

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

THESE DE DOCTORAT
Spécialité : Electrotechnique

Présentée par

HAMEL Meziane

ETUDE ET CARACTERISATION DES FISSURES FINES
EN EVALUATION NON DESTRUCTIVE

Thèse soutenue le 17/12 /2018 devant le jury d'examen composé de :

M. Mohamed	EL HADI LATRECHE	Professeur	Univ de Constantine	Président
M. Hassane	MOHELLEBI	Professeur	Univ de Tizi-Ouzou	Rapporteur
M. Rabah	MOKDAD	Professeur	Univ de Tizi-Ouzou	Examineur
M. Jinyi	LEE	Professeur	Univ de Chosun, Corée du sud	Examineur
M. Mustapha	ZAOUIA	M.C.A	Univ de Tizi-Ouzou	Examineur
M. Mohamed Sour	MIMOUNE	Professeur	Univ de Biskra	Examineur

Remerciements

Le travail présenté dans ce manuscrit est effectué au département d'électrotechnique de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou.

Je tiens à remercier M. Mohamed EL HADI LATRECHE, Professeur à l'université de Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je remercie particulièrement M. Hassane MOHELLEBI, Professeur à l'université de Tizi-Ouzou, pour m'avoir proposé ce sujet intéressant et encadré dans ces travaux. Je le remercie aussi pour ses qualités humaines, son encadrement dynamique et sa disponibilité sans faille tout en long de cette thèse. Par ses conseils répétés, il m'a constamment guidé et formé et j'ai beaucoup appris en travaillant avec lui. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

J'exprime également mes sincères remerciements à Messieurs : Mohamed Souri MIMOUNE, Professeur à l'université de Biskra ; Mustapha ZAOUIA, Maître de Conférences à l'université de Tizi-Ouzou et Rabah MOKDAD, Professeur à l'université de Tizi-Ouzou qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être examinateurs de ma thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail de recherche.

J'exprime également mes sincères remerciements à M. Jinyi LEE, Directeur du laboratoire « Research Center for Real Time NDT » à l'université de Chosun en Corée du Sud, de m'avoir accueilli en stage dans son laboratoire et pour les différentes discussions scientifiques que nous avons eues et à travers lesquelles j'ai pu profiter de ses larges connaissances. Je le remercie également pour avoir accepté d'examiner ma thèse.

Mes remerciements s'adressent également à tous mes amis et collègues pour leurs soutiens et encouragements : Samy Hassani OULD OUALI, Farid HOCINI, Mehammed DAOUI, Ahmed NAIT OUSLIMANE, Ali BOUHEDDA, Mourad AMROUN, Zhor OUDNI, Ferroudja BOUALI, Ghania YOUSFI, Amirouche HAROUZ, Samy DJENDER... et la liste est longue.

Un grand merci à toute ma famille : À mes parents Tassadit et Ahmed, à mes sœurs Nadia et Hafida et à mes frères Khaled et Mahfoud.

Merci mon cousin Aomar pour toute ton aide, merci d'avoir cru en moi.

Merci Inès pour ton soutien inconditionnel durant toutes ces années.

Table des matières

Liste des figures	iv
Liste des Tableaux.....	vi
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le CND	4
I.1. Introduction	5
I.2. Historique	6
I.3. Principe de détection d'un défaut	7
I.4. Les techniques du CND.....	8
I.4.1. Examen visuel	8
I.4.2. Ressuage	8
I.4.3. Magnétoscopie.....	9
I.4.4. Radiographie	10
I.4.5. Thermographie	11
I.4.6. Ultrasons.....	11
I.4.7. CND par courants de Foucault	12
I.5. Conclusion.....	23
Chapitre II: Modélisation des configurations CND par courants de Foucault	24
II.1. Introduction	25
II.2. Mise en équation	25
II.2.1. Equations de base	25
II.2.2. Conditions aux limites	28
II.3. Formulation magnétodynamique.....	28
II.3.1. Introduction des potentiels	28
II.3.2. Formulation en champ électrique \mathbf{E}	29
II.3.3. Formulation en champ magnétique \mathbf{H}	29
II.3.4. Formulation $\mathbf{A} - \mathbf{V}$	30
II.3.5. Formulation $\mathbf{T} - \Omega$	31
II.4. Méthodes analytiques	32
II.5. Méthodes numériques.....	33

II.5.1. La méthode des différences finies	33
II.5.2. La méthode des éléments de frontières	33
II.5.3. La méthode des intégrales de volumes.....	33
II.5.4. La méthode des volumes finis	34
II.5.5. La méthode des éléments finis	34
II.6. Approximation par la MEF	34
II.7. Formulation éléments finis du modèle $T-\Omega$	36
II.8. Techniques de calcul d'impédance.....	37
II.8.1. Hypothèses	37
II.8.2. Impédance à travers la théorie des circuits.....	38
II.8.3. Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique	39
II.8.4. Impédance à travers les énergies électromagnétiques.....	41
II.9. Validations.....	42
II.9.1. Modèle surfacique des défauts fins	42
II.9.2. Benchmark JSAEM ECT-SG	42
II.9.3. Nouveau benchmark pour les rivets dans les structures d'avions	45
II.10. Conclusion	49
Chapitre III: Capteurs et instrumentation	50
III.1. Introduction.....	51
III.2. Schémas synoptique du dispositif de mesure.....	51
III.3. Les capteurs à courants de Foucault	51
III.3.1. Les fluxgates	52
III.3.2. Les capteurs à effet Hall.....	53
III.3.3. Les magnétorésistances.....	54
III.3.4. Les capteurs inductifs.....	54
III.3.5. Types de capteurs inductifs.....	57
III.4. LCR mètre 8101-G (Gw INSTEK).....	61
III.5. NORTEC 500.....	64
III.6. LabVIEW	65
III.7. Instruments virtuels.....	66
III.8. Conclusion	68
Chapitre IV: Dispositifs à courant de Foucault pour la caractérisation des défauts	
 dans les matériaux conducteurs	69
IV.1. Introduction.....	70

IV.2. Système d'acquisition en temps réel basé sur LabVIEW pour la détection de fissures dans des matériaux conducteurs	70
IV.2.1. Système expérimental	71
IV.2.2. Résultats	72
IV.3. Système expérimental d'imagerie par courants de Foucault	75
IV.3.1. Système expérimental	76
IV.3.2. Résultats	78
IV.4. Conclusion	80
Conclusion générale et perspectives	81
Bibliographie.....	83

Liste des figures

Figure I. 1 : Processus de détection et traitement des défauts	7
Figure I. 2 : Principe du ressuage	9
Figure I. 3 : Principe de la magnétoscopie	9
Figure I. 4 : Principe de la radiographie	10
Figure I. 5: Principe de la tomographie X	11
Figure I. 6 : Principe des ultrasons	12
Figure I. 7 : Schéma de principe du CND par courant de Foucault.....	13
Figure I. 8 : Répartition des courants de Foucault dans une pièce	14
Figure I.9 : (a) Plan d'impédance non-normalisée ; (b) Plan d'impédance normalisée	21
Figure I. 10: Dénomination des représentations A-scan, B-scan et C-scan par ultrasons	22
Figure II. 1 : Domaine d'étude	25
Figure II. 2 : Surface Σ séparant deux milieux Ω_1 et Ω_2	27
Figure II. 3 : Frontières Γ_h et Γ_e	28
Figure II. 4 : Bobine à N spires jointives.....	37
Figure II. 5 : Configuration de CND-CF	42
Figure II. 6 : Géométrie du benchmark ECT-SG	43
Figure II. 7: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur (100%d)	44
Figure II. 8 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur (60%d)	44
Figure II. 9 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur (40%d)	44
Figure II. 10 : Géométrie du nouveau Benchmark	45
Figure II. 11 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur.	46
Figure II. 12 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur	47
Figure II. 13 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur	47
Figure II. 14 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur	48
Figure II. 15 : Représentation C-scan à 1kHz (plaque sans fissure).....	48
Figure II. 16 : Représentation C-scan à 1kHz (plaque avec défaut).....	49
Figure III. 1 : Schéma synoptique de la chaine de contrôle	51
Figure III. 2: Principe de fonctionnement d'un fluxgate.	53
Figure III. 3 : Principe de fonctionnement des capteurs à effet Hall.	54
Figure III. 4 : Capteurs inductifs constitués d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau à air.....	55
Figure III. 5 : Photographies de bobinages. A gauche, réalisé en fil de cuivre et à droite obtenu par un procédé photolithographique.....	56
Figure III. 6 : Sonde à courants de Foucault composée de 32 éléments de type micro-bobines gravées sur un film de Kapton.....	57
Figure III. 7 : Bobine encerclante	57
Figure III. 8 : Palpeur	58
Figure III. 9 : Sonde interne	58
Figure III. 10 : Sonde à double fonction.....	59
Figure III. 11 : Sonde à fonctions séparées.....	59
Figure III. 12 : Mesure absolue compensée	60
Figure III. 13 : Mesure différentielle.....	61
Figure III. 14 : LCR mètre 8101-G (Gw INSTRON)	62
Figure III. 15: Mode graphique du LCR-8101G	62

Figure III. 16 : Système expérimental	63
Figure III. 17 : Ensemble capteur-cible	63
Figure III. 18 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur.....	63
Figure III. 19 : NORTEC 500	64
Figure III. 20 : Plan d'impédance pour différentes fissures.....	65
Figure III. 21 : Fenêtre de démarrage du logiciel LabView.....	66
Figure III. 22 : Composantes d'un VI	66
Figure III. 23 : Face avant (front panel) d'un VI.....	67
Figure III. 24 : Block diagramme	68
Figure IV. 1 : Configuration 3D du système.....	70
Figure IV. 2 : Photographie du système expérimental	71
Figure IV. 3 : Schémas bloc du système développé	72
Figure IV. 4 : Programme d'acquisition et de calcul d'impédance	72
Figure IV. 5 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=50$ kHz.....	73
Figure IV. 6 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=100$ kHz.....	73
Figure IV. 7 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=150$ kHz.....	74
Figure IV. 8 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=100$ Hz.....	74
Figure IV. 9 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=50$ Hz	75
Figure IV. 10 : Applications industrielles de l'Inconel-600.....	76
Figure IV. 11 : Appareil de détection de défauts Nortec 500	77
Figure IV. 12 : (a) Scanneur 3D (b) Sonde avec la cible à inspecter	77
Figure IV. 13 : Caractéristiques géométriques de la plaque d'Inconel-600.....	78
Figure IV. 14 : Image obtenue pour des défauts débouchants à 200 kHz et à un lift-off de 1mm	79
Figure IV. 15 : Image obtenue pour des défauts débouchants à 300 kHz et à un lift-off de 1mm	79
Figure IV. 16 : Image obtenue pour des défauts débouchants à 200 kHz et à un lift-off de 0.5mm	79
Figure IV. 17 : Image obtenue pour des défauts enfouis à 200 kHz et à un lift-off de 1mm.....	80

Liste des Tableaux

Tableau II. 1 : Les paramètres du Benchmark ECT-SG	43
Tableau II. 2 : Les paramètres du nouveau Benchmark	45
Tableau IV. 1 : Les paramètres de la bobine et de la plaque.....	71

Introduction générale

Depuis les démineurs durant et après les guerres, jusqu'à l'identification des caractéristiques géométriques et physiques d'une pièce et son inspection (pendant sa mise en œuvre et au cours de son utilisation), les moyens de mesure et de contrôle suivent toutes les découvertes des lois physiques et les technologies apparentées. Les anciennes méthodes de mesure et de détection des défauts sont basées sur un prélèvement statistique ou la mise d'un échantillon sous des essais destructifs. Les techniques modernes permettent l'extraction des informations dans une structure sans porter atteinte à son intégrité. On les appelle Contrôle Non Destructif « CND ».

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité . . .), 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 . . .

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Par exemple, le contrôle de pièces de fonderie (industrie automobile, industrie pétrolière) peut se faire par magnétoscopie. Les tubes (nucléaire, industrie pétrolière . . .) peuvent être testés par courants de Foucault (CF), soit en cours de fabrication, soit lors des phases de maintenance.

Le contrôle par CF est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre (il est très 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 créer une "bonne" répartition des CF 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 CF n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures moyennant des capteurs.

Les capteurs plus couramment utilisés en contrôle non destructif par CF sont les bobines « filaires ». Leur conception est la plus simple à réaliser et la moins coûteuse, caractéristiques qui les rendent très intéressantes pour des applications industrielles. Ils sont constitués d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau qui peut être composé d'air ou de ferrite. Le fonctionnement de ces capteurs est basé sur le phénomène d'induction électromagnétique : une force électromotrice 'E' est induite dans un circuit fermé soumis à un flux magnétique et la grandeur électromagnétique essentiellement exploitée pour la détection de défauts est l'impédance mesurée aux bornes de la bobine.

Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions capteur-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances. La modélisation électromagnétique permet de simuler cette interaction capteur-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux, . . .) tout en limitant le nombre de prototype à réaliser. Dans le domaine du CND par CF, la modélisation est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, une actrice importante dans la conception de sondes.

La modélisation d'une configuration réelle de CND par CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et fait appel à des méthodes numériques. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de prendre en compte des géométries complexes de capteurs et de pièces, est l'une des plus utilisée. Elle s'est en effet imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques. Dans ce travail on a adopté la formulation $\vec{T}-\Omega$, une formulation simple et économique de calcul des courants de Foucault 3D qui permet de réduire le nombre de degrés de liberté, de trois à un, dans les régions non conductrices.

Les défauts fins sont fréquemment rencontrés en CND par CF. Ces fissures sont extrêmement dangereuses car elles constituent souvent le point de départ de défauts plus grands comme les fissures de fatigue. Dans ce contexte, les dispositifs de détection et de caractérisation de défauts jouent un rôle très important dans la prévention d'accidents qui peuvent s'avérer fatales à la pièce contrôlée.

LabVIEW est un environnement de développement graphique appelé langage G qui permet de créer des applications modulaires (notion de VI 'Virtual Instrument') extensibles, pour la conception d'applications de mesure, de contrôle et de test à temps réel. L'objectif de ce travail

de thèse est de concevoir un système de détection de défauts par CF basé sur LabVIEW. Afin de réaliser la détection de fissures, le capteur balaye la cible et les signaux sont collectés par une carte d'acquisition de données de marque National Instruments NI. Le logiciel du système est développé en utilisant LabVIEW afin de réaliser l'acquisition en temps réel de l'impédance du capteur. Pour vérifier les résultats expérimentaux, des simulations sont effectuées en utilisant la méthode des éléments finis 3D. Le système conçu peut être utilisé à la fois pour des fins pédagogiques et des applications industrielles.

Ce mémoire est ainsi organisé comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur le CND. Les principales méthodes de CND sont rappelées. Le contrôle basé sur les courants de Foucault est particulièrement détaillé.

Le second chapitre est consacré à la position d'un problème de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques dans le domaine d'étude. Une structure mathématique regroupant l'ensemble des équations de Maxwell est établie. Les formulations en potentiels permettant de résoudre les problèmes de CF sont introduites. Enfin, la résolution des problèmes de CND CF par la MEF du modèle $\vec{T} - \Omega$ est développée et des résultats de tests de validation sur deux Benchmark ont été détaillés.

Le troisième chapitre est une présentation de l'instrumentation utilisée pour l'acquisition des signaux courants de Foucault, ainsi que le logiciel LabVIEW.

Le quatrième et dernier chapitre vient compléter le chapitre précédent, il est dédié à la description des systèmes de détection de défauts développés. Les résultats obtenus par expérimentation sont confrontés aux résultats numériques.

Cette thèse se termine par une conclusion générale où l'accent sera mis sur les perspectives du travail achevé notamment le développement de systèmes embarqués utilisant des plateformes telles que Raspberry ou Arduino.

Chapitre I :

Généralités sur le CND

I.1. Introduction	5
I.2. Historique	6
I.3. Principe de détection d'un défaut	7
I.4. Les techniques du CND	8
I.4.1. Examen visuel	8
I.4.2. Ressuage	8
I.4.3. Magnétoscopie.....	9
I.4.4. Radiographie	10
I.4.5. Thermographie	11
I.4.6. Ultrasons.....	11
I.4.7. CND par courants de Foucault	12
I.5. Conclusion.....	23

I.1. Introduction

Le contrôle non destructif, comme son nom l'indique, a pour objectif de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Celui-ci correspond à la détection et la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques [Gaktepe, 2001]. Aujourd'hui, on assiste à une demande très importante et généralisée, émanant de tous les secteurs industriels comme l'industrie automobile, aéronautique, pétrolière, navale et nucléaire.

La qualité est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante. Dans ce cadre, le CND constitue une étape du processus industriel qui est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces. Elle joue un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance [Dumont-Fillon, 1996].

Le CND constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent des industriels fabricants et des organismes d'étude et de recherche. Vu l'étendu du champ d'application du CND, de nombreuses techniques ont été développées et étudiées pour l'inspection et la détection des défauts pour différentes applications industrielles [Durouchoux, 1985] [Warren, 1967] [Davis, 1989].

Cette procédure de contrôle se produit souvent soit en cours de fabrication ou au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants [Ravat, 2008] :

- La reproductibilité : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- La fiabilité : le contrôle doit remplir son cahier de charges, il doit détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.
- La possibilité d'inspection globale et locale : il s'agit de la manière dont l'inspection est réalisée. Soit la technique permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois, on parle d'une inspection globale, ou juste d'une partie de celle-ci, ce sera alors une inspection locale.
- La sensibilité : il s'agit du rapport entre la variation de la mesure et la grandeur que l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur mesurée sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- La rapidité d'exécution : il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant au niveau des coûts et qu'il puisse s'intégrer dans un cycle de production.

- Le coût : le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- La résolution : la résolution est la plus petite variation du signal pouvant être détectée, par exemple la dimension du plus petit défaut. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

I.2. Historique

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des CND s'est manifestée ensuite vers les années 1960/1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que l'industrie automobile, l'aéronautique civile et le génie des centrales électriques nucléaires. Les dernières décennies enfin, voient l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide dans les contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique [Dumont-Fillon, 1996] [Durouchoux, 1985].

Globalement, en tant qu'outil majeur de la politique de qualité d'une entreprise, les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue, il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le localiser et le caractériser. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans les composites, des variations de texture ou de rugosité sur une surface ...etc [Morse et al., 1999] [Li et al., 2017]. Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre car les lois de la physique sont ce qu'elles sont et aussi, dans ce domaine, les progrès sont lents. Il n'en va pas de même l'automatisation des CND qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes. L'évolution des CND doit prendre toutefois en compte l'aspect coût, ce dernier pouvant freiner l'essor de nouvelles techniques très performantes [Dumont-Fillon, 1996].

I.3. Principe de détection d'un défaut

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter une hétérogénéité dans un matériau.

Les phénomènes physiques comme l'atténuation ou diffraction des rayons X, réflexion ou diffraction des ultrasons, perturbation des courants de Foucault ; sont à la base des essais non destructifs où ils peuvent servir à caractériser les matériaux (présence de fissures...). En effet, par CND on sous-entend toujours qu'il ne s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité.

Les techniques CND diffèrent généralement par l'énergie employée : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (magnétoscopie, courants de Foucault) ou thermique (thermographie infrarouge). Cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection de défauts est généralement mis en place (voir figure I.1). Il est constitué de deux étapes principales : la détection et la localisation des défauts (décider que le système est en défaut ou non et déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification (estimer l'ampleur et le types des défauts) [Zhang & Yan, 2017].

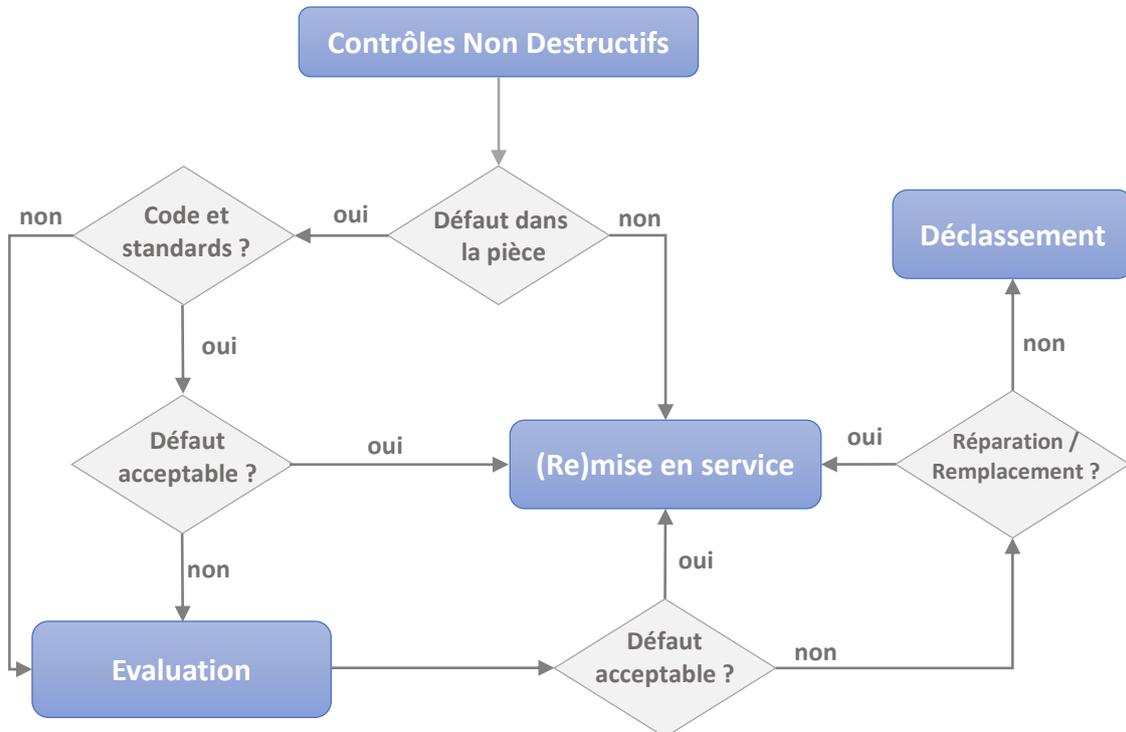


Figure I. 1 : Processus de détection et traitement des défauts

I.4. Les techniques du CND

Du fait que les origines et les types des défauts sont multiples, plusieurs techniques du CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une méthode du CND dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position ou forme de défaut, ...), le type du contrôle à effectuer (contrôle en ligne sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce, ...) et les problèmes économiques. Dans la section suivante, nous allons donner un aperçu global des techniques les plus répondues dans l'industrie [Shull, 2016] [Stifter et al., 2007].

I.4.1. Examen visuel

C'est le contrôle le plus élémentaire et le plus ancien des contrôles non destructifs. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique. Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité [Libby, 1971] [Hung & Ho, 2005].

I.4.2. Ressuage

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes. La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré ou fluorescent dit "pénétrant" est ensuite appliqué sur la surface à contrôler. Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...). L'excès de pénétrant est ensuite éliminé par un lavage adapté. La surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser. On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant. Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous UV.

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchants en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur d'autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le pénétrant.

Les limitations du contrôle par ressuage sont liées au matériau lui-même : trop forte rugosité de surface, impossibilité d'employer les produits classiques qui endommageraient sa surface. Les défauts non débouchants ne peuvent être vus, de même que les fissures renfermant

des corps susceptibles d'interdire l'entrée du pénétrant tels que peintures, oxydes. Le procédé lui-même est relativement lent, coûteux en temps. Il faut enfin prendre en compte, dans le coût du contrôle, la consommation des produits de ressuage dont l'utilisation peut nuire à l'environnement [Berg et al., 2006].

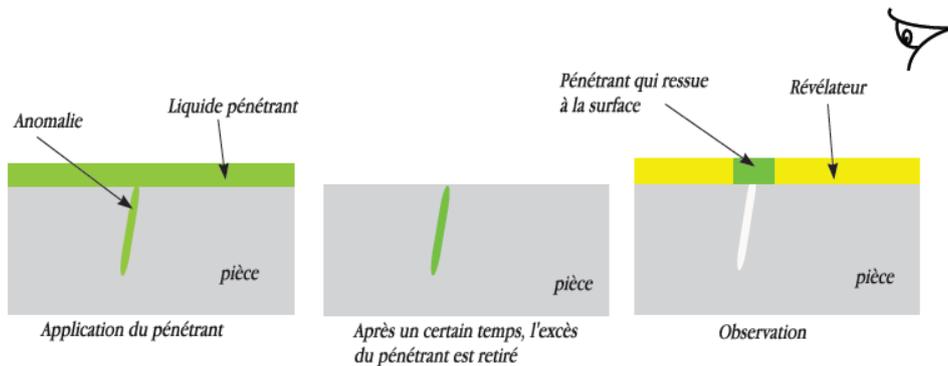


Figure I. 2 : Principe du ressuage

I.4.3. Magnétoscopie

C'est une technique qui révèle les défauts débouchants ou sous-cutanés. Toutefois, elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte ...).

L'examen par magnétoscopie consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Une poudre magnétique est ensuite projetée à la surface et se répartit de façon homogène si la pièce est saine. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques. Lorsqu'un défaut est présent dans la pièce au voisinage de la surface, l'orientation du flux de l'induction magnétique est modifiée localement et son intensité augmente en surface. Il apparaît alors une concentration de particules magnétiques qui révèle la présence du défaut comme l'illustre la figure (I.3) [Dumont-Fillon, 1996] [Birring,2016].

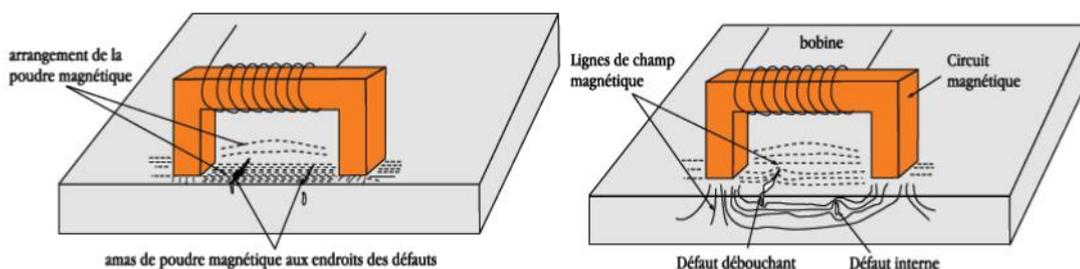


Figure I. 3 : Principe de la magnétoscopie

I.4.4. Radiographie

Le principe de la radiographie est le même que pour le domaine médical. La méthode met à profit l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants [Dumont-Fillon, 1996]. L'examen de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon X, ou γ) et à recueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure (I.4).

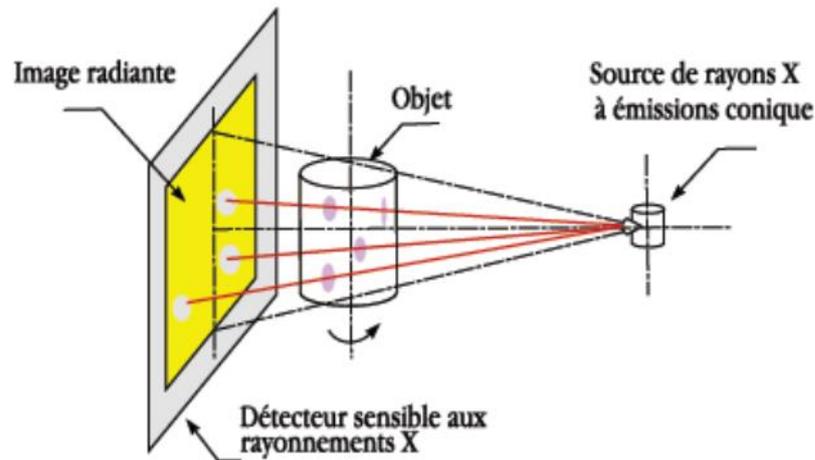


Figure I. 4 : Principe de la radiographie

De par son principe, la radiographie ne permet pas d'avoir d'information sur la localisation du défaut en profondeur dans la pièce examinée. Il faut pour cela réaliser plusieurs clichés sous des angles de tir différents, ce qui n'est pas toujours possible. Un autre moyen est la tomographie industrielle. Elle a le même principe que le scanner médical. Elle consiste à reconstruire une coupe de la pièce par des algorithmes complexes [Kersting et al., 2010] [Gou et al., 2011] [Lindgren & Wirdelius, 2012] à partir d'une succession d'acquisitions suivant des angles différents. La répétition de ce processus selon différentes hauteurs de tir permet d'obtenir une image 3D virtuelle complète de l'objet.

L'essor de cette méthode est essentiellement dû aux progrès de l'informatique et à l'augmentation des capacités de traitement, que ce soit dans le domaine médical ou industriel.

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

Les inconvénients principaux de cette technique sont :

- Coût de mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel ;
- Réglementation souvent très contraignante (transport et stockage des sources radioactives,)

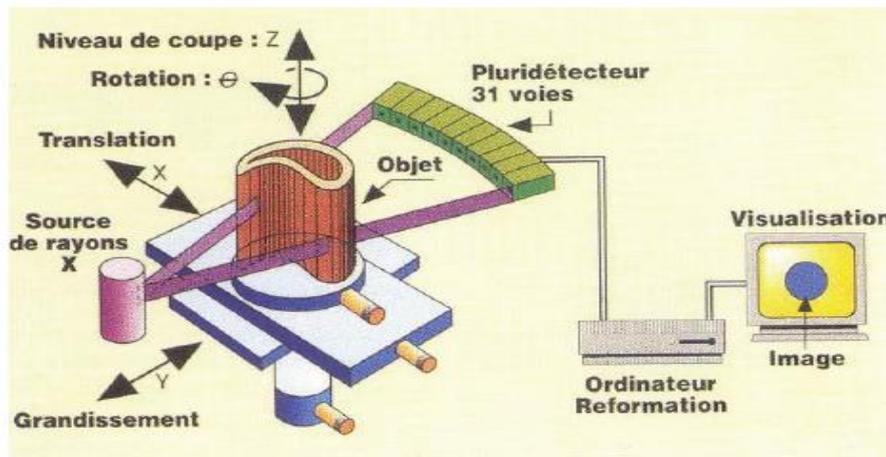


Figure I. 5: principe de la tomographie X

I.4.5. 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 (thermogrammes) 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). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique [Maldague et al., 2001] [Liu et al., 2012].

I.4.6. 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). 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 [Mozurkewich et al., 2008].

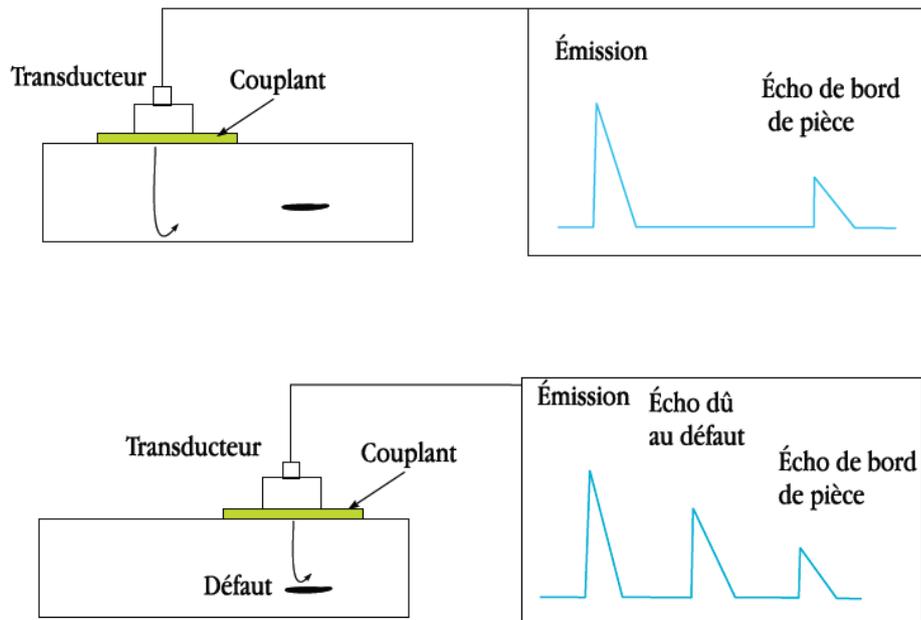


Figure I. 6 : Principe des ultrasons

Le contact entre le transducteur et la cible n'est jamais parfait ; il existe une couche d'air les séparant. La quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air-matériau ne pénètre pas à l'intérieur du matériau. Il y a ainsi nécessité de déposer un couplant (eau, huile par exemple) entre le transducteur et le matériau [Lee et al., 2007].

I.4.7. CND par courants de Foucault

Le CND par courants de Foucault n'est applicable que sur les pièces réalisées, du point de vue électrique, en matériaux conducteurs [Shull, 2016] [Blitz, 1991] [Vuillermoz et al., 1994]. L'élément essentiel est le capteur. Celui-ci est une bobine ou formé d'un ensemble de bobines. Ces dernières sont parcourues par un courant d'excitation variable dans le temps. Le capteur génère un champ magnétique d'excitation variable qui dépend de la géométrie et des caractéristiques électromagnétiques de son entourage. Si un matériau conducteur d'électricité baigne dans ce champ, il sera le siège des courants de Foucault.

Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique de réaction négative. Le champ résultant donnera l'image de la répartition et de la valeur des courants induits. La mesure de ce champ ou des courants induits n'est pas directement accessible à l'expérience. On passe par la mesure d'une grandeur dérivée : l'impédance aux bornes du capteur [Pereira & Clarke, 2015] [Vyroubal, 2004] [Lee & Kim, 2000]. Cette grandeur nous permettra de caractériser le matériau en ce qui concerne sa conductivité, sa perméabilité, sa géométrie et son état de santé.

Suivant ces caractéristiques et les fréquences utilisées, les variations des champs créés par ces courants permettent d'examiner le matériau en surface ou en profondeur.

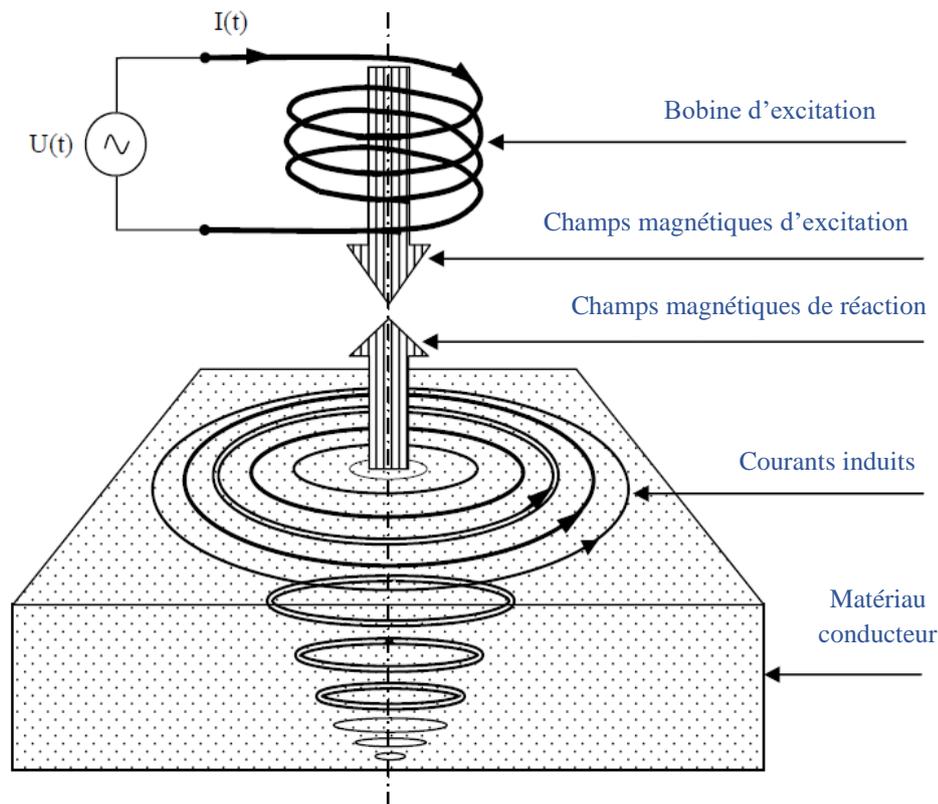


Figure I. 7 : Schéma de principe du CND par courant de Foucault

I.4.7.1. Nature de contrôle non destructif par courant de Foucault

La répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent de la conductivité électrique σ , de la perméabilité magnétique μ , de la fréquence de travail f , de la géométrie du matériau à contrôler, du couplage entre le capteur et le matériau et d'éventuels défauts dont la présence se manifeste à travers une combinaison complexe des paramètres précédents. Le procédé de contrôle par courants de Foucault permet donc d'effectuer des contrôles dimensionnels, des contrôles de l'état de santé et de réaliser des caractérisations métallographiques.

Le contrôle dimensionnel s'applique à des mesures d'épaisseur de revêtement (ex : peinture, dépôt électrolytique) et la détermination des caractéristiques géométriques du matériau (ex : l'épaisseur de petits tubes ou de plaque). Le contrôle de santé recherche la présence de défauts (fissures, inclusions,...). Le contrôle métallographique est destiné à discriminer les matériaux, de dureté, de composition chimique ou de structure métallographique différente.

I.4.7.2. Epaisseur de peau

Dans la configuration la plus simple, l'onde plane électromagnétique générée par un dispositif d'excitation (bobine), se propage orthogonalement à une surface plane d'un matériau. Il a été montré [Libby, 1971] [Le Diraison, 2008] que la résolution des équations de Maxwell conduit alors à exprimer la densité de courants de Foucault induits dans la cible \vec{J} en fonction de la profondeur z comme suit :

$$J(z) = J_0 e^{-z\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \cos(\omega t - z\sqrt{\pi f \mu \sigma}) \quad (I.1)$$

Cette relation montre que l'évolution du module et de la phase de la densité de courants induits sont fonction de la profondeur z et de la fréquence d'excitation f . Donc, plus z est grand, c'est à dire plus on pénètre en profondeur dans la cible, plus le module de la densité de courant est faible [Egorov et al., 2017].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (I.2)$$

Cette profondeur est fonction de la fréquence. Plus la fréquence est importante, plus la densité de CF induits dans la cible est importante et limitée à la surface. Il en résulte que la profondeur à laquelle un capteur CF permet d'inspecter une cible est dépendante de la fréquence d'excitation. Les courants induits ayant une amplitude inférieure à 5% de l'amplitude maximale au-delà de 3δ , il est quasiment impossible de détecter des défauts à cette profondeur.

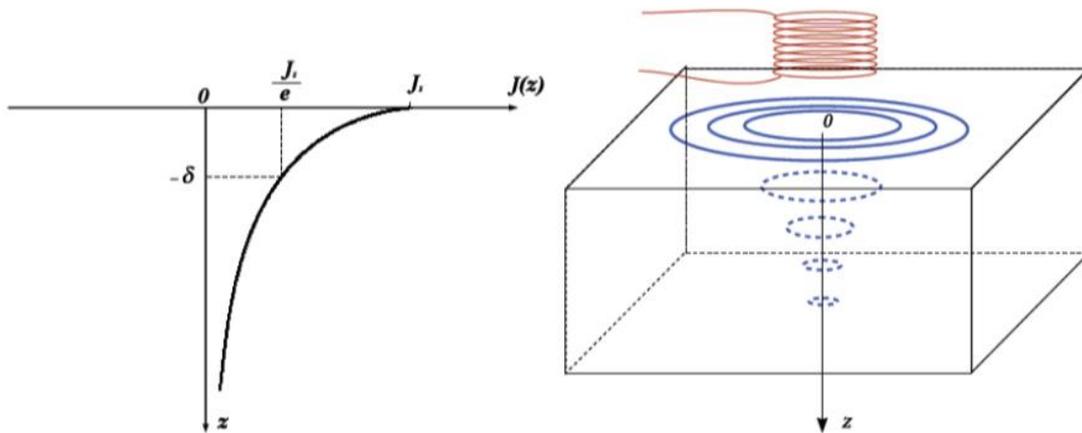


Figure I. 8 : Répartition des courants de Foucault dans une pièce

I.4.7.3. Modes d'excitation

La sensibilité de la méthode dépend de la fréquence du courant d'excitation. Celle-ci conditionne en effet, la profondeur de pénétration des courants induits dans le matériau à inspecter, ce qui destine la technique au contrôle surfacique (pièces minces) et volumique (pièces de grande épaisseur).

L'excitation est réalisée par un générateur délivrant un signal variable dans le temps ou périodique dans une gamme de fréquences déterminées.

Les mesures peuvent être faussées par une mauvaise définition de la forme de l'onde fournie ou par une variation de la fréquence. Par conséquent, le générateur doit impérativement délivrer un signal asservi en fréquence de manière à assurer une grande stabilité d'excitation et à réduire le bruit de fond.

- **Excitation mono fréquence**

Le courant d'excitation est une onde sinusoïdale de fréquence fixe qui peut être fournie par un générateur ayant une ou quelques fréquences fixes commutables. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. La fréquence intervient sur la profondeur de pénétration et sur la séparation en phase des réponses de divers défauts.

Il n'y a pas cependant des critères simples et uniques de choix de la fréquence. Pratiquement, le choix de la fréquence de sondage doit se faire après des essais sur échantillons de façon à mettre en évidence les paramètres perturbateurs. Ce mode d'excitation est limité en utilisation car il ne délivre pas une caractérisation fine des contrôles et il n'élimine pas l'influence de l'ensemble des paramètres perturbateurs.

- **Excitation multi fréquences**

Le contrôle multi fréquences a été développé en particulier pour le contrôle des tubes des générateurs de vapeur [La, 1996] [Le Bihan, 2000] [La et al., 1997] et des rails ferroviaires [Aknin et al., 2001] [Shokralla et al., 2016]. Ces environnements présentent en particulier des parties droites, des coudes et des éléments de fixation. Le contrôle dans certaines zones est rendu très délicat par l'apparition de signaux parasites de fortes amplitudes pouvant se superposer au signal du défaut. La méthode pratiquée consiste à neutraliser les signaux parasites en procédant à leur soustraction pour deux fréquences différentes injectées dans le capteur.

L'origine de la technique multi fréquence est encore liée au développement des programmes électronucléaires. Il semble que le problème se soit posé pour la première fois lors du contrôle des tubes formant l'échangeur de chaleur dans les générateurs de vapeur [La, 1996]. Ces tubes en Inconel sont assemblés en faisceau [Egorov et al., 2015] [Betta et al., 2015]. Chaque tube est cintré en épingle à cheveux. Il repose sur une plaque tubulaire et traverse des plaques servant d'entretoises. Lors du passage de la sonde de contrôle à

l'intérieur du tube, un signal dit « signal plaque » apparaît au niveau de celles-ci. Un tel signal, relativement grand, est susceptible de masquer un éventuel défaut réel.

De même, si lors d'un contrôle, deux défauts se trouvent sur une même zone de la pièce à examiner, le signal est difficilement interprétable car le signal électrique contient des informations relatives à chacun d'eux. L'opérateur doit alors rechercher les conditions optimales de réglage du matériel. Le développement de matériels multi fréquences répond au besoin impératif de séparer puis d'éliminer ce signal perturbateur.

Dans ce mode particulier d'utilisation des courants de Foucault, les générateurs excitent la bobine simultanément sur plusieurs fréquences. Le signal reçu est ensuite filtré par des passes bandes à forte pente. En ayant plus d'information, il est possible d'éloigner les signaux perturbateurs du signal recherché. Pour beaucoup d'informations, il faut faire des mesures à plusieurs fréquences d'excitation.

En effet, l'utilisation de n fréquences engendre $2n$ informations et peut permettre l'élimination de $2n-1$ perturbations [Bensetti, 2004].

La technique de mesure peut être réalisée en fréquences séquentielles ou en fréquences simultanées. La mesure en séquence excite le capteur par mono fréquence successive. Cette technique met un temps d'exécution et d'acquisition des données important. La mesure en fréquences simultanées consiste à injecter au capteur simultanément plusieurs signaux de fréquences différentes. En pratique, on utilise un système d'excitation en double fréquence (10kHz et 100kHz) pour le contrôle des rails ferroviaires [Shokralla et al., 2016] et à trois fréquences simultanées (100kHz, 240kHz, 500kHz) pour les tubes de vapeur [La, 1996].

- **Excitation pulsée**

Elle consiste à émettre un champ magnétique à large bande de fréquence. Le courant d'excitation n'est pas une onde sinusoïdale mais variable dans le temps. C'est une excitation impulsionnelle de formes rectangulaires, triangulaires ou autres. Toutefois, on préfère utiliser une forme semi sinusoïdale en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

La décomposition en série de Fourier de l'onde engendre des signaux de fréquences multiples. Cette méthode représente donc une alternative à l'excitation multi fréquence. On utilise l'évolution temporelle des signaux pour extraire des informations. Une telle technique est plus riche en informations qu'en mono fréquence ou en multi fréquences.

Cette technique a été utilisée pour évaluer l'épaisseur de revêtements [Shin et al., 2009] et les dépôts sur les pièces métalliques [Bensetti, 2004], pour la détection des défauts profonds et dans le domaine de l'inversion du phénomène [Theodoulidis et al., 2012].

I.4.7.4. Gammes de fréquences

- **Gamme basse fréquence [1Hz :1kHz]**

Les courants de Foucault à basse fréquence [Harfeld et al., 1996] [Yoshimura et al., 2018] permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine. Cette technique convient pour le contrôle de produits de forte épaisseur ou le contrôle de qualité (tri de matériaux selon leur nuance à cœur) et les défauts volumiques et profonds [Bowler et al., 1991] [Xu & Shida, 2008]. Elle est utilisée préférentiellement pour les produits ferromagnétiques en raison des problèmes liés à la profondeur de pénétration [Lê & Placko, 1995] [Moulder et al., 1998]. C'est une technique très répandue dans l'industrie. Elle est relativement simple à mettre en œuvre, très peu coûteuses, très sensibles aux manque de matières et une résolution spatiale réduite. Néanmoins, si la fréquence est trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la mesure ne sera pas précise à cause du bruit [Bensetti, 2004].

- **Gamme moyenne fréquence [1kHz :1MHz]**

C'est le domaine le plus employé en mesure de faibles épaisseurs [Le Bihan et al., 2007] [Yin & Peyton, 2007], telles que les plaques ou barres co-filées. Ce domaine fréquentiel couvre également le contrôle de santé (détection hétérogénéité du type fissures débouchantes, inclusions, occlusion, ...) [La, 1996] [Le Bihan, 2000] ainsi que le contrôle de caractéristiques métallurgiques (traitements superficiels, conductivité, ...).

- **Gamme haute fréquence : >1MHz**

Les fréquences supérieures à 1MHz sont très peu utilisées. Elles peuvent engendrer des capacités parasites entre les spires du capteur et entre le capteur et le matériau. Son utilisation se limite essentiellement à des mesures d'entrefer, la détection de micro fissure de surface et la modélisation de micro-bobines utilisées dans le domaine de la télécommunication et de la résonance magnétique nucléaire [Aldrin & Knopp, 2006].

I.4.7.5. Matériau à inspecter

Au cours des années, la technologie des capteurs et le traitement des données ont continuellement progressé et aujourd'hui la technique par courants de Foucault est reconnue comme étant rapide, simple et précise. C'est la raison pour laquelle elle est utilisée largement dans les industries de production et d'utilisation de produits métalliques pour la détection en surface ou en volume et la caractérisation physique des matériaux comme l'aluminium, l'acier

inoxydable, le cuivre, le titane, le laiton, l'Inconel et même l'acier au carbone, le matériau à inspecter étant le siège des courants de Foucault [Shull, 2016].

I.4.7.6. Caractéristiques électromagnétiques du matériau à contrôler

Les faibles variations de la composition chimique d'un matériau (exemple de l'acier) influent sur l'amplitude et la phase du signal. Ces variations de composition agissent surtout sur la dureté qui, à son tour, par l'intermédiaire de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique, modifie l'amplitude du signal fondamental et de ses harmoniques.

L'induction magnétique est directement proportionnelle à la perméabilité magnétique d'un matériau. L'inductance résultante d'une bobine avec un noyau ferromagnétique augmente donc d'un facteur μ_r ; ce qui rend l'épaisseur de peau très faible.

La conductivité est directement liée à la densité de courant inducteur et induite. Dans ce contexte, on cite un exemple élaboré en où les auteurs étudient la sensibilité à la variation de conductivité d'un capteur en fonction de la fréquence. Cette sensibilité est définie par la dérivée de la variation d'impédance par rapport à la conductivité.

Si la conductivité et la perméabilité sont considérées comme étant des éléments perturbateurs dans la détection des défauts et dans la caractérisation géométrique, il n'en est pas de même quand on s'intéresse à leurs évaluations. C'est la caractérisation électromagnétique des matériaux.

Dans cette application, plusieurs travaux ont été réalisés [Cheng & Komura, 2008] [Bensetti et al., 2005]. Entre autres, l'identification des différents matériaux dans une pièce en multicouches [Luquire et al., 1970] [Cheng, 1971].

I.4.7.7. Caractéristiques géométriques du matériau à contrôler

Pour réaliser le contrôle complet d'une pièce, il faut déplacer, à une vitesse qui peut atteindre quelques mètres par seconde, la bobine à la surface de celle-ci et déceler les variations d'impédance qui traduisent la présence d'une anomalie à l'intérieur de la pièce. Ce déplacement provoque des variations de position du capteur par rapport à la surface de la pièce (lift-off) et engendre ainsi des fluctuations d'impédance (Figure I.9). Ces fluctuations peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront des indications sur les caractéristiques des défauts. Il est donc essentiel d'en connaître l'influence et de maîtriser au mieux ce paramètre expérimental.

Une des utilisations de la technique du contrôle par courants de Foucault est l'évaluation dimensionnelle des couches constitutives de la pièce [Le Bihan et al., 2007] [Yin & Peyton, 2007]. Cela revient à mesurer l'épaisseur des différentes couches isolante et conductrice. La détection dimensionnelle des couches isolantes, du point de vue électromagnétique, est

équivalente à la mesure de l'entrefer entre le capteur et la partie conductrice. C'est le lift-off. Dans ce cas, ce paramètre n'est plus perturbateur.

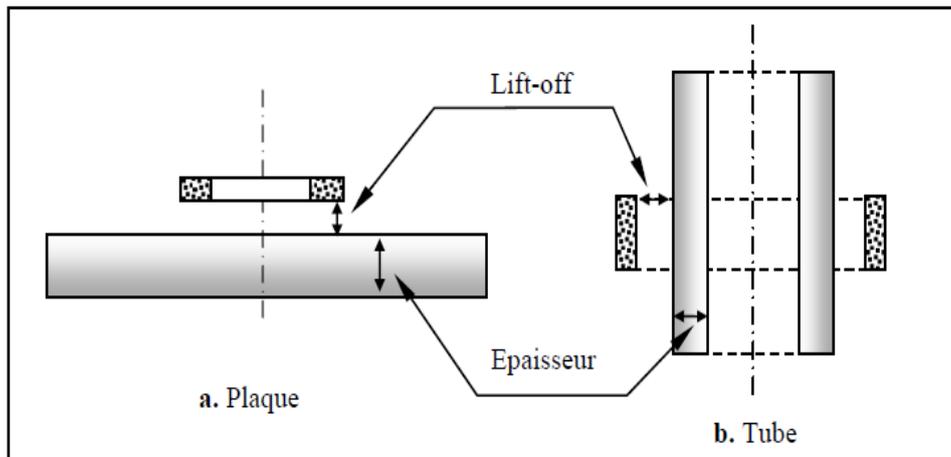


Figure I.9 : Définition des paramètres géométriques

I.4.7.8. Défauts

Les défauts (trous, fissures, rayures,) tendent à modifier le parcours des courants de Foucault dans le matériau. On peut donc considérer qu'un défaut non-conducteur (inclusion, trou...) provoque la même variation d'impédance qu'une variation de conductivité. De même, un défaut en surface peut être assimilé à une variation du coefficient de remplissage. La forme et la position des défauts relativement au matériau imposent des modèles géométriques bidimensionnel ou tridimensionnel.

Dans le cas d'étude bidimensionnelle, les défauts peuvent avoir une vue axisymétrique ou longitudinale. Cette configuration a pour principal défaut de ne permettre une évaluation d'impédance qu'en un seul point. Le modèle n'est valable que si l'axe du défaut coïncide avec celui du capteur. Si ce type de défaut se présente dans une pièce cylindrique, il ne peut être traité par un modèle axisymétrique sauf si on associe, au modèle mathématique, les transformations conformes [Burrascano et al., 2001], sinon il s'agit d'une vue tridimensionnelle [Cheng & Komura, 2008].

Plusieurs autres types de défauts sont traités. On trouve : des fissures de longueur infinie dont la vue est bidimensionnelle, des fissures de longueur finie [Luquire et al., 1970], des défauts ponctuels de formes quelconques sur une surface cylindrique [Cheng & Komura, 2008] [Cheng, 1971, des défauts sous forme de couches [Thidé, 2004], une fissure parallélépipédique ou elliptique, etc.

I.4.7.9. Eléments perturbateurs

Dans tous les traitements de problèmes à plusieurs variables, quand on s'intéresse à une grandeur, les autres paramètres doivent être maîtrisés. Dans les descriptions précédentes nous avons précisé, pour chaque nature de détection, les perturbations qui peuvent surgir lors de la pratique du contrôle. Pour la maîtrise des paramètres, on conçoit généralement des capteurs spécifiques (capteur différentiel) et des excitations en multi fréquences (double et triple fréquence) [Shokralla et al., 2016].

Dans le domaine de contrôle et d'évaluation non destructifs par courant de Foucault, la température est le seul élément purement perturbateur. La perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau varient avec la température. Toute variation thermique devient très gênante pour les appareils qui assurent une mesure absolue tels que ceux destinés à des mesures d'épaisseur ou de détection d'anomalies.

I.4.7.10. Impédance normalisée

L'inspection des matériaux consiste à mesurer les variations d'impédance de la bobine. En général, on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine en présence de la pièce à inspecter et l'impédance Z_0 de la bobine dans l'air. En absence du matériau à contrôler, l'impédance complexe Z_0 du capteur est [Shull, 2016]:

$$\bar{Z}_0 = R_0 + jX_0 \quad (I.3)$$

R_0 et X_0 sont respectivement la résistance et la réactance à vide de la bobine du capteur.

En présence du matériau à contrôler, le champ réactif provoque une modification de l'impédance du capteur. L'impédance complexe en charge \bar{Z} est :

$$\bar{Z} = R + jX \quad (I.4)$$

R est la composante résistive qui englobe les pertes internes du bobinage d'excitation et les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans le matériau. X est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur.

Pour éliminer les composantes de l'impédance à vide R_0 et X_0 (pertes à vide, l'inductance propre du capteur) et garder uniquement la géométrie du capteur, sa position relative au matériau (lift-off) et les caractéristiques géométriques et physiques du matériau, on procède à la normalisation de l'impédance complexe du capteur en présence du matériau. Cette normalisation est donnée par :

$$\bar{Z}_n = \frac{\bar{Z} - R_0}{X_0} = R_n + jX_n \quad (I.5)$$

$$R_n = \frac{R - R_0}{X_0} \quad (I.6)$$

$$X_n = \frac{X}{X_0} \quad (I.7)$$

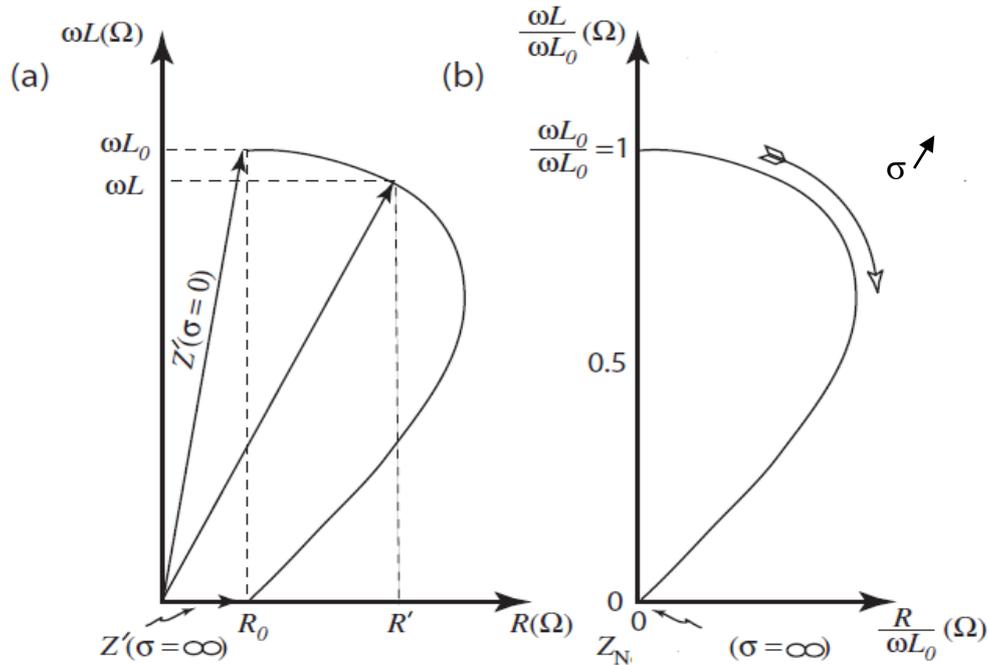


Figure I.9 : (a) Plan d'impédance non-normalisée ; (b) Plan d'impédance normalisée

I.4.7.11. L'imagerie pour l'évaluation non destructive

Différents types de représentations des données sont couramment employés en fonction du mode d'acquisition. On peut en citer trois, venant du domaine des ultrasons: A-scan, B-scan et C-scan (figure I.11).

La dénomination A-scan représente l'amplitude du signal d'écho ultrasonore reçu par un récepteur fixe, en fonction du temps. La dénomination B-scan consiste à mesurer le signal pour différentes positions du récepteur déplacé le long d'une ligne. Le maximum du signal pour chaque position est représenté en fonction de l'abscisse correspondante.

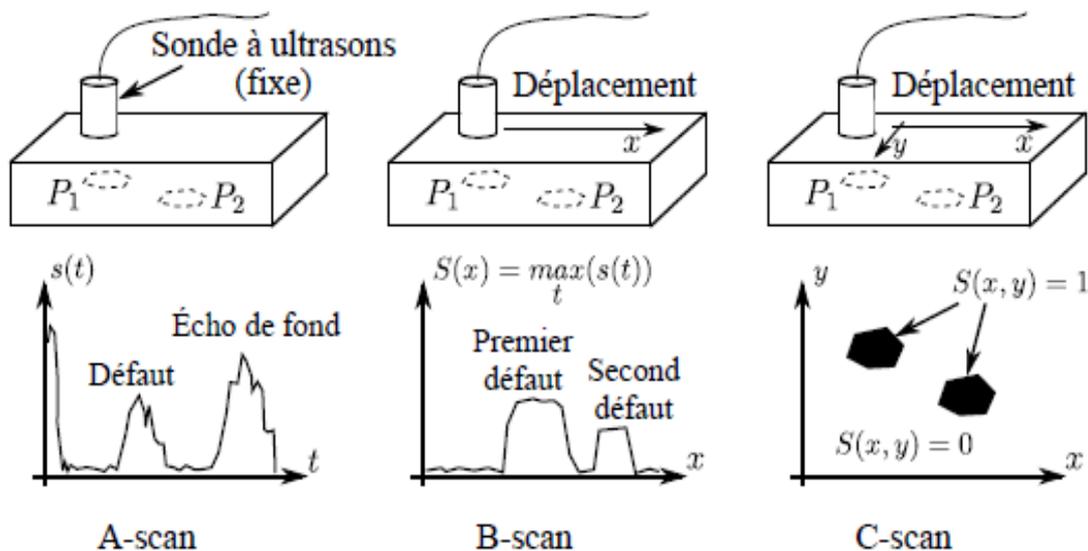


Figure I. 10: Dénomination des représentations A-scan, B-scan et C-scan par ultrasons

On peut ainsi obtenir, selon la méthode utilisée, une représentation en coupe de la pièce inspectée. Enfin, la représentation C-scan représente elle aussi le maximum du signal mesuré pour une position donnée mais cette fois le capteur est déplacé sur un espace en deux dimensions (\vec{x}, \vec{y}) correspondant à la surface de la pièce. Cette dernière représentation offre une image à part entière de la pièce.

La représentation des données issues des capteurs sous forme 2D (images) est séduisante car elle en facilite l'interprétation. Les méthodes de type ressuage et magnétoscopie fournissent des représentations de type C-scan et sont très répandues dans l'industrie quoi qu'elles n'aient pas connu d'évolution ces dernières années et semblent avoir tendance à être délaissées au profit de méthodes permettant une meilleure caractérisation de défauts comme la radiographie.

Celle-ci tire son épingle du jeu car bien que fournissant des images de type C-scan en 2D, il est possible par un jeu de rotation autour de l'objet inspecté d'appliquer des techniques de tomographie similaires à celles utilisées dans le corps médical et ainsi de construire des images 3D représentant la structure interne d'une pièce.

A l'instar de la radiographie, les techniques de courants de Foucault ont permis de développer des sondes d'imagerie multiéléments. En CF, l'obtention de représentations C-scan est aussi possible. Elle se fait couramment par le balayage selon le plan (\vec{x}, \vec{y}) à l'aide d'un capteur unique, ou encore par utilisation d'un ensemble multicapteur, ce qui permet de réduire les déplacements du système expérimental et donc les temps d'acquisition.

Les contrôles gagnent ainsi en traçabilité, rapidité et simplicité [Thidé, 2004] [Dolabdjian et al., 2007] La reconstruction de défauts 3D en imagerie CF est plus difficile à mettre en œuvre à cause de problèmes de diffusion de l'onde électromagnétique ou de problèmes d'accès à plus d'une face de la pièce.

I.4.7.12. Avantages du CND par courants de Foucault

Le CND par CF [Choua, 2009] :

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplants. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage, largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs.
- Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possibles.

I.4.7.13. Limites du CND par courants de Foucault

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe.

I.5. Conclusion

Une recherche bibliographique approfondie sur le contrôle non destructif par courants de Foucault a été réalisée. Partant de la source d'excitation, à travers le capteur et le matériau à examiner, nous arrivons à la mesure de l'impédance complexe aux bornes du capteur. Cette grandeur, résultante de la topologie des courants de Foucault, nous informera sur l'état dimensionnel, physique et de santé du matériau à contrôler. De ce fait, nous ne nous intéressons qu'au calcul des courants de Foucault et de la variation d'impédance qui en résulte. Pour ce faire, on aborde d'abord la présentation du modèle général de Maxwell qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II:

Modélisation des configurations CND par courants de Foucault

II.1. Introduction	25
II.2. Mise en équation.....	25
II.2.1. Equations de base.....	25
II.2.2. Conditions aux limites	28
II.3. Formulation magnétodynamique.....	28
II.3.1. Introduction des potentiels.....	28
II.3.2. Formulation en champ électrique \vec{E}	29
II.3.3. Formulation en champ magnétique \vec{H}	29
II.3.4. Formulation $\vec{A} - V$	30
II.3.5. Formulation $\vec{T} - \Omega$	31
II.4. Méthodes analytiques	32
II.5. Méthodes numériques.....	33
II.5.1. La méthode des différences finies.....	33
II.5.2. La méthode des éléments de frontières.....	33
II.5.3. La méthode des intégrales de volumes	33
II.5.4. La méthode des volumes finis	34
II.5.5. La méthode des éléments finis.....	34
II.6. Approximation par la MEF	34
II.7. Formulation éléments finis du modèle $\vec{T} - \Omega$	36
II.8. Techniques de calcul d'impédance.....	37
II.8.1. Hypothèses.....	37
II.8.2. Impédance à travers la théorie des circuits	38
II.8.3. Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique.....	39
II.8.4. Impédance à travers les énergies électromagnétiques.....	41
II.9. Validations.....	42
II.9.1. Modèle surfacique des défauts fins.....	42
II.9.2. Benchmark JSAEM ECT-SG	42
II.9.3. Nouveau benchmark pour les rivets dans les structures d'avions.....	45
II.10. Conclusion	49

II.1. Introduction

La simulation consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système. Elle s'appuie sur une modélisation et fait appel à des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. En chaque point du système considéré, plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température, champ électromagnétique . . .) décrivent son état. Ces grandeurs physiques ne sont pas indépendantes, mais liées par des équations, généralement aux dérivées partielles. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui régissent le comportement du système. Modéliser, c'est pouvoir déterminer l'état du système pour une source donnée.

Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique.

II.2. Mise en équation

II.2.1. Equations de base

Nous considérons dans ce chapitre un système composé d'air, de matériaux conducteurs et de sources. L'ensemble du système forme le domaine d'étude Ω de frontière Γ et les milieux conducteurs forment le domaine Ω_c avec $\Omega_c \subset \Omega$ (voir la Figure II.1).

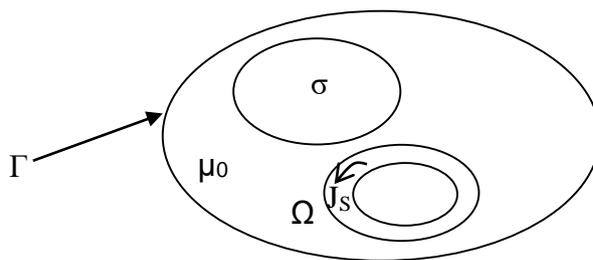


Figure II. 1 : Domaine d'étude

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell [Dolabdjian et al., 2007] [Choua, 2009]. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques. Ces équations sont les suivantes :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

\vec{E} [V/m] et \vec{H} [A/m] : Champ électrique et magnétique.

\vec{D} [C/m²] et \vec{B} [T] : Induction électrique et magnétique.

\vec{J} [A/m²] et ρ [C/m³] : Densité de courants de conduction et de charge électrique.

L'équation (II.4) est une généralisation de la loi d'Ampère, i.e. $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}$. Elle constitue avec (II.2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (II.1) et (II.3) constituent des équations dites de conservation.

Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (II.2-II.4) serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

ε : Permittivité électrique [F/m].

σ : Conductivité électrique [(\Omega.m)⁻¹].

Dans la plupart des problèmes d'électrotechnique, aux fréquences mises en œuvre, les courants de déplacement introduits par le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ sont négligés, le système est alors quasi-stationnaire. Dans ces conditions, on obtient la forme locale du théorème d'Ampère :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.8})$$

Ce qui induit l'équation la conservation de la densité de courant suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{II.9})$$

La décomposition d'un vecteur \vec{e} selon ses composantes tangentielle et normale en un point d'une surface (Figure II.2) est donnée par :

$$\vec{e} = (\vec{n} \cdot \vec{e})\vec{n} + (\vec{n} \wedge \vec{e}) \wedge \vec{n} = (\vec{e})_n + (\vec{e})_t$$

Sa composante tangentielle est donc $(\vec{n} \wedge \vec{e}) \wedge \vec{n}$, mais on y fait en général référence par le vecteur $(\vec{n} \wedge \vec{e})$ qui présente le même module.

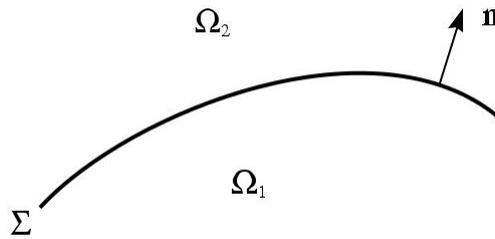


Figure II. 2 : Surface Σ séparant deux milieux Ω1 et Ω2

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités. Cependant, il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux.

Considérons deux milieux Ω1 et Ω2 ayant des propriétés physiques différentes séparées par une interface Σ (Figure II.2), Les conditions traduisant la continuité des champs à l'interface Σ sont alors définies par les relations suivantes :

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = \vec{0} \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \quad (\text{II.13})$$

Avec \vec{n} la normale à l'interface Σ séparant les deux milieux. Ces conditions de passage indiquent que la composante tangentielle du champ électrique \vec{E} et la composante normale de l'induction magnétique \vec{B} sont continues (II.11) et (II.12). Par contre, si des densités surfaciques de charges ρ_s ou de courant \vec{J}_s sont présentes à l'interface Σ, la composantes

normale de l'induction électrique \vec{D} et la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} sont discontinues (II.10) et (II.13).

II.2.2. Conditions aux limites

Le système composé des équations de Maxwell et des lois de comportement admet une infinité de solutions. Des conditions aux limites doivent être données sur la frontière du domaine d'étude afin d'assurer l'unicité de la solution.

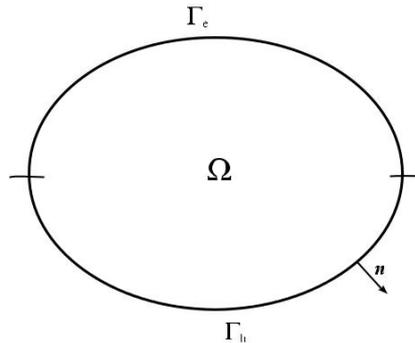


Figure II. 3 : Frontières Γ_h et Γ_e

La frontière du domaine d'étude Ω est décomposée en deux régions complémentaires Γ_h et Γ_e telles que $\Gamma = \Gamma_h \cup \Gamma_e$ et $\Gamma_h \cap \Gamma_e = \emptyset$ (Figure II.3).

Les conditions $\vec{n} \wedge \vec{E} = \vec{0}$ et $\vec{n} \wedge \vec{H} = \vec{0}$ sont respectivement imposées sur Γ_h et Γ_e .

II.3. Formulation magnétodynamique

II.3.1. Introduction des potentiels

La résolution des équations de Maxwell peut être obtenue en considérant les champs comme des grandeurs inconnues. Cependant, on préfère souvent exprimer les champs électrique et magnétique en fonction de potentiels. En effet, Z. Ren [Ren, 1997] a montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs (\vec{E}, \vec{H}) converge moins bien que si on travaille avec des potentiels.

Les potentiels électromagnétiques peuvent être introduits lorsque le rotationnel ou la divergence d'un champ électromagnétique est nul. Ainsi en électrostatique, le rotationnel nul du champ électrique ($\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0$) introduit un champ de gradient : $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}V}$ où V est le potentiel scalaire électrique défini à une constante près.

De même un inducteur bobiné peut être modélisé par un domaine non conducteur où la répartition de la densité de courant source \vec{J}_0 est supposée uniforme. Celle-ci peut être introduite par un vecteur source \vec{T}_0 tel que :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{T}_0 = \vec{J}_0 \quad (\text{II.14})$$

Différentes formulations électromagnétiques ont été élaborées dans la littérature, en exprimant les champs de vecteurs \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} et \vec{J} en fonction de nouvelles variables, telles que les potentiels vecteurs magnétique \vec{A} et électrique \vec{T} ou des potentiels scalaires électrique V et magnétiques et réduits Φ_r , d'autres formulations sont obtenues exprimant sous d'autres formes les équations de Maxwell, et dont la résolution conduit aux diverses grandeurs locales ou globales du problème.

II.3.2. Formulation en champ électrique \vec{E}

Cette formulation est obtenue en dérivant par rapport au temps l'équation d'Ampère-Maxwell et en faisant l'hypothèse que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.15})$$

Elle nécessite l'utilisation des éléments d'arêtes pour prendre en compte les conditions aux limites (de façon naturelle) et les discontinuités sur les composantes normales aux interfaces des champs de vecteur.

II.3.3. Formulation en champ magnétique \vec{H}

En combinant les relations (II.2) et (II.7), nous obtenons l'équation à résoudre :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) + \sigma \left(\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.16})$$

Cette équation associée à des conditions aux limites adéquates admet une solution unique. Cependant il faut assurer la continuité de la composante normale de l'induction magnétique, soit en terme de :

$$(\mu_1 \vec{H}_1 - \mu_2 \vec{H}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.17})$$

Cette relation implique la discontinuité de la composante normale de \vec{H} dans le cas de discontinuité de μ . Ceci rend la formulation beaucoup moins intéressante dans le cas des

éléments finis nodaux. En revanche, elle est bien adaptée aux éléments d'arêtes puisque la continuité de la composante tangentielle de H est vérifiée [Choua et al., 2007].

II.3.4. Formulation $\vec{A} - V$

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique uniquement dans les régions conductrices [Cheng et al., 2006].

En reprenant l'équation (II. 3), on peut montrer que l'induction magnétique \vec{B} peut être considérée comme le rotationnel d'un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.18})$$

De même en remplaçant (II.18) dans (II.2) on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.19})$$

A partir de la relation précédente, nous pouvons définir un potentiel scalaire électrique V donné par la relation :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad \rightarrow \quad \vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.20})$$

La combinaison des équations (II.20) et (II.7) nous donne :

$$\vec{J} = \sigma \left(-\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.21})$$

L'équation magnétodynamique en termes de potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(\vec{\nabla} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \quad (\text{II.22})$$

A cette équation s'ajoute la conservation de la densité de courant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot \left(-\sigma \left(\vec{\nabla} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \right) = 0 \quad (\text{II.23})$$

Le potentiel vecteur n'étant défini qu'à un gradient près ($\vec{A} = \vec{A}_0 + \vec{\nabla} V$), l'unicité du potentiel doit être assurée par l'utilisation d'une jauge. En $\vec{A} - V$ la jauge de Coulomb semble être la plus efficace :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II.24})$$

Cette jauge est introduite par pénalité en ajoutant le terme :

$$-\nabla \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right) \quad (\text{II.25})$$

Nous obtenons le système d'équations électromagnétiques symétrique à résoudre, dit formulation \vec{A} -V :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right) + \sigma \left(\vec{\nabla} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \quad (\text{II.26})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\sigma \left(\vec{\nabla} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \right) = 0 \quad (\text{II.27})$$

II.3.5. Formulation \vec{T} - Ω

La formulation T- Ω , décrit la distribution du champ électromagnétique par l'utilisation du potentiel vecteur électrique \vec{T} et du potentiel scalaire magnétique Ω [Kang et al., 2015] [Bouillault et al., 1990]. Cette formulation a l'avantage de permettre une réduction du coût de calcul en diminuant les degrés de liberté de trois à un dans toutes les zones non conductrices [Golestanirad et al., 2012].

Pour la solution du problème nous considérons une autre fois la condition de la continuité :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{II.28})$$

A partir de l'équation (II.28), l'expression de la densité de courant en termes de potentiel vecteur électrique est donnée par l'équation :

$$\vec{J} = \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \quad (\text{II.29})$$

On peut noter des équations (II.8) et (II.29) que \vec{T} et \vec{H} diffère par le gradient scalaire Ω :

$$\vec{H} = \vec{T} - \vec{\nabla} \Omega \quad (\text{II.30})$$

La combinaison des équations (II.2), (II.5) et (II.7) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \Omega) = 0 \quad (\text{II.31})$$

De l'équation (II.3) et (II.30) on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \Omega) \right) = 0 \quad (\text{II.32})$$

Dans l'air l'expression du champ magnétique est réduite à :

$$\vec{H} = -\vec{\nabla} \Omega \quad (\text{II.33})$$

On remplaçant (II.33) dans (II.3) :

$$-\vec{\nabla} \cdot \mu \overline{\nabla \Omega} = 0 \quad (\text{II.34})$$

La divergence de \vec{T} n'est pas encore défini et par conséquent \vec{T} et Ω restent ambigu. Pour y remédier on utilise l'une de jauge communément utilisée en électromagnétisme en l'occurrence la jauge de Coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (\text{II.35})$$

Cette condition nous autorise à rajouter à l'équation (II.28) le terme :

$$\overline{\nabla \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right)} \quad (\text{II.36})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \overline{\nabla \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right)} + j\omega\mu(\vec{T} - \overline{\nabla \Omega}) = 0 \quad (\text{II.37})$$

C'est ce modèle que nous avons adopté pour nos simulations en 3D

II.4. Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples. À titre d'exemple on peut citer les travaux de Dodd et al qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles par la méthode de séparation des variables. Parmi ces travaux, on retrouve :

- Une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de deux couches métalliques parallèles de matériaux différents [Luquire et al., 1970].
- Une bobine de section rectangulaire encerclant deux cylindres métalliques concentriques [Dodd & Deeds, 1968]

Des développements plus récents permettent notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane [Theodoulidis, 2003] ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane [Theodoulidis, 2005]. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent soit impossible à obtenir, soit très complexe et très coûteuse en ressources de calcul. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques.

II.5. Méthodes numériques

Les formulations magnétodynamiques précédemment exposées sont des équations aux dérivées partielles sous forme continue. Elles peuvent être résolues par l'une des méthodes numériques suivantes :

La méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments de frontière (BEM), la méthode des intégrales de volume, la méthode des volumes finis (FVM) et la méthode des éléments finis (MEF) [Sadiku & Matthew, 2001].

II.5.1. La méthode des différences finies

Historiquement la première, elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes.

II.5.2. La méthode des éléments de frontières

Elle repose sur la méthode plus générale des équations intégrales. Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse due à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée [Ida, 1994]. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques. Cette méthode ne peut s'appliquer que si les courants de Foucault se développent sur une profondeur qui peut être considérée comme négligeable devant les autres dimensions (excitation à haute fréquence, profondeur de pénétration nulle [Thollon & Burais, 1995].

II.5.3. La méthode des intégrales de volumes

Elle repose sur la résolution des équations intégrales précédemment citées. Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée obtenues, les champs électrique et magnétique dus à l'interaction capteur-cible sont déterminés par convolutions entre ces fonctions de Green et les sources (électriques ou magnétiques) mises en jeu. En pratique, ces équations intégrales sont discrétisées par la méthode des moments : les champs et les grandeurs constitutives électromagnétiques sont supposés constants dans des cellules élémentaires cubiques. La résolution numérique s'effectue alors par inversion itérative.

II.5.4. La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis, appelée aussi méthode des volumes de contrôles, est une méthode de résidus pondérés où les fonctions de poids sont égales à l'unité dans des volumes finis données. Elle consiste à discrétiser les équations aux dérivées partielles par intégration sur des volumes finis entourant les nœuds du maillage plutôt qu'aux nœuds eux-mêmes.

En effet, dans le cas de cette méthode, le domaine d'intégration est subdivisé en volumes de contrôle, chacun entoure un nœud de maillage. Lors de l'assemblage des équations discrétisées, la matrice du système global est construite par arrête contrairement aux matrices globales issues d'une discrétisation par éléments finis, pour laquelle la construction se fait par élément [Beckstein et al., 2017].

II.5.5. La méthode des éléments finis

Elle est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Elle est bien utilisée lorsque l'excitation s'effectue à basse ou moyenne fréquence (la profondeur de pénétration standard n'est pas négligeable devant les autres dimensions).

Nous ne nous intéressons qu'à la méthode des éléments finis malgré son coût en occupation mémoire et en temps d'exécution, cette méthode présente des avantages tels que la robustesse ou la précision [Bastos & Sadowski, 2003]

II.6. Approximation par la MEF

La méthode des éléments finis a largement été présentée dans la littérature scientifique [Renhart & Magele, 1990] [Jian Ming, 2002]. Elle consiste en une double discrétisation : une discrétisation spatiale (maillage du domaine) et une discrétisation des champs. La discrétisation spatiale permet de définir les fonctions de base (scalaires ou vectorielles) donnant naissance aux sous-espaces d'approximation des espaces continus (espaces dans lesquels se trouvent les champs). La discrétisation des champs consiste en la discrétisation de l'équation différentielle et des conditions aux limites pour obtenir un système algébrique où le vecteur solution de ce système contient les valeurs approximatives des champs sur les points du maillage.

De façon générale, les problèmes de magnétodynamique formulés sur un domaine de frontière peuvent s'exprimer sous la forme suivante :

$$L(u) = f \quad \text{dans } \Omega \tag{II.38}$$

$$M(u)=g \text{ sur } \Gamma \quad (\text{II.39})$$

où L et M sont des opérateurs différentiels, f et g des fonctions connues et u la variable (inconnue) recherchée.

L'équation (II.38) constitue la "forme forte" de la formulation dont la résolution directe est souvent difficile, vu l'ordre des dérivations élevé et le caractère discontinu des variables considérées.

Pour résoudre numériquement ce problème, il faut l'écrire sous une forme intégrale : la "forme faible". On l'obtient soit par la méthode de Galerkin, soit par la minimisation d'une fonctionnelle comme par exemple l'énergie du modèle physique. Ces deux solutions donnent le même résultat :

$$F(u) = \int_{\Omega} N \cdot (L(u) - f) d\Omega = 0 \quad (\text{II.40})$$

où N est la fonction de pondération scalaire ou vectorielle appartenant au même espace fonctionnel des solutions admissibles. Cette équation traduit le fait que si u est la solution du problème $(L(u) - f)$ alors sa projection sur l'espace des fonctions qui la décrivent N est globalement nulle sur le domaine de résolution Ω .

La formulation "variationnelle" ainsi obtenue est une forme finale qui fournit une solution pour la formulation "faible".

Pour calculer une grandeur dans un domaine discrétisé, il existe plusieurs méthodes d'approximation. On peut discrétiser cette valeur :

- Aux nœuds du maillage (approximation nodale)
- Par sa circulation le long des arêtes des éléments (approximation par des éléments d'arêtes)
- Par son flux à travers les facettes des éléments (approximation par des éléments de facettes)
- Par sa valeur au volume de l'élément (éléments de volume).

Dans le domaine de l'électromagnétisme, pour les champs de vecteurs comme le champ électrique \vec{E} ou le champ magnétique \vec{H} dont les composantes tangentielles sont continues au travers de deux éléments voisins, les éléments d'arêtes qui conservent la composante tangentielle entre deux éléments voisins sont particulièrement adaptés.

Pour les champs de vecteurs comme l'induction magnétique \vec{B} ou la densité de courant électrique \vec{J} dont les composantes normales sont continues au travers de deux éléments voisins, les éléments de facettes sont bien adaptés.

Pour les champs scalaires comme le potentiel scalaire magnétique Φ ou le potentiel scalaire électrique V qui sont tous deux continus au travers des deux éléments voisins, les éléments nodaux sont les plus adaptés.

II.7. Formulation éléments finis du modèle \vec{T} - Ω

La formulation éléments finis du modèle \vec{T} - Ω a été mise en œuvre en utilisant des éléments tétraédriques de second ordre. Dans chaque élément le potentiel scalaire magnétique et le potentiel vecteur électrique sont exprimés par une fonction de forme second degré associée avec les nœuds :

Dans un élément le potentiel scalaire magnétique est approché comme suite :

$$\Omega = \sum_{i=1}^m \Omega_i N_i \quad (\text{II.41})$$

Avec N_i la fonction de forme au nœud i . m est le nombre de nœuds de l'élément et $m = 10$ pour un élément tétraédrique quadratique. Ω_i est la valeur du potentiel scalaire magnétique au nœud i .

Dans le système de coordonnées cartésiennes le potentiel vecteur électrique \vec{T} a trois composantes T_x, T_y, T_z . Chaque nœud a trois degrés de liberté au lieu d'un. Dans chaque élément le potentiel vecteur électrique peut être approché comme :

$$\vec{T} = \sum_{i=1}^m \vec{T}_i \cdot N_i = \sum_{i=1}^m (T_{xi} \cdot \vec{x} + T_{yi} \cdot \vec{y} + T_{zi} \cdot \vec{z}) \cdot N_i \quad (\text{II.42})$$

Pour un élément tétraédrique les fonctions de formes sont définies comme suit:

$$N_i = \frac{a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 xy + a_5 yz + a_6 xz + a_7 x^2 + a_8 y^2 + a_9 z^2}{6 \cdot vol} \quad (\text{II.43})$$

La formulation de Galerkin des équations (II.37), (II.34) et (II.32) est donnée par les équations (II.44) (II.45) et (II.46) respectivement :

$$\int_{vol} N_i \cdot \left(\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \overline{\nabla \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right)} + j\omega\mu(\vec{T} - \overline{\nabla\Omega}) \right) dvol = 0 \quad (\text{II.44})$$

$$\int_{vol} N_i \cdot \left(\vec{\nabla} \cdot \left(\mu(\vec{T} - \overline{\nabla\Omega}) \right) \right) dvol = 0 \quad (\text{II.45})$$

$$\int_{vol} N_i \cdot (-\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{\nabla} \vec{\Omega}) dvol = 0 \quad (\text{II.46})$$

Ces équations peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{vol} ((\vec{\nabla} \wedge N_i) \cdot (\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T}) + (\vec{\nabla} \cdot N_i) (\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T}) + N_i \cdot j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \vec{\Omega})) dvol + \\ \int_S (N_i \cdot \hat{n} \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T}) ds + \int_S (N_i \wedge (\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T}) \cdot \hat{n}) ds = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.47})$$

$$\int_{vol} \vec{\nabla} N_i \cdot (\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \vec{\Omega})) dvol + \int_S (\mu(\vec{T} - \vec{\nabla} \vec{\Omega})) \cdot \hat{n} ds = 0 \quad (\text{II.48})$$

$$\int_{vol} \vec{\nabla} N_i \cdot (\mu(-\vec{\nabla} \vec{\Omega})) dvol + \int_S (\mu(-\vec{\nabla} \vec{\Omega})) \cdot \hat{n} ds = 0 \quad (\text{II.49})$$

En imposant les conditions de surface sur les composantes normales de \vec{B} et \vec{J} , et sur les composantes tangentielles de \vec{H} sur la surface entre les deux milieux conducteur et non-conducteur toutes les intégrales de la surface disparaissent.

II.8. Techniques de calcul d'impédance

II.8.1. Hypothèses

Considérant une bobine de section Ω et formée de N spires jointives disposées en séries (voir Figure II.4). La densité de courant est de répartition uniforme. La spire élémentaire à la bobine est soumise à une tension u et parcourue par une intensité du courant I .

$$I = \iint_{\Omega} \vec{J} \cdot d\vec{\Omega} \quad (\text{II.50})$$

$$I = \frac{J\Omega}{N} \quad (\text{II.51})$$

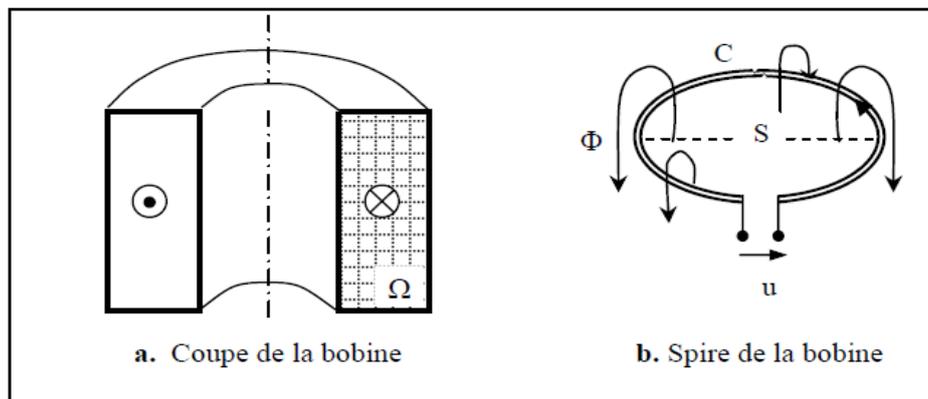


Figure II. 4 : Bobine à N spires jointives

La tension totale est la somme des tensions élémentaires de chaque spire car les spires sont disposées en séries, soit :

$$U = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} u d\Omega \quad (\text{II.52})$$

Différents types de formulation de l'impédance sont possibles. Ces formulations se différencient dans la variable d'état utilisée. Le choix de la variable d'état est relatif aux configurations du problème et à la solution issue de la résolution des équations de Maxwell.

II.8.2. Impédance à travers la théorie des circuits

La théorie des circuits est généralisée par les équations (II.1) et (II.4) de Maxwell. L'équation (II.1) traduit la continuité électrique (loi des nœuds en théorie des circuits). L'équation (II.4) de Maxwell - Ampère généralise la deuxième loi de Kirchhoff (loi des mailles). Cette équation écrite en fonction du potentiel vecteur magnétique et du potentiel scalaire électrique est donnée par l'équation (II.53) ; réécrite en fonction du champ électrique et en notation complexe, elle devient [Klein et al., 2018].

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \nabla V \quad (\text{II.53})$$

Après intégration sur le contour d'une spire élémentaire cette équation devient :

$$-\int_c \nabla V \cdot \vec{dl} = \int_c \vec{E} \cdot \vec{dl} + j\omega \int_c \vec{A} \cdot \vec{dl} = 0 \quad (\text{II.54})$$

Elle exprime que la somme algébrique de toutes les tensions le long d'un contour C ou d'une maille est nulle. Autrement dit, la tension appliquée aux bornes d'un contour ou d'un circuit est égale à la somme des chutes de tensions résistive et inductive le long de celui-ci.

Notant que du est la tension appliquée à ce contour, soit :

$$u = -\int_c \nabla V \cdot \vec{dl} \quad (\text{II.55})$$

Ainsi l'équation (II.54) devient :

$$u = \int_c \vec{E} \cdot \vec{dl} + j\omega \int_c \vec{A} \cdot \vec{dl} \quad (\text{II.56})$$

La combinaison de (II.52) et (II.56) aboutit à l'expression de la tension totale en fonction des champs.

$$U = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} (\int_c \vec{E} \cdot \vec{dl}) d\Omega + j \frac{\omega}{\Omega} \iint_{\Omega} (\int_c \vec{A} \cdot \vec{dl}) d\Omega \quad (\text{II.57})$$

Faisant intervenir le courant total traversant la section du contour, l'impédance n'est autre que :

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{N U}{\Omega J} = R + jX \quad (\text{II.58})$$

$$Z = \frac{1}{\Omega I} \left[\iint_{\Omega} (\int_c \vec{E} \cdot \vec{dl}) d\Omega + j\omega \iint_{\Omega} (\int_c \vec{A} \cdot \vec{dl}) d\Omega \right] \quad (\text{II.59})$$

Si dans l'entourage de la bobine se trouve un matériau qui provoque une réaction sur celle-ci, le potentiel vecteur magnétique ne sera plus un réel et sera composé d'une partie réelle et d'une partie imaginaire. Ainsi, le potentiel vecteur magnétique peut-être écrit sous la forme complexe suivante :

$$\bar{A} = A e^{-j\omega t} = \text{Re}(\bar{A}) - j \text{Im}(\bar{A}) \quad (\text{II.60})$$

En injectant cette forme complexe du potentiel (II.60) dans l'expression de la tension totale (II.57), cette dernière devient :

$$U = \iint_{\Omega} (\int_c \vec{E} \cdot \vec{dl}) d\Omega - \omega \iint_{\Omega} \text{Im}(\int_c \vec{A} \cdot \vec{dl}) d\Omega + j\omega \iint_{\Omega} \text{Re}(\int_c \vec{A} \cdot \vec{dl}) d\Omega \quad (\text{II.61})$$

Appliquant la relation (II.58) de l'impédance en fonction de la tension et du courant, nous arrivons à la forme générale de l'impédance.

$$R = \frac{1}{I} \iint_{\Omega} (\int_c \vec{E} \cdot \vec{dl}) d\Omega - \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \text{Im}(\int_c \vec{A} \cdot \vec{dl}) d\Omega \quad (\text{II.62})$$

$$X = j \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \text{Re}(\int_c \vec{A} \cdot \vec{dl}) d\Omega \quad (\text{II.63})$$

Ces expressions des paramètres de l'impédance s'appliquent que ce soit à une bobine seule ou en présence d'un matériau conducteur.

II.8.3. Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique

En configuration double fonction ou fonctions séparées, L'impédance du bobinage peut être calculée à l'aide d'une méthode générale reposant sur le calcul du flux de l'induction magnétique [Lorrain et al., 1988] [Kim et al., 2007].

Partant de l'équation de Maxwell – Faraday (II.2), après intégration sur la surface S enveloppée par le contour C de la bobine et application du théorème de Stokes [Durand, 1968], nous arrivons à :

$$\int_c \vec{E} \cdot \vec{dl} = -j\omega \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{II.64})$$

Pour obtenir la tension aux bornes de la bobine, nous faisons la somme de toutes les tensions élémentaires des spires. Ainsi, l'équation (II.64) appliquée à l'ensemble des spires formant la bobine devient :

$$\iint_{\Omega} (\int_c \vec{E} \cdot \vec{dl}) d\Omega = -j\omega \iint_{\Omega} (\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}) d\Omega = -j\omega \iint_{\Omega} \Phi d\Omega \quad (\text{II.65})$$

Sachant que l'impédance électrique peut être évaluée à partir de :

$$Z = R + jX = \frac{1}{I} \iint_{\Omega} (\int_c \vec{E} \cdot \vec{dl}) d\Omega \quad (\text{II.66})$$

Et en introduisant la forme complexe du flux magnétique, la combinaison des équations (II.65) et (II.66) donne :

$$Z = \frac{\omega}{I} (\iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega - j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega) \quad (\text{II.67})$$

Les paramètres de l'impédance sont alors :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.68})$$

$$X = -j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.69})$$

Où :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} (\iint_S \text{Im}(\vec{B} \cdot d\vec{S})) d\Omega \quad (\text{II.70})$$

$$X = -j \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} (\iint_S \text{Re}(\vec{B} \cdot d\vec{S})) d\Omega \quad (\text{II.71})$$

L'expression de l'impédance ainsi établie peut s'appliquer indifféremment aux capteurs à double fonction ou à fonctions séparées.

En introduisant le potentiel vecteur magnétique, les équations (II.70) et (II.71) deviennent comme suit :

$$\text{Re}(Z) = \frac{N^2}{J \cdot S^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{Im}(A) \cdot dS \quad (\text{II.72})$$

$$\text{Im}(Z) = \frac{N^2}{J \cdot S^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{Re}(A) \cdot dS \quad (\text{II.73})$$

Avec :

r : Rayon de la bobine.

II.8.4. Impédance à travers les énergies électromagnétiques

Le comportement électromagnétique de l'ensemble bobine - matériau à contrôler peut-être étudié au moyen d'une analogie électrique : un circuit constitué de deux bobines couplées de manière inductive est équivalent à un seul circuit dont les paramètres sont ramenés à la bobine source. D'après cette équivalence, l'énergie magnétique du système (capteur - pièce) est égale à l'énergie magnétique du circuit équivalent. Il en est de même pour l'énergie dissipée par effet Joule [Aldrin & Knopp, 2006] [Durand, 1968].

La résistance R vue par le capteur peut être évaluée à travers le calcul de la puissance perdue par effet Joule, soit :

$$P_J = \iiint_v \frac{J^2}{\sigma} dv \quad (\text{II.74})$$

$$P_J = RI^2 \quad (\text{II.75})$$

D'où :

$$R = \frac{N^2}{S^2 J^2} P_J \quad (\text{II.76})$$

De même l'énergie magnétique emmagasinée nous permet de déduire l'inductance du système.

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_v \frac{B^2}{\mu} dv \quad (\text{II.77})$$

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{II.78})$$

D'où :

$$L = \frac{2N^2}{S^2 J^2} W_m \quad (\text{II.79})$$

C'est cette méthode qui a été adoptée pour nos calculs d'impédance, elle permet de calculer la résistance et l'inductance (réactance) d'une bobine de manière extrêmement simple et rapide même si cette bobine est en présence d'un matériau réactif. Néanmoins, cette méthode est applicable uniquement aux capteurs double fonctions, c'est-à-dire aux capteurs faisant office en même temps d'émetteur et de récepteur.

II.9. Validations

L'objectif de cette section est d'évaluer le modèle $\vec{T} - \Omega$ en comparant les résultats obtenus par celui-ci avec des données expérimentales sur des configurations de benchmarks académiques.

II.9.1. Modèle surfacique des défauts fins

La figure II.5 illustre une configuration typique de CND- CF. Il s'agit d'une bobine au-dessus d'une pièce électriquement conductrice où il existe un défaut fin.

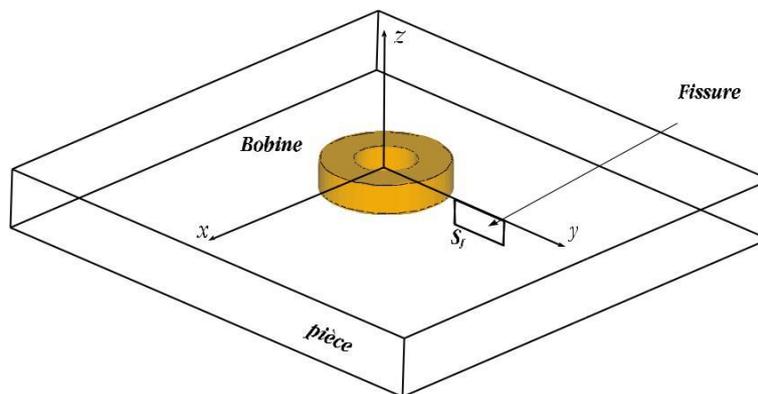


Figure II. 5 : Configuration de CND-CF

II.9.2. Benchmark JSAEM ECT-SG

Le problème traité est celui du Benchmark models of Eddy Current Testing for Steam Generator (Benchmark ECT-SG). Il est décrit par la figure II.6 et le tableau II.1. Ce benchmark a été développé pour le CND des tubes de générateurs de vapeur des centrales nucléaires [Takagi et al., 1994]. Les générateurs de vapeur qui assurent le transfert de chaleur du réacteur vers le groupe turboalternateur constituent une pièce maîtresse des centrales nucléaires. Ils sont l'interface entre les systèmes primaire et secondaire. Ils sont constitués d'environ 5000 tubes très longs (environ 10 m) et très fins (environ 2 cm de diamètre et 1,27 mm d'épaisseur). Le nombre important de ces tubes favorise un rendement élevé dans les échanges thermiques. La sûreté de fonctionnement d'un tel système impose un contrôle régulier et fiable de ces tubes et afin de pouvoir détecter les défauts qui compromettent leur étanchéité.

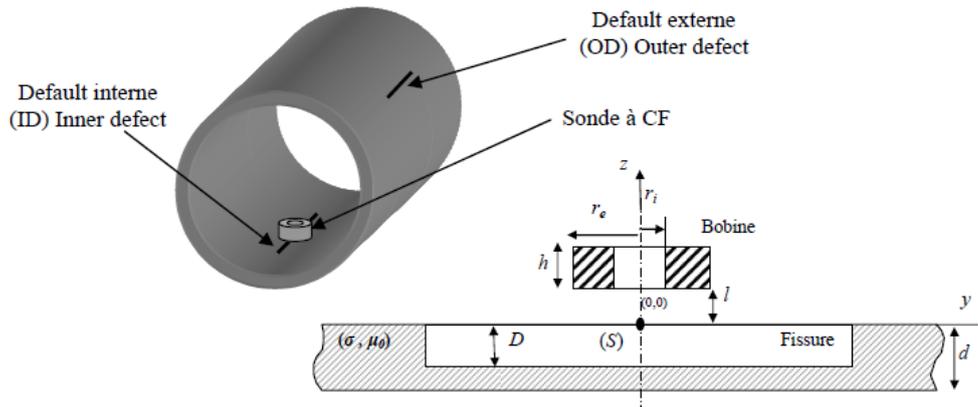


Figure II. 6 : Géométrie du benchmark ECT-SG

Tableau II. 1 : Les paramètres du Benchmark ECT-SG

Paramètres	Valeurs
Bobine	
Rayon intérieur	0.6 mm
Rayon extérieur	1.6 mm
Hauteur	0.8 mm
Lift-off	0.5 mm
Nombre de spires	140
Fréquence	300 kHz
Plaque	
Epaisseur	1.27 mm
Conductivité	1 MS/m
Fissure	
Longueur	10 mm
Profondeur	100%d, 60%d et 40%d

La variation d'impédance obtenue pour la bobine est comparée aux valeurs expérimentales du Benchmark ECT-SG pour différentes profondeurs de la fissure ($D= 100\%d, 60\%d$ et $40\%d$). Le changement de la géométrie dû au déplacement du capteur par rapport à la position de la fissure nécessite le remaillage complet du domaine [Cardelli et al., 2005]. A chaque position (k) du capteur un maillage et un calcul 3D sont réalisés pour calculer l'impédance correspondante : La variation de l'impédance est donnée par :

$$\Delta Z = Z_f - Z_s \quad (II.80)$$

Où Z_f et Z_s représentent respectivement l'impédance du capteur en présence et en absence de la fissure.

Les figures (II.7, II.8 et II.9) montrent les résultats numériques et ceux données par le JSAEM Benchmark ECT-SG. Nous remarquons une bonne concordance entre les résultats.

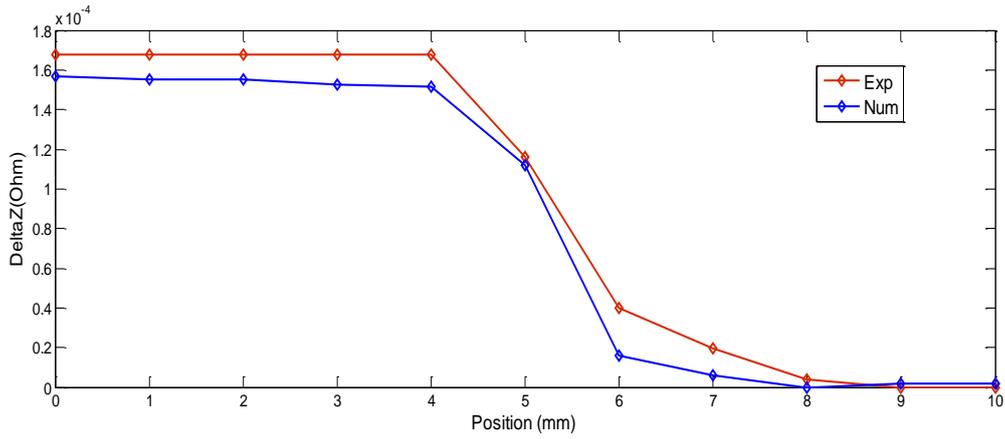


Figure II. 7: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur (100%d)

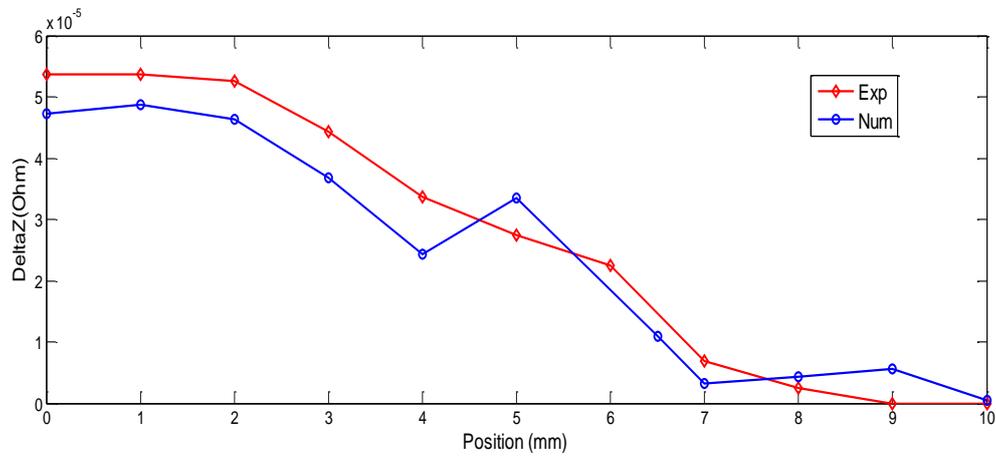


Figure II. 8 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur (60%d)

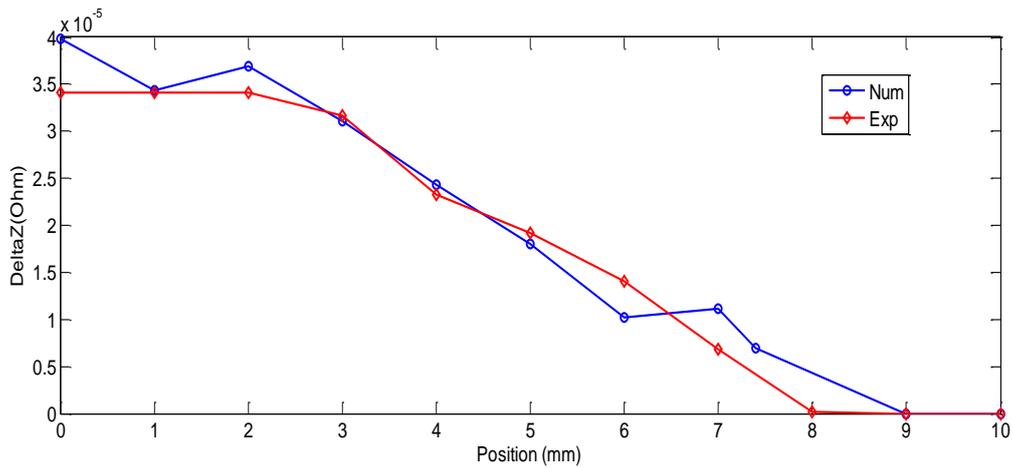


Figure II. 9 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur (40%d)

II.9.3. Nouveau benchmark pour les rivets dans les structures d'avions

Ce nouveau Benchmark proposé par J. Martinos and al en 2014 [Martinos et al., 2014] est une version simplifiée de l'inspection par courants de Foucault des rivets d'assemblage dans les fuselages d'avions.

Deux plaques en aluminium ont été utilisées dans les expériences pour simuler une structure en couches. Les deux plaques ont des dimensions de 300 x 300 mm, une épaisseur de 2 mm et elles sont trouées au centre (voir Figure II.10 et tableau II.2). De plus, l'une d'entre elles comporte une fente étroite simulant une fissure adjacente au rivet. Si nous désignons la plaque sans la fissure A et celle avec la fissure B, nous avons effectué des mesures pour les quatre configurations suivantes qui sont nommées en fonction de la ou des plaques utilisées et de leur position lorsqu'elles sont collées ensemble.

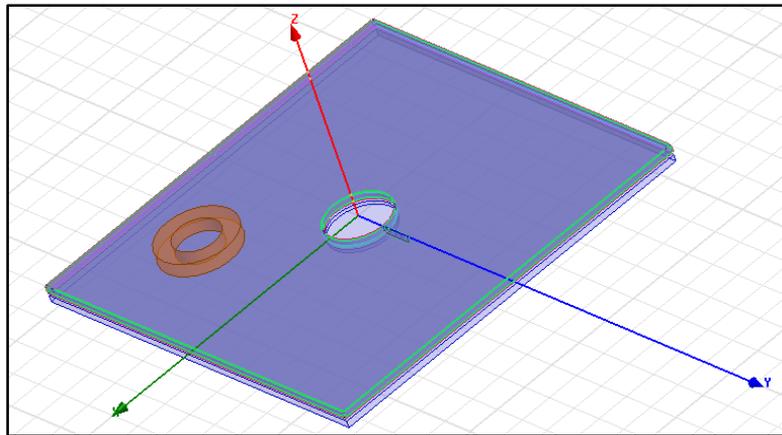


Figure II. 10 : Géométrie du nouveau Benchmark

Tableau II. 2 : Les paramètres du nouveau Benchmark

Paramètres	Valeurs
Bobine	
Rayon intérieur	7 mm
Rayon extérieur	12 mm
Hauteur	4 mm
Lift-off	1.082 mm
Nombre de spires	1650
Fréquence	1 kHz et 5 kHz
Plaque	
Épaisseur	2 mm
Conductivité	17.34 MS/m
Espace entre les deux plaques	70 μ m
Fissure	
Longueur	9.8 mm
Épaisseur	0.234 mm
Rayon du rivet	10 mm

Auparavant, seules les données du B-scan étaient fournies pour l'impédance de la bobine. Dans ce modèle, nous fournissons aussi des résultats de scan de surface (C-scan).

Les valeurs de l'impédance ont été obtenues pour chaque pas de déplacement de la bobine. Un balayage C-scan a été effectué, recouvrant une surface de 80 mm x 80 mm au-dessus du rivet. Des représentations B-scan sont aussi fournies couvrant une ligne de 80mm. Les résultats sont normalisés par rapport à la valeur de la réactance X_0 de la sonde dans l'air et évalués pour deux fréquences de 1 kHz et 5 kHz.

II.9.3.1. Configuration 1 : plaque sans défaut

Dans cette configuration, seul le trou est présent dans la plaque. Les signaux produits à 1 et 5 kHz sont représentés sur la figure II.11. Nous remarquons que les signaux sont symétriques par rapport au centre du trou situé à ($x = 0$ et $y = 0$).

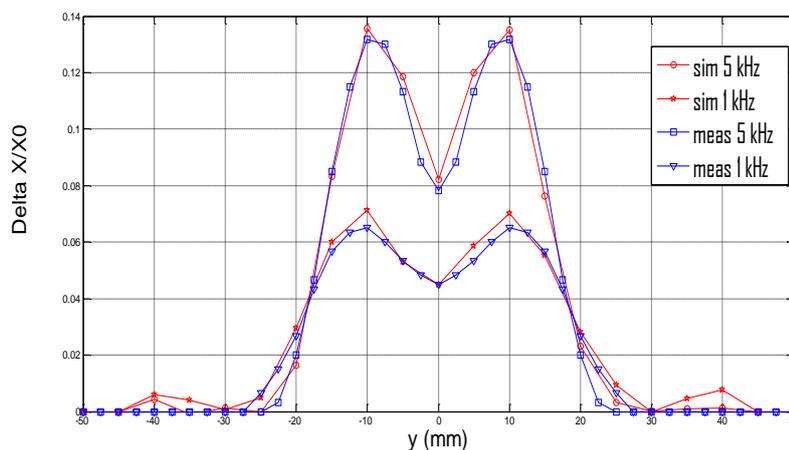


Figure II. 11 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur.

II.9.3.2. Configuration 2 : Plaque avec défaut

Dans ce cas, le capteur scanne une seule plaque avec un trou et une fissure. La figure II.12 montre l'évolution de l'amplitude de l'impédance de la bobine en fonction du déplacement de cette dernière. L'asymétrie dans les signaux révèle la présence de la fissure radiale, qui est située sur l'axe des x ($x = 0$) entre les coordonnées $y = 10$ mm et $y = 19,8$ mm.

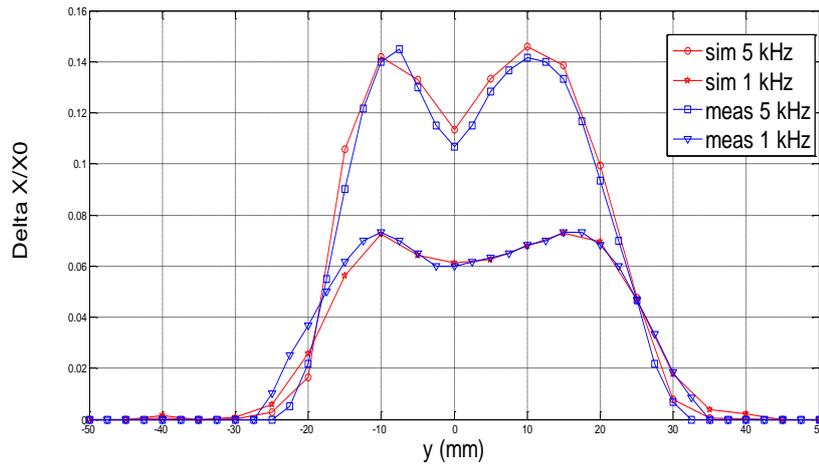


Figure II. 12 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur

II.9.3.3. Configuration 3 : La plaque sans défaut au-dessus de la plaque avec défaut

La troisième validation est relative au cas où la plaque sans défaut se situe au-dessus de celle avec fissure ; l'écart entre eux est de 70 μm . La figure II.13 montre la comparaison des résultats expérimentaux et numériques en fonction de la position de la bobine. Dans ce cas également, l'accord est excellent.

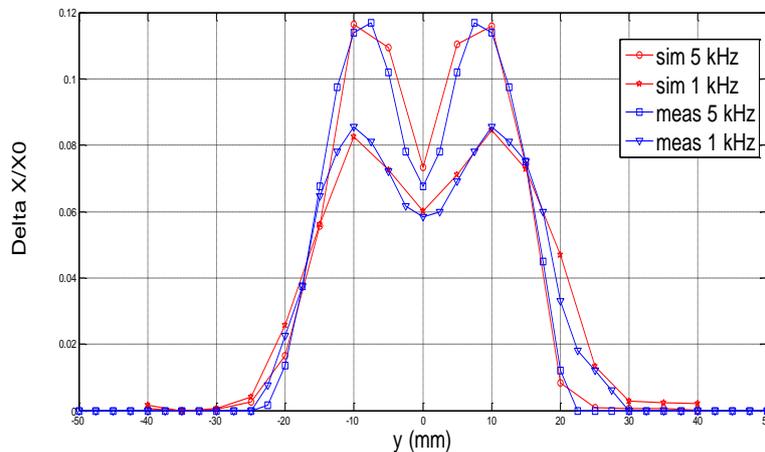


Figure II. 13 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur

II.9.3.4. Configuration 4 : La plaque avec défaut au-dessus de la plaque sans défaut

La figure II.14 montre les résultats obtenus numériquement comparés aux résultats expérimentaux en fonction de la position de la bobine. Encore une fois, on a une très bonne concordance.

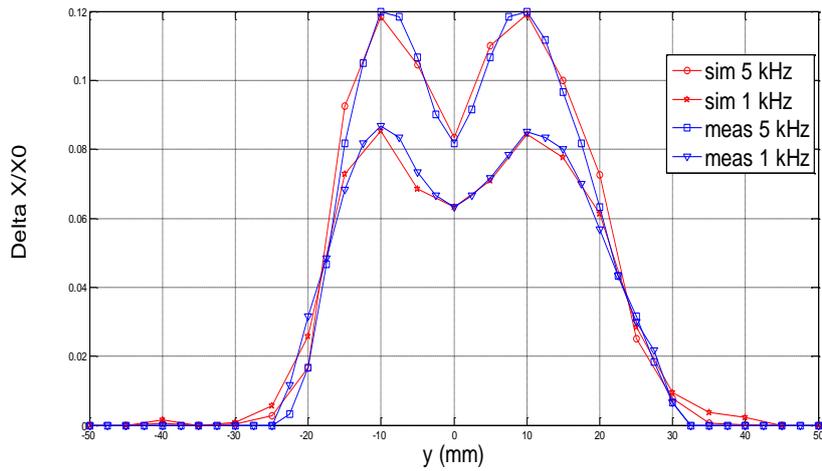


Figure II. 14 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur

II.9.3.5. Résultats C-scan

Les images C-scan de l'impédance pour une plaque avec et sans fissure sont montrées dans la figure II.15 et la figure II.16 respectivement. Les deux images sont clairement différentes et le défaut peut être intuitivement quantifié à partir de la figure II.16.

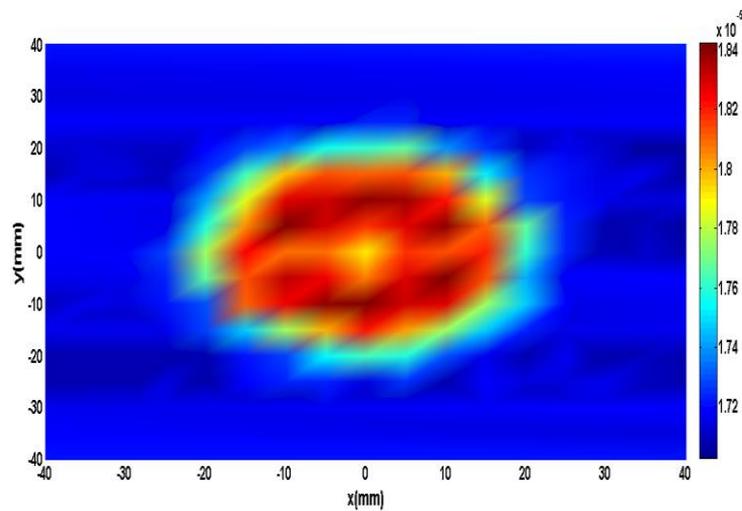


Figure II. 15 : Représentation C-scan à 1kHz (plaque sans fissure)

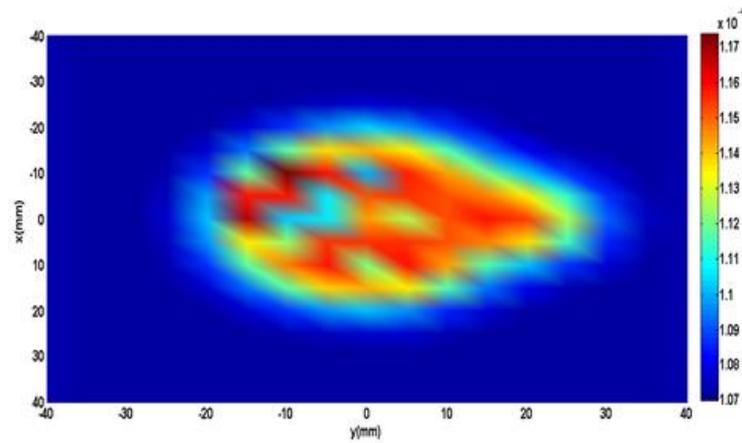


Figure II. 16 : Représentation C-scan à 1kHz (plaque avec défaut)

Les résultats obtenus pour le modèle des défauts fins avec la formulation $\vec{T} - \Omega$ sont satisfaisants et valident les données des expériences de référence aussi bien pour le benchmark Team Workshop le benchmark JSAEM que pour le nouveau benchmark relatif aux rivets dans les carrosseries d'avions.

II.10. Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux techniques de modélisation du capteur à courants de Foucault. Parmi les différentes techniques de modélisation, la méthode des éléments finis présente l'avantage de pouvoir traiter les géométries complexes et de tenir compte de l'hétérogénéité des matériaux.

La formulation $\vec{T} - \Omega$ qui permet de réduire les temps de simulations des configurations CND-CF 3D a été adoptée. Cette approche permet de simuler avec efficacité l'interaction capteur-cible avec défauts fins. Ce modèle a été appliqué à des bobines à air et à des fissures rectangulaires dans le but de le valider.

Chapitre III:

Capteurs et instrumentation

III.1. Introduction.....	51
III.2. Schémas synoptique du dispositif de mesure.....	51
III.3. Les capteurs à courants de Foucault	51
III.3.1. Les fluxgates	52
III.3.2. Les capteurs à effet de Hall.....	53
III.3.3. Les magnéto-résistances	54
III.3.4. Les capteurs inductifs.....	54
III.3.5. Types de capteurs inductifs.....	57
III.4. LCR mètre 8101-G (Gw INSTEK).....	61
III.5. NORTEC 500.....	64
III.6. LabVIEW	65
III.7. Instruments virtuels.....	66
III.8. Conclusion.....	68

III.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à l'approche expérimentale, cette approche s'appuie sur des mesures effectuées sur des étalons comportant des défauts bien connus et moyennant une chaîne de mesure performante. Sur la base de ces mesures on peut dresser des courbes étalons constituant des abaques qui peuvent servir à la caractérisation des défauts.

Dans ce contexte, tout un travail expérimental a été réalisé, Il s'inscrit dans la perspective du développement d'un dispositif de détection de défauts dans les matériaux conducteurs. Pour cela des défauts simulant des fissures ont été réalisés pour établir des corrélations entre la forme, les dimensions du défaut et la signature qu'il engendre en termes d'impédance.

III.2. Schémas synoptique du dispositif de mesure

La chaîne de contrôle non destructif par courant de Foucault comprend essentiellement un générateur alimentant le capteur, le capteur lui-même, le produit à contrôler dont éventuellement la présence de défauts et enfin le système d'observation qui visualise une grandeur dérivée des courants de Foucault. Les paragraphes suivants décrivent chaque élément de cette installation [Shull, 2016].

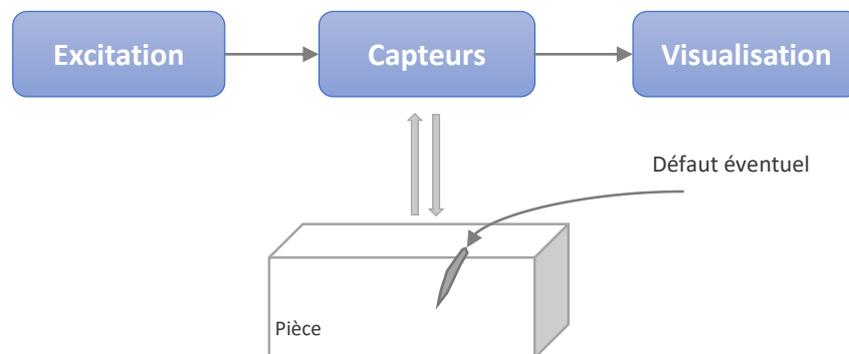


Figure III. 1 : Schéma synoptique de la chaîne de contrôle

III.3. Les capteurs à courants de Foucault

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

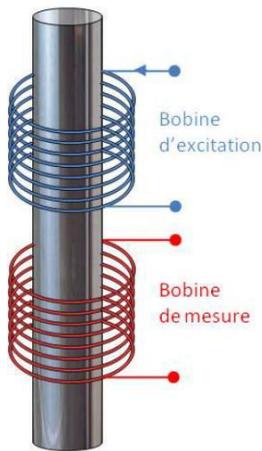
- Les capteurs **magnétiques** : La variation de l'impédance ou de la résistance de ces capteurs est proportionnelle au champ magnétique dans lequel ils sont plongés. L'émission du champ magnétique alternatif doit être réalisée par un autre élément.
- Les capteurs **inductifs** : Historiquement les premiers éléments sensibles au champ connus, ce sont des bobines qui transforment le champ magnétique qui les traverse en tension. Elles peuvent être utilisées en émission et en réception.

III.3.1. Les fluxgates

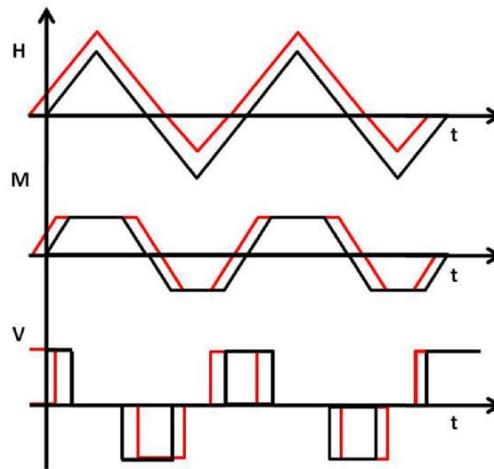
Les fluxgates ont été initialement développés pour la fabrication de compas des systèmes de navigation. Ils sont composés d'un noyau ferromagnétique et au minimum de deux bobinages. L'idée à la base est d'exploiter la saturation du cycle d'hystérésis du noyau ferromagnétique

Le premier bobinage est appelé bobinage d'excitation, en bleu dans la figure III.2a, et le second est appelé bobinage de mesure, en rouge. Nous allons brièvement présenter le principe de fonctionnement de ces capteurs avec un exemple d'une configuration simplifiée. La bobine d'excitation est alimentée par un courant de forme triangulaire, présenté dans la figure III.8b, généralement de basse fréquence, entre 50 et 1000 Hz. Ce courant crée un champ magnétique \vec{H} qui sature périodiquement le noyau ferromagnétique. Lorsque le noyau est saturé, la variation de l'aimantation \vec{M} à l'intérieur du noyau est nulle, et donc la bobine de mesure présente une tension nulle à ses bornes. Lorsque le noyau n'est pas saturé, la bobine de mesure présente une valeur constante à ses bornes, correspondant à la dérivée des variations de l'aimantation. La tension mesurée aux bornes de la bobine de mesure a donc une forme d'onde caractérisée par des impulsions.

En l'absence d'un champ magnétique extérieur, la tension V mesurée est parfaitement symétrique par rapport à l'origine du temps, comme montré dans la figure III.2b par le signal noir. En présence d'un champ magnétique extérieur, la saturation du noyau est plus vite atteinte pour une demi-période que pour l'autre, ce qui engendre un décalage temporel dans la tension mesurée par la bobine, la courbe rouge dans la figure III.2b. C'est donc la mesure de ce décalage qui nous donne une estimation du champ magnétique externe.



(a) Schéma d'un fluxgate constitué par un noyau ferromagnétique et deux bobines. En bleu la bobine d'excitation et en rouge la bobine de mesure.



(b) Forme d'ondes du champ d'excitation H , de l'aimantation du noyau M et de la tension mesurée V . En noir en l'absence d'un champ extérieur, et en rouge en sa présence.

Figure III. 2: Principe de fonctionnement d'un fluxgate.

Le schéma présenté est une simplification par rapport aux capteurs de type fluxgate généralement utilisés. Différentes formes d'onde et de noyaux sont utilisés, notamment pour éliminer l'important couplage qui se crée entre la bobine d'excitation et la bobine de mesure.

Les besoins en CND demandent aux capteurs de ne pas dépasser quelques mm de longueur et les dimensions des capteurs de type fluxgate sont plus importantes. A titre d'exemple on peut citer des capteurs commercialisés par la société Bartington Instrument, qui occupe un volume de $8 \times 8 \times 30 \text{ mm}^3$ (*Bartington-Instrument*). Le CEA LETI en 2005 a conçu un micro-fluxgate de dimensions $1 \text{ mm} \times 400\mu\text{m} \times$ quelques μm gravé sur Silicium [Joisten et al., 2005].

III.3.2. Les capteurs à effet Hall

Le principe de fonctionnement de ces capteurs magnétiques est basé sur l'effet Hall [Angani et al., 2016]. Il est plus important dans des matériaux semi-conducteurs mais afin d'illustrer le principe, on considère des matériaux conducteurs par simplicité. Quand une piste conductrice (l'épaisseur est généralement comprise entre 0.4 et $100\mu\text{m}$) est parcourue par un courant continu I , appliqué selon l'axe y , voir figure III.3, et soumise à une induction magnétique \vec{B} , appliqué dans cet exemple selon l'axe z , il apparaît une différence de potentiel V_H dans la direction perpendiculaire à celle de l'induction et à celle du courant, c'est à dire l'axe x . Cette tension, dite de Hall, est due à la force de Lorentz et est donnée par :

$$\vec{F} = q\mathbf{v} \wedge \vec{B} \quad (\text{III.1})$$

Où q est la charge des électrons et \mathbf{v} leur vitesse.

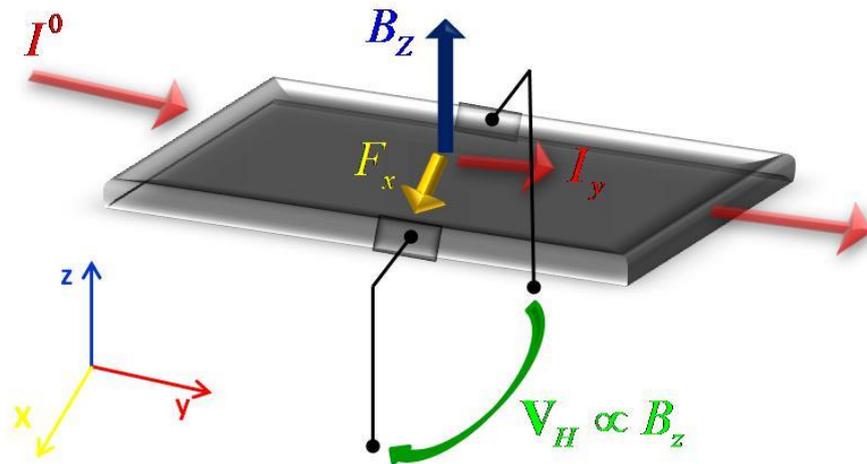


Figure III. 3 : Principe de fonctionnement des capteurs à effet Hall.

III.3.3. Les magnétorésistances

La magnétorésistance (MR) est la propriété liée à certains matériaux de voir leur résistance variée en présence d'un champ magnétique. Tous les conducteurs présentent un effet magnétorésistif qui est typiquement trop faible pour pouvoir les employer comme capteur de champ. Toutefois, on peut trouver des matériaux magnétiques qui présentent un effet magnétorésistif suffisant, appelés magnétorésistances anisotropes (AMR), et qui sont utilisés pour réaliser des capteurs [Tsukada et al., 2018].

Ainsi, les avancées récentes des technologies et matériaux permettent de réaliser des dispositifs composés de couches minces dotées d'un fort effet magnétorésistif, telles que les magnétorésistances géantes (GMR) et tunnel (TMR).

Le taux de MR est défini de la façon suivante :

$$MR(\%) = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \quad (III.2)$$

où R_{max} et R_{min} est respectivement la résistance maximale et minimale atteinte lorsque le champ magnétique varie. Dans le cas des AMR ce facteur est typiquement 1% - 2% pour les GMR 20% -60% et les TMR 60% - 600% [Jander et al., 2005].

III.3.4. Les capteurs inductifs

Les capteurs plus couramment utilisés en contrôle non destructif sont les bobines «filaires». Leur conception est la plus simple à réaliser et la moins coûteuse, caractéristiques qui les rendent très intéressantes pour des applications industrielles. Ils sont constitués d'un fil de

cuivre enroulé autour d'un noyau qui peut être composé d'air ou de ferrite. L'intérêt de la ferrite est sa faculté à canaliser le champ et l'amplifier. Sur la figure III.4, des exemples de capteur inductif à air sont présentés. Le volume de ces capteurs varie selon l'application demandée et dans le cas du CND, il peut aller du mm^3 (avec des fils de cuivre de diamètre d'environ $50\mu\text{m}$) au cm^3 .

Le fonctionnement de ces capteurs est basé sur le phénomène d'induction électromagnétique : une force électromotrice e est induite dans un circuit fermé soumis à un flux magnétique (issu d'une induction magnétique variable). La loi de Lenz-Faraday permet de calculer cette force électromotrice e :

$$e = - \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{III.3})$$



Figure III. 4 : Capteurs inductifs constitués d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau à air.

D'après cette définition on voit que les capteurs inductifs ne peuvent pas mesurer des inductions magnétiques statiques. La tension aux bornes d'une bobine à air comportant N spires de surface moyenne A , soumise à une induction magnétique B variable sinusoïdalement à la fréquence f , est donnée d'après l'équation Eq. (III.1) en régime harmonique par :

$$V(f) = N \cdot A \cdot 2\pi f \cdot B(f) \quad (\text{III.4})$$

La sensibilité S est définie comme le rapport entre la tension de sortie de la bobine et le champ magnétique :

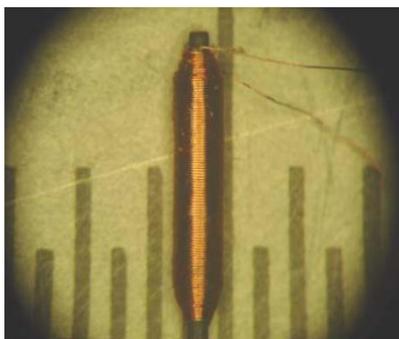
$$S = \frac{V}{B} = N \cdot A \cdot 2\pi f \quad (\text{III.5})$$

La sensibilité du capteur est proportionnelle à la fréquence de travail et au nombre de spires.

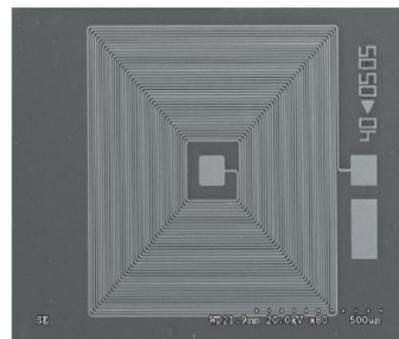
En CND, la fréquence de travail est choisie en fonction de l'application. Dans le cas de détection de défauts profonds, et donc avec de basses fréquences de travail, la sensibilité de la bobine est réduite. Une solution est l'accroissement du nombre de spires et du diamètre de la bobine avec une perte en résolution spatiale. La sensibilité peut être améliorée en utilisant des noyaux ferromagnétiques. Mook et al. [Mook et al., 2007] atteignent la limite des technologies classiques en réalisant avec un fil de cuivre de $30\mu\text{m}$ de diamètre un bobinage de $0,5\text{ mm}$ de diamètre, 3 mm de hauteur et environ 1000 spires, comme montré sur la figure III.5a. On a recours également à des bobinages planaires gravés par des techniques identiques à celles des circuits imprimés avec des résolutions d'environ $100\mu\text{m}$ sur $100\mu\text{m}$ (largeur des pistes plus la largeur de l'isolant entre les pistes). Des procédures photolithographies permettent également d'augmenter la finesse de gravure des spires, avec de résolution d'environ $25\mu\text{m}$ sur $25\mu\text{m}$, que l'on appelle "micro-bobine". De plus avec cette technique nous avons la possibilité d'utiliser des supports flexibles, qui augmentent l'efficacité de l'inspection.

A titre d'exemple sur la figure III.6 est présentée une sonde à courants de Foucault composée de 32 éléments de type micro-bobines gravées sur un film souple de $50\mu\text{m}$ d'épaisseur de Kapton (polymère à base d'imide) [Marchand et al., 2008].

Les capteurs multiéléments à base de micro-bobines ont l'avantage d'avoir une haute résolution spatiale et la capacité d'effectuer des balayages de grandes zones dans un temps raisonnable. Par contre, leur sensibilité aux basses fréquences est limitée en raison du nombre de spires limité.



(a) Bobinage de $0,5\text{ mm}$ de diamètre et 3 mm d'hauteur composé d'environ 1000 spires et réalisé avec un fil de cuivre de $30\mu\text{m}$ de diamètre



(b) Exemple de micro-bobine planaire avec une surface de 1 mm^2 , composé d'environ 40 spires

Figure III. 5 : Photographies de bobinages. A gauche, réalisé en fil de cuivre et à droite obtenu par un procédé photolithographique.

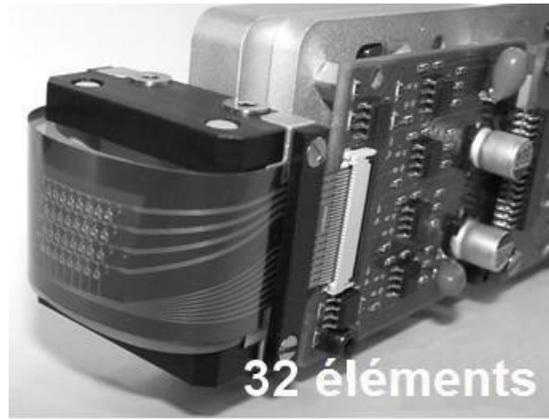


Figure III. 6 : Sonde à courants de Foucault composée de 32 éléments de type micro-bobines gravées sur un film de Kapton

III.3.5.Types de capteurs inductifs

Le champ émis par un élément de mesure est de l'ordre de 100 à 1000 A/m, de quelques Hertz à quelques Méga Hertz. Il est symétrique par rapport à l'axe de l'enroulement. L'élément de mesure rayonne sur une étendue observée de l'ordre de 10 fois son diamètre [Shull, 2016]. L'amplitude décroît rapidement lorsque la distance au bobinage émetteur augmente.

Les éléments de mesure peuvent être classés en trois types :

- **Bobine encerclante** : ses enroulements entourent le produit à contrôler. Elle analyse un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active ou effective de la bobine. Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire.

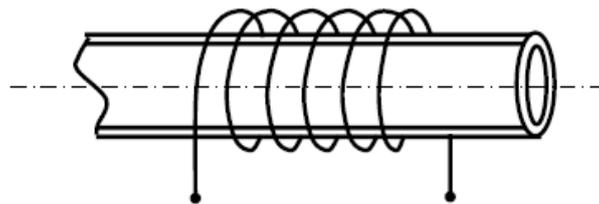


Figure III. 7 : Bobine encerclante

- **Palpeur ou bobine ponctuelle** : ses enroulements forment une petite bobine qui peut être placée sur, ou près, de la surface de la pièce. Il est destiné au contrôle local d'un produit à partir de sa surface, sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Il analyse une zone essentiellement égale à l'aire de sa section transversale. Dans le cas de l'examen d'une surface importante, il nécessite un balayage méthodique de la pièce.

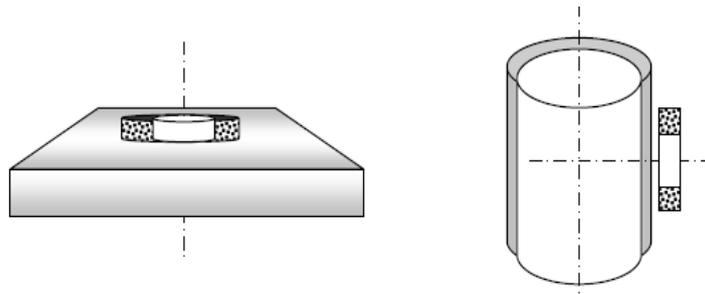


Figure III. 8 : Palpeur

Les palpeurs peuvent être du type à air ou avoir des noyaux magnétiques dans le but d'augmenter l'induction B créée par la bobine excitatrice.

L'usage des palpeurs, tend à se généraliser en raison des exigences d'une précision accrue dans les contrôles.

- **Sonde** : destinée au contrôle d'un produit par l'intérieur, elle peut être déplacée à travers un tube ou une conduite. On distingue la « sonde tournante » constituée d'un palpeur tournant autour de l'axe de translation et la « sonde axiale » dont les enroulements sont bobinés autour de l'axe de translation.

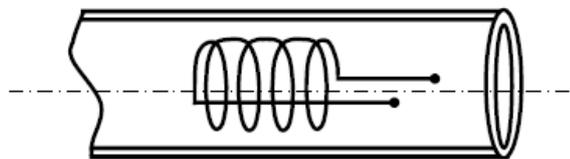


Figure III. 9 : Sonde interne

III.3.5.1. Fonctions du capteur

Le fait qu'un bobinage peut être inducteur ou induit donne la possibilité au capteur de jouer le rôle de l'émetteur ou de récepteur ou les deux fonctions simultanées [Shokralla et al., 2016].

- **Les capteurs à double fonction**

C'est le cas dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par la ou les même (s) bobines [Oka et al., 2010] [Burrascano et al., 2001].

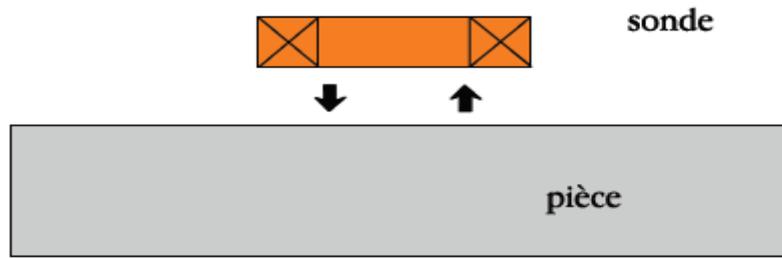


Figure III. 10 : Capteur à double fonction

L'extraction des informations se fait par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou due à la présence d'un défaut dans ce matériau [Knopp et al., 2009] [Le et al., 2014]. Ce type de capteur favorise la mesure de grandeurs à évolution lentes tels que l'épaisseur de revêtement, l'entrefer (lift-off) et la conductivité.

- **Les capteurs à fonctions séparées**

Ces capteurs possèdent un enroulement dédié à l'excitation et un autre à la mesure. Cette conception est souvent utilisée pour la détection de défaut de grande taille ou profond.

Le principe de la détection est basé sur la traversée du champ d'une zone à une autre. La détection de ce genre de défaut nécessite l'augmentation des dimensions de la bobine d'excitation. Cette augmentation de la taille du capteur se fait au détriment de sa résolution spatiale lors de la réception. C'est alors qu'on associe la réception à une autre bobine de taille souvent plus petite que celle de l'émetteur. Les enroulements peuvent être alors enchevêtrés ou séparés.

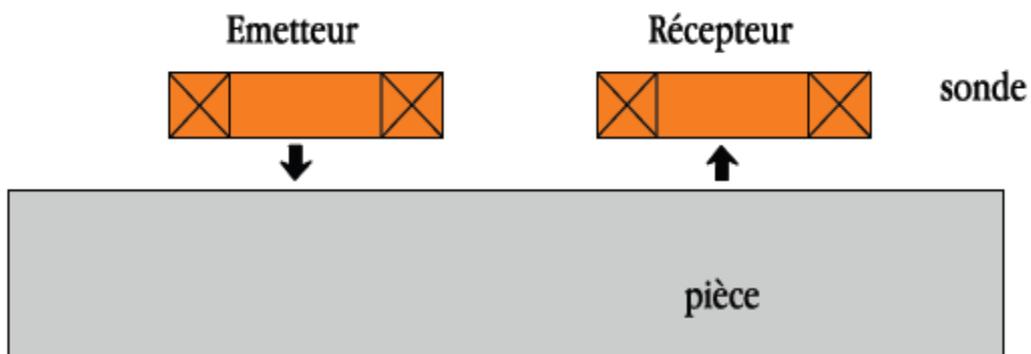


Figure III. 11 : Capteur à fonctions séparées

III.3.5.2. Mode de contrôle

En fonction de l'intensité du champ, qui dépend des caractéristiques électromagnétiques de la pièce à identifier ou à contrôler et des perturbations éventuelles, on compte trois modes de mesure :

- Mode de contrôle absolu
- Mode de contrôle compensé
- Mode de contrôle différentiel

- **Mode de contrôle absolu**

Un capteur absolu est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe. Le signal récupéré par la bobine est très faible en comparaison au signal émis. C'est pourquoi on utilise, en contrôle par courants de Foucault, une mesure comparative. La méthode absolue utilise un capteur à double fonction et la mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique. Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément aux grandeurs utiles et perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau à tester).

Ce type de contrôle est préférentiellement utilisé dans le domaine de la caractérisation électromagnétique et géométrique [Aldrin & Knopp, 2006].

- **Mode de contrôle compensé**

Pour s'affranchir des grandeurs perturbatrices, on réalise le mode absolu compensé. Dans ce mode de contrôle on utilise deux bobines.

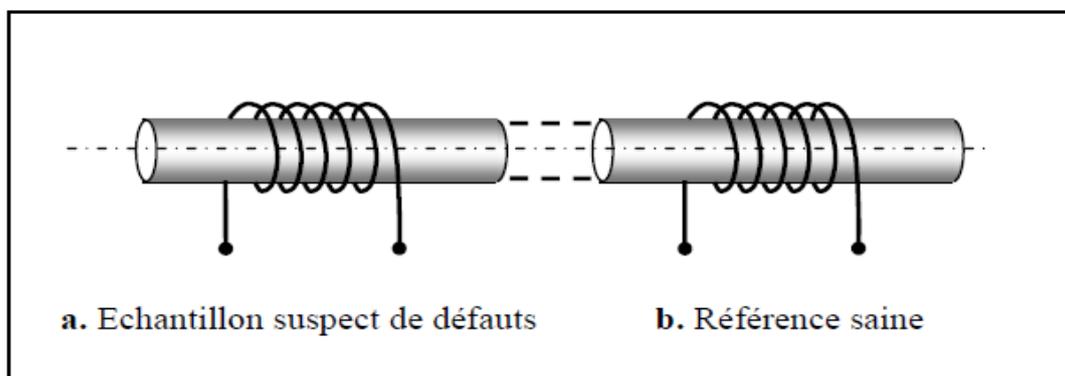


Figure III. 12 : Mesure absolue compensée

L'une est positionnée à proximité d'une surface d'une pièce à contrôler et l'autre à proximité d'une autre surface saine du même matériau, comme le montre la figure I.11. La première capte les grandeurs utiles et perturbatrices alors que l'autre ne capte que les signaux perturbateurs. Une mesure comparative permet d'extraire seulement les signaux utiles.

- **Mode de contrôle différentiel**

Cette technique utilise deux capteurs absolus écartés, montés en tête-bêche parcourus par le même courant mais de signe opposé comme le montre la figure I.13. La mesure différentielle est équivalente à la comparaison permanente de deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Dans le cas de pièce saine, l'impédance du capteur différentiel est nulle. La réponse est sensible seulement aux variations brusques de la géométrie de la pièce à contrôler.

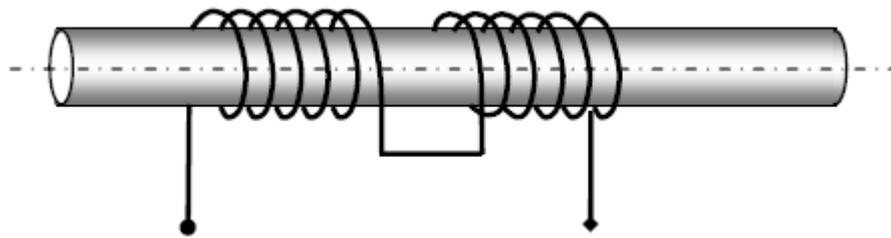


Figure III. 13 :Mesure différentielle

Cette méthode est essentiellement utilisée en contrôle de santé [Gaktepe, 2001] [Shull, 2016]. Elle permet de mettre en évidence des défauts métallurgiques (anisotropie) et les variations dimensionnelles brutales telles que des fissures. Les défauts ponctuels sont bien détectés.

L'avantage de ce mode de mesure réside dans la suppression de tout signal dû à des variations lentes telles que les variations dimensionnelles ou les fluctuations de température ou de conductivité.

III.4. LCR mètre 8101-G (Gw INSTRON)

Le LCR mètre LCR-8101G, avec une fréquence de test allant jusqu'à 1MHz, offre précision, polyvalence et une haute résolution pour une large gamme de mesure d'impédance, y compris la mesure de la résistance en DC.



Figure III. 14 : LCR mètre 8101-G (Gw INSTRUK)

Avec son mode graphique (Figure III.15), le LCR-8101G trace l'impédance sur un large éventail de balayage de fréquence de test ou sur une large plage de balayage en tension de test dans un graphe. Cela donne un résultat d'analyse de l'impédance par rapport à la fréquence ou l'impédance par rapport à la tension appliquée. Les interfaces GPIB et RS-232C sont disponibles en option pour le contrôle de l'instrument et l'affichage des résultats de test sur PC [Thollon & Burais, 1995] [Wang et al., 2015].

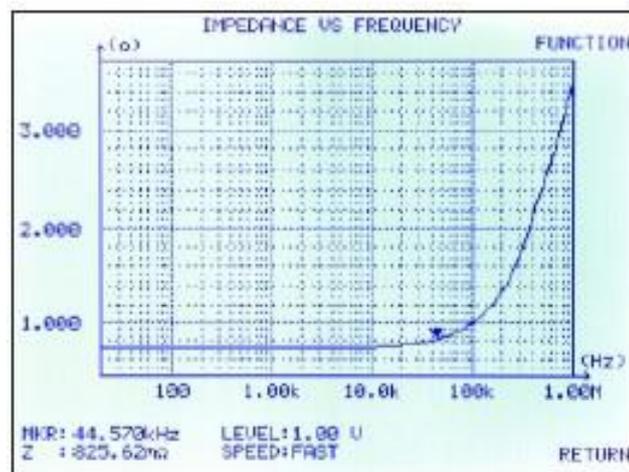


Figure III. 15: Mode graphique du LCR-8101G

Tous les éléments de la chaîne de mesure, en l'occurrence le générateur, l'amplificateur, le démodulateur et l'afficheur, sont montés de manière compacte à l'intérieur de cet appareil. Nous présentons dans la figure III.18 les signaux enregistrés dans le cas d'une plaque en cuivre contenant une fente droite (perpendiculaire à la surface de l'échantillon) de 1,3 mm de profondeur, de 2 mm de largeur et de 12 mm de longueur (voir figures III.16 et III.17) [Hamel, 2012].

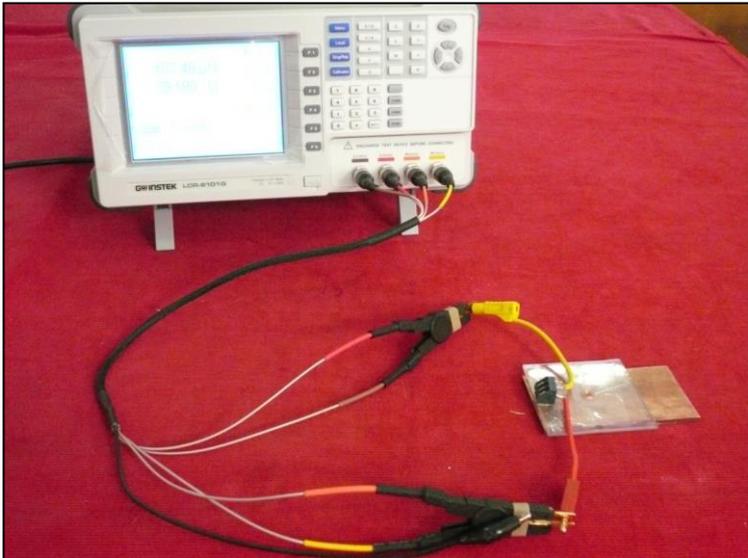


Figure III. 16 : Système expérimental

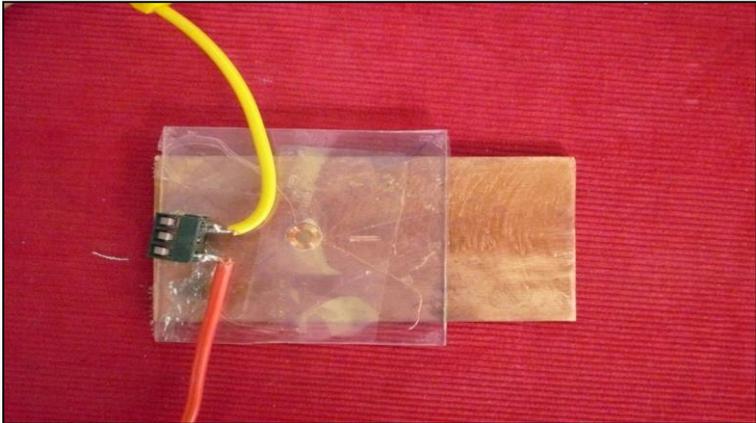


Figure III. 17 :Ensemble capteur-cible

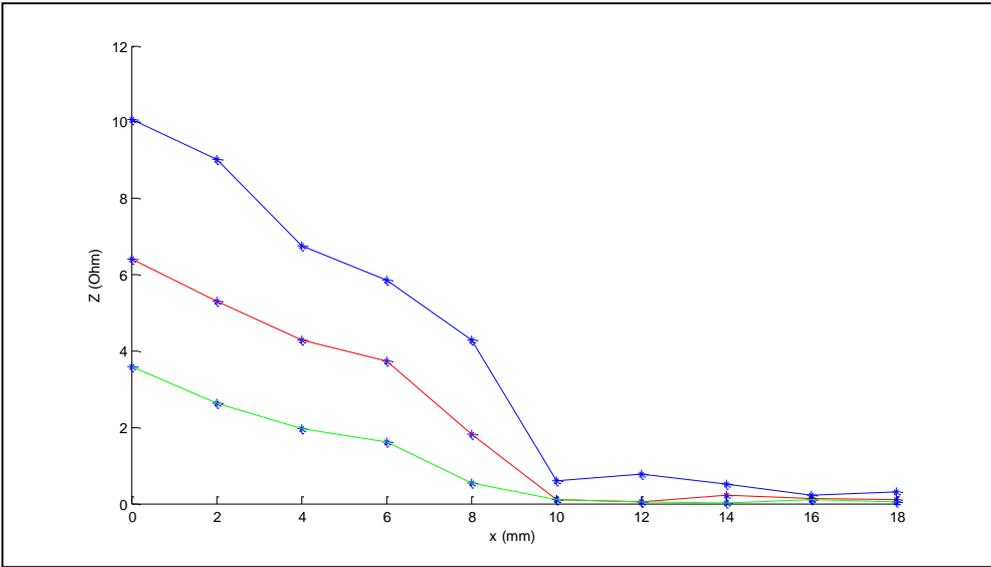


Figure III. 18 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur

III.5. NORTEC 500

L'appareil NORTEC 500 (voir figure III.19), est un appareil de recherche de défauts par courants de Foucault fabriqué par Olympus NDT, il comprend toute une gamme de fonctions : des bobines de compensation internes, un port de sortie VGA (pour les afficheurs à tête haute, les moniteurs et les appareils de projection) et une interface USB (pour le transfert rapide de l'information) [Mohseni et al., 2016].

Le NORTEC 500 apporte des améliorations aux précédents appareils à courants de Foucault d'Olympus. Il inclut la fonction de connectivité numérique et offre une résolution accrue avec réduction du bruit. Les bobines de compensation internes permettent l'utilisation de sondes absolues peu coûteuses, sans avoir besoin d'adaptateurs de bobines de compensation externes. Un préamplificateur intégré apporte le gain supplémentaire nécessaire lors des contrôles difficiles. La sortie VGA permet l'ajout d'un afficheur. Un adaptateur de remise à zéro à distance (en option) ajoute un élément de commodité en rendant possible la réinitialisation de la sonde et l'effacement de l'écran de l'appareil à partir de la sonde [Almeida et al., 2013] [Nurul et al.,].

Le NORTEC 500 peut aussi effectuer la mesure numérique de la conductivité et de l'épaisseur du revêtement.



Figure III. 19 : NORTEC 500

Les signaux CF de l'appareil NORTEC 500 sont obtenus, en effectuant des déplacements du capteur à travers un l'échantillon test « Nortec TB-S1 EDM Standard » contenant trois fissures de 0.04", 0.02", et 0.008" de profondeur respectivement. À chaque position du capteur, une mesure de l'impédance complexe du système est réalisée. L'acquisition des données par le NORTEC 500 permet de tracer les signatures des différentes fissures, comme le montre la figure III.20.

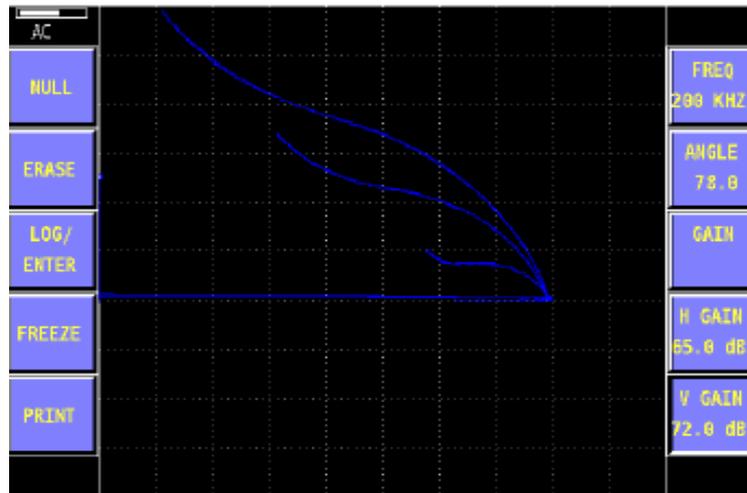


Figure III. 20 : Plan d'impédance pour différentes fissures

III.6. LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un langage de programmation dédié au contrôle d'instruments et l'analyse de données. Contrairement à la nature séquentielle des langages textuels, LabVIEW est basé sur un environnement de programmation graphique utilisant la notion de flot de données pour ordonnancer les opérations. Grâce à LabVIEW, on peut créer des programmes compilés qui offrent des vitesses d'exécution nécessaires pour des solutions d'acquisition de données, de test et mesures personnalisées. On peut également créer des exécutables autonomes [Park et al., 2009] [Wenliang et al., 2011] [Ding & Qian, 2009].

L'utilisation d'ordinateurs pour l'acquisition et l'analyse de données ainsi que le contrôle d'instrumentation dans les systèmes de CND-CF a augmenté rapidement au cours des dernières années. LabVIEW est un environnement de programmation graphique puissant et polyvalent qui a été développé principalement pour faciliter le contrôle de l'instrumentation et l'acquisition et l'analyse de données. Les applications créées avec LabVIEW sont appelées instruments virtuels (VIs).

Le code source VI est créé en utilisant le langage de programmation graphique G dans une fenêtre appelée Block diagramme. LabVIEW implémente un flux de données dans lequel le code n'est pas écrit, mais dessiné ou représenté graphiquement similaire à un organigramme. LabVIEW possède plusieurs fonctionnalités clés qui en font un bon choix dans un environnement d'automatisation. Elles incluent une communication réseau simple, une implémentation clé en main avec les protocoles de communication courants (RS232, GPIB, etc.) [Wang et al., 2013] [Nithyaa et al., 2013].

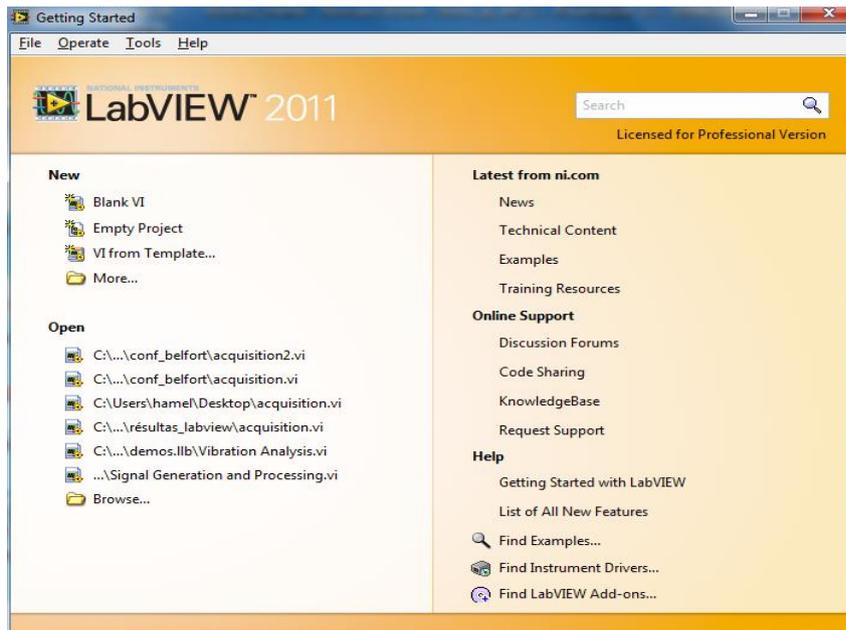


Figure III. 21 : Fenêtre de démarrage du logiciel LabVIEW

III.7. Instruments virtuels

Les programmes LabVIEW sont appelés instruments virtuels (Virtual Instruments en anglais) ou encore VI. Ceci est dû au fait que leur apparence et mode de fonctionnement ressemble à celui d'instruments physiques comme les oscilloscopes ou les multimètres par exemple. Chaque VI est constitué de ces éléments suivants :

- Face avant (front panel) : Sert d'interface utilisateur
- Diagramme (block diagram) : Contient le code source sous forme graphique qui définit les fonctionnalités du VI [Giannone et al., 2011] [Darrer et al., 2015] [Hamel & Mohellebi, 2018].

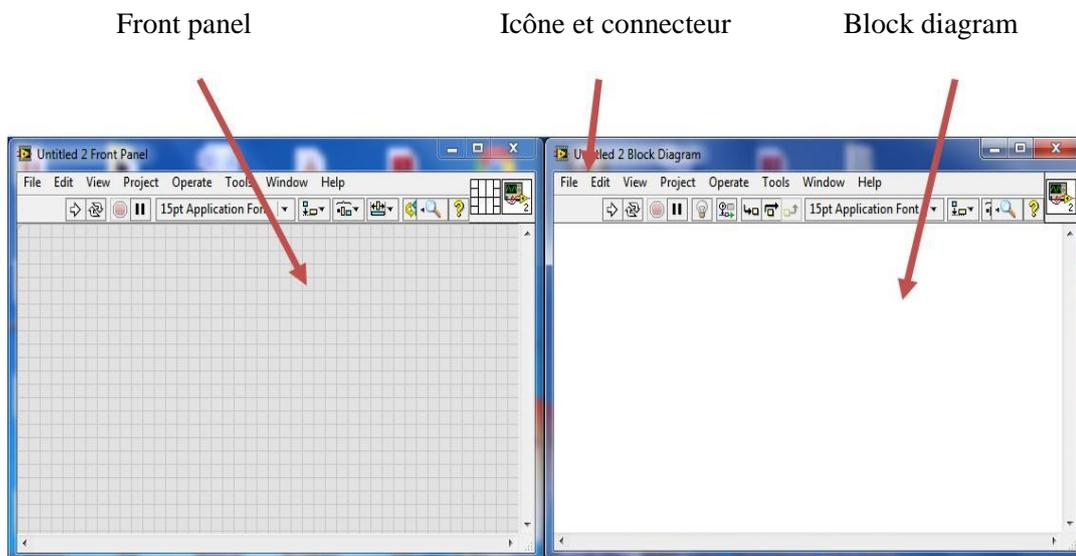


Figure III. 22 : Composantes d'un VI

- **Face avant (front panel) :**

La face avant d'un VI est avant tout une combinaison de commandes et d'indicateurs. Les commandes sont les entrées des VIs, elles fournissent les données au diagramme. Les indicateurs sont les sorties des VIs et affichent les données générées par le diagramme.

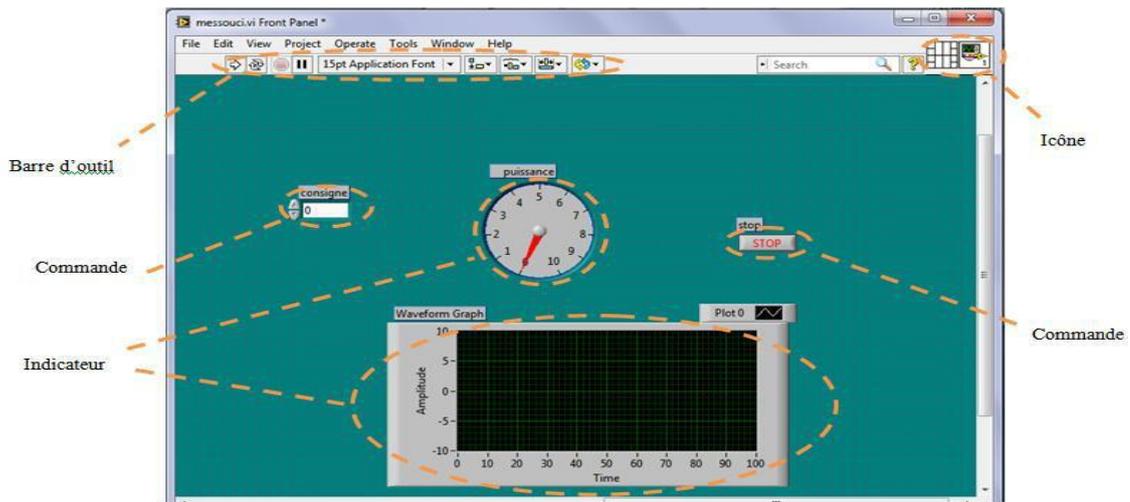


Figure III. 23 : Face avant (front panel) d'un VI

Les commandes peuvent être des interrupteurs, des boutons poussoir, des boîtes de dialogue, et d'autres composants d'entrée. Les indicateurs sont des graphiques, des LEDs et d'autres systèmes d'affichage.

- **Diagramme (block diagram) :**

Après avoir réalisé la face avant, on ajoute du code en utilisant des représentations graphiques de fonctions pour contrôler les objets se trouvant en face avant. Le diagramme va contenir le code source sous forme de graphique. Les objets de la face avant apparaîtront comme des terminaux (d'entrée ou de sortie) du diagramme.

En plus, le diagramme va pouvoir contenir des fonctions et des structures qui sont disponibles dans les bibliothèques de VI de LabVIEW. Des fils relieront chacun des terminaux du diagramme en incluant les contrôles et les indicateurs, les fonctions et les structures.

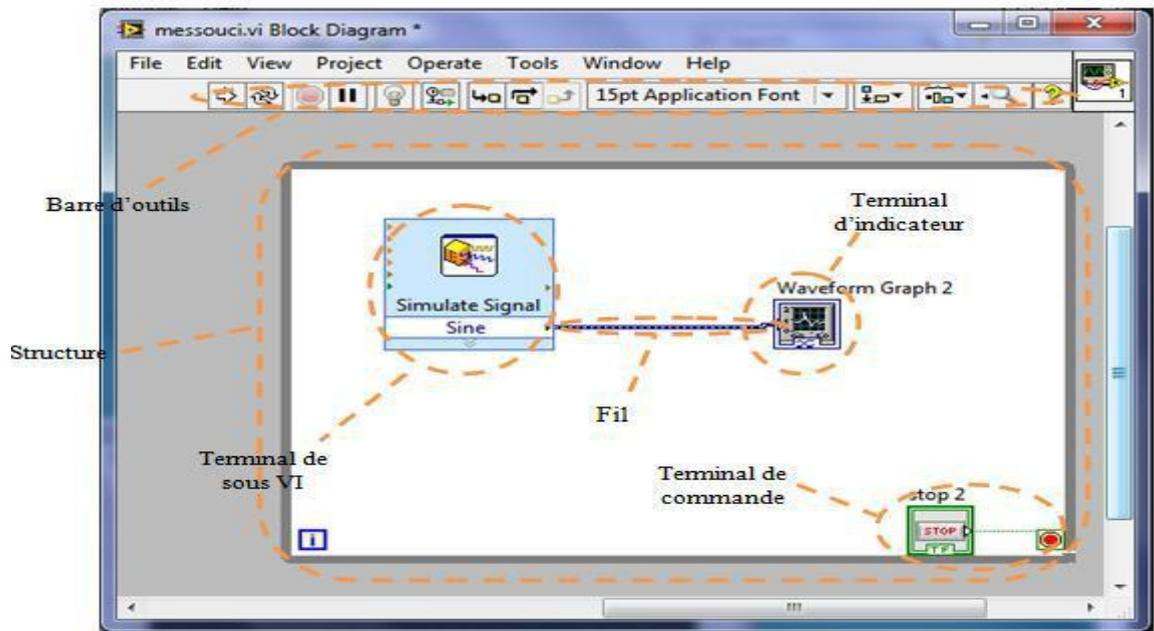


Figure III. 24 : Block diagramme

III.8. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons d'abord présenté un panorama, qui ne prétend pas être exhaustif, des capteurs les plus utilisés dans les applications de CND. Ensuite, les différents dispositifs expérimentaux de mesure et le mode opératoire associé à l'acquisition du signal de mesure ont été illustrés. Nous avons aussi présenté le logiciel LabVIEW, un logiciel incontournable dans les solutions d'acquisitions de données que nous avons exploité par la suite du travail dans la réalisation des bancs d'essais CND-CF.

Chapitre IV:

Dispositifs à courant de Foucault pour la caractérisation des défauts dans les matériaux conducteurs

IV.1. Introduction.....	70
IV.2. Système d'acquisition en temps réel basé sur LabVIEW pour la détection de fissures dans des matériaux conducteurs	70
IV.2.1. Système expérimental	71
IV.2.2. Résultats	72
IV.3. Système expérimental d'imagerie par courants de Foucault.....	75
IV.3.1. Système expérimental	75
IV.3.2. Résultats	77
IV.4. Conclusion.....	79

IV.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les différents résultats de validation obtenus pour des systèmes d'acquisition développés sous LabVIEW, des systèmes correspondant à des détecteurs de défauts dans les matériaux conducteurs.

Des acquisitions ont été effectuées au sein du laboratoire et nous présentons ici les chaînes de mesure utilisées ainsi que les différents traitements nécessaires à la validation. Cette validation nous a permis de s'assurer que les configurations donnaient des résultats corrects.

Les résultats obtenus sont en termes d'impédance étant donné que les capteurs utilisés pour la mesure sont des bobines.

IV.2. Système d'acquisition en temps réel basé sur LabVIEW pour la détection de fissures dans des matériaux conducteurs

Cette application a été mise en œuvre dans le cadre de l'acquisition de la réponse d'une sonde à des fissures de petites dimensions. Il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au-dessus d'une plaque en cuivre comportant une fissure orientée selon l'axe Oy (Voir Figure IV.1). Les différents paramètres du capteur et de la plaque sont listés dans le tableau IV.1.

Ainsi, afin de valider pleinement le modèle, nous avons choisi de comparer les résultats à ceux obtenus grâce au calcul numérique par la méthode des éléments finis 3D adoptant la formulation $\vec{T} - \Omega$.

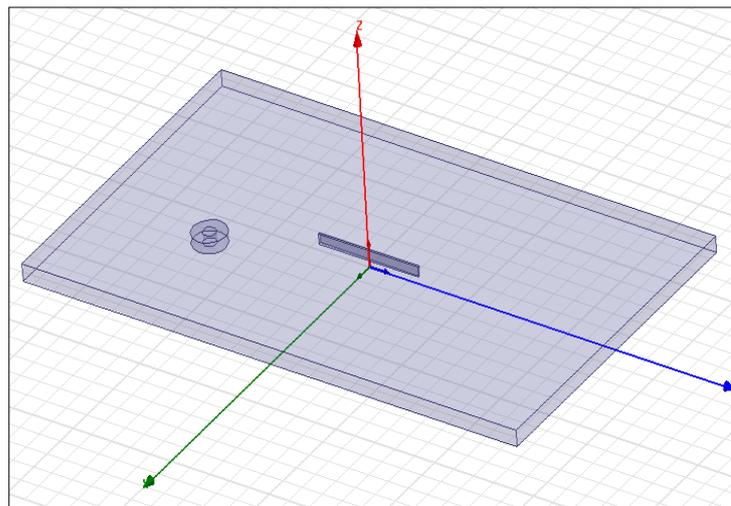


Figure IV. 1 : Configuration 3D du système

Tableau IV. 1 : Les paramètres de la bobine et de la plaque

Paramètres	Valeurs
Bobine	
Rayon intérieur	2.35 mm
Rayon extérieur	4.5 mm
Hauteur	2.2 mm
Lift-off	0.13 mm
Nombre de spires	175
Fréquence	50, 100 et 150 kHz
Plaque	
Épaisseur	4 mm
Conductivité	58 MS/m
Fissure	
Longueur	12 mm, 8 mm
Profondeur	1.3 mm

IV.2.1. Système expérimental

Une photographie du système expérimental est montrée dans la figure IV.2. Des acquisitions ont été effectuées au sein du laboratoire sur la cible précédemment présentée et ce pour différents paramètres géométriques et électromagnétiques.

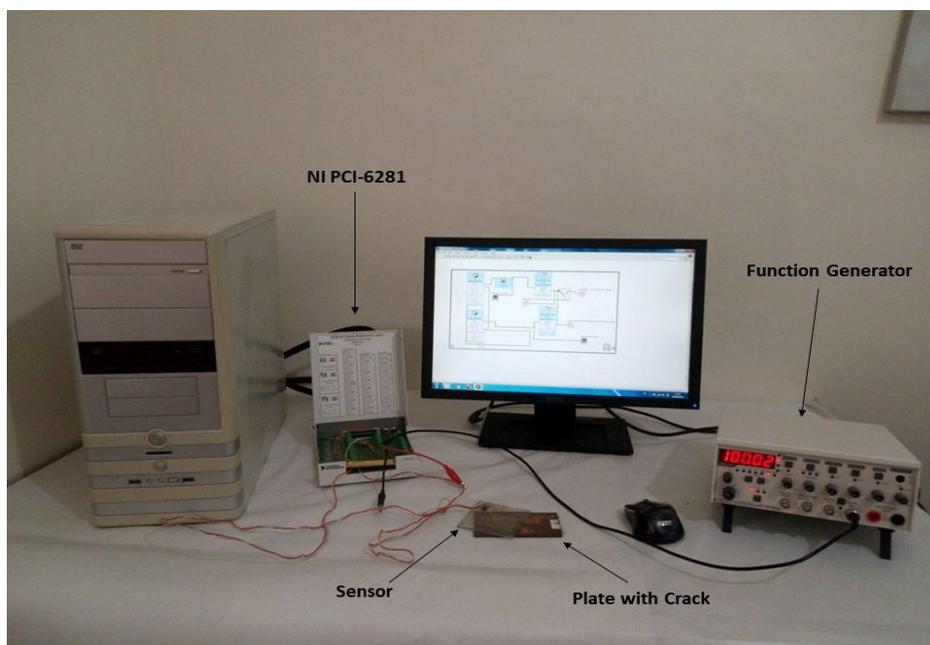


Figure IV. 2 : Photographie du système expérimental

La bobine est alimentée par un générateur de fréquence (GENTRAD 467AF). Un B-scan est effectué et les signaux de tension V_1 , V_2 obtenus respectivement à partir de la résistance shunt R_1 et de la bobine sont appliqués aux entrées analogiques d'une carte d'acquisition 16 bits NI PCI-6281. L'ensemble de la configuration est illustré dans la figure IV.3.

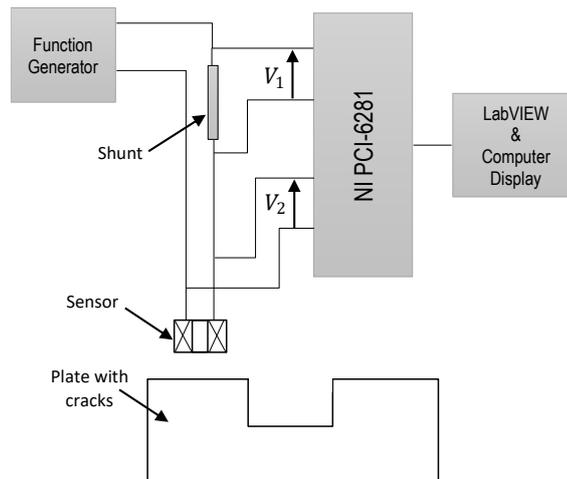


Figure IV.3 : Schémas bloc du système développé

Les scans sont effectués à partir du centre de la fissure. Pour chaque position du capteur, les signaux de sortie sont collectés et le calcul de l'impédance est obtenu à partir d'un programme LabVIEW représenté sur la figure IV.4.

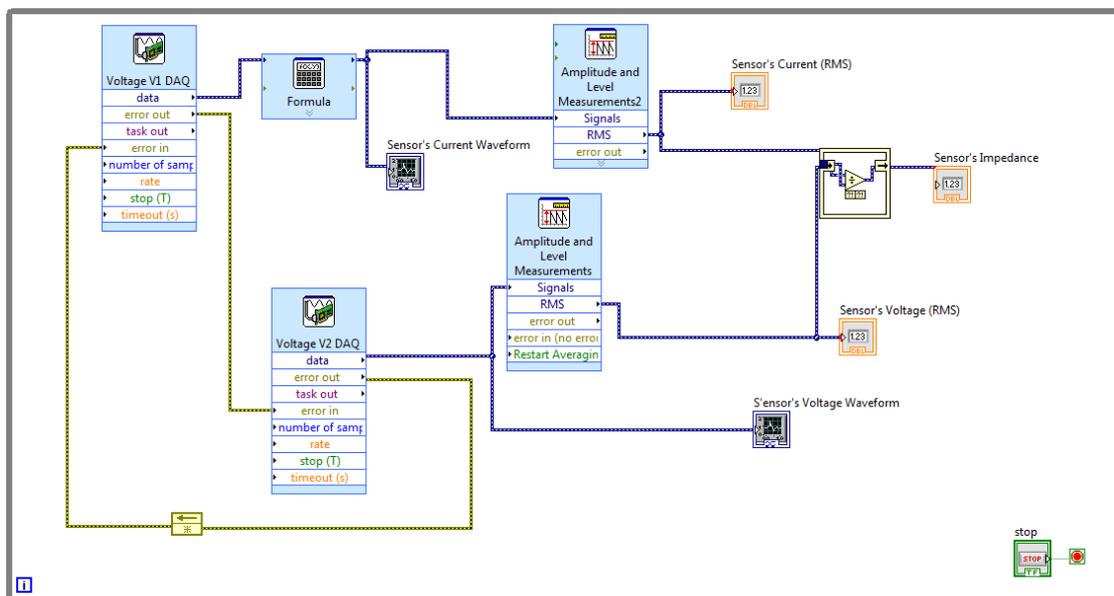


Figure IV.4 : Programme d'acquisition et de calcul d'impédance

IV.2.2. Résultats

Un scan unidimensionnel a été effectué suivant l'axe Oy , les résultats l'expérimentation (variations d'impédance) sont comparés à ceux obtenus par la simulation 3D. La variation de l'impédance, $\Delta Z = Z_f - Z_s$, de la sonde (bobine) est mesurée en fonction de la position de celle-ci. Z_f est l'impédance de la sonde en présence de la fissure

et Z_s est l'impédance de sonde au-dessus d'une zone saine. Tous les résultats sont normalisés par rapport à la valeur de l'impédance de la sonde dans l'air Z_{max} .

La première validation est relative à la modification de la fréquence d'excitation. Les figures IV.5, IV.6 et IV.7 montrent la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux. Dans tous les cas, nous avons un très bon accord entre les deux résultats.

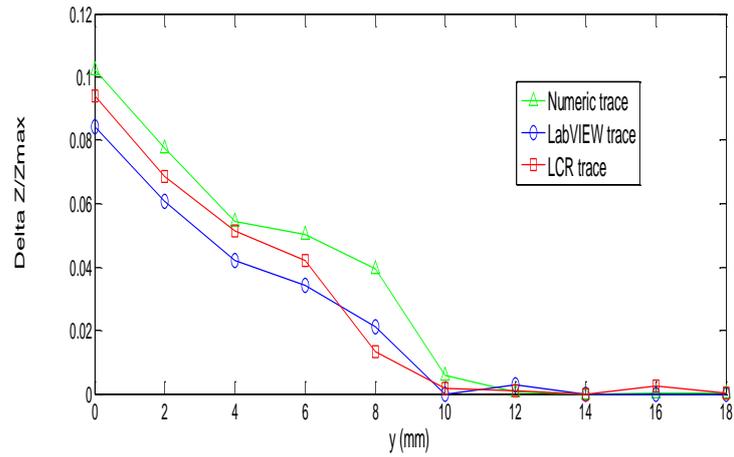


Figure IV. 5 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=50$ kHz

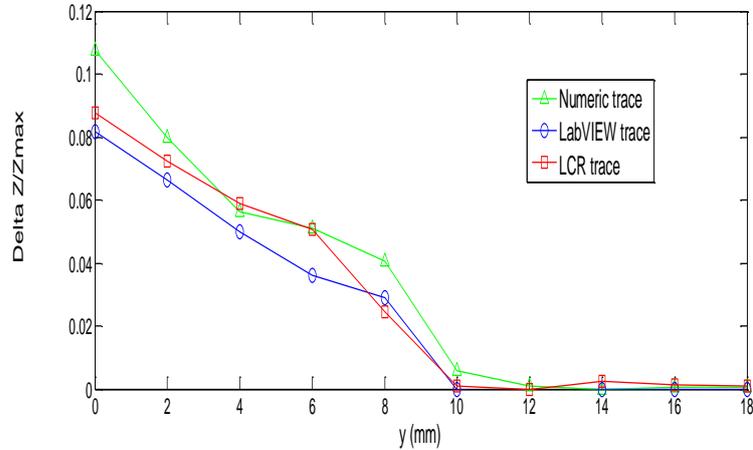


Figure IV. 6 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=100$ kHz

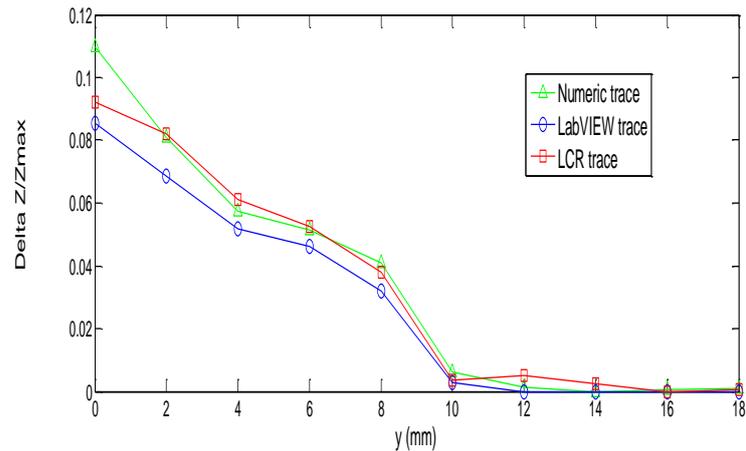


Figure IV. 7 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=150$ kHz

Dans un second temps, nous avons augmenté le lift-off à 0,52 mm. La figure IV.8 montre la variation d'impédance du capteur en fonction du déplacement. Dans ce cas également, nous avons une très bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux.

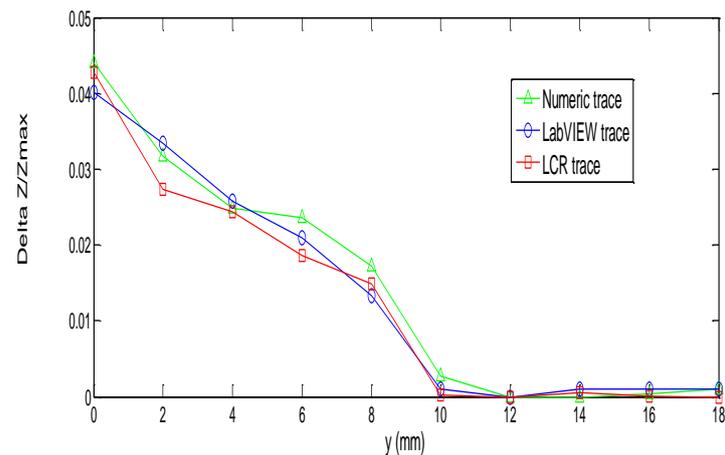


Figure IV. 8 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=100$ Hz

La troisième validation est relative au cas du changement de la longueur du défaut. La figure IV.9 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques en fonction de la position de la bobine pour un défaut de 8 mm de longueur. Dans ce cas aussi nous avons trouvé une bonne concordance.

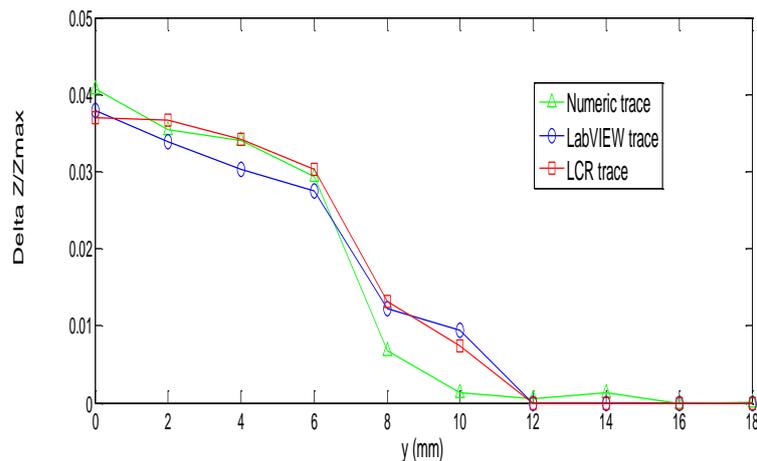


Figure IV. 9 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=50\text{Hz}$

Le système d'acquisition mis en place nous a permis de réaliser l'acquisition en temps réel de l'impédance en utilisant une carte d'acquisition performante de National Instruments NI et le logiciel LabVIEW pour garantir la précision et la stabilité des mesures. Les simulations numériques, réalisées avec la méthode des éléments finis, en utilisant le modèle de formulation $T-\Omega$, valident les données expérimentales. Cette validation numérique est recommandée car les mesures dépendent de nombreux facteurs propres au capteur et à la cible. Les résultats pour différents paramètres sont cohérents avec les résultats de la simulation et ceux obtenus avec l'appareil commercial LCR-mètre GW-INSTEK 8101G.

IV.3. Système expérimental d'imagerie par courants de Foucault

L'Inconel-600 est un alliage nickel/chrome avec une bonne résistance à l'oxydation et aux hautes températures. Il résiste aux fissures de corrosion sous contraintes provoquées par l'ion chlore, à la corrosion produite par l'eau pure et à la corrosion caustique. On l'utilise dans la fabrication d'éléments pour les chambres à combustion, dans le génie nucléaire et dans l'industrie aéronautique et plus particulièrement pour les pièces des parties chaudes des réacteurs (Voir figure IV.10).

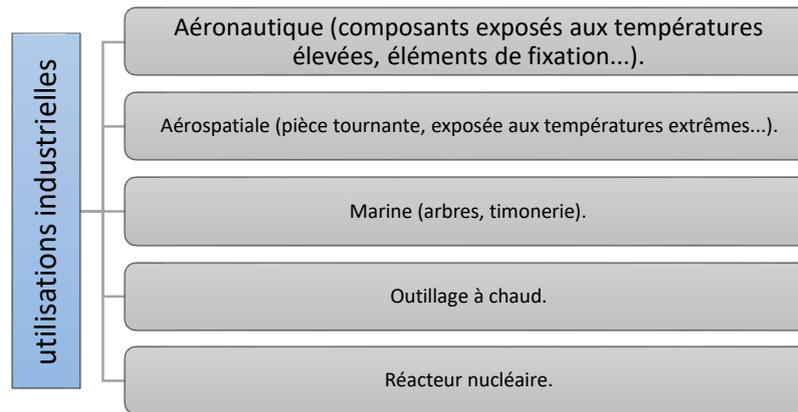


Figure IV. 10 : Applications industrielles de l'Inconel-600

IV.3.1. Système expérimental

Des acquisitions ont été effectuées au sein du « Research Center for Real Time NDT » à l'université de Chosun en Corée du Sud sur une cible en Inconel-600 pour différentes entailles en utilisant un système automatisé comprenant :

- L'appareil de détection de défauts Nortec 500 (Figure IV.11)
- Un robot permettant le déplacement de la sonde selon les trois axes (x,y,z) (Figure IV.12)
- Un ordinateur équipé de LabVIEW est utilisé pour permettre de commander l'ensemble des opérations de mesure et l'exploitation des signaux.
- La cible est constituée d'une plaque d'Inconel-600 comportant un certain nombre d'entailles artificielles débouchantes réalisées par électroérosion et dont les caractéristiques sont reportées dans la (Figure IV.13)

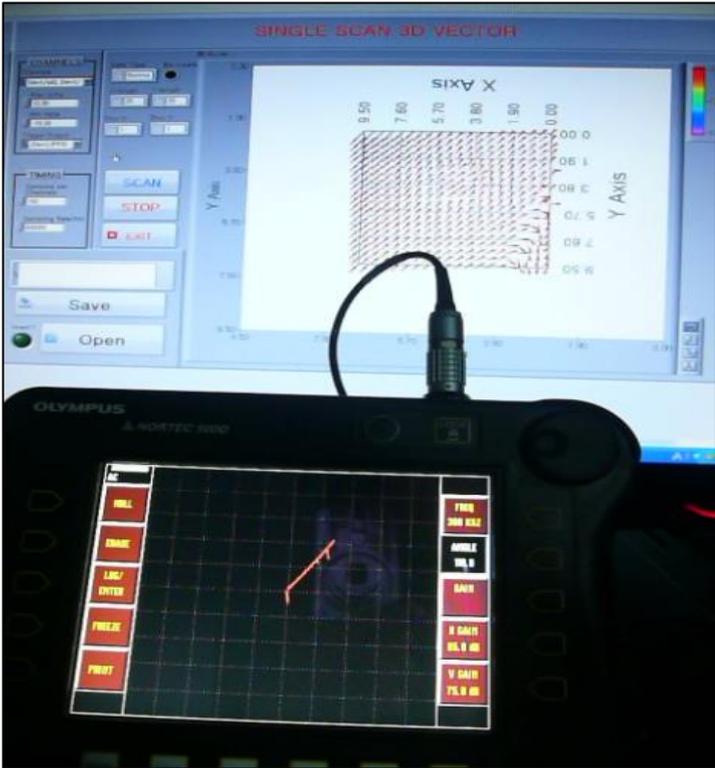
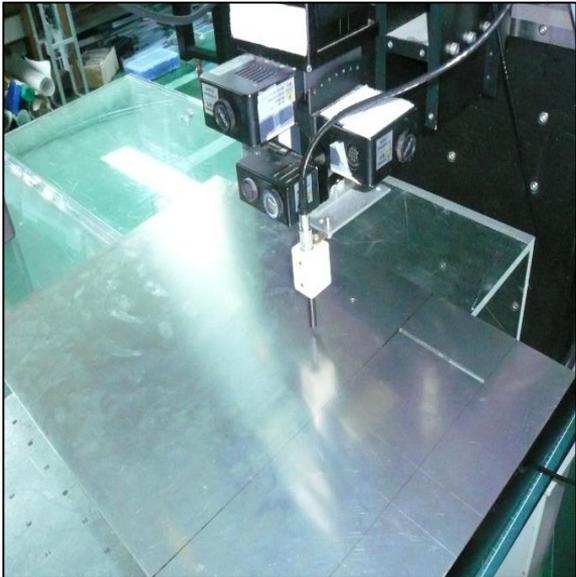


Figure IV. 11 : Appareil de détection de défauts Nortec 500



(a)



(b)

Figure IV. 12 : (a) Scanneur 3D (b) Sonde avec la cible à inspecter

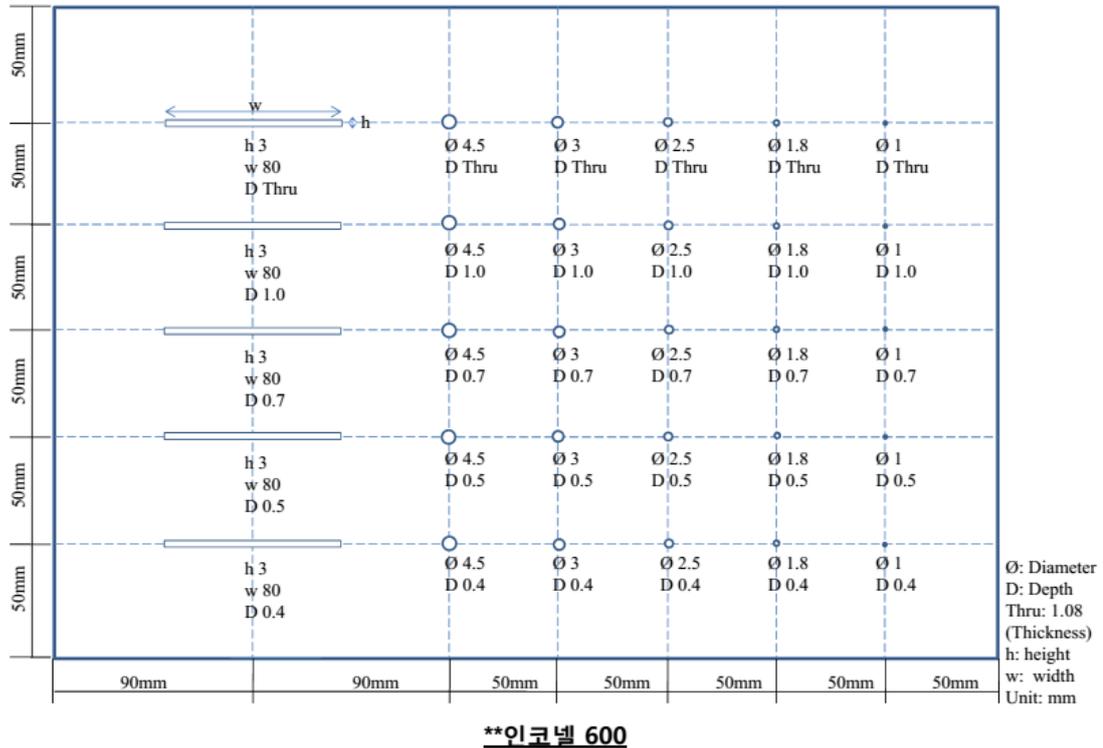


Figure IV. 13 : Caractéristiques géométriques de la plaque d'Inconel-600

IV.3.2. Résultats

Des scans bidimensionnels ont été effectués suivant le plan xy. Les signaux sont lus avec le détecteur de défauts Olympus NORTEC 500D et les données sont traitées et stockées en permanence sur un PC équipé de LabVIEW.

Pour chaque défaut les données sont recueillies pour des fréquences et des lift-off multiples. Les images qui en résultent représentent la variation de l'impédance suivant le plan xy. Les scans sont représentés dans les figures IV.14, IV.15 et IV.17.

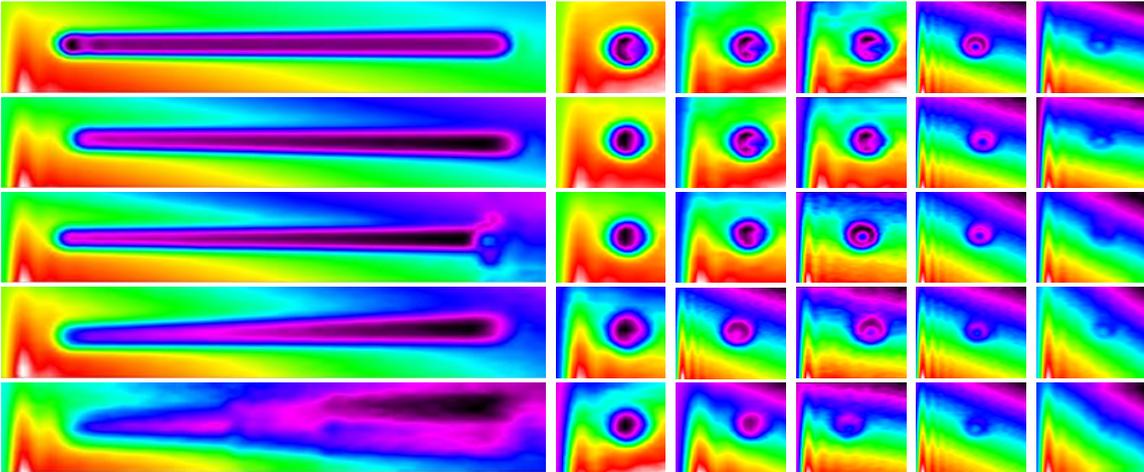


Figure IV. 14 : Image obtenue pour des défauts débouchants à 200 kHz et à un lift-off de 1mm

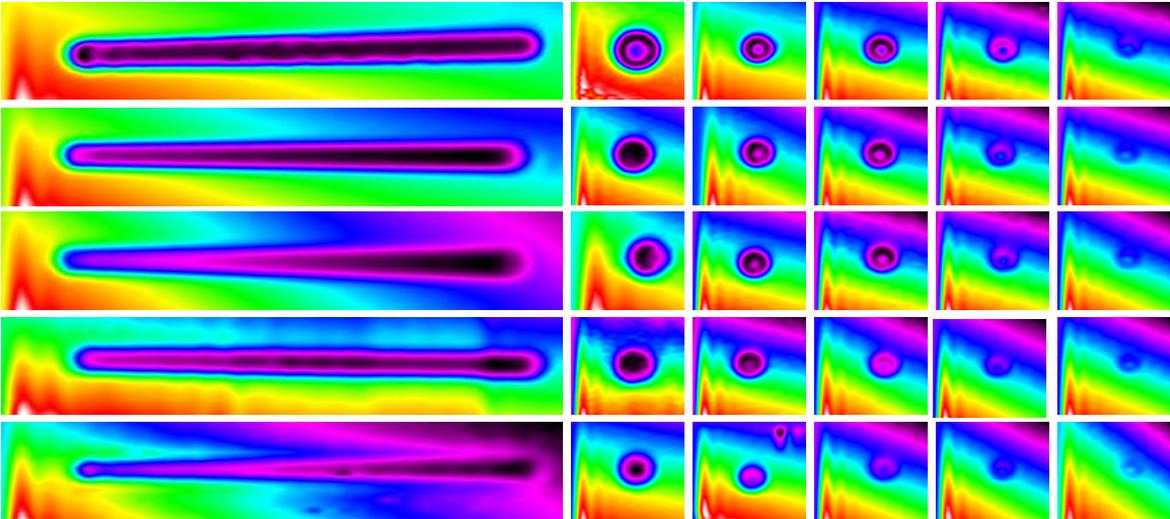


Figure IV. 15 : Image obtenue pour des défauts débouchants à 300 kHz et à un lift-off de 1mm

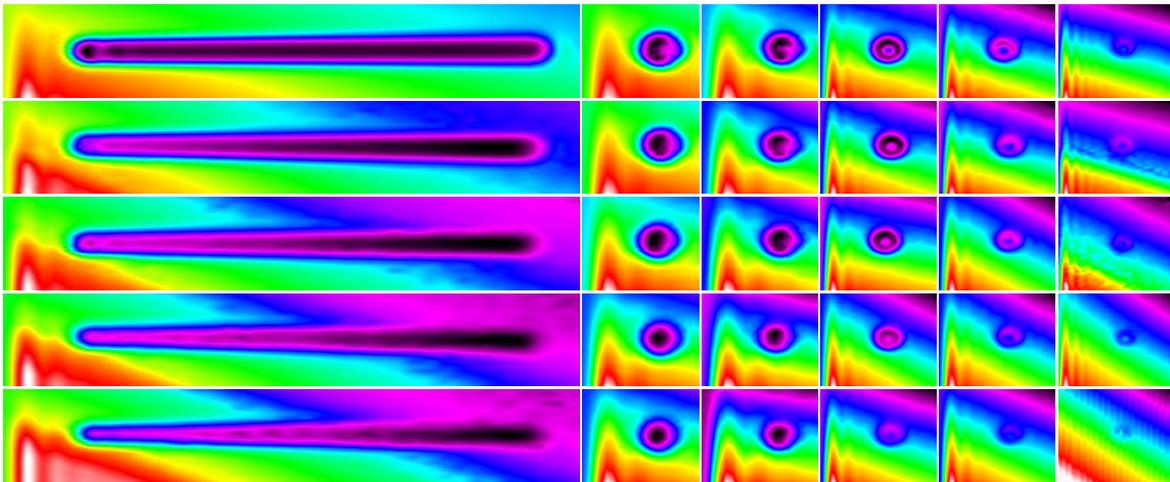


Figure IV. 16 : Image obtenue pour des défauts débouchants à 200 kHz et à un lift-off de 0.5mm

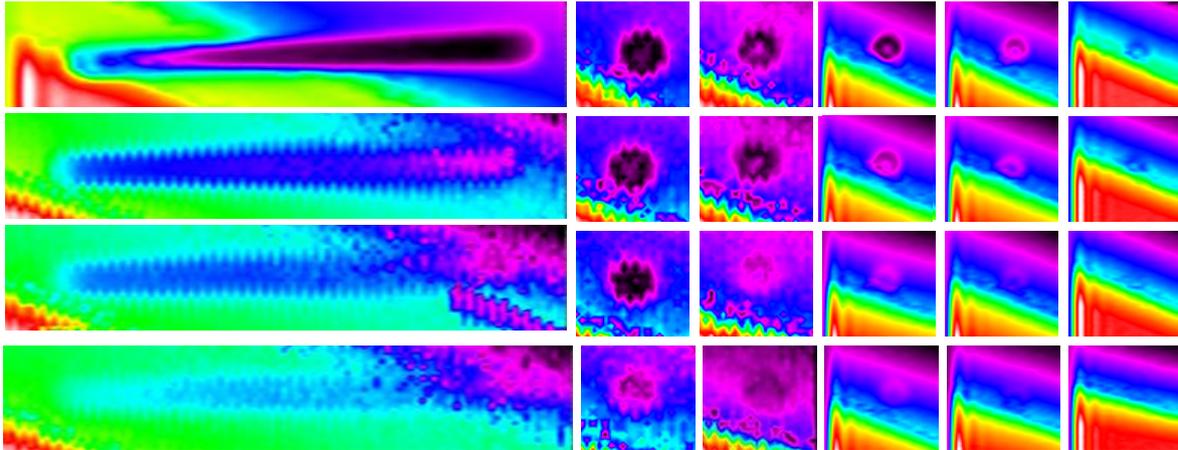


Figure IV. 17 : Image obtenue pour des défauts enfouis à 200 kHz et à un lift-off de 1mm

La distribution spatiale du champ magnétique dû à la présence d'un défaut, ou encore la signature CF d'un défaut, est directement liée à la densité locale de courants de Foucault dans la cible. C'est pourquoi il est nécessaire d'étudier l'influence des paramètres intrinsèques à la bobine inductrice, tels que la fréquence d'excitation, ses dimensions, la structure de son bobinage ou encore sa position relative à la cible (le lift-off).

Nous avons effectué des scans en variant la fréquence d'excitation et le lift-off. Les images obtenues montrent les cartographies de l'impédance pour chaque défaut. Les dimensions des défauts peuvent être estimées à partir de ces images. De plus, la résolution est meilleure en augmentant la fréquence (Figure IV.15) ou en diminuant le lift-off (Figure IV.16).

IV.4. Conclusion

Au cours de ce dernier chapitre nous avons présenté deux dispositifs de mesure expérimentaux, à temps réel, basés sur le LabVIEW.

Les deux dispositifs sont aptes à acquérir de manière efficace et avec précision le signal CF induit par des défauts fins à travers l'évaluation de l'impédance des capteurs. L'acquisition de cette dernière est réalisée en B-scan ou en C-scan.

Pour vérifier les résultats expérimentaux, des simulations ont été effectuées en utilisant la méthode des éléments finis et des tests ont été réalisés en exploitant l'appareil commercial LCR-mètre GW-INSTEK 8101G.

Conclusion générale et perspectives

Différents secteurs industriels imposent des normes de sécurité contraignantes, par exemple l'aéronautique, le nucléaire... Ces secteurs recourent au contrôle non destructif (CND) pour s'assurer de l'état d'intégrité de leurs matériels. De nombreuses techniques 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, de mesurer une épaisseur... La nécessité de contrôler des pièces de géométries de plus en plus complexes tout en améliorant les performances de contrôle conduit à développer des systèmes de détection de défauts automatisés à temps réel.

L'objectif de cette thèse est la conception d'un système de détection de défauts par CF pour le contrôle de matériaux conducteurs. Elle s'est divisée en deux volets complémentaires : l'un, expérimental, a porté sur la description des systèmes basés sur l'acquisition de signaux en utilisant des cartes d'acquisition analogique/numérique et le logiciel LabVIEW, l'autre, numérique, sur la simulation des différentes configurations étudiées.

En CND par CF, l'utilisation d'outils de modélisation permet d'améliorer les procédés de contrôle et la compréhension des données expérimentales observées. La méthode des éléments finis (MEF), grâce à sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes, occupe une place importante dans le cadre des techniques de modélisation utilisées dans le CND par CF. La MEF présente cependant des problèmes liés au temps de calcul. La formulation \vec{T} - Ω représente une solution intéressante pour répondre à ce compromis. Elle a l'avantage de permettre une réduction du coût de calcul en diminuant les degrés de liberté de trois à un dans toutes les régions non-conductrices.

Durant cette thèse, la formulation $\vec{T} - \Omega$ a été adoptée en 3D, Pour les différentes configurations traitées, la formulation s'est avérée adaptée dans une large gamme de configurations. Dans ces conditions, la méthode fournit des résultats précis en accord avec les

solutions de références ou l'expérimentation. La méthode a également donnée des résultats précis pour le déplacement du capteur sans bruit numérique notable.

La deuxième partie de cette thèse a porté sur la conception, la mise en œuvre d'un système d'inspection (hardware/software) peu coûteux, basé sur l'environnement de programmation LabVIEW pour la détection de défauts dans les matériaux conducteurs. Ce système d'acquisition de données permet de réaliser l'acquisition en temps réel de l'impédance des capteurs en utilisant une carte d'acquisition National Instruments et le logiciel LabVIEW pour garantir la précision et la stabilité des mesures. Les résultats obtenus pour différentes configurations sont en accord avec ceux obtenus par simulation et avec l'appareil de mesure LCR mètre GW-INSTEK 8101G, ce qui renseigne sur la précision du processus de mesure proposé et mis en œuvre.

En termes de perspectives, l'utilisation des plateformes telles que Raspberry ou Arduino, permettra le développement d'un système embarqué, compact et mobile. Un système qui peut servir comme outil portable pour la maintenance. Aussi l'intégration des filtres pour la décomposition en valeurs réel et imaginaire de l'impédance des bobines va permettre une meilleure caractérisation des défauts à géométries complexes.

Bibliographie

[Aknin et al., 2001]

Aknin, P., Bentoumi, M., Fessant, F., & Raux, F. (2001). Chaîne d'instrumentation embarquée pour la détection temps réel de défauts de rail débouchants, *Revue de l'électricité de l'électronique*, (1), 53–57.

[Aldrin & Knopp, 2006]

Aldrin, J. C. & Knopp, J. S. (2006). Crack characterization method with invariance to noise features for eddy current inspection of fastener sites. *Journal of Non destructive Evaluation*, 25(4), 165–181.

[Almeida et al., 2013]

Almeida, G., Gonzalez, J., Rosado, L., Vilaça, P., & Santos, T. G. (2013). Advances in ndt and materials characterization by eddy currents. *Procedia CIRP*, 7, 359–364.

[Angani et al., 2016]

Angani, C. S., Ramos, H. G., Rocha, T. J., & Ribeiro, A. L. (2016). Svm classification of thickness and lift-off using transient eddy current oscillation method. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings (I2MTC), 2016 IEEE International* (pp. 1–6): IEEE.

[Bastos & Sadowski, 2003]

Bastos, J. P. A. & Sadowski, N. (2003). *Electromagnetic modeling by finite element methods*. CRC press.

[Beckstein et al., 2017]

Beckstein, P., Galindo, V., & Vukaevia, V. (2017). Efficient solution of 3d electromagnetic eddy-current problems within the finite volume framework of openfoam. *Journal of Computational Physics*, 344, 623 – 646.

[Bensetti, 2004]

Bensetti, M. (2004). *Etude et modélisation de capteurs destinés au contrôle non destructif par courants de Foucault: mise en œuvre de méthodes d'inversion*. PhD thesis, Paris 11.

[Bensetti et al., 2005]

Bensetti, M., Le Bihan, Y., Marchand, C., Tassetti, C.-M., Lissorgues, G., Gergam, E. D., & Gilles, J.-P. (2005). A hybrid finite-element method for the modeling of microcoils. *IEEE transactions on magnetics*, 41(5), 1868–1871.

[Berg et al., 2006]

Berg, H., Alward, K., & Lessmann, K. (2006). Penetrant testing of standard parts, practical examples of process optimization. *ECNDT 2006*.

[Betta et al., 2015]

Betta, G., Ferrigno, L., Laracca, M., Burrascano, P., Ricci, M., & Silipigni, G. (2015). An experimental comparison of multi-frequency and chirp excitations for eddy current testing on thin defects. *Measurement*, 63, 207 – 220.

[Birring, 2016]

Birring, A. (2016). Ndt for non-nuclear power generation: Pressure vessels, piping, and turbines. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier.

[Blitz, 1991]

Blitz, J. (1991). Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing. Taylor & Francis.

[Bouillault et al., 1990]

Bouillault, F., Ren, Z., & Razeq, A. (1990). Calculation of 3d eddy current problems by an hybrid t-omega method. IEEE Transactions on Magnetics, 26(2), 478–481.

[Bowler et al., 1991]

Bowler, J., Jenkins, S., Sabbagh, L., & Sabbagh, H. (1991). Eddy-current probe impedance due to a volumetric flaw. Journal of Applied Physics, 70(3), 1107–1114.

[Burrascano et al., 2001]

Burrascano, P., Cardelli, E., Faba, A., Fiori, S., & Massinelli, A. (2001). Numerical analysis of eddy current non-destructive testing (jsaem benchmark, problem# 6–cracks with different shapes). In Proc. of the E'NDE Conference (pp. 333–340).

[Cardelli et al., 2005]

Cardelli, E., Faba, A., Specogna, R., Tamburrino, A., Trevisan, F., & Ventre, S. (2005). Analysis methodologies and experimental benchmarks for eddy current testing. IEEE transactions on magnetics, 41(5), 1380–1383.

[Cheng, 1971]

Cheng, C. (1971). General analysis of probe coils near stratified conductors. Int. J. Nondestr. Test., 3, 109–130.

[Cheng et al., 2006]

Cheng, W., Kanemoto, S., Komura, I., & Shiwa, M. (2006). Depth sizing of partial contact stress corrosion cracks from ect signals. NDT & E International, 39(5), 374–383.

[Cheng & Komura, 2008]

Cheng, W. & Komura, I. (2008). Simulation of transient eddy-current measurement for the characterization of depth and conductivity of a conductive plate. IEEE Transactions on Magnetics, 44(11), 3281–3284.

[Choua, 2009]

Choua, Y. (2009). Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault. PhD thesis, Université Paris Sud Paris XI.

[Choua et al., 2007]

Choua, Y., Santandrea, L., Le Bihan, Y., & Marchand, C. (2007). Thin crack modeling in ect with combined potential formulations. IEEE Transactions on magnetics, 43(4), 1789–1792.

[Darrer et al., 2015]

Darrer, B. J., Watson, J. C., Bartlett, P., & Renzon, F. (2015). Toward an automated setup for magnetic induction tomography. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(1), 1–4.

[Davis, 1989]

Davis, J. R. (1989). *ASM Handbook: Nondestructive evaluation and quality control*, volume 17. ASM International.

[Ding & Qian, 2009]

Ding, J. & Qian, T. (2009). The reconstruction of crack in surface based on virtual instrument. In *Information Engineering and Computer Science, 2009. ICIECS 2009. International Conference on* (pp. 1–4).: IEEE.

[Dodd & Deeds, 1968]

Dodd, C. & Deeds, W. (1968). Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems. *Journal of applied physics*, 39(6), 2829–2838.

[Dolabdjian et al., 2007]

Dolabdjian, C., Wach, G., & Perez, L. (2007). Improvement in the detection of subsurface fatigue cracks under airframe fasteners using improved rotating giant magneto-resistance magnetometer head. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 49(3), 133–136.

[Dumont-Fillon, 1996]

Dumont-Fillon, J. (1996). *Contrôle non destructif (CND)*. Ed. Techniques Ingénieur.

[Durand, 1968]

Durand, E. (1968). *Magnétostatique*.

[Durouchoux, 1985]

Durouchoux, P. (1985). *La recherche en contrôle non destructif en France*. Technical report.

[Egorov et al., 2017]

Egorov, A., Kucheryavskiy, S., & Polyakov, V. (2017). Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 160, 8 – 12.

[Egorov et al., 2015]

Egorov, A., Polyakov, V., Salita, D., Kolubaev, E., Psakhie, S., Chernyavskii, A., & Vorobei, I. (2015). Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method. *Defence Technology*, 11(2), 99 – 103.

[Gaktepe, 2001]

Gaktepe, M. (2001). Non-destructive crack detection by capturing local flux leakage field. *Sensors and Actuators A: Physical*, 91(1), 70–72. *Third European Conference on Magnetic Sensors & Actuators*.

[Giannone et al., 2011]

Giannone, L., Eich, T., Fuchs, J., Ravindran, M., Ruan, Q., Wenzel, L., Cerna, M., & Concezzi, S. (2011). Data acquisition and real-time bolometer tomography using labview rt. *Fusion Engineering and Design*, 86(6-8), 1129–1132.

[Golestanirad et al., 2012]

Golestanirad, L., Dlala, E., Wright, G., Mosig, J. R., & Graham, S. J. (2012). Comprehensive analysis of lenz effect on the artificial heart valves during magnetic resonance imaging. *Progress In Electromagnetics Research*, 128, 1–17.

[Gou et al., 2011]

Gou, R., Zhang, Y., Xu, X., Sun, L., & Yang, Y. (2011). Residual stress measurement of new and in-service x70 pipelines by x-ray diffraction method. *NDT & E International*, 44(5), 387 – 393.

[Hamel, 2012]

Hamel, M. (2012). Etude et réalisation dun dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques. Mémoire de magiter, Université Mouloud Mammeri.

[Hamel & Mohellebi, 2018]

Hamel, M. & Mohellebi, H. (2018). A labview-based real-time acquisition system for crack detection in conductive materials. *Mathematics and Computers in Simulation*.

[Harfeld et al., 1996]

Harfeld, N., Yoshida, Y., & Bowler, J. R. (1996). Low-frequency perturbation theory in eddy-current non-destructive evaluation. *Journal of applied physics*, 80(7), 4090–4100.

[Hung & Ho, 2005]

Hung, Y. & Ho, H. (2005). Shearography: An optical measurement technique and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49(3), 61 – 87.

[Ida, 1994]

Ida, N. (1994). Numerical modeling for electromagnetic non-destructive evaluation, volume 1. Springer Science & Business Media.

[Jander et al., 2005]

Jander, A., Smith, C., & Schneider, R. (2005). Magnetoresistive sensors for nondestructive evaluation. In *Advanced Sensor Technologies for Nondestructive Evaluation and Structural Health Monitoring*, volume 5770 (pp. 1–13).: International Society for Optics and Photonics.

[Jian Ming, 2002]

Jian Ming, J. (2002). Finite element method in electromagnetics.

[Joisten et al., 2005]

Joisten, H., Guilhamat, B., Audoin, M., Leger, J.-M., Cuchet, R., Barrois, G., Albertini, J.-B., Gaud, P., Renaux, P., Bloch, D., et al. (2005). Microfluxgate performance improvement in microtechnology. *IEEE transactions on magnetics*, 41(11), 4356–4358.

[Kang et al., 2015]

Kang, T., Chen, T., Wang, Y., & Kim, K. I. (2015). A t- formulation with the penalty function term for the 3d eddy current problem in laminated structures. *Applied Mathematics and Computation*, 271, 618 – 641.

[Kersting et al., 2010]

Kersting, T., Schönartz, N., Oesterlein, L., & Liessem, A. (2010). High end inspection by flmless radiography on lsaw large diameter pipes. *NDT & E International*, 43(3), 206 – 209.

[Kim et al., 2007]

Kim, T.-O., Lee, G.-S., Kim, H.-Y., & Ahn, J.-H. (2007). Modeling of eddy current sensor using geometric and electromagnetic data. *Journal of mechanical science and technology*, 21(3), 465–475.

[Klein et al., 2018]

Klein, G., Morelli, J., & Krause, T. W. (2018). Analytical model of the eddy current response of a drive-receive coil system inside two concentric tubes. *NDT & E International*, 96, 18 – 25.

[Knopp et al., 2009]

Knopp, J. S., Aldrin, J. C., & Jata, K. V. (2009). Computational methods in eddy current crack detection at fastener sites in multi-layer structures. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 24(1-2), 103–120.

[La, 1996]

La, R. (1996). Modélisation phénoménologique des signaux courants de Foucault en vue de la caractérisation des défauts des tubes de générateurs de vapeur. PhD thesis, Compiègne.

[La et al., 1997]

La, R., Benoist, B., De Barmon, B., Lengellé, R., Gaillard, P., & Reuchet, J. (1997). An eddy current model based on parametric description of induced current loops. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (pp. 295–301). Springer.

[Le et al., 2014]

Le, M., Kim, J., Vu, H., Shin, K., & Lee, J. (2014). Fast simulation of alternating magnetic fields around a crack in a pipeline system using a dipole model method. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 27(3), 580–589.

[Lê & Placko, 1995]

Lê, M.-Q. & Placko, D. (1995). Nouvelle structure de capteur à courants de foucault et algorithme associé pour la mesure des propriétés électrique et magnétique d'un métal. *Journal de Physique III*, 5(6), 807–824.

[Le Bihan, 2000]

Le Bihan, Y. (2000). Conception et caractérisation d'un dispositif a courants de Foucault pour l'évaluation non destructive de l'épaisseur de paroi d'aubes de turbine creuses. PhD thesis, Cachan, Ecole normale supérieure.

[Le Bihan et al., 2007]

Le Bihan, Y., Pávó, J., & Marchand, C. (2007). Characterization of small cracks in eddy current testing.

[Le Diraison, 2008]

Le Diraison, Y. (2008). Eddy current imaging for the non-destructive evaluation of aeronautical structures. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.

[Lee & Kim, 2000]

Lee, H.-B. & Kim, D.-H. (2000). Impedance calculation for a plate with crack in eddy current ndt using 3d indirect biem. IEEE transactions on magnetics, 36(5), 3131–3133.

[Lee et al., 2007]

Lee, S.-J., Park, W.-S., Lee, J.-H., & Byun, J.-H. (2007). A study on non-contact ultrasonic technique for on-line inspection of cfrp. Non Destructive Testing Australia, 44(1), 30.

[Li et al., 2017]

Li, Z., Sun, G., He, C., Zhao, D., Liu, X., Huang, Y., Li, Y., Liu, H., & Zhang, F. (2017). Non-destructive residual strain prediction using the binary pattern of eddy current. Ieee Transactions on Magnetics, 53(8), 1–15.

[Libby, 1971]

Libby, H. L. (1971). Introduction to electromagnetic nondestructive test methods. Krieger.

[Lindgren & Wirdelius, 2012]

Lindgren, E. & Wirdelius, H. (2012). X-ray modeling of realistic synthetic radiographs of thin titanium welds. NDT & E International, 51, 111 – 119.

[Liu et al., 2012]

Liu, Z., Genest, M., & Krysz, D. (2012). Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe. NDT & E International, 47, 105 – 115.

[Lorrain et al., 1988]

Lorrain, P., Corson, D. R., & Lorrain, F. (1988). Electromagnetic fields and waves. Freeman.

[Luquire et al., 1970]

Luquire, J., Deeds, W., & Dodd, C. (1970). Alternating current distribution between planar conductors. Journal of Applied Physics, 41(10), 3983–3991.

[Maldague et al., 2001]

Maldague, X. et al. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.

[Marchand et al., 2008]

Marchand, B., Decitre, J.-m., & Casula, O. (2008). Recent developments of multielements eddy current probes. (pp. 385–392).

[Martinos et al., 2014]

Martinos, J., Theodoulidis, T., Poulakis, N., & Tamburrino, A. (2014). A benchmark problem for eddy current nondestructive evaluation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2), 1053–1056.

[Mohseni et al., 2016]

Mohseni, E., Viens, M., & Franca, D. R. (2016). A model-based study of the effect of semi-elliptical surface notch geometry on the signal of a split-d eddy current probe. In *ASNT Annual Conference 2016* (pp. 113–121).

[Mook et al., 2007]

Mook, G., Hesse, O., & Uchanin, V. (2007). Deep penetrating eddy currents and probes. *Materials Testing*, 49(5), 258–264.

[Morse et al., 1999]

Morse, D. H., Antolak, A. J., Bench, G. S., & Roberts, M. L. (1999). A flexible labview based data acquisition and analysis system for scanning microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 158(1), 146 – 152.

[Moulder et al., 1998]

Moulder, J. C., Tai, C.-C., Larson, B. F., & Rose, J. H. (1998). Inductance of a coil on a thick ferromagnetic metal plate. *IEEE transactions on magnetics*, 34(2), 505–514.

[Mozurkewich et al., 2008]

Mozurkewich, G., Ghaffari, B., & Potter, T. J. (2008). Spatially resolved ultrasonic attenuation in resistance spot welds: Implications for nondestructive testing. *Ultrasonics*, 48(5), 343 – 350.

[Nithyaa et al., 2013]

Nithyaa, A., Premkumar, R., Dhivya, S., & Vennila, M. (2013). A real time foot pressure measurement for early detection of ulcer formation in diabetics patients using labview. *Procedia Engineering*, 64, 1302–1309.

[Nurul et al.,]

Nurul, A. A. L., Mahmood, D., Mohd, K. K., & Suaib, I. A study of frequency effects on conductivity measurements.

[Oka et al., 2010]

Oka, M., Tsuchida, Y., Yakushiji, T., & Enokizono, M. (2010). Fatigue evaluation for a ferritic stainless steel (sus430) by the eddy current method using the pancake-type coil. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(2), 540–543.

[Park et al., 2009]

Park, D., Angani, C., Kim, G., Kim, C., & Cheong, Y. (2009). Evaluation of pulsed eddy current response and detection of the thickness variation in the stainless steel. *ieee transactions on magnetics*, 45(10), 3893–3896.

[Pereira & Clarke, 2015]

Pereira, D. & Clarke, T. G. (2015). Modeling and design optimization of an eddy current sensor for superficial and subsuperficial crack detection in inconel claddings. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 1287–1292.

[Ravat, 2008]

Ravat, C. (2008). Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI.

[Ren, 1997]

Ren, Z. (1997). Contribution à la modélisation des systèmes électromagnétiques tridimensionnels. étude des formulations duales. modélisation des systèmes électromécaniques-mécanique couplés. Université Paris-Sud.

[Renhart & Magele, 1990]

Renhart, W. & Magele, C. (1990). The treatment of cracks in ndt problems using fem. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(2), 873–876.

[Sadiku & Matthew, 2001]

Sadiku, P. D. & Matthew, N. (2001). Numerical techniques in electromagnetics. Press CRC, New York.

[Shin et al., 2009]

Shin, Y.-K., Choi, D.-M., Kim, Y.-J., & Lee, S.-S. (2009). Signal characteristics of differential-pulsed eddy current sensors in the evaluation of plate thickness. *NDT & E International*, 42(3), 215–221. 2nd International Conference on Advanced Nondestructive Evaluation.

[Shokralla et al., 2016]

Shokralla, S., Morelli, J. E., & Krause, T. W. (2016). Principal components analysis of multifrequency eddy current data used to measure pressure tube to calandria tube gap. *IEEE Sensors Journal*, 16(9), 3147–3154.

[Shull, 2016]

Shull, P. J. (2016). Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications. CRC press.

[Stifter et al., 2007]

Stifter, D., Wurm, M., Wiesauer, K., Nagel, K., Pircher, M., Götzinger, E., & Hitzenberger, C. (2007). Spectral-domain optical coherence tomography: a novel and fast tool for ndt. *NDT in Progress 2007*.

[Takagi et al., 1994]

Takagi, T., Hashimoto, M., Fukutomi, H., Kurokawa, M., Miya, K., Tsuboi, H., Tanaka, M., Tani, J., Serizawa, T., Harada, Y., et al. (1994). Benchmark models of eddy current testing for steam generator tube: experiment and numerical analysis. *International Journal of Applied Electromagnetics in Materials*, 3(5), 149–162.

[Theodoulidis, 2005]

Theodoulidis, T. (2005). Analytical model for tilted coils in eddy-current nondestructive inspection. *IEEE transactions on magnetics*, 41(9), 2447–2454.

[Theodoulidis et al., 2012]

Theodoulidis, T., Wang, H., & Tian, G. Y. (2012). Extension of a model for eddy current inspection of cracks to pulsed excitations. *NDT & E International*, 47, 144–149.

[Theodoulidis, 2003]

Theodoulidis, T. P. (2003). Model of ferrite-cored probes for eddy current nondestructive evaluation. *Journal of applied physics*, 93(5), 3071–3078.

[Thidé, 2004]

Thidé, B. (2004). *Electromagnetic field theory*. Upsilon Books Uppsala, Sweden.

[Thollon & Burais, 1995]

Thollon, F. & Burais, N. (1995). Geometrical optimization of sensors for eddy currents nondestructive testing and evaluation. *IEEE Transactions on Magnetism*, 31(3), 2026–2031.

[Tsukada et al., 2018]

Tsukada, K., Hayashi, M., Nakamura, Y., Sakai, K., & Kiwa, T. (2018). Small eddy current testing sensor probe using a tunneling magnetoresistance sensor to detect cracks in steel structures. *IEEE Transactions on Magnetism*, (99).

[Vuillermoz et al., 1994]

Vuillermoz, P.-L., Saglio, R., & Wüstenberg, H. (1994). *Les courants de Foucault: Principes, mesure et contrôle*. Afnor.

[Vyroubal, 2004]

Vyroubal, D. (2004). Impedance of the eddy-current displacement probe: The transformer model. *IEEE Transactions on instrumentation and Measurement*, 53(2), 384–391.

[Wang et al., 2015]

Wang, H., Li, W., & Feng, Z. (2015). Noncontact thickness measurement of metal films using eddy-current sensors immune to distance variation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(9), 2557–2564.

[Wang et al., 2013]

Wang, Z., Shang, Y., Liu, J., & Wu, X. (2013). A labview based automatic test system for sieving chips. *Measurement*, 46(1), 402–410.

[Warren, 1967]

Warren, J. (1967). *Essais non destructifs: mux et maaux divers*. Editions Eyrolles.

[Wenliang et al., 2011]

Wenliang, Z., Yuele, H., Kun, J., Bin, Z., & Chen, Y. (2011). Development and design of top rail irregularity detection system based on labview. In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*, volume 1 (pp. 1029–1032).: IEEE.

[Xu & Shida, 2008]

Xu, P. & Shida, K. (2008). Eddy current sensor with a novel probe for crack position detection. In *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on* (pp. 1–6).: IEEE.

[Yin & Peyton, 2007]

Yin, W. & Peyton, A. (2007). Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors. *Ndt & E International*, 40(1), 43–48.

[Yoshimura et al., 2018]

Yoshimura, W., Tanaka, R., Sasayama, T., & Enpuku, K. (2018). Detection of slit defects on backside of steel plate using low-frequency eddy-current testing. *IEEE Transactions on Magnetics*, (99).

[Zhang & Yan, 2017]

Zhang, K. & Yan, X. (2017). Multi-cracks identification method for cantilever beam structure with variable cross-sections based on measured natural frequency changes. *Journal of Sound and Vibration*, 387, 53 – 65.

Résumé :

Les méthodes électromagnétiques de contrôle non destructif sont fréquemment utilisées pour le contrôle de pièces conductrices. Parmi celles-ci, les méthodes d'inspection utilisant les Courants de Foucault occupent une place importante et sont appelées à se développer.

Ce travail synthétise l'étude et la mise en place de deux dispositifs de détection de défauts par courants de Foucault. Les dispositifs développés adoptent des capteurs à courants de Foucault, placés au-dessus des pièces conductrices comportant des défauts. Afin de réaliser la caractérisation des défauts, les capteurs balayent les cibles et les signaux sont collectés par une carte d'acquisition National Instruments. Les applications des dispositifs ont été développées sous LabVIEW afin d'accomplir l'acquisition et le traitement des signaux des capteurs en temps réel. Pour vérifier les résultats expérimentaux, des simulations ont été effectuées en utilisant la méthode des éléments finis 3D.

Les résultats montrent la capacité d'adaptation et la pertinence des dispositifs pour une potentielle intégration dans un processus industriel.

Mots-clés: Contrôle non destructif, CND par courants de Foucault, modélisation magnétothermique, formulation T- Ω , éléments finis 3D, LabVIEW, acquisition de données, systèmes à temps réel.

Abstract:

Nondestructive electromagnetic methods are frequently used for the control of conductive parts. Among these, inspection methods using eddy current occupy an important place and are expected to be developed.

This work synthesizes the study and implementation of two eddy current defect detection devices. The developed devices adopt eddy current sensors, placed above conductive parts with defects. In order to carry out defect characterization, the sensors scan the targets and the signals are collected by a National Instruments acquisition board. Devices applications have been developed under LabVIEW to accomplish real-time sensor signal acquisition and processing. To verify the experimental results, simulations were performed using the 3D finite element method.

The results show the adaptive capacity and the relevance of the devices for a potential integration in an industrial process.

Keywords: Non destructive testing, Eddy current NDT, T- Ω formulation, 3D finite elements, LabVIEW, data acquisition, real time systems.