

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par :

OUGAB MOHAMED LAMINE

ROUIDJALI RABAH

Filière :Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Etude et simulation des problèmes direct et inverse en CND par courants de Foucault

Soutenu le 14 /07 /2021 devant le jury composé de:

Mme. MZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Encadreur
Mme.LARABI	Zina	MAA	UMBB	Examineur
Mr.BENGUESMIA	Hani	MCA	UMBM	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques (ISE) de l'université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès (UMBB).

Nous tenons à remercier tout particulièrement Monsieur Meziane Hamel, notre encadreur, MCB à l'UMBB, pour sa précieuse aide et ses conseils avisés mais surtout pour ses qualités autant que personne et enseignant. Il a été pour nous un mentor pendant tout le long de notre parcours universitaire. Nous lui exprimons toute notre gratitude.

Nous remercions madame MZIOU Nassima, Professeur à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Nous remercions Monsieur BENGUESMIA Hani, MCA à UMBM, et Mademoiselle LARABI Zina, MAA à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Dédicaces

Dédicaces

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail

A mes parents qui ont sacrifié leurs vies pour que je réussisse, qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir que Dieu vous protège et vous garde très chers parents.

À mes sœurs « Fatiha et Ritadje », et mes frères « Lotfi, Abdelmadjid » de m'avoir encouragé, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.

À ma chère amie « Rania » je te souhaite le bonheur dans ta vie et que Dieu protège.

À mon binôme « Rabah » je te souhaite un avenir plein de joie

À tous les amis de groupe MME

MOHAMED

Dédicaces

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail

A ma mère qui s'est sacrifiée pour je puisse finir mes études, que Dieu te garde a mes cotés
ma très chère mère

A mon père Que Dieu ait pitié de lui

À mes frères Said, Mohamed et tous mes sœurs de m'avoir encouragé, je vous souhaite
une vie pleine de bonheur et de succès.

À mes ami(e)s Djamel, Walid, Hichem, Karim, Abdelkader, Younes, amine, Marouane
Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.

À tout le groupe MME

RABAH

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Sommaire	V
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Observations et Symboles	X

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur le CND

Introduction générale	1
I.1. Introduction	3
I.2.Généralités sur le contrôle non destructif	3
I.2.1.Principe	3
I.2.3.Schéma synoptique du dispositif.....	3
I.3.Différentes méthodes de CND	4
I.4.L'examen visuel.....	4
I.5.Ressuage.....	5
I.6.Magnétoscopie.....	6
I.7.Thermographie	6
I.8.Echographie ultrasonore	7
I.9.CND par courants de Foucault	8
I.9.1.Le principe de technique.....	8
I.9.2.Epaisseur de peau	9
I.9.4.Signaux d'excitation et exploitation.....	10
I.9.4.1.Contrôle par courant de Foucault mono-fréquence	10
I.9.4.2.Contrôle par courants de Foucault multifréquence	11
I.9.4.3.Contrôle par courant de Foucault pulsé	11
I.9.5.Structure contrôlée	12
I.9.6.Configurations de capteurs CND-CF	12
I.9.6.1.Capteur à double fonctions.....	13
I.9.6.2.Les capteurs à fonctions séparées	13

I.9.7.Applications du CND par courants de Foucault	14
I.9.8.Avantages et limites du CND par courants de Foucault.....	15
I.10.Conclusion.....	15

Chapitre II : Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

II.1. Introduction.....	16
II.2 Description du problème de CND-CF.....	16
II.3 Équations de Maxwell et lois de comportement de milieux.....	17
II.4 Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire.....	19
II.4.1 Hypothèses simplificatrices.....	19
II.4.2 Formulation \mathbf{T} - Ψ	19
II.5. Méthodes de résolution des équations différentielles.....	20
II.6. Méthodes analytiques.....	20
II.7. Méthodes numériques.....	21
II.7.1. Méthode des différences finies (MDF)	21
II.7.2. Méthode des volumes finis (MVF)	21
II.7.3. La Méthode des éléments finis	22
II.7.3.1.Principes de la MEF.....	22
III.7.3.2.Principe de la méthode variationnelle	23
II.8. Calcul de la variation d'impédance	27
II.8.1. Impédance à travers les énergies électromagnétiques.....	27
II .9 Applications et résultats.....	28
II.9.1. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell.....	28
II.9.2. Simulation d'une configuration capteur / plaque avec défaut	29
II.9.2.1.Maillage de demain d'étude	31
II.9.2.2.Distribution des courants induits	33
II.9.3.Résultats en termes de variation d'impédance.....	34
II.9.3.1. Effet de la longueur du défaut	34
II.9.3.2.Effet de la profondeur du défaut.....	35
II.9.3.3.Effet de la fréquence	36
II.9.3.4. Effet du lift-off	36
II.9.3.5.Effet de la conductivité électrique de la pièce.....	37

II.10.Conclusion	38
------------------------	----

Chapitre III : Etude du Problème inverse

III.1.Introduction.....	39
III.2.Problème inverse.....	39
III.2.1.Stratégie de traitement du problème inverse	40
III.3.Présentation de logiciel Minitab	41
III.4.Présentation de la régression	42
III.4.1.La régression linéaire simple.....	42
III.4.2.La régression linéaire multiple	43
III.5.Calcul d'erreur	45
III.6.Base de données	46
III.6.1.Première application	46
III.6.1.1.Polynômes de régression	47
III.6.1.2. Validation.....	47
III.6.1.3. Interprétation des résultats	49
III.6.2.Deuxième application	49
III.6.2.1.Polynômes de régression	51
III.6.2.2.Validation.....	52
III.6.2.3.Interprétation des résultats	54
III.7.Conclusion	55
Conclusion Générale.....	56
Bibliographie	57

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le CND

Figure I.1. Schéma synoptique de la chaîne de contrôle.....	4
Figure I.2. Examen visuel	5
Figure I.3. Principe de la méthode ressuage.....	5
Figure. I.4. Inspection par magnétoscopie	6
Figure I.5.Principe du contrôle par thermographie.....	7
Figure I.6.Echographie ultrasonore	8
Figure I.7.Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault	9
Figure I.8.Variation de l'amplitude des CF à l'intérieur d'un conducteur.....	10
Figure I.9. Diagramme d'impédance normalisée	11
Figure. I.10. Capteur à double fonctions.....	13
Figure I.11.Capteur à fonctions séparées	14

Chapitre II : Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

Figure II.1. Représentation schématique de problème étudié	16
Figure II.2. Maillage de type différences finies.....	21
Figure II.3. Triangle de Pascal.....	27
Figure II.4. La fenêtre de logiciel Maxwell 3D.....	29
Figure II.5. Configuration du système simulé.....	30
Figure II.6. Maillage au milieu du défaut.....	31
Figure II.7. Maillage à l'extrémité du défaut.....	32
Figure II.8. Maillage dans la zone saine.....	32
Figure II.9. Distribution des CF au milieu du défaut.....	33
Figure II.10. Distribution des CF à l'extrémité du défaut.....	33
Figure II.11. Distribution des CF dans la zone saine.....	34
Figure II.12. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la longueur du défaut.....	35
Figure II.13. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut.....	35
Figure II.14. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'alimentation du capteur.....	36
Figure II.15. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes Lift-off	37

Figure II.16. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes conductivités électriques.....	37
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre III : Etude du Problème inverse

Figure.III.1.Schéma d'étude général d'un problème inverse.....	40
Figure.III.2. Schéma fonctionnel d'un système de CND.....	40
Figure III.3.La fenêtre principale de Minitab.....	42
Figure III.4.La droite de la régression linéaire.....	44
Figure III.5. Droite d'ajustement de longueur.....	48
Figure III.6.droite d'ajustement de profondeur.....	49
Figure III.7. Droite d'ajustement de longueur.....	53
Figure III.8.Droite d'ajustement de profondeur.....	53
Figure III.9. Droite d'ajustement de largeur.....	54

Liste des tableaux

Tableau II.1. Les paramètres de la bobine et de la plaque.....	32
Tableau.III.1.Base de données.....	46
Tableau.III.2.résultats et validation.....	48
Tableau.III.3.Base de données.....	50
Tableau.III.4.résultats et validation.....	52

*Abréviations et
symboles*

Abréviations

CND :	Contrôle non destructif
CF :	Courants de Foucault
END :	Essai non destructif
MEF :	Méthode des éléments finis
NDT :	Non-Destructif Testing

Symboles

\vec{B} :	Induction magnétique
\vec{H} :	Champ magnétique
δ :	Epaisseur de peau
f :	Fréquence
σ :	Conductivité électrique
μ :	Perméabilité magnétique
μ_r :	Perméabilité relative
J :	Densité de courants
\vec{J}_s :	Source de courant
\vec{E} :	Champ électrique
\vec{D} :	Induction électrique
ρ :	Densité de charge électrique
ε :	Permittivité électrique
ε_r :	Permittivité relative
\vec{T} :	Potentiel vecteur électrique
Ψ :	Potentiel scalaire magnétique
I :	Intensité de courant

N :	Nombre de spires
U :	Tension
R :	Résistance
C :	la vitesse de la lumière
Ω :	Domaine d'étude
L :	Fonction de Lagrange
v :	Réfectivité magnétique
f_v :	Fonction définie sur le domaine d'étude Ω

Introduction générale

Introduction générale

Dans l'industrie, les exigences de la fiabilité, de réduction des coûts de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes. Pour une meilleure exploitation d'un produit industriel, il faut le maintenir en marche dans de bonnes conditions de sécurité, ce qui nécessite une parfaite connaissance de l'évolution des pièces qui le constituent. Cette connaissance implique un contrôle ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ce ci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif (CND).

Le contrôle non destructif est un ensemble de méthodes permettant de vérifier l'intégrité de structures industrielles sans les endommager en détectant d'éventuels défauts présents dans celle-ci. Le CND a un intérêt crucial, notamment dans le domaine de l'aéronautique et du nucléaire. Il permet d'accéder à des exigences strictes de fiabilité et peut prolonger la vie des structures [1].

Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui), les conditions de mise en œuvre,etc.

Dans le domaine du contrôle de pièces métalliques, la technique des courants de Foucault (CF) est l'une des plus anciennes [2].

L'induction des courants de Foucault dans un objet conducteur associée au calcul des champs électriques et magnétiques dans un point quelconque de l'espace dus à une ou plusieurs sources, constituent les fondations du contrôle non destructif par courants de Foucault. Les courants de Foucault n'altèrent pas l'état de l'objet, constituant ainsi un système de contrôle non invasif ; les champs sont perturbés par la présence d'une inhomogénéité dans l'objet conducteur, et cette perturbation peut être quantifiée à travers les grandeurs caractéristiques du capteur [3].

Le travail présenté dans ce mémoire est scindé en deux parties complémentaires. La première partie est dédiée à la simulation numérique d'un dispositif de CND de défauts dans les pièces métalliques. La deuxième partie est consacrée à la présentation des résultats

d'inversion obtenus à partir d'un algorithme de régression pour la reconstruction des défauts.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres :

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

Le deuxième chapitre est consacré aux équations de Maxwell et aux méthodes de résolution des équations différentielles. Nous avons choisi la méthode numérique des éléments finis qui s'adapte bien aux problèmes de CND-CF pour simuler la réponse de notre capteur inductif aux différentes dimensions des défauts.

Dans le troisième et dernier chapitre nous utilisons les résultats de simulation numérique comme une base des données pour résoudre le problème inverse et reconstruire les défauts.

Et nous terminons par une conclusion générale et les perspectives de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur le

CND

I.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de vérifier l'intégrité d'une pièce ou d'un matériau sans l'endommager en détectant d'éventuels défauts présents dans celui-ci. Dans différents secteurs industriels (aéronautique, nucléaire, automobile, métallurgie...), le CND est primordial afin de garantir la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques. Une grande variété de méthodes existent et permettent de détecter des anomalies internes ou de surface, de déterminer la composition ou la structure des matériaux. Le CND peut être utilisé en production, lors de la mise en service ou lors d'opérations de maintenance[4].

I.2. Généralités sur le contrôle non destructif

I.2.1. Principe

On regroupe sous le vocable essais non destructifs ou encore contrôles non destructifs (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure, tout préservant l'intégrité des produits contrôlés

En ce sens, le contrôle non destructif apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce [5].

Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou γ , perturbation des courants de Foucault... sont à la base des essais non destructifs. Ils peuvent servir à caractériser les matériaux (gros grain, anisotropie, dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou en profondeur...). Les techniques du CND diffèrent par l'énergie employée: énergie mécanique (ultrasons, ressuage), énergie électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...)... [6].

I.2.3. Schéma synoptique du dispositif

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 [7].

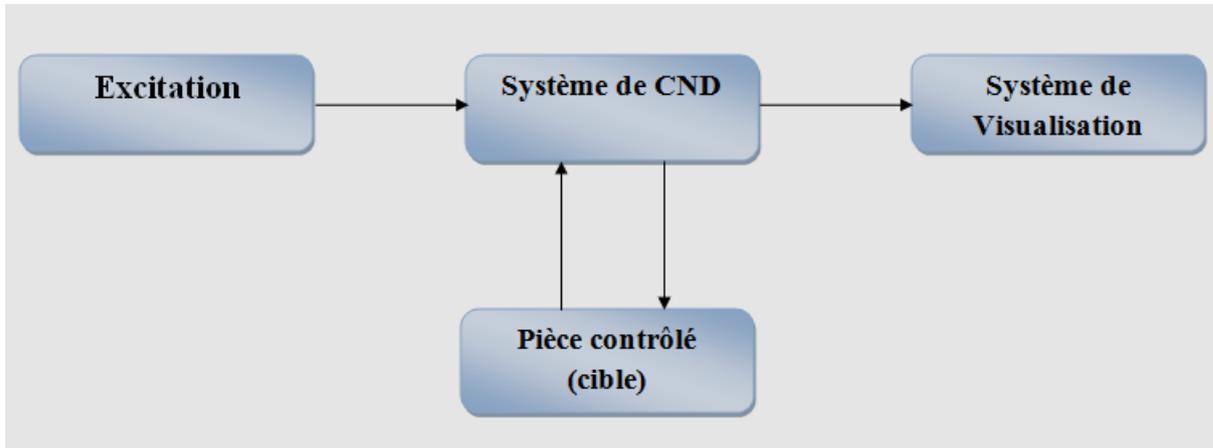


Figure I.1. Schéma synoptique de la chaîne de contrôle

I.3. Différentes méthodes de CND

Les méthodes de CND utilisées sont diverses. Le choix d'une méthode dépend de :

- la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...).
- le type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...).
- les conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué

I.4. L'examen visuel

C'est le contrôle le plus élémentaire, il est la base des contrôles optiques non automatiques. 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[8].

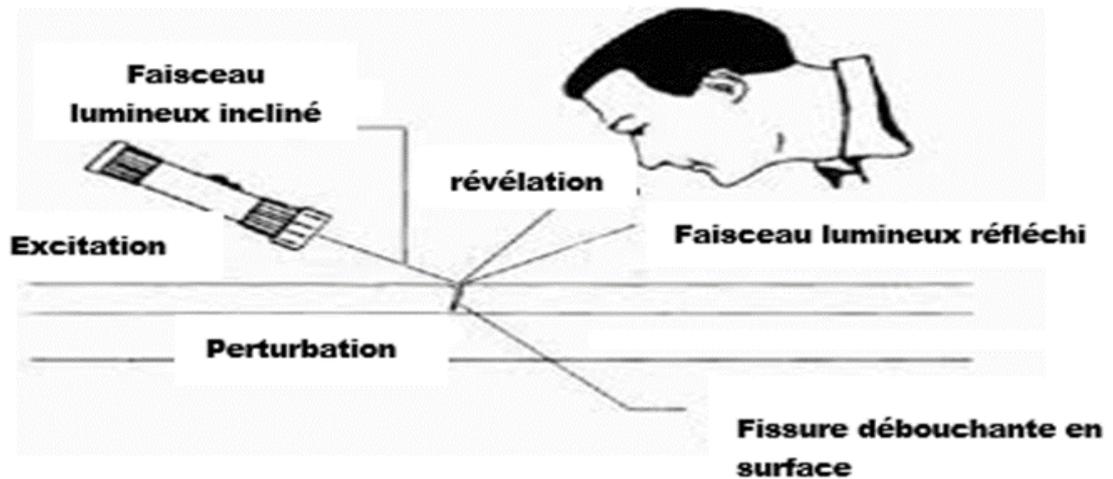


Figure I.2. Examenuisuel

I.5.Ressuage

Cette méthode est exclusivement dédiée à la détection de défauts surfaciques (manque de matière, éraflure, . . .). Elle reste très utilisée et consiste à appliquer à la surface à contrôler préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'impression coloré ou fluorescent. Le liquide pénètre par les capillarités et dans les ouvertures du défaut. Après le temps nécessaire à la pénétration du liquide d'impression, la pièce est lavée et séchée puis soumise à un révélateur du liquide. Un éclairage approprié (qui dépend du liquide utilisé) permet d'observer visuellement le défaut. Toutefois, cette technique ne révèle pas les défauts non débouchant et ne donne pas d'une façon fautive la géométrie du défaut [9].

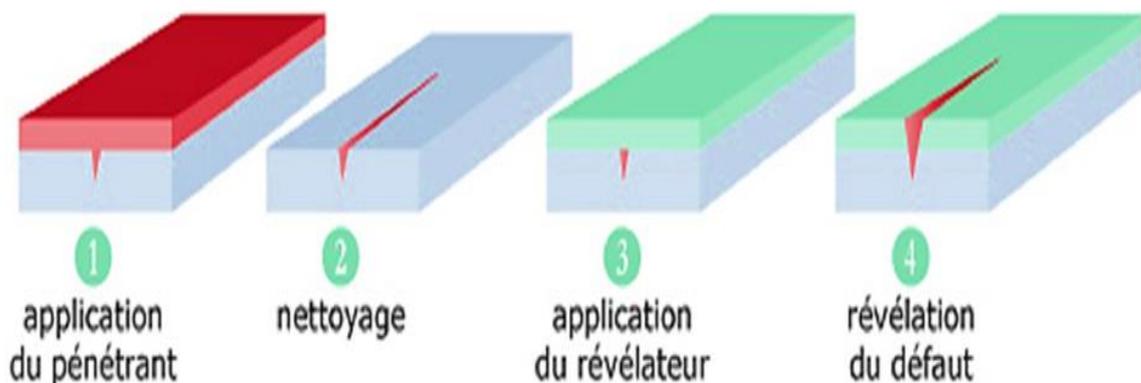


Figure I.3. Principe de la méthode ressuage

I.6. Magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie fait appel aux propriétés magnétiques du matériau inspecté. L'effet de dispersion du flux de fuite peut être mis en évidence en aspergeant la surface contrôlée d'une liqueur magnétique constituée de très fines particules ferromagnétiques et d'un liquide porteur (poudre de fer ou de magnétite colorée). Les particules noires ou fluorescentes viennent s'agglomérer sur le champ de fuite, à l'endroit du défaut, le rendant ainsi parfaitement visible, comme l'illustre la figure I.4 [10].

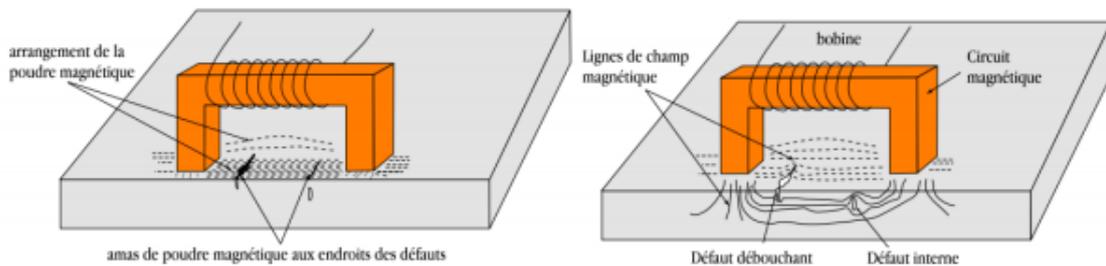


Figure. I.4. Inspection par magnétoscopie

I.7. Thermographie

Le contrôle non destructif par thermographie (Thermography Testing en anglais) est utilisé pour détecter des défauts volumiques et des défauts de surface. En produisant un échauffement local et homogène dans la structure à contrôler, on peut observer l'évolution de la température à l'aide d'une caméra thermographique. Ainsi, les défauts présents jouent le rôle d'obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et engendrent des anomalies thermiques qui peuvent être détectées par la caméra.

On distingue la thermographie passive où l'apport de la chaleur qui provoque l'élévation de température est extérieur, et la thermographie active qui suppose que le chauffage soit obtenu par une sollicitation mécanique interne. Les principaux avantages de cette méthode résident dans la possibilité d'effectuer un contrôle sans contact avec une bonne qualité des résultats qui est liée à l'utilisation de caméras très sensibles. Ses inconvénients sont la lenteur du phénomène de propagation de la chaleur et le coût élevé de l'investissement [11].

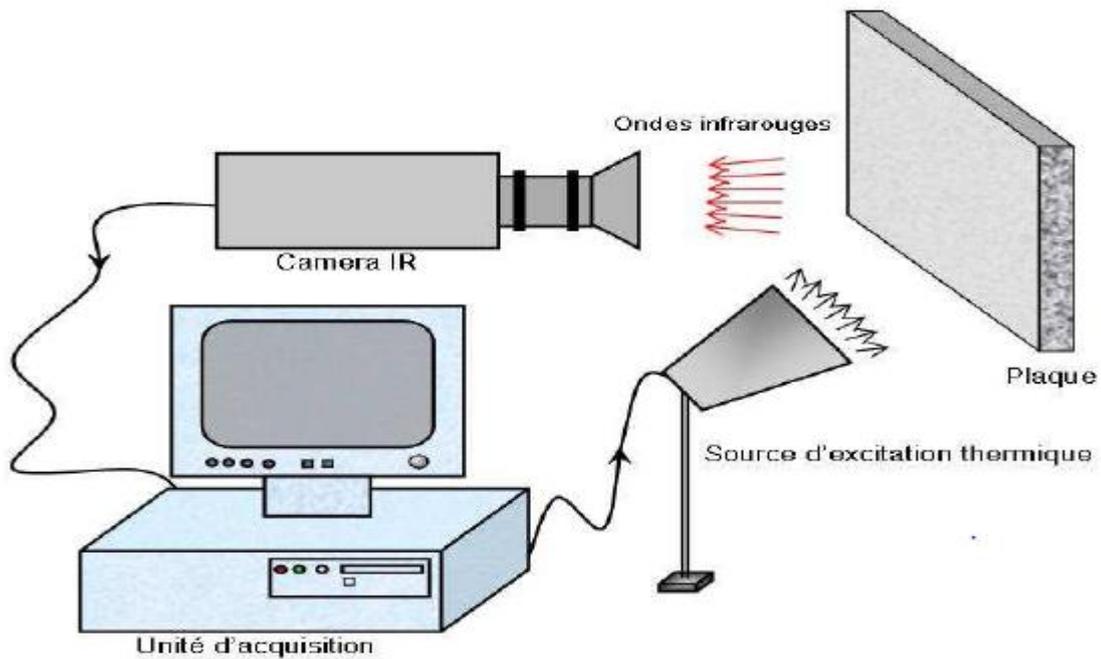


Figure I.5. Principe du contrôle par thermographie

I.8. Echographie ultrasonore

Cette technique est parmi les méthodes les plus répandue. Elle consiste à détecter les défauts en balayant la pièce à contrôler et en observant les échos réfléchis sur les discontinuités de la matière [12].

L'observation est réalisée en visualisant les signaux des échos ou de l'onde transmise. Cette méthode est applicable sur tous matériaux, et permet de mettre en évidence des défauts de surface et des défauts internes. Elle peut également être utilisée pour réaliser des mesures d'épaisseur. Il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur (capteur) et la pièce pour assurer la transmission des ondes [13].

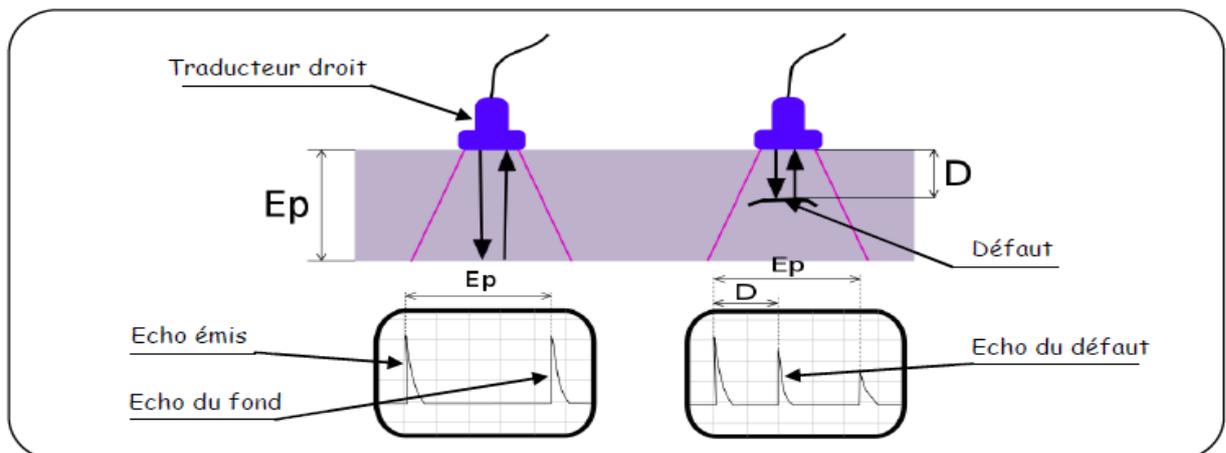


Figure I.6. Echographie ultrasonore

I.9.CND par courants de Foucault

I.9.1.Le principe de technique

Le contrôle par courants de Foucault (CND-CF) repose sur les principes de l'induction électromagnétique. Un flux de courants de Foucault est obtenu en appliquant un courant électrique variable dans le temps (souvent sinusoïdal ou pulsé) à la bobine de contrôle souvent appelée capteur. Le champ magnétique résultant induit un flux de courant électrique lorsqu'il est placé à proximité d'un matériau électriquement conducteur. Les courants électriques circuleront dans le matériau conducteur selon des trajectoires concentriques circulaires, d'où le nom de courants de Foucault. Conformément à la loi de Lenz, les courants de Foucault produisent un champ magnétique secondaire qui interagit avec le champ magnétique primaire. Le champ résultant (une addition vectorielle des champs magnétiques primaire et secondaire) induit un courant et une tension à travers les bornes de la bobine.

En conséquence, les courants de Foucault peuvent être utilisés pour examiner d'éventuelles irrégularités (endommagement) ou inhomogénéités de matériaux qui altèrent ou interfèrent avec : la magnitude, la phase ou le trajet d'écoulement des courants de Foucault. De ce fait, une variation de l'amplitude ou du trajet des courants de Foucault entraîneront une perturbation du champ magnétique et une perturbation résultante de la tension de la bobine de contrôle.

De plus, l'amplitude et la phase de Foucault induits est très pertinentes pour l'amplitude et de la fréquence du courant d'attaque, de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique, de la géométrie du spécimen, de l'homogénéité du matériau, du positionnement de la bobine et leur géométrie[14].

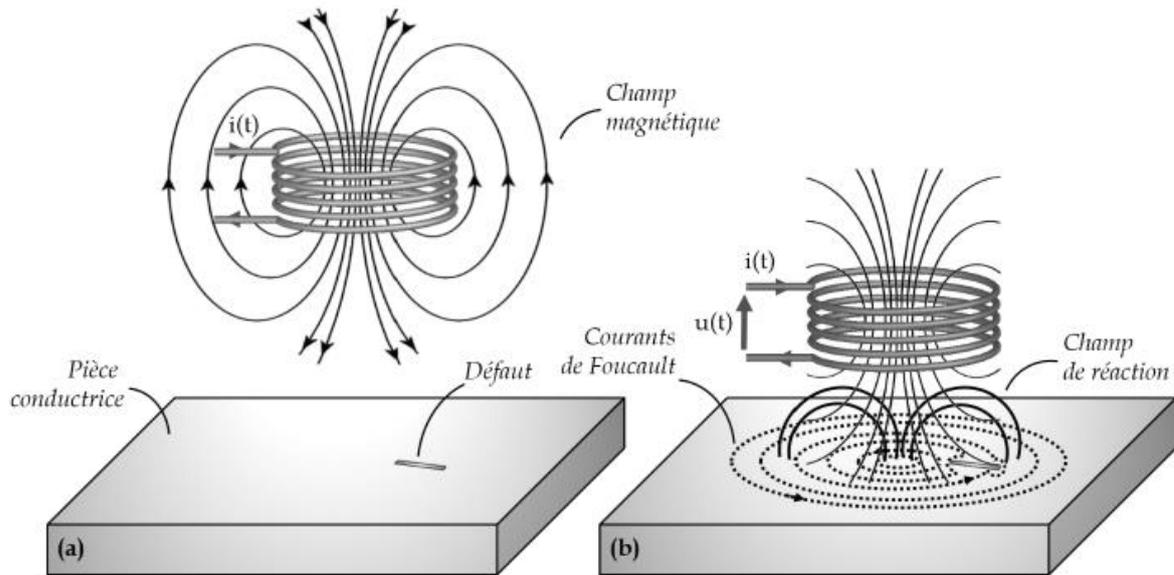


Figure I.7. Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault

Le principe du CND par CF repose donc sur la mesure de l'effet de la variation du champ de réaction. Pour cela, différentes méthodes et différents capteurs peuvent être employés [15].

I.9.2. Epaisseur de peau

L'amortissement des courants de Foucault dans le matériau, dans le cas simple d'une onde plane harmonique d'incidence nulle, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau en regard. On définit l'épaisseur de peau par :

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

Avec :

f : Fréquence d'excitation.

σ : Conductivité électrique du matériau

μ : Perméabilité magnétique du matériau.

Dans le cas général, cette formule rigoureuse mais elle renseigne néanmoins assez précisément sur la profondeur au delà de laquelle les courants induits sont trop faibles pour être influents.

Le module de la densité de courant, dans une pièce d'épaisseur infinie excitée par une nappe de courants extérieure et parallèle à son plan [1], est représenté dans la figure I.10 et est exprimé par la relation suivante :

$$J_z = J_s e^{(-z/\delta)\sqrt{\pi f \sigma \mu}} = J_s e^{(-z/\delta)} \quad (I.2)$$

Z : la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce [m],

J_s : le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z=0$) [A/m²].

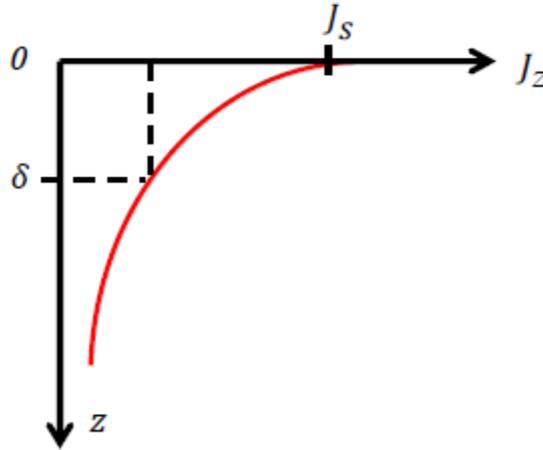


Figure I.8. Variation de l'amplitude des CF à l'intérieur d'un conducteur

I.9.4. Signaux d'excitation et exploitation

Il existe trois types d'excitation pour les capteurs à courants de Foucault:

- Contrôle par courants de Foucault mono-fréquence
- Contrôle par courants de Foucault multifréquence
- Contrôle par courants de Foucault pulsé

I.9.4.1. Contrôle par courant de Foucault mono-fréquence

Les courants de Foucault sont obtenus par un courant sinusoïdal de fréquence donnée. Pour des matériaux dont les caractéristiques sont linéaires, tous les signaux sont eux aussi sinusoïdaux. Le contrôle s'effectue par mesure d'impédance de la bobine.

L'exploitation se fait à l'aide du plan d'impédance normalisé. On utilise les grandeurs X_0 (réactance de la bobine hors matériau), X (réactance de la bobine en présence du matériau), R (résistance de la bobine en présence du matériau), R_0 (résistance de la bobine seule). R et X permettent de représenter les puissances actives et réactives mises en jeu dans tout le dispositif, en particulier dans la pièce où se développent les courants de Foucault. On définit:

- la résistance normalisée: $R_n = (R - R_0) / X_0$.
- la réactance normalisée: $X_n = X / X_0$.

On trace alors l'évolution de l'impédance normalisée dans le plan $X_n=f(R_n)$. La trajectoire de l'extrémité de vecteur impédance lors d'un déplacement relatif bobine matériau sera représentative de l'évolution d'une des propriétés du matériau (figure I.9) et constitue la signature. D'un point de vue industriel, des appareils permettent de visualiser directement le plan d'impédance [16].

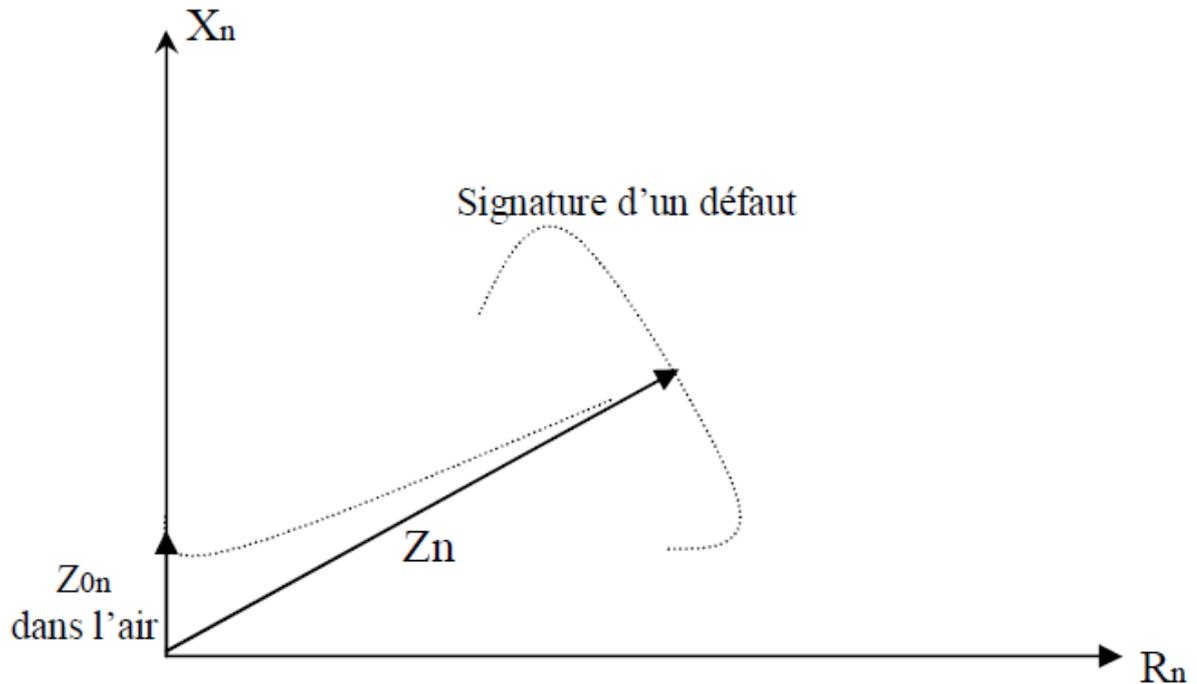


Figure I.9. Diagramme d'impédance normalisée

Z_{0n} : Impédance normalisée de la bobine dans l'air, $Z_{0n} = j$

Z_n : Impédance normalisée de la bobine au contact du matériau

I.9.4.2. Contrôle par courants de Foucault multifréquence

On considère l'hypothèse suivante : lorsque deux déformations se superposent sur une même section du tube, le signal résultant est la somme vectorielle des signaux de ces déformations pris séparément.

On utilise deux fréquences : la fréquence de base F_2 déterminée pour détecter de façon optimum les défauts et une fréquence F_1 permettant de caractériser la structure géométrique à éliminer. Le but est d'éliminer le signal de structure géométrique et de ne conserver que le signal de défaut [17].

I.9.4.3. Contrôle par courant de Foucault pulsé

L'alimentation par des courants pulsés est une dérivée de la méthode de l'alimentation mono fréquentiel mais, à la différence de celle-ci, le champ

électromagnétique est généré par une impulsion de courant d'amplitude et du temps variables. Cette technique permet de détecter des défauts dans des profondeurs non accessibles aux courants de Foucault par la méthode mono fréquence sinusoïdale [18].

Plus un défaut ne sera profond, plus le délai de l'inspection sera important avant l'apparition d'un gradient de température à la surface du matériau. Le temps d'observation nécessaire t_m pour détecter un défaut est de l'ordre de

$$T_m \approx \frac{z^2}{\alpha} \quad (I.3)$$

Où Z est la profondeur de l'inspection et α est la diffusivité thermique du matériau inspecté [8].

I.9.5. Structure contrôlée

La nature physique du matériau constituant les pièces à contrôler, leurs dimensions, les éventuelles anomalies existantes ainsi que la position du capteur par rapport à la surface du matériau sont les paramètres essentiels qui modifient la répartition des courants de Foucault, donc les résultats de mesures [19].

- **Mesure de la conductivité et de la perméabilité**

En prédisant les signaux de la sonde à courants de Foucault dus aux encoches dans le matériau ferromagnétique, il est nécessaire de connaître à la fois la conductivité électrique et la perméabilité magnétique relative μ_r du matériau. Bien que les mesures de conductivité par courants de Foucault puissent être effectuées de manière fiable pour le matériau non magnétique, il présente des incertitudes inhérentes au matériau magnétique. Cela est dû à le fait que l'impédance de la sonde à courants de Foucault change sur un assiette émerveillée à hauteur modérée les fréquences dépendent du produit de la conductivité et de la perméabilité

Aux basses fréquences Les paramètres sont dans une certaine mesure séparable, du moins en principe mais le signal des courants de Foucault s'affaiblit et devient moins facile à mesurer. C'est parce que le courant induit dépend de le taux de changement du champ qui diminue à mesure que la fréquence diminue [20].

I.9.6. Configurations de capteurs CND-CF

Il existe plusieurs configurations de mettre en place des capteurs afin d'effectuer un CND-CF envisageable pour atteindre aux résultats convenables. De ce fait, les configurations de base qui peuvent être réalisés en CND-CF sont présentées ci-après.

I.9.6.1. Capteur à double fonctions

La plus simple configuration est celui du capteur à double fonctions (capteur à réflexion), ce dernier est constitué d'une seule bobine qui joue le rôle d'une part un émetteur du champ magnétique (champ primaire), d'autre part un récepteur de la réaction du champ magnétique (champ secondaire) généré par la présence de la pièce (Figure I.11). L'exploitation des résultats se fait, par la mesure de l'impédance équivalente du capteur en régime harmonique [14].

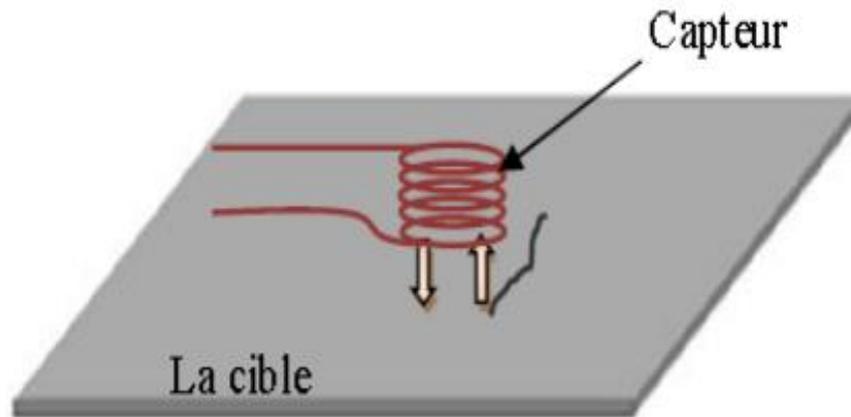


Figure. I.10. Capteur à double fonctions

I.9.6.2. 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 [7].

Avec ce type de capteurs, les récepteurs peuvent être disposés parallèlement ou perpendiculairement à l'émetteur et peuvent être utilisés en mode différentiel ou multi-différentiel. En réalité, la fabrication des capteurs à fonctions séparées dont les récepteurs sont perpendiculaires aux bobines émettrices est complexe, et de ce fait leur utilisation est réservée à des applications particulières nécessitant une forte résolution transversale [21].

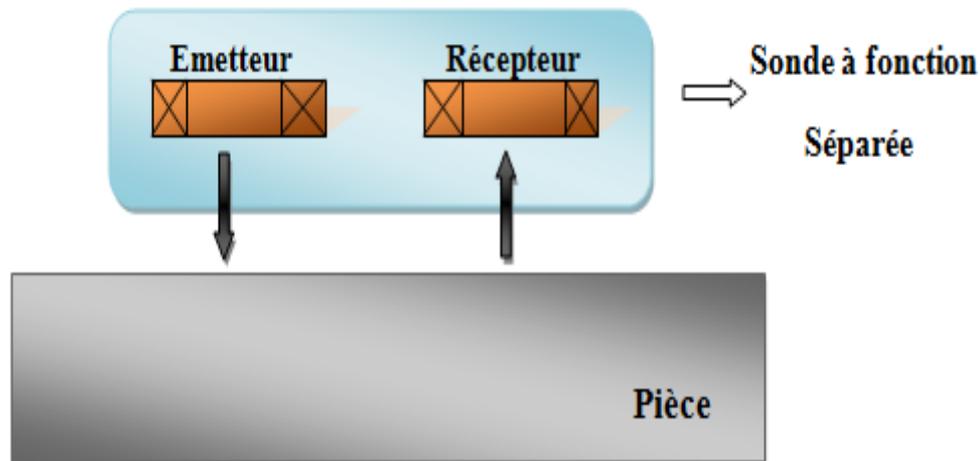


Figure I.11. Capteur à fonctions séparées

I.9.7. Applications du CND par courants de Foucault

L'histoire de l'apparition du CND par CF est intéressante : on constate que cette technique est employée dans de nombreuses applications. Plusieurs de ces applications, classées par ordre chronologique d'apparition, sont présentées ci-dessous.

- **Mesure de la variation de conductivité électrique ou détection d'une variation de la perméabilité magnétique**

En 1879, David Edward Hughes met en évidence l'effet de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique sur le champ de réaction. Hughes met au point un dispositif, la balance d'induction, qui est employé par la Royal Mint dans le but de vérifier les alliages de métaux utilisés pour la frappe des monnaies britanniques.

- **Mesure de l'épaisseur d'un matériau**

La mesure d'épaisseur d'un matériau conducteur par les CF apparaît comme application en 1926 suite aux recherches d'Hermann Ernest Kranz. Les travaux de Kranz ont comme objectif la mesure d'épaisseur de matériaux conducteurs inaccessible aux instruments mécaniques.

- **Détection de défauts (par exemple fissures ou trous)**

L'utilisation des CF pour la détection de défauts apparaît à la suite d'un accident grave aux États-Unis : le déraillement d'un train. Pour éviter une nouvelle catastrophe, la compagnie Sperry Rail Service, toujours en activité, est fondée en 1928. Le système de contrôle, monté dans une locomotive, permet la mise en évidence de discontinuités dans les rails

- **Mesure de l'épaisseur d'un revêtement**

La première référence de mesure d'épaisseur de revêtement est datée de 1945. Dinger développa une méthode et un appareil afin de mesurer l'épaisseur d'un revêtement de peinture sur un matériau conducteur non magnétique. Le film de peinture protège une structure métallique de la corrosion [15].

I.9.8. Avantages et limites du CND par courants de Foucault

Les avantages de cette technique, par rapport aux autres procédés, résident surtout dans sa simplicité de mise en œuvre, son coût réduit et la possibilité d'utiliser des appareils de contrôle à la fois petits, légers et rapides. Cette technique offre une sensibilité de détection importante avec une possibilité d'automatisation, ce qui la rend très appréciée sur le plan industriel.

Cependant, elle ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs et n'est pas bien adaptée à la détection des défauts profonds. Le CND par CF est également très sensible au lift-off (décollement entre bobine et pièce inspectée). Une bonne performance de contrôle implique notamment d'avoir un lift-off de faible valeur [1].

I.10. Conclusion

Ce chapitre a été consacré de fournir une brève étude bibliographique sur le contrôle non destructif, nous avons passé en revue certaines méthodes de CND et présenter quelques procédures d'emploi.

L'une des techniques les plus utilisées est celle des courants de Foucault, l'intérêt que, nous avons porté à celle-ci dans ce travail est plus grand à cause de son appartenance à notre domaine d'étude.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la modélisation numérique de cette technique et les résultats associés.

Chapitre II

Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

II.1. Introduction

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault est une méthode électromagnétique puisque son principe repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique. La compréhension de ce phénomène est l'étape principale pour l'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la conception des capteurs efficaces, et répondre aux problèmes rencontrés lors du contrôle des systèmes [22].

Les grandeurs électromagnétiques dans le composant varient à la fois dans l'espace et dans le temps. Pour calculer ces grandeurs à tout instant, la méthode la plus précise consiste à intégrer dans le temps des équations régissant le problème [23].

Ce chapitre est partagé en deux parties essentielles : la première partie sera consacrée à la description des équations de base pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques régis par les quatre équations de Maxwell. Dans la deuxième partie, nous présenterons un aperçu sur les méthodes de résolution utilisées dans ce type problèmes ainsi que les résultats de simulation.

II.2 Description du problème de CND-CF

Les problèmes de CND liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du spécimen en matériau conducteur et d'une source de courant « J_s », comme illustre la Figure II.1. Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω , ce dernier est délimité par la frontière Γ . En outre, le spécimen est caractérisé par une conductivité électrique anisotrope représentée sous forme d'un tenseur « $\vec{\sigma}$ » une perméabilité relative $\mu_r = 1$ et une permittivité relative $\epsilon_r = 1$.

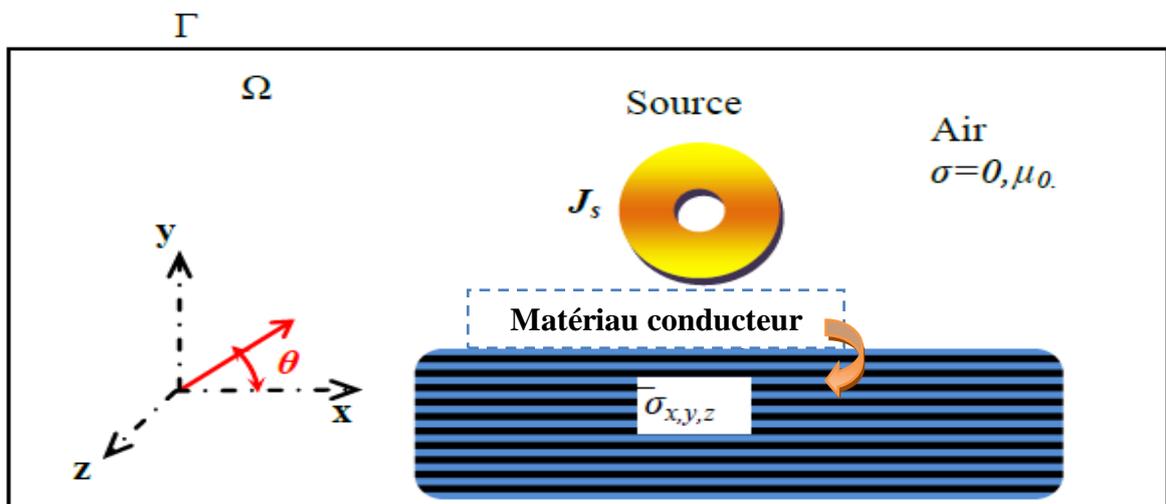


Figure II.1. Représentation schématique de problème étudié

L'objectif de cette étude est d'évaluer les courants de Foucault développés au sein d'un spécimen en matériau conducteur à l'effet de la présence d'un capteur inductif (Bobine) à double fonction, en conséquence l'exploitation de la variation de l'impédance du capteur. Précisément, il s'agit d'étudier le comportement électromagnétique du matériau, de caractériser les propriétés physiques et géométriques de la structure, ainsi que les éventuels défauts qu'elle pourrait contenir. Toutefois, nous ne tenons pas compte des effets de peau et de proximité au niveau de l'inducteur [14].

II.3 Équations de Maxwell et lois de comportement de milieux

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les quatre équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux. Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne, ou est due à, l'existence d'un autre champ au même point. Ces équations sont donc locales et sont valables dans l'espace et dans le temps. Pour calculer du champ électromagnétique qui règne dans un système matériel, on utilise les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de MAXWELL [12], qui s'écrivent sous leurs formes la plus générale comme suit :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

L'équation (Maxwell-Ampère) traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement. Elle établit une relation entre le champ magnétique et les courants électriques, c'est une généralisation du théorème d'Ampère.

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

L'équation (Maxwell-Faraday) traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur fixe ou en mouvement soumis à un champ magnétique variable. Elle établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique, elle correspond à la loi d'induction de Faraday.

Ces deux équations (Maxwell-Ampère) et (Maxwell-Faraday) définissent la relation entre les champs et leurs sources.

$$\overrightarrow{\text{div}}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\overrightarrow{\text{div}}\vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Les équations (conservation du flux magnétique) et (Maxwell -Gauss) traduisent respectivement la conservation du champ magnétique et de la charge électrique.

Avec

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

\vec{D} [A.s/m] et \vec{B} [T] : Inductions électrique et magnétique.

\vec{J} [A/m²] et ρ [c/m³] : Densités de courant de conduction et de charge électrique.

Pour définir complètement le phénomène électromagnétique, on ajoute aux équations précédentes les lois de comportement du milieu homogène et isotrope. Ces dernières sont la loi d'Ohm, les relations magnétiques et les relations diélectriques, elles montrent que les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent.

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{II.7})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{II.9})$$

Avec

σ [($\Omega \cdot m$)⁻¹] : conductivité électrique.

μ [H/m] : Perméabilité magnétique.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m perméabilité magnétique à vide.

μ_r = Perméabilité magnétiques relative au milieu.

ε [F/m] perméabilité électrique .

$\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ perméabilité électrique du vide.

$$\varepsilon_0 \mu_0 C^2 = 1$$

'C' la vitesse de la lumière.

II.4 Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire

II.4.1 Hypothèses simplificatrices

En électrotechnique, les fréquences utilisées sont inférieures aux radios fréquences qui sont de l'ordre de 10^{12} Hz. D'où les courants de déplacements sont faibles, ce qui revient à négliger le terme $(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t})$ devant le terme de conduction $\sigma \vec{E}$.

En considérant ces hypothèses, les équations de Maxwell deviennent :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.11})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.13})$$

II.4.2 Formulation \vec{T} - Ψ

La formulation \vec{T} - Ψ , décrit la distribution du champ électromagnétique par l'utilisation du potentiel vecteur électrique \vec{T} et du potentiel scalaire magnétique Ψ . 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 [24].

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (\text{II.14})$$

A partir de l'équation (II.14), l'expression de la densité de courant en termes de potentiel vecteur électrique est donnée par l'équation :

$$\vec{j} = \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \quad (\text{II.15})$$

On peut noter des équations (II.13) et (II.15) que \vec{T} et \vec{H} diffère par le gradient scalaire Ψ

$$\vec{H} = \vec{T} - \vec{\nabla} \Psi \quad (\text{II.16})$$

La combinaison des équations (II.11), (II.6) et (II.5) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + j\omega\mu (\vec{T} - \vec{\nabla} \Psi) = 0 \quad (\text{II.17})$$

De l'équation (II.12) et (II.16) on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu (\vec{T} - \vec{\nabla} \Psi)) = 0 \quad (\text{II.18})$$

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

$$\vec{H} = -\vec{\nabla}\Psi \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant (II.19) dans (II.12) :

$$-\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{\nabla}\Psi = 0 \quad (\text{II.20})$$

La divergence de \vec{T}_n n'est pas encore définie et par conséquent \vec{T} et Ψ reste ambigu.

Pour y remédier on utilise l'une de jauges communément utilisée en électromagnétisme en l'occurrence la jauge de coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (\text{II.21})$$

Cette condition nous autorise à rajouter à l'équation (II.14) le terme :

$$\overline{\nabla \cdot \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right)} \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \overline{\nabla \cdot \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right)} + j\omega u (\vec{T} - \vec{\nabla}\Psi) = 0 \quad (\text{II.23})$$

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

II.5. Méthodes de résolution des équations différentielles

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles décrites précédemment :

II.6. Méthodes analytiques

Les premiers travaux se sont basés sur des méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles à une seule dimension. Pour les modèles bidimensionnels, la solution analytique peut s'avérer très complexe même si pour des géométries simples, on peut trouver des solutions exactes à partir de la méthode de séparation des variables. Dans des cas particuliers, ces méthodes sont des références de validation pour le reste des autres méthodes.

II.7. Méthodes numériques

Avec l'évolution de l'outil informatique, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution de cette catégorie d'équations se généralise de plus en plus. Les méthodes numériques les plus connues sont : Méthode des différences finies (MDF), Méthode des éléments finis (MEF), Méthode des volumes finis (MVF) [16].

II.7.1. Méthode des différences finies (MDF)

Historiquement, cette méthode est la première qui a proposé la discrétisation du domaine d'étude en un réseau de points à mailles rectangulaires. Elle est basée sur le remplacement d'un opérateur de dérivation par un opérateur de différence entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Le développement en séries de Taylor est utilisé pour la simplification de transformation. Le domaine d'étude est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique en tridimensionnel. L'équation de diffusion est écrite pour chaque point ou nœud de maillage, pour cela on aura un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds [6].

L'avantage de cette méthode est qu'elle a une grande simplicité d'écriture et elle est simple à programmer. Son principal inconvénient c'est qu'elle ne peut pas être utilisée pour des géométries complexes.

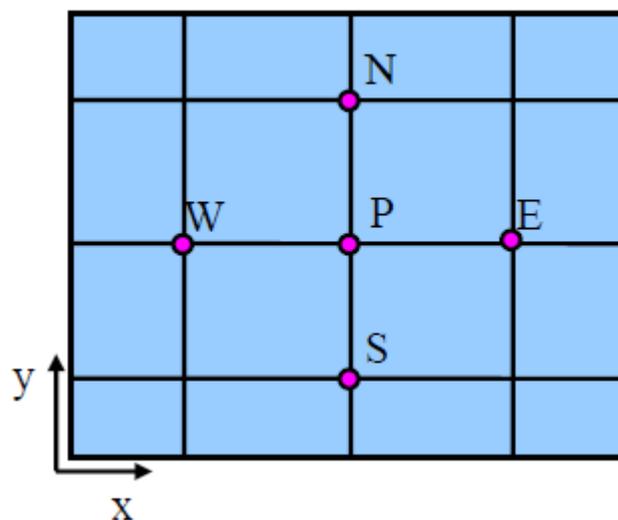


Figure II.2. Maillage de type différences finies

II.7.2. Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis a été mise en œuvre initialement pour les simulations numériques des lois de conservation en mécanique des fluides (Navier Stokes...).

Ultérieurement, elle a été utilisée pour résoudre les équations elliptiques et paraboliques. Elle s'appuie sur une subdivision du domaine d'étude en un nombre fini de sous-domaines élémentaires appelés volumes de contrôle. Ces volumes peuvent être construits autour des points d'un maillage initial (maillage dual) mais ce n'est pas une nécessité. Dans cette méthode, les inconnues sont les valeurs moyennes de la solution sur chaque cellule de contrôle. La méthode consiste à projeter et résoudre le problème sur chaque cellule.

Elle nécessite la mise en place de termes de flux (appelé flux caractéristiques) qui ont pour but de décrire les échanges entre cellules voisines, en respectant les propriétés de conservation. La méthode des volumes finis permet de traiter des géométries complexes, ce qui constitue un avantage par rapport à la méthode des différences finis.

II.7.3. La Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) est capable d'analyser des distributions de champ magnétique dans tous les dispositifs puisqu'elle peut inclure tous les détails de structure, de matériel et d'excitation. Afin d'obtenir l'exactitude acceptable de l'analyse finie d'élément, la machine doit être coupée en nombre énorme d'éléments géométriques. On assume que les valeurs de champ sont une fonction simple de la position dans ces éléments, permettant l'interpolation des résultats. Le temps requis pour calculer la distribution de champ, cependant, pourrait être très long, particulièrement dans l'étape d'optimisation de conception, qui a besoin d'un grand nombre d'itérations pour atteindre une conception optimum.

Cette méthode est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une bonne précision et d'étudier de façon précise la répartition interne du flux magnétique, en prenant en compte les phénomènes de saturation et de création de courants de Foucault à l'intérieur des matériaux. Cette méthode est fondée sur la résolution des équations de Maxwell [2].

II.7.3.1.Principes de la MEF

- ✚ La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds.

- ✚ Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.
- ✚ La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.
- ✚ Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation.

III.7.3.2.Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance a priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée à partir du principe de l'action hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle type intégrale définie par :

$$F(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega \quad (\text{II.24})$$

Avec

Ω : Domaine d'étude.

L : Fonction de Lagrange déduite de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système.

Dans le cas d'un phénomène magnéto-statique, la fonction L est donnée par :

$$L = \int_0^B v. b db - JA \quad (\text{II.25})$$

La fonctionnelle d'énergie est donnée alors comme suit :

$$\int_{\Omega} \left[\int_0^B v. b db - JA \right]. d\Omega \quad (\text{II.26})$$

Où

L : Fonction de Lagrange.

A : Potentiel vecteur magnétique [T. m].

J : Densité de courant [A/m^2]⁻¹

v : Réductivité magnétique [H /m]

B : Induction magnétique [T]

La résolution du problème variationnel ainsi défini, revient à minimiser la fonctionnelle d'énergie F(A). La minimisation est effectuée en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \quad (\text{II.27})$$

Ou :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_N} = 0 \quad (\text{II.28})$$

N : Nombre de nœuds du domaine d'étude.

A_i : Est l'inconnu aux nœuds i du domaine.

a) Méthode des résidus pondérés

La méthode des résidus pondérés est une méthode qui consiste à rechercher la valeur numérique des paramètres d'une fonction d'essai U* qui soit la plus proche possible de la solution U.

a) Principe de la méthode

La méthode des résidus pondérés est basée sur la détermination du résidu par :

$$R = L(A) - f_v \quad (\text{II.29})$$

Avec

R : représente le résidu de l'approximation.

L(A) : Opérateur différentiel.

f_v : Fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : L'inconnue du problème.

L'aide de fonctions de pondération bien choisies, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en n points du domaine Ω :

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \phi_i \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{II.30})$$

Avec

Φ_i : Fonction de projection

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

b) Différentes méthodes déduites des résidus pondérés

Le choix des fonctions de pondération appelées aussi fonctions de projection, conduit à plusieurs méthodes. Parmi celles-ci nous citerons :

- La méthode de collocation par point.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de Galerkin.

La méthode de collocation par point utilise les fonctions de Dirac comme fonction de pondération, la méthode des moindres carrés est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites. La méthode de Galerkin consiste à choisir des fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation.

Contrairement à la méthode variationnelle. La méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance au préalable, de la fonctionnelle d'énergie du système.

Dans le cas de l'utilisation de la méthode de Galerkin, on obtient un système algébrique symétrique facile à résoudre

On se limitera dans ce qui suit, à la méthode projective de Galerkin qui est utilisée dans le cadre de ce travail.

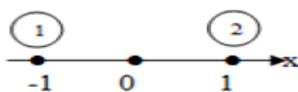
c) La discrétisation

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre fini de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément à l'aide des fonctions d'interpolation. La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatifs aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodale [7].

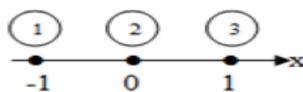
❖ Eléments finis réels

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définis selon le degré de la courbe d'interpolation qui lui est associés. On rencontre généralement, des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

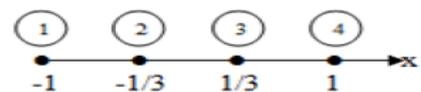
• Eléments à une dimension



Linéaire (4 nœuds)



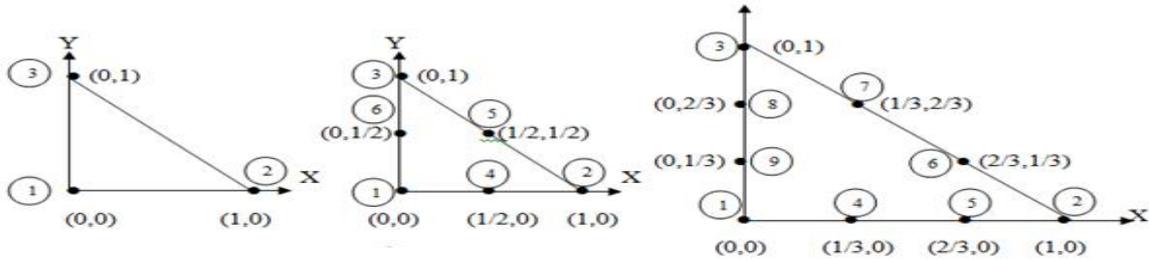
Quadratique (3 nœuds)



Cubique (4 nœuds)

• Eléments à deux dimensions

- ✓ Eléments triangulaires

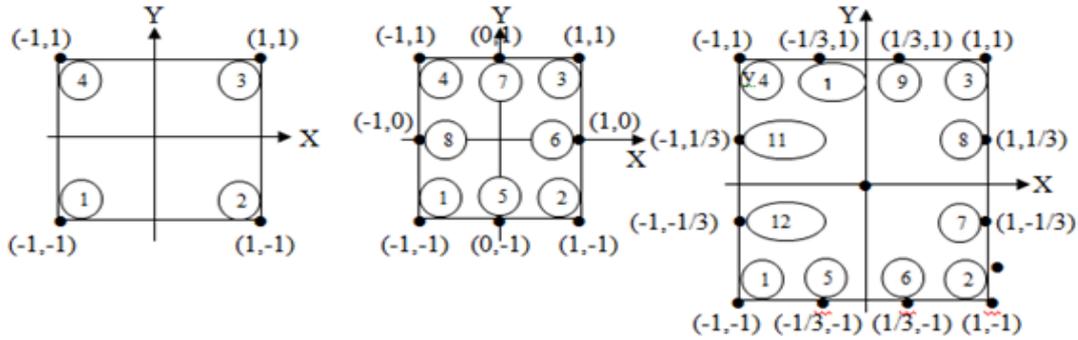


Linéaire (3 nœuds)

Quadratique (6 nœuds)

Cubique (9 nœuds)

✓ Éléments carrés

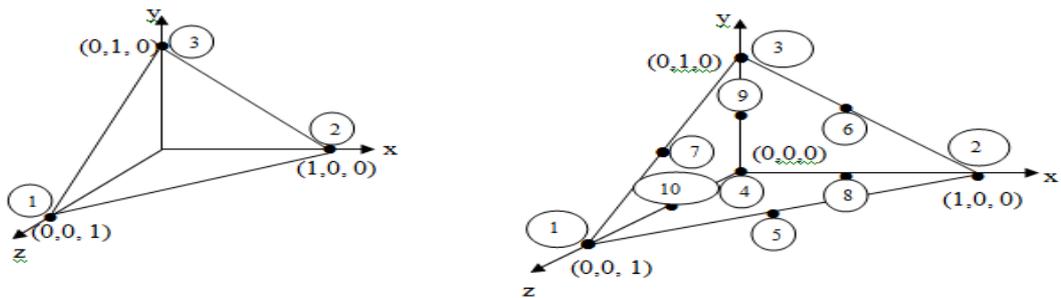


Linéaire (4 nœuds)

Quadratique (8 nœuds)

Cubique (12 nœuds)

✓ Éléments à trois dimensions



Linéaire (4 nœuds)

Quadratique (10 nœuds)

Etant donné que le logiciel de simulation utilisé (MATLAB) fait appel à l'élément triangulaire linéaire, on ne s'intéressera dans la suite qu'à celui-ci.

❖ Fonction d'interpolation

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de Pascal, donné ci-dessous :

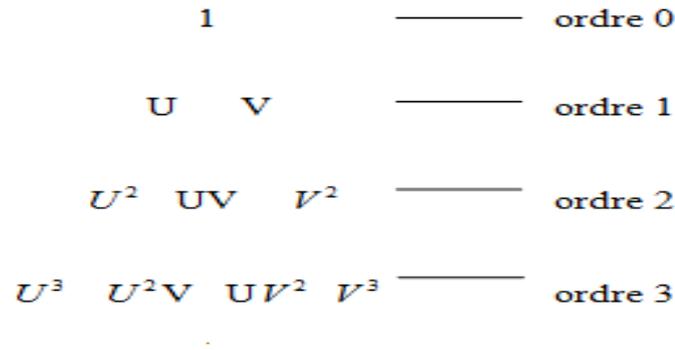


Figure II.3. Triangle de Pascal

II.8. Calcul de la variation d'impédance

La mesure des CF n'est pas directement accessible à l'expérience, et il faut donc passer nécessairement par la mesure d'une grandeur connexe, en l'occurrence :

- La mesure de l'induction, généralement par effet Hall
- La mesure de l'impédance du capteur

La mesure de ces grandeurs doit être faite pour un matériau sain et pour un matériau comportant des défauts.

Notre choix s'est porté sur le calcul de l'impédance, étant donné que nos expériences sont basées sur la mesure de la variation d'impédance de la bobine. On doit disposer tout d'abord d'un modèle qui nous permet de calculer le champ électrique en présence et en absence du défaut. Il est nécessaire de trouver ensuite une méthode pour calculer la variation d'impédance engendrée par la présence de défaut. L'impédance de la sonde est appelée Z et sa variation ΔZ .

II.8.1. 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.

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

$$P_j = \iiint_V \frac{j^2}{\sigma} \cdot dv \quad (\text{II.31})$$

$$P_j = RI^2 \quad (\text{II.32})$$

D'où

$$R = \frac{N^2}{s^2 J^2} \cdot P_j \quad (\text{II.33})$$

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

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{B^2}{\mu} \cdot dv \quad (\text{II.34})$$

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (\text{II.35})$$

D'où

$$L = \frac{2N^2}{s^2 J^2} W_m \quad (\text{II.36})$$

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 [13].

II .9 Applications et résultats

II.9.1. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell

Ansys-Maxwell est un logiciel leader dans la conception, l'analyse et l'optimisation 2D et 3D des dispositifs électromagnétiques, tels que les machines électriques tournantes, les transformateurs, les actionneurs, des isolateurs, des bobines...etc. Ansys-Maxwell utilise l'approche par éléments finis pour résoudre des équations de Maxwell et le calcul du champ électromagnétique dans les structures avec la prise en compte des conditions aux limites.

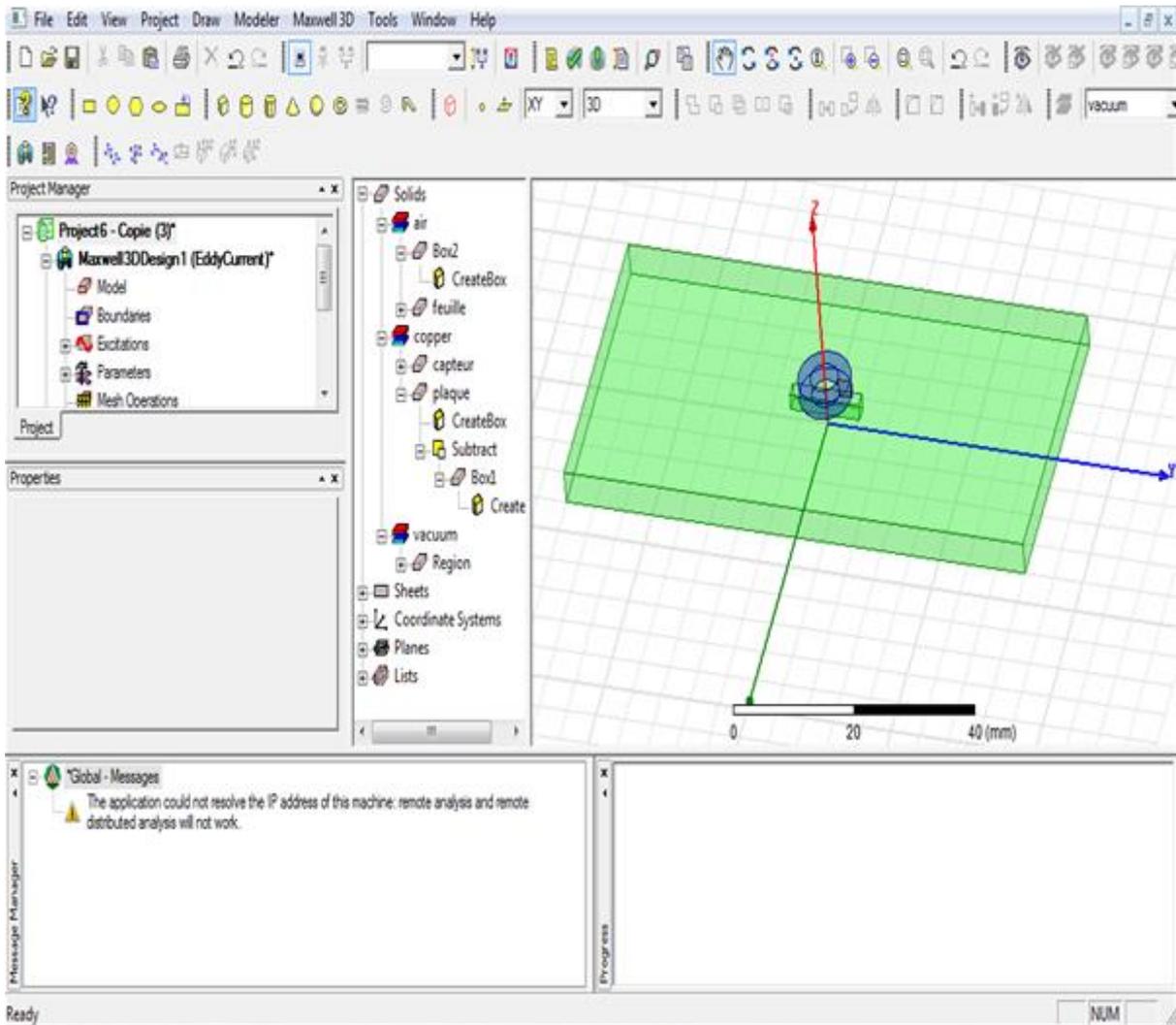


Figure II.4. La fenêtre de logiciel Maxwell 3D.

II.9.2. Simulation d'une configuration capteur / plaque avec défaut

L'application étudiée traite le scan d'une plaque métallique qui contient une fissure surfacique par une bobine à air (capteur) suivant l'axe OY. Nous allons faire des simulations de l'impédance de la bobine pour différents paramètres du système tels que : les dimensions de défaut, la fréquence d'excitation, la distance entre la bobine et la plaque (lift-off).

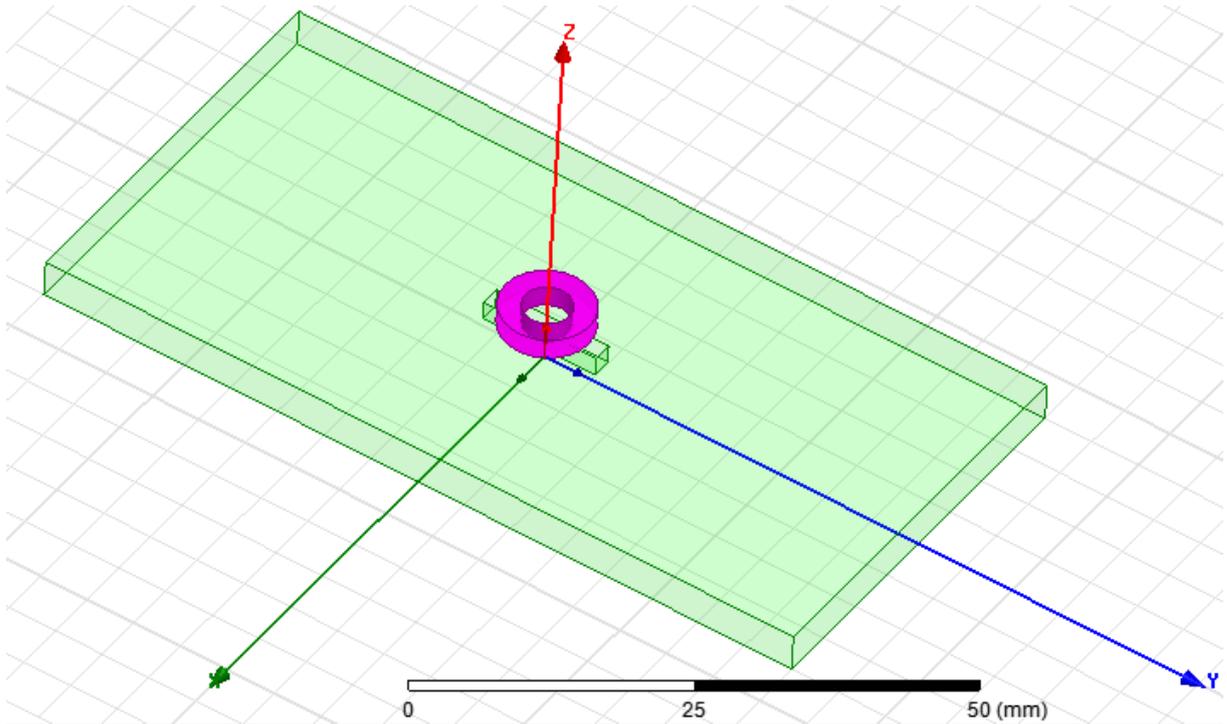


Figure II.5. Configuration du système simulé

Les différents paramètres du système sont listés dans le tableau ci-dessous :

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

Paramètres	Valeurs
Capteur	
Rayon intérieur	2.35 mm
Rayon extérieur	4.5 mm
Hauteur	2.2 mm
Lift-off	0.13 mm
Nombre de spires	170
Fréquence	100 kHz
plaque	
longueur	80 mm
largeur	40 mm
Epaisseur	4 mm
conductivité électrique	58 MS/m

Fissure	
Longueur	12mm, 16mm, 20mm
Largeur	2 mm
Profondeur	2 mm

II.9.2.1. Maillage de demain d'étude

Le maillage du système capteur/pièce pour différentes positions du capteur est présenté par les figures (II.6, II.7, II.8). Nous remarquons que la densité du maillage est plus importante près de la source et elle diminue en s'éloignant de cette dernière

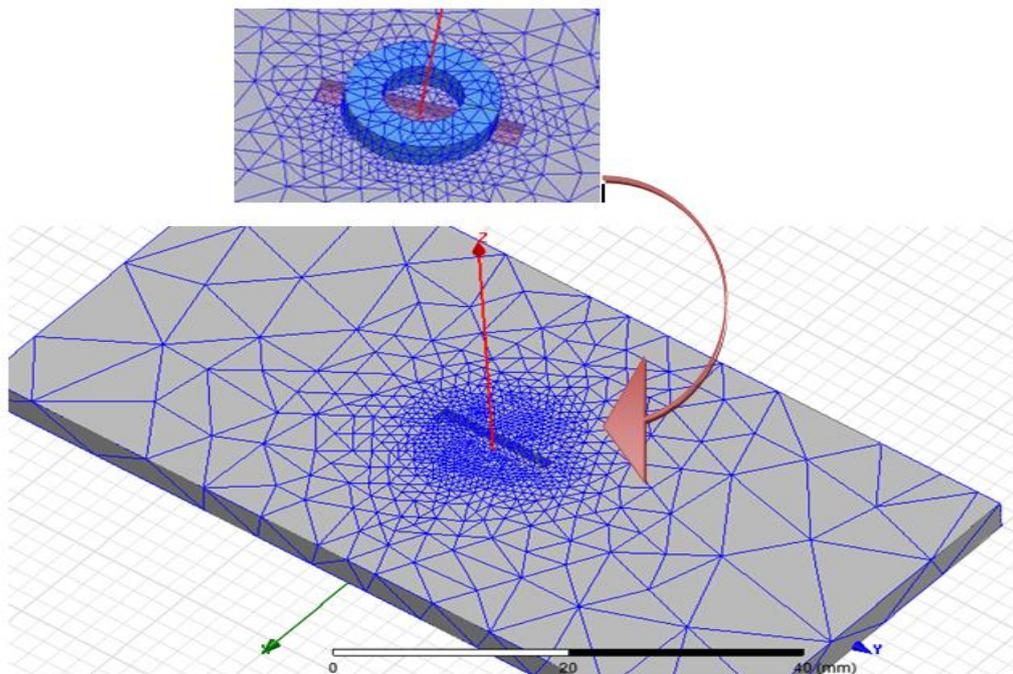


Figure II.6.Maillage au milieu du défaut.

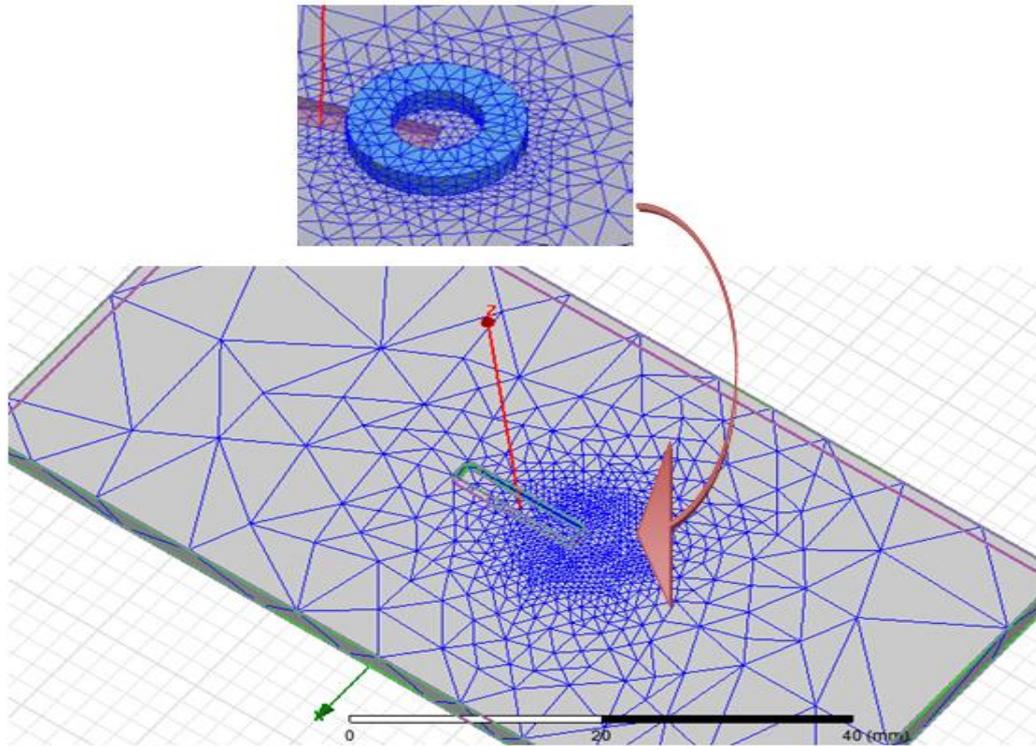


Figure II.7.Maillage à l'extrémité du défaut.

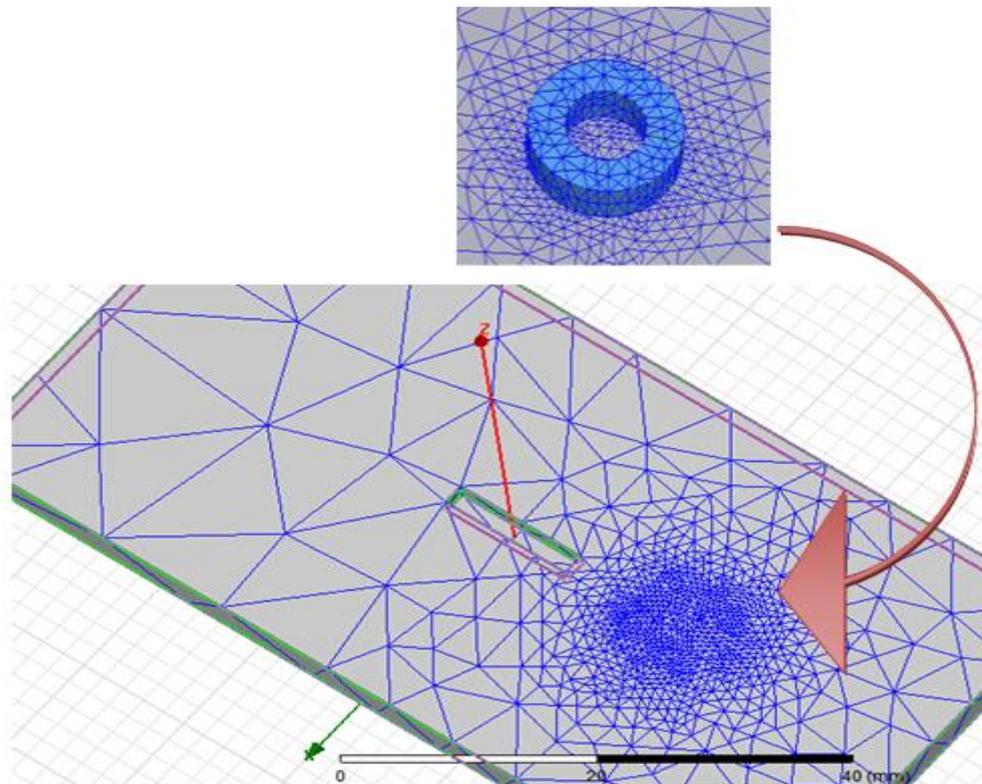
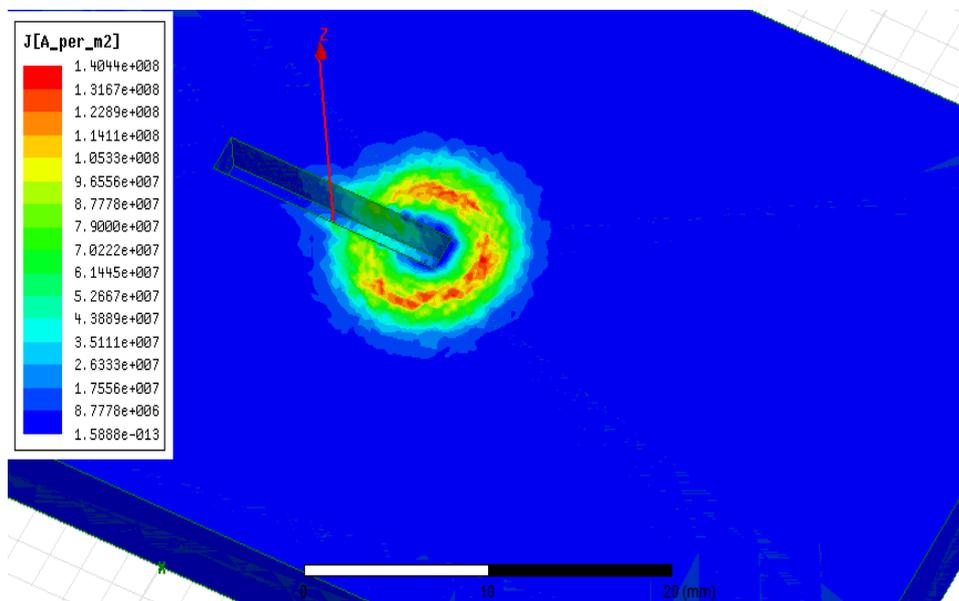
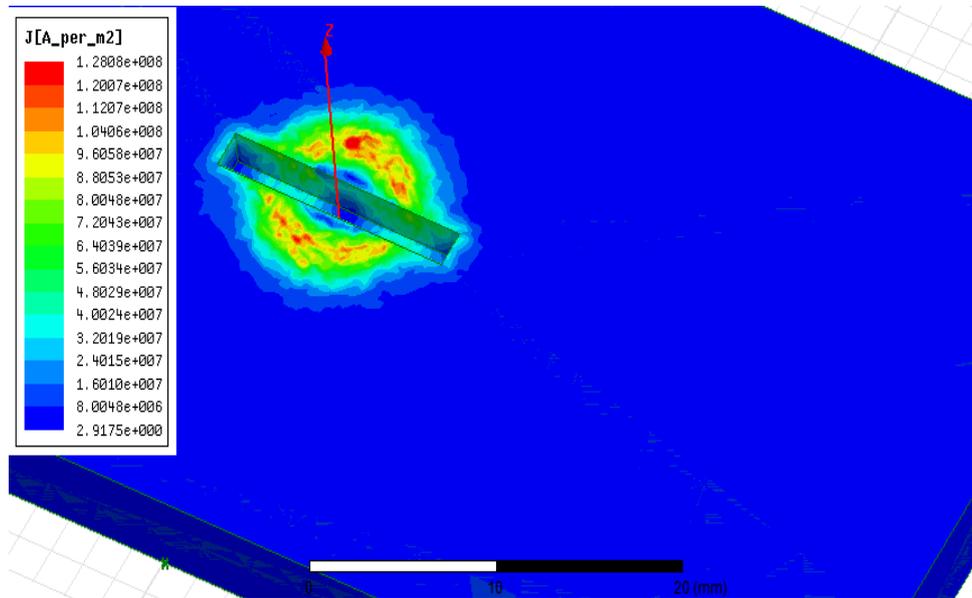


Figure II.8.Maillage dans la zone saine.

II.9.2.2. Distribution des courants induits

Les figures (II.9, II.10 et II.11) montrent les trajectoires des CF en fonction de la position du capteur. Nous remarquons que le courant induit change son chemin lorsque il y'a une fissure (défaut), cette changement affecté sur le champ réfléchi et de ce fait l'impédance du capteur.



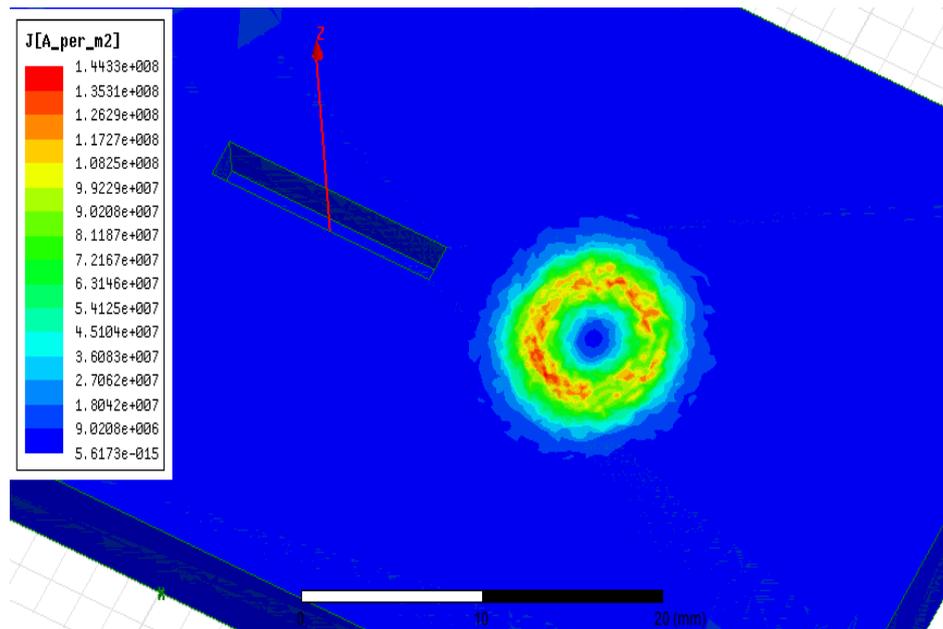


Figure II.11.Distribution des CF dans la zone saine.

II.9.3.Résultats en termes de variation d'impédance

Pour garder que le signal du défaut dans la pièce inspectée, la variation de l'impédance est obtenue par la relation suivante :

$$\Delta Z = \frac{Z_i - Z_{sain}}{Z_0}$$

Z_i : Impédance de la bobine à la position i.

Z_{sain} : Impédance de la bobine dans la zone saine (absence le défaut).

Z_0 : Impédance de la bobine dans l'aire (A vide).

II.9.3.1. Effet de la longueur du défaut

Pour une fréquence d'excitation de 100 kHz et un lift-off de 0.13mm, Nous allons effectuer le scan d'une plaque en cuivre contenant un défaut de larguer et profondeur fixe varier la longueur de ce dernier. Les résultats obtenus sont présentés dans le graphe ci-dessous :

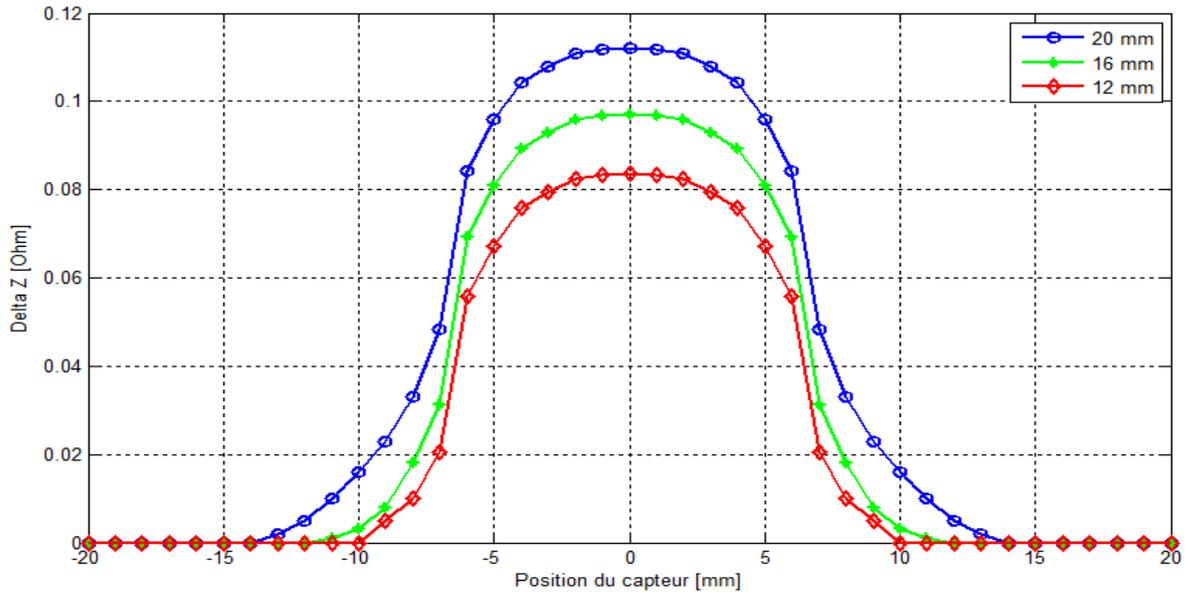


Figure II.12. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la longueur du défaut

La figure II.12 montre que l'augmentation de longueur du défaut conduit à une augmentation de la variation de l'impédance ce qui signifie que le signal CF dépend fortement de la longueur de défaut

II.9.3.2. Effet de la profondeur du défaut

Pour une fréquence d'excitation de 100 kHz et un lift-off de 0.13 mm, on fait varier la valeur de la profondeur du défaut comme suit : 10%, 30%, 60%, et 100% de l'épaisseur du plaque. La figure (II.13) regroupe les signaux obtenus de cette simulation.

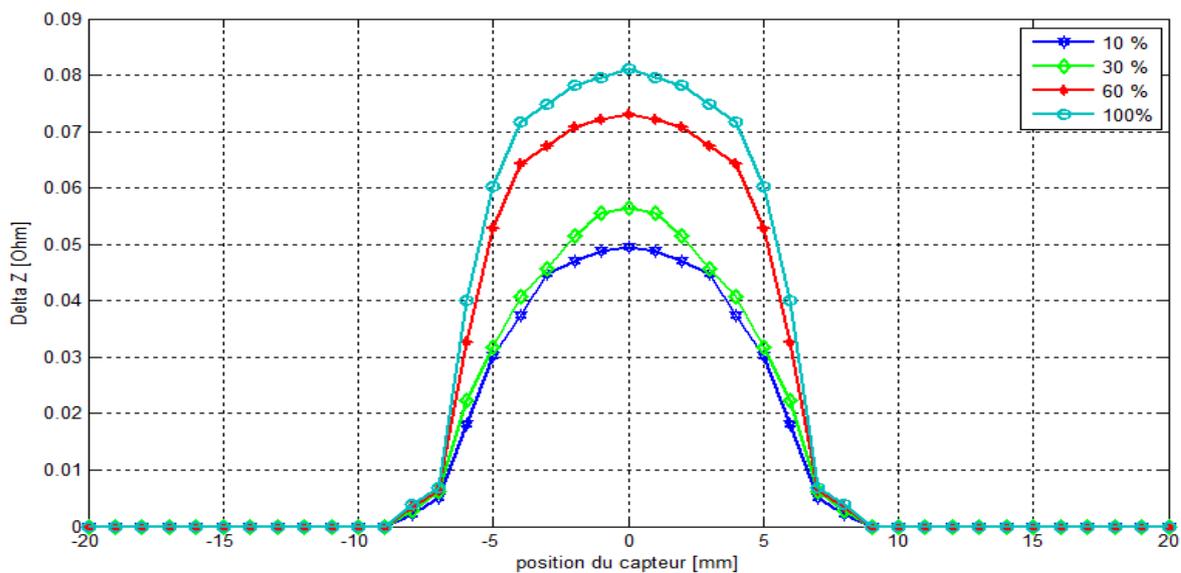


Figure II.13. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut

A travers cette figure, nous voyons clairement que l'augmentation de profondeur de défaut conduit à une augmentation de la variation de l'impédance de capteur.

II.9.3.3. Effet de la fréquence

Pour différentes valeurs de fréquence d'excitation 50, 100, 200 et 400 kHz, la figure II.14 représentent les variations de l'impédance en fonction de la position du capteur.

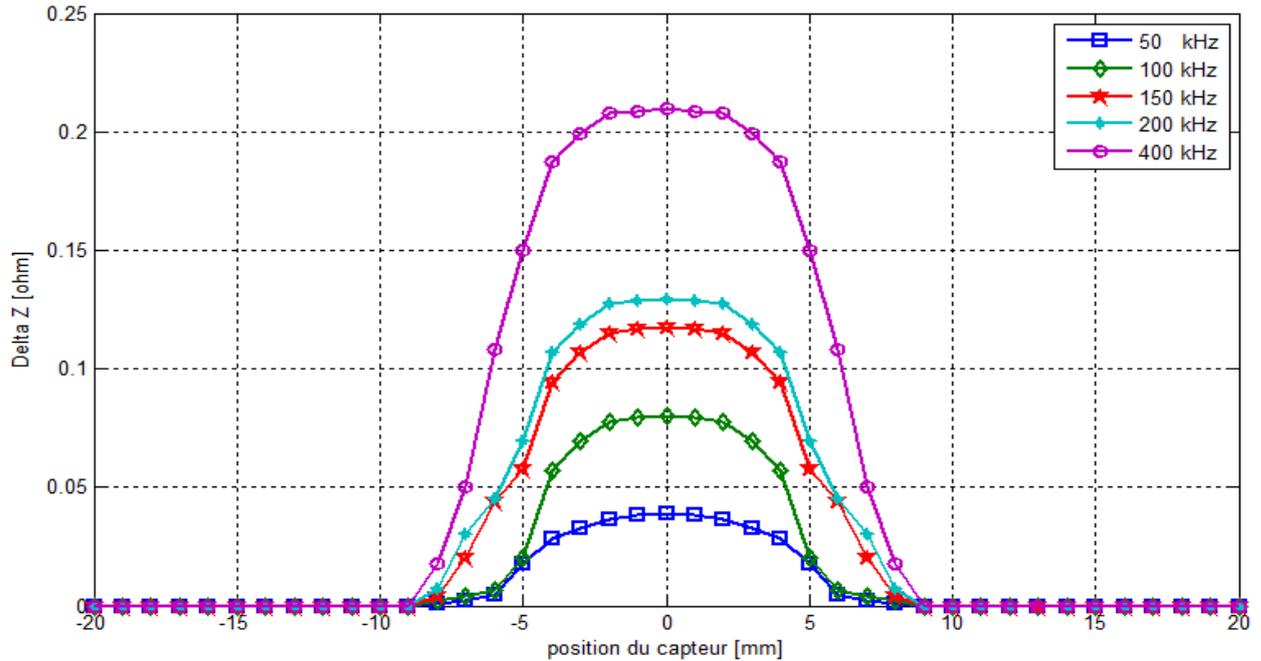


Figure II.14. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'alimentation du capteur

A partir de cette figure, nous remarquons que la variation de l'impédance augmente avec l'augmentation de la fréquence. Ce qui implique plus la fréquence est grande plus la détection est meilleur.

II.9.3.4. Effet du lift-off

Dans cette application nous allons effectuer le scan de la pièce pour différent valeurs du lift-off. Les résultats des scans sont rapportés dans la figure II.15.

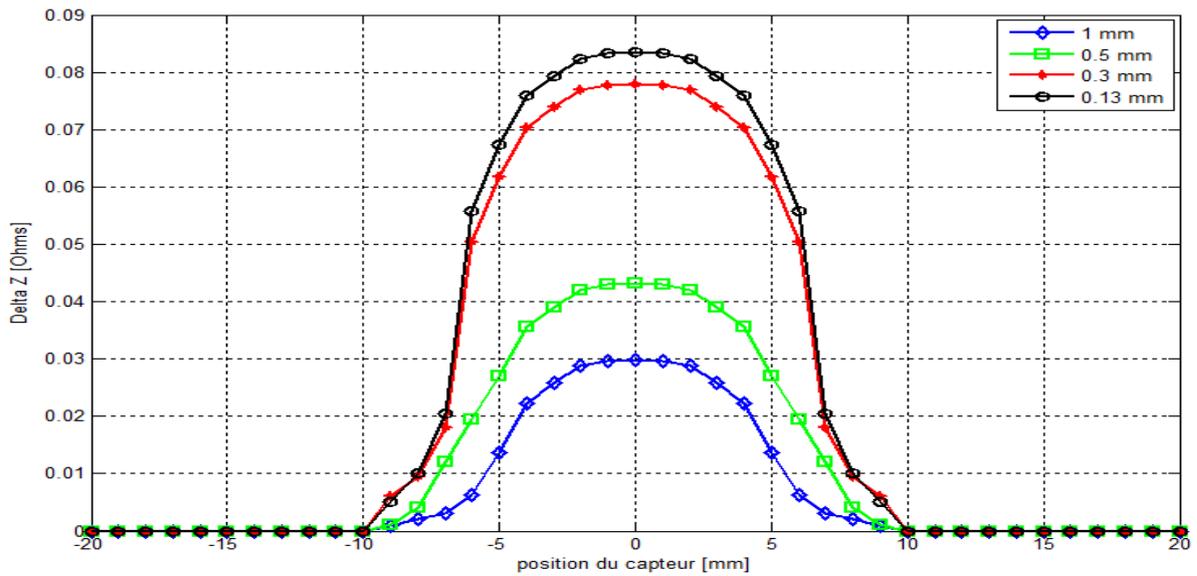


Figure II.15. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes Lift-off

Nous remarquons que la variation de l'impédance décroît avec l'augmentation de lift-off, lorsque le lift-off augmente l'interaction magnétique entre le capteur et la pièce diminue ce qui fait baisser la qualité du signal.

II.9.3.5. Effet de la conductivité électrique de la pièce

Nous allons considérer maintenant l'effet de la conductivité électrique de la plaque sur la qualité de la détection pour une fréquence de 100 KHz et un lift-off de 0.13 mm, nous allons effectuer le scan de plaque en cuivre (58 MS/m), Zinc (16.7 MS/m), platine (9.3 MS/m), steel-stainless (1.1 MS/m).

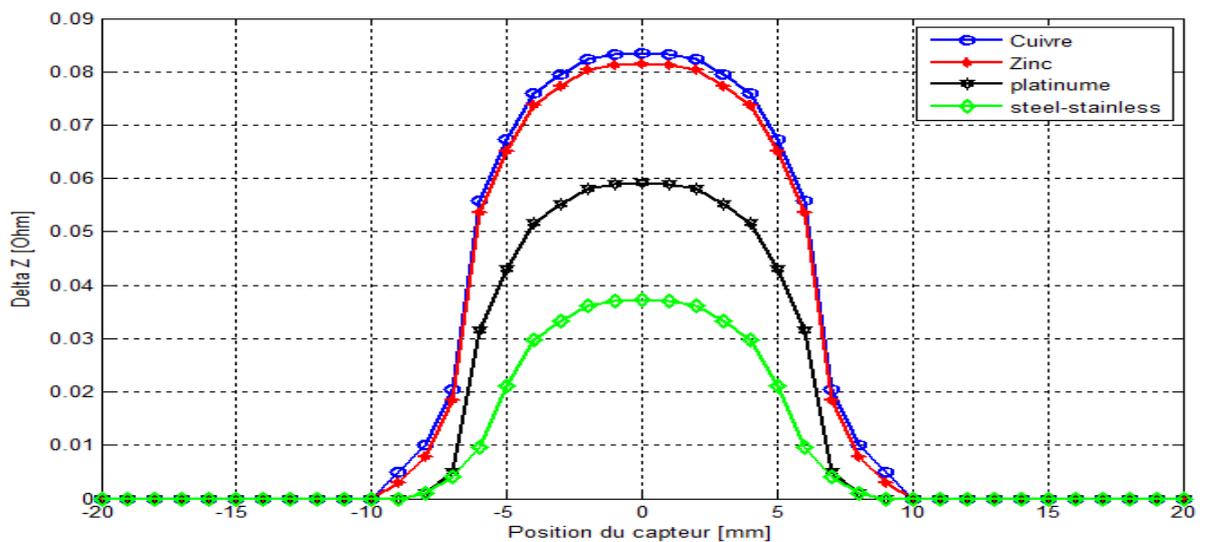


Figure II.16. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes conductivités électriques

D'après la figure II.16, on remarque que la variation de l'impédance est plus grande lorsque l'on augmente la conductivité de la pièce ce qui implique une meilleure détection de défaut.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, on a passé en revue les équations de l'électromagnétisme nécessaires pour la modélisation des structures CND-CF.

Par la suite, nous avons utilisé la technique des éléments finis pour simuler le CND-CF d'une plaque comportant un défaut, et ce afin de constituer une base de données à utiliser dans le problème inverse étudié dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Etude du problème inverse

III.1.Introduction

L'inversion des signaux issus d'un capteur, consiste à remonter aux paramètres de la situation qui les a créés. Le procédé d'inversion fait souvent appel à la connaissance d'un modèle dit direct reproduisant plus ou moins fidèlement le comportement du capteur en fonction de ses paramètres d'entrée. Nous nous intéressons ici à des signaux qui sont sous forme de cloches en deux dimensions, dont l'intérêt réside en particulier dans la corrélation des informations géométriques et électromagnétiques.

Nous avons présenté dans le chapitre précédent une modélisation numérique par éléments finis, permettant de rendre compte, des interactions entre les courants de Foucault et les défauts à travers l'impédance du capteur. Les résultats de cette modélisation sont fournis en terme d'impédance du capteur en fonction de la position de ce dernier et ce pour différentes dimensions géométriques du défaut. Nous disposons donc d'une base de données sur laquelle nous pouvons nous appuyer pour inverser les signaux acquis.

III.2.Problème inverse

Le problème inverse a pour objectif de reconstruire un ou plusieurs paramètres de la cible, qui sont inconnus à partir de la réponse du capteur. Pour remonter aux grandeurs d'intérêt à partir des grandeurs observées (différentes acquisitions issues du capteur CF), il faut naturellement connaître la relation de dépendance les liant. Cette logique implique l'existence de deux grandes étapes dans la résolution de tout problème inverse :

- La construction et le développement d'un modèle direct reliant les caractéristiques physiques et géométriques de la pièce testée aux signaux CF, représentatif de la réalité physique et adapté à des fins d'inversion.
- L'inversion des grandeurs observées en s'appuyant sur la résolution de ce modèle direct. La figure.III.1 représente de manière générale le schéma d'étude de tout problème inverse [25].

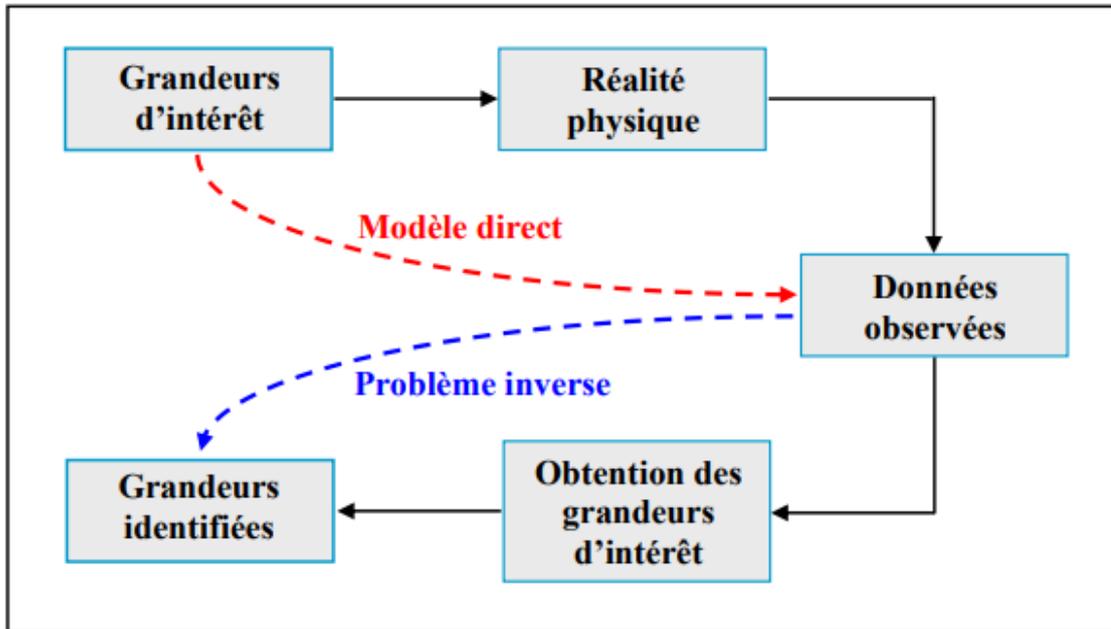


Figure.III.1.Schéma d'étude général d'un problème inverse

III.2.1.Stratégie de traitement du problème inverse

Sur la figure.III.2 est présenté le schéma fonctionnel d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault. Les équations d'état décrivent les phénomènes électromagnétiques. Dans le problème direct, les variables d'entrée sont les paramètres géométriques de la fissure (profondeur et longueur) et les sources (intensité, fréquence,...), les variables de sortie sont l'impédance de la bobine de mesure.

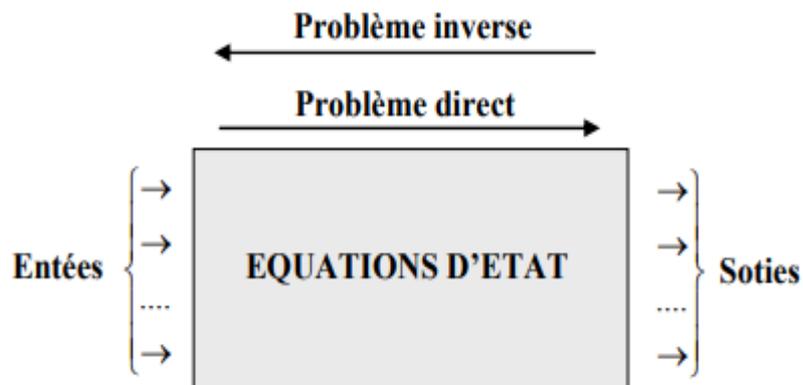


Figure.III.2. Schéma fonctionnel d'un système de CND.

La première étape de la stratégie proposée consiste à construire le modèle direct en éléments finis 3D. Le modèle développé doit aboutir au calcul de l'impédance du capteur en fonction des grandeurs d'intérêts pour des configurations de fissures connues et la construction d'une base de données contenant des entrées (largeur, profondeur et longueur de fissures) et des sorties contenant les signatures de fissures correspondantes. Le modèle doit être ensuite validé moyennant des mesures d'impédance issues de mesures expérimentales.

La seconde étape consiste à inverser les données obtenues, en utilisant un modèle à base de la régression linéaire sous le logiciel Minitab. Ce choix est motivé par deux raisons. Premièrement, la régression linéaire est capable d'approximer avec une précision donnée toute fonction réelle ayant un nombre fini de discontinuités. Deuxièmement, la régression linéaire est connue pour sa rapidité et arrive à retrouver quasi-instantanément la solution du problème inverse.

III.3.Présentation de logiciel Minitab

Développé en 1972 à la Pennsylvania State University, Minitab (Minitab Inc.) est un logiciel de statistique offrant une panoplie de méthodes d'analyse statistiques allant de la statistique élémentaire à des traitements plus avancés (multivariés, modèle linéaire, survie...) en passant par la Maîtrise Statistique des Procédés (MSP). Le choix de ce logiciel est dicté par sa facilité d'utilisation (il ne nécessite quasiment pas d'apprentissage), son caractère pédagogique et la présence d'un module spécifique MSP. Outre les statistiques descriptives, Minitab est largement utilisé en régression et analyse de la variance, en MSP et plans d'expériences. C'est un outil pédagogique et performant pour l'apprentissage de la statistique en particulier sur de petits fichiers.

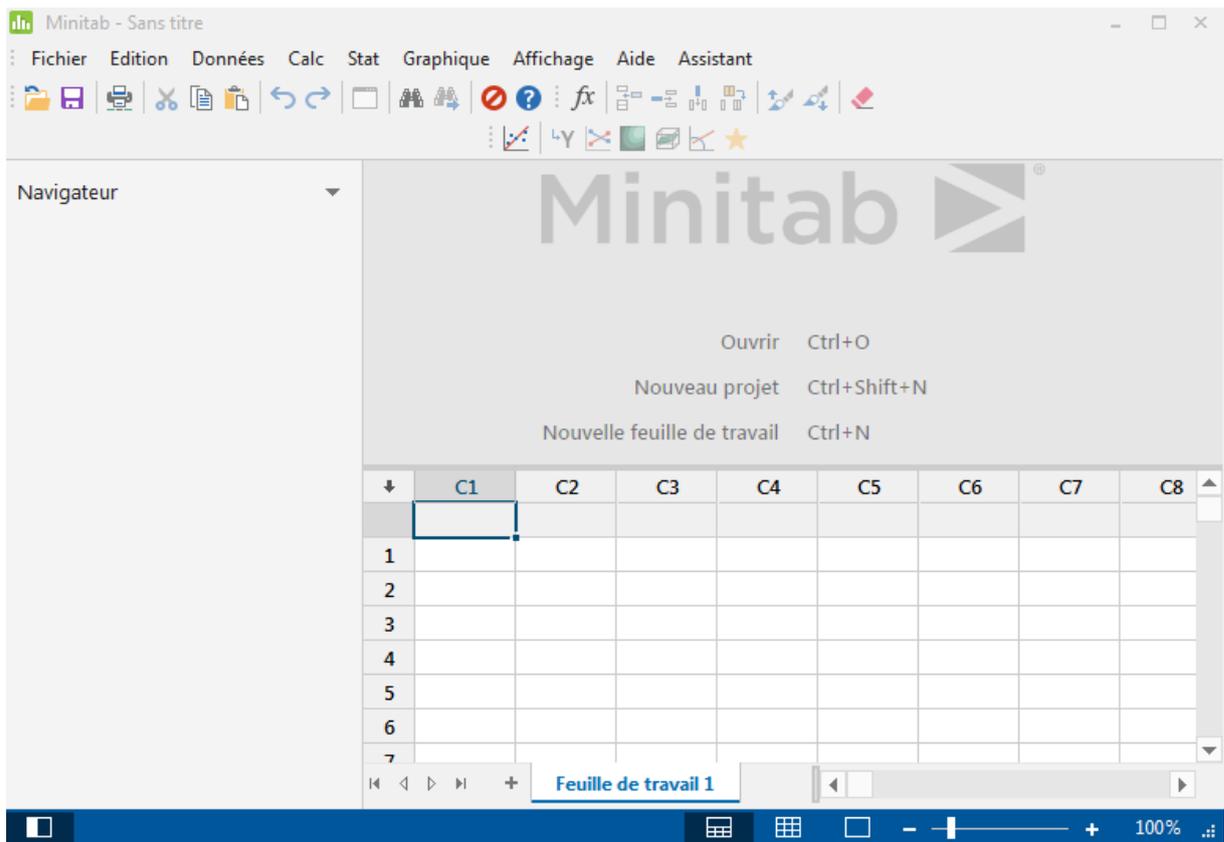


Figure III.3. La fenêtre principale de Minitab

III.4. Présentation de la régression

La régression Permet de modéliser la relation entre des prédicteurs de catégorie ou continus et une réponse, et d'utiliser le modèle pour prévoir les valeurs de réponse pour de nouvelles observations. Vous pouvez facilement inclure des termes d'interaction et polynomiaux, transformer la réponse ou utiliser la régression pas à pas si nécessaire.

III.4.1. La régression linéaire simple

La régression linéaire simple examine la relation linéaire entre deux variables continues : une réponse (Y) et un prédicteur (X). Lorsqu'il existe une relation entre les deux variables, il est possible de prévoir une valeur de réponse à partir de la valeur du prédicteur avec une précision améliorée.

La régression fournit la droite qui s'ajuste le mieux aux données. Cette droite peut être utilisée pour :

- Examiner la façon dont la variable de réponse évolue lorsque la variable de prédiction varie.
- Prédire la valeur d'une variable de réponse (Y) pour n'importe quelle variable de prédiction (X).

Le modèle de régression linéaire simple s'écrit :

$$y_i = a.x_i + b + \varepsilon_i \quad (\text{III.1})$$

a et b sont les paramètres (les coefficients) du modèle. Dans le cas spécifique de la régression simple, a est la pente, b est la constante.

Nous disposons d'un échantillon de n observations (indépendantes et identiquement distribuées) pour estimer ces paramètres.

Le terme aléatoire ε_i que l'on appelle l'erreur du modèle, tient un rôle très important dans la régression. Il permet de résumer toute l'information qui n'est pas prise en compte dans la relation linéaire que l'on cherche à établir entre Y et X c.-à-d. les problèmes de spécifications, l'approximation par la linéarité, résumer le rôle des variables explicatives absentes, etc. Comme nous le verrons plus bas, les propriétés des estimateurs reposent en grande partie sur les hypothèses que nous formulerons à propos de ε . En pratique, après avoir estimé les paramètres de la régression, les premières variations portent sur l'erreur calculée sur les données (on parle de "résidus") lors de la modélisation

III.4.2. La régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple examine les relations linéaires entre une réponse continue et deux prédicteurs ou plus.

Si le nombre des prédicteurs est important, avant d'ajuster un modèle de régression avec tous les prédicteurs, vous devez utiliser la régression pas à pas ou celle sur les meilleurs sous-ensembles pour sélectionner le modèle en éliminant les prédicteurs non associés aux réponses.

L'une des propriétés intéressantes est qu'ils savent prévoir avec précision des données qui ne faisaient pas partie des données d'apprentissage

Le principe de la régression linéaire multiple est de modéliser une variable dépendante quantitative Y , au travers d'une combinaison linéaire de p variables explicatives quantitatives, X_1, X_2, \dots, X_n . Le modèle déterministe (ne prenant pas en compte d'aléa)

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_n X_{ni} + \varepsilon_i \quad (\text{III.2})$$

Où y_i est la valeur observée pour la variable dépendante pour l'observation i , x_{ij} est la valeur prise par la variable j pour l'observation i , et ε_i est l'erreur du modèle.

- **Ecriture matricielle.**

Le modèle (III.1) s'écrit sous la forme matricielle suivante

$$Y_{(n \times 1)} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad \beta_{(n \times 1)} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}$$

$$X_{(n \times p+1)} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{p1} \\ 1 & X_{12} & X_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{2n} & X_{pn} \end{bmatrix}$$

Dans le cadre d'un modèle linéaire multiple, on peut représenter graphiquement la relation entre x et y à travers un nuage de points. L'estimation du modèle linéaire permet de tracer la droite de régression :

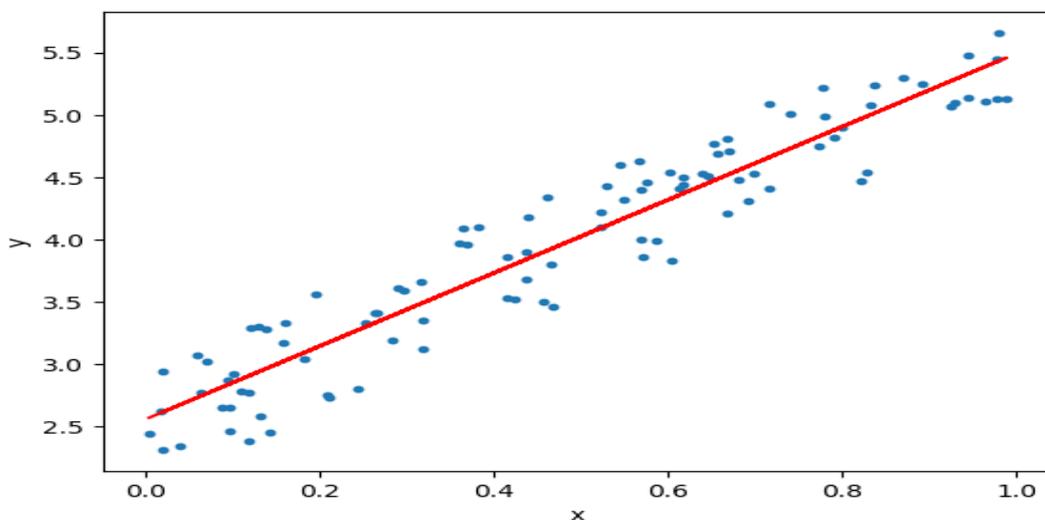


Figure III.4. La droite de la régression linéaire

III.5. Calcul d'erreur

Pour mesurer les performances du modèle développé, le coefficient de détermination R^2 et l'erreur fonctionnelle quadratique moyenne RMSE (RootMean Square Error) sont utilisés, conformément à l'Equation. (III.4) et Equation. (III.5).

$$RMSE_{err}^f = \sqrt{\frac{\sum (E_i - P_i)^2}{N \sum E_i^2}} \quad (III.4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{P}_i)^2} \quad (III.5)$$

E_i : Valeur expérimentale ;

P_i : Valeur prédite ;

\bar{P}_i : Moyenne des données observées ;

N: Nombre de données;

Le RMSE indique la précision des modèles pour prédire la réponse, il est considéré comme un critère d'ajustement important dans le cas où le but du modèle est la prédiction. Il montre à quel point les valeurs expérimentales sont proches des valeurs prédites par un modèle. Plus les valeurs de RMSE sont faibles, meilleur est l'ajustement.

Le RMSE est toujours positif et une valeur de 0 (presque jamais atteinte en pratique) indiquerait un ajustement parfait aux données. En général, une valeur de RMSE plus petite indique une meilleure précision qu'une valeur de RMSE plus élevée.

Concernant le coefficient de détermination, R^2 est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire. Il est utilisé pour évaluer l'ajustement des modèles et l'adéquation entre les données expérimentales et les données prédites en déterminant la dispersion des données le long de la droite de régression ajustée. Ou encore à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points

Ce coefficient varie entre 0 et 1, soit entre un pouvoir de prédiction faible et un pouvoir de prédiction fort.

Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points.

Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100 % de la distribution des points.

En bref, plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points se disperse autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se resserre autour de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, alors $R^2 = 1$ [26].

III.6.Base de données

III.6.1.Première application

Nous avons effectué plusieurs simulations pour différentes dimensions géométriques du défaut (longueur, profondeur). Les signaux obtenus sont en forme de cloche et représentent l'impédance du capteur en fonction du déplacement de ce dernier. Pour une meilleure exploitation de ces signaux dans la construction du problème inverse, nous avons procédé à l'extraction des caractéristiques principale de ce type de signaux qui sont : (La valeur maximale, l'écart type et la valeur moyenne). Les résultats sont collectionnés dans le tableau.III.1 :

Tableau.III.1.Base de données

Longueur	Profondeur	Zmax	Zmoy	Ecart-type
8	0.5	0.0208	0.005	16
	1	0.0275	0.0083	16
	1.5	0.0365	0.0113	16
	2	0.046	0.0129	16
	2.5	0.0483	0.0142	16
	3	0.0527	0.0147	17
.
.
.
16	0.5	0.0317	0.0116	25
	1	0.0538	0.0193	24
	1.5	0.0748	0.0272	24

	2	0.0907	0.0311	24
	2.5	0.0969	0.0351	24
	3	0.1069	0.0388	25
.
.
.
20	0.5	0.0344	0.0129	28
	1	0.0566	0.0231	28
	1.5	0.0759	0.0335	28
	2	0.0927	0.040	29
	2.5	0.1085	0.0448	29
	3	0.1052	0.0417	27

III.6.1.1. Polynômes de régression

Après avoir introduit la base de donnée dans le logiciel, ce dernier effectue les calculs nécessaires pour l'obtention des polynômes de régression.

Pour cette première application nous avons deux polynômes, celui de la longueur et celui de la profondeur :

$$\text{Longueur} = -6.10 - 63.1 \cdot Z_{\max} + 162.3 \cdot Z_{\text{moy}} + 0.9134 \cdot \text{Ecart-type} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Profondeur} = 2.515 + 22.4 \cdot Z_{\max} + 35.8 \cdot Z_{\text{moy}} - 0.1363 \cdot \text{Ecart-type} \quad (\text{III.7})$$

III.6.1.2. Validation

Pour tester les équations obtenues, nous avons procédé à l'introduction des caractéristiques des signaux de cinq (5) défauts non inclus dans la base de donnée. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessus

Tableau.III.2. résultats et validation

Valeurs tests		Résultats prédits		RMSE	RMSE	R ²	R ²
longueur	profondeur	longueur	Profondeur	longueur	profondeur	Longueur	Profondeur
9	2	9.3	1.8	0.26	0.18	0.995	0.951
11	1	11	1.2				
13	2.2	12.8	2.3				
15	3	14.9	2.8				
17	2	17.3	2.1				

Les droites d'ajustements pour les cinq points considérés sont données par les figures III.5 et III.6 :

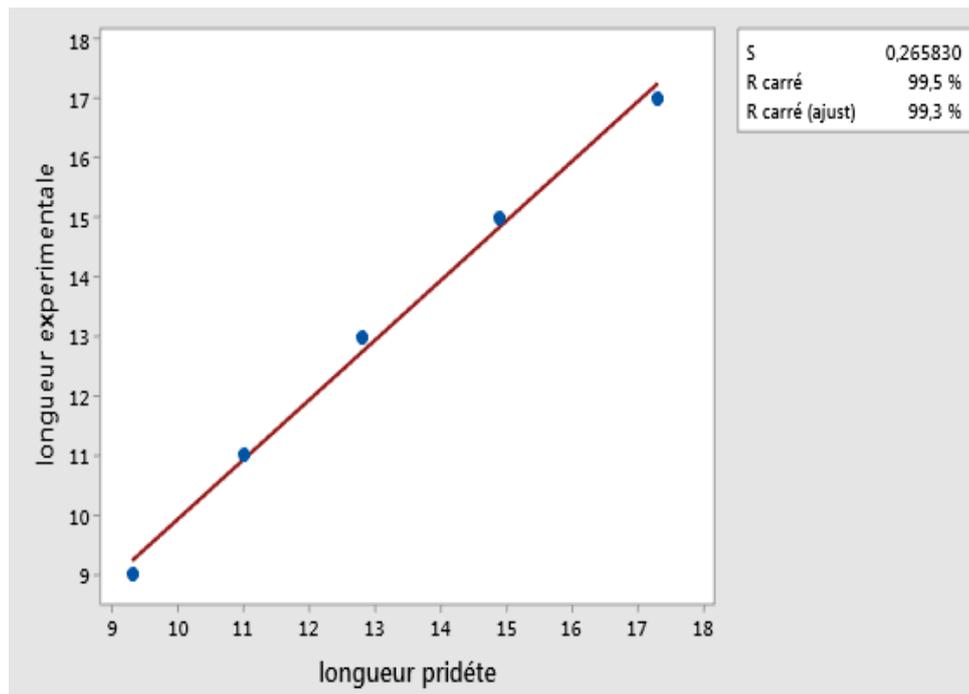


Figure III.5. Droite d'ajustement de la longueur

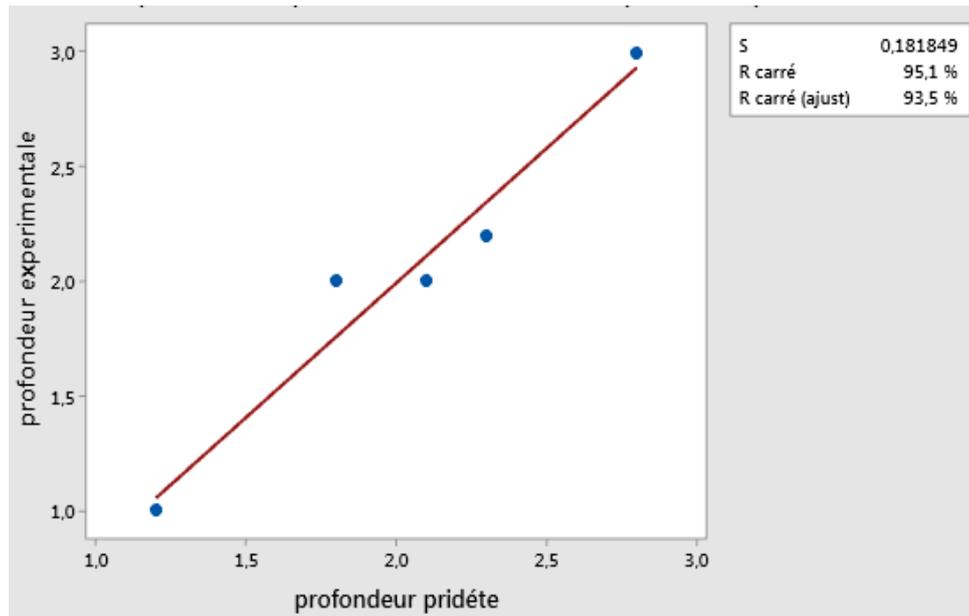


Figure III.6. Droite d'ajustement de profondeur

III.6.1.3. Interprétation des résultats

Le premier modèle a été entraîné avec un ensemble de données de 42 échantillons, et le processus de test avec un ensemble de données de 5, qui n'étaient pas utilisées auparavant pour entraîner le modèle, a montré des valeurs maximales RMSE et R^2 pour la longueur de 0,26 et 0,995 respectivement. et pour la profondeur de 0.18 et 0.951 respectivement. Les valeurs de RMSE sont proches de 0 et R^2 proche de 1, ce qui indique la précision du processus d'apprentissage et de test.

Les tracés de régression des valeurs expérimentales récupérées dans [27] par rapport aux valeurs prédites de test sont présentés respectivement sur figure III.5 et figure III.6. Les données dispersées autour de la ligne de régression sont très proches de cette dernière et montrent une forte corrélation entre les valeurs calculées et expérimentales. Cela indique une prédiction appropriée.

III.6.2. Deuxième application

Dans cette partie nous avons considéré un défaut 3D (longueur, profondeur, largeur), et nous avons procédé au remplissage de base de données. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau III.3 :

Tableau.III.3.Base de données

longueur	profondeur	largeur	Zmax	Zmoy	Ecart-type
8	0.5	1	0.01	0.0035	18
		1.5	0.013	0.0041	16
		2	0.0199	0.0049	16
	1	1	0.0179	0.0047	16
		1.5	0.0239	0.0075	17
		2	0.0304	0.0088	16
	1.5	1	0.0257	0.0065	16
		1.5	0.0277	0.0092	16
		2	0.0311	0.0118	16
	2	1	0.0194	0.0074	17
		1.5	0.0275	0.0106	16
		2	0.0362	0.0137	18
	2.5	1	0.0194	0.0074	17
		1.5	0.0316	0.0116	17
		2	0.037	0.0148	17
	3	1	0.0205	0.0088	16
		1.5	0.03	0.0121	18
		2	0.0364	0.0153	18
.
.
.
14	0.5	1	0,0151	0,0056	21
		1.5	0,0266	0,0079	22
		2	0,0289	0,0106	23
	1	1	0,0325	0,0099	23
		1.5	0,0405	0,0137	23
		2	0,0548	0,018	23
	1.5	1	0,0443	0,0134	22
1.5		0,0581	0,0187	23	

	2	2	0,0747	0,0242	23	
		1	1	0,0544	0,016	23
			1.5	0,0751	0,0255	23
			2	0,0881	0,0261	22
	2.5	1	0,0591	0,0182	23	
		1.5	0,0748	0,0246	23	
		2	0,0966	0,0304	23	
	3	1	0,0628	0,0197	23	
		1.5	0,0785	0,0271	23	
		2	0,0997	0,0327	23	

.	
20	0.5	1	0,0186	0,0075	28	
		1,5	0,0245	0,0116	28	
		2	0,0323	0,0132	28	
	1	1	0,0336	0,0141	29	
		1,5	0,0442	0,0195	29	
		2	0,0561	0,098	29	
	1.5	1	0,0443	0,0195	29	
		1,5	0,0634	0,0277	29	
		2	0,0774	0,0289	29	
	2	1	0,0495	0,023	29	
		1,5	0,0724	0,0325	29	
		2	0,0889	0,041	29	
	2.5	1	0,0623	0,0259	29	
		1,5	0,0847	0,0364	29	
		2	0,1017	0,046	29	
	3	1	0,0656	0,0282	29	
		1,5	0,0885	0,0366	29	
		2	0,1089	0,0434	29	

III.6.2.1. Polynômes de régression

Comme notre défaut est en 3D, nous avons obtenus trois polynômes pour cette application :

$$\text{Longueur} = -8.753 - 6.39 \cdot Z_{\max} - 15.7 \cdot Z_{\text{moy}} + 1.0281 \cdot \text{Ecart-type} \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Profondeur} = 3.606 - 3.62 \cdot Z_{\max} + 115.7 \cdot Z_{\text{moy}} + 0.1688 \cdot \text{Ecart-type} \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Largueur} = 1.945 + 5.53 \cdot Z_{\max} + 15 \cdot Z_{\text{moy}} - 0.0460 \cdot \text{Ecart-type} \quad (\text{III.10})$$

III.6.2.2. Validation

Dans ce cas aussi nous avons procédé au test des trois des polynômes obtenus. Comme l’application précédente, 05 défauts ont été utilisés pour la validation. Les résultats des tests sont collectionnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau.III.4.résultats et validation

Valeurs tests			Résultats prédits			RMSE longueur	RMSE profondeur	RMSE larguer	R ² Longueur	R ² Profondeur	R ² Larguer
longueur	profondeur	larguer	longueur	profondeur	largue r						
9	2.2	1.7	9.2	2.1	1.6	0.24	0.15	0.13	0.996	0.976	0.922
11	1.5	1	11.3	1.3	1.3						
13	0.8	1.1	13.3	0.8	1.2						
15	2.9	2	14.7	3.2	1.95						
17	2	1.5	17	2.1	1.5						

Les droites d’ajustement pour les cinq points considérés sont données par les figures III.7, III.8, III.9 :

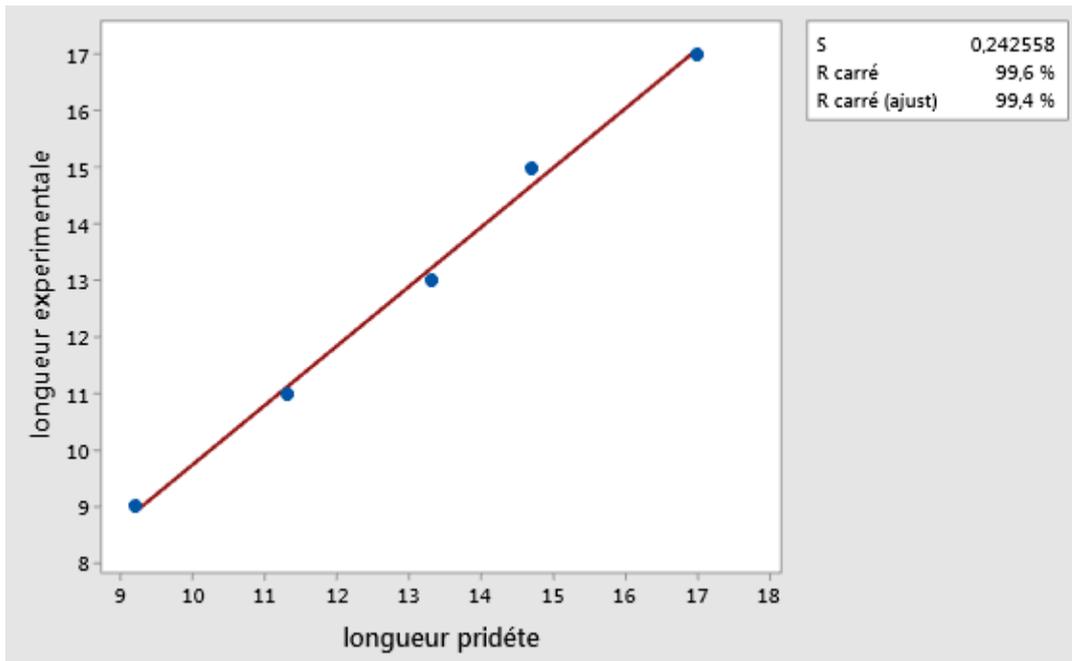


Figure III.7. Droite d'ajustement de la longueur

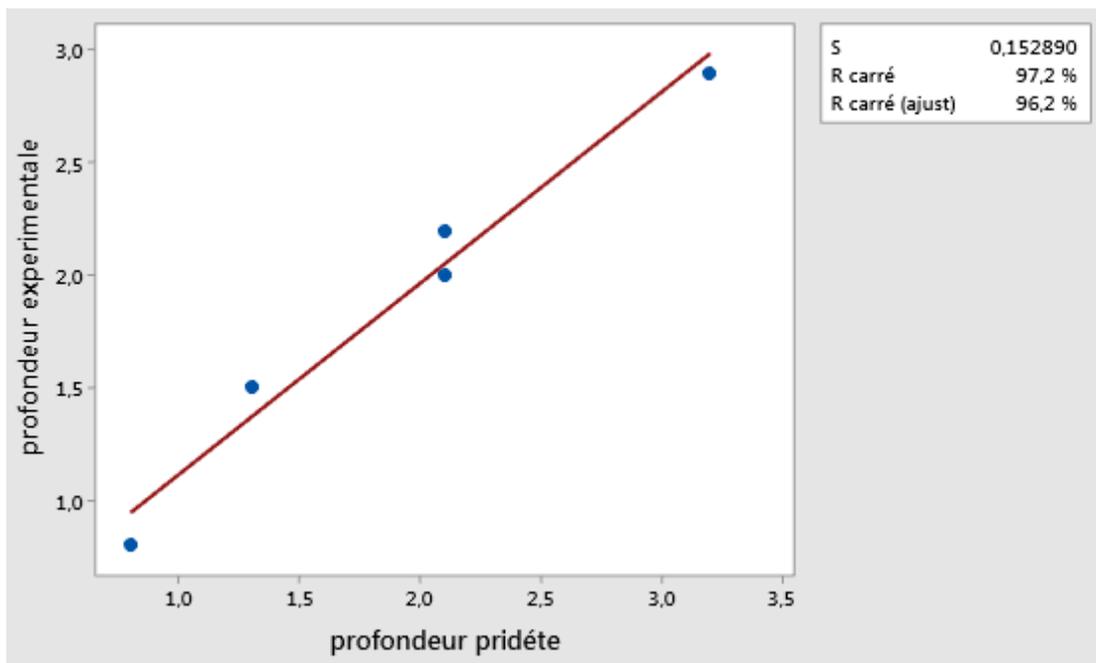


Figure III.8. Droit d'ajustement de la profondeur

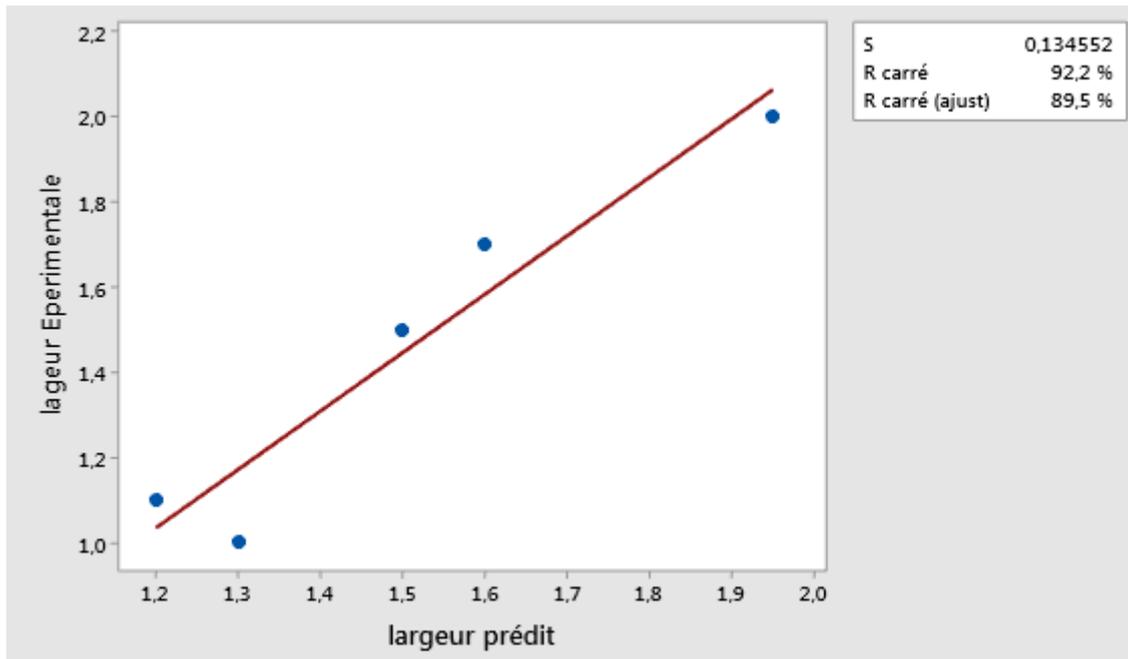


Figure III.9. Droite d'ajustement de la largeur

III.6.2.3. Interprétation des résultats

Le deuxième modèle a été entraîné avec un ensemble de données de 126 échantillons, et le processus de test avec un ensemble de données de 5, qui n'étaient pas utilisées auparavant pour entraîner le modèle, a montré des valeurs maximales RMSE et R^2 pour longueur de 0,24 et 0,996 respectivement .et pour profondeur de 0.15 et 0.976 respectivement et pour largeur 0.13 et 0.922 respectivement Les valeurs de RMSE sont proches de 0 et R^2 proche de 1, ce qui indique la précision du processus d'apprentissage et de test.

Les tracés de régression des valeurs expérimentales récupérés de[27] par rapport aux valeurs prédites de test sont présentés respectivement sur figure III.7 et figure III.8 et figure III.9 Les données dispersées autour d'une ligne pointillée sont très proches de la ligne et montrent une forte corrélation entre les valeurs calculées et expérimentales. Cela indique une prédiction appropriée.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel de statistique Minitab pour l'étude du problème inverse en CND-CF.

Nous avons opté pour la méthode de la régression linéaire et constaté d'après les résultats de calcul d'erreur et les tracés des droits ajustements que le modèle obtenu est très faible pour la prédiction des dimensions des défauts.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce manuscrit présente la modélisation numérique d'un système de contrôle non destructif par courants Foucault ainsi que le traitement de son problème inverse. Nous nous sommes basées sur la conception assistée par ordinateur afin de réaliser un système « capteur/pièces avec défauts » et montrer l'influence de différents paramètres physiques sur la réponse du capteur à courants de Foucault.

Avant d'aborder les objectifs de cette étude, nous avons jugé utile, à travers une recherche bibliographique, de rappeler et de synthétiser les éléments constituant les dispositifs du CND-CF, et les grandeurs électriques mesurables.

Par la suite, nous avons opté pour une modélisation numérique du système moyennant les équations de Maxwell et la formulation $\vec{T}-\Phi$. Parmi les méthodes de résolution des équations à dérivées partielles qui régissent le système, on a choisi la méthode numérique des éléments finis qui s'adapte bien à ce type de problème. Grâce à sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes, cette méthode occupe une place importante dans le cadre des techniques de modélisation utilisées dans le CND par CF.

Dans ce cadre, des simulations numériques d'une configuration comprenant une plaque conductrice avec défaut et une bobine à air afin de construire une base de données pour le problème inverse.

Le problème inverse a été étudié en choisissant la technique de régression programmée dans le logiciel de statistiques Minitab. Les résultats obtenus ont permis de reproduire avec une très bonne précision les dimensions de défauts qui n'existaient pas dans la base de données injectée.

En termes de perspectives, nous proposons la réalisation et le développement d'un système expérimental de détection de défauts comportant un module qui permettrait l'inversion des données d'acquisition.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. **Zaidi.H**, "Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples", thèse de doctorat, Paris, 2012.
- [2]. **Bouchala. T**, "Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. – Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite –", mémoire de magister, Batna , 2008.
- [3]. **Chiara. Z**, "Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction", Thèse doctorat, Paris, 2012.
- [4]. **Choua. Y**, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault", Thèse de Doctorat paris, 2009.
- [5]. **Abdou, A**. "Contrôle non destructif par courant de Foucault", thème ingénieur d'état Batna, 2006.
- [6]. **Hamza.B, Zeddou.A**. « Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif », thème master, jijel, 2018.
- [7]. **Hamel. M**, "Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes", thème magister, Tizi-Ouzou, 2012.
- [8]. **Brahim. R**, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo inductive de contrôle non destructif : développement d'un outil de conception d'analyse et d'aide à la décision", thèse doctorat, Nantes, 2009.
- [9]. **Khebbab.M**. "Contribution à l'étude de CND-CF de matériaux hétérogènes faiblement conducteurs à base d'éléments finis ", thèse doctorat, constantine, 2016.
- [10]. **Lakhdari.A**. "Etude et modélisation de capteur en CNC-CF : application à la détection des fissures", thèse doctorat, Biskra, 2011.
- [11]. **Assia.A**. "Mise en œuvre d'un modèle analytique numérique pour la détection de défaut à vitesse élevée ". thème magister, Tizi-ouzou, 2015.

- [12]. **TITOUAH. L, ZIANE. A** "Caractérisation non destructif par courant de Foucault pulsés d'une rainure par inversion associée à méthode des circuits électrique couplés ". thème master ,Bijaia, 2014.
- [13]. **HAOUCHENE.L, OUADOU. M,** "Etude et simulation d'un système d'imagerie par courants de foucault ", thème master, Boumerdes, 2020.
- [14]. **Lakhdari. A,** "Modélisation en volumes finis de CNC des Matériaux faiblement conducteur par courant de Foucault et de déplacement ", thèse doctorat, Batna, 2019.
- [15]. **Delabre.B,** "Développement de capteurs flexibles à courant de Foucault : application à la caractérisation de propriétés électromagnétique des matériaux et à la détection de défaut par imagerie statique ", thèse doctorat, paris, 2016.
- [16]. **Khatab.S, Baiti.A,** "Modalisation numérique d un capteur inductif dédiée au contrôle non destructif des structures axisymétriques ", thème master, Boumerdes, 2019.
- [17]. **Bruno. B,** "SYSTEME EXPERT D'ANALYSE AUTOMATIQUE DES SIGNAUX DE DEFAUTS LORS DU CONTROLE NON DESTRUCTIF DES GENERATEURS DE VAPEURDES CENTRALES NUCLEAIRES ", Rapport CEA, France, 1991.
- [18]. **cheheb.O, Laiouer.h.** "Etude du principe de contrôle non destructif par courante de Foucault et simulation d un capteur élémentaire ", thème master, Jijel, 2020.
- [19]. **Zerguine.S.** "Elaboration des modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courante de Foucault ", thèse doctorat, constantine.
- [20]. **TAO.WA.** "The theory of eddy current non destructive evaluation by using the volume integral equation method ", Theses and Dissertations, Iowa state university , 2016.
- [21]. **Slimane.W.** "Conception d'un système Multi capteur à courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND)", thème magister, Batna, 2008.
- [22]. **Aggab. M,** "Etude et contrôle non destructif (CND) par courant de Foucault et simulation par la méthode des éléments finis ", thème master Oum el bouaghi, 2016.
- [23]. **BENISSAD. S,** "Détection des fissures à l'aide de la méthode des éléments finis et des réseaux de neurones ". mémoire magster, Alger, 2016.

[24]. **Ouamour.A, Zamoum.A.** "Application de la méthode des éléments finis pour la simulation 3D d'un dispositif de détection de défauts dans les matériaux conducteurs", thème master, Boumerdes, 2019.

[25]. **HALIFA. B,** "Contribution a la simulation du CND par courants de foucault en vue de la caracterisation des fissures debouchantes", thèse doctorat, Nantes, 2012.

[26]. **Mougari NE, Largeau JF, Himrane N, Hachemi M, Tazerout M.** « Application of artificial neural network and kinetic modeling for the prediction of biogas and methane production in anaerobic digestion of several organic wastes ». Int J Green Energy 2021;00:1–14. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1914630>.

[27]. **HAMEL.M,** "Etude et caractirisation des fissures fines en evaluation non destructive ", thèse Doctorat, Tizi-Ouzou, 2018

Résumé

Le vieillissement des systèmes industriels, mais aussi la volonté de prolonger le cycle de vie des pièces les composant, impose aux techniques de maintenance des exigences de contrôle accrues en termes de fiabilité et de rapidité. Les principaux enjeux étant la détection, et surtout la caractérisation des défauts pouvant apparaître dans les pièces sensibles dans les systèmes. Cette caractérisation pouvant aller jusqu'à la reconstruction qualitative, voire quantitative du profil des défauts, ce qui suppose la résolution du problème inverse consistant, à partir des signaux mesurés, à remonter à certaines caractéristiques du défaut inspecté, notamment géométriques.

Dans une première partie, ce manuscrit présente une approche numérique de modélisation d'une structure de CND par courants de Foucault. Cette modélisation adopte la méthode des éléments finis de manière à ce que d'une part les signaux obtenus, soient d'amplitude la plus élevée possible, et d'autre part, afin que ces signaux soient exploitable pour nourrir la base de données à utiliser dans l'inversion.

Ainsi, la deuxième partie de ce mémoire, est consacrée à l'étude du problème inverse. La méthode de régression linéaire est exploitée, et se montre efficace pour la reconstruction géométrique des défauts.

Mots clés : courants de Foucault, contrôle Non destructif, méthodes des éléments finis, impédance, problème inverse, caractérisation de défauts.