

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique

Option : Électromécanique

Thème

**Étude d'un capteur à un courant de Foucault
multiéléments alimenté en mode harmonique
multiplexé "Application à l'inspection des
échangeurs de chaleur"**

Réalisé par :

M. DERRADJI Bilal

Encadré par :

Pr. BOUCHALA Tarek
Dr. BOUZIDI Athmane

Membres du jury :

Mme. N.ROUHA

MCA

U.A.M.B

Présidente

Mme. A.BENDEHMANE

MAA

U.A.M.B

Examinatrice

Mr. A.BOUZIDI

MCA

U.A.M.B

Promoteur

Promotion 2021

Remerciements

On tient à remercier ALLAH et tout ceux qui nous ont aidés ou contribués au succès de la rédaction de ce mémoire.

Ce projet de fin d'étude présenté dans ce manuscrit a été proposé par Monsieur Tarek BOUCHALA.

Nous nous ferons, alors, un agréable devoir de remercier notre *encadreur* Pr. **Tarek BOUCHALA**, enseignant à l'université de M'sila pour nous avoir accueillis dans sa maison, encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous nous ferons encore un grand plaisir de remercier notre *encadreur* Dr. **Athmane BOUZIDI**, enseignant à l'université de Bejaia pour nous avoir encadrés et aidés avec ses conseils.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des membres du jury qui nous font l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Dédicaces

*À toutes les personnes qui m'ont
aidé durant mes études*

*À mes parents, à mes deux frères
et ma sœur*

*À khali Lounis, farid (foufou)
Raid, Imad (cousin),*

*Saad et Heneoui et à tout mes
amis.*

Bilal DERRADJI.

Table des matières

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Table des matières.....	iii
Abréviation, notations et symboles.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur le contrôle non destructif.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2. Techniques du Contrôle non destructif.....	4
I.2.1. Examen visuel.....	4
I.2.2. Ressuage.....	4
I.2.3. Magnétoscopie.....	5
I.2.4. Radiographie.....	6
I.2.5. Ultrasons.....	6
I.2.6. Thermographie.....	7
I.3 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault.....	8
I.3.1. Principe.....	8
I.3.2. Effet de peau.....	8
I.3.3 Objectifs du CND-CF.....	10
I.3.4. Avantages et limites du CND par courant de Foucault.....	10
I.3.4.1. Avantages du CND par courant de Foucault.....	10
I.3.4.2. Limites du CND par courant de Foucault.....	10
I.3.5. Classification des capteurs.....	11
I.3.5.1. Selon la position.....	11
I.3.5.2. Selon la fonction du capteur.....	13
I.3.5.3. Selon le mode.....	14
I.4. capteur multiéléments.....	16
I.4.1. Déplacement.....	16
I.4.2. Motif.....	16

I.4.3 Paramètres définissant un capteur multiélément	17
I.4.4. Avantages et inconvénients du capteur multiélément.....	18
I.4.4.1. Avantages.....	18
I.4.4.2. Inconvénients	18
I.5. Conclusion	18
Chapitre II. Modélisation du Système Contrôle Non Destructif par CF	19
II.1. Introduction	19
II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF.....	20
II.3. Intérêt de la modélisation	20
II.4. Mise en équations	21
II.4.1 Équations de Maxwell	21
• <i>historique</i>	21
II.4.2. Lois constitutive	23
II.4.3. Conditions aux limites	23
II.4.4. Conditions de continuité	24
II.4.5. Conditions de Jauge.....	25
II.4.6. Hypothèses simplificatrices	25
II.5. Formulations magnétodynamiques	26
II.5.1. Formulations basées sur le champ électrique E.....	27
II.5.2 Formulation en A-V.....	27
II.5.3 Formulation en H.....	27
II.5.4. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T- Φ	28
II.5.5. Comparaison entre les formulations	28
II.6. Méthodes de résolution des EDP	28
II.6.1. Méthodes analytiques	29
II.6.2. Méthodes numériques	29
II.6.2.1. Méthode des intégrales de volume (MIV).....	29
II.6.2.2. Méthode des intégrales de surface (MIS)	29
II.6.2.3. Méthode des intégrales de frontières (MIF)	29
II.6.2.4. Méthode des différences finies (MDF)	30
II.6.2.5. Méthode des éléments finis (MEF)	30
II.6.2.6. Méthode des volumes finis (MVF)	30
II.6.3. Méthodes semi-analytiques.....	31

II.7. Méthode des éléments finis (MEF).....	32
II.7.1. Principe de la méthode variationnelle.....	32
II.7.2. Formulation résidus pondérés:	33
II.7.3. La discrétisation du domaine.....	34
II.7.4. Calcul de l'impédance du capteur.....	34
II.7.4.1. Calcul de l'impédance à travers l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes joules.....	34
II.7.4.2. Calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine	35
II.8. Conclusion.....	36
Chapitre III. Simulation du comportement du système capteur multiéléments et tube de l'échangeur de chaleur.....	37
III.1 Introduction	37
III.2 Présentation des étapes de simulation sous COMSOL	37
III.2.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5.....	37
III.2.2 Création du modèle de simulation.....	38
III.2.3 Vue 3D et 2D du modèle à étudier	39
III.2.4 Maillage du modèle proposé.....	40
III.3. Etude d'un défaut interne	41
III.3.1 Etude de l'influence de la fréquence	41
a. $f=20\text{kHz}$	41
b. $f= 40\text{kHz}$	42
c. $f= 60\text{kHz}$	43
III.3.2 Influence du pas de déplacement du capteur	44
a. $P= 2\text{mm}$	45
b. $P= 1\text{mm}$	46
c. $P= 0.5\text{mm}$	47
III.3.3. Influence de la profondeur des défauts.....	49
a. $Pd=0.5\text{mm}$	49
b. $Pd=1\text{mm}$	50
c. $Pd=1.5\text{mm}$	51
III.3.3. Influence de la largeur des défauts	52
a. 1 ^{er} cas	53
b. 2 ^{ème} cas.....	54
c. 3 ^{ème} cas.....	55

III.4 Etude d'un défaut externe	57
III.4.1 Influence du pas de déplacement du capteur	57
a. P=2mm.....	58
b. P=1mm.....	59
c. P=0.5mm.....	60
III.4.2. Influence de la profondeur des défauts	62
a. Pd= 0.5mm.....	62
b. Pd=1mm.....	62
c. Pd=1.5mm.....	63
III.4.2. Influence de la largeur des défauts	64
a. 1 ^{er} cas	64
b. 2 ^{ème} cas.....	65
c. 3 ^{ème} cas.....	66
III.5 Conclusion.....	68
Conclusion et perspectives	69
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71

Abréviations, notations et symboles

Abréviation

CND :	Contrôle Non Destructif.
CF :	Courants de Foucault.
CND-CF :	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.
MEF :	Méthode des éléments finis.
3D:	Tri-dimensional.
2D :	Two-dimensional.
Wc :	Énergie cinétique.
Wp :	Énergie potentielle
MIV :	Méthode des intégrales de volume
MIS :	Méthode des intégrales de surface
MIF :	Méthode des intégrales de frontières
MDF :	Méthode des différences finies
MVF :	Méthode des volumes finis
MEF :	Méthode des éléments finis

Notations et Symboles

$\Omega :$	Domaine d'étude.
$J_s :$	Densité de courant électrique dans la source.
$\Gamma :$	Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.
$\sigma :$	Conductivité électrique.
$\mu_0 :$	Perméabilité magnétique absolue du vide.
$\vec{H} :$	Champ magnétique [A/m].
$\vec{D} :$	Induction électrique [C/m ²]
$\vec{B} :$	Induction magnétique [T].
$\vec{J} :$	Densité de courant [A/m ²].

- ρ** : Densité volumique des charges électriques [C/m³].
- μ** : Perméabilité magnétique [H/m].
- μ_0** : Perméabilité magnétique = $4\pi 10^{-7}$ [H/m].
- μ_r** : Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m].
- σ** : Conductivité électrique [S/m].
- ε** : Permittivité électrique [F/m].
- ε_0** : Constante diélectrique du vide = $8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m].
- ε_r** : Permittivité électrique relative du milieu [F/m].
- $\overline{\rho_s}$** : La densité surfacique de charge.
- $\overline{J_s}$** : La densité surfacique de courant.
- \vec{n}** : La normale à l'interface Σ séparant les deux milieux
- L** : La fonction de Lagrange
- n** : nombre de nœud dans le domaine d'étude.
- A** : inconnue au nœud n du domaine.
- Φ_i** : Fonction de pondération ou de projection.
- U** : La tension d'alimentation.
- I** : Le courant traversant la bobine.
- L_d** : La longueur du défaut.
- W_d** : La largeur du défaut.
- P_d** : La profondeur du défaut.
- P** : Le pas du déplacement du capteur.

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II. 1 Comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF.....	29
--	----

Chapitre III

Tableau III. 1. Caractéristique du dispositif étudié	40
Tableau III. 2. Evolution de la variation de la résistance et la réactance en fonction de la fréquence.....	44
Tableau III. 3. Evolution de la variation de la résistance, la réactance et l'erreur en fonction du pas de déplacement	48
Tableau III. 4. Evolution de la variation de la résistance et la réactance en fonction de la profondeur des défauts.....	52
Tableau III. 5. Evolution de la variation de la résistance et la réactance en fonction de la largeur des défauts.....	56
Tableau III. 6. Evolution de la variation de la résistance, la réactance et l'erreur en fonction du pas de déplacement	61
Tableau III. 7. Evolution de la variation de la réactance en fonction de la profondeur des défauts.....	63
Tableau III. 8. Evolution de la variation de la résistance et la réactance en fonction de la profondeur des défauts.....	67

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1. Principe de l'examen visuel	4
Figure I. 2. Principe de CND par ressuage	5
Figure I. 3. Principe du CND par magnétoscopie	6
Figure I. 4. Principe du CND par Radiographie.....	6
Figure I. 5. Principe du CND par Ultrason	7
Figure I. 6. Principe du CND par Thermographie.....	7
Figure I. 7. Principe du CND par courant de Foucault. [9]	8
Figure I. 8. Répartition des courants de Foucault sous une surface plane, [10]	9
Figure I. 9. Objectif du CND par CF. [9]	10
Figure I. 10. Critères de classification des capteurs. [9].....	11
Figure I. 11. Sonde interne [9]	12
Figure I. 12. Sonde encerclante [9]	12
Figure I. 13. Bobine ponctuelle (Palpeur) [9]	12
Figure I. 14. Bobine plate [5].....	13
Figure I. 15. Sonde interne tournante [9].....	13
Figure I. 16. Capteur à double fonction [9]	14
Figure I. 17. Capteur à fonctions séparées [9]	14
Figure I. 18. Capteur à fonctions séparées [9]	15
Figure I. 19. Capteur en mode différentiel [9]	15
Figure I. 20. Perturbation du signal d'alimentation [9].....	15
Figure I. 21. Représentation schématisé de balayage en peigne et linéaire obtenu respectivement avec un élément simple et un capteur multiéléments, [12].....	16
Figure I. 22. Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution [12]	17
Figure I. 23. Uniformité de signal CF sur un montage multiélément [12]	17

Chapitre II

Figure II. 1. Schéma du système de contrôle étudié.....	20
Figure II. 2 .Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.....	21
Figure II. 3 .James Clerk Maxwell 1831-1879	22
Figure II. 4 .Surface Σ séparant deux milieux Ω_1 et Ω_2	24
Figure II. 5 .Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF	31

Chapitre III

Figure III. 1. Interface utilisateur de COMSOL 5.5	38
Figure III. 2. Création du modèle géométrique.....	39
Figure III. 3. Vue 3D du système étudié.....	39
Figure III. 4. Maillage du dispositif en 3D.	40

Figure III. 5. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=20\text{kHz}$	41
Figure III. 6. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=40\text{kHz}$	42
Figure III. 7. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=60\text{kHz}$	43
Figure III. 8. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la fréquence	44
Figure III. 9. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P=2\text{mm}$	45
Figure III. 10. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P=1\text{mm}$	46
Figure III. 11. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P=0.5\text{mm}$	47
Figure III. 12. Evolution de la variation relative de la résistance, la réactance et de l'erreur en fonction du pas de déplacement	48
Figure III. 13. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P_d=0.5\text{mm}$	49
Figure III. 14. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P_d=0.1\text{mm}$	50
Figure III. 15. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P_d=1.5\text{mm}$	51
Figure III. 16. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la profondeur des défauts	52
Figure III. 17. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $W_d=0.5\text{mm}$	53
Figure III. 18. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $W_{d1}=1\text{mm}$ et $W_{d2}=2\text{mm}$	54
Figure III. 19. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $W_{d1}=2\text{mm}$ et $W_{d2}=4\text{mm}$	55
Figure III. 20. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la largeur des défauts	56
Figure III. 21. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P=2\text{mm}$	58
Figure III. 22. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P=1\text{mm}$	59
Figure III. 23. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P=0.5\text{mm}$	61
Figure III. 24. Evolution de la variation relative de la résistance, la réactance et l'erreur en fonction du pas de déplacement	61
Figure III. 25. Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur à $P_d=0.5\text{mm}$	62
Figure III. 26. Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur à $P_d=1\text{mm}$	62
Figure III. 27. Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur à $P_d=1.5\text{mm}$	63
Figure III. 28. Evolution de la variation relative de la réactance en fonction de la profondeur des défauts	63

Figure III. 29. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $W_d=0.5\text{mm}$	64
Figure III. 30. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $W_{d1}=1\text{mm}$ et $W_{d2}=2\text{mm}$	65
Figure III. 31. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $W_{d1}=2\text{mm}$ et $W_{d2}=4\text{mm}$	66
Figure III. 32. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la largeur des défauts externe.....	67

Introduction générale

Le contrôle non-destructif (CND) permet l'évaluation de l'état de santé d'une pièce sans en altérer les propriétés mécaniques. Il représente une alternative aux méthodes dites destructives. Les contrôles sont utilisés dans l'industrie lors des phases de fabrication et de maintenance, pour divers objectifs, tels que la caractérisation de matériaux, la mesure d'épaisseur, les contrôles de serrage, les contrôles à chaud ainsi que la détection et la caractérisation des défauts, [22]

Les techniques utilisées en CND sont divers tel que (ultrasons, examen Visual, magnétoscopie, courants de Foucault, rayons X, radiographie, ressuage...). 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...

Le contrôle par courants de Foucault est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre (création des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde) et complexe. En effet, pour un contrôle donné, il est important de savoir comment créer une "bonne" répartition des CF permettant d'avoir un "signal de défaut" mesurable et quantifiable? Il est nécessaire avant tout d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les CF n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent tel que l'impédance du capteur, [2]

La modélisation d'une configuration réelle de CND par CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et fait appel à des méthodes numériques. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de prendre en compte des géométries complexes de sondes et de pièces, est l'une des plus utilisée. Elle s'est, en effet, imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques, [21]

Parmi les applications du CND par Courants de Foucault (CF) l'inspection des tubes des échangeurs de chaleur, permet de détecter d'éventuels défauts qui peuvent se créer à cause des contraintes chimiques et thermiques. La détection de ces défauts doit être effectuée de manière précoce avant que celui-ci ne se propage et crée des fuites dans les tubes. Pour répondre à cette problématique nous proposons l'étude d'un capteur multiélément qu'on va modéliser et simuler grâce au logiciel COMSOL-Multiphysics qui est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier.

Principalement, ce mémoire est organisé comme suit :

Le **premier chapitre** présente des généralités sur le CND à savoir les principales méthodes, leurs principes ainsi que les avantages et les inconvénients, d'autre part, une attention particulière est attachée au contrôle basé sur les courants de Foucault (principe, capteurs, domaines d'utilisation...). Ensuite, nous présenterons les notions de base concernant les capteurs multiéléments et leurs apports en CND-CF.

Le **deuxième chapitre** sera consacré à la modélisation du dispositif d'inspection par CF tout en introduisant les équations décrivant le comportement du champ électromagnétique, les formulations magnétodynamiques nécessaires à la mise en œuvre d'un outil éléments finis.

Enfin, le **troisième chapitre** présentera le dispositif à étudier ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques du dispositif d'imagerie par CF multiéléments utilisé pour l'inspection des tubes d'un échangeur de chaleur. Après avoir implémenté le modèle sous COMSOL-multiphysics, nous l'exploitons pour étudier l'effet de quelques paramètres géométriques et électriques (fréquence) sur les performances de l'inspection. A travers cette étude nous mettons en évidence la nécessité de faire un choix judicieux sur les paramètres étudiés afin d'assurer une inspection à haute sensibilité.

Enfin, nous terminerons ce travail par une **conclusion générale** et des **perspectives** permettant de faciliter le chemin aux futurs étudiants et chercheurs qui souhaitent améliorer et compléter cette étude.

Chapitre I

Généralités sur le contrôle non destructif

Chapitre I. Généralités sur le contrôle non destructif

I.1 Introduction

Les enjeux de sûreté, les contrôles qualité et de santé des pièces deviennent un impératif incontournable. Le contrôle non destructif (CND) a comme objectif de vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques. L'histoire du CND commence à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND. Différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service). Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes familles : les défauts surfaciques et les défauts internes. [11]

Les défauts **surfaiques** sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'*aspect*, c'est à dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.

Les défauts **internes** sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses.

Les techniques développées se différencient essentiellement par le type d'onde utilisé pour sonder le matériau, par exemple les méthodes ultrasons, les courants de Foucault, les rayons X ou la thermographie infrarouge. Quelle que soit la méthode, les objectifs sont les mêmes: la fiabilité de l'examen, la reproductibilité, la localisation des défauts, leur caractérisation et classement. [2]

Le premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui fera l'objet d'étude dans ce manuscrit, et une définition du capteur multiélément à CF.

I.2. Techniques du Contrôle non destructif

Les techniques de CND sont diverses, et le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature de matériau, le forme de la pièce ...).

Parmi les techniques de contrôle non-destructif les plus utilisées on distingue, les techniques de ressuage, examen Visual, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, l'ultrason et les courants de Foucault.

I.2.1. Examen visuel

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. Elle nécessite uniquement les "bons yeux" d'un opérateur. [3]



Figure I.1. Principe de l'examen visuel

I.2.2. Ressuage

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Le principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes.

- La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler.
- Un liquide coloré ou fluorescent dit "pénétrant" est ensuite appliqué sur la surface à contrôler. Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...).
- L'excès de pénétrant est ensuite éliminé par un lavage adapté. La surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser.

On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant. (Voir la figure 1.1). Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous UV.

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur d'autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le pénétrant. [3]

Des limitations peuvent apparaître avec cette technique. Ainsi, elle est difficile à automatiser et limitée à l'inspection de pièces de géométrie simple. Certains produits de ressuage présentent par ailleurs des désagréments vis-à-vis de l'environnement, de la sécurité et de l'hygiène du travail. Il arrive également que des fissures soient bouchées par des produits mal nettoyables et qu'elles soient donc invisibles. [4]



Figure I.2. Principe de CND par ressuage

I.2.3. Magnétoscopie

La magnétoscopie est une technique destinée spécialement aux pièces ferromagnétiques (fer, fonte ...), elle permet de détecter les défauts superficiels, débouchant en surface, ou très proche de la surface de la pièce.

Le principe de cette technique est simple : il consiste à créer un champ magnétique intense à l'intérieur de la pièce. Une poudre magnétique est uniformément répartie par la suite sur la surface de la pièce. Lors de la présence d'un défaut sur son chemin, le champ magnétique est dévié et son intensité augmente en surface. Le champ crée une fuite qui attire les particules de poudre magnétique, signalant ainsi la présence d'un défaut. [4]

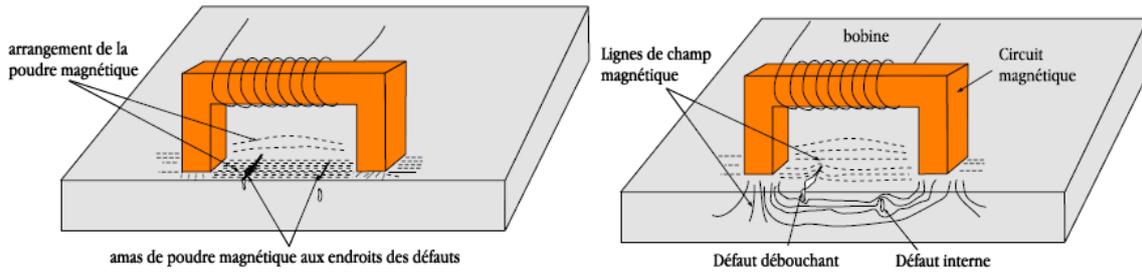


Figure I.3. Principe du CND par magnétoscopie [15]

I.2.4. Radiographie

La radiographie est un examen de l'état interne d'une structure. Elle consiste à parcourir la structure par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon x , ou γ), suivi de la capture de rayonnement résiduel non absorbé par un récepteur qui est, généralement, un film sensible à la nature des rayons utilisés.

La radiographie peut être utilisée pour contrôler tous les types de matériaux, quel qu'en soit la complexité géométrique. Elle peut arriver à contrôler des pièces jusqu'à 20 mm d'épaisseur avec les rayons x et jusqu'à 150 mm avec les rayons γ . Les limites fondamentales de cette technique sont le volume important du dispositif qui pose un problème de transport et d'installation. D'autre part, elle a besoin d'accéder aux deux côtés de la structure pour faire un scan 3D. De plus, les rayonnements ionisants sont dangereux pour le corps humain, ce qui nécessite des procédures de sécurité strictes pour l'opérateur. [5]

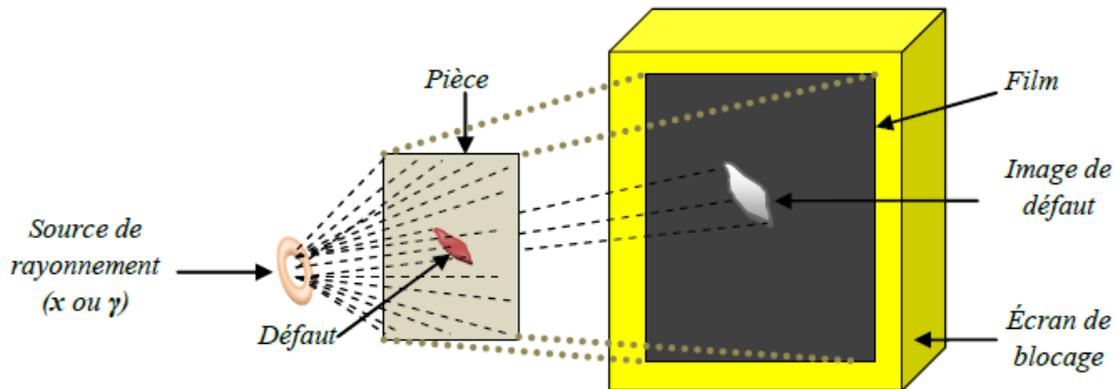


Figure I.4. Principe du CND par Radiographie [5]

I.2.5. Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). [6]

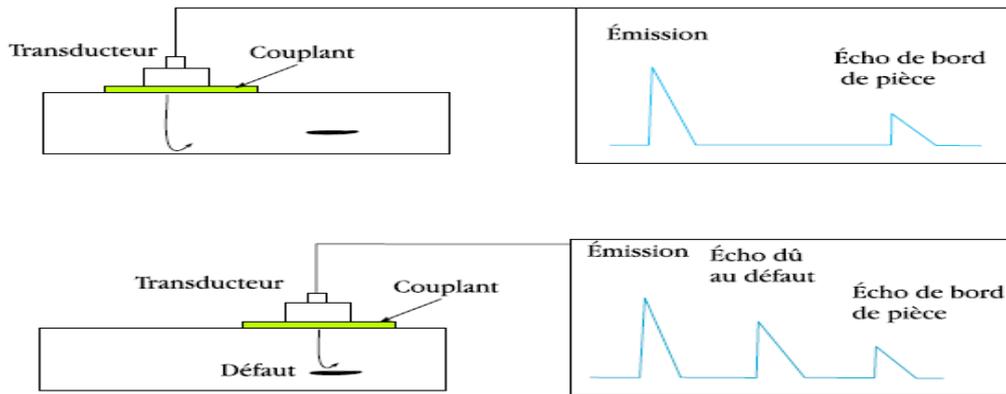


Figure I.5. Principe du CND par Ultrason [6]

Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises.

I.2.6. Thermographie

L'AFNOR définit la **thermographie** comme la " technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique observée dans un domaine spectral de l'infrarouge ". [7]



Figure I.6. Principe du CND par Thermographie [15]

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres. [8]

I.3 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault

I.3.1. Principe

On appelle courants de Foucault (CF) ou courants induits les courants électriques créés dans un objet conducteur, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique dans lequel est plongé l'objet, soit par déplacement de cet objet dans un champ magnétique constant. Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.

Pour appliquer la technique de CND par CF, une bobine (appelée émetteur ou excitateur) parcourue par un courant alternatif est placée au voisinage de la pièce conductrice testée. Des courants de Foucault se développent dans la pièce en formant des boucles. Ces courants ont la même fréquence que le courant émetteur et génèrent un champ magnétique induit qui s'oppose au champ émetteur. Un défaut dans la pièce dévierait la circulation des courants de Foucault et modifierait donc le champ magnétique résultant. La variation du champ magnétique est détectée à l'aide d'une bobine ou d'un capteur de champ magnétique. Un choix particulier est d'utiliser la bobine émettrice comme élément de mesure de la variation du champ résultant. [4]

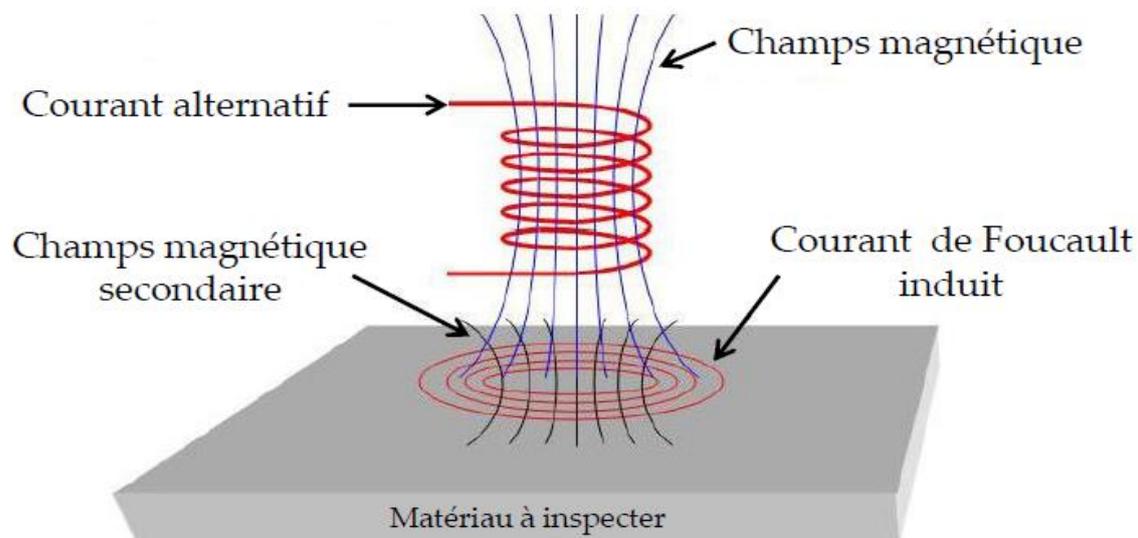


Figure I.7. Principe du CND par courant de Foucault. [9]

En CND par courant de Foucault, on utilise généralement des fréquences faibles (quelques dizaines de Mhz), cela implique que la longueur d'onde est très grande par rapport aux dimensions de la pièce.

I.3.2. Effet de peau

Ce phénomène existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant quand on s'enfonce dans un conducteur.

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, est représenté dans la figure 1.8 Et est exprimé par la relation suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (\text{I.1})$$

f : Fréquence d'alimentation.

μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

σ : Conductivité électrique.

La profondeur de pénétration est donc inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau. Si on considère une cible plane semi infinie excitée par une nappe de courants extérieurs parallèles au plan, dans ce cas le module de la densité de courant est régi par la relation suivante.

$$J_c(z) = J_{c0} \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (\text{I.2})$$

Z : Profondeur considérée à l'intérieur de la cible [m].

J(z): Module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/m*m].

σ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau [m].

On constate que la densité du courant décroît d'une manière exponentielle en profondeur.

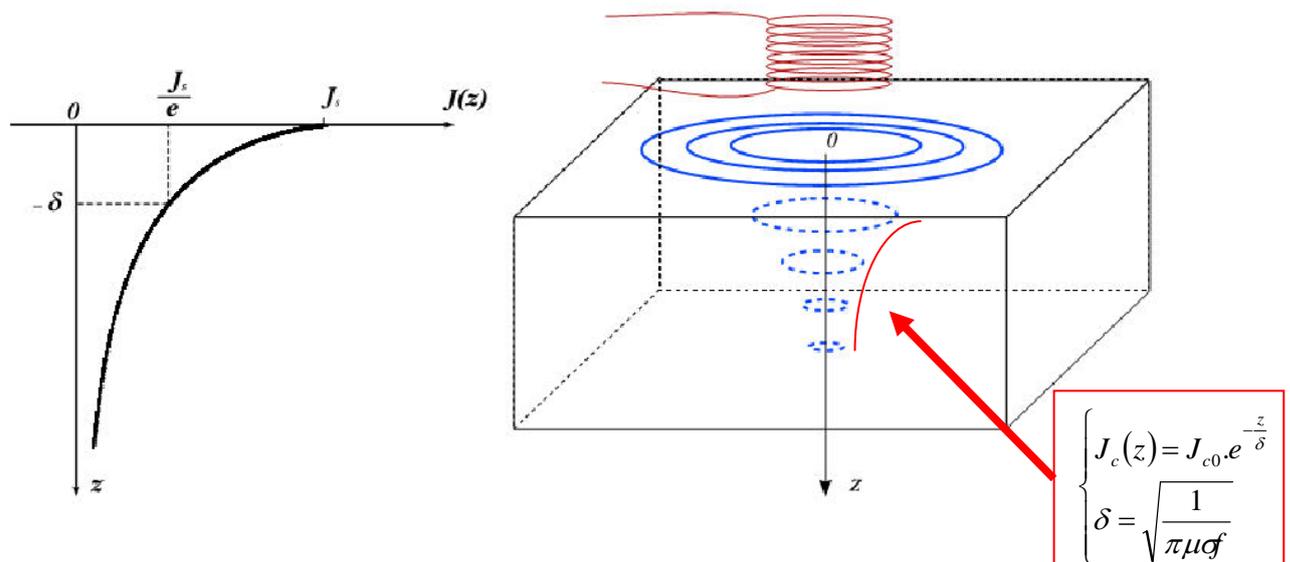


Figure 1.8. Répartition des courants de Foucault sous une surface plane, [10]

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas, il s'agit de mesurer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) représentative de la variation d'un flux. Cette mesure s'effectue souvent par l'intermédiaire d'une bobine. [3]

I.3.3 Objectifs du CND-CF

La figure suivante montre les différents objectifs visés par le CND-CF.

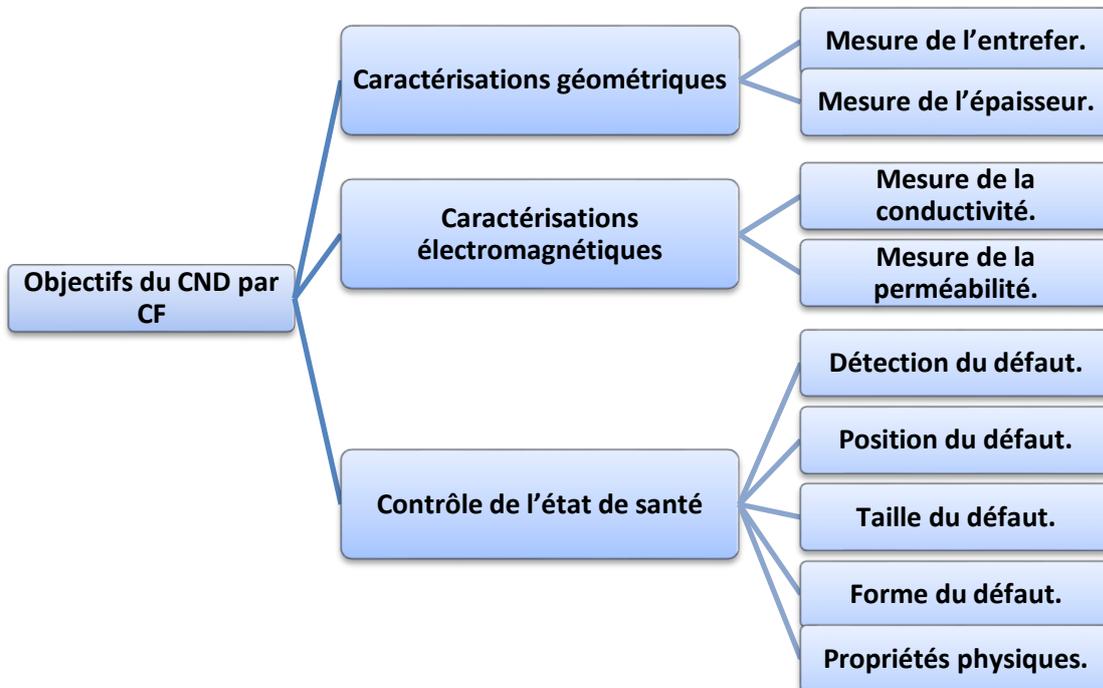


Figure I.9. Objectif du CND par CF. [9]

I.3.4. Avantages et limites du CND par courant de Foucault

I.3.4.1. Avantages du CND par courant de Foucault

Le CND par courant de Foucault a plusieurs avantages tel que :

- Simplicité de mise en œuvre.
- Rapidité de balayage et de détection.
- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement en fois (quelques mm) dans tout matériau conducteur.
- Aucune nuisance ou pollution.
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.

I.3.4.2. Limites du CND par courant de Foucault

Malgré tous les avantages du CND par CF par rapport aux autres techniques, elle reste limitée par certaines limitations et inconvénients :

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

- Probabilité d'instabilité de lift_off du capteur CF durant la procédure du scan qui peut conduire à des perturbations au niveau de la détection de la variation d'impédance.

I.3.5. Classification des capteurs

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines, il sert à générer les courants de Foucault ainsi qu'à capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image des courants de Foucault. La forme du capteur, sa position relative au matériau, sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Il peut être classé en fonction de trois caractéristiques : sa position, sa fonction et sur mode de contrôle (figure I.10). [1]

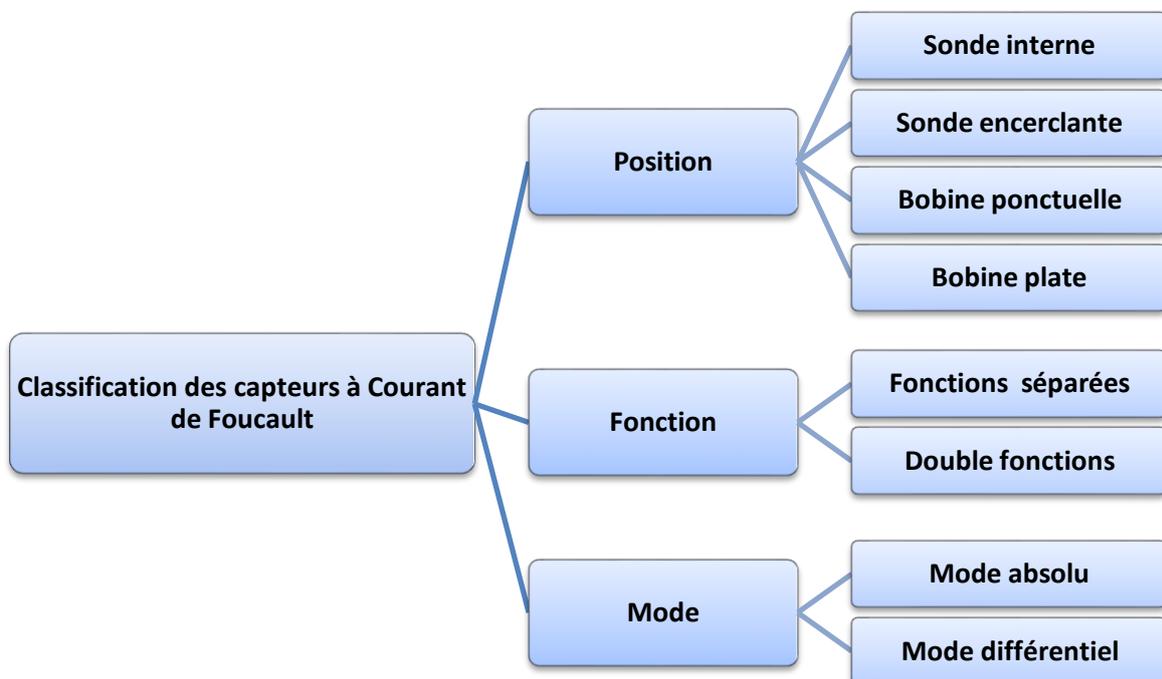


Figure I.10. Critères de classification des capteurs. [9]

I.3.5.1. Selon la position

a) Sonde interne

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau figure (I.11). [1]

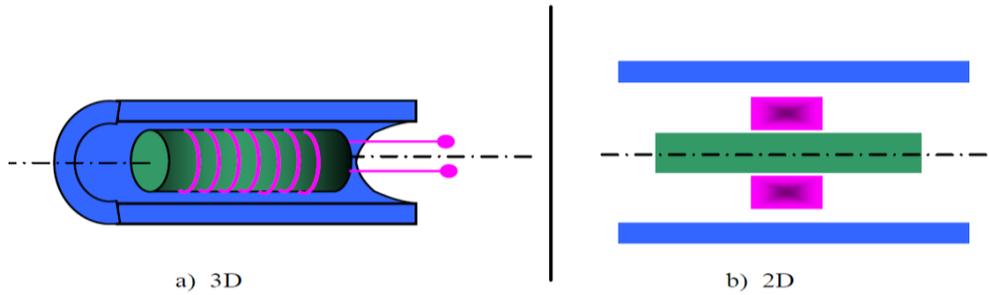


Figure I.11. Sonde interne [9]

b) Sonde encerclante

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner (Figure I.12). Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres. [9]

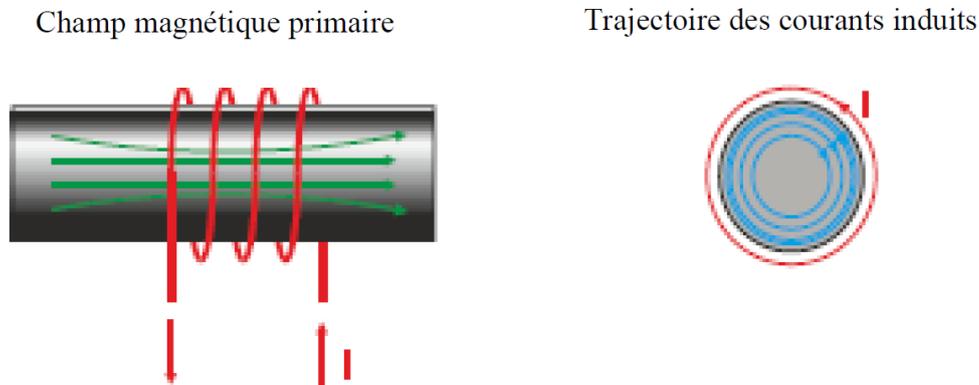


Figure I.12. Sonde encerclante [15]

c) Bobine ponctuelle (Palpeur)

Ses enroulements forment une petite bobine qui peut être placée sur, ou près, de la surface de la pièce. Il est destiné au contrôle local d'un produit à partir de la surface, sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Elle analyse une zone essentiellement égale à l'aire de sa section transversale. Elle permet donc une inspection locale de la pièce et elle peut atteindre des régions d'accès réputées difficiles. Dans le cas de l'examen d'une surface importante, il nécessite un balayage méthodique de la pièce. [1]

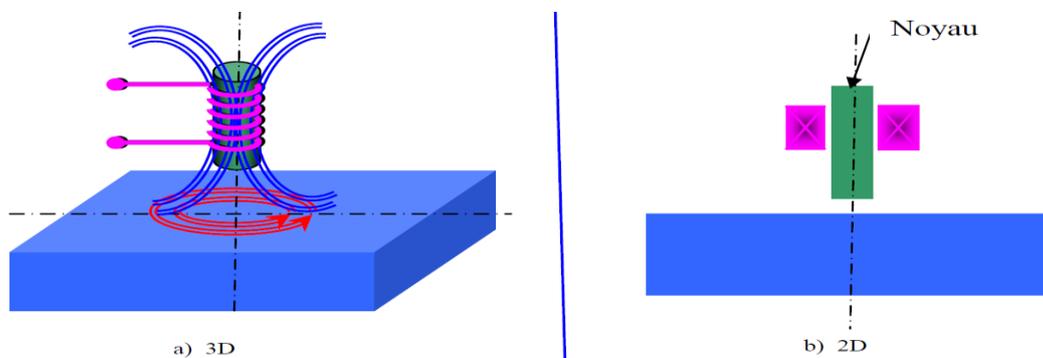


Figure I.13. Bobine ponctuelle (Palpeur) [9]

d) Bobine plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large. [10]

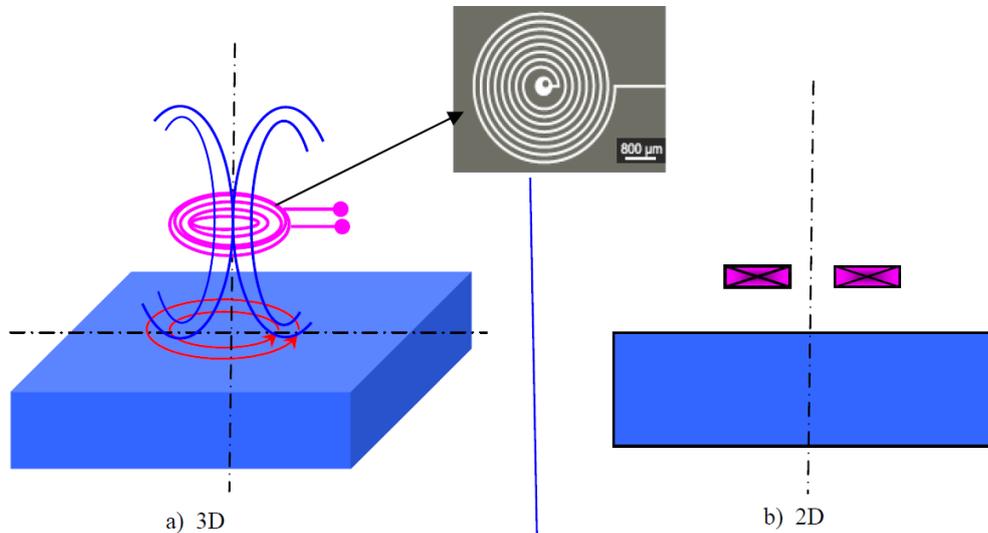


Figure I.14. Bobine plate [5]

e) Sonde interne tournante

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube. [1]

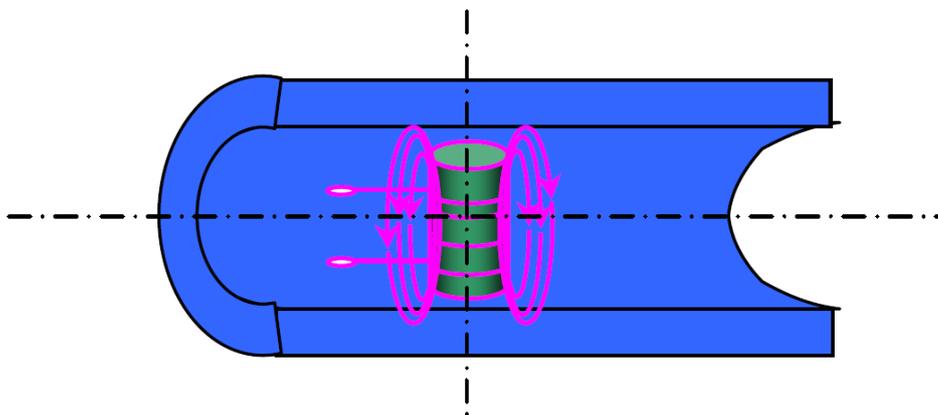


Figure I.15. Sonde interne tournante [9]

I.3.5.2. Selon la fonction du capteur

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés. [8]

a) Capteur double fonction

Le montage le plus simple est celui de la sonde à double fonctions constituée d'une seule bobine. Les fonctions d'émission et de réception sont assurées par la même bobine. L'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement. [8]

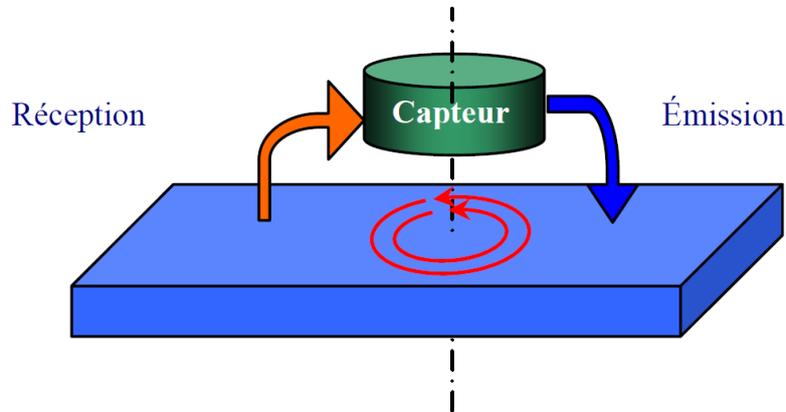


Figure I.16. Capteur à double fonction [9]

b) Capteurs à fonctions séparées

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci

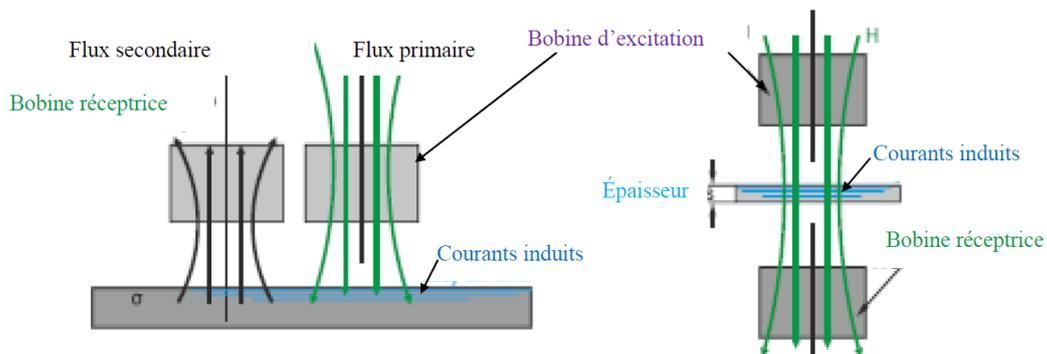


Figure I.17. Capteur à fonctions séparées [15]

I.3.5.3. Selon le mode

a) Mode absolu

Ce type de capteur est sensible à tous les paramètres géométriques et électromagnétiques de l'environnement. Typiquement le récepteur est constitué d'un seul élément (figure I.18). Avant le contrôle d'une pièce un étalonnage peut être effectué sur une pièce de référence (maquette), [8]

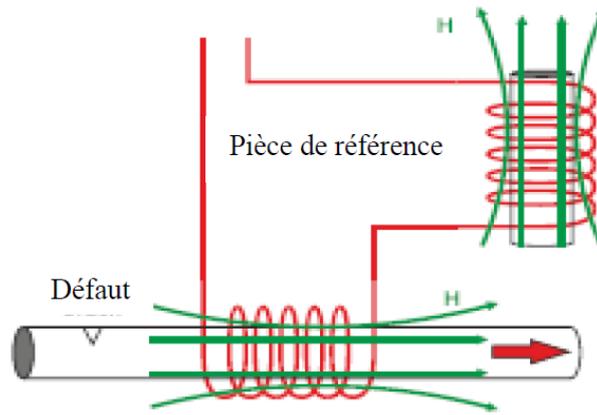


Figure I.18. Capteur absolue en mode compensé [15]

b. Mode différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés (figure I.19).

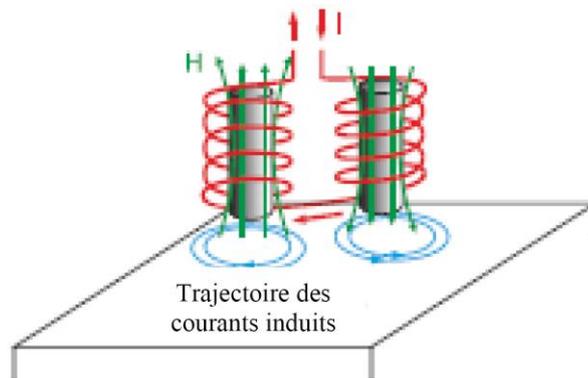


Figure I.19. Capteur en mode différentiel [9]

En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle (figure I.20). Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée [9]

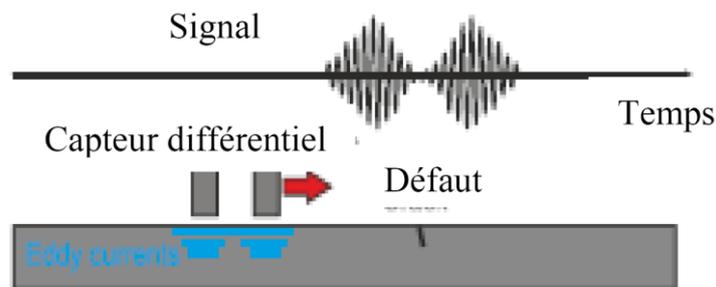


Figure I.20. Perturbation du signal d'alimentation [9]

I.4. capteur multiéléments

La technique de capteur multiélément à courant de Foucault consiste à générer un champ magnétique dans un conducteur induisant des courants qui permettent d'obtenir des informations sur la santé de la pièce inspectée. Toutefois, la génération du champ et la mesure sont faites à l'aide d'une ou plusieurs bobines électroniquement activées dans un motif donné et répété sur l'ensemble des éléments / bobines composant le capteur. C'est ce que l'on appelle le séquençement (i.e. la chronologie de l'activation de chaque motif).

I.4.1. Déplacement

Pour produire des capteurs multiéléments, plusieurs bobines placées de manière spécifique (ex. côte à côte, avec un motif particulier) dans un même assemblage, sont électroniquement activées selon un séquençement dédié (figure I.21). Ceci permet d'obtenir une zone active plus large et donc de diminuer efficacement le nombre de balayage nécessaire à l'inspection d'un composant donné comparé au capteur conventionnels. Par exemple, un balayage mono-élément en peigne est maintenant remplacé par un balayage linéaire de capteur multiéléments (Figure I.21). A noter qu'il est aussi possible d'effectuer des balayages en peigne avec des capteurs multiéléments, augmentant encore plus la zone d'inspection et donc la rapidité du contrôle. [12]

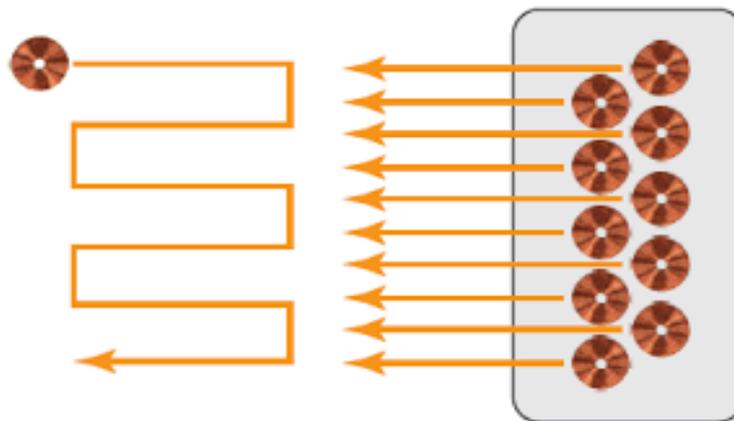


Figure I.21. Représentation schématisée de balayage en peigne et linéaire obtenu respectivement avec un élément simple et un capteur multiéléments, [12].

I.4.2. Motif

Le motif (aussi appelé topologie) correspond au montage physique des bobines dans un même capteur ainsi qu'à l'activation électronique unitaire de celles-ci. Les motifs de capteur multiélément sont en principe établis sur des montages de base développés pour les capteurs mono élément tels que les montages absolus, différentiels, et en transmission. De manière générale, les motifs utilisés sont principalement de type absolu ou émission/réception (E-R). Le motif absolu permet la détection de défaut dans toutes les orientations quel que soit le déplacement du capteur. [12]

Un capteur multiélément a la même sensibilité et limite des ses éléments, cela veut dire que si un de ces éléments ne peut pas détecter les défauts la solution final est la même.

I.4.3 Paramètres définissant un capteur multiélément

Les paramètres qui permettent de définir le capteur multiélément liés au motif sont la couverture, la résolution du capteur et l'uniformité des signaux.

La couverture correspond à la zone dite active du capteur. Selon le motif, le capteur doit donc contenir suffisamment de bobines pour fournir une couverture qui s'étend au-delà de la zone d'intérêt pour une inspection par passe unique. Des scans multiples peuvent être nécessaires pour couvrir une surface complète, (figure I.22.a). [12]

La résolution est la distance entre les deux centres de deux bobines adjacentes, elle est définie par le plus petit défaut recherché, (figure I.23.b).

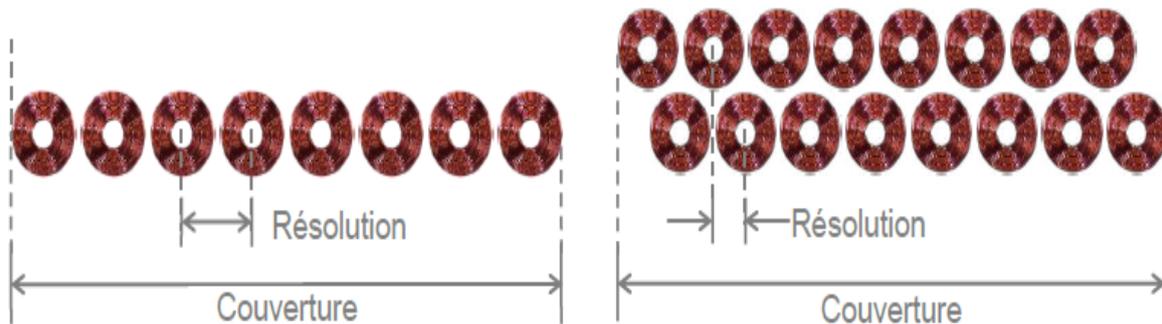


Figure I.22. Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution [12]

L'uniformité du signal d'un capteur est sa capacité à obtenir la même signature CF pour un défaut donné quel que soit l'élément du capteur le détectant. Ce paramètre est primordial pour maximiser la probabilité de détection du défaut recherché. Il est affecté par le design physique des éléments et le motif du capteur. De manière générale, les éléments d'un capteur CFM (Courant de Foucault Multiélément) sont agencés de manière à atteindre un niveau de sensibilité adéquat et uniforme. [12]

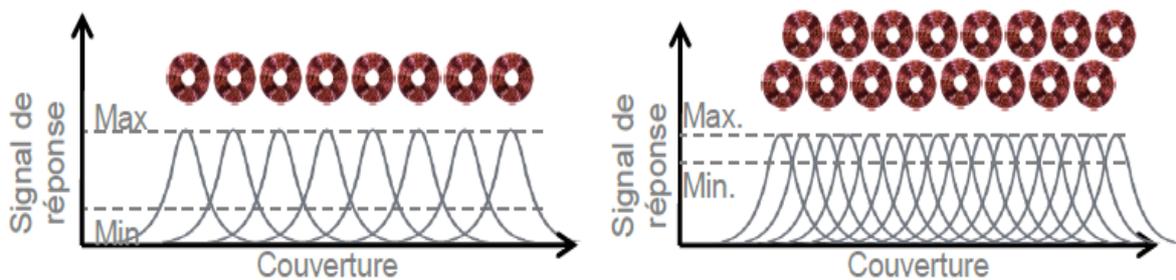


Figure I.23. Uniformité de signal CF sur un montage multiélément [12]

Dans les capteurs multiéléments, le multiplexage permet une optimisation de la réponse des éléments et donc d'accroître la résolution du capteur, la sensibilité des éléments (grâce à la réduction de l'inductance mutuelle) et de réduire le niveau de bruit.

I.4.4. Avantages et inconvénients du capteur multiélément

I.4.4.1. Avantages

Le capteur multiélément a beaucoup d'avantages tel que :

- Réduit considérablement le temps d'inspection en augmentant la vitesse de balayage.
- Couvre une zone plus grande dans une seule passe tout en maintenant une haute résolution.
- Réduit la complexité des systèmes de balayage mécaniques et robotiques.
- Produit en temps réel une cartographie de la région inspectée, ce qui facilite l'interprétation des données.
- Convient bien aux pièces de forme complexe.
- Améliore la fiabilité et le taux de détection.
- Aucune préparation de surface.

I.4.4.2. Inconvénients

Malgré les différents avantages de ce capteur, on peut distinguer quelques inconvénients

- Le coût élevé du capteur.
- La difficulté de réalisation de capteur.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différentes techniques du contrôle non destructif les plus utilisées dans l'industrie à savoir: l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, les ultrasons et enfin la technique des courants de Foucault.

Ensuite, on s'est concentré sur la technique du CND par les courants de Foucault, ou on a éclairci son principe, son objectif, l'effet de peau, ainsi que ses avantages et inconvénients.

En outre, la classification des capteurs de CND par courants de Foucault a été expliquée.

Enfin. Nous avons présenté en détail le capteur multiélément à CF, son principe, motif, paramètres qui le définissent et les avantages et inconvénients de ce capteur ont été expliqués.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du système de contrôle non destructif par les courants de Foucault.

Chapitre II

Modélisation du système du Contrôle Non Destructif par CF

Chapitre II. Modélisation du Système de Contrôle Non Destructif par CF

II.1. Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent des différentes techniques du contrôle non destructif ou on s'est basé sur les courants de Foucault, puis on a présenté les capteurs multiélément. En effet, pour faire une inspection, il est nécessaire d'avoir des connaissances sur les propriétés physiques des matériaux les phénomènes électromagnétiques, les traitements de signal associé ainsi que les défauts et les pièces à inspecté. Il est donc nécessaire de développer une modélisation de cette technique pour une bonne compréhension du comportement de ces derniers pour une prédiction et une détectabilité optimale des défauts.

Dans le domaine du CND par CF, la modélisation numérique est devenue ; grâce à la performance du matériel informatique, un outil majeur dans la conception des sondes et dans l'étude des performances de détection des systèmes.

La modélisation du CND par CF est basée sur la résolution des équations de Maxwell. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui régissent le comportement du système. Selon la complexité de la configuration à simuler, la résolution peut être analytique ou numérique ou même mixte.

La résolution analytique des équations de Maxwell présente l'avantage d'être rapide et permet d'obtenir des résultats très précis. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent impossible à obtenir. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques permettant d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées, comprenant des géométries quelconques de pièces, de défauts et de capteurs.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontières, la méthode des intégrales de volume... La plus répandue des approches numériques est celle des éléments finis (EF). [1, 3,7]

Nous débuterons ce chapitre par une description du problème à résoudre et les équations de Maxwell ainsi que les conditions aux limites associés. Ensuite, nous présenterons les différentes méthodes utilisées pour la résolution de ces équations différentielles aux dérivées partielles, ainsi que la méthode de calcul d'impédance. Enfin nous allons nous intéresser plus précisément à la méthode des éléments finis.

II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la (Figure II.1). Un matériau en cuivre (tube d'échangeur de chaleur), qui contient des défauts internes et externes, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF multiélément où une densité de courant variable dans le temps est imposée.

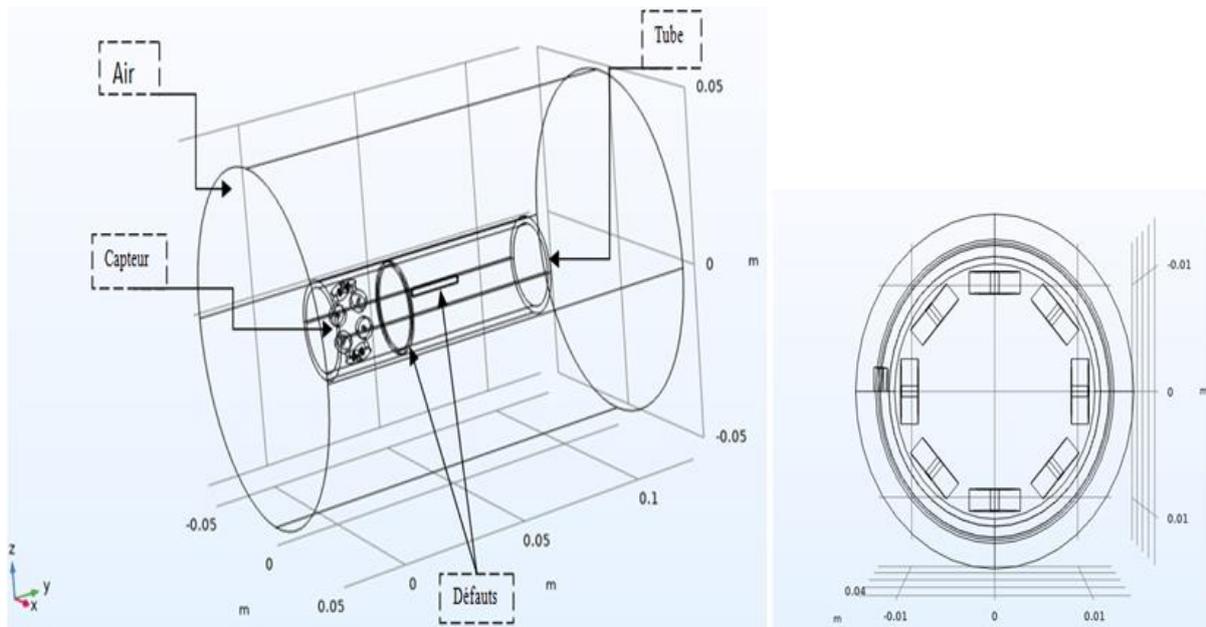


Figure II.1. Schéma du système de contrôle étudié.

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce à inspecter ainsi que la variation d'impédance de la bobine.

II.3. Intérêt de la modélisation

Une question se pose souvent pour les chercheurs, les ingénieurs et bien d'autres professionnels : quel est le résultat obtenu si telle action s'exerce sur tel composant? Le moyen le plus simple serait de tenter l'expérience, c'est-à-dire d'exercer l'action souhaitée sur ce composant pour observer ou évaluer le résultat. Toutefois, dans de nombreux cas l'expérience est irréalisable, coûteuse, dangereuse... Dans ces cas, il est donc intéressant de faire recours à la modélisation c.à.d. rechercher un modèle qui réagit d'une manière semblable au composant que l'on étudie. Ce modèle permettra de déduire les résultats souhaités. La modélisation consiste à créer une représentation mathématique d'un problème réel moyennant certaines hypothèses. Cette représentation permet aux utilisateurs de prévoir le comportement des systèmes étudiés.

Dans le contexte du CND par CF, les outils de modélisation permettent la conception des capteurs et la prédiction de leur comportement sans réalisation effective. Ces outils ont des conséquences sur le développement d'outils de production, en permettant de réduire le

coût de la phase expérimentale. La modélisation comporte deux étapes : la première est l'étude et l'analyse du problème et la deuxième est la mise en œuvre d'une solution au problème. La première étape aboutit en CND par CF à des équations aux dérivées partielles (EDP) basées sur les lois de l'électromagnétisme. [4]

II.4. Mise en équations

Les problèmes liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du matériau conducteur et d'une source de courant (Figure II. 2). Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω de frontière Γ . [5]

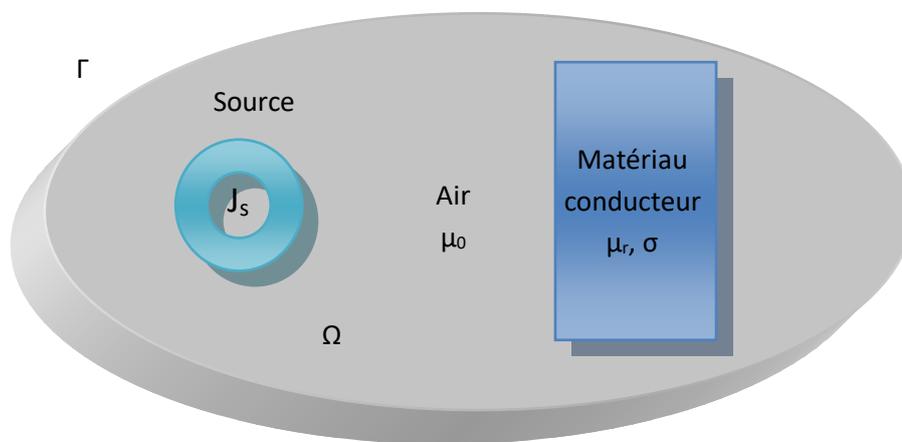


Figure II.2. Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.

- Ω : Domaine d'étude.
- J_s : Densité de courant électrique dans la source.
- Γ : Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.
- σ : Conductivité électrique.
- μ_0 : Perméabilité magnétique absolue du vide.
- μ : Perméabilité magnétique relative du matériau conducteur.

II.4.1 Équations de Maxwell

- *historique*

James Clerk Maxwell, né en 1831 à Édimbourg en Écosse, est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations l'électricité, le magnétisme et l'induction en développant la formulation mathématique des travaux précédents réalisés par Michael Faraday et André-Marie Ampère. Il a démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière. Les équations de Maxwell dérivent d'un ensemble de vingt équations différentielles à vingt variables, plus tard réduites à quatre. Ces équations sont présentées la première fois à la "Royal Society" en 1864 et décrivent le comportement et les relations du champ électromagnétique ainsi que son interaction avec la matière.

Dans la suite de ces travaux seul le régime harmonique sera étudié avec une convention en temps choisie en $e^{-j\omega t}$ où ω représente la fréquence angulaire ou pulsation et f la fréquence en Hz. Pour simplifier la notation la dépendance en ω de toutes les grandeurs sera implicite sauf lorsque c'est nécessaire. [5]



Figure II. 3. James Clerk Maxwell 1831-1879

L'étude d'un dispositif électromagnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et des équations de Maxwell. Ces équations sont l'expression la plus généralisée des lois de l'électromagnétisme classique. Elles constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques, et elles s'écrivent : [5]

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Loi de Maxwell Gauss (électrique)} \quad (\text{II.1})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de Maxwell Gauss (magnétique)} \quad (\text{II.2})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell Faraday (induction)} \quad (\text{II.3})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell Ampère} \quad (\text{II.4})$$

\vec{E} : Champ électrique [V/m].

\vec{H} : Champ magnétique [A/m].

\vec{D} : Induction électrique [C/m²].

\vec{B} : Induction magnétique [T].

\vec{J} : Densité de courant [A/m²].

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m³].

II.4.2. Lois constitutive

En physique, la conductivité électrique (σ), la perméabilité magnétique (μ) et la permittivité électrique sont des paramètres physiques qui relient les équations de Maxwell à travers des relations appelées « lois de comportement des matériaux » (lois constitutives). Ces relations sont décrites comme suit : [2]

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Où :

- μ : Perméabilité magnétique [H/m].
- $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Perméabilité magnétique [H/m].
- μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m].
- σ : Conductivité électrique [S/m].
- ε : Permittivité électrique [F/m].
- $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Constante diélectrique du vide [F/m].
- ε_r : Permittivité électrique relative du milieu [F/m].

Où, μ et σ peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotrope, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie. [8]

La relation entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique \vec{H} peut être non linéaire.

Pour assurer l'unicité de la solution du système d'équations (II.4) à (II.7), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions: les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les jauges. [8]

II.4.3. Conditions aux limites

Après avoir défini la géométrie, les caractéristiques électromagnétiques des matériaux utilisés et les sources actives et leurs valeurs, et afin de pouvoir résoudre le système d'équations d'état, il est nécessaire de définir des conditions aux limites caractérisant le dispositif étudié. Elles sont nécessaires pour la prise en compte des symétries du système. Ces conditions aux limites sur le potentiel vecteur magnétique sont en rapport avec les phénomènes physiques que vérifie le champ sur les bords du domaine.

Afin de pouvoir résoudre entièrement cette équation, il est nécessaire d'imposer des conditions sur les limites du domaine d'étude. on distingue les deux types de condition suivants:

Condition de Dirichlet homogène qui impose la valeur du potentiel vecteur sur la partie choisie du contour du domaine d'étude.

$$\vec{u} \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.8.a})$$

Condition de Neumann homogène qui impose que la dérivée normale du potentiel vecteur A est égale à zéro sur la partie choisie de contour du domaine d'étude.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (\text{II.8.b})$$

II.4.4. Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables. Cependant, il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux de propriétés différentes.

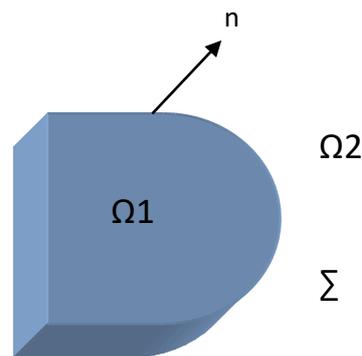


Figure II.4. Surface Σ séparant deux milieux Ω_1 et Ω_2

Considérons deux milieux Ω_1 et Ω_2 ayant des propriétés physiques différentes, séparées par une interface Σ (figure II.4). Les conditions traduisant la continuité des champs à l'interface Σ sont alors définies par les relations suivantes :

- La discontinuité de la composante tangentielle de H est égale aux courants superficiels J_s .

$$\vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \quad (\text{II.9.a})$$

- La continuité de la composante tangentielle de E

$$\vec{n} \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (\text{II.9.b})$$

- La continuité de la composante normale de B.

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (\text{II.9.c})$$

- La discontinuité de la composante normale de D est égale aux charges superficielles ρ_s

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \vec{\rho}_s \quad (\text{II.9.d})$$

Où :

$\vec{\rho}_s$: La densité surfacique de charge.

\vec{J}_s : La densité surfacique de courant.

\vec{n} : La normale à l'interface Σ séparant les deux milieux

Ces conditions de continuité (II.9), montrent que les composantes tangentielles E et H et les composantes normales B et D sont continues à travers l'interface Σ . Elles traduisent la continuité des composantes tangentielles E et H et normales de B et de D à l'interface Σ . La composante tangentielle n'est continue que si la surface de séparation ne possède pas une densité de courant surfacique \vec{J}_s . [4]

II.4.5. Conditions de Jauge

Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution. Soient \vec{U} et \vec{W} deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par : [1],

$$\text{div} \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{II.10.a})$$

$$\text{div} \vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{II.10.b})$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'arêtes} \quad (\text{II.10.c})$$

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près. La jauge de Coulomb s'écrit donc :

$\text{div} \vec{A} = 0$ normal à la surface de séparation des deux milieux Ω_1 et Ω_2 et dirigé vers l'extérieur.

II.4.6. Hypothèses simplificatrices

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasi-stationnaires), ce qui donne des équations découplées plus simples à résoudre, certaines hypothèses simplificatrices sont aussi introduites. Dans notre cas d'étude nous considérons que les hypothèses simplificatrices suivantes: [15]

- 1) Dans un milieu conducteur de conductivité σ est de l'ordre de 10^6 [S/m], et permittivité ϵ_0 de l'ordre de $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m], à des fréquences qui avoisinent les

MHZ, nous avons en condition $\omega \cdot \epsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'obtenir des courants de conceptions nuls:

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.11})$$

- 2) La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\rho = 0$).
- 3) Les paramètres σ , μ , ϵ , sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système
- 4) Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre deviennent:

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.12.a})$$

$$\text{div } \vec{D} = 0 \quad (\text{II.12.b})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.12.c})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.12.d})$$

Avec les relations constitutives suivantes :

$$\vec{j} = \vec{j}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.14})$$

L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($B_r = 0$) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent ou de matériau ferromagnétique.

II.5. Formulations magnétodynamiques

Une association des relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge sont à la base de formulations qui permettent la mise en œuvre d'une solution outil éléments finis 3D. Il faut donc, avoir une formulation aux dérivées partielles qui régit notre système. En générale il est plus fréquent, dans les travaux CND-CF, d'avoir recours à l'utilisation au champ électrique et magnétique en fonction de potentiels. Car la solution converge mieux que si les inconnues étaient les champs (E, H). [13]

On peut classer les formulations en deux types suivant :

- Formulations basées sur le champ électrique ($\mathbf{E}, \mathbf{A-V}$), formulation en potentiel vecteur magnétique \mathbf{A}
- Formulation basées sur le champ magnétique ($\mathbf{H-}\Phi, \mathbf{T-}\Omega$) n , comprend des formulations en \mathbf{H} ou la formulation en \mathbf{T} .

II.5.1. Formulations basées sur le champ électrique E

La formulation en champ électrique s'obtient en faisant la dérivée de l'équation Maxwell-Ampère (II.4) par rapport au temps, tout en supposant que la perméabilité magnétique est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit : [13]

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

II.5.2 Formulation en A-V

D'après l'équation de la conservation de flux (II.2), l'induction magnétique \vec{B} dérive d'un potentiel magnétique \vec{A} , tel que [13]

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} . \vec{A} \quad (\text{II.16})$$

Lorsque cette équation est remplacée dans (II.9a), on obtient :

\vec{A} Est le potentiel vecteur magnétique

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] = \vec{0} \quad (\text{II.17})$$

Un potentiel électrique v peut être déterminé à partir de l'équation (II.17), qui est donné par la relation ci-après :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(v) \quad \Longleftrightarrow \quad \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(v) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.18})$$

La combinaison de l'équation (II.13) et (II.17) nous permet d'écrire :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma E = \vec{J}_s - \sigma \left[\overrightarrow{\text{grad}}(v) + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] \quad (\text{II.19})$$

Finalement la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique A et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}}(v) = \vec{J}_s \quad (\text{II.20})$$

L'unicité du potentiel doit être assurée par l'utilisation d'une jauge. En A-V la jauge de Coulomb semble être la plus efficace.

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.21})$$

II.5.3 Formulation en H

La combinaison des équations (II.12d) et (II.13) conduit directement à l'équation à résoudre: [13]

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\sigma} \text{rot}(\vec{H}) \right] + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.22})$$

Aucune condition de jauge n'est nécessaire pour assurer l'unicité de champ magnétique lorsque les conditions aux limites sont adéquates.

II.5.4. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T-Φ

Comme la densité de courant induite est à divergence nulle ($\text{div} \vec{A} = 0$), un potentiel vecteur électrique, noté \vec{A} , peut être introduit, tel que : [13]

$$\vec{J} = \text{rot} \vec{T} \quad (\text{II.23})$$

Comme pour la formulation A-V, l'unicité de la solution nécessite l'introduction d'une jauge (Jauge de Coulomb par exemple); ce qui donne l'expression ci-dessous :

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\sigma} \text{rot} \vec{T} \right] + \mu \frac{\partial}{\partial t} [\vec{T} - \overrightarrow{\text{grad}} \Phi] = 0 \quad (\text{II.24})$$

En fonction de la dimension et de la complexité du problème à traiter, le choix d'une formulation dépend principalement des ressources informatiques, de mise en œuvre et de précision. Les formulations vérifiant au sens fort les équations de Maxwell sont les formulations duales (E, H) qui admettent une solution unique pour des conditions aux limites adéquates et ne nécessitent pas de jauge.

II.5.5. Comparaison entre les formulations

Le Tableau 2.1 récapitule une comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF.

Tableau II.1. Comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF.

Formulation	Potentiels régions non conductrices	Potentiels régions conductrices	Avantages	Inconvénients
$\vec{A}V - \vec{A}$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	Pas de problèmes régions multiples identiques	Nombres d'inconnues importants
$\vec{T} - \Phi$	Φ	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, \Phi$	Faible temps de calcul – Réduction inconnues	Problèmes de Régions multiples

II.6. Méthodes de résolution des EDP

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP), et elles peuvent se diviser en deux grandes familles : analytiques et numériques. La méthode choisie dépend principalement de la géométrie à étudier.

II.6.1. Méthodes analytiques

Dans la majorité des cas, les méthodes analytiques sont utilisées pour la modélisation des configurations ayant des structures électromagnétiques et géométriques simples. Les modèles électromagnétiques et géométriques traités sont respectivement linéaires et unidimensionnels ou bidimensionnels mais rarement tridimensionnels. Outre les méthodes analytiques comme celle de séparation des variables, on distingue plusieurs outils analytiques de formulation d'un problème électromagnétique (noyau de Green, équation de Fredholm, loi de Biot et Savart, théorème de réciprocité de Lorentz, théorème des images utilisées en optique, etc.). [14]

II.6.2. 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 permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. Parmi ces méthodes, on pourra citer la Méthode des **intégrales de volume** (MIV), Méthode des **intégrales de surface** (MIS), Méthode des **différences finies** (MDF), Méthode des **volumes finis** (MVF), Méthode des **intégrales de frontières** (MIF), Méthode des **éléments finis** (MEF). [15]

II.6.2.1. Méthode des intégrales de volume (MIV)

La méthode des intégrales de volumes repose sur la résolution des équations intégrales précédemment citées (intégrales de surface (MIS), différences finies (MDF), volumes finis (MVF), intégrales de frontières (MIF) et éléments finis (MEF)). Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée obtenues, les champs électrique ou magnétique dus à l'interaction capteur-cible sont déterminés par convolutions entre ces fonctions de Green et les sources (électriques ou magnétiques) mises en jeu.

En pratique, ces équations intégrales sont discrétisées par la méthode des moments : les champs et les grandeurs constitutives électromagnétiques sont supposés constants dans des cellules élémentaires cubiques. La résolution numérique s'effectue alors par inversion itérative. [15]

II.6.2.2. Méthode des intégrales de surface (MIS)

Avec cette méthode, le défaut est supposé de conductivité nulle avec une très petite ouverture. Il est pris en compte comme une surface empêchant le courant de passer. Cette méthode se révèle bien adaptée pour ce type de problème. Cependant, à cause de la définition de Green, elle reste limitée du point de vue des configurations traitables avec cette méthode. [15]

II.6.2.3. Méthode des intégrales de frontières (MIF)

Cette méthode est basée sur une subdivision de nœuds distribués sur les frontières des différentes régions de dispositif. À partir des valeurs sur les frontières, il est possible dans certains cas de calculer les champs, si c'est nécessaire, à l'intérieur du domaine de résolution.

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de prendre en considération la saturation, la nécessité d'un espace mémoire et d'un temps de calcul importants, car les matrices issues de cette méthode sont de rang élevé.

La méthode des intégrales de frontières est utilisée généralement en magnétostatique ou bien elle est couplée avec la méthode des éléments finis pour calculer des champs électromagnétiques dans les milieux linéaires et non conducteurs. [3, 1, 4, 16]

II.6.2.4. Méthode des différences finies (MDF)

Cette méthode historiquement la première est relativement simple à mettre en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir une faible qualité d'approximation des variables et l'incapacité de modéliser des géométries de forme complexe. Elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires. La méthode est basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes. [3, 4, 16, 20]

II.6.2.5. Méthode des éléments finis (MEF)

Cette méthode consiste à mailler tout le domaine d'étude par des volumes élémentaires (Tétraèdres, prismes...). Ensuite, les EDP sont réécrites sous une forme variationnelle. Après discrétisation création et assemblage des matrices, cette dernière conduit à un système matriciel à résoudre directement ou par une méthode itérative.

Contrairement à la plupart des méthodes numériques citées auparavant, la méthode des éléments finis permet de traiter des configurations de contrôle très variées, d'un point de vue géométrique (capteur et pièce inspectée) et de celui des caractéristiques physiques des matériaux. Ceci la rend très adaptée pour modéliser les capteurs souples et les pièces de formes complexes. C'est la méthode qui a été retenue dans ce travail. [3, 4, 16, 13, 20]

II.6.2.6. Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation utilisée en particulier en mécanique des fluides. Elle a connu aussi un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie : transfert thermique, électromagnétisme ...etc. La méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude Ω en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes...etc.) de telle manière que chaque volume entoure un nœud. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques.

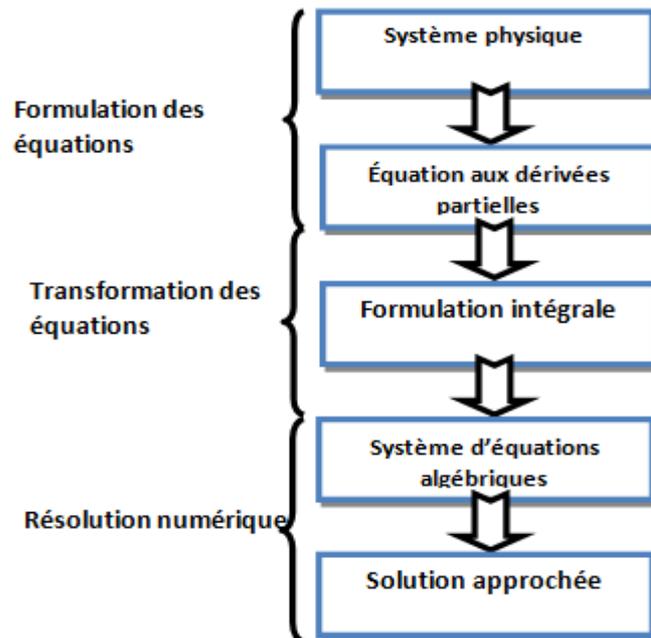


Figure II.5. Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF

L'équation EDP (Équation aux dérivées partielles) du problème est intégrée sur un volume élémentaire. Afin de calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, ...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Par rapport aux éléments finis, la discrétisation par la méthode des volumes finis conduit à un système linéaire avec une matrice plus creuse. Cet avantage permet une convergence plus rapide des solveurs itératifs [3, 4, 16, 20]

II.6.3. Méthodes semi-analytiques

Ce sont des méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité.

Les résistances, les inductances et mutuelles élémentaires sont calculées analytiquement. Ensuite une sommation numérique permet de calculer ainsi l'impédance totale de l'inducteur. Donc, cette impédance contient des expressions analytiques qui sont sommées numériquement; d'où vient l'appellation **semi-analytique**.

Elles regroupent la méthode des **multi-transformateurs** et celle des **circuits couplés**, [9].

II.7. Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis est apparue dans les années 1950 et n'a été introduite en électromagnétisme qu'en 1970 par M.V.K.Chari et P.P. Sylvester. Elle a connu dès lors un développement considérable. [17, 18]

Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul. Cette méthode est l'une des plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

La MEF consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important [20] [16]

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations différentielles aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème, elle peut être soit une **formulation variationnelle** ou en **résidus pondéré**.

II.7.1. Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonnienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle type intégral défini par: [17]

$$F(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega \quad (\text{II.25.a})$$

Où :

$$L = Wc - Wp \quad (\text{II.25.b})$$

- L : est la fonction de lagrange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.
- Ω : est le domaine d'étude

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie F(A) revient à minimiser cette fonctionnelle.

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_n} = 0 \quad (\text{II.25.c})$$

Où :

- n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.
- A : inconnue au nœud n du domaine.

II.7.2. Formulation résidus pondérés:

Le principe de la méthode des résidus pondérés consiste à remplacer la solution exacte par la solution approchée, ce qui va engendrer une erreur appelée résidus R ;

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{II.26})$$

Tel que :

- R_i : est le résidu de l'approximation.
- $L(A)$: opérateur différentiel.
- f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω .
- A : l'inconnue à chercher.

À l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en N points du domaine Ω .

$$\int_{\Omega} R_i \Phi_i \cdot \partial\Omega = 0 \quad (\text{II.27})$$

Φ_i : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu. [17, 18]

Plusieurs méthodes peuvent être déduites de la formulation résidus pondérés, ces dernières sont essentiellement liées au choix des fonctions de pondérations, parmi elles on citera :

- a) **La méthode de collocation par points**, ou la fonction de Dirac est prise comme fonctions de pondérations ou on impose au résidu de s'annuler dans chaque point ou on veut approcher la solution.
- b) **Méthode des moindres carrés** qui est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites.
- c) **La méthode de Galerkin** qui consiste à choisir des fonctions de projections identiques aux fonctions d'approximation, qui donne à la fin un système algébrique symétrique facile à résoudre.

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

II.7.3. La discrétisation du domaine

Le domaine de résolution est discrétisé en petits domaines appelés éléments finis, l'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément, grâce aux fonctions d'interpolation.

L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément. On parle alors d'interpolation nodale, [16].

II.7.4. Calcul de l'impédance du capteur

Le CND par courants de Foucault repose sur l'analyse des différentes grandeurs électriques du capteur lors de son déplacement par rapport aux défauts, ces grandeurs sont influencées par de nombreux paramètres.

Une fois les valeurs du potentiel vecteur magnétique en tout nœud de la région maillé sont déterminées, l'impédance de la bobine qui est notre paramètre d'intérêt peut être calculée.

Comme l'obtention des courants de Foucault n'est pas directement accessible expérimentalement, donc le passage par la mesure ou le calcul d'autres grandeurs (potentiel vecteur magnétique, champ électrique, impédance) est nécessaire. Plusieurs expressions de l'impédance ont été formulées et développées dans le domaine de contrôle non destructif par courants de Foucault. Parmi elles citons: [13]

II.7.4.1. Calcul de l'impédance à travers l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes joules

La variation d'impédance peut être déterminée en calculant l'énergie magnétique emmagasinée W_m dans tout l'espace d'étude et les pertes Joule P_J , définies par les relations suivantes :

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{\mu} |\vec{B}|^2 dv \quad (\text{II.28})$$

$$P_J = \frac{1}{2} \iiint_{\text{conducteur}} \frac{1}{\sigma} |\vec{J}|^2 dv \quad (\text{II.29})$$

Connaissant W_m et P_J , nous pouvons accéder facilement à la résistance R et à la réactance X , équivalentes du capteur. Les expressions reliant la résistance aux pertes Joule, et la réactance de l'énergie magnétique sont données par les relations suivantes,

$$R = \frac{P_J}{I^2} \quad (\text{II.30})$$

$$X = \frac{2\omega}{I^2} W_m \quad (\text{II.31})$$

Avec I et ω représentent respectivement le courant d'excitation parcourant la bobine et sa pulsation. On peut déduire alors les variations ΔX et ΔR

$$\Delta X = \frac{\omega}{\mu \cdot I^2} \iiint_V (|B_0|^2 - |B|^2) \cdot dv \quad (\text{II.32})$$

$$\Delta R = \frac{1}{2 \cdot \sigma \cdot I^2} \iiint_{\text{conducteur}} (|J_0|^2 - |J|^2) \cdot dv \quad (\text{II.33})$$

Avec

- B_0 : Induction pour pièce de référence (sans défaut);
- B : Induction pour pièce de à tester (avec défaut);
- J_0 : Densité des courants induits;
- J : Densité des courants induits.

II.7.4.2. Calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine

On peut calculer la variation de l'impédance par la détermination de l'énergie électromagnétique de la bobine constituant le capteur. Cette variation est donnée par la formule ci-après. [13]

$$W_{em} = I^2 \Delta Z = - \int_{\Omega_s} (\vec{E} - \vec{E}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad (\text{II.33})$$

Avec:

\vec{E} et \vec{E}_0 représentent les champs électrique respectivement en présence et en absence de la fissure. I est l'intensité du courant parcourant la bobine et Ω_s représente le volume occupé par la bobine.

Dans la bobine, le champ électrique s'écrit:

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j\omega \vec{A} \quad (\text{II.34})$$

D'où, l'expression de la variation d'impédance ΔZ :

$$\Delta Z = - \frac{j\omega}{I^2} \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad (\text{II.35})$$

Où:

\vec{A} et \vec{A}_0 étant les potentiels vecteurs magnétiques respectivement en présence et en absence de la fissure.

On doit noter que le terme $\frac{I^2 \Delta Z}{j\omega} = \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s$ représente la variation de l'énergie électromagnétique de la bobine en présence et en absence du défaut.

Les deux méthodes aboutissent aux mêmes résultats. Dans nos calculs, nous avons opté pour la première méthode.

La taille des matrices obtenues est importante, d'où la nécessité de recourir à des algorithmes de pré-conditionnement ainsi que l'utilisation des méthodes itératives pour la résolution du système obtenu.

Actuellement, divers logiciels de simulation numérique sont disponibles et permettent de faciliter la résolution numérique des systèmes d'équations aux dérivées partielles décrivant les phénomènes électromagnétiques intervenant dans le CND-CF. Le logiciel utilisé est le COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis et qui permet aussi la possibilité de se coupler à Matlab. [13]

II.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du CND par CF, il a fait l'objet d'une présentation des Équations de Maxwell, les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les conditions de jagues. Ensuite on a vu les méthodes utilisées pour la résolution de ces équations différentielles aux dérivées partielles, telle que, les méthodes analytiques, numériques, et semi analytiques. Enfin on a présenté les différentes expressions de l'impédance qui ont été formulées et développées dans le domaine de contrôle non destructif par courants de Foucault.

Comme le logiciel COMSOL-Multiphysics est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel, nous l'utiliserons comme outil de simulation pour le CND-CF appliqué pour l'inspection des tubes des échangeurs de chaleur. La résolution dans notre mémoire est basée sur la méthode des éléments finis.

Chapitre III

Simulation du comportement du système capteur multiéléments et
tube de l'échangeur de chaleur

Chapitre III. Simulation du comportement du système capteur multiéléments et tube de l'échangeur de chaleur

III.1 Introduction

Plusieurs techniques permettent de révéler la présence d'un défaut dans la paroi interne ou externe du tube. La méthode par capteur multiélément est la plus utilisée par les leaders mondiaux dans ce domaine. D'une part, cette méthode permet dans un temps très réduit de dessiner la cartographie des surfaces inspecter mettant en évidence la présence du défaut, d'autre part, les images obtenues rendent la caractérisation de défaut très aisée (forme, taille, orientation...).

Dans ce chapitre, nous allons étudier les performances de détection d'un capteur multiéléments opérant sur un tube d'échangeur de chaleurs sous COMSOL-multiphysics.

III.2 Présentation des étapes de simulation sous COMSOL

Une simulation électromagnétique sous COMSOL-Multiphysics se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. La simulation se décompose ainsi en trois étapes principales: le prétraitement, le calcul et le post-traitement. L'étape de prétraitement inclut l'implantation du modèle géométrique et affectation des propriétés physiques des différentes parties du travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL. Enfin, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement pour exploitation (Excel, Matlab...). [18]

III.2.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. A gauche, on retrouve le Model où il est possible de définir des variables et d'autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles physiques s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). Le modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le modèle: par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Geometry. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. En haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer l'agrandissement de l'affichage (zoomer), l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc... Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut

de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, les progressions des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée. Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.5 sont présentés sur la figure III.1, [1]

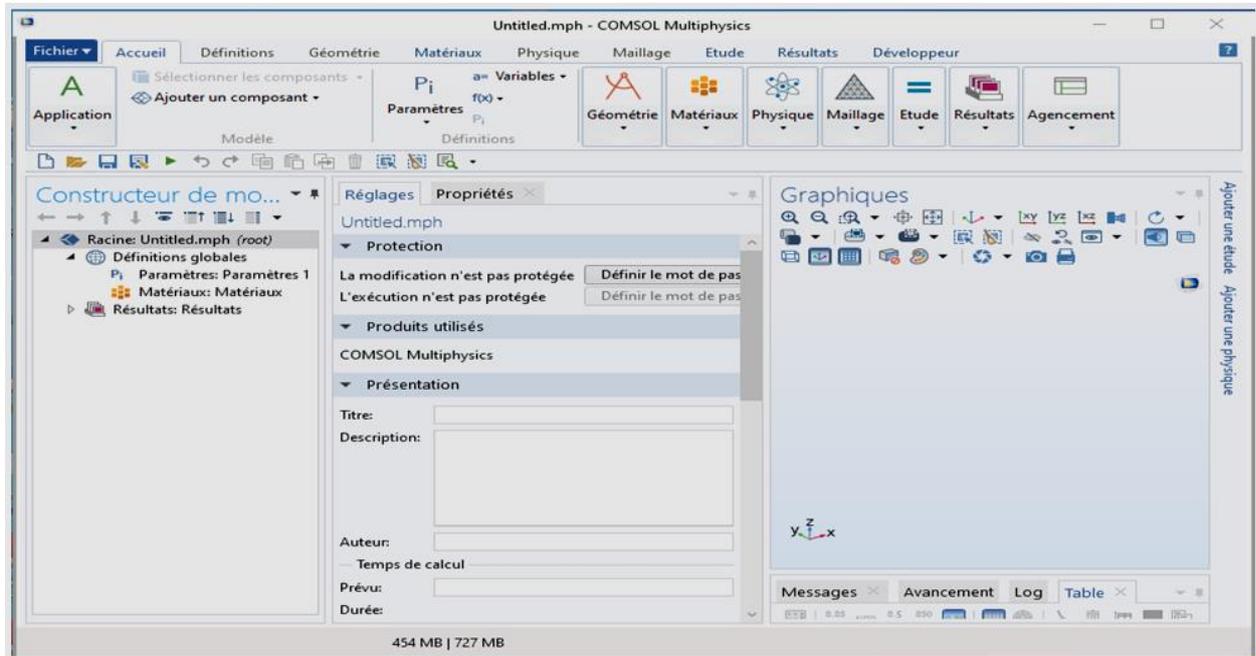


Figure III. 1. Interface utilisateur de COMSOL 5.5

III.2.2 Création du modèle de simulation

Les étapes de création et simulation d'un modèle sous COMSOL-Multiphysics sont :

- choix du modèle spatial en 2D, 3D,
- choix du domaine physique de travail (domaine magnétique (mf) sous AC/DC),
- choix du domaine d'étude, le domaine fréquentiel,
- implantation de la géométrie du modèle,
- affectation des propriétés physiques de chaque domaine,
- maillage des différentes parties du modèle,
- simulation et exploitation des résultats.

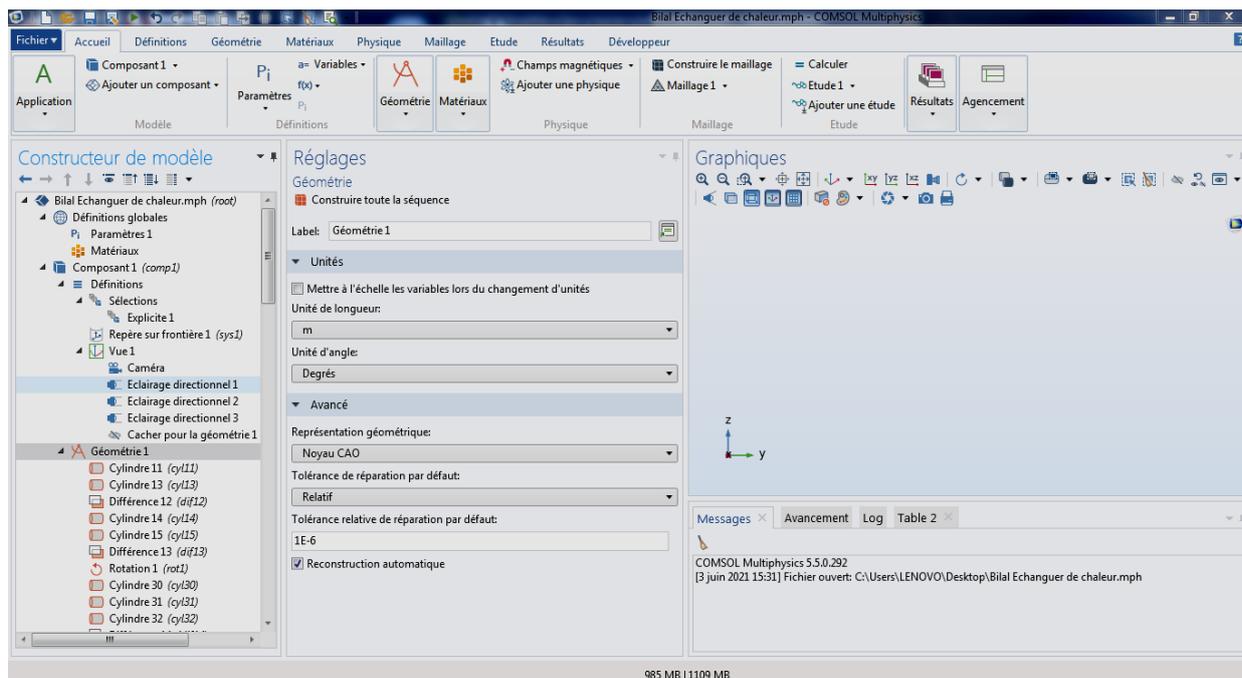


Figure III. 2. Création du modèle géométrique.

III.2.3 Vue 3D et 2D du modèle à étudier

La configuration d'étude est composée d'un tube d'échangeur de chaleur en cuivre, et deux défauts. Le capteur est constitué de huit (8) bobines comme montré en figure III.3.

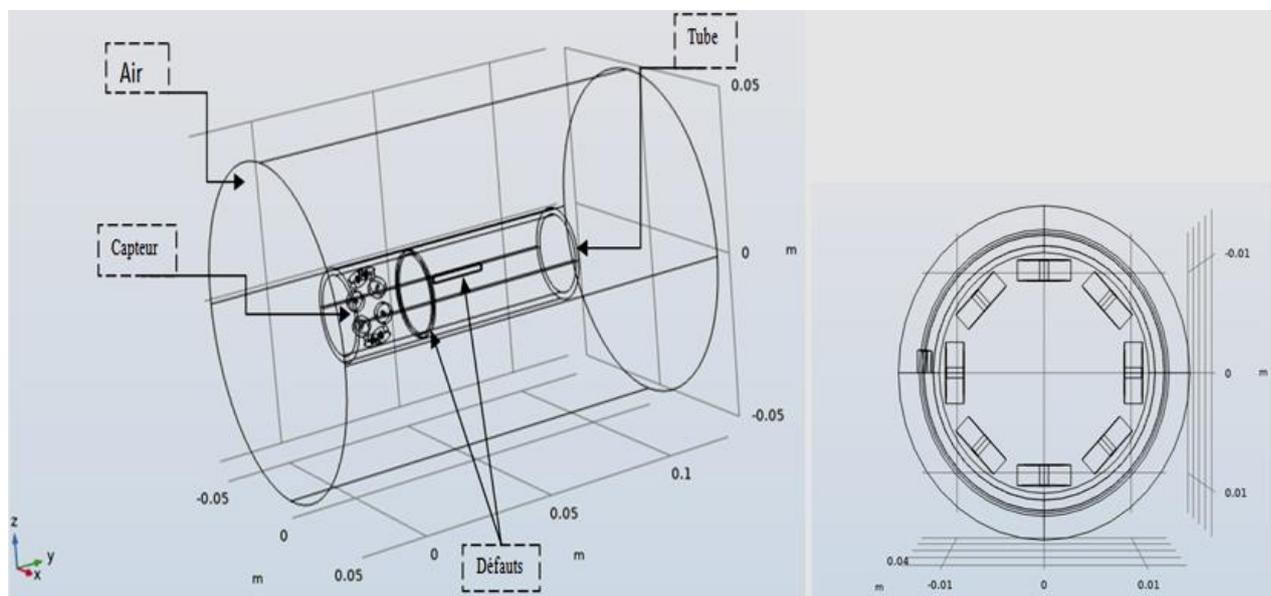


Figure III.3. Vue 3D du système étudié

Les caractéristiques géométriques du modèle du tube, du capteur et des différents défauts sont données par le Tableau III.1 :

Tableau III. 1. Caractéristique du dispositif étudié

Capteur			Tube		
Nombre de bobines	8		Rayon externe (mm)	14	
Rayon externe (mm)	3		Rayon interne (mm)	12	
Rayon interne (mm)	0.5		Longueur (mm)	90	
Hauteur (mm)	2		Conductivité électrique(S*m ⁻¹)	5.87*10e7	
Nombre de spires	125		Défaut cylindrique		
Défaut Parallélépipède			Type de défaut	Interne	Externe
Type de défaut	Interne	Externe	Rayon externe (mm)	13	14
Longueur (mm)	20	20	Rayon interne (mm)	12	12.5
Largeur (mm)	2	2	Largeur (mm)	1	1
Profondeur (mm)	1	1.5	Profondeur (mm)	1	1.5

III.2.4 Maillage du modèle proposé

La première tâche à accomplir lors de la réalisation d'une simulation numérique consiste à définir le domaine de calcul, suivi par la création du maillage pour le domaine retenu. Cette étape peut être considérée à la fois comme la plus importante et la plus délicate dans ce travail préliminaire. Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL-Multiphysics. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes.

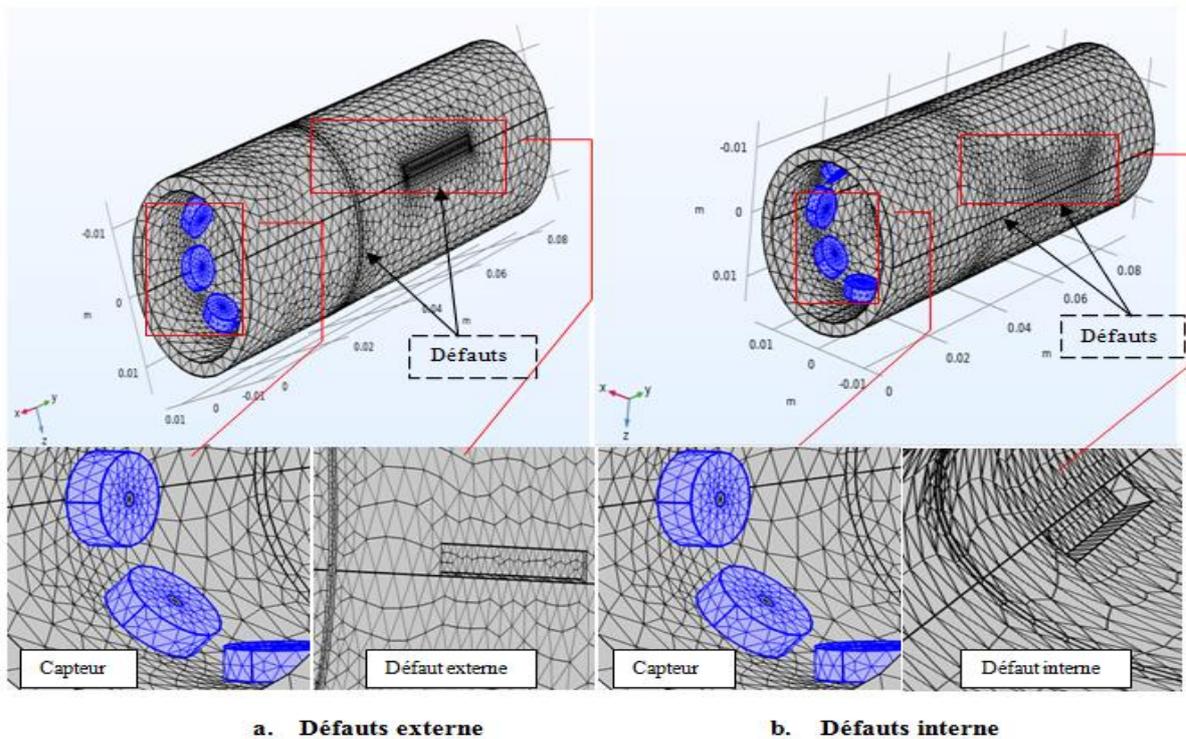


Figure III. 4. Maillage du dispositif en 3D.

III.3. Etude d'un défaut interne

Après avoir implémenté le model sous COMSOL, nous procéderons a l'étude de l'effet de certains paramètres comme la fréquence, le pas de déplacement du capteur et la profondeur et la largeur des défauts sur la qualité de la détection obtenues d'un défaut interne.

III.3.1 Etude de l'influence de la fréquence

Pour étudier l'effet de la fréquence du champ d'excitation sur la qualité de détection, nous fixons le pas du déplacement du capteur à 2mm et on réalise le scan pour les fréquences 20khz, 40khz, et 60khz. Les résultats sont donnés sur les figures suivantes :

a. $f=20\text{khz}$

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à $f=20\text{khz}$.

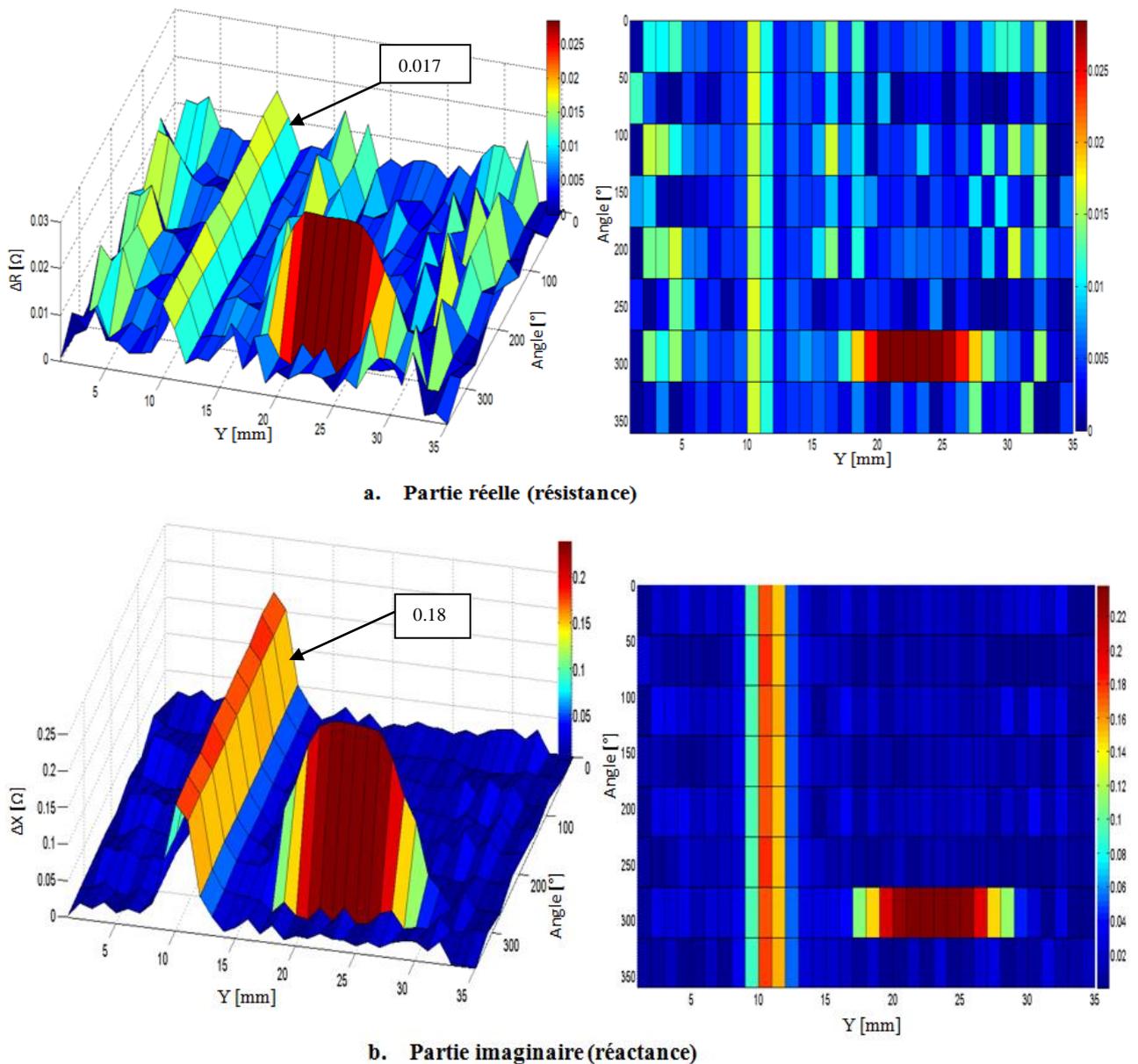


Figure III.5. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=20\text{khz}$

b. $f=40\text{kHz}$

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à $f=40\text{kHz}$.

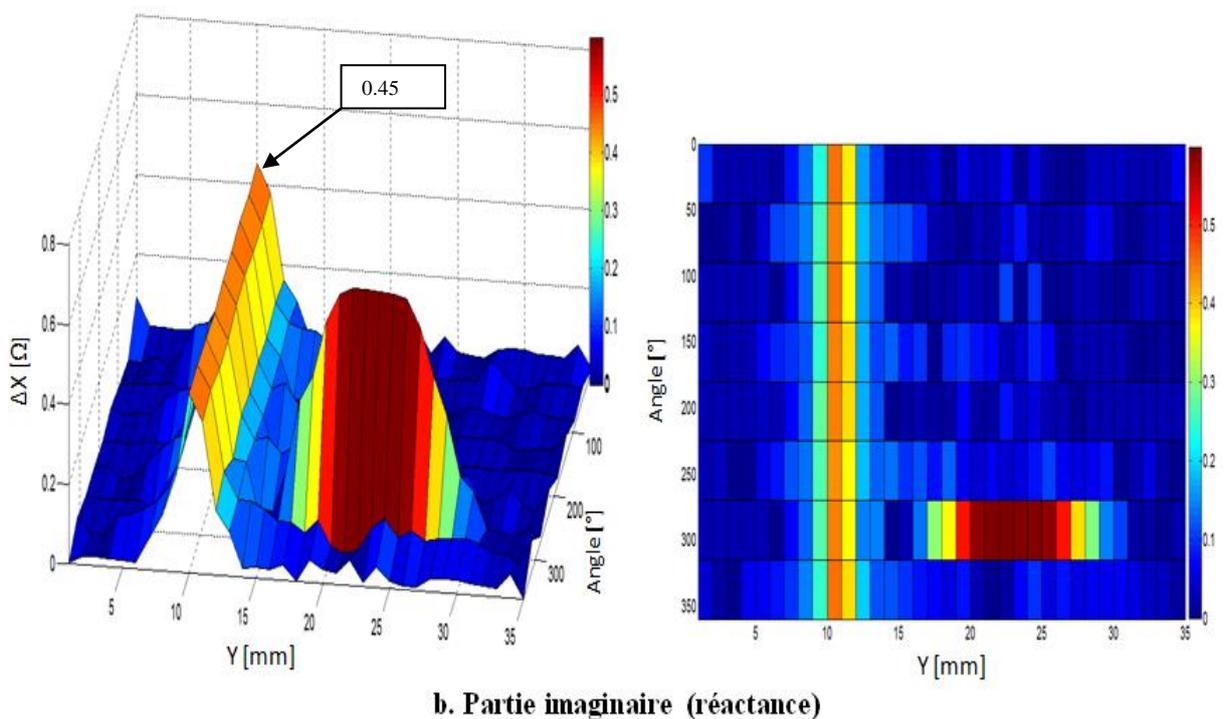
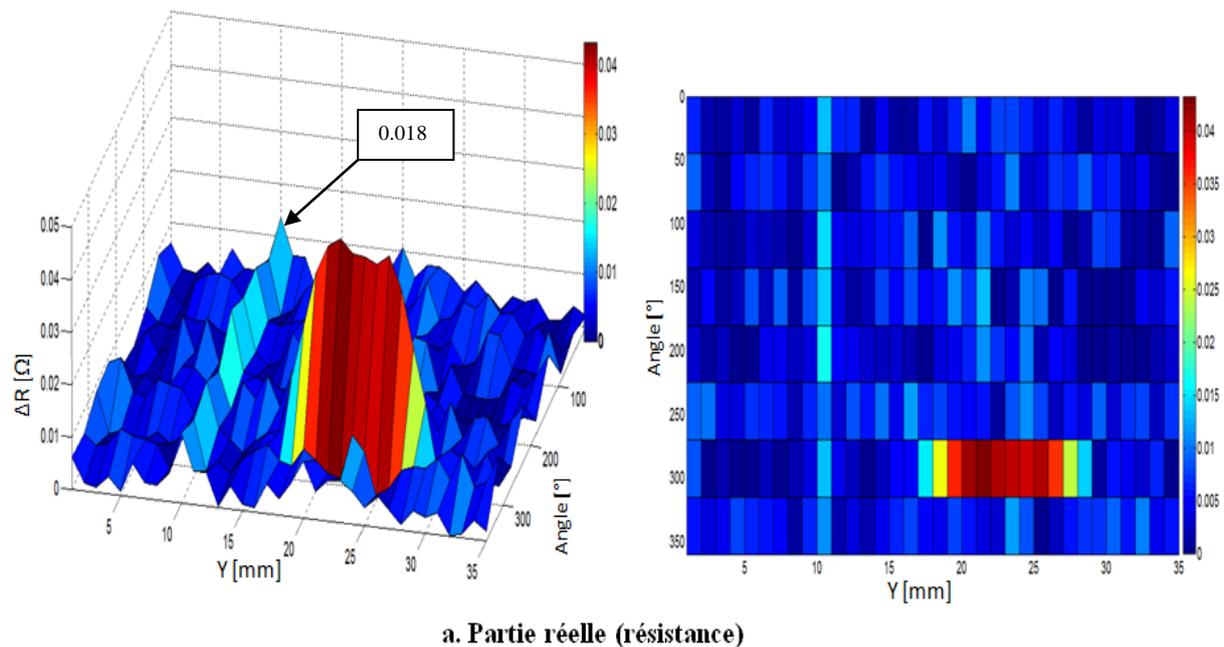
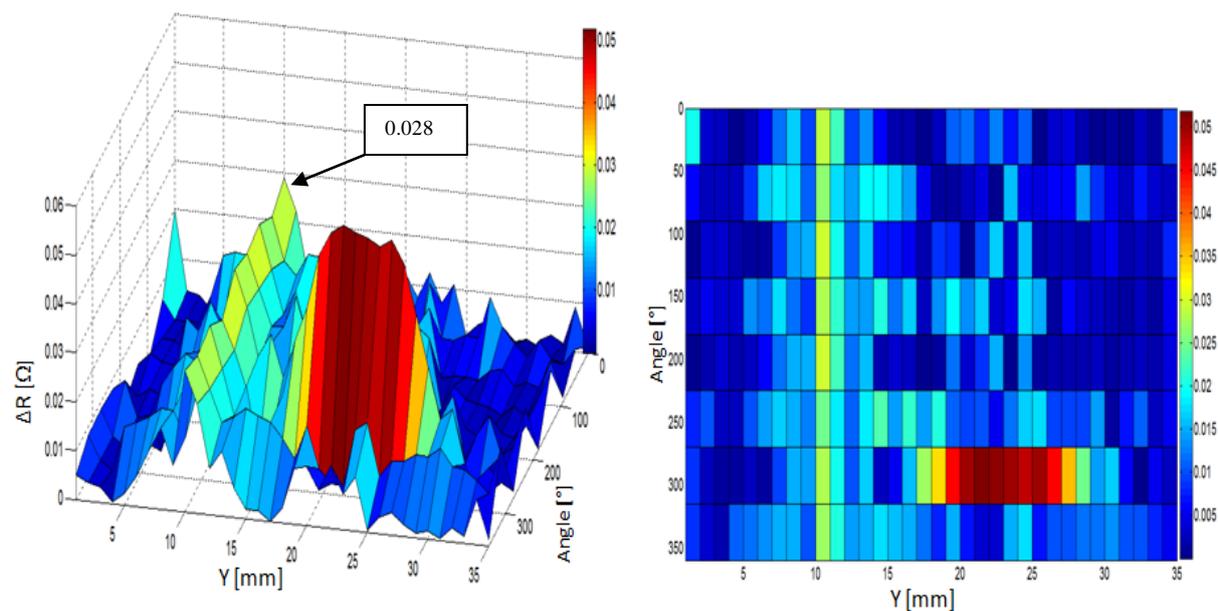


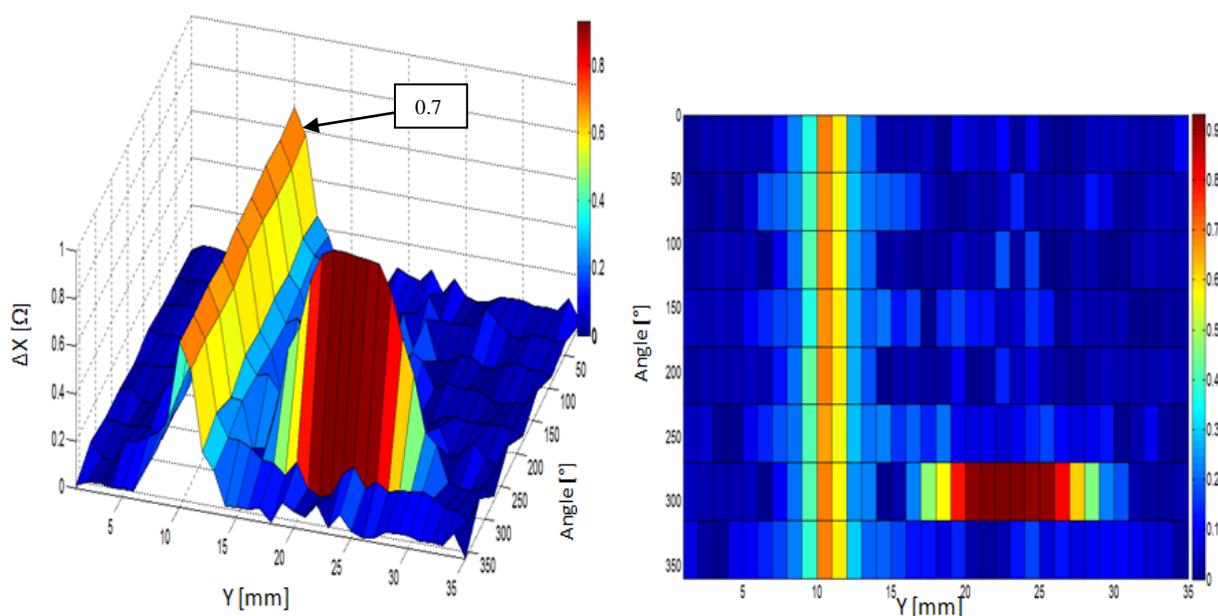
Figure III.6 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=40\text{kHz}$

c. $f= 60\text{khz}$

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à $f=60\text{khz}$.



a. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III.7 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=60\text{khz}$

Le tableau III.2 et le graphe présenté sur la figure III.8 montrent l'évolution de la partie réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence.

Tableau III.2. Evolution de la variation la résistance et la réactance en fonction de la fréquence

Fréquence (KHz)	20	40	60
$\Delta R_{\max} (\Omega)$	0.028	0.041	0.051
$\Delta X_{\max} (\Omega)$	0.24	0.6	0.92
$\Delta R_{\max} / R (\%)$	16	16.4	17
$\Delta X_{\max} / X (\%)$	2.6	3.31	3.5

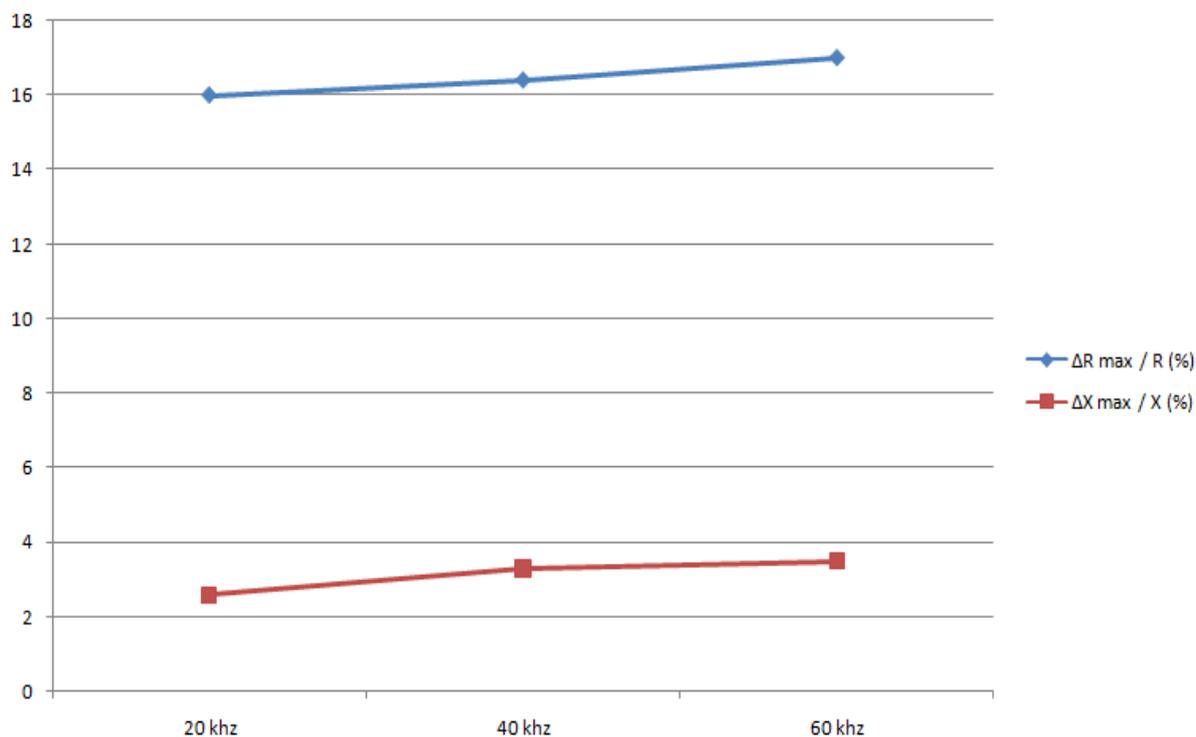


Figure III.8. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la fréquence

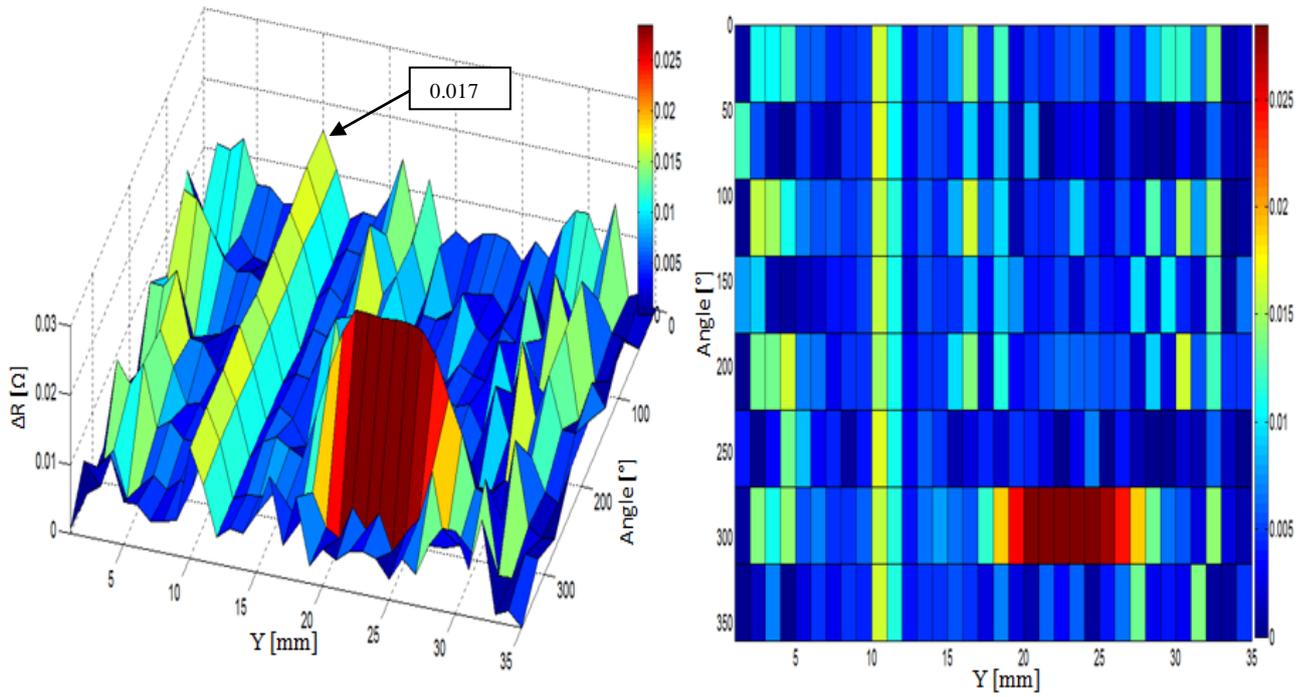
Selon les résultats obtenus sur les figures (III.5, 6, 7 et 8) et le tableau III.2, lorsqu'on applique une fréquence d'alimentation de 20kHz, 40kHz, et 60kHz on remarque une augmentation de la variation relative d'amplitude des deux parties réelles et imaginaires de l'impédance ΔR et ΔX respectivement.

III.3.2 Influence du pas de déplacement du capteur

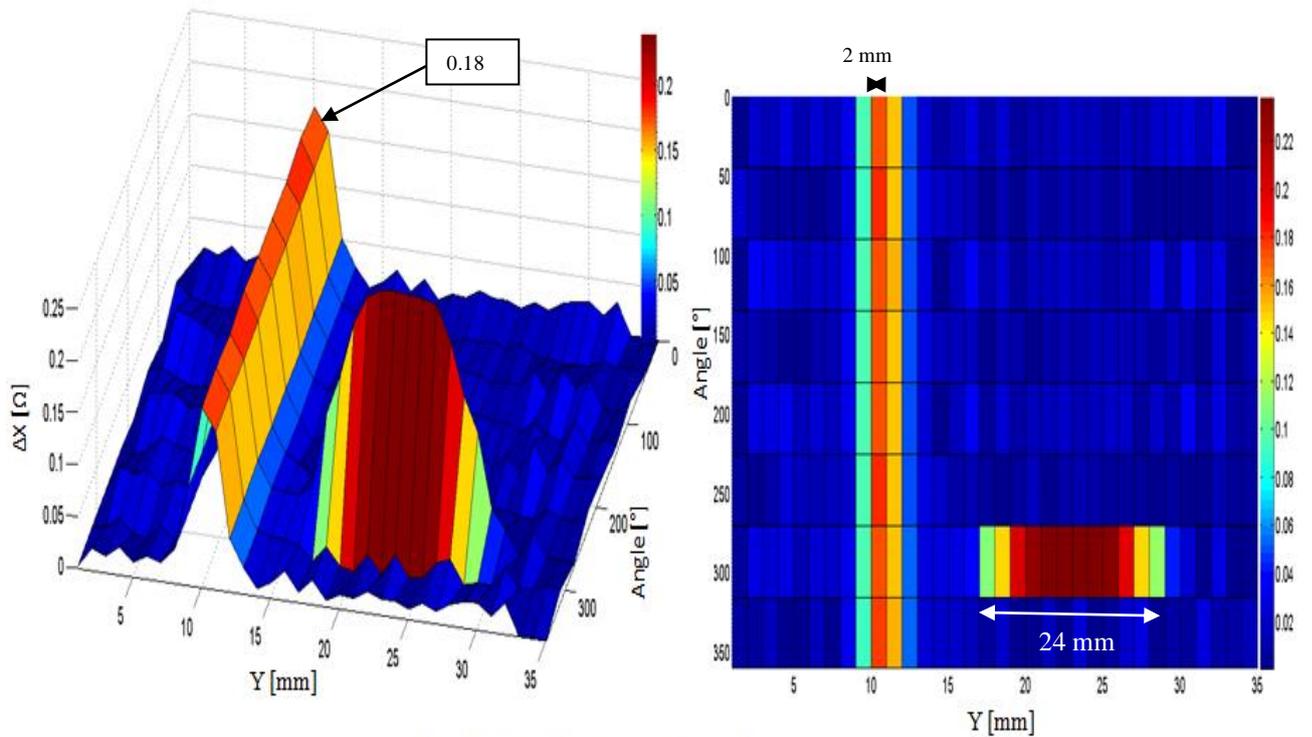
Dans cette partie on fixe la fréquence à 20kHz, et on varie le pas de déplacement P dans la paroi interne du tube à $P=2\text{mm}$, $P=1\text{mm}$ et $P=0.5\text{mm}$.

a. $P=2\text{mm}$

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à $P=2\text{mm}$.



a. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III.9. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $P=2\text{mm}$

b. P= 1mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à P=1 mm.

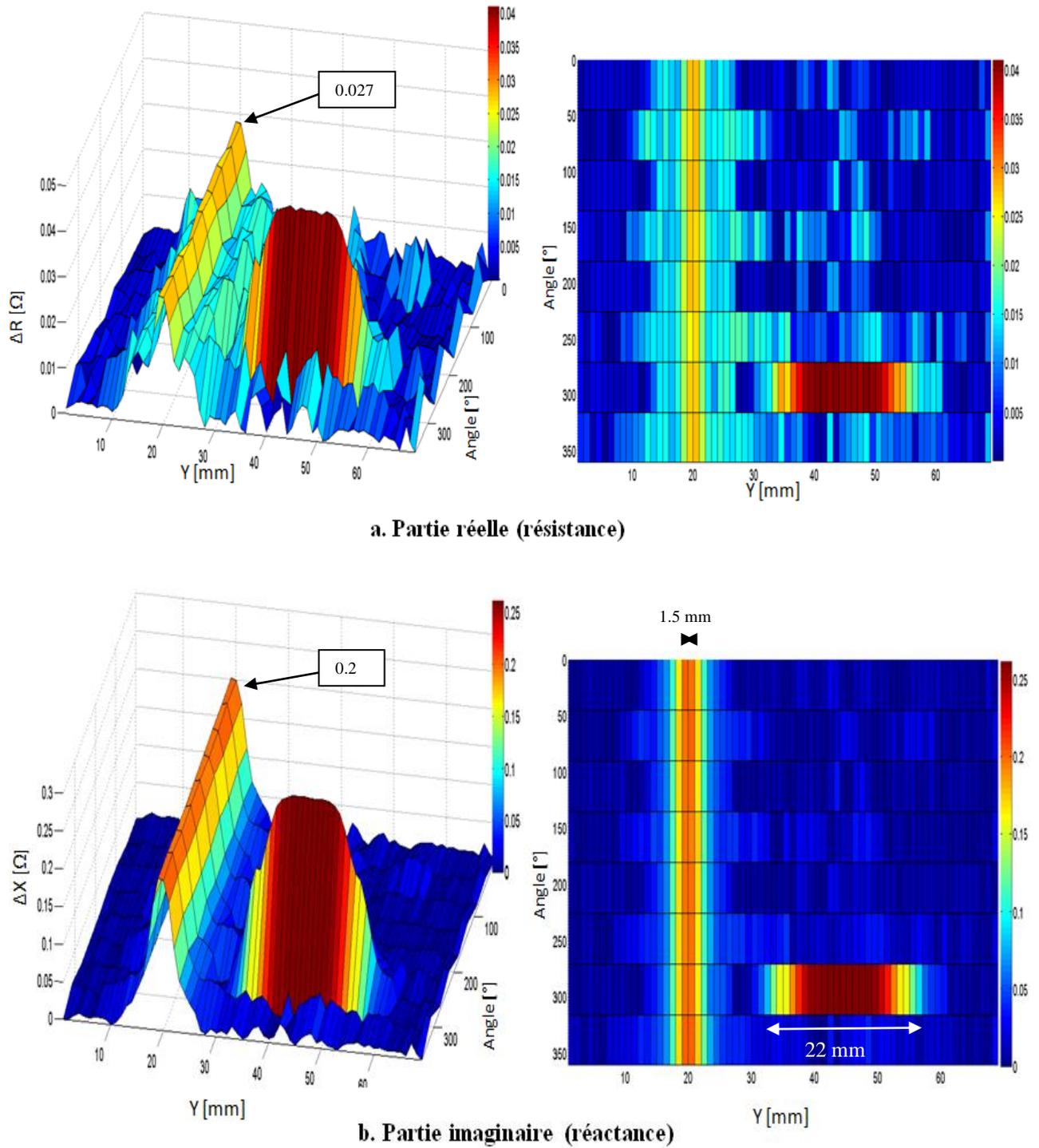


Figure III.10. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à P=1mm

c. P= 0.5mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à P=0.5mm.

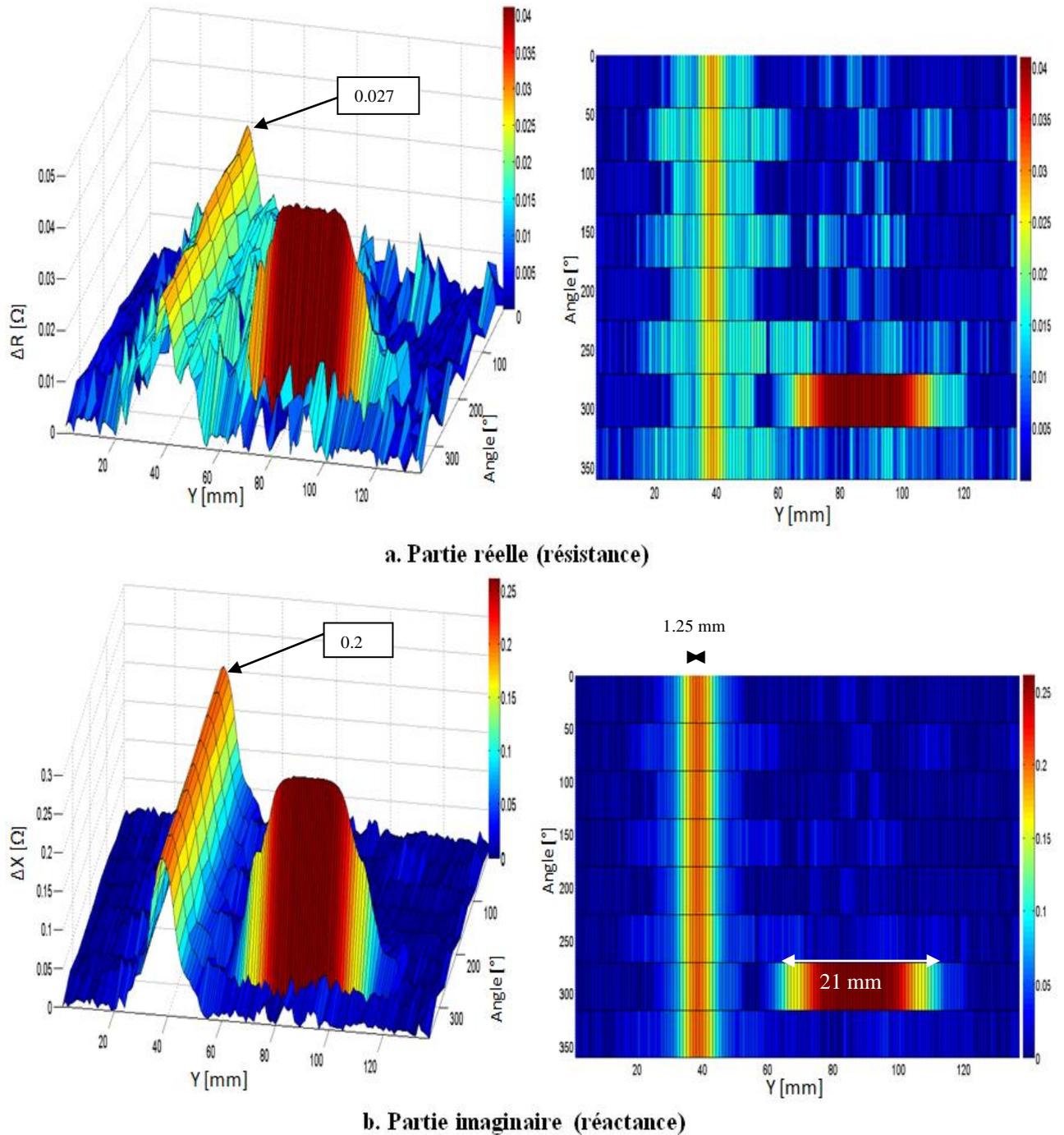


Figure III.11. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à P=0.5mm

Le tableau suivant montre l'évolution des deux parties de l'impédance en fonction du pas déplacement du capteur, et l'erreur entre les dimensions réelles et celles trouvées par l'imagerie (pour les dimensions on prend seulement la longueur Ld du défaut parallépipède et la largeur Wd du défaut circulaire).

Tableau III.3. Evolution de la variation de la résistance, la réactance et l'erreur en fonction du pas de déplacement

Pas (mm)	2	1	0.5
Dimension réelle (mm)	Ld=20	Ld=20	Ld=20
	Wd=1	Wd=1	Wd=1
Dimension issue de l'imagerie (mm)	Ld =24	Ld =22	Ld =21
	Wd =2	Wd =1.5	Wd =1.25
L'erreur (%)	Ld =20	Ld =10	Ld =5
	Wd =100	Wd =50	Wd =25
ΔR_{\max} (Ω)	0.028	0.041	0.041
ΔX_{\max} (Ω)	0.24	0.26	0.26
$\Delta R_{\max} / R$ (%)	16	16.4	16.4
$\Delta X_{\max} / X$ (%)	2.6	2.8	2.8

La figure III.12 suivante montre l'évolution des deux parties de la variation relative l'impédance du capteur et l'erreur des dimensions des défauts.

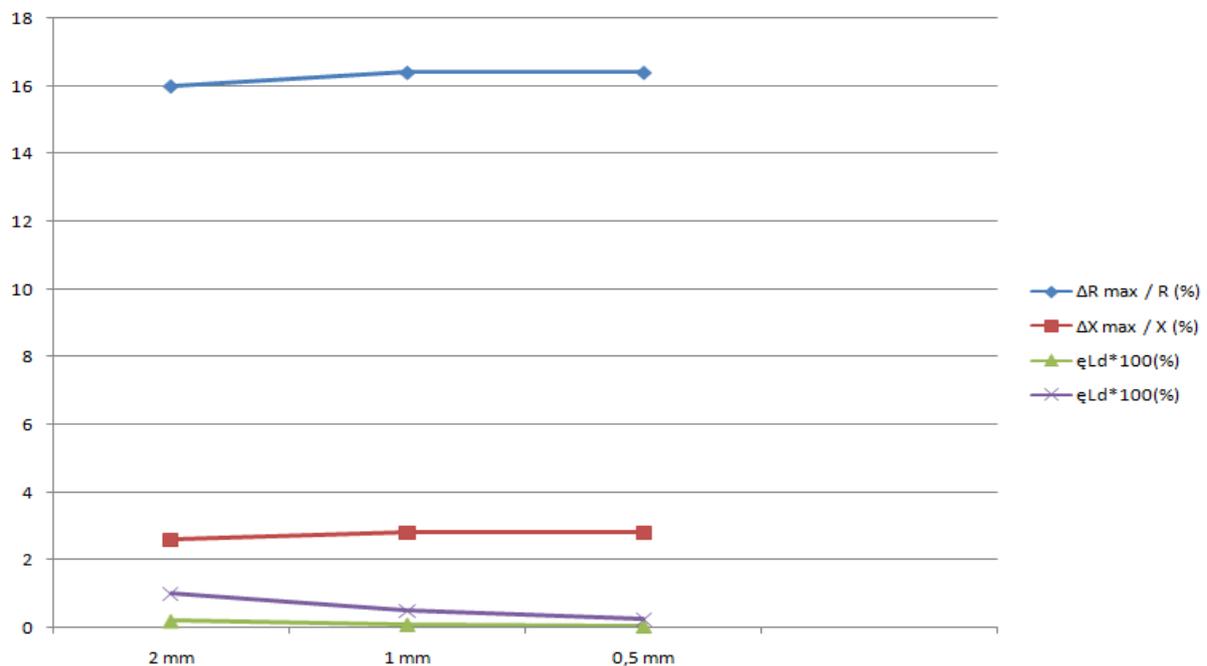


Figure III.12. Evolution de la variation relative de la résistance, la réactance et de l'erreur en fonction du pas de déplacement

À travers les cartographies et les imageries des figures (III.9, 10, et 11), le tableau III.3 et les graphes présentés sur la figure III.12, on remarque clairement qu'en réduisant le pas du déplacement du capteur de P=2mm, P=1mm et P=0.5mm la variation relative des deux parties de l'impédance ΔR et ΔX augmente légèrement quand le pas diminue de P=2mm à P=1mm

puis elle se stabilise, d'autre part l'erreur diminue comme on voit clairement sur les graphes ce qui donne des bonne résolutions.

III.3.3. Influence de la profondeur des défauts

Pour étudier l'effet de la profondeur des défauts sur la qualité des détections, nous fixons la fréquence à 20Khz et on fait varier la profondeur selon les trois cas suivants : Pd=0.5mm, Pd=1mm et Pd=1.5mm

- a. Pd=0.5mm
- b. Variation ΔR et ΔX de l'impédance à Pd=0.5mm.

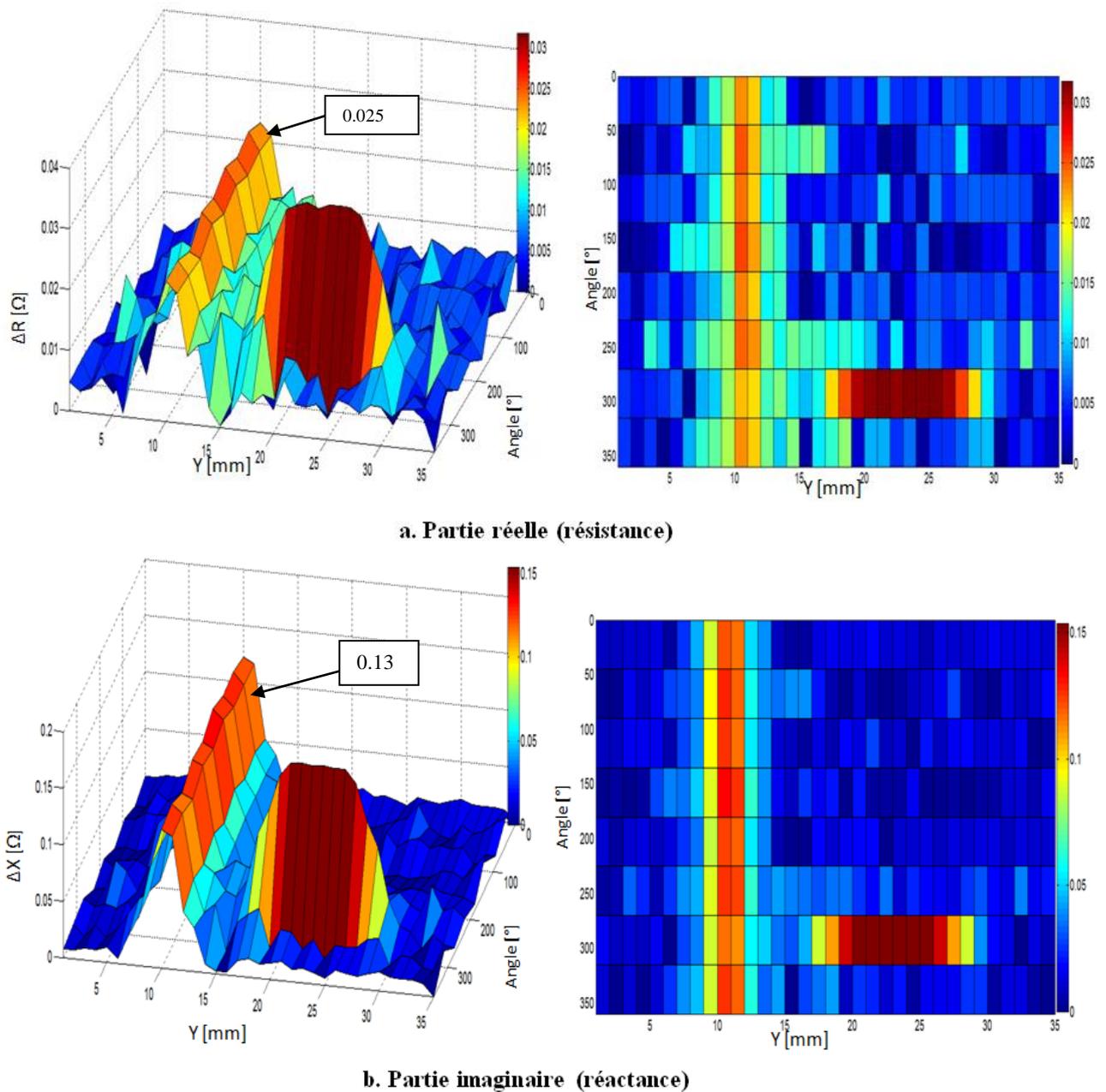
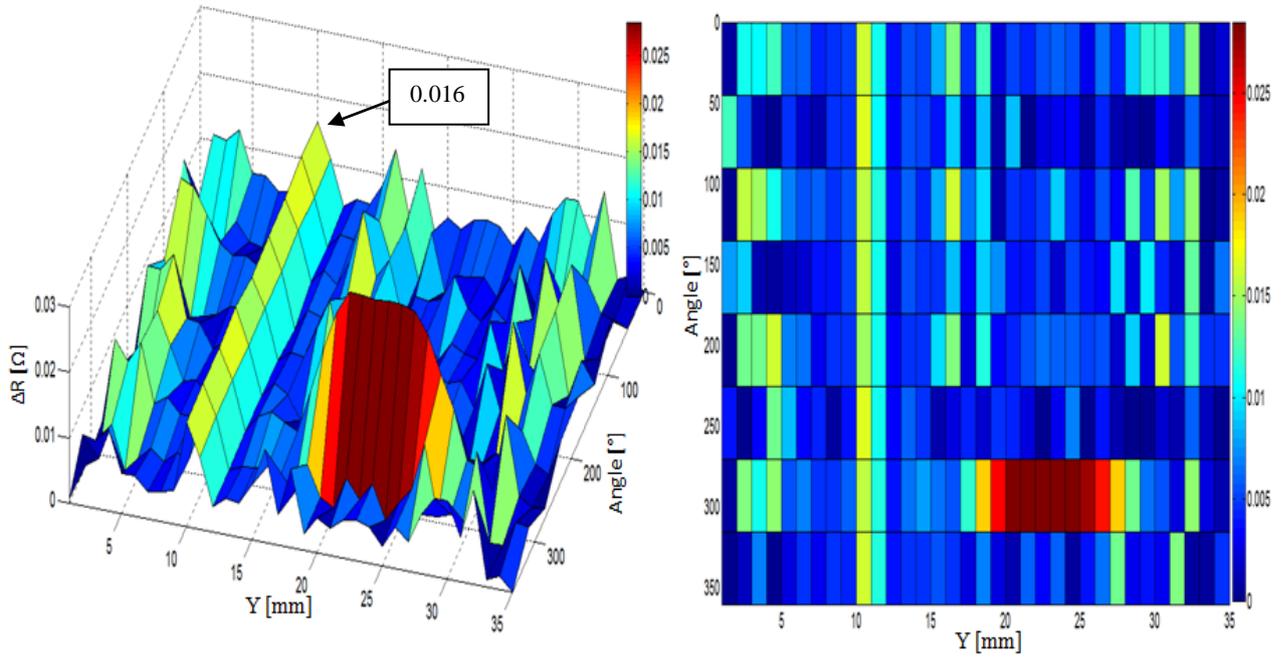


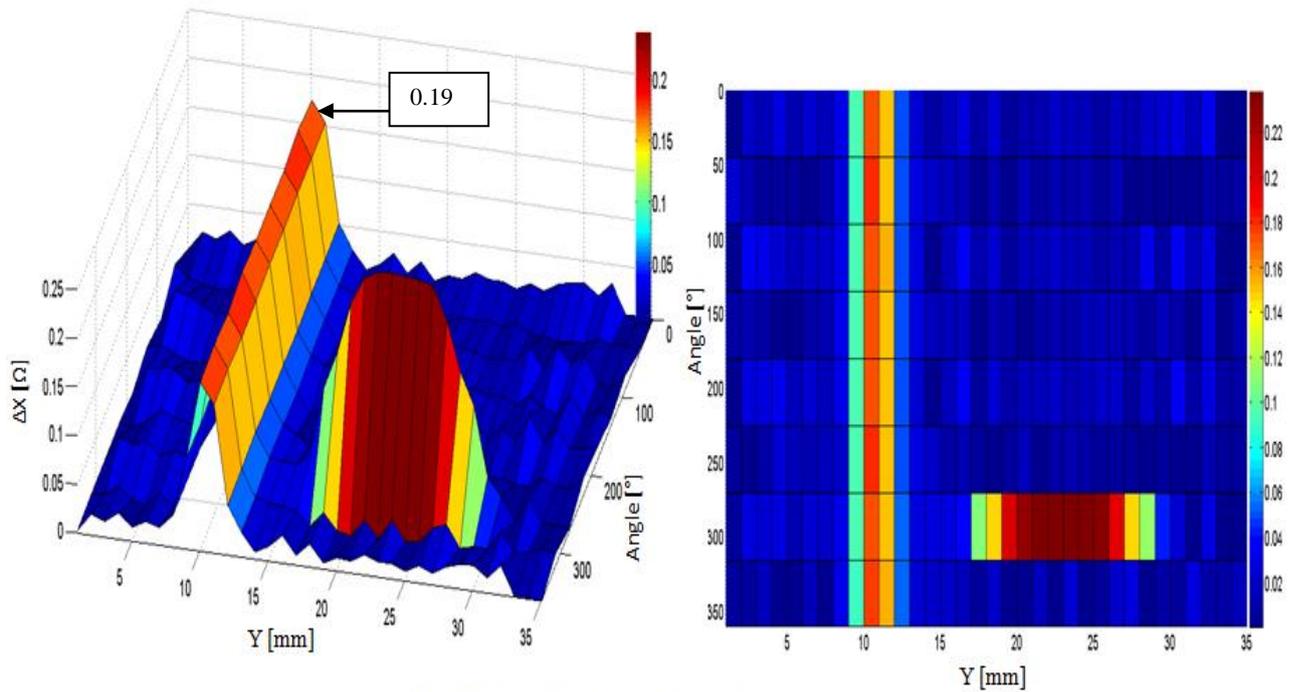
Figure III.13. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à Pd=0.5mm

c. Pd=1mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à Pd=1 mm.



a. Partie réelle (résistance)

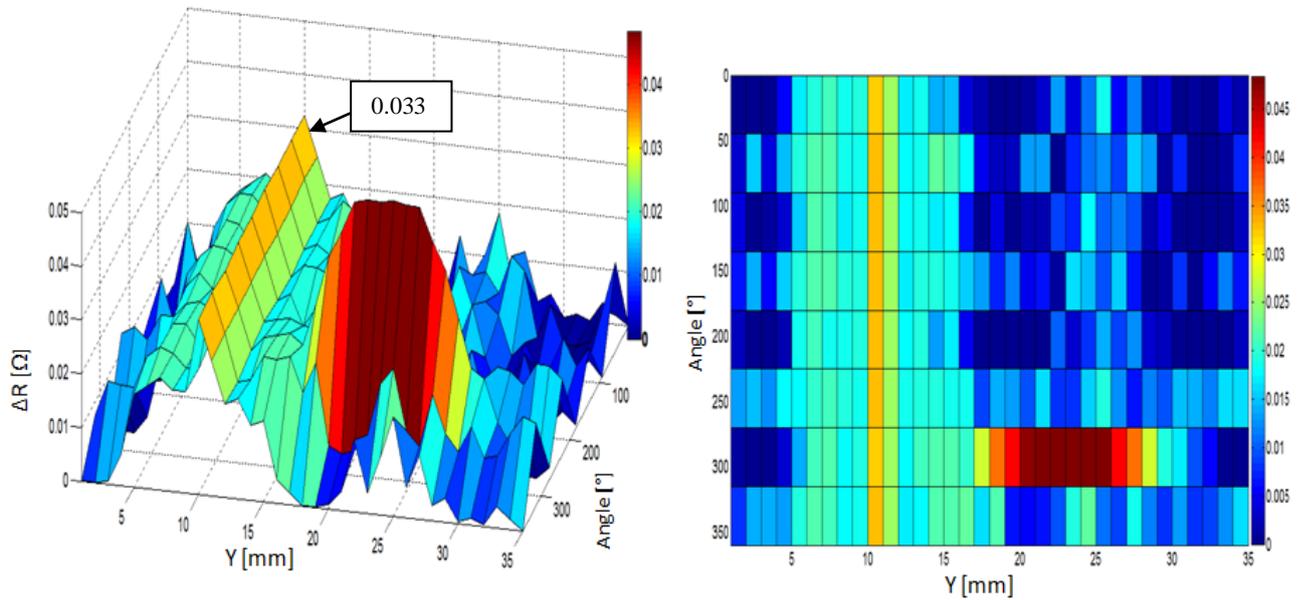


b. Partie imaginaire (réactance)

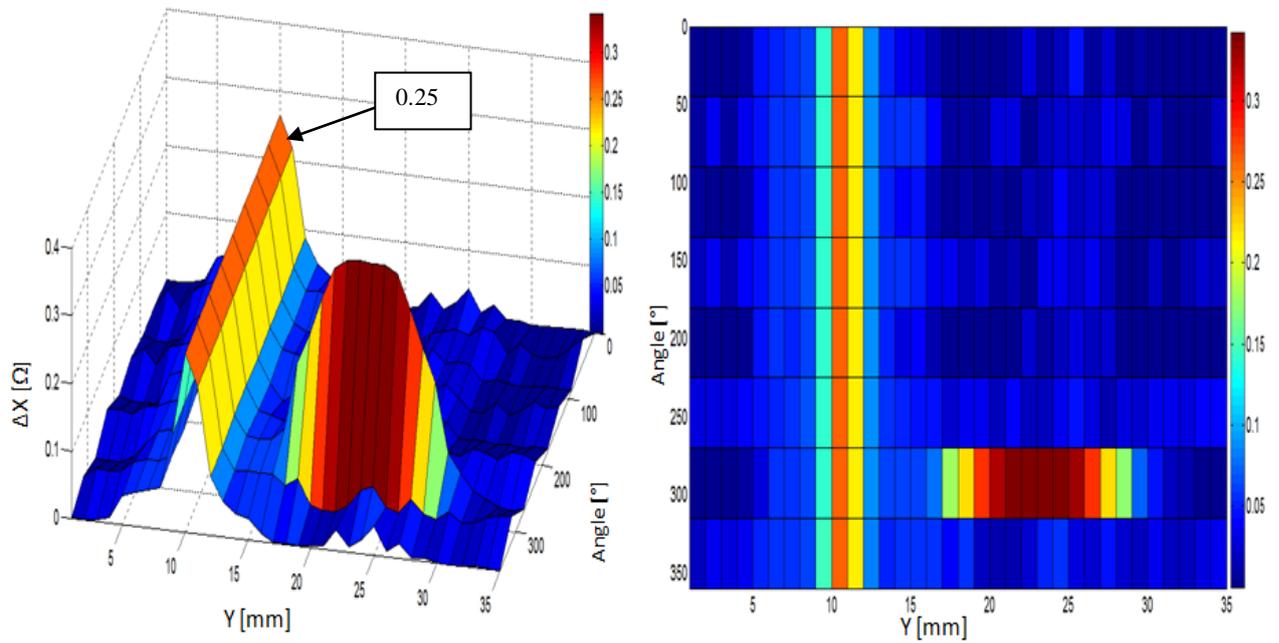
Figure III.14. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à Pd=0.1mm

d. Pd=1.5mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à Pd=1.5mm.



a. Partie réelle (résistance)



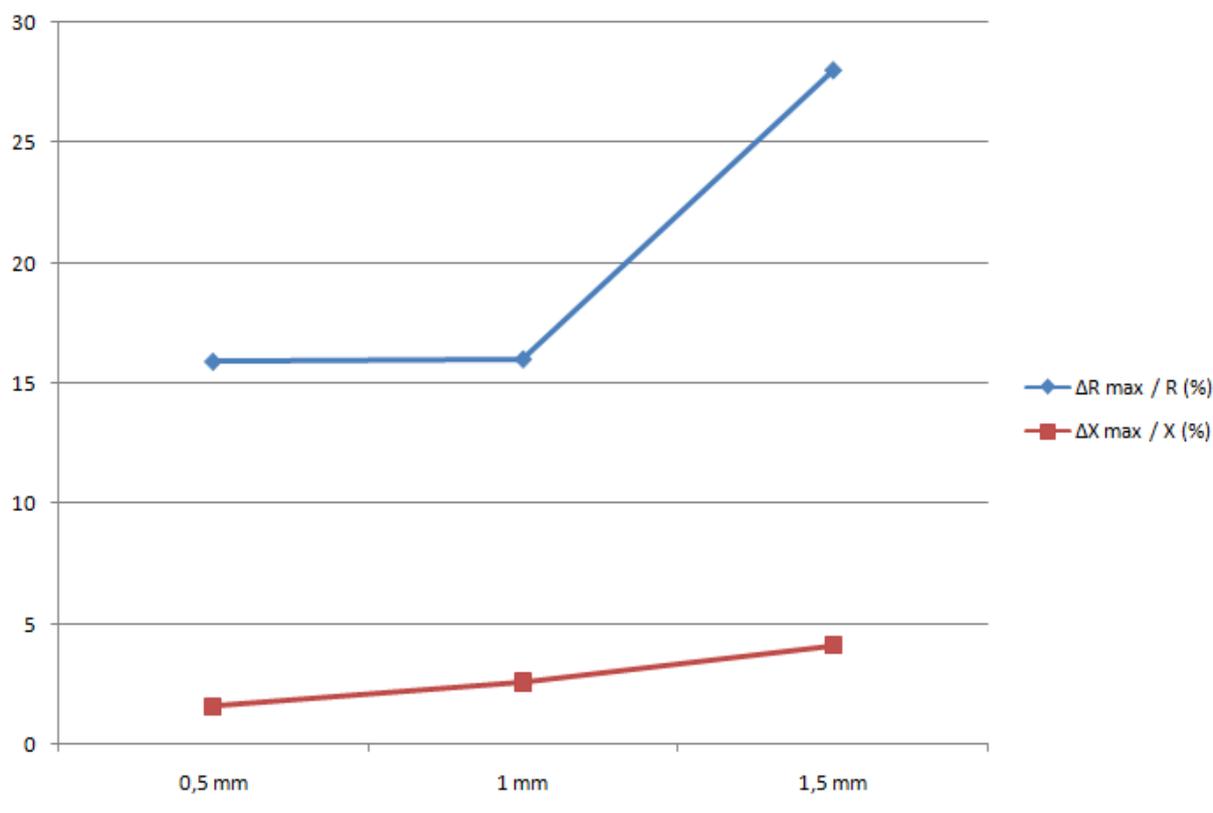
b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III.15. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à Pd=1.5mm

Le tableau III.4 et le graphe présenté sur la figure III.16 montrent l'évolution de la partie réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la profondeur des défauts.

Tableau III.4. Evolution de la variation de la résistance et la réactance en fonction de la profondeur des défauts

Profondeur (mm)	0.5	1	1.5
$\Delta R_{\max} (\Omega)$	0.031	0.028	0.048
$\Delta X_{\max} (\Omega)$	0.15	0.24	0.38
$\Delta R_{\max} / R (\%)$	15.9	16	28
$\Delta X_{\max} / X (\%)$	1.6	2.6	4.1

**Figure III.16. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la profondeur des défauts**

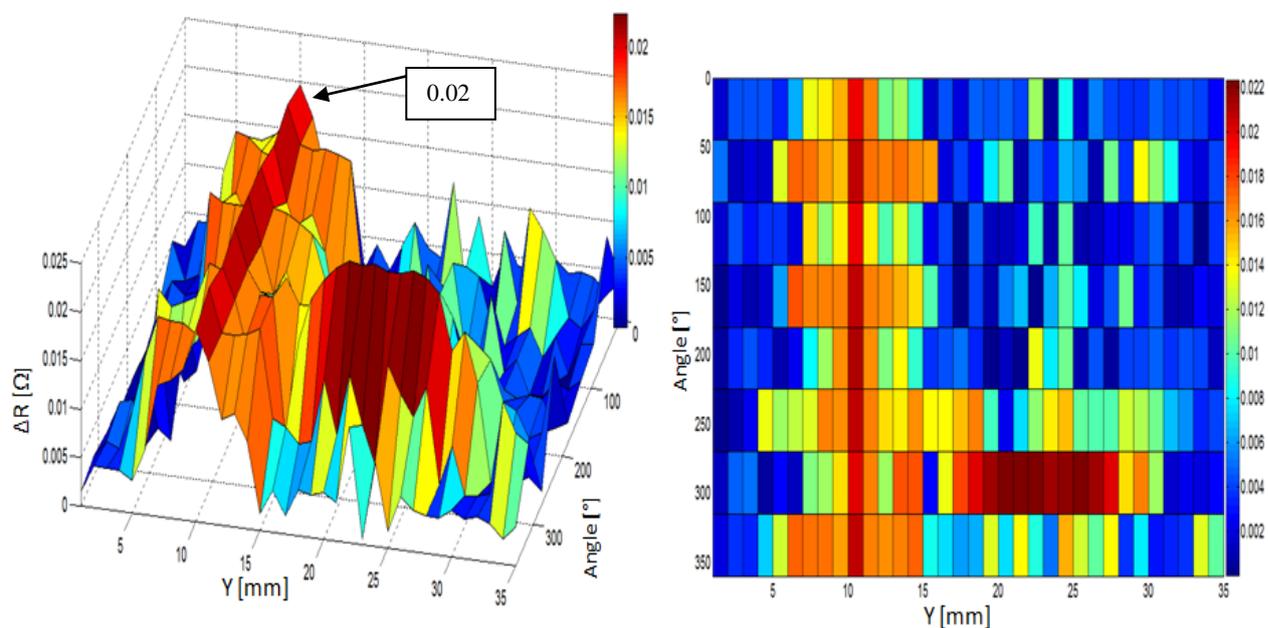
A partir des résultats obtenues sur les figures (III.13, 14 et 15), le tableau III.4 et le la figure III.16, on remarque que lorsqu'on augmente la profondeur des défauts la variation relative de l'amplitude des deux parties de l'impédance ΔR et ΔX du capteur augmente.

III.3.3. Influence de la largeur des défauts

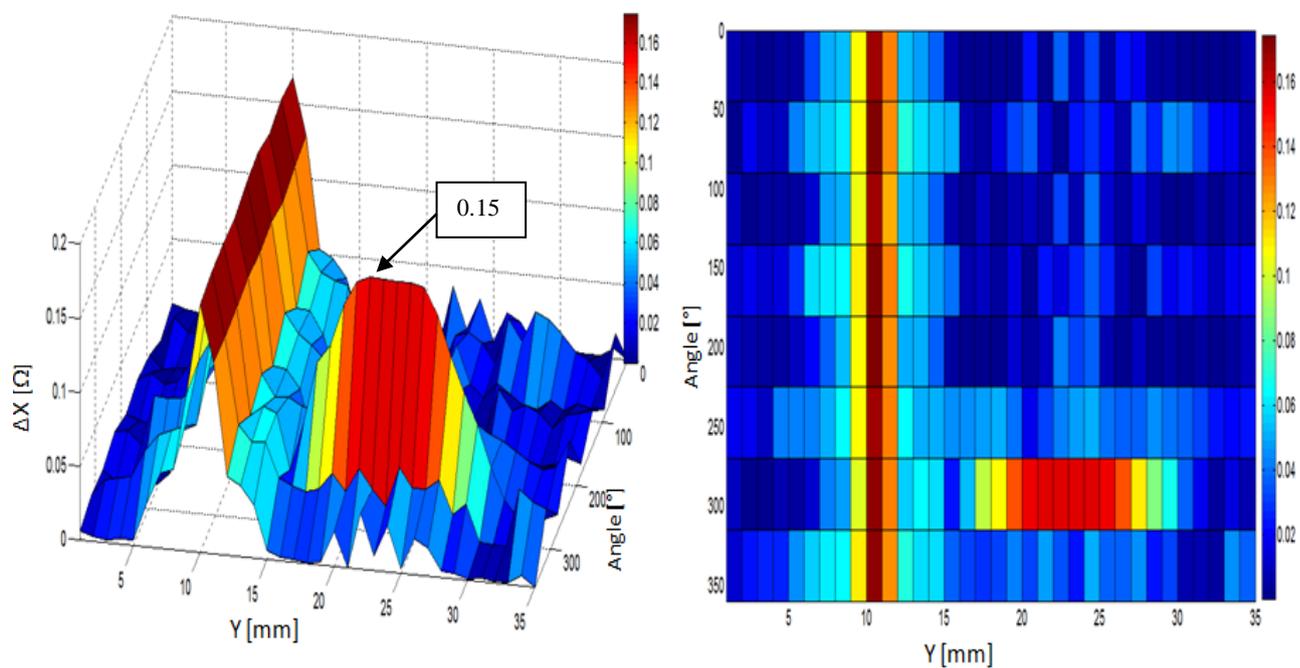
Dans cette partie on va étudier l'effet de varier la largeur des défauts sur la détection de l'impédance du capteur, on prend les trois cas suivant :

a. 1^{er} cas

Les deux défauts ont la même largeur $Wd=0.5\text{mm}$



a. Partie réelle (résistance)

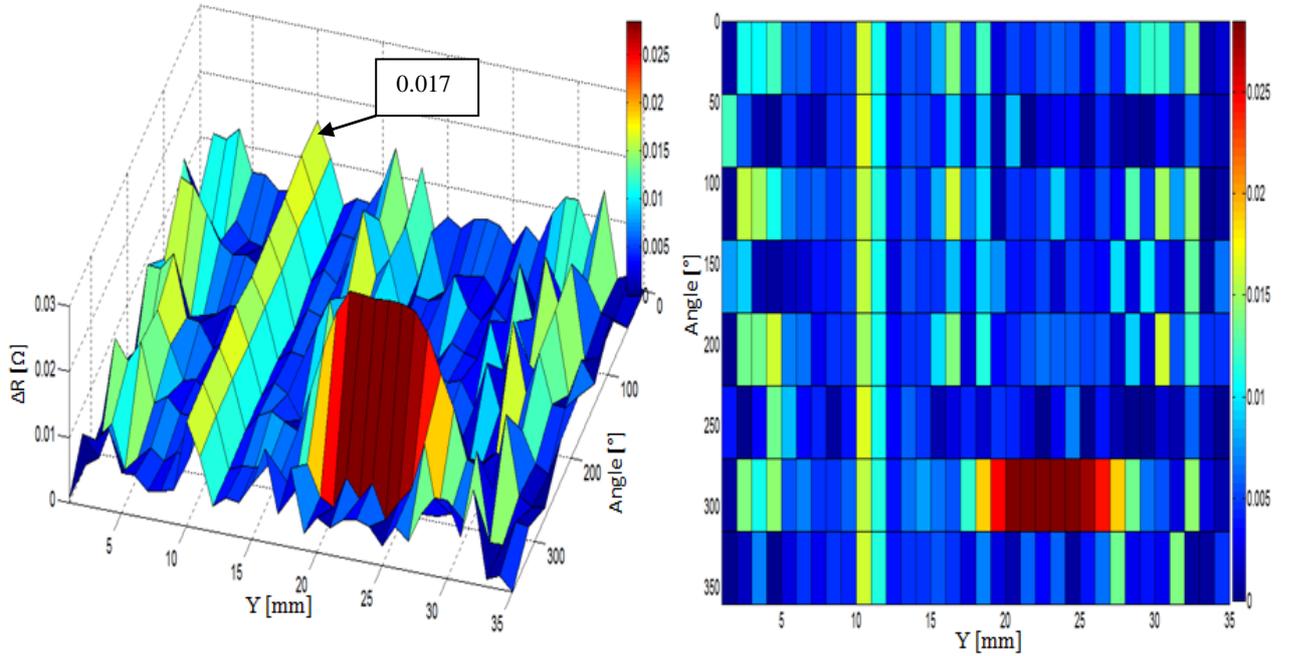


b. Partie imaginaire (réactance)

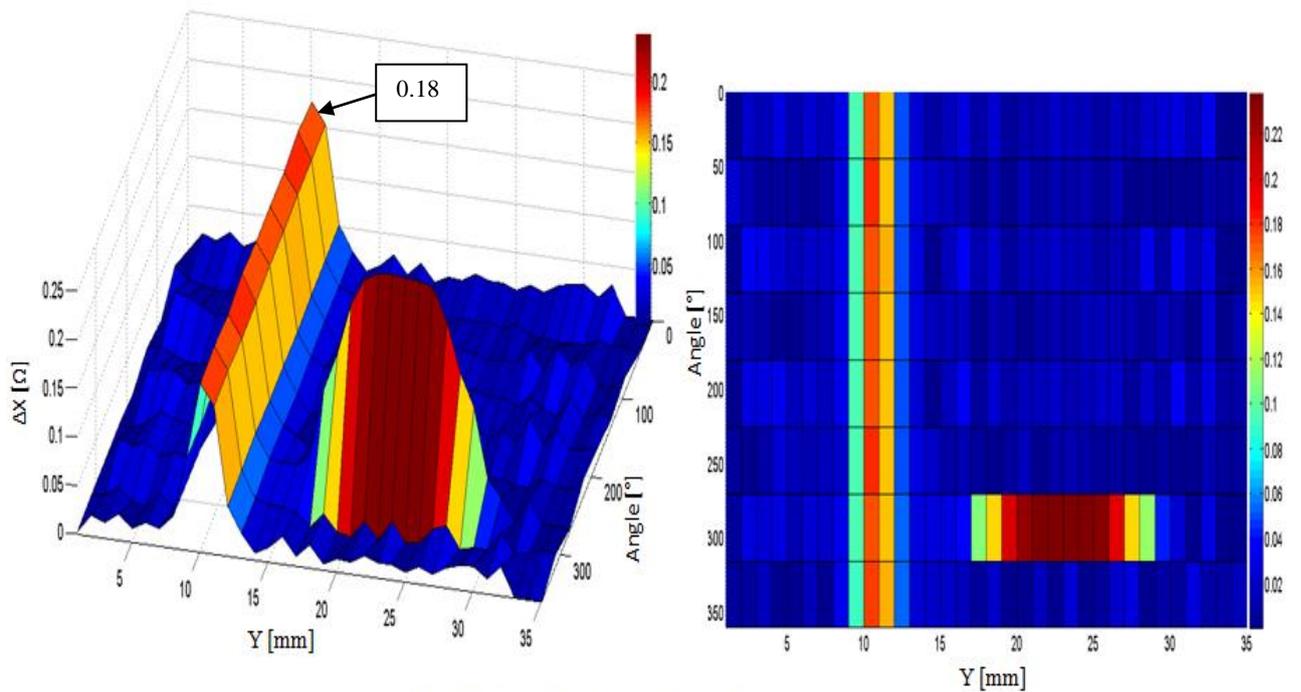
Figure III.17. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $Wd=0.5\text{mm}$

b. 2ème cas

Dans ce cas la largeur du défaut circulaire est $Wd1=1\text{mm}$, la largeur du défaut parallélépipède est $Wd2=2\text{mm}$.



a. Partie réelle (résistance)

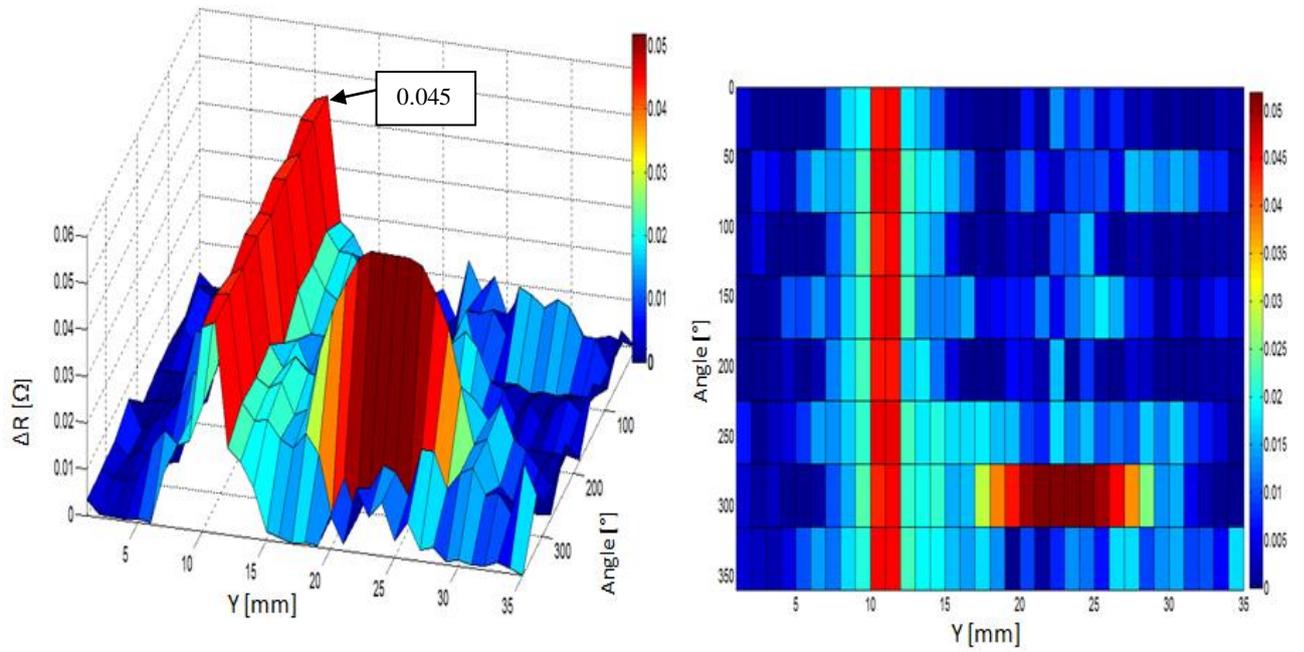


b. Partie imaginaire (réactance)

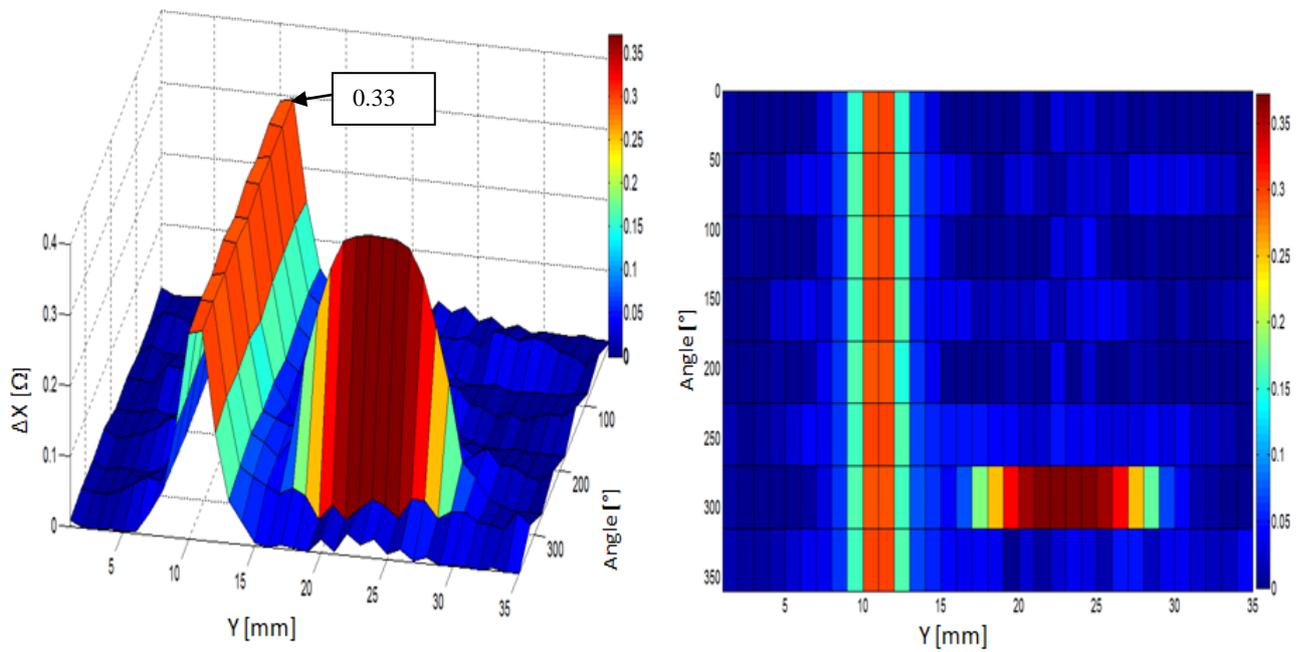
Figure III.18. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $Wd1=1\text{mm}$ et $Wd2=2\text{mm}$

c. 3ème cas

Dans ce cas la largeur du défaut circulaire est $Wd1=2\text{mm}$, la largeur du défaut parallélépipède est $Wd2=4\text{mm}$.



a. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III.19. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $Wd1=2\text{mm}$ et $Wd2=4\text{mm}$

Le tableau III.4 et le graphe présenté sur la figure III.20 montrent l'évolution de la partie réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la largeur des défauts.

Tableau III.5. Evolution de la variation de la résistance et la réactance en fonction de la largeur des défauts

Largeur	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas	3 ^{ème} cas
$\Delta R_{\max} (\Omega)$	0.022	0.028	0.051
$\Delta X_{\max} (\Omega)$	0.17	0.24	0.37
$\Delta R_{\max} / R (\%)$	14.4	16	31.4
$\Delta X_{\max} / X (\%)$	1.8	2.6	4

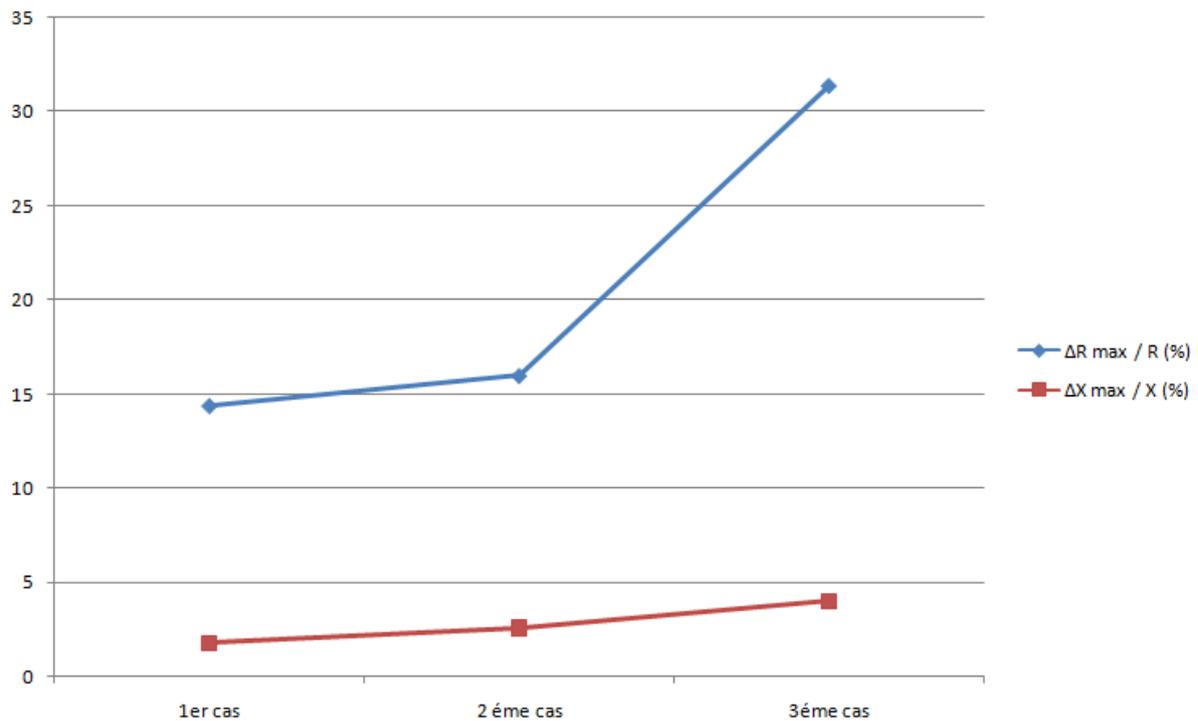


Figure III.20. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la largeur des défauts

Lorsqu'on augmente la largeur des défauts internes du tube, on remarque l'augmentation de la variation relative de l'amplitude des deux parties de l'impédance ΔR et ΔX du capteur, cela est montré sur les figures (III.17, 18, et 19) et le tableau III.5 et la figure III.20. Ce qui signifie que les défauts les plus larges sont les plus détectés avec une bonne précision.

III.4 Etude d'un défaut externe

Dans cette partie on va étudier le cas où le défaut est situé sur la surface externe du tube. Pour cela, un calcul de la fréquence optimale d'inspection à partir de l'équation de (III.1).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (\text{III.1})$$

Où :

f : Fréquence d'alimentation.

μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

σ : Conductivité électrique.

δ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau [m].

L'épaisseur du tube est de 2mm, et après simplification on obtient :

$$f = \frac{1}{\sigma \cdot \pi \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \delta^2}$$

Où: $\mu_r = 4 \cdot \pi$ [H/m].

$\mu_0 = 10^{-7}$ [H/m].

$\sigma = 60 \cdot 10^6$ [S/m]

$\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ [m]

AN: $f \approx 1 \text{ kHz}$

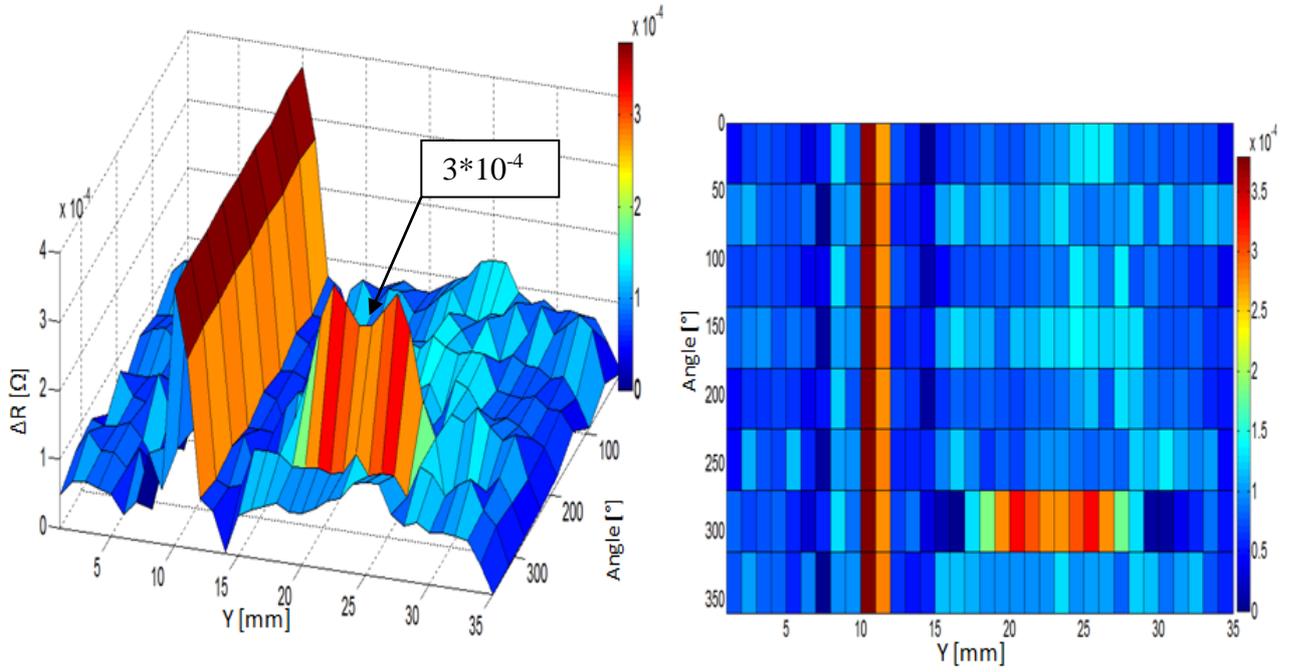
Dans ce qui suit, on fait varier le pas de déplacement P (2,1 et 0.5mm) et cela pour une fréquence de 1kHz.

III.4.1 Influence du pas de déplacement du capteur

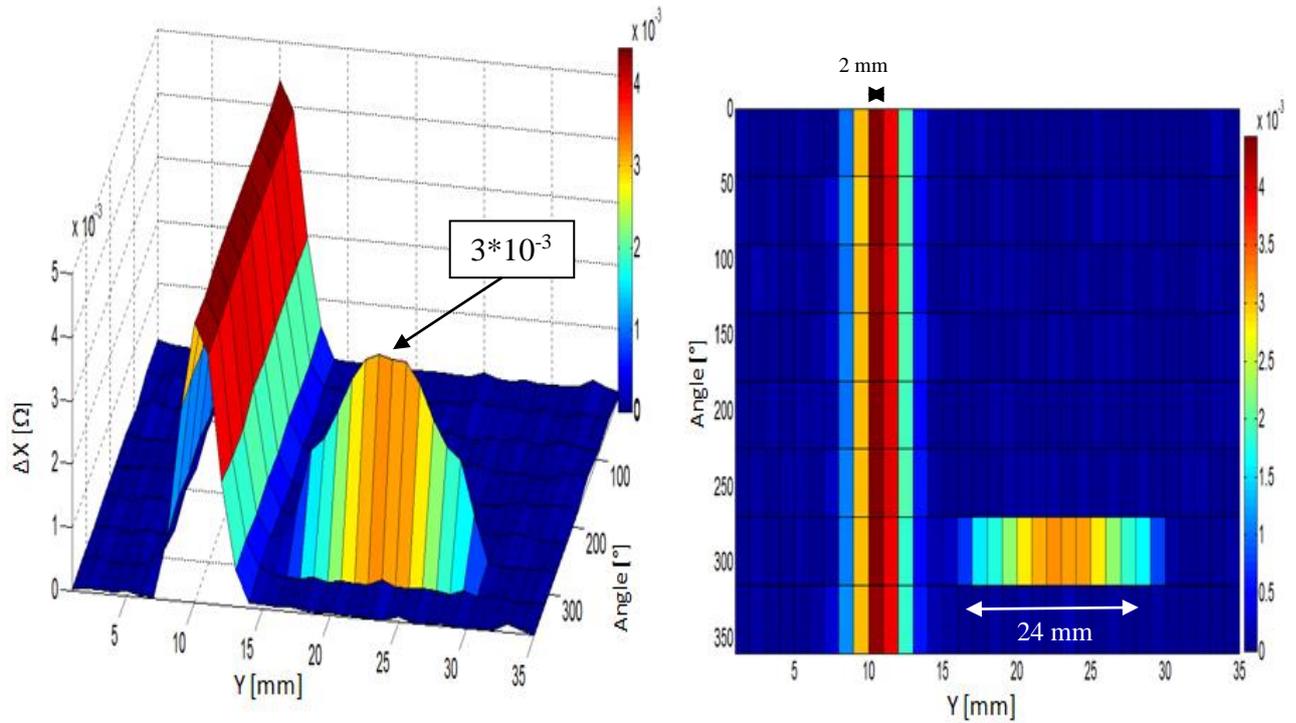
Les figures suivantes montrent les cartographies de la partie réelle (ΔR) et la partie imaginaire (ΔX) le long de la surface externe du tube de l'échangeur de chaleur pour P=2mm, P= 1mm et P=0.5mm.

a. P=2mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à P=2mm.



a. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III.21. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à P=2mm

b. P=1mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à P=1 mm.

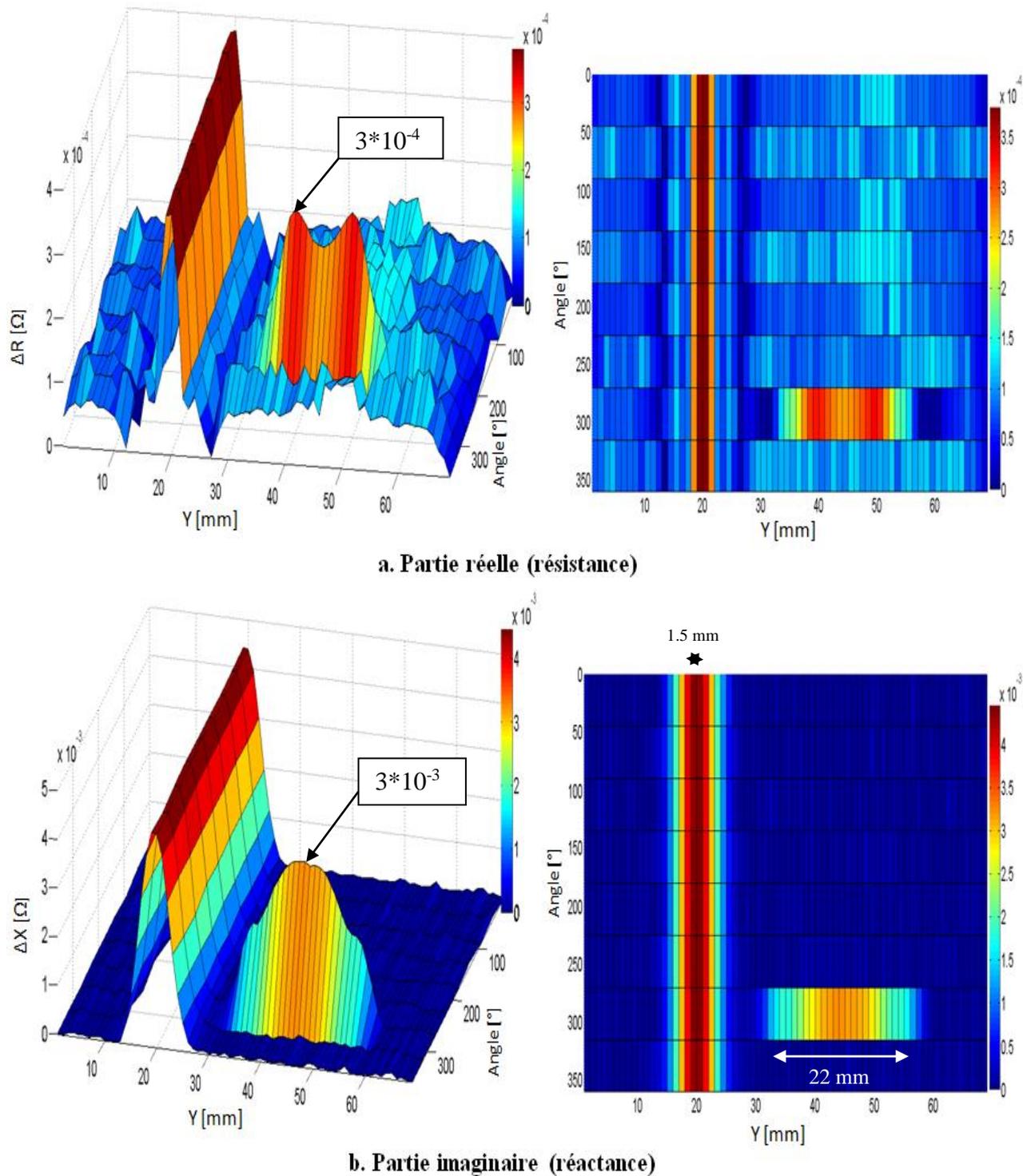


Figure III.22. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à P=1mm

c. P=0.5mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à P=0.5mm.

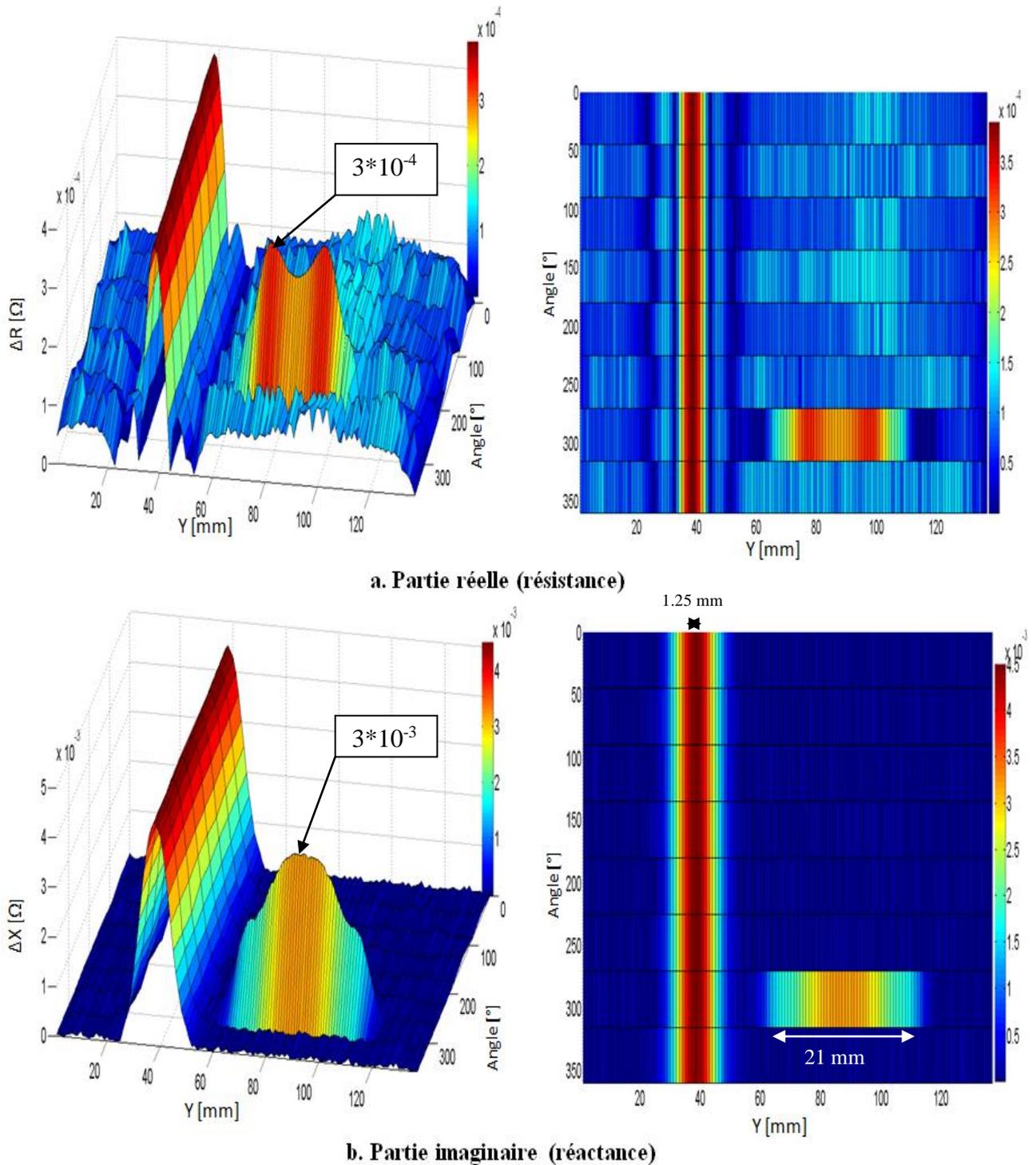


Figure III.23. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à P=0.5mm

Le tableau suivant montre l'évolution des deux parties de la variation de l'impédance (ΔR et ΔX) en fonction du pas déplacement du capteur, et l'erreur entre les dimensions réelles et celles trouvées par l'imagerie (pour les dimensions on prend seulement la longueur Ld du défaut parallépipède et la largeur Wd du défaut circulaire).

Tableau III.6. Evolution de la variation de la résistance, la réactance et l'erreur en fonction du pas de déplacement

Pas (mm)	2	1	0.5
Dimension réelle (mm)	Ld=20	Ld=20	Ld=20
	Wd=1	Wd=1	Wd=1
Dimension issue de l'imagerie (mm)	Ld =24	Ld =22	Ld =21
	Wd =2	Wd =1.5	Wd =1.25
L'erreur (%)	Ld =20	Ld =10	Ld =5
	Wd =100	Wd =50	Wd =25
ΔR_{\max} (Ω)	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$
ΔX_{\max} (Ω)	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$
$\Delta R_{\max} / R$ (%)	3.8	3.8	3.8
$\Delta X_{\max} / X$ (%)	0.9	0.9	0.9

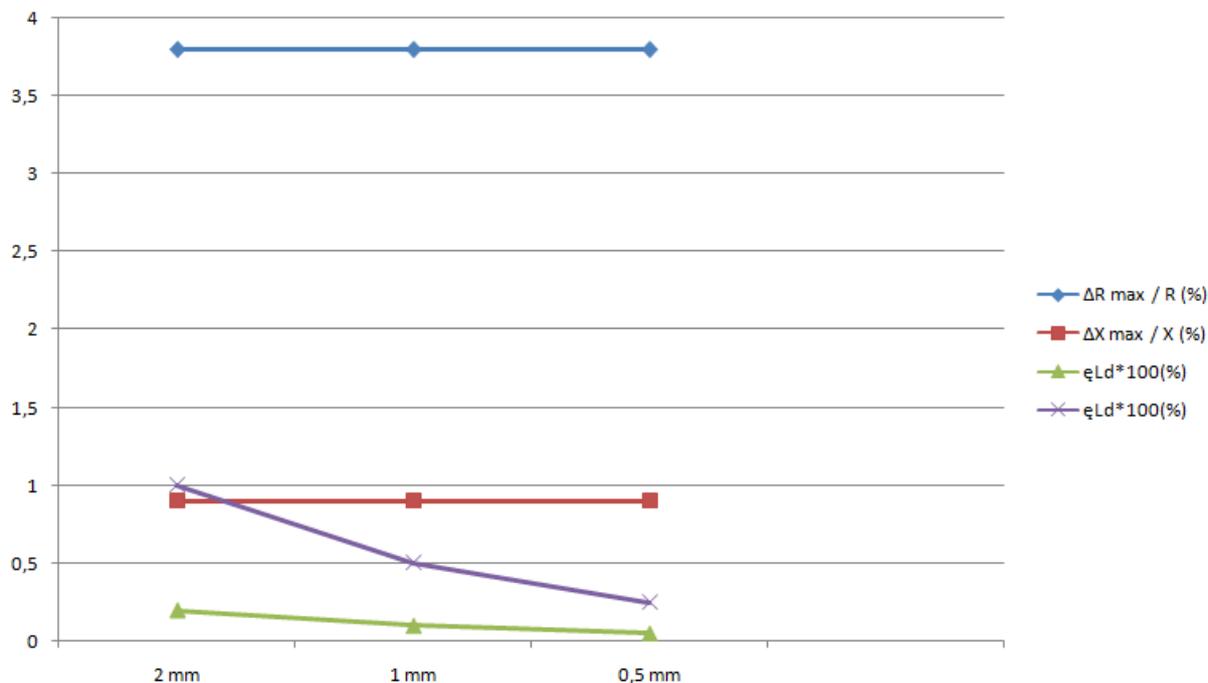


Figure III.24. Evolution de la variation relative de la résistance, la réactance et l'erreur en fonction du pas de déplacement

À travers les cartographies et les imageries des figures (III.21, 22, et 23), le tableau III.6 et la figure III.24, on remarque clairement qu'on réduisant le pas du déplacement du capteur de P=2mm, P=1mm et P=0.5mm la variation des deux partie de l'impédance (ΔR et ΔX) reste stable, par ailleurs l'erreur entre les dimensions réelles et celles de l'imagerie diminue, ce qui veut dire que la résolution des images s'améliore.

III.4.2. Influence de la profondeur des défauts

Comme dans le cas des défauts internes, on fait varier la profondeur des défauts Pd (0.5, 1 et 1.5mm) et les résultats sont présentés sur les figures suivantes :

a. Pd= 0.5mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à Pd=0.5mm.

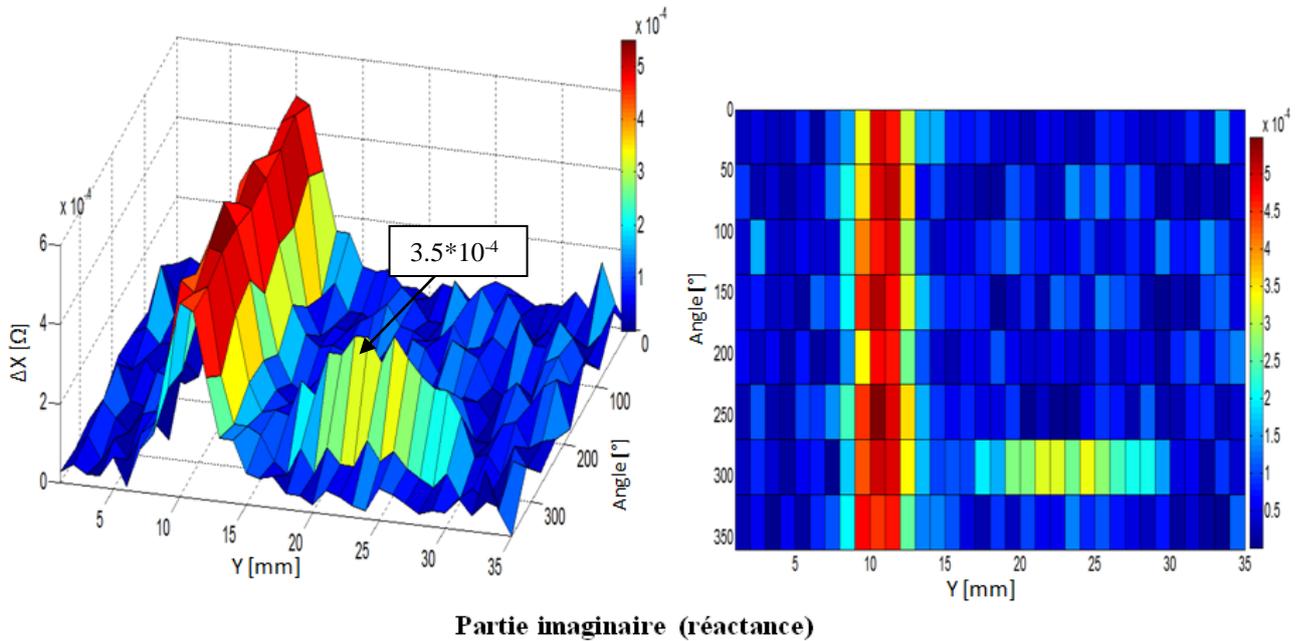


Figure III.25. Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur à Pd=0.5mm

b. Pd=1mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à Pd=1 mm.

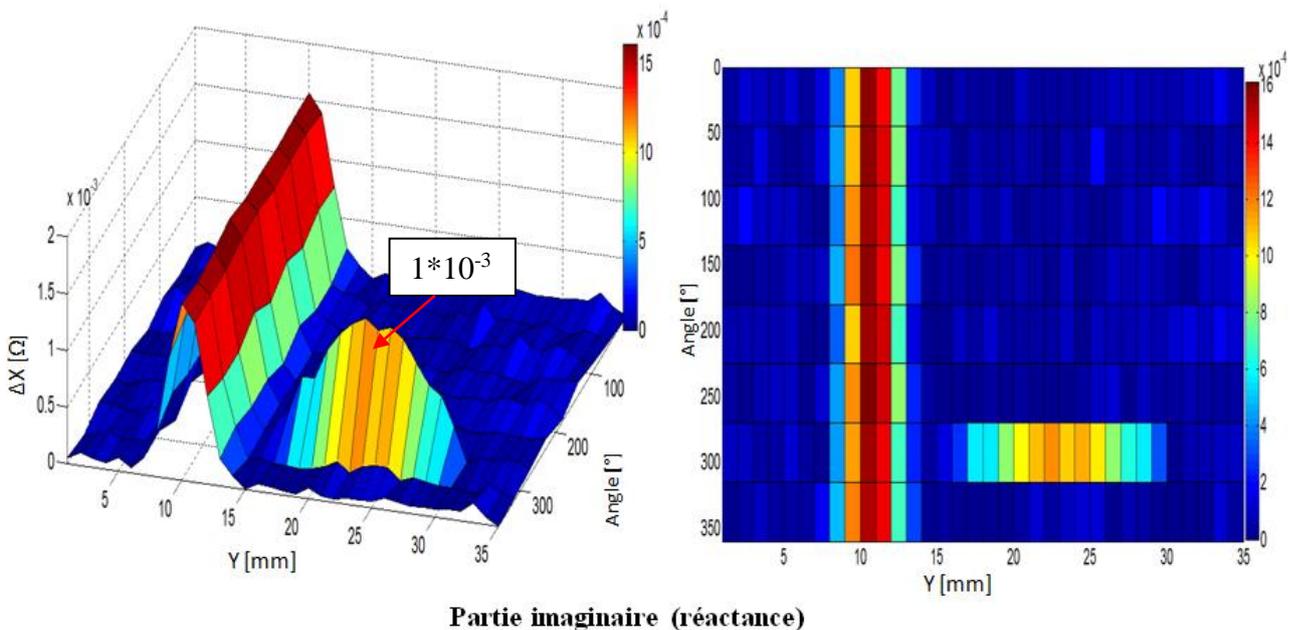


Figure III.26. Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur à Pd=1mm

c. Pd=1.5mm

Variation ΔR et ΔX de l'impédance à Pd=1.5mm.

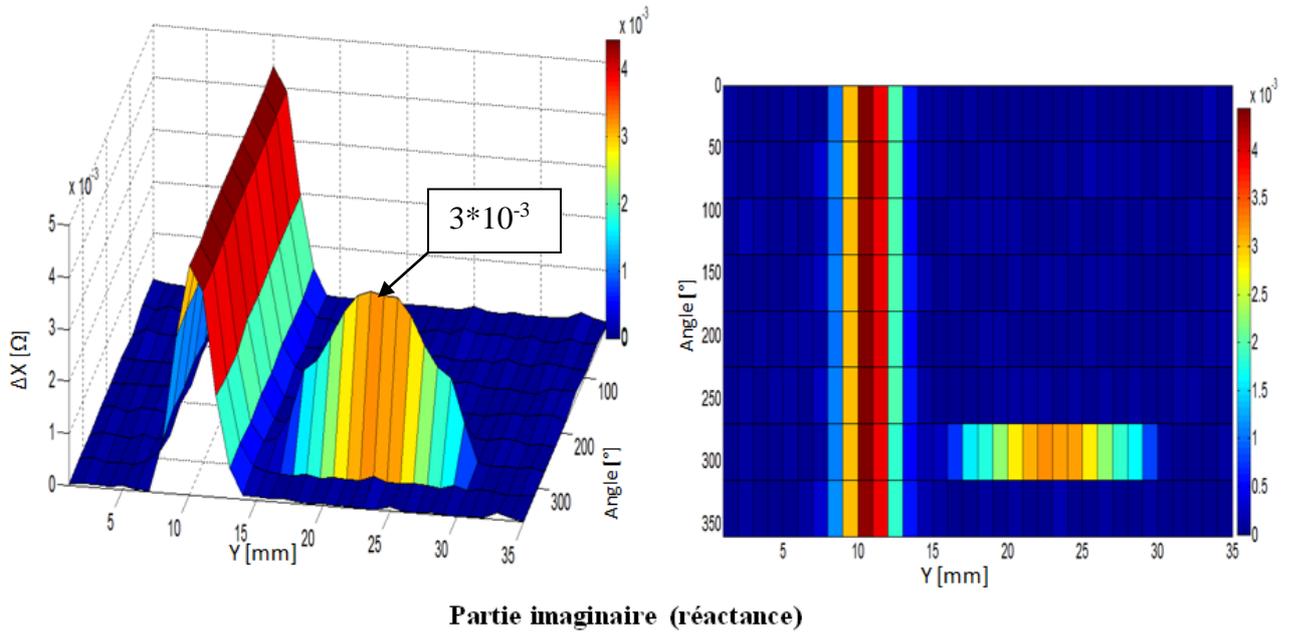


Figure III.27. Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur à Pd=1.5mm

Le tableau III.7 et la figure III.28 montrent l'évolution de la partie réelle et imaginaire de la variation l'impédance (ΔR et ΔX) en fonction de la profondeur des défauts.

Tableau III.7. Evolution de la variation de la réactance en fonction de la profondeur des défauts

Profondeur (mm)	0.5	1	1.5
$\Delta X_{\max} (\Omega)$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$
$\Delta X_{\max} / X (\%)$	0.11	0.32	0.9

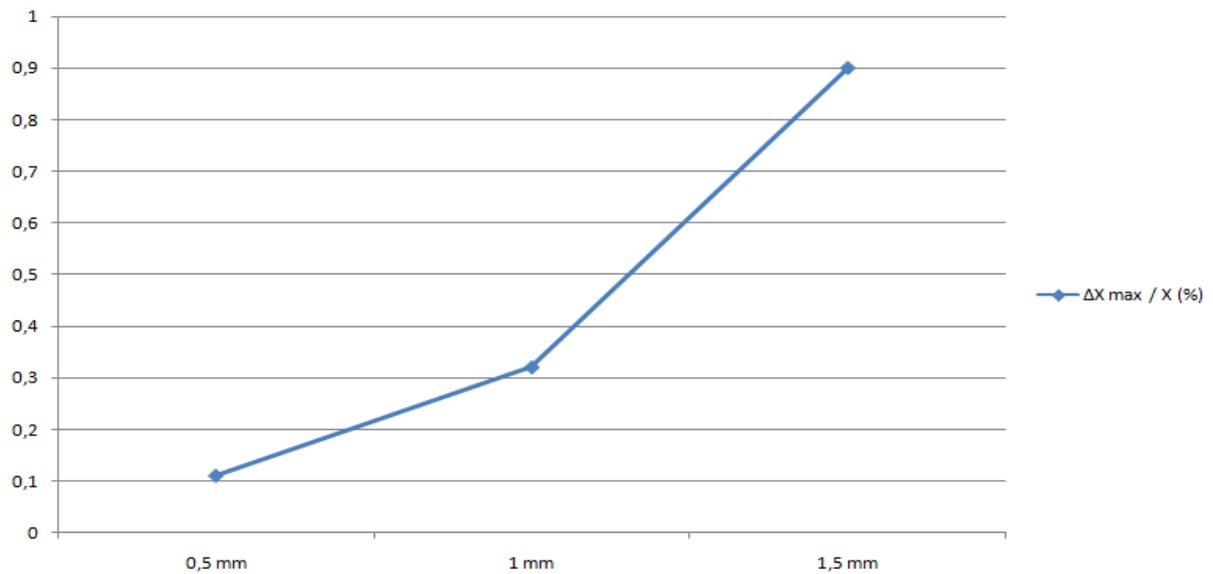


Figure III.28. Evolution de la variation relative de la réactance en fonction de la profondeur des défauts

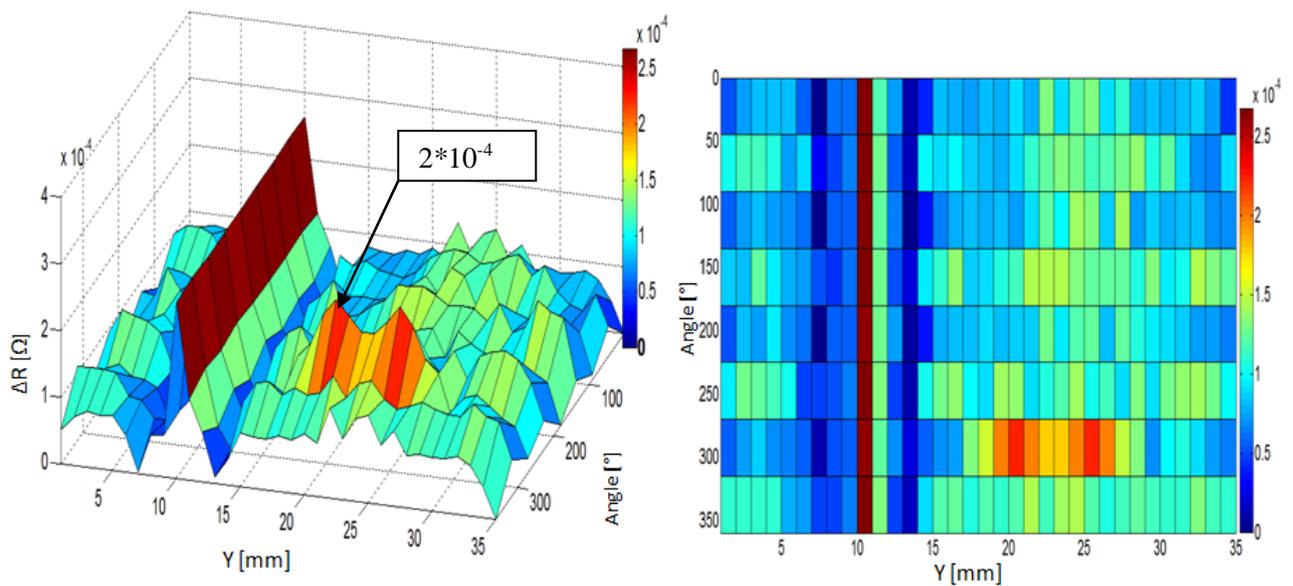
Selon les figures précédentes on remarque aussi qu'on augmentant les profondeurs des défauts externes, la valeur de la variation de amplitude de la réactance augmente (ΔX), ce qui veut dire que la profondeur des défauts est proportionnelle à la partie réactance de la variation de l'impédance.

III.4.2. Influence de la largeur des défauts

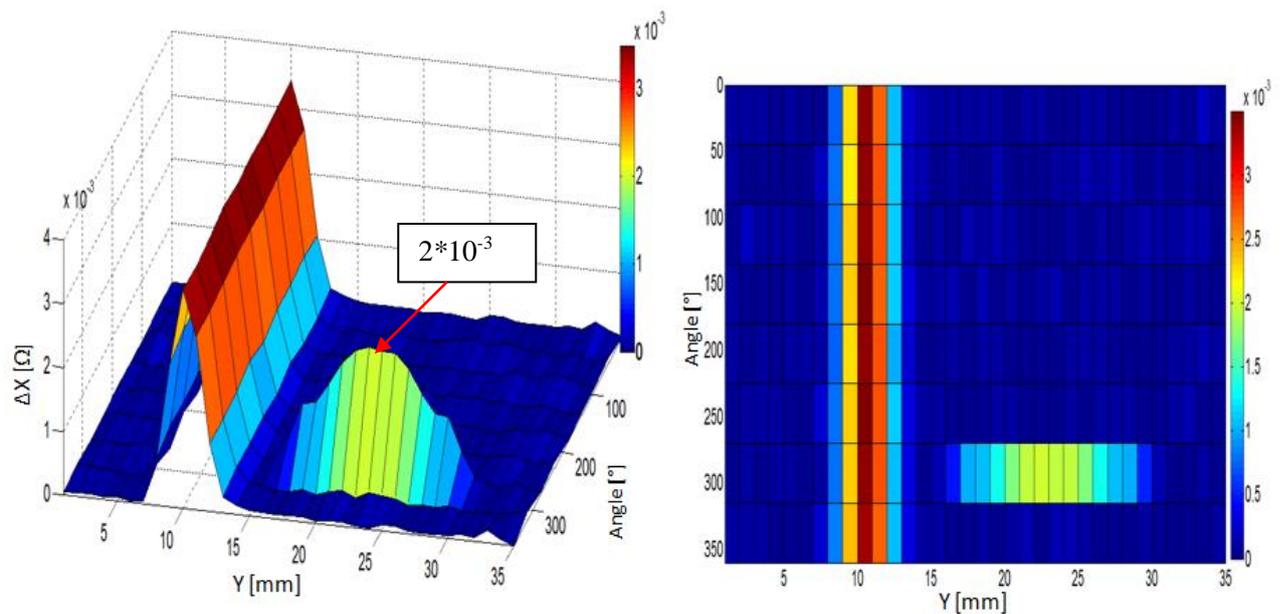
Dans cette partie on va étudier l'effet de varier la largeur sur la détection de l'impédance du capteur, on prend les trois cas suivant :

a. 1^{er} cas

Les deux défauts ont la même largeur $W_d=0.5\text{mm}$



a. Partie réelle (résistance)

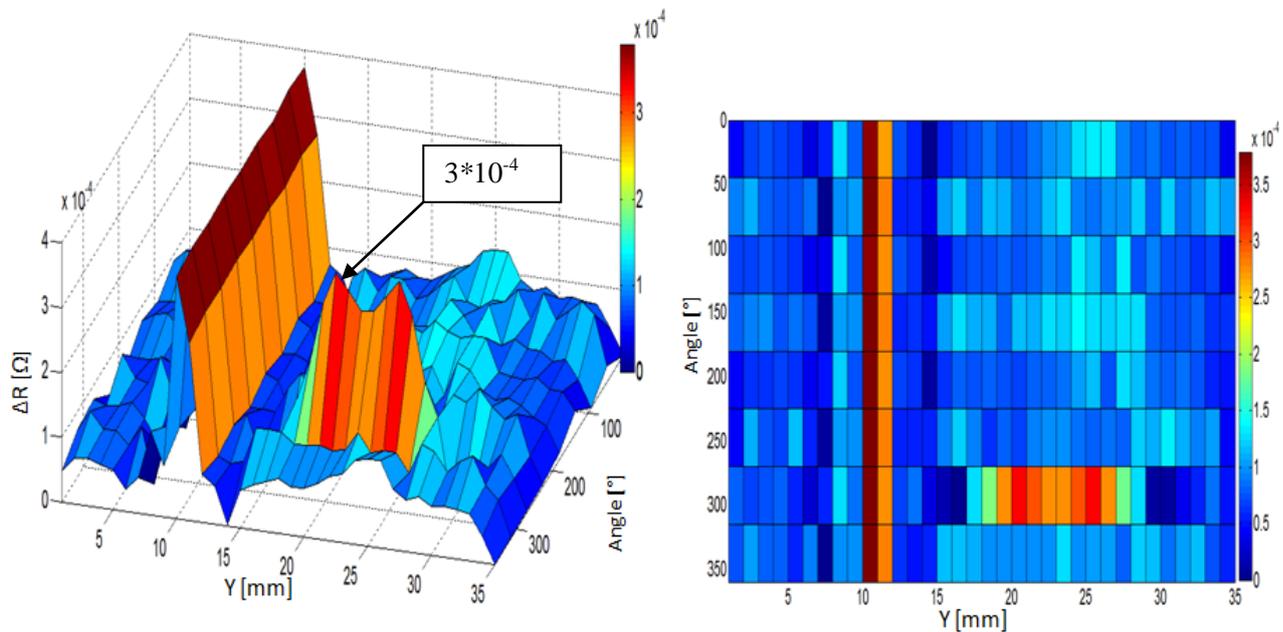


b. Partie imaginaire (réactance)

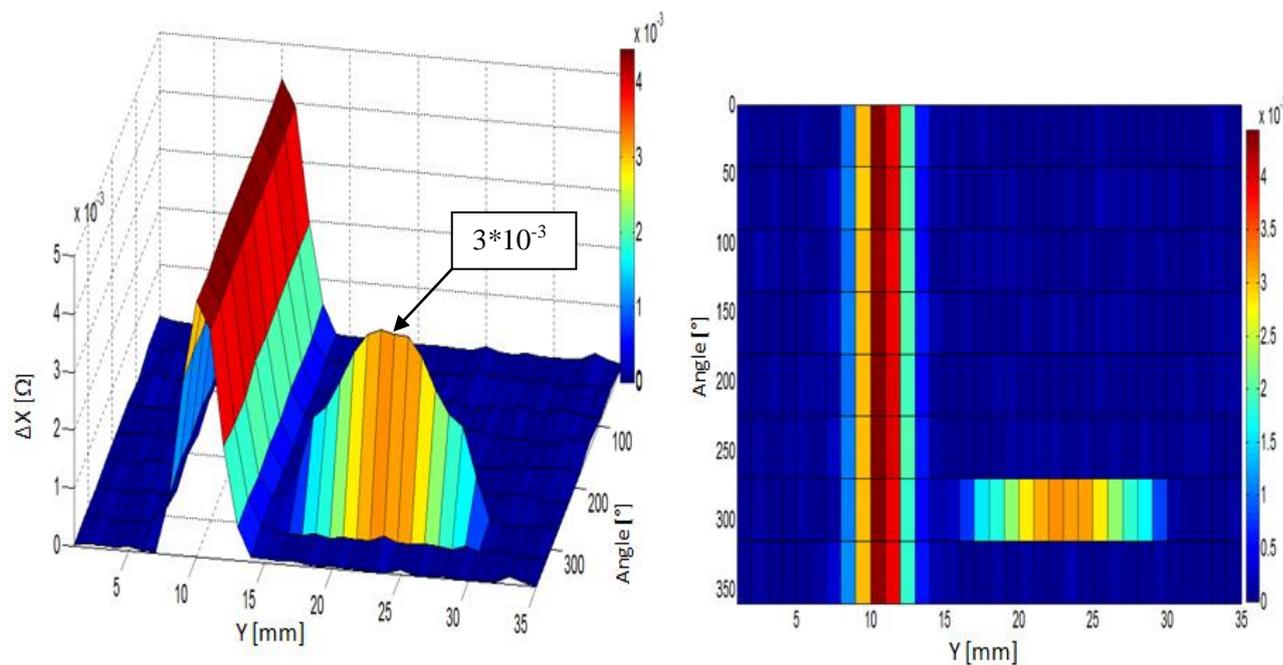
Figure III.29. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $Wd=0.5mm$

b. 2ème cas

Dans ce cas la largeur du défaut circulaire est $Wd1=1mm$, la largeur du défaut parallélépipède est $Wd2=2mm$.



a. Partie réelle (résistance)

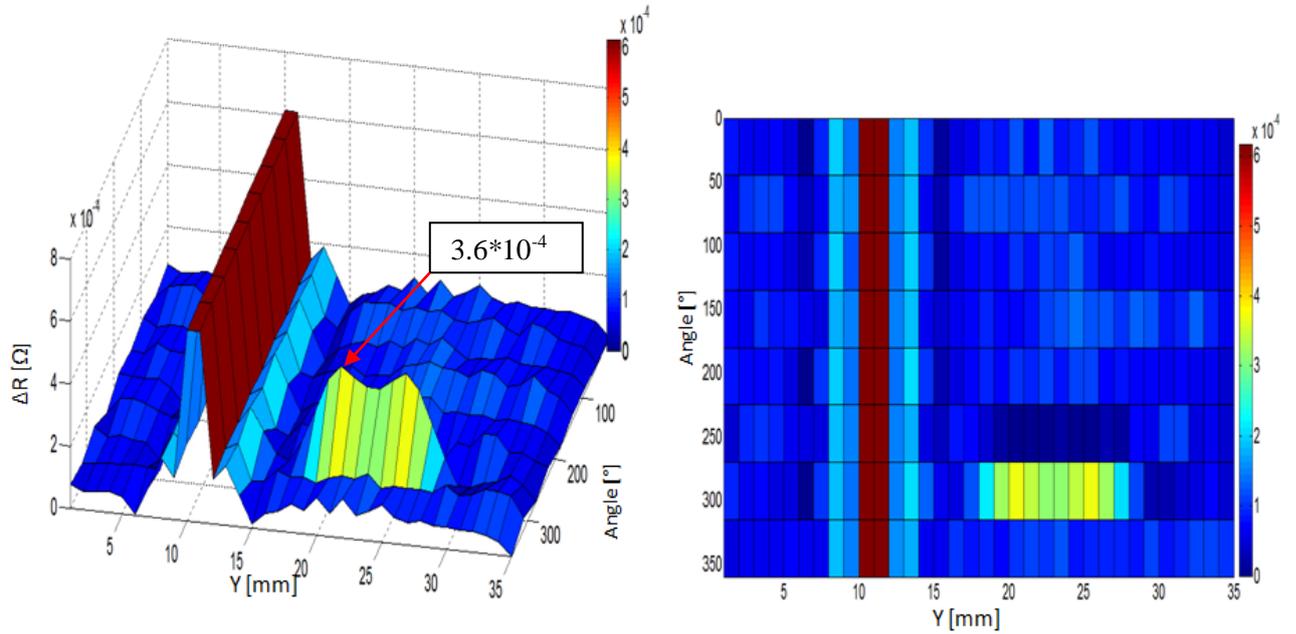


b. Partie imaginaire (réactance)

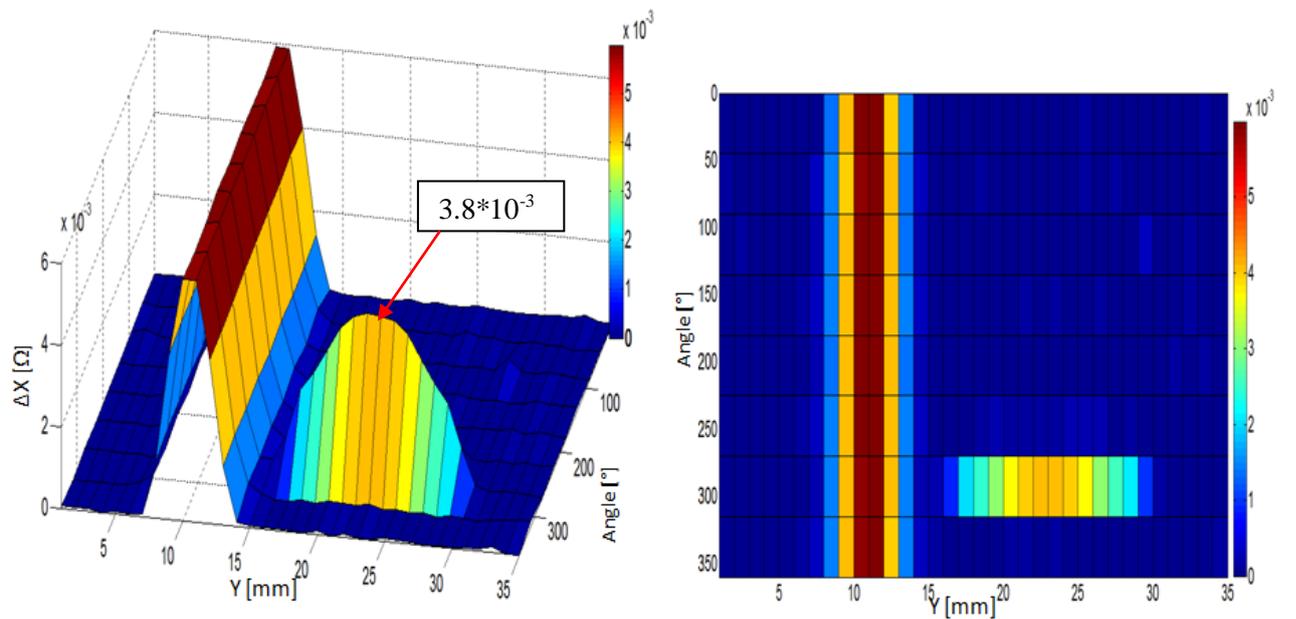
Figure III.30. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $Wd1=1mm$ et $Wd2=2mm$

c. 3ème cas

Dans ce cas la largeur du défaut circulaire est $Wd1=2\text{mm}$, la largeur du défaut parallélépipède est $Wd2=4\text{mm}$.



a. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III.31. Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $Wd1=2\text{mm}$ et $Wd2=4\text{mm}$

Le tableau III.8 et la figure III.31 montrent l'évolution de la partie réelle et imaginaire de la variation l'impédance (ΔR et ΔX) en fonction de la largeur des défauts.

Tableau III.8. Evolution de la variation de la résistance et la réactance en fonction de la largeur des défauts

Largeur	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas	3 ^{ème} cas
$\Delta R_{\max} (\Omega)$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-4}$
$\Delta X_{\max} (\Omega)$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
$\Delta R_{\max} / R (\%)$	2.6	3.8	6.1
$\Delta X_{\max} / X (\%)$	0.7	0.9	1.2

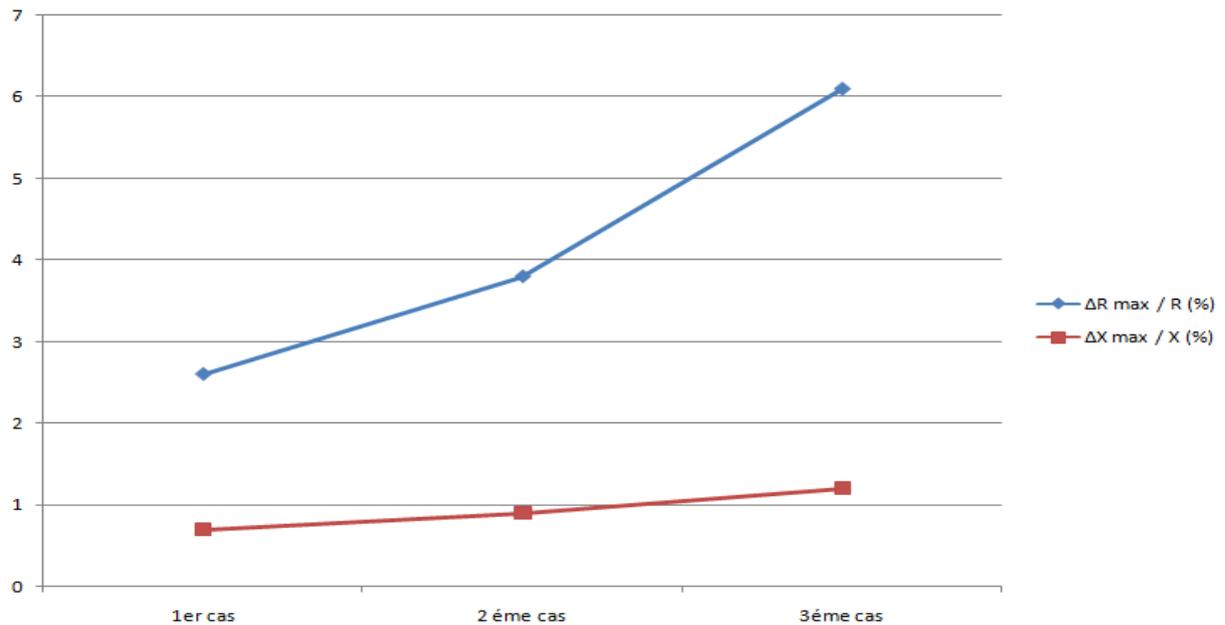


Figure III.32. Evolution de la variation relative de la résistance et la réactance en fonction de la largeur des défauts externe

Selon les résultats des trois cas étudiés présentés sur la figure III.31, le tableau III.8 et les cartographies (fig. III.28-30), on constate que l'amplitude des parties réelles et imaginaires ΔR et ΔX de la variation l'impédance est proportionnel à la largeur des défauts.

III.5 Conclusion

En se référant aux résultats précédents ; nous pouvons déduire ce qui suit :

- Au fur et à mesure que la fréquence de l'excitation du capteur augmente, l'amplitude du signal des deux parties de l'impédance (résistance et réactance) devient plus importante, et le défaut est détecté avec une grande précision car les défauts sont surfaciques.
- D'autre part, la réduction du pas de déplacement permet d'explorer la totalité de la surface infectée. Par conséquent, les images obtenues seront de haut résolution ; ce qui conduit à une représentation fiable et précises des régions infectés.
- Au fur et à mesure que la profondeur ou la largeur des défauts augmente, l'amplitude du signal de l'impédance augmente quelque soit les défauts (interne ou externe), ce qui veut dire que les défauts les plus profond et les plus larges qui ont bonne détection.

Conclusion

Nous avons commencé notre travail par une recherche bibliographique sur les différentes techniques du CND les plus utilisées ainsi que la classification des capteurs en CND-CF et des différents défauts. Nous avons constaté clairement que l'utilisation des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux des milieux conducteurs. La simplicité de ce contrôle et sa robustesse d'utilisation en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Ensuite, l'intérêt de notre de travaille est l'étude d'un capteur à courant de Foucault multiéléments alimentés en mode harmoniques multiplexés, afin de l'appliquer a une détections des défauts interne et externes des tubes des échangeurs de chaleur.

Pour étudier ce problème, nous avons fait un appel au logiciel COMSOL Multiphysics pour résoudre les équations et reproduire par une simulation numérique le comportement électromagnétique du problème étudié.

Enfin, après avoir implémenté le système à étudier sous COMSOL Multiphysics, ce dernier nous a permis d'étudier le signal du capteur multiélément en fonction du pas de déplacement du capteur, la fréquence d'alimentation, la profondeur et la largeur des défauts dans le cas ou les défauts sont internes ou externes. Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- Au fur et à mesure que la fréquence de l'excitation du capteur augmente, l'amplitude du signal des deux parties de l'impédance (résistance et réactance) devient plus importante, et le défaut est détecté avec une grande précision car les défauts sont surfaciques.
- D'autre part, la réduction du pas de déplacement permet d'explorer la totalité de la surface infectée. Par conséquent, les images obtenues seront de haut résolution ; ce qui conduit à une représentation fiable et précise des régions infectées.
- Au fur et à mesure que la profondeur ou la largeur des défauts augmentent, l'amplitude du signal de l'impédance augmente quelque soit les défauts (interne ou externe), ce qui veut dire que les défauts les plus profond et les plus larges ont une bonne détection.

Perspectives

Afin d'élargir et de compléter le champ de notre étude, nous suggérons comme perspectives ce qui suit :

- Étude de l'effet de la taille et le nombre des bobines du capteur sur la grandeur permettant le contrôle.

- Comparer les performances de cette configuration avec celle d'un capteur rotatif fonctionnant en mode multiplexé.
- Réalisation d'une sonde multiélément et comparer les résultats expérimentaux avec les résultats obtenus.
- Remplacer l'alimentation en mode harmonique des bobines par le mode pulsé afin de permettre aux courants de Foucault de descendre en profondeur et de détecter les défauts surfaciques et en profondeur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **BAKAI, LAYACHI**, "contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage) ", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.

[2] **Chiara ZORNI**, "Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques de l'expérience au modèle d'interaction ", Thèse de Doctorat, université Paris-Sud11, Paris 2012.

[3] **CHOUA Yahya**, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configuration de contrôle non destructif par courants de Foucault ", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud 11, PARIS 2010.

[4] **HOUDA ZAIDI**, "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, Université Paris-Sud, 2012.

[5] **BOULOUDENINE Abderraouf**, "Etude de dispositifs de CND-CF (Contrôle non destructif par Courants de Foucault) appliqués à la caractérisation dematériaux composites à fibres de carbone", Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018

[6] **Dumont-Fillon**, "Contrôle non destructif (CND)", Technique de l'ingénieur 1994.

[7] **Brahim RAMADANE**, "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 de Doctorat, Université de Nantes. 2009.

[8] **SAFER Omar Adib**, "Etude et modélisation d'un capteur a courant de Foucault pour le contrôle non destructif", diplôme de master en genie électrique, universite de m'sila, 2014.

[9] **BOUCHALA Tarek**, "Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les systèmes de CND par Courants de Foucault ", Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Batna 2013.

[10] **BOUCHALA Tarek**, "Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. (Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite)", Mémoire de Magister, Université Elhadj Lakhder Batna, 2008 .

[11] **DUMONT-FILLON 1996**, "Contrôle non destructif (CND)".

[12] **Angélique RAUDE, Hugo LEMIEUX, Michael SIROIS**, "Courants de Foucault Multiéléments : Une alternative aux méthodes conventionnelles de contrôle non destructif de surface", JOURNEES COFREND, 2800 rue Louis-Lumière, Suite 100 Québec City, Québec Canada G1P 0A4 www.eddyfi.com, 2017.

- [13] **Abdelhak ABDOU**, "Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif", Thèse de Doctorat, Batna 2018.
- [14] **Bouzidi athmane**, "Etude du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Pulsés en utilisant les Circuits Electromagnétiques Couplés", thèse doctorat, universite A. Mira – Bejaia, 2013.
- [15] **Brahimi, Badi**, "Étude de la détection des défauts dans les structures aéronautiques par capteur à courants de Foucault rotatif ", mémoire master, M'sila 2019/2020.
- [16] **NABIL BENHADDA**, "Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault", Mémoire de Magistère, université El Hadj Lakhdar Batna, 2006.
- [17] **KHEBBAB MOHAMED** "Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND)", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [18] **KHEBAL, DALI**, "Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques", Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf. M'sila, 2019.
- [20] **LAKHDARI, Ala-Eddine**, "Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault: application a la détection des fissures". Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011.
- [21] Meziane, HAMEL, "Etude Et Réalisation D'un Dispositif de Détection de Défauts par Méthodes Electromagnétiques". Mémoire de Magister, Université de TiziOuzou , 2012.
- [22] **BASTIEN, Clause**, "Modélisation des traducteurs électromagnétiques acoustiques (EMAT) pour le contrôle non-destructif (CND) de milieux ferromagnétiques". Thèse de Doctorat ; Université Paris-Saclay. 2018.

Résumé

Les échangeurs de chaleurs sont soumis en permanence à des contraintes chimiques et thermiques qui conduisent au fil du temps à l'apparition d'une large variété de défauts. En effet, les industriels se trouvent souvent devant la nécessité de l'inspection des tubes afin de vérifier l'intégrité et l'état de santé de l'échangeurs. Pour ce faire, plusieurs techniques sont utilisées.

Parmi celles ci on cite les courants de Foucault. Dans ce travail nous envisageons de concevoir un nouveau capteur multiéléments dont les bobines sont alimentées en modes multiplexés. Car, cette technique permet de scanner d'un seul balayage les totalités de la surface intérieure ou extérieure du tube. Par ailleurs, cela nous permet de déterminer en temps réel la position, la forme, l'orientation et la taille du défaut. Pour accomplir cette tâche nous ferons appel à la simulation des comportements électromagnétique du système dans COMSOL-multiphysics. Ensuite, nous procédons à la représentation, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

Abstract

Heat exchangers are constantly subjected to chemical and thermal stresses that lead to a wide variety of defects over time. Indeed, manufacturers are often faced with the need to inspect the tubes in order to verify the integrity and health of the exchanger. To do this, several techniques are used.

One of these is eddy current. In this work we plan to design a new multi-element sensor whose coils are fed in multiplexed modes. This technique allows us to scan the entire inner surface of the tube in a single scan. Furthermore, it allows us to determine the position, shape, orientation and size of the defect in real time. To accomplish this task we will use the simulation of the electromagnetic behaviour of the system in COMSOL-multiphysics. Then we proceed to the representation, analysis and interpretation of the obtained results.

المخلص

تخضع المبادلات الحرارية باستمرار لضغوط كيميائية وحرارية تؤدي بمرور الوقت إلى ظهور مجموعة متنوعة من العيوب. في الواقع، غالبًا ما يواجه المصنعون الحاجة إلى فحص الأنابيب للتحقق من سلامة المبادلات وحالتها الصحية. للقيام بذلك، يتم استخدام العديد من التقنيات.

من بين هؤلاء نذكر التيارات الدوامة. في هذا العمل، نخطط لتصميم مستشعر تصفيف مرحلي جديد يتم تغذية ملفاته في أوضاع متعددة الإرسال. لأن هذه التقنية تجعل من الممكن مسح السطح الداخلي أو الخارجي للأنبوب بالكامل في مسح واحد. بالإضافة إلى ذلك، يسمح لنا بتحديد موضع العيب وشكله واتجاهه وحجمه في الوقت الفعلي. لإنجاز هذه المهمة، ثم ننتقل إلى تمثيل وتحليل COMSOL-multiphysics سنستخدم محاكاة السلوكيات الكهرومغناطيسية للنظام في وتفسير النتائج التي تم الحصول عليها.