



Université Batna 2



Faculté de Technologie
Département d'Électrotechnique

Thèse
en vue de l'obtention
du Diplôme de Doctorat en Sciences en:
Électrotechnique

Présentée par

Abdelhak ABDOU

*Magister en Électrotechnique (Option: Matériaux Électrotechniques)-
Université de Batna
Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de Batna*

Contrôle non Destructif (CND) :
Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif
à Courants de Foucault

Thèse soutenue le: 08/02/2018

Mr. BENAKCHA Abdelhamid	Prof.	Université de Biskra	Président
Mr. ABDELHADI Bachir	Prof.	Université Batna 2	Rapporteur
Mr. GUETTAFI Amor	Prof.	Université Batna 2	Co-Rapporteur
Mr. BOUKEZZI LARBI	Prof	Université de Djelfa	Examineur
Mr. BENS Aid Samir	Prof	Université de Bouira	Examineur
Mr. BENOUDJIT Azeddine	Prof.	Université d'El Baha,A.S	Invité



Dédicaces

*A la mémoire de mes défunts Parents qui n'ont cessés de me rappeler
qu'on ne peut se fier à la richesse quelle qu'elle soit.*

Seule l'instruction fait exception.

A ma famille et tous ceux qui me sont chers

Je tiens à dédier ce travail à:

Mon défunt frère Mohamed Cherif,

Mes enfants, Moustapha, Mohamed et Abdelmoumene, que Dieu les gardent et les orientent sur le bon chemin ;

Ma femme pour son soutien, sa patience et son aide pour me faciliter la tâche durant toute cette période ;

Mes frères et sœurs et leurs familles;

Mes petits frères Lahcen, Houcine et Rabie;

Mes oncles Mohamed OUAHDI et Abdelkader LOUAI et leurs familles ;

Ali BENZAZZA et toute sa famille;

Ahmed HAMZAOUI, Abdelhamid MAAFA et Faouzi BOUHIDEL ;

Mon défunt ami et frère Tayeb ABBECH et sa famille ;

El HADJA Fatima que Dieu lui accorde sa miséricorde ;

Hakim BENKHARREF et sa famille ;

Malik BENDAIKHA, Salah BELKHIRI, Mabrouk DAFDAF, Fouad BERRABAH, Salim CHAKROUNE, Yahia. LAAMARI, Hassen BOUZGOU

Abdelhak ABDOU



Remerciements

Cette dernière période fut enrichissante et pleine d'activité grâce au bon Dieu Tout Puissant, qui m'a donné volonté, patience et santé. J'ai eu la chance d'évoluer parmi des personnes qui m'ont toujours assuré de leur soutien, je tiens à remercier très sincèrement:

Dr Azeddine BENOUDJIT, à qui j'exprime ma sincère gratitude, Professeur à l'Université El Baha Arabie Saoudite, sans sa confiance, sa générosité, et sa patience, cette thèse n'aurait pu voir le jour. Je veux vivement le remercier pour la liberté qu'il m'a accordée et les responsabilités qu'il m'a confiées, et qui m'ont permis d'atteindre une maturité scientifique. Ses qualités scientifiques exceptionnelles associées à ses qualités humaines aussi merveilleuses m'ont aidé à surmonter les moments les plus délicats de cette thèse.

La première personne est mon Directeur de thèse **Dr. Bachir ABDELHADI**, Professeur à l'Université Batna 2 qui, sereinement, m'a orienté, corrigé et conseillé durant ce projet. Sa rigueur a été capitale dans l'atteinte des objectifs de ma thèse.

Je remercie aussi mon co-directeur de thèse, **Dr. Amor GUETTAFI**, Professeur à l'Université Batna 2, qui par ses critiques fondées et objectives, m'a permis d'avancer correctement dans mon travail.

Je tiens également à adresser mes remerciements au **Dr. Abdelhamid BENAKCHA**, Professeur à l'Université de Biskra pour avoir accepté de siéger dans mon jury et de l'avoir présidé. Je remercie très vivement le **Dr. Samir BENSALIM**, Professeur à l'Université de Bouira et le **Dr. Larbi BOUKEZZI** Professeur à l'Université de Djelfa, pour l'honneur qu'ils m'ont fait de juger ce modeste travail.

Je remercie vivement le **Dr. Tarik BOUCHALA**, et **Dr. Nabil BENHADDA**, respectivement maître de conférences aux Universités de Ouargla et Khenchela, de m'avoir prodigué d'utiles suggestions tout au long de ce travail et pour leurs conseils avisés sur la façon de mener mon travail doctoral.

Je suis aussi redevable à tout les enseignants et personnel administratif du Département d'Électrotechnique de l'Université de Batna 2, qui ont instaurés un environnement d'entraide et de soutien tant au plan scientifique qu'au plan humain.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans mentionner, tous mes amis et collègues de l'Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila.

Abdelhak ABDOU

Table des Matières

Table des Matières	i
Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux	vii
Notations et Symboles	viii

Introduction Générale

Enjeux du contrôle non destructif	1
Problématique 2	
Structure du manuscrit	3

Chapitre I Etat de l'Art sur les Techniques du Contrôle non Destructif

I.1	Introduction et historique	4
I.2	Généralités sur le contrôle non destructif (CND)	5
I.2.1	Principe	5
I.2.2	Champ d'application actuel	5
I.2.3	Classement des défauts détectés en CND	6
I.2.4	Principe de la détection d'un défaut	6
I.3	Différentes méthodes de CND	7
I.3.1	Examen visuel	7
I.3.2	Ressuage	8
I.3.3	Procédés à flux de fuite magnétique	9
I.3.4	Procédés à ultrasons	10
I.3.5	Procédés radiographiques et techniques connexes	10
I.3.6	Thermographie	12
I.4	Procédés électromagnétiques	13
I.4.1	Principe de la détection par courants de Foucault	13
I.4.2	Champ d'application	14
I.4.3	Avantages et inconvénients	14
I.5	Méthodes couplées	15
I.6	Synthèse comparative des techniques utilisées en CND	15
I.7	Capteurs à courants de Foucault	16
I.7.1	Profondeur de pénétration	18
I.7.2	Mise en œuvre du contrôle	19
I.7.3	Disposition des bobines	22
I.7.4	Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND	26
I.8	Conclusion	27

Chapitre II Modélisation des Phénomènes Électromagnétiques dans le CND par CF	
II.1	Introduction 28
II.2	Méthodes de résolution..... 29
II.2.1	Méthodes analytiques 29
II.2.2	Méthodes numériques 29
II.3	Modélisation du dispositif de CND par CF 31
II.4	Mise en équations..... 31
II.4.1	Equations de Maxwell 31
II.4.2	Conditions aux limites 33
II.4.3	Conditions de continuité 33
II.4.4	Hypothèses simplificatrices 34
II.5	Formulations magnétodynamiques 35
II.5.1	Formulations basées sur le champ électrique E 35
II.5.2	Formulation en A-V 36
II.5.3	Formulation en H 36
II.5.4	Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T- Φ 37
II.5.5	Comparaison entre les formulations 37
II.6	Conclusion 37
Chapitre III Modélisation et Simulation du Dispositif du CND - CF avec Capteur Inductif à Double Fonction - Cas des Défauts Conducteurs -	
III.1	Introduction 38
III.2	Modèle géométrique et description..... 38
III.3	Modèle géométrique 39
III.4	Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique $AV-A$ harmonique..... 39
III.4.1	Calcul de l'impédance 42
III.5	Déroulement de la simulation 3D avec COMSOL Multiphysics 44
III.5.1	Création du domaine de travail..... 44
III.5.2	Caractéristiques géométriques et physiques 45
III.5.3	Maillage 45
III.6	Simulation du CND par CF 47
III.6.1	Tests de validation 47
III.6.2	Résultats de simulation pour défauts conducteurs..... 53
III.7	Paramètres influents sur CND-CF pour défaut fin 59
III.7.1	Effet de la fréquence 59
III.7.2	Effet de la variation du lift-off..... 60
III.7.3	Effet des caractéristiques géométriques du défaut..... 62
III.8	Conclusion 66

Chapitre IV Application du CND-CF aux Structures Rivetées

IV.1	Introduction	67
IV.2	Structures rivetées à 3 couches d'aluminium	69
IV.2.1	Modèle géométrique et description.....	69
IV.2.2	Caractéristiques géométriques et physiques	70
IV.2.3	Résultats de simulation	70
IV.3	Comparaison des défauts ayant la même longueur et se trouvant dans des couches différentes	74
IV.3.1	Variations partie imaginaire (ΔX) et réelle (ΔR) en fonction du déplacement	74
IV.3.2	Diagramme de phases des variations partie imaginaire (ΔX) en fonction des variations réelle (ΔR)	76
IV.4	Influence du rivet adjacent.....	80
IV.5	Conclusion	81

Conclusion Générale

Travail accompli	84
Analyse des résultats et discussions.....	85
Perspectives	86

Annexes

Annexe A1: Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération des courants ... de Foucault	87
Annexe A2: Organigramme de simulation sous COMSOL Multiphysics:.....	88
Annexe A3: Méthode Analytique (Dodd et Deeds,).....	89
Annexe A4: Modèle multicouche, transformateur à 2 secondaires chargés.....	92

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques.....	94
----------------------------------	----

Liste des Figures

Chapitre I État de l'Art sur les Techniques du Contrôle non Destructif

Fig. I. 1	Principe du contrôle non destructif.....	7
Fig. I. 2	Exemples de contrôle visuel	8
Fig. I. 3	Méthode de ressuage par liquide pénétrant préémulsifié.....	9
Fig. I. 4	Principe du contrôle par magnétoscopie.....	9
Fig. I. 5	CND par ultrasons.	10
Fig. I. 6	Schéma de principe du contrôle radiographique.....	11
Fig. I. 7	Tomographe industriel.....	12
Fig. I. 8	CND par thermographie.....	13
Fig. I. 9	Principe de la détection par courants de Foucault.	13
Fig. I. 10	Variation de l'impédance lors de l'apparition d'un défaut.	17
Fig. I. 11	Profondeur de pénétration.....	18
Fig. I. 12	Bobines réelles.....	19
Fig. I. 13	Exemples de différentes géométries de circuit magnétique.....	20
Fig. I. 14	Fonctions d'un capteur.....	21
Fig. I. 15	Contrôle en mode absolu.	21
Fig. I. 16	Contrôle en mode différentiel.	22
Fig. I. 17	Capteurs encerclants	23
Fig. I. 18	Capteurs internes.....	24
Fig. I. 19	Capteur sonde.	25
Fig. I. 20	Sonde rotative.	25
Fig. I. 21	Sonde à bobines perpendiculaires.....	26

Chapitre II Modélisation des Phénomènes Électromagnétiques dans le du CND par CF

Fig. II. 1	Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF	30
Fig. II. 2	Schéma descriptif d'un problème type de CND par CF	31
Fig. II. 3	Interface entre deux milieux différents.....	33

Chapitre III Modélisation et Simulation du Dispositif du CND - CF avec Capteur Inductif à Double Fonction - Cas des Défauts Conducteurs -

Fig. III. 1	Géométrie du dispositif à modéliser.	39
Fig. III. 2	Modèle magnétodynamique avec défaut conducteur.....	40
Fig. III. 3	Domaine de travail sous COMSOL Multiphysics.	45
Fig. III. 4	Maillage de plaque à tester sous COMSOL Multiphysics.....	46
Fig. III. 5	Detail du TEAM Workshop N° 15-1, (Burke, 1988).	47

Fig. III. 6	Vue 3D et maillage du TEAM Workshop N° 15-1.	48
Fig. III. 7	Variation de la réactance: modèle développé.	49
Fig. III. 8	Variation de la réactance: selon Choua et TEAM Workshop N° 15-1.	49
Fig. III. 9	Variation de la réactance: selon Helifa et TEAM Workshop N° 15-1.	49
Fig. III. 10	Variation de la résistance: modèle développé.	50
Fig. III. 11	Variation de la résistance: selon Choua et TEAM Workshop N° 15-1.	50
Fig. III. 12	Variation de la résistance: selon Helifa et TEAM Workshop N° 15-1.	50
Fig. III. 13	Variation de la réactance: selon JSEAM: modèle développé.	52
Fig. III. 14	Variation de la réactance: selon JSEAM: modèle Choua et TEAM Workshop N° 15-1	52
Fig. III. 15	Variation de la résistance, selon JSEAM: modèle développé.	52
Fig. III. 16	Variation de la résistance, selon JSEAM: modèle Choua et TEAM Workshop N° 15-1.	53
Fig. III. 17	Variation de la réactance ΔX en fonction du déplacement pour différentes valeurs de conductivité du défaut.	54
Fig. III. 18	Variation de la résistance ΔR en fonction du déplacement pour différentes valeurs de conductivité du défaut.	55
Fig. III. 19	Résistance, réactance et impédance relative, en (%) en fonction de la conductivité électrique du défaut pour différentes valeurs de profondeurs de défauts [0.5 mm: 2.25 mm].	57
Fig. III. 20	Cartographies de la densité des courants induits en fonction des conductivités de pollution.	58
Fig. III. 21	Effet de la variation de la fréquence sur ΔR et ΔX	59
Fig. III. 22	Effet de la variation de la fréquence sur $ \Delta Z $	59
Fig. III. 23	Effet de la variation de la fréquence sur ΔX en fonction de ΔR	60
Fig. III. 24	Effet de la variation du lift-off sur ΔR et ΔX	60
Fig. III. 25	Effet de la variation du lift-off $ \Delta Z $	61
Fig. III. 26	Effet de la variation du lift-off sur ΔX en fonction de ΔR	61
Fig. III. 27	Effet de la variation de la largeur du défaut sur ΔR et ΔX	62
Fig. III. 28	Effet de la variation de la largeur du défaut sur $ \Delta Z $	62
Fig. III. 29	Effet de la variation de la largeur du défaut sur ΔX en fonction de ΔR	63
Fig. III. 30	Effet de la variation de la profondeur du défaut sur ΔR et ΔX	63
Fig. III. 31	Effet de la variation de la profondeur du défaut sur $ \Delta Z $	64
Fig. III. 32	Effet de la variation de la profondeur du défaut sur ΔX en fonction de ΔR	64
Fig. III. 33	Effet de la variation de la longueur du défaut sur ΔR et ΔX	65
Fig. III. 34	Effet de la variation de la longueur du défaut sur $ \Delta Z $	65
Fig. III. 35	Effet de la variation de la longueur du défaut sur ΔX en fonction de ΔR	66
Chapitre IV Application du CND-CF aux Structures Rivetées		
Fig. IV. 1	Structure rivetées utilisée en aéronautique.	68
Fig. IV. 2	Géométrie du modèle proposé.	69
Fig. IV. 3	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR dans la première couche.	71

Fig. IV. 4	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR dans la deuxième couche.	72
Fig. IV. 5	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR dans la dans la troisième couche.....	73
Fig. IV. 6	Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 10 mm de longueur.	74
Fig. IV. 7	Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 7.5 mm de longueur. ...	74
Fig. IV. 8	Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 5 mm de longueur.	75
Fig. IV. 9	Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 2.825 mm de longueur	75
Fig. IV. 10	Signaux de défauts seuls pour de la troisième couche: Défaut de 1.4125 mm de longueur.	76
Fig. IV. 11	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de 10 mm.	77
Fig. IV. 12	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de 7.5 mm.	77
Fig. IV. 13	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de.5 mm.	78
Fig. IV. 14	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de.2.825 mm.	78
Fig. IV. 15	Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de.1.4125 mm.	79
Fig. IV. 16	Photo alésage de rivet adjacents.	80
Fig. IV. 17	Influence du rivet adjacent sur la variation ΔX et ΔR de la sonde.	80

Annexes

Fig. A. 1	Organigramme du calcul de la variation d'impédance.	87
Fig. A. 2	Organigramme de simulation sous COMSOL Multiphysics.	88
Fig. A. 3	Géométries axisymétriques avec bobine à air traitées par Dodd et al.	89
Fig. A. 4	Géométrie de la spire au dessus d'une plaque.	90
Fig. A. 5	Capteur CF placé sur une structure multicouche	92

Liste des Tableaux

Chapitre I Etat de l'Art sur les Techniques du Contrôle non Destructif

Tableau I. 1	Comparaison des procédés de CND les plus connus.....	15
Tableau I. 2	Comparaison des performances des principaux procédés de CND	16

Chapitre II Modélisation des Phénomènes Électromagnétiques dans le du CND par CF

Tableau II. 1	Comparaison entre les formulations les plus utilisées dans le CND-CF.....	37
---------------	---	----

Chapitre III Modélisation et Simulation du Dispositif du CND - CF avec Capteur Inductif à Double Fonction - Cas des Défauts Conducteurs -

Tableau III. 1	Paramètres géométriques et physiques du système à modéliser	45
Tableau III. 2	Paramètres géométriques et physiques du TEAM Workshop N° 15-1,	48
Tableau III. 3	Paramètres géométriques et physiques du Benchmark JSAEM.....	51

Chapitre IV Application du CND-CF aux Structures Rivetées

Tableau IV. 1	Paramètres géométriques et physiques de la structure rivetée.....	70
---------------	---	----

Notations et Symboles

Acronymes

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CCF	Capteur par Courants de Foucault.
CF	Courants de Foucault
CM	Capteur Magnétique
CND	Contrôle Non Destructif
CND-CF	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
END	Évaluation Non Destructif
Hb	Hauteur de la bobine
Hd	Hauteur de défaut
Hp	Hauteur de la pièce
Lad	Largeur de défaut
Lap	Largeur de la pièce
Lod	Longueur de défaut
Lop	Longueur de la pièce
MCC	Méthode des Circuits Couplés
MEF	Méthode des Éléments Finis
r1	Rayon extérieur de la bobine
r2	Rayon intérieur de la bobine

Symboles

A	Potentiel Vecteur magnétique	(T.m)
B	Induction magnétique	(T)
D	Induction électrique	(C/m ²)
E	Champ électrique	(V/m)
<i>f</i>	Fréquence	(Hz)
H	Champ magnétique	(A/m)
I	Intensité du courant électrique	(A)
J	Densité du courant	(A/m ²)
J _s	Densité des courants surfaciques	(A/m ²)
L	Inductance propre	(H)
M	Inductance mutuelle	(H)
R	Résistance électrique	(Ω)
S	Surface	(m ²)
<i>t</i>	Temps	(s)
U	Tension aux bornes du capteur	(V)

V	Potentiel scalaire électrique	(V)
X	Réactance	(Ω)
X_n	Réactance normalisée	
Z	Impédance	(Ω)
Γ	Frontière du milieu	
δ	Épaisseur de peau	(m)
ϵ_0	Permittivité électrique absolue du vide	$36\pi 10^{-9}$ (F/m)
ϵ_r	Permittivité électrique relative	
μ_0	Perméabilité magnétique absolue du vide	$4\pi 10^{-7}$ (H/m)
μ_r	Perméabilité magnétique relative	
ρ	Résistivité électrique	($\Omega \cdot m$)
Φ	Potentiel scalaire magnétique	(T.m)
ω	Pulsation électrique	(rad/s)
Ω	Domaine d'étude	
σ_p	Conductivité électrique de la pièce	(S/m)
σ	Conductivité électrique	(S/m)
ΔR	Variation de la résistance	(Ω)
ΔX	Laplacien	
ΔX	Variation de la réactance	(Ω)
∇X	Divergence d'un vecteur X	
∇X	Gradient d'un scalaire X	
$\nabla \times X$	Rotationnel d'un vecteur X	
ΔZ	Variation de l'impédance	(Ω)
\vec{n}	Vecteur normale à la surface	
\vec{e}_θ	Vecteur angulaire unitaire	

Introduction Générale

Enjeux du contrôle non destructif.....	1
Problématique	2
Structure du manuscrit.....	3

Introduction Générale

Enjeux du contrôle non destructif

Depuis plusieurs années, les industriels ont fait de la sécurité de leurs installations et équipements un axe de recherche de priorité majeure. A titre d'exemple, dans les secteurs sensibles tels que le nucléaire et l'aéronautique, il est très important de connaître l'état d'usure d'une pièce (tube de générateur de vapeur ou aile d'avion par exemple) sans l'endommager. C'est donc dans un contexte industriel exigeant quant aux normes de sécurité des systèmes de fonctionnement critique que le contrôle non destructif (CND) trouve son utilité, (Alexandra, 2014)

On désigne par contrôle non destructif l'ensemble des procédés permettant de caractériser l'intégrité de structures ou de matériaux sans les altérer. (Pipis, 2015). Le recours à ces procédés intervient à différentes étapes de la vie d'un produit, que ce soit au cours de sa fabrication, de son utilisation ou dans le cadre d'opérations de maintenance, Bien que la nature des défauts recherchés à détecter se soit également diversifiée, le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut toujours être effectué à trois stades différents de son cycle de vie, en cours de fabrication, en recette et en service (Benhadda, 2015).

Toute rupture d'un équipement en fonctionnement, due à une fissure, est un accident qui peut avoir des répercussions graves. Le degré de gravité de ces accidents peut varier, de la dégradation du matériel et par conséquent la mise hors service des machines ou des installations, avec comme effet secondaire des charges supplémentaires et onéreuses pour l'immobilisation, la rénovation et la remise en service du matériel. Dans le pire des cas, une rupture peut se traduire, non seulement par des accidents ou des dysfonctionnements de matériels ou de systèmes de production, mais également par des pertes en vies humaines.

L'une des causes essentielles des crashes d'avions est la rupture en cours de vol et surtout en décollage ou en atterrissage, de pièces critiques telles que des aubes ou disques de turboréacteurs. Ces ruptures sont dues essentiellement aux fissures mal évaluées en cours de fabrication, de révision ou de maintenance révision ou de maintenance, (Helifa, 2012).

Le CND intervient donc pour répondre à différents enjeux. En premier lieu, pour répondre à des enjeux liés à la sécurité de fonctionnement, qui touchent les domaines industriels sensibles tels que le nucléaire et l'aéronautique,... En second lieu, pour répondre à des objectifs de qualité, comme par exemple dans le domaine de la métallurgie avec le contrôle des aciers ou la radiographie des soudures, où l'on recherche des défauts d'aspect et des corps étrangers nuisibles. Enfin, pour des enjeux économiques, où l'on cherche à optimiser les coûts de fabrication et d'exploitation, mais aussi à prolonger le cycle de vie des systèmes et des structures, dans un contexte de développement durable. (Thomas, 2010).

Dans l'industrie, les techniques de contrôle non destructif sont passées de la maintenance préventive, c'est-à-dire la recherche et la qualification de défauts inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), à la caractérisation des matériaux d'une part, et au contrôle de qualité des produits fournis aux consommateurs d'autre part.

Les méthodes de CND sont pour la plupart fondées sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique dépendant des propriétés constitutives ou géométriques du matériau et éventuellement perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité (défaut). Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même du contrôle envisagé, les plus répandues sont: les ultrasons, les rayons ionisants (X ou gamma), le ressuage, la thermographie et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault), (Fillon, 1996).

Parmi les différentes méthodes de CND, celle basée sur les courants de Foucault est largement utilisée pour l'inspection de composants électriquement conducteurs exposés aux contraintes mécaniques ou/et à la corrosion. A titre d'exemple, le contrôle interne ou externe des 70 km de tubes constituant l'échangeur de chaleur d'un générateur de vapeur dans un réacteur nucléaire nécessite une automatisation et une vitesse d'exécution considérables: le seul contrôle qui réponde à ces exigences est le contrôle par courants de Foucault, (Helifa, 2012). Le contrôle par courants de Foucault est surtout utilisé pour détecter et quantifier divers défauts superficiels, tels que les fissures et les hétérogénéités chimiques, microstructurales ou mécaniques. Il est également utilisé pour mesurer les épaisseurs de revêtements métalliques ou isolants sur des matériaux conducteurs, (Helifa, 2012). Le CND par CF consiste à créer des courants induits dans la structure inspectée (conductrice) dont la circulation sera perturbée par la présence d'un défaut, (Zaidi, 2012).

La simulation en CND par CF permet de caractériser les capteurs CF et d'en améliorer les performances tout en limitant le nombre de prototypes expérimentaux et donc les coûts de développement, (Bouchala, 2014). La simulation d'un problème de CND par CF implique une modélisation magnétodynamique. La méthode des éléments finis (MEF), puisqu'elle permet de tenir compte de géométries complexes de sondes et pièces inspectées, est l'une des plus utilisées. Elle est considérée comme un outil efficace pour résoudre numériquement des problèmes électromagnétiques.

Problématique

Les équipements et les infrastructures industrielles sont amenés à travailler dans des conditions sévères et dans un environnement qui peut être pollué. Partant de ce constat, l'idée est née, qu'il y a possibilité que le volume d'une fissure peut être occupé par un matériau et plus particulièrement si le matériau polluant est conducteur. En effet, lors d'un CND-par courants de Foucault, le volume du défaut initial sera complètement ou partiellement rempli par ces matériaux polluants conducteurs qui peuvent être le siège de courants induits. Si ce phénomène n'est pas pris en considération dans la modélisation de ces systèmes de CND-CF, il va conduire à un écart significatif entre les résultats expérimentaux et théoriques, (Benhadda N, 2014).

Un autre aspect important de ce travail porte sur CND-CF appliqué aux structures multicouches rivetées utilisées en aéronautique. La littérature recèle un certain nombre de travaux concernant ces structures mais la majorité ne prend pas le matériau du rivet en considération (alésage vide) d'une part et d'autre part la longueur du défaut est souvent choisi supérieur au diamètre de la tête du rivet. C'est dans ce contexte que s'inscrira nôtre deuxième volet de recherche, à savoir, la prise en considération du matériau du rivet ainsi que les défauts qui peuvent apparaitre sous la tête du rivet.

Structure du manuscrit

La thèse comportera quatre chapitres structurés comme suit:

Un premier chapitre, qui englobera deux parties, la première dont le but est de rappeler brièvement la nature, le but et le domaine d'application du contrôle non destructif. Après un bref historique du CND, nous évoquerons les grands principes de détection des défauts et les bases physiques qui gouvernent les procédés et leur performance. Nous passerons ensuite à une description plus détaillée des principales familles de procédés du contrôle non destructif. On terminera cette partie par un Tableau récapitulatif sur les différentes techniques et leurs applications. Quant à la deuxième partie elle sera dédiée au capteur inductif, les paramètres qui influent sur le contrôle, la mise en œuvre, c'est-à-dire aux différents types de sondes, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle et nous terminerons avec, une étude détaillée du fonctionnement du capteur en regard d'une cible comportant une fissure et les différentes applications des capteurs inductifs en CND.

Au deuxième chapitre nous passerons en revue les différentes méthodes de résolution analytiques, semi-analytiques et numériques des problèmes directs du contrôle non destructif Puis nous présenterons les phénomènes physiques associés à l'électromagnétisme. En particulier, les équations de Maxwell seront décrites et les principales formulations qui en découlent seront exprimées.

Au troisième chapitre, nous commencerons par présenter la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique, puis nous donnerons une description des étapes de modélisation sous le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics, ceci sera suivie par une présentation des résultats de simulation pour les défauts conducteur, lors d'un CND-CF en mode absolu, une comparaison sera faite avec ceux des simulations manque de matière et enfin nous terminerons par la visualisation de l'effet des différents paramètres influent sur le contrôle, tels que la fréquence, la distance capteur-pièce "lift-off" et les caractéristiques géométriques du défaut.

Quant au quatrième chapitre, il sera consacré à l'étude du CND-CF des structures rivetées utilisées en aéronautique où l'on cherchera à mettre en évidence, d'une part, l'effet de la longueur du défaut par rapport à la tête du rivet et principalement lorsque ce défaut est à la fois inférieur au diamètre extérieur du rivet et diamètre intérieur du capteur, et d'autre part, le positionnement du défaut dans les trois couches qui constituent la structure riveté.

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

Chapitre I

État de l'Art sur les Techniques du Contrôle non Destructif (CND)

I.1	Introduction et historique.....	4
I.2	Généralités sur le contrôle non destructif (CND).....	5
I.2.1	Principe	5
I.2.2	Champ d'application actuel	5
I.2.3	Classement des défauts détectés en CND	6
I.2.4	Principe de la détection d'un défaut	6
I.3	Différentes méthodes de CND	7
I.3.1	Examen visuel.....	7
I.3.2	Ressuage	8
I.3.3	Procédés à flux de fuite magnétique	9
I.3.4	Procédés à ultrasons	10
I.3.5	Procédés radiographiques et techniques connexes	10
I.3.6	Thermographie.....	12
I.4	Procédés électromagnétiques	13
I.4.1	Principe de la détection par courants de Foucault	13
I.4.2	Champ d'application.....	14
I.4.3	Avantages et inconvénients	14
I.5	Méthodes couplées.....	15
I.6	Synthèse comparative des techniques utilisées en CND	15
I.7	Capteurs à courants de Foucault.....	16
I.7.1	Profondeur de pénétration.....	18
I.7.2	Mise en œuvre du contrôle.....	19
I.7.3	Disposition des bobines	22
I.7.4	Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND	26
I.8	Conclusion	27

Chapitre I État de l'Art sur les Techniques du Contrôle non Destructif (CND)

I.1 Introduction et historique

De nos jours, la qualité et la gestion des risques sont deux paramètres que ne peuvent négliger les industriels fabriquant, mettant en œuvre ou utilisant les matériaux, les produits ou les structures de toutes natures. Les contrôles non destructif sont donc devenus essentiels en quelques dizaine d'années ce qui explique que leur périmètre d'application ne cesse de s'accroître au-delà du domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Comme l'instrumentation scientifique, le CND constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire des essais non destructifs (END) commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du XIXe siècle: découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézoélectricité, ... etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie: contrôle des aciers, radiographie des soudures, (Fillon, 1996).

Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des END s'est manifestée ensuite vers les années 60/70 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électriques nucléaires, l'aéronautique (pour lesquels la sécurité des personnes et l'environnement sont un souci essentiel), l'extraction (plates-formes off shore) et le transport (oléoducs, gazoducs) des produits énergétiques pétrole ou gaz et enfin le spatial. Il est intéressant de noter que ce développement a accompagné, souvent suivi, celui parallèle qui s'effectuait dans le secteur médical (contrôle non invasif).

La dernière décennie enfin voit l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante; on assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique, comme les contrôles optiques, (Fillon, 1996), (Wanin, 1996), (Lacroix, 1996).

L'essor considérable qu'a connu le contrôle non destructif par courants de Foucault est dû principalement au capteur inductif, son rôle est d'assurer une duplication de l'information en la transférant, au point même où se fait la mesure, de la grandeur physique (non électrique) qui lui est propre, sur une grandeur électrique.

Dans ce chapitre, nous présenterons, en premier lieu des généralités sur le CND, le principe général, les champs d'applications, les phases du contrôle, les différents types de défauts et une synthèse des différentes techniques de CND les plus utilisées, en second lieu nous aborderons avec plus de détail les différentes topologies des capteurs à courants de Foucault et nous terminerons par une conclusion.

I.2 Généralités sur le contrôle non destructif (CND)

I.2.1 Principe

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

Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôles non destructifs qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

En ce sens, le contrôle non destructif apparaît comme un élément essentiel du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce, (Fillon, 1996), (Wanin, 1996).

I.2.2 Champ d'application actuel

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

Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

Le champ d'application du CND est très vaste, il englobe, (Viens, 2006):

- ✓ La détection et évaluation de défauts; la détection de fuite;
- ✓ La mesure dimensionnelle;
- ✓ La caractérisation d'une structure ou d'une microstructure;
- ✓ L'estimation des propriétés mécaniques et physiques d'un matériau;
- ✓ La mesure de contrainte; la détermination de la composition chimique d'un matériau.

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

- ✓ Le contrôle en cours de fabrication;
- ✓ Le contrôle en recette;
- ✓ Le contrôle en service.

I.2.3 Classement des défauts détectés en CND

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement: les défauts de surface et les défauts internes, (Fillon, 1996), (Wanin, 1996).

I.2.3.a. Défauts de surface,

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

- ✓ Les défauts ponctuels,
- ✓ Les défauts d'aspect.

I.2.3.b. Défauts internes

Le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge et la neutronographie.

I.2.4 Principe de la détection d'un défaut

Les méthodes de contrôles non destructifs sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité (Figure (I. 1)). On exploite donc un phénomène physique pour détecter la présence d'une hétérogénéité dans un matériau (à l'exception des procédés visuels directs qui échappent à cette règle).

Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou γ , perturbation des courants de Foucault sont à la base des essais non destructifs, ils peuvent servir à caractériser les matériaux (gros grain, anisotropie, dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou en profondeur ...).

Cependant, par END, on sous-entend presque toujours qu'il s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité.

Les techniques de CND diffèrent par l'énergie employée, énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique ...), mais ils sont caractérisés par les étapes suivantes:

- ✓ Mise en œuvre d'un processus physique énergétique,
- ✓ Modulation ou altération de ce processus par les défauts,
- ✓ Détection de ces modifications par un capteur approprié,
- ✓ Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

E Emetteur du flux Φ_o émis vers la pièce P à tester,
 Φ_R Flux réfléchi,
 Φ_T Flux transmis,
 D Défaut,
 P Pièce à contrôler,
 Φ_R, Φ_T Vecteurs de l'information utilisée par le contrôleur.

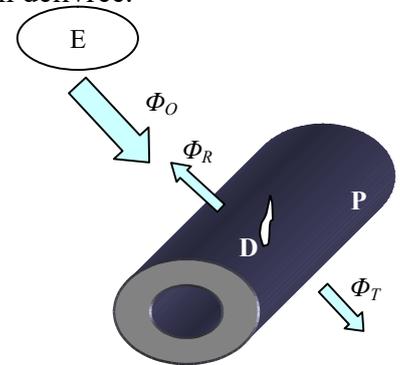


Fig. I. 1 Principe du contrôle non destructif, (Fillon, 1996).

Les techniques de CND sont nombreuses et peuvent être classées en plusieurs procédés. Citons:

- ✓ Les procédés optiques: l'examen visuel, le ressuage et les procédés à flux de fuite magnétique;
- ✓ Les procédés électromagnétiques: les courants de Foucault, les bruits de Barkhausen et de perméabilité incrémentale;
- ✓ Les procédés à ultrasons;
- ✓ Les procédés radiographiques.

I.3 Différentes méthodes de CND

Les techniques de CND utilisées sont diverses: la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, le bruit Barkhausen, les courants de Foucault ... Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme, ...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur, ...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui constituera l'objet d'étude de ce manuscrit, (Choua, 2010).

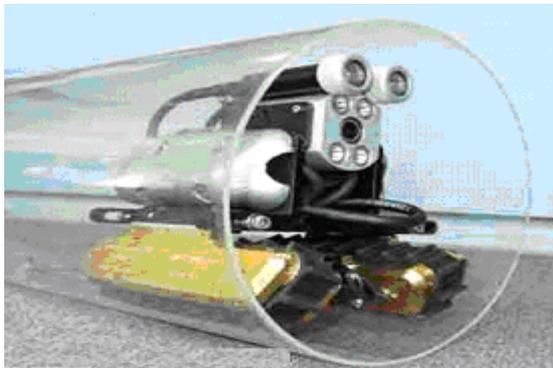
I.3.1 Examen visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple, le moins cher (NAJAR, 1997) et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, ...etc.

Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures tels que: l'éclairage, l'œil et ses limitations. Ces limitations justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, grâce à des instruments d'optique permettant d'accroître les performances de l'œil ou encore plus généralement de donner la possibilité de contrôler des surfaces inaccessibles à la vision directe de l'observateur, (Fillon, 1996), (Wanin, 1996).

On peut même utiliser des robots pour inspecter des endroits dangereux ou difficiles d'accès tels les réseaux de canalisation et les réacteurs nucléaires, (Figure (I. 2)).



a) Inspection robotisée d'un pipeline



b) Inspection du réacteur d'un avion

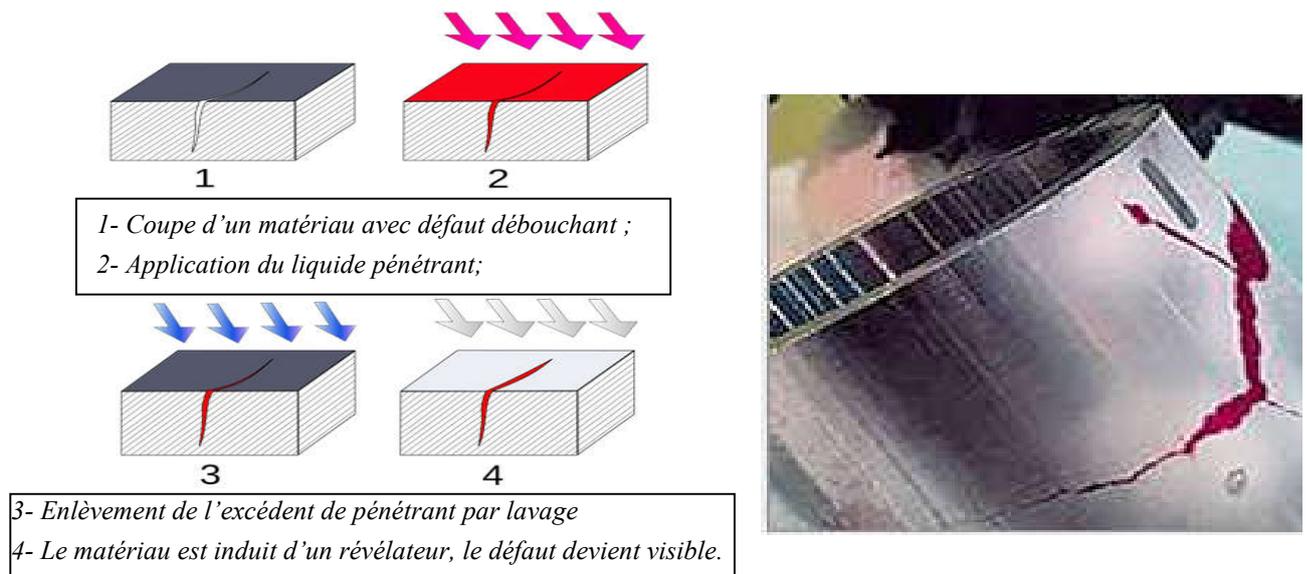
Fig. I. 2 Exemples de contrôle visuel, (Viens, 2006).

1.3.1.a. Techniques optiques particulières

Nous regroupons sous ce vocable les procédés de contrôle optique qui, contrairement aux précédents, ne mettent pas en œuvre l'image visible de la surface inspectée. On peut classer ces procédés en deux familles: celle des techniques basées sur une imagerie hors du spectre du visible (imagerie radiofréquence, imagerie infrarouge), et celle basée sur les applications de l'optique ondulatoire (holographie interférentielle), (Fillon, 1996), (Maurice, 1996).

1.3.2 Ressuage

Le ressuage est un moyen de recherche des défauts de surface qui consiste à améliorer les possibilités de détection visuelle des fissures. Un des intérêts de cette technique réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. Un autre intérêt tient au fait qu'il s'agit d'une méthode globale, en ce sens qu'elle autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce, (Fillon, 1996). Ce contrôle est, de par son principe, exclusivement réservé à la détection des défauts débouchant à la surface de la pièce examinée, Figure (I. 3).



a) Etapes de ressuage.

b) Visualisation de défaut sur cylindre par ressuage.

Fig. I. 3 Méthode de ressuage par liquide pénétrant préémulsifié.

I.3.3 Procédés à flux de fuite magnétique

Dans un matériau ferromagnétique, les lignes de champ magnétique s'épanouissent latéralement à la rencontre d'un obstacle (perpendiculaire aux lignes). Cet obstacle peut être constitué d'un défaut débouchant ou sous cutané ce qui correspond à un entrefer (accroissement local de la réluctance du circuit). Le même phénomène de dispersion est observé lorsqu'on est en présence d'une hétérogénéité non ferromagnétique dans un matériau ferromagnétique, (Kuhn, 2014), Figure (I. 4).

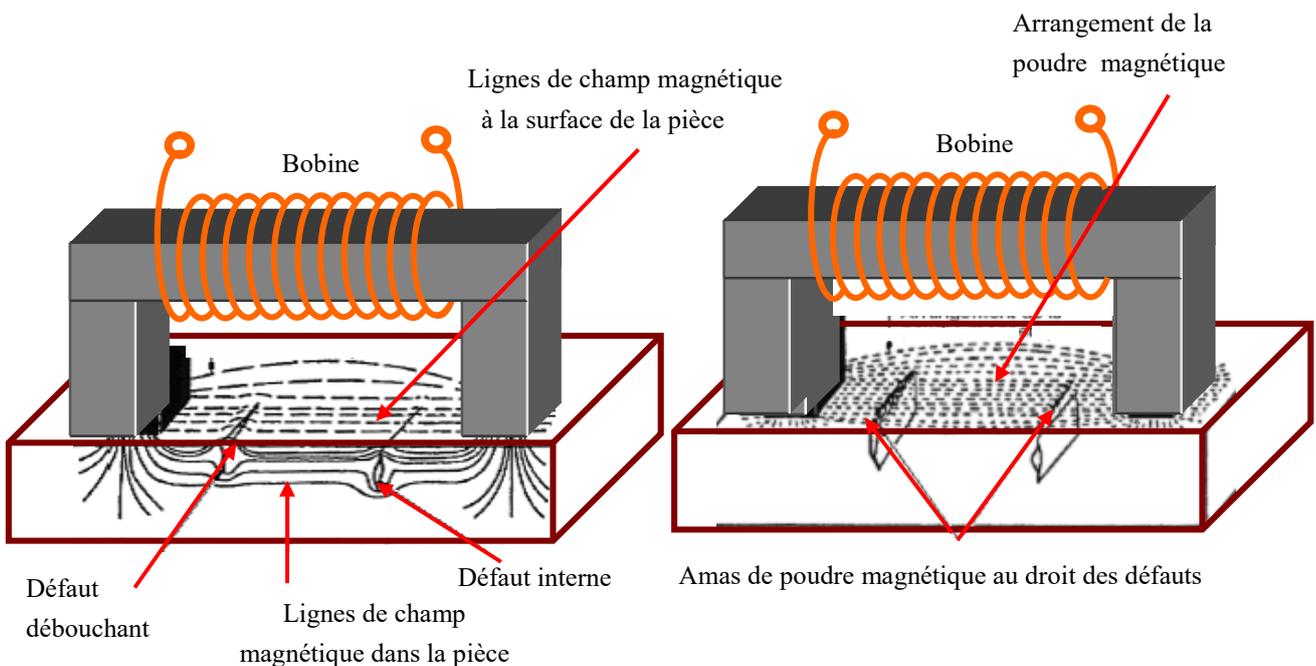


Fig. I. 4 Principe du contrôle par magnétoscopie, (Fillon, 1996), (Maurice, 1996).

Remarque: Il est très important de noter que les défauts ne peuvent être détectés que s'ils sont orientés pour tout ou partie normalement aux lignes de champ. La démarche de mise en œuvre de ces procédés consiste à définir clairement le type et l'orientation des défauts recherchés, puis en fonction de ces paramètres, à choisir le type de magnétisation qui fournira un champ d'orientation convenable, (Fillon, 1996).

I.3.4 Procédés à ultrasons

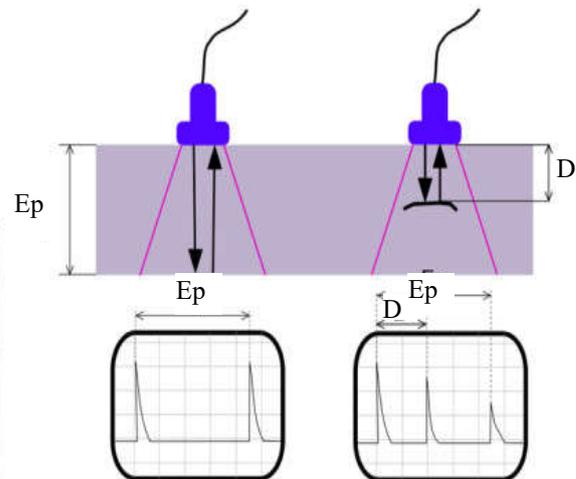
Les ultrasons (UT) sont des ondes mécaniques se propageant dans un milieu (avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde). La propagation et la nature de ces ondes peuvent être affectées par des discontinuités, plus précisément par des modifications locales de l'impédance acoustique.

Elles peuvent être réfléchies par un défaut plan, réfractées à l'interface entre deux milieux, diffractées par les extrémités d'une fissure, etc...

L'analyse de ces modifications renseigne l'opérateur sur la santé de l'objet inspecté, Figure (I. 5).



a) Dispositif expérimental



Ep ; épaisseur de plaque ; D: distance de localisation de défaut

b) Principe

Fig. I. 5 CND par ultrasons.

I.3.5 Procédés radiographiques et techniques connexes

Cette section décrira les procédés radiographiques ainsi que quelques techniques connexes telles que la radiographie, la neutronographie et la tomographie.

I.3.5.a. Radiographie

La radioscopie est une des plus vieilles méthodes d'évaluation non destructive. Son principe consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'ondes, les rayons X ou γ (qui sont de même nature, mais leur origine diffère: les premiers sont généralement produits par l'impact d'un faisceau d'électrons hautement énergétiques sur une cible adéquate; les seconds sont issus du réarrangement de noyaux instables d'isotopes radioactifs au cours de leur

désintégration) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau incident sous forme d'une image sur un récepteur surfacique du type film photographique argentique ou capteur électronique du type amplificateur de brillance ou autre, la Figure (I. 6) illustre ce principe.

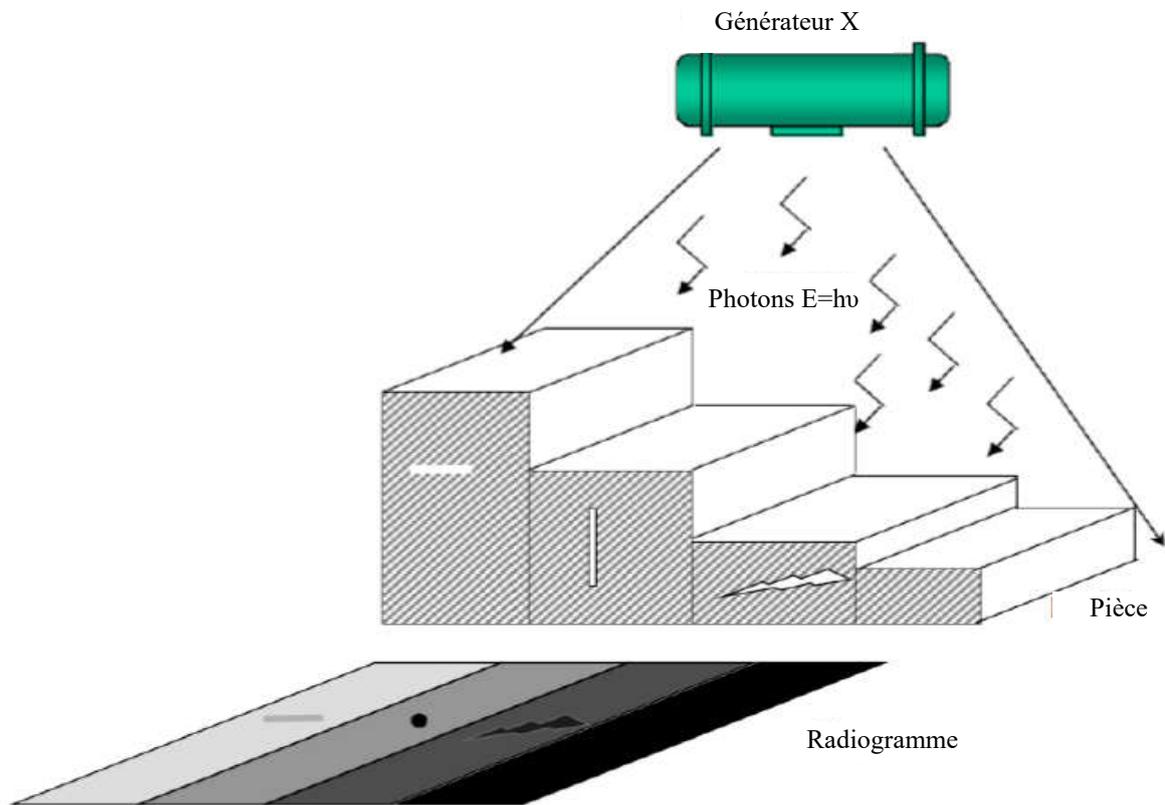


Fig. I. 6 Schéma de principe du contrôle radiographique, (Larsan, 2006).

1.3.5.b. Neutronographie

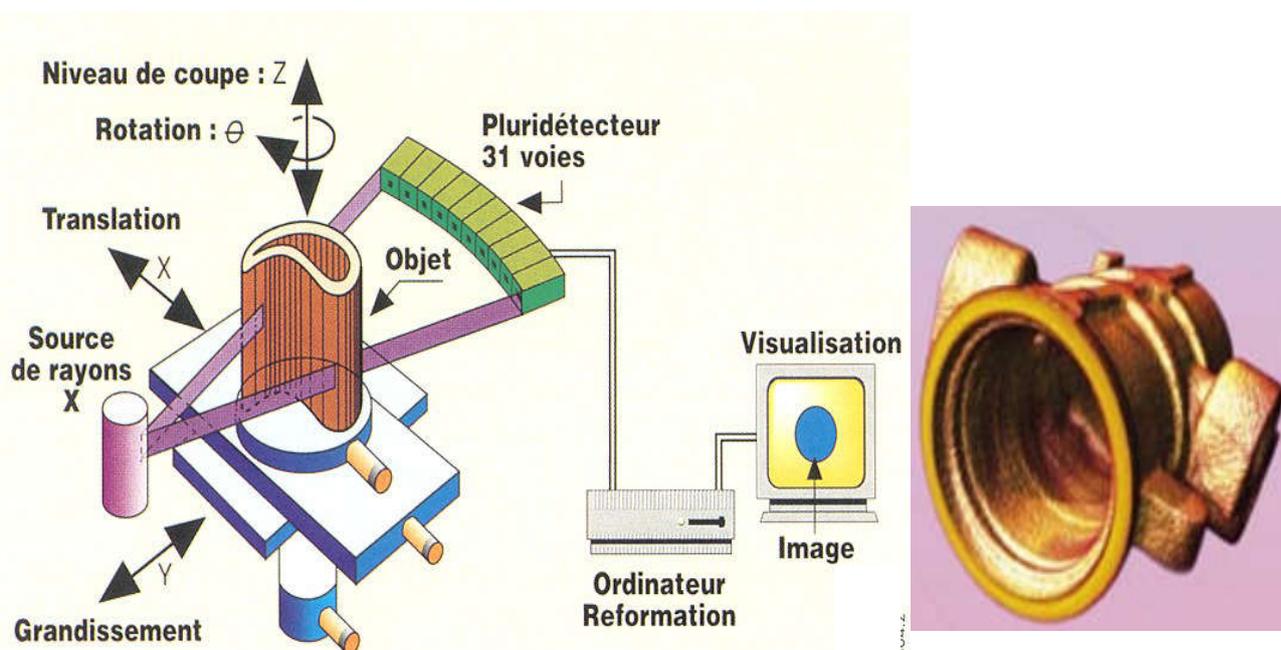
Le principe du contrôle neutronographique est semblable à celui de la radiographie; il s'agit d'effectuer un cliché par transparence. Toutefois la différence essentielle entre l'emploi des neutrons et celui des photons X et γ , tient à la nature des interactions avec la matière: action sur le noyau pour les neutrons, sur les électrons pour les photons.

La neutronographie est une technique complémentaire à la radiographie, elle est adaptée au contrôle de produits ou d'assemblages de natures très dissemblables. Ce potentiel d'applications est toutefois compromis par les difficultés de mise en œuvre liées à la nature même du rayonnement neutronique, en particulier en ce qui concerne les générateurs (les réacteurs nucléaires, les sources radio isotopiques, les accélérateurs d'ions), (Fillon, 1996).

1.3.5.c. Tomographie

Par principe, une simple radiographie ne peut pas donner d'information sur la morphologie complète d'un défaut et sur sa localisation en profondeur dans la pièce examinée. On peut remédier à cette carence en prenant plusieurs clichés sous des angles de tir différents, (Figure (I. 7)), (Lacroix, 1996).

Ainsi est née la tomographie X appelée aussi tomodensitométrie. Elle a le même principe que le scanner médical. Elle consiste à reconstruire une coupe de la pièce par des algorithmes complexes à partir d'une succession d'acquisitions suivant des angles différents, (Choua, 2010). Cette image représente la cartographie de l'atténuation d'un pinceau de rayons X traversant la tranche de l'objet sous diverses incidences. Les images sont obtenues par reconstruction algorithmique à partir des différentes mesures, Figure (I. 7), (Fillon, 1996).



a) Principe de la tomographie 3D.

b) Photo 3D avec vue interne après reconstruction.

Fig. I. 7 Tomographe industriel.

I.3.6 Thermographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées. Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique, Figure (I. 8), (Choua, 2010).

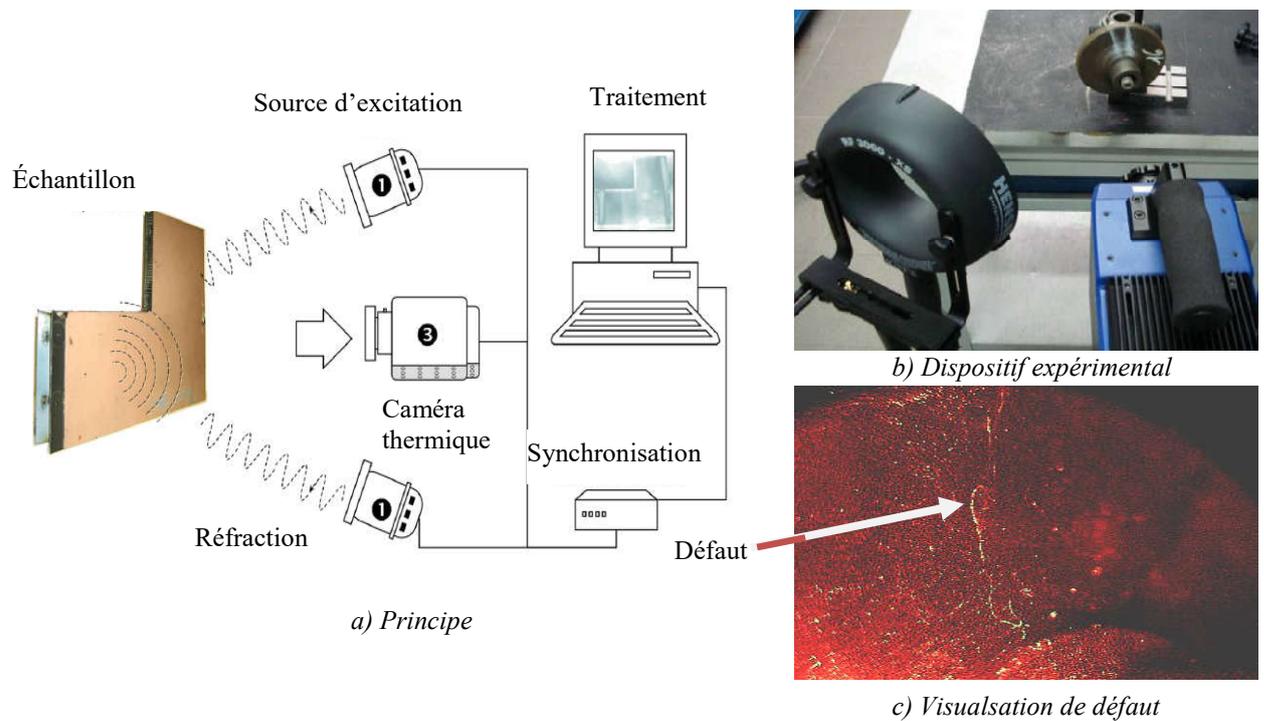


Fig. I. 8 CND par thermographie.

I.4 Procédés électromagnétiques

I.4.1 Principe de la détection par courants de Foucault

Lorsqu'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps, où dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci, ce sont les courants de Foucault (physicien français 1819-1868). Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifie par là-même l'impédance de cette bobine, (Figure (I. 9)), (Maurice, 1996), (Mix, 2005).

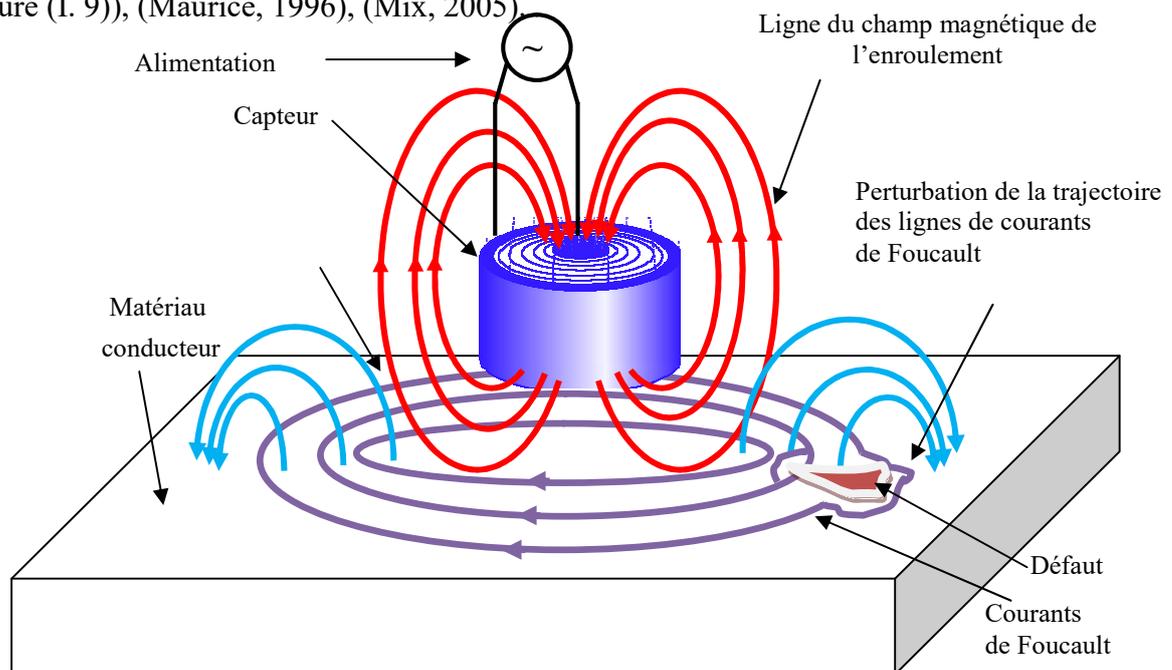


Fig. I. 9 Principe de la détection par courants de Foucault.

I.4.2 Champ d'application

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs et ferromagnétiques, elle est utilisée pour détecter des défauts superficiels ou sous-cutanés (les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau). elle est utilisée en milieu industriel notamment dans le contrôle des, tubes, barres, fils, surfaces planes et même pour le tri de nuances de matériaux conducteurs et mesure dimensionnelle.

I.4.3 Avantages et inconvénients

➤ Avantages

- ✓ Grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales ...), avec possibilité d'en évaluer la profondeur;
- ✓ Recherche de défauts débouchant et obstrués ou situés à des profondeurs faibles;
- ✓ Automatisation aisée, résultats immédiats;
- ✓ Possibilité de contrôle des pièces longues, possibilité de défilement à grande vitesse, absence de contact entre la sonde et la pièce à contrôler;
- ✓ Permet d'effectuer des mesures dimensionnelles (mesure d'épaisseur des revêtements isolants ou de conductivité très différente de celle du substrat);
- ✓ Possibilité de mesurer à des températures élevée (900°) et même sous l'eau;
- ✓ Très utile pour les contrôles en maintenance (tubes de générateurs de vapeur, remontées mécaniques, ponts suspendus, moteurs d'avions ...);
- ✓ Utile pour le tri de pièces dont la conductivité électrique est différente (même alliage, mais traitement thermique différent, nuances d'alliages mélangées accidentellement ...);
- ✓ Transportabilité de l'équipement, coût faible;
- ✓ Aucun inconvénient relié à l'environnement ou à la sécurité.

➤ Inconvénients

- ✓ Méthode utile que pour les défauts externes seulement;
- ✓ Limité aux matériaux conducteurs d'électricité;
- ✓ Très sensible, détecte parfois des défauts inappropriés;
- ✓ Se limite à des formes de pièces assez simples;
- ✓ Mesures locales, peu adaptées à des balayages rapides de grandes surfaces planes;
- ✓ Difficile à mettre en œuvre pour l'examen complet de pièces de formes complexes; (nécessité de fabriquer des sondes spécifiques);
- ✓ Interprétation des signaux délicate, nécessitant une formation spécifique des opérateurs;
- ✓ Sensible à de nombreux paramètres dont il faut maîtriser la variation, (Fillon, 1996), (Maurice, 1996), (Mix, 2005).

I.5 Méthodes couplées

Les méthodes conventionnelles que nous venons de présenter, et dont la liste n'est pas exhaustive, constituent les briques de bases de méthodes plus complexes élaborées en couplant différentes techniques afin d'enrichir les données d'observation, de combiner leurs avantages en cherchant à s'affranchir de leurs inconvénients. Parmi ces méthodes dites couplées, on peut citer celles utilisant les laser-ultrasons qui permettent de s'affranchir du couplant nécessaire en ultrasons, les méthodes électromagnétiques ultra-sonores, magnéto-optiques ou encore thermo-optiques. Ces techniques font actuellement l'objet d'intenses recherches, (Thomas, 2010).

I.6 Synthèse comparative des techniques utilisées en CND

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

Tableau I. 1 Comparaison des procédés de CND les plus connus.

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

Ces techniques sont parfois difficilement comparables car elles répondent à un cahier des charges ou à des mises en œuvre particulières. Mais leurs performances respectives peuvent éventuellement être évaluées voire comparées à l'aide des critères tels que: le coût, la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité. Le Tableau (I. 2) présente un simple comparatif des principales techniques de CND, (Choua, 2010).

Tableau I. 2 Comparaison des performances des principaux procédés de CND ; (Choua, 2010) .

Procédé	Coût	Durée de contrôle	Reproductibilité	Sensibilité	Contraintes
Thermographie	Plus cher	Longue	Facile	Sensible	Lenteur du contrôle
Ressuage	Cher	Longue	Difficile	Moins Sensible	Toxicité
Ultrasons	Plus cher	Longue	Difficile	Très Sensible	Nécessite couplant
Radiographie	Trop cher	Longue	Facile	Moins Sensible	Rayon X
Courants de Foucault	Moins cher	Moins longue	Très facile	Sensible	Matériaux conducteurs

I.7 Capteurs à courants de Foucault

Les capteurs à courants de Foucault utilisent les propriétés conductrices de la cible en regard de laquelle est placé un circuit magnétique de grande perméabilité (en ferrite généralement) sur lequel est bobiné un enroulement d'excitation alimenté avec des fréquences élevées de manière à réduire l'épaisseur de peau. A l'approche du circuit magnétique, cette cible devient le siège de nappes de courants surfaciques (dits de *Foucault* ou encore désignés dans le monde anglo-saxon par *eddy-current* "courants tourbillonnants"), elles-mêmes génératrices d'un champ magnétique qui s'oppose au champ incident, (Bouchala, 2014).

La conjonction des deux sources de champ entraîne une nouvelle répartition des lignes de champ qui se traduit par une modification de la réluctance au niveau du capteur. La détection se fait, soit par la mesure de l'amplitude des oscillations, soit par celle du courant consommé par l'oscillateur due à la variation de la réluctance, soit encore par un bobinage secondaire qui recueille la force électromotrice créée par la variation de la réluctance, (Mauris, 1992).

En contrôle par capteurs à courants de Foucault, c'est l'analyse de la variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps

considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, ce qui conduit à une modification du champ induit, lequel s'oppose à chaque instant au champ d'excitation (loi de Lenz). Conséquence, le courant traversant la bobine d'excitation varie. Autrement dit, l'impédance Z_0 de la bobine est modifiée ($Z_2 \neq Z_1 \neq Z_0$), (Figure.(I. 10)).

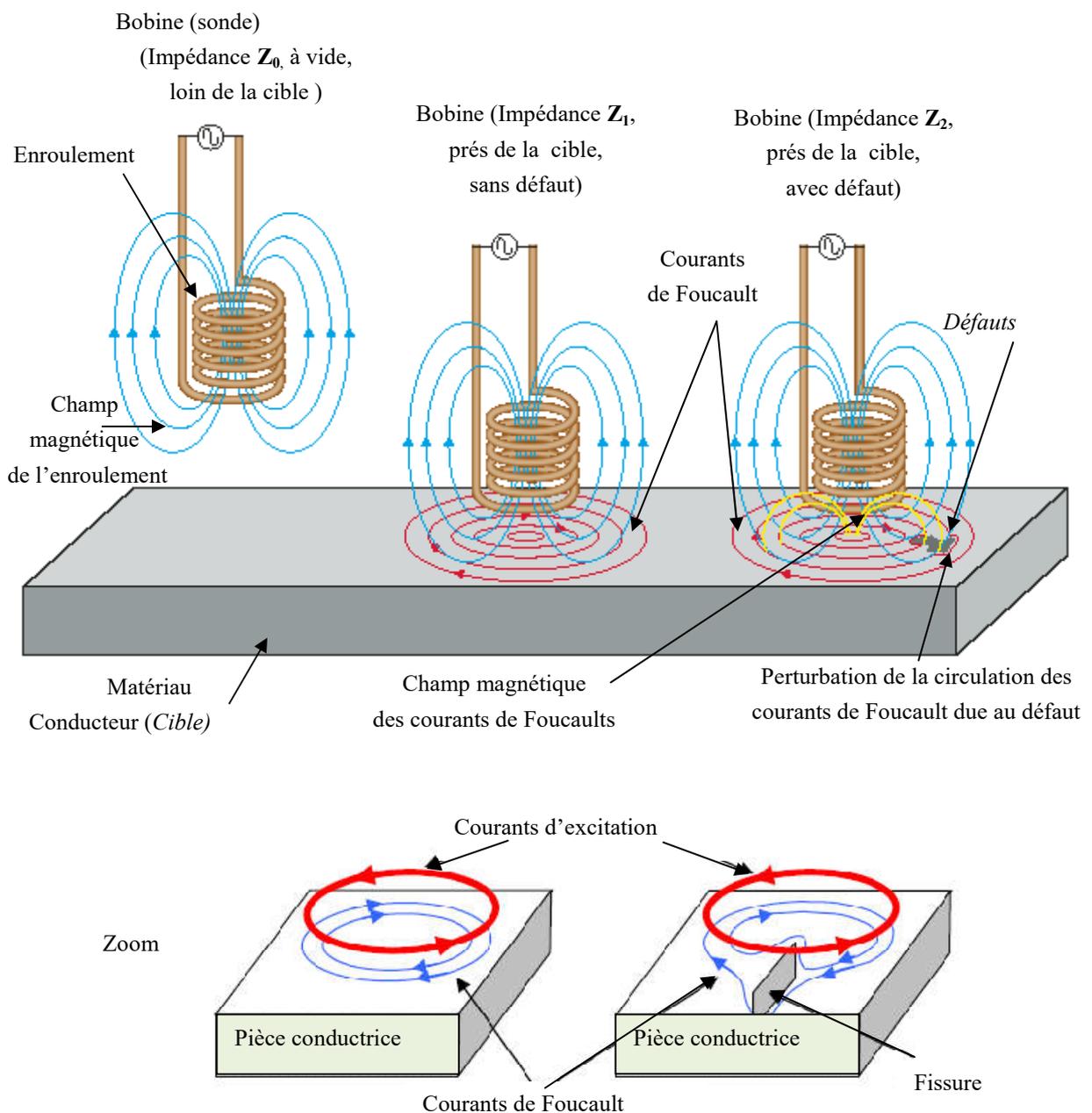


Fig. I. 10 Variation de l'impédance lors de l'apparition d'un défaut.

Remarque: Il est à noter que les fissures parallèles aux courants de Foucault ne sont détectées car ils ne perturbent pas la trajectoire de ces courants.

I.7.1 Profondeur de pénétration

Le principe des capteurs inductifs est surtout utilisé pour détecter des défauts situés à proximité de la surface de la pièce étudiée, car les courants de Foucault ont tendance à se cantonner dans les couches proches de la surface du conducteur. Cette épaisseur moyenne δ (en m) dite de "peau" dans laquelle circule les courants peut être estimée à l'aide de la formule:

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

avec: σ : Conductivité électrique en S.m (Siemens - mètre).

μ : Perméabilité magnétique en H/m (Henry par mètre).

f : Fréquence de travail ($\omega = 2\pi f$: pulsation) en Hz (Hertz).

La densité de courant décroît de façon exponentielle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface (Figure (I. 11)). On quantifie cet effet de peau par une profondeur de pénétration δ , profondeur sous la surface pour laquelle la densité de courant de pénétration J_δ est:

$$J_\delta = \frac{J_s}{e} \quad (\text{I.2})$$

Où: J_s : Densité du courant en surface.

$e = 2,718$ Base des logarithmes népériens.

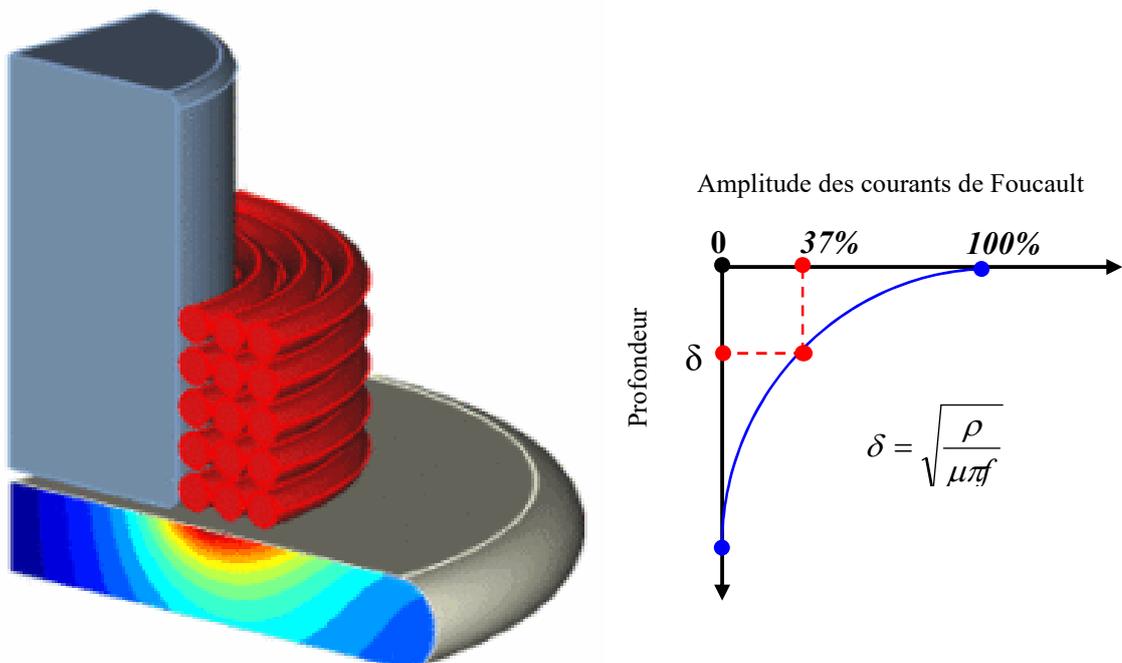


Fig. I. 11 Profondeur de pénétration, (Lai, 2005).

Il en résulte qu'environ 63 % des courants induits passent entre la surface et cette profondeur δ , créant une zone de forte sensibilité et qui est très importante du point de vue de la sensibilité aux interactions avec les défauts de surface, (Lacroix, 1996).

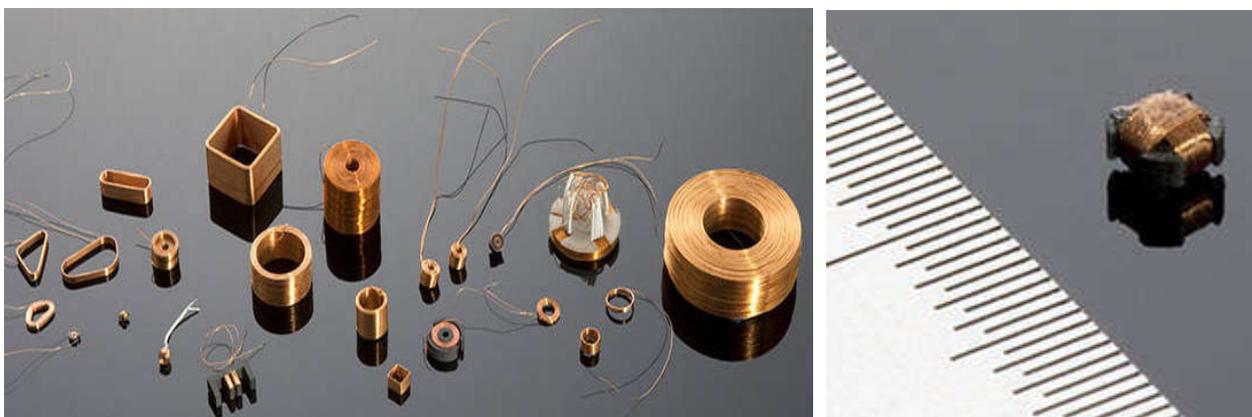
I.7.2 Mise en œuvre du contrôle

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

- ✓ Structure
- ✓ Forme
- ✓ Fonction
- ✓ Mode de contrôle.

I.7.2.a. Montage des sondes

Les sondes comporte des bobines avec ou sans noyau magnétique (Figure (I. 12)), ce dernier est utilisé pour limiter les zones d'interaction de la bobine, on couple généralement celle-ci avec un circuit magnétique de grande perméabilité. Celui-ci peut être réalisé en tôle feuilletée à basse fréquence ou en ferrite pour les fréquences élevées. Son rôle est de canaliser les lignes de champ magnétique.



a) Bobines sans noyau magnétique

b) Bobine avec noyau magnétique (Ferrite)

Fig. I. 12 Bobines réelles (Lai, 2005).

La géométrie du circuit magnétique varie selon les applications et la Figure (I. 13) on montre quatre exemples, (Oukhellou, 1997).

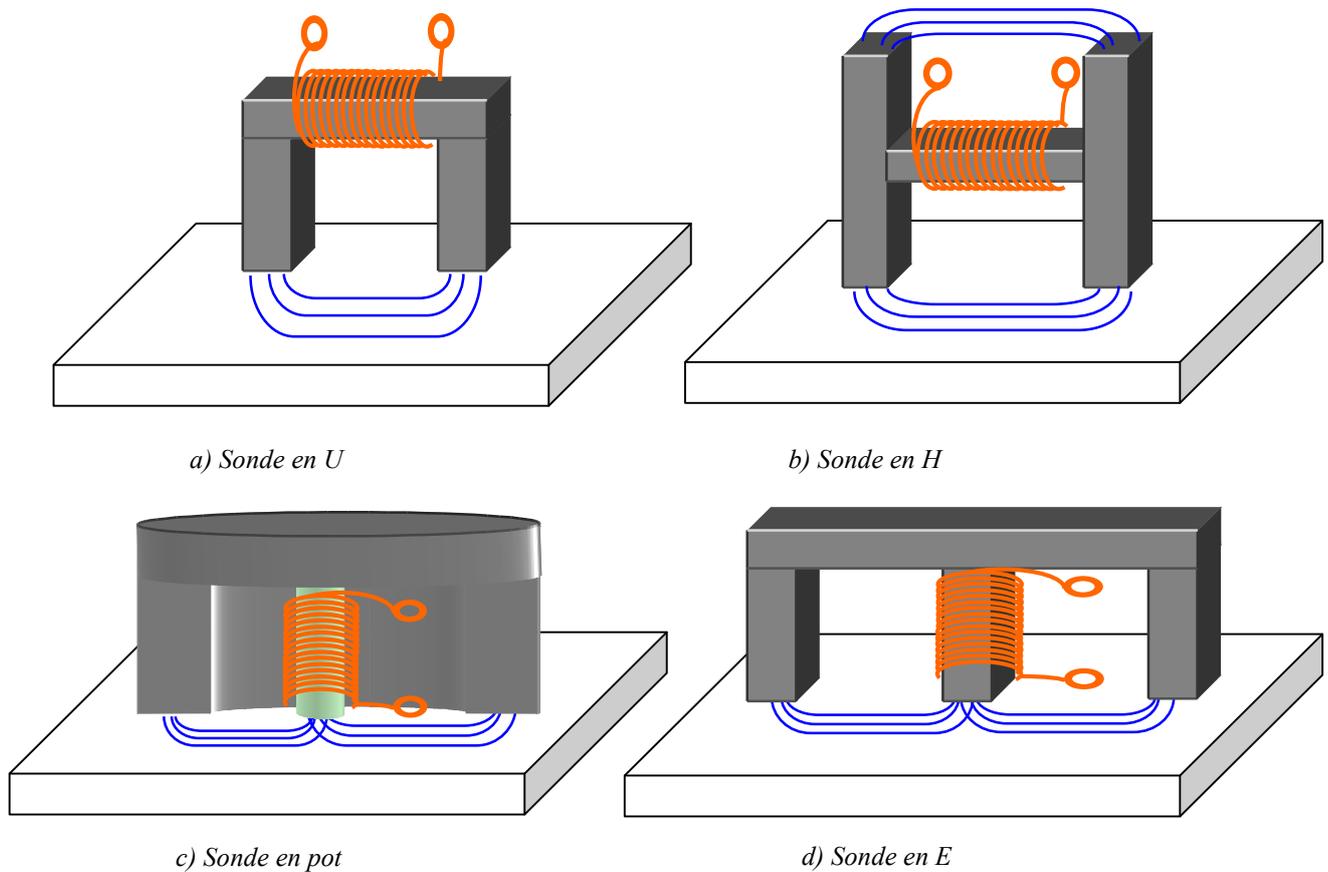


Fig. I. 13 Exemples de différentes géométries de circuit magnétique.

I.7.2.b. Branchements électriques

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les montages de base à partir desquels d'autres montages peuvent être envisagés selon la nature du produit à contrôler. Selon leurs fonctions, il existe deux types de capteurs, Figure (I. 14):

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

➤ Capteur à double fonction

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

➤ *Capteur à fonctions séparées*

Connu aussi sous le nom de systèmes à bobinage double, dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par des enroulements distincts. A l'inverse du premier, il est constitué de 2 bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications dues au matériau, c'est-à-dire qu'elle servira uniquement pour la mesure ; on parle alors de mesure par trans-impédance, (Oukhellou, 1997).

Ces bobinages sont moulés dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle induction. Ce montage est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1000$ Hz) pour le contrôle de matériaux magnétiques (élimination de l'effet de variations de température), Figure (I. 14).

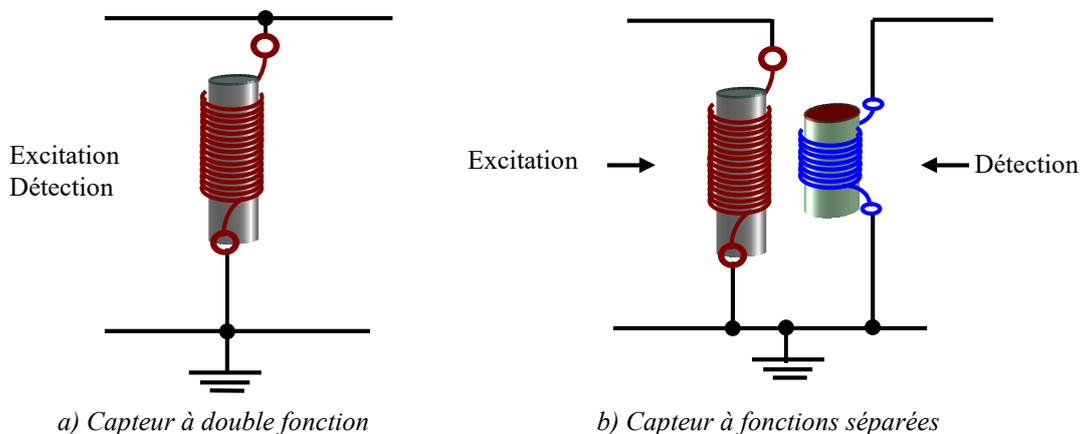


Fig. I. 14 Fonctions d'un capteur.

I.7.2.c. Mode de contrôle

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

➤ *Mode absolu*

Un capteur en mode absolu permet d'accéder à toutes les grandeurs utiles et également perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique μ et la conductivité électrique σ du matériau à tester), (Figure (I. 15), (Lacroix, 1996).

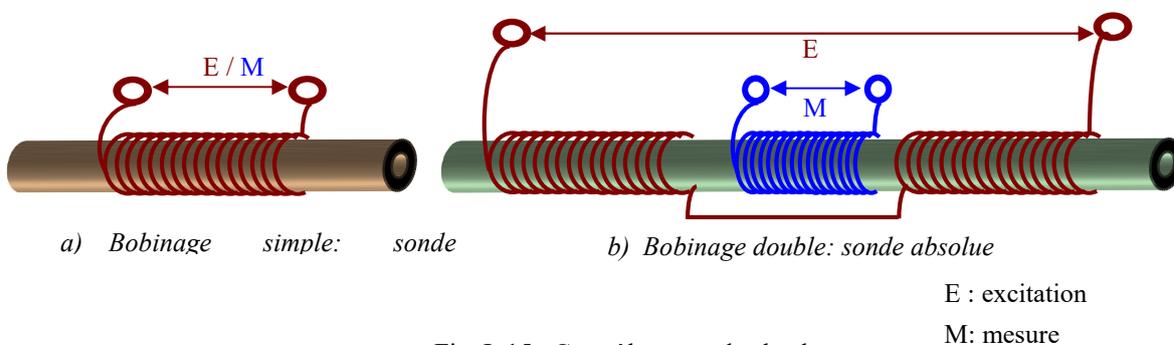


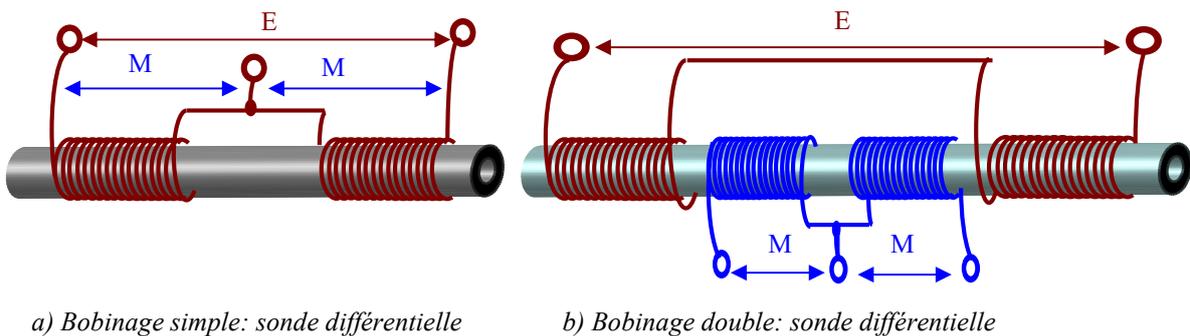
Fig. I. 15 Contrôle en mode absolu.

Remarque: Pour s'affranchir de certaines grandeurs perturbatrices, et afin de faciliter les réglages dans le plan d'impédance, on utilise la sonde en mode absolu avec référence externe (mode absolu

compensé), la bobine de mesure est associée à une bobine externe alimentée dans les mêmes conditions et qui lui sert de référence.

➤ Mode différentiel

Un capteur en mode différentiel est un capteur destiné à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines, (Benhadda, 2015). La bobine de réception comporte deux enroulements montés en opposition. Dans de nombreux cas de contrôle, il est très difficile de neutraliser les effets perturbateurs qui brouillent les signaux de défauts, tels que les variations locales du *lift-off* ou de la perméabilité magnétique par exemple. Une solution élégante pour contourner cette difficulté inhérente à l'emploi d'une bobine unique est d'utiliser un capteur constitué de deux bobines identiques placées côte à côte et montées en différentiel électrique, de telle façon que les variations locales de propriétés électromagnétiques aient tendance à affecter les deux sondes et ne créent pas de déséquilibre, alors qu'un défaut unitaire affectera une bobine à la fois et pourra être détecté grâce au double signal de déséquilibre ainsi engendré (détection de défauts par asymétrie). La Figure (I. 16) présente un montage différentiel pour le contrôle d'une barre pour un bobinage simple et double.



a) Bobinage simple: sonde différentielle

b) Bobinage double: sonde différentielle

E : excitation

M: mesure

Fig. I. 16 Contrôle en mode différentiel.

Caractéristiques des sondes en mode différentiel:

- ✓ Constituée par deux bobines côte à côte ou concentriques;
- ✓ Moindre sensibilité au lift off;
- ✓ Détection de défauts par asymétrie;
- ✓ Application: recherche de défauts courts.

I.7.3 Disposition des bobines

Les sondes à courants de Foucault sont extrêmement variées et il est impossible de les décrire toutes brièvement. Leurs dimensions varient du millimètre pour les plus petites sondes pick-up utilisant un noyau de ferrite, jusqu'à 120 ou 140 mm de diamètre pour les sondes les plus encombrantes, (G Asch, 2002).

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

1.7.3.a. Capteurs encerclants

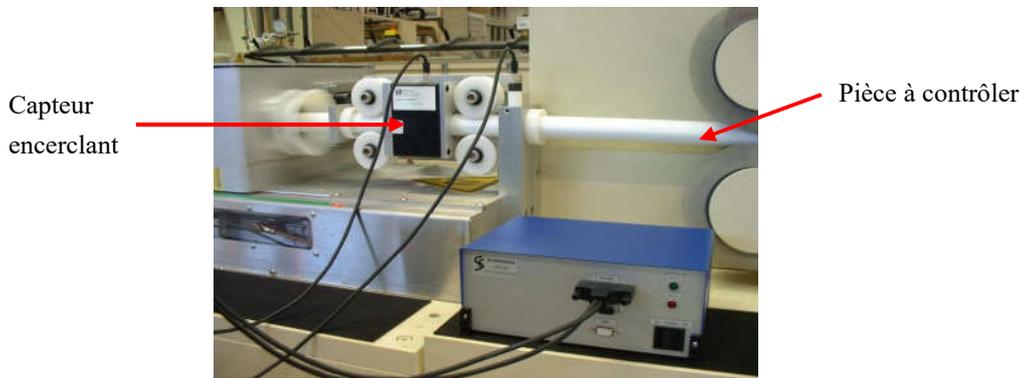
Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Elles analysent un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active de la bobine; les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit. Les capteurs encerclants sont destinés au contrôle au défilé des produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres, tubes et petits profilés métallurgiques, (Figure (I. 17)), (Lacroix, 1996).



a) Contrôle d'un tube



b) Différents modèles de capteurs encerclants



c) Contrôle de tube en cours de production

Fig. I. 17 Capteurs encerclants, (Lai, 2005).

1.7.3.b. Capteurs internes

Ils sont destinés à l'examen d'un produit par l'intérieur pour le contrôle des produits par l'intérieur, les bobines sont moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit; ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques, condensateurs ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire, (Figure (I. 18)).

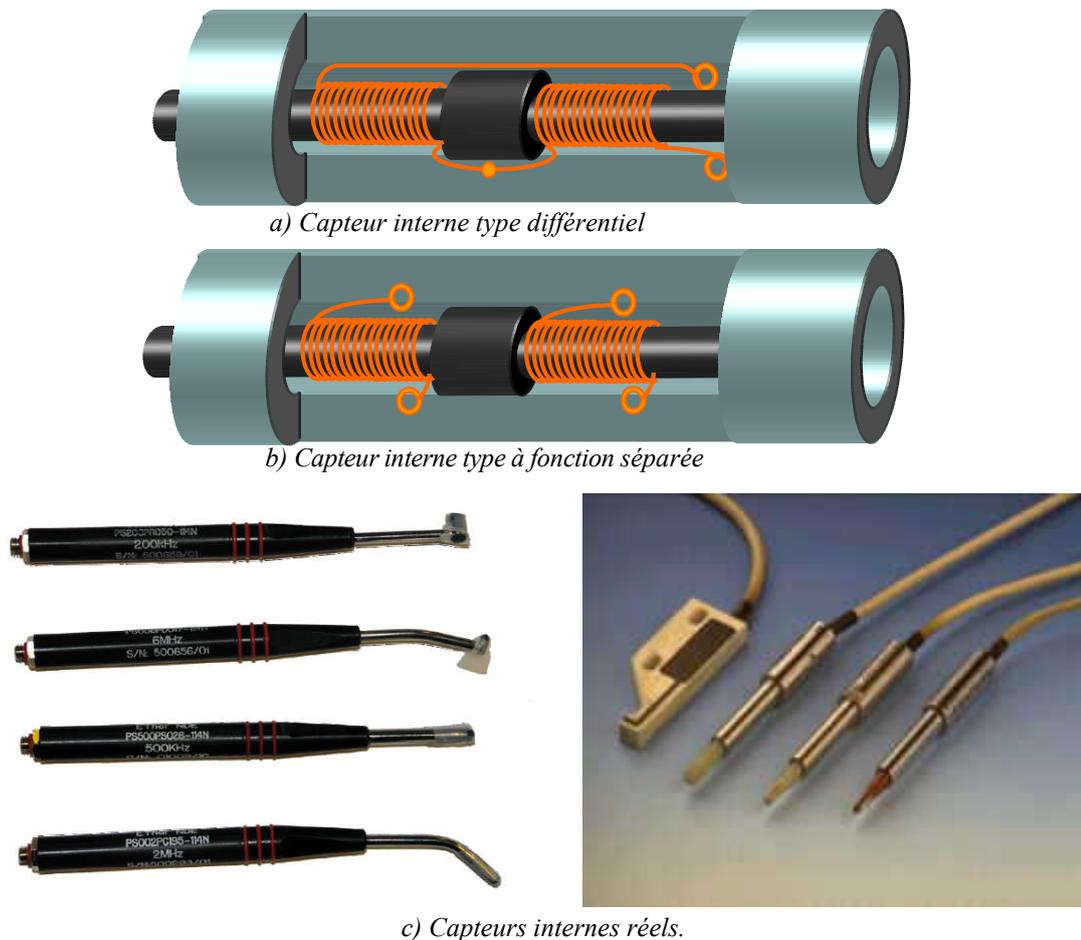


Fig. I. 18 Capteurs internes, (Mix, 2005).

I.7.3.c. Capteurs sondes

Ils sont connus aussi sous le nom de palpeurs ou bobines ponctuelles. Ces sondes comportent un ou plusieurs bobinages et peuvent être placées sur, ou à proximité de la surface de la pièce à contrôler, ils sont généralement moulées sur un noyau de ferrite d'axe perpendiculaire à la surface, très perméable aux faibles champs alternatifs, tout en gardant une bonne sensibilité ponctuelle de détection des défauts les plus fins. Ils analysent une zone quasiment égale à l'aire de leurs sections transversales. Ils permettent donc une inspection locale de la pièce et ils peuvent atteindre des régions d'accès réputées difficiles.

La géométrie des sondes est fonction des cibles à contrôler et du dimensionnement des fissures recherchées, ainsi on peut trouver des sondes plus ou moins à tête large (embase plate) pour le contrôle de surface importante et pour défauts relativement grands, (Figure (I. 19.a)). D'autre part on trouve des sondes à tête très fine (tête de crayon) pour permettre l'inspection dans les espaces restreints et pour détecter de petites discontinuités. Elles sont disponibles avec un support droit ou coudé, qui facilite la manipulation, (Figure (I. 19.b)).

Ces capteurs sont adaptés aux explorations ponctuelles en contrôle manuel ou au balayage de grandes surfaces en contrôle automatique.



a) Sondes à tête large (embase plate)

b) Sondes à tête fine

Fig. I. 19 Capteur sonde.

I.7.3.d. Sondes particulières

➤ Sonde tournante

C'est une sonde interne ou encerclante particulière, le produit à contrôler est déplacé longitudinalement à travers des sondes tournantes créant ainsi un pas d'inspection hélicoïdal. (Figure (I. 20)); les vitesses (translation et rotation) sont combinées pour avoir un recouvrement des zones contrôlées à chaque passage.

Plus sensible que les sondes encerclante avec une meilleure détection de fissures axiales, mais plus fragile en plus d'un allongement du temps d'examen, étant donnée, la vitesse de rotation (800 à 1500 tr/min suivant les modèles) et la distance entre sonde et cible, (Lacroix, 1996).

La longueur minimale d'un défaut pouvant être détecté de manière systématique est fonction de la vitesse de rotation des sondes et de la vitesse de déplacement du produit.

Elles sont utilisées pour, la détection de défauts type fissure sur fil étiré à froid ou barres en longueur, le contrôle en ligne avec opérations sur fil en continu telles que étirage, formage y compris fabrication de ressorts, re-bobinage ou dressage et coupe.

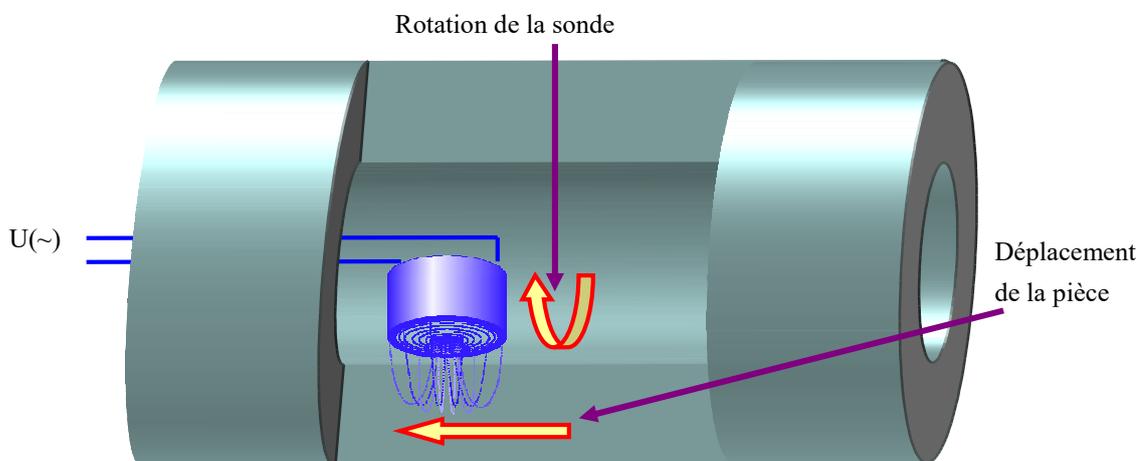


Fig. I. 20 Sonde rotative.

Une tête de contrôle comprenant 4 sondes à 90° est en général utilisée pour diminuer la vitesse de rotation et l'influence des variations d'entrefer. Les liaisons électriques sonde – appareillage de contrôle sont réalisées par l'intermédiaire de collecteurs ou de transformateurs tournants.

➤ Sonde à bobines perpendiculaires

Constituée de deux bobines perpendiculaires entre elles, généralement utilisée en mode différentiel, caractérisée par, (Figure (I. 21)):

- ✓ Une forte sensibilité aux fissures orientées selon l'un des axes de bobine,
- ✓ Une faible influence du lift off, de la conductivité et de la perméabilité,
- ✓ Une faible sensibilité aux fissures orientées à 45° ou 135° .

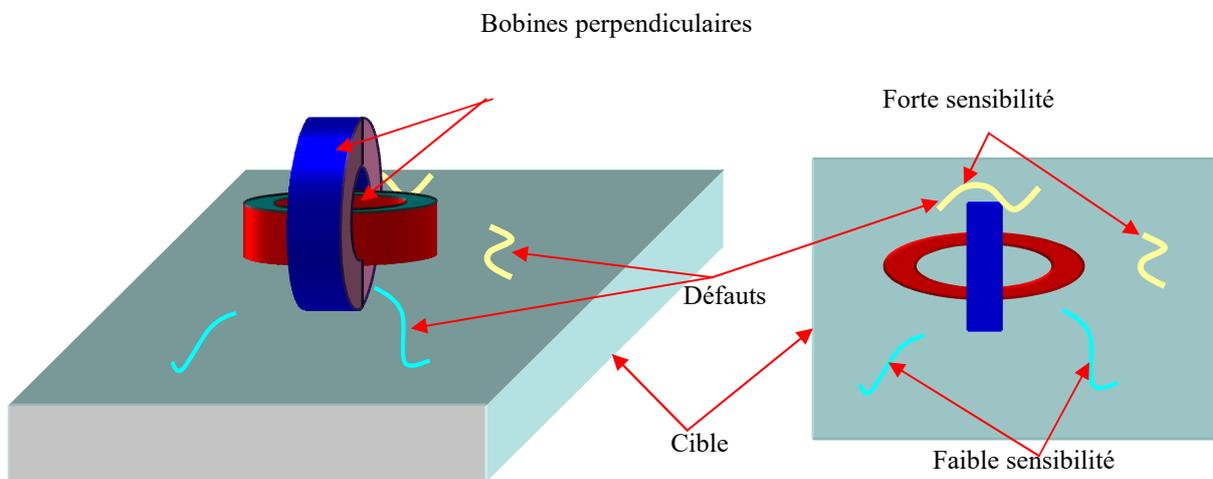


Fig. I. 21 Sonde à bobines perpendiculaires.

1.7.4 Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND

Les courants de Foucault constituent un moyen de contrôle particulièrement fidèle, les plus faibles variations du signal étant exactement reproduites lors d'un second contrôle dans les mêmes conditions. Cette caractéristique est particulièrement intéressante en maintenance des matériels, notamment pour suivre leur évolution lors des contrôles périodiques.

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

- ✓ Mesure de conductivité électrique ;
- ✓ Mesure de l'épaisseur de revêtements isolants ;
- ✓ Détection de fissures ;
- ✓ Contrôle des tubes, barres et fils ;
- ✓ Détection d'objets métalliques dans un environnement isolant.

I.8 Conclusion

La première constatation qu'on peut tirer c'est qu'il n'y a pas de technique valable pour tous les matériaux et pour tous les types de défauts, on est souvent amené à combiner deux ou plusieurs méthodes. Devant la diversité des techniques de contrôle non destructif, un choix s'impose. Mais comme souvent dans ces cas là, chacune des techniques a ses particularités et son champ d'application privilégié. Pour bien choisir, il faut en connaître les avantages et surtout les limites.

Le choix d'un procédé est généralement conditionné par plusieurs facteurs, nous citerons:

- ✓ *Nature et superficie de la cible,*
- ✓ *Nature des fissures recherchées,*
- ✓ *Critères technico-économiques,*
- ✓ *Degré d'automatisation,*
- ✓ *Rapidité et simplicité d'utilisation,*
- ✓ *Portabilité et possibilité du contrôle en temps réel,*
- ✓ *Simplicité et disponibilité des équipements.*

Nôtre choix du procédé de contrôle par courants de Foucault, fût conditionné par les facteurs précédemment cités et particulièrement à cause des matériaux conducteurs et ferromagnétiques, qui forment l'ossature principale des équipements électriques.

Le CND par courants de Foucault est largement employé pour inspecter les matériaux électriquement conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances.

D'une façon générale, la simulation constitue une aide à l'interprétation et à la compréhension des phénomènes physique. Dans le domaine du CND-CF, la simulation contribue à réduction des coûts des essais non destructifs et à optimiser les performances de cette méthode.

Le logiciel de simulation, via la modélisation électromagnétique, permet de simuler l'interaction sonde-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux, ...) sans avoir à réaliser de prototypes multiples. Dans le domaine du CND par courants de Foucault, la modélisation numérique est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, un acteur important dans la conception de sondes, c'est pour ces raisons que le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du CND-CF.

Chapitre II

Modélisation des Phénomènes

Électromagnétiques dans le CND par CF

II.1	Introduction	28
II.2	Méthodes de résolution.....	29
II.2.1	Méthodes analytiques	29
II.2.2	Méthodes numériques	29
II.3	Modélisation du dispositif de CND par CF	31
II.4	Mise en équations.....	31
II.4.1	Equations de Maxwell	31
II.4.2	Conditions aux limites	33
II.4.3	Conditions de continuité	33
II.4.4	Hypothèses simplificatrices	34
II.5	Formulations magnétodynamiques	35
II.5.1	Formulations basées sur le champ électrique E	35
II.5.2	Formulation en A-V	36
II.5.3	Formulation en H	36
II.5.4	Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T- Φ	37
II.5.5	Comparaison entre les formulations	37
II.6	Conclusion	37

Chapitre II Modélisation des Phénomènes Électromagnétiques dans le CND par CF

II.1 Introduction

Les outils de simulations sont devenus un moyen très efficaces, d'une part, pour contourner les problèmes rencontrés lors de l'étude paramétrique expérimentale, telle que, la non disponibilité d'échantillons de référence, les nombreux essais et échantillons ou le coût de l'élaboration d'un banc d'essai de contrôle, (Helifa, 2012), et d'autre part, il est possible de prévoir les conséquences des différents choix (configurations géométriques, choix des matériaux, ...), ainsi que le comportement du système et son optimisation avant d'entamer la phase de réalisation de prototype. L'utilisation de la modélisation a donc un intérêt économique évident et dans la majorité des cas indispensable, (H. Hashizume, 1992) (Benhadda, 2015).

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

Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique. (Choua, 2010).

Dans ce même domaine, la modélisation vise à décrire l'interaction entre la cible et le capteur. Elle permet de résoudre deux problèmes direct et inverse:

✓ **Le problème direct:** *il consiste à mettre en œuvre un modèle mathématique qui permet de prédire les signaux du capteur (l'impédance complexe de la bobine excitatrice par exemple) en connaissant les paramètres de la cible (conductivité électrique, perméabilité magnétique, épaisseurs de la cible, lift-off, dimension de la fissure, ...).*

✓ **Le problème inverse:** *il consiste à remonter à tout ou à une partie des caractéristiques de la cible à partir des résultats de mesure correspondant aux signaux issus du capteur. Dans ce cas, il n'existe en général pas de relations mathématiques inverses explicites.*

Ce chapitre sera décomposé en deux grandes parties. La première est relative à la position d'un problème de CND par CF. Les équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques seront rappelées. Les conditions aux limites du domaine, les conditions de continuité ainsi que les hypothèses simplificatrices seront ensuite introduites.

Dans la deuxième partie, on représentera les différentes formulations en potentiels permettant de résoudre les problèmes magnétodynamiques et on terminera par une comparaison entre ces formulations.

II.2 Méthodes de résolution

La résolution des équations de Maxwell qui régissent le CND par CF peut être analytique ou numérique.

II.2.1 Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell présente l'avantage d'être rapide et permet d'obtenir des résultats très précis. À titre d'exemple, nous pouvons citer les travaux de (Deeds, 1968), (Theodoulidis, 2003) et (Theodoulidis, 2005) qui ont procédé à des résolutions directes des équations de Maxwell, par la méthode de séparation des variables. Parmi ces travaux on retrouve:

- ✓ Une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de deux couches métalliques parallèles de matériaux différents, (J. W. Luquire, 1970) .
- ✓ Une bobine de section rectangulaire encerclant deux cylindres métalliques concentriques (Deeds, 1968).

Des développements plus récents permettent notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane (Theodoulidis, 2003) ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane, (Theodoulidis, 2005) .

Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent soit impossible à obtenir, soit très complexe et très coûteuse en ressources de calcul. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques, (Choua, 2010), (Hamia, 2006), (Beltrame, 2002).

II.2.2 Méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. Parmi ces méthodes, on pourra citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontières, la méthode des intégrales de volume et la méthode des éléments finis (MEF).

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

✓ **La méthode des éléments de frontières:** Dans cette méthode les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse due à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques.

✓ **La méthode des intégrales de volumes:** repose sur la résolution des équations intégrales précédemment citées. Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée sont 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.

✓ **La méthode des éléments finis:** est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques, Figure (II. 1):

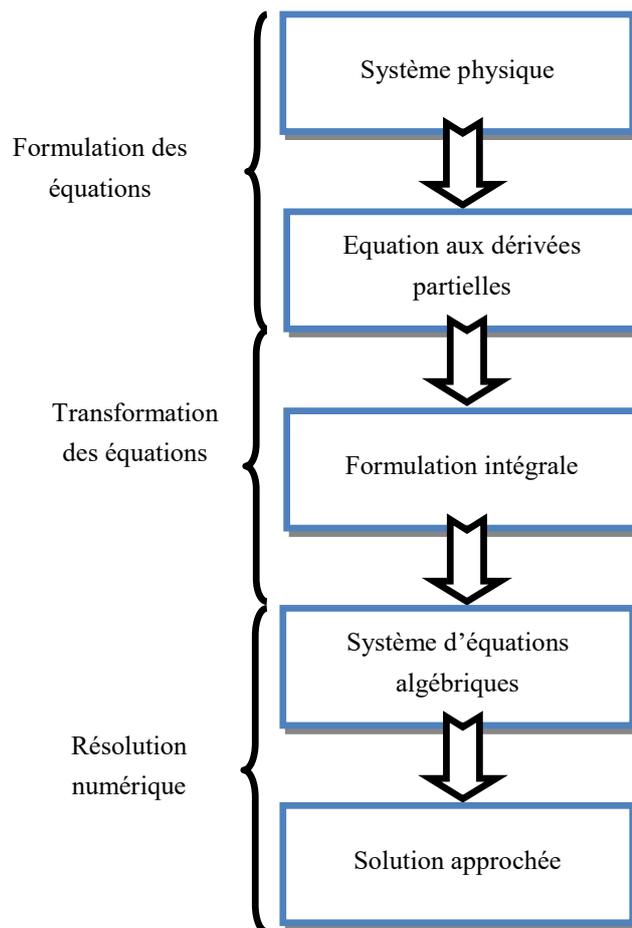


Fig. II. 1 Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF, (Choua, 2010).

D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes, Figure (II. 1):

- ✓ Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles.
- ✓ Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres . . .) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local
- ✓ Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
- ✓ Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

II.3 Modélisation du dispositif de CND par CF

La géométrie du système de CND-CF, qui est régie par les équations de Maxwell en régime linéaire harmonique, peut être décomposée en trois zones, (Choua Y, 2007), Figure (II. 2):

- ✓ Zone 1: zone inductrice (bobine, fil,...) dans lesquelles circulent des courants sources J_s ,
- ✓ Zone 2: zone conductrice, caractérisée par une perméabilité μ et une conductivité δ , qui le siège des courants induits,
- ✓ Zone 3: zone d'espace environnant où il n'y a ni courant induit ni courant source, c'est de l'air. La totalité de cette géométrie forme le domaine d'étude Ω de frontière Γ_L .
- ✓ Zone 4: zone conductrice magnétique (noyau en ferrite,...) pour canaliser le flux magnétiques.

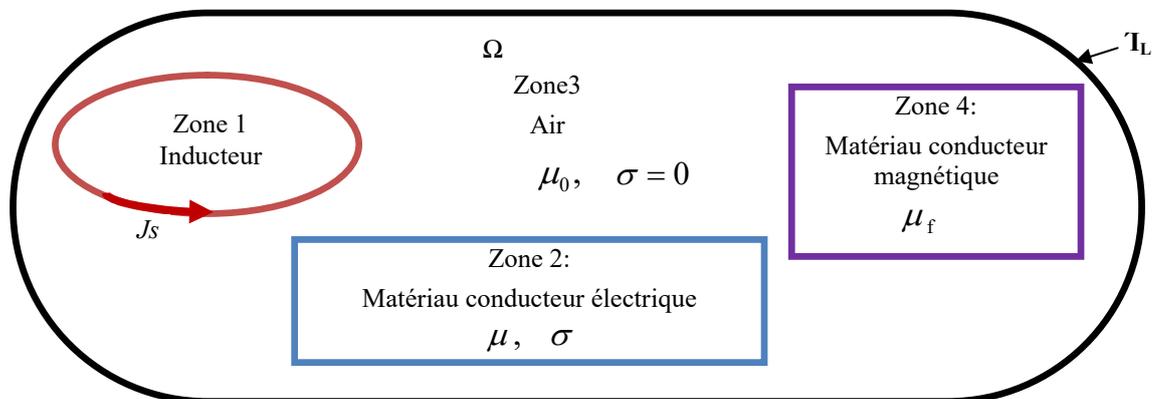


Fig. II. 2 Schéma descriptif d'un problème type de CND par CF.

II.4 Mise en équations

II.4.1 Equations de Maxwell

Michel Faraday (1791-1867) est le premier à décrire en 1831 le phénomène d'induction électromagnétique sur une spire conductrice placée à proximité d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps. Léon Foucault (1819-1868) découvrit ensuite les courants induits par un champ électromagnétique dans une masse métallique conductrice; ces derniers créent à leur

tour un champ induit qui s'oppose au champ inducteur selon la loi de Lorenz (1804-1865) énoncée en 1834, (Choua, 2010).

En effectuant une synthèse des travaux réalisés dans le XIX^e siècle, James Clerk Maxwell (1831-1879) a formulé une description complète des phénomènes électromagnétiques vers 1875.

Pour les applications de CND par CF, les fréquences d'excitation utilisées pour la détection de défauts profonds, ne dépassent généralement pas le MHz. Dans ces conditions, nous pouvons négliger les courants de déplacement.

Les équations de Maxwell lient entre eux les champs électrique et magnétique. Ce sont des équations locales qui s'écrivent comme suit:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_s + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Théorème d'Ampère-Maxwell} \quad (\text{II.1})$$

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

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad \text{Théorème de Gauss} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation de flux} \quad (\text{II.4})$$

Où ∂t symbolise la dérivée partielle par rapport au temps, ρ qui représente la densité volumique de charges électriques (C/m³) et deux types de champs de vecteurs:

- ✓ Les champs d'intensité:

\vec{E} Champ électrique (V/m),

\vec{H} Champ magnétique (A/m).

- ✓ Les densités de flux:

\vec{D} Induction électrique (C/m²),

\vec{B} Induction magnétique (Wb/m² ou T),

\vec{J} Densité de courant de conduction (A/m²).

L'équation (II.1) est une généralisation de la loi d'Ampère, $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_s$. Elle constitue avec (II.2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (II.3) et (II.4) constituent les équations dites de conservation. L'utilisation directe des équations de Maxwell pour la résolution des problèmes en électromagnétisme est parfois déconseillée, puisque nous devrions prendre en compte ces quatre équations différentielles simultanément. Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (II.1 à II.4) serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes:

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

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

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

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, (Thomas, 2010).

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.1) à (II.7), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions: les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les jauges, (Zaoui, 2008).

II.4.2 Conditions aux limites

Pour un domaine Ω de frontière Γ , avec \vec{n} un vecteur unitaire normal pour une variable u , il existe deux conditions:

- ✓ Condition de Dirichlet homogène $u \cdot \vec{n} = 0$
- ✓ Condition de Neumann homogène $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$

II.4.3 Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités. Cependant, il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux. Considérons deux milieux Ω_1 et Ω_2 ayant des propriétés physiques différentes et séparés par une interface Σ comme le montre la Figure (II. 3).

Les conditions traduisant la continuité des champs à l'interface Σ sont alors définies par les relations suivantes: (Benhadda, 2015).

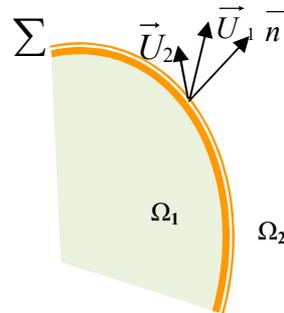


Fig. II. 3 Interface entre deux milieux différents.

Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique \vec{E} .

$$\vec{E}_1 \wedge \vec{n} = \vec{E}_2 \wedge \vec{n} \quad (\text{II.8})$$

Continuité de la composante normale du vecteur d'induction magnétique \vec{B} .

$$\vec{B}_1 \wedge \vec{n} = \vec{B}_2 \wedge \vec{n} \quad (\text{II.9})$$

Discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique \vec{H} .

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

Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique \vec{D} en présence de charges superficielles ρ_s :

$$\vec{n}(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \quad (\text{II.11})$$

Où:

\vec{n} : Vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux Ω_1 et Ω_2 ,

\vec{J}_s : Densité surfacique d'une nappe de courant entre les deux milieux.

L'ensemble des équations, précédemment présentées, décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais dans la plupart des cas, nous ne pouvons pas les résoudre directement, (Beltrame, 2002).

Suivant la forme des dispositifs, certains phénomènes deviennent négligeables. Par conséquent, les équations se simplifient pour donner lieu à des modèles plus simples.

II.4.4 Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux accomplis jusqu'à présent dans le domaine de calcul des champs et des courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, sont fondés sur les hypothèses suivantes:

- ✓ Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$;
- ✓ Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité $\sigma \vec{E}$ peut être décomposée en une partie imposée \vec{J}_s (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour la quelle on gardera la notion de $\sigma \vec{E}$ qui exprime uniquement la densité des courants de Foucault, (Zaidi, 2012) ;
- ✓ La densité surfacique de courant entre les deux milieux est nulle ($\vec{J}_s = \vec{0}$) ;
- ✓ La densité volumique de charge est considérée nulle ($\rho_s = 0$).

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

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s \quad (\text{II.12})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.13})$$

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

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.15})$$

Avec les relations constitutives suivantes:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.16})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.17})$$

L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($\vec{B}_r = 0$) 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 formulation qui permet 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 des champs électrique et magnétique en fonction de potentiels. car la solution converge mieux que si les inconnues étaient les champs (E, H), (Helifa, 2012).

Deux familles de formulations peuvent être mises en évidence.

- ✓ Formulations basées sur le champ électrique ($E, A-V$), formulation en potentiel vecteur magnétique A
- ✓ Formulation basées sur le champ magnétique ($H-\Phi, T-\Omega$), comprend des formulations en H ou la formulation en J , (Benhadda, 2015).

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.1) par rapport au temps, tout en supposant que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit:

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu} (\text{rot} \vec{E}) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II.18})$$

II.5.2 Formulation en A-V

D'après l'équation de la conservation de flux (II.4), l'induction magnétique \vec{B} dérive d'un potentiel magnétique \vec{A} , tel que, (Bensaid, 2006):

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.19})$$

Lorsque cette équation est remplacée dans (II.13), on obtient:

Où \vec{A} est le potentiel vecteur magnétique.

$$\text{rot} \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] = \vec{0} \quad (\text{II.20})$$

Un potentiel électrique v peut être déterminé à partir de l'équation (II.20), qui est donné par la relation ci-après:

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad}(v) \Leftrightarrow \vec{E} = -\text{grad}(v) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.21})$$

La combinaison des équations (II.16) et (II.20) nous permet d'écrire:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} = \vec{J}_s - \sigma \left[\text{grad}v + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] \quad (\text{II.22})$$

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

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu} \text{rot}(\vec{A}) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \text{grad}v = \vec{J}_s \quad (\text{II.23})$$

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, (Helifa, 2012).

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

II.5.3 Formulation en H

La combinaison des équations (II.12) et (II.16) conduit directement à l'équation à résoudre:

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\sigma} \text{rot}(\vec{H}) \right] + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II.25})$$

Aucune condition de jauge n'est nécessaire pour assurer l'unicité de champ magnétique lorsque les conditions aux limites sont adéquates, (RAVAT, 2008).

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

Comme la densité de courant induite est à divergence nulle ($\text{div}\vec{J}=0$), un potentiel vecteur électrique, noté \vec{T} , peut être introduit, tel que, (Bensaid, 2006):

$$\vec{J} = \text{rot } \vec{T} \quad (\text{II.26})$$

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:

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\sigma} \text{rot} \vec{T} \right] + \mu \frac{\partial}{\partial t} \left[\vec{T} - \overrightarrow{\text{grad}} \Phi \right] = \vec{0} \quad (\text{II.27})$$

En fonction de la dimension et de la complexité du problème à traiter, le choix d'une formulation dépend principalement des ressources informatiques, de moyens mis en œuvre et de la 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, (Benhadda, 2015).

II.5.5 Comparaison entre les formulations

Le Tableau (II. 1) récapitule une comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF, (Helifa, 2012), (Zaoui, 2008).

Tableau II. 1 Comparaison entre les formulations les plus utilisées 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	$\vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z, \Phi$	Faible temps de calcul – Réduction inconnues	Problèmes de Régions multiples connexes

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation des problèmes électromagnétiques liés aux équations de Maxwell dans le domaine CND-CF a été présentée, les différentes formulations en champs électrique et magnétique ont été illustrées, ainsi que les méthodes de résolution des problèmes direct ont été abordées. Sur le plan informatique, la méthode des éléments finis conduit à l'écriture de codes de calculs généraux. La plupart des codes de calcul disponibles (Flux 2D et 3D, Maxwell 2D et 3D, ANSYS, COMSOL Multiphysics, etc.) sont basés sur cette méthode, (Zaoui, 2008). Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et simulation du dispositif de CND-CF en mode absolu par la MEF dans le cas d'un défaut conducteur.

Chapitre III

Modélisation et Simulation du Dispositif du CND-CF avec Capteur à Double

Fonction - Cas des Défauts Conducteurs -

III.1	Introduction	38
III.2	Modèle géométrique et description.....	38
III.3	Modèle géométrique	39
III.4	Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique $AV-A$ harmonique.....	39
III.4.1	Calcul de l'impédance	42
III.5	Déroulement de la simulation 3D avec COMSOL Multiphysics	44
III.5.1	Création du domaine de travail.....	44
III.5.2	Caractéristiques géométriques et physiques	45
III.5.3	Maillage	45
III.6	Simulation du CND par CF	47
III.6.1	Tests de validation	47
III.6.2	Résultats de simulation pour défauts conducteurs.....	53
III.7	Paramètres influents sur CND-CF pour défaut fin	59
III.7.1	Effet de la fréquence	59
III.7.2	Effet de la variation du lift-off.....	60
III.7.3	Effet des caractéristiques géométriques du défaut.....	62
III.8	Conclusion.....	66

Chapitre III Modélisation et Simulation du Dispositif du CND - CF avec Capteur Inductif à Double Fonction - Cas des Défauts Conducteurs -

III.1 Introduction

Le monde des équipements industriels est en mutation continue afin de répondre aux exigences incessantes de l'industrie de production et de la compétitivité visant à satisfaire la forte demande des produits manufacturiers. Cela a poussé les industriels à travailler dans des conditions sévères et parfois dans des environnements pollués, cette pollution peut se déposer au sein d'un volume de fissure ce qui provoquera ou induira en erreur l'analyse des résultats lors d'un contrôle non destructif par courants de Foucault et plus particulièrement si le matériau polluant est conducteur. On peut trouver des cas similaires lors des opérations de soudage ou de moulage où il peut y avoir des petits débris conducteurs qui peuvent se fixer avec le matériau de base pendant ces opérations soit par soudage ou moulage, et à long terme ils peuvent nuire à la santé de ce dernier. Pour mettre en évidence ce cas particulier de défauts conducteurs, on doit passer par la modélisation de ces systèmes.

Les outils numériques de simulation d'aujourd'hui sont devenus très performants grâce, d'une part aux avancées technologiques des machines (vitesse d'exécution, mémoire allouée), et d'autre part, aux développements de modèles numériques de plus en plus adaptés aux problèmes rencontrés. Ces outils sont généralement intégrés à des plates-formes de simulations, telles que FLUX 2D ou 3D, ANSYS, CIVA ou COMSOL Multiphysics. Ces logiciels, qui sont en évolution permanente, constituent une plateforme pour toute modélisation de CND visant à caractériser des défauts. Pour notre cas nous avons choisi COMSOL Multiphysics 5.0 vu sa caractéristique principale à savoir qu'il est multidisciplinaire.

Ce chapitre, en premier lieu, nous présenterons la formulation magnétodynamique utilisée pour élaborer notre modèle CND-CF 3-D en mode absolu. Elle est basée sur le potentiel vecteur magnétique, nous allons mettre en évidence l'impact du défaut conducteur sur le signal de l'impédance Capteur-Pièce. Puis, nous étudierons l'effet des paramètres influant sur la réponse du capteur tels que les grandeurs géométriques des défauts, la fréquence et le lift-off.

III.2 Modèle géométrique et description

Différentes structures de capteurs inductifs sont disponibles pour détecter une large variété de défauts. En général, ces capteurs ou sondes captent les défauts avec une grande sensibilité lorsque

les courants induits dans la pièce sous test sont fortement altérés. Les capteurs de type pancake sont formés de bobines dont l'axe est perpendiculaire à la surface de la pièce à tester. Ces capteurs sont destinés pour l'inspection des objets plats, (Feliachi, 2006).

En effet, les courants induits dans la cible sont des circonférences parallèles à la surface. Quand une fissure pénétrante se produit sur la surface, le courant est fortement modifié et la fissure peut être détectée. Cependant, ces types de sondes ne sont pas convenables pour les défauts parallèles à la surface car les courants induits ne sont pas fortement déformés.

III.3 Modèle géométrique

La géométrie axisymétrique du dispositif à modéliser pour un contrôle non destructif par courants de Foucault est représentée sur la Figure (III. 1). Cette dernière inclut la plaque massive conductrice, constituant la pièce à tester et contenant une fissure, elle est soumise à l'action d'un champ électromagnétique produit par la bobine représentant le capteur CF en mode absolu alimenté en courant sinusoïdal, où une densité de courant variable dans le temps est imposée.

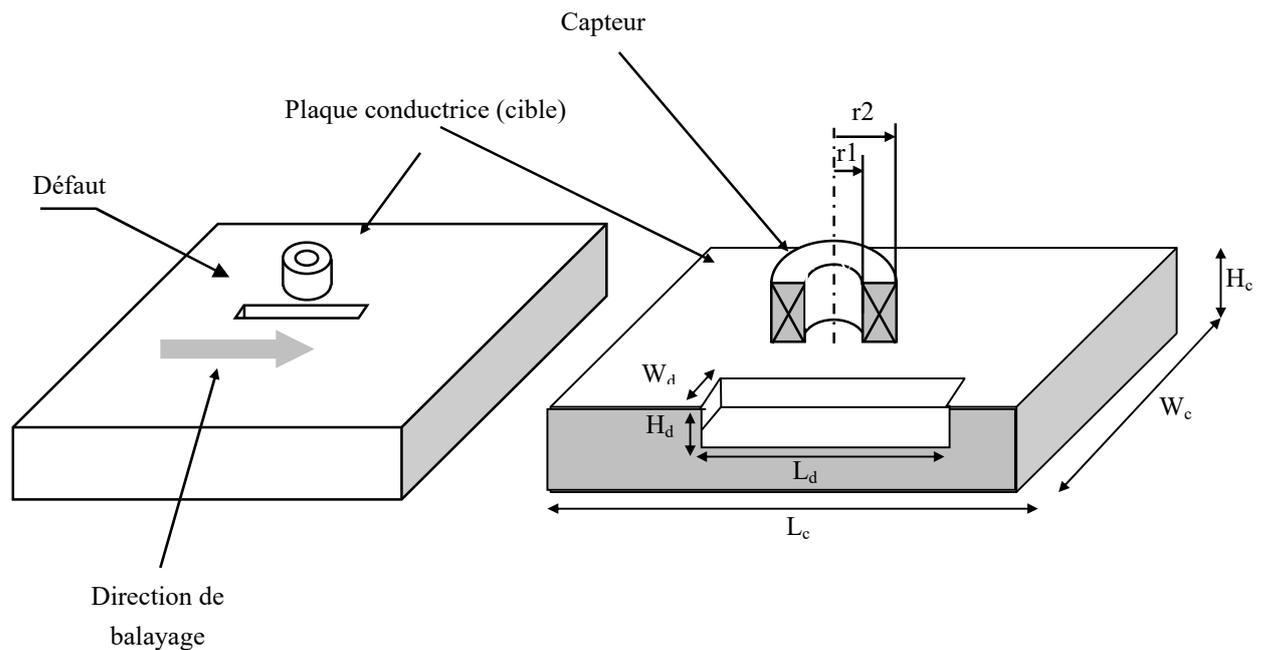


Fig. III. 1 Géométrie du dispositif à modéliser.

III.4 Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique $AV-A$ harmonique

La magnétodynamique consiste en l'étude des phénomènes magnétique et électrique en régime dynamique harmonique ou transitoire en tenant compte des courants induits. Typiquement, un problème magnétodynamique est présenté par la Figure (III. 2), (M'hemed. Rachek, 2005):

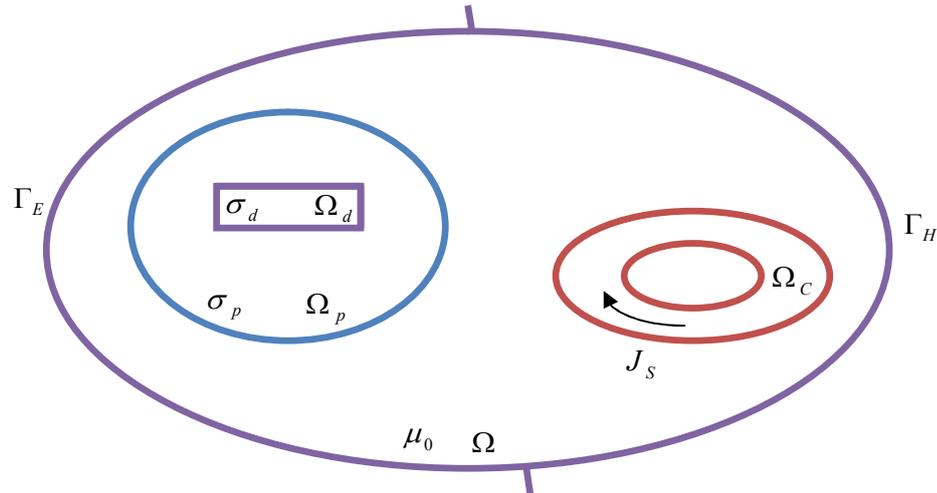


Fig. III. 2 Modèle magnétodynamique avec défaut conducteur.

Le système d'équations en potentiel vecteur magnétique et scalaire (AV - A) électrique à résoudre est, (M. Rachek, 2013) :

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

$$\text{div} \left(\sigma \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A} + \overline{\text{grad}} V) \right) = 0 \quad (\text{III.2})$$

Pour des dispositifs à matériaux linéaires et pour une alimentation sinusoïdale, l'opérateur de dérivation temporelle est $\frac{\partial}{\partial t}$ remplacé par le facteur $j\omega$, :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) - \text{grad} \left(\frac{1}{\mu} \text{div} \vec{A} \right) + j\omega\sigma (\vec{A} + \overline{\text{grad}} V) = \vec{J}_s \quad (\text{III.3})$$

$$\text{div} (j\omega\sigma (\vec{A} + \overline{\text{grad}} V)) = 0 \quad (\text{III.4})$$

Étant donné que le potentiel vecteur magnétique est déterminé au gradient d'une fonction scalaire quelconque près, la solution qui sera obtenue n'est pas unique. Donc pour fixer la fonction scalaire et garantir l'unicité de la solution, un terme de pénalité sera ajouté pour exprimer la condition de Jauge de Coulomb, (M. Rachek, 2013) :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{III.5})$$

La formulation AV - A en éléments nodaux avec terme de pénalité est :

$$\text{rot} (v \cdot \text{rot} \vec{A}) - v_p \cdot \text{div} (\overline{\text{grad}} A) + j\omega\sigma \vec{A} + \sigma \overline{\text{grad}} V = \vec{J}_s \quad (\text{III.6})$$

Avec ;
 $v = \frac{1}{\mu}$: Réductivité magnétique ;
 v_p : Terme de pénalité ayant la dimension d'une réductivité magnétique.

La formulation magnétodynamique harmonique sous forme intégrale est obtenue par une discrétisation spatiale en utilisant la méthode des éléments finis, ce qui permet en plus d'interpoler les inconnues sur les éléments du maillage. En appliquant la méthode de Galerkin et le théorème de Green avec des conditions aux limites homogènes, nous obtenons la formulation intégrale $AV - A$ définis sur les nœuds du maillage du domaine Ω .

$$\int_{\Omega} \left(\nu \cdot (\text{rot } \vec{A}) (\text{rot } \vec{N}_i) + \text{div}(N_i) \nu_p \cdot \text{div}(A) \right) d\Omega + \int_{\Omega} j \omega \sigma \vec{N}_i \cdot (\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}} V) d\Omega = \int_{\Omega} N_i \cdot \vec{J}_s \cdot d\Omega \quad (\text{III.7})$$

$$\int_{\Omega} j \omega \sigma \alpha_i \text{grad}(A) \cdot d\Omega + \int_{\Omega} j \omega \sigma \text{grad}(\alpha_i) \cdot \text{grad}(v) \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III.8})$$

Avec :

N_i : Fonction de projection vectorielles ;

α_i : Fonction de projection scalaire.

Le domaine d'étude Ω est donnée par un ensemble d'éléments géométriques de formes simple sur lesquelles la variable inconnue est exprimée par une combinaison des valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique A .

$$A_S^e = \sum_{j=1} (N_j \cdot A_{xj} \cdot e_x + N_j \cdot A_{yj} \cdot e_y + N_j \cdot A_{zj} \cdot e_z) \quad (\text{III.9})$$

Avec :

A_{xj}, A_{yj}, A_{zj} : Composantes du potentiel vecteur magnétique au nœud j ;

$N_j(x, y, z)$: Fonction d'approximation nodale associée au nœud j ;

e_x, e_y, e_z : Vecteurs unitaires.

L'inconnue sera donné par une combinaison des valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique A .

L'introduction de (III.9) dans les équations intégrales (III.7) et (III.8) permet le des intégrants volumique dont l'assemblage donne un système d'équation algébrique dont les degrés de liberté sont liés au nombre de nœuds du maillage.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} + M & K_{xy} & K_{xz} & G_{xv} \\ K_{yx} & K_{yy} + M & K_{yz} & G_{yv} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} + M & G_{zv} \\ G_{vx} & G_{vy} & G_{vz} & G_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_v \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Où :

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \left(\nu \cdot (\text{rot } \vec{A}) (\text{rot } \vec{N}_i) + \text{div}(N_i) \nu_p \cdot \text{div}(A) \right) d\Omega \quad (\text{III.11})$$

$$M_{ij} = \int_{\Omega} j \omega \sigma \cdot N_i \cdot N_j \cdot d\Omega \quad (\text{III.12})$$

$$G_{uv} = \int_{\Omega} j\omega\sigma.N_i.grad(V).d\Omega \quad (III.13)$$

$$F = \int_{\Omega} .N_i.J_S.d\Omega \quad (III.14)$$

Avec $u = x, y, z$ et $v = x, y, z$ obtenue par permutations cyclique.

III.4.1 Calcul de l'impédance

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:

III.4.1.a. 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 , (Benhadda, 2006), (Helifa, 2012), définies par les relations suivantes:

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{\mu} |\vec{B}|^2 dv \quad (III.15)$$

$$P_J = \frac{1}{2} \iiint_{\text{Conducteur}} \frac{1}{\sigma} |\vec{J}|^2 dv \quad (III.16)$$

Connaissant W_m et P_J , nous pouvons accéder facilement à la résistance R et à la réactance X , équivalentes du capteur (Helifa, 2012). Les expressions reliant la résistance aux pertes Joule, et la réactance de l'énergie magnétique sont données par les relations suivantes, (M. Rachek, 2013), (Bennoud, 2014).

$$R = \frac{1}{I^2} P_J \quad (III.17)$$

$$X = \frac{2\omega}{I^2} W_m \quad (III.18)$$

Avec I et ω représentent respectivement le courant d'excitation parcourant la bobine et sa pulsation.

D'où on peut déduire les variations ΔX et ΔR

$$\Delta X = \frac{\omega}{\mu.I^2} \iiint_V (|B_0|^2 - |B|^2).dv \quad (III.19)$$

$$\Delta R = \frac{1}{2.\sigma.I^2} \iiint_{\text{Conducteur}} |J_0|^2 - |J|^2 dv \quad (III.20)$$

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.

III.4.1.b. 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, (M. Rachek, 2013).

$$I^2 \Delta Z = - \int_{\Omega_s} (\vec{E} - \vec{E}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad (III.21)$$

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:

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j\omega \vec{A} \quad (III.22)$$

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

$$I^2 \Delta Z = j\omega \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad (III.23)$$

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 optée pour la première méthode.

La taille des matrices obtenues est importante, d'où la nécessité de recourir à des algorithmes de préconditionnement 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, ce choix fût conditionné par son aspect multidisciplinaire d'une part et d'autre part, ce logiciel offre la possibilité à l'utilisateur à définir ses propre systèmes d'équations aux dérivées partielles, soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires et des équations algébro-différentiels sont également possibles.

Ce logiciel permet aussi la possibilité de se coupler à Matlab. Par conséquent, l'ensemble Comsol-Matlab permet de réaliser à la fois l'analyse par EF des structures électromagnétiques et d'autre fois à exploiter les outils d'optimisation disponible sous Matlab.

III.5 Déroulement de la simulation 3D avec COMSOL Multiphysics

Une simulation électromagnétique avec COMSOL se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. Elle se décompose en trois étapes principales:

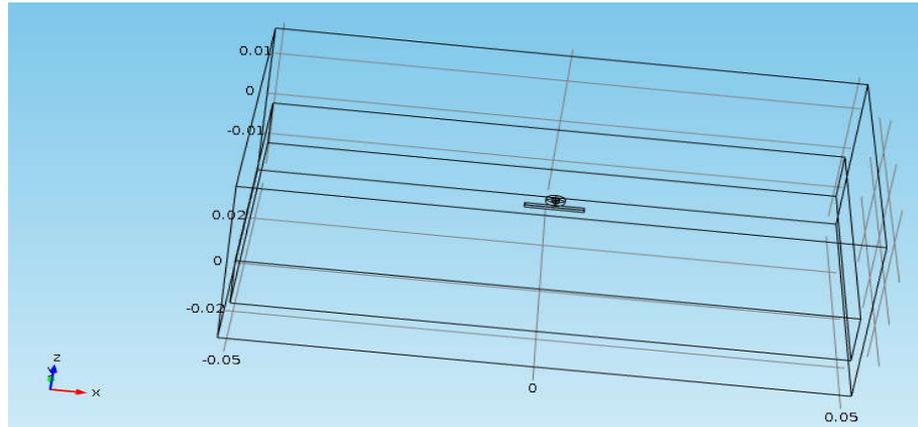
- ✓ Pré-traitement,
- ✓ Calcul
- ✓ Post-traitement.

L'étape de pré-traitement inclut la description géométrique et physique du domaine de 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 Multiphysics. Finalement, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement.

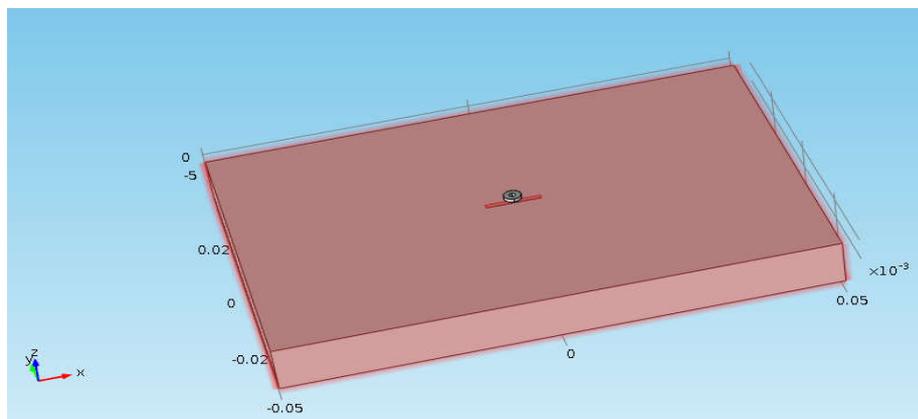
La résolution du problème EF peut être faite dans COMSOL avec plusieurs types de solveurs directs ou itératifs. Nos simulations numériques ont été réalisées avec le solveur direct FGMRS.

III.5.1 Création du domaine de travail

La Figure (III. 3), présente le système CND-CF en mode absolu à modéliser, il est composé par un domaine d'air qui englobe une plaque d'aluminium présentant un défaut, au dessus duquel va se déplacé une bobine, cette dernière est utilisée comme émettrice et réceptrice.



a) Domaine d'air contenant le capteur et la plaque à tester



b) Vue de la plaque à modéliser.

Fig. III. 3 Domaine de travail sous COMSOL Multiphysics.

III.5.2 Caractéristiques géométriques et physiques

Le Tableau (III. 1), englobe les caractéristiques géométriques et physiques du système à modéliser.

Tableau III. 1 Paramètres géométriques et physiques du système à modéliser

Plaque (C)		Bobine (B)		Défaut (D)	
Longueur (L_c)	100 (mm)	Hauteur (L_b)	0.8 (mm)	Longueur (L_d)	10 (mm)
Largeur (W_c)	70 (mm)	Rayon extérieur (r_2)	1.6 (mm)	Largeur (W_d)	1 (mm)
Hauteur (H_c)	10 (mm)	Rayon intérieur (r_1)	0.6 (mm)		
Conductivité (σ)	$30e^6$ (S/m)	Nombre de spire	140		
Permeabilité (μ_r)	1	Conductivité (σ)	$60e^6$ S/m)		
Permittivité (ϵ_r)	1	Intensité de courant (I)	0.8 (A)		
		Lift-off	1 (mm)		

III.5.3 Maillage

Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme) sont proposées par COMSOL Multiphysics. Le type d'élément utilisé conditionne en partie le nombre de degrés

de liberté nécessaire au final pour la résolution numérique du problème. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes, (Hamia, 2006), Figure (III. 4).

Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue. Le maillage est très extrêmement fin au niveau du défaut, encore plus fin pour la bobine et la plaque et normal dans le reste du domaine.

La géométrie finalisée a 4 domaines, 28 frontières, 60 arêtes et 40 points. Le maillage complet consiste en 98209 éléments de domaine, 14682 éléments de frontière et 837 éléments d'arêtes.

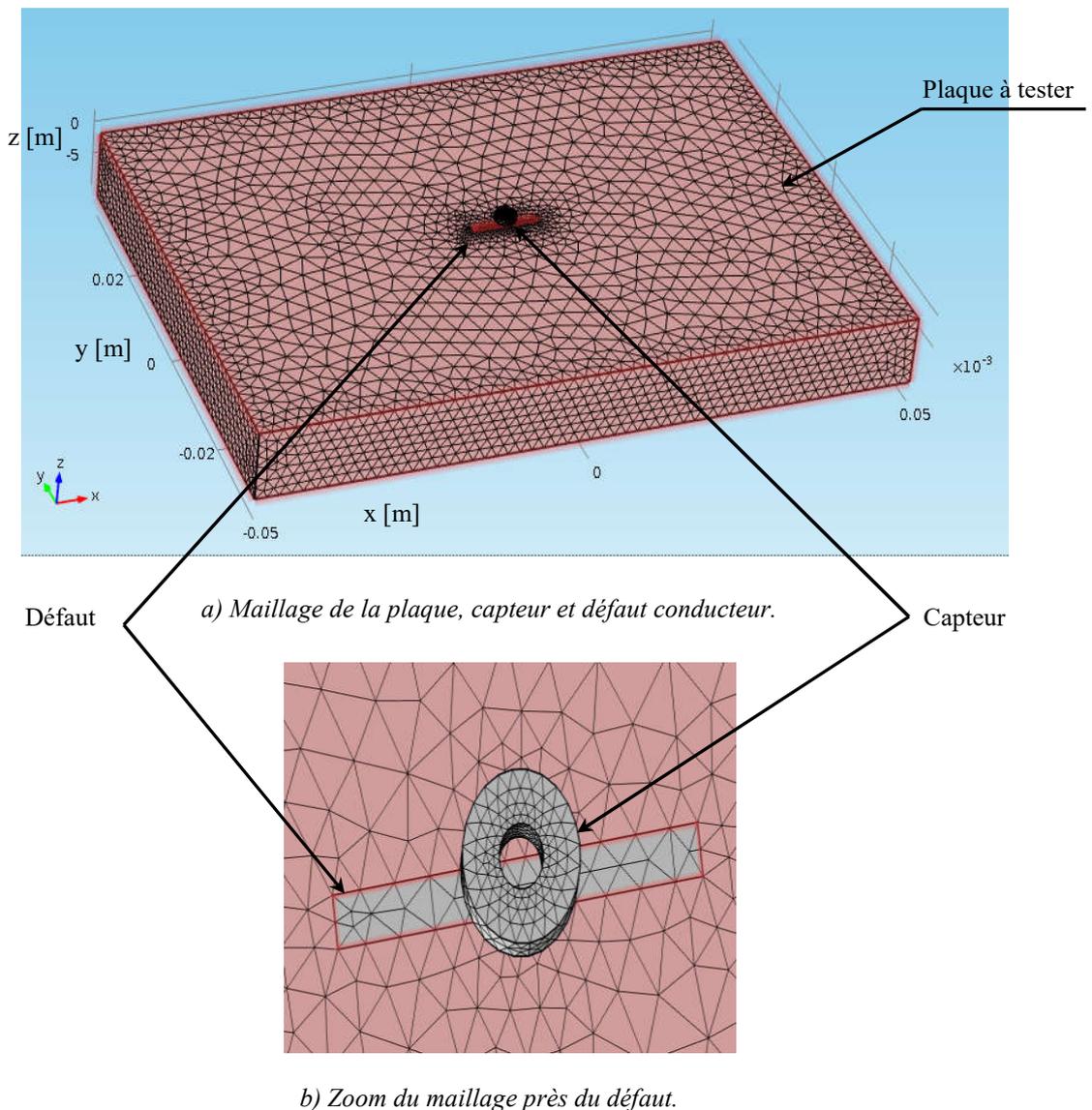


Fig. III. 4 Maillage de plaque à tester sous COMSOL Multiphysics.

III.6 Simulation du CND par CF

III.6.1 Tests de validation

Avant d’entamé la simulation du CND par CF pour le modèle développé pour les défauts conducteur, on va procéder à une validation de ce dernier en comparant les résultats obtenus par celui-ci avec des données expérimentales sur des configurations de benchmarks académiques.

Le premier benchmark est le TEAM Workshop n°15-1 (Burke, 1988). L’avantage de ce benchmark est qu’il fournit des signaux d’amplitudes importantes, du fait des grandes dimensions du défaut et de la bobine. L’épaisseur de la plaque est très grande par rapport à la profondeur du défaut. Ce dernier est une entaille longue par rapport aux défauts rencontrés dans la plupart des applications industrielles. Son ouverture est de 0.28mm, le rapport ouverture sur longueur est de 2%, alors que le rapport profondeur sur la longueur est de 40%. L’ouverture est donc très petite par rapport aux autres dimensions, ce qui est une configuration favorable pour la validation du modèle des défauts fins, (Choua, 2010),(Helifa, 2012).

Le second est le JSAEM n°2-5. Les dimensions de la bobine sont très petites par rapport à celles du benchmark TEAM Workshop n°15-1. L’épaisseur de la plaque est de l’ordre de l’épaisseur de peau. L’ouverture du défaut est de 0.21mm et le rapport ouverture sur sa longueur est de 2%, tandis que le rapport profondeur sur sa longueur est de 7.5%, (Choua, 2010),

III.6.1.a. Benchmark Team Workshop n°15-1

C’est une bobine à air “sans noyau de ferrite” se déplace au dessus d’une plaque métallique conductrice comportant une fissure débouchante, Figure (III. 5). Les principaux paramètres du modèle sont représentés dans le Tableau (III. 2).

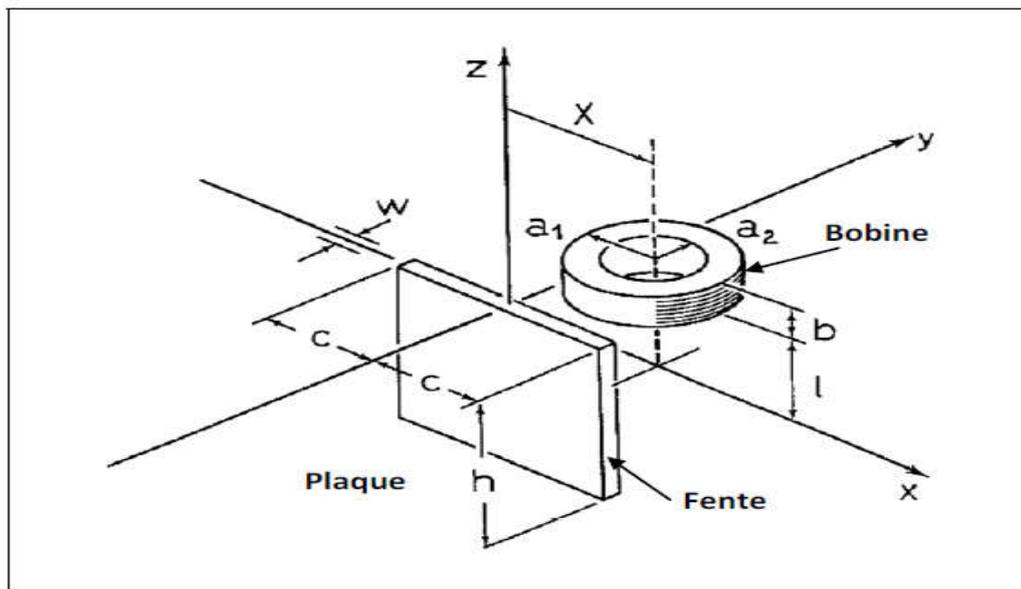


Fig. III. 5 Detail du TEAM Workshop N° 15-1, (Burke, 1988).

Tableau III. 2 Paramètres géométriques et physiques du TEAM Workshop N° 15-1, (Burke, 1988)

Plaque (C)		Bobine (B)		Défaut (D)	
Épaisseur	12.22(mm)	Rayon externe (a_1)	12.4 (mm)	Longueur (2c)	12.6 (mm)
Conductivité (σ)	30.6×10^6 (S/m)	Rayon interne (a_2)	6.15 (mm)	Largeur (W)	0.28 (mm)
Permeabilité (μ_r)	1	Hauteur (b)	6.15 (mm)	Profondeur(h)	5.00 (mm)
Permittivité (ϵ_r)	1	Nombre de spires	3790		
		Fréquence	900 Hz		
		Épaisseur de peau	3,04 (mm)		
		Lift-off	0.88 (mm)		

La Figure (III. 6) illustre la vue en 3D du modèle ainsi que le maillage utilisé.

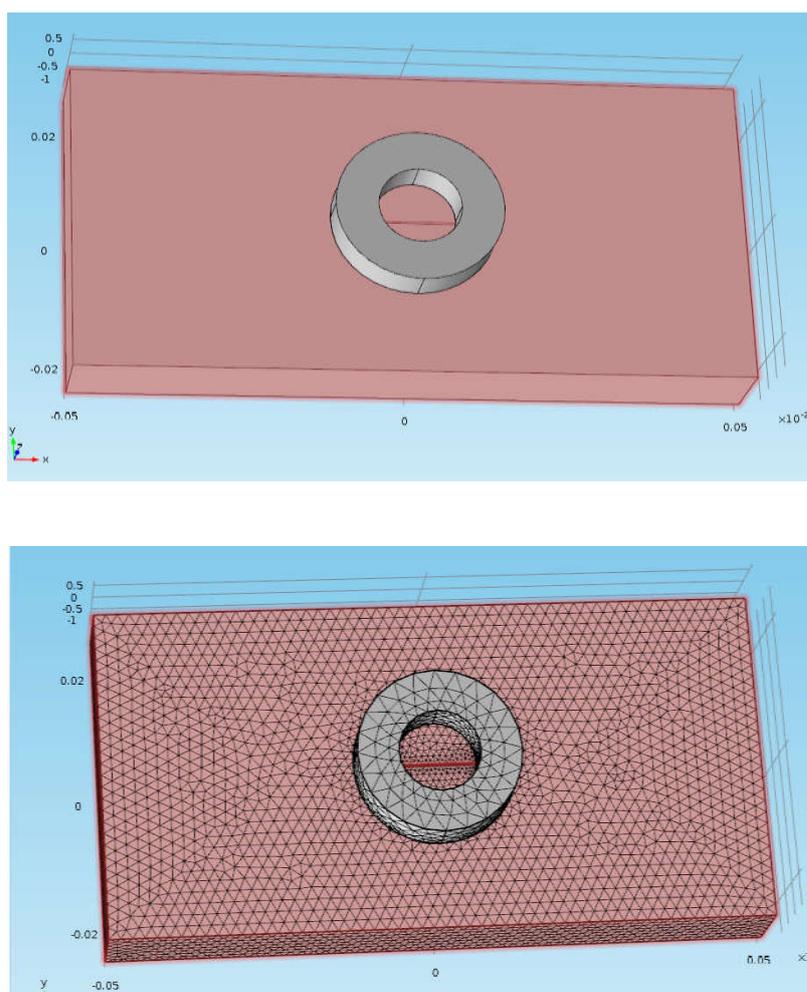


Fig. III. 6 Vue 3D et maillage du TEAM Workshop N° 15-1.

Les résultats obtenus sont illustrés sur les Figures (III. 7 à III.9) et les Figures (III 10 à III. 12) qui représentent successivement les variations de la réactance et les variations de la résistance.

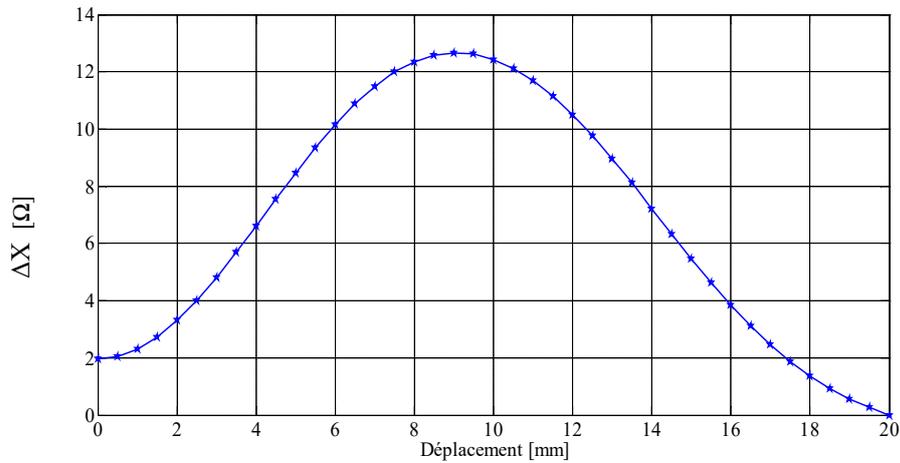


Fig. III. 7 Variation de la réactance: modèle développé.

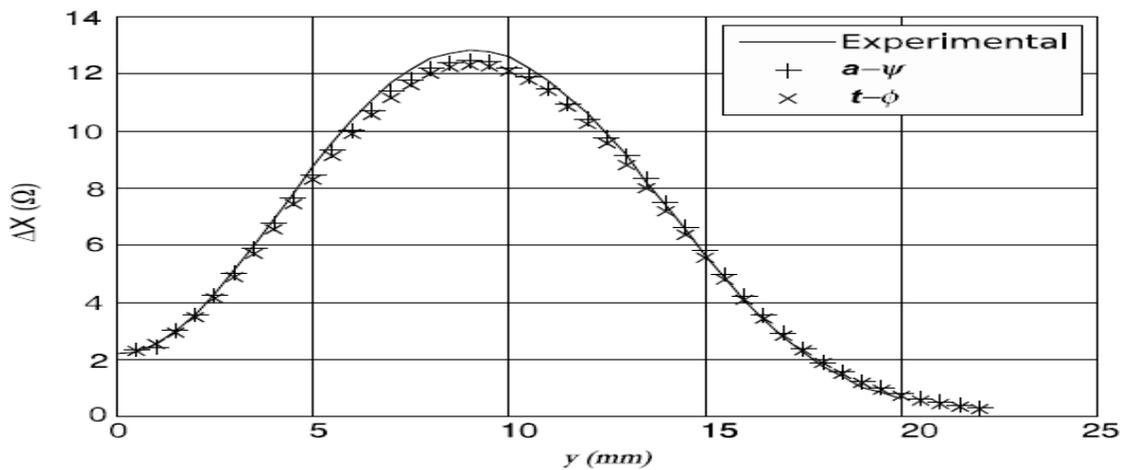


Fig. III. 8 Variation de la réactance: selon Choua et TEAM Workshop N° 15-1.

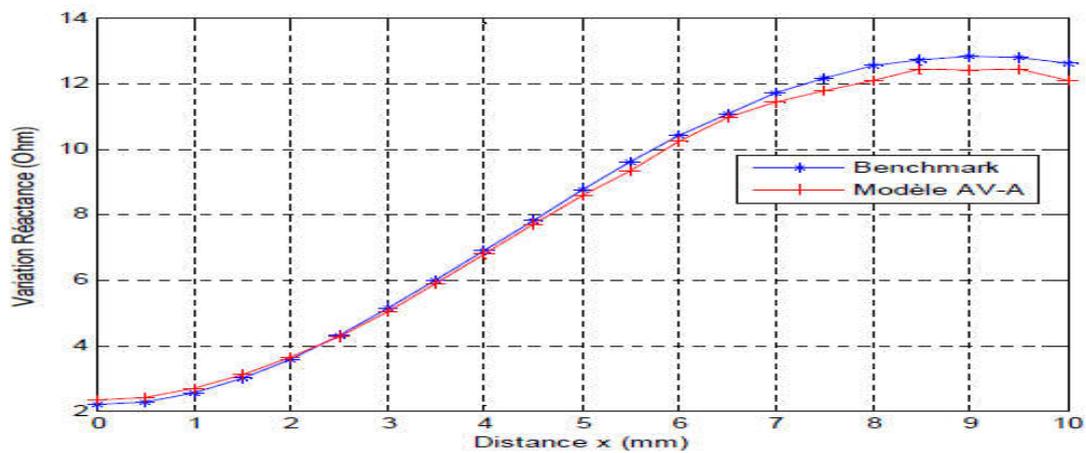


Fig. III. 9 Variation de la réactance: selon Helifa et TEAM Workshop N° 15-1.

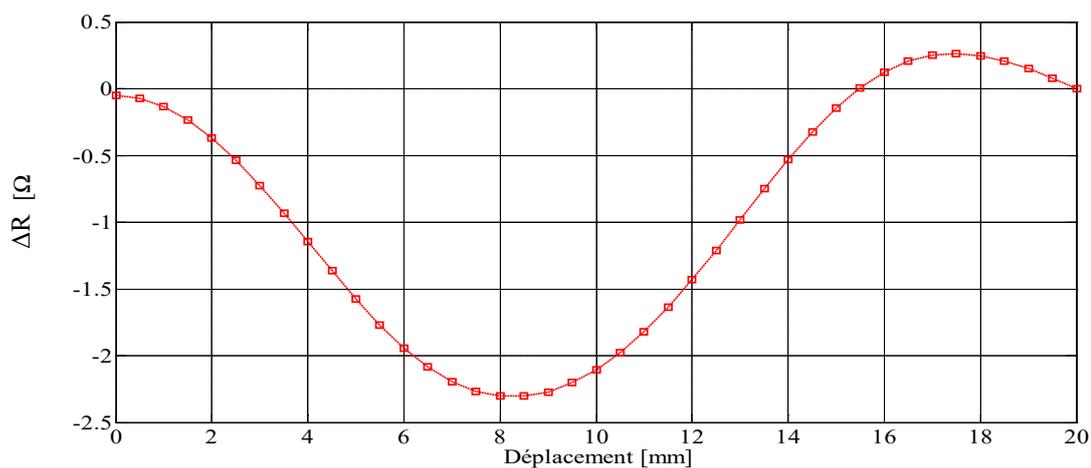


Fig. III. 10 Variation de la résistance: modèle développé.

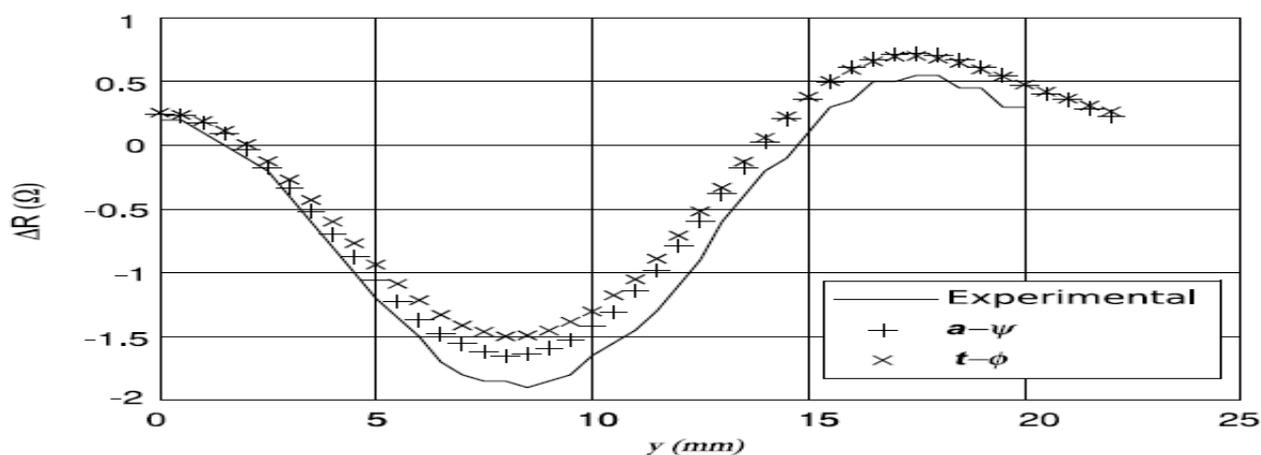


Fig. III. 11 Variation de la résistance: selon Choua et TEAM Workshop N° 15-1.

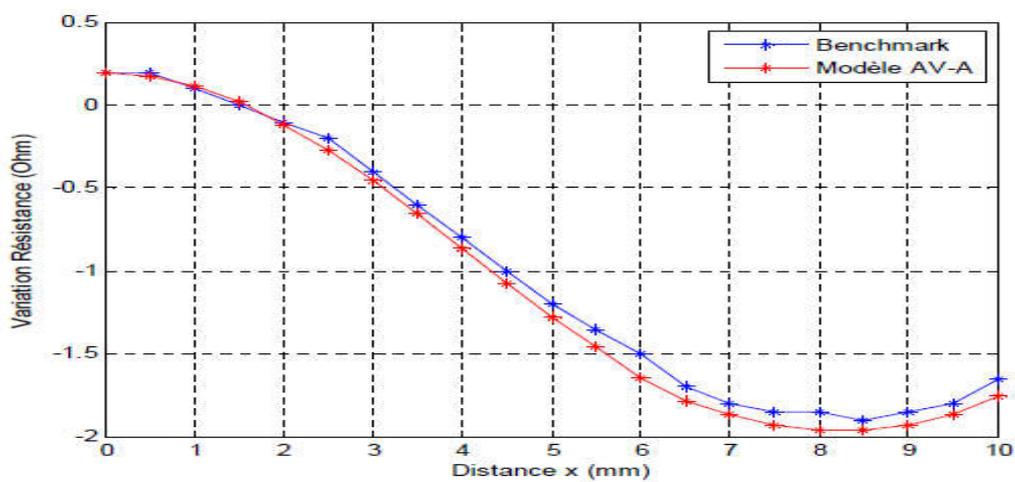


Fig. III. 12 Variation de la résistance: selon Helifa et TEAM Workshop N° 15-1.

Sur les Figures (III. 7 à III. 9) et les Figures (III. 10 à III. 12) les résultats sont comparés aux données expérimentales du Benchmark ainsi que ceux obtenus par MEF par (Choua, 2010) et (Helifa, 2012), ces derniers sont eux mêmes comparés avec TEAM Workshop N° 15-1.

Les résultats obtenus sont en parfaits concordance pour la partie imaginaire et avec une légère variation pour la partie réelle, mais qui reste acceptable vue que la forme et l'amplitude sont très proches.

III.6.1.b. Benchmark JSAEM

Ce benchmark a été l'objet d'études menées par la Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics (JSAEM). Il comporte un défaut débouchant. Ses caractéristiques sont représentées dans le Tableau (III. 3), (Choua, 2010).

Tableau III. 3 Paramètres géométriques et physiques du Benchmark JSAEM

Plaque (C)	
Épaisseur	1.25(mm)
Conductivité (σ)	$1e^6$ (S/m)
Perméabilité (μ_r)	1
Permittivité (ϵ_r)	1
Bobine (B)	
Rayon externe (a1)	1.6 (mm)
Rayon interne (a2)	0.6 (mm)
Hauteur (b)	0.8 (mm)
Nombre de spires	140
Fréquence	150 kHz
Épaisseur de peau	1,3 (mm)
Lift-off	0.5 (mm)
Défaut (D)	
Longueur (2c)	10.0 (mm)
Largueur (W)	0.21 (mm)
Profondeur (h)	0.75 (mm)

Sur les Figures (III. 13 et III. 14) et les Figures (III 15 et III. 16) sont représentées les variations des parties imaginaire et réelle du signal obtenu ainsi que ceux du, Benchmark JSAEM et par MEF par (Choua, 2010).

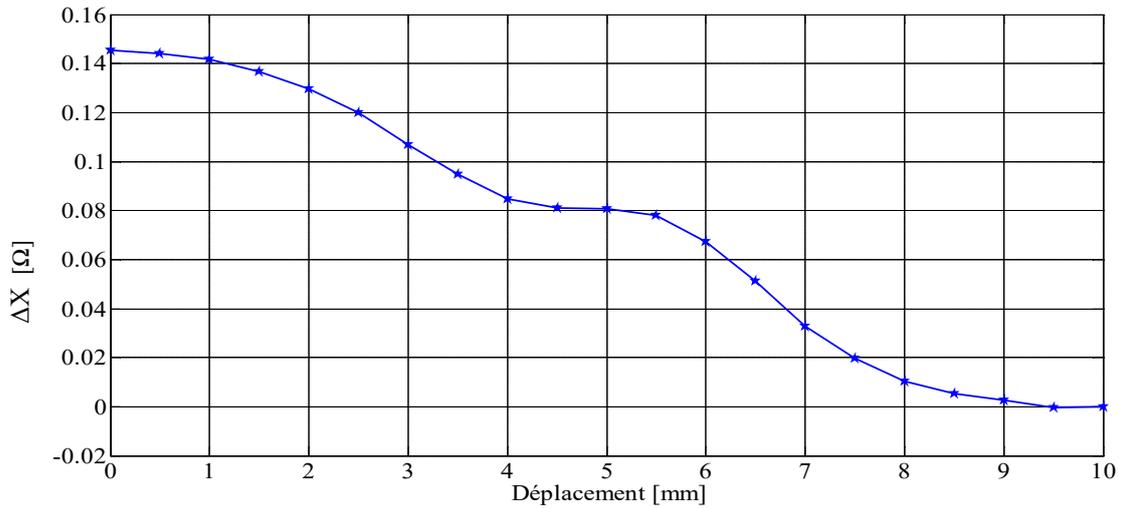


Fig. III. 13 Variation de la réactance: selon JSEAM: modèle développé.

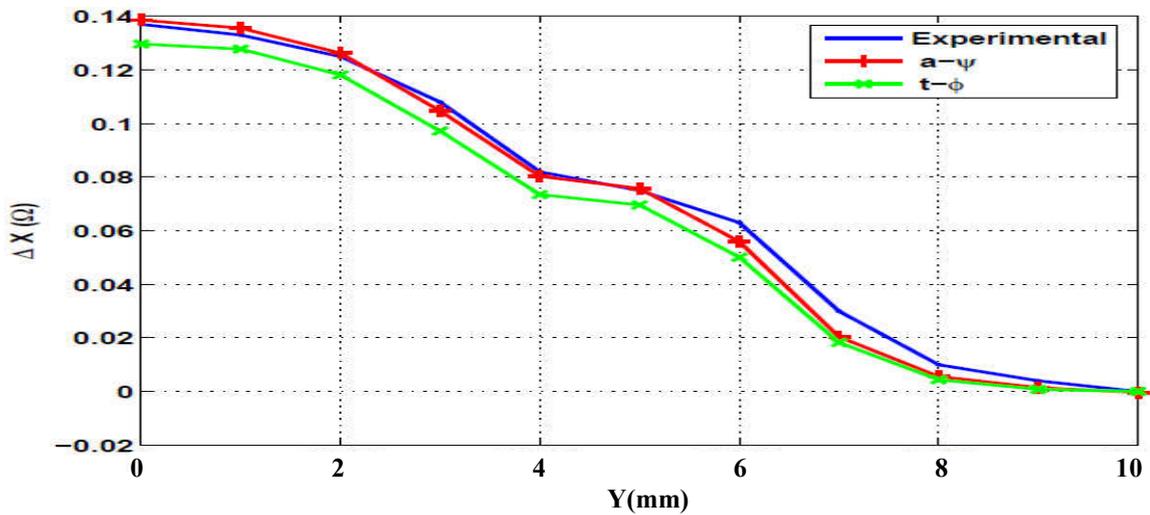


Fig. III. 14 Variation de la réactance: selon JSEAM: modèle Choua et TEAM Workshop N° 15-1.

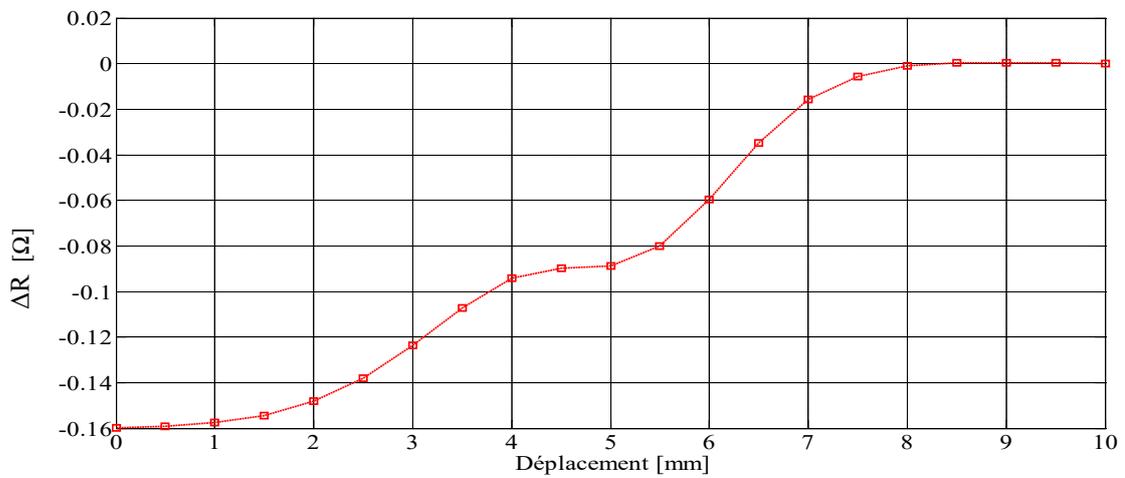


Fig. III. 15 Variation de la résistance, selon JSEAM: modèle développé.

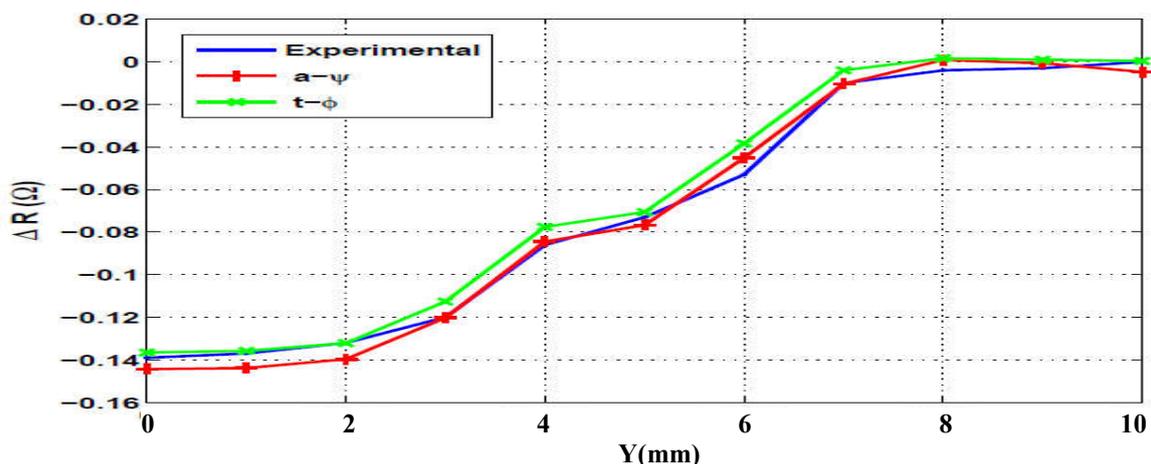


Fig. III. 16 Variation de la résistance, selon JSEAM: modèle Choua et TEAM Workshop N° 15-1.

En comparant les résultats obtenus aux résultats expérimentaux du Benchmark JSAEM d'une part et d'autre part aux résultats de simulation selon les deux modèles A- ψ et T- Φ élaboré par (Choua, 2010), on peut constater qu'il y a concordance parfaite.

Au vue des résultats obtenus par le modèle élaboré pour les défauts fins sont satisfaisants, soit pour le benchmark Team Workshop qui est caractérisé par une pièce de profondeur importante, 4 fois supérieur à l'épaisseur de peau δ , soit pour le benchmark JSAEM dont la profondeur de la pièce est du même ordre que l'épaisseur de peau.

Ces validations nous permettent de bien entamé l'étape suivante pour la caractérisation et la mise en évidence de l'effet des matériaux polluant conducteurs lorsqu'ils sont le siège des fissures.

III.6.2 Résultats de simulation pour défauts conducteurs

Une grande partie des travaux scientifiques dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault considèrent une fissure comme une rupture du réseau cristallin ou comme défaut avec manque de matière. Cependant, d'autres types de cas particulier de défauts peuvent apparaître sans qu'il y ait perte de matière ou fissures avec pertes de matière mais contenant des matériaux polluants conducteurs, (Benhadda, 2015).

On peut citer à titre d'exemples :

- Les défauts qui apparaissent lors du moulage de pièces conductrices où on peut être confronté à une insertion de débris conducteurs qui vont former des défauts d'aspects à la surface des ces pièces ou des inclusions conductrices à l'intérieur, d'où une hétérogénéité du système ;
- Lors de l'utilisation des pièces conductrices, les points de contacts électriques constituent des micro-brulures locale qui peuvent changer les caractéristiques physiques de ces points de contacts (changement de la conductivité locale) ;
- Les défauts avec manque de matière mais tout en étant remplis de débris conductrices, comme lors du soudage, ou lors du transport de liquides conducteurs comme l'eau salée ou le mercure...

Tous ces cas particuliers doivent être pris en considération pour ne pas avoir un écart significatif entre la simulation et la pratique.

III.6.2.a. Variation de la résistance ΔR et réactance ΔX

Les résultats de simulation pour défauts conducteurs sont représentés sur les Figures (III. 17 et III. 18).

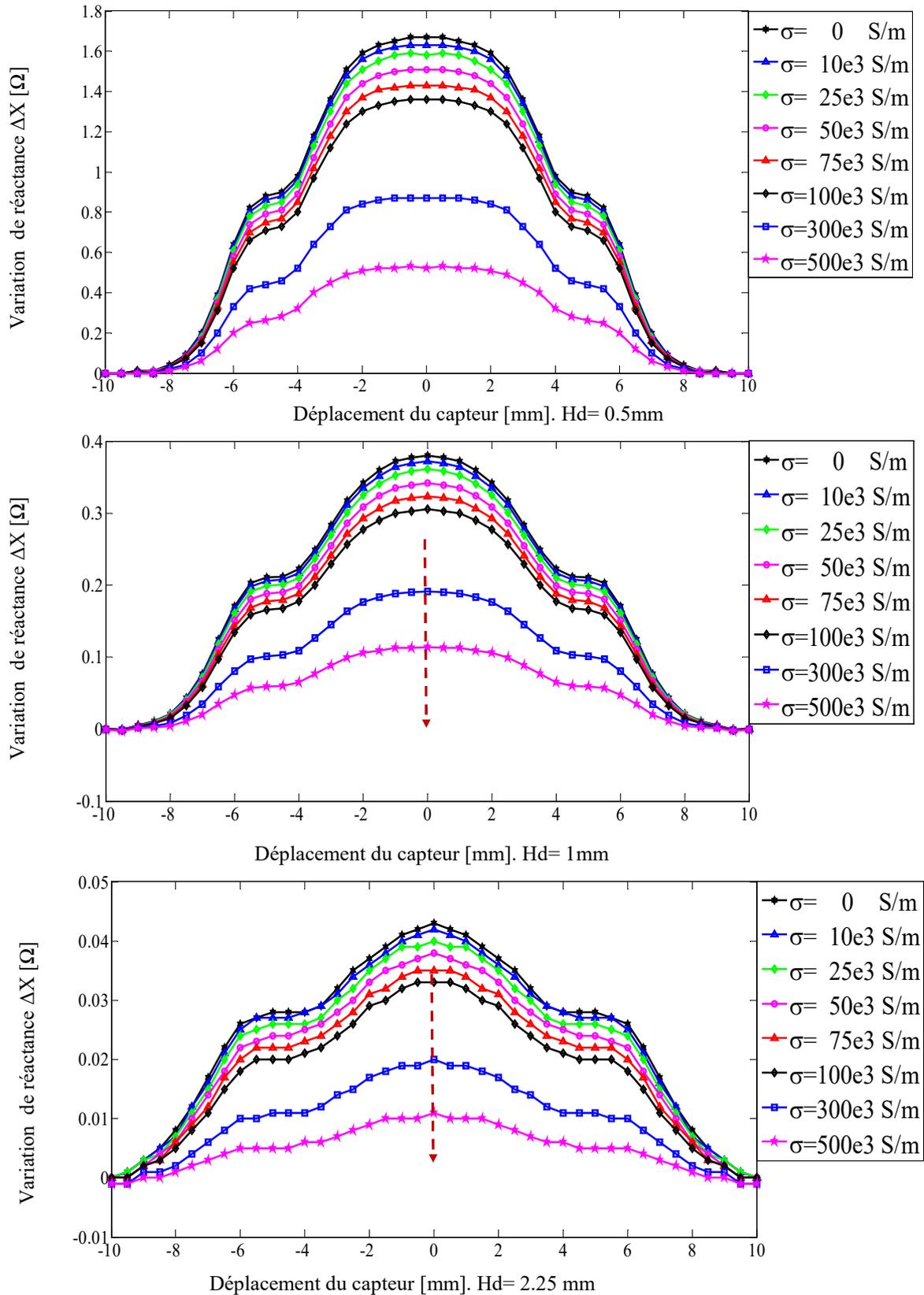


Fig. III. 17 Variation de la réactance ΔX en fonction du déplacement pour différentes valeurs de conductivité du défaut.

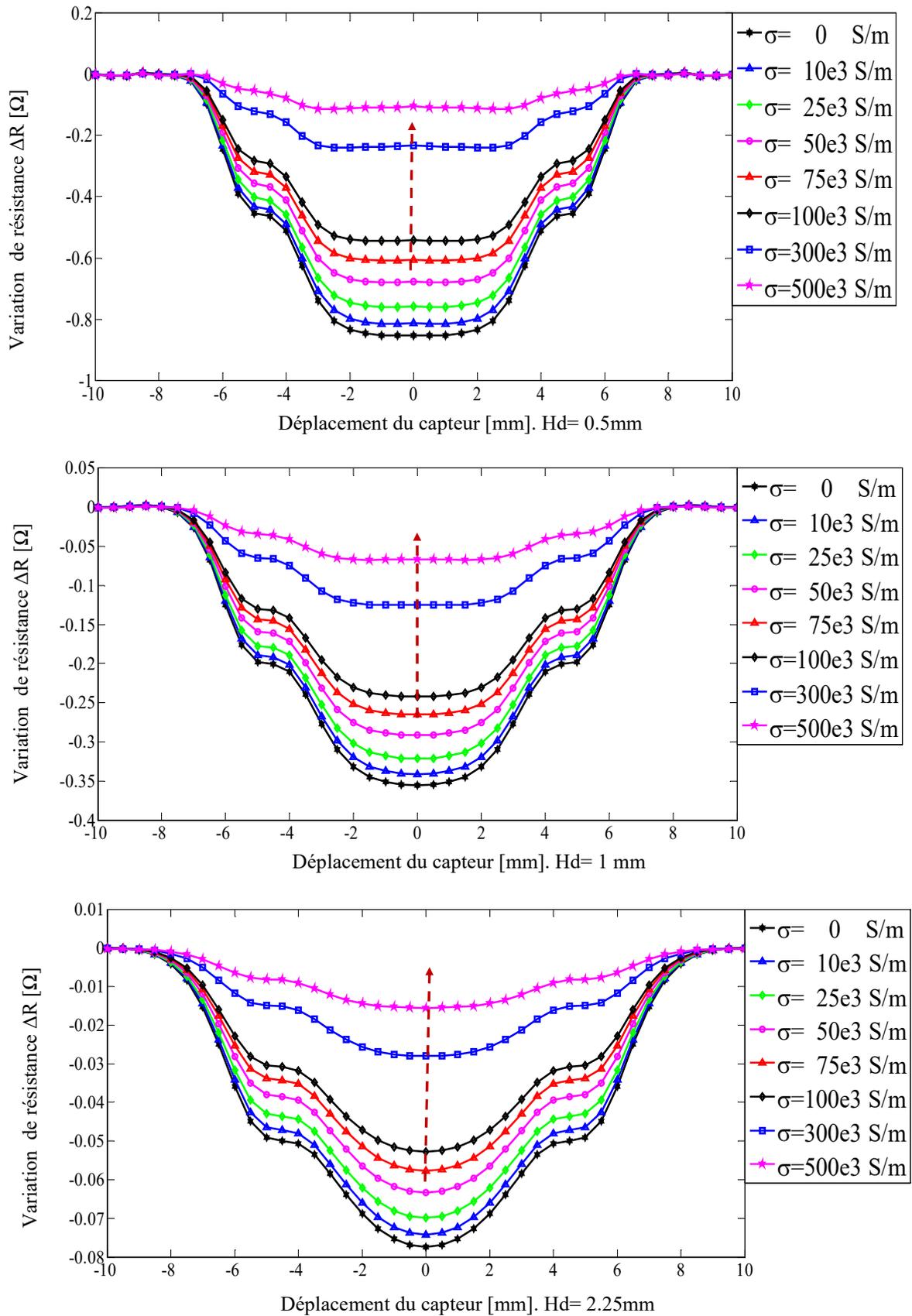


Fig. III. 18 Variation de la résistance ΔR en fonction du déplacement pour différentes valeurs de conductivité du défaut.

Les Figures (III. 17 et III. 18) illustrent les résultats de simulation d'un CND-CF en absolu pour différentes profondeurs de défaut, à savoir 2.25 mm, 1 mm et 0.5 mm. Ces dernières correspondent à la variation de la résistance ΔR et la variation de la réactance ΔX de l'impédance du couple capteur-cible en fonction du déplacement du capteur, et pour mettre en évidence l'impact du défaut conducteur, on fait varier, pour chaque profondeur, la conductivité électrique du défaut dans un intervalle de [0Ms / m, 0.5Ms / m].

La fréquence a été choisie en fonction de la profondeur de pénétration de telle sorte qu'elle soit très proche de la profondeur du défaut.

On remarque, d'après les Figures (III. 17 et III. 18), que l'augmentation de la conductivité du matériau conducteur polluant du défaut se traduit par une diminution de l'amplitude des signaux des variations de ΔR et de ΔX . Lorsque le capteur est loin du défaut, les composants de variation d'impédance (variation résistance et variation de réactance) sont nuls. À mesure que le capteur approche du défaut, une augmentation de ces composants est observée. En effet, l'amplitude maximale est atteinte lorsque le capteur est précisément au milieu du défaut ($x = 0$ mm). D'autre part, on peut remarquer pour toutes les fréquences, que l'amplitude du signal est inversement proportionnelle avec l'augmentation de la conductivité électrique de la pollution.

III.6.2.b. Variation de la résistance relative et réactance relative

Dans cette section, nous allons calculer la différence relative entre les paramètres d'impédance calculés pour un défaut avec et sans accumulation d'impuretés polluantes. Les différences relatives $\Delta R_{\text{relative}}(\%)$, $\Delta X_{\text{relative}}(\%)$ et $\Delta Z_{\text{relative}}(\%)$ sont données respectivement par les équations (III. 19), (III.20) et (III.21).

$$\Delta R_{\text{relative}}(\%) = \left| \frac{(\Delta R_0 - \Delta R)}{\Delta R_0} \right| .100 \quad (\text{III.24})$$

$$\Delta X_{\text{relative}}(\%) = \left| \frac{(\Delta X_0 - \Delta X)}{\Delta X_0} \right| .100 \quad (\text{III.25})$$

$$\Delta Z_{\text{relative}}(\%) = \left| \frac{(\Delta Z_0 - \Delta Z)}{\Delta Z_0} \right| .100 \quad (\text{III.26})$$

Où:

ΔR_0 et ΔR sont successivement les variations des résistances de la bobine pour un défaut sans et avec une pollution conductrice.

ΔX_0 et ΔX sont successivement les variations des réactances de la bobine obtenue pour un défaut sans et avec une pollution conductrice.

ΔZ_0 et ΔZ sont successivement les variations des impédances de la bobine pour un défaut sans et avec une pollution conductrice.

La Figure (III. 19) présente la variation de la résistance relative, la réactance relative et l'impédance relative en pourcentage (%) en fonction de la conductivité électrique pour différentes profondeurs de défauts.

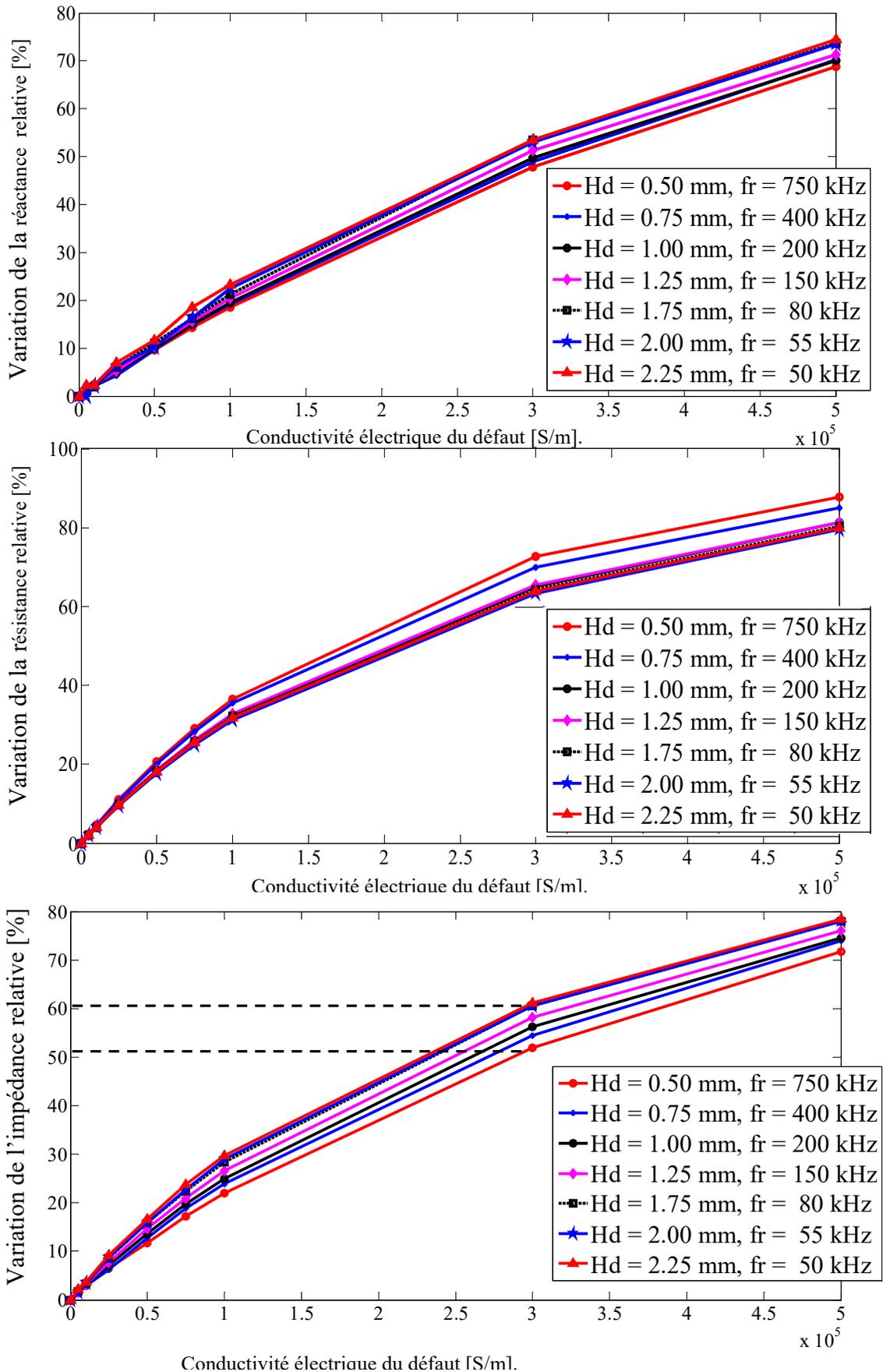


Fig. III. 19 Résistance, réactance et impédance relative, en (%) en fonction de la conductivité électrique du défaut pour différentes valeurs de profondeurs de défauts [0.5 mm: 2.25 mm].

D'après la Figure (III. 19), on peut remarquer que la différence relative est proche de 0% pour la faible conductivité et la profondeur de la conductivité électrique; pour les valeurs élevées de profondeur et de conductivité électrique cette différence peut atteindre 78%. En conséquence, pour un matériau fonctionnant dans un environnement pollué, le défaut peut être caché à travers les signaux détectés, car il est remarqué que la conductivité électrique des substances polluantes affecte la signature des défauts. Par exemple, l'amplitude de la variation d'impédance passe de [12%, 15%] à [71%, 78%] lorsque la conductivité électrique de la pollution varie de 0,05 MS/m à 0,5 MS / m. Ces résultats peuvent être justifiés par la présence des courants induits dans le volume des défauts.

III.6.2.c. Cartographie des courants induits

La Figure (III. 20) illustre la cartographie des courants induits pour trois valeurs de conductivités de défauts pour une même fréquence et des mêmes profondeurs de défauts.

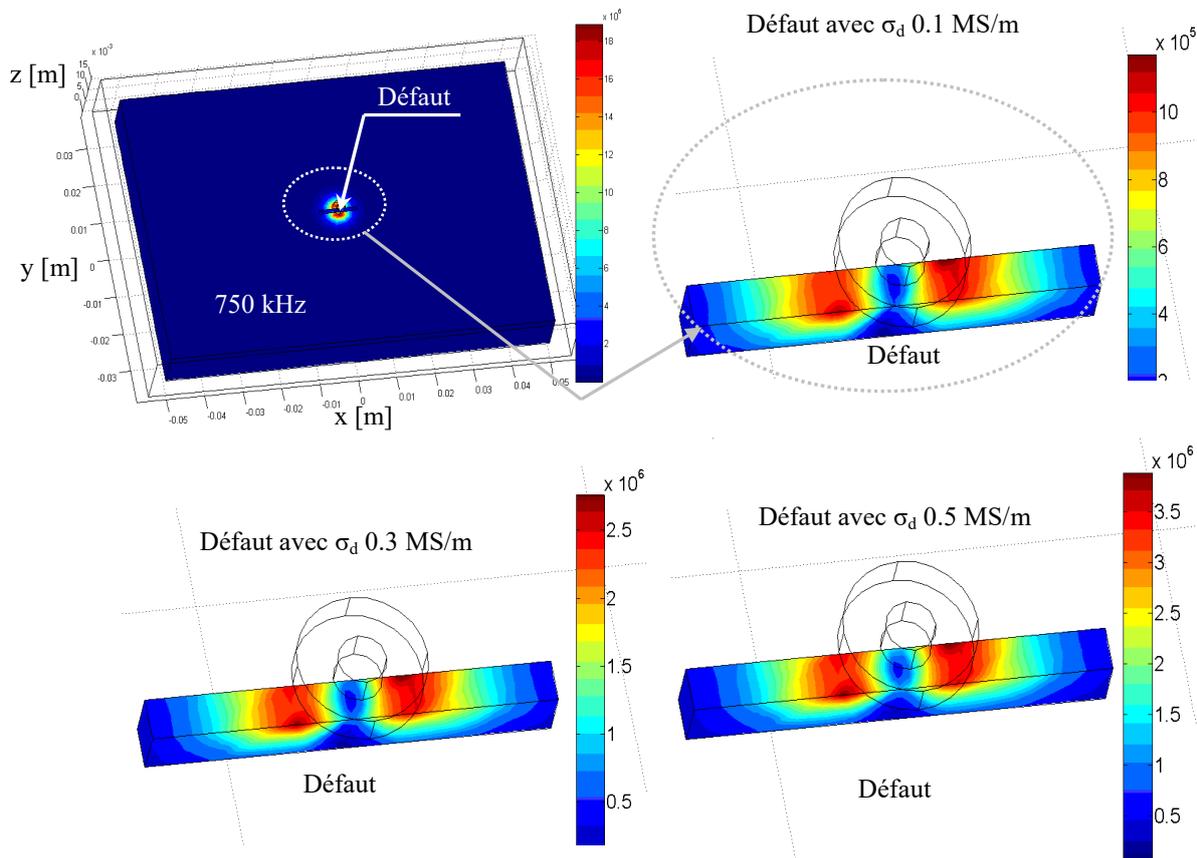


Fig. III. 20 Cartographies de la densité des courants induits en fonction des conductivités de pollution.

En effet, la Figure (III. 20) montre la cartographie des courants induits dans le volume des défauts conducteurs. La valeur de ces derniers est proportionnelle à celle de leurs conductivité électrique.

III.7 Paramètres influents sur CND-CF pour défaut fin

La réponse et la sensibilité d'un capteur utilisé en CND-CF dépende, uniquement des paramètres de structure que sont la fréquence d'excitation et la géométrie de la sonde, et des paramètres de la cible à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique σ , sa perméabilité μ et de la distance sonde/cible (lift-off) pour le cas d'un capteur au dessus d'une plaque soit du coefficient de remplissage pour les bobines encerclantes. Pour mettre en exergue d'une part l'effet de ces paramètres sur la sensibilité de la détection de la sonde, et d'autre part l'effet des matériaux polluant conducteurs, on procède à la variation de l'un des paramètres pour les deux cas, défaut manque de matière et défaut avec matériau conducteur de conductivité électrique 300 S/m.

III.7.1 Effet de la fréquence

Les Figures (III. 21 et III. 22) montrent l'effet de la fréquence sur ΔR , ΔX , et $|\Delta Z|$, ainsi que le diagramme de phase, ΔX en fonction de ΔR .

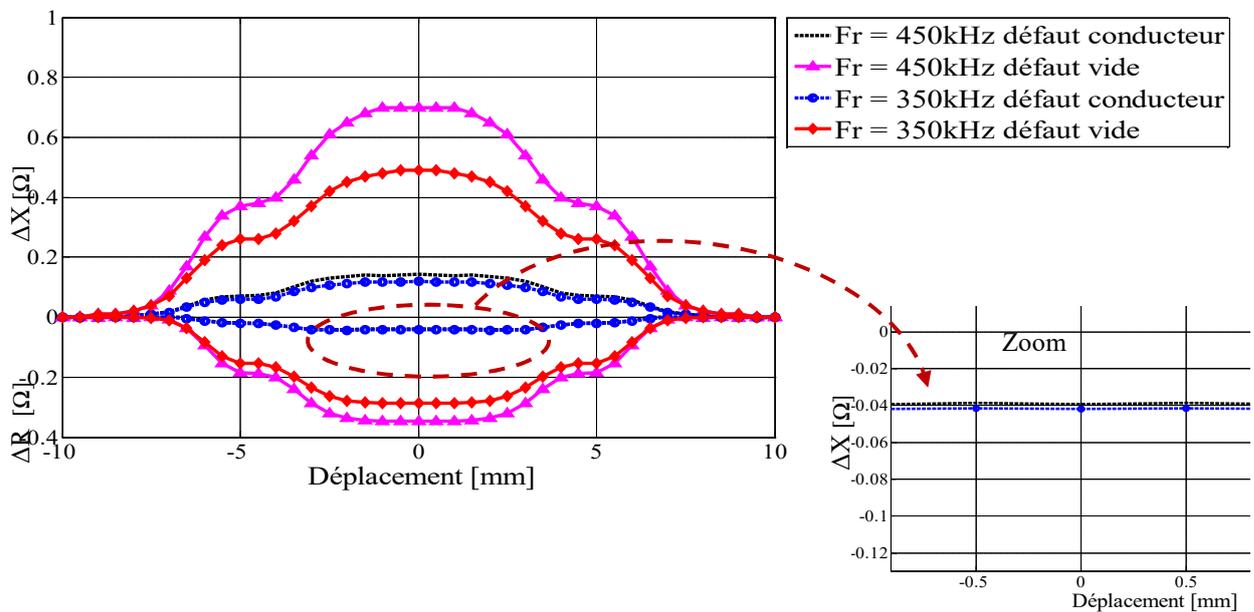


Fig. III. 21 Effet de la variation de la fréquence sur ΔR et ΔX .

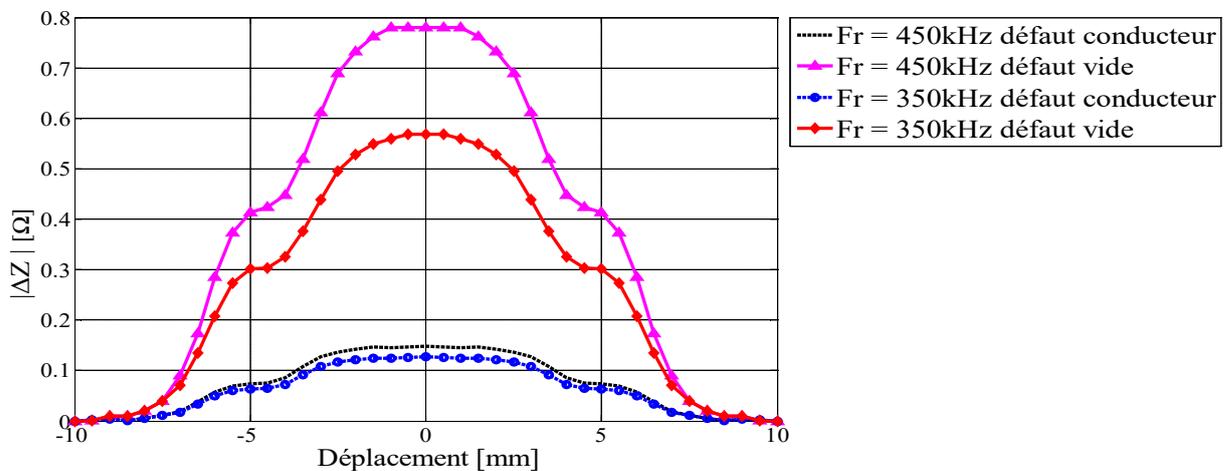


Fig. III. 22 Effet de la variation de la fréquence sur $|\Delta Z|$.

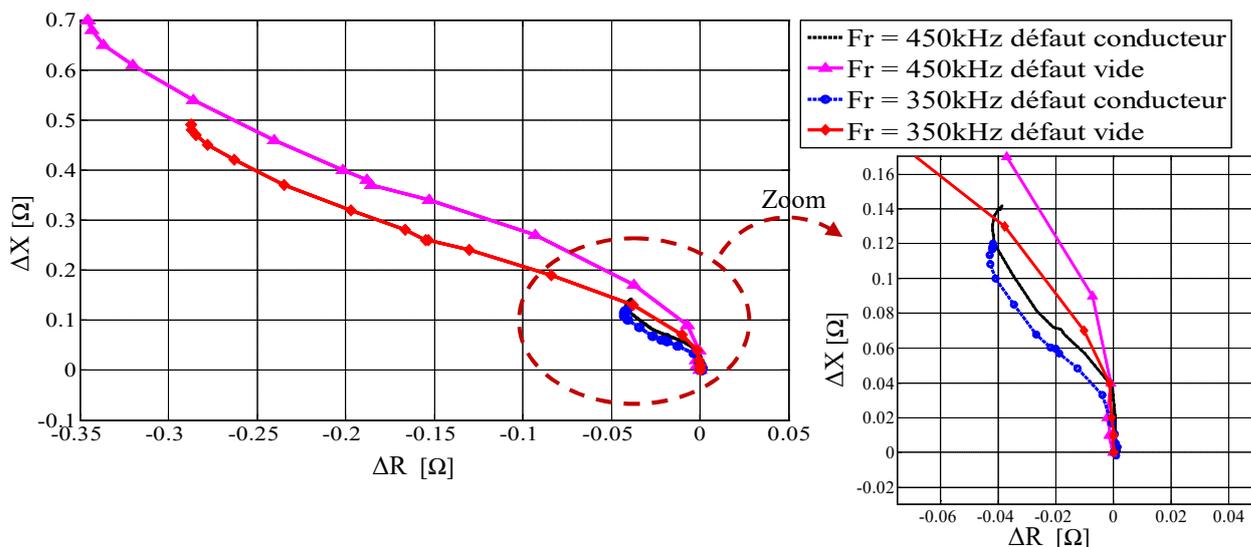


Fig. III. 23 Effet de la variation de la fréquence sur ΔX en fonction de ΔR .

On constate que la variation ΔR , ΔX et $|\Delta Z|$, en fonction du déplacement du capteur, Figure (III. 21 et III. 22), est liée à l’augmentation de la fréquence, elle est encore plus visible pour la partie imaginaire pour défaut manque de matière mais pour le défaut conducteur et pour la même partie imaginaire il faut passer par le zoom pour déceler la différence. Les courbes de phase, Figure (III. 23) tournent dans le sens horaire avec l’augmentation de fréquence, l’amplitude du signal est plus importante pour les défauts manque de matière et le déphasage est plus important pour défaut manque de matière, par contre pour défaut conducteur il faut passer par un zoom du signal pour pouvoir déceler l’effet de la fréquence sur le diagramme de phase.

III.7.2 Effet de la variation du lift-off

On procède à la variation de la profondeur du lift-off de 0.5 mm et 1.0 mm, tout en fixant la fréquence $Fr=300\text{ kHz}$, la longueur du défaut $Lod=10\text{ mm}$, largeur $lad\ 0.2\text{ mm}$ et la hauteur défaut $Hd=0.75\text{ mm}$, (Figure (III. 24 à III. 26)).

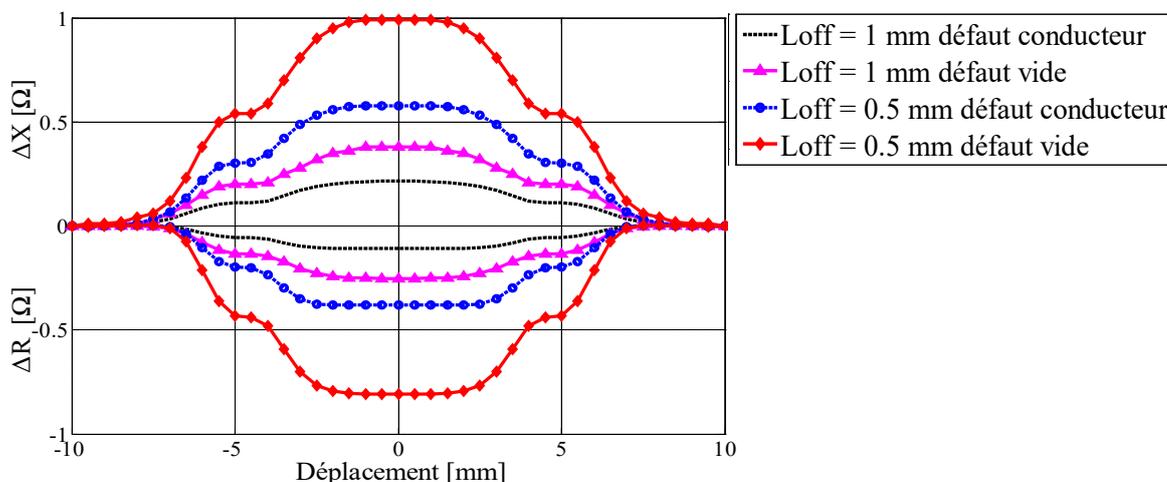


Fig. III. 24 Effet de la variation du lift-off sur ΔR et ΔX .

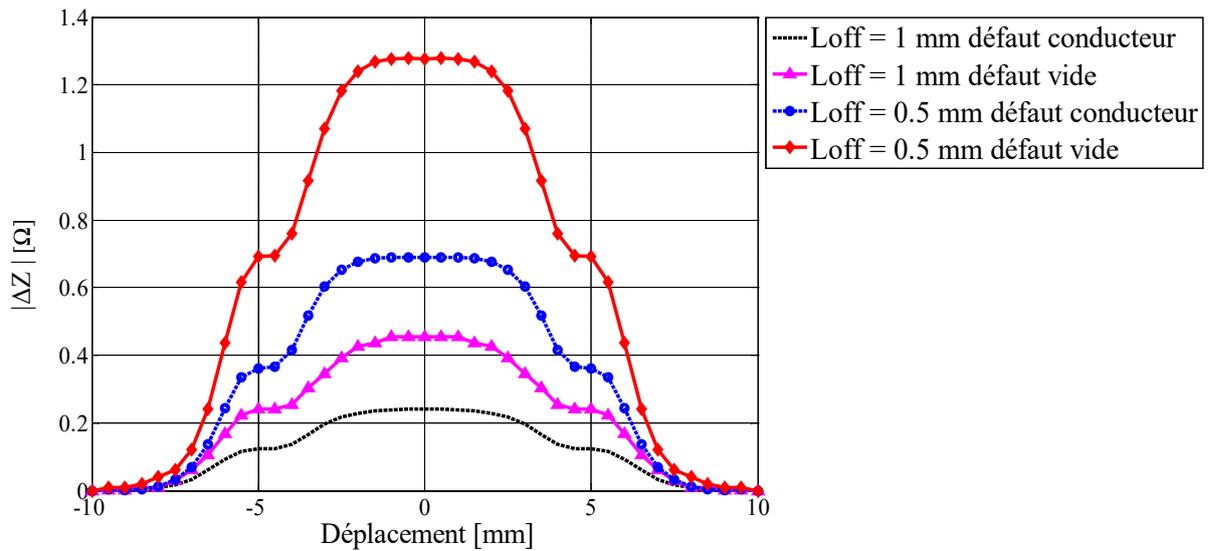


Fig. III. 25 Effet de la variation du lift-off $|\Delta Z|$.

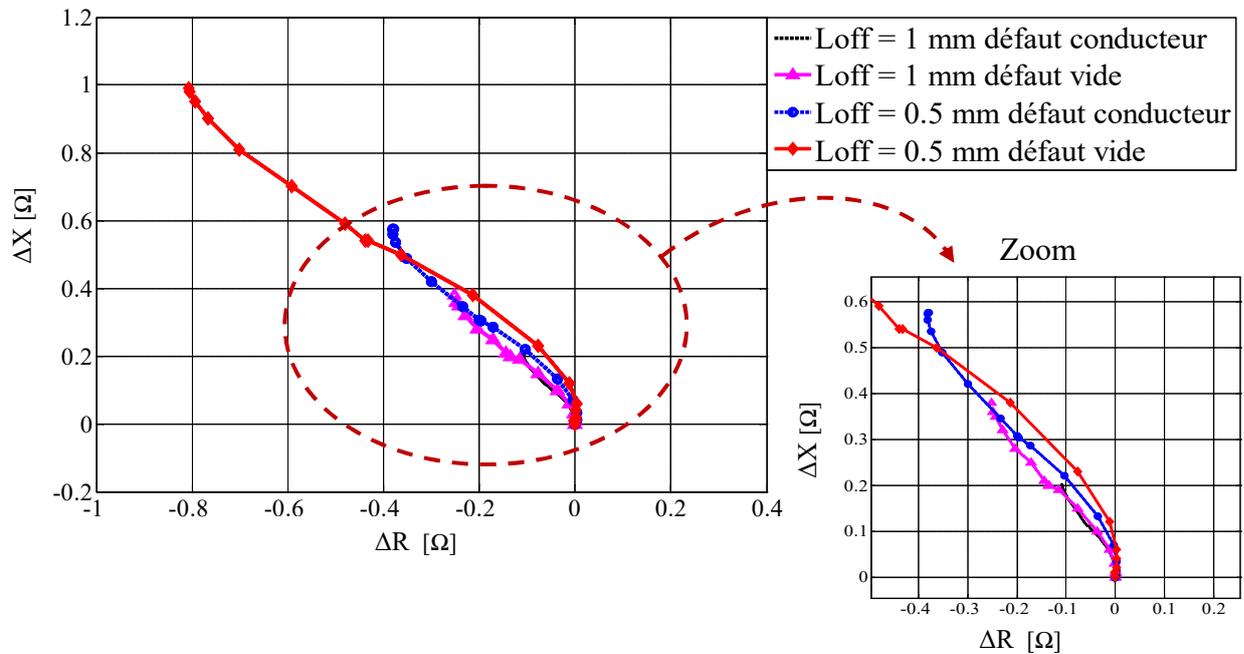


Fig. III. 26 Effet de la variation du lift-off sur ΔX en fonction de ΔR .

Les Figures (III. 24 et III.25), illustrent les résultats de simulation pour différentes valeurs du lift-off “Loff”, distance capteur-pièce. On remarque qu’en premier lieu l’amplitude du signal pour défauts manque de matière est toujours plus importante que celle du défaut conducteur, en second lieu, la variation d’amplitude du signal ΔR , ΔX et $|\Delta Z|$, est inversement proportionnellement avec l’augmentation du lift-off, enfin et à partir des courbes de phase, Figure (III. 26), on constat que ces dernières tournent dans le sens anti-horaire avec la diminution du Lift-off. Tout cela peut être justifié par le fait que l’effet du champ inverse des courants induits démunie avec l’augmentation du lift-off.

III.7.3 Effet des caractéristiques géométriques du défaut

III.7.3.a. Effet de la variation de la largeur du défaut

On procède à la variation de la largeur du défaut de 0.2 mm à 0.4 mm, tout en fixant la fréquence $f_r = 300$ kHz, la longueur du défaut $L_{od} = 10$ mm, hauteur du défaut $H_d = 0.75$ mm, (Figure (III. 27 à III. 29)).

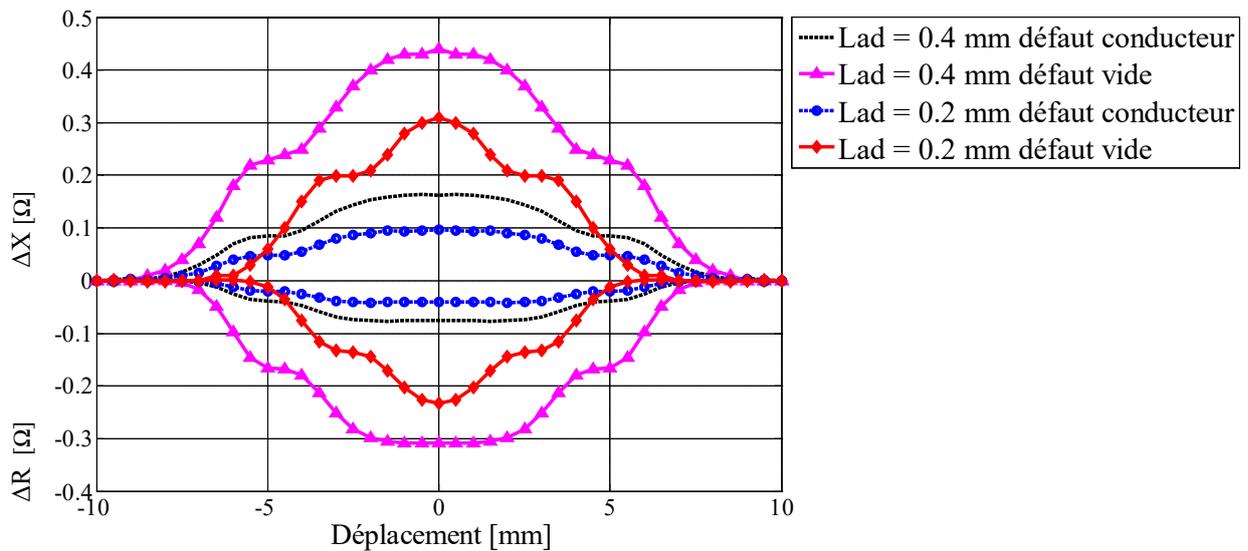


Fig. III. 27 Effet de la variation de la largeur du défaut sur ΔR et ΔX .

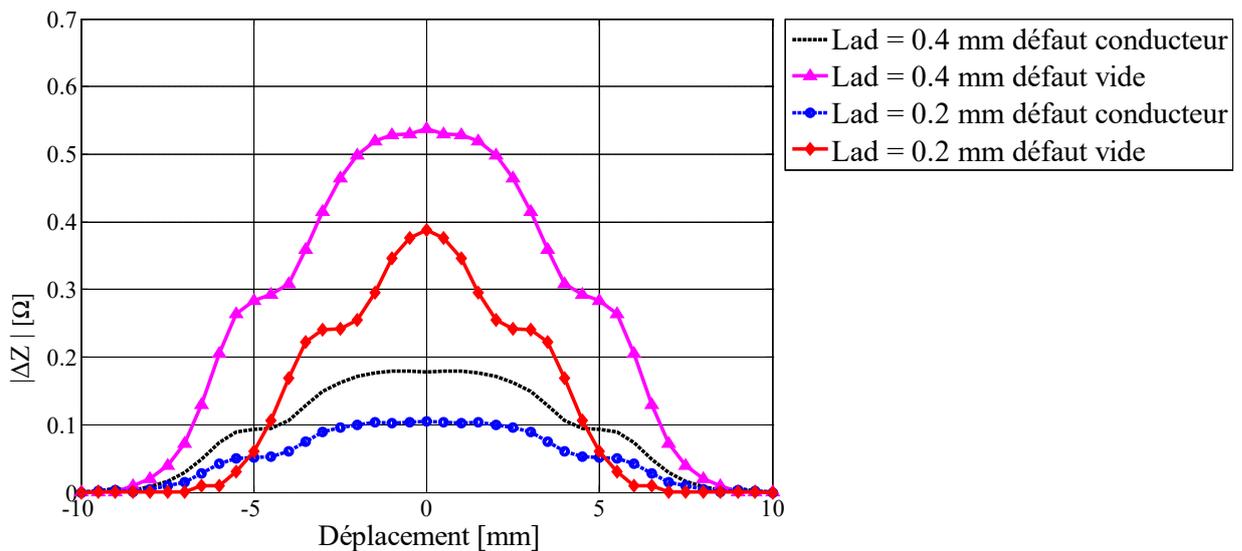


Fig. III. 28 Effet de la variation de la largeur du défaut sur $|\Delta Z|$.

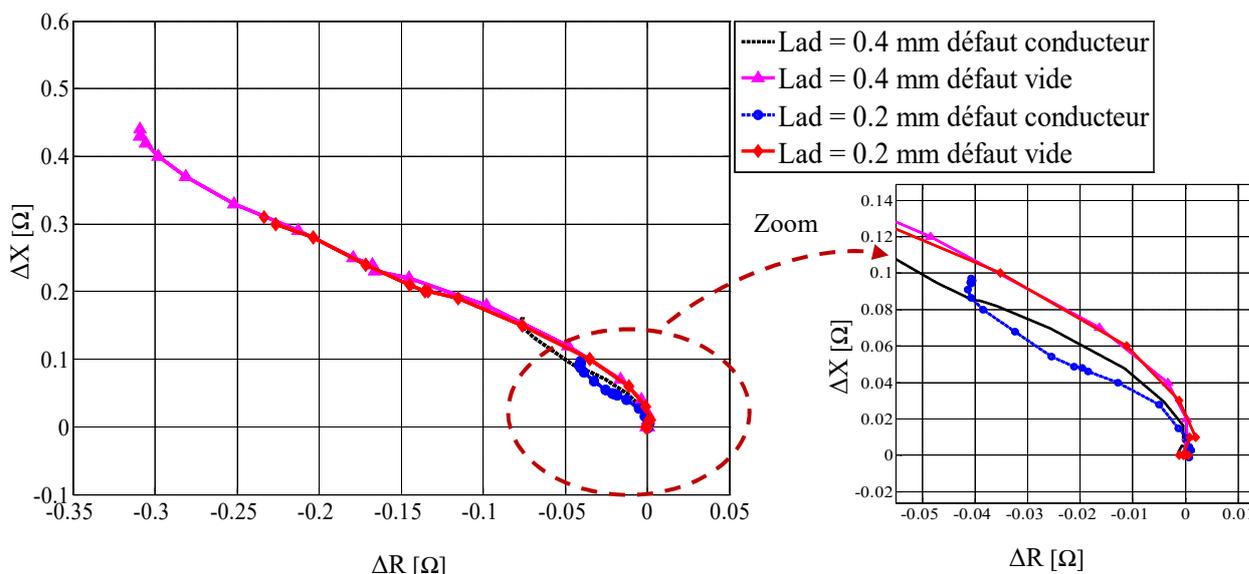


Fig. III. 29 Effet de la variation de la largeur du défaut sur ΔX en fonction de ΔR .

Les Figures (III. 27 et III. 28) présentent les résultats de simulation pour différentes valeurs de largeurs du défaut “Lad”. La première constatation est que malgré l’utilisation de défauts très fins, avec largeurs de l’ordre de 0.2 à 0.4 mm, l’effet de cette dernière est clairement visible sur l’amplitude des signaux ΔR , ΔX et $|\Delta Z|$. Pour le diagramme de phase, Figure (III. 29), le déphasage est plus net pour un défaut conducteur que pour un défaut manque de matière tandis que l’amplitude du signal défaut est toujours supérieur à celui du défaut conducteur.

III.7.3.b. Effet de variation de la profondeur du défaut

On fait varier la profondeur du défaut H_d , de 0.5 mm à 1 mm, tout en fixant la fréquence $f_r = 300$ kHz, la longueur du défaut $L_{od} = 10$ mm, largeur $lad = 0.2$ mm, Figure (III. 30 à III. 33).

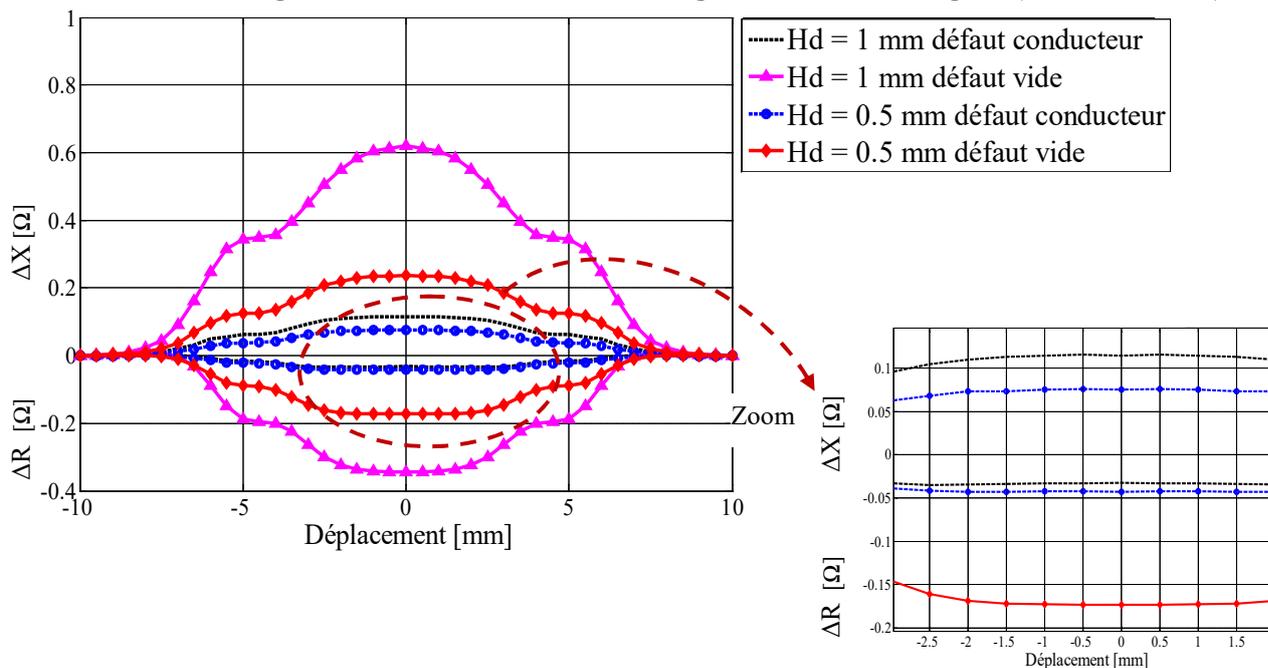


Fig. III. 30 Effet de la variation de la profondeur du défaut sur ΔR et ΔX .

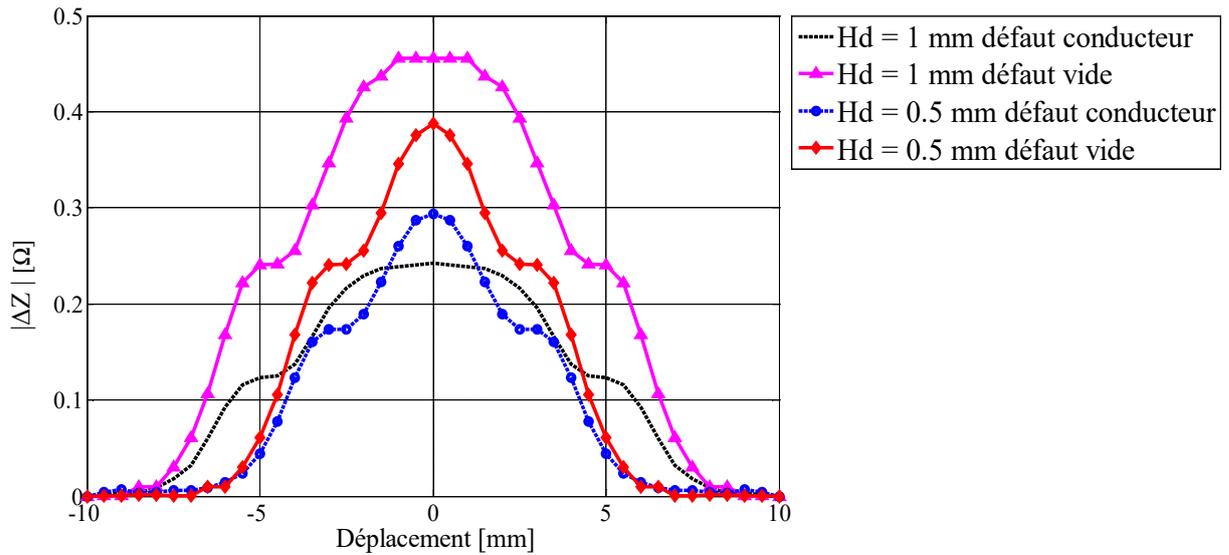


Fig. III. 31 Effet de la variation de la profondeur du défaut sur $|\Delta Z|$.

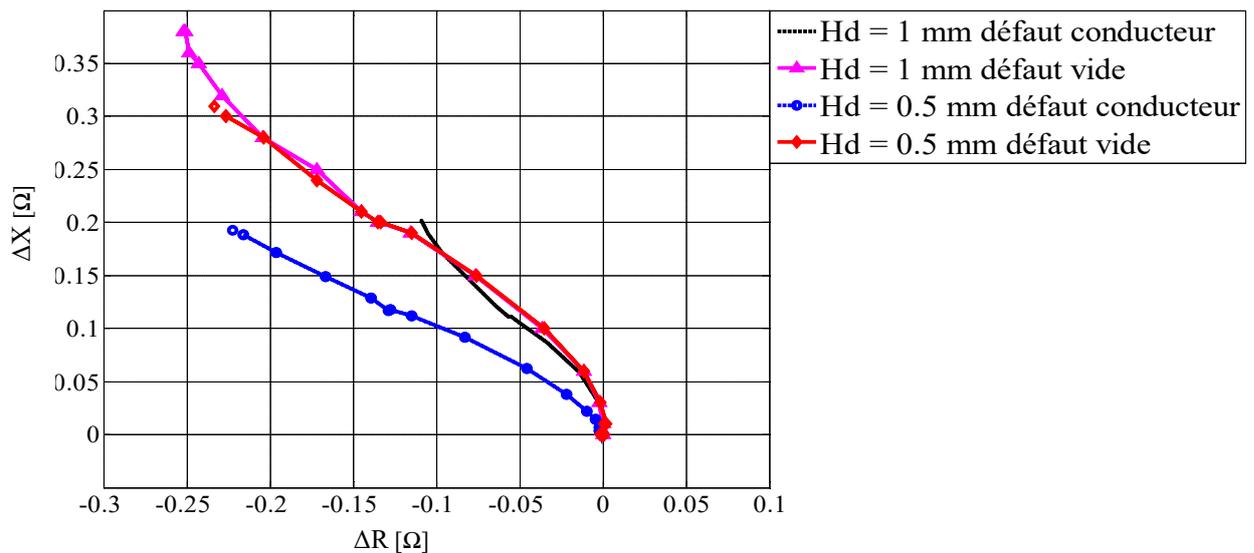


Fig. III. 32 Effet de la variation de la profondeur du défaut sur ΔX en fonction de ΔR .

Les Figures (III. 30 à III. 31). montrent les résultats de simulation pour différentes valeurs de H_d , hauteur de défaut. On constate que l'amplitude des signaux ΔR , ΔX , et $|\Delta Z|$, varie proportionnellement avec l'augmentation de H_d , à partir des courbes de phase, Figure (III. 32), on remarque aussi que ces dernières tournent dans le sens horaire avec l'accroissement de H_d , le déphasage pour une hauteur $H_d = 0.5$ mm est plus important et plus net, c'est un moyen de caractériser la profondeur du défaut au lieu d'utiliser l'amplitude de la variation d'impédance. L'amplitude des signaux est plus importante pour les défauts manque de matière.

III.7.3.c. Effet de variation de la longueur du défaut

On varie la longueur du défaut de 6.0 mm à 10.0 mm, tout en fixant la fréquence $F_r = 300$ kHz, le lift-off $L_{off} = 1$ mm, la largeur $lad = 0.2$ mm et la hauteur défaut $H_d = 0.75$ mm, Figures (III. 33 à III. 35).

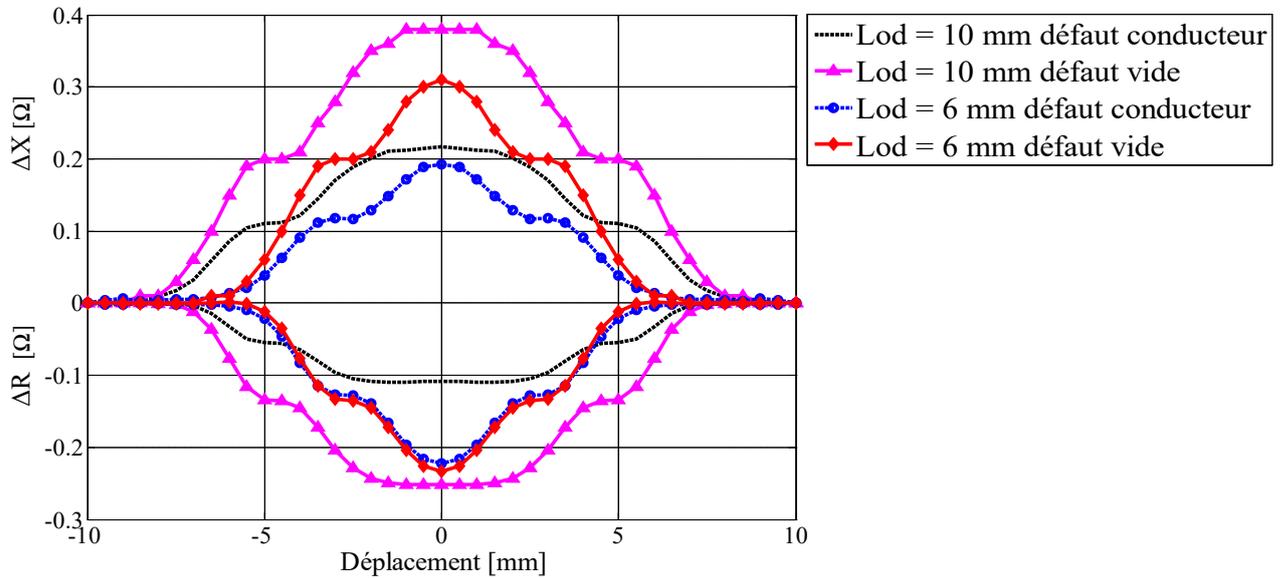


Fig. III. 33 Effet de la variation de la longueur du défaut sur ΔR et ΔX .

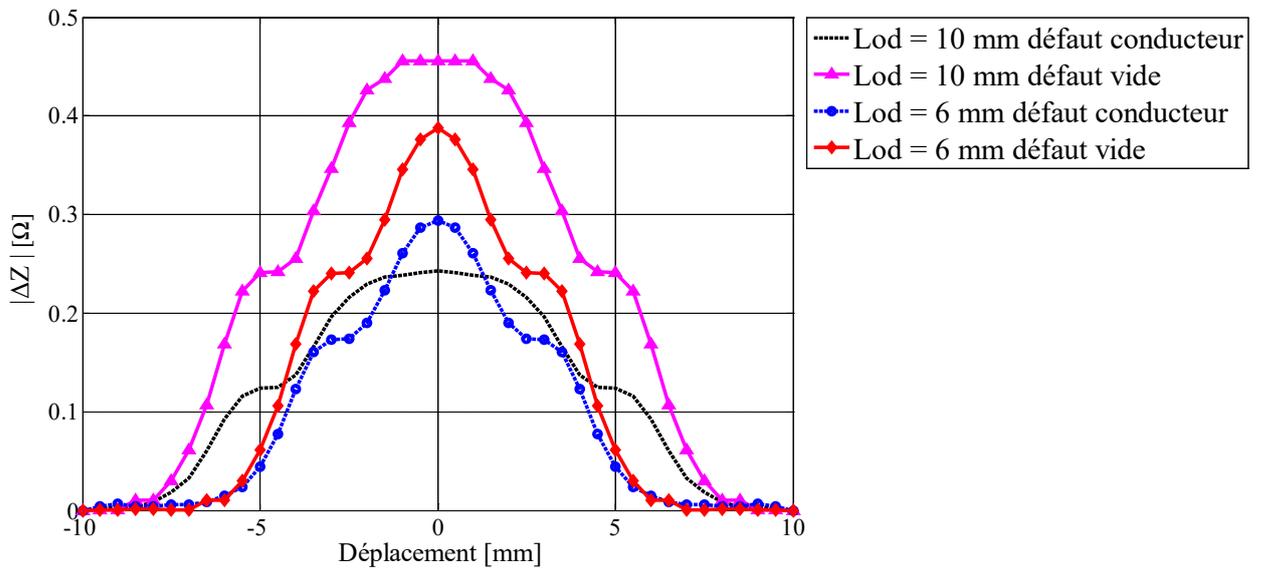


Fig. III. 34 Effet de la variation de la longueur du défaut sur $|\Delta Z|$.

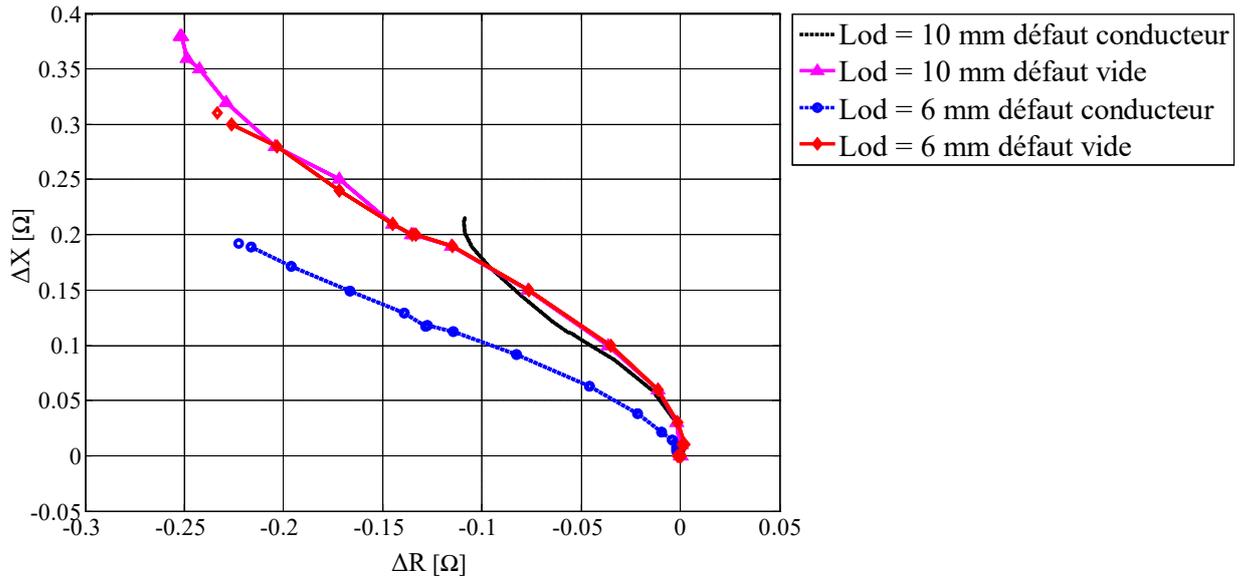


Fig. III. 35 Effet de la variation de la longueur du défaut sur ΔX en fonction de ΔR .

Les résultats de simulation pour différentes valeurs de la longueur du défaut Lod , sont présentés sur les Figures (III. 33 à III. 34). L'effet de la longueur du défaut (Lod) est très net du point de vue amplitude sur les signaux ΔR , ΔX , et $|\Delta Z|$. Cette variation est proportionnelle à l'augmentation de la longueur du défaut. Par contre les courbes de phase, Figure (III. 35), montrent que la variation de phase est très claire dans le cas d'un défaut conducteur et pour défaut manque de matière.

III.8 Conclusion

A travers ce chapitre, en premier lieu, un modèle magnétodynamique du système étudié a été formulé, puis un modèle 3D, du CND-CF en mode absolu avec fissure volumique, basé sur la méthode des éléments finis a été implémenté sous le logiciel COMSOL Multiphysics. Une formulation magnétique a été utilisée pour modéliser notre système, au cours de cette dernière, l'utilisation de cette formulation avec le logiciel COMSOL Multiphysics a permis d'économiser des ressources informatiques en particulier en ce qui concerne le temps de calcul et de la mémoire requise pour les simulations. L'approche que nous avons développée a permis de simuler le déplacement rectiligne du capteur, c'est-à-dire la simulation du mouvement a été prise en compte pour ce modèle géométrique en 3D.

En second lieu, et avant d'étudier l'effet de la pollution conductrice, sur les signaux du CND-CF en mode absolu, nous avons pu valider le modèle développé en le comparant d'une part aux signaux expérimentaux du Benchmark Team Workshop N°15-1 et du Benchmark JSAEM, et d'autre part aux signaux de simulations selon les deux approches $A-\psi$ et $T-\Phi$ élaborées par (Choua, 2010), et par (Helifa, 2012). Cette comparaison montre une parfaite concordance soit du point de vue allure des signaux ou de leurs amplitudes.

Les signaux représentant les variations de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur ont été adoptés comme des signatures caractéristiques des fissures modélisées avec matériaux polluants à l'intérieur du volume de la fissure.

Ces résultats de simulations ont été comparés à ceux de la modélisation avec défaut manque de matière (défaut non pollué), il en résulte que l'impact des matériaux conductrices sur le signal de contrôle est important et doit être pris en compte lors des CND-CF.

En dernier lieu, l'étude de la sensibilité nous a permis de mettre en évidence d'une part l'effet des paramètres influant sur le CND-CF tels que le lift-off, la fréquence et les grandeurs géométriques du défaut et d'autre part l'effet du défaut pollué, il en résulte que si le défaut est pollué par un matériau conducteur très proche de celui de la pièce à testée il peut induire en erreur le contrôleur car la variation de l'impédance sera pratiquement nulle et donc pas de défaut, alors qu'il existe.

Cette étude a montré que pour des fissures minces de l'ordre de 0.2 mm:

- ✓ Les composantes de la variation l'impédance du capteur sont dépendent des grandeurs géométriques de la fissure, principalement de la longueur et de la profondeur, et même pour les défauts très fins (jusqu'à 0.2 mm de largeur) les signaux restent très nets,*
- ✓ Les composantes de la variation l'impédance du capteur sont dépendent des paramètres tels que la fréquence et le lift-off,*
- ✓ Le signal correspondant aux variations de la réactance est plus intense que celui correspondant aux variations de la résistance, ce signal est plus sensible aux variations de la longueur de la fissure.*
- ✓ L'amplitude des signaux de la réponse du CND-CF est plus importante pour les défauts manque de matière que ceux conducteurs.*

Etant donné que le CND - CF est simple et efficace du point de vue utilisation, un des secteurs privilégiés de cette technique est celui de l'aéronautique pour l'inspection de structures multicouches rivetées pour détecter d'éventuels défauts qui peuvent se créer au pied ou sous la tête de rivet et se propager compte tenu des grandes contraintes mécaniques qui s'exercent sur celles-ci. C'est dans ce contexte que s'inscrira la problématique du prochain chapitre.

Chapitre IV

Application du CND-CF aux Structures Rivetées

IV.1	Introduction	67
IV.2	Structures rivetées à 3 couches d'aluminium	69
IV.2.1	Modèle géométrique et description.....	69
IV.2.2	Caractéristiques géométriques et physiques	70
IV.2.3	Résultats de simulation	70
IV.3	Comparaison des défauts ayant la même longueur et se trouvant dans des couches différentes	74
IV.3.1	Variations partie imaginaire (ΔX) et réelle (ΔR) en fonction du déplacement	74
IV.3.2	Diagramme de phases des variations partie imaginaire (ΔX) en fonction des variations réelle (ΔR)	76
IV.4	Influence du rivet adjacent.....	80
IV.5	Conclusion.....	81

Chapitre IV Application du CND-CF aux Structures Rivetées

IV.1 Introduction

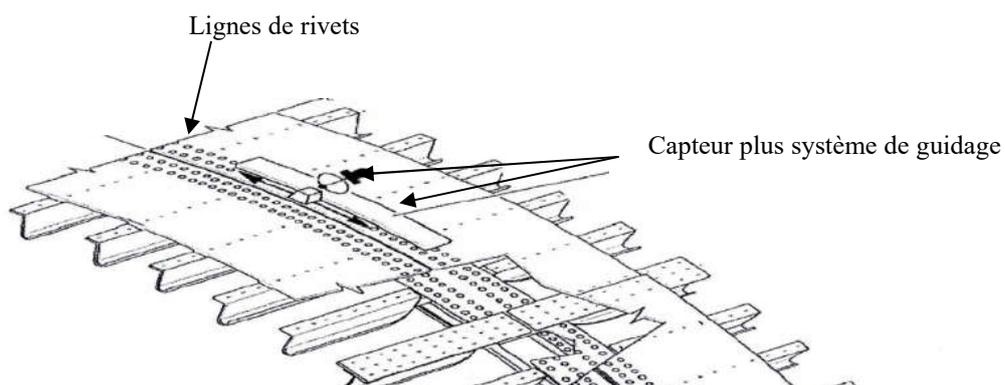
Dans le domaine aéronautique, les contraintes économiques tendent à accroître la durée de vie des appareils au-delà de leur premier cycle. Dans ce cas, pour un second voire un troisième cycle de vie, il devient nécessaire, par mesure de sécurité, d'effectuer des contrôles d'usure plus approfondis. Pour en assurer la maintenance, de nombreux contrôles non destructifs ponctuent la durée d'exploitation de l'avion afin de détecter un défaut avant qu'un seuil critique ne soit atteint, (Figure IV. 1.d).

Un des grands enjeux est de contrôler les lignes de rivets pour détecter d'éventuels phénomènes de fissuration qui peuvent se créer au pied ou sous de rivet se propager compte tenu des grandes contraintes mécaniques qui s'exercent sur ceux-ci. En effet, les défauts présents dans les structures rivetées naissent en pied de rivet et grandissent suivant l'axe de la ligne de rivetage. La détection de ces défauts doit être effectuée de manière précoce avant que celui-ci ne se propage de rivet en rivet pouvant provoquer l'arrachage du fuselage durant un vol, Figure (IV. 1), (Paillard, 2008), (Thomas, 2010).

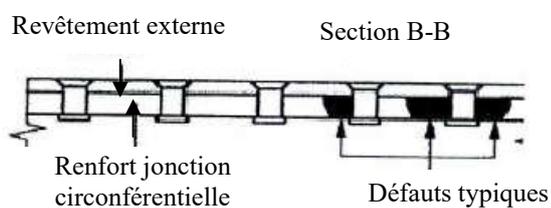
Ces maintenances sont coûteuses (périodes d'immobilisation des appareils) et primordiales pour la sécurité des passagers, ce qui explique l'importance de l'optimisation des procédés de contrôle. L'utilisation des outils de simulation constitue une aide précieuse pour la mise au point de méthodes de contrôle, leurs optimisations et leurs qualifications, (Paillard, 2008).

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux structures multicouches de plaques conductrices rivetées contrôlée par un capteur à courants de Foucault muni d'un noyau ferrite, en mode absolu.

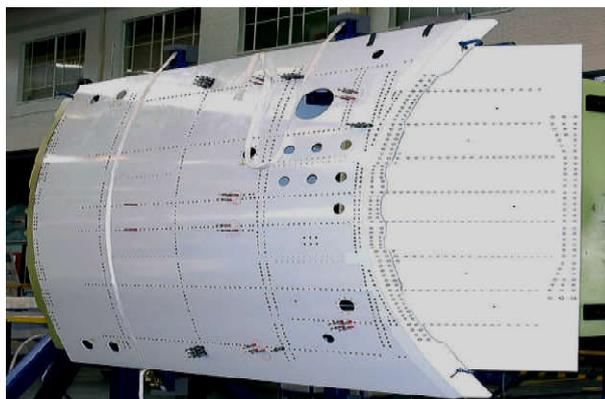
Pour mettre en évidence l'effet des défauts, nous proposons une étude avec des défauts variables du point de vue longueur par rapport à la longueur de la tête de rivet (inférieure et supérieure) et du point de vue positionnement dans les couches, tout en le matériau du rivet, d'où le système n'est pas homogène.



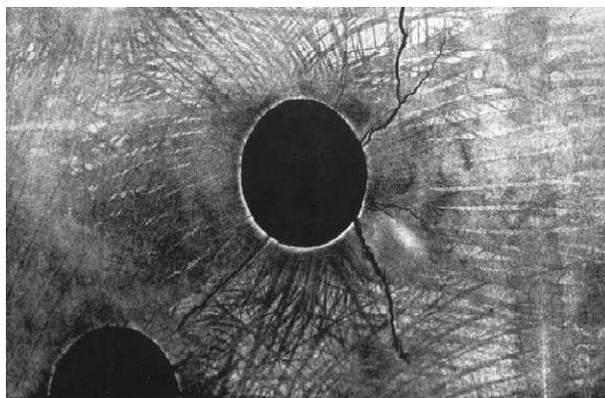
a) Schéma du fuselage riveté d'un avion



b) Schéma en vue de coupe du fuselage riveté d'un avion.



c) Photo réelle du fuselage riveté d'un avion, (Paillard, 2008).



d) Apparition du défaut au pied de l'alésage du rivet, (Pipis, 2015).

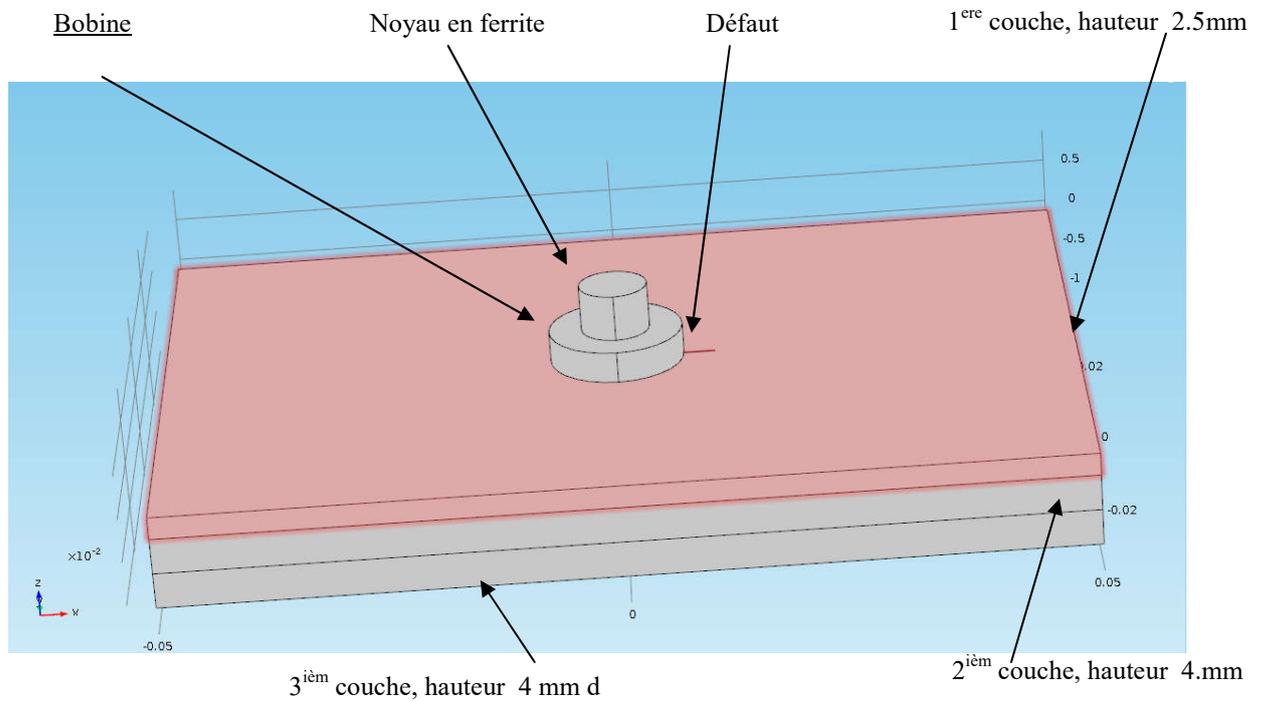
Fig. IV. 1 Structure rivetées utilisée en aéronautique.

IV.2 Structures rivetées à 3 couches d'aluminium

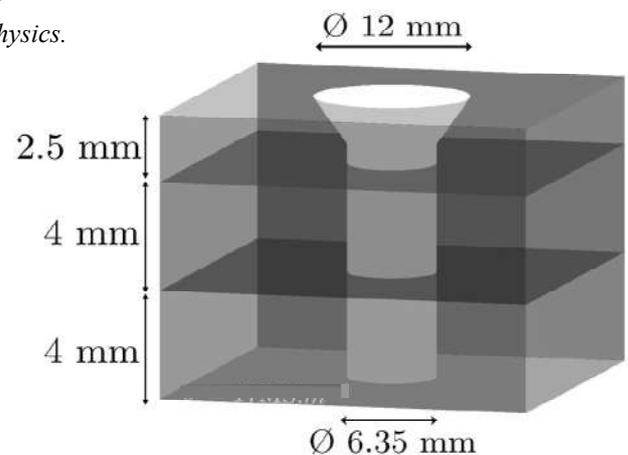
IV.2.1 Modèle géométrique et description

La littérature recèle un certain nombre de travaux concernant l'étude et la mise en œuvre de techniques de CND-CF utilisées en aéronautique. La structure multicouche rivetée proposée est une référence dans ce domaine, car ses caractéristiques géométrique et physique sont issues de modèle réel industriel du secteur, (Choua, 2010), (Paillard, 2008)

La structure est constituée de plaques planes empilées constituées d'aluminium (homogènes et non ferromagnétiques et leur conductivité varie entre 10 MS/m et 30 MS/m), altérées ou non par un défaut, contrôlée par un capteur à courants de Foucault muni d'un noyau en ferrite, en mode absolu, Figure (IV. 2).



a) Vue globale du modèle sous COMSOL Multiphysics.



b) Détail rivet, (Paillard, 2008).

Fig. IV. 2 Géométrie du modèle proposé.

IV.2.2 Caractéristiques géométriques et physiques

Le Tableau (IV. 1), englobe les caractéristiques géométriques et physiques de la structure multicouches à modéliser.

Tableau IV. 1 Paramètres géométriques et physiques de la structure rivetée

Plaque	Bobine		Rivet		
Longueur	100 (mm)	Hauteur	3.46 (mm)	Rayon de tête	6 (mm)
largeur	70 (mm)	Rayon extérieur	7.325 (mm)	Rayon corps	3.175 (mm)
hauteur couche 1	2.5 (mm)	Rayon intérieur	3.74 (mm)	Rayon alésage	3.175 (mm)
hauteur couche 2	4.0 (mm)	Nombre de spire	926	Conductivité (σ)	$2.34e^6$ (S/m)
hauteur couche 3	4.0 (mm)	Conductivité (σ)	$60e6$ (S/m)		
Conductivité (σ)	$17e^6$ (S/m)	courant (I)	1.0 (A)		
Perméabilité (μr)	1	Lift-off	0.09 (mm)		
Permittivité (ϵr)	1	Fréquence	1.6 (kHz)		
		Hauteur ferrite	8.65 (mm)		
		Perméabilité (μ) ferrite	1100		

IV.2.3 Résultats de simulation

Afin de mettre en évidence la sensibilité de la détection des défauts enfoui dans les structures multicouches rivetées, nous allons varier la longueur du défaut, de telle sorte qu'il soit inférieure ou égale au diamètre de la tête du rivet d'une part, et d'autre part juste supérieur au diamètre extérieur de la bobine (5 mm), (Choua, 2010) et largement supérieur à cette dernière.

La largeur du défaut, noté L_{ad} étant fixe et égale à 0.2 mm, quant à la hauteur elle égale à la hauteur de la couche où se trouve le défaut. Les longueurs utilisées sont:

- ✓ $L_{ad1} = (\text{Rayon tête de rivet} - \text{Rayon corps de rivet}) * 0.5 = (6 - 3.175) * 0.5 = 1.4125 \text{ mm}$;
- ✓ $L_{ad2} = (\text{Rayon tête de rivet} - \text{Rayon corps de rivet}) = (6 - 3.175) = 2.825 \text{ mm}$;
- ✓ $L_{ad3} = 5 \text{ mm}$, (Choua, 2010) ;
- ✓ $L_{ad4} = 5 * 1.5 = 7.5 \text{ mm}$;
- ✓ $L_{ad5} = 5 * 2 = 10 \text{ mm}$.

Dans cette première partie, nous allons présenter les résultats de simulations des diagrammes de phases (courbes de Lissajous) pour chaque couche.

IV.2.3.a. Défaut dans la première couche

La Figure (IV. 3) montre l'évolution des variations de la réactance (parties imaginaires) en fonction des variations de la résistance (parties réelles) de la sonde. pour la première couche.

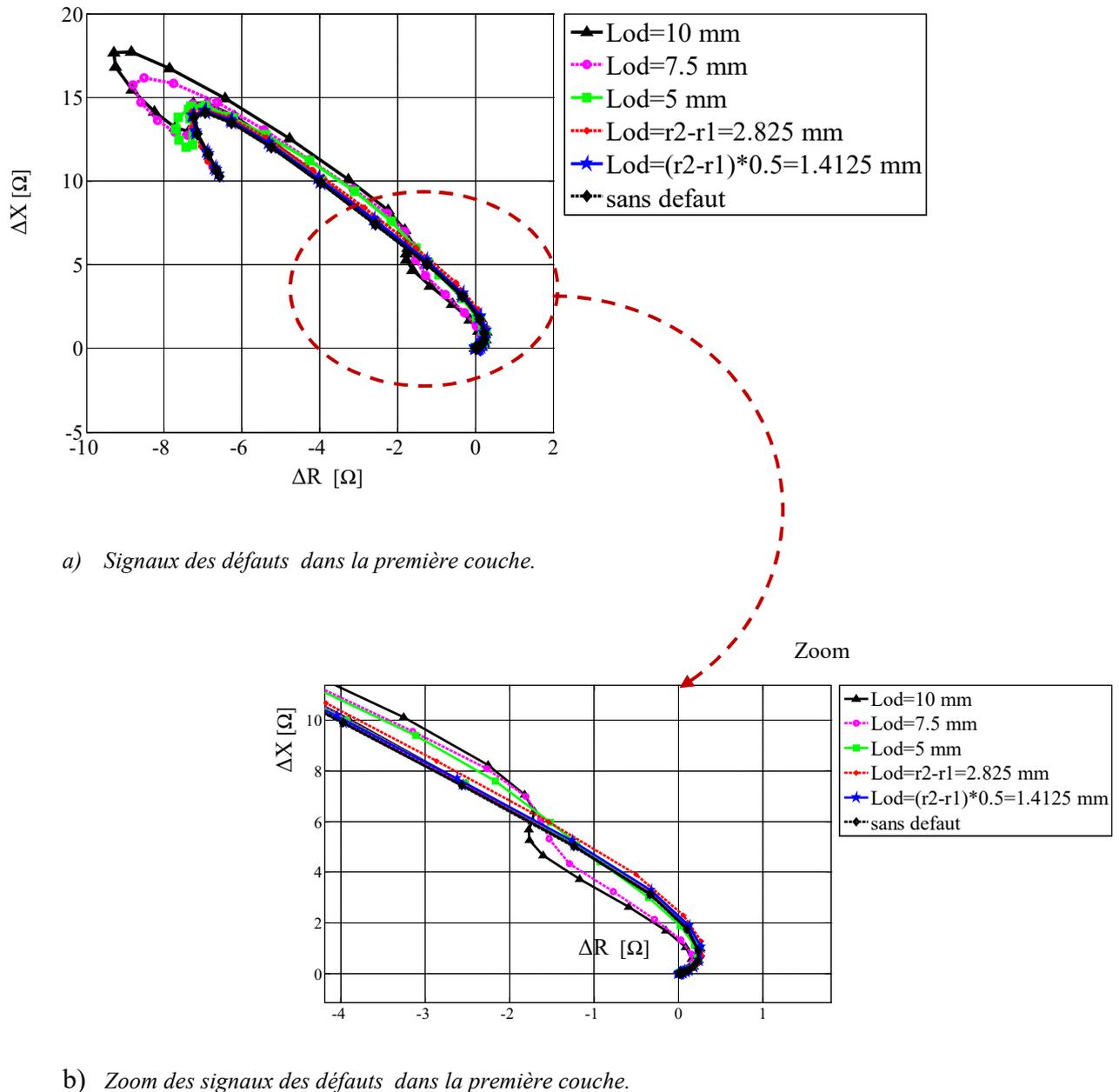
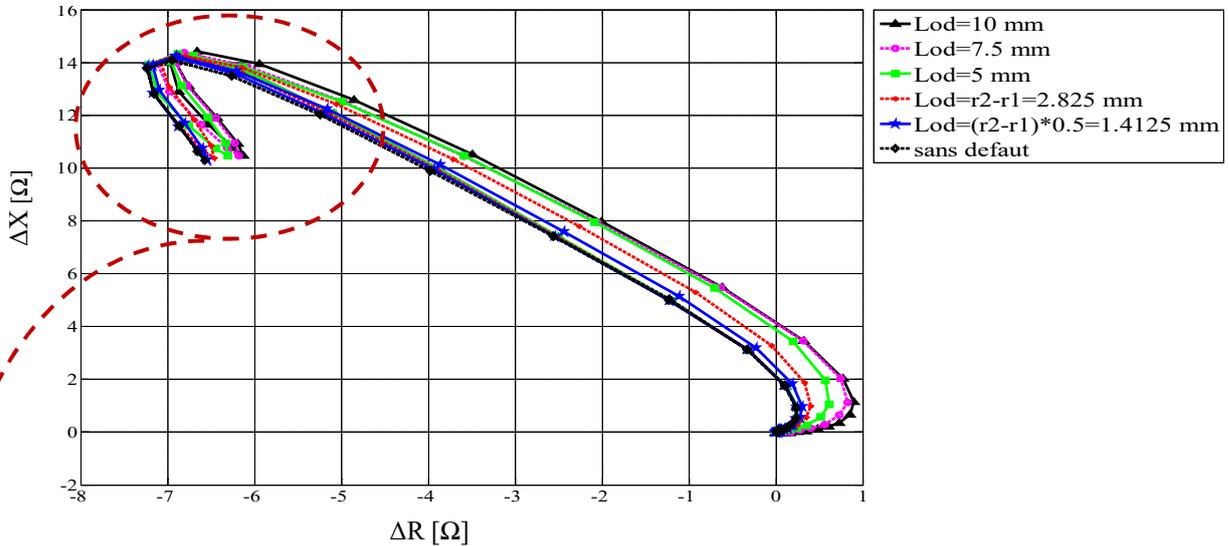


Fig. IV. 3 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR dans la première couche.

On remarque que les courbes de phase, tournent dans le sens horaire avec l'augmentation de la longueur des défauts, comme le montre la Figure (IV. 3). L'amplitude des signaux est proportionnelle à la longueur du défaut elle est très visible pour les longueurs importantes et moins pour les défauts masqués par la tête des rivets, tout en restant visible sans le zoom.

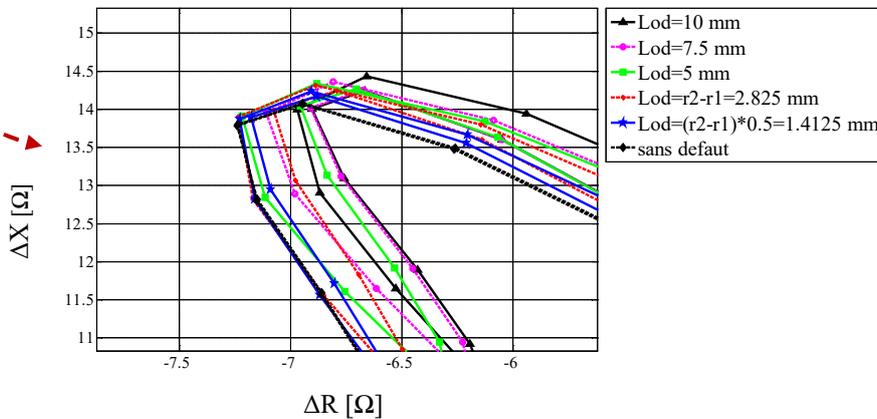
IV.2.3.b. Défaut dans la deuxième couche

La Figure (IV. 4) présente les résultats de simulation d'un CND-CF pour les défauts se trouvant dans la deuxième couche, l'hauteur du défaut est de 4 mm.



a) Signaux des défauts dans la deuxième couche.

Zoom



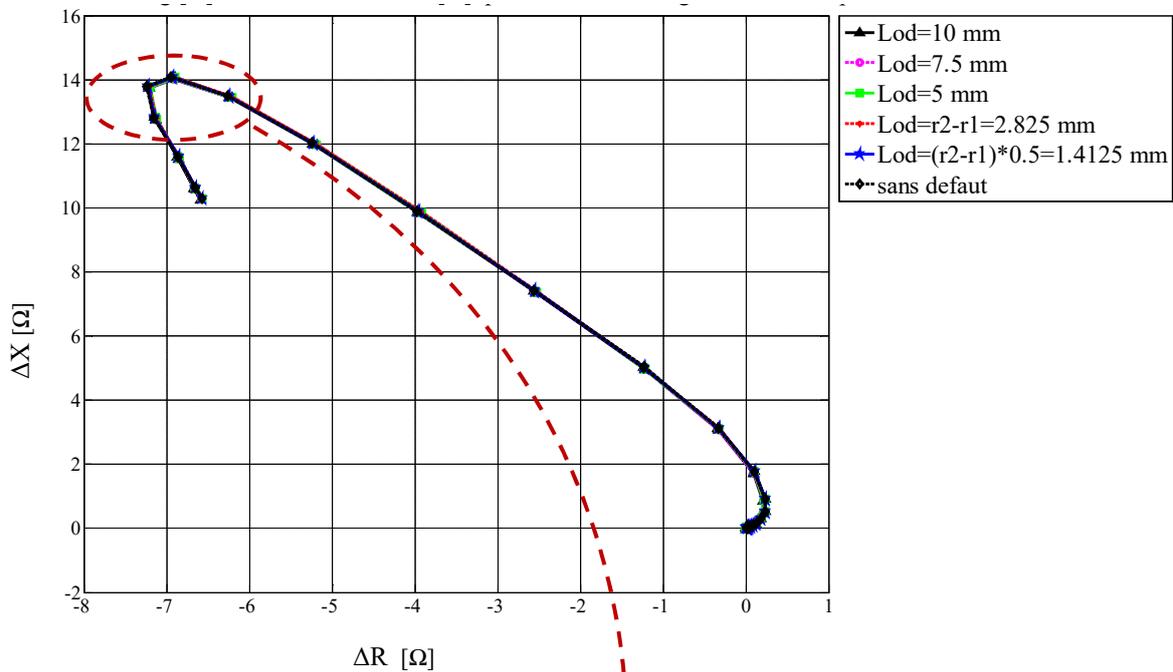
b) Zoom des signaux des défauts dans la deuxième couche.

Fig. IV. 4 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR dans la deuxième couche.

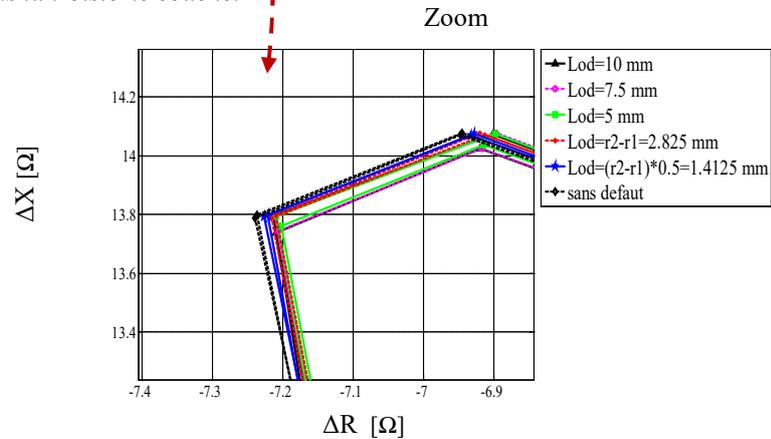
Le diagramme de phase des variations de ΔX en fonction de ΔR pour la deuxième couche, reste lisible du point de vue phase de chaque défaut, par contre l'amplitude du signal est moins significatif par rapport au cas précédent (première couche) car la sensibilité de la détection diminue avec l'éloignement du défaut de la sonde, Figure (IV. 4).

IV.2.3.c. Défaut dans la troisième couche

La Figure (IV. 5) illustre les résultats de simulation d'un CND-CF pour défauts se trouvant dans la troisième couche, la hauteur du défaut est de 4 mm.



a) Signaux des défauts dans la troisième couche.



b) Zoom des signaux des défauts dans la troisième couche

Fig. IV. 5 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR dans la dans la troisième couche.

Les diagrammes de phase des variations de ΔX en fonction de ΔR pour la troisième couche des différents défauts, reste pratiquement superposés, et il faut donc passé par un agrandissement important pour déceler la différence des signaux, Figure (IV. 5).

On peut constater un manque de lisibilité du signal, essentiellement pour les couches inferieures et pour les défauts qui peuvent être cachés par la tête de rivet.

IV.3 Comparaison des défauts ayant la même longueur et se trouvant dans des couches différentes

IV.3.1 Variations partie imaginaire (ΔX) et réelle (ΔR) en fonction du déplacement

Les Figures (IV. 6 à IV. 10) illustre les courbes des signaux de défauts ayant la même longueur et se trouvant dans les trois couches.

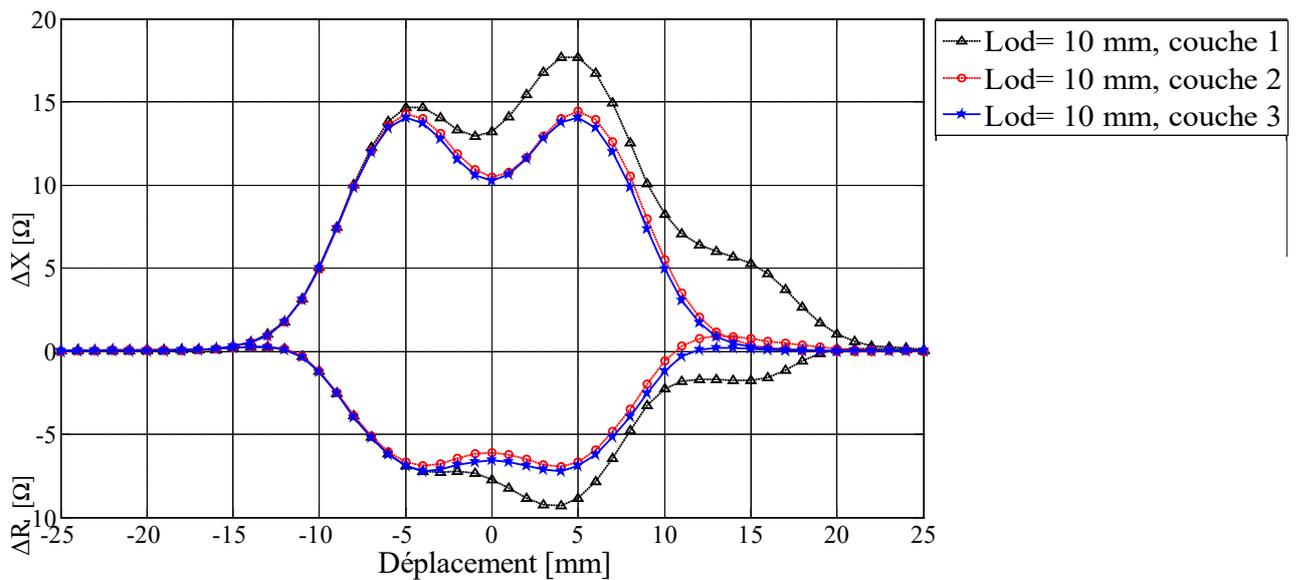


Fig. IV. 6 Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 10 mm de longueur.

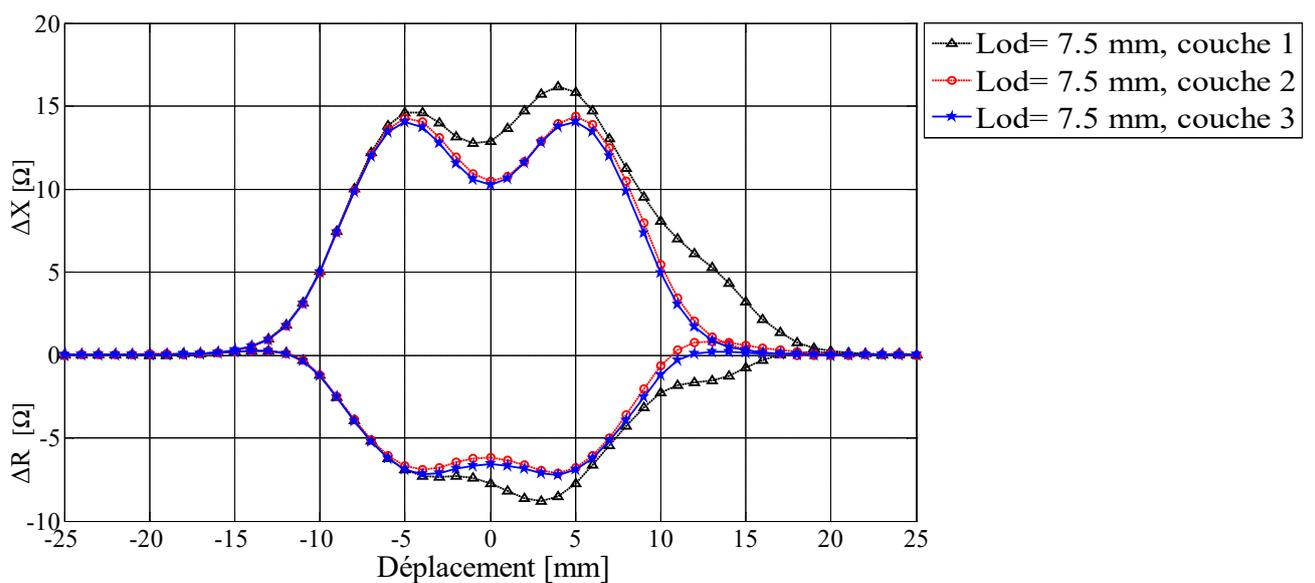


Fig. IV. 7 Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 7.5 mm de longueur.

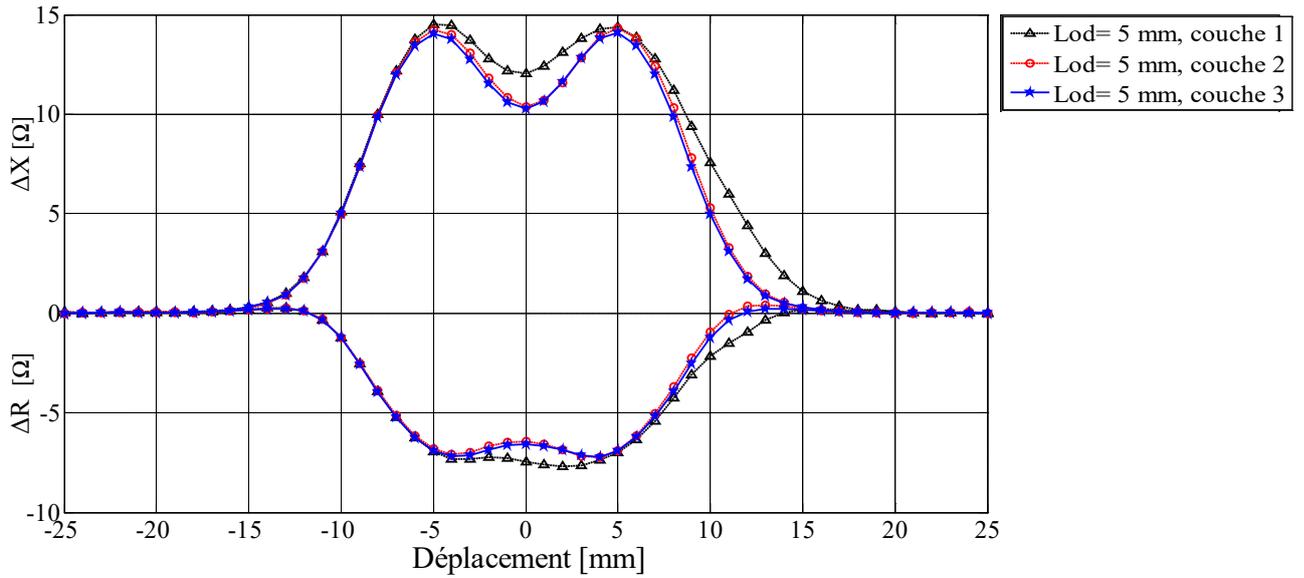


Fig. IV. 8 Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 5 mm de longueur.

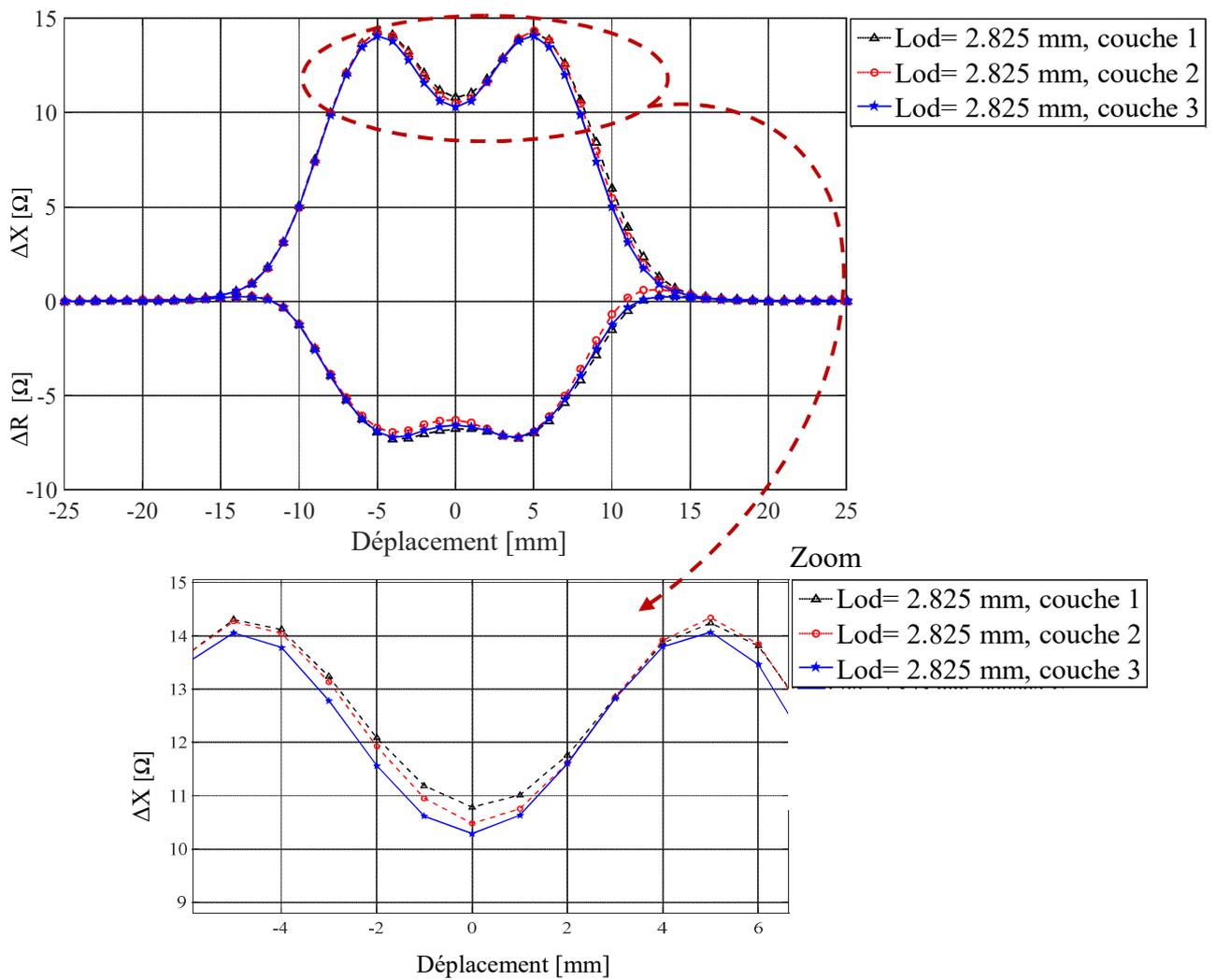


Fig. IV. 9 Signaux de défauts seuls pour les trois couches: Défaut de 2.825 mm de longueur.

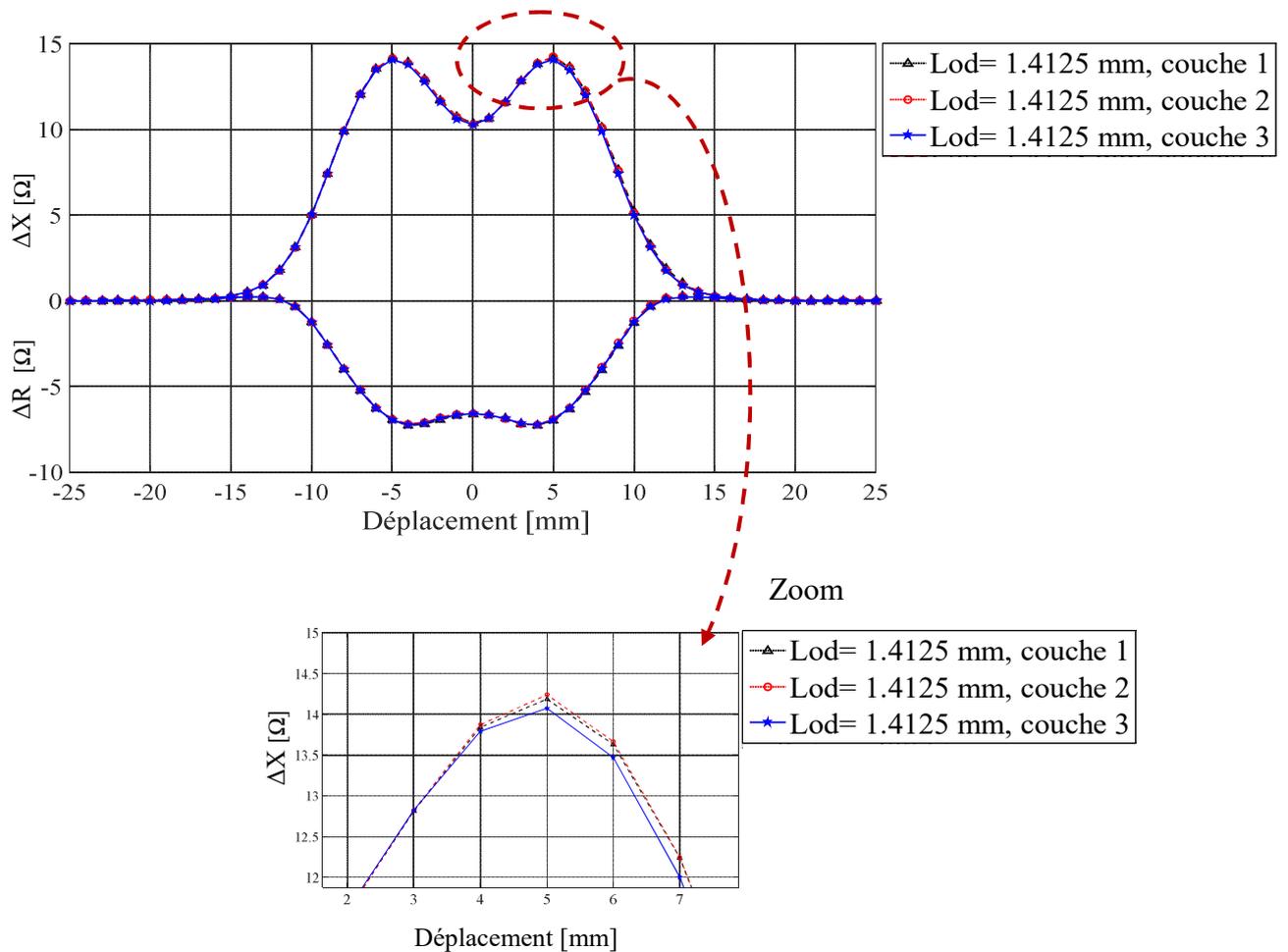


Fig. IV. 10 Signaux de défauts seuls pour de la troisième couche: Défaut de 1.4125 mm de longueur.

D'après les Figures (IV. 6 -10), l'amplitude du signal est proportionnelle à la longueur du défaut. Elle est très visible pour les défauts supérieurs ou égaux à 5mm, et observable même pour le défaut situé au même niveau que la tête de rivet et reste moins nette pour le défaut 1.4125 mm, il faut passer par le zoom. On constate aussi que la sensibilité de la détection commence avant l'arrivée au début des défauts, ce qui rend cette dernière efficace pour le CND-CF pour les structures rivetées.

IV.3.2 Diagramme de phases des variations partie imaginaire (ΔX) en fonction des variations réelle (ΔR)

Les Figures (IV. 11 à IV. 15) illustrent les courbes des signaux des phases des défauts de même longueur et se trouvant dans les trois couches.

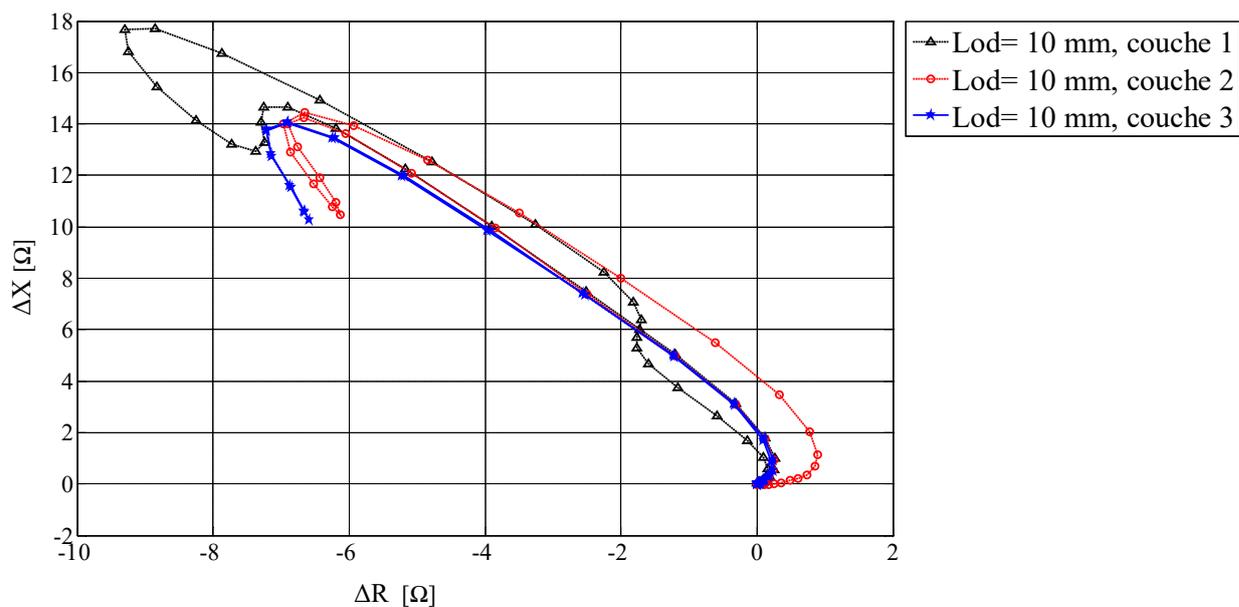


Fig. IV. 11 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de 10 mm.

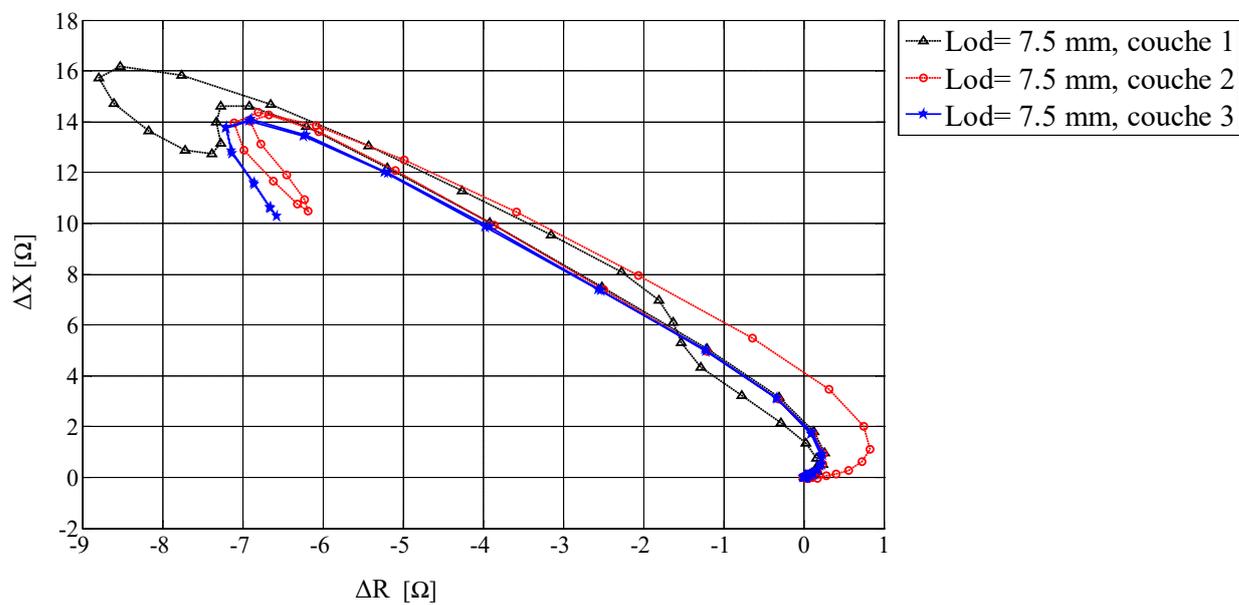


Fig. IV. 12 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de 7.5 mm.

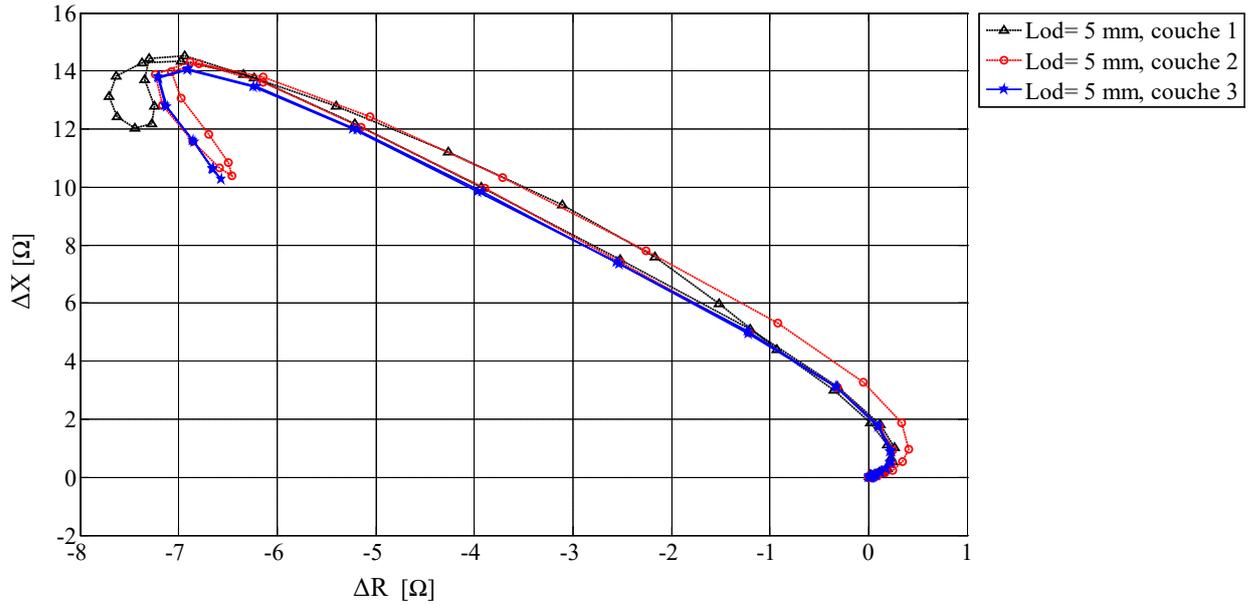
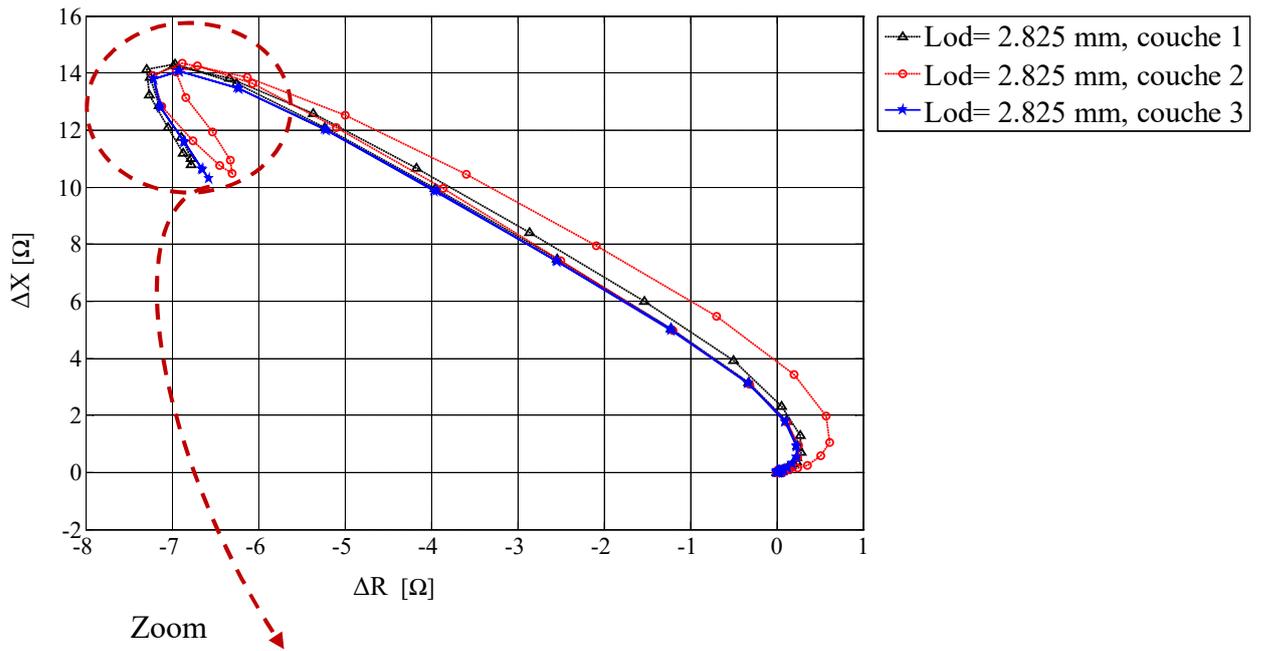


Fig. IV. 13 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de 5 mm.



Zoom

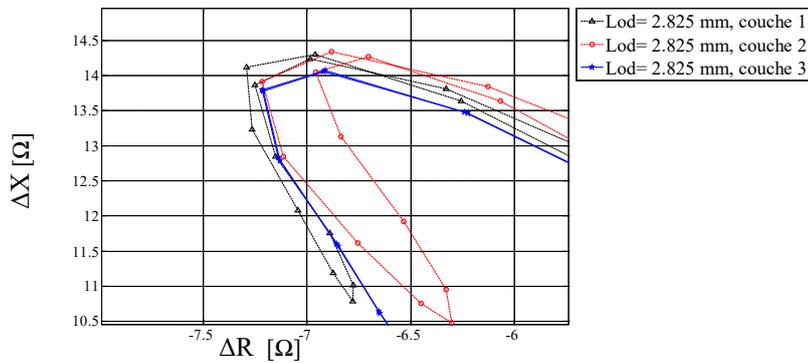


Fig. IV. 14 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de 2.825 mm.

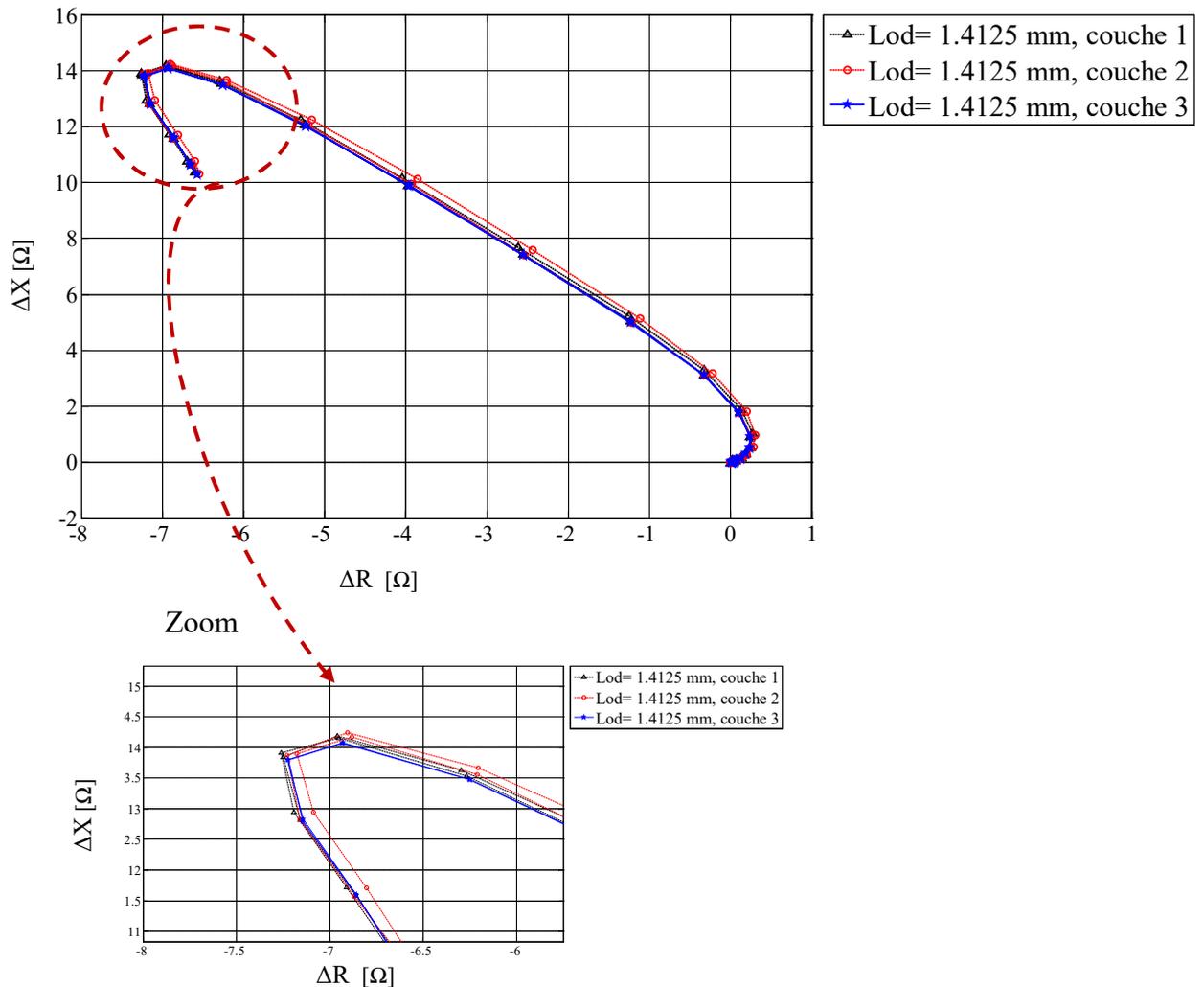


Fig. IV. 15 Signaux de phases ΔX en fonction de ΔR pour les défauts de 1.4125 mm.

Les Figures (IV. 11 -15), montrent les signaux des diagrammes de phases des variations de la partie imaginaire ΔX en fonction des variations de la partie réelle ΔR , on peut constater qu'ils sont proportionnelle aux longueurs des défauts, c'est-à-dire que la différence des amplitudes et des phases est très nette pour les défauts dont la longueur est égale ou supérieure à 5 mm (Fig. IV.11-13). Pour le défaut situé à la limite du rayon de la tête de rivet, de longueur 2.825 mm (Fig. IV.14), la différence de phase est lisible par contre la différence d'amplitude est moins nette, cela est dû au fait que le défaut est caché par la tête du rivet. Et enfin les signaux du défaut dont la longueur est égale à la moitié du rayon de rivet (1.4125 mm), ils apparaissent superposés, avec une différence des amplitudes pratiquement nulle et une légère différence du point de vue phase après utilisation du zoom, (Fig. IV.15).

Donc on peut conclure que la détection des défauts de longueur supérieur au rayon du rivet se fait en exploitant à la fois les différences de phase et d'amplitude des signaux de ces digrammes, par contre, pour les défauts qui présentent une longueur égale ou inférieur au rayon du rivet, la détection se fait uniquement par la différence de phase.

IV.4 Influence du rivet adjacent

Les lignes de rivets sont caractérisées par espace inter-rivet de l'ordre de 22 mm, (Paillard, 2008), étant donné que le capteur utilisé a des dimensions relativement grandes (diamètre externe de la bobine de 12 mm) par rapport à la distance inter-rivets, nous avons jugé utile d'étudier l'effet des rivets qui se trouvent à proximité du rivet contrôlé, Figure (IV. 16).



Fig. IV. 16 Photo alésage de rivet adjacents, (Paillard, 2008).

Le rivet adjacent est situé à droite du rivet contrôlé, la Figure (IV. 17) montre la variation ΔX et ΔR en fonction du déplacement avec existence du rivet adjacent à 22 mm du rivet contrôlé.

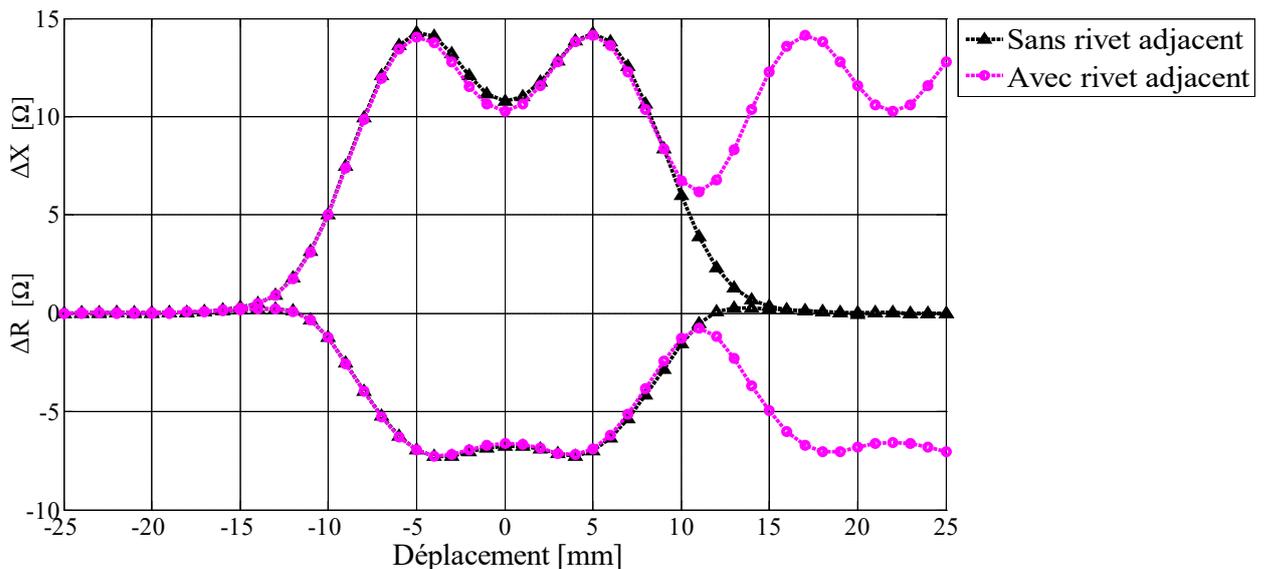


Fig. IV. 17. Influence du rivet adjacent sur la variation ΔX et ΔR de la sonde.

Lorsque la sonde se trouve à gauche du rivet contrôlé, elle n'est pas influencée par le rivet adjacent, par contre à droite, elle va progressivement être sensible à la présence de celui-ci au fur et à mesure du déplacement de la sonde.

D'après la Figure (IV. 17) le capteur commence à être sensible à la présence du rivet adjacent lorsque la sonde se trouve à plus de 11 mm du centre du rivet contrôlé. L'espacement entre les alésages n'est pas assez grand pour que la partie imaginaire du signal redevienne nulle, elle atteint

la valeur de 6Ω puis augmente de nouveau du fait de la présence du rivet voisin. Pour la partie réelle, le signal atteint une valeur presque nulle puis croît de nouveau. Il ressort de cette étude que les rivets voisins perturbent certes légèrement mais de manière significative le signal du rivet contrôlé.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre une structure multicouche rivetée a été élaborée avec la prise en considération de la nature du matériau du rivet avec une bobine munie d'un noyau en ferrite. Pour mettre en évidence la sensibilité de la détection, nous avons choisis différents longueurs de défauts et se trouvant alternés sur les trois couches.

La panoplie de série de simulations effectuées, nous a permis de conclure que la sensibilité de la détection dépend d'une part, de la position du défaut par rapport à l'éloignement des couches de la bobine de détection, et d'autre part de la longueur du défaut par rapport à la longueur de la tête du rivet, et enfin on a pu mettre en évidence l'effet du rivet adjacent sur la réponse du capteur.

Conclusion Générale

Travail accompli	84
Analyse des résultats et discussions.....	85
Perspectives	86

Conclusion Générale

Travail accompli

Le durcissement de la législation en matière de sécurité des infrastructures industrielles à risque, tels que le nucléaire, l'aéronautique, secteur pétrolier et métallurgique, ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces qui les constituent et la complexité grandissante des processus industriels exige non seulement des recours plus fréquents au CND, favorisant ainsi la recherche dans ce domaine mais impose également la mise au point de nouvelles méthodes de contrôle plus poussées.

A cet égard, le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND - CF), par sa simplicité, facilité de mise en œuvre, son efficacité, son faible coût et de son caractère non polluant, possibilité d'automatisation et de contrôle à des vitesses de défilement élevées, est la technique la plus utilisée pour la caractérisation des défauts de surfaces dans les matériaux conducteurs d'électricité.

Dans ce travail, la première partie a été consacrée à la recherche bibliographique, le premier volet concerne les principaux procédés du contrôle non destructif les plus utilisés comme, les procédés optiques, le ressuage, les procédés par flux de fuite, les procédés radiographiques et connexes, les procédés de contrôle par ultrasons et enfin les procédés par courants de Foucault. Nous avons clôturé cette partie par l'élaboration d'un Tableau comparatif mettant en relief le principe physique, les champs d'application, les avantages et les inconvénients de ces techniques, quant au second volet, et partant du fait que le capteur inductif est l'élément de base du contrôle non destructif par courants de Foucault, il a été utilisé pour la mise en évidence des différents types de capteurs inductifs, leurs branchements électriques, leurs modes de contrôle et les différents paramètres influant sur le contrôle qui est basé sur la mesure de l'impédance du couple "capteur-cible".

La deuxième partie, a été réservée à la modélisation de l'interaction d'un champ électromagnétique avec une structure en matériau conducteur, régie par les équations de Maxwell dans le domaine CND-CF, ainsi qu'à la présentation des différentes formulations en champ électrique et magnétique. Le choix de l'approche de modélisation numérique de type éléments finis, fut conditionné par le fait que cette dernière est caractérisée par son efficacité, sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes pour la résolution des problèmes CND-CF.

Dans la troisième partie, une contribution pour l'étude de l'effet des défauts polluant sur le signal de détection de défaut, en l'occurrence la variation d'impédance du couple capteur-pièce a été proposée.

Afin de mettre en évidence l'impact des défauts conducteurs, nous avons développé un modèle 3D adapté aux problématiques du CND-CF pour une pièce plane conductrice avec défauts débouchants.

En premier lieu, une validation du modèle a été effectuée en comparant les résultats obtenus par celui-ci et avec défaut manque de matière, avec des données expérimentales sur différents benchmarks et résultats de la littérature dans ce domaine. Une bonne concordance a été obtenue entre le modèle proposé et l'expérimentation.

En second lieu, nous avons varié la conductivité du matériau du défaut, afin d'élaborer une base de données qui puisse faire apparaître la variation de la signature du défaut en fonction des diverses conductivités de défauts polluants. Ces résultats montrent bien que le signal de détection peut être influé par la présence de matériau polluant d'où une possibilité de fausser l'interprétation des résultats, si ce cas n'est pas pris en considération, principalement si la conductivité de ce dernier est très proche de celle la pièce à contrôler.

Et enfin nous avons clôturé cette partie par une étude de la sensibilité du signal issu du capteur à CF, avec défaut fins manque de matière et défaut conducteur, concernant les différentes grandeurs géométriques de la fissure, en l'occurrence la longueur, la profondeur et l'épaisseur, ainsi que de la fréquence et le lift-off.

Quant à la quatrième partie, elle a été dédiée, à la modélisation et simulation d'une structure rivetée multicouche de plaques conductrices utilisée en aéronautique. Le contrôle est assuré par un capteur à courants de Foucault muni d'un noyau en ferrite, en mode absolu. Ensuite, une série de tests a été élaboré avec des emplacements alternés des défauts par couche et défaut de longueurs différentes: inférieure, égale, supérieure et largement supérieure au diamètre du rivet. Enfin, un test pour évaluer l'effet du rivet adjacent a été effectué.

Analyse des résultats et discussions

En résumé, le travail effectué dans le cadre de cette thèse a permis d'établir une simulation 3D en utilisant la MEF pour l'étude du CND par la technique des courants de Foucault d'une part appliqué aux plaques conductrices et avec défauts débouchant manque de matière et défaut pollué par matériau conducteur, et d'autre part pour les structures rivetées multicouche utilisées en aéronautique.

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

- ✓ *Développer un modèle tridimensionnel 3D, pour problème CND-CF avec défaut manque de matière, avec validation par comparaison avec des problèmes-tests internationaux, et les problèmes "Benchmark";*

- ✓ *Mettre en évidence l'effet des défauts polluants sur la signature du signal de la variation de l'impédance et qui constitue le moyen de détection et de contrôle en CND-CF ;*
- ✓ *Faire apparaître l'influence combinée, des défauts polluants conducteurs et celle des paramètres liés, à la géométrie de la fissure, au lift-off et la fréquence, sur le signal de contrôle pour défauts fins de largeur de l'ordre de 0.2 mm;*
- ✓ *Développer un modèle tridimensionnel 3D, pour problème CND-CF pour structure multicouche rivetée, avec la prise en considération du matériau du rivet, d'où le système n'est plus homogène ;*
- ✓ *Obtenir la signature des défauts qui sont caractérisés, d'une part par des longueurs variables par rapport à la tête du rivet et d'autre part par leurs positions soit à la 1^{ère}, 2^{ème} ou 3^{ème} couche ;*

Perspectives

Ce travail conduit tout naturellement à envisager un certain nombre de prolongements:

- ✓ *Passage de l'étape de détection à celle de l'identification ou de la caractérisation des défauts par la méthode de multifréquence;*
- ✓ *Passage de l'identification des paramètres de la fissure du problème direct au problème inverse en utilisant les réseaux de neurones ou les algorithmes génétiques;*
- ✓ *Passage du balayage monodirectionnel à celui du balayage surfacique, notamment par l'utilisation d'un système multi capteurs et l'élaboration d'une cartographie des défauts;*
- ✓ *Passage de la détection de défaut surfacique à celle de la détection de défaut interne par l'utilisation de la technique des courants pulsés;*
- ✓ *Réalisation d'un banc d'essai, avec balayage bidirectionnel qui permet de valider les différents résultats obtenus;*
- ✓ *Prendre en considération des défauts non rectangulaires, défauts de forme non planaire qui se rapproche plus des cas réels;*
- ✓ *Elaboration d'une modélisation de la propagation dynamique de la fissure par l'introduction des contraintes mécaniques;*
- ✓ *Utilisation des nouveaux capteurs magnétiques GMR, GMI qui se caractérisent par leurs sensibilité et leurs grandes bandes passantes en faible fréquence pour l'inspection des pièces que se soit magnétiques ou amagnétiques;*
- ✓ *Modélisation des capteurs souples.*

Annexes

Annexe A1: Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération des courants de Foucault	87
Annexe A2: Organigramme de simulation sous COMSOL Multiphysics:.....	88
Annexe A3: Méthode Analytique (Dodd et Deeds,).....	89
Annexe A4: Modèle multicouche, transformateur à 2 secondaires chargés.....	92

Annexes

Annexe A1: Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération des courants de Foucault

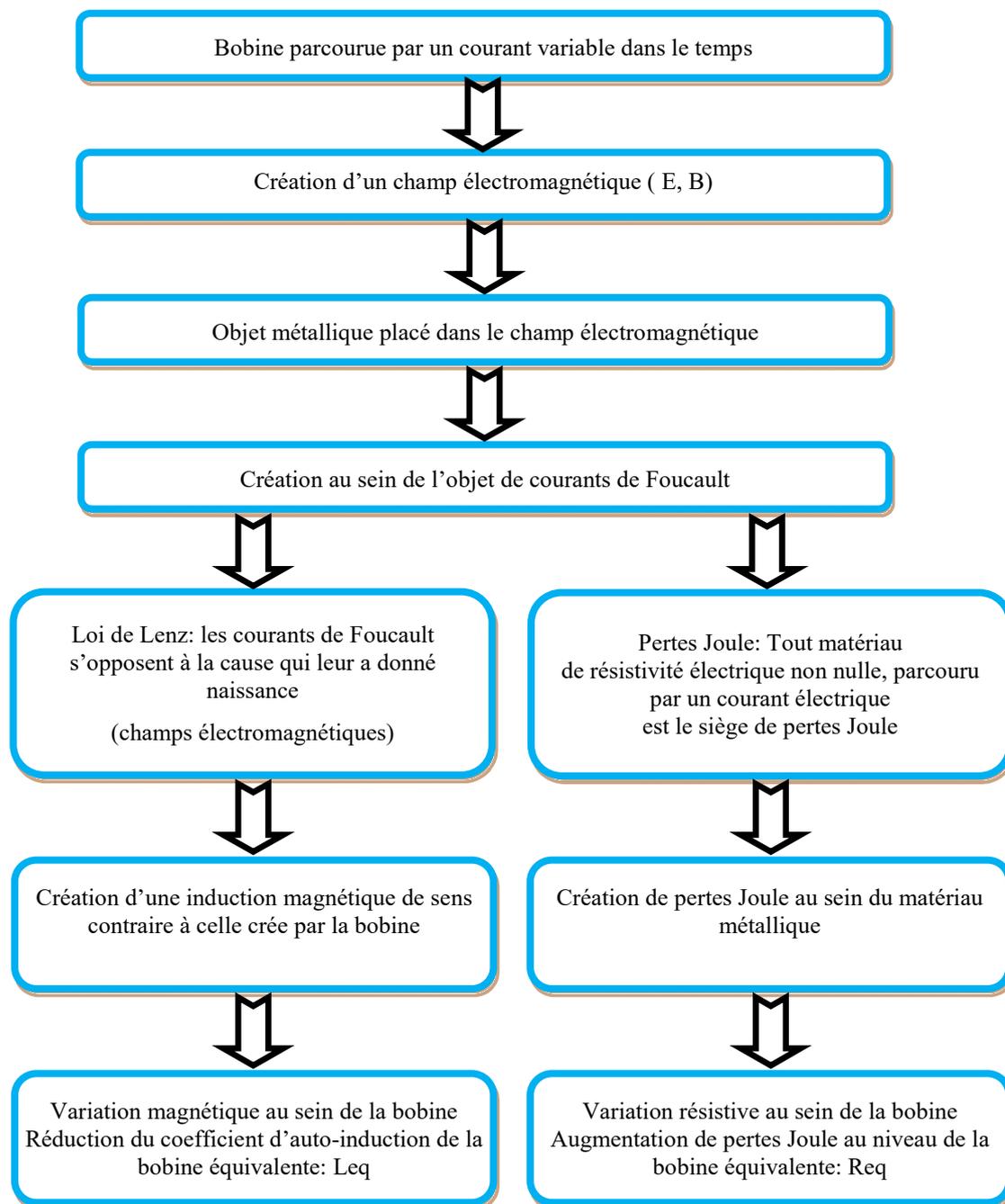


Fig. A. 1 Organigramme du calcul de la variation d'impédance.

Annexe A2: Organigramme de simulation sous COMSOL Multiphysics:

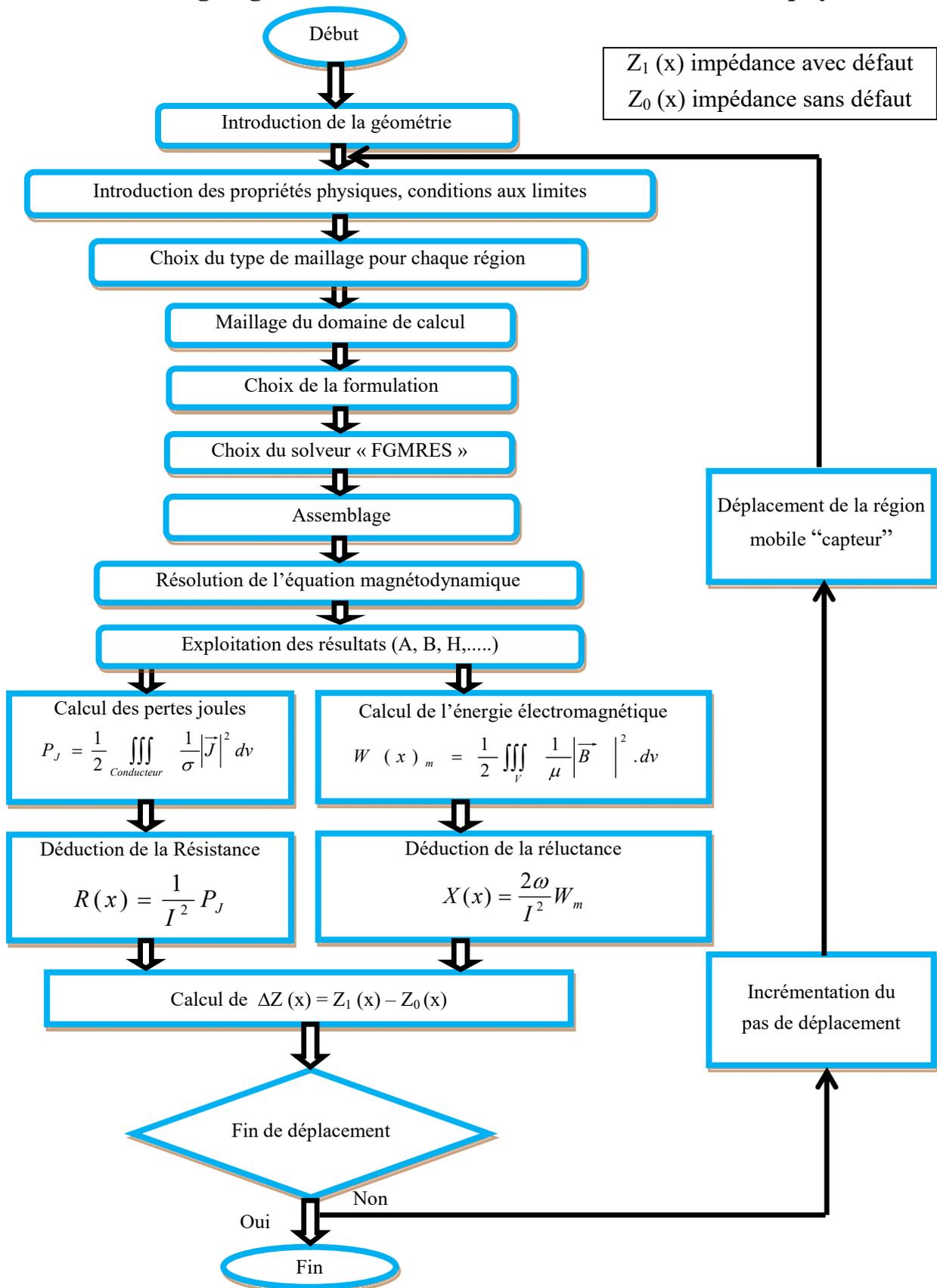


Fig. A. 2 Organigramme de simulation sous COMSOL Multiphysics.

Annexe A3: Méthode Analytique (Dodd et Deeds,)

Méthode utilisée pour des configurations géométriques simples où les matériaux sont homogènes et isotrope. Un des premier model axisymétrique est celui développé par Dodd et Deeds, (Deeds, 1968), qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles; pour le cas d'une bobine à air axisymétrique de section circulaire située soit au-dessus de deux couches métalliques de longueurs infinis parallèles de matériaux différents, soit encerclant deux conducteurs cylindres coaxiaux infinis, (Benhadda, 2015), (Zaoui, 2008), (Doirat, 2007), Figure (A.3).

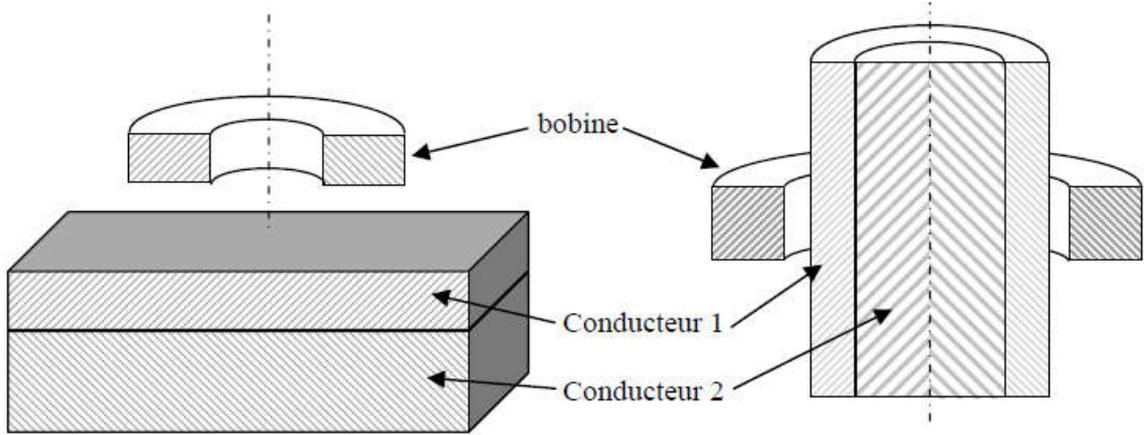


Fig. A.3 Géométries axisymétriques avec bobine à air traitées par Dodd et al.

Le travail de Dodd et *al.*, consiste essentiellement à résoudre l'équation suivante:

$$\nabla(\nabla\vec{A}) - \nabla^2\vec{A} = -\mu\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \mu\vec{J}_s \quad (\text{A.1})$$

Où

- \vec{A} le potentiel vecteur magnétique
- \vec{J}_s la densité de courant d'excitation.

Le potentiel vecteur magnétique A et la densité de courant \vec{J}_s sont:

$$\vec{A} = A(r, z)\vec{e}_\theta \quad (\text{A.2})$$

$$\vec{J} = J(r, z)\vec{e}_\theta \quad (\text{A.3})$$

En choisissant une condition de jauge convenable telle que $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ et en considérant un courant d'excitation sinusoïdal, nous pouvons écrire l'équation (A.1) comme suit:

$$\frac{\partial^2 A(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 A(r, z)}{\partial z^2} - \frac{\partial A(r, z)}{r^2} = -\mu J(r, z) + j\omega\sigma\mu A(r, z) \quad (\text{A.4})$$

Dans les régions qui ne sont pas parcourues par la densité de courant $J(r,z)$, la solution générale de (A.4) se met sous la forme suivante, (Zaoui, 2008):

$$A(r,z) = \int_0^\infty [A_i e^{\alpha_i z} + B_i e^{-\alpha_i z}] [C_i J_1(\alpha r) + D_i Y_1(\alpha r)] d\alpha \quad (\text{A.5})$$

Avec:
$$\alpha_i = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\sigma_i\mu_i}$$

Les paramètres μ_i et σ_i sont respectivement la perméabilité magnétique et la conductivité électrique dans la région i .

J_1 et Y_1 représentent respectivement les fonctions de Bessel de premier ordre et de première et seconde espèce.

A_i , B_i , C_i et D_i sont des coefficients à déterminer grâce aux conditions aux limites et aux conditions de passage.

Une autre configuration a été traitée. Elle est constituée d'une bobine à air qui est placée en dessus d'un plan conducteur homogène et isotrope, de grande dimension devant le rayon de la bobine. L'axe de la bobine est perpendiculaire au plan, ce qui implique qu'on y ait devant une configuration axisymétrique, comme le montre la Figure (A. 4), (Benhadda, 2015), (Doirat, 2007) .

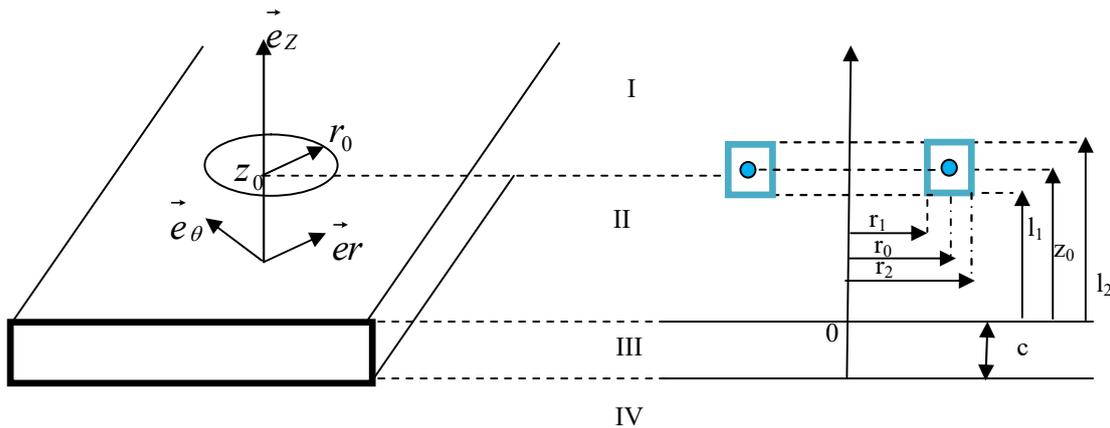


Fig. A. 4 Géométrie de la spire au dessus d'une plaque.

Ce problème a été également traité analytiquement ; il consiste à résoudre l'équation suivante. En fonction des paramètres géométriques et physique en coordonnées cylindrique, la composante azimutale du potentiel vecteur magnétique ne dépend que des coordonnées r et z , soit $A(r,z) = A_\theta(r,z)e_\theta$

$$\frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial z^2} - \frac{\partial A_\theta}{r^2} - j\omega\sigma\mu A_\theta + \mu I \delta(r - r_0) \delta(z - z_0) = 0 \quad (\text{A.6})$$

Le dernier terme correspond à la spire élémentaire de courant qui est nul en dehors des coordonnées $r = r_0$, $z = z_0$ et $\theta \in [0, 2\pi]$. On aura donc à déterminer la solution particulière de l'équation:

$$\frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial z^2} - \frac{\partial A_\theta}{r^2} - j\omega\sigma\mu A_\theta = 0 \quad (\text{A.7})$$

La solution générale de cette équation est donnée par:

$$A(r, z) = \int_0^\infty [A_i(\alpha_i) e^{-\alpha_i z} + B_i(\alpha_i) e^{\alpha_i z}] [C_i \psi(\alpha r) + D_i Y_1(\alpha r)] d\alpha \quad (\text{A.8})$$

$$\alpha_i = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\sigma_i \mu_i}$$

Finalement, la formule de l'impédance d'une spire circulaire de section rectangulaire, placée au dessus d'une plaque conductrice, sera déterminée par, (Deeds, 1968):

$$Z = \frac{2\pi\omega\mu n^2}{(l_2 - l_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \left[\frac{1}{\alpha^5} \psi_1^2(r_2 - r_1) K(\alpha) \right] d\alpha \quad (\text{A.9})$$

Une troisième configuration est obtenue à partir du modèle de Dodd et Deeds, Luquire et al. et Cheng et al. (Deeds, 1968), qui s'intéressent aux modèles multicouches. Dans ce modèle, la bobine est intercalée entre deux plans conducteurs multicouches. Le potentiel vecteur magnétique peut être exprimé comme suit:

$$A_\theta(r, z) = \iint G(r, z; r_0, z_0) J(r_0, z_0) dr_0 dz_0 \quad (\text{A.10})$$

Où $G_0(r, z; r_0, z_0)$ est la fonction de Green pour une spire élémentaire de courant situé en (r_0, z_0) qui conduit à l'équation:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - j\omega\sigma\mu \right] G(r, z; r_0, z_0) = -\mu \delta(r - r_0) \delta(z - z_0) \quad (\text{A.11})$$

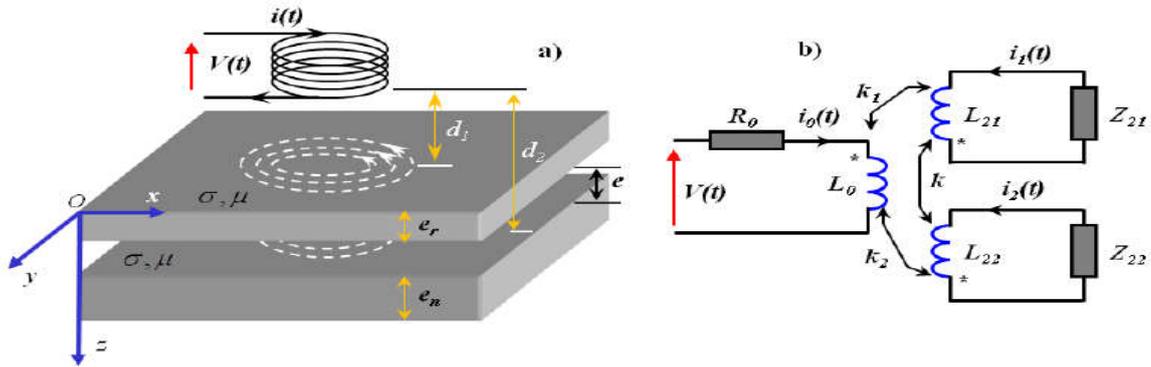
Tel que, pour chaque région i , une fonction de Green est donnée par:

$$G(r, z; r_0, z_0) = \int_0^\infty [B_i(\alpha_i) e^{-\alpha_i z} + C_i(\alpha) e^{\alpha_i z}] \psi(\alpha r) d\alpha \quad (\text{A.12})$$

Les constantes B_i et C_i sont déterminées par les conditions de passage d'une région à une autre et à partir des conditions aux limites, (Bensaid, 2006). Le vecteur magnétique est défini sous une forme matricielle, et à partir duquel l'impédance de la bobine sera déterminée.

Annexe A4: Modèle multicouche, transformateur à 2 secondaires chargés

Une structure constituée de deux plaques métalliques séparées par un entrefer peut être assimilée à un transformateur à 2 secondaires chargés, la bobine primaire représentant l'inductance L_0 du capteur et les bobines secondaires L_{21} et L_{22} représentant les effets des deux plaques métalliques. Toutes trois étant liées par des phénomènes de mutuelle induction donnant lieu à des coefficients de couplage K , k_1 et k_2 (Figure A.5), (Long, 2012).



a) Schéma de principe.

b) Circuit de transformateur équivalent.

Fig. A.5 Capteur CF placé sur une structure multicouche.

Les coefficients de couplage k_1 et k_2 entre le primaire et les secondaires dépendent respectivement des distances relatives d_1 et d_2 du capteur par rapport à la première et à la deuxième plaque.

Le coefficient de couplage k entre les secondaires est lié quant à lui à l'écartement e entre les plaques.

Les inductances L_{21} et L_{22} sont considérées comme égales et de même valeur.

Quant aux impédances de charge Z_{21} et Z_{22} , nous devons pour les exprimer tenir compte de la propagation des ondes électromagnétiques dans les plaques.

L'impédance de l'air étant infinie, le coefficient de réflexion à l'extrémité de la deuxième plaque (en $z = e_a + e + e_b$) est:

$$\rho(e_a + e + e_b) = 1 \quad (\text{B.1})$$

Par ailleurs, e pouvant être considéré comme très faible nous supposons

$$\rho(e_a + e) \approx \rho(e_a) \quad (\text{B.2})$$

Le coefficient de réflexion à la surface de la plaque supérieure (côté capteur), il peut s'écrire:

$$\rho(0) = \rho(e_a) e^{2\gamma e_a} \quad (\text{B.3})$$

Avec γ constante de propagation dans la cible, elle vaut:

$$\gamma = \frac{1+j}{\delta} = \sqrt{j\omega\sigma\mu_0} \quad (\text{B.4})$$

Où δ est la profondeur standard de pénétration (épaisseur de peau).

De la même manière, le coefficient de réflexion à la surface supérieure de la plaque inférieure peut s'écrire:

$$\rho(e_a + e) = \rho(e_a + e + e_b)e^{2\gamma e_b} = e^{2\gamma e_b} \quad (\text{B.5})$$

Comme la relation linéaire entre z et e peut s'exprimer comme suit:

$$z = \alpha(f, e_a, e_b).e \quad (\text{B.6})$$

Le coefficient directeur α dépend de la fréquence d'excitation f et des épaisseurs e_a et e_b .

D'après (B.6) (B.1) et (B.2) on a:

$$\rho(0) = e^{2\gamma(e_a + e_b)} \quad (\text{B.7})$$

Par conséquent, l'impédance d'entrée Z_{21} de la plaque supérieure peut s'écrire:

$$Z_{21} = \frac{1 + \rho(0)}{1 - \rho(0)} Z_p = \frac{Z_p}{\tanh[\gamma(e_a + e_b)]} = \frac{\sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma}}}{\tanh[(e_a + e_b)\sqrt{j\omega\mu_0}]} \quad (\text{B.8})$$

et l'impédance d'entrée de la deuxième plaque peut s'écrire:

$$Z_{22} = \frac{1 + \rho(e_a + e)}{1 - \rho(e_a + e)} Z_p = \frac{Z_p}{\tanh[\gamma(e_b)]} = \frac{\sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma}}}{\tanh[(e_b)\sqrt{j\omega\mu_0}]} \quad (\text{B.9})$$

Par ailleurs, le système d'équations complexes suivant régit le comportement du transformateur à deux secondaires chargé:

$$\begin{cases} (R_0 + j\omega L_0)I_0 - j\omega M_{01}I_1 - j\omega M_{02}I_2 = V \\ j\omega M_{01}I_1 + (j\omega L_{21} + Z_{21})I_1 + j\omega M_{12}I_2 = 0 \\ j\omega M_{02}I_1 + \omega L_{12}I_1 + Z_{21})I_1 + (j\omega L_{22} + Z_{22})I_2 = 0 \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

Où les coefficients d'induction mutuelle M_{01} , M_{02} et M_{03} sont tels que:

$$M_{01} = K_1 \sqrt{L_0 L_{21}}, \quad M_{02} = K_2 \sqrt{L_0 L_{22}}, \quad M_{12} = K_2 \sqrt{L_{21} L_{22}}$$

Compte tenu des relations (B.5) et (B.7), la résolution du système (B.10) conduit à l'expression d'impédance normalisée suivante:

$$Z_n = \frac{\frac{V}{I_0} - R_0}{\omega L_0} = \frac{N_1 + N_2 - N_3}{D} \quad (\text{B.11})$$

Où:

$$\begin{aligned} D &= \omega L_0 [(j\omega L_{21} + Z_{21})(j\omega L_{22} + Z_{22}) + \omega^2 M_{12}^2] \\ N_1 &= (R_0 + j\omega L_0)(j\omega L_{21} + Z_{21})(j\omega L_{22} + Z_{22}) \\ N_2 &= \omega^2 [M_{01}^2(j\omega L_{22} + Z_{22}) + M_{02}^2(j\omega L_{21} + Z_{21}) + M_{10}^2(R_0 + j\omega L_0)] \\ N_3 &= j2\omega^3 M_{01}M_{02}M_{12} - R_0 D \end{aligned}$$

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Alexandra, Christophe. 2014.** *Méthode des Eléments Finis avec Joints en Recouvrement non-Conforme de Maillages: Application au Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.* Université Paris-Sud: Thèse de Doctorat, 2014.
- Ayad A, Benhamida F. Bendaoud A. Le Bihan Y. and Bensetti M. 2011.** *Solution of Inverse Problems in Electromagnetic NDT Using Neural Networks.* 2011. ISSN 0033-2097, R. 87 NR 9a/.
- Beltrame, PH. 2002.** *Modélisation de la Perturbation Electromagnétique au Voisinage d'une Fissure Mince dans un Matériau Conducteur. Application au Contrôle non Destructif par Courants de Foucault.* Ecole Centrale de Lyon: Thèse de Doctorat, 2002.
- Benhadda N, T. Bouchala A. Guettafi and B. Abdelhadi. 2014.** *Study of the Influence of Conductive Defect Characteristics on Eddy Current Differential Probe Signal.* Romania: Journal of Electrical Engineering, JEE, 2014. Vol.14. Issue 3.
- Benhadda, N. 2015.** *Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND).* Université Batna 2: Thèse de Doctorat en Sciences, 2015.
- Benhadda, Nabil, A. Abdou, A. Guettafi, et A. Benoudjit. 2006.** *Simulation du Contrôle non Destructif par Capteurs à Courants de Foucault de Pièces Cylindriques Amagnétiques.* Université Batna 2: 4th International Conference of Genie Electric, 2006. pp. 123-127.
- Bennoud, S, Zergoug M. 2014.** *Modeling and Simulation for 3D Eddy Current Testing in Conducting Materials.:* International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 2014. pp. 747-750. Vol. 8 No:4.
- Bensaid, S. 2006.** *Contribution a la Caractérisation et à la Modélisation Electromagnétique et Thermique des Matériaux Composites Anisotropes.* Université de Nantes, Thèse de Doctorat, à l'IREENA Saint-Nazaire, 2006.
- Bouchala T, B. Abdelhadi and A. Benoudjit. 2013.** *Novel Coupled Electric Field Method for Defect Characterization in Eddy Current Non-Destructive Testing Systems.* New York, USA: Journal of Nondestructive Evaluation, Media, Springer Science+ Business, 2013.
- Bouchala, T. 2014.** *Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les Systèmes de CND par Courants de Foucault.* Université El-Hadj Lakhder, Batna: Thèse de Doctorat, 2014.

- Burke, S. K. 1988.** *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1988. pp. 3080–3083. Vol. 7.
- Caire, François. 2014.** *Les Equations de Maxwell Covariantes pour le Calcul Rapide des Champs Diffractés par des Conducteurs Complexes. Application au Contrôle non Destructif par Courants de Foucault.* Université Paris-Sud: Thèse de Doctorat, 2014.
- Ch. Subhas, Mukhopadhyay. 2004.** *A Novel Planar Mesh-Type Microelectromagnetic Sensor- Part II: Estimation of System Properties.* USA: IEEE, Sensor Journal, 2004. Vol. 4, No. 3.
- CHERIET, Ahmed. 2007.** *Contribution à la Modélisation Tridimensionnelle par la Méthode des Volumes Finis de Dispositifs Electromagnétiques.* Université Mohamed Khider Biskra: Thèse de Doctorat, 2007.
- Choua Y, L. Santandrea, Y. Le Bihan, and C. Marchand. 2007.** *Thin Crack Modeling in ECT with Combined Potential Formulations.* 2007. Vol. 43, N°. 4.
- Choua, Yahia. 2010.** *Application de la Methode des Elements Finis pour la Modelisation de Configurations de Contrôle non Destructif par Courants de Foucault.* Université de Paris-Sud 11: Thèse de Doctorat, 2010.
- Deeds, C. V. Dodd et W. E. 1968.** *Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems.* 1968. pp. 2829–2832. Vol. 39.
- Diraison, Y. Le. 2008.** *Imagerie à Courants de Foucault pour l'Evaluation non Destructive de Structures Rivetées Aéronautiques.* Ecole Supérieure Cachan: Thèse de Doctorat, 2008.
- Doirat, V. 2007.** *Contribution à la Modélisation de Systèmes de Contrôle non destructif par Courants de Foucault, Application à la Caractérisation Physique et Dimensionnelle de Matériaux de l'Aéronautique.* Université de Nantes: Thèse de Doctorat, 2007.
- Feliachi, B. Maouche and M. 2006.** *A Half Analytical Formulation for the Impedance Variation in Axisymmetrical Modeling of Eddy Current non Destructive Testing.* France: European Physical Journal Applied Physics, February, 2006. pp. 59-67. Vol. 33.
- Fillon, Jacques DUMONT-. 1996.** *Contrôle non Destructif (CND).* Techniques de l'Ingénieur R1400, 1996.
- G Asch. 2002.** *Les Capteurs en Instrumentation Industrielle.* France: Dunod, 5^{ème} Edition, 2002.
- H. Hashizume, Y. Yamada, K. Miya, S. Toda, K. Morimoto, Y. Araki, K. Satake, N. Shimizu. 1992.** *Numerical and Experimental Analysis of Eddy Current Testing for a Tube with Cracks.* 1992. pp. 469-1472. Vol. 28 N°.2.

- Hamia, Rimond. 2006.** *Performances et Apports des Capteurs Magnétiques à très Haute Sensibilité aux Systèmes de Contrôle non Destructif par Courant de Foucault.* Université de Caen: Thèse de Doctorat, 2006.
- Helifa, B. 2012.** *Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault Vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes.* Université de Nantes: Thèse de Doctorat, 2012.
- J. W. Luquire, W. E. Deeds, et C. V. Dodd. 1970.** *Alternating Current Distribution Between Planar Conductors.* 1970. pp. 3981–3991. Vol. 41.
- Kuhn, Eric. 2014.** *Contrôle Non Destructif D'un Matériau Excité par une Onde Acoustique ou Thermique. Observation par Thermographie.* Université Paris Ouest Nanterre la Defense: Thèse de Doctorat, 2014.
- Lacroix, M. 1996.** *Essais non Destructifs.* Techniques de l'Ingénieur M110 et M111, 1996. pp. 1-21 et 1-17.
- Lai, Y. 2005.** *Eddy Current Displacement Sensor with LTCC Technology.* Universität Freiburg im Breisgau, Germany: Thèse de Doctorat, 2005.
- Larsan, B. 2006.** *Introduction to Nondestructive Testing: NDT Education,* 2006.
- LI, Yue. 2012.** *Application à l'Evaluation non Destructive Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques Caractérisant des Structures Composites Complexes.* Université de Nantes: Thèse de Doctorat, 2012.
- Long, C. Thành. 2012.** *Évaluation non-Destructive Quantitative de Structures Aéronautiques par la Méthode des Courants de Foucault.* Ecole Normale Supérieure de Cachan: Thèse de Doctorat, 2012.
- M. Rachek, Cherif S. and Kadi H. 2013.** *Strong Coupled Formulation of the Magnetic Vector Potential and Total Current Density for Eddy Current Testing with Skin and Proximity Effects.* Ouargla, Algeria.: The International Conference on Electronics & Oil from Theory to Application., 2013.
- M'hemed. Rachek, Mouloud Féliachi. 2005.** *Modélisation par Eléments Finis Tridimensionnelle des Phénomènes Magnetodynamique Harmonique avec la Formulation AV-A.* 2005. pp. 173-177.
- Maurice, Wanin. 1996.** *Evaluation non Destructive de la Qualité des Matériaux Partie 1" et Partie 2.:* Techniques de l'Ingénieur R4130 et R4132, 1996. pp. 1-26 et 1-16.
- Mauris, G. 1992.** *Capteurs Ultrasonors Inrèlligents, Application à la Représentation Symbolique de Mesures de Distance par Codage Flou.* Université de Savoie: Thèse de Doctorat, 1992.

- MENANA, Hocine. 2009.** *Modélisation 3D Simplifiée pour l'Evaluation Non Destructive des Matériaux Composites Anisotropes*. Université de Nantes: Thèse de Doctorat, 2009.
- Mix, P. 2005.** *Introduction to Nondestructive Testing*. United States of America: A Training Guide, Second Edition, Wiley Interscience, 2005.
- NAJAR, Fouad. 1997.** *Contrôle Non Destructif par Thermographie Infrarouge des Matériaux Hétérogènes Contenant des Défauts*. Université de Gergy-Pontoise: Thèse de Doctorat, 1997.
- Oukhellou, L. 1997.** *Paramétrisation et Classification de Signaux en Contrôle non Destructif. Application à la Reconnaissance des Défauts de Rails par Courants de Foucault*. Université de Paris-Sud Centre d'Orsay: Thèse de Doctorat, 1997.
- Paillard, Séverine. 2008.** *Développement d'un Modèle pour le Contrôle non Destructif par Courants de Foucault de Structures Rivetées en Aéronautique*. Université Paris Sud 11: These de Doctorat, 2008.
- Parizeau, M. 2004.** *Le Perceptron Multicouche et son Algorithme de Rétropropagation des Erreurs*. Université Laval: Cour, Département de Génie Electrique et Génie Informatique, 2004.
- Pipis, Konstantinos. 2015.** *Modélisation du CND par Courants de Foucault des Pièces Axisymétriques avec des Discontinuités Suivant l'Axe à l'Aide d'une Formulation d'Equation Intégrale*. Université paris-saclay: Thèse de Doctorat, 2015.
- Placko, I. DUFOUR and D. 1993.** *Separation of Conductivity and Distance Measurements for Eddy Current Nondestructive Inspection of Graphite Composite Materials*. 1993.
- RAMDANE, Brahim. 2009.** *Contribution à la Modélisation Tridimensionnelle de la Technique Thermoinductive de Contrôle non Destructif: Développement d'un Outil de Conception, d'Analyse et d'Aide à la Décision*. Université de Nantes: Thèse de Doctorat, 2009.
- RAVAT, Cyril. 2008.** *Conception de Multicapteurs à Courants de Foucault et Inversion des Signaux Associés pour le Contrôle non Destructif*. Université Paris-Sud 11: Thèse de Doctorat, 2008.
- Sakina, ZERGUINI. 2014.** *Elaboration de Modèles Electromagnétiques Caractérisant le Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault*. Université de Constantine: Thèse de Doctorat en Sciences, 2014.
- Shin, S.J. Song and Y.K. 1999.** *Eddy Current Flaw Characterization in Tubes by Neural Networks and Finite Element Modeling*. 1999. pp. 233-243.
- Tekoing, L. 2011.** *Formulation Intégrale Surfaique des Equations de Maxwell pour la Simulation de Contrôles non Destructifs par Courants de Foucault. Étude*

- Préliminaire à la Mise en Œuvre de la Méthode Multipôle Rapide*. Ecole Polytech, Paris Tech: Thèse de Doctorat, 2011.
- Theodoulidis, 2003.** *Model of Ferrite-Cored Probe for Eddy Current Nondestructive Evaluation*. 2003. pp. 3071–3078. Vol. 93, No. 5.
- Theodoulidis, T. P. 2005.** *Analytical Model for Tilted Coils in Eddy-Current Nondestructive Inspection*. 2005. pp. 2447–2454. Vol. 41, No. 9.
- Thomas, Vincent. 2010.** *Système Multi-Capteurs et Traitement des Signaux Associés pour l'Imagerie par Courants de Foucault de Pièces Aéronautiques*. Ecole Normale Supérieure de CACHAN: Thèse de Doctorat, 2010.
- Trillon, A. 2012.** *Reconstruction de Défauts à Partir de Données Issues de Capteurs à Courants de Foucault avec Modèle Direct Différentiel*: Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- Viens, M. 2006.** *Essais Mécanique et Contrôle Non Destructif*. Université du Québec: Ecole de Technologie Supérieur, 2006.
- Wanin, M. 1996.** *Evaluation non Destructive de la Qualité des Matériaux Partie 1 et Partie 2*. 1996. pp. 1-26 et 1-16.
- Zaidi, H. 2012.** *Méthodologies pour la Modélisation des Couches Fines et du Déplacement en Contrôle non Destructif par Courants de Foucault: Application aux Capteurs Souples*. Université, Paris- Sud: Thèse de Doctorat, 2012.
- Zaoui, A. 2008.** *Contribution à la Modélisation de CND par Matrice à Courants de Foucault*. Ecole Militaire Polytechnique, Alger: Thèse de Doctorat, 2008.
- ZORNI, Chiara. 2012.** *Contrôle non Destructif par Courants de Foucault de Milieux Ferromagnétiques: de l'Expérience au Modèle d'Interaction I*. Université Paris-Sud 1: Thèse de Doctorat, 2012.

Résumé

Résumé	99
Abstract	100
ملخص	101
Liste des Travaux.....	102

Résumé

Le contrôle non destructif (CND), ou essai (évaluation) non destructif (END) est un domaine interdisciplinaire, utilisé dans des contextes industriels, qui vise à diagnostiquer l'état d'intégrité ou de santé d'une pièce, d'un composant ou d'une structure industrielle sans qu'il en résulte une altération préjudiciable à leurs utilisations ultérieures.

Le nombre des méthodes CND/END est important et ne cesse de croître. La technique CND-CF est l'une des techniques les plus utilisées pour son efficacité, sa simplicité de mise en œuvre.

Ce travail comprend deux parties, la première donne un aperçu général sur les différentes techniques de CND ainsi qu'un état de l'art sur les capteurs inductifs utilisés en CND-CF, les équations qui régissent ce contrôle et les différentes formulations en potentiels permettant de résoudre les problèmes magnétodynamiques. Quant à la seconde partie, elle traite de la modélisation et de la validation par la méthode des éléments finis pour différentes configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault.

- *Le premier volet de cette dernière partie, aborde l'utilisation de la méthode des éléments finis, sous le logiciel COMSOL Multiphysics, pour la modélisation tridimensionnelle (3D) d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) en mode absolu, cette modélisation vise d'une part à déterminer l'interaction entre le capteur et la pièce à inspecter à travers le calcul de l'impédance d'un capteur à courants de Foucault pour des défauts manque de matière. C'est dans ce contexte qu'un modèle s'appuyant sur la discrétisation des équations de Maxwell en régime magnétodynamique a été développé puis une validation de ce modèle a été effectuée en comparant les résultats obtenus à ceux des données expérimentales sur différents benchmarks et résultats de la littérature dans ce domaine, et d'autre part mettre en relief l'effet des matériaux polluants conducteurs lorsqu'ils occupent le volume des fissures. Ce modèle a été par la suite enrichi par une étude comparative de la sensibilité de la réponse capteur à CF pour les différents paramètres influant sur ce signal, tels que les grandeurs géométriques de la fissure, le lift-off et la fréquence, pour un défaut manque de matière et un défaut pollué par un matériau conducteur.*

- *Le deuxième volet concerne le CND-CF dans le domaine aéronautique de l'inspection de structures rivetées pour détecter d'éventuels défauts qui peuvent se créer au pied ou sous la tête de rivet et se propager compte tenu des grandes contraintes mécaniques qui s'exercent sur celles-ci. C'est dans ce contexte qu'un modèle tridimensionnelle (3D) d'une structure rivetée de trois couches d'aluminium a été élaboré, avec la prise en considération du matériau du rivet, pour se rapprocher du cas réel du contrôle. Le contrôle est assuré par un capteur muni d'un noyau en ferrite. En effet, un ensemble de tests avec des emplacements alternés des défauts sur les trois couches et des défauts de longueurs différentes: inférieure, égale, supérieure et largement supérieure au diamètre du rivet. Enfin, un test pour montrer l'effet du rivet adjacent a été introduit en évidence.*

Mots clés: *Contrôle non Destructif, Courants de Foucault, Éléments Finis, Contrôle en Mode Absolu, Problème Direct, Structure Multicouches Rivetées.*

Abstract

Non-Destructive Testing (NDT), or non-destructive evaluation (NDE) is an interdisciplinary field, used in industrial contexts to diagnose the health state or integrity of a workpiece, a component or an industrial structure without resulting in alteration that is detrimental to their future use. In the literature, the number of NDT / NDE methods is important and continuously growing. The NDT eddy current (EC) technique is one of the most used techniques for its efficiency, simplicity of implementation.

This work comprises two parts: the first one gives a general overview on the different NDT techniques as well as a state-of-the-art on the inductive sensors used in NDT-EC, the equations governing this control and the different potential formulations allowing to solve magnetodynamic problems. The second part deals with the modeling and validation by the finite element method for non-destructive control configurations by eddy currents.

- *The first issue of this part deals with the use of the finite element method, using the COMSOL Multiphysics software, for the three-dimensional modeling of a non-destructive Eddy Current Control System (NDT-EC) in an Absolute mode. This modeling aims on the one hand to determine the interaction between the sensor and the part to be inspected through the calculation of the impedance of an eddy current sensor for defects of lack of material. In this context, a model based on the discretization of Maxwell's equations in magnetodynamic regime was developed and the validation of this model was carried out by comparing the obtained results by this latest with those of experimental data on different benchmarks and results extracted from the literature. On the other hand, to highlight the effect of conductive pollutants when occupying the volume of cracks. This model was subsequently investigated deeply by a comparative study of the sensitivity of the CF sensor response for the different parameters influencing this signal, such as the geometrical characteristics of the crack, the lift-off and the frequency, due to lack of material and defect polluted by a conductive material.*

- *The second part deals with non-Destructive Testing (NDT) by Eddy Currents (EC) in the aeronautical field of inspection of riveted structures to detect any defects that can be created at the foot or under the rivet head and to propagate taking into consideration the great mechanical stresses which are exposed to. In this context, a three-dimensional (3D) riveted structure model of three layers of aluminum has been developed, taking into account the rivet material in order to get closer to the real case of the control. The control is carried out using a sensor equipped with a ferrite core. Then, several tests have been fulfilled with alternate locations of defects on the three layers and defects of different lengths: inferior, equal, superior and much greater than the diameter of the rivet. Finally, a test to evaluate the effect of the adjacent rivet is incorporated.*

Keywords: *Non Destructive Testing, Eddy Current, Finite Elements, Absolute Mode Control, Direct Problem, Riveted Multilayer Structure.*

ملخص

إن المراقبة الغير مدمرة، أو الغير متلفة للقطعة المراد مراقبتها و تعرف أيضا بالتقييم الغير متلف، ميدان متداخل الاختصاصات يستعمل في الميدان الصناعي، حيث يكمن دوره في مراقبة حالة القطع، المكونات أو الهياكل الصناعية بدون حدوث أي ضرر يؤثر على استخدامها في المستقبل.

البحوث المقدمة في هذا الميدان تحتوي على عدد كبير من تقنيات المراقبة الغير متلفة ، و هو في تزايد دائم. تعتبر تقنية تيارات فوكو من التقنيات الأكثر استعمالا و ذلك لسهولة استعمالها و لفعاليتها.

الأعمال المقدمة في هذه الأطروحة تنقسم إلى قسمين ، الأول يتضمن، نظرة شاملة لمختلف طرق المراقبة الغير متلفة الأكثر استعمالا، و لمحة حول الملتقطات الحثية المستعملة في المراقبة بواسطة تيارات فوكو ، المعادلات التي تصف النظام و كذا مختلف القوانين التي تمكن من حل الحالات التي تتعلق بالأنظمة المغناطيسية-حركية. أما القسم الثاني يتعلق بالنمذجة بواسطة طريقة العنصر المحدود بالنسبة لتقنية المراقبة الغير مدمرة عن طريق تيارات فوكو و يشتمل على محورين:

- المحور الأول لهذا العمل يتمثل في استعمال النمذجة بواسطة طريقة العنصر المحدود وذلك بواسطة البرمجيات *COMSOL Multiphysics*، لنمذجة ثلاثية الأبعاد لنظام يمثل تقنية المراقبة الغير متلفة عن طريق تيارات فوكو في حالة الطريقة المطلقة. من جهة، هذه النمذجة تهدف إلى تحديد التفاعل بين أجهزة الاستشعار والجزء و القطعة المراد مراقبتها من خلال حساب ممانعة الملتقط أو الوشعة في حالة شرخ مصحوب بنقص من مادة القطعة. في هذا السياق تم برمجة نموذج يعتمد على معادلات ماكسويل ، حيث تم التحقق من صحة هذا الأخير بمقارنته بالأعمال التطبيقية المتوفرة في هذا الميدان. و من جهة أخرى، تم إدراج الحالة التي يكون فيها الشرخ السطحي للقطعة مملوء بمادة ناقلة للتيار. بعد ذلك تم إثراء هذا العمل عبر مقارنة حساسية الملتقط للخصائص الهندسية للشرخ و ذبذبة إشارة التغذية الكهربائية و البعد بين الملتقط و القطعة الناقلة، أثناء المراقبة لحالتين: شرخ غير مملوء و شرخ مملوء أو ملوث بمادة ناقلة للتيار.

- المحور الثاني يتعلق بتقنيات المراقبة الغير متلفة بواسطة تيارات فوكو في ميدان النقل الجوي و ذلك لمراقبة القطع المعدنية متعددة الطبقات المجمععة عن طريق البراشيم ، حيث نبحت على وجود الشرخ في إحدى الطبقات الثلاثة تحت تأثير الضغط الميكانيكي في أسفل البرشام أو تحت رأسه. تم برمجة نموذج ثلاثي الأبعاد لهذا الغرض مع أخذ بعين اعتبار مادة البرشام المستعملة و ، تواجد الشرخ على التداول على القطع الثلاثة من جهة، و من جهة أخرى تم تغيير طول الشرخ من أقل من قطر رأس البرشام إلى أكبر منه و في الأخير تم دراسة تأثير البرشام المجاور على إشارة المراقبة.

الكلمات الرئيسية:

المراقبة الغير مدمرة، تيارات فوكو، طريقة العناصر المحدودة، التحكم المطلق، المشكلة المباشرة، الهيكل المعدني متعدد الطبقات المجمععة عن طريق المسامير.

Liste des Travaux

Ces travaux ont fait l'objet de publication de renommée internationale et de communication, dont les principales sont:

- **Conférences**

- [1] A. ABDOU, N. BENHADDA, A. BENOUDJIT, and A. GUETTAFI, “ *Approche Expérimentale pour un Contrôle Non Destructif (CND) par Capteur à Courants de Foucault en Mode Absolu* ”, 5^{ème} Conférence sur le Génie Electrique, Ecole Militaire Polytechnique, Bordj El Bahri, Alger, 16 et 17 Avril 2007.
- [2] N. BENHADDA, A. ABDOU, A. GUETTAFI, and A. BENOUDJIT, “ *Analyse par la Méthode des Éléments Finis d'un Capteurs à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour l'Inspection des Pièces Cylindriques* ”, 5^{ème} Conférence sur le Génie Electrique, Ecole Militaire Polytechnique, Bordj El Bahri Alger, 16 et 17 Avril 2007.
- [3] N. BENHADDA, A. ABDOU, A. GUETTAFI, and A. BENOUDJIT, “*Simulation du Contrôle Non Destructif par Capteurs à Courants de Foucault de Pièces Cylindriques Amagnétiques*”, 4th International Conference of Genie electric, Nov 2006, Univerity of Batna.

- **Communications**

- [1] A. ABDOU, T. BOUCHALA, N. BENHADDA, B. ABDELHADI et A. BENOUDJIT, “ *Influence of Conductive Pollution on Eddy Current Testing* ”, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2017