

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : *TECHNOLOGIE*

DEPARTEMENT : *GENIE ELECTRIQUE*



DOMAINE : *SCIENCE TECHNIQUE*

FILIERE : *ELECTROTECHNIQUE*

OPTION : *ELECTROMECHANIQUE*

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

**Proposé et dirigé par: Dr. *ABDOU ABDELHAK***

*BENHALIMA Abdenour*

*SAOUDI Amirouche*

**Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault  
(Application aux Structures Rivetées  
Utilisées en Aéronautiques)**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Mr. BENDAIKHA Abdelmalik

Université de Mohamed Boudiaf – M'sila. Président

Mr. ABDOU Abdelhak

Université de Mohamed Boudiaf – M'sila. Rapporteur

Mr. BELKHIRI Salah

Université de Mohamed Boudiaf – M'sila. Examineur

Mr. GHAALLAB Mohamed

Université de Mohamed Boudiaf – M'sila. Examineur

**Année universitaire: 2017 /2018**

# *DEDICACES*

---

Nous dédions le présent travail  
à nos parents,  
nos familles,  
à tous nos amis.  
et à tous nos collègues.

# REMERCIEMENTS

---

Nous remercions Dieu, le Tout Puissant, Dieu qui nous a donné force, patience, volonté et surtout courage pour élaborer ce travail.

Ainsi, Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur, **Dr. ABDOU Abedelhak** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour la disponibilité et la patience dont il a fait preuve et dont les précieux conseils et les remarques pertinentes et pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie vivement **Mr SAFER Omar Adib** pour son aide, conseils et Suggestions tout au long de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier avec la plus grande sincérité (Mohammed .b et Saïd. h Abdenour, b) dans les meilleures conditions.

Nous sommes aussi redevable à tout les enseignants et personnel administratif du département d'Électrotechnique de l'Université de M'sila, qui ont instaurés un environnement d'entraide et de soutien tant au plan scientifique qu'au plan humain.

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

# *TABLE DES MATIERES*

---

# Sommaire

<i>Dedicaces</i> .....	<i>II</i>
<i>Remerciements</i> .....	<i>III</i>
<i>Sommaire</i> .....	<i>IV</i>
<i>Table des figures</i> .....	<i>V</i>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I. GENERALITES SUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2 Différentes techniques de contrôle</b> .....	<b>3</b>
I.2.1 Examen Visual .....	4
I.2.1.1 Principe.....	4
I.2.1.2 Domaine d'application .....	5
I.2.1.3 Avantages et Inconvénients.....	5
I.2.2 Contrôle par laser .....	5
I.2.2.1 Principe.....	5
I.2.2.2 Avantages et Inconvénients.....	5
I.2.3 Ressuage .....	6
I.2.3.1 Principe.....	6
I.2.3.2 Domaine d'application .....	6
I.2.3.3 Avantages et Inconvénients.....	7
I.2.4 Magnétoscopie.....	7
I.2.4.1 Principe.....	7
I.2.4.2 Domaine d'application .....	8
I.2.4.3 Avantages et Inconvénient .....	9
I.2.5 Radiographie .....	9
I.2.5.1 Principe.....	9
I.2.5.2 Domaine d'application .....	10
I.2.5.3 Avantages et Inconvénients.....	10
I.2.6 Thermographie .....	11
I.2.6.1 Principe.....	11
I.2.7 Mesure du bruit Barkhausen.....	12
I.2.7.1 Principe.....	12
I.2.8 Ultrasons.....	13
I.2.8.1 Principe.....	13
I.2.8.2 Domaine d'application .....	14
I.2.8.3 Avantages et Inconvénients.....	14

# Table des matières

<b>I.3 Courants des Foucault .....</b>	<b>15</b>
I.3.1 Principe.....	15
I.3.2 Effet de peau.....	16
I.3.3 Domaine d'application .....	18
I.3.4 Avantages et Inconvénient .....	18
I.3.5 Principe physique de CND-CF.....	19
<b>I.4 Type des défauts .....</b>	<b>20</b>
<b>I.5 Conclusion.....</b>	<b>22</b>
<b>CHAPITRE II. FORMULATION ET MODELISATION DU CND PAR CF.....</b>	<b>23</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>23</b>
II.1.1 Modélisation du dispositif de CND par CF.....	23
II.1.2 Équations de Maxwell.....	24
II.1.2.1 Lois constitutive .....	25
II.1.2.2 Conditions aux limites.....	26
II.1.2.3 Conditions de continuité.....	26
II.1.2.4 Conditions de Jauge.....	27
II.1.2.5 Hypotheses simplificatrices.....	28
II.1.2.6 Champs et potentiels .....	29
II.1.3 Méthodes analytiques.....	30
II.1.4 Méthodes numériques.....	30
II.1.5 Modélisation mathématique du système .....	31
II.1.6 Formulation en potentiel vecteur (couple A-V) .....	33
<b>II.2 Méthode des éléments finis (MEF).....</b>	<b>34</b>
II.2.1 Principe de la méthode variationnelle .....	34
II.2.2 Formulation résidus pondérés .....	34
II.2.3 Calcule de l'impédence .....	35
<b>II.3 Conclusion.....</b>	<b>37</b>
<b>CHAPITRE III. SIMULATION D'UNE STRUCTURE RIVETEE MULTICOUCHES .</b>	<b>38</b>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2 Déroulement de simulation sous COMSOL Multiphysics.....</b>	<b>39</b>
III.2.1 Modèle géométrique et description .....	39
III.2.2 Caractéristiques géométriques et physiques .....	40
III.2.3 Vue 3D du modèle proposé.....	42

## Table des matières

---

III.2.4 Maillage du modèle propose .....	42
III.2.5 Validation de modèle.....	43
<b>III.3 Résultats de simulations.....</b>	<b>45</b>
III.3.1 Résultats de simulation pour la couche 1 .....	45
III.3.1.1 Diagrammes de variation de résistance et de réactance .....	45
III.3.1.2 Diagramme de phase .....	49
III.3.2 Résultats de simulation pour la couche 2 .....	51
III.3.2.1 Diagramme de variation de résistance et de réactance.....	51
III.3.2.2 Diagramme de phase .....	55
III.3.3 Résultats de simulation pour la couche 3 .....	57
III.3.3.1 Diagramme de variation de résistance et de réactance.....	57
III.3.3.2 Diagramme de phase .....	61
III.3.3.3 Diagramme de variation de résistance et de réactance.....	65
III.3.3.1 Diagramme de phase .....	69
III.3.4 Paramètres influant sur le signal de détection .....	73
III.3.4.1 Variation de la fréquence .....	73
a) Diagramme d'impédance.....	73
b) Diagramme de phase .....	75
III.3.4.1 Variation de lift-off .....	76
a) Diagramme d'impédance.....	76
b) Diagramme de phase .....	77
III.3.4.2 Variation de la position de défaut ; .....	78
a) Défaut 5[mm] de longueur .....	78
b) Défaut 10[mm] de longueur. ....	80
III.3.4.3 Densité des courants induit pour défauts dans la première couche.....	83
III.3.5 Conclusion.....	84
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>76</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>77</b>

*TABLE*  
*DES FIGURES*  
*ET DES TABLEAUX*

---

## Table des Figures

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF

Figure I.1	Principe de l'Examen Visual.....	4
Figure I.2	Principe du ressuage. [3] .....	6
Figure I.3	Principe de la magnétoscopie, [3].....	8
Figure I.4	Principe de La Radiographie. [3].....	10
Figure I.5	Principe de La Thermographie. [3].....	11
Figure I.6	Principe de La mesure du bruit Barkhausen , [9] .....	13
Figure I.7	Principe des Ultrasons. [3].....	14
Figure I.8	Principe du CND par courants de Foucault,[16]) .....	15
Figure I.9	Répartition des courants de Foucault sous une surface plane,[2]. .....	17
Figure I.10	Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault, [11] .....	20

### Chapitre II: Formulation et modélisation du CND par CF

Figure II. 1	Système capteur-fissure ,[1]. .....	23
Figure II. 2	Problème magnétodynamique type,[1]. .....	24
Figure II. 3	Interface entre deux milieux.....	26

### Chapitre III : Résultats de simulations

Figure III. 1	Structure rivetées utilisée en aéronautique. [10] .....	38
Figure III. 2	. Création du modèle trois couches avec alésage de rivet. ....	39
Figure III. 3	Paramètre du pot en ferrite du capteur. [3]. .....	41
Figure III. 4	Empilement de trois couches d'aluminium riveté. [3]. .....	41
Figure III. 5	Vue 3D du modèle proposé.....	42
Figure III. 6:	Maillage du modèle. ....	43
Figure III. 7	Variation de réactance selon modèle proposé et modèle de Choua.....	44
Figure III. 8	Variation de résistance selon modèle proposé et modèle de Choua. ....	44
Figure III. 9	. Variation de $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 1, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	45
Figure III. 10	.Variation $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	46
Figure III. 11	.Zoom de $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	46
Figure III. 12	Variation $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	47
Figure III. 13	.Zoom de Variation $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	47

## Table des Figures et des Tableaux

---

Figure III. 14 . Variation de $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 1, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	48
Figure III. 15 . Signaux de phases $\Delta X$ en fonction de $\Delta R$ dans la première couche. (Couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	49
Figure III. 16 . Diagramme de phase $\Delta X$ en fonction de $\Delta R$ . (Couche 1, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	50
Figure III. 17 . Variation $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	51
Figure III. 18 . Zoom Variation $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	51
Figure III. 19 . Variation $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	52
Figure III. 20 . Zoom Variation $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	52
Figure III. 21 . Variation $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	53
Figure III. 22 . Zoom de Variation $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	53
Figure III. 23 . Variation de $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	54
Figure III. 24 . Zoom de Variation de $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	54
Figure III. 25 . Signaux de phases $\Delta X$ en fonction de $\Delta R$ dans la deuxième couche. (Couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	55
Figure III. 26 . Signaux de phases $\Delta X$ en fonction de $\Delta R$ dans la deuxième couche. (Couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	56
Figure III. 27 . Variation $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	57
Figure III. 28 . Zoom de Variation de $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	57
Figure III. 29 . Variation de $\Delta X$ en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	58
Figure III. 31 . Variation $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	59
figure III. 33 . Variation de $\Delta R$ en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	60
Figure III. 35 . Signaux de phases $\Delta X$ en fonction de $\Delta R$ dans la troisième couche. (Couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	62
Figure III. 44 . Signaux de phases $\Delta X$ en fonction de $\Delta R$ dans la troisième couche. (Couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut. ....	70

## Table des Figures et des Tableaux

---

Figure III. 59 . Signaux de phases $\Delta X$ en fonction de $\Delta R$ , avec variation de la position du défaut 10[mm]. .....	82
---	----

## Liste de Tableau

Tableau III-1 caractéristiques géométriques et physiques .....	40
--	----

# ABREVIATION

CND :	Contrôle Non Destructif
CF :	Courants de Foucault
CND-CF :	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
MEF :	Méthode des éléments finis.
3D:	Tridimensionnel
Wc ;	énergie cinétique
Wp ;	énergie potentielle

## *Notations et symboles*

$f$ :	Fréquence d'alimentation.
$\mu_r$ :	Perméabilité magnétique relative du matériau.
$\mu_0$ :	Perméabilité magnétique du vide.
$\sigma$ :	Conductivité électrique.
$Z$ :	Profondeur considérée à l'intérieur de la cible[m].
$J(z)$ :	Module de la densité de courant en fonction de la profondeur [ $A/m^2$ ].
$\delta$ :	Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau[m].
$\vec{E}$ :	Champ électrique [V/m].
$\vec{H}$ :	Champ magnétique [A/m].
$\vec{B}$ :	Induction magnétique [T].
$\vec{D}$ :	Induction électrique [C/m <sup>2</sup> ].
$\vec{j}$ :	Densité de courant [A/m <sup>2</sup> ].
$\rho$ :	Densité volumique des charges électriques [C/m <sup>3</sup> ].
$\mu$ :	Perméabilité magnétique [H/m].

## Nomenclature

---

$\varepsilon :$	Permittivité électrique [F/m].
$\vec{B}_r :$	Induction magnétique rémanente [T].
$\vec{T} :$	Potentiel vecteur électrique [A/m].
$\vec{A} :$	Potentiel vecteur magnétique [Wb/m].
$v :$	Potentiel scalaire électrique [V].
$\phi :$	Potentiel scalaire magnétique [A].
$\vec{J}_{ind} :$	Densité de courant induit.
$\vec{J}_{exc} :$	Densité de courant d'excitation.
$\varepsilon_0 :$	Constante diélectrique du vide, $=8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m].
$\varepsilon_r :$	Permittivité électrique relative du milieu.
$\Omega :$	Domaine d'étude.
$n :$	Nombre de nœud dans le domaine d'étude.
$A :$	Inconnue au nœud $n$ du domaine.
$R :$	Résidu de l'approximation.
$L(A) :$	Opérateur différentiel.
$\phi_i :$	Fonction de pondération ou de projection

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

---

### Introduction Générale

*Dans l'industrie, les exigences, de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes. Au niveau de la production, il faut dimensionner les pièces au plus juste tout en garantissant leurs disponibilités et leurs performances. Durant l'exploitation d'un produit industriel, son maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le constitue. [1].*

*Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité . . .), soit pour déceler la présence de défauts et les caractériser.*

*Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault . . .). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui..) ; les conditions de mise en œuvre. [10]*

*Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Le CND par capteurs à courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du défaut.*

*La modélisation d'une configuration réelle de CND par CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et fait appel à des méthodes numériques. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de prendre en compte des géométries complexes de sondes et de pièces, est l'une des plus utilisée. Elle s'est en effet imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques. [15]*

*L'aéronautique est un secteur industriel de plus en plus exigeant vis à vis des techniques de maintenance utilisées. Cette exigence est liée à une préoccupation évidente de sécurité, mais aussi aux contraintes économiques toujours plus pressantes, c'est-à-dire utilisations fréquentes des appareils. Enfin, la complexité croissante des structures aéronautiques, qu'il s'agisse de composants de petites dimensions (aubes, disques de turbines,...) ou de grandes dimensions (joints rivètes, assemblages, attaches), imposent des techniques de contrôles.*

## Introduction Générale

---

*Pour répondre à ces exigences, que ce soit dans le domaine de l'aéronautique pour les assemblages rivetés qui nous intéressent ou bien dans d'autres secteurs industriels sensibles tels que le nucléaire, les techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault sont particulièrement intéressantes. En effet, elles combinent robustesse et faible coût, et sont particulièrement adaptées à la détection des défauts de type fissures qui se traduisent par des ruptures de conductivité électrique ; [4].*

*Ce manuscrit est structuré comme suit :*

*Au premier chapitre on présentera les méthodes de CND les plus utilisées tout en expliquant leurs principes, leur mise en œuvre et domaines d'applications ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients, nous détaillerons un peu plus la technique par Courants de Foucault à savoir.*

*Le deuxième chapitre sera dédié à la modélisation du dispositif de CND par CF tout en introduisant les équations décrivant le comportement du champ électromagnétique, les formulations magnétodynamiques nécessaires à la mise en œuvre d'un outil éléments finis 3D soit en formulations type champ ou potentiel, et enfin à l'exposé des différentes formulations de l'impédance.*

*Quant au troisième chapitre il sera consacré à la modélisation de fissures de longueurs variable dans une structure multicouche tridimensionnelle en utilisant la méthode à éléments finis 3D sous COMSOL Multiphysics. Dans un premier temps nous allons donner une description du système de CND-CF à étudier, puis nous validerons le modèle proposé par comparaison aux travaux de [3]. En fin, nous allons présenter et commenter les résultats obtenus.*

*Nous terminons par une conclusion générale.*

# *CHAPITRE I.*

---

## *GENERALITES SUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF*

---

*(CND)*

---

# **Chapitre I. Généralités sur le contrôle non destructif**

## **I.1 Introduction**

*Le contrôle non destructif (CND) a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Cette définition est assez large. Pour être plus précis, le CND concerne exclusivement « la santé de la matière », en effet les techniques du CND sont utilisées en contrôle de qualité pour s'assurer de la qualité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance. Elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de déceler le manque de matière, les fissures, etc.*

*Le contrôle non destructif est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industrie pétrolière, nucléaire, aéronautique et automobile, car toute fissure d'une pièce ou d'un élément de l'ensemble de ces systèmes peut avoir des conséquences très grave sur le personnel travaillant et des répercussions négatives en matière d'économie et de matériels.*

*Le système de contrôle par les courants de Foucault s'est développé très rapidement ces dernières années par l'avancement de la technologie apportée aux dispositifs des mesures. Le développement important de l'informatique une grande sur dans le domaine du CND.*

*Dans ce premier chapitre, on présentera les principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault, cette dernière fera l'objet d'étude de ce manuscrit, [2].*

## **I.2 Différentes techniques de contrôle**

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, [5]

## I.2.1 Examen Visuel

### I.2.1.1 Principe

Chronologiquement l'examen visuel est le plus ancien. Cette procédure techniquement très simple fait toutefois appel à une véritable expertise et à un sens aigu de l'observation des agents qui l'effectuent (**Figure I.1**). L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure ou d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique.

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 inadmissibles pour des produits plats du types tôles, tissus, verres,...etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limites de différentes natures, que nous allons examiner et justifiant l'utilisation de toute une gamme de procédés de contrôle optique (éclairage, loupe, miroir, ...),[8] .



**Figure I.1 Principe de l'Examen Visuel.**

### **I.2.1.2 Domaine d'application**

- Applicable pour tous les matériaux et pour défauts débouchant.

### **I.2.1.3 Avantages et Inconvénients**

Les Avantages et Inconvénients de l'examen visuel sont :

#### **a) Avantages**

- Examen simple, rapide et peu coûteux.
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

#### **b) Inconvénients**

- Détection limitée aux défauts visibles.
- La surface doit être propre.

## **I.2.2 Contrôle par laser**

### **I.2.2.1 Principe**

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en contrôle non destructif. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Le mot laser est un acronyme pour amplification légère de la radiation de l'émission stimulée. Cette lumière est très intense, essentiellement monochromatique (longueur d'onde unique), plan polarisé (unidirectionnel) et très stable. Les méthodes de contrôle non destructif par laser sans contact sont populaires dans les industries aéronautique et automobiles ; [6]

### **I.2.2.2 Avantages et Inconvénients**

Les Avantages et Inconvénients de contrôle par laser sont :

#### **a) Avantages**

- Inspection sans contact, ne nécessite pas la préparation de surface de la pièce à contrôler.
- Pas de constables : liquide de pénétration, martiaux de marquage ...etc.
- Avec les capteurs électro-optiques comme les cameras CCD, des mesures en temps réel sont possibles.

b) **Inconvénients**

- Considération de sécurité particulières doivent être prises en compte.
- Une composante de chargement est nécessaire pour voir les résultants.
- Les résultats dépendent de la composante de cisaillement.
- L'interprétation des résultats est subjective ; [16]

## I.2.3 Ressuage

### I.2.3.1 Principe

C'est une technique destinée à révéler la présence de fissures en surface de pièces planes ou quasi-planes. Elle consiste à badigeonner la cible avec un liquide fluorescent, qui pénètre dans les fissures (**Figure I.2**).

Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et en réagissant avec le liquide restant dans les fissures, va les révéler.

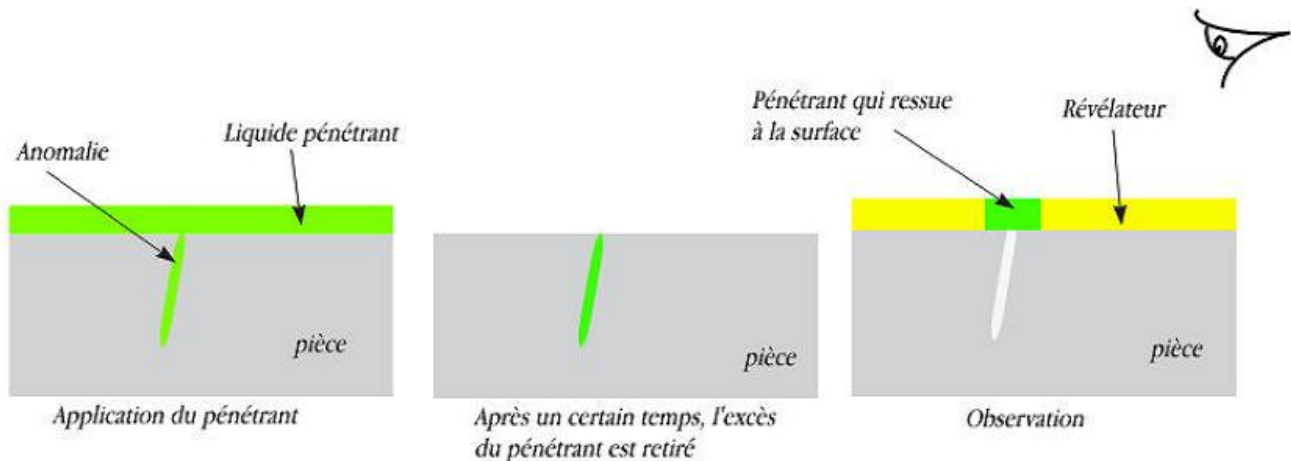


Figure I.2 Principe du ressuage. [3]

### I.2.3.2 Domaine d'application

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

A titre indicatif, sa sensibilité est très bonne, puisqu'on peut estimer et obtenir une détection fiable de défauts de 80  $\mu\text{m}$  de largeur pour 200  $\mu\text{m}$  de profondeur pour un ressuage coloré pratiqué en atelier sur une surface usinée, alors que le ressuage fluorescent conduit dans

les mêmes conditions à une limite de détection de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  en largeur pour 20 à 30  $\mu\text{m}$  en profondeur .

### **I.2.3.3 Avantages et Inconvénients**

Les Avantages et Inconvénients de ressuage sont :

#### **a) Avantages**

- Simple à mettre en œuvre et relativement sensible aux fissures ouvertes (et en surface).
- Elle n'est pas automatisable et les résultats restent à l'appréciation de l'opérateur. De plus, elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux de géométrie et dimensions quelconques.
- Facilité de mise en œuvre (pour pénétration pré émulsionnée).

#### **b) Inconvénients**

- Il est nécessaire de faire un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection.
- L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation (ex: centrale nucléaire où cette technique va être complètement abandonnée pour des raisons de normes de dépollution).
- Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammable ; [16])

## **I.2.4 Magnétoscopie**

### **I.2.4.1 Principe**

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructive pour la détection des défauts débouchant ou sous jacents (de 1 à 2 mm de la surface) dans les matériaux ferromagnétiques. Elle consiste à créer un flux magnétique intense dans les structures entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite (**Figure I.3**). Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux ou, de façon plus marginale, par une mesure directe avec des capteurs. Il s'agit, dans la majorité des cas, d'une inspection visuelle réalisée par un opérateur.

La sensibilité de détection est liée en partie à la granulométrie des poudres magnétiques utilisées, qui doivent être très homogènes. Le contrôle peut se faire de façon automatisée sur des

pièces de forme simple, en particulier toutes les pièces axisymétriques du type barres et tubes, à l'aide de capteurs électriques sensibles aux champs magnétiques[3].

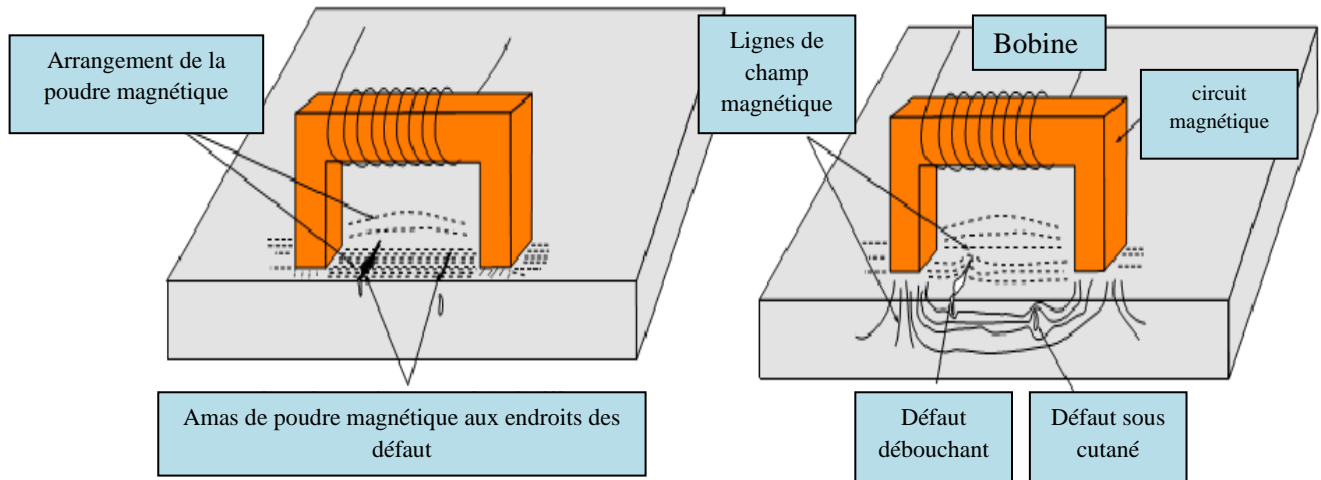


Figure I.3 Principe de la magnétoscopie, [3].

#### I.2.4.2 Domaine d'application

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de densité débouchant en surface ou proches de la surface sur des matériaux ferromagnétiques tels que aciers ordinaire au carbone, aciers ferritiques ordinaires et au chrome (13 % de chrome), fontes, nickel, cobalt. Les aciers austénitiques ne sont pas ferromagnétiques. On considère qu'un matériau est ferromagnétique lorsque soumis à un champ continu de 2400 A/m, il présente une induction d'au moins 1 tesla. La magnétoscopie est utilisée pour le contrôle:

- Des pièces moulées : criques situés entre le raccordement, réseaux de fissures superficielles.
- Des pièces forgées : criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement.
- Les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détectées. Les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique des soudures[16].

### **I.2.4.3 Avantages et Inconvénient**

Les Avantages et Inconvénients de la magnétoscopie sont :

#### **a) Avantages**

- Facilité à mettre en œuvre manuellement.
- Economique.
- Résultats quasi immédiats.
- Détection des défauts débouchant et des défauts sous-jacents.

#### **b) Inconvénients**

- Cette méthode à champ magnétique continu ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques, et ne détecte pas le défaut interne ; [14].

## **I.2.5 Radiographie**

### **I.2.5.1 Principe**

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou  $\gamma$ ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé (**Figure I.4**). Ce contrôle peut s'appliquer à de très nombreux types de matériaux pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure..., au stade de la production ou en maintenance. Les défauts se présentant perpendiculairement à la direction du faisceau sont plus difficilement détectables[3].

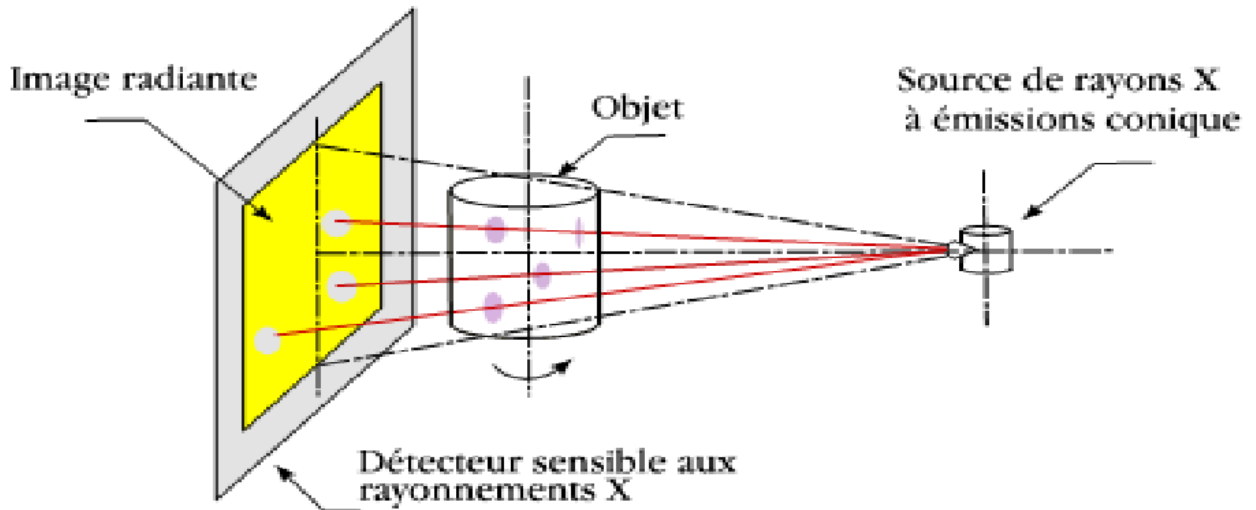


Figure I.4 Principe de La Radiographie. [3]

### I.2.5.2 Domaine d'application

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries métallurgiques ; [5]

### I.2.5.3 Avantages et Inconvénients

Les Avantages et Inconvénients de cette technique sont :

#### a) Avantages

- fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille.
- garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures.

#### b) Inconvénients

- toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée.

- la nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel.
- le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.
- la faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films ; [1]

## I.2.6 Thermographie

### I.2.6.1 Principe

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge (**Figure I.5**).

L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres[3].

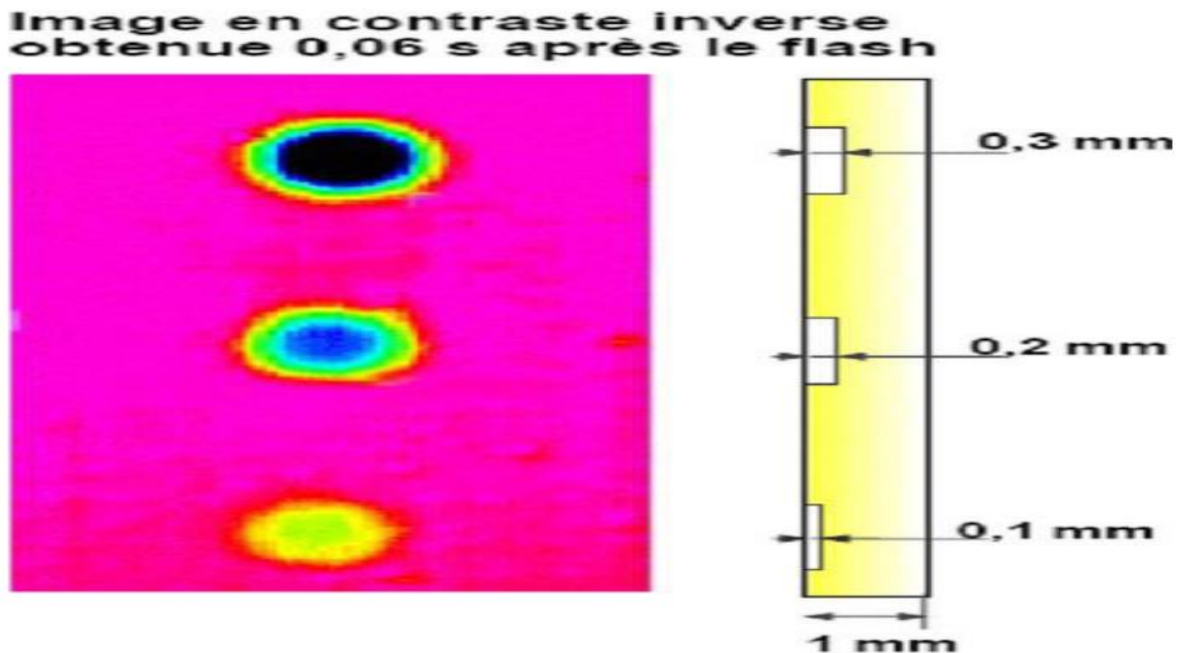


Figure I.5 Principe de La Thermographie. [3].

**a) Thermographie pulsionnelle**

Elle consiste à déposer à un instant  $T_0$ , une impulsion spatialement uniforme de chaleur sur la surface de la pièce à contrôler et à observer l'évolution de la température de surface au cours du transfert de chaleur par conduction dans l'épaisseur. La présence d'une discontinuité dans le matériau perturbe le flux thermique ce qui se traduit par un écart de température appelé contraste thermique.

La mesure de ce contraste et de l'instant  $T$  pour lequel il est maximum renseigne sur la nature et la profondeur du défaut.

**b) Thermographie modulée**

Dans ce cas l'apport de chaleur est périodique et la présence d'une discontinuité se traduit par un déphasage entre l'évolution de la température de surface du matériau sain et celle du matériau défectueux.

**c) Méthode surfacique**

L'apport de chaleur et l'observation se font sur un élément de surface de la pièce à contrôler. On enregistre une séquence d'images qui décrit l'évolution de la température de surface au cours du temps en chaque point de la zone contrôlée ; [1]

## **I.2.7 Mesure du bruit Barkhausen**

### **I.2.7.1 Principe**

L'effet Barkhausen est dû à une émission locale d'ondes électromagnétiques qui se créent au cœur même des cristaux d'un matériau sous l'effet d'un champ magnétique (**Figure I.6**).

Basée sur la microstructure magnétique et sa réorganisation, la technique Barkhausen est très proche du matériau et permet ainsi d'avoir des informations précises sur son état métallurgique et son niveau de contraintes résiduelles.

Les émissions Barkhausen peuvent être mesurées par l'intermédiaire de sondes encerclantes ou de sondes de côté constituées de bobines plates posées à la surface de l'échantillon. Le bruit Barkhausen est généralement représenté par sa courbe enveloppe, tracée en fonction du champ appliqué, et qui a la forme d'un pic ; [9]

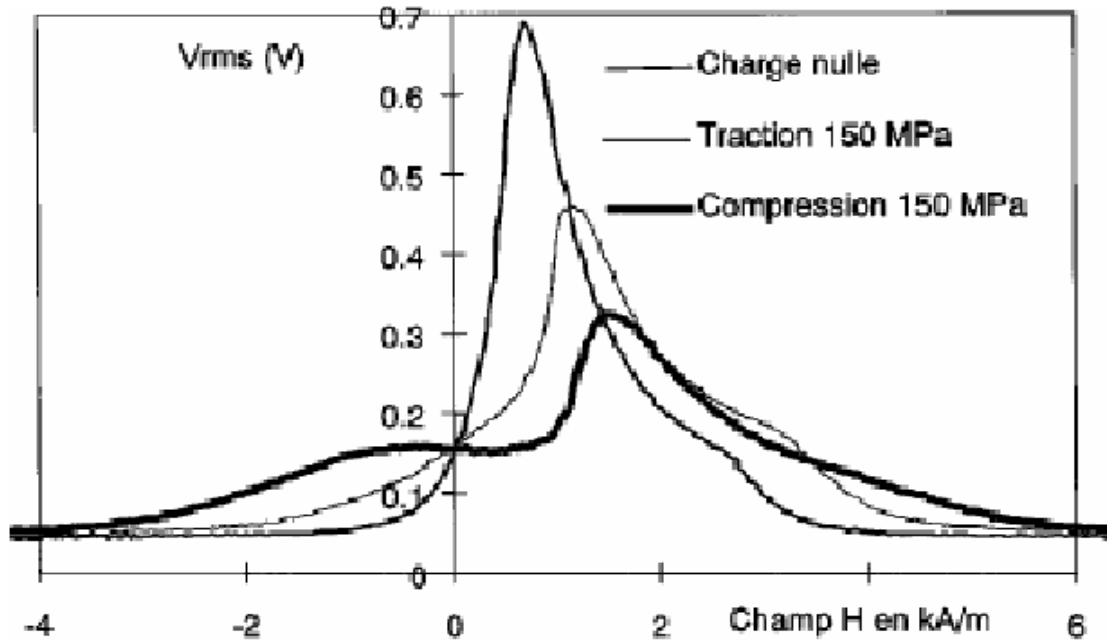


Figure I.6 Principe de La mesure du bruit Barkhausen , [9]

## I.2.8 Ultrasons

### I.2.8.1 Principe

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

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

Le contact entre le transducteur et la cible n'est jamais parfait ; il existe une couche d'air les séparant. La quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air-matériau ne pénètre pas à l'intérieur du matériau.

Il y a ainsi nécessité de déposer un couplant (eau, huile par exemple) entre le transducteur et le matériau.

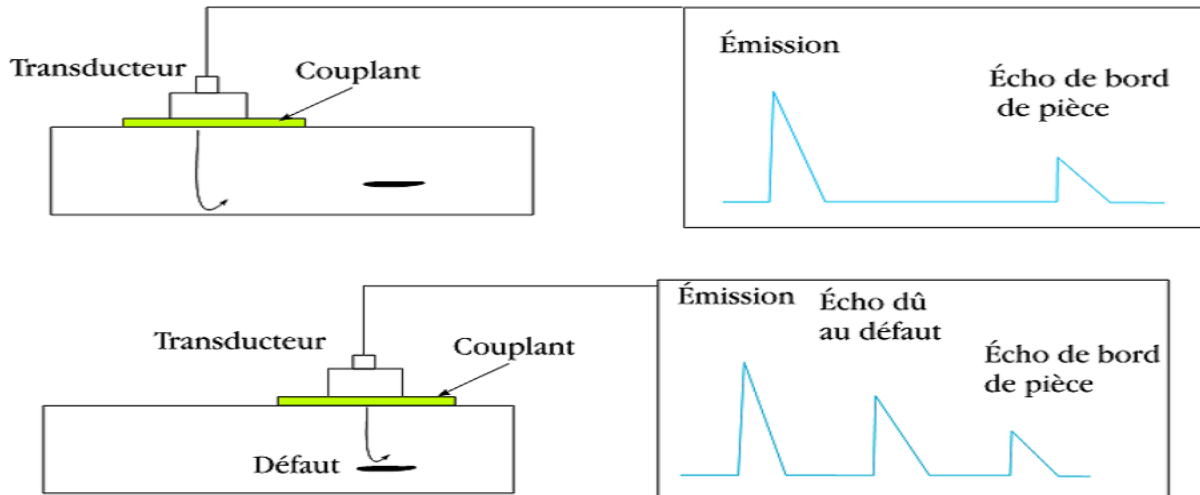


Figure I.7 Principe des Ultrasons. [3]

### I.2.8.2 Domaine d'application

L'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques. Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope. Les ultrasons sont très employées pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers, ...etc.

### I.2.8.3 Avantages et Inconvénients

Les Avantages et Inconvénients de la ultrasonore sont :

#### a) Avantages

- grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge).
- haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore).
- localisation et dimensionnement des défauts.
- examen à partir d'une seule face souvent suffisant.
- détection instantanée, se prête bien à l'automatisation.

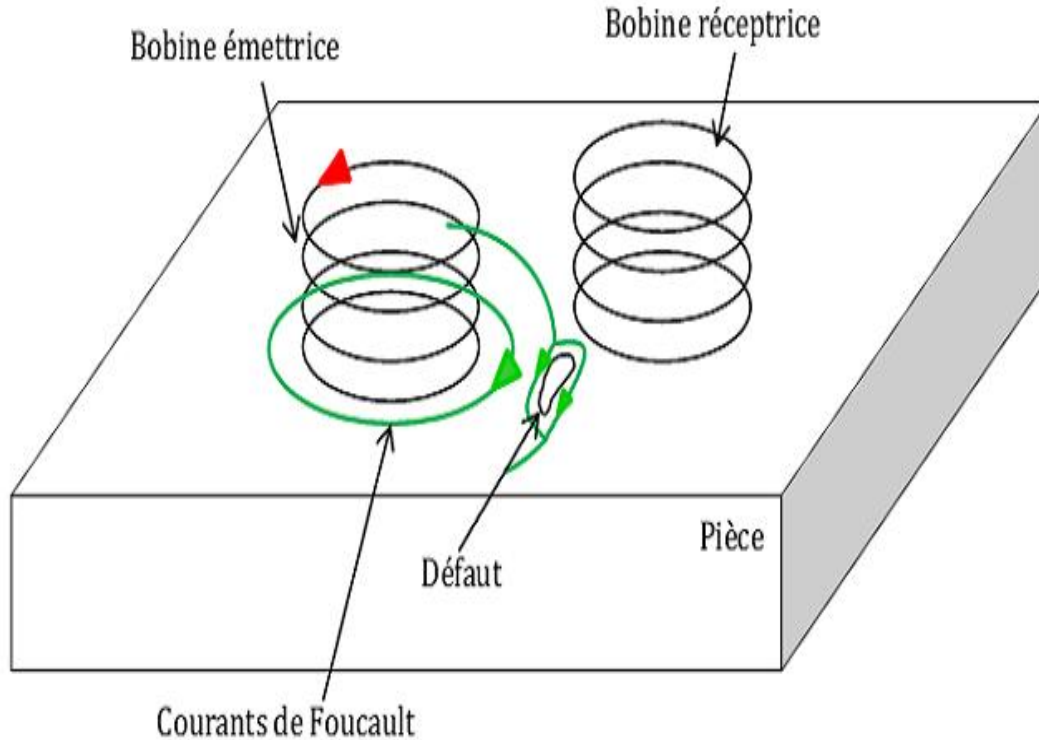
**b) Inconvénients**

- pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire.
- méthode impliquant un très haut niveau de technicité.
- sensible à la géométrie (forme, rugosité).
- sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle) ; [5]

### I.3 Courants des Foucault

#### I.3.1 Principe

Ce mode d'examen consiste à créer des courants induits par l'intermédiaire d'un champ magnétique alternatif (généré par un solénoïde) et variable dans le temps (basse ou haute fréquence). Ces courants induits et créés localement sont appelés courants de Foucault, leurs distributions et leurs répartitions dépendent du champ magnétique d'excitation (**Figure I.8**), de la géométrie et des caractéristiques de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique et de structure examinée ;[16] .[12]



**Figure I.8 Principe du CND par courants de Foucault,[16] .**

### I.3.2 Effet de peau

Ce phénomène d'origine électromagnétique apparaît dans tous matériaux conducteurs parcourus par un courant électrique alternatif ou soumis à un champ électromagnétique variable dans le temps, dans le cas du contrôle non destructif, les courants induits dans la pièce commencent à décroître d'une manière exponentielle à partir de la surface (**relation I.1**) ; [3]

La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration donnée par:

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

- ✓ f : Fréquence d'alimentation.
- ✓  $\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du matériau.
- ✓  $\mu_0$ : Perméabilité magnétique du vide.
- ✓  $\sigma$ : Conductivité électrique.

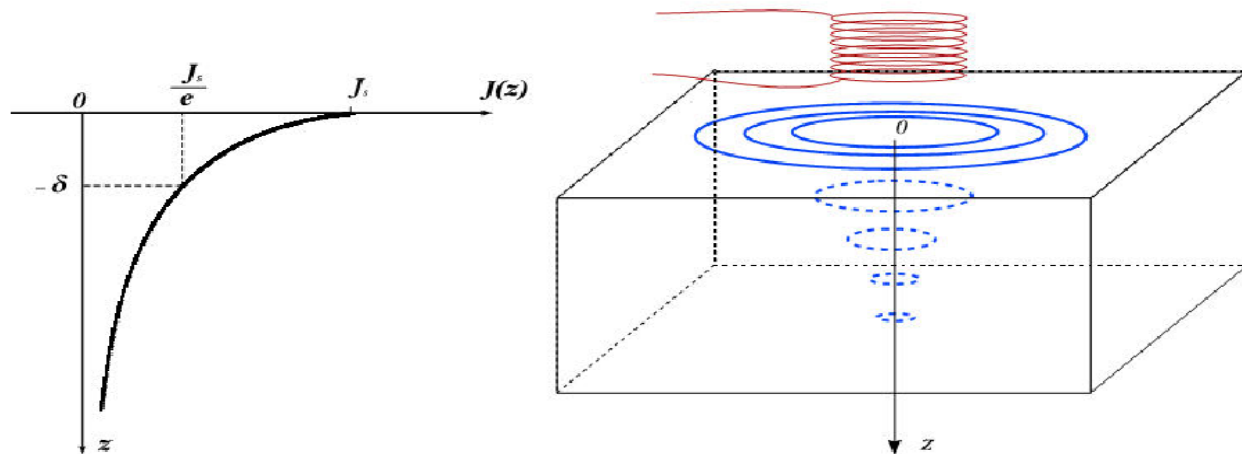
La profondeur de pénétration est donc inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau.

Si on considère une cible plane semi infinie excitée par une nappe de courants extérieurs parallèles au plan, dans ce cas le module de la densité de courant est régi par la relation suivante :

$$J(Z) = J_0 \cdot e^{-z\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (\text{I-2})$$

- ✓ Z : Profondeur considérée à l'intérieur de la cible[m].
- ✓ J(z): Module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/m<sup>2</sup>].
- ✓  $\delta$ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau[m].

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur (**Figure I.9**)[2].



**Figure I.9 Répartition des courants de Foucault sous une surface plane,[2].**

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

La présence d'un défaut, perturbe la circulation des courants de Foucault, entraînant une variation de l'impédance du solénoïde. La technique est applicable à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Dans l'examen par les courants de Foucault citons deux méthodes :

### 1) Méthode directe

Cette méthode consiste à passer un courant dans un tube figure (1.8 a) où dans une plaque figure (1.8 b). Lorsqu'un défaut orienté selon l'axe entre électrodes, perturbe la distribution du champ est donc détectée. Un défaut transversal par rapport à cet axe n'est pas détecté.

### 2) Méthode indirecte

L'examen par cette méthode basé sur la génération d'une induction par un solénoïde ou un aimant permanent, applicable pour les tubes et plaques. La présence d'un défaut transversal par rapport aux lignes du champ dévie celle-ci est détecté. Contrairement à un défaut orienté parallèlement au liges du champ.

Pour la détection des défauts, on utilise deux types de courants de Foucault dans le C.N.D;

- Les courants de Foucault basse fréquence (ordre du Hz/kHz).

Les courants de Foucault basse fréquence permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine. On distingue en général trois types de pièces (tendre, adéquat et dur).

- Les courants de Foucault haute fréquence (50 kHz à 500 kHz);

Les courants de Foucault à haute fréquence permettent de localiser en surface des bulles d'air dans le métal, en déplaçant une bobine au dessus du défaut. Il faut donc pouvoir mettre la pièce en rotation. Toutefois, il reste possible de créer une sonde rotative que l'on approche de la pièce mais le contrôle est plus complexe à réaliser (à cause de la variation d'entrefer plus importante) ; [2].

### **I.3.3 Domaine d'application**

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisés pour effectuer les opérations suivantes :

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques.
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau.
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...).
- Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...).
- Suivi d'installations et de matériels en service.
- Mesure d'épaisseur.[12]

### **I.3.4 Avantages et Inconvénient**

Les Avantages et Inconvénients des courants de Foucault sont :

#### **a) Avantages:**

Le CND par CF :

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni

pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs.

- Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possible.

**b) Inconvénients**

- La profondeur d'inspection est dépend de la fréquence d'excitation.
- La détection des défauts se fait d'une manière locale.
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs.
- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts.
- à compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection ; [2].

**c) Limites du CND par courants de Foucault**

- Il s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur ne.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe ; [3].

### **I.3.5 Principe physique de CND-CF**

L'alimentation de la bobine du capteur par un courant variable crée un champ d'excitation variable sous la loi de Maxwell Ampère. Toute pièce conductrice baignant dans ce champ sera le siège des courants induits appelés courants de Foucault.

En vertu de la loi de Lenz, ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique opposant au champ qui leur a donné naissance. Le champ résultant modifiera alors le courant dans la source et par conséquent l'impédance du capteur. (**Figure I.10**) résume le principe de CND par courant de Foucault ; [11]

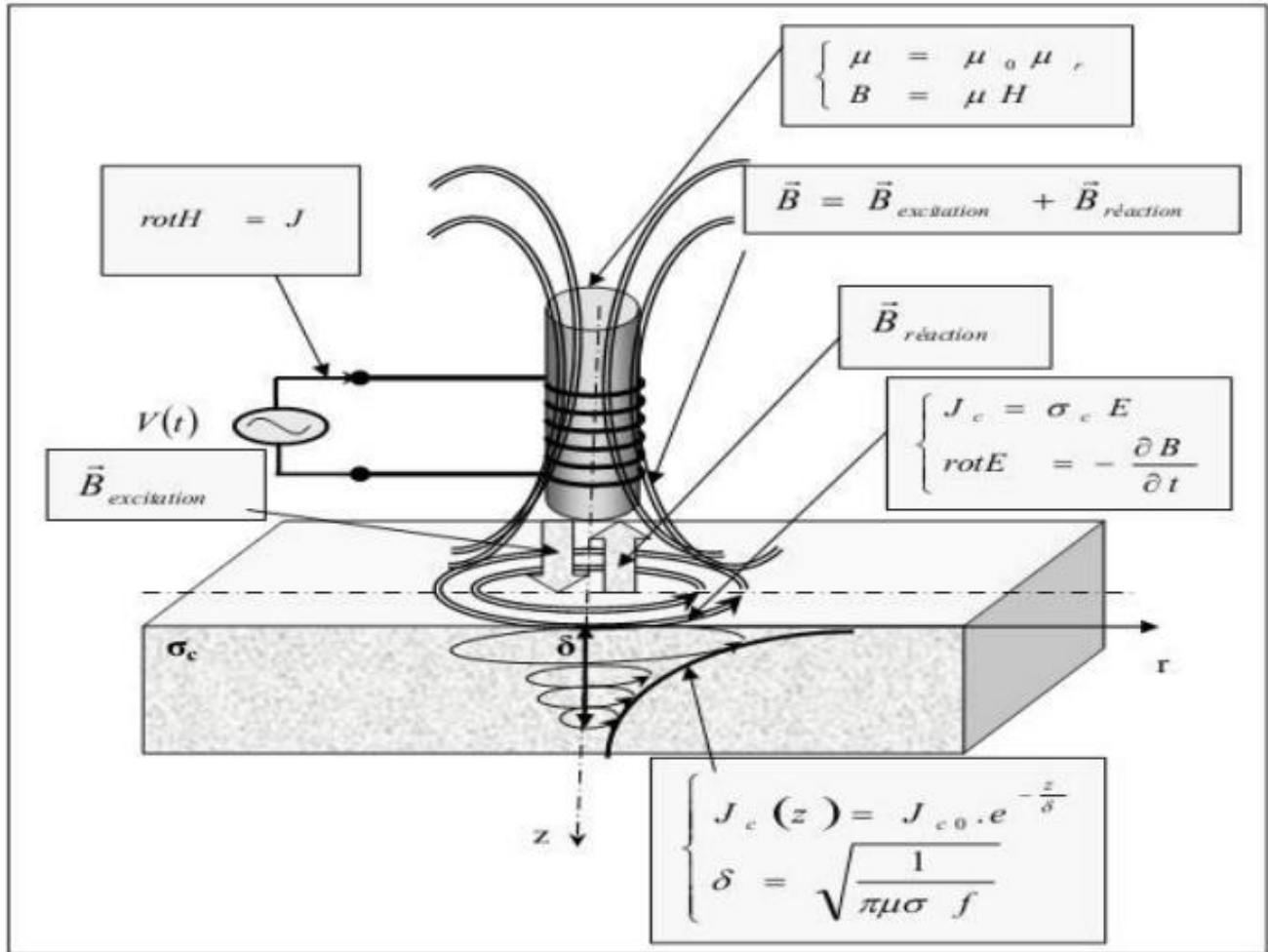


Figure I.10 Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault, [11]

## I.4 Type des défauts

Le défaut, se traduit soit par l'absence de matière (air), ou par une anomalie non conductrice, il peut être situé à la surface de la pièce, au milieu ou à l'intérieur de la pièce.

### a) Hétérogénéités et défauts

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. Brièvement les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement les défauts de surface, les défauts internes[16].

**b) Défauts de surface**

Ce sont des défauts accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect. La première catégorie (défauts ponctuels) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques  $\mu\text{m}$ ) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

**c) Défauts internes**

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler.

Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger dans le produit emballé.

Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'imagerie infrarouge, ... la majorité des techniques précédemment citées utilisent le capteur comme outil de détection des défauts. Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure ; [16] .

## **I.5 Conclusion**

*Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif, les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, le contrôle par laser, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la technique des courants de Foucault, la thermographie et enfin le procédé thermo-inductive. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients. Il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts , le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs , nature (conducteur ou isolant), dimensions et état de surface du matériau à contrôler , type de défaut débouchant, sous cutané ou interne, but du « CND » recherche de défaut ou caractérisation des pièces à contrôlées, mesure d'épaisseur.... Comme la plus part des matériaux utilise en électrotechnique soit de type conducteur électrique au magnétique.*

*Le CND par courants de Foucault s'adapte bien pour ces types de matériaux, nous avons jugé utile de lui consacré le chapitre suivant ; [2].*

*CHAPITRE II.*  
*FORMULATIONS ET*  
*MODELISATIONS*  
*DU CND PAR CF*

---

## Chapitre II. Formulation et modélisation du CND par CF

### II.1 Introduction

*La simulation consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système. Elle s'appuie sur une modélisation et fait appel à des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. En chaque point du système considéré, plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température, champ électromagnétique . . .) décrivent son état.*

*Ces grandeurs physiques ne sont pas indépendantes, mais liées par des équations, généralement aux dérivées partielles. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui régissent le comportement du système.*

*Modéliser, c'est pouvoir déterminer l'état du système pour une source donnée. Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique ; [3].*

#### II.1.1 Modélisation du dispositif de CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la (**Figure II.1**). Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée.

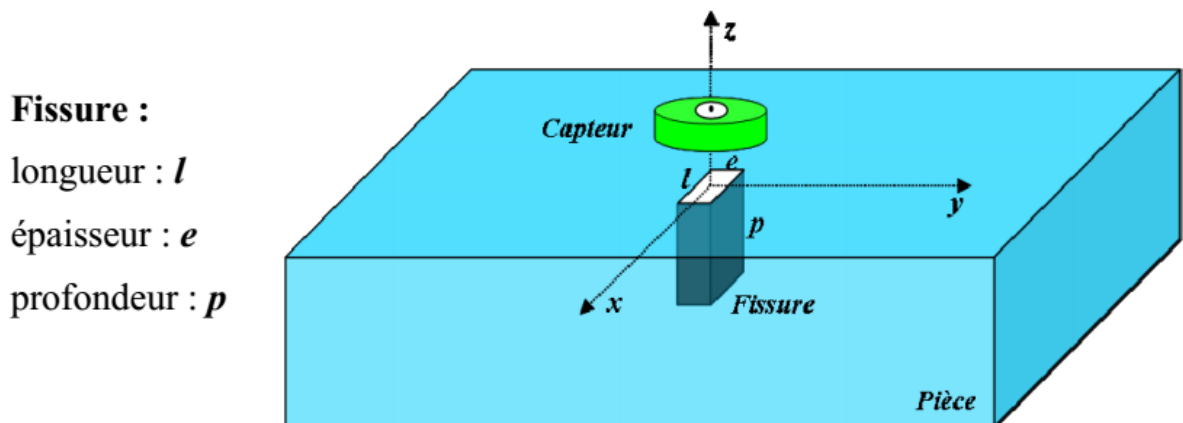


Figure II. 1 Système capteur-fissure ,[1].

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce défectueuse ainsi que la variation d'impédance de la bobine. Les dispositifs de CND que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire. Il s'agit des dispositifs constitués d'inducteurs filaires, de régions conductrices, non conductrices magnétiques ou amagnétiques et de sources de courant.

La modélisation de ces dispositifs peut être ramenée, dans le cas général, à un problème magnétodynamique type comme indiqué sur la (Figure II.2). L'ensemble de ce système forme le domaine de calcul  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$ [1].

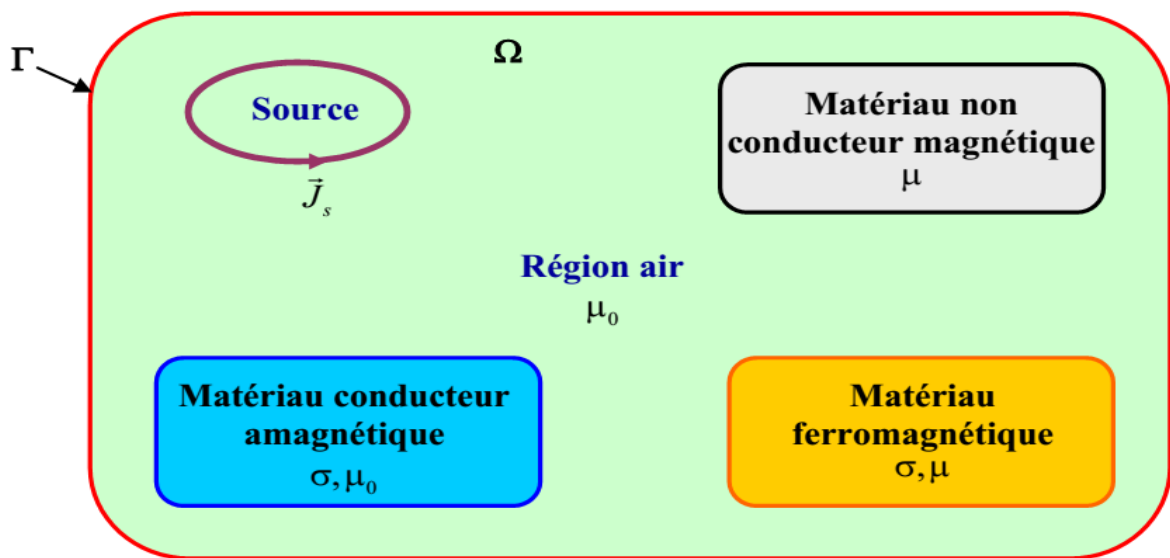


Figure II. 2 Problème magnétodynamique type,[1].

Pour décrire le comportement du champ électromagnétique dans le système modélisé, nous démarrons des quatre équations de Maxwell auxquelles nous associons les lois constitutives et les conditions de passage aux frontières ; [1]

### II.1.2 Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont l'expression la plus généralisée des lois de l'électromagnétisme classique. Elles constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques et de leurs sources respectives : charges et densités de courant, et traduisent l'interdépendance de ces quatre grandeurs :

$$\text{div}D = \rho \qquad \text{Théorème de Gauss} \qquad \text{(II-1)}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du flux} \quad (\text{II-2})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad \text{Loi de Faraday} \quad (\text{II-3})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} \quad \text{Théorème d'Ampère-Maxwell} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$\vec{E}$  : Champ électrique [V/m].

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m].

$\vec{B}$  : Induction magnétique [T].

$\vec{D}$  : Induction électrique [C/m<sup>2</sup>].

$\vec{j}$  : Densité de courant [A/m<sup>2</sup>].

$\rho$  : Densité volumique des charges électriques [C/m<sup>3</sup>].

### II.1.2.1 Lois constitutive

Les équations précédentes sont associées aux relations constitutives (lois de comportement) des matériaux.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II-5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II-6})$$

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

Où :

$\mu$ : Perméabilité magnétique [H/m].

✓  $\sigma$ : Conductivité électrique [S/m].

✓  $\varepsilon$ : Permittivité électrique [F/m].

$\mu$  et  $\sigma$  peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotropes, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie.

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 (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[12].

### II.1.2.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites (spatiales) s'énoncent de façon générale pour un domaine  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$  avec  $n$  un vecteur normal (unitaire) à  $\Gamma$  pour la variable  $u$ .

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

### II.1.2.3 Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu 1 à un milieu 2 (Figure II.3), les grandeurs de champs subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables.

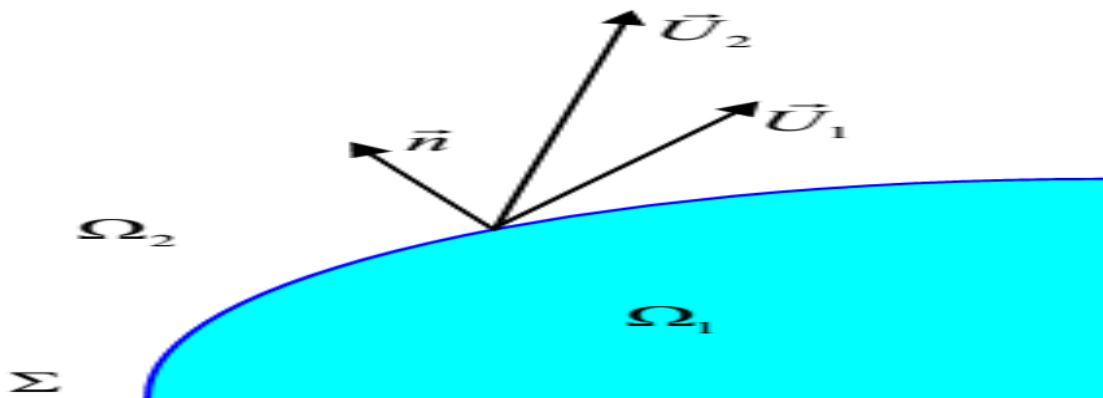


Figure II. 3 Interface entre deux milieux[12].

Les relations entre les grandeurs électromagnétiques à l'interface, dites relations de transmission, s'écrivent alors :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (\text{II-8})$$

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

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{J}_{sur} \quad (\text{II-10})$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{II-11})$$

Où  $\rho_{sur}$  est la densité surfacique de charge,  $\vec{J}_{sur}$  la densité surfacique de courant et  $\vec{n}$  le vecteur normal à la surface de séparation des deux milieux  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  et dirigé vers l'extérieur du milieu 1.

#### II.1.2.4 Conditions de Jauge

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

$$\text{div} \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{II-12})$$

$$\text{div} \vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{II-13})$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'arêtes} \quad (\text{II-14})$$

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près. La jauge de Coulomb s'écrit donc :  $\text{div} \vec{A} = 0$  [12].

### II.1.2.5 Hypotheses 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  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$  Approximation des Régimes

Quasi Stationnaires ARQS).

- 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 laquelle on gardera la notation  $\sigma \vec{E}$  qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II-15})$$

- La densité volumique de charge est considérée comme nulle.
- Généralement, le courant n'existe qu'en volume ( $\vec{J}_{sur} = \vec{0}$ ) , c'est-à-dire que

la conductivité est finie et que la fréquence d'excitation n'excède pas quelques MHz (basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée.

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{II-16})$$

- L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ( $\vec{B}_r = \vec{0}$ ) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent.

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II-17})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-18})$$

### II.1.2.6 Champs et potentiels

Les champs de vecteurs  $\vec{E}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{j}$  peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires :

$$\vec{H} = \vec{T} - \operatorname{grad} \phi \quad (\text{II-19})$$

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (\text{II-20})$$

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

$$\vec{j} = \operatorname{rot} \vec{T} \quad (\text{II-22})$$

Avec :

- ✓  $\vec{T}$ : Potentiel vecteur électrique [A/m].
- ✓  $\vec{A}$ : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m].
- ✓  $v$ : Potentiel scalaire électrique [V].
- ✓  $\phi$ : Potentiel scalaire magnétique [A].

Ainsi, pour un problème donné, plusieurs combinaisons sont envisageables (il existe a priori un grand nombre de formulations possibles). De telles combinaisons aboutissent à des formulations électromagnétiques ; [1]

### II.1.3 Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples.

À titre d'exemple on peut citer les travaux de Dodd et al qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles par la méthode de séparation des variables.

Parmi ces travaux on retrouve :

- une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de deux couches métalliques parallèles de matériaux différents.
- Une bobine de section rectangulaire encerclant deux cylindres métalliques concentriques.

Des développements plus récents permettent notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane. 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[12].

### II.1.4 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 repose sur la méthode plus générale des équations intégrales. Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse due à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée.
- 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

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. D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :

- 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. C'est cette méthode que nous avons retenue. Elle est présentée plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Ce chapitre se décompose 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 seront ensuite introduites. Les espaces de définition des opérateurs différentiels et des grandeurs électromagnétiques seront déterminés. Une structure mathématique basée sur deux suites d'espaces regroupant l'ensemble des équations de Maxwell sera établie. Enfin, les formulations en potentiels permettant de résoudre les problèmes magnétodynamiques seront introduits. La seconde partie est relative à la résolution numérique des équations de Maxwell. La discrétisation des espaces fonctionnels sera développée sur un maillage tétraédrique.

Enfin, à partir de ces outils, les différentes formulations magnétodynamiques en potentiels, permettant de résoudre les problèmes d'électromagnétisme, seront développées ; [17].

### **II.1.5 Modélisation mathématique du système**

Tous les phénomènes d'électromagnétismes variables dans le temps et dans l'espace dans nos études des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de maxwell suivantes Loi de

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Maxwell Faraday (induction).} \quad \text{(II-23)}$$

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad \text{Loi de Maxwell Gauss (électrique)} \quad \text{(II-24)}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell Ampère} \quad \text{(II-25)}$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad \text{Loi de Maxwell Gauss (magnétique)} \quad \text{(II-26)}$$

Où :

- ✓  $\vec{E}$ [V/m] et  $\vec{H}$ [A/m]: Champ électrique et magnétique.
- ✓  $\vec{D}$ [A.s/m] et  $\vec{B}$ [T]: Induction électrique et magnétique.
- ✓  $\vec{j}$ [A/m<sup>2</sup>] et  $\rho$ [C/m<sup>3</sup>]: Densité du courant et la charge volumique.

Tel que :

$$\checkmark \vec{j} = \vec{J}_{\text{ind}} + \vec{J}_{\text{exci}} \quad \text{(II-27)}$$

Avec :

- ✓  $\vec{J}_{\text{ind}}$ : La densité de courant induit.
- ✓  $\vec{J}_{\text{exci}}$ : La densité de courant d'excitation.

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré sont.

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad \text{(II-28)}$$

Où :

- ✓  $\mu$  : Perméabilité magnétique [H/m].
- ✓  $\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [H/m].
- ✓  $\mu_r$  : Perméabilité magnétique relative du milieu.

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{cases} \quad \text{(II-29)}$$

- ✓  $\varepsilon$ [F/m]: Permittivité diélectrique.
- ✓  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  [F/m] : Constante diélectrique du vide.
- ✓  $\varepsilon_r$ : Permittivité électrique relative du milieu.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \text{(II-30)}$$

Où :

✓  $\sigma$  [ $S.m^{-1}$ ] : Conductivité électrique.

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasistationnaires), ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites, dans notre cas d'étude nous allons considérer que.

Dans un milieu conducteur  $\sigma$  est de l'ordre de  $10^6 S.m^{-1}$ , et  $\epsilon_0$  de l'ordre de  $8.85.10^{-32} F/m$  Jusqu'à des fréquences qui avoisinent les mHZ nous avons  $\omega. \epsilon_0 \ll \sigma$  ce qui nous permet d'avoir :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-31})$$

La densité volumique de charge est considérée comme nulle ( $\rho = 0$ ).

Les paramètres  $\sigma, \mu, \epsilon$  sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système.

Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.

Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient ; [18]

Tel que :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-32})$$

$$div(\vec{D}) = 0 \quad (\text{II-33})$$

$$\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (\text{II-34})$$

### II.1.6 Formulation en potentiel vecteur (couple A-V)

Pour résoudre les équations de Maxwell, des changements de variables sont nécessaires. La méthode la plus connue est la « méthode A-V ». Les équations différentielles aux dérivées partielles (II-33) et (II-36) correspondent aux équations de diffusion des grandeurs H et E, toute fois, les formulations en champ présentent un inconvénient majeur, c'est celui de la discontinuité aux interfaces et particulièrement aux coins (Continuité de la composant normal de l'induction B). Ce qui est justifié par les relations de passage ; [3].

## II.2 Méthode des éléments finis (MEF)

### II.2.1 Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonienne qui stipule

L'existence d'un fonctionnel type intégral défini par:

$$F(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega \quad (\text{II-35})$$

- ✓ L : est la fonction de la grange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.

$$L = W_c - W_p \quad (\text{II-36})$$

Avec :

- ✓  $\Omega$ : est le domaine d'étude.

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

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

$$\frac{\partial F}{\partial A_n} = 0 \quad (\text{II-37})$$

Où :

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

### II.2.2 Formulation résidus pondérés

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

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{II-38})$$

Tel que :

- ✓ R : est le résidu de l'approximation.

- ✓  $L(A)$  : opérateur différentiel.
- ✓  $f$  : fonction définie sur le domaine d'étude  $\Omega$ .
- ✓  $A$  : l'inconnue à chercher.

A l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en  $N$  points du domaine  $\Omega$ .

$$\int_{\Omega} R_i \phi_i \cdot \partial \Omega \quad (\text{II-39})$$

Où :

$\phi_i$  : Fonction de pondération ou de projection.

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

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

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

Contrairement à la méthode variationnelle, la méthode des résidus pondérés, ne nécessite pas la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système ; [11]

### II.2.3 Calcule de l'impédance

L'impédance d'une bobine peut être calculée à partir de l'énergie du système, puisque l'inductance et la résistance sont respectivement associées à l'énergie stockée et l'énergie dissipée dans le système.

L'énergie stockée  $W$  dans le système peut être donnée par :

$$W = \frac{1}{2} \int_v B \cdot H \cdot dv \quad (\text{II-40})$$

En supposant la relativité constante dans chaque sens, l'énergie stockée dans un élément fini de volume  $V_i$  peut être écrite, en termes des composantes de  $B$  seule sous la forme :

$$W_i = \frac{1}{2} (B_{ri}^2 + B_{zi}^2) \cdot V_i \quad (\text{II-41})$$

En additionnant sur tous les éléments ( $N$ ) de la région du maillage, l'énergie stockée total est donnée par:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} v ((B_{ri}^2 + B_{zi}^2) \cdot V_i \quad (\text{II-42})$$

L'inductance de la bobine peut alors être calculée par:

$$L = 2 \frac{W}{I_s^2} \quad (\text{II-43})$$

Où  $I_s$  est le courant dans la bobine de la source.

La résistance de la bobine est associée à l'énergie dissipée dans le système. L'énergie dissipée dans un élément fini de volume  $V_i$  est donnée par:

$$P_i = \frac{J_i^2 \cdot V_i}{\sigma} \quad (\text{II-44})$$

Où  $J_i$  est la densité du courant induit définie par :

$$J_i = -j \cdot \omega \cdot \sigma A_{ci} \quad (\text{II-45})$$

Où  $c_i$  est la valeur du potentiel vecteur magnétique central pour l'élément ( $i$ ).

en Remplaçons l'équation (II.49) dans (II.48) et additionnons sur tous les éléments de la région du maillage, l'énergie dissipée total est donnée par:

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N V_i \cdot \omega^2 \cdot \sigma \cdot A_{ci}^2 \quad (\text{II-46})$$

La résistance de la bobine est donnée par:

$$R = \frac{P}{I_s^2} \quad (\text{II-47})$$

L'impédance de la bobine est défini par:

$$Z = R + j \cdot \omega \cdot L \quad (\text{II-48});$$

[2].

### **II.3 Conclusion**

*Les équations étant formulées, ce deuxième chapitre a fait l'objet d'une présentation des méthodes analytiques, numériques, ou les méthodes semi analytiques pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles.*

*Comme le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel, nous utiliserons comme outil de simulation pour le CND-CF appliqué aux structures multicouches rivetées utilisées en aéronautique.*

*CHAPITRE III.*

*SIMULATION D'UNE*  
*STRUCTURE RIVETEE*  
*MULTICOUCHES*

---

## Chapitre III. Simulation d'une Structure Rivetée Multicouches

### III.1 Introduction

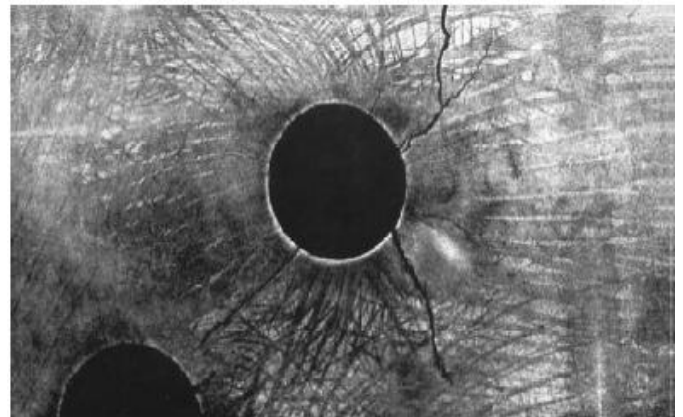
*Le problème de la sécurité dans le transport aérien et plus précisément celui posé par les arrachements de fuselages causés par la faiblesse de joints rivetés. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux techniques à courants de Foucault car elles sont bien adaptées au contrôle de structures conductrices et notamment celles des joints rivetés, [19]*

*Cette contribution décrit la simulation 3D sous COMSOL Multiphysics de contrôles par courants de Foucault de structures rivetées utilisées en aéronautique. Le système de multicouche est constitué de plaques conductrices dont les caractéristiques géométriques et physiques sont basés sur des références internationales de la littérature du domaine de CND-CF, [3], [10] le but sera de faire intervenir la nature du matériau de rivet n d'où le système n'est plus homogène, et voir l'influence de ce dernier, particulièrement, lorsque le défaut est sous la tête de rivet ou au pied de rivet.*

*Dans ce chapitre, on présentera, en premier lieu, le modèle multicouches proposé ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques, puis une validation du modèle sera proposée par comparaison avec des travaux Mr (CH,2009),[3], nous passerons ensuite à la modélisation et la simulation des défauts de longueur différentes par rapport à la tête de rivet et se trouvant alternés sur les trois couches et on terminera par la mise en évidence des paramètres influents sur le signal de détection.*



a. Photo réelle du fuselage riveté d'un avion,



b. Photo défaut au pied de rivet

**Figure III. 1** Structure rivetées utilisée en aéronautique. [10]

### III.2 Déroulement de simulation sous COMSOL Multiphysics

Une simulation électromagnétique sous COMSOL Multiphysics se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. La simulation se décompose ainsi en trois étapes principales : le pré-traitement, le calcul et le post-traitement. L'étape de pré-traitement inclut la implantation du modèle géométrique et affectation des propriétés physique de composants 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. Finalement, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement (Excel, Matlab...).

#### III.2.1 Modèle géométrique et description

Le domaine de travail a été modélisé par une boîte d'air (**Figure III.2**) qui englobe les 3 cales d'aluminium ainsi que le capteur en pot. Les dimensions de cette boîte sont choisies suffisamment grandes par rapport à celles de la plaque, de manière à ce que les conditions appliquées sur ses frontières n'altèrent pas la solution (méthode de troncature de l'infini).

La structure que nous avons à modéliser, présente une symétrie géométrique qui est aussi une symétrie électromagnétique. Le plan de symétrie est suivant l'axe x. Il contient l'inducteur et coupe la plaque de référence en deux.

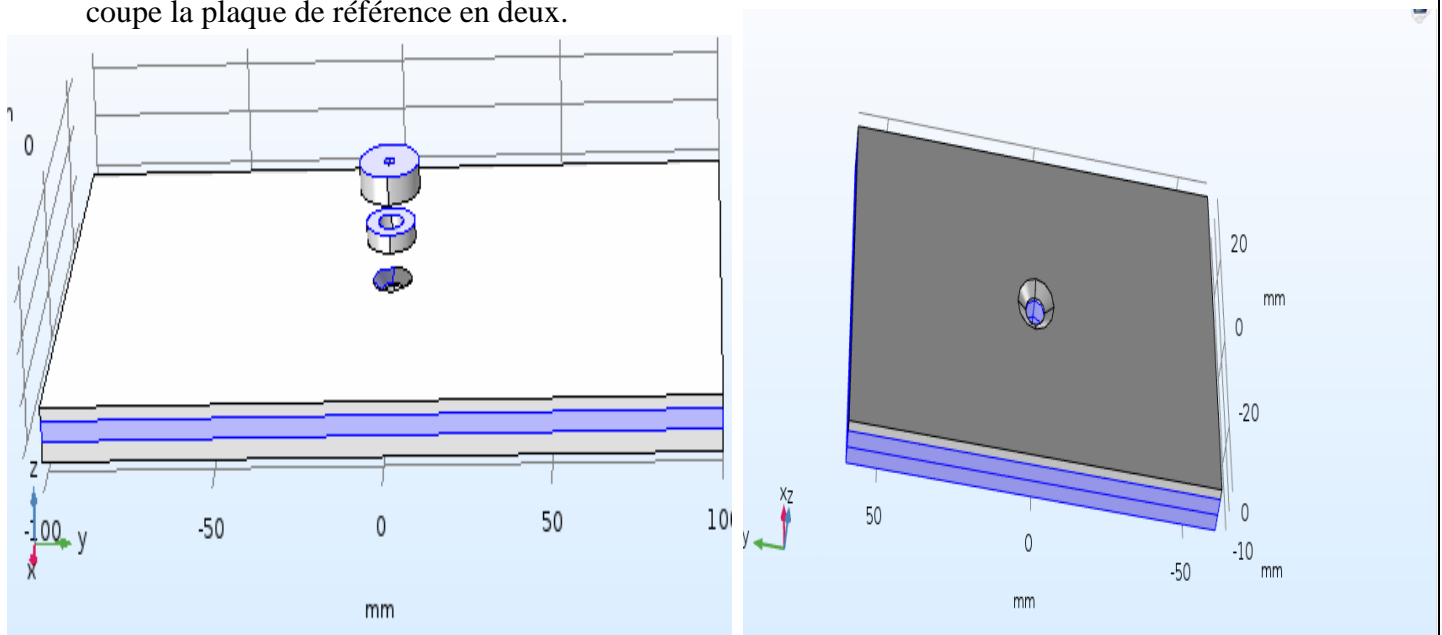


Figure III. 2 . Création du modèle trois couches avec alésage de rivet.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

### III.2.2 Caractéristiques géométriques et physiques

Les caractéristiques géométriques et physiques sont données par les tableaux III.1 .

**III.2 :Tableau III-1 caractéristiques géométriques et physiques**

<b>La plaque</b>			<b>Défaut</b>		<b>Domaine</b>	
<i>couche 1</i>	<i>Longueur (mm)</i>	200	<i>Longueur (mm)</i>	5	<i>Longueur (mm)</i>	3000
	<i>Largueur (mm)</i>	120				
	<i>Hauteur (mm)</i>	2.5				
	<i>Conductivité (s/m) Sigm</i>	17.10 <sup>6</sup>				
<i>couche 2</i>	<i>Longueur (mm)</i>	200	<i>Largueur (mm)</i>	0.21	<i>Largueur (mm)</i>	3000
	<i>Largueur (mm)</i>	120				
	<i>Hauteur (mm)</i>	4				
	<i>Conductivité (s/m) Sigm</i>	17.10 <sup>6</sup>				
<i>couche 3</i>	<i>Longueur (mm)</i>	200	<i>Hauteur (mm)</i>	2.5	<i>Hauteur (mm)</i>	500
	<i>Largueur (mm)</i>	120				
	<i>Hauteur (mm)</i>	4				
	<i>Conductivité (s/m) Sigm</i>	17.10 <sup>6</sup>				
<b>Bobine</b>			<b>Riveté</b>		<b>Pot en ferrite</b>	
<i>Hauteur (mm)</i>	3.46	<i>Hauteur cône (mm)</i>	1.88	<i>H (mm)</i>	5.33	
<i>Rayon externe (mm) r1B</i>	7.325	<i>Rayon (tête de rivet) (mm)</i>	6	<i>Rayon1 (mm)</i>	9	
<i>Rayon interne (mm) r2B</i>	3.74	<i>Rayon (corps de rivet) (mm)</i>	3.175	<i>Rayon2 (mm)</i>	7.49	
<i>nombre de spires</i>	926			<i>Rayon3 (mm)</i>	3.74	
<i>Lift –off (mm)</i>	2			<i>Rayon4 (mm)</i>	1.55	
<i>Conductivité <math>\sigma_B</math> (s/m)</i>	60.10 <sup>6</sup>	<i>Conductivité <math>\sigma_R</math> (s/m)</i>	1 .10 <sup>6</sup>	<i>Conductivité <math>\sigma_F</math> (Ms/m)</i>	1.10 <sup>-12</sup>	
<i>Intensité(A)</i>	0.8			<i>Perméabilité magnétique du vide (<math>\mu_0</math>)</i>	pi*4e-7	
<i>section bobine SB (m<sup>2</sup>)</i>	(r1B-r2B)*hau B/Ns			<i>D (mm)</i>	3.6	
<i>Fréquence [Hz]</i>	1.6.10 <sup>3</sup>			<i>D1 (mm)</i>	0	
				<i>d (mm)</i>	0 (mm)	

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

Le schéma et dimensions géométriques du capteur en pot de ferrite du capteur sont illustrés sur les figures suivantes:

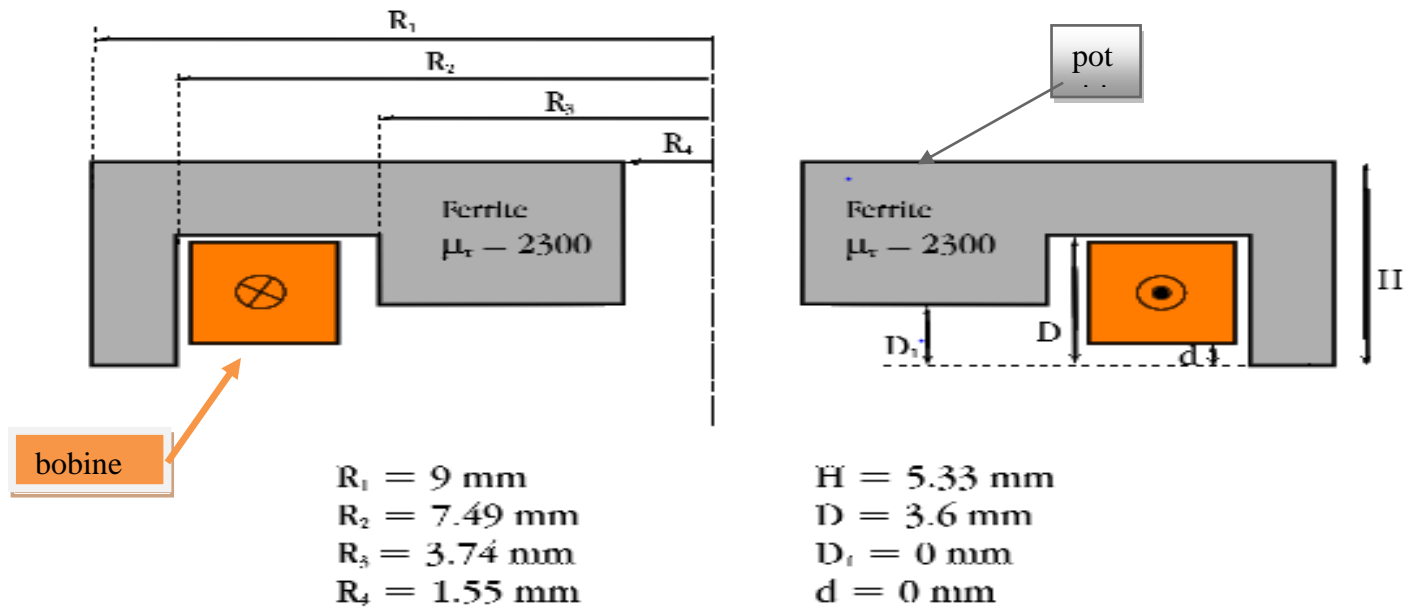


Figure III. 3 Paramètre du pot en ferrite du capteur. [3].

Les détails géométriques du rivet sont représentés sur la figure ci-dessous :

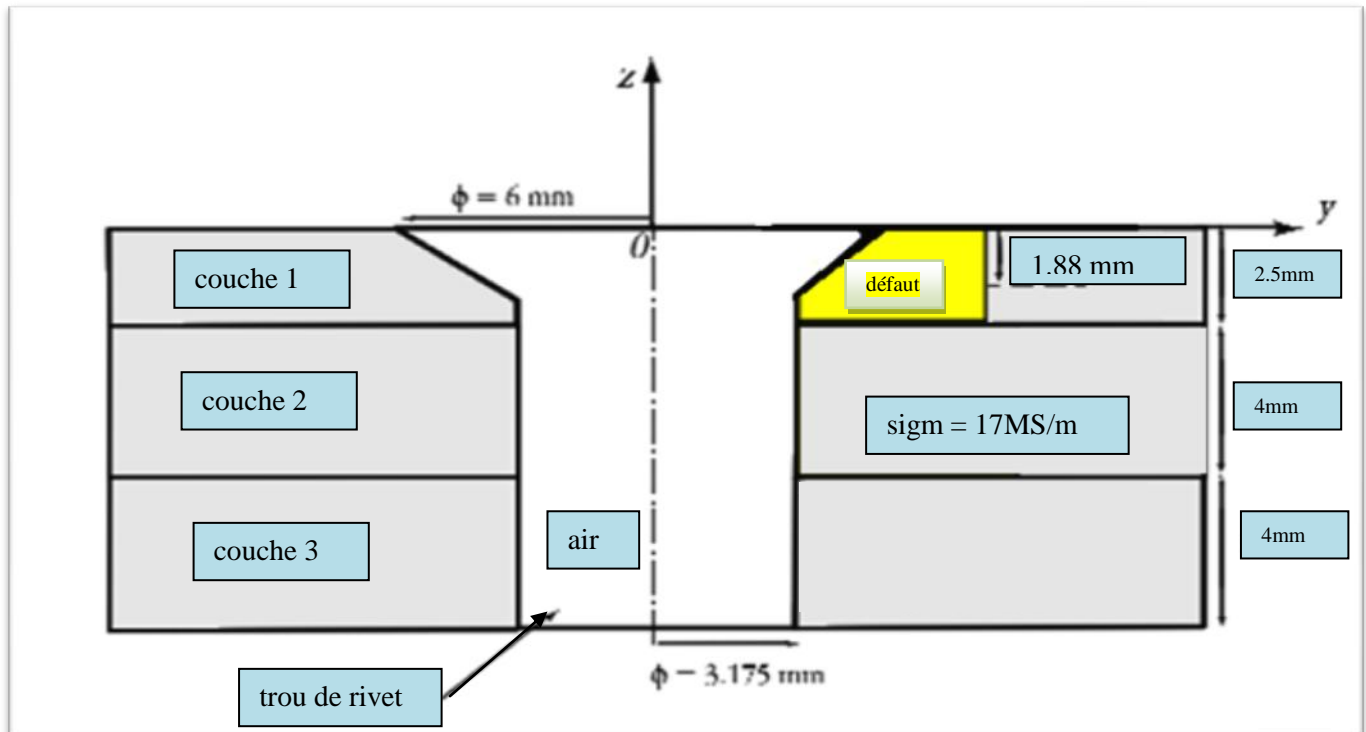


Figure III. 4 Empilement de trois couches d'aluminium riveté. [3].

### III.2.3 Vue 3D du modèle proposé

Les détails de la vue géométrique 3D du modèle proposé sont représentés sur la (Figure III.5)

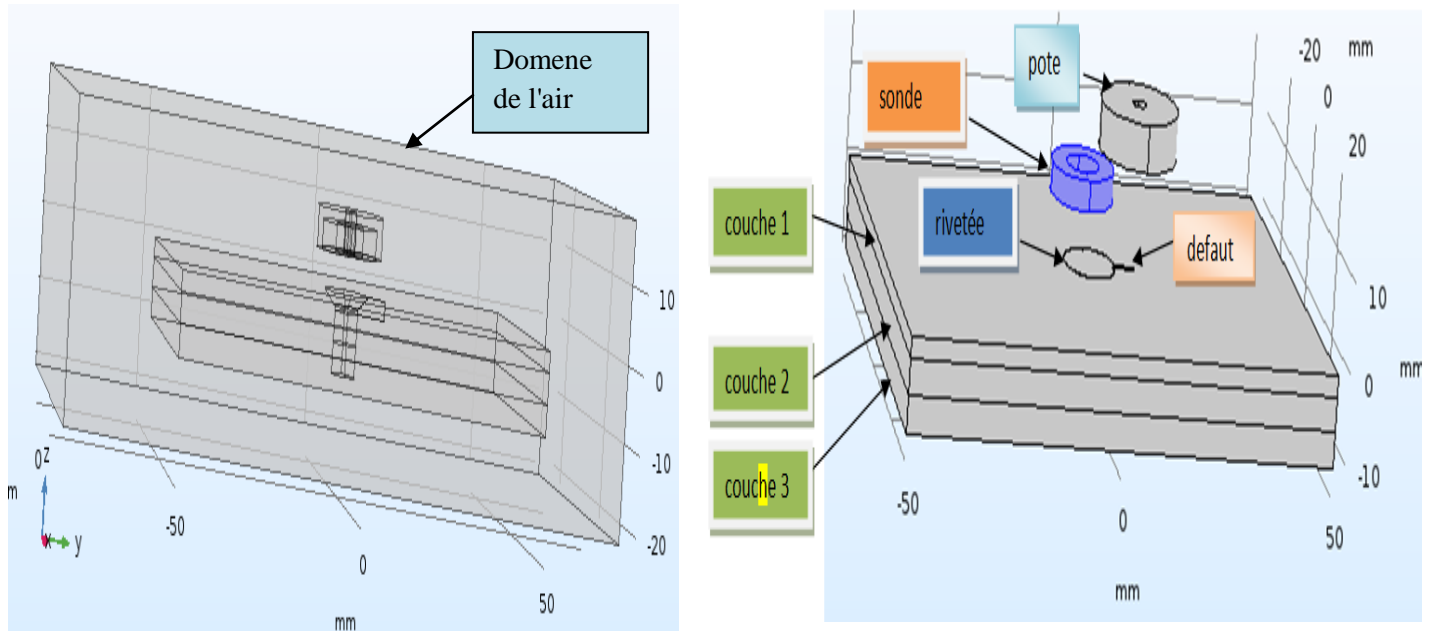


Figure III. 5 Vue 3D du modèle proposé.

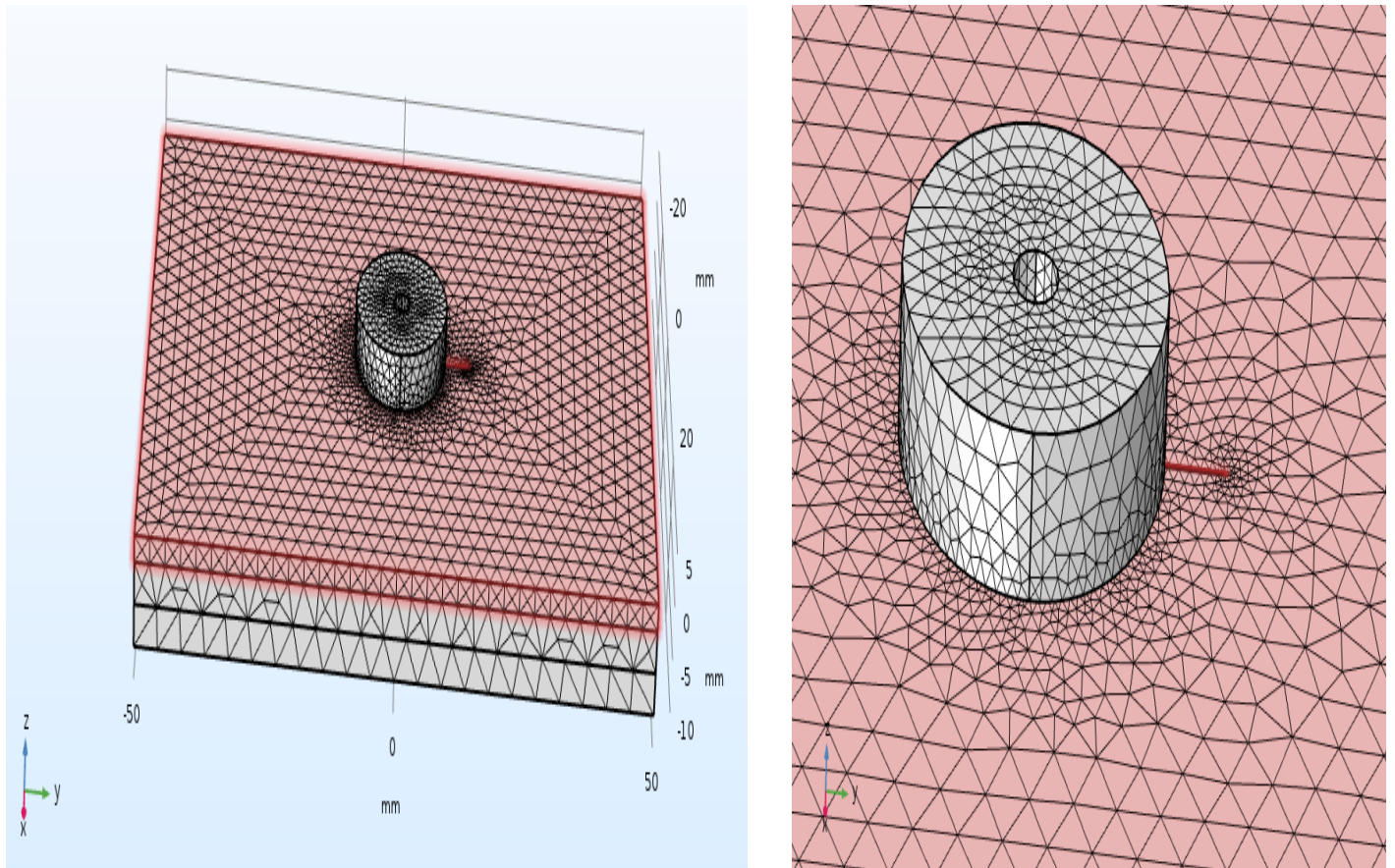
### III.2.4 Maillage du modèle propose

Chaque volume constituant le domaine d'étude doit être discrétisé avec des éléments géométriques qui forment un maillage sur les nœuds desquels les grandeurs physiques vont être déterminées numériquement. 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.

Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue. Afin de décrire correctement les évolutions des grandeurs d'intérêt, il est nécessaire d'adapter la taille des mailles au problème que nous avons à résoudre. La difficulté de cette étape consiste à harmoniser les maillages entre les différents domaines afin d'optimiser le temps de calcul et la précision de la résolution. Comme le montre (Figure III.6), le maillage est très affiné au niveau de la plaque (Figure III.6-b), tandis qu'il est grossier dans le reste du domaine d'étude.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

Le modèle complet est constitué de 6 domaines, le maillage complet consiste en 194266 éléments de domaine, 30310 éléments de frontière et 1592 éléments d'arête



a) Vue globale sans le domaine d'air

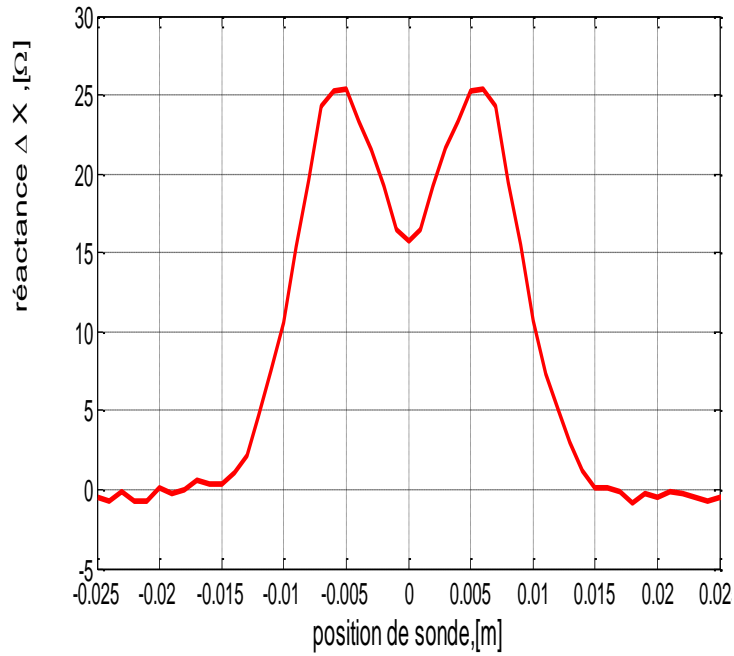
b) zoom sur la zone de la plaque.

**Figure III. 6: Maillage du modèle.**

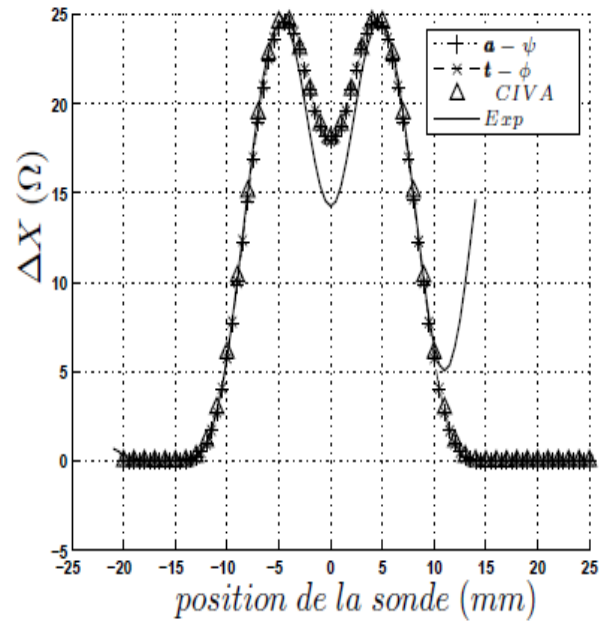
### III.2.5 Validation de modèle

La validation de notre modèle est faite par comparaison au modèle de [3]et (PAILLARD, 2008)  
La maquette utilisée est constituée d'un empilement de 3 plaques d'aluminium traversées par un trou cylindrique, qui correspond à l'alésage du rivet, le matériau n'est pas pris en considération.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

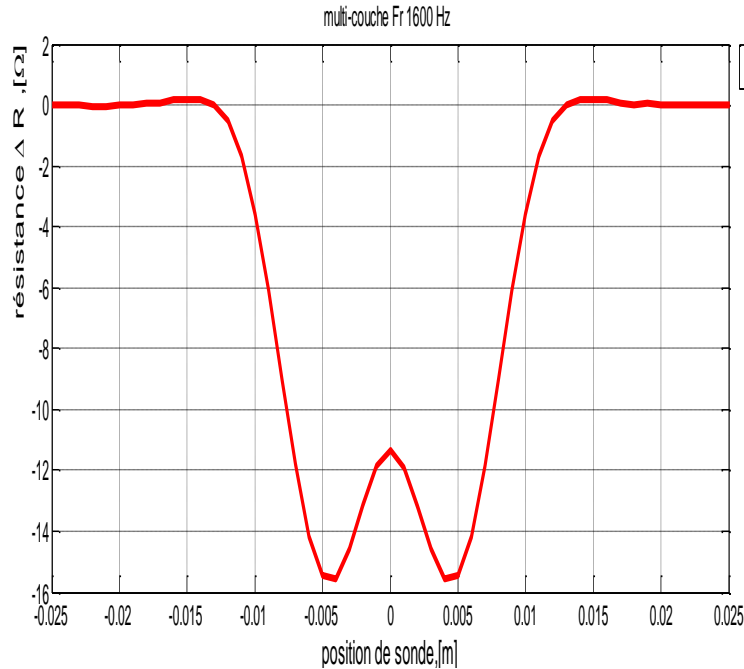


a) Modèle proposé

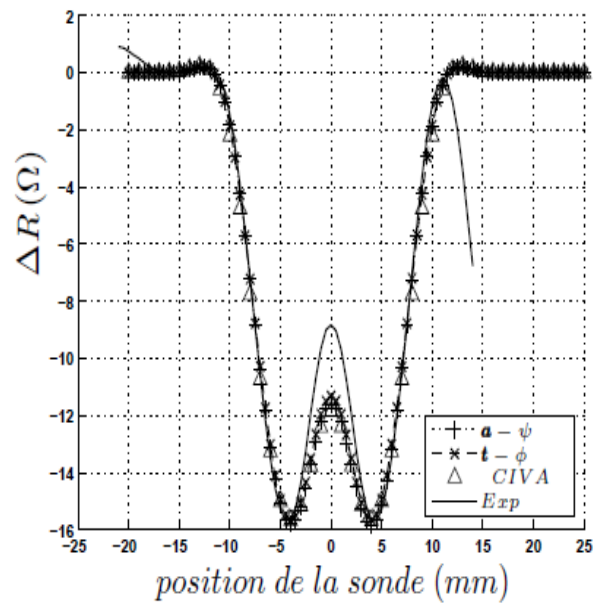


b) Modèle de Choua [3].

**Figure III. 7** Variation de réactance selon modèle proposé et modèle de Choua



a) Modèle proposé.



b) Modèle de Choua[3].

**Figure III. 8** Variation de résistance selon modèle proposé et modèle de Choua.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

D'après les Figures (III.7 et III.8), les résultats obtenus montrent une concordance acceptable, du point de vue forme et amplitude des signaux.

Ces validations nous permettent de bien entamé l'étape suivante pour la caractérisation et la mise en évidence de l'effet des fissures dans les différentes couches et de longueurs variables.

Résultats de simulations en 3D pour structure rivetées

### III.3 Résultats de simulations

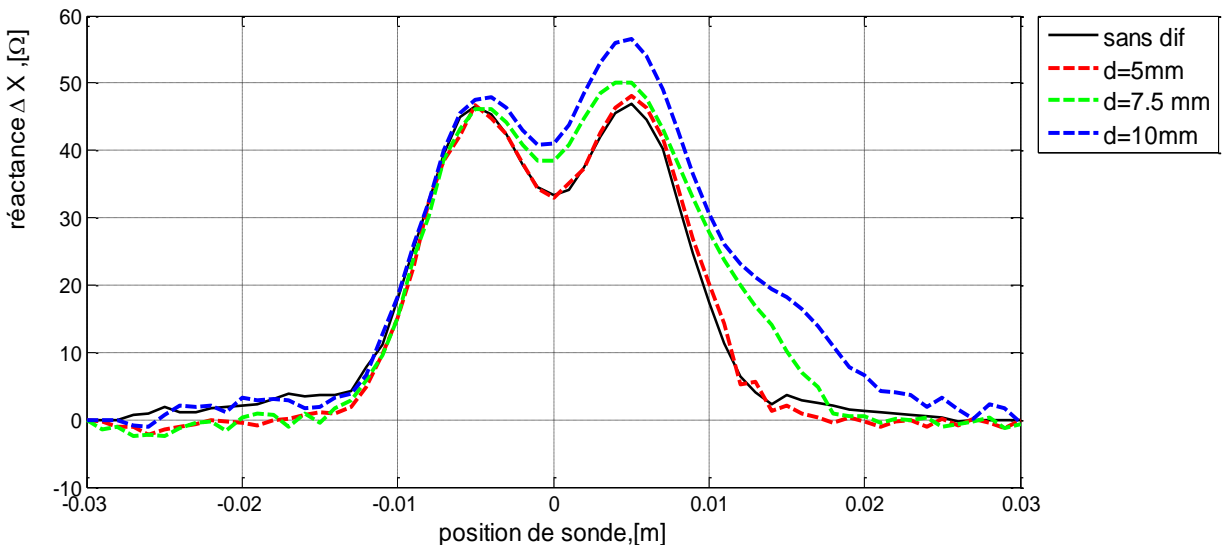
Les caractéristiques du modèle proposé sont ceux donnés sur les tableau III.1 III.2 avec en plus de la conductivité du rivet qui est  $1.7 \cdot 10^6$  S/m .

La hauteur des défaut est fixe et égale à la hauteur de la couche de pièce ou il se trouve , la largeur est de 0.1 mm, et les longueurs de défaut sont respectivement ; et on fait varier la longueur du défaut de telle qu'on aura des défauts supérieur, inférieur et égale au diamètre supérieur du rivet.

- ✓ 10 mm, 7.5 mm, et 5 mm,
- ✓ 2.8 mm, 1.4 mm, 0.7 mm et 0.4 mm

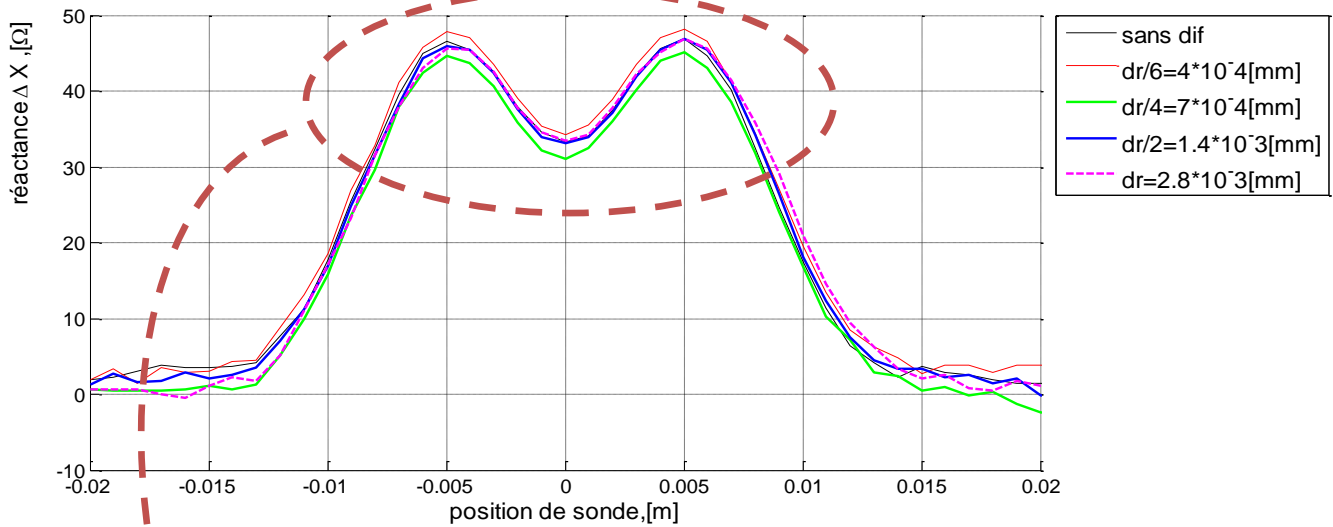
#### III.3.1 Résultats de simulation pour la couche 1

##### III.3.1.1 Diagrammes de variation de résistance et de réactance

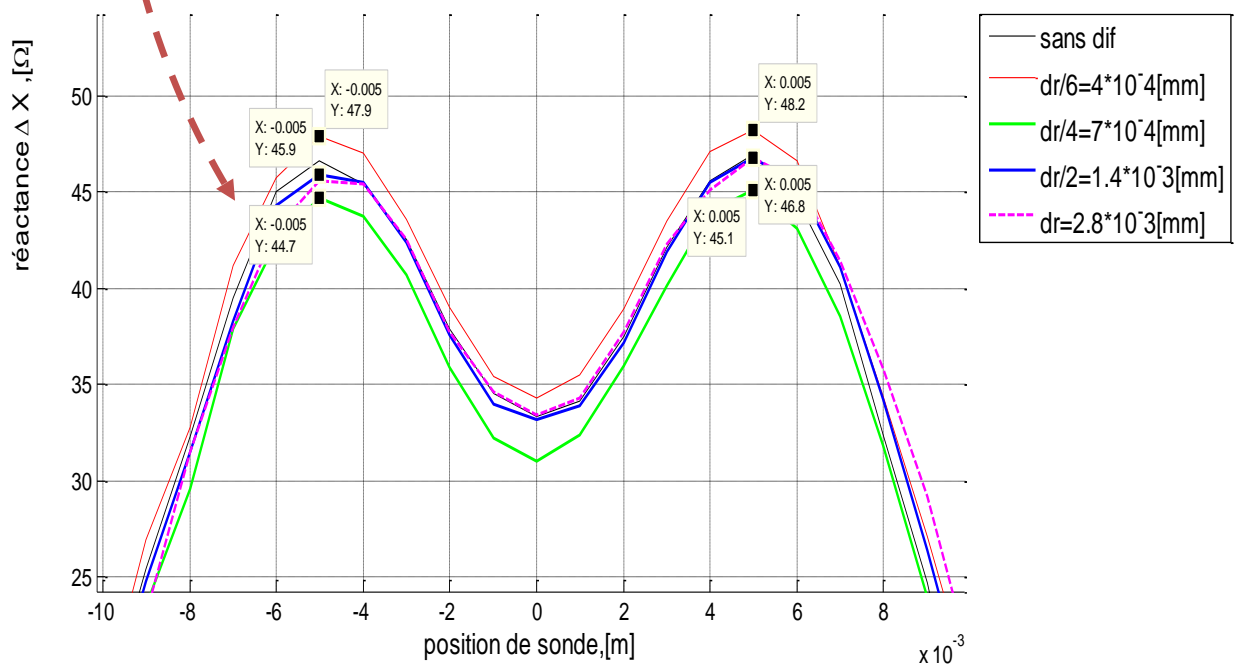


**Figure III. 9 .Variation de  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 1, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche



**Figure III. 10 .Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**



**Figure III. 11 .Zoom de  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

Les figures (III.9 à III.11) représentent la variation de la réactance en fonction de sonde dans la couche 1. On remarque que la variation est plus importante pour les défauts dont la longueur du défaut est supérieure à la tête du rivet, par contre on doit passer par un zoom pour voir la différence pour les défauts inférieur à la tête de rivet.

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

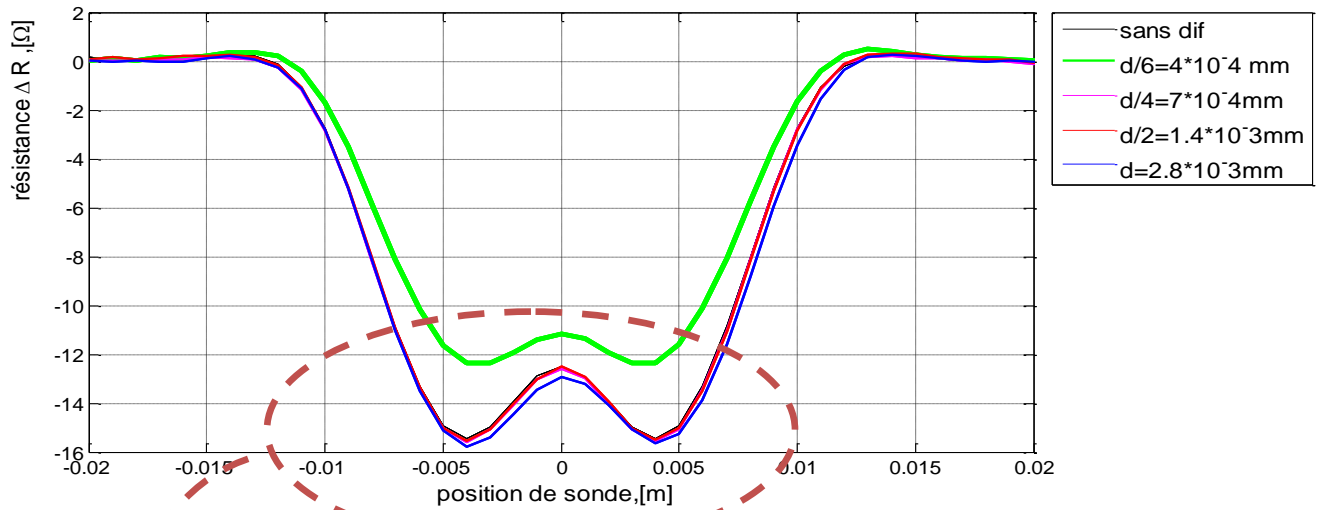


Figure III. 12 Variation  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

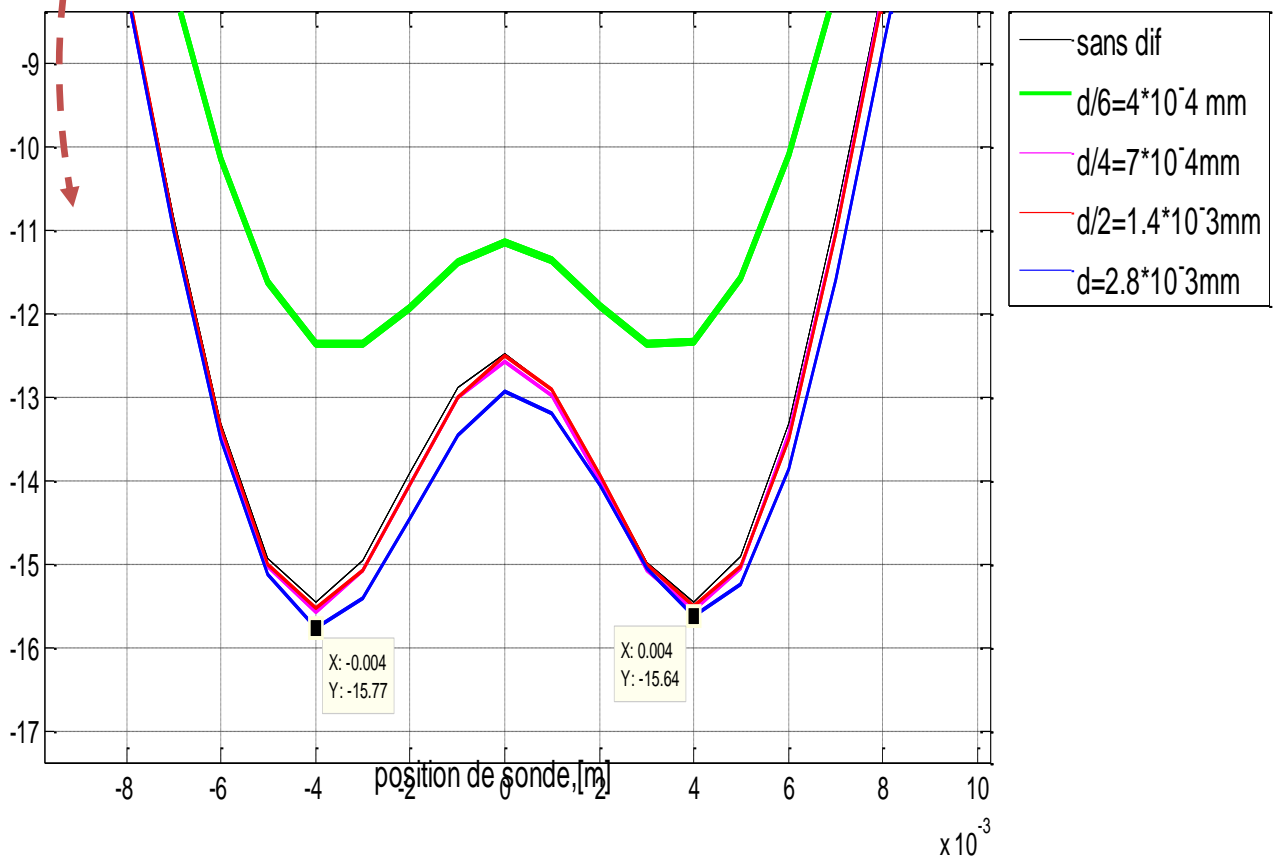
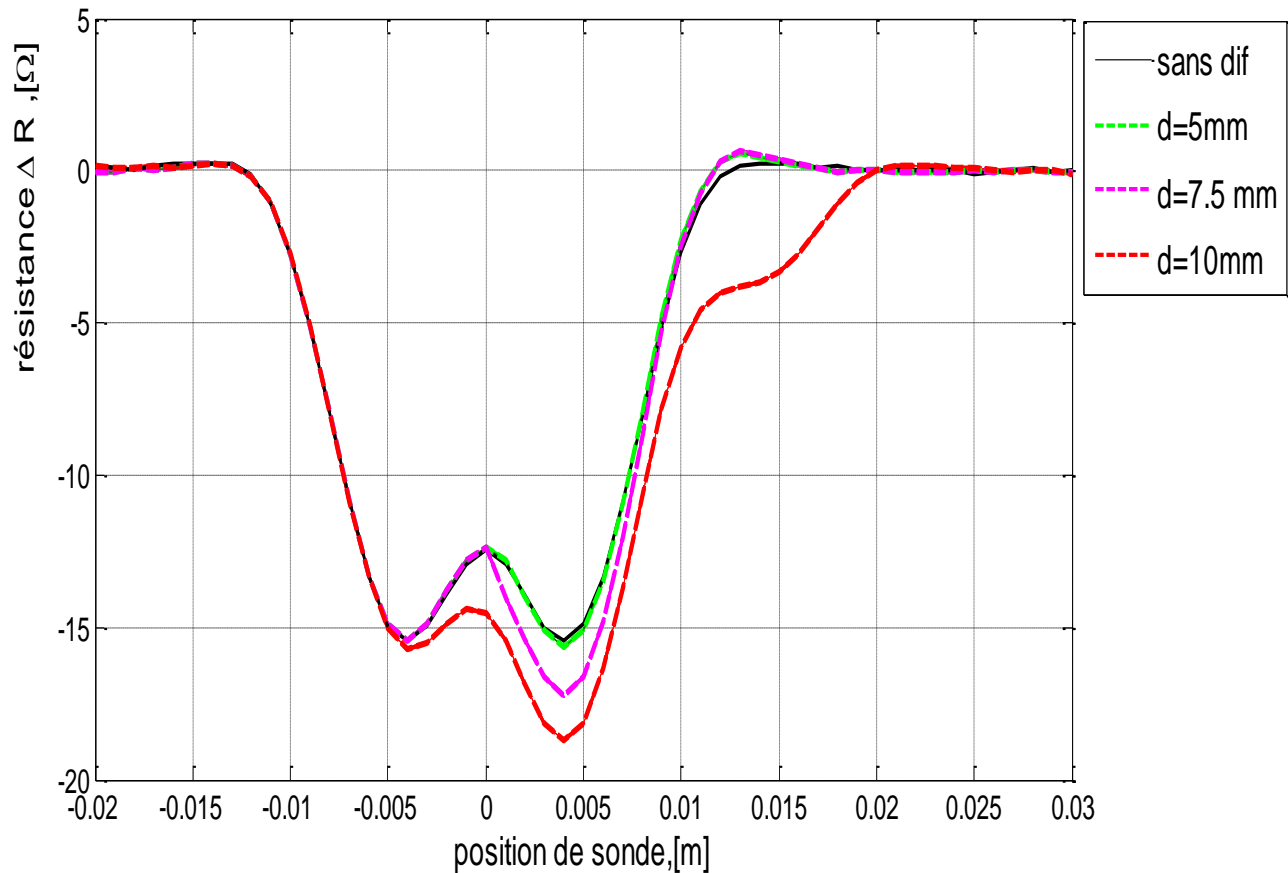


Figure III. 13 .Zoom de Variation  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.



**Figure III. 14 . Variation de  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 1, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

Les figures (III.12 a III.14) illustrent la variation de résistance en fonction de position de sonde dans la couche 1. la variation elle très nette pour les défauts dont la longueur est supérieur à la tête de rivet, elle est un peu moins visible pour le cas contraire , ce qui évident car on a d'une part des longueurs très faibles et d'autre parts ils son cachés par la tête du rivet (système non homogène)

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

## III.3.1.2 Diagramme de phase

Le diagramme de phase des défauts dans la première couche est donné par les figures suivantes :

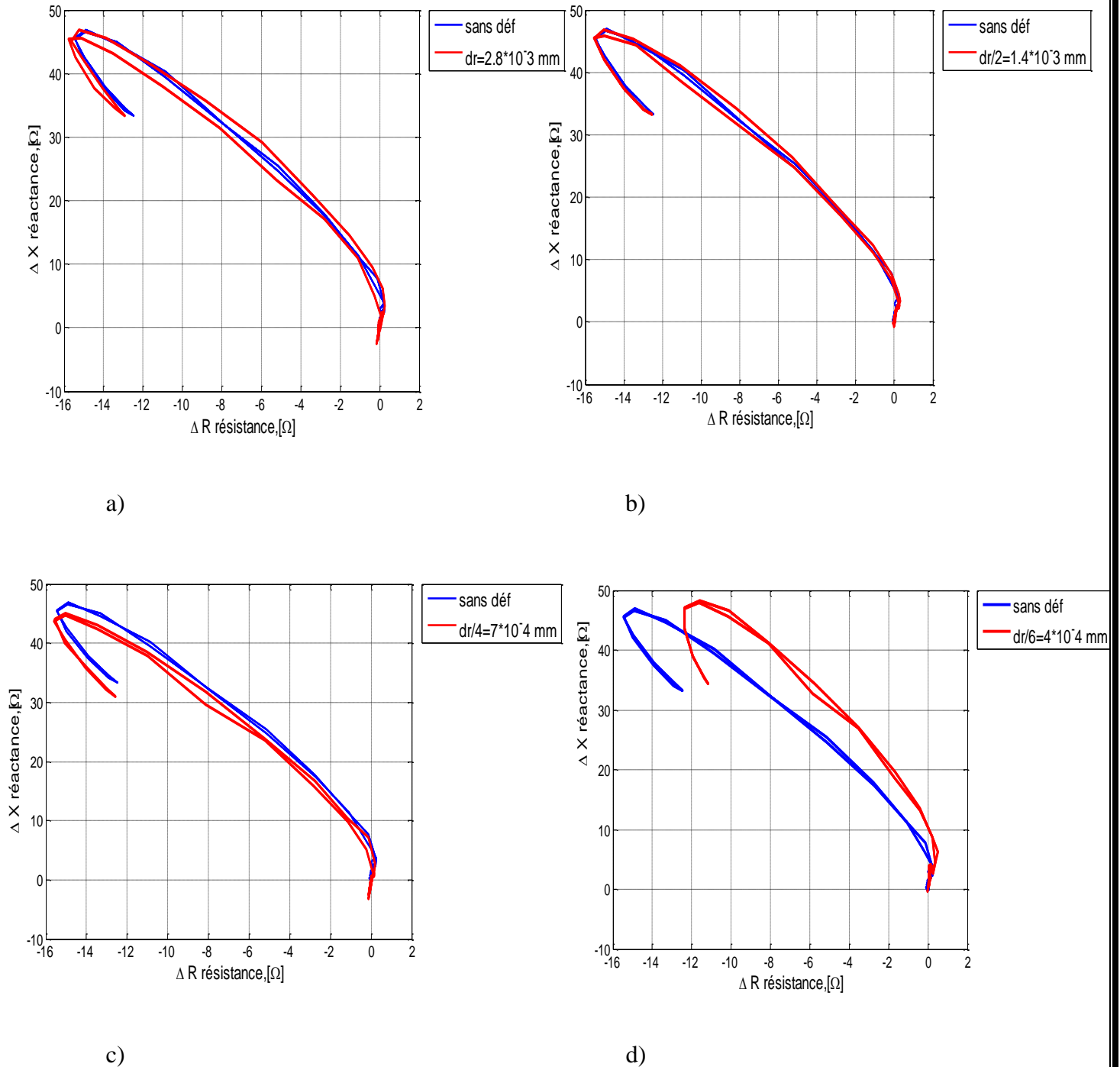
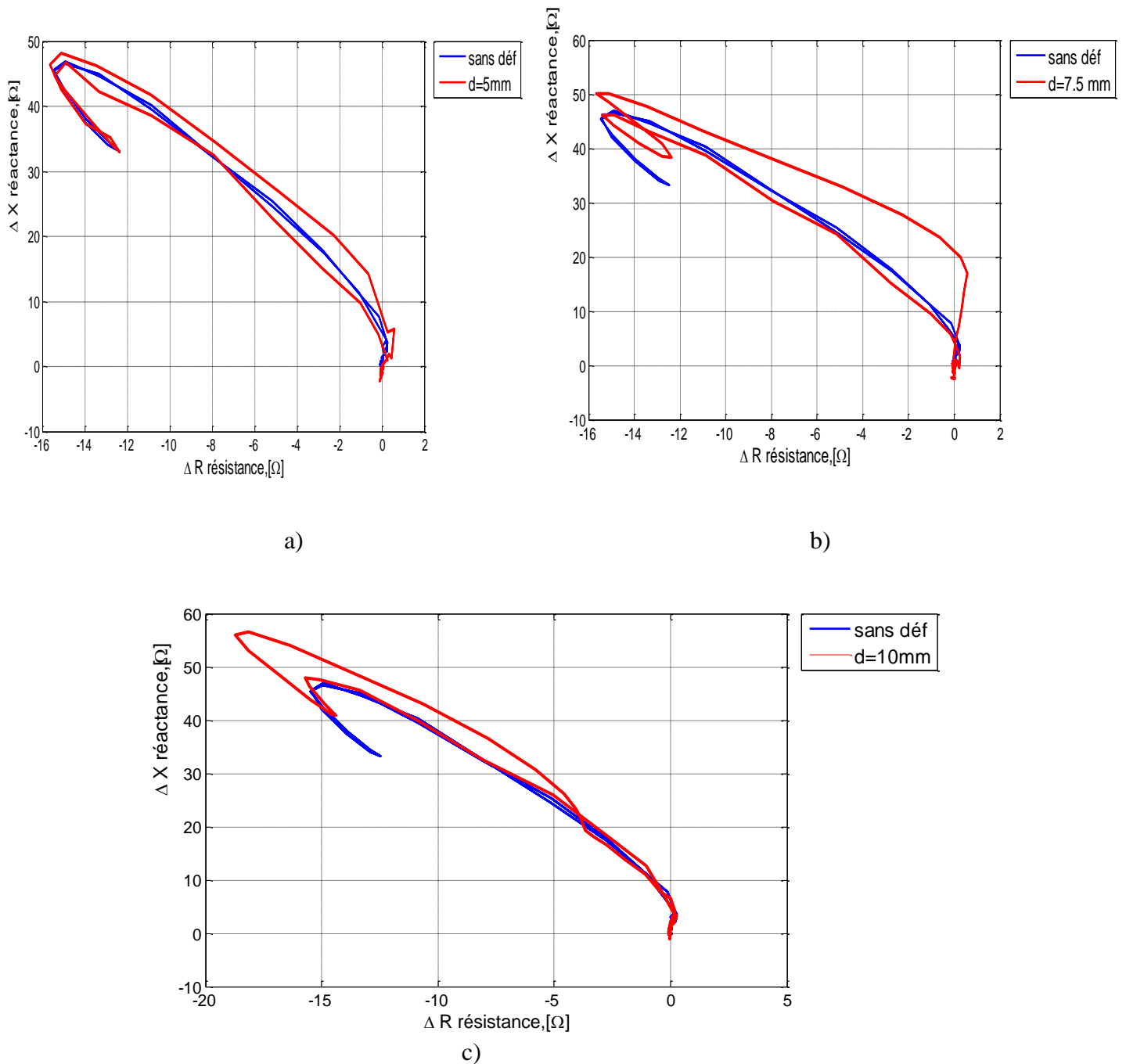


Figure III. 15 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$  dans la première couche. (Couche 1, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.



**Figure III. 16 . Diagramme de phase  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$ .  
(Couche 1, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

La Figure (III.15 et III.16), montrent les signaux des diagrammes de phases des variations de la réactance (partie imaginaire  $\Delta X$ ) en fonction des variations de la résistance (partie réelle  $\Delta R$ ), On remarque qu'ils sont proportionnels aux longueurs des défauts. Il y a différence d'amplitude et de phase, elle est plus importante pour les défauts de longueur considérable,

III.3.2 Résultats de simulation pour la couche 2

III.3.2.1 Diagramme de variation de résistance et de réactance

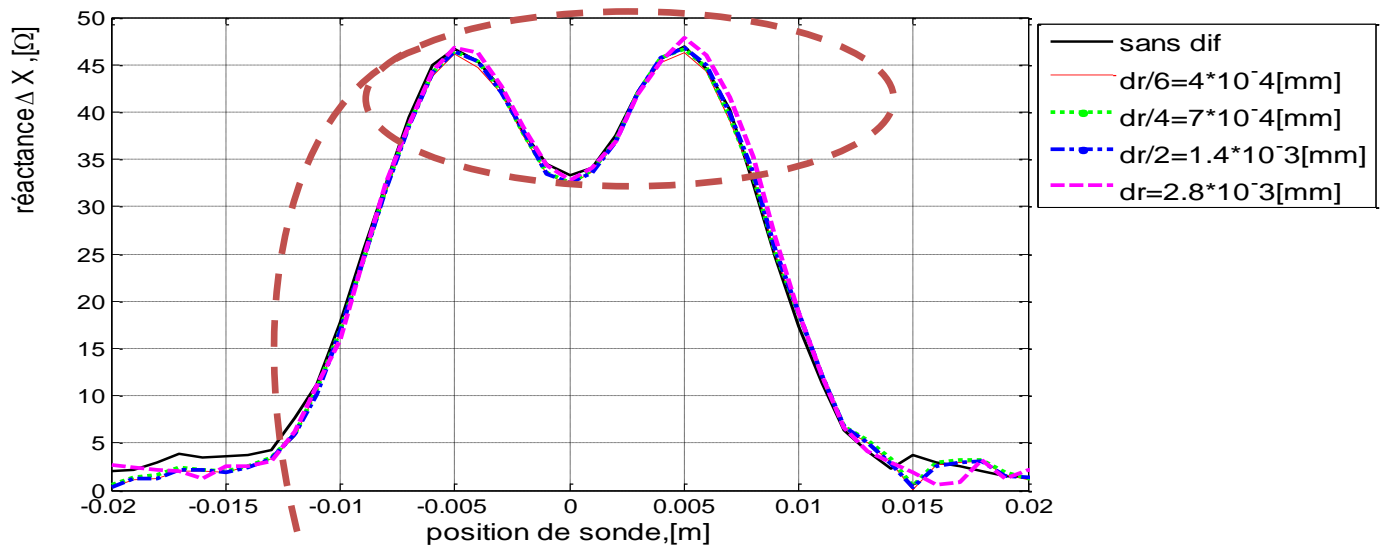


Figure III. 17 . Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

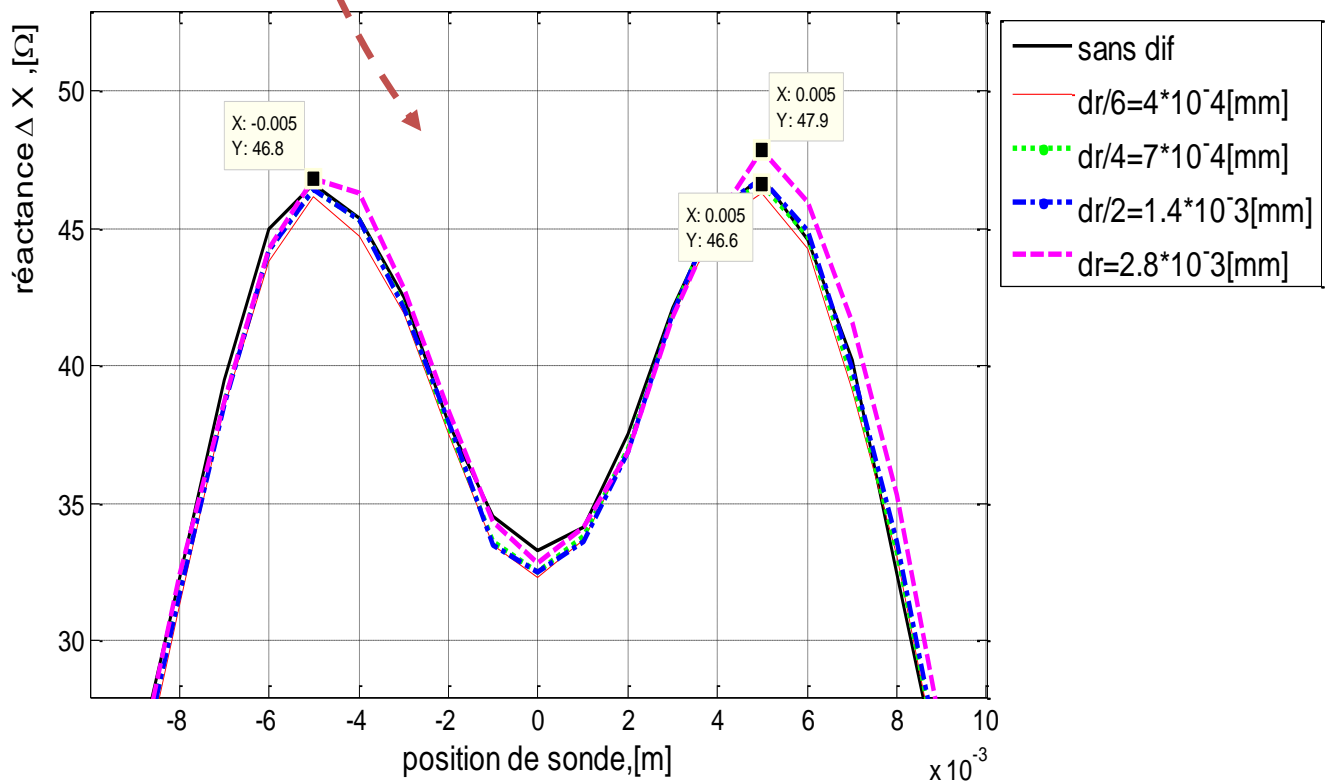


Figure III. 18 .Zoom Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

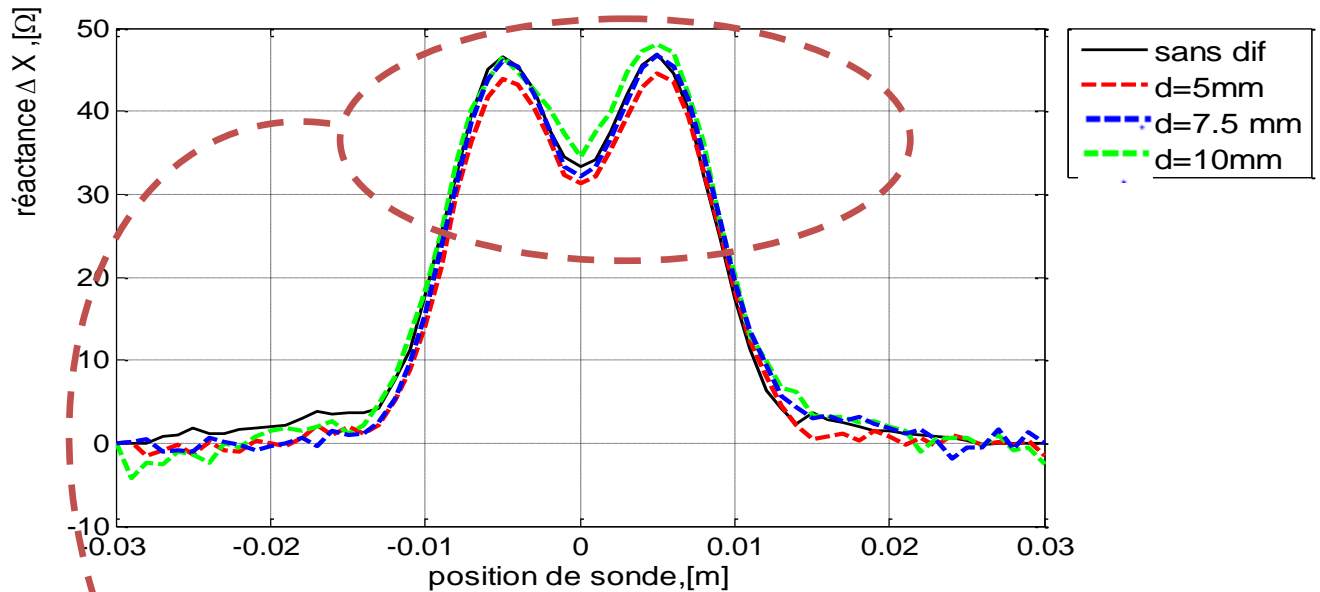


Figure III. 19 .. Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

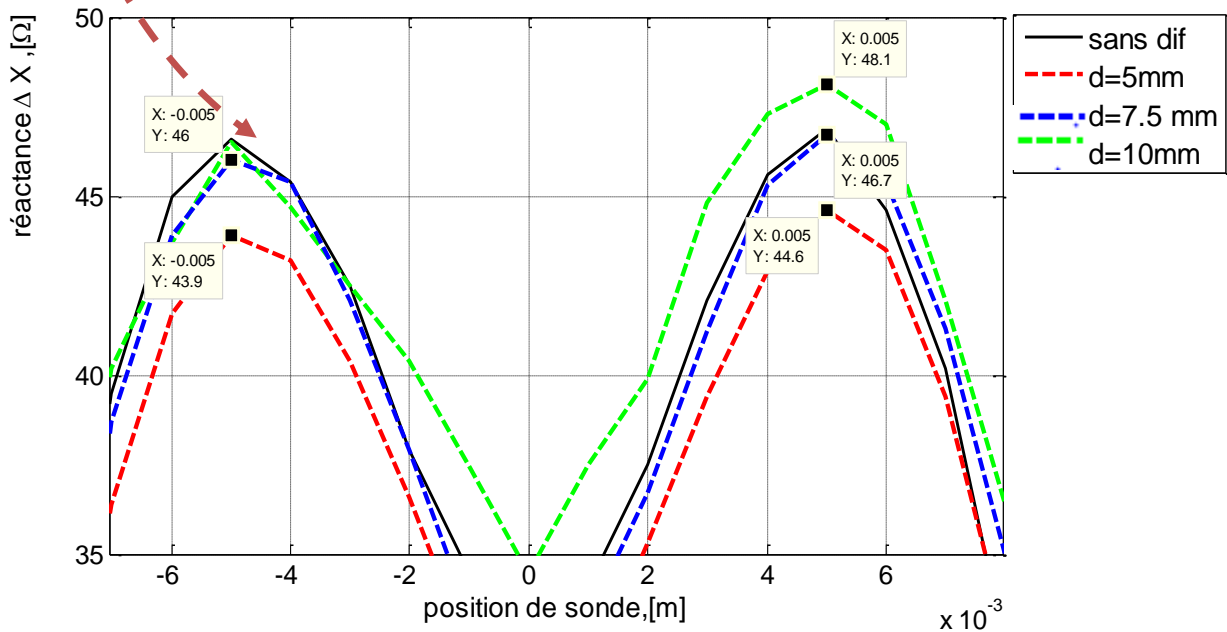


Figure III. 20 .Zoom Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

Les figures (III.17 à III.24) représentent la variation de la réactance et de la résistance en fonction de sonde pour différentes longueurs de défaut dans la couche 2. On remarque qu'il y a diminution de sensibilité de la détection par rapport au cas précédent, défaut dans couche 1, avec toujours une détection plus nette pour les défauts de longueurs supérieurs à la tête du rivet.

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

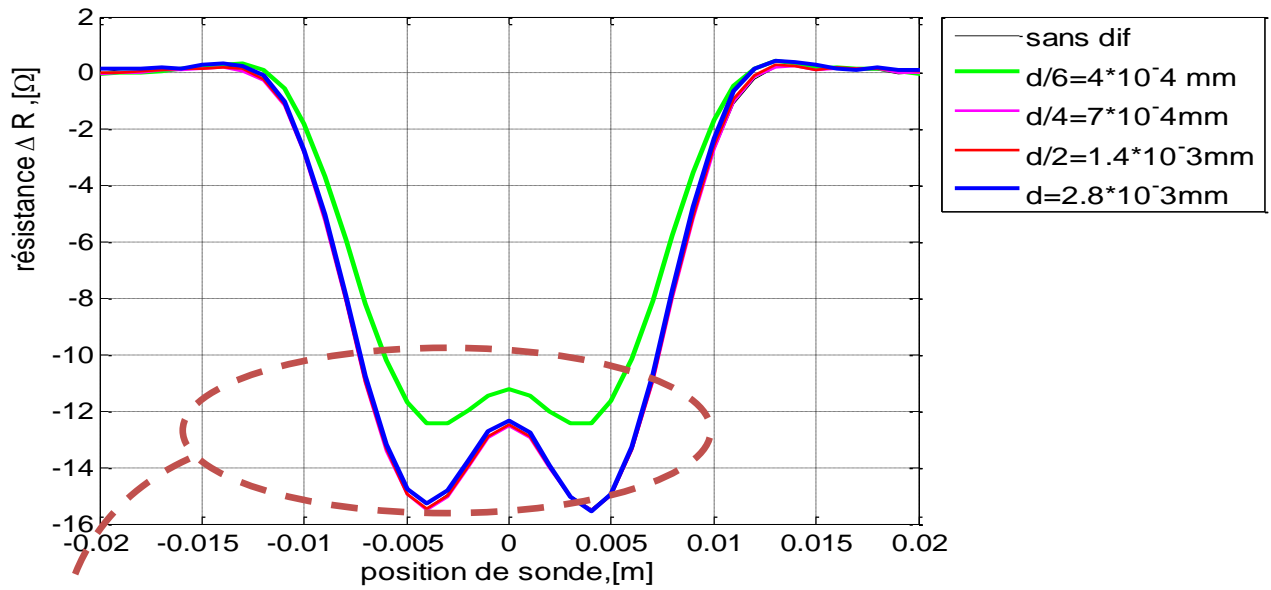


Figure III. 21 Variation  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

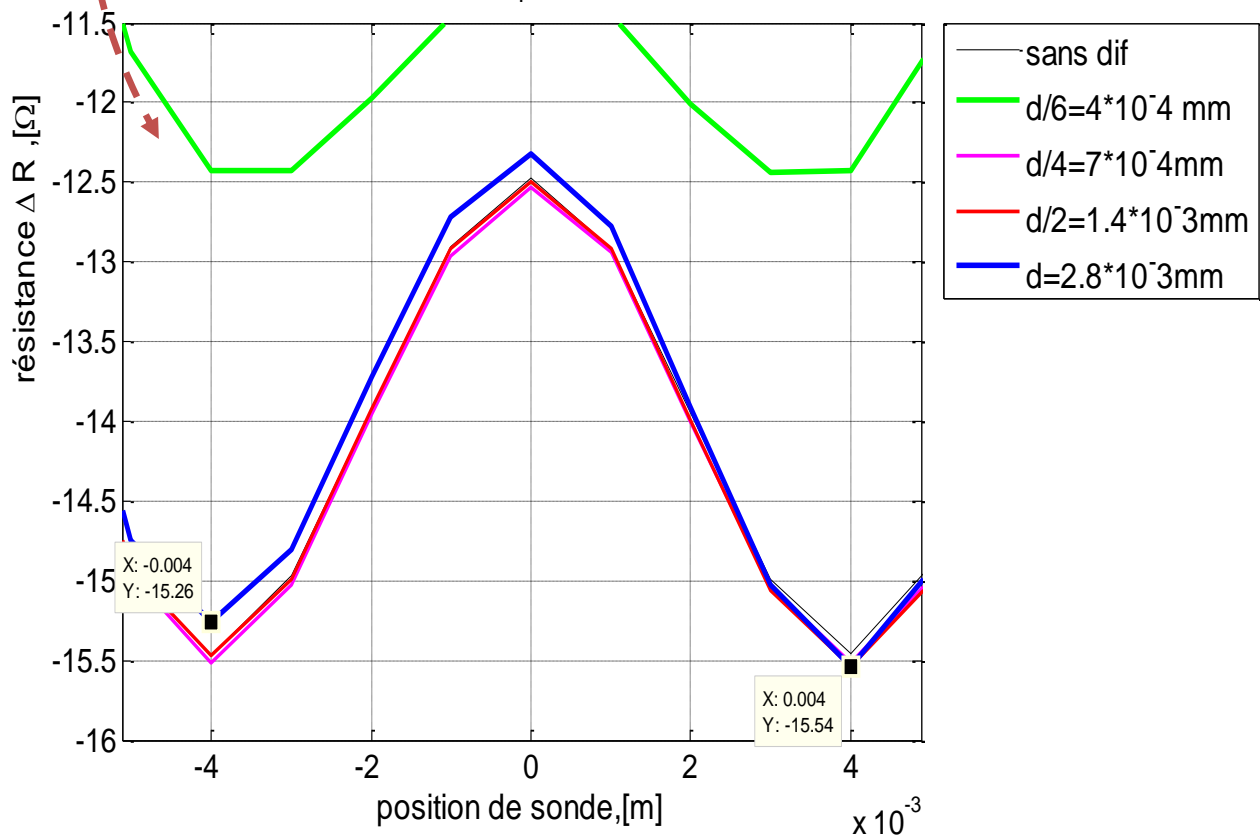
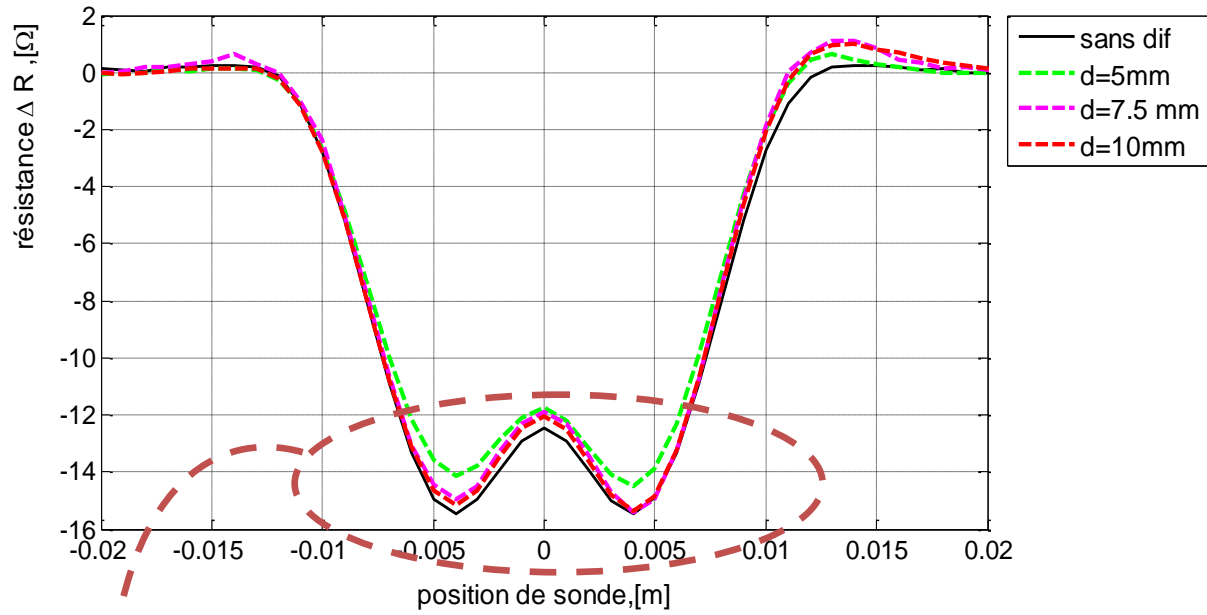
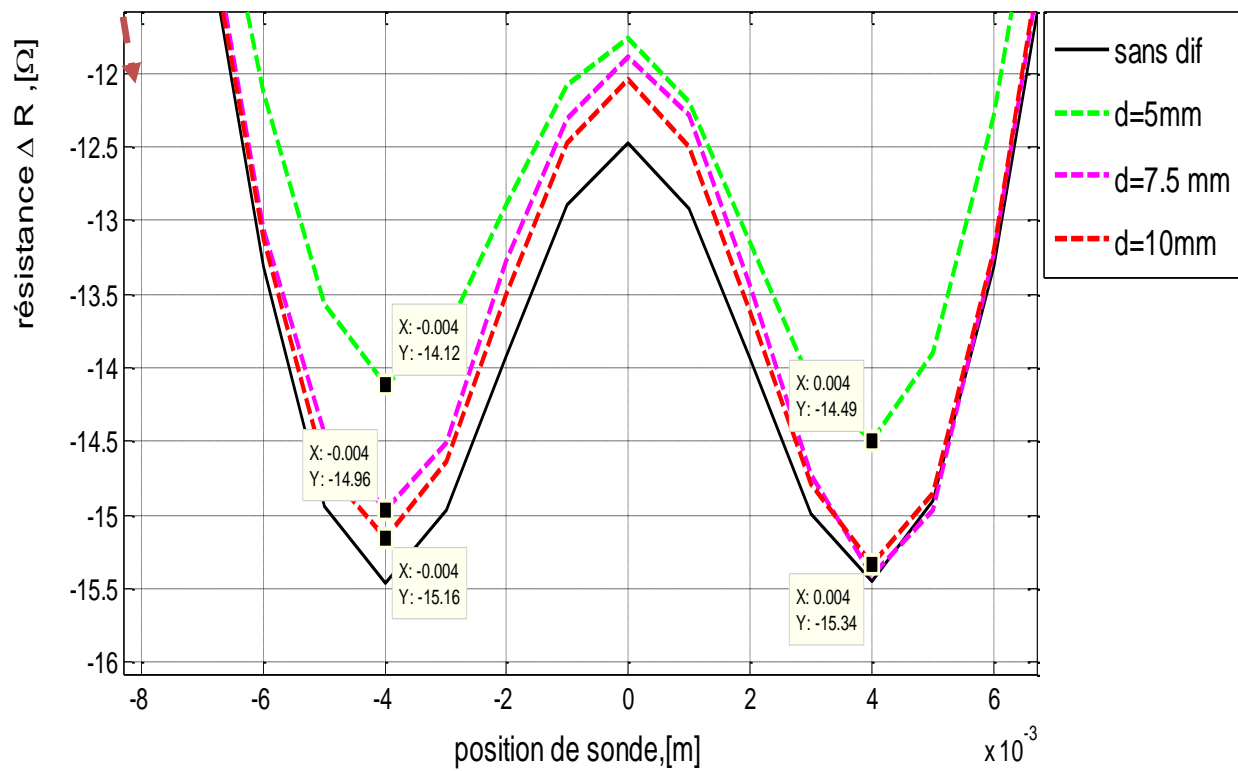


Figure III. 22 .Zoom de Variation  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.



**Figure III. 23 . Variation de  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

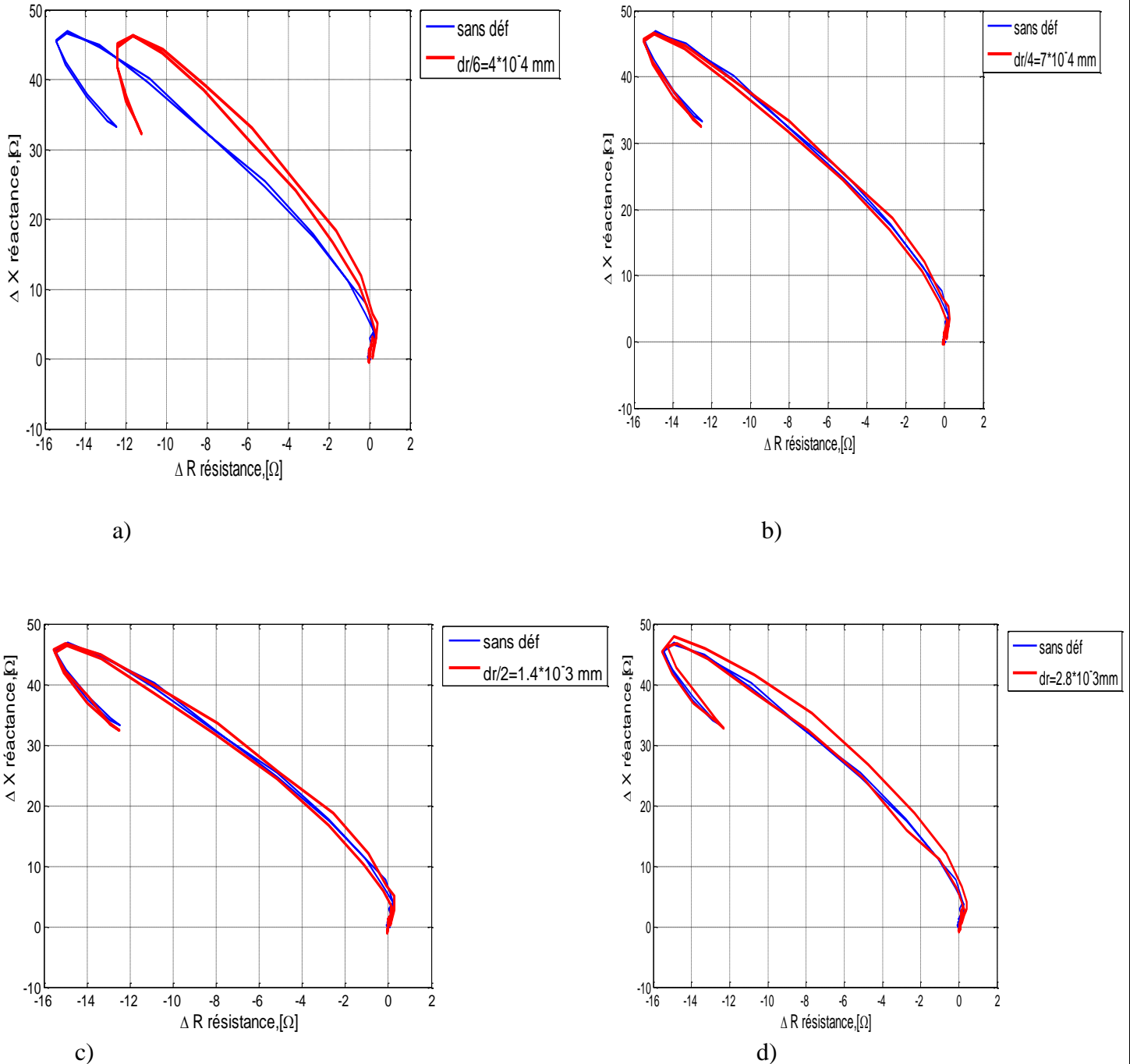


**Figure III. 24 .Zoom de Variation de  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

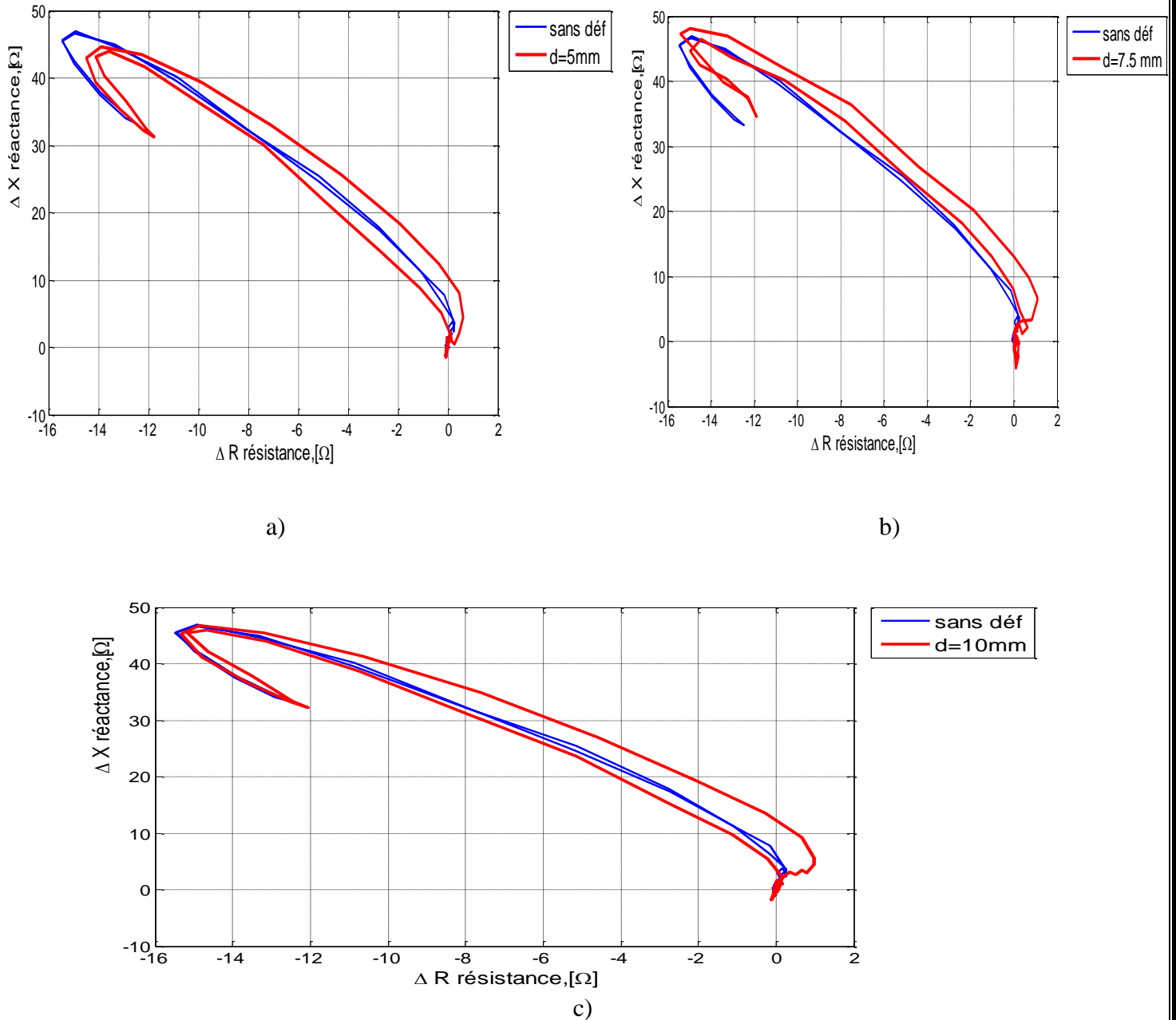
## III.3.2.2 Diagramme de phase

Le diagramme de phase des défauts dans la deuxième couche est donné par les figures suivantes



**Figure III. 25 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$  dans la deuxième couche. (Couche 2, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches



**Figure III. 26 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$  dans la deuxième couche. (Couche 2, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

Les Figures (III.25 et III.26), montrent les signaux des diagrammes de phases des variations de la réactance (partie imaginaire  $\Delta X$ ) en fonction des variations de la résistance (partie réelle  $\Delta R$ ). On remarque que qu'ils sont proportionnelle aux longueurs des différents défauts.

## III.3.3 Résultats de simulation pour la couche 3

### III.3.3.1 Diagramme de variation de résistance et de réactance

a) Pour une de fréquence 1600Hz.

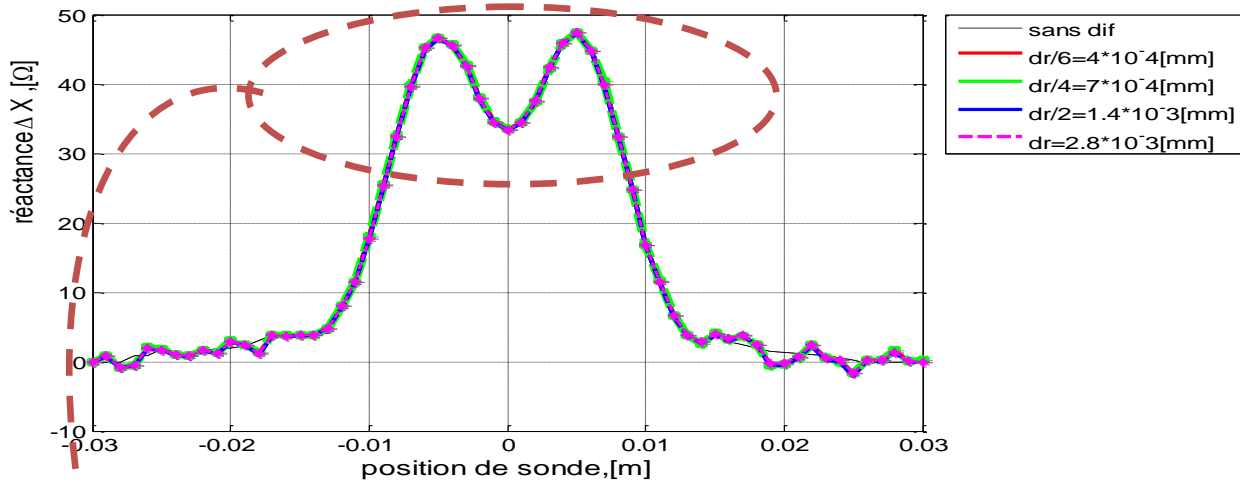


Figure III. 27 . Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

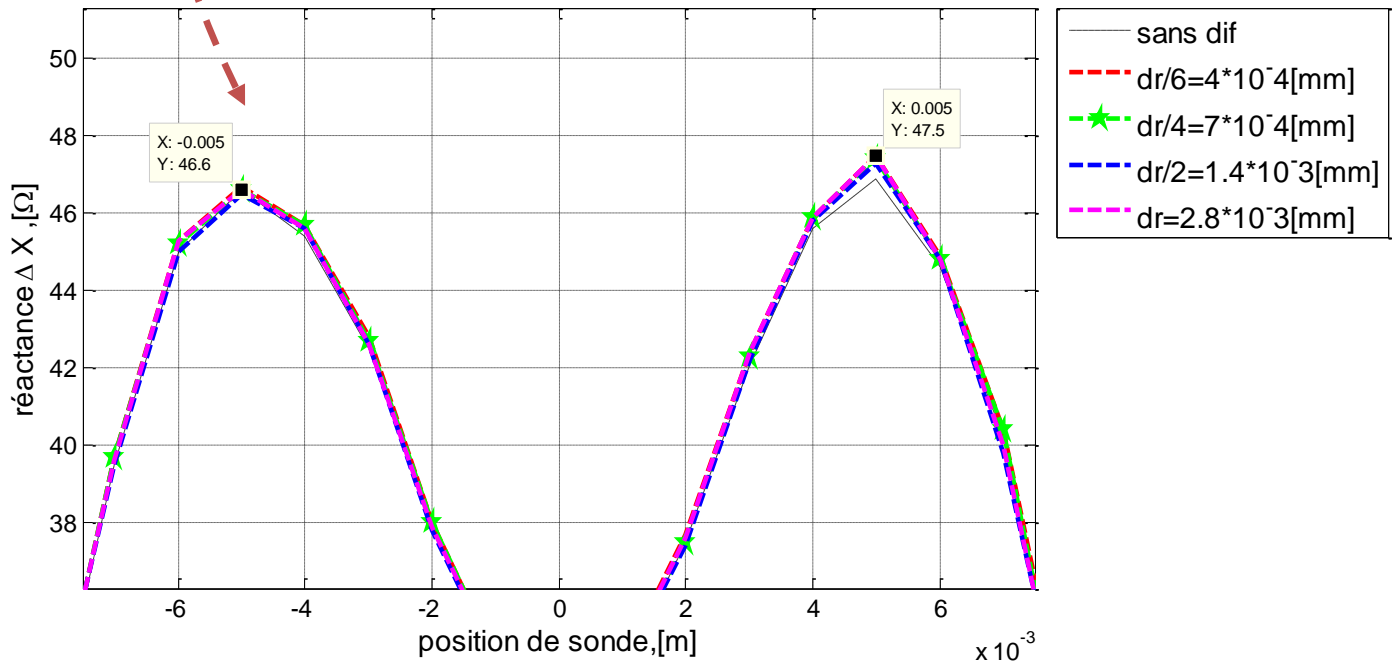
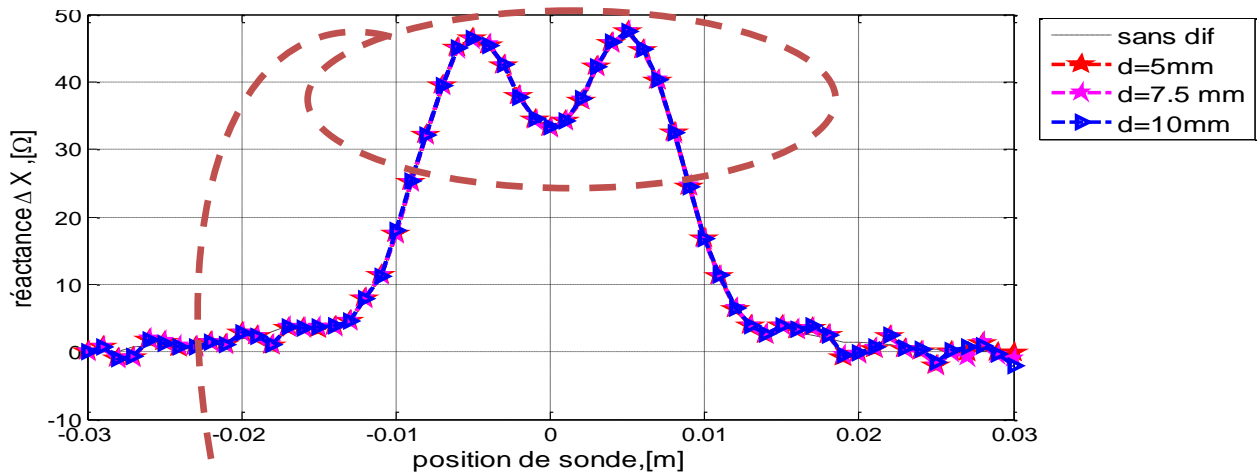
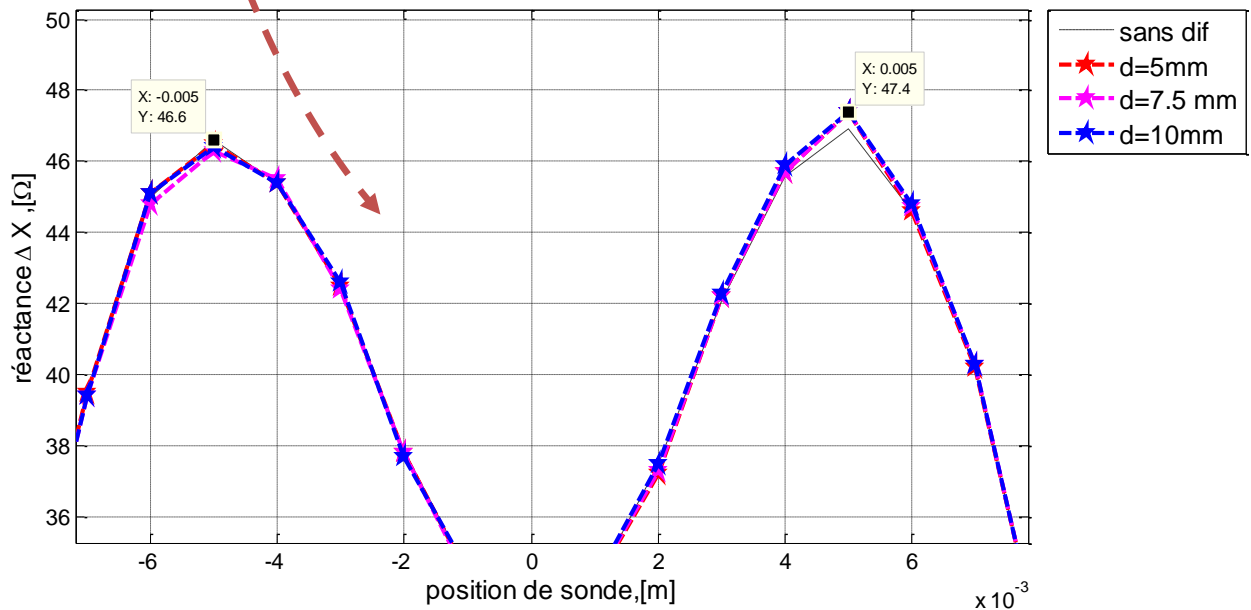


Figure III. 28 . Zoom de Variation de  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.



**Figure III. 29 . Variation de  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**



**Figure III. 30 . Zoom de Variation de  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

Les figures (III.27 a III.30) représentent la variation de la réactance en fonction du déplacement de la sonde pour les différents défauts se trouvant dans la couche 3. On remarque que la sensibilité de la détection à diminuer car on ne distingue pas l'effet des défauts, il y a uniquement l'effet de l'alésage du rivet. la sensibilité dépend de l'éloignement des défauts par rapport au capteur.

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

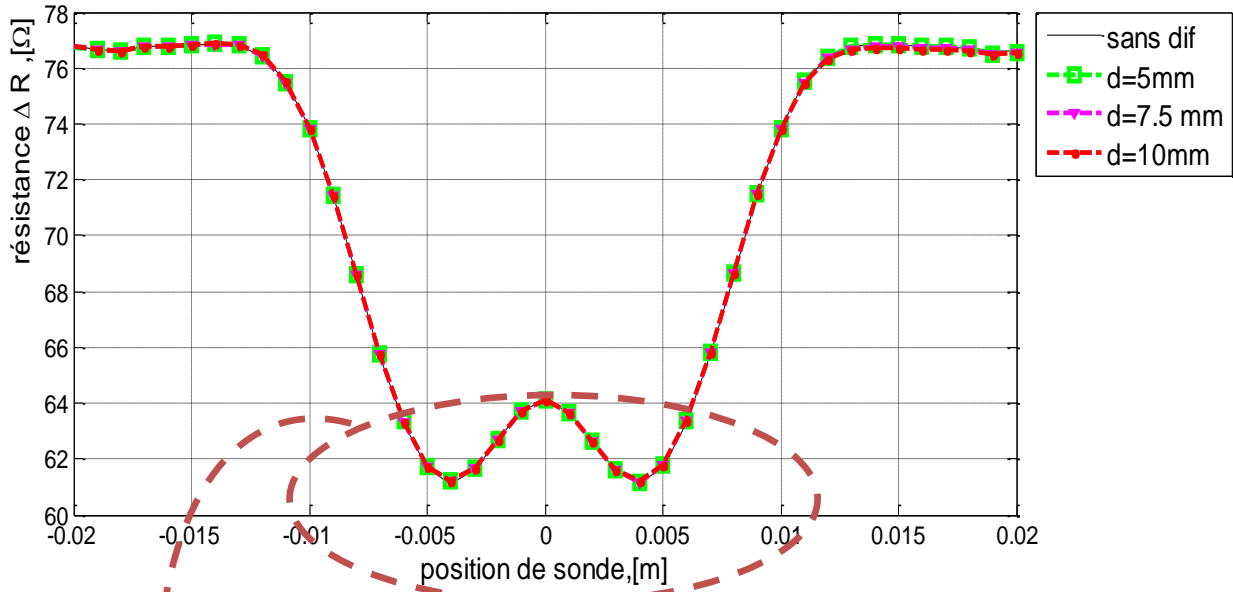


Figure III. 30 Variation  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

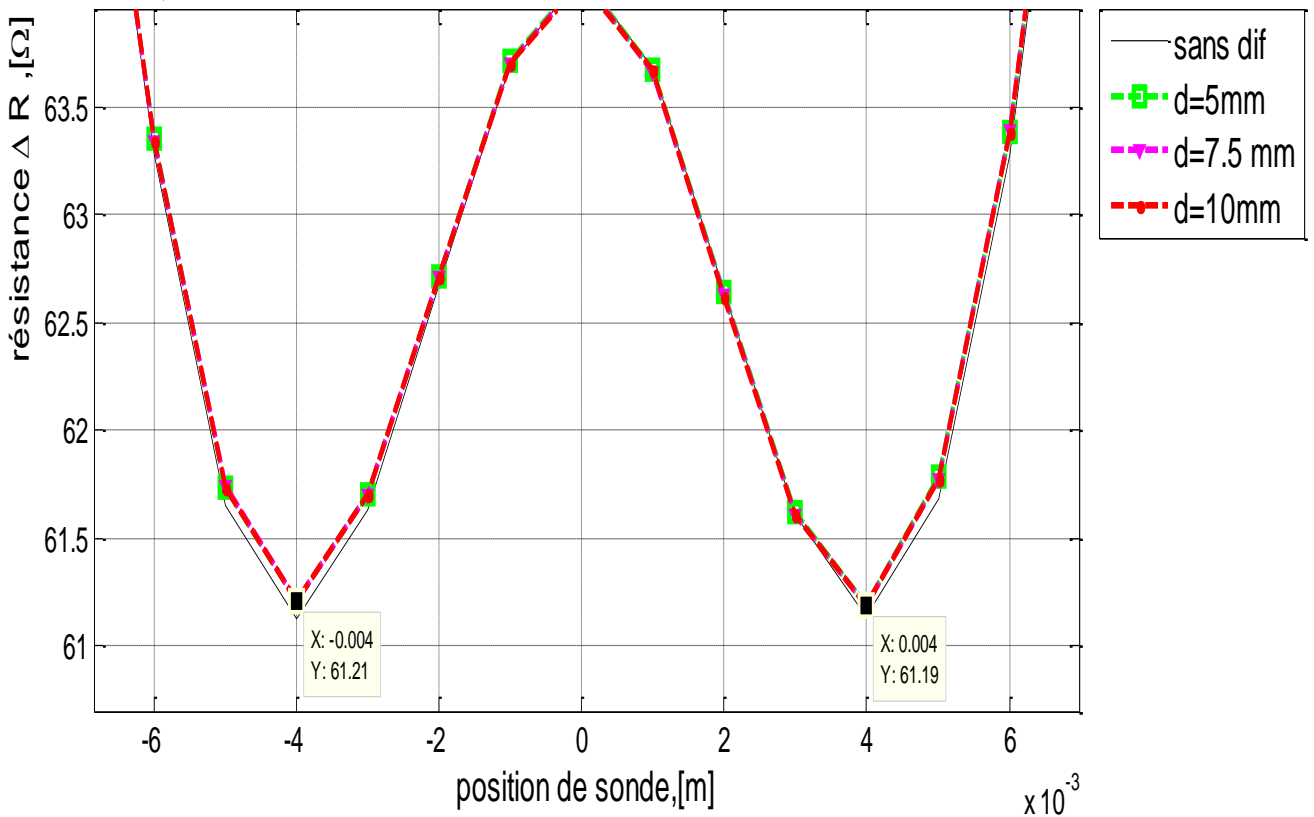


Figure III. 32 . Zoom de Variation de  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

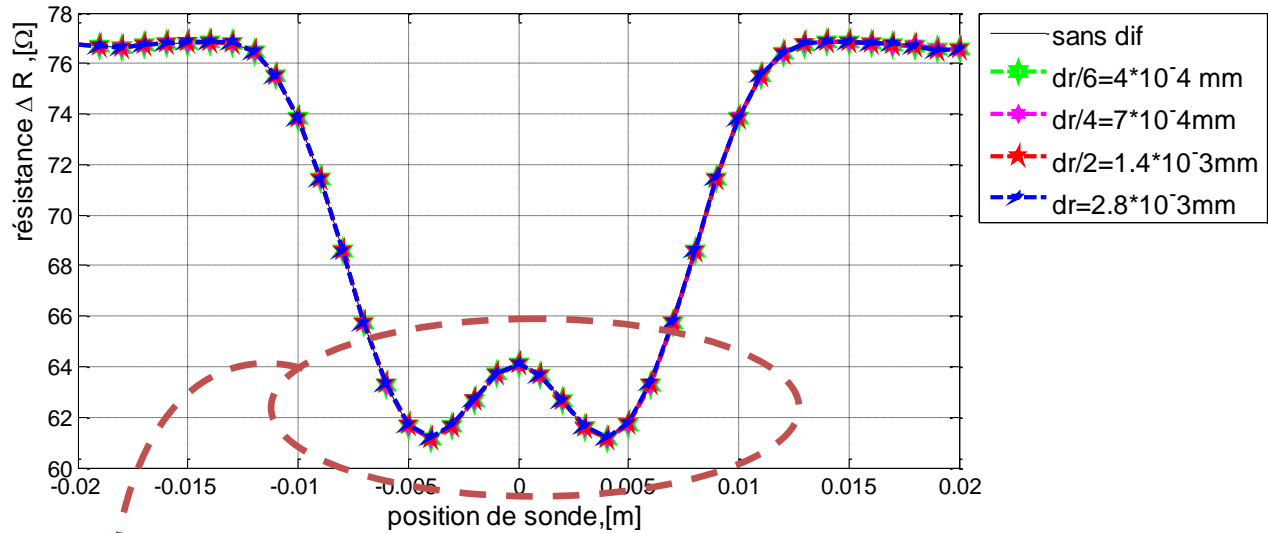


figure III. 31 . Variation de  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

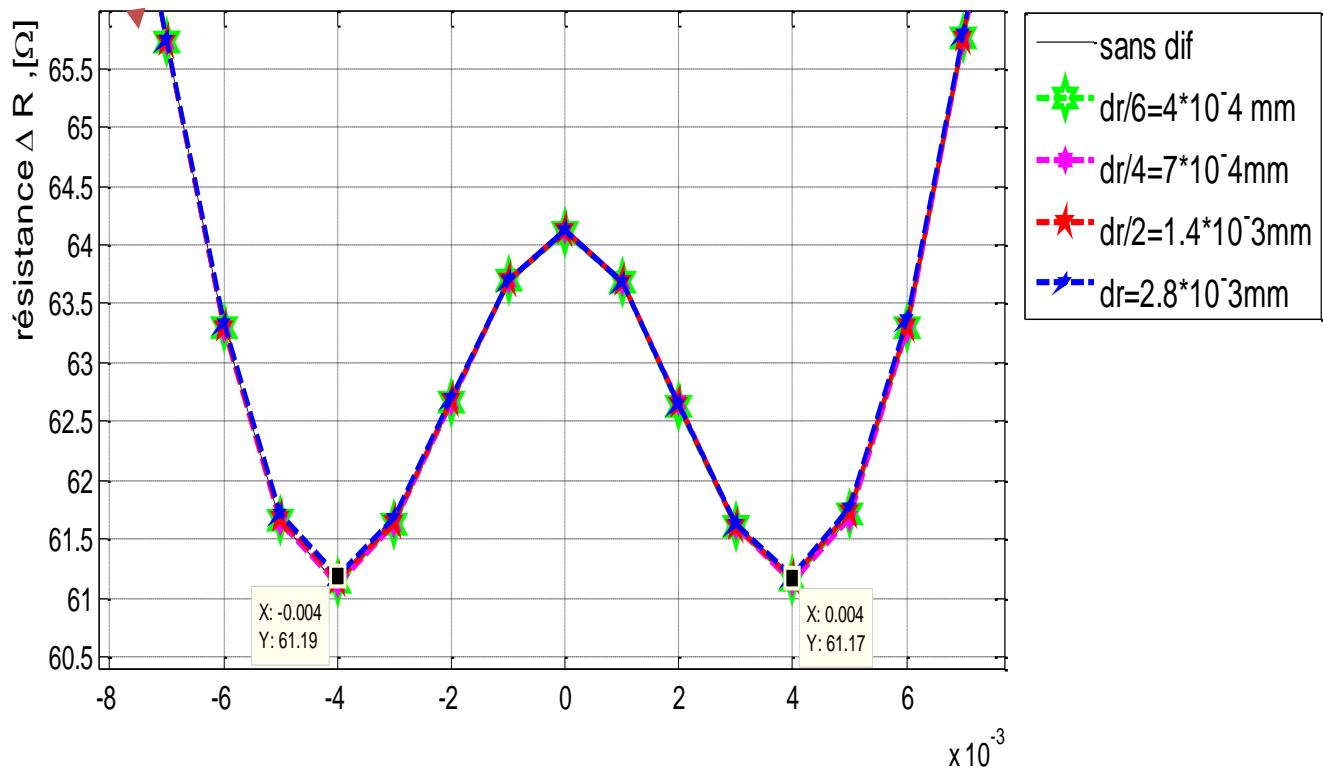
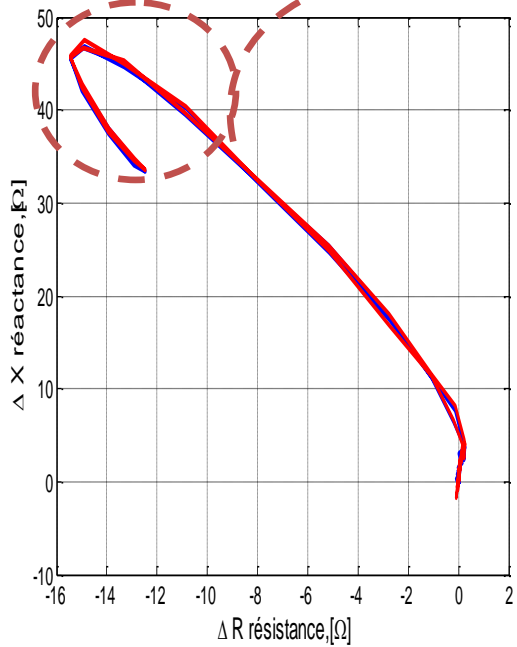


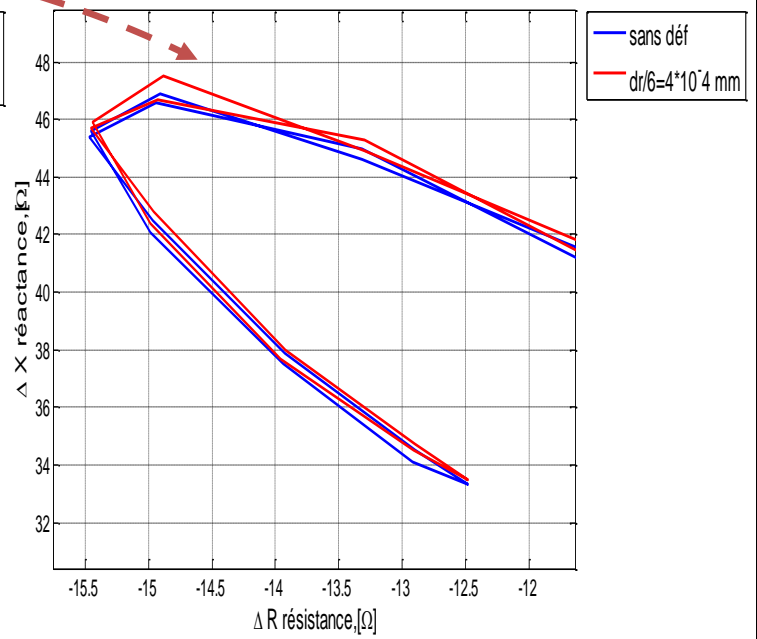
Figure III. 34 . Zoom de Variation de  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

D'après les figures (III.31 a III.34) représentant  $\Delta R$  pour la couche 3, il n'y a pas de détection sans zoom, donc de détection affecté par l'éloignement des défauts dans la couche 3.

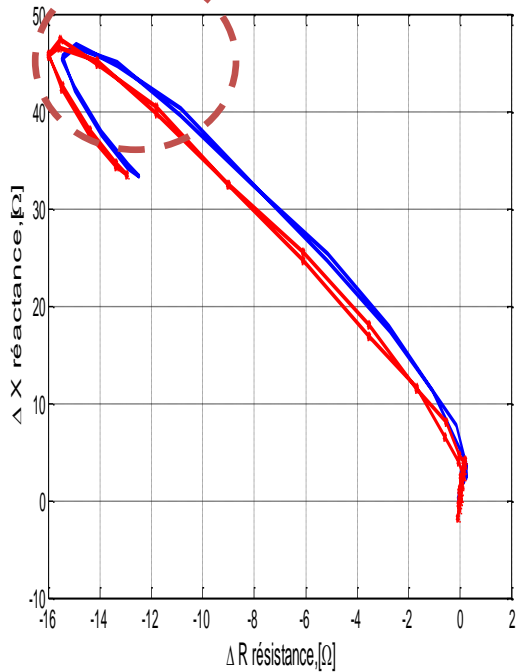
## III.3.3.2 Diagramme de phase



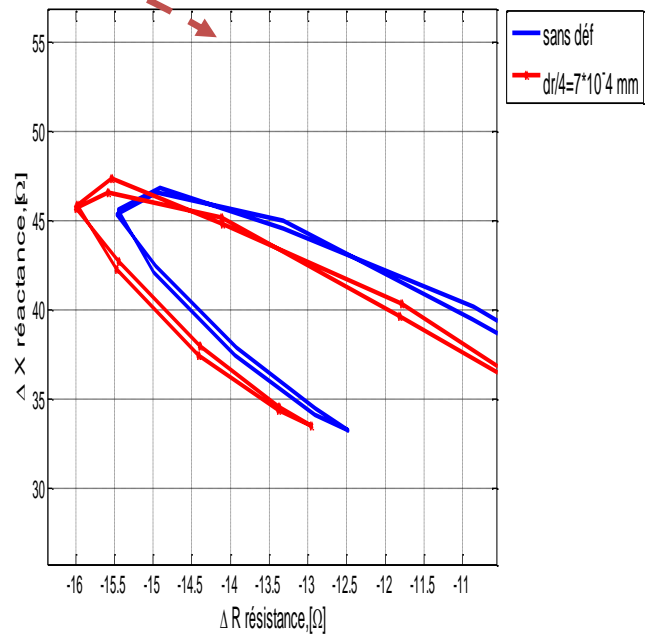
a)



Zoom

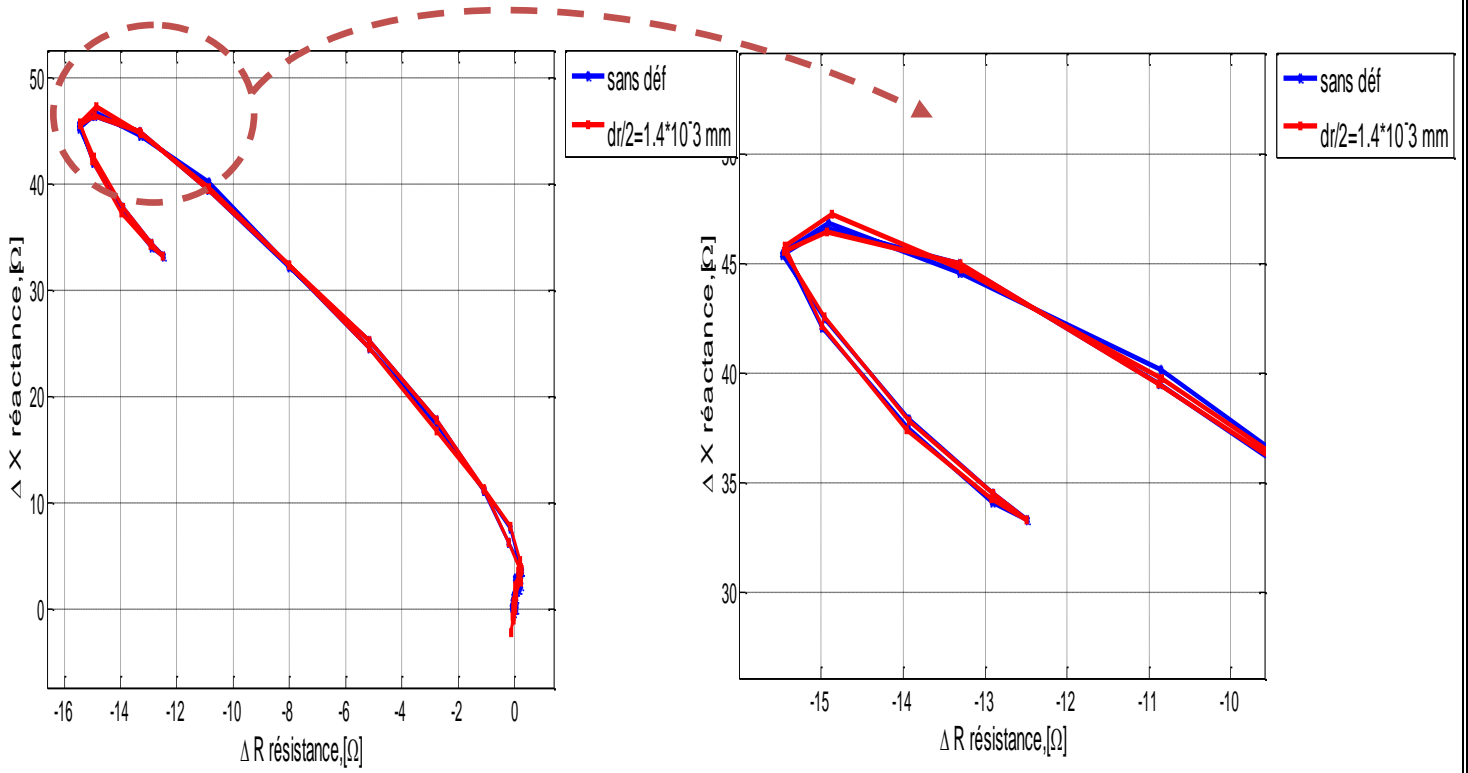


b)



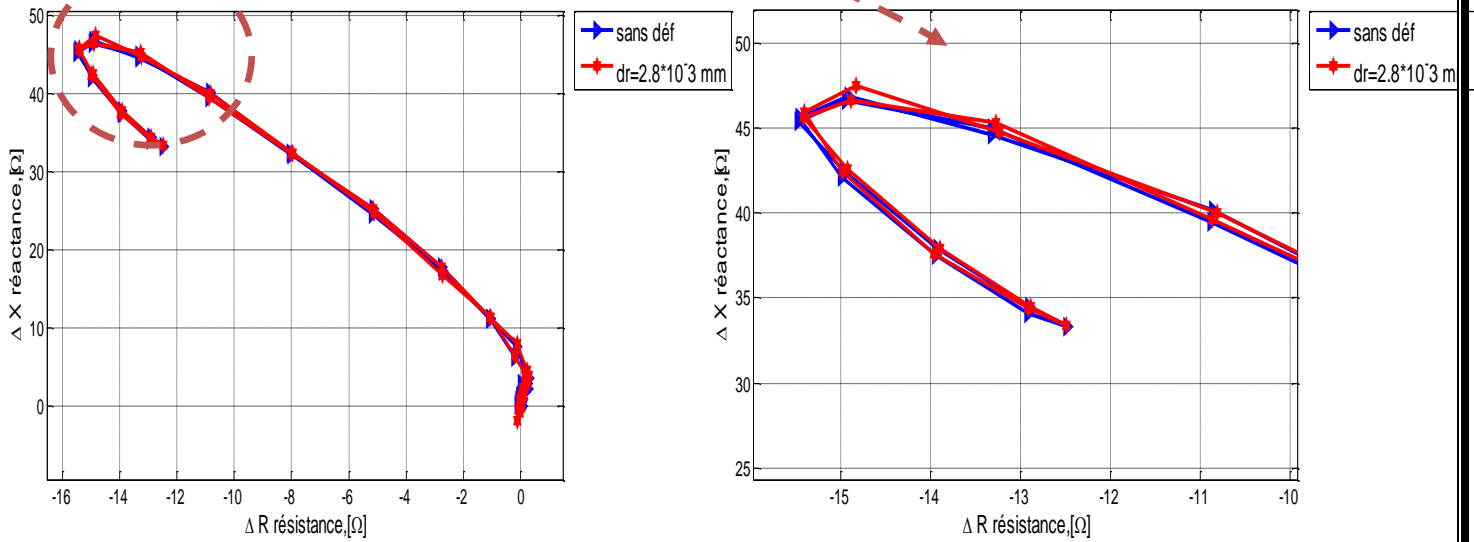
Zoom

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche



c)

Zoom c)

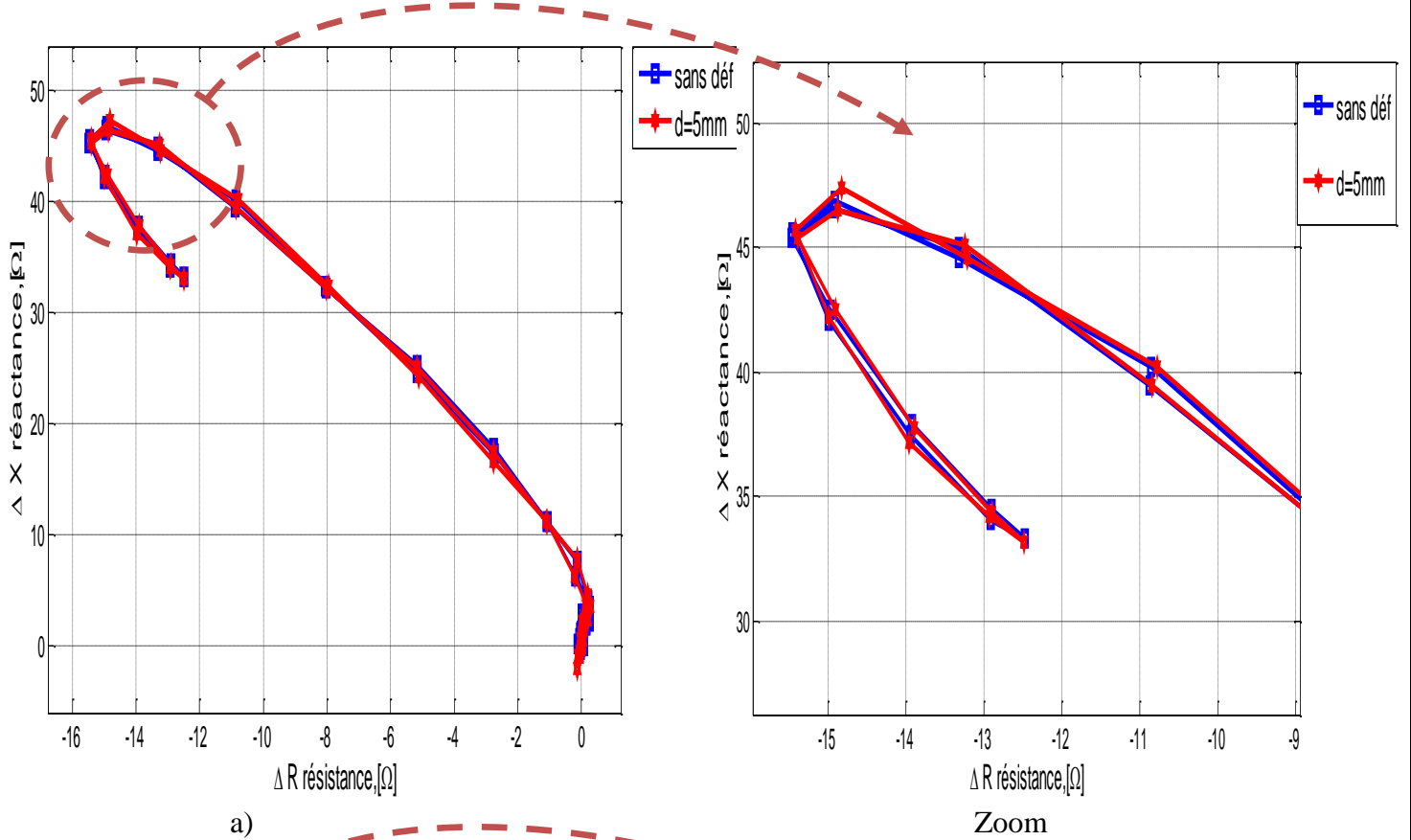


d)

Zoom

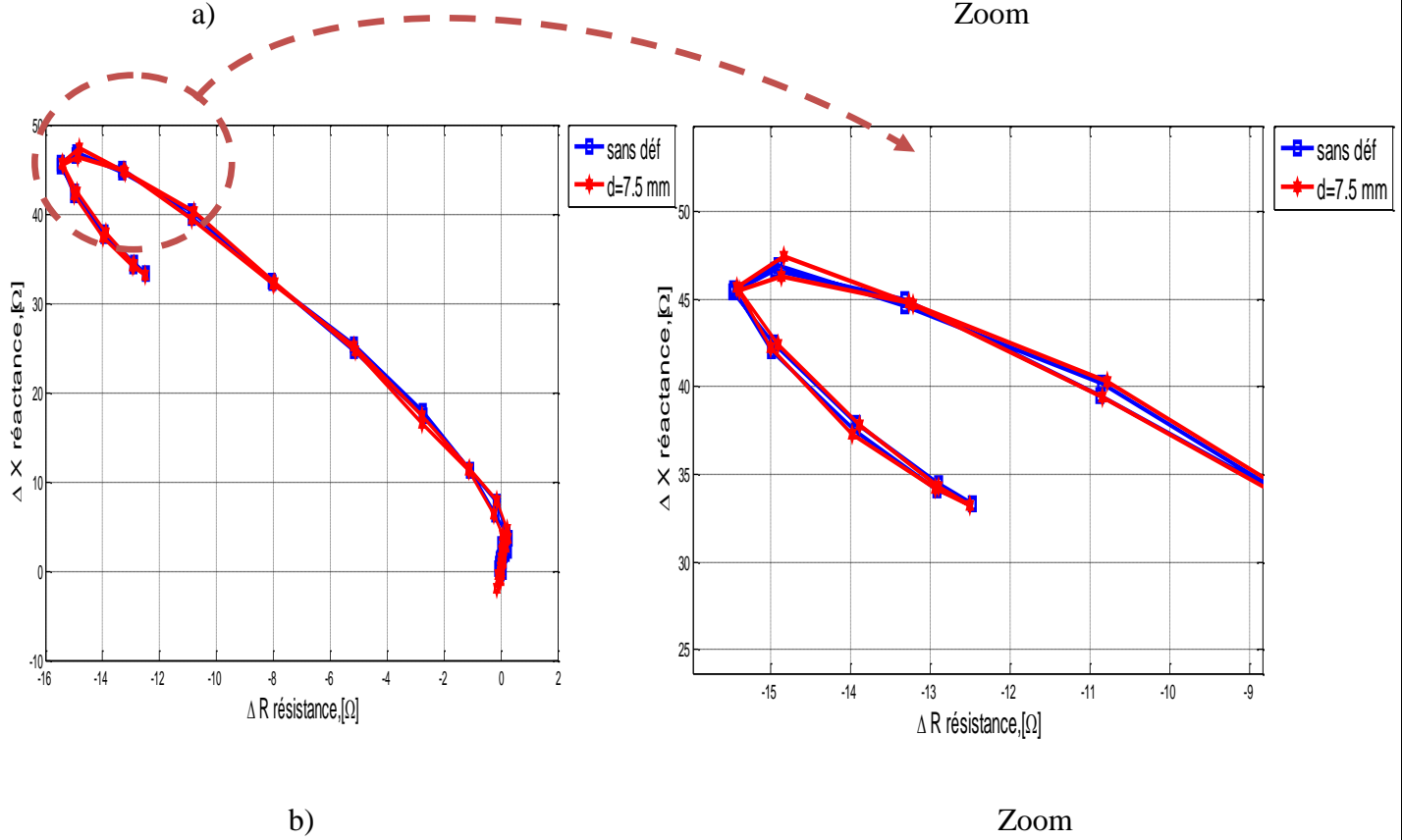
**Figure III. 32 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$  dans la troisième couche. (Couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche



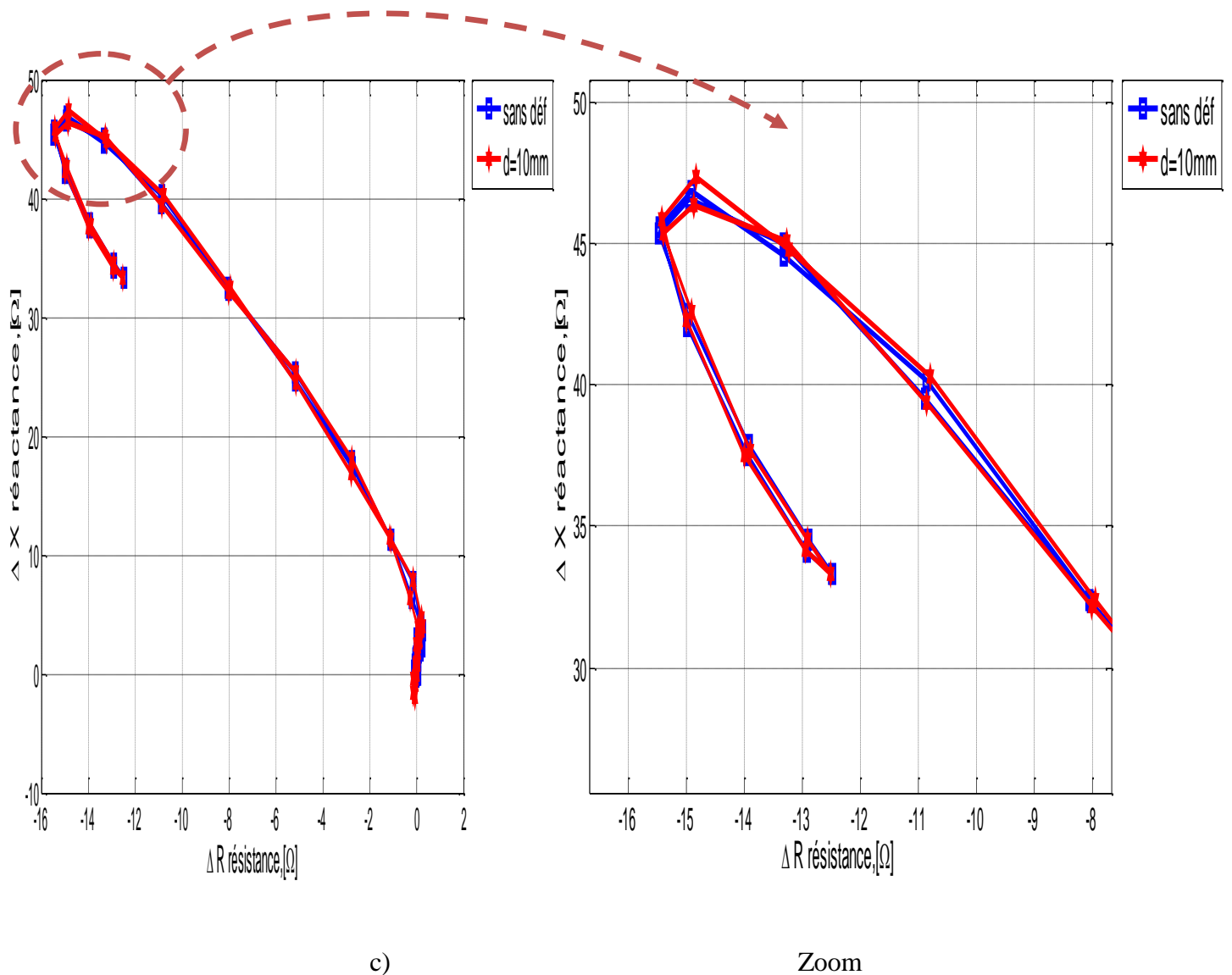
a)

Zoom



b)

Zoom



**Figure III. 36 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$  dans la troisième couche. (Couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.**

Les Figures (III.35 à III.36), montrent les signaux des diagrammes de phases des variations de la réactance (partie imaginaire  $\Delta X$ ) en fonction des variations de la résistance (partie réelle  $\Delta R$ ),

On remarque qu'il y a une grande diminution de la sensibilité de la détection par rapport les cas précédents, défaut dans couche 1 et 2. On ne détecte pas les défauts même après le zoom.

On doit varier la fréquence pour augmenter l'effet de peau:

Pour 1600 Hz elle est de 3 mm et le défaut se trouve à 10 mm en dessous.

On utilisera 800 Hz pour le reste des simulations

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

## III.3.3.3 Diagramme de variation de résistance et de réactance.

### b) Pour fréquence 800Hz.

Les figures (III.36 à III.39) représentent la variation de la réactance en fonction de sonde (varier à Longueur de défaut) d'un la couche 3 pour fréquence 800Hz

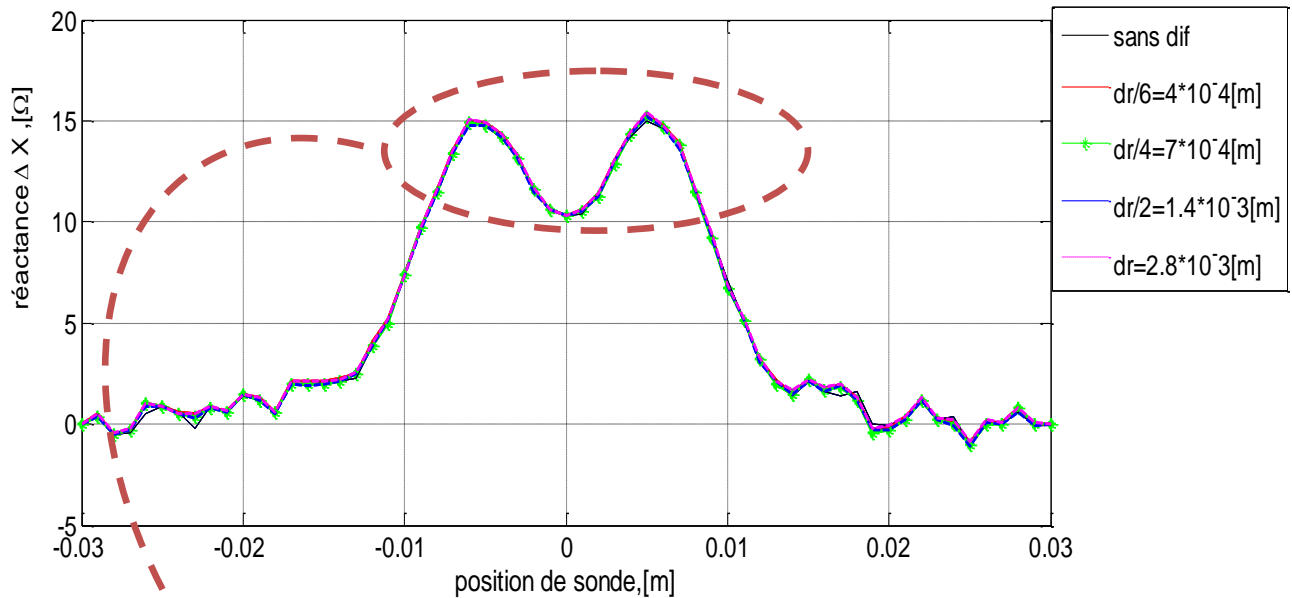


Figure III. 36 . Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

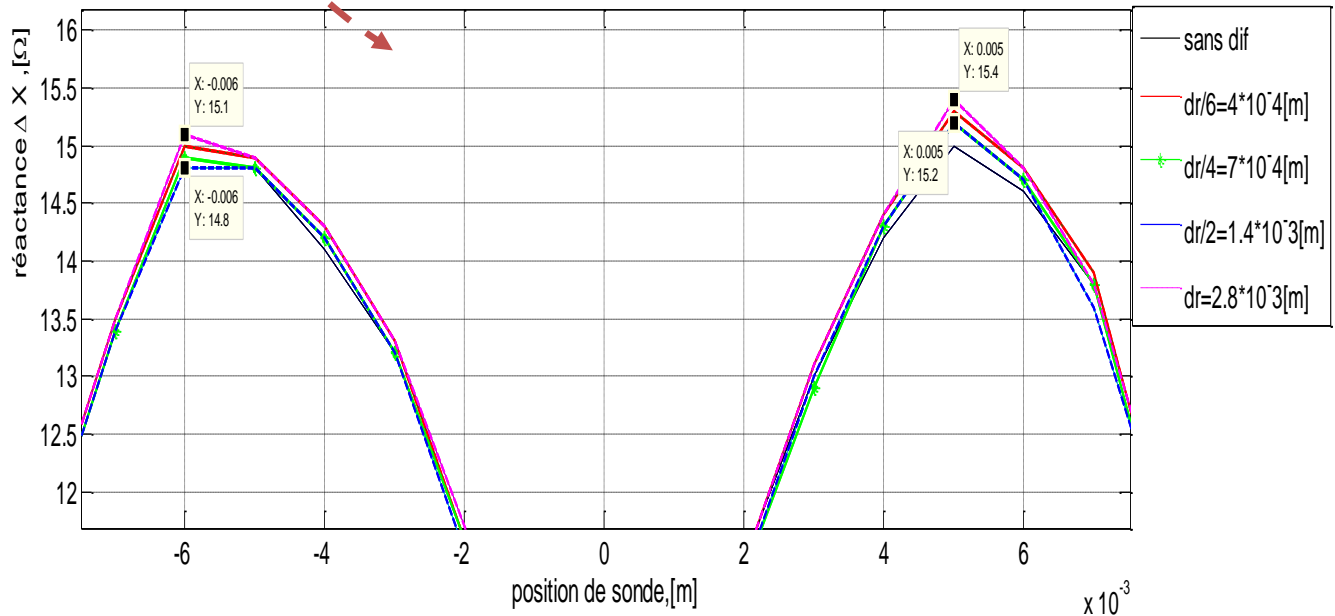
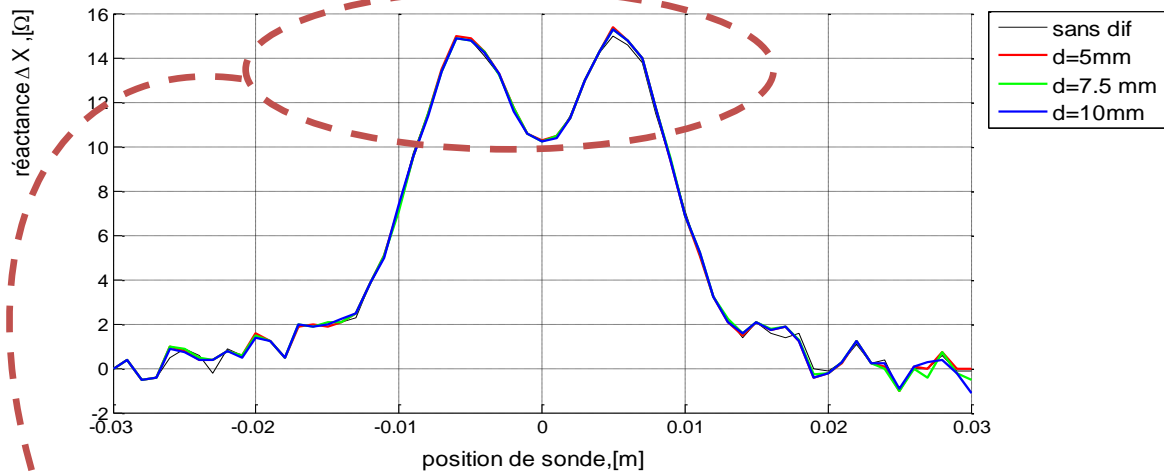
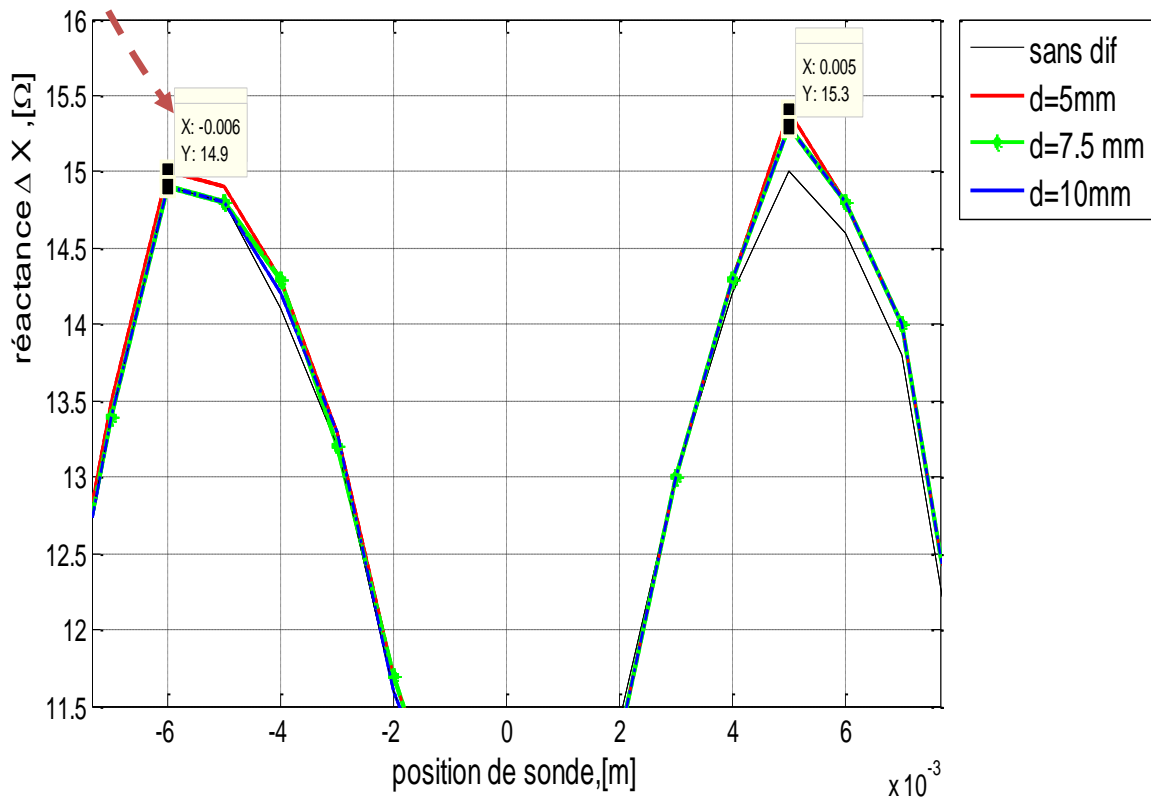


Figure III. 37 . Zoom Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet ), avec variation de la longueur du défaut.



**Figure III. 38 .** Variation de  $\Delta X$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.



**Figure III. 39 .** Zoom Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

On remarque, d'après les figures (III.33 à III.36), que il y a une amélioration de la sensibilité de détection , vue que la différence entre les crêtes des signaux est visible après le zoom.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

Les figures (III.40 à III.43) représentent la variation de la résistance en fonction du déplacement de la sonde pour différents défauts dans la couche 3 pour une fréquence de 800Hz.

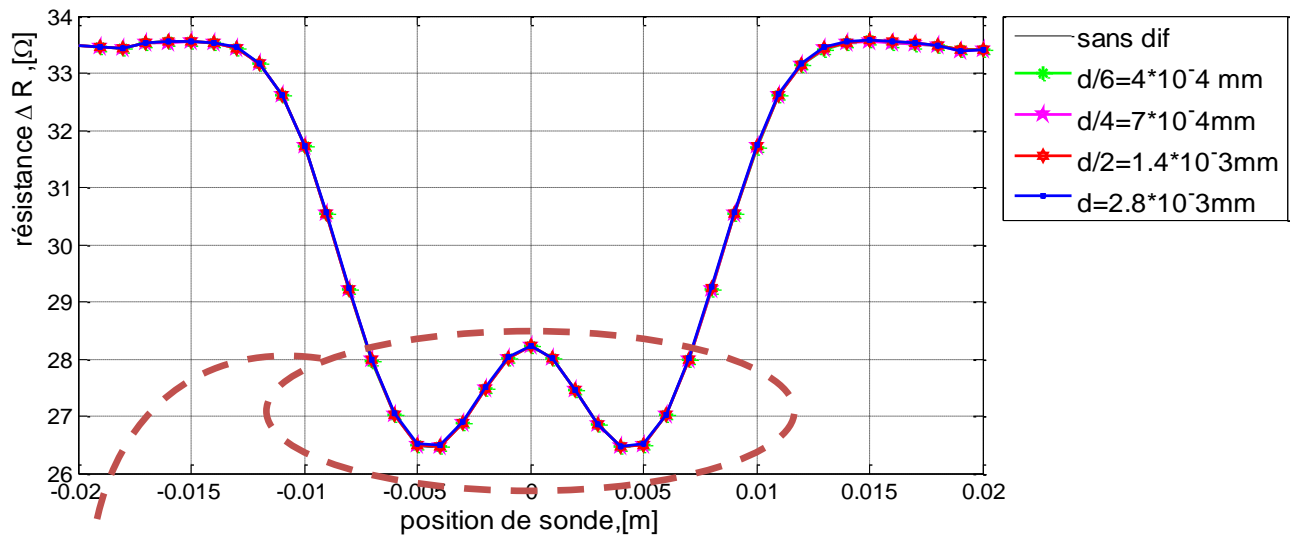


Figure III. 40 Variation  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

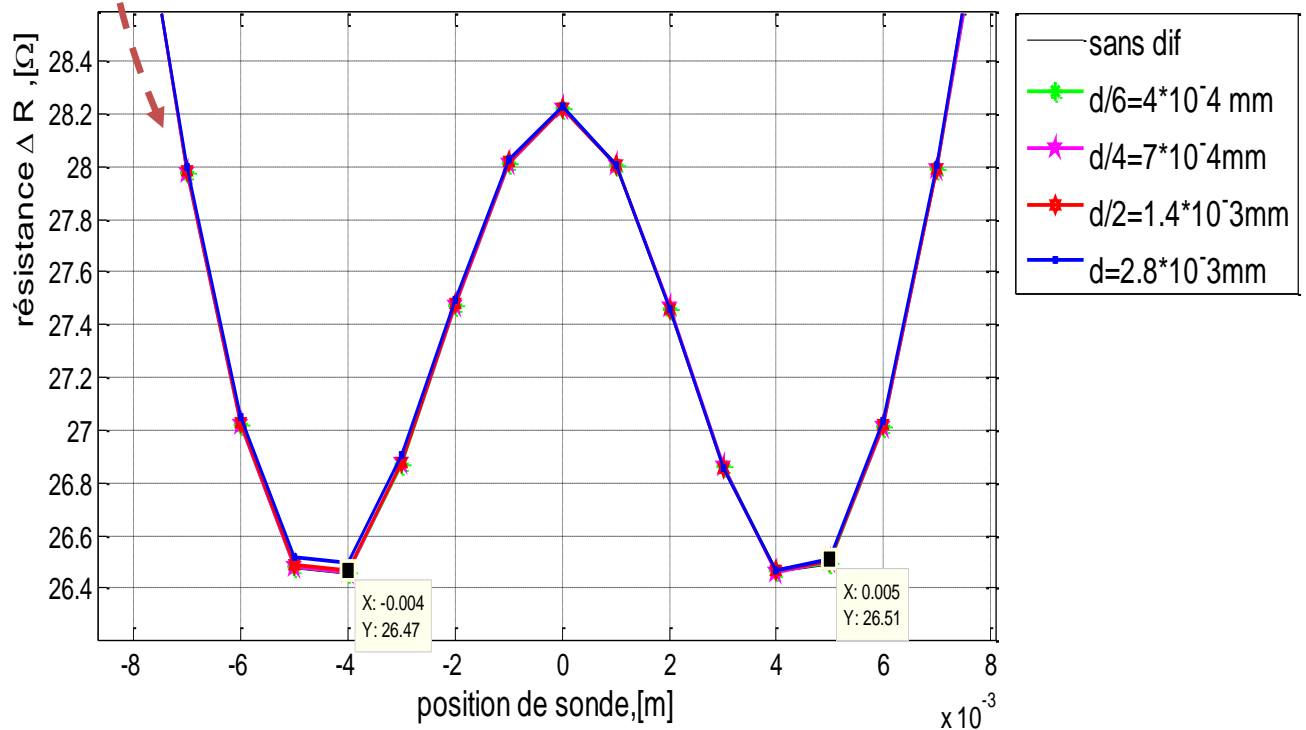
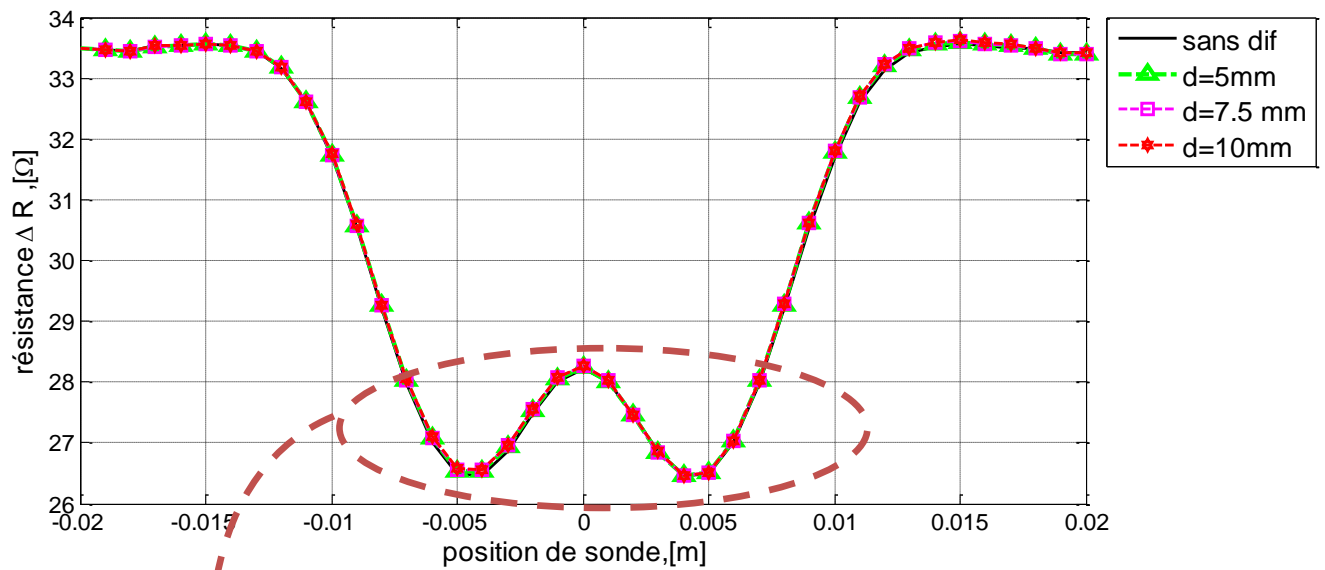
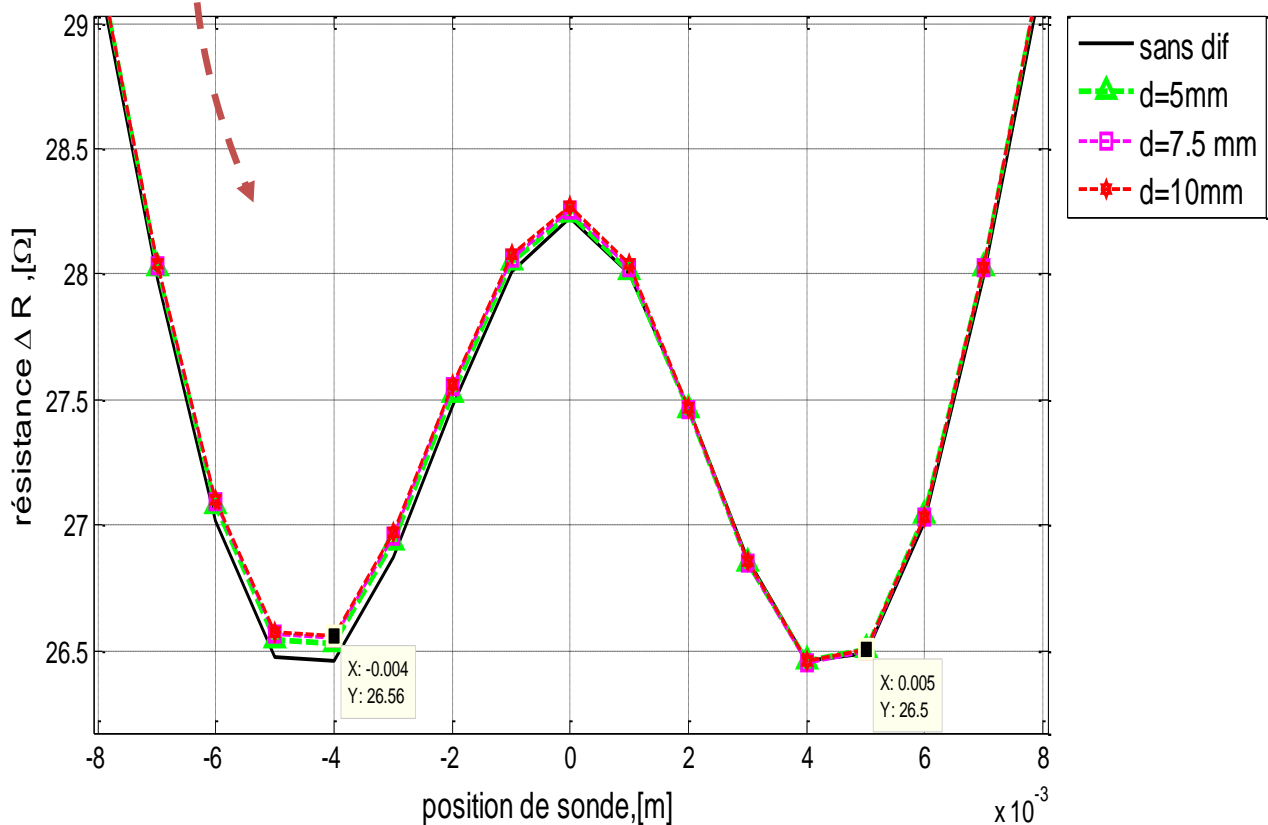


Figure III. 41. Zoom Variation  $\Delta R$  en fonction de position de sonde couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche



**Figure III. 42 .** Variation de  $\Delta R$  en fonction de position de sonde (couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.



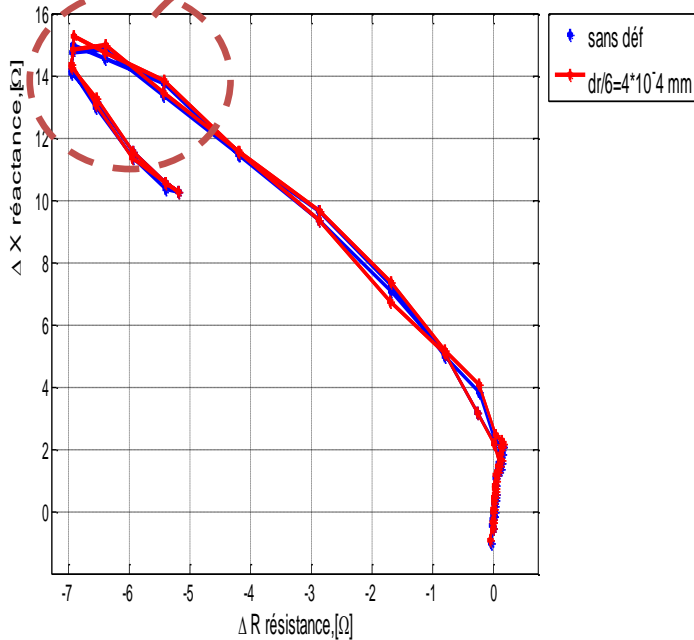
**Figure III. 43 .** Zoom Variation  $\Delta X$  en fonction de position de sonde couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

On remarque que la variation de la partie réelle est moins sensible, mais avec un zoom adéquat on peut voir la sensibilité de la détection

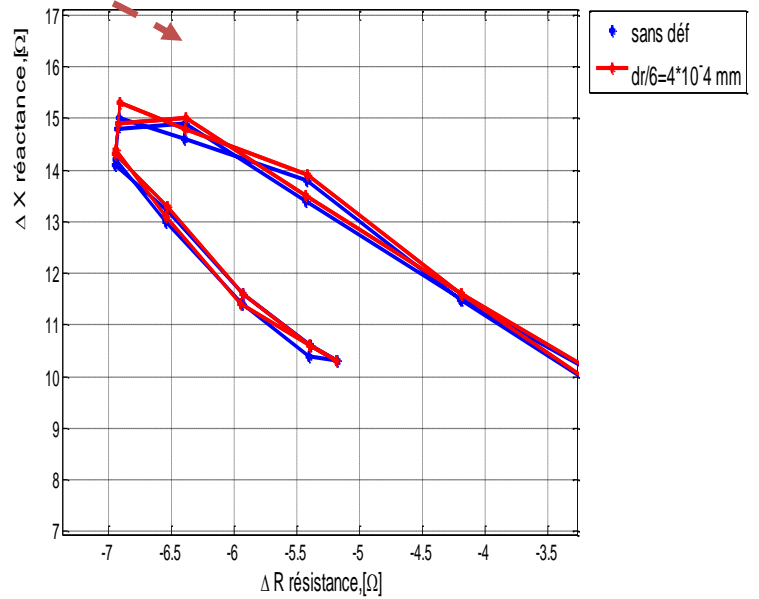
# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

## III.3.3.1 Diagramme de phase

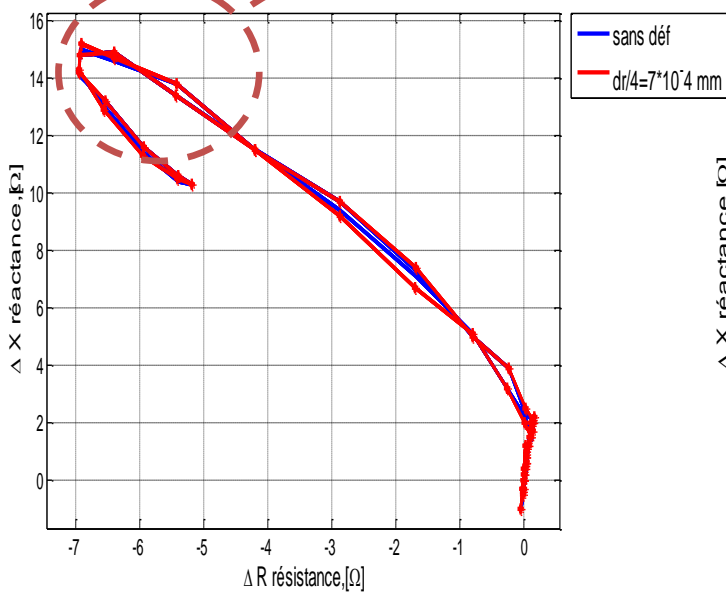
Les Figures (III.44 et III.45), montrent les signaux des diagrammes de phases pour une fréquence de 800Hz,



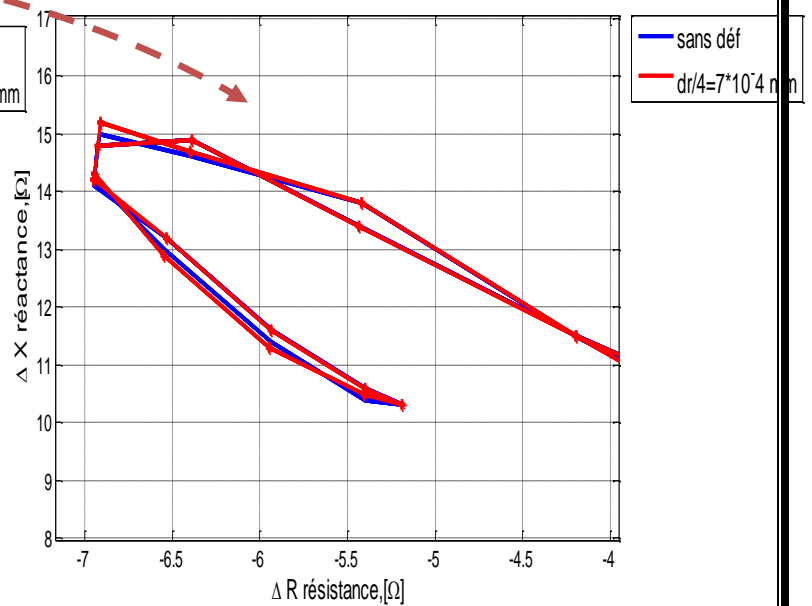
a)



Zoom

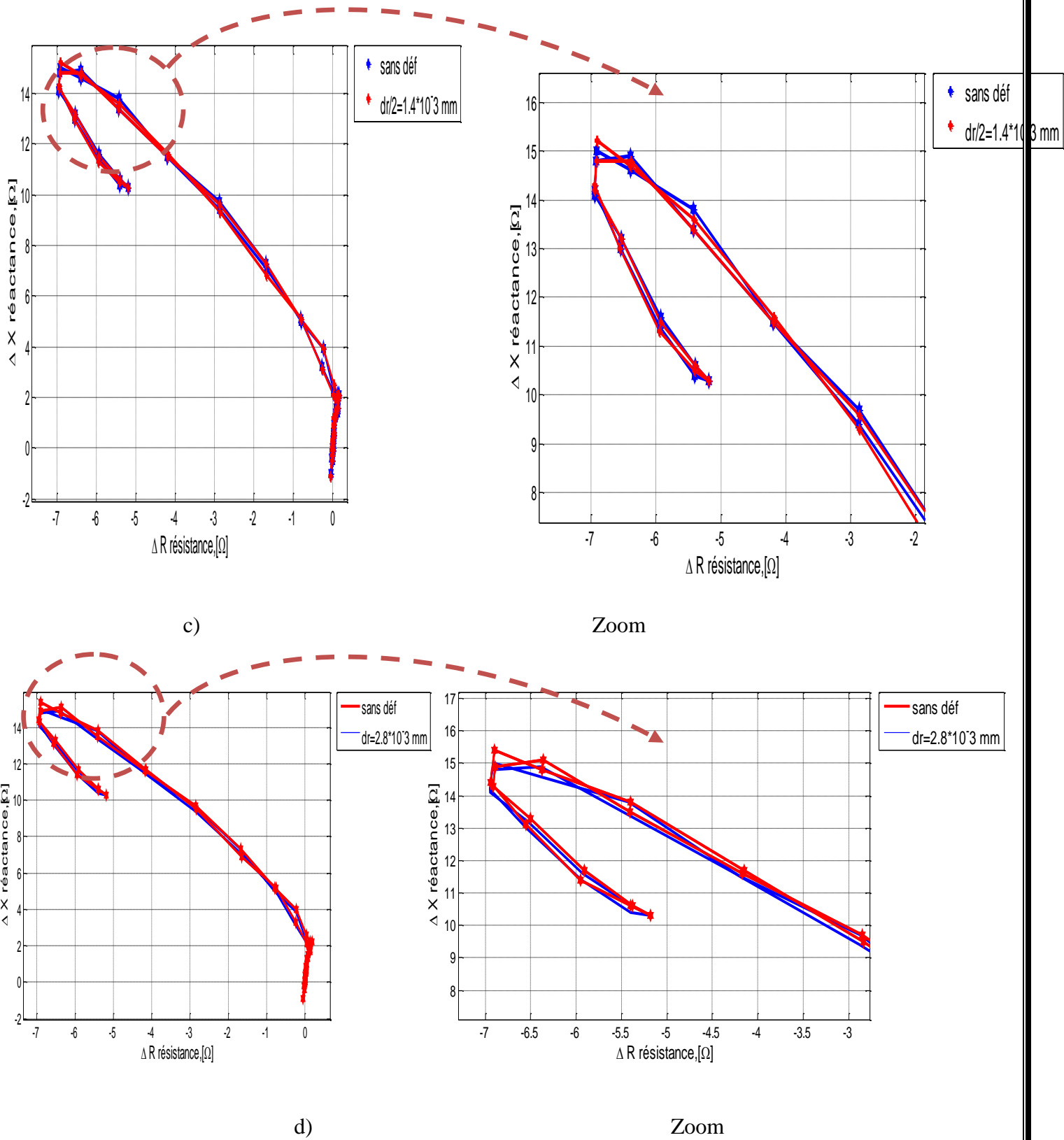


b)



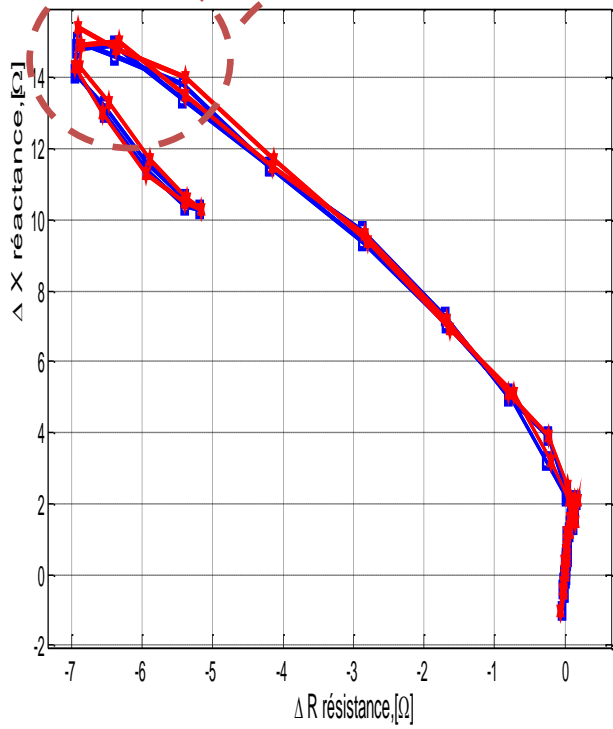
Zoom

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

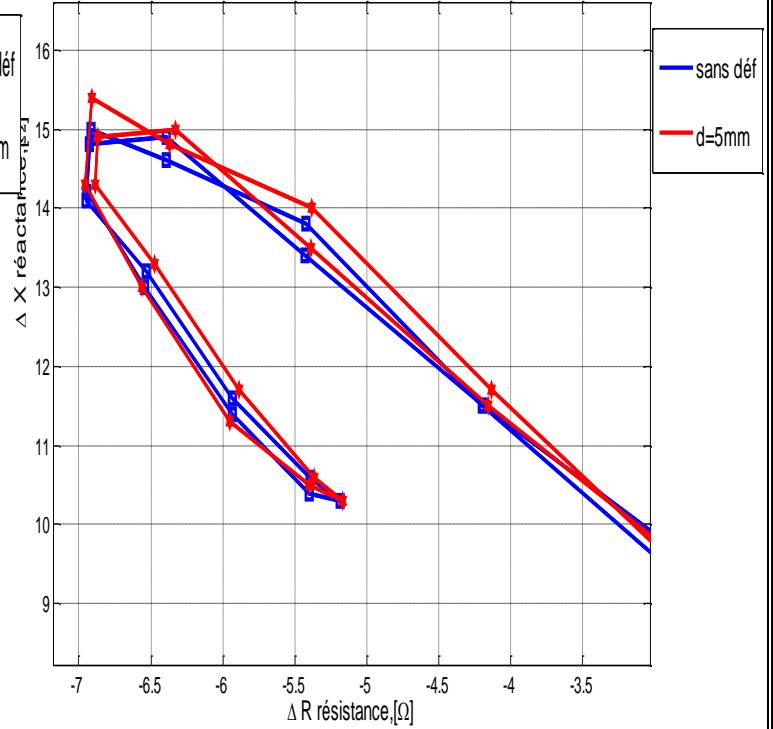


**Figure III. 33** Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$  dans la troisième couche. (Couche 3, défauts inférieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

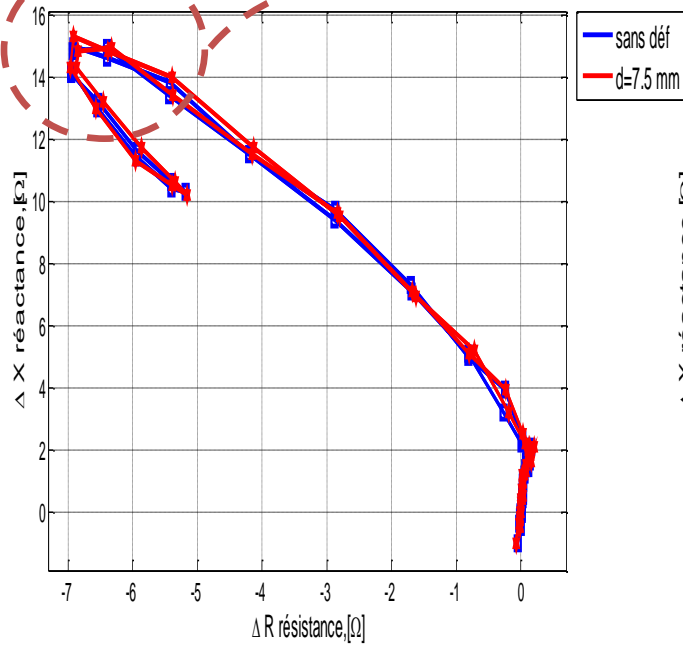
# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche



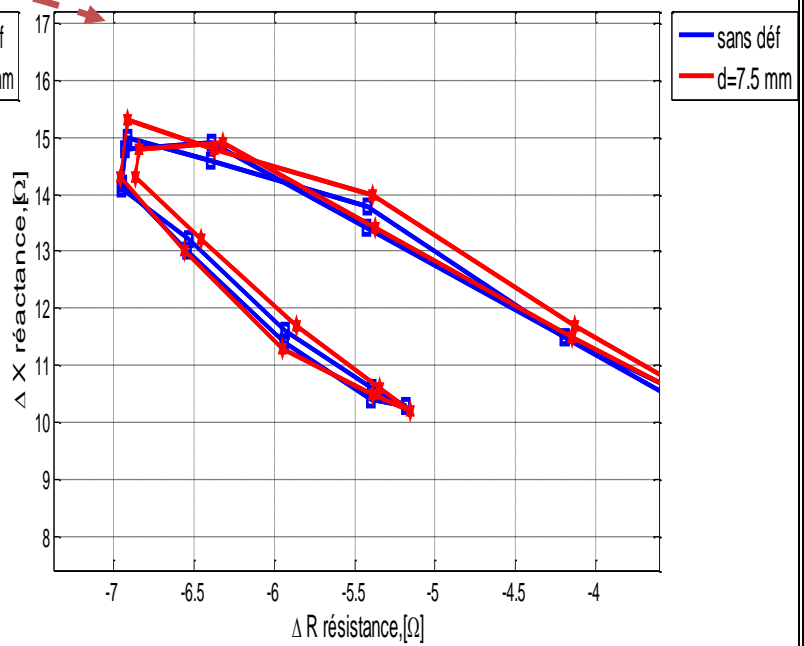
a)



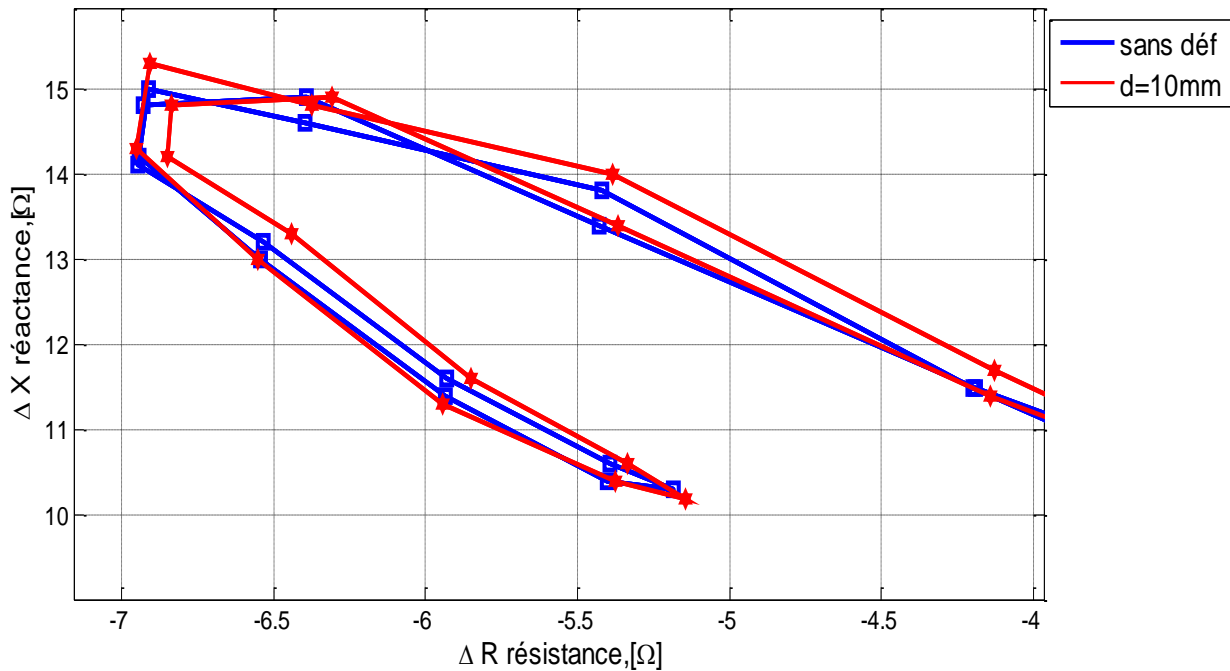
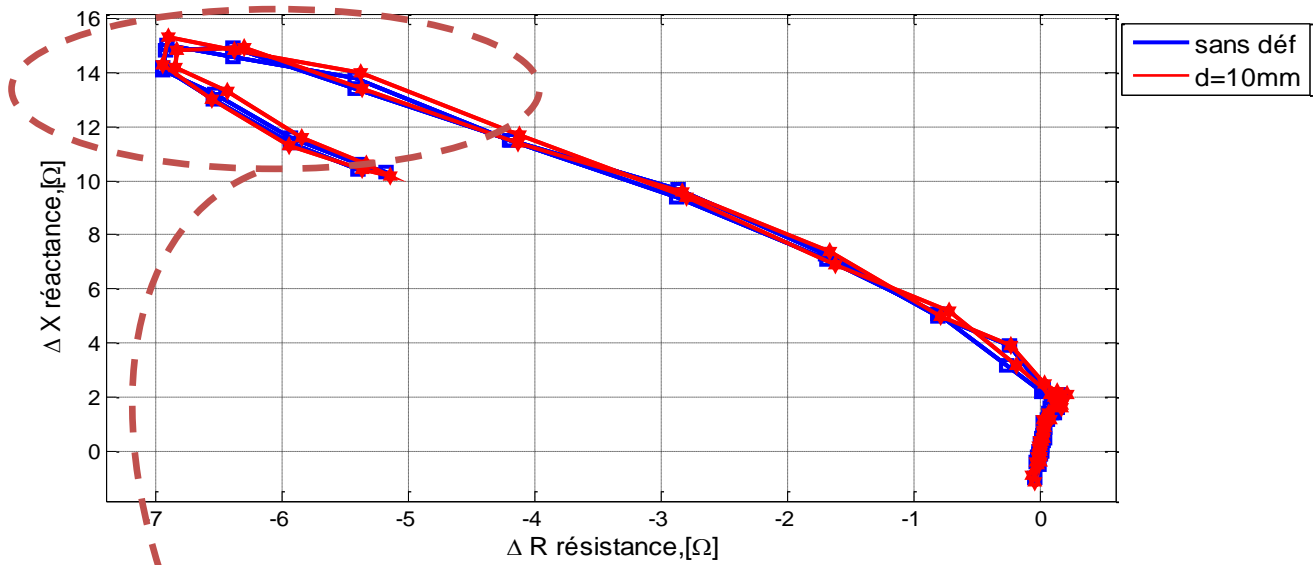
Zoom a)



b)



Zoom b)



Zoom c)

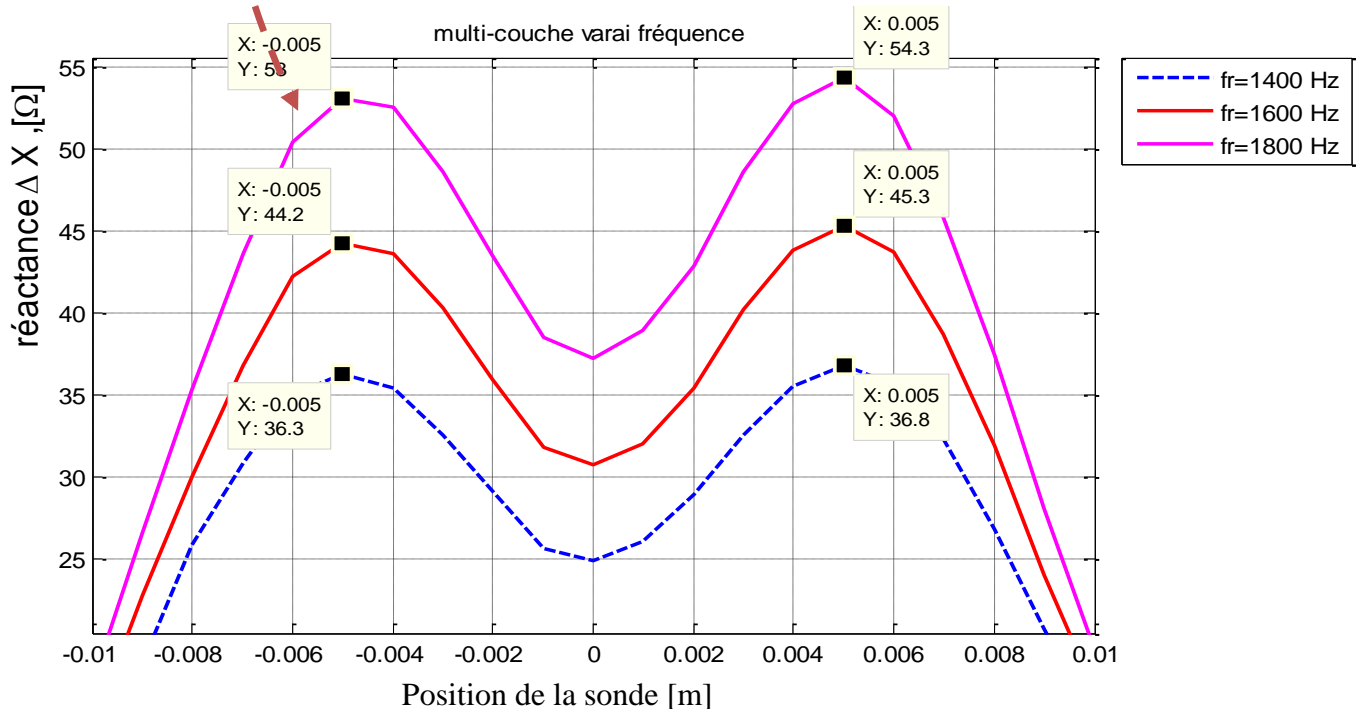
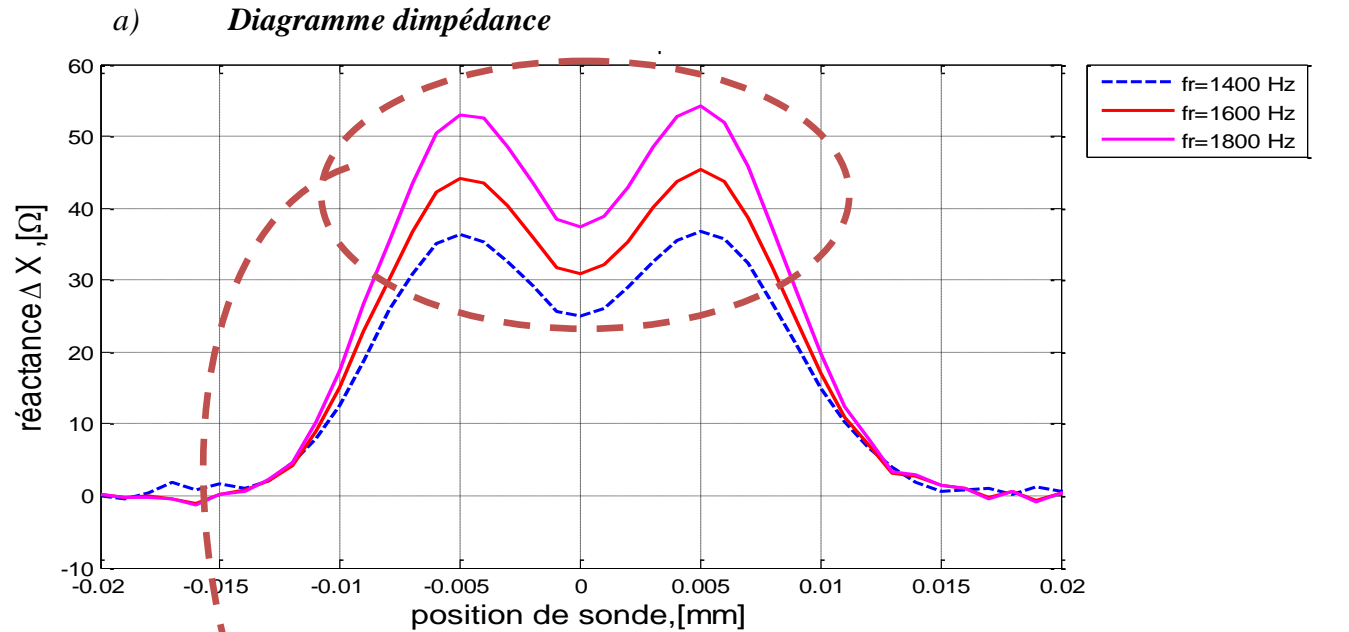
**Figure III. 45** Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$  dans la troisième couche. (Couche 3, défauts supérieur à la tête de rivet), avec variation de la longueur du défaut.

On remarque que la sensibilité de la détection à nettement augmentée, on peut voir les variations avec un petit zoom.

## III.3.4 Paramètres influant sur le signal de détection

Pour la suite de cette partie, la longueur du défaut est constante, elle égale à 5 [mm]

### III.3.4.1 Variation de la fréquence



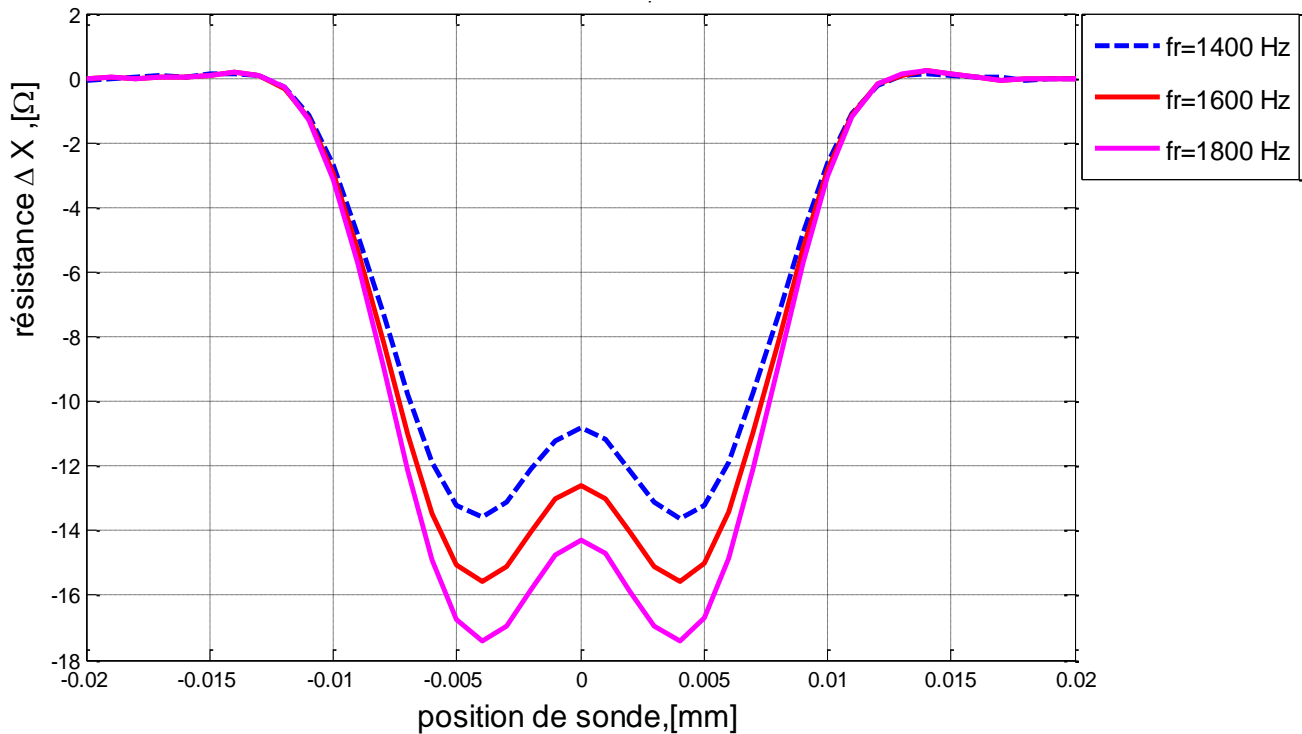


Figure III. 48 Variation de la  $\Delta X$  en fonction de la position sonde, avec variation de la fréquence.

Les figures (III.46 à III.48) illustrent la variation de la réactance et résistance pour différentes valeurs de la fréquence (1400Hz, 1600Hz, et 1800Hz), On remarque que ce signal est proportionnel à la valeur de la fréquence. on peut distinguer les valeurs de crêtes des signaux, et on peut déduire que le défaut se trouve à droite du rivet (figure III.42)

L'augmentation de la fréquence permet de concentrer les courants induits sur une petite surface possible (minimisation de l'effet de peau) d'où variation de l'impédance proportionnelle à la fréquence.

### b) *Diagramme de phase*

Le diagramme de phase du même défaut mais avec une variation de la fréquence est donné par la figure suivante :

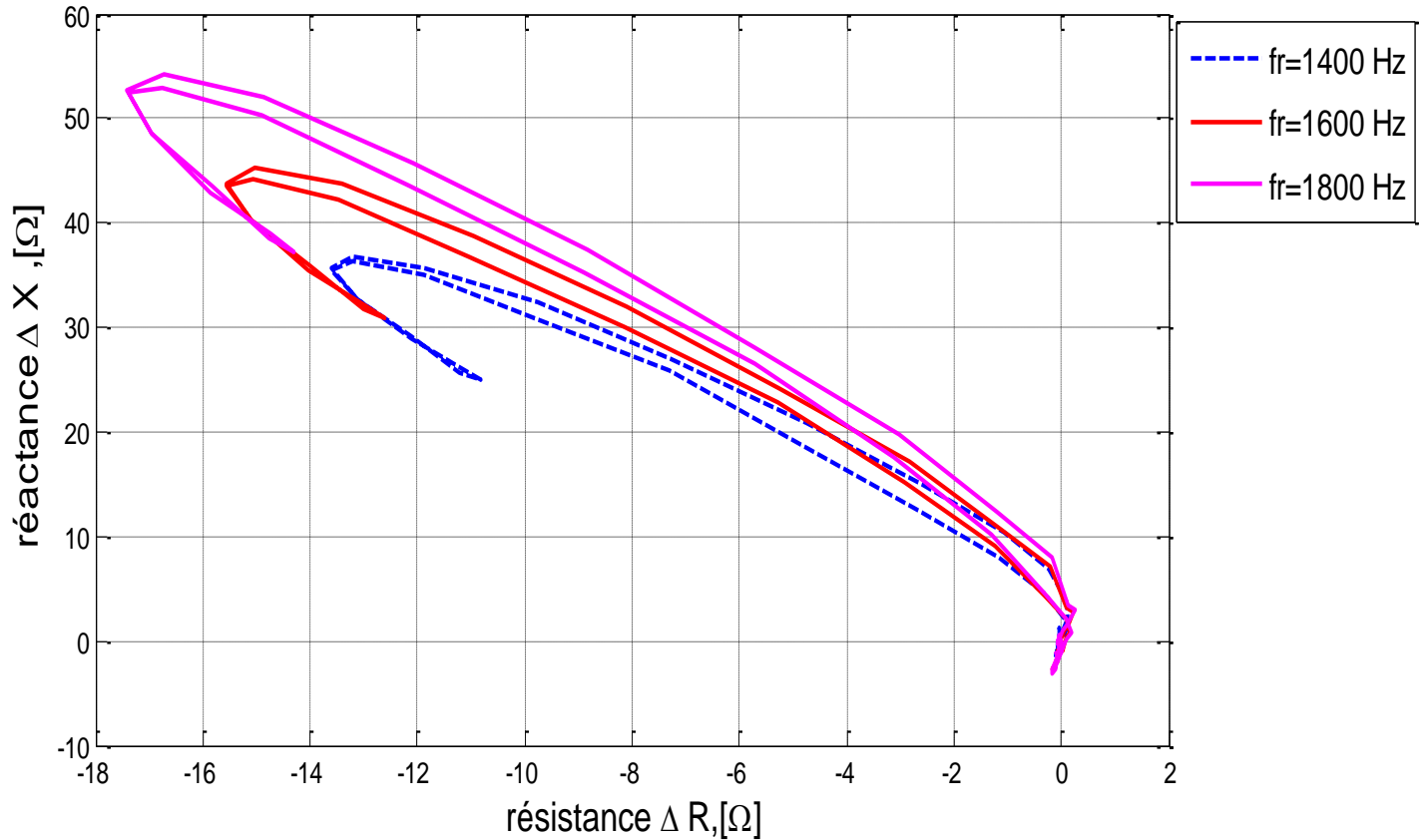


Figure III. 49. Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction  $\Delta R$ , avec variation de la fréquence.

La Figure (III.49), montre les signaux des diagrammes de phases des variations de la réactance (partie imaginaire  $\Delta X$ ) en fonction des variations de la résistance  $\Delta R$  (partie réelle). On remarque que la différence entre les signaux de détection est très lisible, ainsi les signaux obtenus sont proportionnels à la variation de la fréquence du point de vue module et phase.

## III.3.4.1 Variation de lift-off

### a) *Diagramme d'impédance*

Les figures (III.50 et III.51) représentent la variation de la réactance (partie imaginaire) et résistance (partie réelle) pour différentes valeur du lift-off (0.1mm, 1mm, 2mm, 3mm),

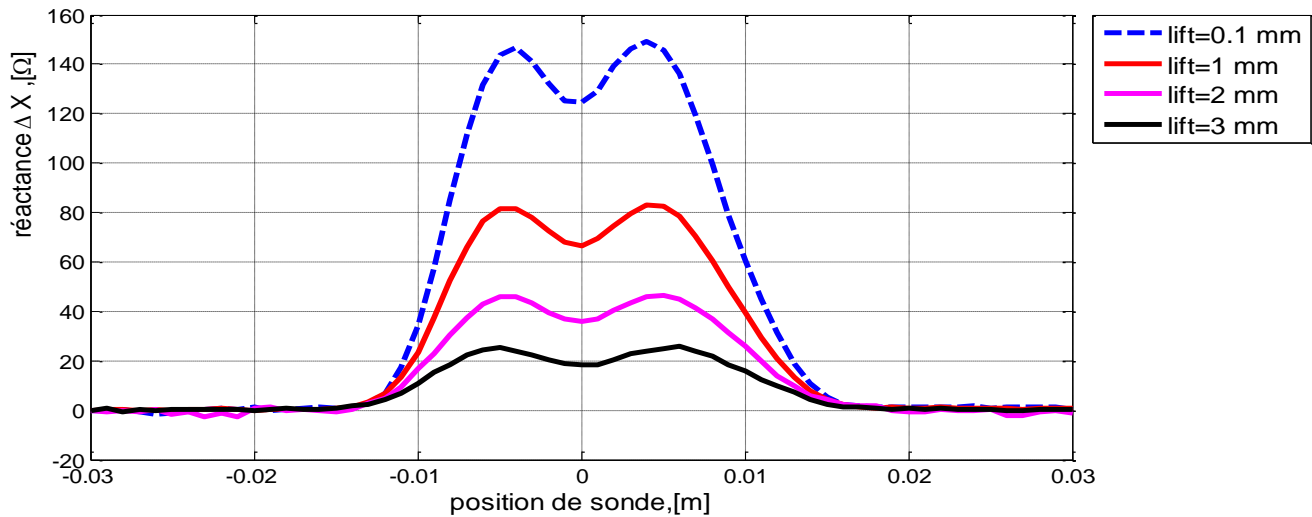


Figure III.50 .Variation de la  $\Delta X$  en fonction de la position sonde, avec variation du lift-off.

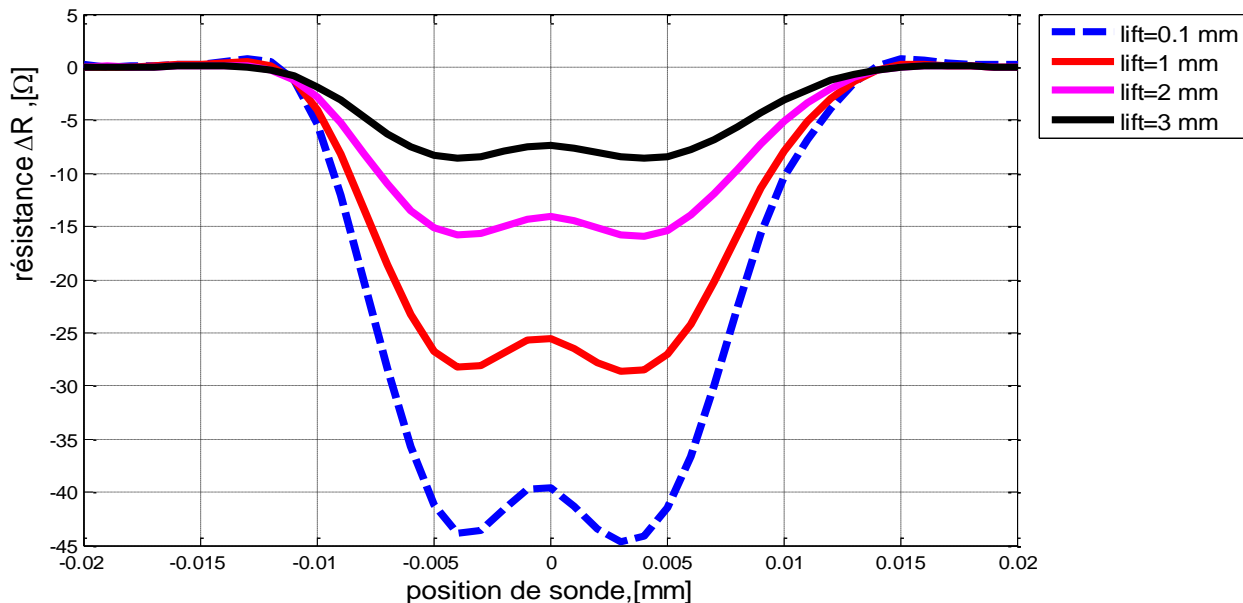
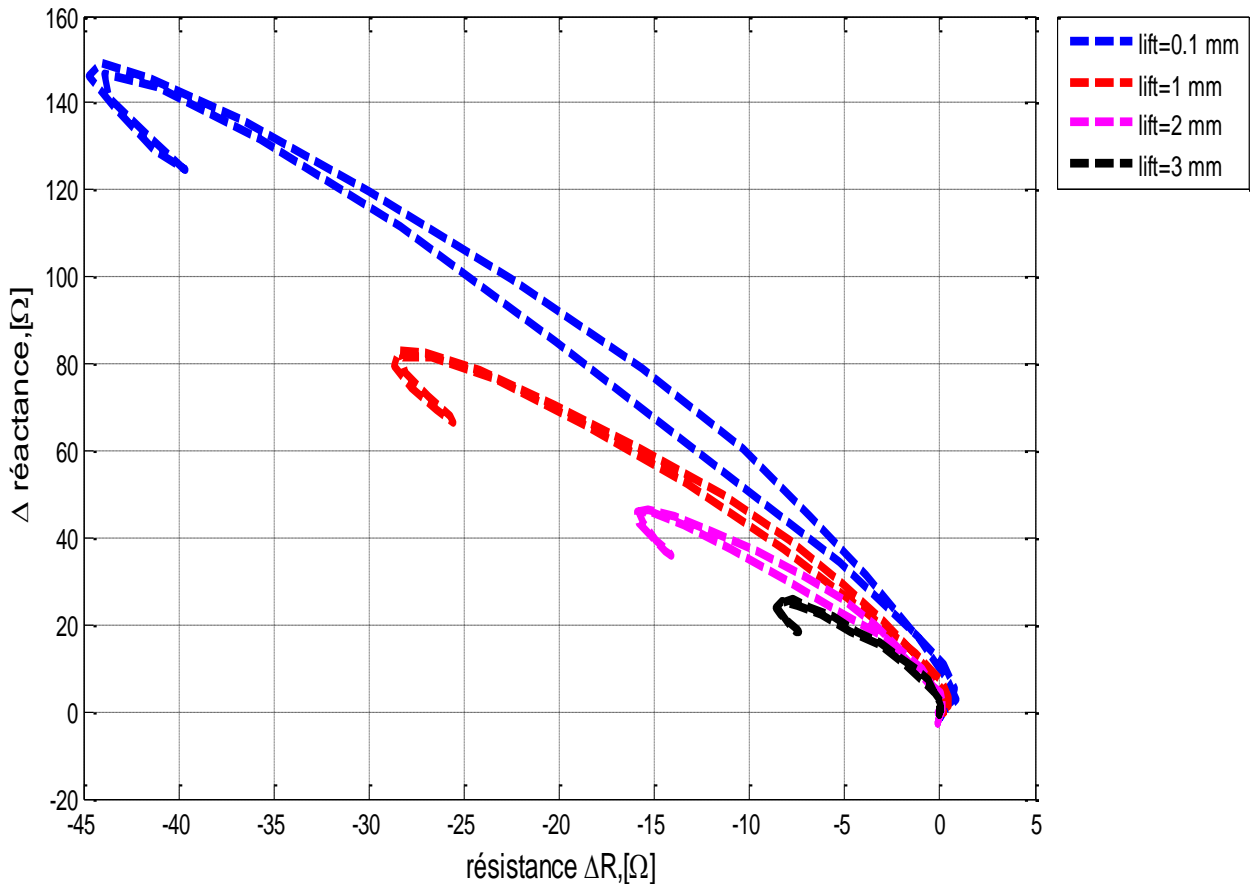


Figure III. 51 .Variation de la  $\Delta R$  en fonction de la position sonde, avec variation du lift-off.

On constate que les signaux obtenus sont inversement proportionnels au lift-off, car la sensibilité de détection de défauts diminue avec l'éloignement du capteur par rapport à la pièce à tester.

### b) *Diagramme de phase*

La Figure (III.52), montre les signaux des diagrammes de phases des variations de la réactance (partie imaginaire  $\Delta X$ ) en fonction des variations de la résistance (partie réelle  $\Delta R$ ),



**Figure III. 52 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$ , avec variation du lift-off.**

En se référant à la Figure III.52, on peut déduire qu'il est possible d'utiliser le diagramme de phase comme moyen de détection ou de caractérisation des défauts, la différence des signaux est plus nette, du point de vue phase et amplitude. Plus le lift-off augmente plus le signature du défaut diminue car l'effet de l'éloignement intervient.

## III.3.4.2 Variation de la position de défaut ;

a) *Défaut de 5[mm] de longueur*

➤ *Diagramme d'impédance*

Les figures (III.53 à III.56) représentent la variation de la réactance et résistance pour différentes position du même défaut (5mm) dans les trois couches (1, 2, et 3),

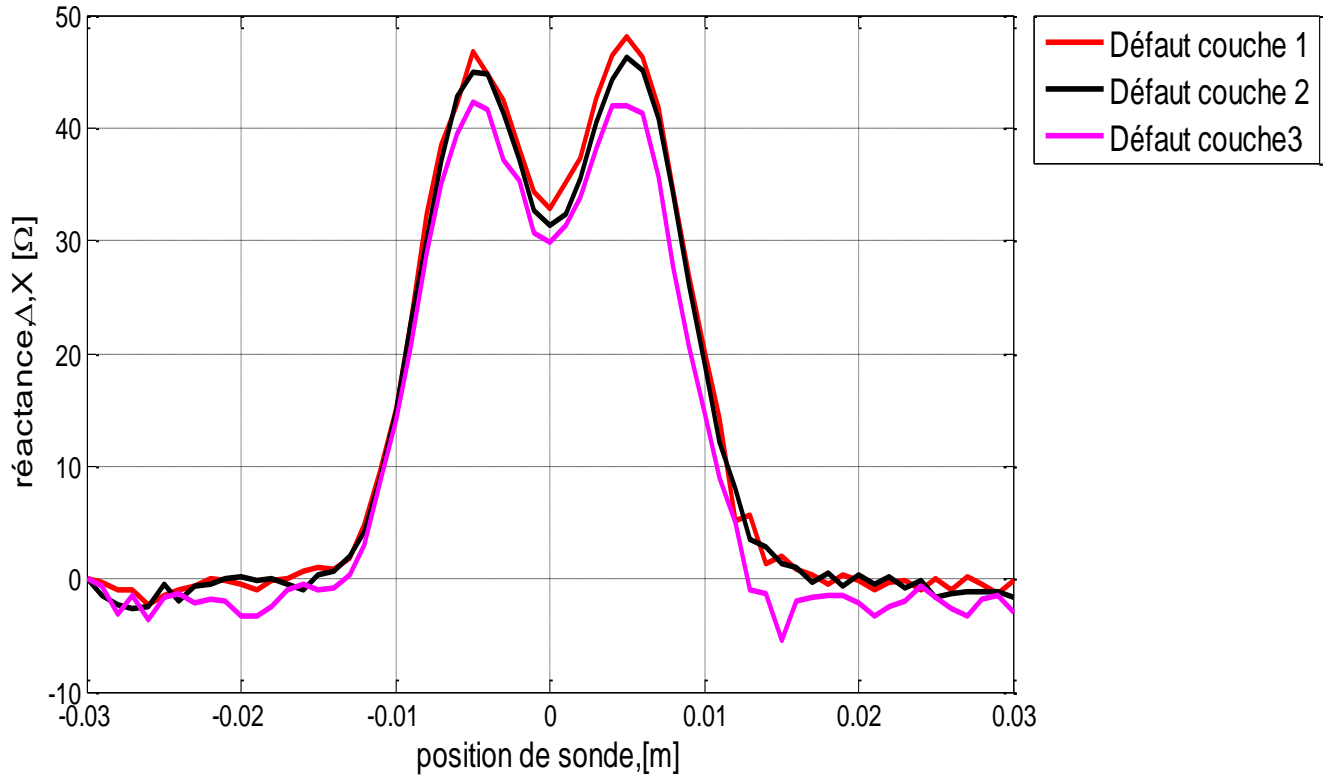


Figure III. 53 .Variation de la  $\Delta X$  en fonction de position de sonde, avec variation de la position du défaut 5[mm].

# Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

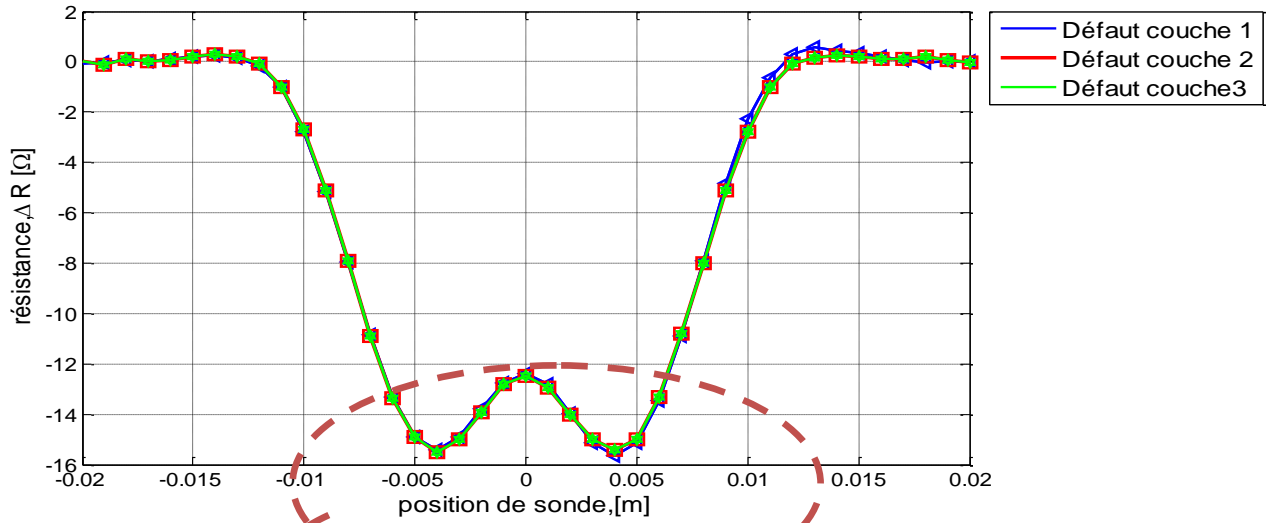


Figure III. 54 Variation de la  $\Delta R$  en fonction de position de sonde, avec variation de la position du défaut 5[mm].

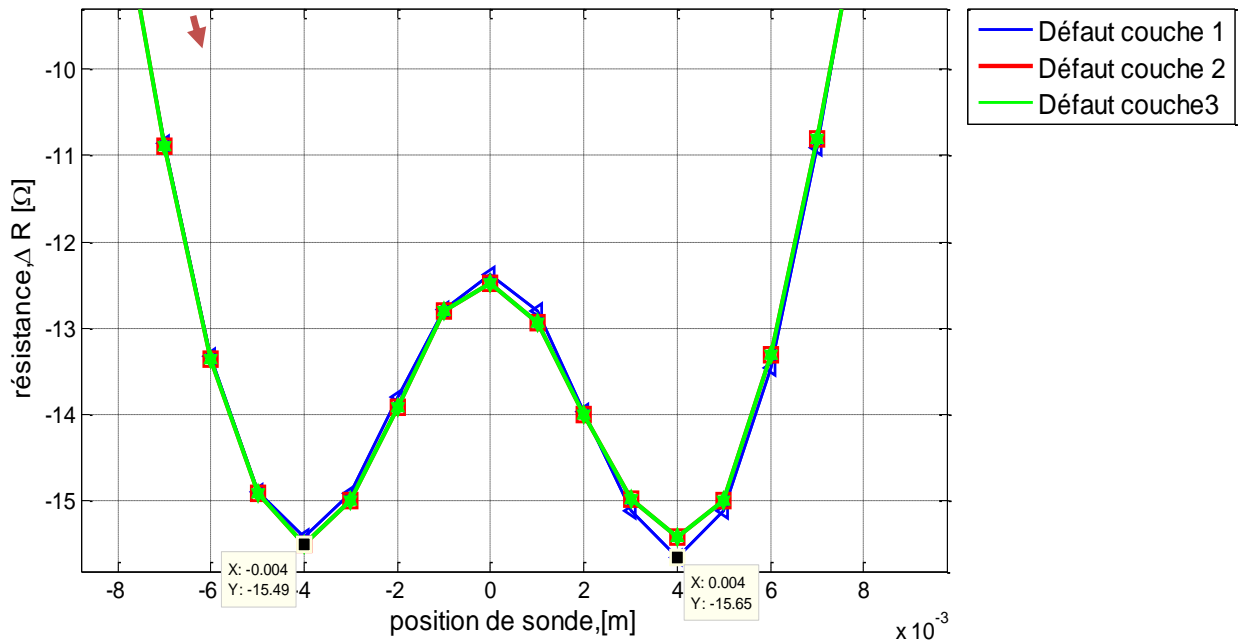


Figure III. 55 .Zoom de Variation de la  $\Delta R$  en fonction de position de sonde , avec variation de la position du défaut 5[mm].

On remarque que la sensibilité de la détection pour les valeurs de la réactance est très lisible, (Figure III.48) , elle plus importante pour les positions supérieures du même défaut, par contre

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

elle moins évidente les valeurs de variation de résistance, on doit passé par un zoom pour déceler la différence des signaux, (Figure III.50).

### ➤ Diagramme de phase

Les Figure (III.56), montre les signaux des diagrammes de phases des variations de la réactance (partie imaginaire  $\Delta X$ ) en fonction des variations de la résistance (partie réelle  $\Delta R$ ) pour un même défaut (5mm)

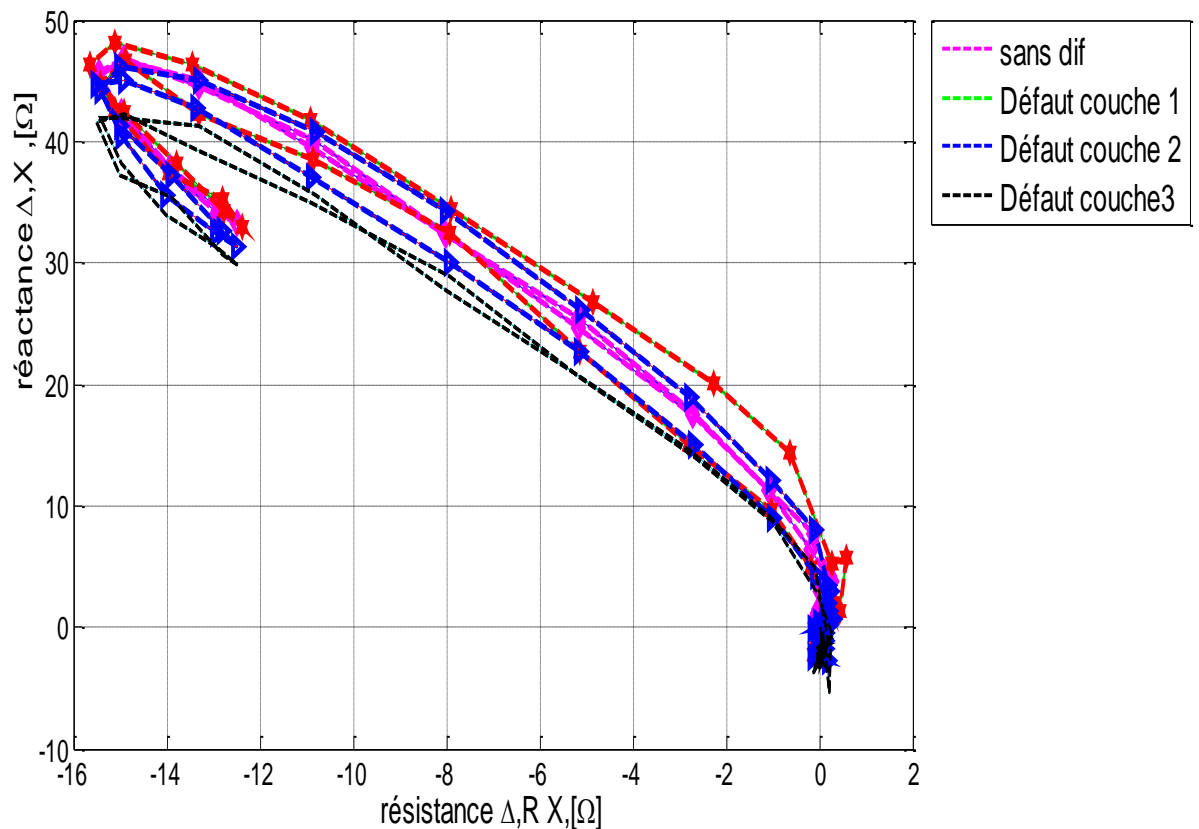


Figure III. 56 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$ , en variation sur la position du défaut 5[mm].

D'après la Figure (III. 56), on remarque que l'amplitude et la phase des signaux du digramme de phase qu'ils sont plus importants pour le défaut se trouvant dans les couches supérieure

### b) Défaut de 10[mm] de longueur.

#### ➤ Diagramme d'impédance

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouches

Les Figures (III.57 et III.58) représentent la variation de la réactance et résistance pour différentes position du même défaut (10mm) alterné sur les trois couches

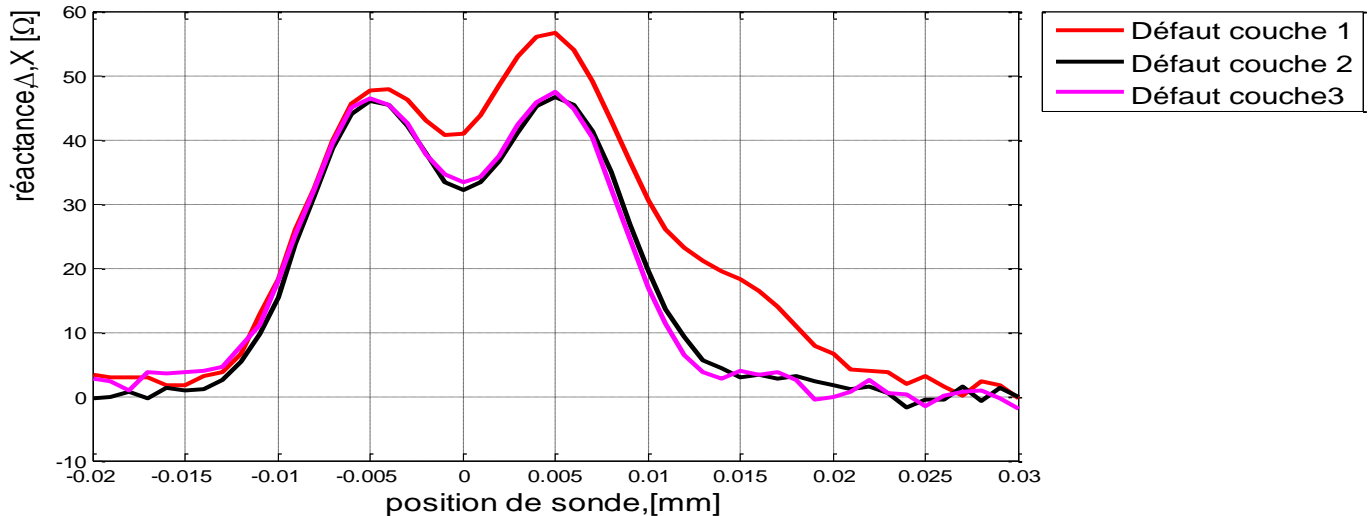


Figure III. 57. Variation de la  $\Delta X$  en fonction de position de sonde. avec Variation de la position du défaut 10[mm].

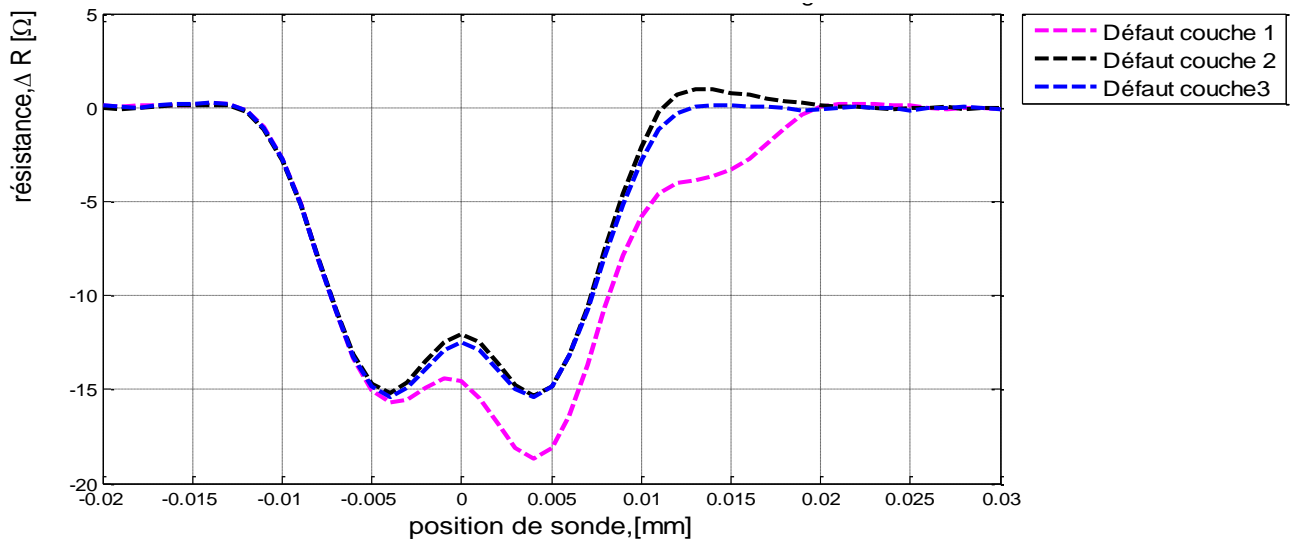


Figure III. 58 . Variation de la  $\Delta R$  en fonction de position de sonde. avec variation de la position du défaut 10[mm].

On remarque que les valeurs des variations de la réactance et résistance varient proportionnellement avec l'augmentation de hauteur du défaut et sa position.

➤ *Diagramme de phase*

## Chapitre III. Simulation d'une structure rivetée multicouche

La Figure (III.59 ), représente les signaux des diagrammes de phases des variations de la réactance (partie imaginaire  $\Delta X$ ) en fonction des variations de la résistance (partie réelle  $\Delta R$ ) pour défaut (10mm),

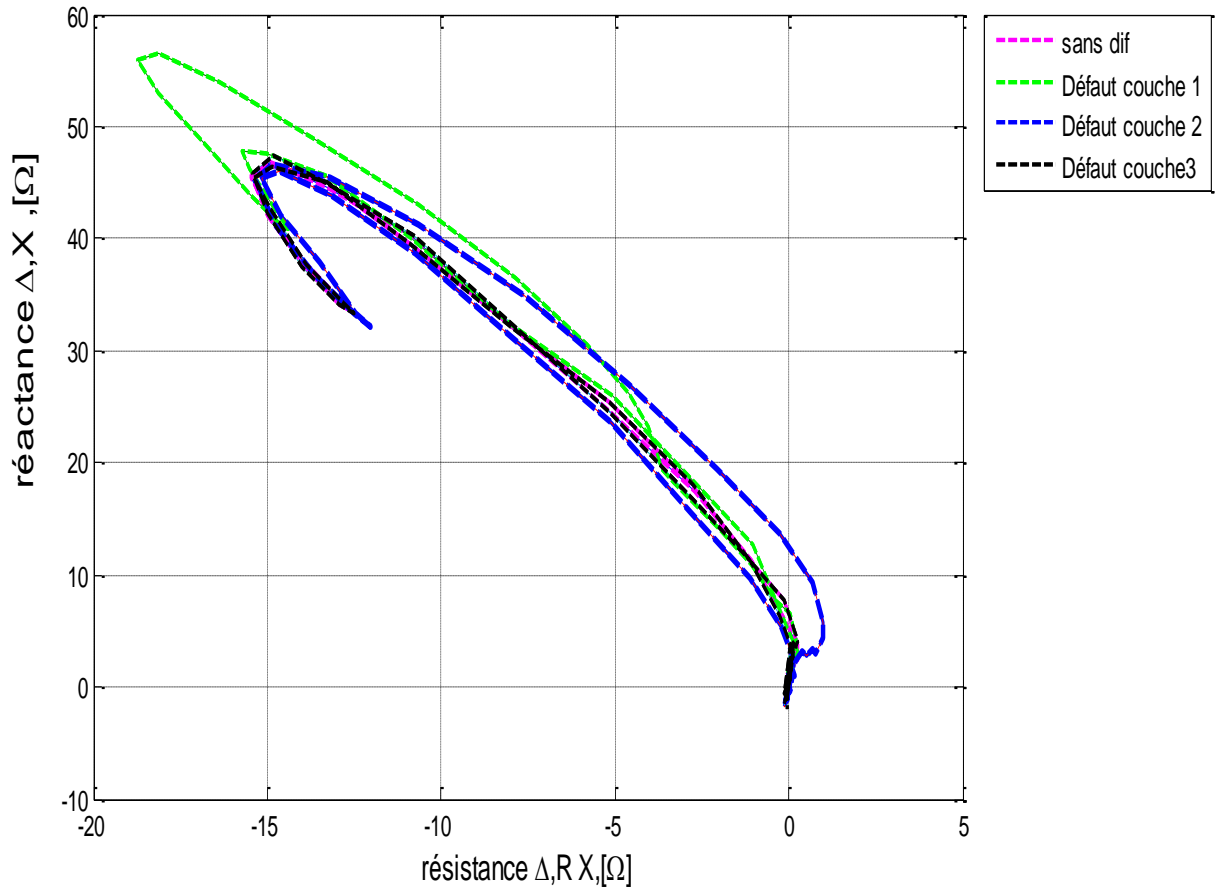
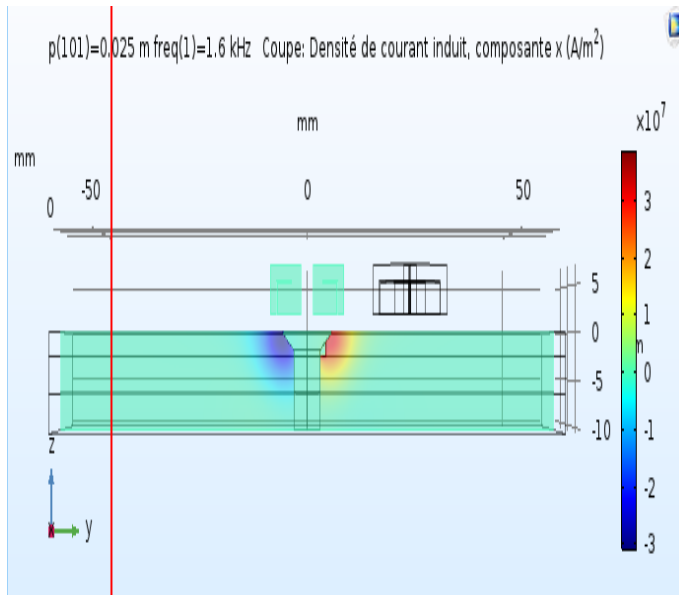


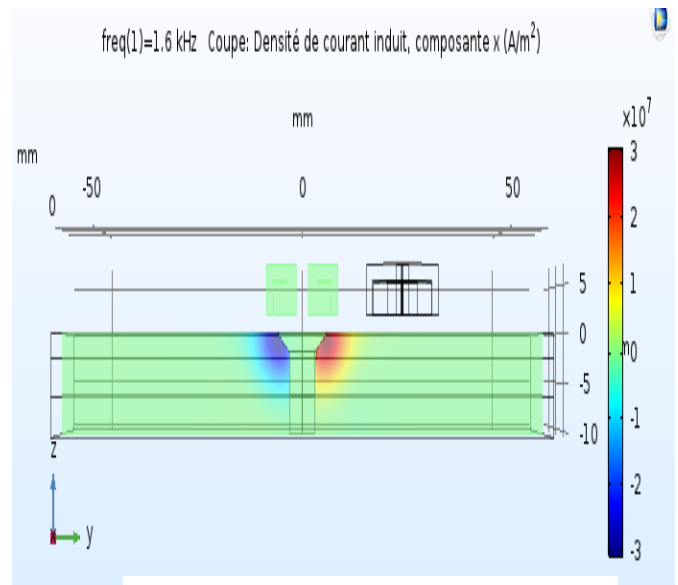
Figure III. 34 . Signaux de phases  $\Delta X$  en fonction de  $\Delta R$ , avec variation de la position du défaut 10[mm].

On constate que toujours la sensibilité est plus grande pour les couches supérieures .soit du point de vue amplitude ou phase, donc on peut amené à détecter des défaut par le digramme de phase au lieu du digramme d'impédance, Figure III. 59

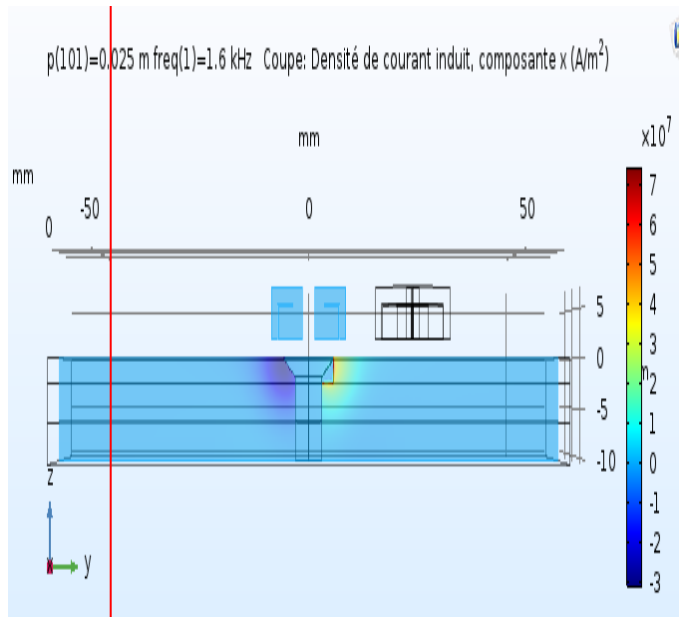
## III.3.4.3 Densité des courants induits pour défauts dans la première couche



Longueur du défaut= 0.04 mm



Longueur du défaut = 0.07 mm



Longueur du défaut =2.8mm

**Longueur du défaut=7.5mm**

**Figure III. 60 . Densité des courants induit pour différentes longueurs de défaut couche 1**

D'après la Figure (III.60), on peut constater que la densité des courants induits selon l'axe x est proportionnelle à la longueur des défauts, le manque de matière se traduit par une augmentation de la densité de courant

### **III.3.5 Conclusion**

*Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des différents cas de simulation pour une structure multicouches rivetée (3 couches, avec trou et rivet), auparavant nous avons validé notre modèle par comparaison aux résultats de : Choua et Paillard*

*Les résultats obtenu montrent une très bonne sensibilité puisqu'on pu détecter des défauts de l'ordre de 0.4 mm, même dans des couche éloignée et sous la tête de rivet.*

*On peut conclure que la sensibilité de la détection dépend de la longueur du défaut par rapport à la longueur de la tête du rivet (supérieur et inférieur), la fréquence, lift-off et la position du défaut dans chaque couche.*

# *CONCLUSION GENERALE*

---

### Conclusion générale

*Le travail présenté dans ce rapport avait pour objectif l'étude et l'analyse des performances des systèmes de CND par CF pour structure multicouches rivetées. Nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui régissent les procédés de contrôle ; (Nacereddine, 2015).*

*Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie, et enfin le procédé la technique des courants de Foucault. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients. C'est l'examen par les courants de Foucault qui constitue le sujet de ce travail. Le choix d'un tel contrôle est justifié par sa simplicité, réalisation pratique non coûteuse. Dans la deuxième partie, nous avons rappelés la modélisation du CND par CF par méthode des éléments finis (MEF).*

*La détection des fissures permet de prévenir la destruction des pièces en fonctionnement et d'augmenter la fiabilité des produits industriels en générale et plus particulièrement dans le domaine à risque comme l'aéronautique la détection précoce peut éviter des pertes humaines et matériels.. C'est dans ce contexte qu'un modèle à été développé pour faciliter la modélisation de défauts fins dans une structure multicouche rivetée.*

*Les travaux présentés dans ce mémoire traitent de la modélisation CND-CF par la méthode des éléments finis (MEF) sous COMSOL Multiphysics ; un modèle d'une structure multicouche rivetée a été élaboré avec une bobine munie d'un noyau en pot 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.*

*Les résultats obtenus montrent que la sensibilité de la détection dépend de la position du défaut par rapport à la couche et de sa longueur par rapport à la tête du rivet , plus le défaut est éloigné plus la détection est faible et de même lorsque sa longueur est inférieure à la tête du rivet, et inversement elle plus nette pour la couche supérieure et pour défauts de longueurs supérieure à la tête du rivet on pu aussi mettre en évidence l'effet de la fréquence et du lift-off sur le signal de détection .*

*REFERENCES*

*BIBLIOGRAPHIQUES*

---

### Références Bibliographiques

- [1]: **HELIFA, Bachir**, « *Contribution A La Simulation Du Cnd Par Courants De Foucault En Vue De La Caracterisation Des Fissures Debouchantes.* », . Thèse de Doctorat, université de NANTES école doctorale, Nantes 2012.
- [2]: **Oussama, BENSALAH**, «*Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel* », Mémoire de master en génie électrique, Université de M'sila, 2012.
- [3]: **Yahya, CHOUA**, «*Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault*», Thèse de doctorat, Orsay, Université Paris Sud - Paris XI, Français.2009.
- [4]: **Diraison, Yohan Le.** CACHAN : L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE Cachan, 2009.
- [5]: **KHEBBAB, MOHAMED**, «*Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND)* », mémoire de Magistere en Elettrotechnique, Université de Constantine , 2007.
- [6]: **MIX, PAUL E. 2005.** «*Introduction to nondestructive testing*»: a training guide. United States of America , 2005.
- [7]: **Meziane, HAMEL. 2012.** «*Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques*». Mémoire de Magister, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-ouzou :, 2012.
- [8]: **NABIL, BENHADDA.** «*Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault.* », Mémoire de Magistère En Electrotechnique, Université de Batna ,2006.
- [9]: **BENSAID, Samir. 2010.** «Cours théorie de champ», Université de de M'sila , 2010
- [10]: **PAILLARD, Séverine.** « *Développement D'un Modèle Pour Le Contrôle Non Destructifpar Courants De Foucault De Structures Rivetées En Aéronautique*», Thèse de doctorat, Université Paris Sud 11 France , 2008.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [11]: **TAREK, BOUCHALA** , « *Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. – Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite* », *Mémoire de Magister en Electrotechnique*, Université de Batna , 2008.
- [12]: **Ala-Eddine Lakhdari** , « *Etude Et Modélisation De Capteurs En Cnd Par Courants De Foucault :Application A La Détection Des Fissures* » , *Mémoire de Magister, Electricité industrielle* , Université de Biskra ,2011.
- [13]: **Konstantinos Pipis** , «*Eddy-Current Testing Modeling of Axisymmetric Pieces With Discontinuities Along the Axis by Means of an Integral Equation Approach*», *Thèse de Doctorat* , Université Paris Sud, Paris 2015.
- [14]: **I. Dufour, M. Busawon, D. Premel**, «*General Analysis of Inductive Sensor Based Systems.* », *Thèse de Doctorat* , France , 1994.
- [15]: **Meziane, HAMEL**, «*Etude Et Réalisation D'un Dispositif de Détection de Défauts par Méthodes Electromagnétiques*». *Mémoire de Magister* , Université de Tizi - Ouzou :, 2012.
- [16]: **Adib, SAFER Omar**, « *Etude Et Modélisation De Capteur A Courants De Foucault Pour Le Contrôle Non Destructif (CND)* », *Mémoire master en génie électrique* Université de M'sila , 2014.
- [17]: **Chiara ZORNI**, « *Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault de Milieux Ferromagnétiques : de l'expérience au Modèle d'interaction*», *Thèse de Doctorat*, Université Paris Sud11 ; Paris 2012.
- [18]: **DUMONT-FILLON, Jacques**, « *Contrôle non Destructif (CND)* ». *Thèse de Doctorat*, Paris , 2006
- [19]: **Houda, ZAIDI. 2012.** «*Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples*». *Thèse de Doctorat* , Université paris-sud école doctorale, Paris ,2012.
- [20]: **Nacereddine, AISSANI.** «*Contrôle Non Destructif (Cnd) Par Courants Defoucault (Cf) , Utilisation des Capteursmagnetiques à Tres Haute Sensibilite* » ; *Mémoire de Mastere* , *Ingénierie des Systèmes Électromécaniques*, Université de M'sila , 2015.

## Résumé du rapport bibliographique du projet de MDM

Le contrôle non destructif (CND) a pour but d'évaluer l'intégrité d'une pièce sans la détériorer. Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue aussi un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance. Le CND-CF est très utilisé dans les domaines à risque comme l'aéronautique où la détection préventive de fissure peut éviter des dégâts important en vie humaine et matériels, c'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, à savoir la modélisation et la simulation, sous COMSOL Multiphysics, pour la détection de défaut dans des structures multicouches rivetées pour différentes position du défaut et de longueur variable par rapport à la tête du défaut.

**Mots clé :** Contrôle non destructif (CND), capteur à courants de Foucault (CCF), fissures méthode des éléments finis (MEF) L'objectif.

## ملخص تقرير المراجع لمشروع مذكرة الماستر

المراقبة الغير مهدمة اختبار يهدف لتقييم سلامة القطعة دون الإضرار بهاتهدف هذه المرحلة من العملية الصناعية إلى ضمان الاستخدام الآمن للأجزاء المتحكم فيها. كما أنه يلعب دورًا اقتصاديًا هامًا. بمعنى انه يسمح بإدارة محسنة للصيانة. يستخدم على نطاق واسع في المناطق المعرضة للخطر مثل الطيران. حيث يمكن عن الكشف عن الشقوق من اجل تجنب حدوث تلف كبير في حياة الإنسان والمواد. وفي هذا السياق يكون عملنا وتحديد النماذج والمحاكاة. تحت برنامج للكشف عن الأخطاء في الهياكل متعددة الطبقات وفي مختلف الوضعيات ومختلف الأطوال لهذه الأخطاء بدلالة رأس المعيب

**كلمات مفتاحية :** المراقبة الغير تدميرية , لاقط تيارات فوكو, الشقوق , طريقة العناصر المنتهية .

## Abstract of bibliographic report of the MM project

Non Destructive Testing (NDT) is intended to assess the integrity of a part without damaging it. This stage of the industrial process is intended to guarantee the safe use of the controlled parts. It also plays a significant economic role, in the sense that it allows optimized management of maintenance. The CND-CF is widely used in risk areas such as aeronautics where preventive crack detection can avoid significant damage in human life and material, it is in this context that our work, namely the modeling and simulation, under COMSOL Multiphysics, for error detection in multilayer structures riveted for different error position and variable length with respect to the defect head.

**Index Terms:** Non-destructive testing (NDT), eddy currents, cracks, finite element method.

**4.6.14**