

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIES**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**N° : ELM-**



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : ELECTROMECHANIQUE**

**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

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

**Par:**

**LAMOUCAT Saddik**

**BENAMER Ramadhane**

**Intitulé**

**Simulation de la Détection de Défauts de  
Corrosion de Rail de Train par CND-CF**

**Soutenu devant le jury composé de:**

<b>Dr. BELKHIRI Salah</b>	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
<b>Dr. ABDOU Abdelhak</b>	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
<b>Dr. CHERIF Bilal Djamal Eddine</b>	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2021/ 2022**

# **Dédicaces & Remerciements**

**Dédicaces**

**Nous dédions le présent travail à**  
**Nos parents,**  
**Nos familles,**  
**Et à tous nos amis.**

## Remerciements

*Nous remercions **LE BON DIEU** de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.*

*Par la même occasion nos sincères remerciements seront adressés à notre encadreur le **Dr. ABDOU Abdelhak** qui nous a fait bénéficier de ses conseils, sa patience, sa disponibilité et son dévouement pour que nous puissions élaborés ce travail.*

*Nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont accepté de juger ce travail d'une part, et d'autre notre gratitude envers tous les enseignants et personnel administratif du département d'électrotechnique pour leurs efforts et engagement pour nos offrir les meilleures conditions de formation durant nos années d'études.*

*On ne peut pas oublier de remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ainsi que toute la promotion **ELECTROMECHANIQUE 2021/2022**.*

# Résumé

## Résumé

### Résumé du rapport bibliographique du projet de Mémoire de Master

La corrosion n'est pas souvent détectable par une simple inspection visuelle. Si on laisse la corrosion agir trop longtemps, sans la détecter, elle diminuera la résistance des surfaces et provoquera probablement des défauts structurels graves des systèmes voies de rail. Aussi bien pour la sécurité que pour des considérations économiques, les rails de train doivent être inspectés régulièrement. Dans ce contexte nous proposons un système de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) pour la détection de défaut de corrosion de rail.

Mots clés : Contrôle Non Destructif (CND), Courants de Foucault (CF), Corrosion, Rail, Sonde multiéléments, alimentation Multiplexée

### Summary of the bibliographic report of the Master Thesis project

Corrosion is not often detectable by simple visual inspection. If corrosion is left to act for too long, undetected, it will decrease surface strength and likely cause serious structural failures in rail track systems. Both for safety and for economic considerations, train tracks must be inspected regularly. In this context we propose a non-destructive testing system by eddy currents (CND-CF) for the detection of rail corrosion defects.

Keywords: Non Destructive Testing (NDT), Eddy Currents (CF), Corrosion, Rail, Phased Array Probe, Multiplexed Power Supply.

### ملخص التقرير الببليوغرافي لمشروع رسالة الماجستير

يمكن غالبًا اكتشاف التآكل عن طريق الفحص البصري البسيط. إذا تُرك التآكل ليعمل لفترة طويلة جدًا ، دون أن يتم اكتشافه ، فسيؤدي ذلك إلى تقليل قوة السطح ومن المحتمل أن يتسبب في حدوث أعطال هيكلية خطيرة في أنظمة مسار السكك الحديدية. لاعتبارات تتعلق بالسلامة والاقتصادية ، يجب فحص مسارات القطارات بانتظام. في هذا السياق ، نقترح نظام اختبار غير مدمر بواسطة التيارات الدوامة (CND-CF) للكشف عن عيوب تآكل السكك الحديدية.

الكلمات الرئيسية: اختبار غير مدمر (NDT) ، تيارات إيدي (CF) ، تآكل ، سكة حديدية ، مسبار صفيح مرحلي ، مزود طاقة متعدد الإرسال

# **Tables des Matières, Figures et Tableaux**

# Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iv
Table des matières .....	v
Liste des Figures.....	vii
Liste des Tableaux.....	ix
Nomenclature.....	x
Introduction générale.....	1
Chapitre I . Généralités sur le Contrôle Non Destructif.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Principe de détection d'un défaut .....	3
I.3. Différentes techniques de C N D .....	4
I.3.1. Examen visuel .....	4
I.3.2. Ressuage .....	5
I.3.3. Radiographie.....	7
I.3.4. Contrôle par Ultrasons.....	8
I.3.5. Flux de fuite magnétique (magnétoscopie) .....	10
I.3.6. CND par courants de Foucault .....	11
I.4. Principe des capteurs inductifs .....	15
I.5. Classification des capteurs utilisés en CND-CF .....	16
I.5.1. Classification selon la géométrie.....	16
I.5.2. Classification selon la fonction .....	18
I.5.3. Classification selon le mode de contrôle .....	20
I.6. Type des defaults .....	21
I.6.1. Hétérogénéités et defaults.....	21
I.6.2. Défauts de surface .....	21
I.6.3. Défauts internes .....	22
I.7. Synthèse .....	22
I.7.1. Méthodes couplées .....	23
I.8. Conclusion .....	24
Chapitre II . Modélisation du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault .....	25
II.1. Introduction.....	25

II.2.	Modélisation du dispositif de CND par CF .....	25
II.3.	Mise en équations .....	27
II.3.1.	Equations de maxwell.....	27
II.3.2.	Lois constitutives .....	28
II.3.3.	Conditions aux limites .....	28
II.3.4.	Conditions de continuité.....	28
II.3.5.	Conditions de Jauge.....	29
II.3.6.	Hypothèses simplificatrices.....	30
II.3.7.	Champs et potentiels.....	31
II.4.	Conclusion .....	31
Chapitre III	Simulation de la détection de défaut de corrosion de rail de train par CND- CF	33
III.1.	Introduction .....	33
III.2.	Technologie de la voie ferroviaire .....	33
III.2.2.	Contrôle non destructif par courants de Foucault des voies ferroviaires.....	36
III.2.3.	Cahier des charges .....	36
III.2.4.	Etapes de simulation du système de contrôle sous COMSOL.....	37
III.2.5.	Effet de la présence d'un défaut sur la distribution des courants induits .....	42
III.2.6.	Effet de variation des paramètres du défaut sur les variations d'impédance..	43
III.3.	Technologie des courants de Foucault multiéléments en mode multiplexé.....	49
III.3.1.	Capteurs multiéléments ECA (Eddy Current Array).....	49
III.3.2.	Alimentation en mode multiplexage.....	50
III.3.3.	Géométries d'une sonde CF multiéléments .....	50
III.3.4.	Interprétation du signal .....	52
III.3.5.	Systèmes multiéléments à étudier échantillon 1 .....	53
III.3.1.	Systèmes multiéléments à étudier échantillon 2 .....	58
III.4.	Conclusion:.....	63
	Conclusion générale .....	64
	Bibliographie .....	66

## Liste des Figures

### Chapitre I

Figure I. 1. Principe de l'examen visuel .....	5
Figure I. 2. Principe du contrôle par ressuage.....	6
Figure I. 3. Principe du contrôle par radiographie.....	7
Figure I. 4. Principe du contrôle par ultrasons.....	9
Figure I. 5. Principe du contrôle par magnétoscopie.....	10
Figure I. 6. Principe du contrôle par courants de Foucault.....	12
Figure I. 7. Répartition des courants de Foucault dans une pièce conductrice.....	13
Figure I. 8. Capteur Magnétique ou CM.....	16
Figure I. 10. Bobine encerclante.....	16
Figure I. 9. Capteur a courant de Foucault ou CF.....	16
Figure I. 11. Bobine interne.....	17
Figure I. 12. Bobine ponctuelle.....	17
Figure I. 13. Bobine plate.....	18
Figure I. 14. Bobine interne tournante.....	18
Figure I. 15. Capteur à double fonction.....	19
Figure I. 16. Capteur à fonctions séparées.....	19
Figure I. 17. Mesure en mode absolu par un pont d'impédance.....	20
Figure I. 18. Mesure en mode différentiel par un pont d'impédance.....	21

### Chapitre III

Figure II. 1. Système capteur-pièce-fissure.....	26
Figure II. 2. Problème magnétodynamique type.....	26
Figure II. 3. Interface entre deux milieux.....	29

### Chapitre III

Figure III. 1. Profil du rail .....	33
Figure III. 2. Répartition des contraintes sur une traverse.....	34
Figure III. 3. Exemples de corrosion de rail de train.....	35
Figure III. 4. Dessin de la géométrie tridimensionnelle.....	38
Figure III. 5. Domaine du système à étudier.....	38
Figure III. 6. Maillage 3D du domaine d'étude.....	40
Figure III. 7. Maillage du rail .....	40
Figure III. 8. Zoom Maillage du rail.....	40
Figure III. 9. Variation de réactance d'impédance en fonction du déplacement.....	41
Figure III. 10. Variation de résistance d'impédance en fonction du déplacement.....	41
Figure III. 11. Cartographie des courants induits à 500 Hz.....	42

Figure III. 12. Positionnement des 3 défauts de largeurs différentes sur le rail.....	43
Figure III. 13. Effet de la Variation de la largeur du défaut sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.....	44
Figure III. 14. Effet de la Variation de la largeur du défaut sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.....	44
Figure III. 15. Effet de la Variation de la longueur du défaut sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.....	45
Figure III. 16. Effet de la Variation de la longueur du défaut sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.....	46
Figure III. 17. Effet de la Variation du lift-off sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.....	47
Figure III. 18. Effet de la Variation du lift-off sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.....	47
Figure III. 19. Effet de la Variation de la fréquence sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.....	48
Figure III. 20. Effet de la Variation de la fréquence sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.....	48
Figure III. 21. Substitution d'un balayage de 10 parcours avec un autre d'un seul parcours, (27).....	49
Figure III. 22. Principe du multiplexage pour une sonde multiéléments à CF.....	50
Figure III. 23. Structure linéaire uniforme.....	51
Figure III. 24. Une répartition d'une rangée de quatre sondes avec une rangée de 3 ouvertures.....	51
Figure III. 25. Géométries planaires d'un multiélément.....	52
Figure III. 26. Principe de détection d'un système multiéléments.....	52
Figure III. 27. Principe de détection d'un système multiéléments échantillon1.....	53
Figure III. 28. Maillage du système multiéléments à étudier « échantillon1 ».....	53
Figure III. 29. Maillage du rail et des capteurs, « échantillon1 ».....	54
Figure III. 30. Zoom du maillage du rail et des capteurs, « échantillon1 ».....	54
Figure III. 31. Variation de la partie imaginaire de l'impédance » échantillon1.....	56
Figure III. 32. Variation de la partie réelle de l'impédance » échantillon1.....	57
Figure III. 33. Principe de détection d'un système multiéléments, échantillon 2.....	58
Figure III. 34. Maillage du système multiéléments à étudier, échantillon 2.....	59
Figure III. 35. Maillage du rail et des capteurs, échantillon 2.....	59
Figure III. 36. Zoom du maillage du rail et des capteurs, échantillon 2.....	59
Figure III. 37. Imagerie 3D de variation de réactance d'impédance du balayage surfacique du rail muni de 3 défauts de largeurs différentes.....	61
Figure III. 38. Imagerie 3D de variation de résistance d'impédance du balayage surfacique du rail muni de 3 défauts de largeurs différentes.....	62

## **Liste des Tableaux**

### **Chapitre I**

Tableau I. 1 .Tableau récapitulatif des techniques conventionnelles de CND.....23

### **Chapitre III**

Tableau III. 1 Caractéristiques géométriques et physiques du système de rail. ....39

## Nomenclature

### Acronymes

CND	Contrôle Non Destructif
END	Evaluation Non Destructif
CF	Courants de Foucault
CND-CF:	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
CCF:	Capteur par Courants de Foucault.
CM	Capteur Magnétique.
MEF	Méthode des Eléments Finis.
MCC	Méthode des Circuits Couplés.
2D	Bidimensionnel.
3D	Tridimensionnel.

### Symboles

A	Potentiel Vecteur magnétique	(T.m)
B	Induction magnétique	(T)
D	Induction électrique	(C/m <sup>2</sup> )
E	Champ électrique	(V/m)
$f$	Fréquence	(Hz)
H	Champ magnétique	(A/m)
I :	Intensité de courant électrique	(A)
J	Densité de courant	(A/m <sup>2</sup> )
J <sub>s</sub> :	Densité de courants surfaciques	(A/m <sup>2</sup> )
$t$	temps	(s)
U :	Tension aux bornes du capteur	(V)
V	Potentiel scalaire électrique	(V)
$\Phi$	Potentiel scalaire magnétique	(T.m)
$\omega$	Pulsation électrique	(rad/s)
$\sigma$	Conductivité électrique	(S/m)

$\sigma_p$ :	Conductivité électrique de la pièce	(S/m)
$\rho$	Résistivité électrique	( $\Omega$ .m)
$\delta$	Épaisseur de peau	(m)
$\mu_0$	Perméabilité magnétique absolue du vide	$4 \pi 10^{-7}$ (H/m)
$\mu_r$	Perméabilité magnétique relative	
$\epsilon_0$	Permittivité électrique absolue du vide	$36\pi 10^{-9}$ (F/m)
$\epsilon_r$	Permittivité électrique relative	
R	Résistance électrique	( $\Omega$ )
$\Delta R$	Variation de la résistance	( $\Omega$ )
L	Inductance propre	(H)
X	Réactance	( $\Omega$ )
$X_n$	Réactance normalisée	
$\Delta X$ :	Variation de la réactance	( $\Omega$ )
Z	Impédance	( $\Omega$ )
$\Delta Z$ :	Variation de l'impédance	( $\Omega$ )
S :	Surface	(m <sup>2</sup> )

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

*Les processus industriels et les pièces fabriquées sont devenus de plus en plus complexes et exigeants en termes de qualité et de sécurité. La défaillance de ces pièces peut entraîner des conséquences plus ou moins importantes. Par exemple, dans les domaines aéronautique, nucléaire et chemin de fer ces conséquences s'expriment souvent en termes de sécurité des personnes ou de dégâts environnementaux. Souvent, bon nombre d'industriels utilisent des contrôles destructifs pour vérifier la sécurité de leurs produits. Ce type de contrôle est lent, coûteux et ne peut se faire que sur un nombre limité de pièces. De plus, il n'est pas applicable dans les systèmes déjà en fonctionnement. C'est pourquoi, le contrôle non destructif (CND) est devenu une nécessité industrielle. Il vise à contrôler la qualité des pièces inspectées sans les endommager. L'enjeu du CND est aussi d'ordre économique: la rapidité et la fiabilité des techniques employées sont capitales pour la réduction des coûts de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des installations, (1)*

*La méthode de contrôle par courants de Foucault est largement utilisée dans la sidérurgie, l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire ou encore dans transport ferroviaire. C'est l'une des nombreuses méthodes d'essais électromagnétiques utilisées en contrôles non destructifs (CND) faisant usage de l'induction électromagnétique pour détecter et caractériser les défauts de surface et de sous surface dans les matériaux conducteurs et dans les métaux plus spécifiquement. (2)*

*Le contrôle non destructif par courants de Foucault (symbole ET – Eddy Current Testing en anglais) consiste à créer, dans des matériaux conducteurs électriques, des courants induits au moyen d'un capteur. Ces courants induits circulent localement dans le matériau et ont une distribution et une répartition qui dépendent du champ électromagnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de la perméabilité magnétique de la pièce examinée, (3)*

*Dans l'industrie ferroviaire, des essais non destructifs (CND) sont requis pour les actifs ferroviaires, notamment les essieux, les roues, les bogies, les wagons et le chemin de fer lui-même. L'intégrité de l'infrastructure ferroviaire est au cœur de systèmes de transport sûrs et économiques, évitant les défaillances entraînant des conséquences inimaginables et des pertes financières. Plusieurs méthodes CND différentes sont déployées pour l'évaluation de l'intégrité structurelle des infrastructures ferroviaires, certaines complémentaires les unes des autres.*

*Un rail posé en voie s'oxyde rapidement, du fait de son contact avec l'environnement extérieur généralement à ciel ouvert. Néanmoins nous parlons de « défauts de corrosion » que lorsque que les parties les plus fines du rail (à savoir l'âme, la partie verticale au milieu*

du profil, et le patin, la partie horizontale inférieure du profil, perdent plusieurs millimètres de matière. Les limites d'alerte, d'intervention voire même de ralentissement des trains liées à ces pertes de matière par corrosion, et dépendent aussi du trafic ferroviaire de la ligne et du profil de rail.

De nombreux facteurs rendent la corrosion plus sensible, tel que les milieux humides comme les tunnels ou le platelage des Passages à Niveau (PN), les environnements proches de la mer, certains types d'électrification de la voie ferrée ...

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, c'est-à-dire la simulation 3D sous COMSOL Multiphysics de la détection de défauts de rail de train dus soit à la corrosion ou à l'arrachement de matière par la technique de CND-CF

Ce mémoire sera scindé en trois chapitres dont nous présentons brièvement les lignes principales ci-après :

Un premier chapitre, dont le but est de donner une description des principales familles de procédés du contrôle non destructif, à savoir : les procédés optiques, les procédés par flux de fuite, les procédés à ultrasons, les procédés radiographiques et connexes, enfin les procédés de contrôle par courants de Foucault. On terminera ce chapitre par un tableau récapitulatif sur les différentes techniques et leurs applications.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF).

Quant au troisième chapitre, nous présenterons les étapes de modélisation et de simulation d'un système de contrôle non destructif par le courant de Foucault tridimensionnel sous COMSOL Multiphysics qui nous permettra la détection de défaut de rail par courant de Foucault.

Dans un premier temps nous utiliserons un balayage linéaire tout en mettant en évidence l'effet des paramètres géométriques du défaut, la fréquence et lift-off sur l'impédance du capteur. Dans un deuxième temps un balayage surfacique grâce à une série d'éléments simples disposés en rangée, permettant aux utilisateurs de couvrir une plus grande surface en un seul passage. Pour éviter l'effet de mutualité entre bobines, on alimentera ses capteurs par une alimentation en mode multiplexage.

Le multiplexage consiste à activer et désactiver des bobines dans des séquences spécifiques pour tirer parti de la largeur de la sonde. Le multiplexage minimise également les interférences entre les bobines à proximité immédiate (inductance mutuelle) et maximise la résolution de la sonde.

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

# **Chapitre I :**

## **Généralité sur les**

### **Techniques de CND**

## Chapitre I . Généralités sur le Contrôle Non Destructif

### I.1. Introduction

*Les méthodes du CND sont actuellement utilisées pour la recherche et la classification des défauts dans les pièces d'une part, et la caractérisation des matériaux d'autre part. les techniques sont diverses (ultrasons, courant de Foucault, radiographie, ressuage, thermographie...etc.). Chacune d'elles dépend à la fois de la nature du matériau constituant les pièces à contrôler, de la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position et forme du défaut), du type de contrôle à effectuer (contrôle en ligne, sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce), la question économique (coût)...etc. Dans les dispositifs électromagnétiques utilisés en électrotechnique, tel que les machines électriques, les appareils de coupures, les appareillages à haute tension, généralement ont fait appel aux méthodes électromagnétiques ; tel que le contrôle par courant de Foucault où le phénomène électromagnétique est le phénomène prépondérant. (4) (5)*

*Dans ce chapitre, nous présentons les différentes techniques de CND existantes, en rappelant leur principe, leurs avantages et inconvénients. Etant donné, que notre recherche est axée sur la technique par courants de Foucault, cette méthodologie d'inspection ainsi que les capteurs utilisés dans cette dernière, seront présentés de manière détaillée du point de vu phénoménologique et technologique*

### I.2. Principe de détection d'un défaut

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

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

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

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

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

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

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

Certains auteurs classent également la thermographie infrarouge, l'holographie, le contrôle d'étanchéité et l'analyse de signature mécanique parmi les techniques de CND. (3)

### **I.3. Différentes techniques de C N D**

Les techniques non destructives doivent s'adapter aux matériaux que nous souhaitons contrôler.

Dans le cas des métaux, et pour un contrôle au sein du métal, il faut exploiter les phénomènes physiques qui permettent de pénétrer dans le métal et sélectionner celui qui permet le mieux de fournir les informations requises par l'utilisateur.

Actuellement, pour la plupart des métaux, il existe différents moyens de pénétrer au sein de la matière. Nous allons décrire le principe de chacun de ces moyens et faire une analyse succincte donnant une idée sur les possibilités d'emploi de chacune de ces techniques. Chaque environnement industriel impose ces conditions propres et il n'existe donc pas de méthode (universelle) permettant de réaliser le contrôle non destructif dans toutes les conditions au meilleur rendement. (6)

#### **I.3.1. Examen visuel**

##### ***I.3.1.a. Principe***

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures

ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur. (5)



**Figure I. 1. Principe de l'examen visuel .**

***1.3.1.b. Domaine d'application***

Cette technique est Applicable pour tous les matériaux et pour defaults débouchant.

***1.3.1.c. 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 limité aux défauts visibles.
- La surface doit être propre.

**1.3.2. Ressuage**

***1.3.2.a. Principe***

Cet essai permet de déceler les défauts qui apparaissent à la surface. Il est appliqué dans le cas des matériaux non magnétiques (alliages à base d'Al, de Cu, de Ti, aciers inoxydables, etc.). Son mode d'emploi est très simple. La pièce à examiner est badigeonnée de pétrole léger, coloré ou contenant une poudre fluorescente. Au lieu du pétrole léger tout autre liquide pénétrant, c.-à-d. de faible tension superficielle, peut aussi rendre le même service. Après pénétration capillaire, la surface est essuyée. Pour le cas d'un liquide fluorescent la résurgence du liquide à partir des fissures et des porosités est rendu visible par un éclairage aux rayons ultraviolets. Les fissures contenant du liquide coloré sont rendues visibles par une couche de

talc, qu'on applique sur la pièce à l'aide d'un spray, qui ensuite absorbe le liquide coloré en se teignant. L'observation, dans ce cas, se fait à l'œil nue. Les traces colorées indiquent les endroits où il y a des fissures (Figure I-2). (7)

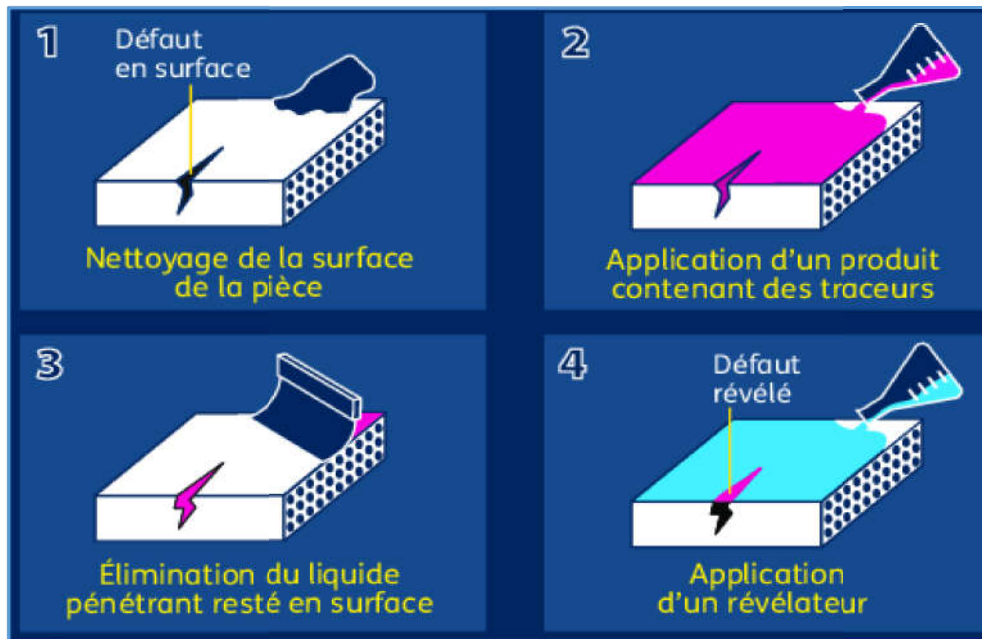


Figure I. 2 . Principe du contrôle par ressuage.

### ***1.3.2.b. 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 . (8)

### ***1.3.2.c. Avantages et Inconvénients***

#### **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 ; (6)

### I.3.3. Radiographie

#### I.3.3.a. 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.3). 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, (7)

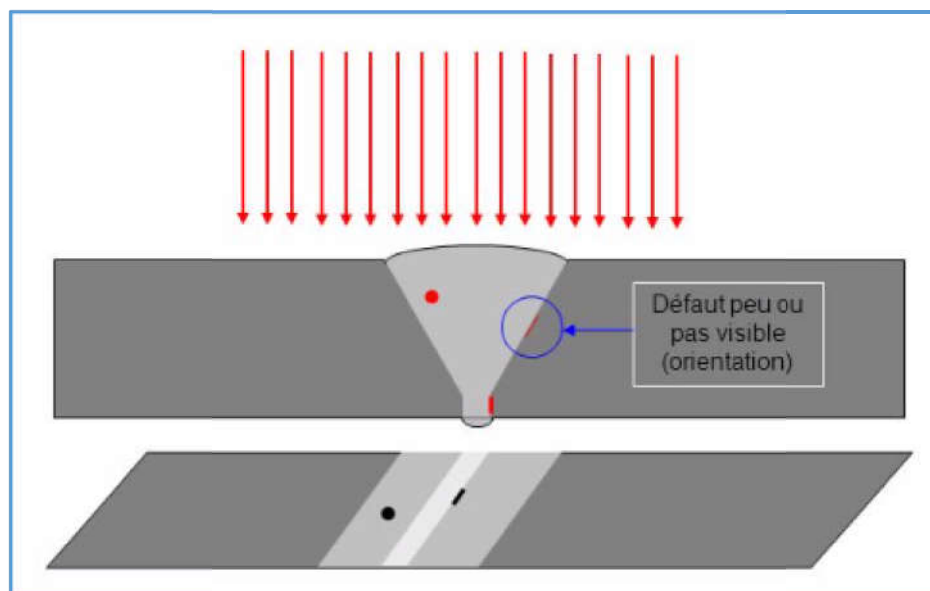


Figure I. 3. Principe du contrôle par radiographie.

### **I.3.3.b. 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 ; (8)

### **I.3.3.c. Avantages et Inconvénients**

#### **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**

- 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 sécurités 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 ; (9)

## **I.3.4. Contrôle par Ultrasons**

### **I.3.4.a. Principe**

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler.

Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives.

Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface.

L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce.

Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts (figure I – 4). (5)

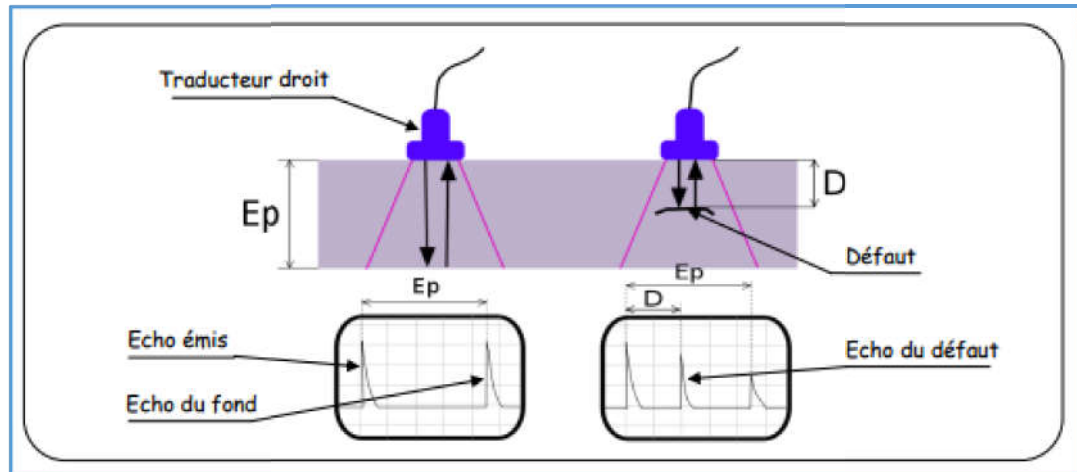


Figure I. 4. Principe du contrôle par ultrasons.

#### ***1.3.4.b. Domaine d'application***

Les ultrasons sont aussi très employés pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les textures, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers, et enfin l'estimation des contraintes mécaniques, (12) (13) (14) (15)

#### ***1.3.4.c. Avantages et Inconvénients***

##### **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**

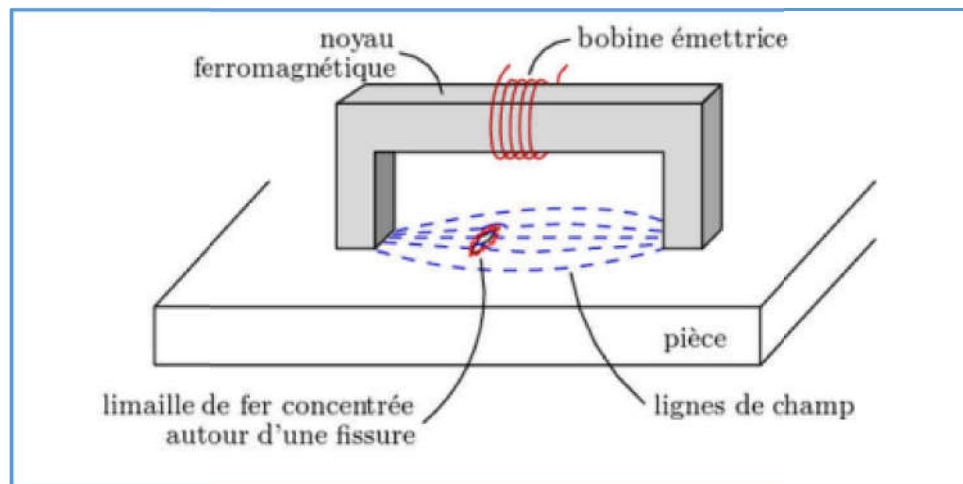
- Pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire.
- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité.

- Sensible à la géométrie (forme, rugosité).
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle) ; (8)

### **I.3.5. Flux de fuite magnétique (magnétoscopie)**

#### **I.3.5.a. 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.5). 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, (7).



**Figure I. 5 . Principe du contrôle par magnétoscopie.**

#### **I.3.5.b. 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, (6).

#### ***I.3.5.c. Avantages et Inconvénients***

##### **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 ; (10).

### **I.3.6. CND par courants de Foucault**

#### ***I.3.6.a. Principe***

Ce type de contrôle s'effectue en excitant par un champ magnétique variable la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur. En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés. (11).

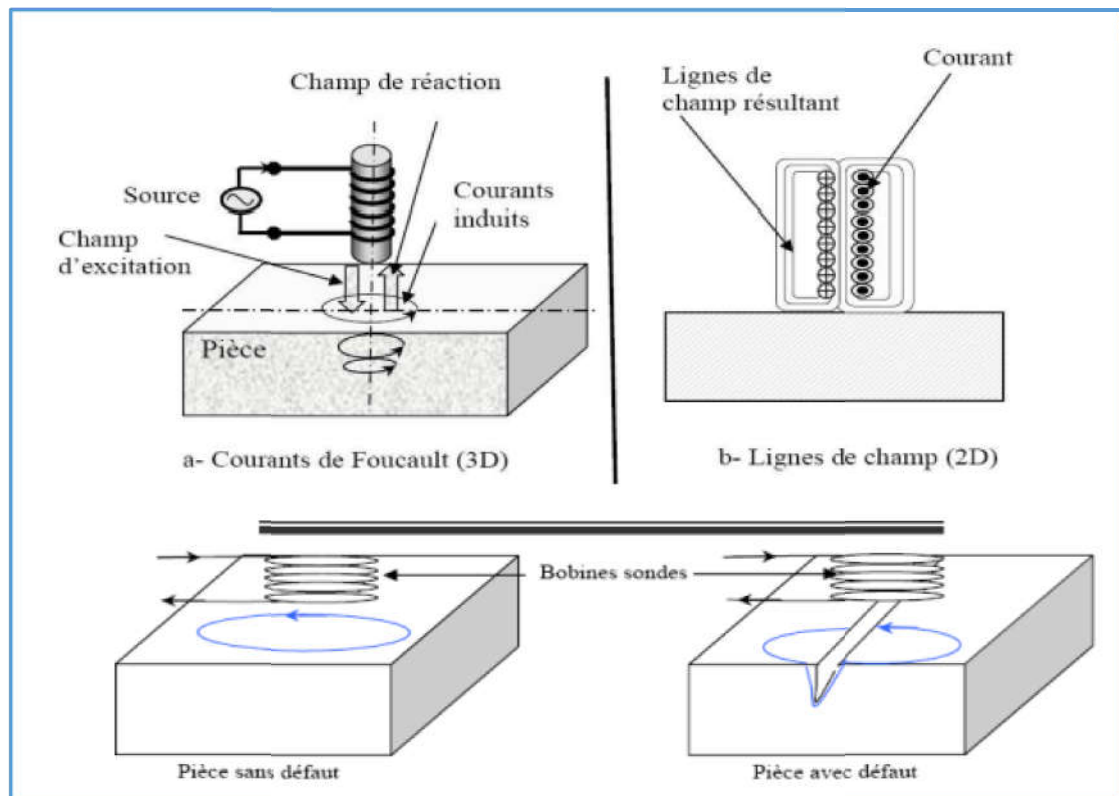


Figure I. 6 . Principe du contrôle par courants de Foucault.

#### ***1.3.6.b. 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).

#### ***1.3.6.c. Avantages et inconvénient du contrôle par Courant de Foucault***

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

- Rapidité de balayage et de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie).

- Détection possible à travers un revêtement surfacique.
- Aucune préparation particulière de la surface à contrôler.
- Qualité de détection indépendante de la vitesse de balayage.
- Pas de nécessité d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante.
- Traitement informatique avec stockage des données de simulation.
- Contrôle non polluant (8).

**b) Inconvénients**

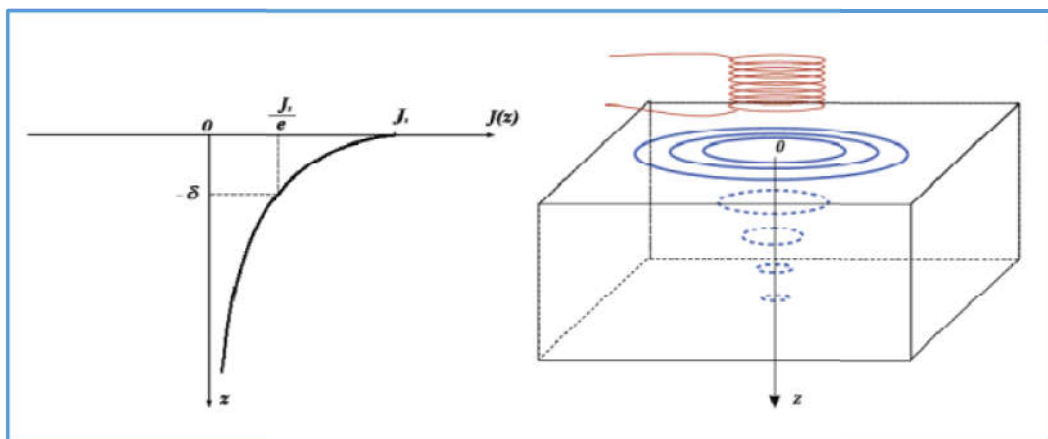
- Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites
- Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électrique.
- Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant.
- Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants, (8) .

**1.3.6.d. 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,
- L'interprétation des signaux est souvent complexe ; (7).

**1.3.6.e. 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, Figure (I.7).



**Figure I. 7. Répartition des courants de Foucault dans une pièce conductrice.**

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

par: 
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \tag{I.1}$$

- $f$  : la fréquence d'alimentation en hertz [Hz].
- $\mu_r$  : La perméabilité magnétique relative du matériau en [H/m].
- $\mu_0$  : La perméabilité magnétique du vide en [H/m].
- $\sigma$  : La conductivité électrique en [S/m].

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 :

$$J(z) = J_0 \cdot e^{-z/\delta} \quad (I.2)$$

- $Z$  : La profondeur considérée à l'intérieur de la cible en mètre [m]
- $J(z)$  : Le module de la densité de courant en fonction de la profondeur en [A/m<sup>2</sup>].
- $\delta$  : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.
- $J_0$  : densité de courant à la surface en [A/m<sup>2</sup>].

#### ***1.3.6.f. Méthode directe***

Cette méthode consiste à passer un courant dans un tube, Figure (I.8 a) où dans une plaque, Figure (I.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.

#### ***1.3.6.g. 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 lignes 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) 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) ; (8) .

#### **I.3.6.h. Objectifs des CND-CF**

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches. Du fait que l'impédance du système Capteur/Pièce est fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Cette technique est parfois utilisée pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d'autre fois pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et caractérisant les défauts (13)

Le CND-Cf est utilisé pour :

- **La caractérisation géométrique**
  - Mesure de l'entrefer.
  - Mesure de l'épaisseur.
- **La caractérisation électromagnétique**
  - Mesure de la conductivité.
  - Mesure de la perméabilité
- **Le contrôle de l'état de la santé**
  - Détection du défaut.
  - Position du défaut.
  - Taille du défaut.
  - Forme du défaut.
  - Propriété physique.

### **I.4. Principe des capteurs inductifs**

Un capteur inductif est principalement constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité, sur lequel sont bobinés un ou plusieurs enroulements parcourus par un courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et / ou magnétique dans l'entrefer du circuit modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de réluctance et de pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible. (17) Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants surfaciques dénommés courants de Foucault, qui à leur tour génèrent un champ magnétique opposant au champ excitateur. On parle dans ce cas de "Capteurs à courants de Foucault" ou "CCF".

L'effet produit par l'approche d'une cible magnétique non conductrice se traduit par une modification des lignes de champ, qui se trouvent attirées par le matériau en regard. Le dispositif fonctionne alors en "Capteur Magnétique" ou "CM". (18)

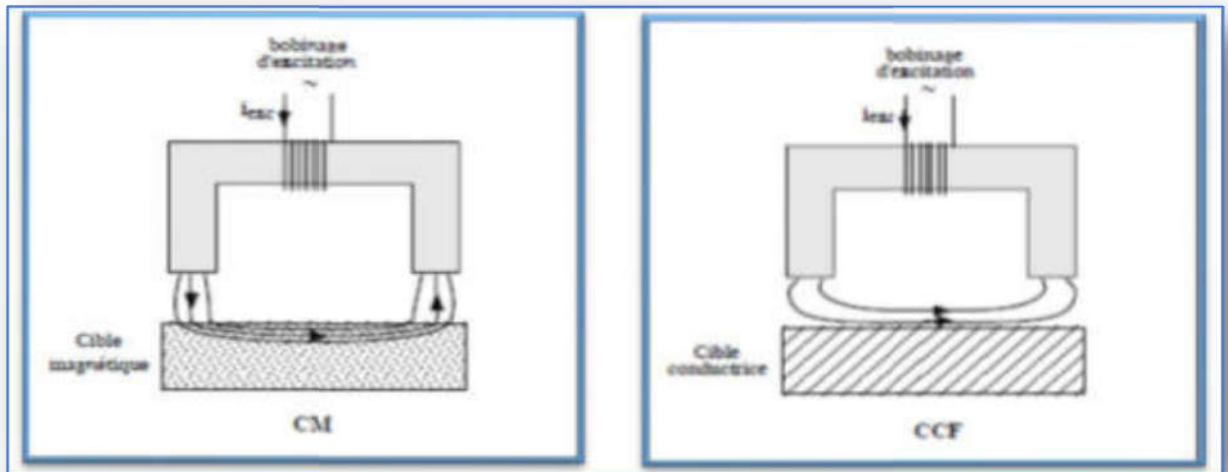


Figure I. 9. Capteur Magn

Figure I. 8. Capteur a courant de Foucault ou CF.

## I.5. Classification des capteurs utilisés en CND-CF

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs.

La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle.

### I.5.1. Classification selon la géométrie

#### I.5.1.a. Sonde encerclante

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes,... Figure (I.10).

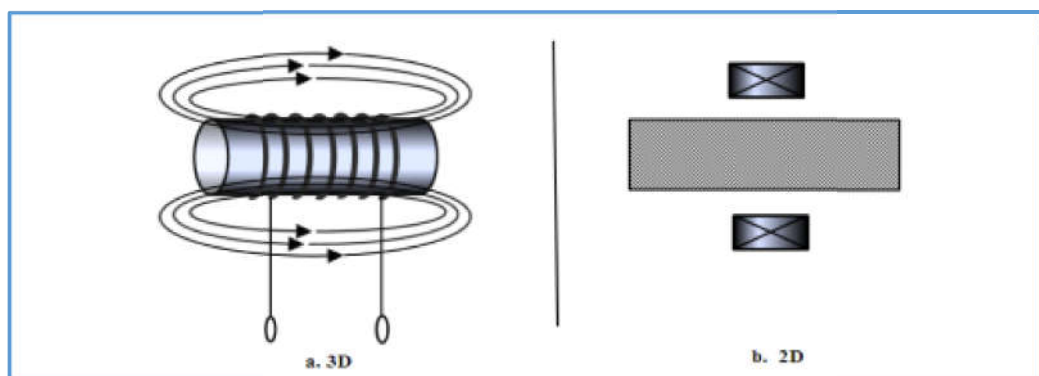
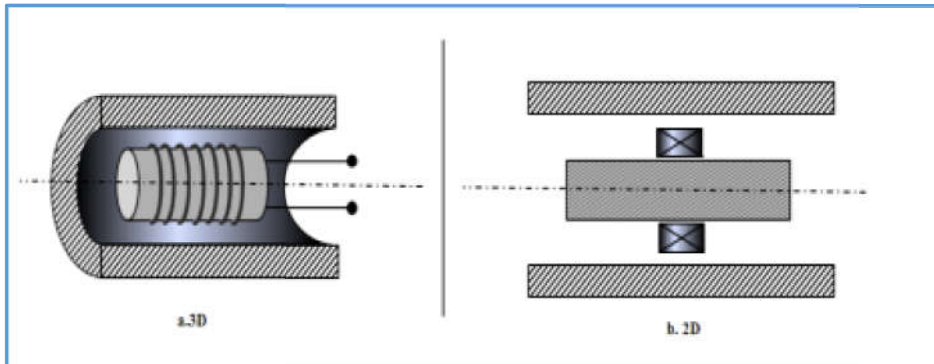


Figure I. 10 . Bobine encerclante.

**I.5.1.b. Sonde interne**

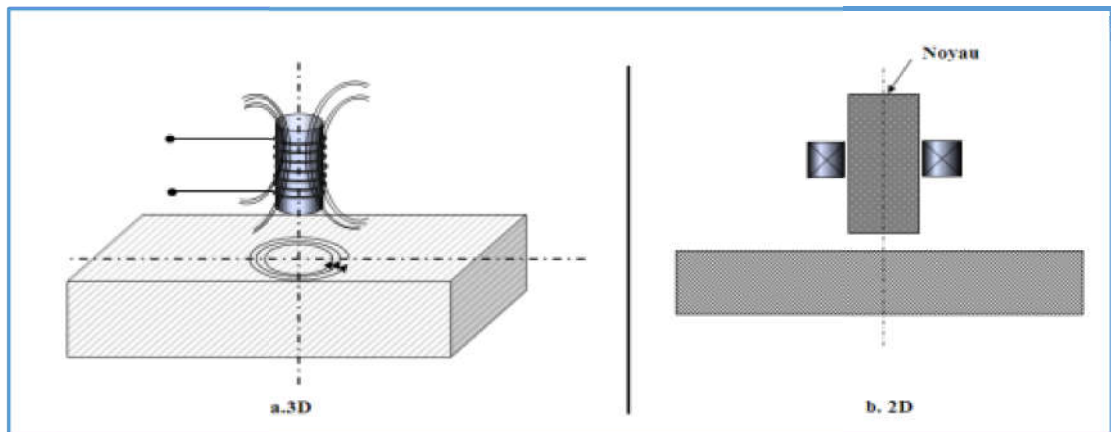
C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau (figure I. 11).



**Figure I. 11. Bobine interne.**

**I.5.1.c. Sonde ponctuelle**

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe, Figure (I. 12).



**Figure I. 12. Bobine ponctuelle.**

**I.5.1.d. Bobine plate**

De la même que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large (Fig.I. 13).

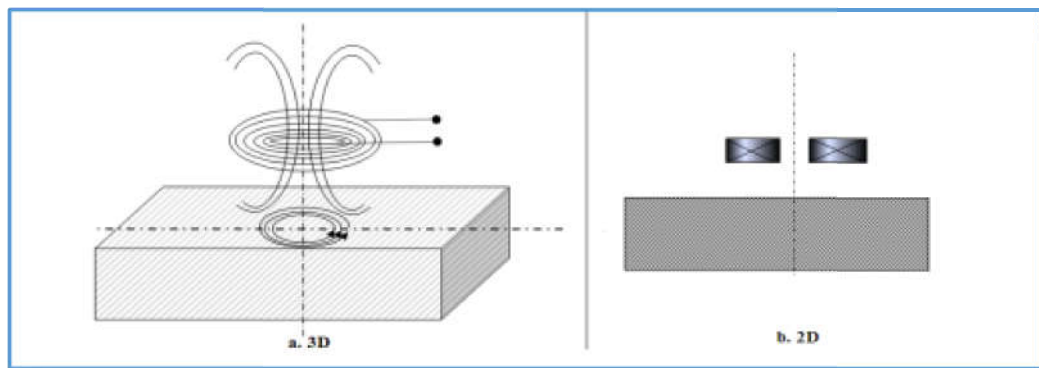


Figure I. 13. Bobine plate.

#### ***I.5.1.e. Sonde interne tournante***

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube, Figure (I. 14).

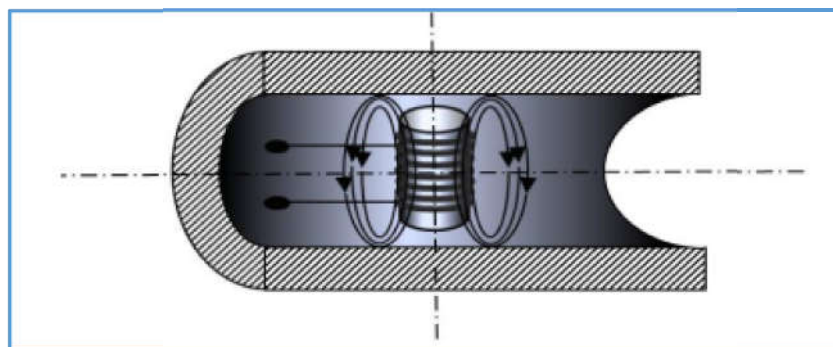


Figure I. 14 . Bobine interne tournante.

### **I.5.2. Classification selon la fonction**

En principe, tous les capteurs assurent deux fonctions : la fonction d'alimentation et de mesure. Si ces dernières sont assurées par un seul enroulement, on parle de capteur à double fonction, sinon il s'agit un capteur à fonction séparée.

#### ***I.5.2.a. Capteur à double fonction***

Ce type de capteurs est très utilisé dans les applications type courant de Foucault sinusoïdaux. C'est un capteur dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par la ou les mêmes bobines. L'exploitation se fait par la mesure de l'impédance

équivalente de la bobine dans son environnement. Ce type de capteurs favorise la détection de grandeurs à évolution lente telles que l'épaisseur de revêtement et de conductivité, Figure (I. 15).

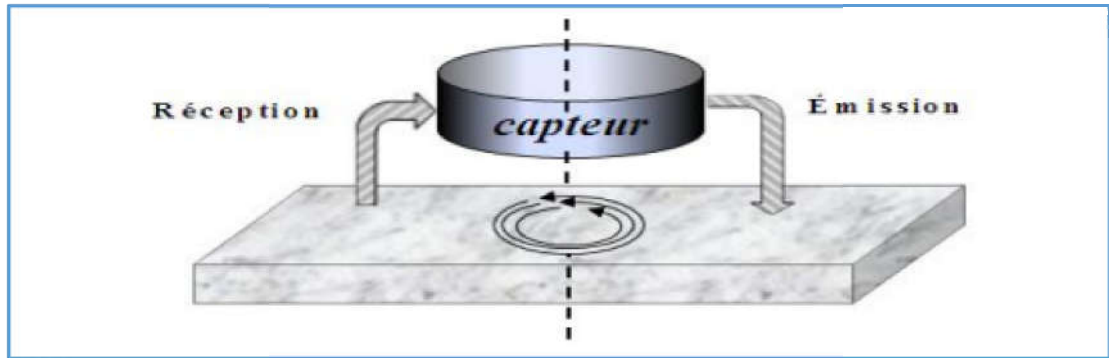


Figure I. 15. Capteur à double fonction.

#### *1.5.2.b. Capteurs à fonctions séparées*

La détection des défauts profonds favorise une augmentation des dimensions de la bobine d'excitation. Cependant, cet accroissement de la taille de l'émetteur se fait au détriment de la résolution spatiale du capteur.

Il est donc nécessaire d'établir un compromis sensibilité-résolution. Ce compromis est facilité par l'adoption de capteurs à fonctions séparées. C'est un type de capteurs où la fonction d'excitation et de réception est assurée par des éléments distincts. La réception peut alors se faire à un endroit différent de la position de l'émetteur. L'élément de mesure peut être une bobine plus petite aux bornes de laquelle on mesure la variation d'impédance (Fig. I. 16).

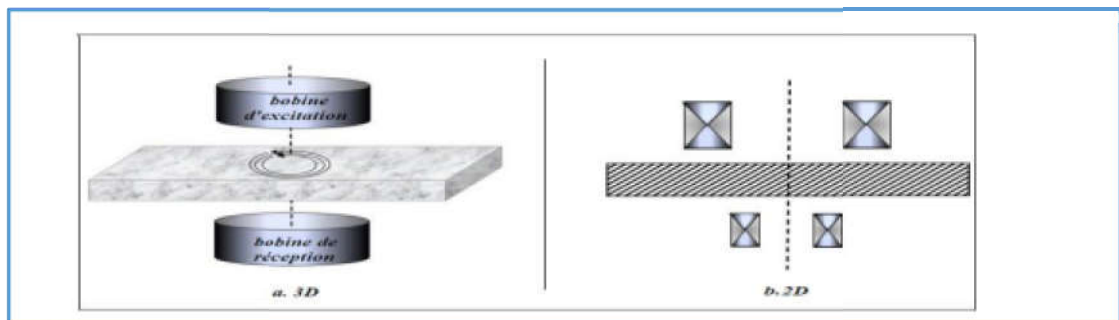


Figure I. 16 . Capteur à fonctions séparées.

### I.5.3. Classification selon le mode de contrôle

On distingue deux modes de contrôle: mode absolu et mode différentielle.

#### I.5.3.a. Mode absolu

Le schéma suivant montre la mesure en mode absolu par un pont d'impédance (Fig. I.17).

- La bobine d'examen est une branche d'un pont d'impédance alimenté par un oscillateur. En absence de défaut, le pont est équilibré.
- Un signal apparait dans pont complexe dès que la sonde s'approche du défaut. L'amplitude du signal est liée au volume de la matière affectée par le défaut de même, la phase est fonction du type du défaut et de la profondeur.

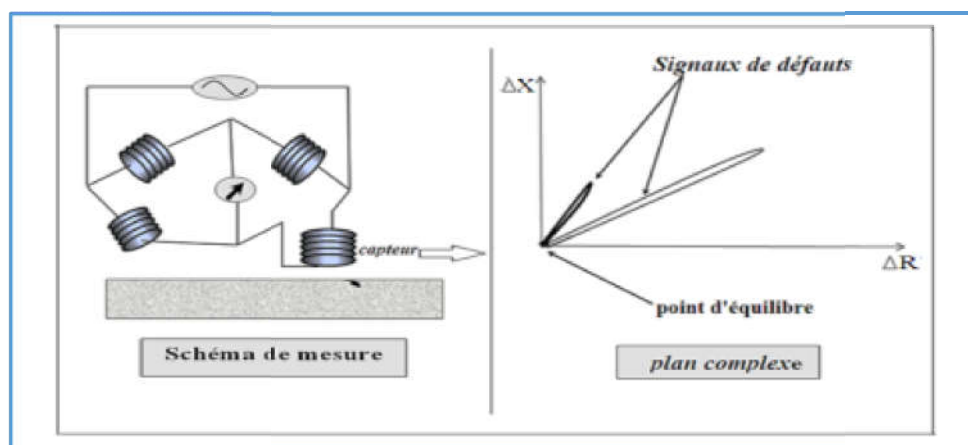


Figure I. 17. Mesure en mode absolu par un pont d'impédance.

#### I.5.3.b. Mode différentiel

Ils sont constitués d'au moins deux éléments de mesure rigidement liés dans le capteur.

Dans le cas d'un capteur à deux éléments, la mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Ce type de capteur est particulièrement utilisé pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce s'affranchissant des perturbations induites par une variation d'épaisseur ou de conductivité.

Le schéma suivant montre la mesure par pont d'impédance (Fig.I. 18)

- Deux branches du pont constituent des bobines d'examen. Le pont est équilibré en absence de défaut ;

- le passage de la sonde devant un défaut provoque l'apparition d'un signal (courbe de Lissajous) dans le plan complexe.

L'amplitude du signal est fonction du volume de la matière. De même, la phase est liée au type de défaut et à sa profondeur.

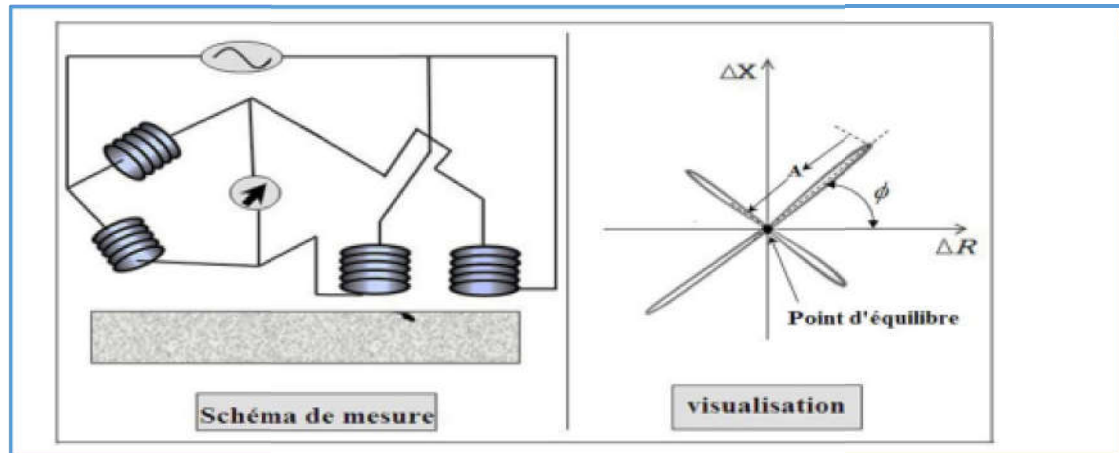


Figure I. 18 .Mesure en mode différentiel par un pont d'impédance.

## I.6. Type des defaults

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.

### I.6.1. Hétérogénéités et defaults

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, (6).

### I.6.2. 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.

### **I.6.3. Défauts internes**

Ils 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, (6).

## **I.7. Synthèse**

De nombreuses méthodes en CND sont disponibles dans l'industrie, chacune d'entre elles ayant ses propres avantages et limitations, mais six d'entre elles sont plus fréquemment utilisées : contrôle par ultrasons (UT), radiographie (RT), contrôle courants de Foucault (CF), magnétoscopie (MT), contrôle par ressuage (PT) et inspection visuelle (VT).

D'autres techniques non conventionnelles de CND sont de plus en plus utilisées dans le contrôle industriel. Parmi ces techniques on peut citer : le contrôle par émission acoustique (AE), le contrôle par ondes guidées (GW), l'inspection par laser (LM), le contrôle par résonance acoustique (ART), les tests d'étanchéité (LT), le contrôle par flux de fuite magnétique (MFL), l'analyse des vibrations (VA), les tests par rayonnement infrarouge (IR)  
.....

La présentation de ces méthodes conventionnelles ne serait pas complète sans une synthèse comparative selon plusieurs critères. Ainsi, le tableau I.1 présente une vue d'ensemble des qualités et défauts de chacune de ces techniques.

**Tableau I. 1 .Tableau récapitulatif des techniques conventionnelles de CND.**

<b>Méthodes CND</b>	<b>Ressuage</b>	<b>Magnétoscopie</b>	<b>Ultrasons</b>	<b>Courant de Foucault</b>	<b>Radiographie</b>
<b>Matériaux contrôlables</b>	Tous (sauf poreux)	Ferro magnétiques	Tous	Conducteurs de l'électricité	Tous
<b>Défauts recherchés</b>	Débouchant	Débouchant ou sous jacents	Débouchant et interne	Débouchant ou sous jacents	Débouchant et interne
<b>Orientation préférentielle</b>	Sans	Perpendiculaire aux lignes de champ magnétique	Perpendiculaire au faisceau ultrasonore	Perpendiculaire aux lignes de courant de Foucault	Parallèle au faisceau Rx
<b>Avantages</b>	Méthode globale	Méthode globale	Facilement automatisable dimensionnement des défauts	Dimensionnement des défauts	Dimensionnement des défauts
<b>Inconvénients</b>	Pas de dimensionnement retrait des revêtements	Pas de dimensionnement retrait des revêtements	Nécessité d'un couplant méthode ponctuelle	Méthode ponctuelle	Sécurité des opérateurs
<b>Autres applications</b>			Mesures dimensionnelles mesures d'épaisseur	Mesure d'épaisseur mesures de conductivité électrique	

### **I.7.1. Méthodes couplées**

De plus en plus de dispositifs utilisent conjointement plusieurs méthodes parmi celles qui viennent d'être présentées. Il existe ainsi des méthodes laser-ultrasons, électromagnétiques ultrasonores ou encore magnéto-optiques. Ces techniques tentent de s'affranchir des différents défauts des méthodes utilisées tout en conservant les avantages. Par exemple, la méthode laser-ultrasons permet de réaliser des contrôle par ultrason sans contact, et donc sans couplant. Il s'agit le plus souvent de techniques en cours de développement à l'heure actuelle, (6)

## I.8. Conclusion

*Dans ce chapitre nous avons 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 thermographie et la technique des courants de Foucault, pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.*

*Cette technique est basée sur la mesure de la variation de l'impédance qui est souvent fonction de plusieurs paramètres. En effet, la variation de l'un de ces paramètres engendrera une modification sur l'impédance aux bornes du capteur.*

*Dans la deuxième partie on a présenté les différents types de sondes, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle et enfin les différents type de défauts.*

*Comme les matériaux utilisés en électrotechnique sont de type conducteur électrique au magnétique d'une part, et d'autre part la modélisation est outil essentiel pour la compréhension des phénomènes qui régissent le contrôle CND-CF, nous avons jugés utile de consacré le chapitre suivant aux capteurs CF et à la modélisation du CND-CF.*

# Chapitre II :

## *Capteurs et Modélisation pour le CND par Courants de Foucault*

## Chapitre II . **Modélisation du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault**

### II.1. Introduction

*Le principe de fonctionnement du contrôle non destructif par les courants de Foucault est basé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour la modélisation mathématique puis la simulation et faire des modifications pour la conception des capteurs efficace et minimiser les problèmes rencontrés dans le contrôle.*

*La simulation en CND par CF permet de caractériser les capteurs CF et d'en améliorer les performances tout en limitant le nombre de prototypes expérimentaux et donc les coûts de développement. La simulation d'un problème de CND par CF implique une modélisation magnétodynamique. Un modèle magnétodynamique est décrit par les équations de Maxwell en se plaçant dans l'hypothèse d'un régime quasi-statique. La résolution des équations, qui dérivent de la modélisation d'une configuration réelle de CND par CF, ne peut généralement pas être faite analytiquement. Par conséquent, des méthodes numériques sont nécessaires. La méthode des éléments finis (MEF), puisqu'elle permet de tenir compte de géométries complexes de sondes et pièces inspectées, est l'une des plus utilisées. Elle est considérée comme un outil efficace pour résoudre numériquement des problèmes électromagnétiques. (11) (15) (16) (22)*

*Après avoir choisi l'équation de la magnétodynamique en régime quasi-stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique  $A$ , nous aboutissons à l'équation de magnétodynamique à résoudre numériquement par la méthode des éléments finis. Enfin, nous appliquons cette méthode pour l'étude d'un système de CND-CF composé d'un capteur opérant sur une plaque conductrice. (7) (11) (14)*

### II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le Système représenté sur la figure II.1. Un matériau, 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.

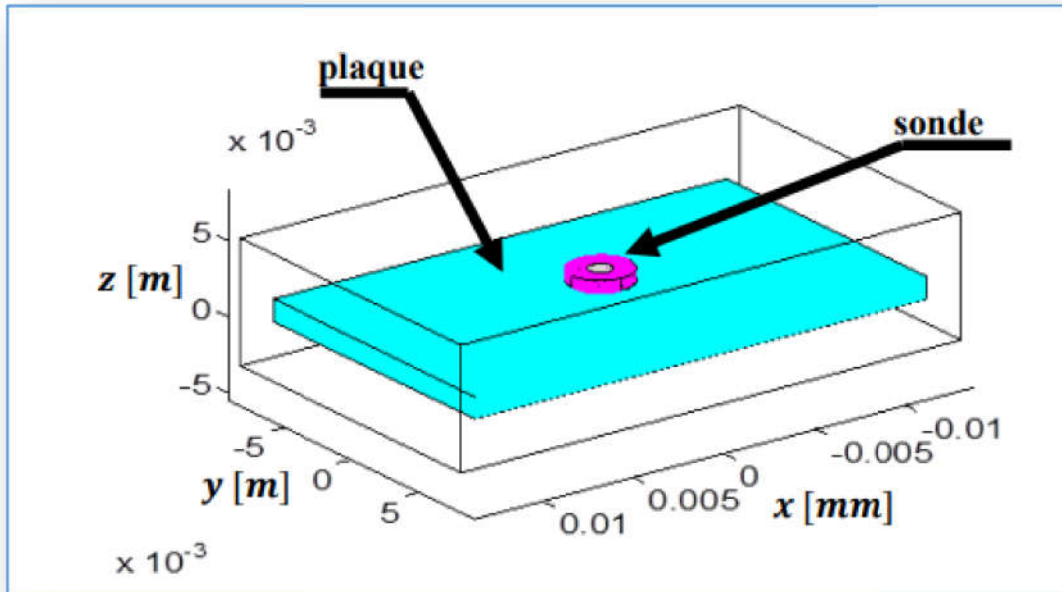


Figure II. 1. Système capteur-pièce-fissure.

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  $\Gamma$  (9)

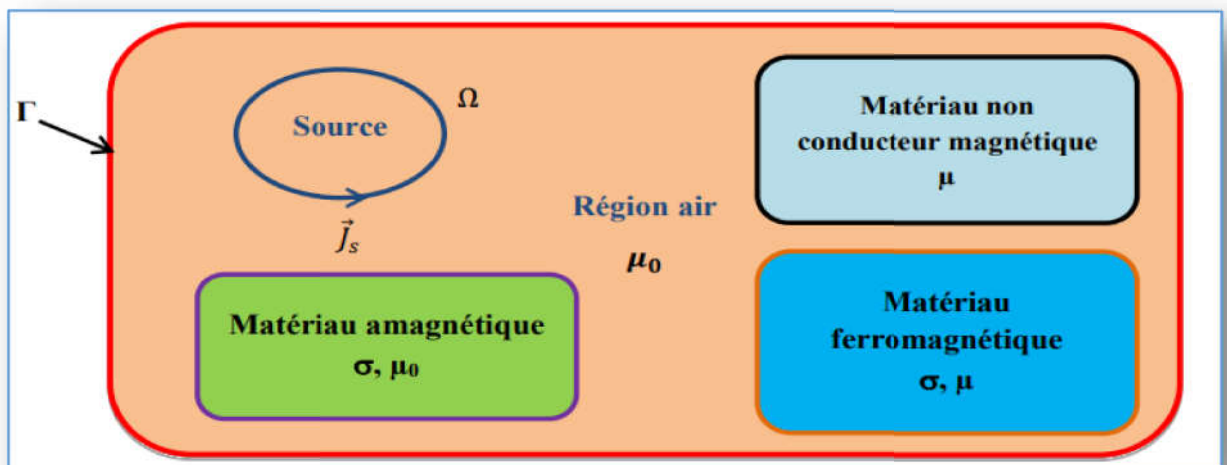


Figure II. 2 Problème magnétodynamique type.

## II.3. Mise en équations

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 (9)

### II.3.1. Equations 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 :

Théorème de Gauss

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.1})$$

Loi de conservation du flux

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.2})$$

Loi de Faraday

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

Théorème d'Ampère-Maxwell

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

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.3.2. Lois constitutives

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

$$J = \zeta E \quad (\text{II.5})$$

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

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

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

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

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

$B r$  : Induction magnétique rémanente [T]

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

La relation entre l'induction magnétique  $B$  et le champ magnétique  $H$  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.

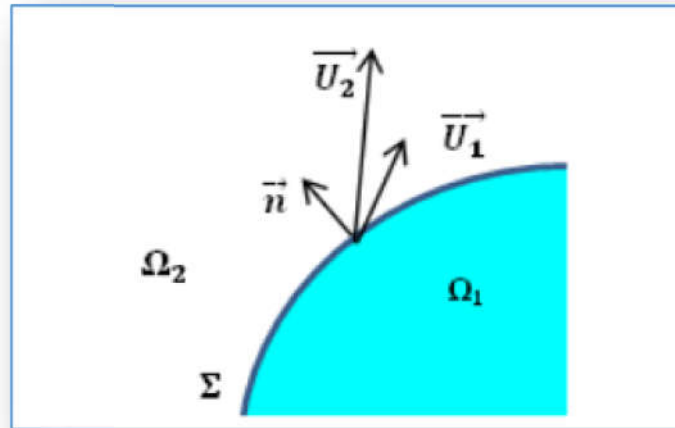
### II.3.3. Conditions aux limites

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  $u \cdot n = 0$
- Condition de Neumann homogène  $\partial u / \partial n = 0$

### II.3.4. 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**

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

$$D_2 - D_1 \cdot n = \rho_{sur} \quad (\text{II.8})$$

$$B_2 - B_1 \cdot n = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$H_2 - H_1 \times n = J_{sur} \quad (\text{II.10})$$

$$E_2 - E_1 \times n = 0 \quad (\text{II.11})$$

Où  $\rho_{sur}$  est la densité surfacique de charge,  $J_{sur}$  la densité surfacique de courant et  $n$  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.3.5. Conditions de Jauge

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

Jauge de Coulomb

$$\text{div } U = 0 \quad (\text{II.12})$$

Jauge de Lorentz

$$\text{div } U + K \partial u \partial t = 0 \quad (\text{II.13})$$

Jauge adapté pour les éléments d'arêtes

$$U \cdot W = 0 \quad (\text{II.14})$$

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 :  $\text{div } A = 0$ .

### II.3.6. Hypothèses simplificatrices

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

- Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable  $\partial D / \partial t = 0$  (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  $\zeta E$  peut être décomposée en une partie imposée  $J_s$  (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation  $\zeta E$  qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$J = J_s + \zeta E \quad (\text{II.15})$$

- La densité volumique de charge est considérée comme nulle.
- Généralement, le courant n'existe qu'en volume ( $J_{\text{sur}} = 0$ ), 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.

$$H_2 - H_1 \times n = 0 \quad (\text{II.16})$$

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

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$\text{div } B = 0 \quad (\text{II.17})$$

$$\text{rot } E = - \partial B / \partial t \quad (\text{II.18})$$

$$\text{rot } H = J_s + \zeta E \quad (\text{II.19})$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$B = \mu H \quad (\text{II.20})$$

### II.3.7. Champs et potentiels

Les champs de vecteurs  $E$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $J$  peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires :

$$H = T - \text{grad}\Phi \quad (\text{II.21})$$

$$B = \text{rot } A \quad (\text{II.22})$$

$$E = - \partial A / \partial t - \text{grad } v \quad (\text{II.23})$$

$$J = \text{rot}T \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$T$  : Potentiel vecteur électrique [A/m]

$A$  : 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..

## II.4. Conclusion

*Comme la simulation d'un problème de CND par CF implique une modélisation magnétodynamique qui est décrite par les équations de Maxwell, des lois de comportement et des conditions aux limites. On peut alors modéliser le système de CND-CF pour la détection de défauts de corrosion ou d'arrachement de matière de rail sous COMSOL Multiphysics dans le troisième chapitre*

**Chapitre III :**

**Simulation d'un**

**Systeme de détection**

**de défaut de Rail de**

**train par CND-CF**

## **Chapitre III . Simulation de la détection de défaut de corrosion de rail de train par CND-CF**

### **III.1. Introduction**

*Durant leur procédé de production, les industries sont exposées à un problème particulièrement grave : les surfaces métalliques sont victimes de la corrosion . La corrosion est un procédé chimique qui détériore le matériau du rail, réduit l'épaisseur originale et peut provoquer des accidents à moyen et long termes, c'est notamment le cas des voies ferroviaires.*

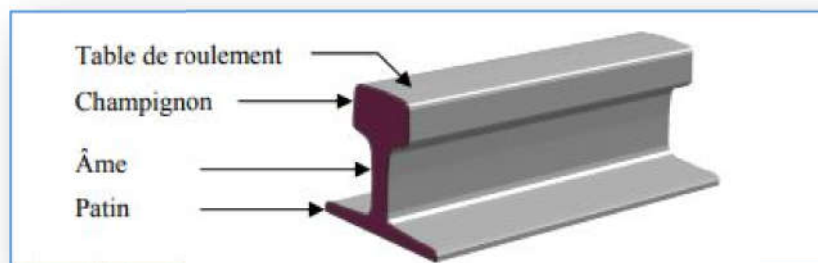
*Nous présenterons dans ce chapitre le comportement d'un système de CND-CF-3D par une simulation numérique de la détection de défaut de corrosion ou d'arrachement métallique sur les têtes de rail utilisés sur les voies ferroviaires.*

*Nous exposerons en premier lieu les résultats de simulation pour balayage linéaire, et en second lieu les résultats obtenu par balayage surfacique par sonde multiéléments alimentée en mode multiplexé, et nous terminerons par une conclusion.*

### **III.2. Technologie de la voie ferroviaire**

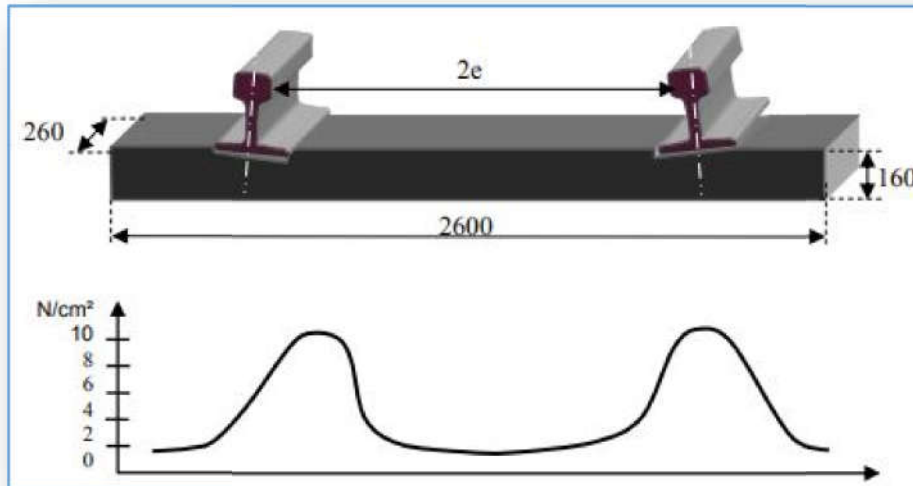
La voie constitue un système dont les quatre composants principaux assurent une fonction nécessaire à l'objectif final du transport : le rail, les traverses, le ballast et la plateforme.

Le rail est une barre d'acier en trois parties ; la table de roulement est la face supérieure du champignon permettant le roulement de la roue.



**Figure III. 1. Profil du rail**

Les traverses garantissent non seulement un écartement constant des rails, mais aussi transmettent au ballast les contraintes longitudinales des rails et leurs efforts transversaux, longitudinaux ou verticaux. Il existe de nombreux dispositifs de fixations des rails sur les traverses ; les fixations de type récent ne permettent pas le glissement longitudinal du rail.



**Figure III. 2 . Répartition des contraintes sur une traverse.**

### *III.2.1.a. Corrosion des rails de train*

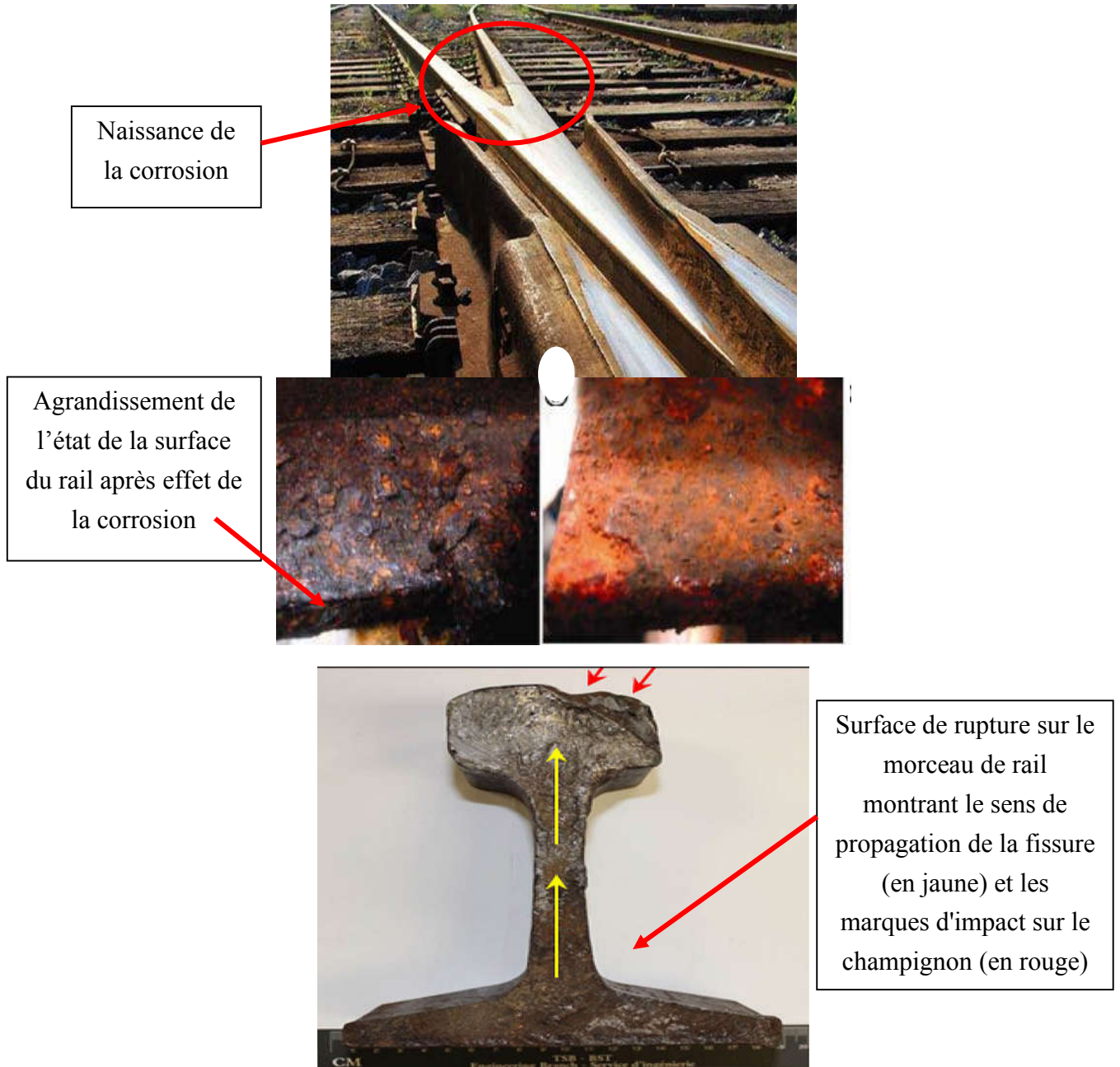
Les conditions telles que la lumière du soleil, l'humidité relative, la température et l'atmosphère affectent largement la corrosion. En outre, le dépôt de sel est un facteur important d'initiation de la corrosion. De plus, le changement de température à la surface du rail est en retard par rapport à la température de l'air, et la condensation de l'eau de l'air et l'évaporation entraîneraient des cycles humides/secs, ce qui favorise également la corrosion. La corrosion elle-même n'induirait pas de perte de masse remarquable de la voie ferrée et est généralement cachée et difficile à détecter à temps. Cela pourrait être l'une des principales raisons pour lesquelles le problème de la corrosion des rails n'a pas encore attiré suffisamment l'attention et est devenu une préoccupation majeure.

Cependant, une petite perte de matériaux ferroviaires peut induire un changement substantiel sur la performance des matériaux ou même agir comme un « concentrateur de contraintes » pour une initiation de la fissuration, ce qui peut se traduire dans le cas échéant, et à long terme, par des accidents (pertes matérielles et humaines) .

Une étude sur le coût de la corrosion en Chine a été réalisée récemment concernant cinq principaux domaines industriels, dont le transport (Hou et al. 2017). Il a été rapporté que le coût direct dû à la corrosion des seuls chemins de fer (wagons non inclus) en 2014 était 18,88 milliards.

Le coût direct est le coût directement induit par la corrosion, y compris le changement des composants corrodés, l'entretien des voies en raison de la corrosion, l'application de technologies de protection contre la corrosion (revêtements, matériaux résistants à la corrosion, matériaux isolants),

Le coût indirect est le coût qui peut être partiellement attribué à corrosion, y compris la diminution des revenus due à une suspension temporaire du service ou à un changement d'horaire en raison de la corrosion, des victimes d'accidents attribués à la corrosion, des pollutions environnementales.



**Figure III. 3 . Exemples de corrosion de rail de train.**

### **III.2.2. Contrôle non destructif par courants de Foucault des voies ferroviaires**

Le contrôle non destructif par capteurs inductifs est un procédé relativement répandu dans l'industrie ferroviaire. C'est par l'intermédiaire d'un champ magnétique alternatif que s'établit l'interaction entre le dispositif de mesure et la cible. Puisque tous les milieux transmettent les ondes électromagnétiques, la mesure peut s'effectuer sans contact. Toutefois, une distance faible est recommandée du fait de la décroissance rapide des champs électromagnétiques dans l'air et afin de focaliser au maximum le champ produit vers la zone utile. Le traitement des signaux issus de ces capteurs est fonction de l'application envisagée; il peut s'avérer très simple ou très complexe selon les performances attendues et le nombre de paramètres du défaut à identifier, (32).

L'auscultation des rails utilisant cette technique est possible aussi bien durant la phase de fabrication qu'une fois posés en voie. En sortie de laminoir, les contrôles concernent soit la mesure des variations de la hauteur du rail soit la détection de défauts de type fissure en surface ou en sub-surface, le choix de la fréquence d'émission conditionnant la profondeur de pénétration du champ dans le rail. Pour les contrôles en voie, les sondes inductives sont souvent associées à des sondes à ultrasons; de cette manière elles sont rendues solidaires du sabot de contrôle afin d'assurer une hauteur de mesure constante ou minimiser l'effet de la dynamique du véhicule sur la mesure. Les sondes utilisées sont des sondes d'usage général et leurs formes ne sont pas étudiées spécifiquement pour le CND des rails, (32).

L'interprétation des résultats est généralement relativement sommaire. Une fois qu'une alerte est fournie par le système, elle est validée ou annulée par un examen visuel de la zone suspecte. (32)

### **III.2.3. Cahier des charges**

Comme toutes procédures de conception un cahier de charges est fourni par le client. Pratiquement, comme méthode classique, le bruit de roulement jugé anormal dans le cas d'arrachement de champignon de rail et le clignotement des circuits de voie lorsqu'il s'agit de rail cassé sont les deux moyens de détection utilisés par le conducteur jusqu'à présent. Dans la perspective d'une conduite automatique intégrale et des évolutions futures des systèmes de signalisation, d'autres dispositifs de détection doivent être développés.

Le CND des rails envisagé dans notre étude répond à cet impératif. Il doit s'effectuer sans contact, sur véhicule en exploitation commerciale et pour des vitesses d'auscultation pouvant atteindre 100 km/h. Dans un contexte industriel ferroviaire relativement hostile, certaines conditions de mesure sont inhabituelles pour le CND par courants de Foucault. Il s'agit notamment de la distance de mesure, qui doit être de 20 à 30 mm.

Le défaut majeur qui se présente, consiste en une fissure transversale pouvant évoluer jusqu'à la rupture franche d'une file de rail (spécialement dans les zones de soudure). Le taux d'occurrence de ce type de défaut est d'environ 8 par an et par ligne sur un réseau ancien de métro type RATP. Moins fréquemment, il peut apparaître un autre type de défaut consistant en un arrachement d'une partie du champignon (la partie supérieure du rail). Ce second défaut résulte d'une fatigue de contact qui initie des fissures en surface ou sub-surface du champignon et dont l'évolution ne conduit pas à une rupture franche du rail mais à un arrachement, le plus souvent partiel, du champignon. En effet, le système développé doit détecter les deux défauts type :

- fissure complète ou partielle du champignon.
- arrachement du champignon du rail. (33).

### **III.2.4. Etapes de simulation du système de contrôle sous COMSOL**

Il existe aujourd'hui plusieurs logiciels de simulation numérique qui facilitent la résolution numérique des systèmes d'équations aux dérivées partielles décrivant les phénomènes électromagnétiques intervenant. Le logiciel COMSOL Multiphysics s'adapte bien au problème de CND-CF. D'autre part, ce logiciel offre la possibilité de se lier à Matlab. Par conséquent, l'ensemble Comsol-Matlab permet de réaliser à la fois l'analyse par éléments finis (EF) des structures électromagnétiques et d'autre fois à exploiter les outils d'optimisation disponible sous Matlab. La simulation d'un dispositif de CND-CF sur COMSOL passe essentiellement par les étapes suivantes :

- ✚ Construction de la géométrie
- ✚ Attribution des caractéristiques de chaque milieu
- ✚ Introduction des conditions limites
- ✚ Maillage
- ✚ Résolution

#### ***III.2.4.a. Dessin de la géométrie tridimensionnelle***

Le système 3D à étudier comprend 3 domaines, Figure (III.4 et 5):

- le rail muni d'un défaut surfacique de forme parallélépipède,
- le capteur,
- le domaine.

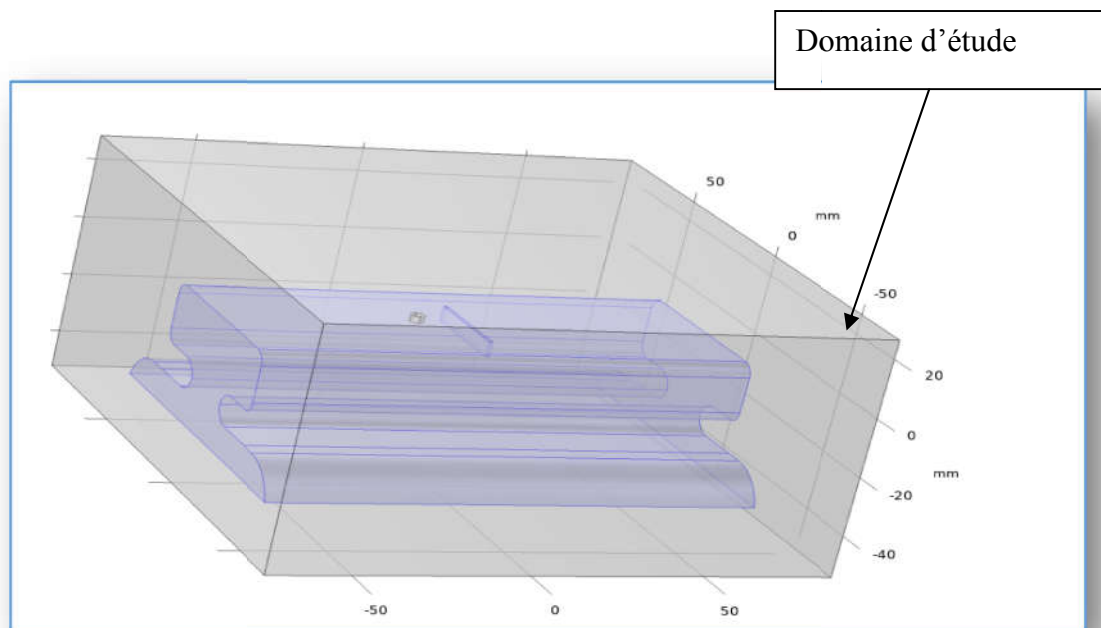


Figure III. 4. Dessin de la géométrie tridimensionnelle.

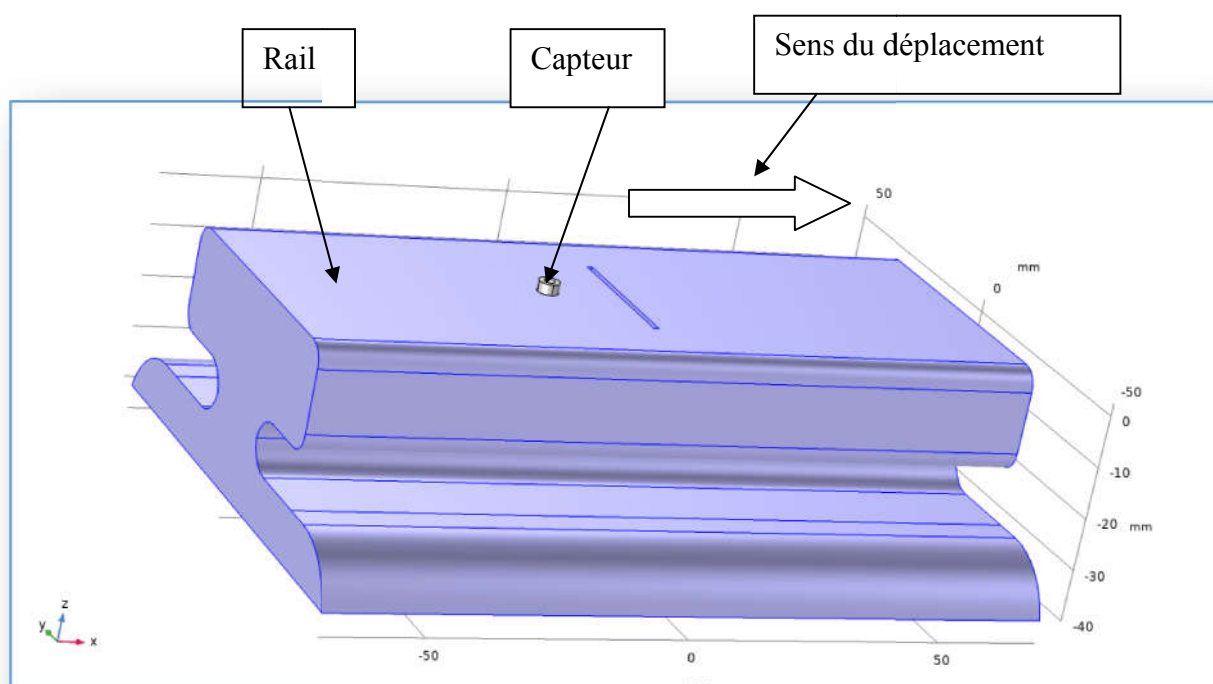


Figure III. 5. Domaine du système à étudier.

Les caractéristiques géométriques sont données par le tableau III.1

**Tableau III. 1 Caractéristiques géométriques et physiques du système de rail.**

Capteur	
Diamètre extérieur (mm)	2
Diamètre intérieur (mm)	1
Hauteur (mm)	2
Number of turns	140
Lift-off (mm)	1
Fréquence (kHz)	500
RAIL	
Conductivity (S/m)	4e6
Relative permeability	25
Thickness (mm)	60
DEFECT	
Longueur (mm)	10
Largeur (mm)	0.2
Profondeur (mm)	5

***III.2.4.b. Affectations des caractéristiques de chaque domaine***

On introduit la conductivité, la perméabilité ainsi que la permittivité pour chaque domaine (air, bobine, rail et fissure), Tableau (III. 1)

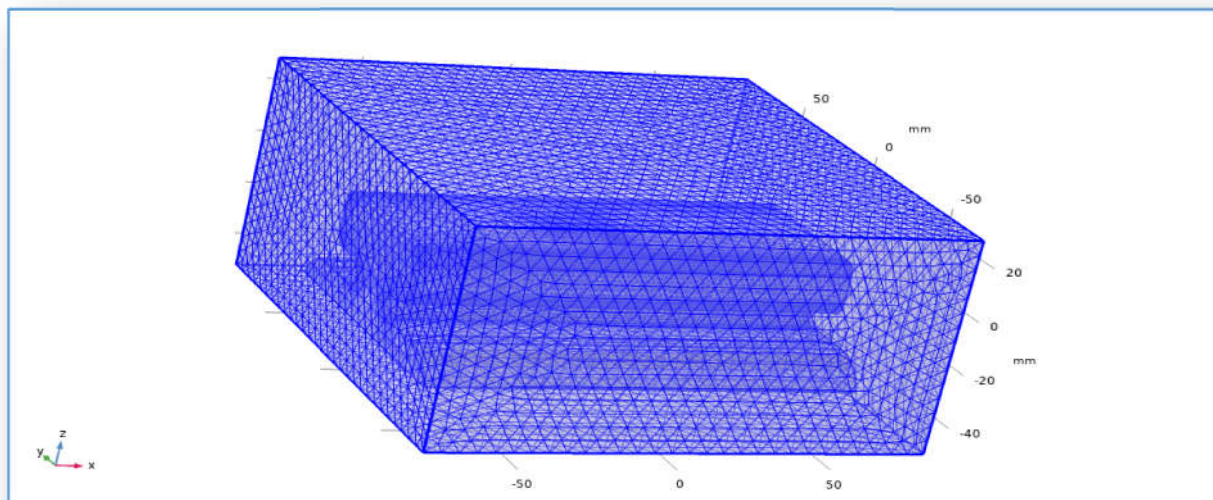
***III.2.4.c. Conditions aux limites***

Dans toutes les frontières du domaine à étudier, l'induction magnétique B est censée être tangente et la condition d'isolation magnétique ( $n \cdot A = 0$ ) est imposée (condition par défaut sur COMSOL Multiphysics).

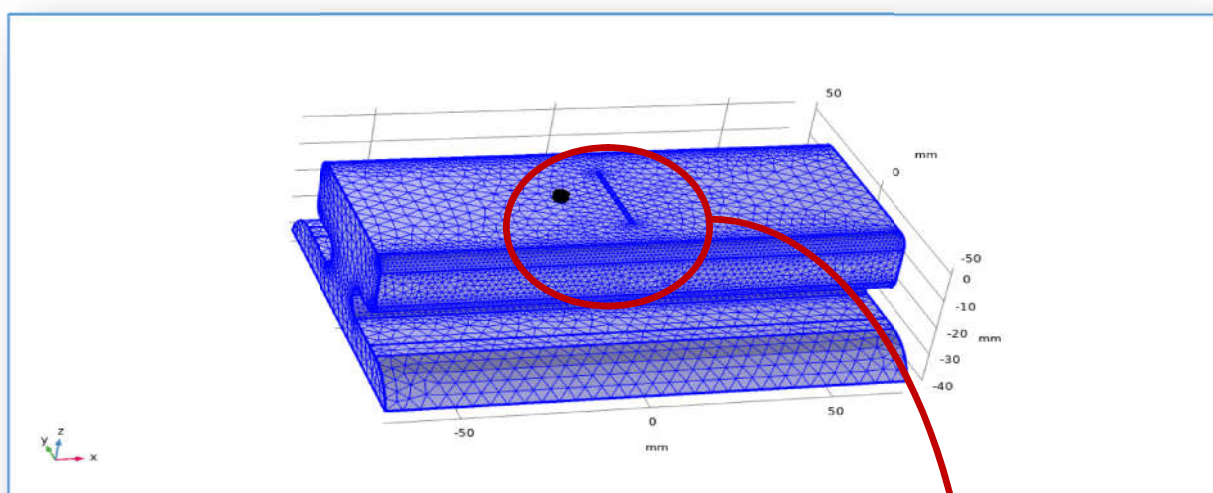
***III.2.4.d. Maillage du domaine***

Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL Multiphysics.. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage

extrêmement raffiné au niveau de la bobine et du rail avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes, (figure III.6 -8).



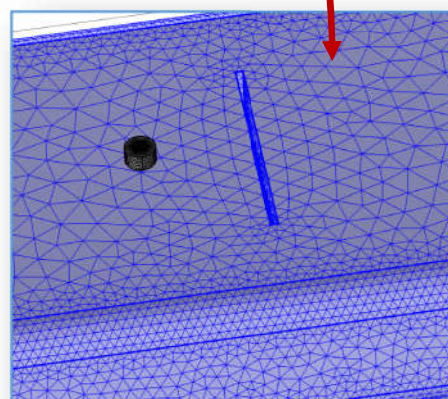
**Figure III. 6. Maillage 3D du domaine d'étude**



**Figure III. 7. Maillage du rail**

**Zoom**

**Figure III. 8. Zoom Maillage du rail**



III.2.4.e. Résolution de simulation

Afin de réduire le temps de calcul lors de simulation, on utilise uniquement la partie supérieure du rail qui nous intéresse. Les résultats de simulation sont montrés sur les Figures (III.9-10).

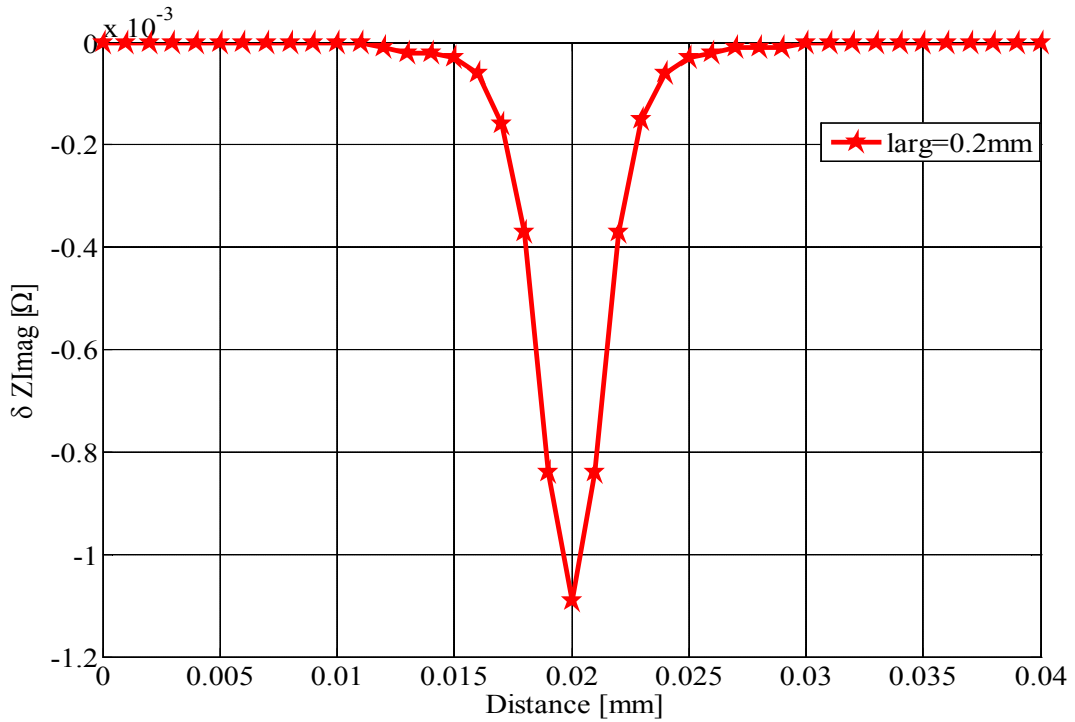


Figure III. 9. Variation de réactance d'impédance en fonction du déplacement.

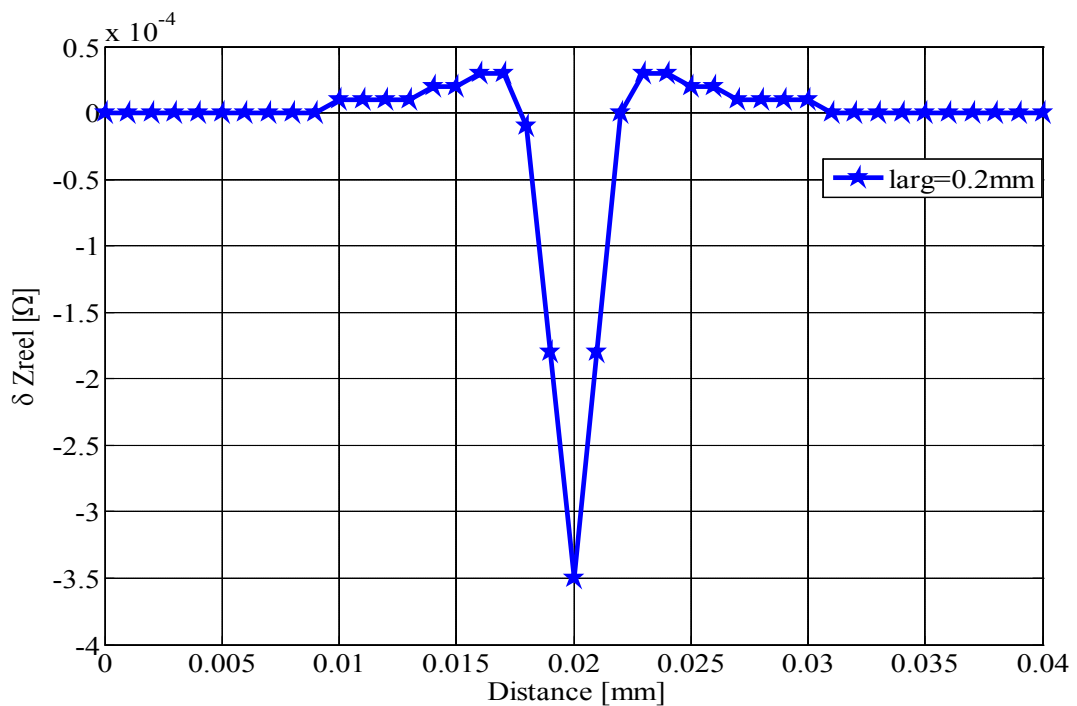
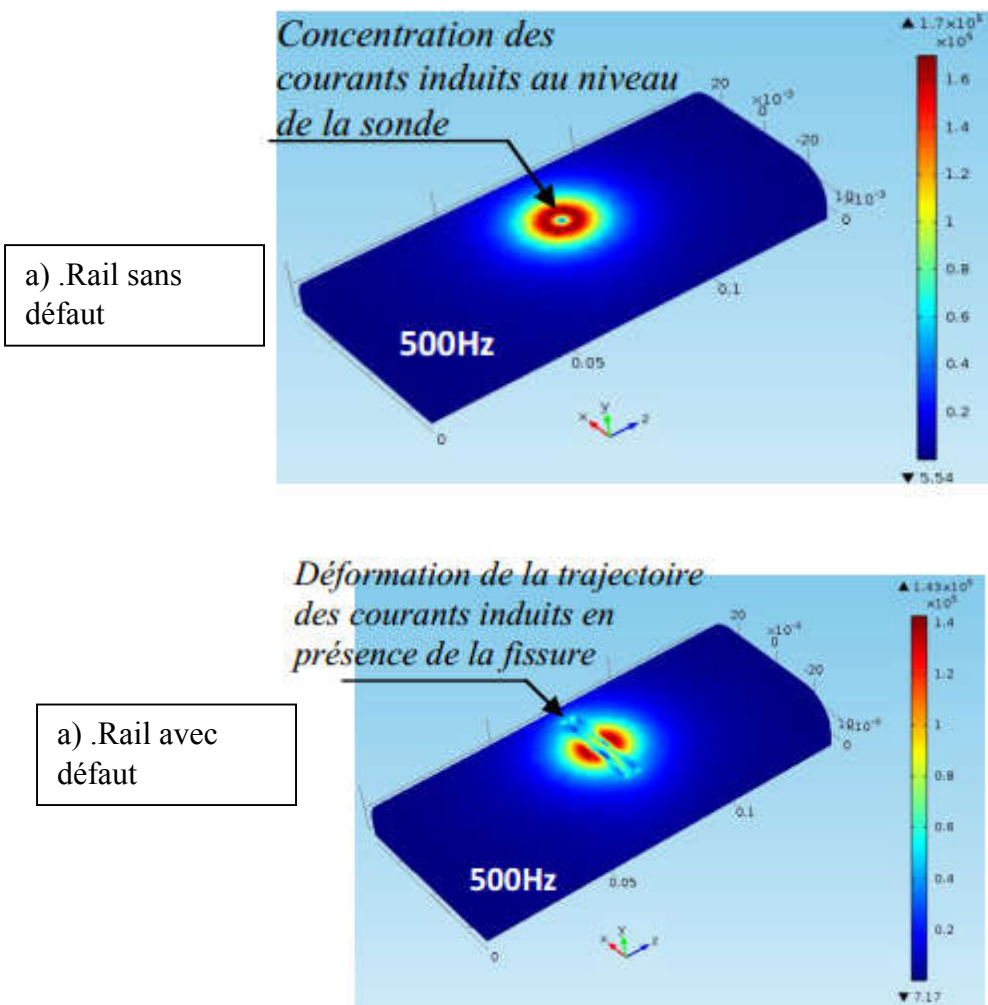


Figure III. 10. Variation de résistance d'impédance en fonction du déplacement.

D'après les résultats obtenus nous remarquons que de plus le capteur s'approche du défaut l'amplitude de l'impédance augmente et atteint le maximum au milieu de la fissure.

### **III.2.5. Effet de la présence d'un défaut sur la distribution des courants induits**

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la présence d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur sur la répartition des courants induits. Pour ce faire, nous reprenons la configuration présentée ci-dessus et nous réalisons une simulation en présence et en absence d'une fissure fine à la surface du matériau. Après cela, nous traçons la cartographie des courants induits, pour la fréquence 300Hz, 500Hz et 700Hz, Les résultats sont illustrés sur les figures ci-dessous.



**Figure III. 11. Cartographie des courants induits à 500 Hz**

On remarque que, d'une part que la présence du défaut modifie la trajectoire des courants induits, car ces derniers suivent le chemin le plus conducteur et ne peuvent pas traverser le défaut qui présente une résistivité infinie. et d'autre part que la densité des courants induit est

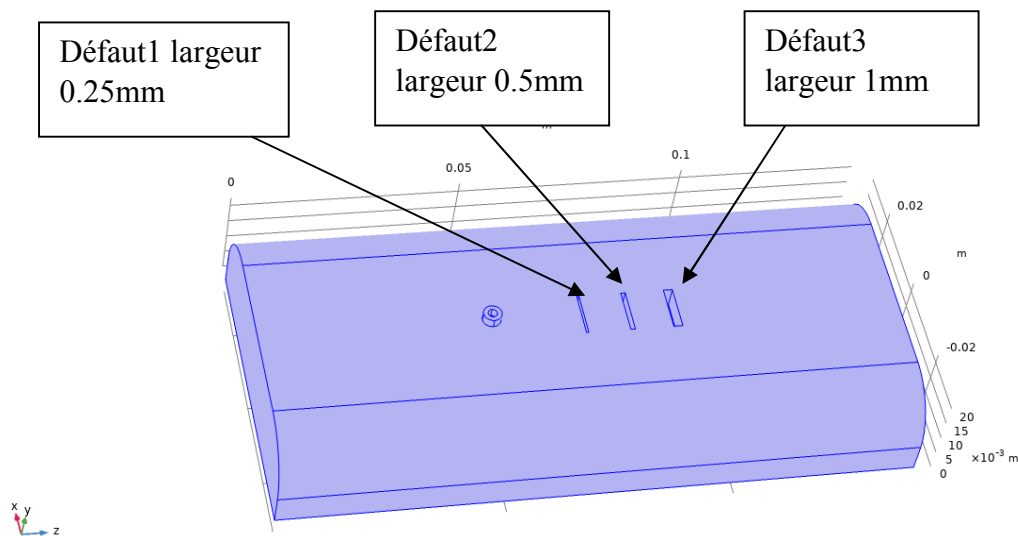
plus importante pour le cas sans défaut, On affirmé donc, pour notre système que le défaut est détecté avec une grande sensibilité

### **III.2.6. Effet de variation des paramètres du défaut sur les variations d'impédance**

Nous aborderons dans cette partie l'effet de la variation des paramètres du défaut sur l'impédance du capteur.

#### *III.2.6.a. Effet de la largeur du défaut*

La figure suivante montre la position des défauts par rapport aux plaques.



**Figure III. 12. Positionnement des 3 défauts de largeurs différentes sur le rail.**

Les Figures (III. 13-14) illustrent l'effet de la variation de la largeur du défaut sur les signaux de variation de l'impédance (Résistance et réactance).

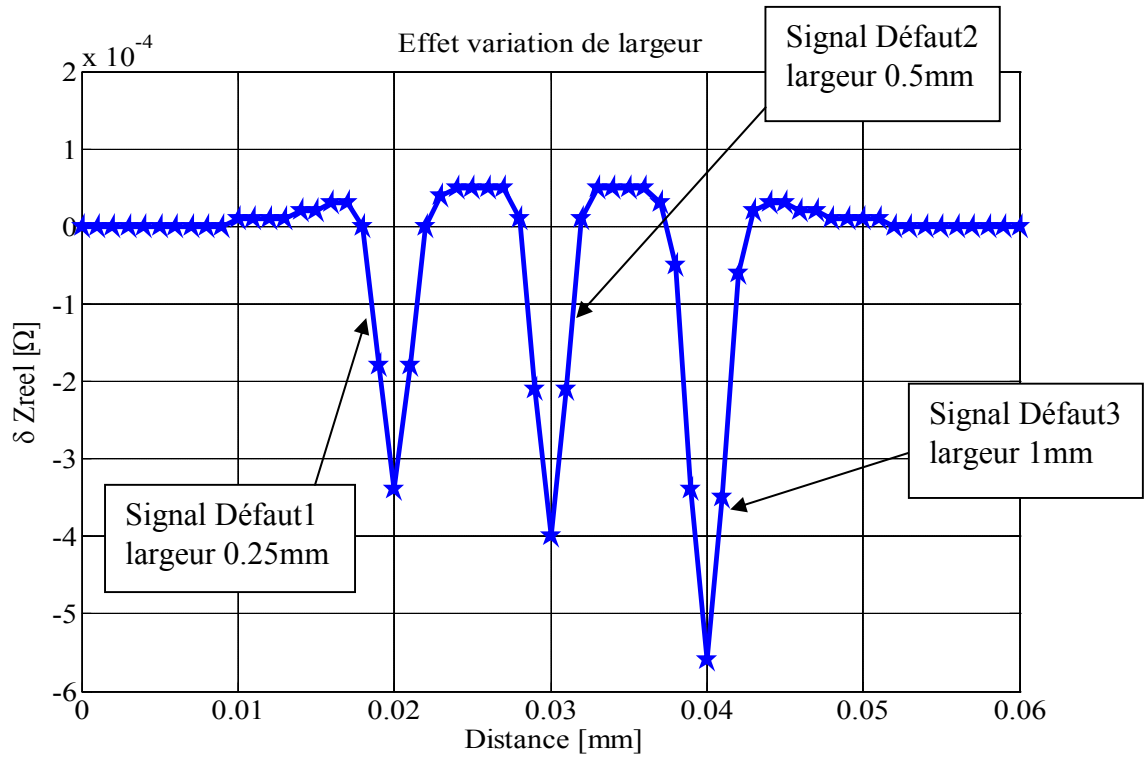


Figure III. 13. Effet de la Variation de la largeur du défaut sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.

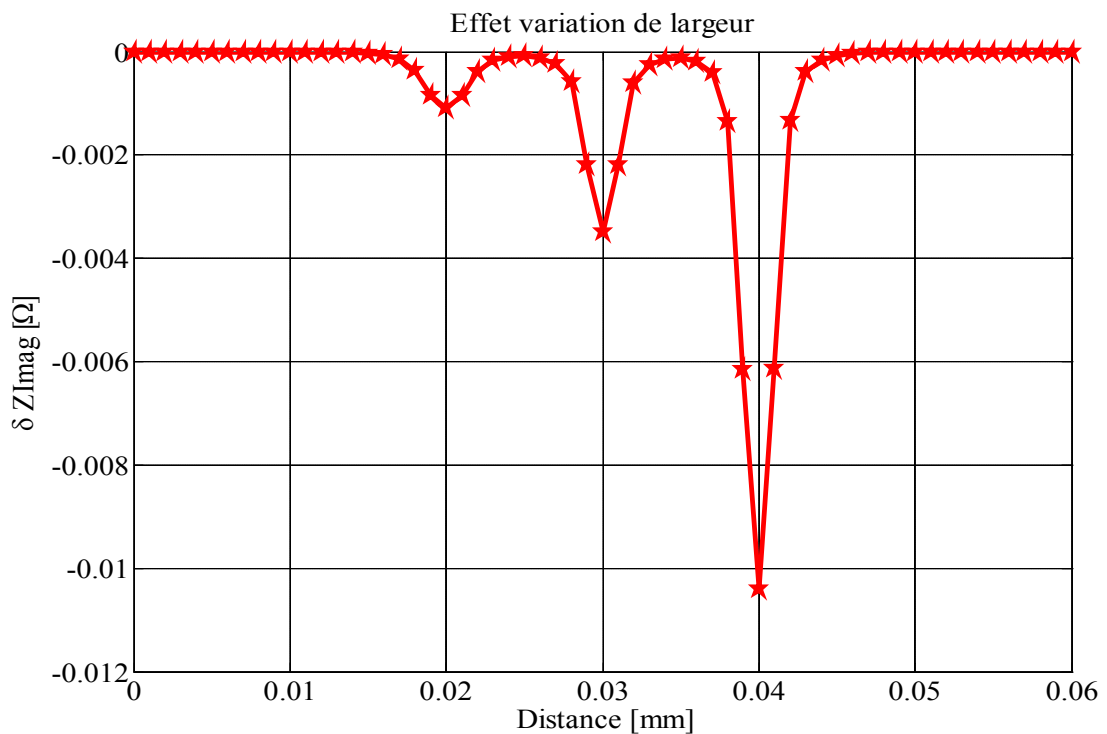


Figure III. 14. Effet de la Variation de la largeur du défaut sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.

On remarque que l'amplitude des signaux obtenus est proportionnelle avec les largeurs des défauts. De même, l'amplitude des variations de la résistance sont plus importants que ceux de la variation de réactance.

### III.2.6.b. Effet de la longueur du défaut sur les variations d'impédances

L'effet de la variation de la longueur du défaut sur les signaux de détection, avec la largeur et la profondeur fixent, et le déplacement se fait le long du défaut.

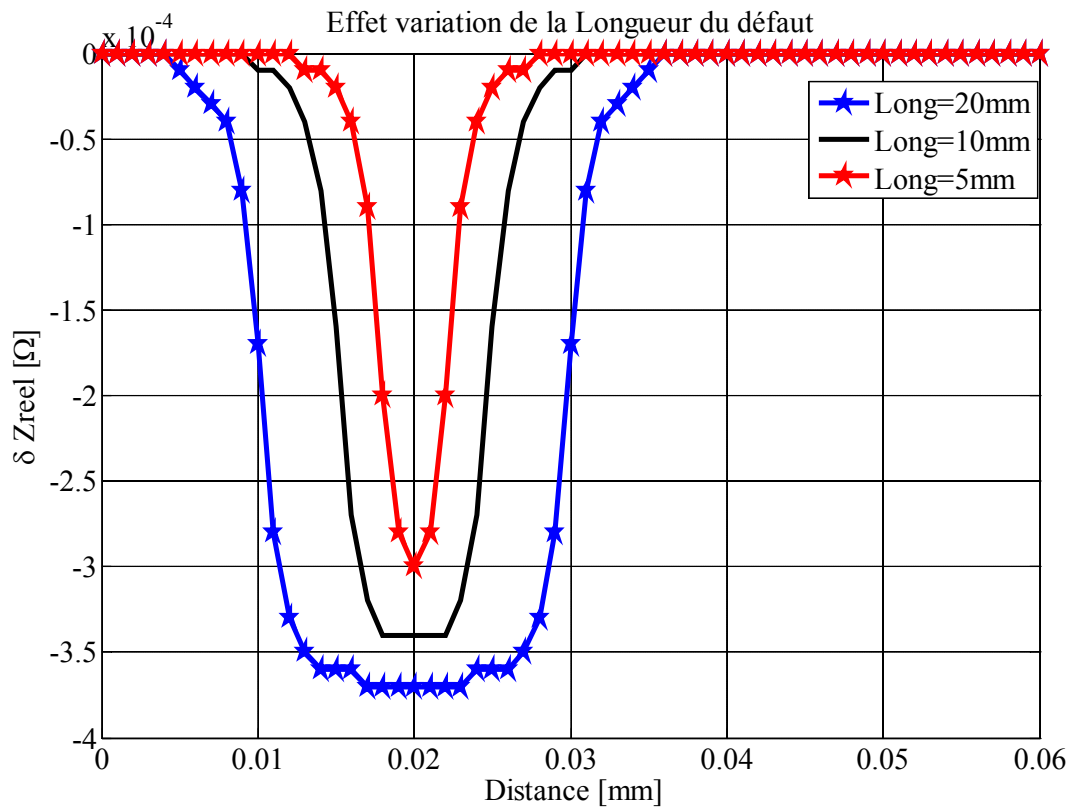
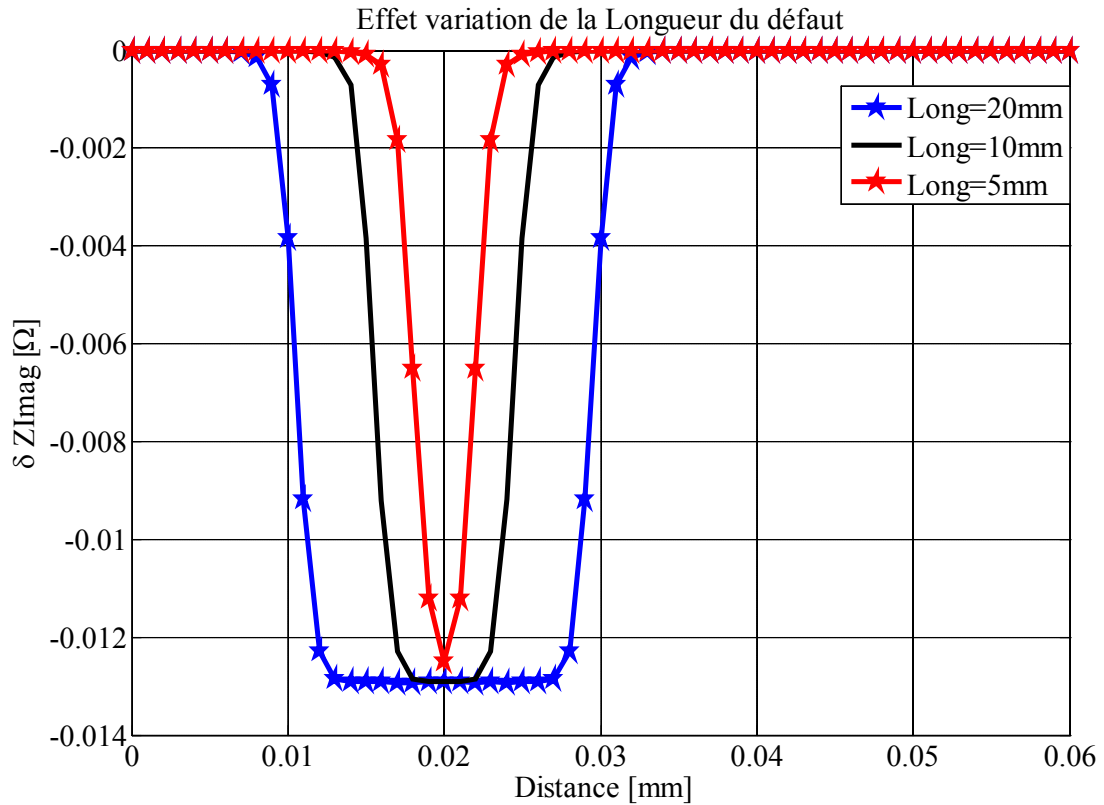


Figure III. 15. Effet de la Variation de la longueur du défaut sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.



**Figure III. 16. Effet de la Variation de la longueur du défaut sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.**

Les largeurs des signatures des défauts obtenus sont proportionnelles aux longueurs des défauts, Figures (III. 15-16).

### III.2.6.c. Effet variation du lift-off la fréquence.

D'après les Figures (III. 17 et 18) montrent que le signal est inversement proportionnel au lift-off..

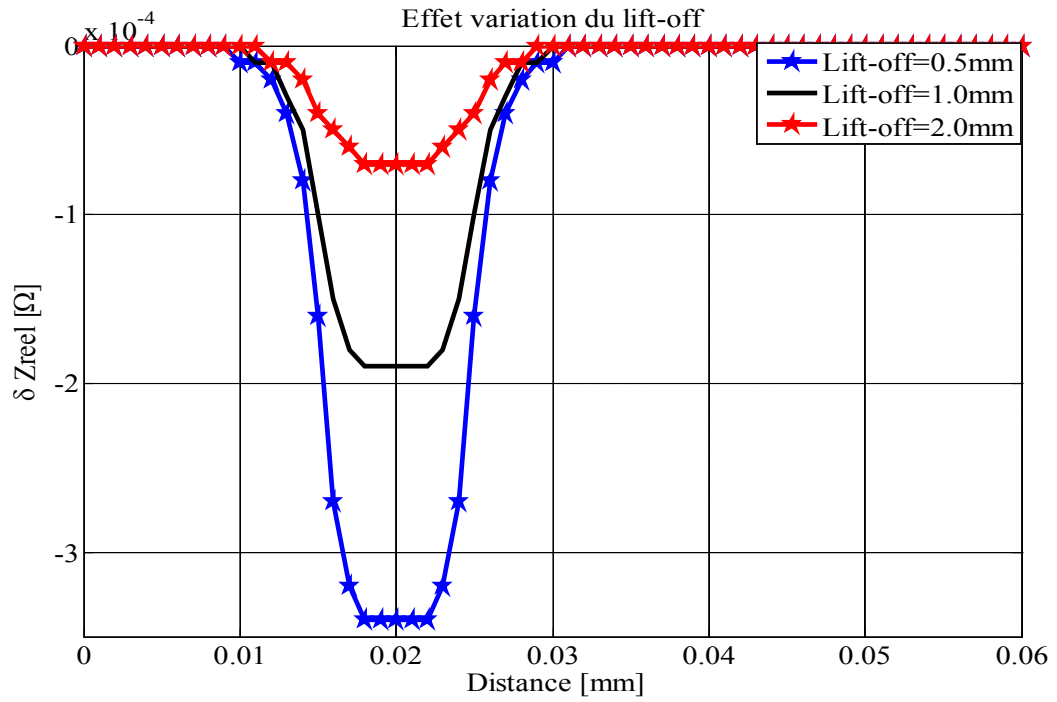


Figure III. 17. Effet de la Variation du lift-off sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.

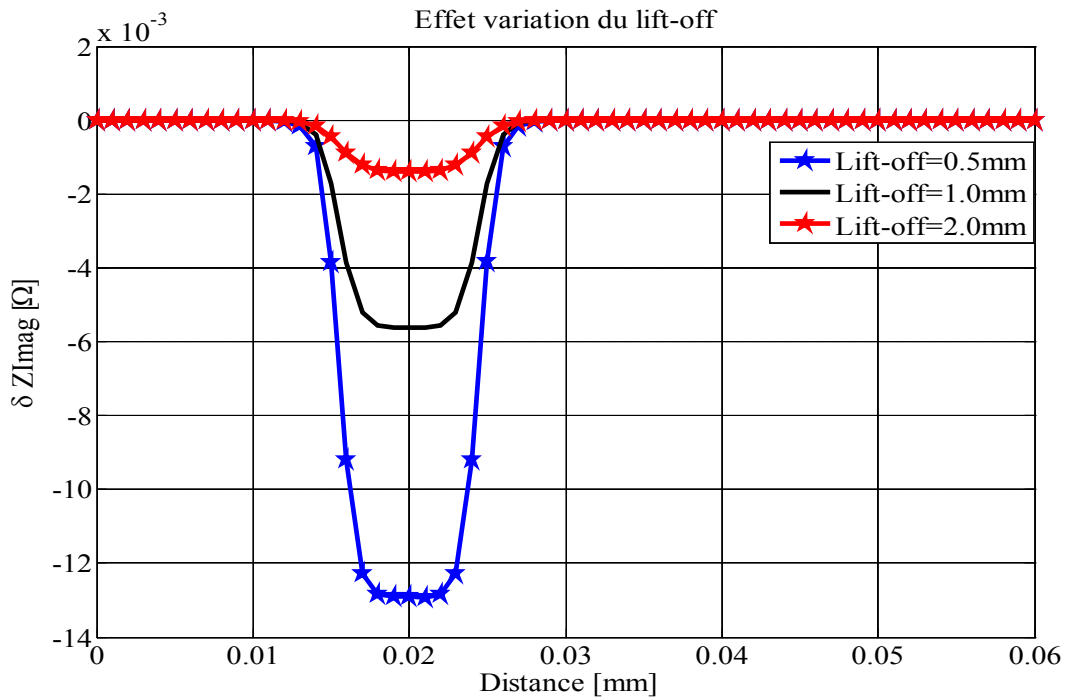


Figure III. 18. Effet de la Variation du lift-off sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.

III.2.6.a. Effet variation du lift-off la fréquence.

D'après les Figures (III. 19 et 20) montrent que le signal est proportionnel à la fréquence.

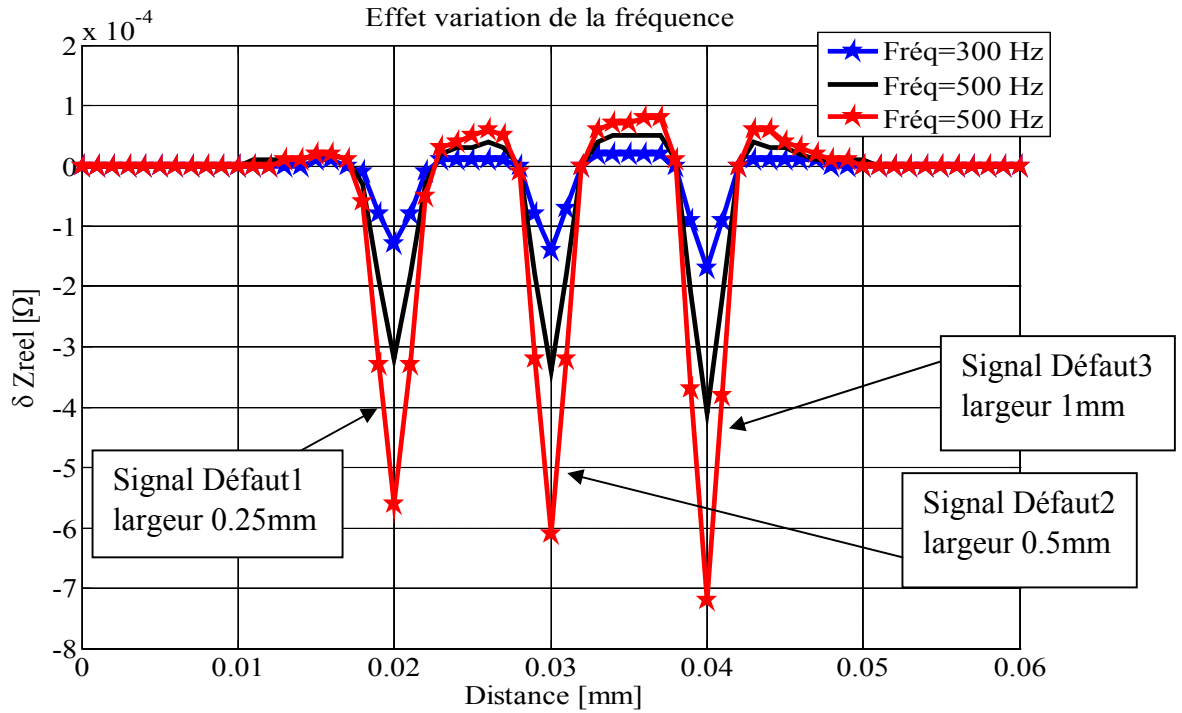


Figure III. 19. Effet de la Variation de la fréquence sur la résistance de l'impédance en fonction du déplacement.

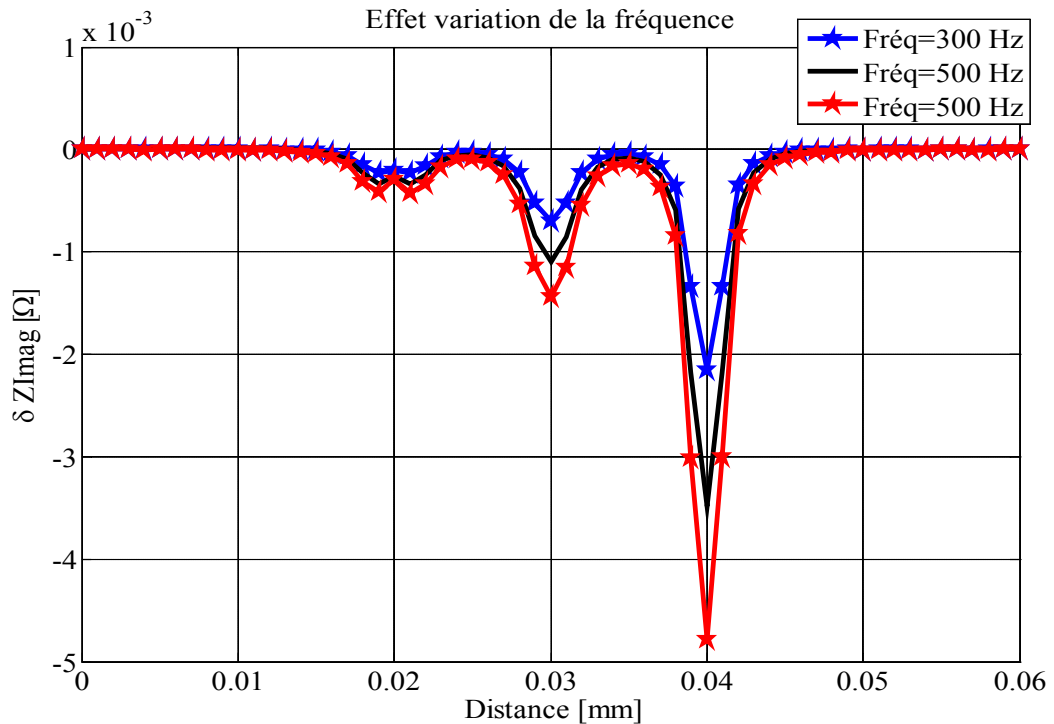


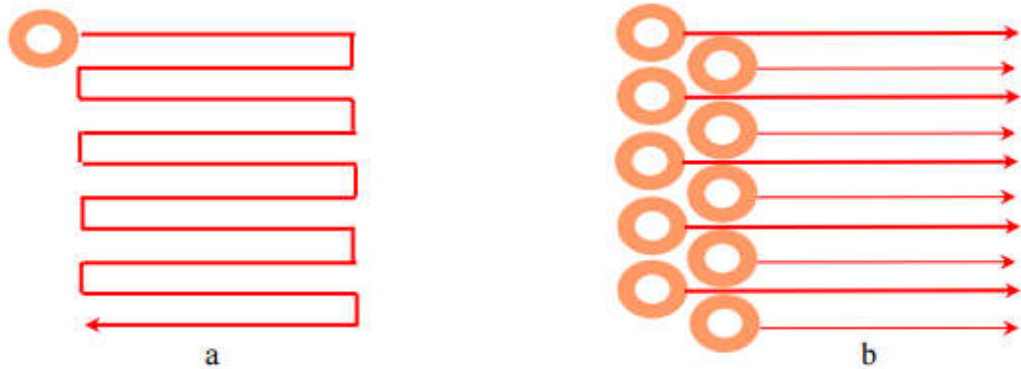
Figure III. 20. Effet de la Variation de la fréquence sur la réactance de l'impédance en fonction du déplacement.

### **III.3. Technologie des courants de Foucault multiéléments en mode multiplexé**

#### **III.3.1. Capteurs multiéléments ECA (Eddy Current Array)**

Les techniques mettant en œuvre des capteurs multiéléments ou capteurs ECA (Eddy Current Array) permettent de passer du stade de la détection local à celui de la détection surfacique par analogie avec les méthodes de ressuage et magnétoscopie. En cela les sondes ECA présentent un intérêt ne serait-ce qu'en terme de productivité.

L'emploi de sondes CF multiéléments permet de remplacer un des deux axes dans un balayage bidimensionnel et offre plus de souplesse dans la configuration des courants de Foucault (Figure (III.21), (27))



a) Bobine simple balayage ligne par ligne

b) Bobines multiples=balayage sur une ligne

**Figure III. 21. Substitution d'un balayage de 10 parcours avec un autre d'un seul parcours, (27).**

#### **III.3.1.a. Caractéristiques d'une sonde CF multiéléments**

C'est une sonde qui est, (27) :

- Composée de beaucoup d'enroulements pour permettre une sensibilité plus élevée ;
- Chaque enroulement balaye un secteur spécifique ;
- Chaque enroulement est optimisé pour une application déterminée ;
- Aucune interférence entre les enroulements ;
- N'importe quelle forme est possible ;
- Multiplexage intégré spécial au besoin de l'électronique ;
- Peut être optimisé pour différentes applications ; Peut être formé à suivre la pièce à inspecter,

### III.3.1.b. Avantages des CCF multiéléments

Comparée avec la technologie CF monocanal, la technologie CF multiéléments procure les avantages suivants, (27):

- Elle réduit considérablement le temps d'inspection en augmentant la vitesse de balayage ;
- Elle couvre une zone plus grande dans une seule passe tout en maintenant une haute résolution ;
- Elle réduit la complexité des systèmes de balayage mécaniques et robotiques ;
- Elle produit en temps réel une cartographie de la région inspectée, ce qui facilite l'interprétation des données ;
- Elle convient bien aux pièces de forme complexe ;
- Elle améliore la fiabilité et le taux de détection ; La sonde peut être formée pour suivre la forme des pièces complexes à inspecter.

### III.3.2. Alimentation en mode multiplexage

La technologie des courants de Foucault multiéléments permet d'exciter et de lier électroniquement plusieurs capteurs CF disposés côte à côte dans un même assemblage de sonde. L'acquisition de données peut être réalisée au moyen du multiplexage, ce qui évite l'inductance mutuelle entre les capteurs individuels. La Figure (III.21). , présente une implantation des bobinages pour la sonde multiéléments à courants de Foucault, et description de la séquence de commutation des voies, (33).

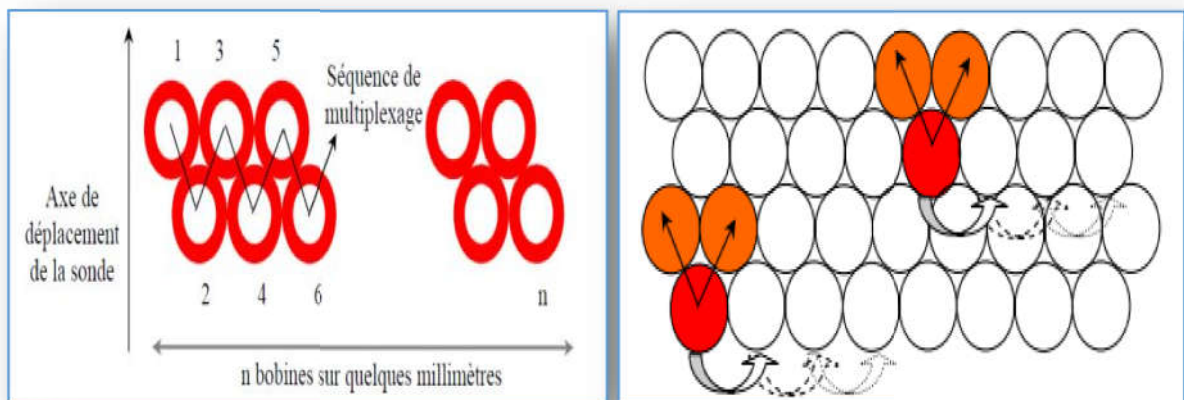


Figure III. 22. Principe du multiplexage pour une sonde multiéléments à CF

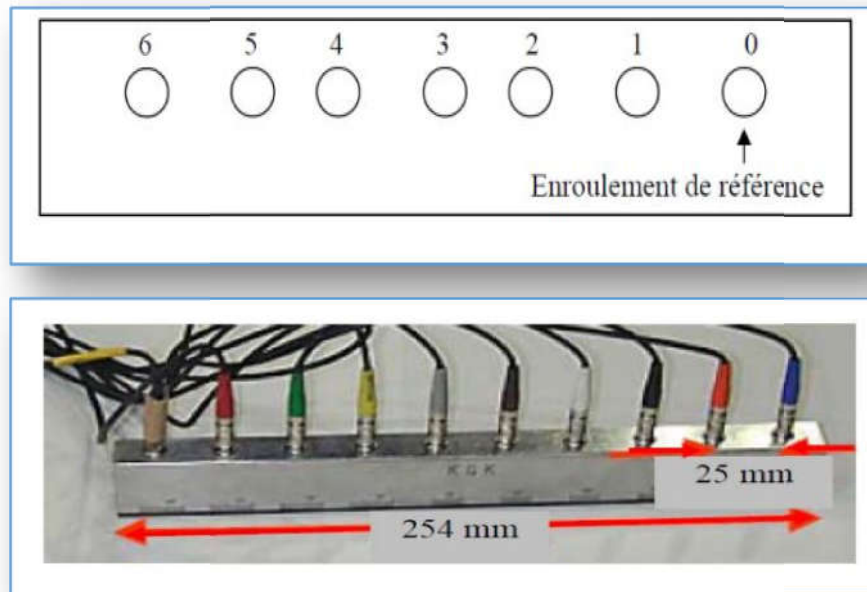
### III.3.3. Géométries d'une sonde CF multiéléments

Les géométries d'une sonde composée de capteurs multiéléments utilisés sont ,. (34):

- La structure linéaire uniforme (ULA)
- La structure circulaire uniforme (UCA).
- La structure planaire uniforme (UPA)
- 

### **III.3.3.a. Rangée linéaire uniforme**

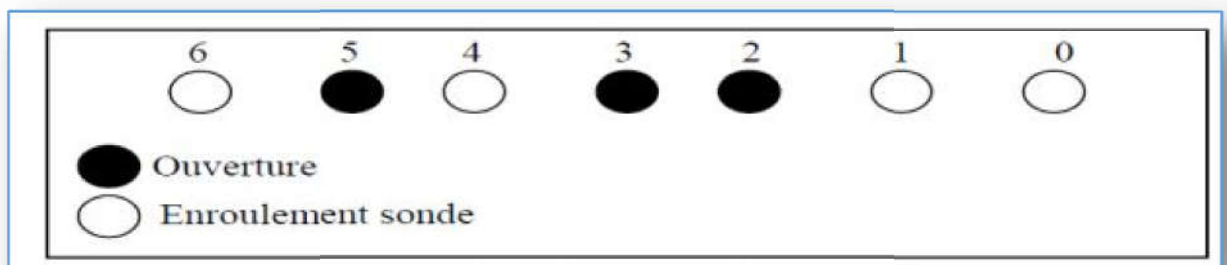
C'est la géométrie la plus simple, elle consiste à ranger la multitude de capteur linéairement et uniformément.



**Figure III. 23. Structure linéaire uniforme**

### **III.3.3.b. Rangée linéaire non uniforme**

Une répartition d'une rangée de quatre sondes avec une inclusion de trois ouvertures, c'est une répartition non uniforme, (Figure (III.24.).



**Figure III. 24. Une répartition d'une rangée de quatre sondes avec une rangée de 3 ouvertures**

### III.3.3.c. Rangée planaire:

Il existe des rangées planaire uniforme (UPA) et non uniforme. Des géométries de rangée planaires sont montrées sur la Figure (III.25)

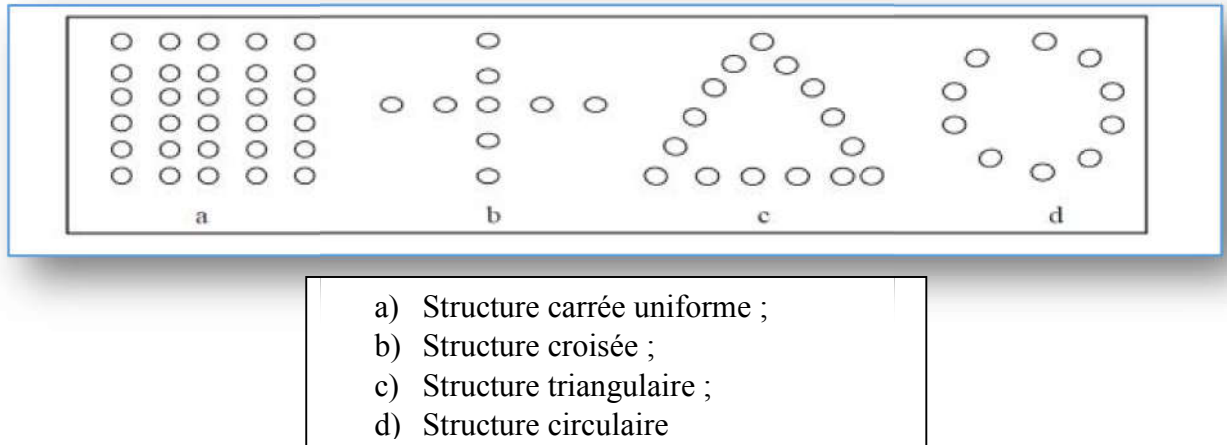


Figure III. 25. Géométries planaires d'un multiélément.

### III.3.4. Interprétation du signal

La figure (III.26), montre l'image qui peut être construite quand une sonde multiéléments (ECA) passe au-dessus d'un défaut. Dans ce cas, l'enroulement juste au-dessus du défaut produit un signal fort.

Plus l'enroulement est loin de la fissure, plus le signal produit est faible. La vue est codée en couleurs pour représenter les différentes amplitudes, la forme et la position des signaux par rapport aux enroulements (proches ou loin des bobines).

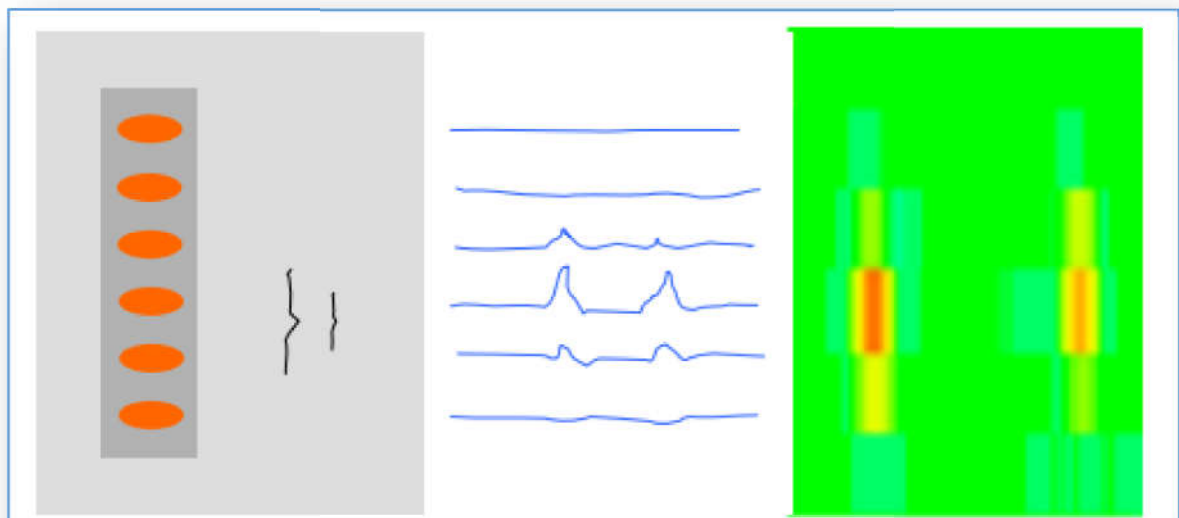


Figure III. 26. Principe de détection d'un système multiéléments

### III.3.5. Systèmes multiéléments à étudier échantillon 1

#### III.3.5.a. Domaine d'étude du système à multiéléments (ECA) en mode multiplexage échantillon1 : rail avec 1 seul Défaut

L'échantillon 1 est un système est composé d'une sonde composé de sept capteurs rangé linéairement, et le rail est affecté d'un seul défaut de largeur 0.2mm, Figure (III.27).

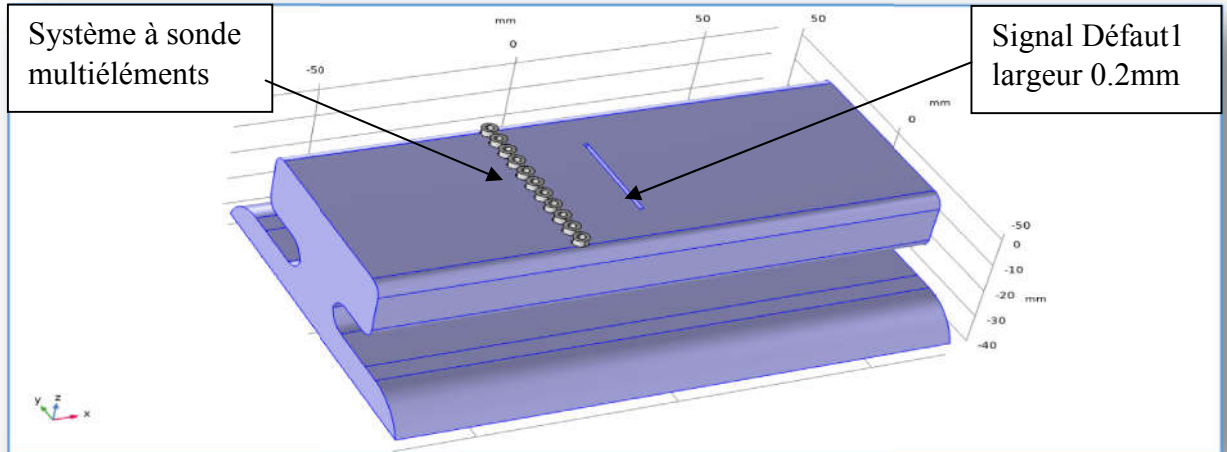


Figure III. 27. Principe de détection d'un système multiéléments échantillon1.

#### III.3.5.b. Maillage du système à multiéléments (ECA) en mode multiplexage échantillon1 : rail avec 1 seul Défaut

La figure (III.28) montre le maillage utilisé lors du balayage surfacique par multicapteurs alimentés en mode multiplexage pour l'échantillon 1 de rail.

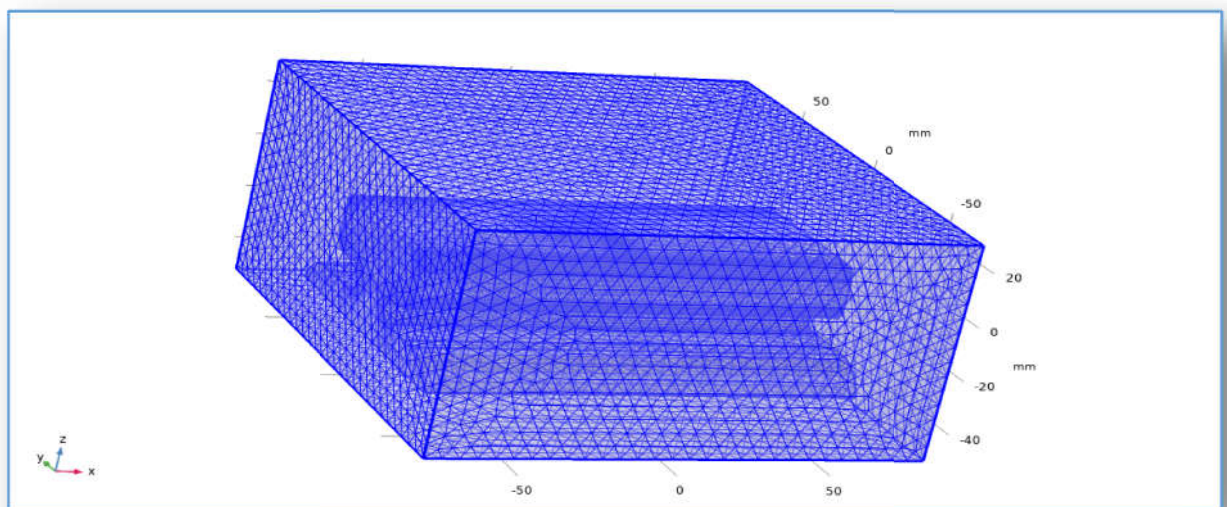
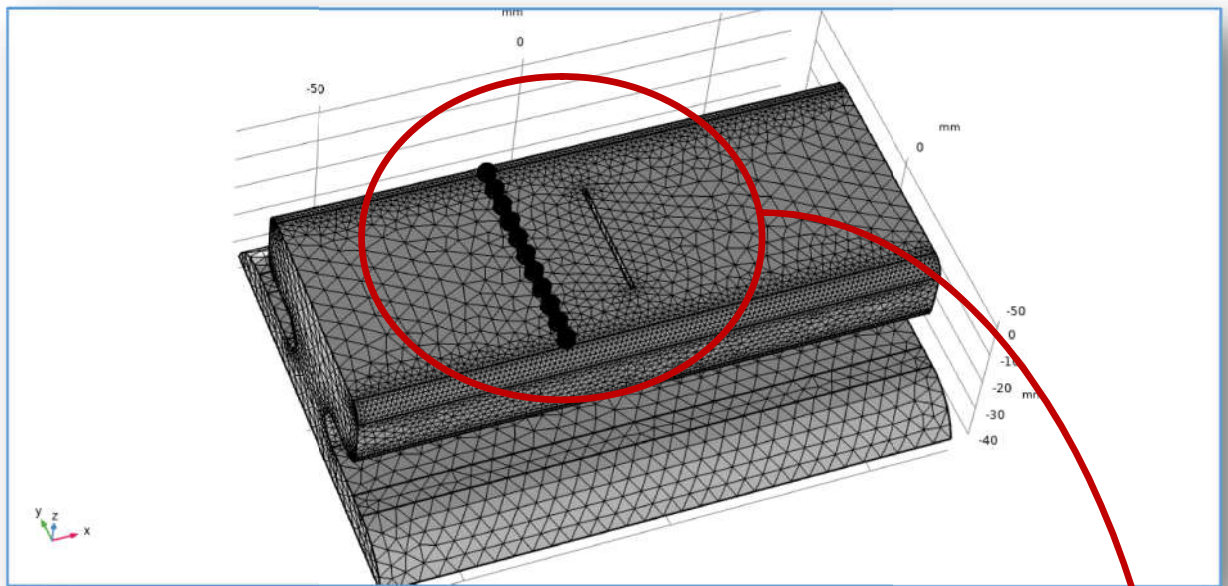


Figure III. 28. Maillage du système multiéléments à étudier « échantillon1 » .

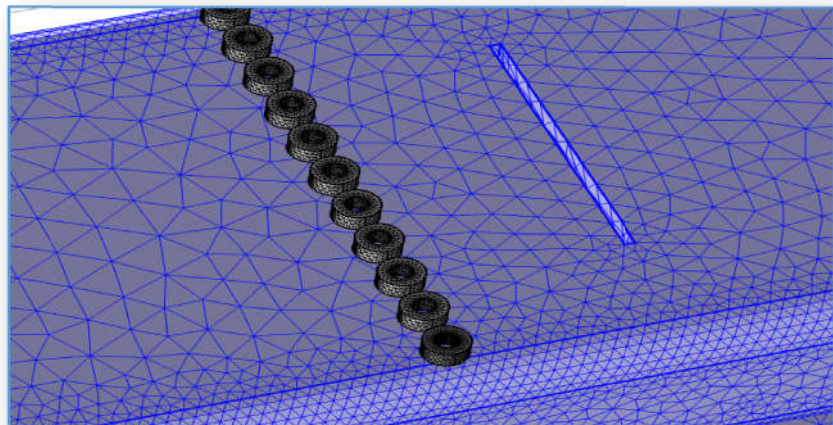
La figure (III.29) montre le maillage au niveau du rail et des capteurs.



**Zoom**

**Figure III. 29. Maillage du rail et des capteurs, « échantillon1 »**

Le zoom du maillage au niveau des 3 défauts, bobines et rail, est illustré par la figure (III.30).

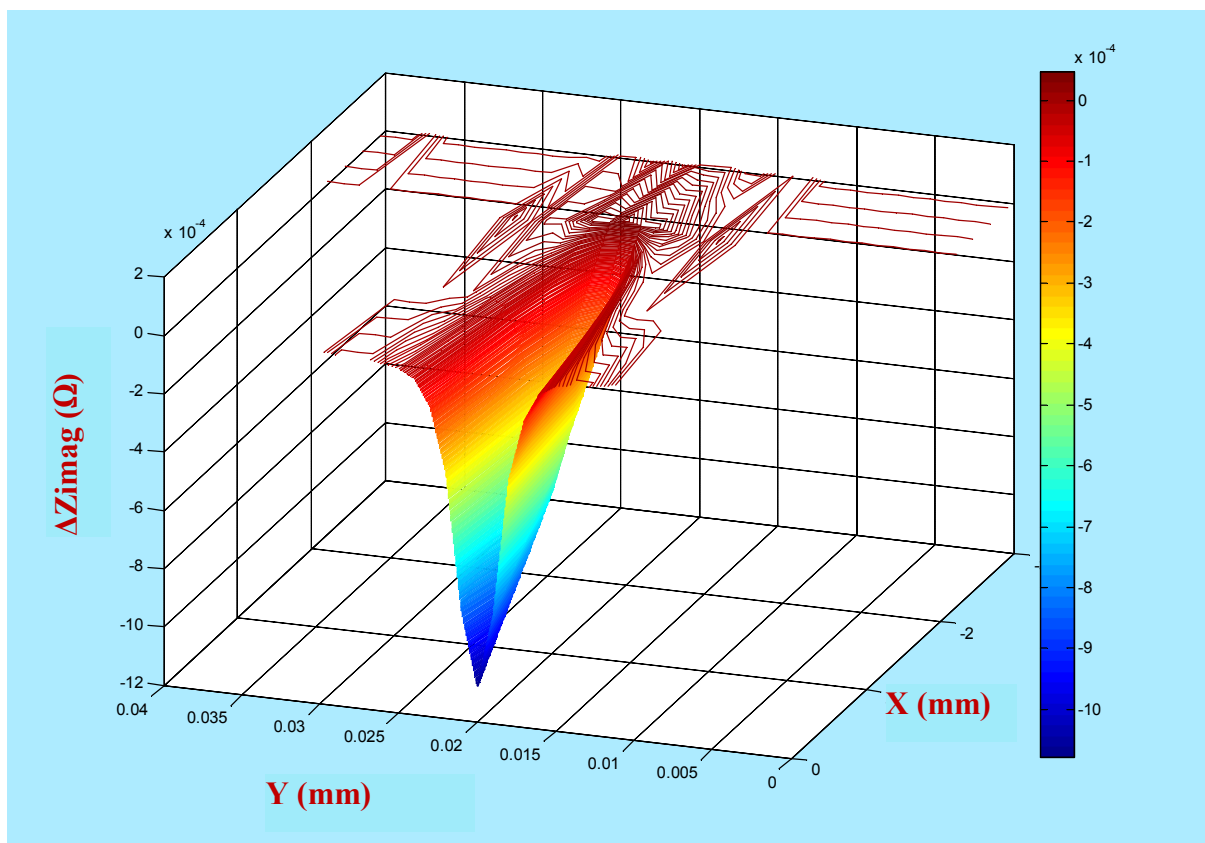


**Figure III. 30. Zoom du maillage du rail et des capteurs, « échantillon1 ».**

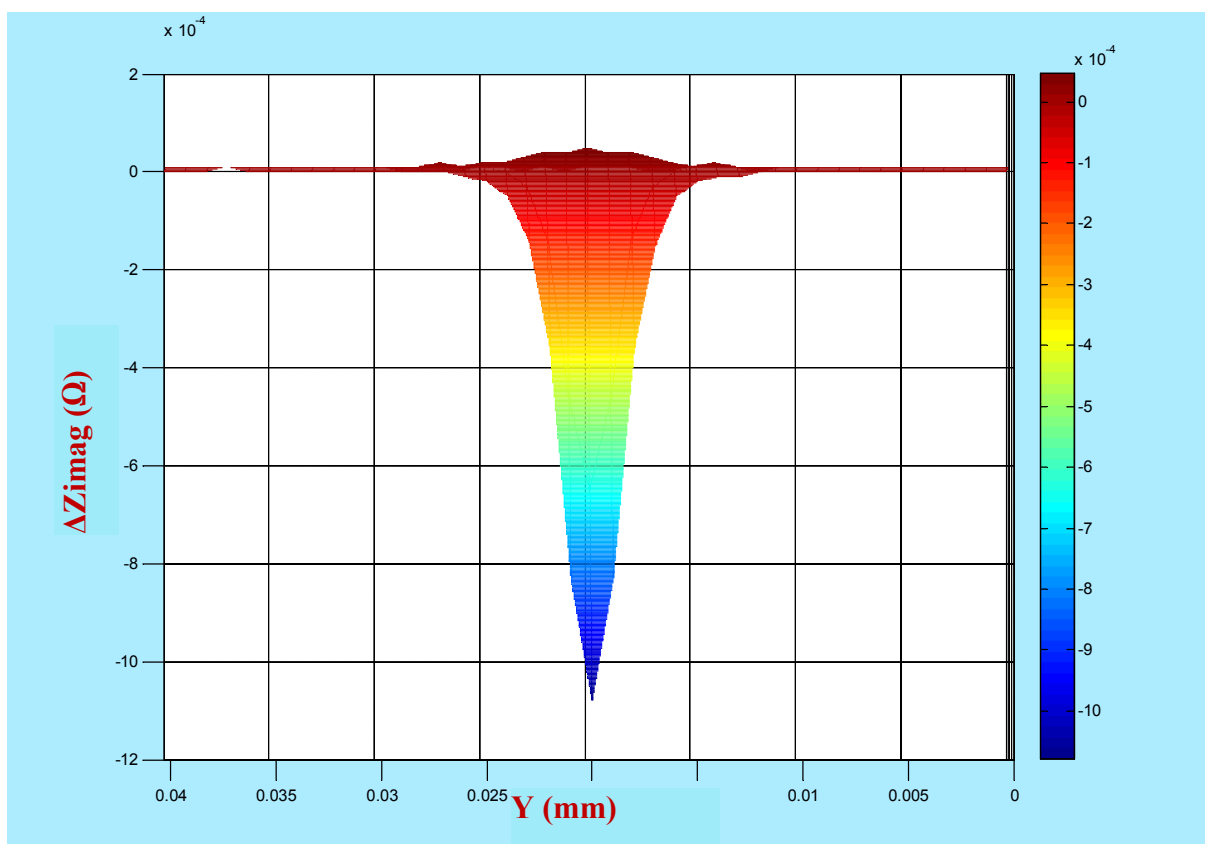
### **III.3.5.c. Résultats obtenus pour un balayage surfacique, échantillon1**

#### **a) Imagerie de variation de la partie imaginaire de l'impédance « Échantillon1 »**

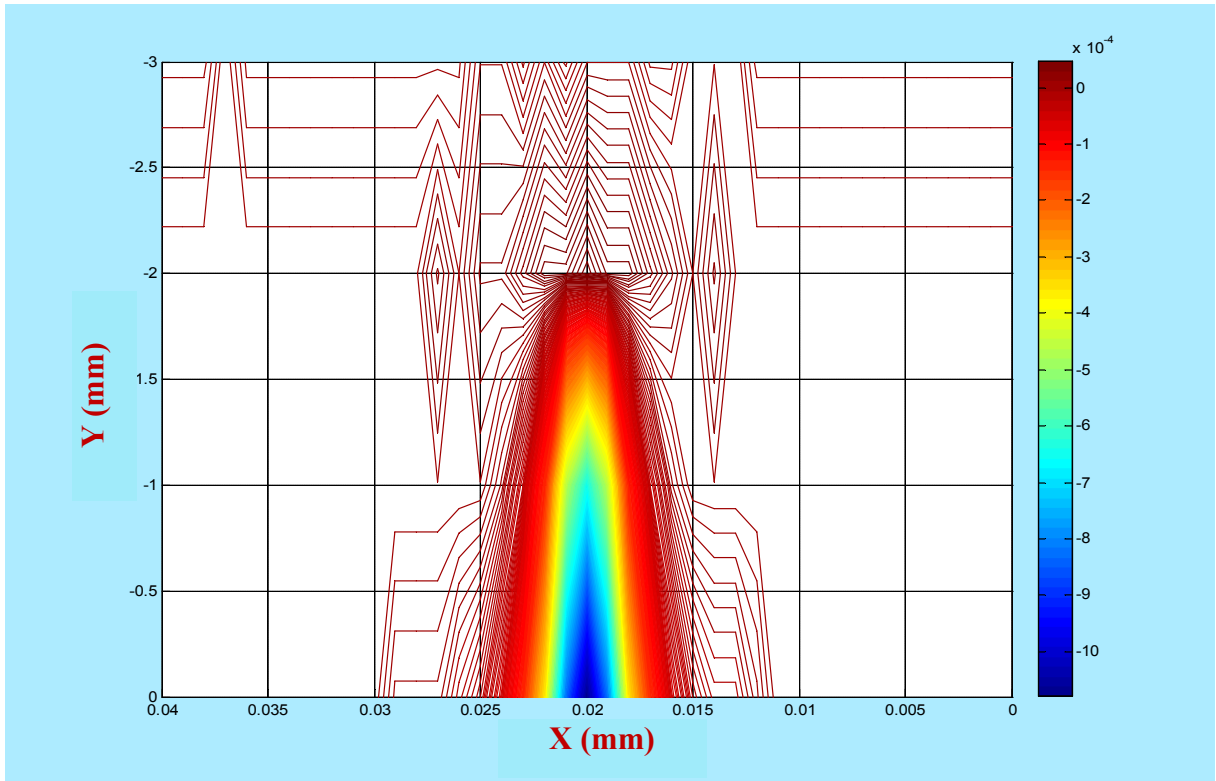
La figure (III.31) présente l'imagerie de la variation de la partie imaginaire de l'impédance en 3D, vue de face et vue de dessus 2D.



a.  $\Delta Z_{imag}$  (Vue en 3D)



b.  $\Delta Z_{imag}$  (Vue de face 2D)

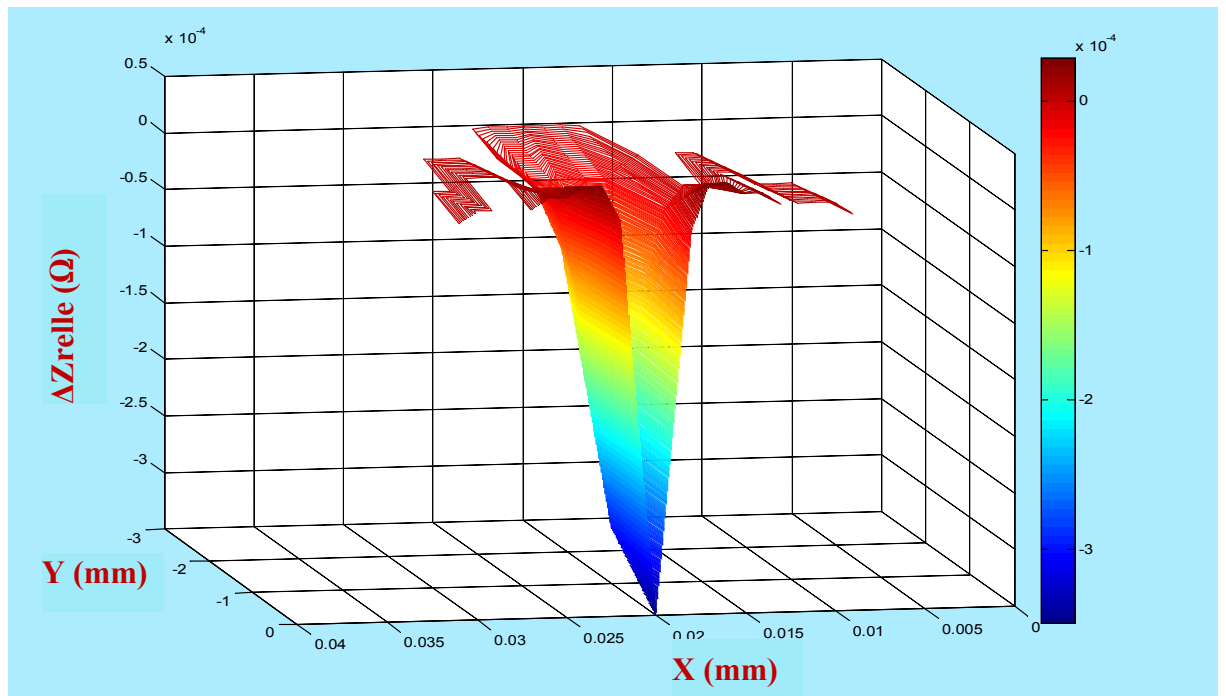


c.  $\Delta Z_{\text{imag}}$  (Vue de dessus 2D)

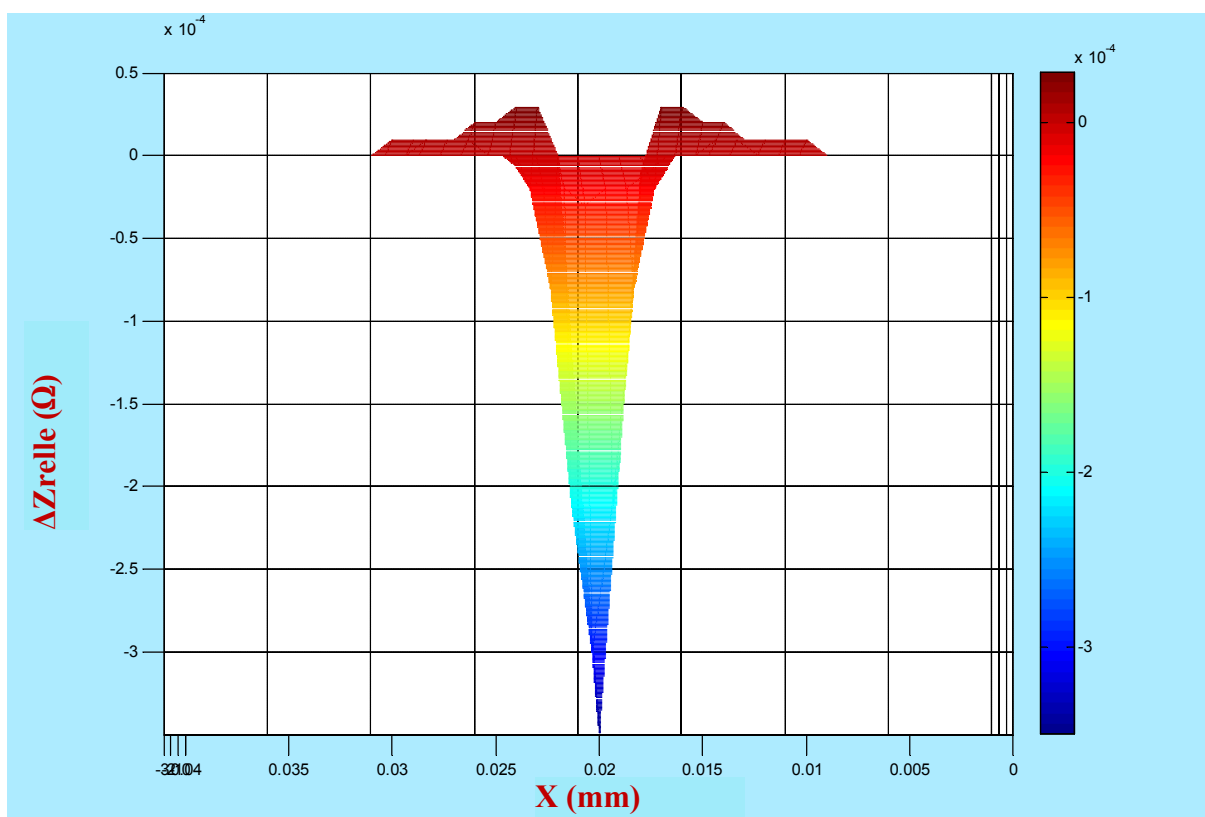
Figure III. 31. Variation de la partie imaginaire de l'impédance » échantillon1.

b) **Imagerie de variation la partie réelle de l'impédance « Échantillon1 »**

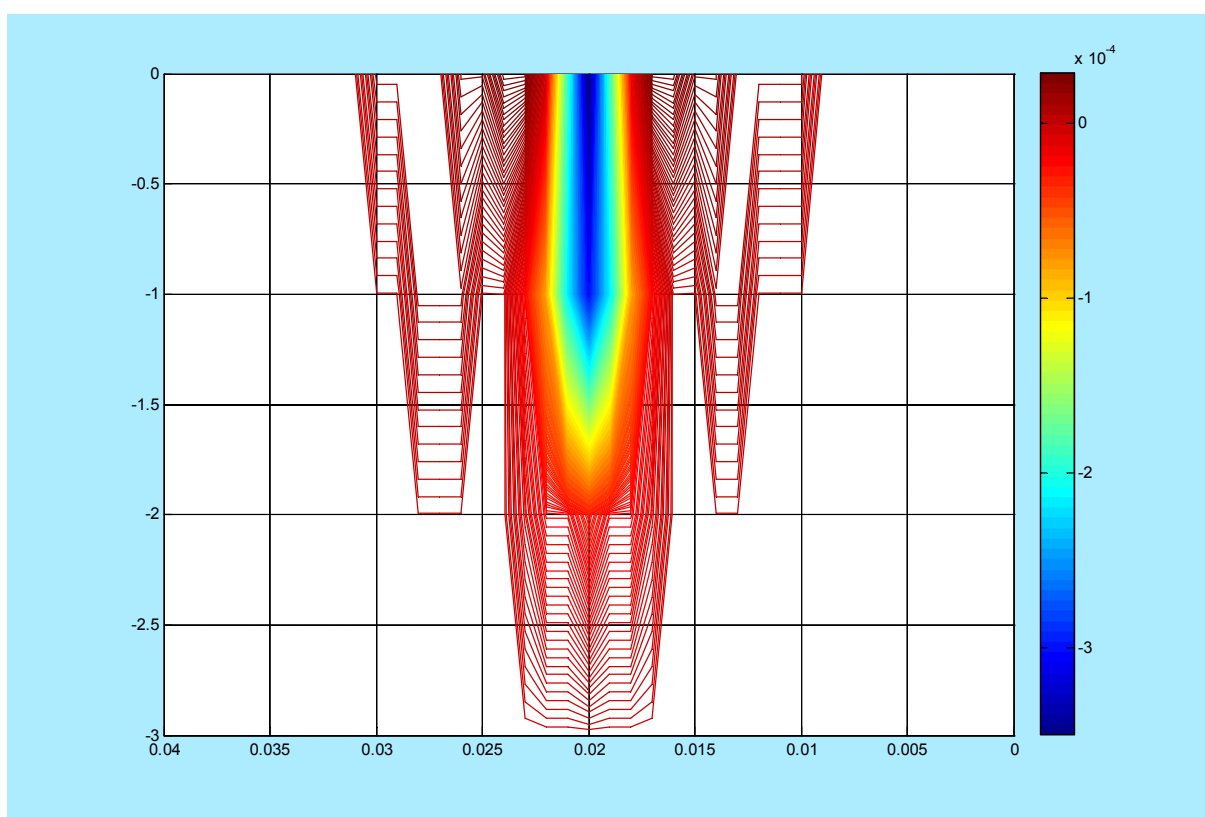
La figure (III.32) présente l'imagerie de la variation de la partie imaginaire de l'impédance en 3D, vue de face et vue de dessus 2D.



a.  $\Delta Z_{\text{reelle}}$  (Vue en 3D )



b.  $\Delta Z_{reelle}$  (Vue de face 2D)



c.  $\Delta Z_{reelle}$  (Vue de dessus 2D)

Figure III. 32. Variation de la partie réelle de l'impédance » échantillon1.

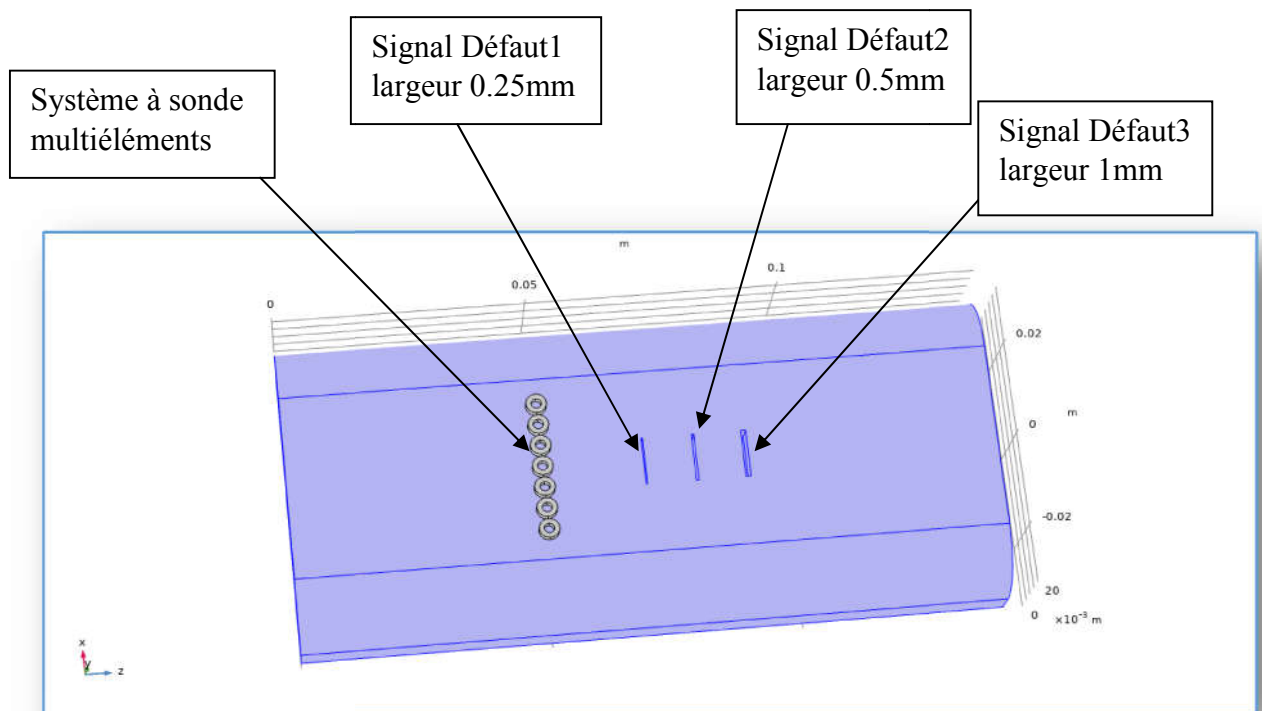
D'après les Figures (III.31), on peut constater que la variation  $\Delta Z_{\text{imag}}$  est nulle au voisinage du rail où il n'y a pas de défaut, par contre cette variation elle est maximale au milieu du défaut, de l'ordre de  $-10,8 \cdot 10^{-4} \Omega$ .

Mais pour la variation réelle  $\Delta Z_r$  (III.32) elle est négative et elle a une valeur maximale de l'ordre  $-3,4 \cdot 10^{-4} \Omega$ .

### **III.3.1. Systèmes multiéléments à étudier échantillon 2**

#### **III.3.1.a. Domaine d'étude du système à multiéléments (ECA) en mode multiplexage échantillon2 : rail avec 3 Défauts**

L'échantillon2 est un système de rail composé d'une sonde à sept capteurs rangé linéairement, et le rail est affecté de trois défauts de largeur 0.25, 0.5 et 1.0mm et espacés de 15mm, Figure (III.33).



**Figure III. 33. Principe de détection d'un système multiéléments, échantillon 2.**

#### **III.3.1.b. Maillage du système à multiéléments (ECA) en mode multiplexage échantillon2 : rail avec 3 Défauts**

La figure (III.34) montre le maillage utilisé lors du balayage surfacique par multicapteurs alimentés en mode multiplexage.

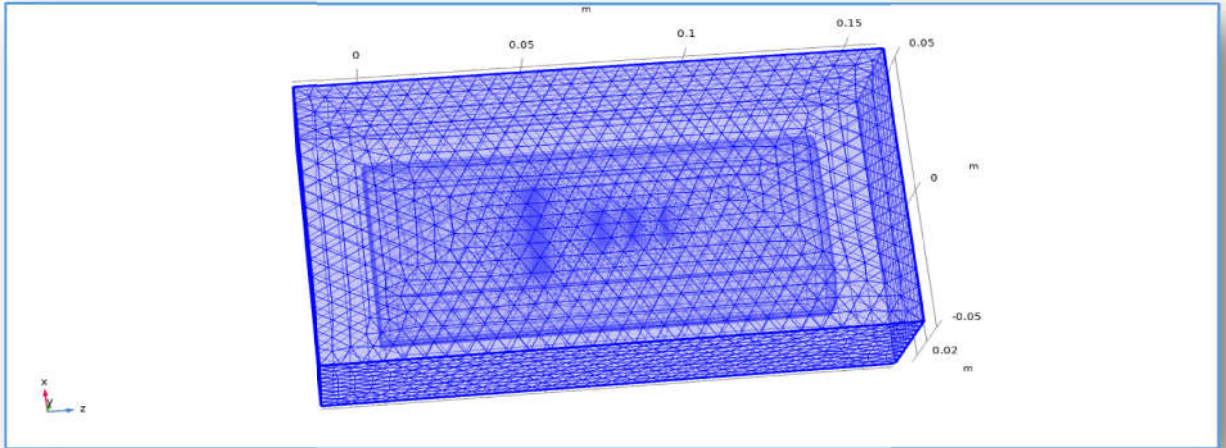


Figure III. 34. Maillage du système multiéléments à étudier, échantillon 2.

La figure (III.35) montre le maillage au niveau du rail et des capteurs .

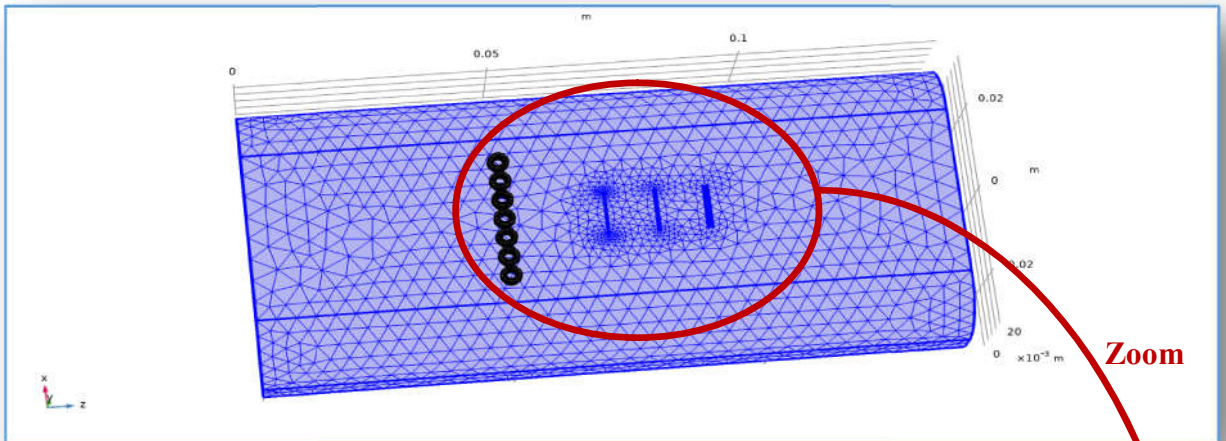


Figure III. 35. Maillage du rail et des capteurs, échantillon 2.

Le zoom du maillage au niveau des 3 défauts, bobines et rail. est illustré par la figure (III.36).

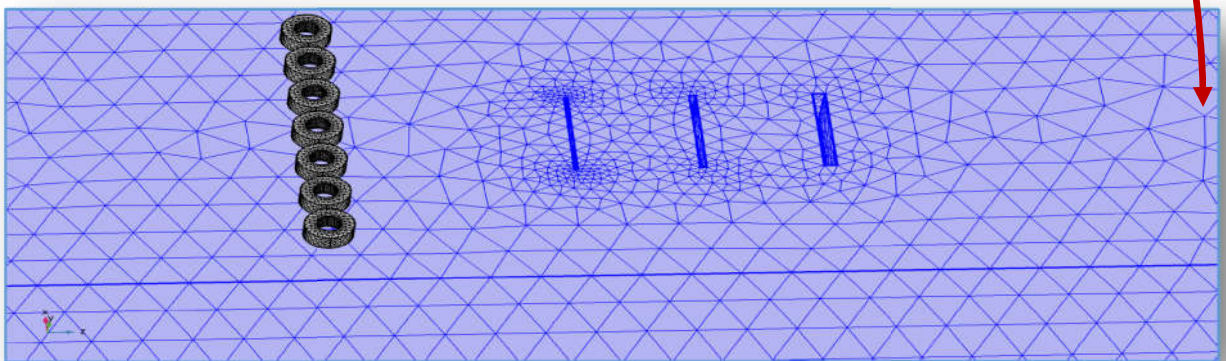
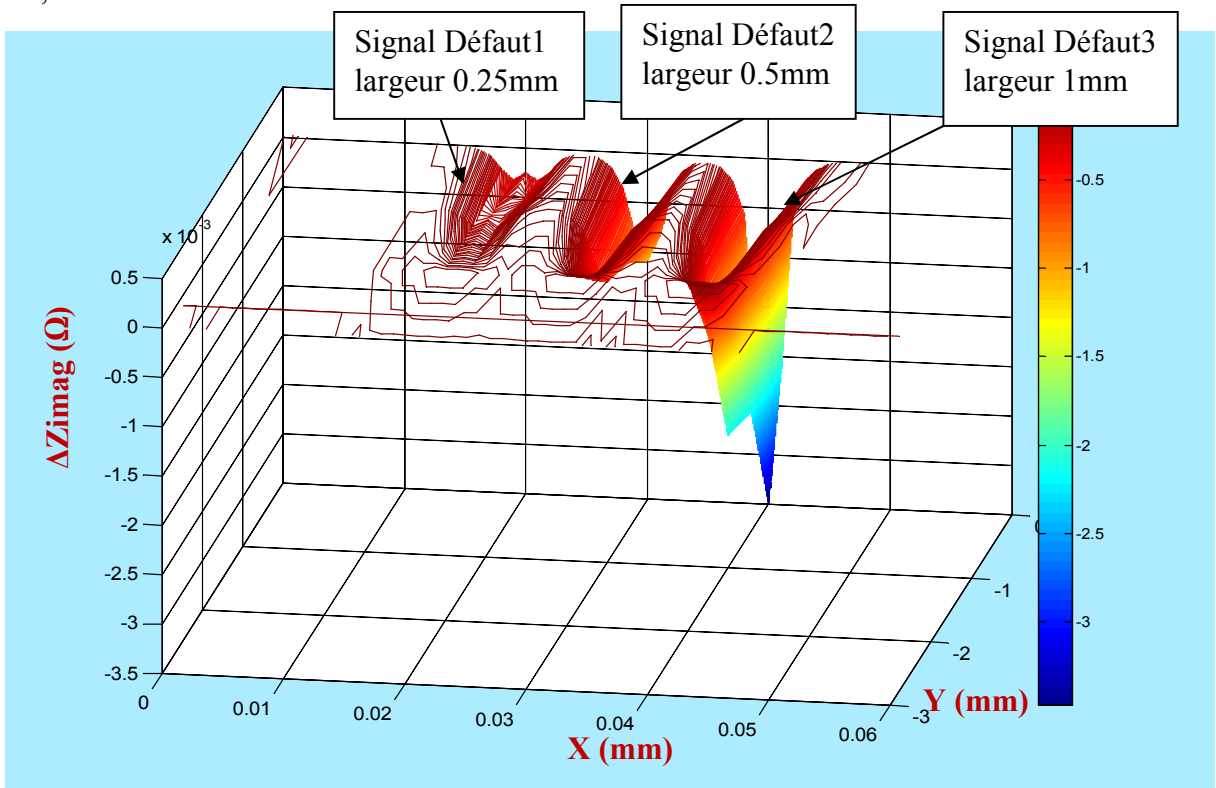


Figure III. 36. Zoom du maillage du rail et des capteurs, échantillon 2..

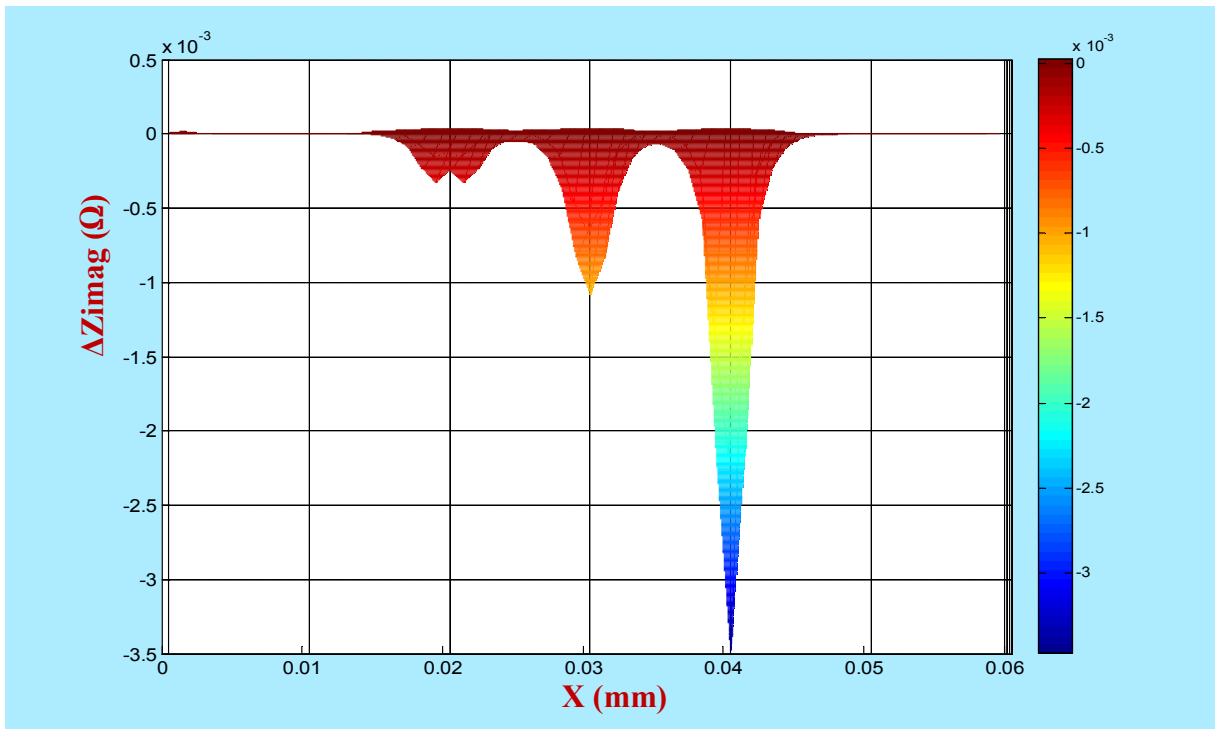
III.3.1.a. Résultats obtenus pour un balayage surfacique, échantillon 2

a) Imagerie de variation de la partie imaginaire de l'impédance « Échantillon 2 »

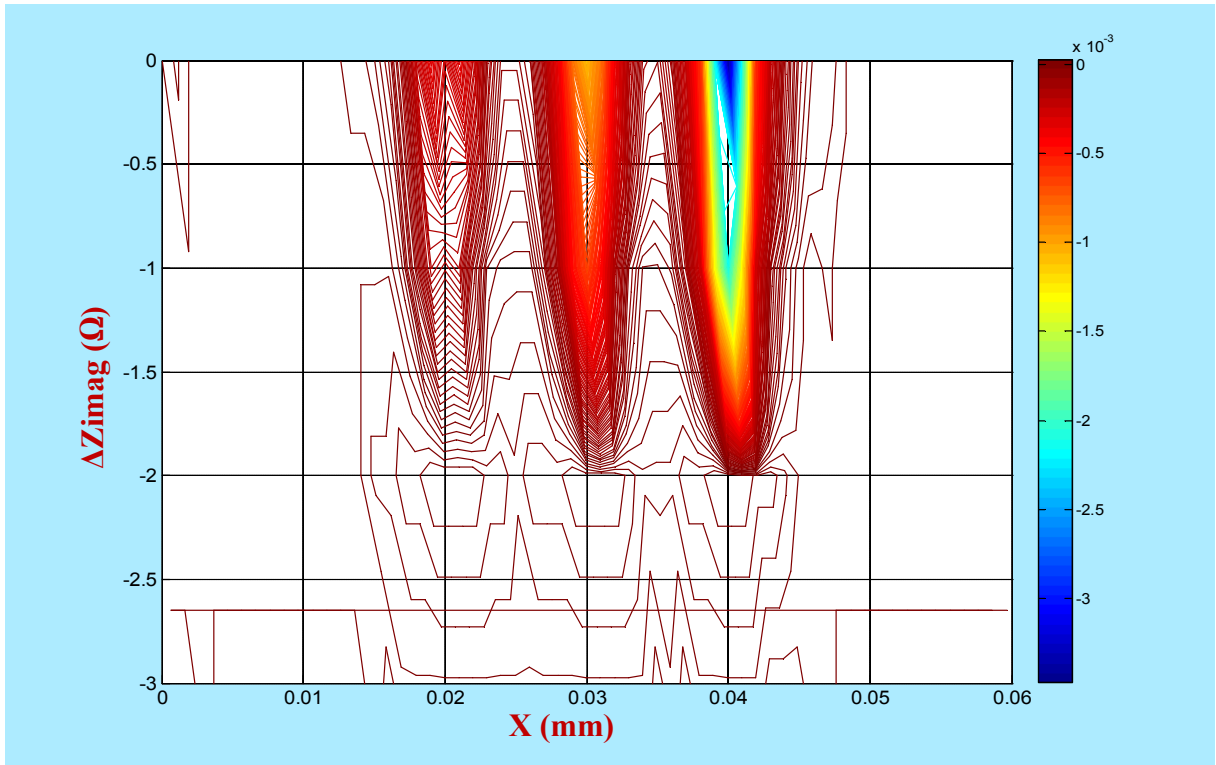
La figure (III.37) présente l'imagerie de la variation de la partie imaginaire de l'impédance en 3D, vue de face et vue de dessus 2D.



a.  $\Delta Z_{imag}$  (Vue en 3D)



b.  $\Delta Z_{imag}$  (Vue de face 2D)

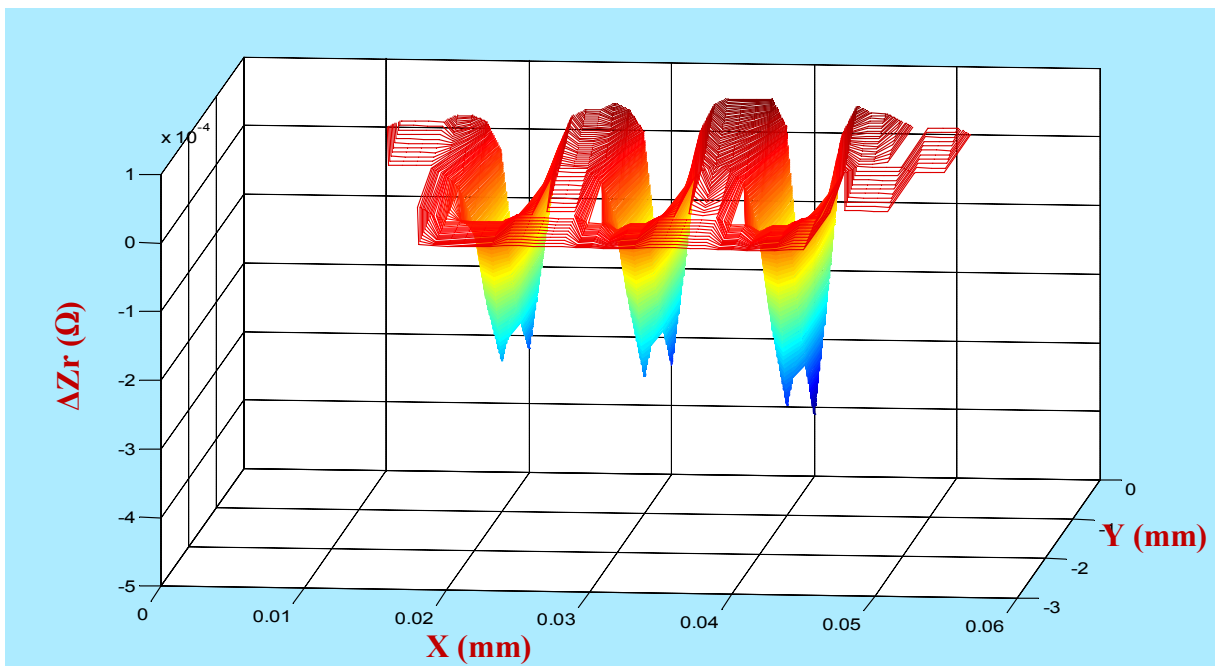


c.  $\Delta Z_{\text{imag}}$  (Vue de dessus 2D)

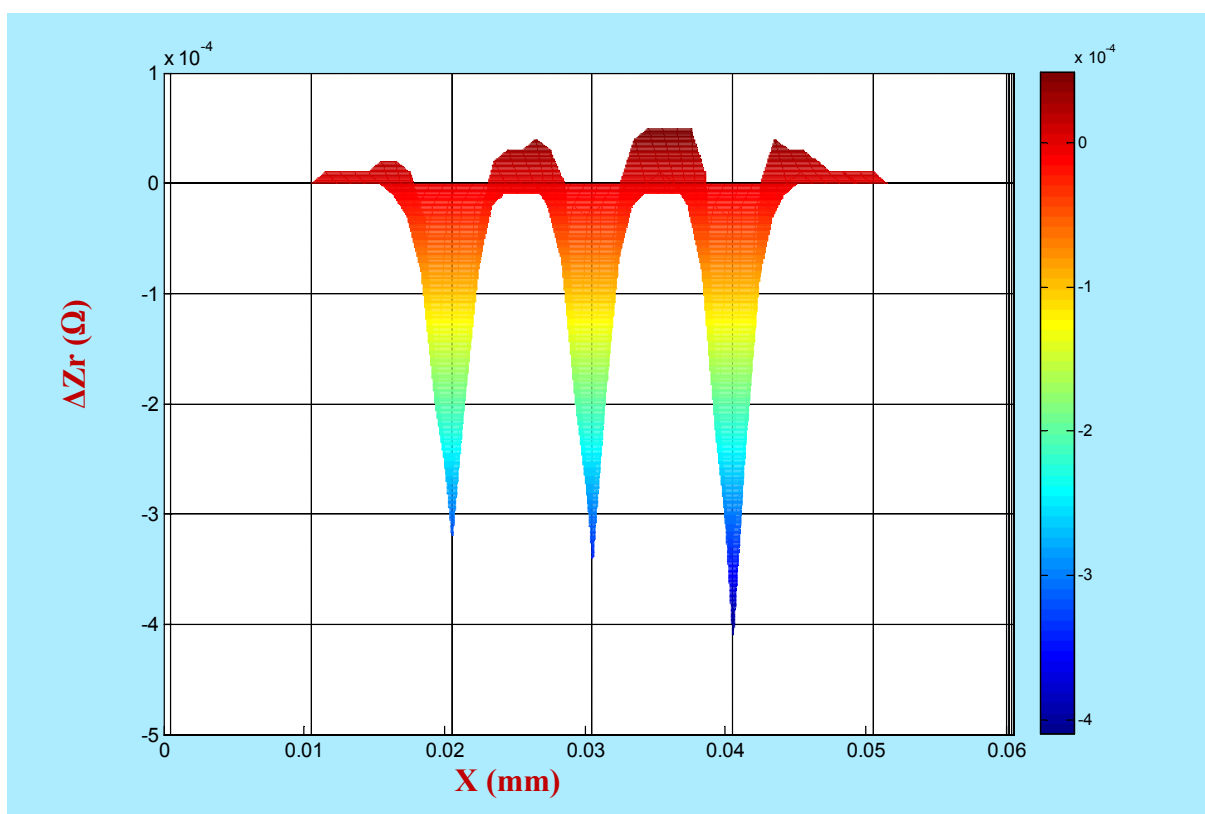
Figure III. 37. Imagerie 3D de variation de réactance d'impédance du balayage surfacique du rail muni de 3 défauts de largeurs différentes.

b) Imagerie de variation de la partie réelle de l'impédance « Échantillon 2 »

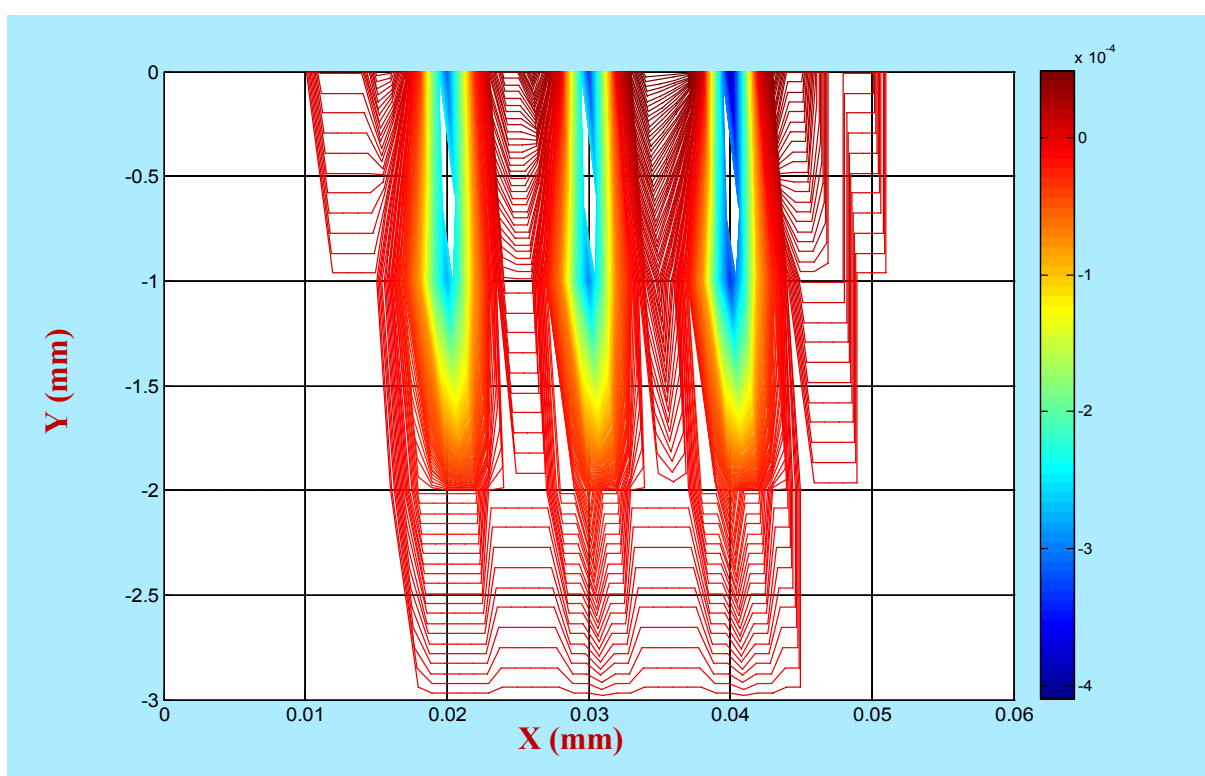
La figure (III.38) présente l'imagerie de la variation de la partie réelle de l'impédance en 3D, vue de face et vue de dessus 2D.



a.  $\Delta Z_r$  (Vue en 3D)



a.  $\Delta Z_r$  (Vue de face 2D )



c.  $\Delta Z_r$  (Vue de dessus 2D )

Figure III. 38. Imagerie 3D de variation de résistance d'impédance du balayage surfacique du rail muni de 3 défauts de largeurs différentes.

D'après les Figures (III.37), on peut remarquer que la variation  $\Delta Z_{\text{imag}}$  est nulle au alentour du rail où il n'existe pas de défaut, par contre cette variation elle est maximale au milieu des défauts, de l'ordre de  $-0,2 \cdot 10^{-4} \Omega$ ,  $-1,1 \cdot 10^{-4} \Omega$ , et  $-3,5 \cdot 10^{-4} \Omega$  respectivement pour les défauts de 0.25mm, 0.5mm et 1.0mm de largeur

Mais pour la variation réelle  $\Delta Z_r$  (III.38) elle est négative et elle à une valeur maximale de l'ordre  $-3,2 \cdot 10^{-4} \Omega$ ,  $-3,5 \cdot 10^{-4} \Omega$  et  $-4,0 \cdot 10^{-4} \Omega$ . pour trois défauts dont les largeurs sont 0.25mm, 0.5mm et 1.0mm .

### **III.4. Conclusion:**

*Après avoir implémenté un système CND-CF de détection de défauts de corrosion ou d'arrachement de matière d'un rail de train simulé sous COMSOL Multiphysics. Les résultats obtenus montrent, pour le premier volet « balayage linéaire » que l'étude de l'effet de variation des paramètres du défaut a montré que de plus le défaut est volumineux de plus le signal qu'il engendre au niveau du capteur devient important. Pour le deuxième volet « balayage surfacique » c'est-à-dire l'utilisation de sonde multiéléments alimentée en mode multiplexage a un impact significatif sur les vitesses d'inspection ce qui se traduit par un gain de temps et surface inspectée.*

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

*De nos jours, des normes de sécurité contraignantes sont imposés pour différents secteurs tel que l'aéronautique, le nucléaire, gazoduc et même le transport ferroviaire... Ces secteurs recourent au contrôle non destructif (CND) pour s'assurer de l'état d'intégrité de leurs matériels.*

*Plusieurs méthodes CND différentes sont déployées pour l'évaluation de l'intégrité structurelle des infrastructures ferroviaires, certaines complémentaires les unes des autres.*

*De nombreuses techniques existent. Celle dite des courants de Foucault (CF) est très répandue en raison de sa facilité de mise en œuvre, de sa simplicité d'implémentation, de son faible coût et de son caractère non polluant et sans contact. Elle est réservée aux pièces électriquement conductrices dans lesquelles elle permet de détecter la présence de fissures, de mesurer une épaisseur...*

*La méthode des éléments finis (MEF), grâce à sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes, occupe une place importante dans le cadre des techniques de modélisation utilisées dans le CND par CF.*

*Notre mémoire de Master a été dédié à la simulation par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL-Multiphysics pour un système de détection de défauts de corrosion ou manque de matière « d'arrachement de matière » de rail de train par la technique du CND-CF*

*Avant de présenter les conclusions de simulation, il est important de comprendre que lorsqu'il s'agit de méthode de contrôle de surfaces, la performance réelle de chaque technique dépend largement des conditions spécifiques à l'inspection, notamment le type de matériau, le défaut recherché, l'état de la surface à inspecter, ses propriétés, etc.*

*Les résultats de simulation numérique pour les deux balayages, linéaire et surfacique, ont montrés :*

- L'amplitude de signal du capteur dépend fortement de la fréquence, car l'amplitude et la distribution des courants induits dépend de cette dernière.*
- L'utilisation d'un seul capteur faisant un balayage unidimensionnel (linéaire) n'est pas suffisant vu la taille de la surface du rail.*
- L'utilisation d'un système de sonde multi-capteurs pour un balayage bidimensionnel (surfacique) avec alimentation en mode multiplexée permettant d'éliminer l'effet néfaste de mutualité entre capteurs élémentaires se trouvant côte à côte. devient irréfutable car elle permet un gain de temps et de surface inspectée.*

### **Perspectives**

Plusieurs perspectives sont liées à ce travail, on peut citer notamment les points suivants :

- *Il serait intéressant de poursuivre les résultats de simulation par les validations expérimentales du modèle étudié*
- *Remplacer des capteurs absolus par capteurs différentiels dans le but de minimiser l'effet de la variation de Lift-off et les contraintes thermiques.*
- *Réalisation pratique du système multiéléments, tenant en compte des conditions réelles de l'inspection.*

## Bibliographie

1. **Technology, AEA.** *Review and identification of methods for analysing the effect of defects and damage.* s.l. : Technical report, 2003.
2. **Thollon, Frédéric.** *Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques .* LYON : L'ECOLE DOCTORALE DE LYON DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR, 1995.
3. **Abdou, Abdelhak.** *Contrôle non Destructif (CND) : Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault.* Batna : Université de Batna 2 , 2018.
4. **N.Oukacine.** *Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive.* Tizi-ouzou, Algérie : Université Mouloud Mammeri, 2012.
5. **DALI Abderrahmane, KHEBAL Merwane.** *Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques.* s.l. : Université Mohamde Boudiaf M'sila, 2019.
6. **SAFER, Adib Omar.** *Etude et modélisation de capteur à courant de Foucault pour le contrôle non destructif.* s.l. : Université de M'sila, 2014.
7. **Choua, Yahya.** *Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault.* s.l. : Université Paris Sud Paris XI, 2010.
8. **KHEBBAB, MOHAMED.** *Etude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault pour le Contrôle Non Destructifs CND.* Constantine : Thèse de magister en electroniue Université Mentouri de Constantine, 2007.
9. **Helifa, Bachir ,.** *Contribution à La Simulation du Cnd par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Debouchantes.* Nantes : Thèse de Doctorat, université de NANTES école doctorale, 2012.
10. **Isabelle Dufour, Moolraj Busawon, Denis Premel and Dominique Placko.** *General Analysis of Inductive Sensor Based Systems.* France : Journal de Physique III,, 1994. Vol. Volume 4,.
11. **Tarik, Bouchala.** *Modélisation semi analytique d'un capteur a noyau de ferrite.* Batna : thèse de magister en électronique , université H. Lakhdar de Batna, 2007.
12. **Lakhdari, Ala-Eddine.** *Etude Et Modélisation De Capteurs En Cnd Par Courants De Foucault : Application A La Détection Des Fissures.* Université de Biskra : Mémoire de Magister, Electricité industrielle, 2011.
13. **M.Mephane.** *modélisation de contrôle ultrasonore de tube d'acier présente des défauts de type "direction de l'information scientifique et technique.* s.l. : Gif-sur-yvert frane, 1998.

14. **Abbassi Abderrahmane, Meddeur Abdessamed.** *Application des réseaux de neurones pour la caractérisation géométrique et physique d'une plaque conductrice.* 2015 : UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
15. **Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Bachir Abdelhadi, Amor Guettafi, Azzedine Benoudjit.** *Nondestructive Eddy Current Measurement of Coating Thickness of Aeronautical Construction Materials.* 2019. pp. 451-457.
16. **Dumont-Fillon, Jacques.** *Contrôle non destructif (CND).* PARIS : s.n., 2006. R 1400-1.
17. **BENHALIMA, Abdenour et SAOUDI, Amirouche.** *Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques).* s.l. : Université de M'sila, 2018.
18. **AMRIOU Nabil, HANNA Brahim.** *Contrôle Non Destructif pour une Structure Multicouches utilisée en Aéronautique par Système de Multi-Capteurs à Courants de Foucault.* M'sila : Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2021.
19. **C.RAVAT.** *Conception de multicapteurs à courant de foucault et inversion des signaux associées pour le controle non destructif.* PARIS : University Paris Sud 11, 2008.
20. **W.TFAILI.** *Conception d'un algorithme de colonies de fourmis pour l'optimisation continue dynamique.* Val de MARE : University Paris 12, 2007.
21. **G. Dreyfus, J. M. Martinez, M. Samuelides M.B .Gordon, F. Badran, S .Thiria, L. Hérault.** *Réseaux de neurones: Méthodologie et applications.* s.l. : Edition EYROLLES, 2004.
22. **M.WEINFELD.** *Réseaux de neurones.* s.l. : Technique de l'ingénieur, 2003. H1990.
23. **M.BENTOUMI.** *Outils pour la détection et la classification. Application au diagnostic de défauts de surface de rail.* NANCY : Université Henri Poincaré Nancy 1, 2006.
24. **J.Rude.** *Développement d'un modèle statistique neuronal pour la description fine de la pollution par le dioxyde d'azote : application à la région parisienne.* Paris : Université Paris XII, 2008.
25. **Y.Le Bihan, J.Pavo, C.Marchand.** *Characterization of small cracks in Eddy current Testing.* s.l. : Eur phys ,J.Appl Phys , 2008. 43,231-237.
26. **M.R.ZEMOURI.** *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la maintenance.* s.l. : Université de Franche-Comté, 2003.
27. **O.BENZAÏM.** *technique multi port pour la conception et la réalisation de systèmes Micro-ondes dédiés à l'évaluation non destructive de matériaux.* s.l. : Université de LILLE 1, 2009.

28. **F.Cau, A.Fanni, A.Montisci, M.USAI, P.Testoni.** *Artificial Neural Networks for Non Destructive Evaluation with Ultrasonic Waves in not Accessible Pipes.* 2005. 0-7803-9208, p685-692.
29. **Aboubekr ryad abdallah, DJOUDI Oussama.** *Application des Réseaux de Neurones pour la Caractérisation Géométrique d'un Défaut 3D par Courants de Foucault.* s.l. : University Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
30. **Prévoitet, J-C.** *Tutorial on Neural Networks .* France : Université Paris VI, 2002.
31. **J.Freeman, D.Skapura.** *Neural Networks. Algorithms Applications and Programming Techniques.* Clear Lake : University of Houston, 1995.
32. **IAEA.** *Eddy Current Testing at Level 2:.* 2011.
33. **Bowler, Nicola.** *Eddy-Current Nondestructive Evaluation.* s.l. : Springer Series in Measurement Science and Technology, 2019.
34. **Meziane, HAMEL.** *ETUDE ET CARACTERISATION DES FISSURES FINES EN EVALUATION NON DESTRUCTIVE.* s.l. : UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
35. **Nathan Ida, Norbert Meyendorf.** *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation.* s.l. : Springer International Publishing, 2019.
36. **Oukhellou, Latifa.** *Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défaut de rails par courant de Foucault .* s.l. : l'Université Paris XI Orsay, 2004.
37. **Oussama, BENSALAH.** *Contrôle non destructif par courants de Foucault.* s.l. : Université de Msila, 2012.
38. **RAMDANE, Brahim.** *Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de.* s.l. : UNIVERSITE DE NANTES, 2009.
39. **Zaidi, Houda.** *Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courant de Foucault : application aux capteurs souples.* s.l. : UNIVERSITE PARIS-SUD, 2013.
40. **Zorni, Chiara.** *Contrôle non destructif par courants de Foucault de.* s.l. : L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD 11, 2012.
41. **Delabre, Benjamin.** *Développement de capteurs flexibles à courants de foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique.* s.l. : Université Paris Saclay, 2016.

42. **BENHADDA, Nabil.** *Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND)* . Batna : Université de Batna 2 , 2015.

43. <https://nucleom.ca/fiches/les-types-dessais-non-destructifs>. [En ligne]