

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



**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE**

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'étude Master Académique

Spécialité : entraînements électriques

Présenter par :

***M_{elle}* : DAHMANI DIHYA**

Thème

Contrôle non destructif application pour matériaux conducteurs

Membres du jury :

M. Hocini	Farid	, MCB, UMMTO,	Président
M. Mohellebi	Hassane	, Professeur, UMMTO,	Promoteur
Mme. Djadel Ferroudja		, MAA, UMMTO,	Examinatrice
M. Nait Ouslimane Ahmed		, MAA, UMMTO,	Examineur

Soutenu le 28/09/ 2016

Remerciements

Sans parlé trop si grâces a ce travail que j'ai peut formuler quelques connaissances dont j'ai recueillie. Mais sans oublié que ma persistance engendre votre présence intellectuelle et que se partage pleine d'émotion qui me permet de ne pas tenir rigueur a tous les gens soient je les connais ou pas et je souhaite une réciproque à ce sujet.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste mémoire de fin d'étude. Je tiens à remercier Mr Mohellebi Hassane mon promoteur et je suis vraiment honoré de faite d'accepté me diriger, Professeure à l'université de l'UMMTO pour ses remarques et ses conseils. Je tiens surtout à remercier très sincèrement Mr,
Je remercie, avec la même sincérité,

Compte tenu des nombreuses personnes agréable que j'ai eu leur émotion comme véritable aide et sans aucun doute, j'ai beaucoup de monde à remercier, pas uniquement pour leurs compétences ou leur participation dans ce modeste travaille, mais tout simplement pour leur soutien, leur gentillesse ou le souvenir éternel qu'elles m'ont laissé.

Dédicaces

Je dédie se mémoire pour mes très chères Parents.

Pour mon adorable tante Cherifa que j'adore beaucoup.

Pour mes sœurs.

Pour mes frères.

Pour mes collègues et camarades.

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I

L'état de l'art sur les techniques (CND) le contrôle non destructif

I. 1.Introduction.....	2
a). Les étapes de contrôle non destructif	2
b). L'utilisation des méthodes de contrôle non destructif	2
c). Exemple de domaines de contrôle par courant de Foucault	3
d). Quelque exemple de pièces contrôlées par courants de Foucault.....	3
e).Principe de contrôle non destructif application matériaux conducteur (courants de Foucault).....	4
f). Choix des procédés CND.....	4
g). Les principaux défauts rencontrés.....	4
h). Schéma présente le principe de contrôle CND par courants de Foucault.....	5
I. 2. Les différentes techniques de contrôle non destructif (C N D).....	6
I. 2.1. Contrôle par examen visuel (V T).....	6
I.2.2 . Contrôle par ressuage (P T).....	6
a). Les étapes adaptatives.....	6
I. 2.3. Magnétoscopie (M T).....	7
I. 2.4. Contrôle d'étanchéité (L T).....	8
a). Contrôles d'étanchéité ITM TODA-15.....	9
I. 2.5.Radiographie.....	9
I. 2.6. Contrôle ultrasons	9
a). Les avantages	10
b). Les inconvénients	10
I. 2.7. Thermographie.....	10

I. 2.8. Chauffage par induction.....	11
I. 2.9. Le contrôle par courants de Foucault (C F).....	11
I. 2.9.1. Présentation de courants de Foucault	12
I. 2.9.2. La distribution des courants de Foucault dans la cible (pièce).....	14
I. 2.9.3. Les modes d'exploitation.....	15
a). alimentation mono-fréquence.....	15
b). Alimentation multi-fréquentiel.....	15
c). L'alimentation par des courants pulsés.....	15
I. 2.9.4. Epaisseur de peau (effet de peau).....	16
I. 2.9.5. Les capteurs à courant de Foucault.....	18
I. 2.9.5.1. Les capteurs inductifs.....	18
a). Bobine encerclant	18
b). Palpeur ou bobine ponctuelle.....	18
c). Bobine plat.....	19
d). Sonde interne tournante.....	19
e). Les capteurs absolus (double fonction).....	20
I. 2.9.7. Les capteurs magnétiques	20
a). Exemples de capteurs.....	20
I. 2.9.8. Les fluxgates (les magnétomètres).....	21
I. 2.9.9. Les capteurs à effet Hall.....	21
I. 2.9.10. Les magnétorésistances.....	22
a). Les magnétorésistances anisotropes – AMR.....	22
b). Les magnétorésistances géantes GMR.....	23
c). Les magnétorésistances tunnel – TMR.....	24

I. 2.9.11. Principe de CND par courants de Foucault.....	24
a). Les équations de Maxwell en régime magnétostatique.....	25
b). Les équations de Maxwell en régime magnéto harmonique.....	25
I. 2.9.12 Exemple de contrôle d'une plaque conductrice	26
I. 2.9.13. Les avantages de contrôle par courants de Foucault.....	26
I. 2.9.14. Les inconvénients de la méthode de contrôle par courants de Foucault.....	27
I. 2.9.15. L'intérêt de contrôle non destructif par courants de Foucault	27
I. 3. Les matériaux conducteurs électriques	28
I. 3.1. Introduction.....	28
I. 3.2. Conducteur dans un champ électrique	28
I. 3.3. Les conducteurs dans un champ électrique statique.....	28
I. 3.4. Du conducteur parfait au conducteur réel.....	28
I. 3.5. Conducteur parfait	29
I. 3.6. La réflexion sur un conducteur parfait	29
I. 3.7. L'électron amorti.....	29
I. 3.8. Conductivité électrique	30
I. 3.9. Propagation dans les conducteurs.....	30
I. 3.9.1. Les conducteurs ohmiques	30
I. 4. Conclusion	30

Chapitre II

Les méthodes numériques de résolution aux dérivées partielles

II. 1.Introduction.....	32
II. 2. La méthode des différences finis.....	32
II. 2.1. Introduction.....	32
a). Approximation des dérivées d'ordre 1.....	33

b). Approximation des dérivées d'ordre 2.....	33
II. 2.2. Utilisation de la méthode des différences finies.....	34
II. 2.3. Intérêts de la méthode des différences finis.....	34
II. 2.4. Les inconvénients.....	34
II. 2.5. Conclusion sur la méthode des différences finis.....	35
II. 3. La méthode des éléments finis.....	35
II. 3.1. Introduction.....	35
II. 3.2. Équations de la physique mathématique de la méthode des éléments finis.....	36
II. 3.3. Les conditions aux limites.....	37
a). Type Dirichlet.....	37
b). Type Neuman.....	37
II. 3.4. Les processus d'analyse d'un problème physique.....	38
II. 3.5. La formulation intégrale des éléments finis.....	39
II. 3.5.1. La formulation variationnelle.....	39
II. 3.5.2. La formulation résidus pondérés (projective).....	40
a). Méthode de Galerkin.....	40
II. 3.5.3. L'approximation approchée.....	41
a). Principe d'approximation approché	41
b). Principe de minimisation.....	41
II. 3.5.4. Approximation par éléments finis.....	42
II. 3.5.5. Approximation (tétraèdre) nodale d'une fonction.....	43
II. 3.5.6. Approximation nodale.....	44
II. 3.5.7. Construction de l'approximation nodale.....	44
II. 3.5.8. Construction de l'approximation d'un élément triangulaire.....	45
II. 3.5.9. Méthode de construction des fonctions d'interpolation associées aux éléments finis de type C^0	46

II. 3.5.10. Utilisation de la méthode des éléments finis.....	47
II. 3.5.11. Les inconvénients.....	47
II. 3.5.12. La mise en œuvre de la méthode des éléments finis.....	47
II. 3.5.13. Les démarches éléments finis.....	48
II. 3.5.14. Conclusion sur la méthode des éléments finis.....	48
II. 4. La méthode des volumes finis.....	49
II. 4.1.Définition.....	49
II. 5.Conclusion sur la méthode des volumes finis.....	50
II. 6. La méthode des éléments de frontières.....	50
II. 7. Conclusion sur les méthodes numériques.....	51

Chapitre III

Application et résultats obtenues

III. 1. Introduction.....	52
III. 2. Dispositif de simulation.....	52
III. 3. Les caractéristiques des trois (03) modèles géométrique et électromagnétique.....	53
III. 3.1. Les caractéristiques d'une seule pièce.....	53
III. 3.2 Les caractéristiques des Trois (03) pièces.....	53
III. 3.3 Les caractéristiques des huit (08) pièces.....	54
III. 4. La formulation électromagnétique du problème.....	54
III. 5. Les différents types de modèles adaptés.....	55
III. 5.1. La variation de la profondeur.....	55
III. 5.2 Domaine d'étude et les conditions aux limites.....	55
III. 6. Les résultats obtenus.....	56
III. 6.1 La pièce avec une seule couche.....	56
a). Profondeur de La fissure de 20 %.....	56

b). Profondeur de La fissure de à 40 %.....	58
c). Profondeur de La fissure de à 60 %.....	59
d). Profondeur de La fissure de à 80 %.....	61
III. 6.2. La pièce avec trois (03) couches.....	62
a). la 1er pièce avec le défaut, la 2ème pièce et la 3ème pièce sans défaut.....	63
b). 2ème pièce avec fissure, la première et la troisième sans défaut.....	66
c). Pièce (03) avec fissure, la 2 ^{ème} et la 1 ^{er} pièce sans défaut.....	75
III. 6.3. La troisième étape la pièce avec huit (08) couche.....	81
III. 7 Interprétation des résultats et commentaire.....	89
III. 8. Présentation de logiciel de simulation MATLAB.....	90
III. 9. Conclusion.....	90
Conclusion générale.....	92

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I

L'état de l'art sur les techniques (CND) le contrôle non destructif

I. 1.Introduction.....	2
a). Les étapes de contrôle non destructif	2
b). L'utilisation des méthodes de contrôle non destructif	2
c). Exemple de domaines de contrôle par courant de Foucault	3
d). Quelque exemple de pièces contrôlées par courants de Foucault.....	3
e).Principe de contrôle non destructif application matériaux conducteur (courants de Foucault).....	4
f). Choix des procédés CND.....	4
g). Les principaux défauts rencontrés.....	4
h). Schéma présente le principe de contrôle CND par courants de Foucault.....	5
I. 2. Les différentes techniques de contrôle non destructif (C N D).....	6
I. 2.1. Contrôle par examen visuel (V T).....	6
I.2.2 . Contrôle par ressuage (P T).....	6
a). Les étapes adaptatives.....	6
I. 2.3. Magnétoscopie (M T).....	7
I. 2.4. Contrôle d'étanchéité (L T).....	8
a). Contrôles d'étanchéité ITM TODA-15.....	9
I. 2.5.Radiographie.....	9
I. 2.6. Contrôle ultrasons	9
a). Les avantages	10
b). Les inconvénients	10
I. 2.7. Thermographie.....	10

I. 2.8. Chauffage par induction.....	11
I. 2.9. Le contrôle par courants de Foucault (C F).....	11
I. 2.9.1. Présentation de courants de Foucault	12
I. 2.9.2. La distribution des courants de Foucault dans la cible (pièce).....	14
I. 2.9.3. Les modes d'exploitation.....	15
a). alimentation mono-fréquence.....	15
b). Alimentation multi-fréquentiel.....	15
c). L'alimentation par des courants pulsés.....	15
I. 2.9.4. Epaisseur de peau (effet de peau).....	16
I. 2.9.5. Les capteurs à courant de Foucault.....	18
I. 2.9.5.1. Les capteurs inductifs.....	18
a). Bobine encerclant	18
b). Palpeur ou bobine ponctuelle.....	18
c). Bobine plat.....	19
d). Sonde interne tournante.....	19
e). Les capteurs absolus (double fonction).....	20
I. 2.9.7. Les capteurs magnétiques	20
a). Exemples de capteurs.....	20
I. 2.9.8. Les fluxgates (les magnétomètres).....	21
I. 2.9.9. Les capteurs à effet Hall.....	21
I. 2.9.10. Les magnétorésistances.....	22
a). Les magnétorésistances anisotropes – AMR.....	22
b). Les magnétorésistances géantes GMR.....	23
c). Les magnétorésistances tunnel – TMR.....	24

I. 2.9.11. Principe de CND par courants de Foucault.....	24
a). Les équations de Maxwell en régime magnétostatique.....	25
b). Les équations de Maxwell en régime magnéto harmonique.....	25
I. 2.9.12 Exemple de contrôle d'une plaque conductrice	26
I. 2.9.13. Les avantages de contrôle par courants de Foucault.....	26
I. 2.9.14. Les inconvénients de la méthode de contrôle par courants de Foucault.....	27
I. 2.9.15. L'intérêt de contrôle non destructif par courants de Foucault	27
I. 3. Les matériaux conducteurs électriques	28
I. 3.1. Introduction.....	28
I. 3.2. Conducteur dans un champ électrique	28
I. 3.3. Les conducteurs dans un champ électrique statique.....	28
I. 3.4. Du conducteur parfait au conducteur réel.....	28
I. 3.5. Conducteur parfait	29
I. 3.6. La réflexion sur un conducteur parfait	29
I. 3.7. L'électron amorti.....	29
I. 3.8. Conductivité électrique	30
I. 3.9. Propagation dans les conducteurs.....	30
I. 3.9.1. Les conducteurs ohmiques	30
I. 4. Conclusion	30

Chapitre II

Les méthodes numériques de résolution aux dérivées partielles

II. 1.Introduction.....	32
II. 2. La méthode des différences finis.....	32
II. 2.1. Introduction.....	32
a). Approximation des dérivées d'ordre 1.....	33

b). Approximation des dérivées d'ordre 2.....	33
II. 2.2. Utilisation de la méthode des différences finies.....	34
II. 2.3. Intérêts de la méthode des différences finis.....	34
II. 2.4. Les inconvénients.....	34
II. 2.5. Conclusion sur la méthode des différences finis.....	35
II. 3. La méthode des éléments finis.....	35
II. 3.1. Introduction.....	35
II. 3.2. Équations de la physique mathématique de la méthode des éléments finis.....	36
II. 3.3. Les conditions aux limites.....	37
a). Type Dirichlet.....	37
b). Type Neuman.....	37
II. 3.4. Les processus d'analyse d'un problème physique.....	38
II. 3.5. La formulation intégrale des éléments finis.....	39
II. 3.5.1. La formulation variationnelle.....	39
II. 3.5.2. La formulation résidus pondérés (projective).....	40
a). Méthode de Galerkin.....	40
II. 3.5.3. L'approximation approchée.....	41
a). Principe d'approximation approché	41
b). Principe de minimisation.....	41
II. 3.5.4. Approximation par éléments finis.....	42
II. 3.5.5. Approximation (tétraèdre) nodale d'une fonction.....	43
II. 3.5.6. Approximation nodale.....	44
II. 3.5.7. Construction de l'approximation nodale.....	44
II. 3.5.8. Construction de l'approximation d'un élément triangulaire.....	45
II. 3.5.9. Méthode de construction des fonctions d'interpolation associées aux éléments finis de type C^0	46

II. 3.5.10. Utilisation de la méthode des éléments finis.....	47
II. 3.5.11. Les inconvénients.....	47
II. 3.5.12. La mise en œuvre de la méthode des éléments finis.....	47
II. 3.5.13. Les démarches éléments finis.....	48
II. 3.5.14. Conclusion sur la méthode des éléments finis.....	48
II. 4. La méthode des volumes finis.....	49
II. 4.1.Définition.....	49
II. 5.Conclusion sur la méthode des volumes finis.....	50
II. 6. La méthode des éléments de frontières.....	50
II. 7. Conclusion sur les méthodes numériques.....	51

Chapitre III

Application et résultats obtenues

III. 1. Introduction.....	52
III. 2. Dispositif de simulation.....	52
III. 3. Les caractéristiques des trois (03) modèles géométrique et électromagnétique.....	53
III. 3.1. Les caractéristiques d'une seule pièce.....	53
III. 3.2 Les caractéristiques des Trois (03) pièces.....	53
III. 3.3 Les caractéristiques des huit (08) pièces.....	54
III. 4. La formulation électromagnétique du problème.....	54
III. 5. Les différents types de modèles adaptés.....	55
III. 5.1. La variation de la profondeur.....	55
III. 5.2 Domaine d'étude et les conditions aux limites.....	55
III. 6. Les résultats obtenus.....	56
III. 6.1 La pièce avec une seule couche.....	56
a). Profondeur de La fissure de 20 %.....	56

b). Profondeur de La fissure de à 40 %.....	58
c). Profondeur de La fissure de à 60 %.....	59
d). Profondeur de La fissure de à 80 %.....	61
III. 6.2. La pièce avec trois (03) couches.....	62
a). la 1er pièce avec le défaut, la 2ème pièce et la 3ème pièce sans défaut.....	63
b). 2ème pièce avec fissure, la première et la troisième sans défaut.....	66
c). Pièce (03) avec fissure, la 2 ^{ème} et la 1 ^{er} pièce sans défaut.....	75
III. 6.3. La troisième étape la pièce avec huit (08) couche.....	81
III. 7 Interprétation des résultats et commentaire.....	89
III. 8. Présentation de logiciel de simulation MATLAB.....	90
III. 9. Conclusion.....	90
Conclusion générale.....	92

Résumé

Dans ce travail, nous proposons un modèle numérique sous une interface d'un logiciel appelé MATLAB qui adapte la méthode des éléments finis pour la résolution d'un problème électromagnétique, d'un contrôle non destructif par les courants de Foucault, appliquer pour des matériaux conducteurs, en vue de la détection et caractérisation de défauts dans une structure.

Nous avons utilisé un capteur à double fonction constituer d'une bobine émettrice-réceptrice grâce au courant d'alimentation qui crée un champ et celui-ci engendre un second champ dont l'apparition de changements (variation) de l'impédance de cette bobine fait appelle à la présence d'un défaut dans une pièce conductrice.

Mots clés

Contrôle non destructif, courants de Foucault, l'impédance, matériaux conducteurs, capteur (sonde), méthode des éléments finis.

Introduction générale

Introduction générale

Le développement technologique est une progression apparue dans des nouvelles techniques adaptatives dans le but de fiabilité des tests, la reproductibilité, la localisation des défauts, leur caractérisations et classement. Parmi ces techniques on cite la technique de contrôle non destructif (C N D), qui désigne un ensemble de méthodes différentes d'objectif de vérification de l'état d'une pièce (matériau) sans l'endommager lors de la détection éventuellement des défauts, pour la mesure de paramètres dimensionnels ou constitutifs (épaisseurs, états de contraintes...), Leur présence dans des secteurs industriels (aéronautique, nucléaire, automobile, métallurgie...) est abondante , le C N D dispose de la garantie de sûreté de fonctionnement des systèmes critiques. Pour les méthodes de caractérisation "mécanique" par le groupe des méthodes de contrôle non destructif (CND). Ces techniques ont pour but de détecter la présence de défauts au sein des structures sans avoir à pratiquer dessus des tests qui entraînent la ruine du matériau : elles sont donc essentielles pour le suivi en service. IL existe plusieurs types de techniques permettant le contrôle non destructif (CND).

L'histoire du contrôle non destructif (CND) commence à la fin de XIX siècle avec la physique moderne, mais la survenance dans l'industrie c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont marqués leur présence, en particulier cette méthode est adaptée particulièrement pour la métallurgie vers les années 1960-1970. Le développement des centrales nucléaires et l'aéronautique a engendré des progrès dans l'utilisation et le développement des techniques du CND.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres, le premier est destiné pour l'état de l'art sur les techniques CND, le deuxième chapitre parle sur des méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles, le chapitre trois comprend l'application du contrôle non destructif par courants de Foucault de matériaux stratifiés conducteurs sous un logiciel MATLAB, avec une sonde.

Chapitre I

L'état de l'art sur les techniques CND

I. 1. Introduction

Le contrôle non destructif c'est un ensemble de méthodes (C.N.D) qui vise à extraire et distinguer des défauts, aussi la mesure de paramètres dimensionnels ou constitutifs (épaisseur, état de contraintes...), dans l'environnement (recherche de polluants) et pour (matériaux de détection de fissures), Aéronautique (détection d'inserts dans un matériau composite), électricité (surveillance de lignes haute tension). Permet de caractérisé plusieurs structures même l'état de ces matériaux sans les dégradé soit au cours de la production, utilisation, dans le cadre de maintenance, on parle aussi d'essais non destructifs (E N D) ou d'examens non destructifs, en intègre des matériaux conducteurs dans le calcul du champ électromagnétique. La technique de CND par courants de Foucault connaît aujourd'hui une profonde mutation pour répondre aux industries très demandeuses d'un accroissement des performances des contrôles. [1] [2]

Les techniques de développement sont différentes suivant les types de méthodes utilisées pour examiner les matériaux parmi les plus illustrée la méthode ultrasonore, méthode de contrôle par courants de Foucault, la méthode radiographique (les rayons X), la thermographie, contrôle par examen visuel (V T), contrôle par ressuage (P T), magnétoscopie (M T) (flux de fuite), contrôle d'étanchéité (L T), chauffage par induction, d'autre technique non cités. On parle des défauts on distingue deux types de défauts les défauts surfaciques, les défauts internes. [3]

Visant la technique de contrôle par les courants de Foucault appliquer pour les matériaux soit conducteur ou magnétique, dont Les développements concernent la modélisation de la réponse d'un capteur CF contrôlant une pièce plane magnétique composée d'une Couche d'un matériau magnétique pouvant contenir un ou plusieurs défauts. [4]

Cette méthode par courants de Foucault a été utilisée avec succès pour localiser et caractériser des défauts dans des matériaux composites conducteurs. [5], les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau, à la recherche d'une rupture de ces paramètres. [6]

Apparemment les techniques de contrôle non destructif se fassent à partir de plusieurs étapes.

a). Les étapes de contrôle non destructif

- La mise en œuvre de processus physique énergétique.
- Modulation ou atténuation par processus des défauts.
- Détection des modifications par un capteur approprié.
- Traitement des signaux et interprétations des résultats.

b). L'utilisation des méthodes de contrôle non destructif

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- L'industrie navale (contrôles des coques).
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains atterrissages).

- L'aérospatiale et l'armé.
- L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbine, etc.....) et (maintenance des installations).
- Le ferroviaire en fabrication et maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies).
- L'inspection alimentaire.
- L'archéologie.
- Domaine Génie civile et les bâtiments.

Généralement en effective dans tous les secteurs produisant :

- Pour des pièces avec un coût de production élevé quantifié faiblement en exemple (nucléaire, pétrochimique, etc.).
- Pour des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (BTP, nucléaire, canalisation de gaz, par exemple).

c). Exemple de domaines de contrôle par courant de Foucault



Figure (a) : Le contrôle de tube dans les
Plateformes pétrolières



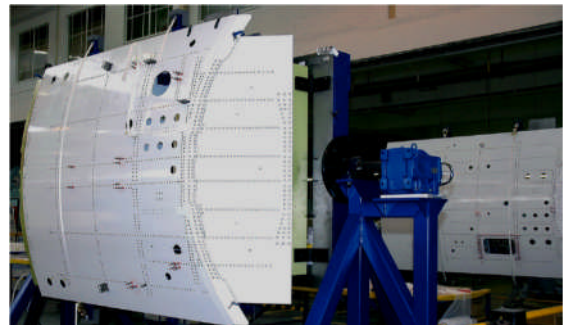
Figure (b) : contrôle de Rails

d). Quelque exemple de pièces contrôlées par courants de Foucault

La variation de température, pression, ou la destruction provoquée par des produits chimiques. Dans l'aéronautique, l'avantage de contrôler les lignes de rivets (Figure(d)), pour détecter d'éventuel les phénomènes de fissuration qui peuvent se créer en pied de rivet et se propager (PAILLARD 2007).



Figure (c) : Airbus A380 (Airbus)



Figure(d) : lignes de rivetages sur
Un Fuselaged'A400 (PAILLARD2007)

Les figures (c) et (d) destiner pour l'application aéronautique.

Fuselage : corps d'un avion auquel sont fixées les ailes.

Rivet : clou dont la pointe peut être écrasée et qui sert à fixer deux pièces métalliques.

e). Principe de contrôle non destructif application matériaux conducteur (courants de Foucault)

- Génération par un émetteur d'un signal qui est perturbé par la pièce à contrôler.
- Un récepteur permet de recueillir la réponse due à la pièce contrôler.

f). Choix des procédés CND

Le choix d'une méthode de CND est fonction de plusieurs critères :

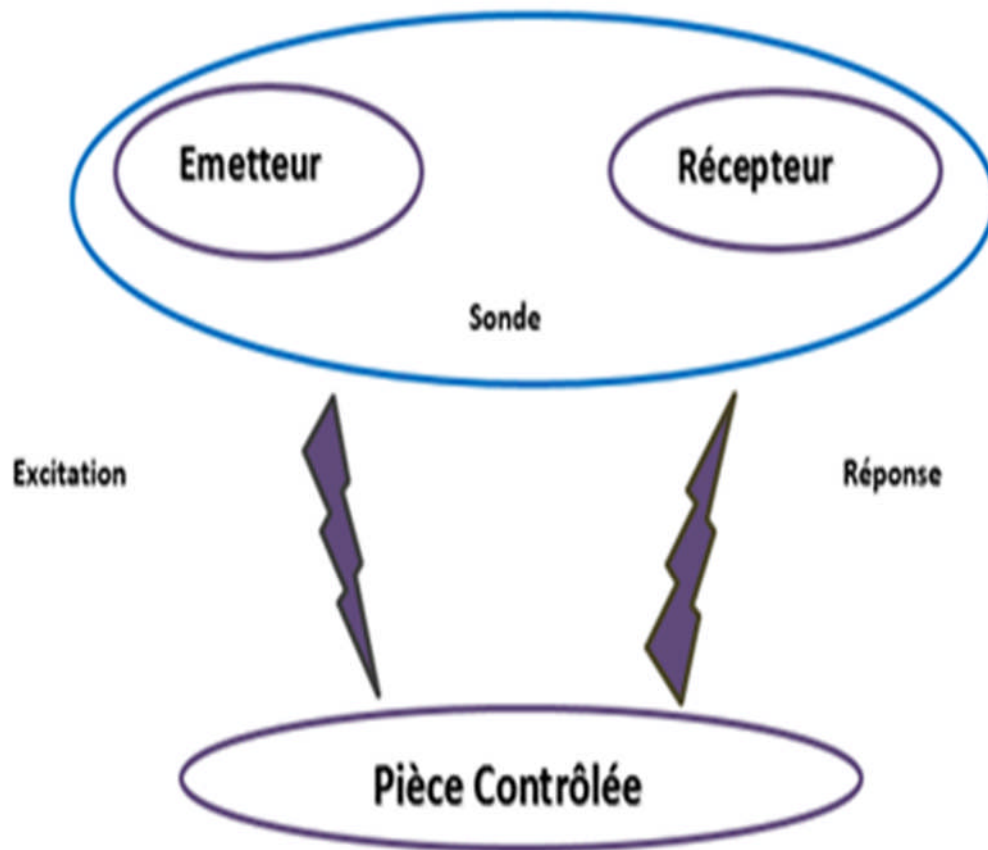
- Suivant l'âge de la pièce
 - Fabrication matière (lingôt,...)
 - Fabrication de la pièce (usinage, soudage, ...)
 - Service pièce (corrosion, fatigue, ...)
 - Etat des traitements thermiques
-
- Suivant la nature de défauts
Débouchant ou non
Gros ou petit
-
- Ponctuel, surfacique, etc....
 - Petite ou grosse pièce
 - Pièce ferromagnétique ou non
 - Pièce conduisant l'électricité ou non

g). Les principaux défauts rencontrés

- Soufflures
Les liquides ont un certain pouvoir de dissolution des gaz. Lorsqu'ils se solidifient, ce pouvoir devient nul. Des bulles se forment. Si ces bulles restent emprisonnées, on voit apparaître des soufflures.
- Retassures
Lors de la solidification d'un métal, (passage de l'état liquide à solide), le volume diminue. Les retassures représentent le défaut pouvant apparaître lors du refroidissement d'une pièce, sous l'effet du retrait.
- Inclusions
Ceux sont des particules emprisonnées lors de la solidification (particules métalliques ou non métalliques). En fonderie, ceux peut être :
 - Goutte froide, goutte phosphoreuse, scories, crasse, laitier, sableEn soudage, ce peut être :
 - Laitier, silicates, tungstène
- Fissures
Séparation locale abrupte dans la matière, en surface ou dans le volume, pouvant mener à la rupture.

Lingot : morceau de métal ayant la forme de mole dans lequel il a été fondu.

h). Schéma présente le principe de contrôle CND par courants de Foucault.



I. 2. Les différentes techniques de contrôle non destructif (C N D)

I. 2. 1. Contrôle par examen visuel (V T)

Le contrôle visuel est une technique importante lors de contrôle non destructif .on recueille des informations essentielle sur l'état surfacique d'une pièce par évidence apparition des défauts comme par exemple (des pliures, des cassures, de l'usure de la corrosion ou fissures ouvertes). Pour assurer un bon déroulement de contrôle visuel ce qui exige d'avoir des conditions assurant avant tout un éclairage suffisant soit automatique ou non. D'ordre de 350 Lux pour un minimum. Faire un rapprochement de l'œil à au moins 60 cm de la partie à examiner. Apparemment quand l'examen visuel ne peut permettre de tester la pièce sous un angle d'incidence de 30°, dans ce cas on utilise un appareil appelé Endoscope constituer de miroirs et lentilles .Cette méthode désigne un contrôle par Endoscopie. Cas de présence des graves défauts à l'intérieure de la pièce qu'a la surface extérieure donc si nécessaire de choisir une méthode qui accède à l'état de surfaces, etc. ..., parmi les techniques de la méthode de contrôle non destructif visuel on donne les tests d'étanchéités, les tests pneumatiques et les épreuves hydrauliques afin de évacuer des fuites éventuelles. [7][8]

I.2.2 . Contrôle par ressuage (P T)

Le contrôle par ressuage c'est une méthode destinée à révéler la présence des discontinuités ouvertes en surface des pièces métalliques, en céramiques. Cette méthode consiste à appliquer (soit par immersion ou par pulvérisation électrostatique, parfois mais rarement, au pinceau) sur l'objectif à tester avec un liquide fluorescent ou coloré en rouge qui pénètre dans les discontinuités et, en faisant « *ressuer* » le reste de liquide dans les fissures ,va les révéler.

La mise en œuvre de cette méthode semblable aussi simple mais en réalité les discontinuités ouvertes la rend sensible. Les discontinuités de 1µm d'ouverture, est 100 fois plus fines qu'un cheveu engendre la nécessite d'utiliser des produits non récupérables (ex : centrale nucléaire pour but de réduire le volume des déchets). La mise en place de favorisation de cette méthode de faite qu'elle est irremplaçables pour les discontinuités d'issues présentes dans des matériaux non ferromagnétiques ou non conducteur d'électricité. Cette méthode est suivant plusieurs étapes adaptatives.

a). Les étapes adaptatives

Etant que son principe consiste à faire apparaitre des défauts de surface avec ressort des écarts visuels très remarquable dans la différence de couleur qui est baigné dans un contraste coloré ou fluorescent en commence ces étapes par un bonne nettoyage de la pièce à contrôler. On utilise un liquide coloré ou fluorescent qui pénètre lors de son application sur la surface à contrôler puis s'infiltre à l'intérieur des écarts provoquer par les anomalies (fissures, etc...) l'excès de liquide pénétrant après est éliminé par une adaptation d'un lavage, le révélateur comme une couche fine recouvre la surface par absorption de pénétrant en lissant une tache coloré de surface aussi plus large que l'anomalie ou point de la localiser.

De la vient l'apparition de notion de ressuage étant donné que le révélateur de fait ressuer le pénétrant.

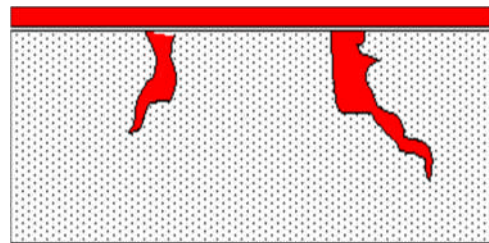
Certains confins liés au matériau lui-même entraine un endommagement de surface de celui-ci puisque. Sa dureté surfacique ne permet pas de voir les défauts entant que les fissures fermées Le pénétrant ne peuvent figurer dedans, dont la présence des corps susceptibles tels que peintures, oxydes. Cette procédure de temps lent est couteuse, l'inconvénient son effet indésirable polluant l'environnement. [9]

Des limitations peuvent apparaitre avec cette technique. Ainsi, elle est difficile à automatiser et limitée à l'inspection de pièces de géométrie simple. Certains produits de ressuage présentent par ailleurs des désagréments vis-à-vis de l'environnement, de la sécurité et de l'hygiène du travail. Il arrive également que des fissures soient bouchées par des produits mal nettoyables et qu'elles soient donc invisibles. [10]

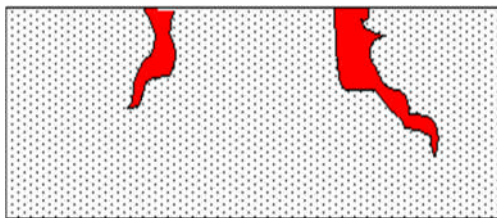
Les figures qui suivent représentent le contrôle par ressuage :



1)- Préparation des surfaces (Figure – I. 1-)

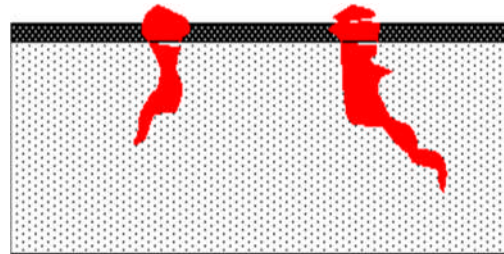


2)- Application de pénétrant (Figure – I. 2-)



3)- Lavage du pénétrant de surface

(FIGURE – I. 3 -)



4)- Application de révélateur et lecteur de défauts (Figure – I. 4 -)

I. 2. 3. Magnétoscopie (M T) (flux de fuite)

La technique de magnétoscopie s'applique aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte,...).

Cette méthode repose sur la création de flux magnétique intense puis l'appliquer sur la surface d'un matériau ferromagnétique (pièce), projetant une poudre magnétique sur la surface de cette pièce a répartition d'une façon homogène veut dire la pièce ne comprenne pas des défauts, quand le flux dévie à la rencontre des défauts (les discontinuités superficielles) sur son chemin provoque des fuites. Celle-ci permet d'attirer les concentrations des particules magnétiques (colorées ou fluorescentes) à partir d'un produit révélateur, approvisionner sa signature particulière caractéristique du défaut, Figure (I. 5). Soit à l'aide d'un film magnétisable (Magnétographie) [11], soit à l'aide d'appareils de mesure de champ magnétique. [12]

La magnétisation circulaire permet de détecter des défauts obliques par rapport à une génératrice. Le principe est un courant électrique passant à travers un conducteur axial crée un champ magnétique circonférentiel autour du tube.

Les lignes de champ sont toujours perpendiculaires à la direction du courant qui induit le champ magnétique.

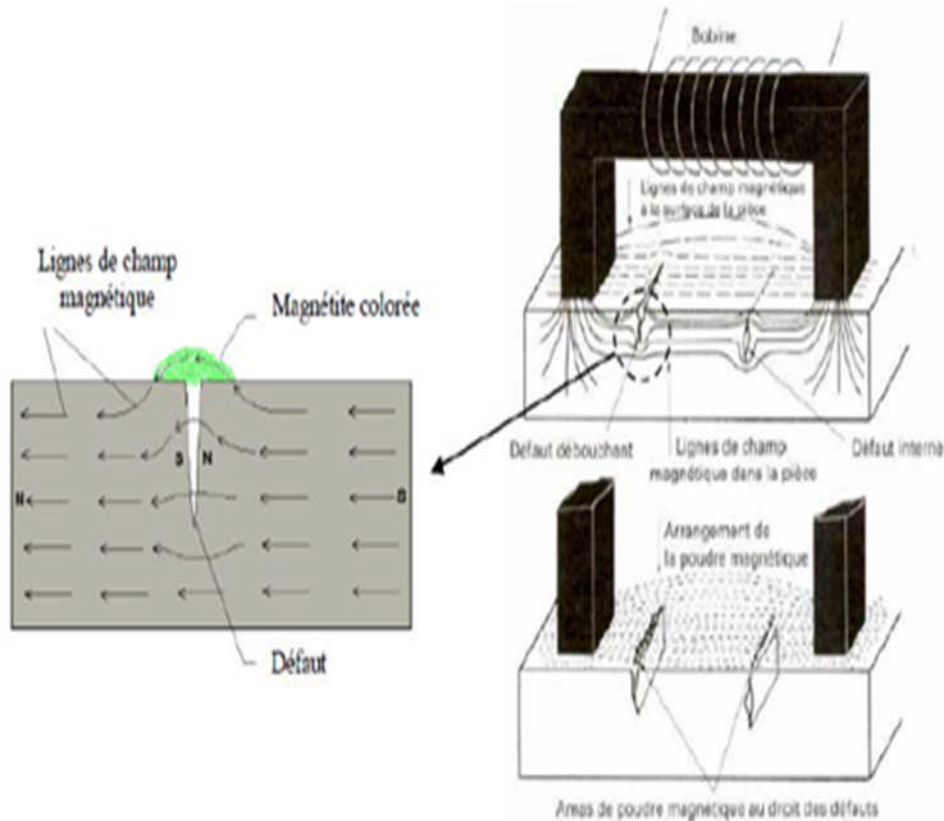


Figure (I. 5) : le principe de la magnétoscopie

I. 2. 4. Contrôle d'étanchéité (L T)

Les méthodes de contrôle d'étanchéité se basent sur l'usage des gaz traceurs à partir des instruments très sensibles à leurs concentrations. Les plus utilisés sont l'hélium, l'hydrogène, (azote hydrogéné) même utilise le gaz SF6 que le règlement maintenant l'interdit comme est tant nocif. Mais en éventuellement dans d'autres pays marque son usage .les Etats-Unis à titre d'exemple.

Les méthodes de détection de fuite avec des mesures systématiques. Qui maintient la pression en vue de la précision afin de déterminer, le taux de fuite sans faire intervenir aux gaz traceurs. Pour les emballages, des méthodes plus avantageux en raison de contrôle, se fait à tout l'ensemble du volume fixer (soudures (longitudinales, transversales) non pas la possibilité de pliage. Ces méthodes en cuvette sans dépression externe ont une sensibilité de l'ordre de 250 μ m de probabilité de détection 70 % pour le contrôle de contenants à volume variable. [9]

a).Contrôles d'étanchéité ITM TODA-15

La méthode de contrôle ITM TODA-15 aux les éléments à contrôler mise en dépression (réservoirs, accessoires, canalisations associées) à une détection acoustique des bruits de fuites dans les zones non étanches. D'avoir demeuré dans cette zone grâce à La dépression de fait c'est un élément physique provoque l'émission de turbulences dans les zones non étanches. Ces bruits de fuites (turbulences) leur détection, suivant le positionnement de capteurs dans l'installation contrôlée. Le traitement des signaux acoustiques et la gestion du contrôle est réalisé par capteur ATEX avec une interface électronique (TODA Unit), en manœuvre avec un logiciel spécifique.

Cette méthode de contrôle ITM TODA-15 est apparue à l'usage des installations de stockage travaillant sous pression atmosphérique. [10]

I. 2. 5. Radiographie

Le principe de la radiographie se réalise de fait d'absorption des pièces, par des rayonnements électromagnétiques ionisants. La mise en évidence des défauts est assurée par une variation de densité optique. Sur le radiogramme (film radiographique irradié et développé) suite aux différences d'absorption des rayons X, entre une zone saine et une zone défectueuse. L'examen de la structure d'un objet (pièce), consiste à la pénétration des rayonnements électromagnétiques de longueurs d'ondes aussi très courtes (rayons X, ou). Puis les rayonnements non absorbés seront recueillis avec récepteur approprié, la radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale. Cette méthode est applicable sur tous matériaux et permet de mettre en évidence des défauts de surface et des défauts internes même dans le volume des matériaux, (Figure -I.6-). Cette méthode est utilisable dans les domaines de fonderies. [13], ou pour la recherche des soudures. [14]

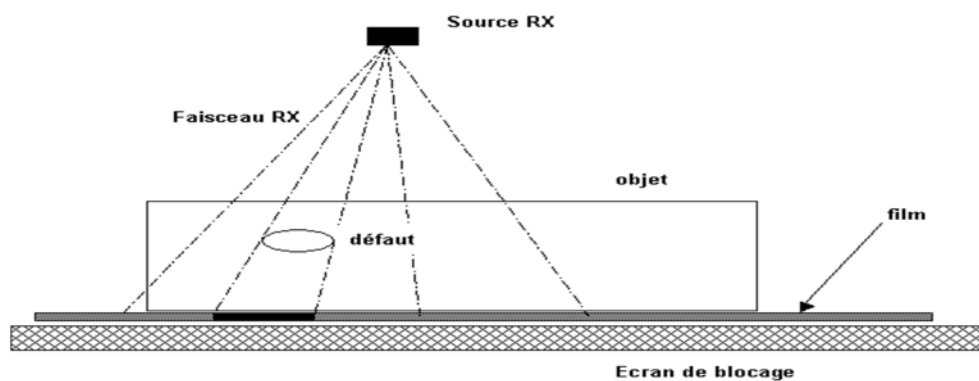


Figure -I.6- : représentation du la méthode de radiographie

I. 2. 6. Contrôle ultrasons

Le contrôle ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore (vibration acoustique) générée par un transducteur (joue le rôle d'émetteur et de récepteur), propageant dans une pièce à contrôler.



Figure I.7 : Equipement de contrôle par ultrasons. Les ondes émises et réfléchies donnent des informations sur la présence ou l'absence de défauts et leurs natures.

L'observation s'effectue en visualisant les signaux des échos ou de l'onde transmise sur l'oscilloscope, et l'interprétation de ses signaux permet de positionner le défaut, de définir ces dimensions relatives, (Figure I.7). Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et plus de possibilité de détection, des défauts bien aussi dans des volumes dans la matière qu'en surfaces.

D'autres techniques telle que la méthode TOFD (Time of diffraction), utilisent le principe de diffraction des ondes ultrasonores pour la caractérisation des défauts. Par comparaison avec le contrôle par radiographie, comme toutes méthodes comprend d'avantages et des inconvénients. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts. [15][16]

a). Les avantages

- Ne nécessite qu'une seule face d'accès.
- Aucun danger lié à l'utilisation de source radioactive et des rayonnements ionisants.
- Plus grande sensibilité de contrôle sur les pièces de forte épaisseur.
- Résultat du contrôle en temps réel.
- Contrôle plus rapide pour des épaisseurs importantes.
- Meilleure sensibilité de contrôle pour les défauts filiformes (fissures, tapures, criques) d'orientation aléatoire.

b). Les inconvénients

- Certains matériaux métalliques sont difficilement contrôlables (matériaux à gros grains)
- Contrôle plus lent pour les faibles épaisseurs
- Plus faible sensibilité à la détection de porosités

I. 2. 7. Thermographie

La thermographie dispose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans un objet (pièce à contrôler). Une énergie sous forme de chaleur stockée dans la matière dont on mesure sa température, cette méthode se base sur l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces remarquable. On distingue que la thermographie passive qui

est résulté d'une observation des gradients thermiques sur une pièce, lors d'une perturbation thermique est volontaire générée afin de contrôler (par une source laser comme titre d'exemple). La présence des différences de température visualiser sur l'image se traduit par les discontinuités dans la pièce. Ces images thermiques se reçoivent à l'aide d'une caméra thermographique.

I. 2. 8. Chauffage par induction

Le principe est d'échauffer la pièce (localement ou en totalité) à l'aide d'un inducteur pendant une durée limitée, de façon à créer une onde de chaleur qui se propage dans le matériau. Un défaut matière peut être considéré comme une hétérogénéité qui va perturber la propagation de cette onde de chaleur et ainsi générer un différentiel de température à la surface du matériau, qui sera visible sur l'image thermographique.

La forme de l'inducteur devra nécessairement être adaptée à la forme de la pièce à contrôler. D'autre part, un traitement de l'image thermographique peut être utile pour améliorer la détectabilité des défauts. (Figure I.8)

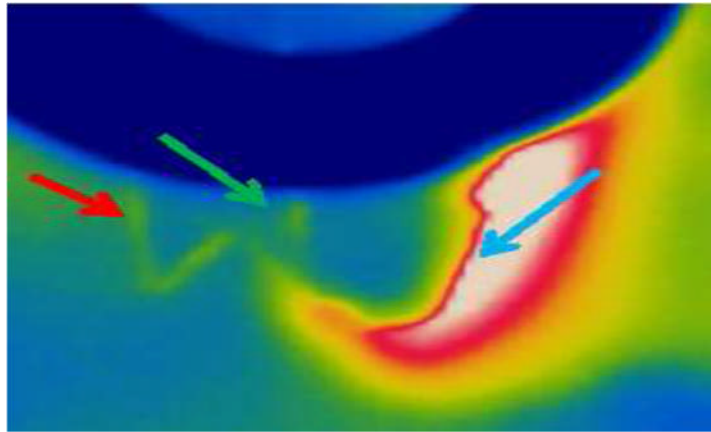


Figure I.8 : Détection de fissure en excitation par induction

Dans ce mémoire en vise à l'exploitation de la technique de contrôle non destructif par courants de Foucault (C N D, application pour matériaux conducteurs). Évidement de plusieurs méthodes de contrôle non cité dans ce mémoire.

I. 2. 9. Le contrôle par courants de Foucault (C F)

Les courants de Foucault sont des courants qui apparaissent dans un matériau conducteur lorsqu'il est excité par un champ magnétique varié, des forces électromotrices d'induction élémentaires « e » prennent naissance et se traduisent par des courants dans le matériau. Ces courants suivent la loi de Faraday-Lenz qui stimule. « La force électromotrice d'induction « e » qui apparait dans un matériau sous un champ magnétique variable a toujours un sens tend à s'opposer à la variation de flux magnétique qui l'a produite » ce qui traduit par :

$$e = - \frac{d \varphi}{d t} \quad (I.1)$$

I. 2. 9. 1. Présentation de courants de Foucault



Figure 1 .9 : Jean Bernard Léon Foucault 1819 – 1868

Ce nom vient de non du savant français qui les découvrit (Jean Bernard Léon Foucault, Figure I.9), sa synthèse se base lors de la mise d'un matériau conducteur (bobine) sous un champ magnétique qui varier dans le temps selon différentes fréquences, engendre création des courants induits se développent à l'intérieur. Ces courants de Foucault (C F), vont créer un champ magnétique induit opposé au champ d'excitation. Le flux magnétique crée par ces courants induits modifiant la force électromotrice de la bobine et l'analyse de cette variation fournit les informations exploitables pour le contrôle de l'objet. Dès qu'ils rencontrent une fissure une inhomogénéité, un changement de géométrie, les lignes de courants induits sont déviées, ce qui entraîne une modification du champ de réaction. (Figure I.10), est une illustration de cette technique de contrôle. [3]

Le fait de rencontré la difficulté de ne pas avoir une possibilité de mesurés, ces courants de Foucault directement car leurs génération par un champ magnétique. Cela conduit à faire une analyse mathématique approfondi qui lier logiquement les caractéristiques du défaut à ce champ magnétique d'une façon permet de réaliser une image de défaut mais pas celle de champ. En effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault qui dépend de caractéristiques physiques et géométriques de la pièce bien aussi de conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). La présence de défaut provoque une discontinuité électrique de fait à crée une perturbation de la circulation des courants de Foucault ce qui conduit à varier la f.é.m. induite dans la bobine, engendre une variation d'impédance (cas harmonique) apparent au niveau de la bobine d'excitation. Ce principe est simple utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault se développent sur la surface du corps conducteur, là on rencontre le phénomène de pénétration (effet de peau).

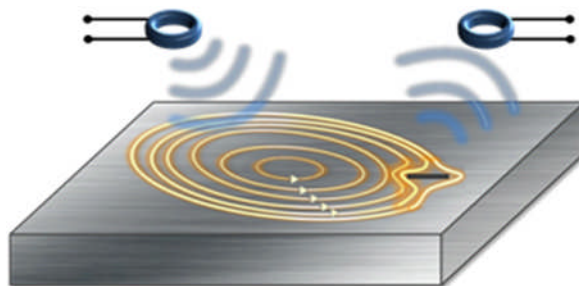


Figure I.10 : Fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault.

On se place en régime harmonique et on considère une bobine caractérisée par N spires. Parcourue par un courant d'excitation :

$$I = I_0 e^{-j \omega t} \quad (I.2)$$

Avec $\omega = 2 \pi f$, la pulsation et f la fréquence. L'impédance de la bobine dans l'air en Ω .

Lorsqu'un conducteur parcouru par un courant alternatif d'intensité « i » comporte plusieurs spires et prend ainsi la forme d'une bobine, on ne peut plus en effet parler de résistance de ce conducteur mais d'impédance.

La tension aux bornes de cette bobine est donnée par l'expression (loi d'Ohm).

$$U = Z I \quad (I.3)$$

Dans laquelle Z est l'impédance de la bobine. Cette impédance est composée de deux termes, l'un purement résistif R et l'autre appelé réactance inductive X telle que $X = L \omega$ où L l'inductance de la bobine et ω la pulsation du courant $\omega = 2 \pi f$, f étant la fréquence des courant. L'expression de l'impédance :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (I.4)$$

Qui s'écrit aussi par cette écriture :

$$Z_{bob} = Z_0 = R_0 + j X_0 \quad (I.5)$$

Avec: $X_0 = \omega L_0$, R_0 , X_0 , L_0 sont respectivement la résistance (en Ω), la réactance (en Ω) et l'inductance (en H) de la bobine dans l'air. à proximité d'une pièce conductrice, un champ de réaction s'oppose au champ d'excitation de la bobine. Modifiant ainsi la valeur de l'impédance :

$$Z_{bob} = Z_{pièce} = R_{pièce} + j X_{pièce} \quad (I.6)$$

En présence d'un défaut dans la pièce, la déviation des courants de Foucault entraine une variation du champ, affecte l'impédance de la bobine qui devient :

$$Z_{bob} = Z_{pièce} + (\Delta R_{défaut} + j \Delta X_{défaut}) \quad (I.7)$$

On prend la considération de la variation de l'impédance afin de mettre en évidence l'effet du défaut, dans cette (Figure I.11), la valeur de point 1 correspond à la valeur Z_{bob} , dans l'air, le point 2 à la valeur $Z_{pièce}$, le point 3 à la valeur $Z_{pièce}$. L'écart entre les points 2 et 3 représente la signature du défaut, cette variation exploitable pour détecter sa présence.

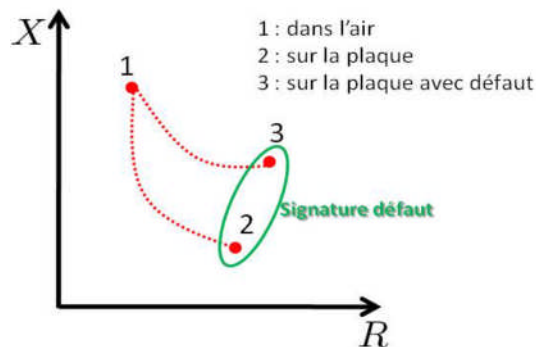


Figure I.11: Effet de défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine.

La variation d'impédance du bobinage est analysée afin de contrôler l'état de la pièce. Par exemple, pour évaluer l'épaisseur d'un revêtement isolant ou faiblement conducteur de type peinture, le paramètre primordial du couplage est l'entrefer entre le bobinage et la pièce conductrice. Pour la recherche de défauts en fabrication, c'est la perturbation de la conductivité électrique et/ou de la perméabilité de la pièce qui est le paramètre d'intérêt.

Cette méthode est applicable sur tous matériaux conducteurs de l'électricité, et ne permet de mettre en évidence que des défauts superficiels. Elle est également utilisée pour détecter des défauts superficiels dans la mesure où les courants de Foucault se développent à la surface des corps conducteurs. Plus de détail en se propos dans l'identification de l'effet de peau.

I. 2. 9. 2. La destribution des courants de Foucault dans la cible (pièce)

Pour une bobine d'excitation circulaire et une cible homogène, les courants de Foucault circulent parallèlement aux spires et dans le sens opposé du courant d'excitation, (Figure I.12).

Lorsqu'il y a plusieurs spires dans la bobine d'excitation, les courants de Foucault forment une nappe d'une certaine largeur dans la cible, (Figure I.13).

La présence d'un défaut ou d'une fissure à la surface de la cible perturbe cette nappe. On peut détecter ces perturbations avec un capteur de champ magnétique ponctuel.

On illustre le comportement des courants induits vis-à-vis d'une fissure de surface. Par la présence de nappe des courants étant « coupée » par la fissure, les courants induits contournent cette dernière par la droite et par la gauche. On observe des pics de champ magnétique près des extrémités de cette fissure, alors que la valeur du champ est quasiment nulle vers le milieu de la fissure.

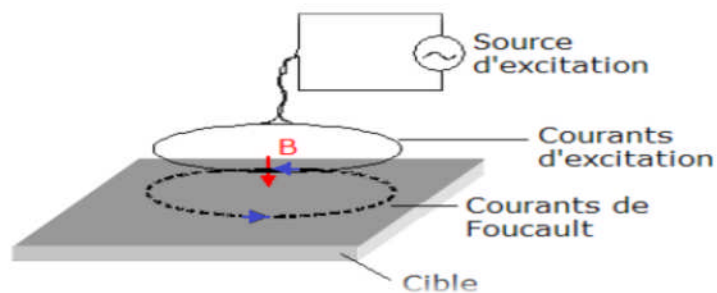


Figure I.12 : Schéma de distribution de courants de Foucault.

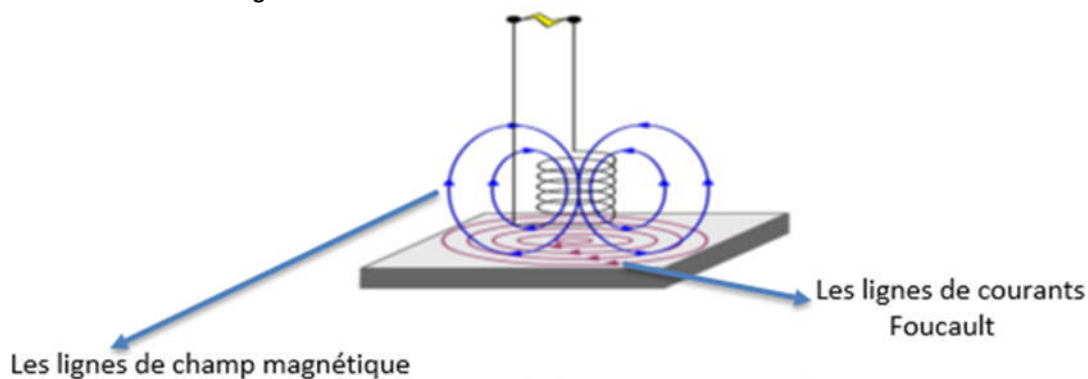


Figure I.13 : courant alternatif forme une nappe dans une cible conductrice.

Les courants de Foucault comme on observe dans la (Figure I.13) que leurs mouvement est circulaire dans le cas pas de présence de défaut.

I. 2. 9. 3. Les modes d'exploitation

On distingue trois types de modes d'alimentation pour les capteurs à courants de Foucault :

- mode mono-fréquentiel
- mode multi- fréquentiel
- mode pulsé : signal a durée finis

a). alimentation mono-fréquence.

Les courants de Foucault sont obtenus par un courant sinusoïdal de fréquence donnée. Pour des matériaux dont les caractéristiques sont linéaires, tous les signaux sont eux aussi sinusoïdaux. Le contrôle s'effectue par mesure d'impédance de la bobine. L'exploitation se fait à l'aide du plan d'impédance normalisé. On utilise les grandeurs X_0 (réactance de la bobine hors matériau), X (réactance de la bobine en présence du matériau), R (résistance de la bobine en présence du matériau), R_0 (résistance de la bobine seule). R , X permettent de représenter les puissances actives et réactives mises en jeu dans tout le dispositif, en particulier dans la pièce où se développent les courants de Foucault. On définit:

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

On trace alors l'évolution de l'impédance normalisée dans le plan $Xn = f(Rn)$, (Figure I. 11) La trajectoire. D'extrémité de vecteur impédance lors d'un déplacement relatif bobine matériau sera représentative en évolution d'une des propriétés du matériau. D'un point de vue industriel, des appareils permettent de visualiser directement le plan d'impédance.

b). Alimentation multi-fréquentiel

Dans le contrôle mono fréquentiel, on est limité à deux informations :

- Ce type de contrôle permet une localisation spatiale d'un défaut et parfois une localisation sur sa taille (la résistance et la réactance normalisées). [18], il ne permet pas de dissocier plusieurs informations [19] (présence de plusieurs défauts) ou l'information d'une grandeur perturbatrice (entretoises dans les tubes des générateurs de vapeur).

La technique multifréquence permet de discriminer un nombre de paramètres supérieur à deux. Elle constitue une extension de la technique mono fréquence et permet d'exploiter n fréquences différentes (deux ou quatre) et fournit deux informations.

Le développement des techniques multifréquences résulte d'un double objectif, positionner et caractériser un défaut à partir d'un signal global résultant de la combinaison du signal utile dû au défaut et de bruits parasites ayant des origines diverses.

c). L'alimentation par des courants pulsés

Cette méthode de contrôle est une extension de la méthode multi fréquentielle. Elle présente deux principaux avantages par rapport au contrôle mono fréquentiel :

- Un signal d'excitation pulsé (signal à durée finie) atteint en intensité une valeur élevée (plusieurs ampères), contre une centaine de milliampère pour un signal sinusoïdal classique. Ce type d'excitation utilise un signal à large bande spectrale équivalent à un contrôle multi- fréquentiel. Cette technique est utilisée pour la mesure d'épaisseur

des revêtements métalliques [20], Des travaux ont également porté sur son utilisation pour la détection de défauts enfouis. [21]

I. 2. 9. 4. Epaisseur de peau (effet de peau)

L'épaisseur de peau nommé effet de peau (profondeur de pénétration) désigner par δ .

Ce phénomène lié à l'électromagnétisme apparaît dans tous matériaux conducteurs qui sont parcouru par courant alternatif ou on applique un champ magnétique variable pendant une durée de temps. Dans notre cas prenant le contrôle non destructif par courants de Foucault (application des matériaux conducteurs), (Figure I.14).

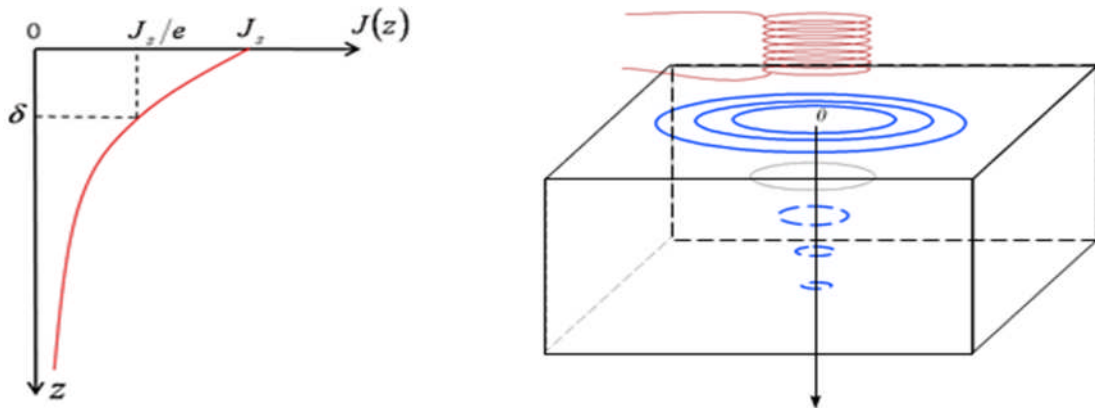


Figure I .14 : répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur Z . (cas d'excitation par onde plane).

La profondeur de pénétration dans un conducteur métallique est donnée par l'abaque ci-après, en fonction de la nature du matériau conducteur:

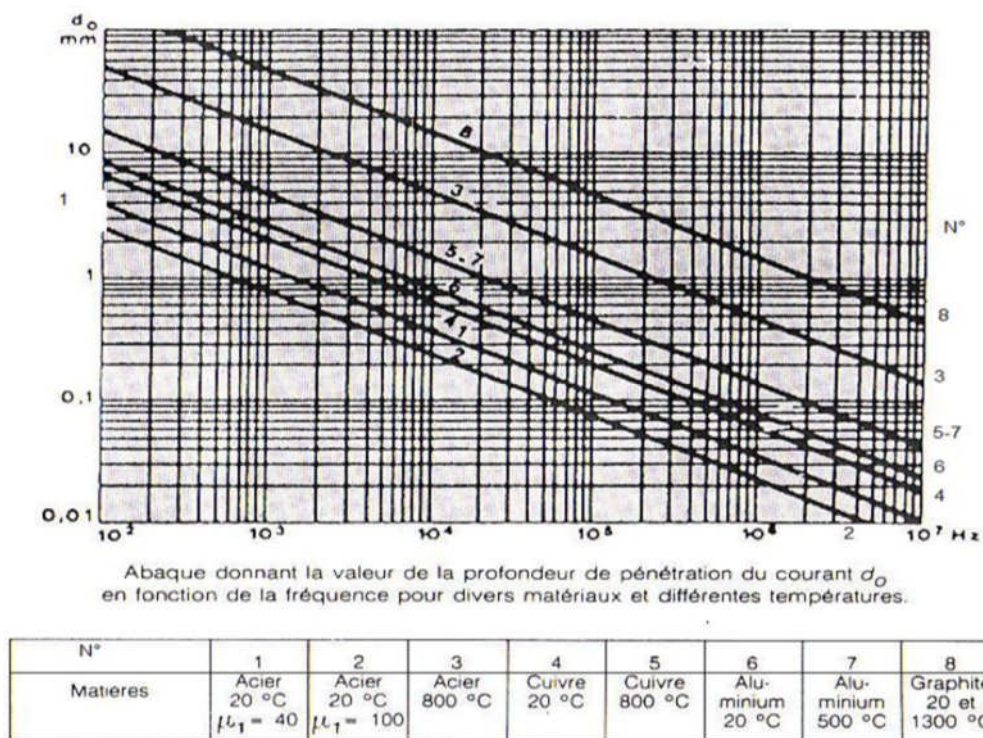


Figure I.15 : abaque donnant la valeur de la profondeur de pénétration du courant δ_0 en fonction de la fréquence pour divers matériaux et différentes températures.

A 10 KHz, cette profondeur est de 0,6 mm dans le cas du cuivre, (Figure I.15).

On parle de l'effet de peau. Donc en considère l'intensité des courants de Foucault d'une pièce constitué d'un matériau conducteur, ces caractéristiques se représente par sa conductivité électrique σ et sa perméabilité magnétique μ diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration usuelle δ .

$$J(z) = J_s \exp(-Z \sqrt{\pi f \sigma \mu}) = J_s \exp(-\frac{z}{\delta}) \quad (I.8)$$

- z : la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce en [m].
- $J(z)$: le module de la densité de courant à la profondeur (z) en [A].
- J_s : le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$), [A/m].
- δ : la profondeur de pénétration ou épaisseur de peau en [m].

La profondeur de pénétration δ est donnée par la relation suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (I.9)$$

Or: $\omega = 2 \pi f$ (I.10)

$$\rightarrow \delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (I.11)$$

Ou :

- δ : Profondeur de pénétration en mètre [m].
- f : Fréquence du courant parcourant la bobine en Hertz [H].
- μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau [H.m⁻¹]
- σ : Conductivité électrique du matériau en Siemens par mètre [S.m⁻¹].

On remarque :

- L'épaisseur de peau est inversement proportionnelle à la fréquence, plus les fréquences sont élevées, l'épaisseur de peau plus moins.
- La décroissance de la densité d'une manière exponentielle dans la profondeur.

Le problème majeur des contrôles par courants de Foucault est de distinguer les variables caractéristiques du matériau qui sont à l'origine d'une modification de l'impédance apparente d'une bobine inductrice placé en présence de ce matériau donc cette impédance est affecté par Ces variables, principalement citons :

- La conductivité σ du matériau.
- La perméabilité magnétique relative μ_r du matériau.
- L'homogénéité du matériau (présence de discontinuités).
- Les dimensions d'une pièce.
- La distance D entre la bobine et la pièce à contrôler Lift-off.

Dans le contrôle non destructif la technique de contrôle par courants de Foucault, la plus utilisée est la technique de contrôle par courants de Foucault classique qui utilise un champ électromagnétique sinusoïdal pour créer les courants d'induction. Elle est surtout applicable pour la recherche de défauts surfaciques, ou sub-surfacique. Différents types de sondes, il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Peuvent étudier le développement de l'effet de peau (profondeur de pénétration) à partir deux astuces :

- soit en utilisant un courant d'excitation de fréquence relativement basse (quelques centaines de kHz).
- soit en réduisant la perméabilité magnétique relative du matériau à contrôler. Cette dernière solution est réalisée en créant dans le matériau une induction magnétique B élevée donc en saturant celui-ci par l'action d'un champ magnétique extérieur H .

I. 2. 9. 5. Les capteurs à courant de Foucault

La technique de contrôle par courants de Foucault pour la mise en place des systèmes qui permet l'émission et la réception de champ magnétique alternatif. Cela est distingué par deux fonctions soit deux éléments ou un seul élément. On parle des capteurs magnétiques son rôle de transformer les variations de champ magnétique en une variation de tensions mesurables. Les types de capteurs utiliser figure dans ce qui suit.

I. 2. 9. 5.1. Les capteurs inductifs

Sont parmi les premiers éléments sensibles aux variations du champ magnétique historiquement sont les bobines qui permet la transformation des champs qui la traverse en tension peuvent jouées deux rôles émission et réception. Les capteurs les plus utilisés dans le contrôle non destructif sont les bobines « filaires ». Raison de dépense moins et conception simple, les caractéristiques que celle-ci comporte ces paramètres utiliser pour les suggérer l'industrie, constitués d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau sa composition soit de l'aire ou de ferrite (canalisation de champ, amplification).

Parmi les capteurs inductifs on trouve des différents types dont on cite :

a). Bobine encerclant

Ses enroulements entourent le produit à contrôler. Elle analyse un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active ou effective de la bobine. Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire, (Figure I.16).

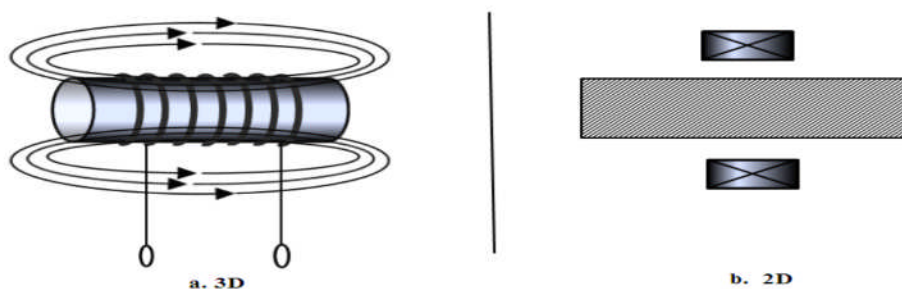


Figure I.16 : Bobine encerclant.

b). Palpeur ou bobine ponctuelle

Ses enroulements forment une petite bobine qui peut être placée sur, ou près, de la surface de la pièce. Il est destiné au contrôle local d'un produit à partir de sa surface, sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Il analyse une zone essentiellement égale à l'aire de sa section transversale. Dans le cas de l'examen d'une surface importante, il nécessite un balayage méthodique de la pièce.

Les palpeurs peuvent être du type à air ou avoir des noyaux magnétiques dans le but d'augmenter l'induction B créée par la bobine excitatrice, (Figure I.17).

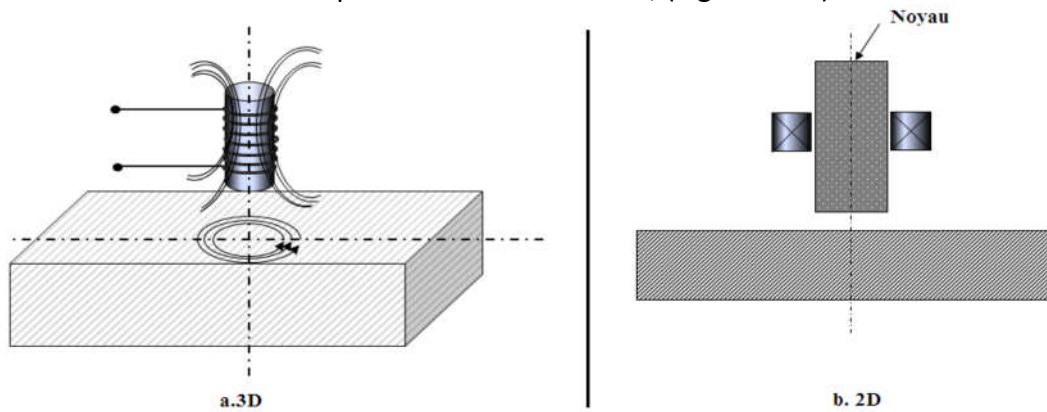


Figure I.17 : Bobine simple avec noyau

L'usage des palpeurs, peu répandu autrefois, tend à se généraliser en raison des exigences d'une précision accrue dans les contrôles.

c). Bobine plat

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, (Figure I.18).

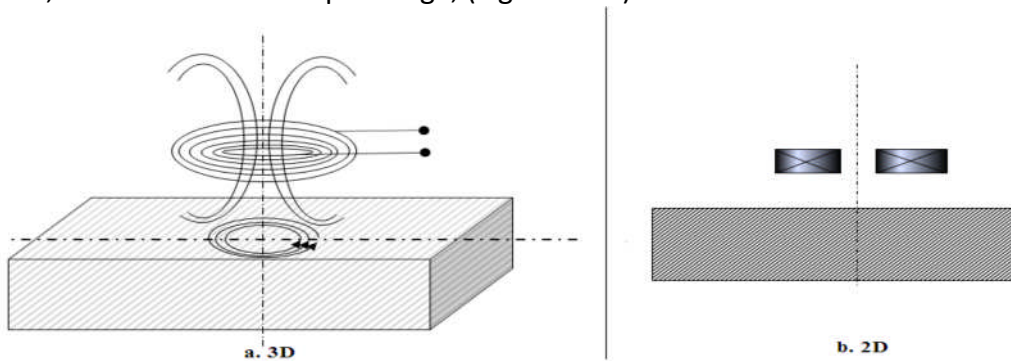


Figure I.18. : Bobine plat

d). 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. On parle des sondes donc on parle de bobines avec des différents types aussi appelées les capteurs dont en rencontre les sondes interne tournante, (Figure I.19).

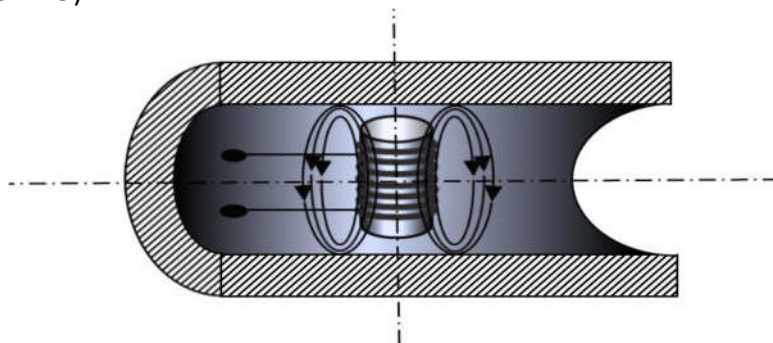


Figure I.19 : Capteur interne tournant

La sonde est destinée au contrôle d'un produit par l'intérieur, elle peut être déplacée à travers un tube ou une conduite. On distingue la « sonde tournante » constituée d'un palpeur tournant autour de l'axe de translation et la « sonde axiale » dont les enroulements sont bobinés autour d'axe de translation.

e). Les capteurs absolus (double fonction)

C'est un capteur à double fonction, il est constitué d'une seule bobine émettrice - réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement son signal de sortie.

I. 2. 9. 7. Les capteurs magnétiques

La variation d'impédance ou de la résistance de ces capteurs est proportionnelle au champ magnétique dans lequel sont baignés. Ce champ magnétique alternatif tant que émetteur dont doivent être réalisées par un autre élément.

On trouve les capteurs magnétiques de type magnétorésistance géante (GMR) appliqué au contrôle de pièces planes amagnétiques, légèrement magnétiques, ferromagnétiques.

Les phénomènes étudiés en utilisant les capteurs magnétorésistance géante (GMR), sont les phénomènes de bruit spécifiques engendrés par les matériaux magnétiques en titre d'exemple les bruits de structures et le champ magnétique rémanent, et leur influence sur les mesures.

a). Exemples de capteurs

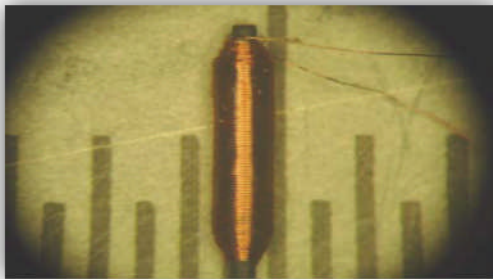


Figure I.20 : Bobinage de 0,5mm de diamètre et 3mm D'hauteur composée d'environ 1000 spires est réalisée Avec un fil de cuivre de 30 μm de diamètre (MOOK, HESSE, UCHANIN 2006; MOOK, HESSE, UCHANIN 2007).

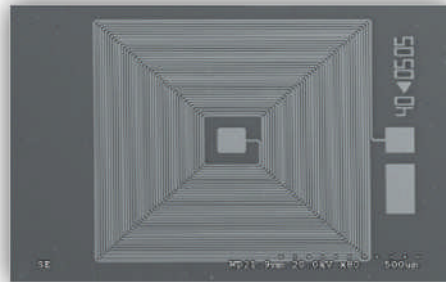


Figure I.21 : exemple de micro-bobine planaire avec une surface de 1mm^2 , composé d'environ 40 spires (RAVAT, WOYTASIK, JOUBERT et al, 2007)



Figure I.22 : un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau à air.

On parle de champ magnétique et sa variation veut dire la présence d'une force électromotrice « e » donc suivant la loi de Faraday- Lenz :

$$e = - \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{I. 12})$$

On observe que les capteurs inductifs ne peuvent pas mesurer des inductances magnétiques statiques. La tension aux bornes d'une bobine à air comportant N spires de surface moyenne A , soumise à une induction magnétique B variable sinusoïdalement à la fréquence f , en cas harmonique définit par :

$$V(f) = N \cdot A \cdot 2\pi f \cdot B(f) \quad (\text{I. 13})$$

La sensibilité S est définie par le rapport entre la tension de sortie de la bobine et le champ magnétique :

$$S = \frac{V}{B} = N \cdot A \cdot 2\pi f \quad (\text{I. 14})$$

La sensibilité du capteur est proportionnelle à la fréquence de travail et au nombre de spires.

I. 2. 9. 8. Les fluxgates (les magnétomètres)

Les fluxgates sont développés pour la fabrication des compas des systèmes de navigation. Leur composition est de noyau ferromagnétique et de bobines au minimum. Pour exploiter la saturation de cycle d'hystérésis du noyau ferromagnétique.

La première bobine en bleu appelé bobine d'excitation et la seconde c'est une bobine de mesure en rouge (sont présentés dans la Figure I.23). On alimente la bobine par un courant de forme triangulaire, qui est représenté dans la (Figure I.24), avec une basse fréquence entre 50 et 1000 H_z . Ce courant crée un champ magnétique H qui provoque périodiquement la saturation de noyau ferromagnétique. Lors de la saturation de noyau ferromagnétique engendre une aimantation nulle M à l'intérieur du noyau, et la tension de la bobine de mesure est nulle à ses bornes. La présence de tension constante aux bornes de la bobine de mesure veut que le noyau ferromagnétique ne soit pas saturé. Donc ce qui correspond à la variation de l'aimantation. La tension aux bornes de la bobine de mesure caractérisée par une forme d'onde des impulsions, l'absence de champ extérieur dont la tension V mesurée est parfaitement symétrique à l'origine de temps, présenté par un signal noir dans (Figure I.24). La saturation du noyau plus vite à l'application d'un champ magnétique extérieur, atteinte pour une demi-période, on observe que la couleur rouge définit le décalage qui donne une estimation du champ magnétique extérieur.

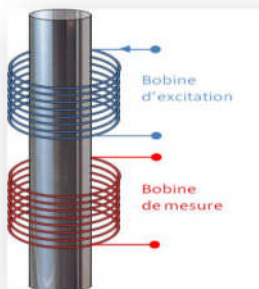


Figure I.23 : Schéma de fluxgates constitué par un noyau Ferromagnétique et deux bobines. En bleu la bobine d'excitation, En rouge la bobine de mesure.

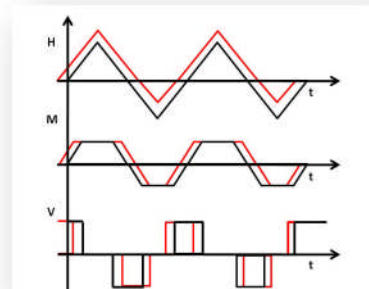


Figure I.24 : Forme d'ondes du champ d'excitation H , de l'aimantation du noyau M et de la tension mesurée V . En noir en l'absence d'un champ extérieur, en rouge, sa présence.

I. 2. 9. 9. Les capteurs à effet Hall

L'effet Hall est assez sensible et linéaire, et ses caractéristiques le destinent particulièrement à l'instrumentation, par exemple dans des capteurs de courant. Il est utilisé dans cette application pour détecter l'induction magnétique générée par le passage du courant que l'on veut déterminer. Il est aussi utilisé dans des capteurs de position ou des capteurs de vitesse.

Ces capteurs leur principe est basé sur l'effet de Hall. Qui sont des capteurs magnétiques plus importants dans des matériaux semi-conducteurs, mais l'utilisation des matériaux conducteurs plus simple, prenant une épaisseur généralement est prise entre 0.4 et 100 μm , et parcourue par un courant continu I , appliqué selon l'axe y , et soumise à une induction B appliqué selon l'axe z , l'apparence d'une différence de potentiel V_H qui est dans la direction perpendiculaire à celle de l'induction et même à celle du courant disant à l'axe de y , cette tension est appelée la tension de Hall, due à la force de Lorentz (Figure I.25) qui stimule que :

$$\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (\text{I. 15})$$

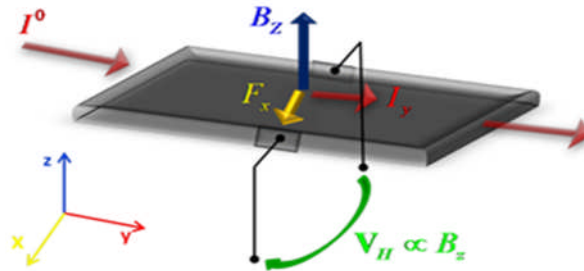


Figure 1.25 : Principe de fonctionnement à effet de Hall

Avec :

- q : la charge des électrons.
- v : la vitesse des électrons.

I. 2. 9. 10. Les magnétorésistances

La magnétorésistance (M R) désigne une certaines caractéristiques liée aux propriétés des matériaux, de la variation de leur résistance à la présence d'un champ magnétique. Tous les matériaux conducteurs apparition d'un effet magnétorésistif qui est typique faible pour les employer comme capteur de champ. Des fois on trouve des matériaux magnétiques qui fournissent un effet magnétorésistif suffisant appelé magnétorésistances anisotropes (AMR), utilisé pour réalisation de capteurs. Grâce à l'innovation adapter par la technologie qui à permet de réaliser des dispositifs composés de couches minces doté d'un effet magnétorésistif important telle que les magnétorésistances géantes (GMR) et tunnel (TMR), le taux de la magnétorésistance (MR est définie de la manière suivante :

$$MR(\%) = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \quad (\text{I. 16})$$

Ou R_{max} et R_{min} est respectivement la résistance maximale et minimale atteint lorsque le champ magnétique varie, dans le cas des AMR ce facteur est typiquement 1% – 2% pour les GMR 20% – 60% et les TMR 60% – 600%.

a). Les magnétorésistances anisotropes – AMR

Ce phénomène est étant défini par ces propriétés optiques, physique, ou mécaniques varient selon les directions. Les AMR est constituant par un matériau ferromagnétique mono – domaine est anisotrope, possède un axe d'aimantation facile généralement induit lors d'un traitement par chaleur sous un champ magnétique, la magnétorésistance consiste à la variation de la résistance R du matériau ferromagnétique en fonction de l'angle θ entre l'aimantation M du matériau et l'intensité de courant traversant le matériau I . Cette relation s'écrit :

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta \quad (\text{I. 17})$$

OU :

- R_0 est la résistance quand l'aimantation est perpendiculaire à la direction du courant I . Lorsqu'un champ est appliqué perpendiculaire à l'axe d'anisotropie du matériau, l'axe d'aimantation tourne d'un angle θ donné par la relation (STONER et WOHLFARTH 1991) :

$$\sin \theta = \frac{H}{H_k} \quad (\text{I. 18})$$

OU H_k est le champ anisotropie du matériau. On combine les deux équations, on obtient une relation non-linéaire entre la résistance R et l'angle θ :

$$R = R_0 + \Delta R \sqrt{1 - \left(\frac{H}{H_k}\right)^2} \quad (\text{I. 19})$$

b). Les magnétorésistances géantes GMR

Ces magnétorésistances sont des capteurs reconnue d'une façon dont leurs apparition c'est lors d'un passage d'électrons dans un matériau conducteurs, à travers une zone aimanté localement, des phénomènes de diffusion qui se manifeste différemment en fonction des axes d'orientation des spins de ces électrons avec l'aimantation, soit parallèles ou antiparallèles. Pour des matériaux non- magnétique on ne peut parler de spins comme étant donné que le nombre de spins parallèles et antiparallèles sont les même provoque une distribution des spins aléatoires et un moment magnétique macroscopique nul. Ce qui n'est pas le cas des matériaux magnétiques le nombre de ces spins dicté son différent donc engendre la présence de moment magnétique macroscopique non nul. Caractériser par un empilage de couches ferromagnétiques à magnétisation parallèle et antiparallèle on met une couche non conductrice entre ces couches dans les deux cas. Lors de la conduction des électrons soit de nature parallèle ou antiparallèle suivant les couches. La trajectoire de ces électrons sont déterminer par leur spins puisque les phénomènes de diffusion aussi fort dans le cas des spins parallèles à la magnétisation et plus faible dans le cas contraire. Pouvant déterminer la résistance équivalente dont on distinct la résistance rencontré r par l'électron dans la couche à magnétisation parallèle à son spin et la résistance R apparue lors du passage dans une couche antiparallèle, on trouve la relation dans ce qui suit :

$$R_{\text{éq}} = 2 \frac{r R}{r + R} \quad (\text{I. 20})$$

On a deux types de capteurs à magnétorésistance géante qui est différencié par le nombre et la nature des couches employées. Un type est constitué par un empilement alterné de couches ferromagnétiques, spécifiquement des alliages de fer – cobalt – nickel, avec des couches conductrices non magnétiques, comme exemple le cuivre ou ruthénium. Le principe de fonctionnement est le suivant :

En l'absence de champ magnétique extérieur, les axes d'aimantation des couches ferromagnétiques successives opposés.

En présence d'un champ magnétique, les axes d'aimantation de toutes les couches ferromagnétiques s'alignent progressivement dans l'axe du champ magnétique appliqué. La résistance électrique de la structure multicouche diminue à cause de changement de l'orientation des couches.

Le second type des capteurs GMR, ces magnétorésistances utilise seulement deux couches ferromagnétiques séparées par une couche de matériau conducteur.

c). Les magnétorésistances tunnel – TMR

Le dernier capteur magnétorésistif présenté exploite l'effet tunnel qui permet aux électrons de traverser une barrière isolante entre deux matériaux ferromagnétiques tout en conservant leur spin. La probabilité pour un électron de traverser cette barrière de potentiel est directement liée à son spin. Afin d'illustrer ce phénomène, La structure est comparable à celle des GMR à vannes de spin présentées dans le paragraphe précédent dans laquelle la couche conductrice a été remplacée par une couche isolante, typiquement constituée par alumine avec une épaisseur de l'ordre du nm. La résistance, comme dans le cas des GMR, est élevée lorsque les aimantations des couches sont parallèles et faible lorsqu'elles sont antiparallèles. L'inconvénient de cette technologie est la fragilité de la fine couche isolante faisant office de barrière tunnel, qui doit être moins de 2 nm dans la plupart des cas.

I. 2. 9. 11. Principe de CND par courants de Foucault

Comme nous l'avant déjà dit Dont on utilise des sondes qui sont soit des récepteurs ou des émetteurs. Constitué d'une bobine (émettrice) permet la création des courants induits (courants de Foucault). Générant un champ magnétique déterminé par les équations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Équation de conservation de flux magnétique}) \quad (I. 21)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Équation de Maxwell- Gauss}) \quad (I. 22)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Équation de Maxwell- Faraday}) \quad (I. 23)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Équation de Maxwell-Ampère}) \quad (I. 24)$$

Avec $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont respectivement les champs électriques et magnétiques, $\vec{D}$ et $\vec{B}$ sont respectivement les inductances électriques et magnétiques, $\vec{J}$ est la densité surfacique de courant électrique, ρ la densité volumique de la charges électriques.

Dans le cas statique on néglige les courants de déplacement $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ figurant dans l'équation de Maxwell – ampère, en effet l'approximation des régimes quasi – statique qui permet la possibilité de négliger le temps de propagation des ondes électromagnétiques si les dimensionnes considéré faibles devant la longueur d'onde. Les fréquences utiliser pour la technique de CND par courants de Foucault ne dépasse pas en réalité les 20 MHz, la longueur d'onde est assimilable à ce qui suit :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (I. 25)$$

Avec c en tant que la vitesse de propagation des ondes dans le matériau correspondante à la vitesse de la lumière dans le vide $c = 3 \cdot 10^8 \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Pour l'étude des matériaux considérés comme étant des matériaux linéaires isotropes dans ce cas en rencontre ces relations constitutives du milieu on a :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (I. 26)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (I. 27)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (I. 28)$$

Prenant compte de l'absence de charges électriques, pour des matériaux non diélectriques (conducteurs), (la constante ϵ égale à la permittivité du vide ϵ_0) et non saturé (μ perméabilité dépendante de la valeur de H). Les quatre équations de Maxwell sous forme intégrales et différentielles deviennent :

Forme différentielle	Forme intégrale	
$\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{H} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	(I. 29)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint_\Omega \rho_v d\Omega \quad (I.30)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dS \quad (I.31)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (I.32)$$

Ou:

$\vec{E}$: Vecteur champ électrique, (V /m)

$\vec{D}$: Vecteur déplacement électrique, (C / m²)

ρ_v : Densité volumique de la charge électrique, (C / m³)

$\vec{B}$: Induction magnétique, (T)

$\vec{J}$: Vecteur densité du courant électrique, (A/m²)

$\vec{H}$: Vecteur champ magnétique, (A/m)

Ω Représente le volume, S le bord de Ω et L le contour fermé de la surface S .

Ces équations permet d'estimer la création de courants induits, qui engendre par conséquence la présence d'un champ magnétique qui va pénétrer dans la pièce.

a). Les équations de Maxwell en régime magnétostatique

En régime magnétostatique, les phénomènes sont représentés par un champ magnétique statique lié à la présence de courants électriques continus (courants stationnaires) ou d'aimants.

Un problème magnétostatique est généralement composé :

- d'air.
- de régions ferromagnétiques non conductrices,
- de sources inductrices (champ magnétique externe, conducteurs bobinés dans

Lesquels on suppose connue la distribution de courant).

Dans ce régime, il ne se développe pas de courants de Foucault et les équations de Maxwell à résoudre sont les équations (I.29), (I.31), et les équations dans lesquels la dérivée temporelle du déplacement électrique est nulle sont les équations :

$$\text{div } B = 0 \quad (I.33)$$

$$\text{rot } H = J_s \quad (I.34)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (I.35)$$

Où J_s est une densité de courant imposée.

b). Les équations de Maxwell en régime magnétoharmonique

Le régime magnétoharmonique est un régime permanent sinusoïdal qui tient compte des courants de Foucault éventuels. La résolution en régime magnétoharmonique avec une notation complexe des équations de Maxwell suppose que toutes les grandeurs physiques varient temporellement de façon sinusoïdale à une fréquence donnée. Sans traitement particulier, les matériaux magnétiques sont nécessairement linéaires.

Un problème magnétoharmonique est généralement composé des régions suivantes :

- Des conducteurs bobinés où les courants de Foucault sont négligés.
- Des régions constituées de matériaux ferromagnétiques qui sont supposées isolantes. Dans ces régions, les courants de Foucault sont négligés.
- Des conducteurs massifs, éventuellement perméables où peuvent circuler des courants induits.

- Une région d'air qui englobe les autres régions.

Dans le cas de régime quasi-statique les phénomènes de propagation sont négligés Les équations qui sont résolues s'écrivent :

$$\text{rot } H = J_s + J \quad (\text{I. 36})$$

$$\text{rot } E = -j\omega B \quad (\text{I. 37})$$

$$\text{div } B = 0 \quad (\text{I. 38})$$

$$B = \mu . H \quad (\text{I. 39})$$

$$J = \sigma E \quad (\text{I. 40})$$

Avec les hypothèses ci-dessus le champ électrique ne peut être calculé que dans les conducteurs. [22]

I. 2. 9. 12 Exemple de contrôle d'une plaque conductrice

Le schéma illustre le contrôle d'une plaque conductrice par la technique des courants de Foucault. Le point rouge qui se déplace dans le plan complexe (XY) correspond à la variation d'impédance du bobinage (ΔZ). La composante X correspond à la partie résistive et la composante Y correspond à la partie réactive de l'impédance. La référence (ou origine dans le plan complexe) pour la variation d'impédance est une zone sans défaut de la pièce à contrôler ou d'une plaque de référence. L'opération qui consiste à soustraire l'impédance de référence Z_0 à l'impédance Z du bobinage s'appelle l'équilibrage ($\Delta Z = Z - Z_0$). Cette fonction est disponible sur tous les appareils de contrôle par courants de Foucault et constitue un préalable au contrôle, (Figure I. 26). [23]

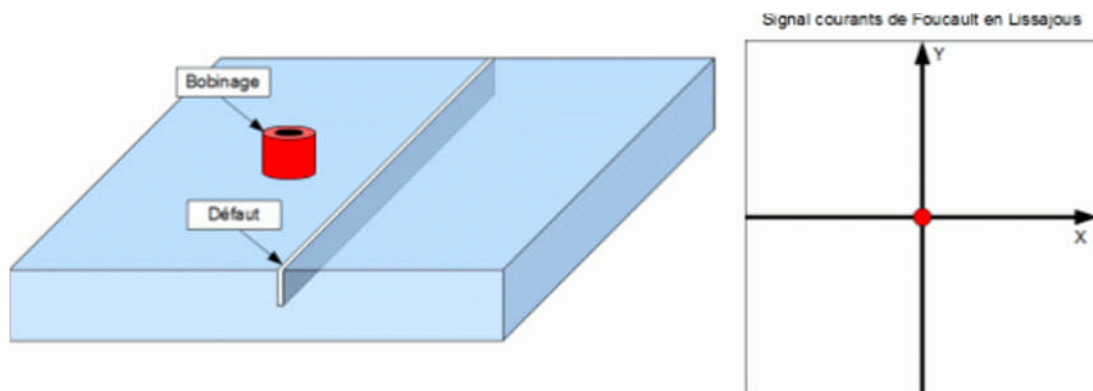


Figure I. 26 : Exemple de contrôle d'une Plaque conductrice

I. 2. 9. 13. Les avantages de contrôle par courants de Foucault

- La sensibilité

La sensibilité envisagée à la présence des fissures, Tous fissure sur surfaces.

- La simplicité

Le principal avantage des sondes à CF est leur facilité de la mise en œuvre. Le contrôle est réalisé sans contact et par conséquent sans utiliser un couplant. Le signale CF est obtenue directement et instantanément.

- L'intégration

La nature électrique de signale CF mesuré permet aussi de bénéficier fortement des avancées récentes au niveau de l'intégration des composants électroniques. En termes de réduction de volume comme augmentation des performances, le signale CF est en effet directement utilisable éventuellement pour traitements électroniques analogiques, suivis d'une

numérisation et de traitements numériques ou informatiques. Cela d'envisager des appareils de contrôle à la fois plus petits plus légers et plus rapides.

- Le contrôle par CF est un dispositif composé d'une bobine et un générateur, un voltmètre, un ampèremètre.
- Le contrôle par courants de Foucault permet de tester les pièces de formes simples avec une grande vitesse.
- la rapidité d'exécution

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

- le coût

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

- la reproductibilité

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

- la fiabilité

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

I. 2. 9. 14. Les inconvénients de la méthode de contrôle par courants de Foucault

- L'atténuation rapide des courants de Foucault limite un peu cette technique à la présence d'une faible profondeur lors de contrôle, seuls les défauts en surface aux proches de la surface peuvent être détectés.
- L'interprétation des signaux peuvent être complexe (l'analyse en plan d'impédance).
- La caractérisation de profondeur des défauts de types fissures peuvent être difficiles.
- Application pour les matériaux conducteurs seulement.

I. 2. 9. 15. L'intérêt de contrôle non destructif par courants de Foucault

- Recherche de défauts débouchant (même fermer) aux situés à des profondeurs faibles.
- Mesures dimensionnelle (mesures d'épaisseur, des revêtements isolants).
- Choix de pièces dont la conductivité électrique est différente (même alliage mai traitement thermique différent, nuances d'alliages mélangées accidentellement, etc.).
- Haute sensibilité de détection des défauts, avec possibilité d'en évaluer la profondeur.
- Distinction des différents types d'anomalies (dimensionnels, structurels).
- Possibilité de contrôle automatique et en continu de pièces longues et profilés (tubes, barres, rubanes, feuillard).
- Vitesses de défilement élevées, le capteur n'est pas nécessairement au contact du la pièce.
- La mesure est possible à très hautes températures (900°C).
- Transportabilité.
- Parfaitement adapter aux contrôles de maintenance (tubes de générateur de vapeur, remontées mécaniques, ponts suspendus, moteurs d'avions...).
- Sans impacts nuisibles à l'environnement.

- Compatibles à avec les exigences d'hygiène et de sécurité.

I. 3. Les matériaux conducteurs électriques

I. 3. 1. Introduction

Un conducteur électrique est un milieu dans lequel les charges électriques sont libres de se déplacer. Ces charges sont des électrons ou des ions. Les métaux, Les électrolytes, les plasmas (gazes ionisées) sont des milieux conducteurs.

I. 3. 2. Conducteur dans un champ électrique

Lorsque le champ électrique change, la mise en équilibre ne peut être instantanée. Sans évidence que les charges se mettent en mouvement. Ce qui apparait par l'intervention de deux phénomènes alors on à l'inertie des charges est à l'origine d'un retard de la réponse, la collision des porteurs de charges en effet son origine c'est la dissipation.

I. 3. 3. Les conducteurs dans un champ électrique statique

Plaçons un morceau de métal dans un champ électrique statique. A l'intérieur de métal, les électrons de conduction, qui sont libre de se déplacer dans tout le volume. Sont soumis à une force qui les met en mouvement. Les électrons sont stoppés à leur arrivé sur les parois du métal dont s'accumulent. Leur accumulation crée un champ qui s'adition au champ extérieur. Après cette phase transitoire on atteint un état d'équilibre.

A l'intérieur du conducteur on admet que ces électrons sont immobiles. Ça nous confirme que le champ électrique au quel sont soumis est nul. « Le champ électrique est nul à l'intérieur d'un milieu conducteur à l'équilibre » ce qui permet la déduction à partir du théorème de Gauss qui stipule que la densité totale de charge est nulle. « La densité volumique est nulle à l'intérieur d'un milieu conducteur ». Dans un métal par exemple la densité de charges négatives due aux électrons est compensée par la densité de charges positives due aux noyaux.

Tant qu'à l'extérieur de conducteur, le champ électrique n'est pas nul, présence d'une discontinuité à la surface du conducteur. Une partie accumulée en surface, le champ crée par cette densité surfacique de charges à l'intérieur compensant le champ extérieur.

Lorsqu'on fait varier le champ électrique extérieur, les charges se déplacent de sorte que le champ électrique à l'intérieur reste nul. C'est le changement est lent, les courants électriques sont des courants surfaciques.

I. 3. 4. Du conducteur parfait au conducteur réel

Le conducteur parfait est une idéalisation de conducteur réel. En fin de compte c'est à partir de l'étude effectué sur les conducteurs réels, qui va nous permettre de savoir et de déterminer les paramètres dans lesquelles on pourra considérer les conducteurs comme étant idéal. En tendance vers les milieux supraconducteurs ou la dissipation est parfaitement nulle, peuvent aussi dire que sont dans la case des conducteurs idéals, par conséquence l'inertie de leurs électrons est conservé.

I. 3. 5. Conducteur parfait

Un conducteur parfait c'est un conducteur qui se comporte de la même manière soit dans le cas d'un régime dynamique, ou régime statique. Pour un conducteur parfait le champ électrique à l'intérieur $\vec{E}_{int}$ est nul. (Équation de Maxwell-Gauss).

$$\vec{E}_{int}(\vec{r}, t) = \mathbf{0}. \quad (I. 41)$$

A partir de l'équation de Maxwell-Gauss on peut déduire que la densité de charge est nulle :

$$\rho_{int}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \overrightarrow{div} \vec{E}_{int} = 0. \quad (I. 42)$$

Seule la densité surfacique de charge qui n'est pas nulle. D'après l'équation de Maxwell-Faraday que nous avons déjà cité qui permet de conclure qu'à l'intérieur d'un conducteur parfait le champ magnétique ne peut dépendre que temps (cité dans(I. 23)).

Dans le conducteur parfait le champ magnétique est nécessairement statique en titre d'exemple les supraconducteur (lorsque un conducteur passe de l'état normal a l'état supraconducteur. Les lignes de champ magnétiques sont expulsées de sorte que le champ magnétique devient nul à l'intérieur de supraconducteur), on déduit alors l'équation de Maxwell-Ampère (cité dans(I.24)) qui stipule que les courants électriques sont nécessairement stationnaires c'est-à-dire indépendant du temps.

Les courants surfaciques seulement qui dépendent de temps. [24]

I. 3. 6. La réflexion sur un conducteur parfait

Lorsque une onde électromagnétique se projet sur un conducteur parfait. On observe un phénomène qui se présente par le mouvement des charges, qui trouve à la surface de ce conducteur et à l'intérieur les deux champs soit, le champ magnétique ou soit le champ électrique restent nuls. Le champ électromagnétique émis par les charges en mouvement à la surface de conducteur compense le champ incident à l'intérieur de conducteur : la surface de ce conducteur émet un champ de même amplitude que le champ incident et en opposition de phase. La surface est un plan, donc en déduisent que par symétrie de champ émis par ces charges en mouvement vers l'extérieur de conducteur est symétrique au champ qu'il est émet vers l'intérieur. Dont on constate que nous désignons de parler d'un miroir. Sauf de fait le que le champ réfléchit subit un déphasage de π par rapport au champ incident.

I. 3. 7. L'électron amorti

Dans un conducteur on considère que les électrons dont la conduction intervient dans se Milieu conducteur.

Un électron libre de masse m_e et de charge $q = -e$ obéit à l'équation d'évolution suivant :

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_L - \Gamma_{\vec{v}} \quad (I. 43)$$

$\vec{F}_L$, c'est la force de Lorentz :

$$\vec{F}_L = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (I. 44)$$

Lorsque le champ électrique et le champ magnétique viennent tous deux d'une même onde électromagnétique, on négligera le terme du champ magnétique, qu'il est inférieur à celui de champ électrique d'un facteur de $\frac{v}{c}$ qui est très petit tant que les vitesses ne sont pas relatives. Disant que le champ statique peut conduire à une force comparable à celle de champ électrique même si les vitesses ne sont relatives.

$\Gamma_{\vec{v}}$, c'est la force de friction visqueuse (qui rend compte des mécanismes dissipatifs présents dans le milieu. Le coefficient de friction ne peut pas généralement être calculé à partir des

premiers principes (équation de maxwell, mécanique quantique, ...) sont obtenus à partir des paramètres macroscopiques du milieu. Dans un plasma, la friction est due aux collisions des électrons avec les ions mais les molécules restent neutres, dans un métal il s'agit de l'interaction entre les électrons et les vibrations mécanique de réseau cristallin.

I. 3. 8. Conductivité électrique

Lorsque la densité volumique d'électron tend vers N_e , la densité stationnaire de courant $\vec{J}$ est proportionnelle au champ électrique on retrouve ainsi que son comportement ohmique :

$$\vec{J} = \sigma_0 \vec{E}_0 \quad (\text{I. 45})$$

I. 3. 9. Propagation dans les conducteurs

I. 3. 9. 1. Les conducteurs ohmiques

Ces conducteurs se caractérisés en volume par l'équation d'état :

$$\rho = 0 \quad (\text{I. 46})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{I. 47})$$

Avec une conductivité σ réelle. Les équations de Maxwell s'écrivent donc (que nous avons déjà cité dans le principe de CND par les courants de Foucault) :

$$\text{div } \vec{E} = 0 \quad (\text{I. 48})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{I. 49})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{I. 50})$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \sigma \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{I. 51})$$

De même qu'en l'absence de charges, on obtient une équation pour la propagation de champ électrique seul en calculant le double rotationnel du champ électrique

$$\text{rot } (\text{rot } \vec{E}) = \text{grad div } \vec{E} - \Delta \vec{E} = -\Delta \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \sigma \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (\text{I. 52})$$

Soit :

$$\Delta \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \mu_0 \sigma \vec{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (\text{I. 53})$$

Deux situations limites dont on parle :

- $\sigma \ll \epsilon_0 \omega$: il s'agit de cas des mauvais conducteurs électriques appelés milieux à pertes.
- $\sigma \gg \epsilon_0 \omega$: il s'agit de très bons conducteurs.

I. 4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cité plusieurs techniques de CND. La technique qui nous intéresse et dont on s'est basé de sous, c'est la méthode de contrôle par courants de Foucault comme étant indiqué sous le titre contrôle non destructif applications matériaux conducteurs

(courants de Foucault). La mise en preuve de son envisagement tant que sa mise en œuvre plus simple et accès à un plus d'intérêts , en effet celle-ci est employé afin d'optimiser des systèmes de contrôle de but s'informer sur l'état de la pièce (des objets conducteurs) à contrôler, on utilisant des utiles de simulation pour faire l'étude d'interaction entre la pièce et la sonde. Qui permet de configuré tous les phénomènes qui s'intervient lors de ce contrôle. D'estimer les caractéristiques et la structure, dimensionnes, la distance entre la sonde et la pièce à contrôler, l'influence des paramètres entre eux, lors de la mise en jeu de ce contrôle on vise à respecter le mode de fonctionnement, les délais de production de toutes prototypes des sondes en terme de temps de dépense d'efficacité, même le choix de matériau lors de l'utilisation.

Chapitre II

Méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles

II. 1. Introduction

Les méthodes numériques pour les équations aux dérivées partielles (EDP) d'évolution et leurs conditions aux limites qui reposent sur deux supports, un se base sur l'analyse fonctionnelle et la théorie des espaces fonctionnels. Le second se base sur les modèles des EDP et leur lien avec modélisation des phénomènes réels. Permettent la résolution des problèmes physiques dont on rencontre dans notre quotidien (le transport de polluants, les problèmes de convection, les écoulements dans les conduites, la modélisation de la pollution atmosphérique, ...etc.), tous ces problèmes sont décrits par des équations aux dérivées partielles couplées et non linéaires. Comme les problèmes magnéto-statiques linéaires, non linéaires et magnéto-dynamiques. Pour un problème de modélisation qui comporte un modèle composé de l'air, de matériau magnétique linéaire, de matériau conducteur et de source de courant électrique. La non linéarité d'un milieu dû à la saturation magnétique par la perméabilité $\mu(H)$. [25] [26]

On fait un calcul numérique pour l'étude de comportement des objets même très complexes, avec condition soient continus qui est décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire. En général ces équations n'admettant pas de solutions analytiques sauf dans des cas très simplifiés. On se sert par de méthodes de résolutions numériques connues, présente dans ce chapitre par quatre catégories de méthodes dont on cite :

- **Méthode des éléments finis**
- **Méthode des différences finies**
- **Méthode des volumes finis**
- **La méthode des éléments de frontières**

Chaque méthode de résolution numérique d'un problème comporte une phase de discrétisation et de maillage. En fin de compte les deux méthodes, la méthode des éléments finis et la méthode de volumes finis sont extraites à partir de la méthode des différences finies qui est la base (mère) de ces méthodes de discrétisation la plus élaborées. [27]

II. 2. La méthode des différences finies

II. 2. 1. Introduction

Le principe de la méthode des différences finies est basé sur l'utilisation d'une discrétisation des équations aux dérivées partielles. Elle est le plus souvent utilisée dans le domaine temporel (FDTD, pour Finite-difference time-domain), les problèmes harmoniques sont alors traités en prenant comme source une onde harmonique ou par passage d'un signal large-bande dans le domaine fréquentiel. [28]

C'est une méthode numérique qui permet de calculer une approximation de la solution d'une EDP en des points distribués sur une grille. L'objectif est alors de construire des dérivées de fonctions intervenant dans l'EDP à l'aide de la valeur discrète de celle-ci à partir de formules de Taylor. L'approximation s'exprime à partir d'opérateur aux différences finies converge vers l'opérateur différentiel lorsque le pas de maillage tend vers 0 (h). On prend pas tous les

points en considération mais quelques points correspondant aux nœuds de domaine de résolution. En fait à partir d'une grille constituant une discrétisation des points qui définissent le maillage par différences finis, (Figure II. 1.).

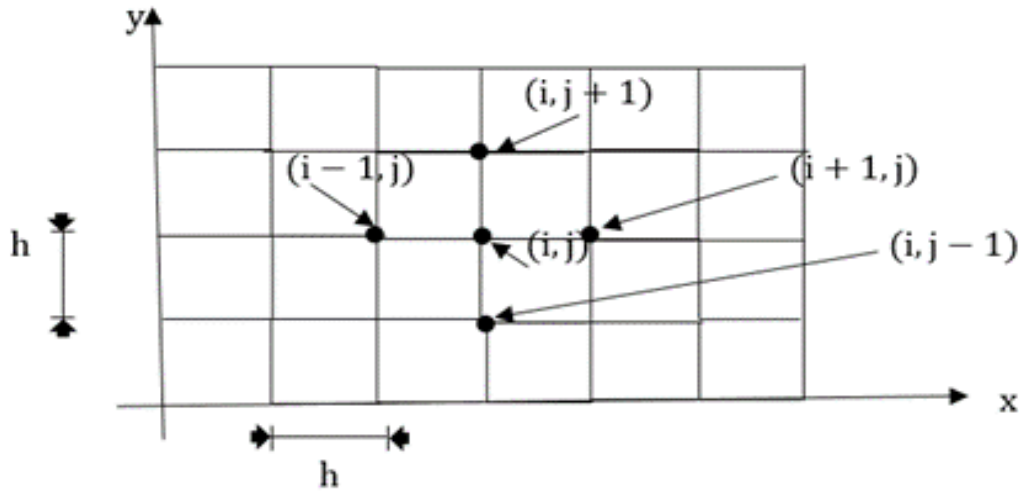


Figure II. 1 : Grille de maillage par différences finis

Le maillage des différences finis est représenté par un ensemble des points.

La construction de système des équations algébriques est permise par l'approchement des équations aux dérivées partielles. Pour aboutir à la résolution de ce système d'équations.

a). Approximation des dérivées d'ordre 1

L'approximation des dérivées d'ordre 1 par rapport à x et y sont définis comme suit :

Au point de coordonnée (i, j) situé dans le repère (x, y).

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)_{(i,j)} = \frac{G_{(i+1,j)} - G_{(i-1,j)}}{2h} \quad (\text{II. 1})$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)_{(i,j)} = \frac{G_{(i,j+1)} - G_{(i,j-1)}}{2h} \quad (\text{II. 2})$$

b). Approximation des dérivées d'ordre 2

L'approximation des dérivées d'ordre 2 par rapport à x et y :

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}\right)_{(i,j)} = \frac{G_{(i+1,j)} - 2G_{(i,j)} + G_{(i-1,j)}}{h^2} \quad (\text{II. 3})$$

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2}\right)_{(i,j)} = \frac{G_{(i,j+1)} - 2G_{(i,j)} + G_{(i,j-1)}}{h^2} \quad (\text{II. 4})$$

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}\right)_{(i,j)} + \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2}\right)_{(i,j)} = \frac{G_{(i+1,j)} + G_{(i-1,j)} + G_{(i,j+1)} + G_{(i,j-1)} - 4 G_{(i,j)}}{h^2} \quad (\text{II. 5})$$

On peut déduire $\Delta_{G(i,j)}$ de Laplace qui s'écrit comme suit :

$$\Delta_{G(i,j)} = \nabla^2 G_{(i,j)} = \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}\right)_{(i,j)} + \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2}\right)_{(i,j)} \quad (\text{II. 6})$$

L'expression (II. 5) est appelée la formule à « cinq points ». Les expressions précédentes sont obtenues par le développement en série de Taylor, mais l'écriture de cette équation pour tous les nœuds de maillage nous permet d'aboutir à un système matriciel suivant :

$$[S][G] = [F] \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

[F] : Terme source

[S] : Matrice élémentaire

[G] : Matrice des inconnues

La résolution de ce système nous permet d'avoir la distribution de l'inconnue dans le domaine d'étude. [29]

Cette méthode en réalité si la racine des deux autre méthodes comme éléments fini et volumes finis. Si la première méthode adapté pour la résolution des équations aux dérivées partielles.

II. 2. 2. Utilisation de la méthode des différences finies

- Mise en œuvre simple pour des géométries simples.
- Plus utiliser dans des codes de recherche.

II. 2. 3. Intérêts de la méthode des différences finis

- Un code numérique utilisant une méthode de différences finies de type FDTD est relativement simple à développer et à utiliser.
- Cette méthode demande peu de capacités de calcul.
- La méthode est utilisable à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel.
- On peut modéliser des structures aux géométries complexes, dont les matériaux peuvent être anisotropes ou inhomogènes. [30]

II. 2. 4. Les inconvénients

- Limité dans l'utilisation pour des géométries complexes (mise en œuvre difficile) à cause de la « rigidité ».
- N'est pas toujours conservative.
- Le passage d'un milieu physique à un autre (fer-air), non-linéarité (saturation) nécessite un traitement très spécifique.

II. 2. 5. Conclusion sur la méthode des différences finies

Dans ce cadre la résolution des équations aux dérivées partiel par la méthode des différences finies. A fait partie de la résolution numérique pour problèmes physiques. la progression de cette méthode apparaissent dans son intégration à la résolution numériques, comme tout méthode numérique comprend un grand espace d'utilisation sans égarée ces inconvénients entrainant dans une plage de limitation de la marge d'utilisation, aussi intégrer dans les problèmes Mécanique.

Dans l'espace « physique » (espace réel) et les méthodes seront appelées **Différences finies** (« Finite Difference »). On travaille sur une grille d'espace et de temps. [31]

II. 3. La méthode des éléments finis

II. 3. 1. Introduction

Dans ce chapitre nous abordons l'approximation des problèmes elliptiques par la méthode des éléments finis. Nous commencerons par présenter la méthode d'approximation interne, qui est une méthode d'approximation abstraite dans les espaces de Hilbert. La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation interne particulière, l'espace d'approximation étant un espace de fonctions polynomiales par morceaux. Nous décrirons donc ensuite les espaces locaux utilisés dans l'approximation, en nous bornant aux exemples les plus courants : les éléments de Lagrange sur des triangles et des rectangles, en 2 dimensions, sur des tétraèdres, des hexaèdres et des prismes en 3 dimensions. Ensuite on construit les espaces d'approximation globaux, et les propriétés du problème approché obtenu. [32].

La définition d'une méthode des éléments finis pour un type de problème donné passe donc par une première phase de définition des principes de construction des termes élémentaires appelée écriture de l'élément. [33]

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation numérique de solutions aux problèmes soient statiques ou dynamiques tels que :

- Diffusion thermique.
- Mécanique des milieux continus (solides et fluides).
- Électromagnétisme.

Principalement elle est basée sur une théorie mathématique rigoureuse. Très utiliser et incontournable en mécanique (fluides, solides, interactions, structures), et aussi applicable dans plusieurs domaines qui contient des problèmes d'EDP aux limites par titre d'exemple en mathématiques financières ou l'électromagnétisme. Cette méthode a fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou

EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet ou Neumann.

Cette méthode consiste à découper le domaine en petits éléments, appelés maille donc à la recherche d'une formulation simplifier de problèmes sur chaque élément. Qui s'appuie sur la transformation des systèmes d'équations quelconques en équations linéaires solutions. Pour chaque système est représenter par une matrice, en rassemble tous systèmes d'équations des éléments pour obtenir une matrice. La résolution de ce système globale donne la solution approchée au problème.

Les logiciels modernes utilisant la méthode des éléments finis bénéficient d'une interface graphique rendant leur utilisation relativement simple. Par ailleurs, un certain nombre de tâches sont automatisables. On peut donc quasiment lancer un calcul sur ordinateur sans connaître la méthode. Cependant, le modèle utilisé risque d'être inadapté au problème, on aura donc un résultat très éloigné de la réalité. L'utilisateur doit avoir des connaissances suffisantes pour être en mesure de :

- maîtriser le modèle, c'est-à-dire utiliser les options permettant de représenter le plus fidèlement possible la réalité.
- contrôler la qualité du résultat, détecter les résultats manifestement erronés.
- interpréter les résultats, et éventuellement les post-traitements, c'est-à-dire utiliser les résultats pour faire d'autres calculs.

Un élément fini est une maille, il est défini par ses nœuds, c'est-à-dire les angles pour une figure plane, ou les sommets pour un volume.

La MEF consiste à calculer les valeurs de la fonction (f) — solution des EDP — aux nœuds, on ne recherche pas la valeur en tout point de l'espace, mais uniquement en certains points. [31]

Approximation par éléments finis son principe est basé sur. La discrétisation numérique par méthodes des éléments finis qui s'appuie d'une part sur l'établissement d'une formulation variationnelle des équations, et d'autre part sur le choix d'un espace d'approximation de Galerkin.

Cette méthode est intégrée avec des utiles CAO (conception assister par ordinateur). Son principe se ramène sur la mise en forme intégrale du problème définie à partir de son équation aux dérivées partielles ou précisément de sa fonctionnalité d'énergie qui peut se présenter en deux formulations :

- variationnelle.
- Résidus pondérés.

Son doute la méthode des éléments finis EF a fait un trajet dans l'évolution pendant le temps mais ça reste inévitable l'apparition des cas d'imprécise dans quelques situations qui se ressort dans :

- La présence de singularité dans le domaine d'étude.
- Cas des domaines infinis.
- Autres structures (dimensionnes relatifs).

II. 3. 2. Équations de la physique mathématique de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis c'est une méthode de résolution des équations de la physique – mathématique.

Les principales méthodes de la physique – mathématique sont :

- Ces équations sont discrétisées par les méthodes; de différences finies, volumes finis, éléments finis.
- Les équations elliptiques :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{II. 8})$$

- Les équations paraboliques :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (\text{II. 9})$$

- Les équations hyperboliques :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II. 10})$$

Ces équation intervient principalement dans mécanique des fluides, (aéronautique, écoulements diphasiques, modélisation de rupteur de barrage d'avalanches).

II. 3. 3. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites associables sont :

a). Type Dirichlet :

Cette condition adaptable sur le domaine d'étude. Dont la valeur de l'inconnu exacte figure sur les frontières extérieures de domaine d'étude Ω avec $\Omega \in [0,1]$, $A(x)$ conditions qui limite la résolution des dérivées partielle accordé aux problèmes posés dont on applique cette condition sur le domaine d'étude.

$A(x) = A_0(x)$ (Condition de Dirichlet non homogène)

$$\text{avec:} \quad A_0 = \text{cste} \quad (\text{II. 11})$$

$A(0) = A(1) = 0$ (Condition de Dirichlet homogène)

b). Type Neuman:

Cette condition permet de mettre des conditions aux limites sur les frontières $\partial\Omega$ de domaine d'étude qui détermine la valeur de la composant normale de l'inconnu en fait de mettre une limitation de ce domaine d'étude.

$$\frac{\partial u(x)}{\partial n} + \alpha u = f_s \quad \text{sur } S_f \quad (\text{II. 12})$$

- Si $\alpha = 0$ cette condition est dite de Neuman
- Si $\alpha \neq 0$ cette condition dite de Cauchy

$$\frac{\partial u(x)}{\partial n} = A_0 \quad A_0 = \text{cste} \quad (\text{II. 13})$$

$$\frac{\partial u(x)}{\partial n} = 0 \quad (\text{Neuman homogène}) \quad (\text{II. 14})$$

Pour tous régimes dynamiques on prend en compte les variations temporelles. La définition de A pour les équations paraboliques ce fait à l'instant $t = 0$ sur tout le domaine. Pour les équations hyperboliques on fait définir A à l'instant $t = 0$ sur tout le domaine.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \text{ (à l'instant } t = 0). \quad (\text{II. 15})$$

Les équations elliptiques caractérisant les phénomènes en régime permanent statique ou harmonique : $\frac{\partial}{\partial t} = 0 \Rightarrow \text{statique}$ (II. 16)

$$\frac{\partial}{\partial t} = j \omega \Rightarrow \text{harmonique} \quad (\text{II. 17})$$

Les équations paraboliques caractérisant le régime transitoire (démarrage).

Les équations hyperboliques caractérisant les phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques.

II. 3. 4. Les processus d'analyse d'un problème physique

De façon générale, les différentes étapes d'analyse d'un problème physique s'organisent suivant. Le processus schématisé par la (FIGURE II. 2). Nous partons d'un problème physique.

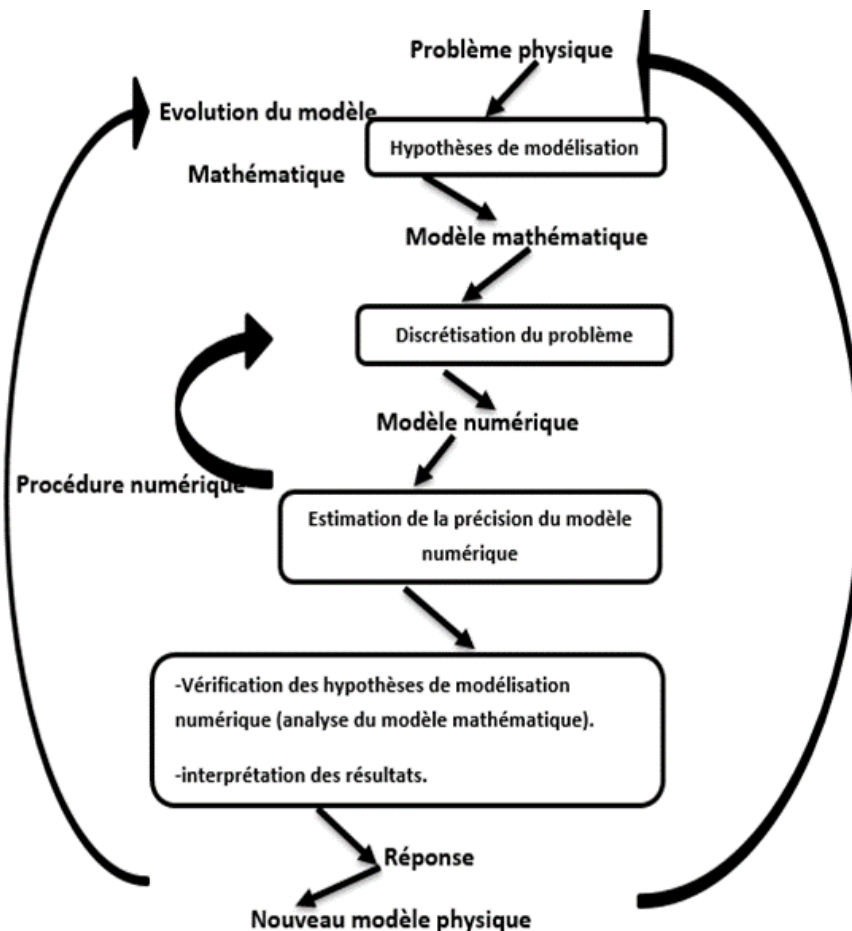


FIGURE . II. 2. : Processus d'analyse utilisant un modèle numérique

II. 3. 5. La formulation intégrale des éléments finis

La formulation intégrale est composée de deux types citée dans ce qui suit :

- La formulation variationnelle.
- La formulation projective (résidus pondérés).

II. 3. 5. 1. La formulation variationnelle

Cette formulation consiste une connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système d'étude. La formulation variationnelle sa construction est à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui stipule que l'existence d'une fonctionnelle de type intégrale est définie par :

$$I_a = \int_{\Omega} (x_i, q_i, q'_{ij}) d\Omega. \quad (\text{II. 18})$$

Avec :

x_i : variables , $i = 1, \dots, n$.

q_j : variables d'état.

$$q'_{ij} = \frac{\partial q_i}{\partial x_{jk}} \text{ dérivées des fonctions d'états } q_i. \quad (\text{II. 19})$$

$$L(x_i, q_i, q'_{ij}) = w_c - w_p \quad (\text{II. 20})$$

L: la fonction de lagrange qui résulte la coénergie de type cinétique et l'énergie potentielle.

w_c : coénergie de type cinétique .

w_p : énergie potentielle.

Exemple :

$$F(A) = \int_{\Omega} (H \, dB) \, d\Omega = \int_{\Omega} \left(\frac{B}{\mu} \, dB \right) \, d\Omega = \frac{1}{\mu} \int_{\Omega} B \, dB = \frac{1}{\mu} \frac{1}{2} B^2. \quad (\text{II. 21})$$

Ω : domaine de résolution.

A : potentiel vecteur magnétique(T. m).

H : champ magnétique (A/m).

B : induction magnétique (T).

μ : perméabilité magnétique, ($\mu_0 \mu_r = \mu$).

Or que :

μ_0 : perméabilité de vide, ($\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$).

μ_r : perméabilité relative de matériau.

La résolution d'un problème variationnelle est déduit à partir de la fonctionnelle d'énergie $F(A)$. réalisable par minimisation de cette fonctionnelle.

II. 3. 5. 2. La formulation résidus pondérés (projective)

La formulation résidus pondérés ou projective (associé avec une base de fonctions). Cette formulation est plus utiliser dont ne consiste pas à la connaissance de l'expression énergétique du système (fonctionnelle énergétique). Appelée aussi formulation résidus pondérés (nommé la méthode de Galerkin). [34]

a). Méthode de Galerkin

C'est une méthode consiste à utiliser comme fonctions de pondération les fonctions de forme. L'inconvénient réside dans le calcul de l'intégrale sur le domaine. Par contre, si les opérateurs sont symétriques, les matrices le sont également, de plus, si le problème est bien posé, nous sommes assurés de la régularité du système. Cette régularité du modèle mathématique assure des propriétés de convergence de la solution cherchée.

Son principe est fondement abouté sur des méthodes projectives qui est basé sur un théorème applicable dans un espace de Hilbert qui dit que seul le vecteur nul est orthogonal à tous les vecteurs d'espace.

Soit $(f, g) \in \underline{\underline{L}}^2$, l'orthogonalité de f et g se traduit par :

$$\int_{\Omega} f g \, d\Omega = 0. \quad (\text{II. 22})$$

La méthode des résidus pondérés consiste à rechercher dans des fonctions A qui satisfaisant les conditions aux limites et telles que pour toutes fonctions $\emptyset$ qui est des conditions de dérivabilité déterminées par cette relation :

$$\int_{\Omega} \emptyset [L(A) - f] \, d\Omega = 0. \quad (\text{II. 23})$$

$$\int \int_{\Omega} R_i \emptyset_i \, d\Omega = 0. \quad (\text{II. 24})$$

Le choix des fonctions $\emptyset$ introduit une erreur de méthode, en effet cette méthode est plus avantageuse par rapport à la formulation variationnelle. Tant que pas de dépendance à la fonctionnelle d'énergie. La fonction approché définit pour estimer l'erreur commit sur la fonction exacte par un résidu R .

$$R = L(u) - f. \quad (\text{II. 25})$$

L'erreur s'annule d'après la solution l'intégration de résidus. Définit en un point appartenant au domaine Ω .

II. 3. 5. 3. L'approximation approchée.**a). Principe d'approximation approché**

Soit A^* la fonction approcher par :

$$A^* = \alpha_1 N_1 + \alpha_2 N_2 + \alpha_3 N_3 + \dots + \alpha_n N_n. \quad (\text{II. 26})$$

Les coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$, sont déterminés afin d'avoir une réalisation mieux d'une approximation de la fonction A . Par l'adaptation des fonctions $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$.

b). Principe de minimisation

Minimisation par des fonctions approximantes

Le principe de minimisation repose sur les coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ de la fonction d'approximation A^* , par adaptation de certaines conditions imposé à ces fonctionnelles soit :

$$L(A) - f = 0. \quad (\text{II. 27})$$

On sait que A^* la fonction d'approximation de la fonction A sur tout le domaine d'étude Ω telle que : $A^* = \sum_{i=1}^N \alpha_i N_i$. (II. 28)

Alors la fonction F dépend uniquement des coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$.

La fonctionnel s'écrit :

$$F = \int \int_{\Omega} L(A_1, A_x', A_y') d\Omega. \quad (\text{II. 29})$$

La condition d'extrêmes s'écrit :

$$\frac{\partial F}{\partial A_1} = 0. \quad \frac{\partial F}{\partial A_1} = \frac{\partial F}{\partial A_2} = \frac{\partial F}{\partial A_3} = \frac{\partial F}{\partial A_n} = 0. \quad (\text{II. 30})$$

$$\frac{\partial F}{\partial A_2} = 0. \quad A_1, A_2, A_3, A_n : \text{inconnues de problème (aux nœuds la résolution du système obtenue permet de déterminé } A^* \text{ sur tous le domaine.)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial A_3} = 0.$$

•
•
•

$$\frac{\partial F}{\partial A_n} = 0.$$

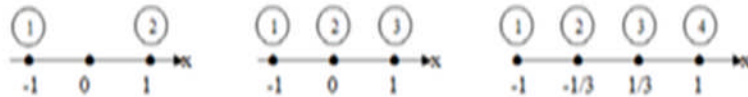
Le principe de minimisation permet d'écrire que $F = 0$.

$$F = \int \int_{\Omega} [L A^* - f] d\Omega. \quad (\text{II. 31})$$

II. 3. 5. 4. Approximation par éléments finis

Faisant un rapprochement à partir de la méthode des éléments finis. Basé sur la subdivision de domaine dont l'appellation éléments qu'on choisit [34]. La forme pour des problèmes à un (élément droit), deux, trois dimensionnes (1D, 2D ,3D). (Figure II. 3) les éléments de base sont :

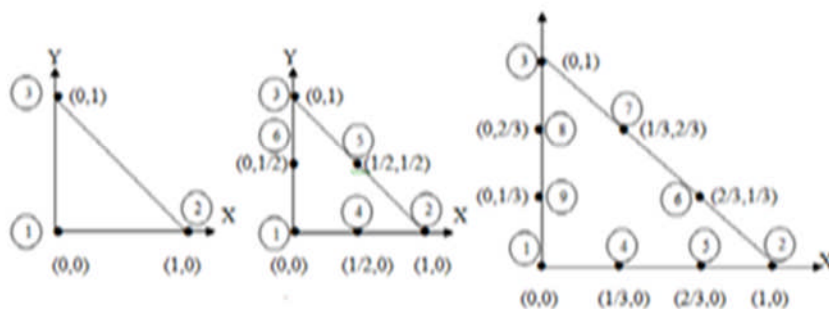
- **Eléments à une dimension**



Linéaire (4 noeuds) Quadratique (3 noeuds) Cubique (4 noeuds)

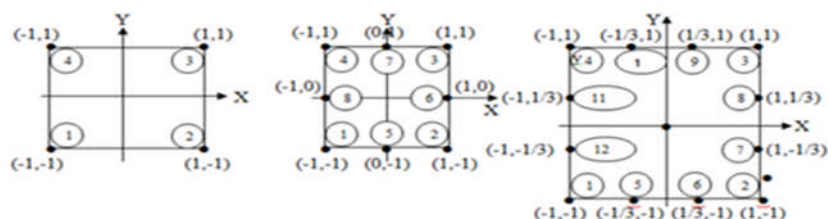
- **Eléments à deux dimensions**

- **Eléments triangulaires**



Linéaire (3 noeuds) Quadratique (6 noeuds) Cubique (9 noeuds)

- **Eléments carrés**



Linéaire (4 noeuds) Quadratique (8 noeuds) Cubique (12 noeuds)

○ Éléments à trois dimensions

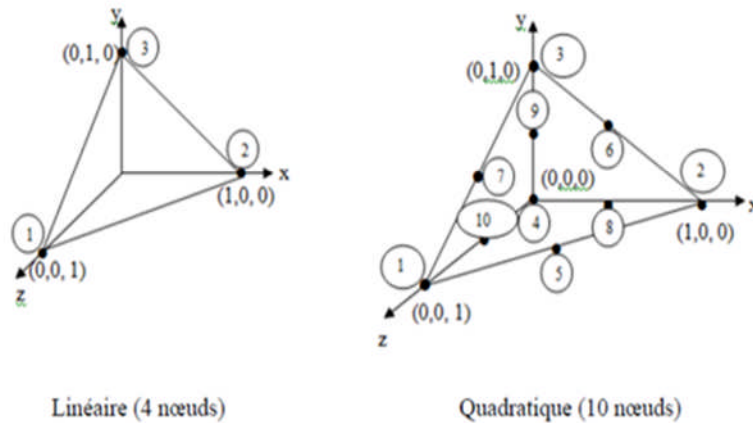


Figure II. 3 : Les différents types d'éléments Finis en 1D, 2D, 3D

II. 3. 5. 5. Approximation (tétraèdre) nodale d'une fonction

Soit une fonction représentant le comportement d'une grandeur physique qui peut être un champ magnétique, une induction, potentiel vecteur magnétique, la température, la chaleur ... etc.

Supposant f fonction connue en un certain nombre de points $x_i : 1, 2, 3, \dots, n$, on construit une fonction approché $U(x)$, de f d'une manière à avoir une erreur nul :

$$e(x) = f(x) - u(x). \quad (\text{II. 32})$$

$u(x)$: Peut-être de type :

- Polynomiale.
- Trigonométrique.
- Exponentielle.
- Fonction spéciale.

L'interpolation à la base d'un polynôme :

$$\text{Soit : } u(x) = \langle P_1(x), P_2(x), P_3(x), \dots, P_n(x) \rangle \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (\text{II. 33})$$

$P_1(x), P_2(x), P_3(x), \dots, P_n(x)$; Sont des polynômes connus.

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$; Sont des paramètres de l'approximation.

Les paramètres a_i sont choisis d'une sorte d'avoir l'erreur $e(x)$ nulle avec cette approximation :

	Quadratique	$[1, x, x^2]$	trois variables
2 dimension:	linéaire	$[1, x, y]$	trois variables
	Quadratique	$[1, x, y, xy, x^2, y^2]$	six variables
3 dimension:	linéaire	$[1, x, y, z]$	quatre variables
	Quadratique	$[1, x, y, z, x^2, xy, y^2, xz, z^2, yz]$	dix variables

Pour utiliser une base polynomiale complète, le nombre de termes doit être égal au nombre de variables nodales à identifier. Si l'on ne peut pas utiliser un polynôme complet le meilleur choix consiste à respecter la symétrie des monômes conservés.

Exemples de bases polynomiales incomplètes:

2 dimensions: "bi - linéaire"	$[1, x, y, xy]$	4 variables
3 dimensions: "tri - linéaire"	$[1, x, y, z, xy, xz, yz, xyz]$	8 variables

II. 3. 5. 8. Construction de l'approximation d'un élément triangulaire

Soit un élément triangulaire à trois nœuds, (FIGURE II. 4)

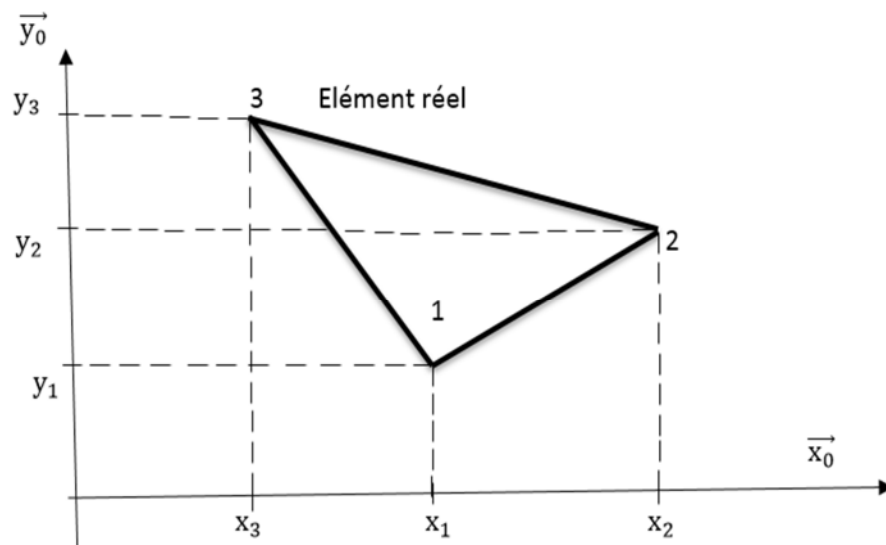


FIGURE II. 4: Élément triangulaire à trois nœuds

En définissant aux nœuds l'approximation u^* :

u^* : L'approximation à la valeur du champ u

u_n : Les variables nodales

$\{a\}$: Les paramètres généralisés en fonction des variables nodales

Les valeurs nodales: $u^*(x_i, y_i) = u_i$ (II. 40)

Or: $u_n = u^*(M_n) = [\phi_{M_n}]\{a\}$ (II. 41)

$$\text{Et:} \quad \{a\} = [T]\{N_{M_n}\} \quad (\text{II. 42})$$

$$\text{Avec:} \quad [T] = [\emptyset_{M_n}]^{-1} \quad (\text{II. 43})$$

Nous avons trois variables nodales, nous cherchons une approximation polynomiale linéaire de forme :

$$u^*(x, y) = [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 44})$$

Nous obtenant la relation matricielle suivante :

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

La relation inverse est de forme :

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \Delta_{23} & \Delta_{31} & \Delta_{12} \\ y_{23} & y_{31} & y_{12} \\ x_{32} & x_{13} & x_{21} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad \text{Avec :} \begin{cases} A : \text{aire de triangle} \\ x_{ij} = x_i - x_j \text{ et } y_{ij} = y_i - y_j \\ \Delta_{ij} = x_i y_j - x_j y_i \end{cases} \quad (\text{II. 46})$$

Reportons ce résultat dans l'approximation nous obtenons :

$$u^*(x, y) = [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{bmatrix} u_1 \\ u \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 47})$$

Avec permutation circulaire de ijk :

$$N_i = \frac{1}{2A} (\Delta_{jk} + x y_{jk} - y x_{jk}) \quad (\text{II. 48})$$

Nous venons de construire les fonctions d'interpolation d'un élément triangulaire quelconque, si la démarche est simple les calculs sont moins même si la forme est quelconque de l'élément. En pratique les fonctions d'interpolation sont construites pour des éléments possédant des propriétés géométriques permettant de simplifier les calculs. Ce sont les éléments de référence dont nous avons présenté quelques exemples dans les paragraphes précédents.

II. 3. 5. 9. Méthode de construction des fonctions d'interpolation associées aux éléments finis de type C^0 :

Cette méthode s'effectue à partir d'élaboration de quelques règles.

Pour construire la fonction d'interpolation en utilisant le triangle de Pascal. [34]

Et la construction est à partir la procédure suivante :

1. La fonction approximante est de type polynomial

2. Pour assurer la continuité de la fonction approximante sur le côté 1-4, sa variation doit être linéaire en u
3. Pour assurer la continuité de la fonction approximante sur côté 2-1, sa variation doit être linéaire en v
4. Pour assurer la continuité de la fonction approximante sur le côté 2-3, sa variation doit être linéaire par rapport à u
5. Pour assurer la continuité de la fonction approximante sur le côté 3-4, sa variation doit être linéaire par rapport à v
6. Il faut prendre tous les termes linéaires du développement de Pascal
7. Puisque 4 points définissent de manière unique la variation de la fonction, il faut prendre 4 termes tirés du triangle de Pascal

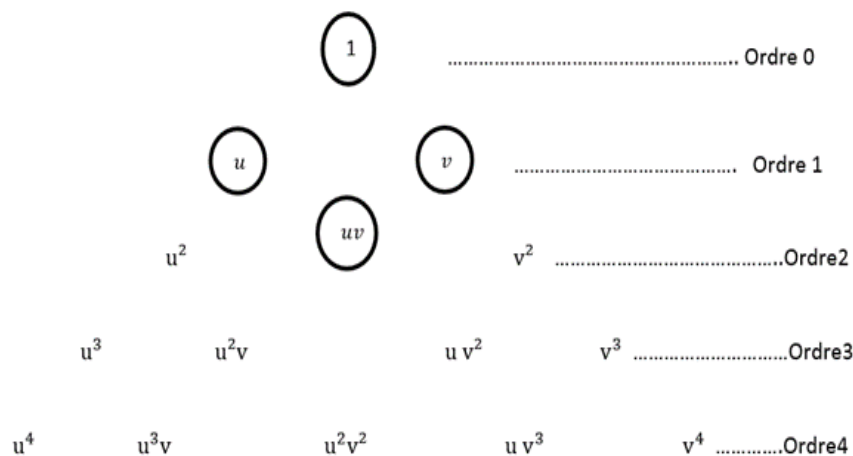


Figure II. 5 : Triangle de pascale à l'ordre 4

II. 3. 5. 10. Utilisation de la méthode des éléments finis

- Approche très mathématique.
- Adaptation pour n'importe quelconque géométrie.
- Utilisation large dans la mécanique des solides, problèmes multi-physiques.

II. 3. 5. 11. Les inconvénients

Cette méthode reste imprécise dans les situations suivant :

- Présence de singularité dans le domaine d'étude.
- Domaine d'étude infini.

II. 3. 5. 12. La mise en œuvre de la méthode des éléments finis

L'organisation d'un code éléments finis, pour un problème linéaire et stationnaire, (Figure II. 6).

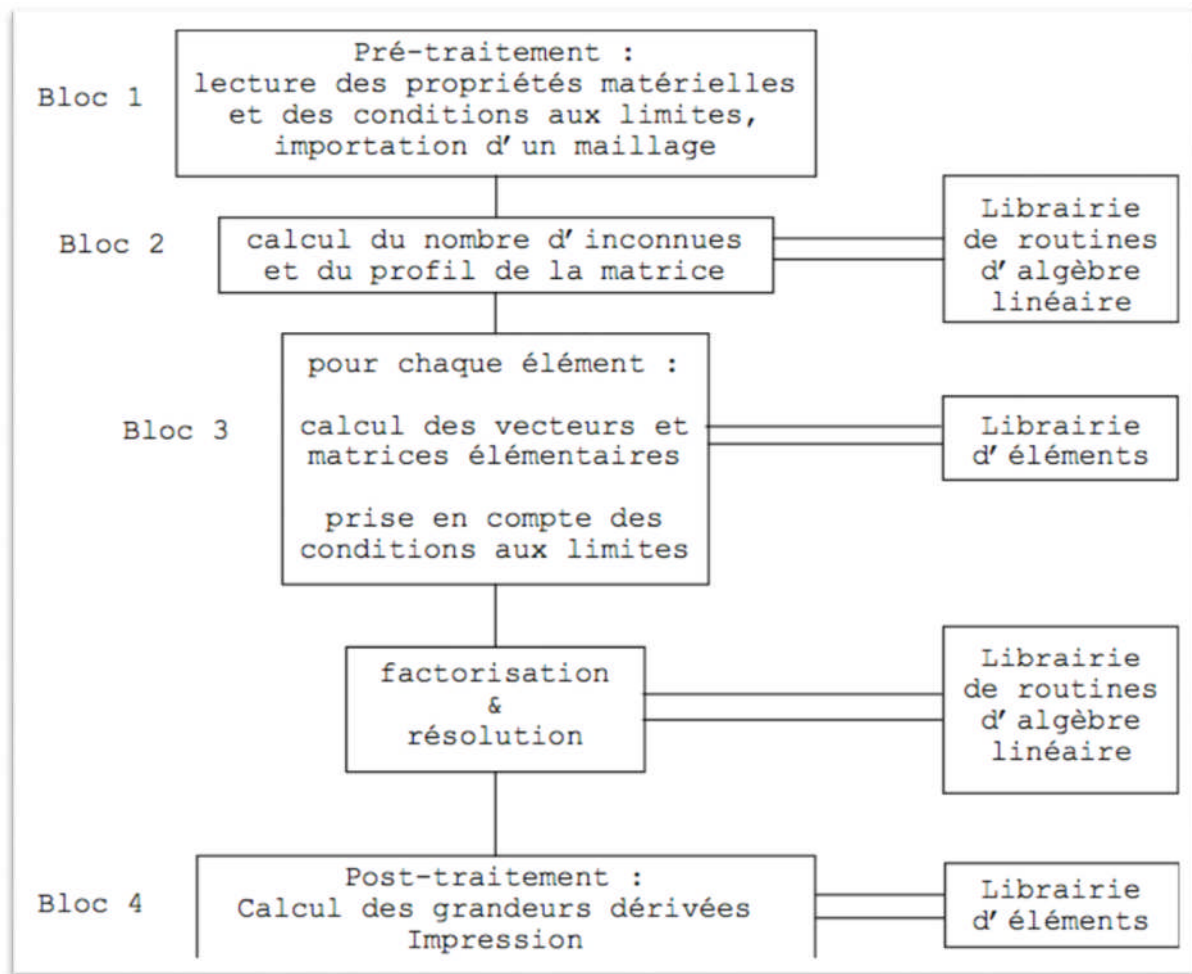


FIGURE II. 6 : L'organisation d'un code élément finis

II. 3. 5. 13. Les démarches éléments finis

Les principales étapes pour la construction éléments finis sont les suivants :

- Discrétisation de milieu continu en sous domaine.
- Construction nodale par sous domaine.
- Calcul de matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale de problème.
- Assemblage des matrices élémentaires, prise en compte des conditions aux limites.
- Résolution des systèmes d'équations.
- Discrétisation géométrique.
- Approximation nodale.

II. 3. 5. 14. Conclusion sur la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis a fait un trajet incontournable dans l'industrie. Tant qu'utile aussi important pour l'analyse des produits industriel et pour conception. La perfection de la modélisation à partir de ces utiles adaptatifs avec l'innovation technologique. Permet par des algorithmes fiable dont marquant sa performance. Sans ce méfié de la bonne utilisation que prenant en considération de plusieurs taches de procédure à respecter pour atteindre les

objectifs attendue. La méthode des éléments finis a connu un tel développement, ces dernières années, qu'elle apparaît actuellement comme la méthode la moins coûteuse et la plus simple d'analyse des contraintes et de calcul des structures. [26] On les affecte par des conditions figurant dans :

- Formaliser les non apparues comme hypothèses de modélisation. faire une démarche simplifiant la tâche pour l'analyse de problème, de faire une conception mieux.
- Faire évaluation aux résultats recueillis avec une certitude.
- Analyse des conséquences de résultats par rapport aux objectives visées.

II. 4. La méthode des volumes finis

II. 4. 1. Définition

Les problèmes physiques rencontrés dans notre quotidiennes (le transport des polluants. Les problèmes de convection, les écoulements dans les conduites, la modélisation de l'écoulement des polymères fondus, la modélisation des pollutions atmosphériques, etc...). Décrits par des équations aux dérivées partielles fortement couplées et non linéaires. Tant que la méthode des volumes finis c'est une méthode numérique de résolution qui comprend une phase de discrétisation et une autre de maillage. [35]

- La phase de maillage consiste à diviser le domaine en petits volumes appelées volumes de contrôles.
- La phase de discrétisation transforme le problème continu en problème discret. les équations ainsi les conditions aux limites. Sont approchées par des équations et conditions discrètes.

Parmi les méthodes numériques conservatifs on trouve la méthode des volumes finis. Applicable sur des maillages variables (mobiles et potentiellement auto- adaptatifs) pour la résolution des équations hyperboliques linéaires ou non linéaires en une dimension d'espace. Inspiré par la méthode de Godunov (le schéma de Godunov est constitué de deux étapes : une étape d'évolution exacte en temps, suivie d'une étape de projection en espace). En utilisant un maillage variable (mobile et à topologie éventuellement variables) pour la résolution des équations hyperboliques en une dimension d'espace. Plus intéressement et plus particulièrement à l'advection linéaire et à l'équation de Burgers, non linéaire.

Cette méthode est largement utiliser pour les problèmes concrets en mécanique des fluides. [36]

Son utilisation adaptative pour raison qui se manifeste dans ce qui suit :

- Approche très « physique » bilan des flux.
- S'adapte à une géométrie quelconque.
- Plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaire hyperbolique.
- Conservative par (sa formulation).

Le volume de contrôle de type rectangulaire nous permet de modeliser les phénomène électromagnétique que pour des géométrie simple. Elle consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires, forme simple, adjacent chaque volumes délimité par deux

interfaces, dans le cas monodimensionnel (e,v), quatre interfaces et dans le cas bidimensionnel chaque volume entour un nœud (Figure II. 7).

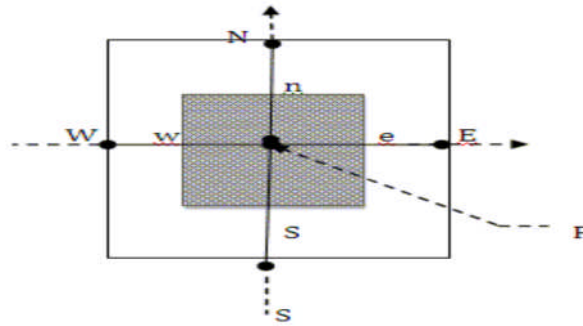


Figure .II. 7 : Volumes élémentaires (2D)

La méthode des volumes finis, appelée aussi méthode des volumes de contrôles, est une méthode de résidus pondérés où les fonctions de poids sont égales à l'unité dans des volumes finis données. Elle consiste à discrétiser les équations aux dérivées partielles par intégration sur des volumes finis entourant les nœuds du maillage plutôt qu'aux nœuds eux-mêmes. En effet, dans le cas de cette méthode, le domaine d'intégration est subdivisé en volumes de contrôle, chacun entoure un nœud de maillage. Lors de l'assemblage des équations discrétisées, la matrice du système global est construite par arrête contrairement aux matrices globales issues d'une discrétisation par éléments finis, pour laquelle la construction se fait par élément.

II. 5. Conclusion sur la méthode des volumes finis

L'apparition de cette méthode fait l'intérêt de s'occuper des problèmes plus complexes, en raison de sa conservation. De raison à aboutir à la résolution des problèmes physiques. Dont sa présence parmi les première méthodes évolue et utiliser dans les calculs d'écoulements stationnaires et instationnaires qui prit en compte les effets de la non-linéarité et les effets de compressibilité ainsi la viscosité. Cette méthode a remplacé les méthodes classiques. Basée sur la méthode des différences finis pour traiter des problèmes plus complexes notamment tridimensionnels.

II. 6. La méthode des éléments de frontières

Elle repose sur la méthode plus générale des équations intégrales. Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse due à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée [37]. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques. Cette méthode ne peut s'appliquer que si les courants de Foucault se développent sur une profondeur qui peut être considérée comme négligeable devant les autres dimensions (excitation à haute fréquence, profondeur de pénétration nulle). [38] [39]

II. 7. Conclusion sur les méthodes numériques

Dans ce chapitre on vise les méthodes numériques dont on a cité trois méthodes. A partir d'une définition de la méthode de différences finies (la base des autres méthodes qui suit). Passent par éléments finis, puis à la fin on se tente d'illustrer la méthode des volumes finis. Sans oublier de montrer les avantages et inconvénients de chaque méthode et son impact envisager dans son utilisation pour la résolution des EDP liée à un problème physique avec des conditions aux limites.

Chapitre III

Application et résultats

III. 1.Introduction :

Dans le contrôle non destructif par les courants de Foucault, c'est la plus utilisée comme technique de contrôle classique applicable pour des matériaux conducteurs, qui utilise un champ électromagnétique sinusoïdal pour créer les courants d'induction (courants de Foucault). Elle est surtout applicable pour la recherche de défauts surfaciques, ou sub-surfacique. [40]

L'inspection de pièces métalliques par la méthode des Courants de Foucault répond aux problématiques de nombreux besoins industriels, dans les domaines aussi variés que le nucléaire et l'aéronautique. Toutefois, de parts leurs conception à partir de bobines filaires, les sondes traditionnelles présentent un encombrement important, si bien que l'accès à certaines zones peut s'avérer difficile, voire impossible. De surcroît, ces sondes sont le plus souvent dédiées à une application donnée, ce qui nécessite des études spécifiques et les coûts de développement sont plus coûteux, afin d'avoir des bonnes performances lors de tests.

III. 2. Dispositif de simulation

On a développé un modèle qui nous a permis de prendre en considération certains phénomènes physiques et géométrique, dans notre simulation le modèle adapté et un modèle constituer de sonde a double fonction placé au-dessus de la pièce à contrôler.

Notre objectif si de faire un teste par courants de Foucault à partir d'une sonde double fonction, génèrent un champ magnétique variable, qui crée ces courants de Foucault sur la surface de la cible (pièce) d'où s'intervient la variation de l'impédance en bord de la bobine.

Ce modèle se compose de diverse configuration, dont on a essayé de créer des différentes structures. En débutant par une simple géométrie; une seule pièce (cible) contient un défaut avec une sonde, puis on a créé un modèle constitué de trois (03) pièces à contrôler, dont on a fait déplacer le défaut à travers les trois pièces sous le teste de la sonde, en fin on termine par une structure de huit couche (08) mais le défaut se situe dans la première cible seulement, sous un test d'une sonde a double fonction.

Dans notre simulation nous avons utilisé une sonde a double fonction, (Figure (a)). Ce type de capteur, comporte deux enroulement l'un est pour l'excitation, l'autre pour réception, de but de détecter les défauts à l'intérieur de la pièce. Créé dans un espace cartésienne (x, y) .

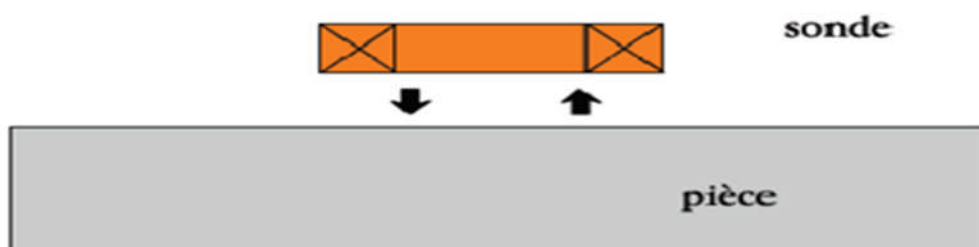


Figure (a) : Type de sonde a double fonction

III. 3. Les caractéristiques de trois (03) modèles géométrique et électromagnétique

III. 3. 1. Les caractéristiques d'une seule pièce

- **La sonde**

Nombre de spires	150	spires
Rayon intérieur	1.2	mm
Rayon extérieur	3.6	mm
Hauteur	1	mm
Conductivité électrique	$3.4 \cdot 10^7$	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$

- **La pièce**

Largeur	150	mm
Longueur Hauteur	10	mm
Epaisseur	2	mm
Conductivité électrique	$3.4 \cdot 10^7$	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique de vide	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$
Perméabilité magnétique relative	[1]	$[H/m]$
La profondeur	[20 %, 40 %, 60 %, 80 %]	mm

- **L'aire**

Conductivité électrique	0	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$

III. 3. 2 Les caractéristiques de Trois (03) pièces

- **La sonde**

Nombre de spires	150	spires
Rayon intérieur	1.2	mm
Rayon extérieur	3.6	mm
Hauteur	1	mm
Conductivité électrique	$3.4 \cdot 10^7$	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique de vide	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$

- **Les trois (03) pièces**

Largeur	150	mm
Longueur Hauteur	10	mm
Epaisseur	2	mm
Entrefer entre les plaques	0.1	mm
Conductivité électrique	$3.4 \cdot 10^7$	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$
Perméabilité magnétique relative	[1,50,500]	$[H/m]$

- **L'aire**

Conductivité électrique	0	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$

III. 3. 3 Les caractéristiques des huit (08) pièces

- **La sonde**

Nombre de spires	120	spires
Rayon intérieur	0.8	mm
Rayon extérieur	1.63	mm
Hauteur	1	mm
Entrefer entre les plaques	10^{-3}	mm
Conductivité électrique	$3.4 \cdot 10^7$	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$

- **Les Huit (08) pièces**

Largeur	175	mm
Longueur Hauteur	10	mm
Epaisseur	2	mm
Conductivité électrique	$3.4 \cdot 10^7$	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$
Perméabilité magnétique relative	[1,10,50,500]	$[H/m]$

- **L'aire**

Conductivité électrique	0	$[\Omega \cdot m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	$[H/m]$

III. 4. La formulation électromagnétique du problème

Nous avons considéré un problème magnéto dynamique en régime harmonique et dont l'équation en terme potentiel magnétique vecteur [41] est donnée comme suit :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + j \sigma \omega A = J_{sz} \quad (\text{III. 1})$$

On adapte l'équation (III. 1) pour le système on obtient :

Dans la sonde :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = J_{sz} \quad (\text{III. 2})$$

Dans la pièce :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + j \sigma \omega A = 0 \quad (\text{III. 3})$$

Dans l'aire :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{III. 4})$$

III. 5. Les différents types de modèles adaptés

III. 5. 1. La variation de la profondeur

1. Profondeur du défaut varié à partir de 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, d'une fréquence de 100 KHz. Pour chaque résolution on récupère le tracer de potentiel vecteur magnétique A suivant le segment A-B.

Les structures adaptatives avec fissure et sans fissure, avec segment, sans segment pour une seule pièce à contrôler.

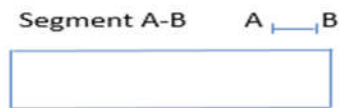


FIGURE III. 1: Pièce sans fissure



Pièce avec fissure sans le segment A-B



Pièce avec fissure et le segment A-B

FIGURE III. 2: Représentation d'une pièce comporte fissure avec ou sans segment A-B

III. 5. 2 Domaine d'étude et les conditions aux limites

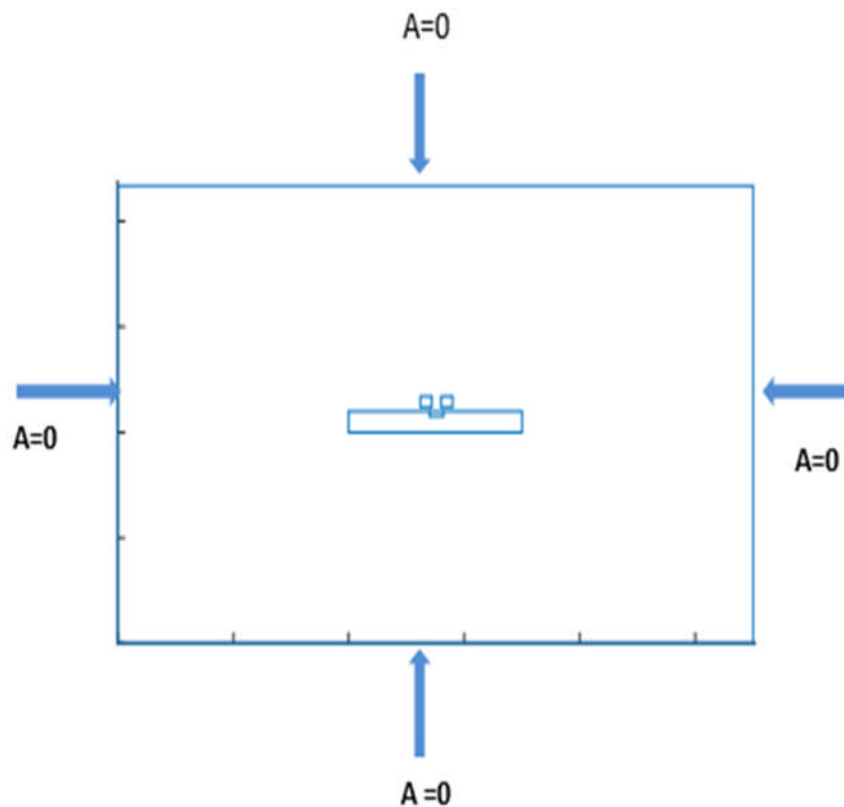


Figure III.3 :Domaine de résolution et condition aux limites

III. 6. Les résultats obtenus

III. 6. 1 La pièce avec une seule couche

a). Profondeur de La fissure de 20 %

- La fréquence de ce système, $f = 100 \text{ kHz}$, pour les différentes profondeurs.
- Détection de défaut dans une pièce (01) conductrice. le domaine d'étude est crié avec des coordonnées cartésiennes (x, y) .

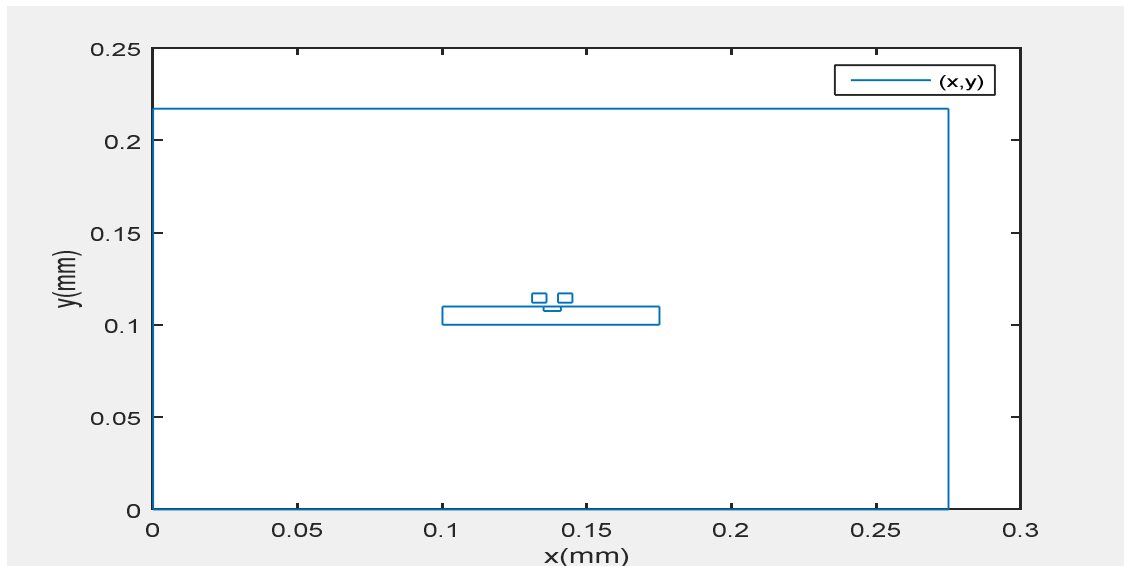


Figure III. 4: Domaine d'étude

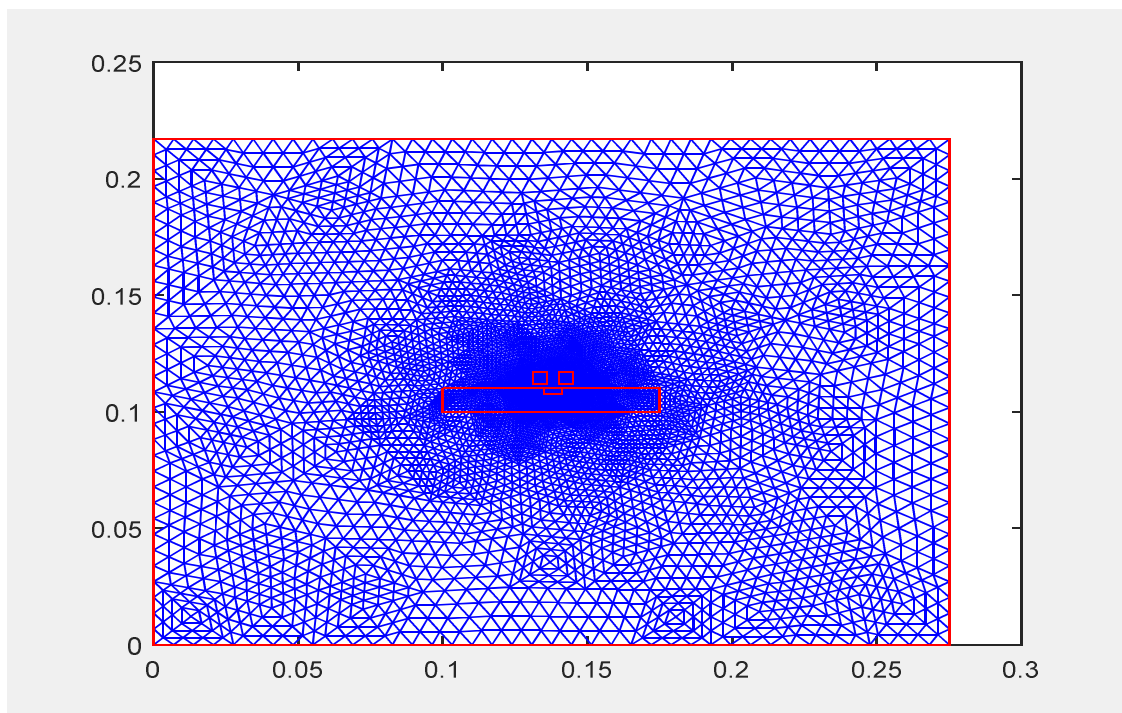
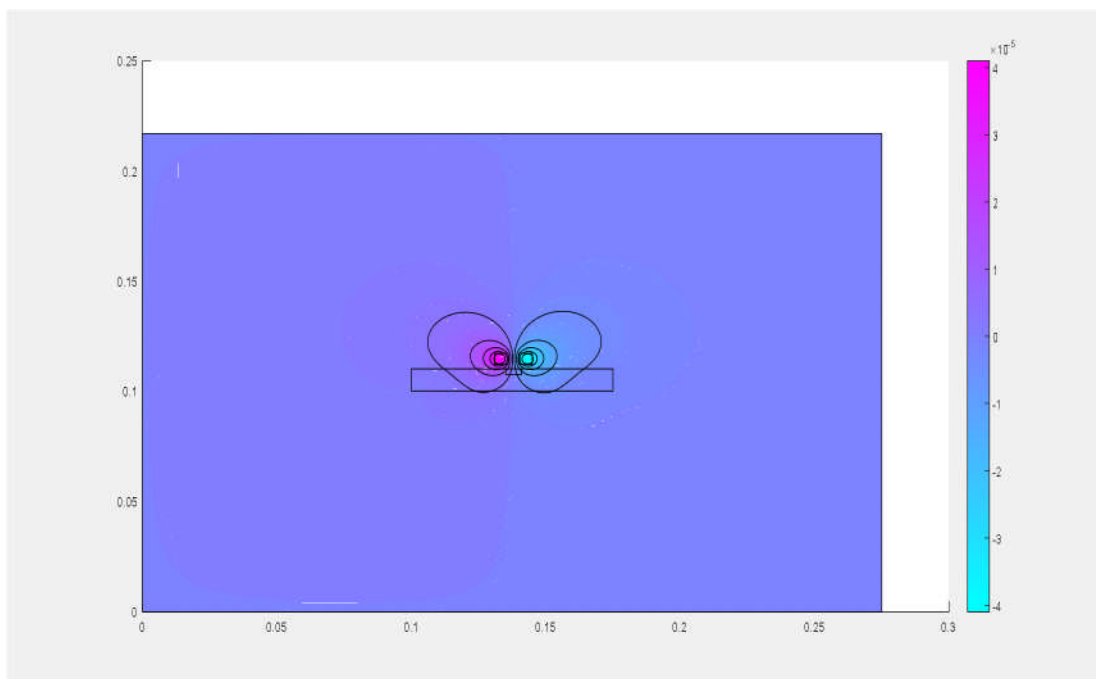
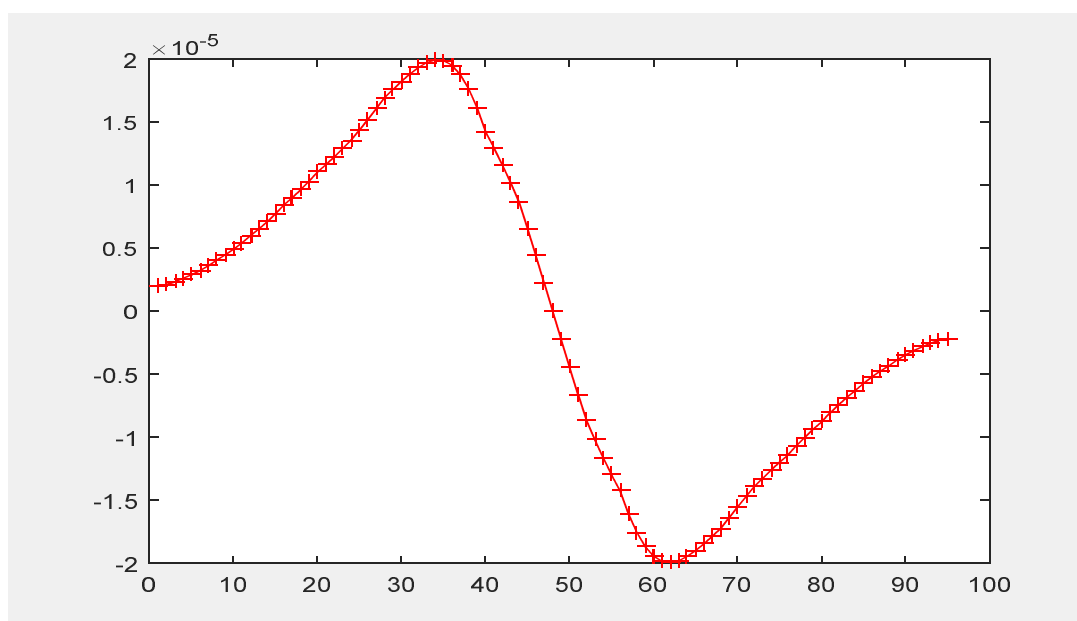
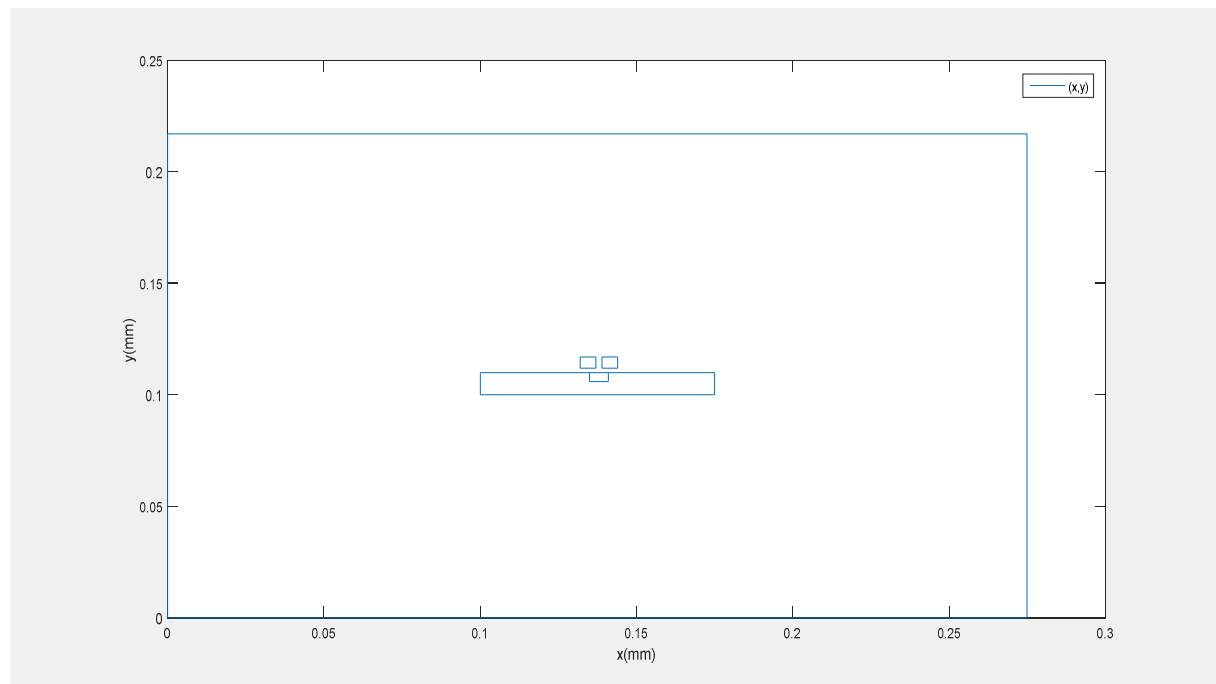
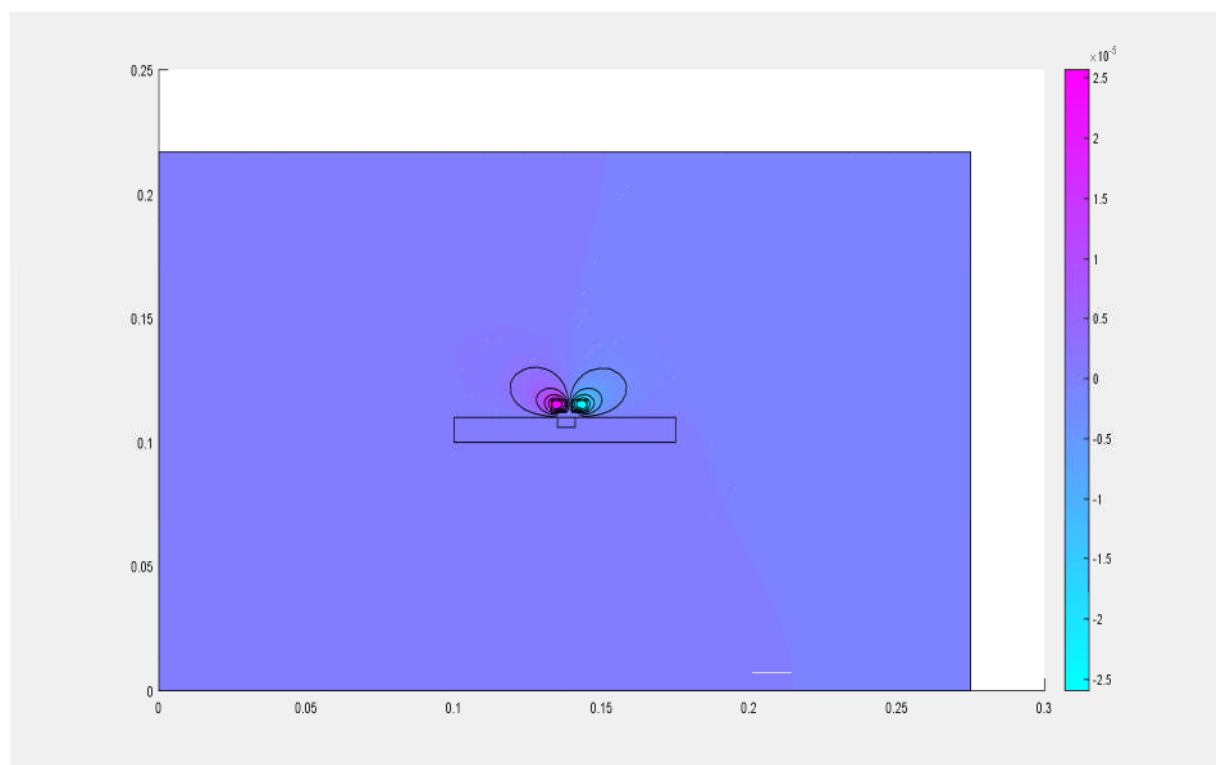


Figure III. 5: le Maillage de domaine d'étude

**Figure III. 6: le potentiel magnétique vecteur A****Figure III. 7 : L'impédance de la sonde**

b). Profondeur de La fissure de à 40 %**Figure III. 8 : Domaine d'étude****Figure III. 9 : Le potentiel Magnétique vecteur A**

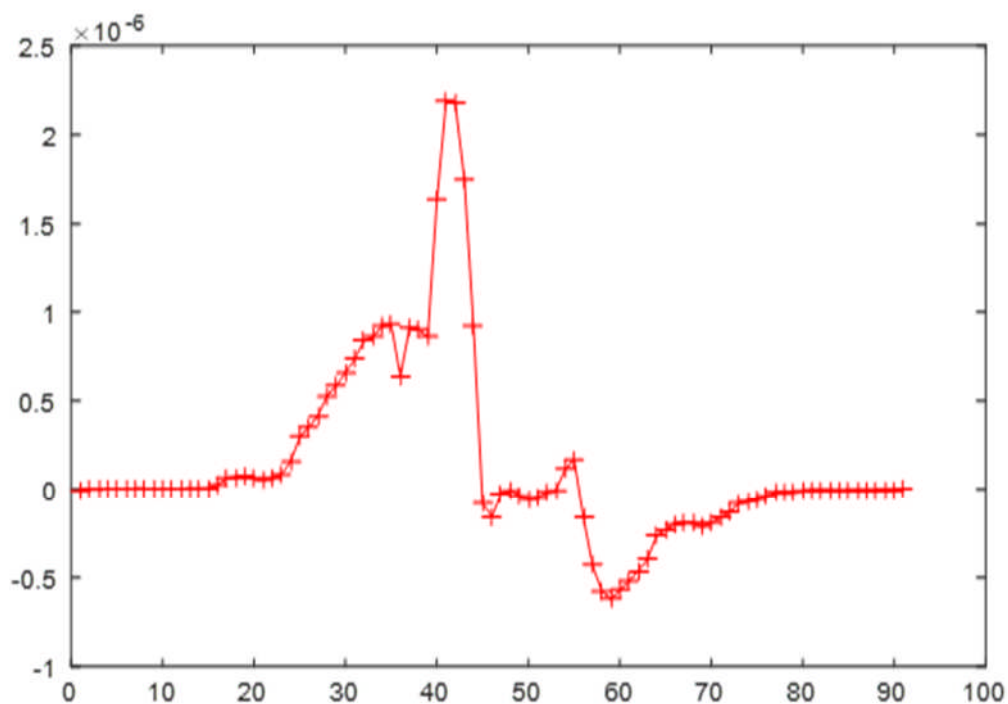


Figure III. 10 : L'impédance de la sonde

c). Profondeur de La fissure de à 60 %

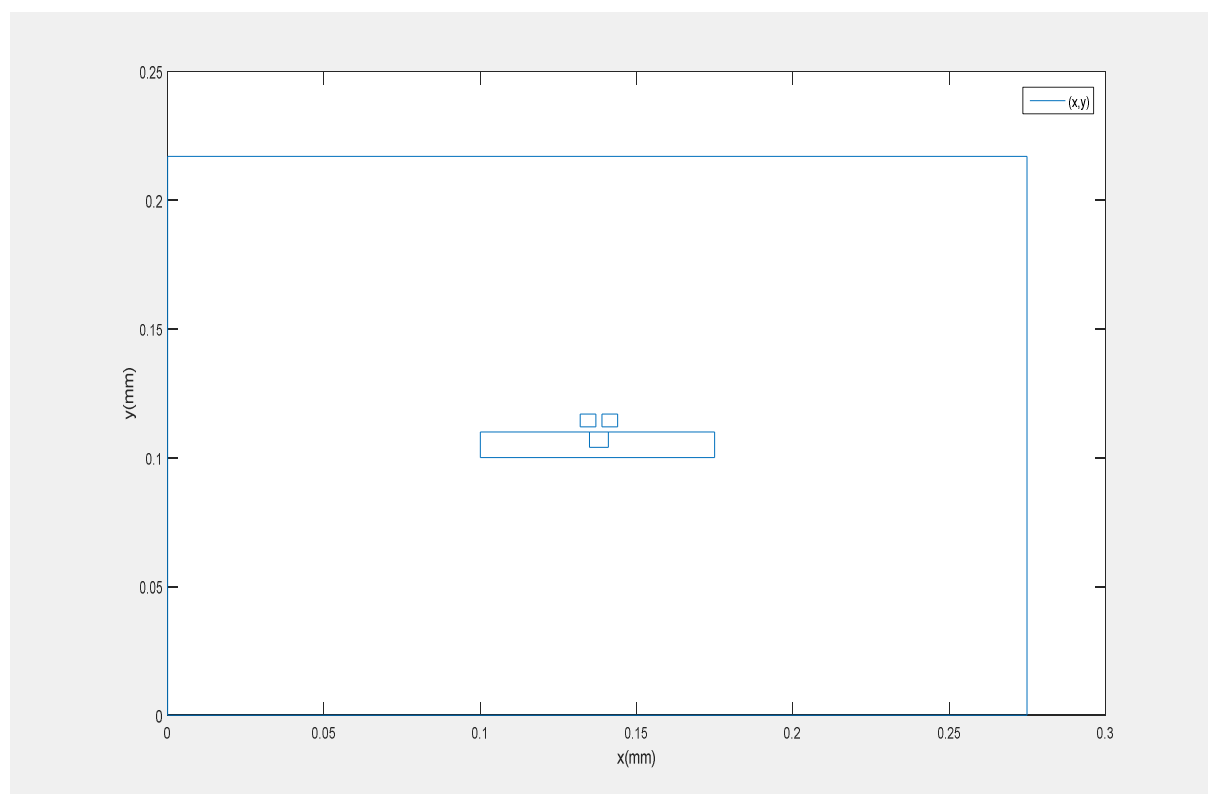


Figure III. 11 : Le domaine d'étude

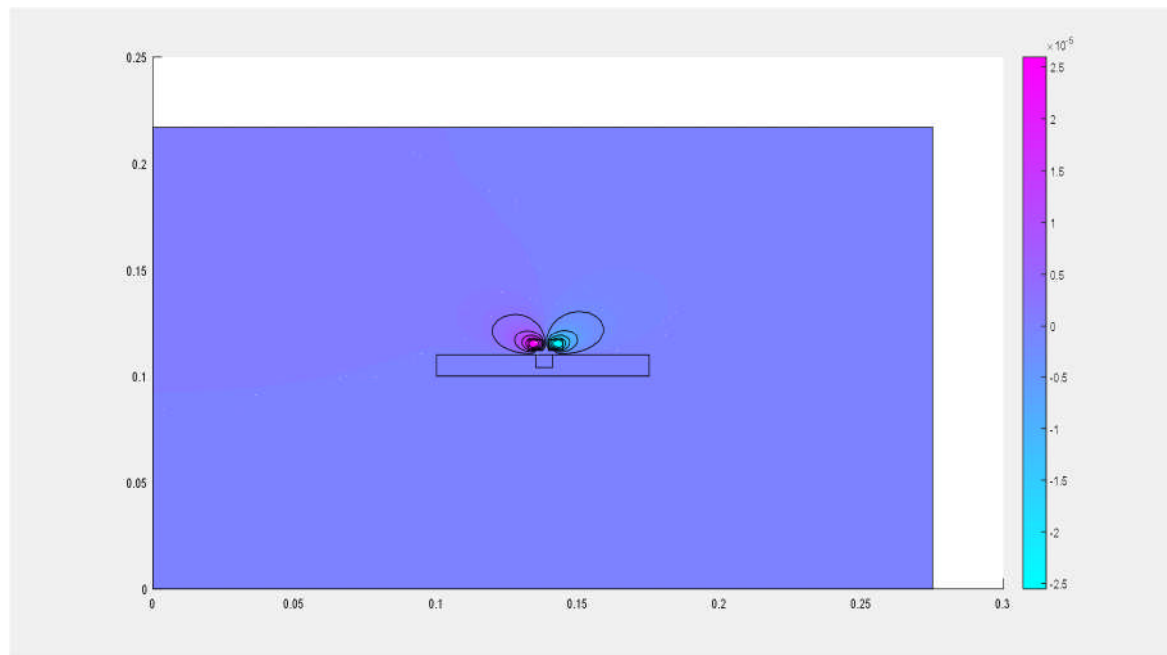


Figure III. 12 : Le potentiel Magnétique vecteur A

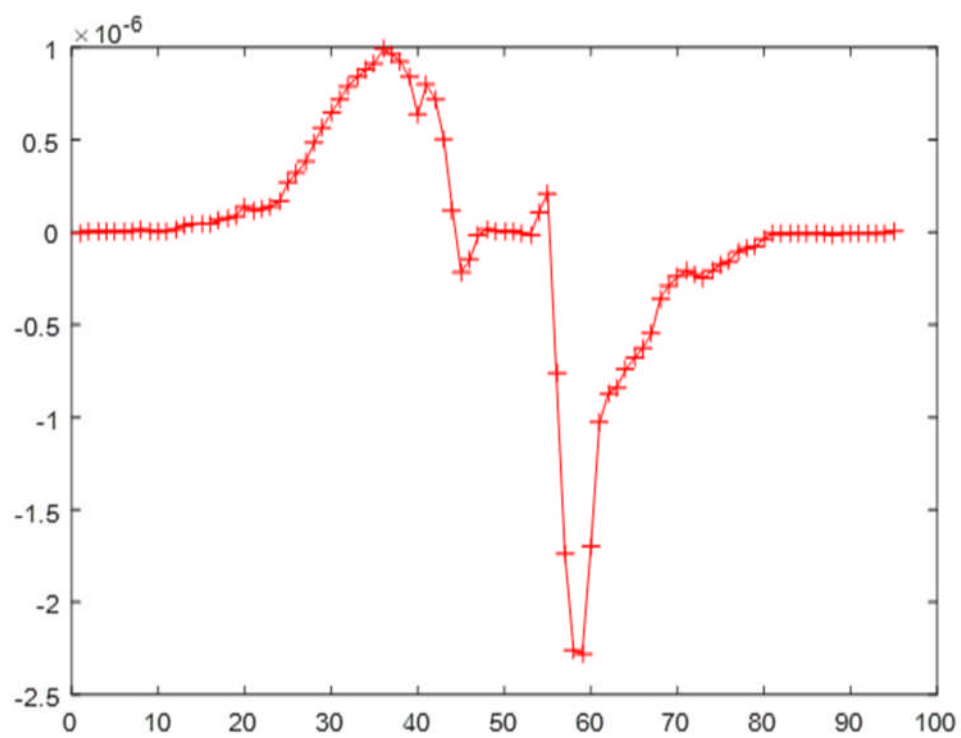
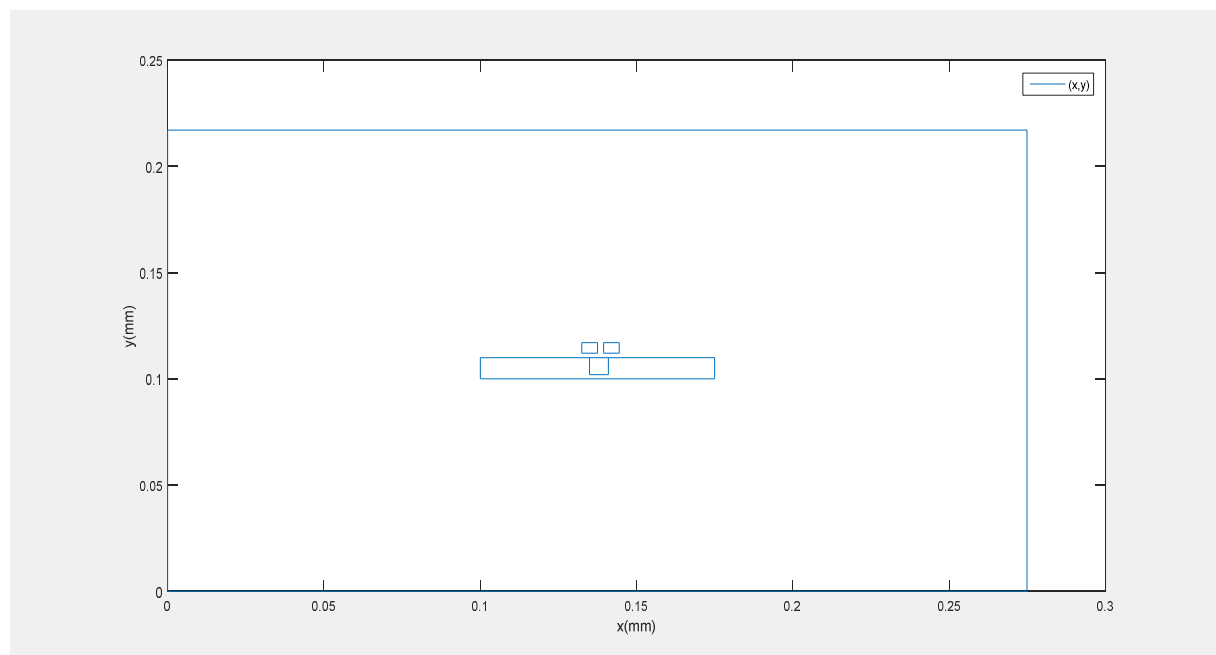
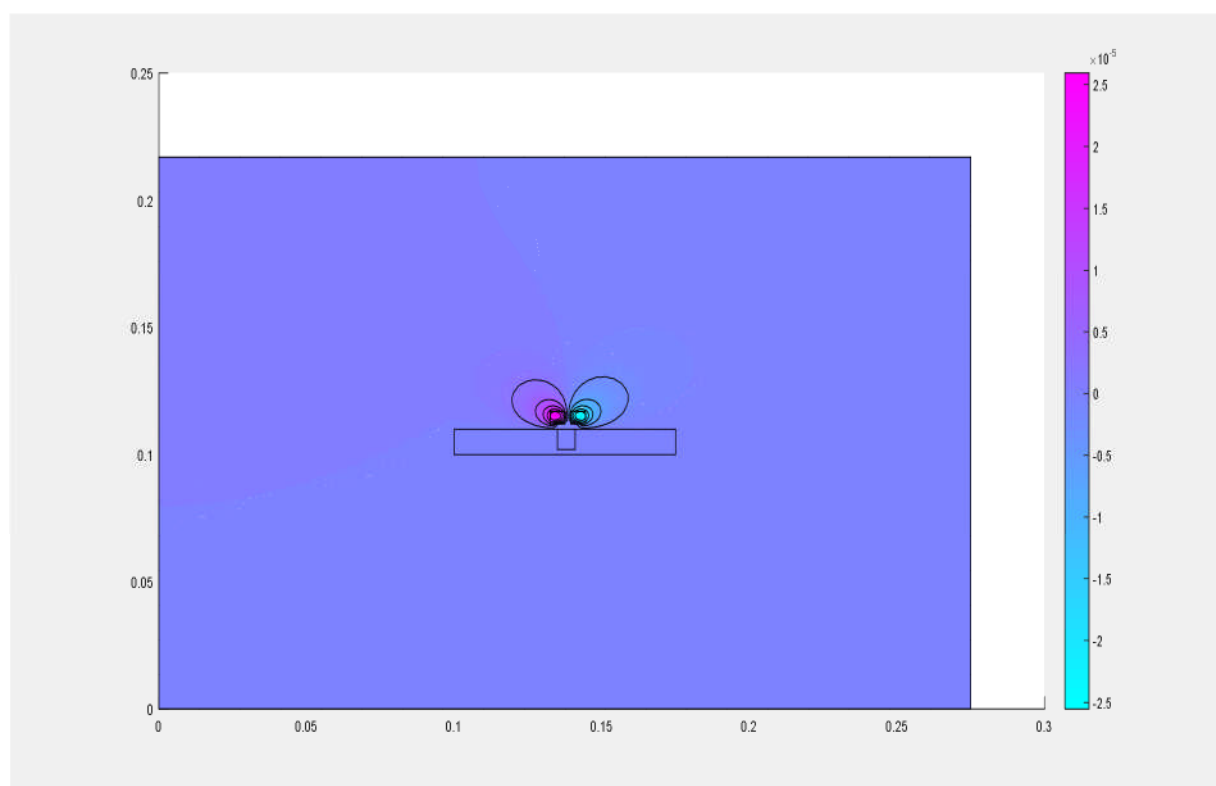


Figure III. 13 : L'impédance de la sonde

d). Profondeur de La fissure de à 80 %**Figure III. 14 : Domaine d'étude****Figure III. 15 : Le potentiel Magnétique vecteur A**

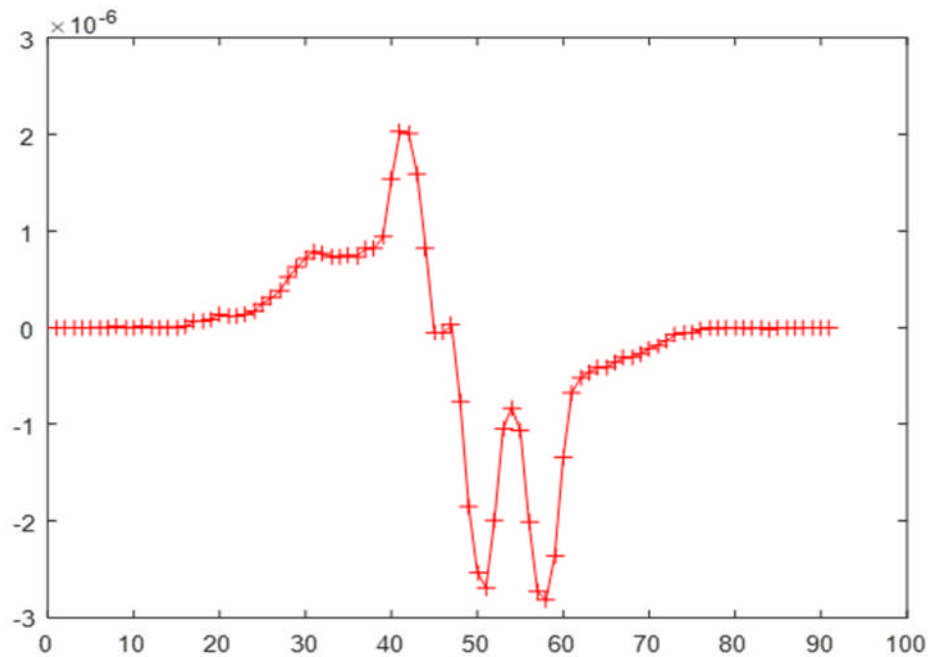


Figure III. 16 : L'impédance de la sonde

III. 6. 2. La pièce avec trois (03) couches

- On essaie de faire varier la perméabilité des pièces pour voir le changement apparaît sur la variation d'impédance, on pose $\mu_r = 1, \mu_r = 10, \mu_r = 50, \mu_r = 500$.
Avec $f = 100 \text{ kHz}$.

Pour cette structure constituée de trois (03) couches, avec déplacement de défaut, on récupère des allures de géométrie, maillage, potentiel vecteur magnétique A, impédance de surface.

- Détection de défauts dans une structure stratifiée (multicouches), avec trois (03) couches.
- La première couche avec défauts, la deuxième et la troisième sans défauts

$$1). \mu_r = 1$$

a). la 1er pièce avec le défaut, la 2ème pièce et la 3ème pièce sans défaut.

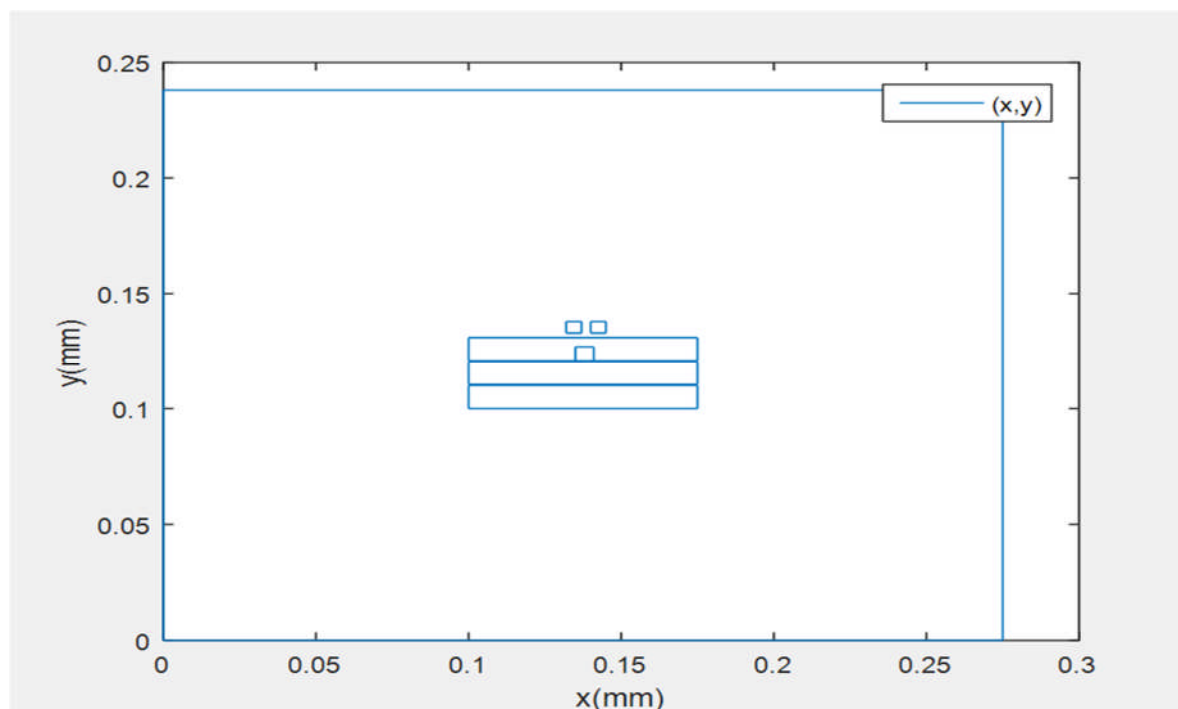


Figure III. 17 : Domaine d'étude de (03) couche

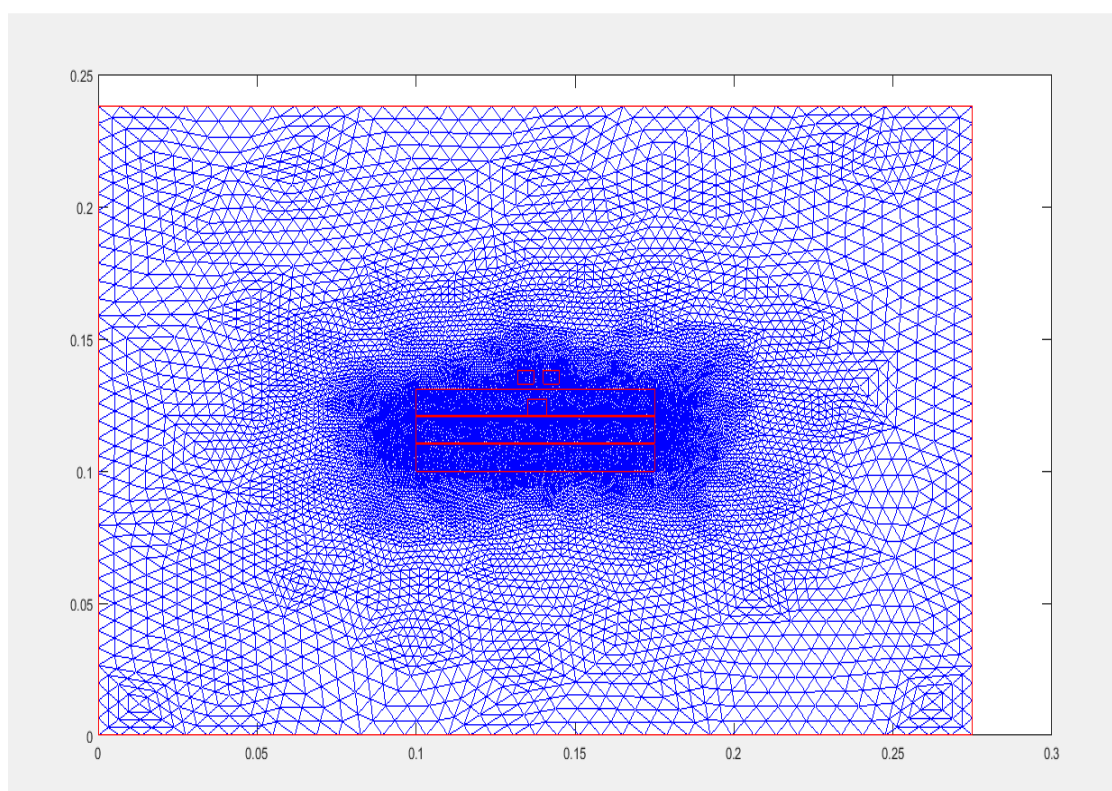


Figure III. 18 : Le Maillage de domaine

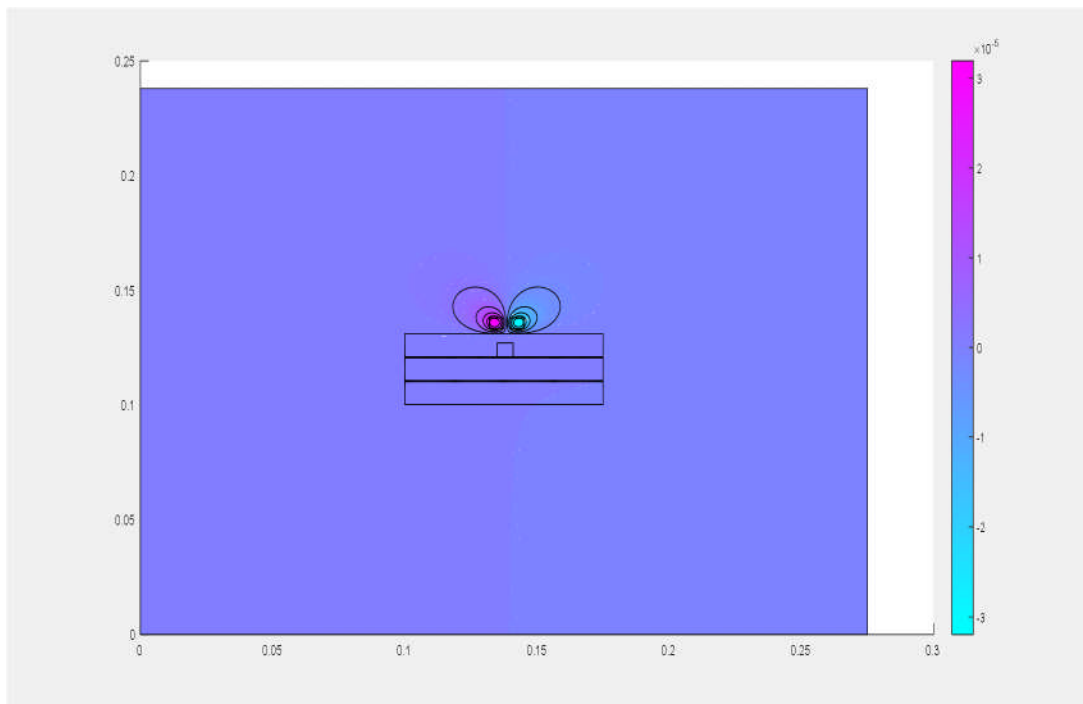


Figure III. 19 : Le potentiel Magnétique vecteur A

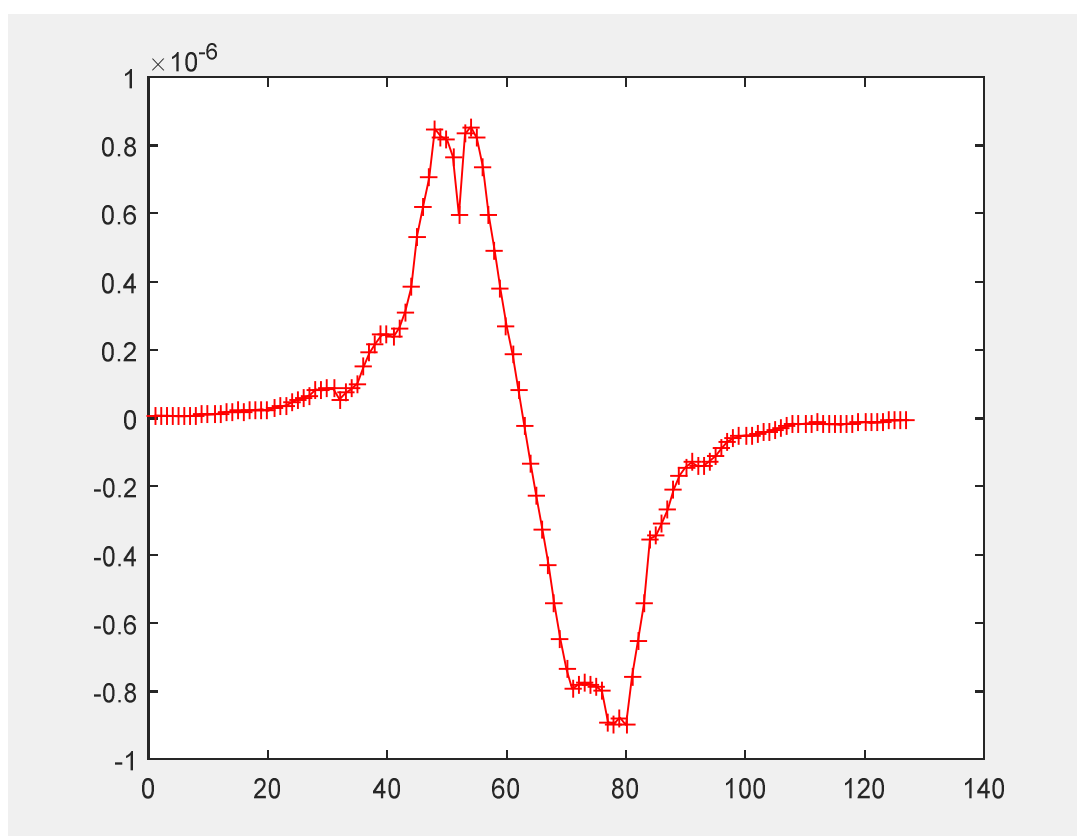


Figure III. 20 : L'impédance de la sonde

2) $\mu_r = 500$

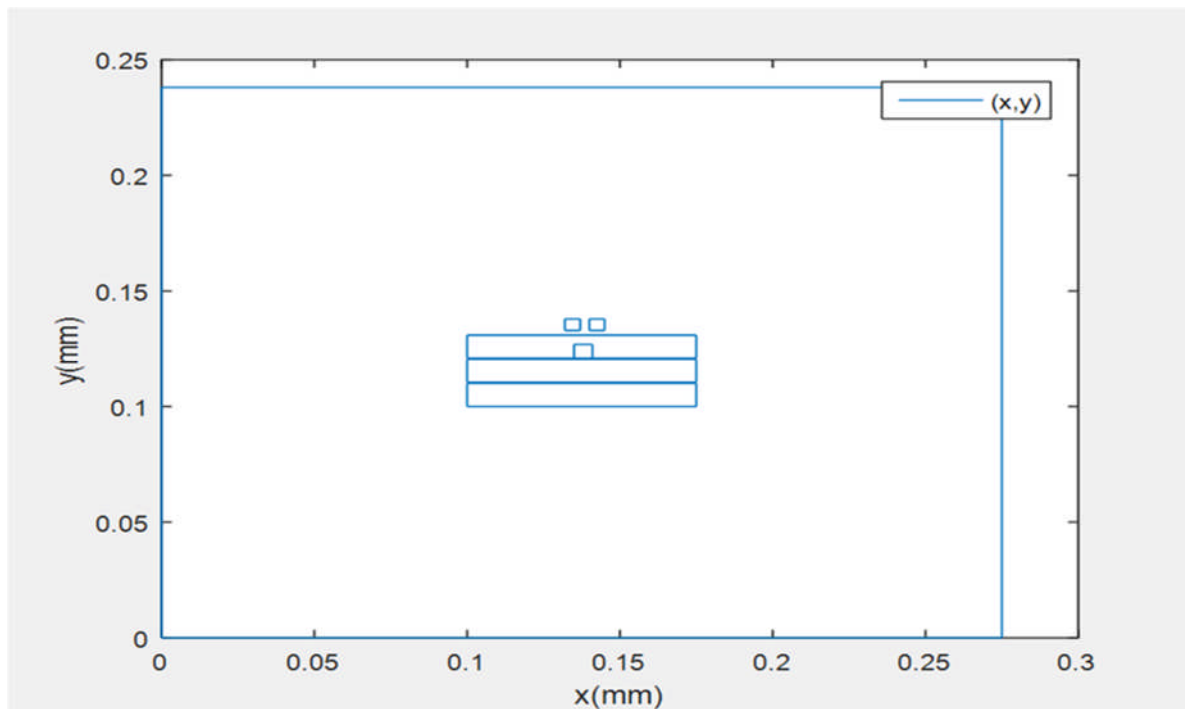


Figure III. 21 : Domaine d'étude

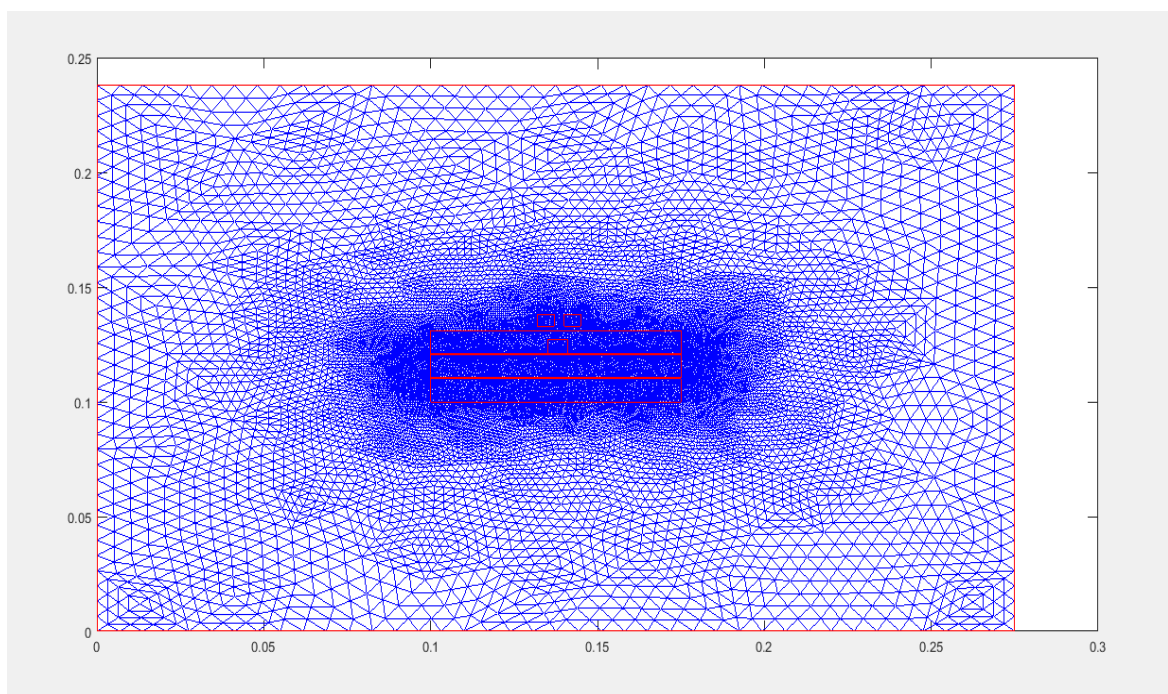


Figure III. 22 : le Maillage de Domaine

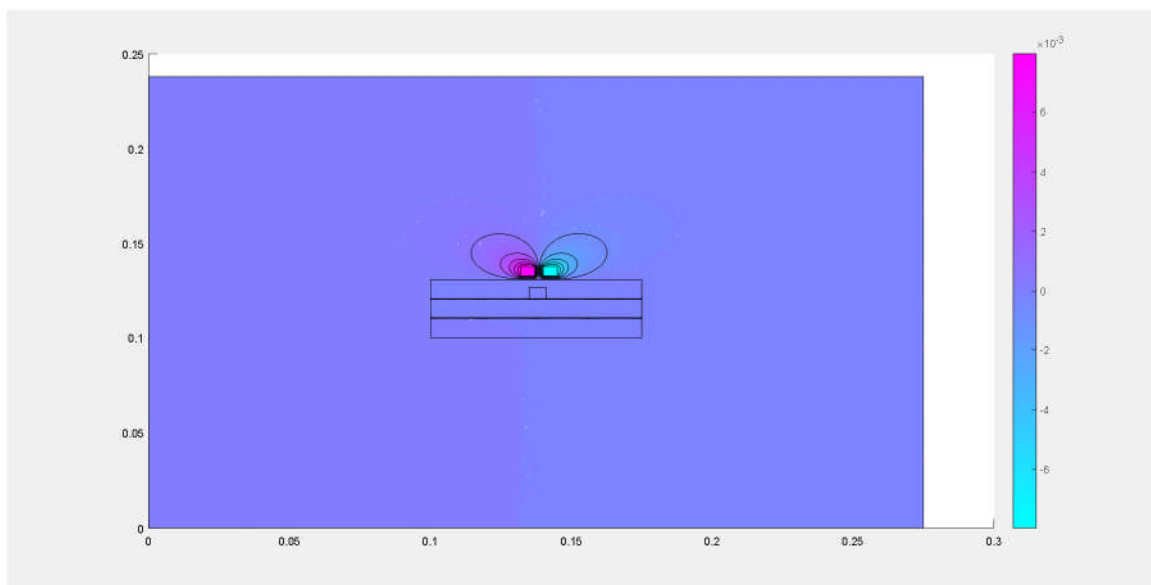


Figure III. 23 : le Potentiel magnétique Vecteur A

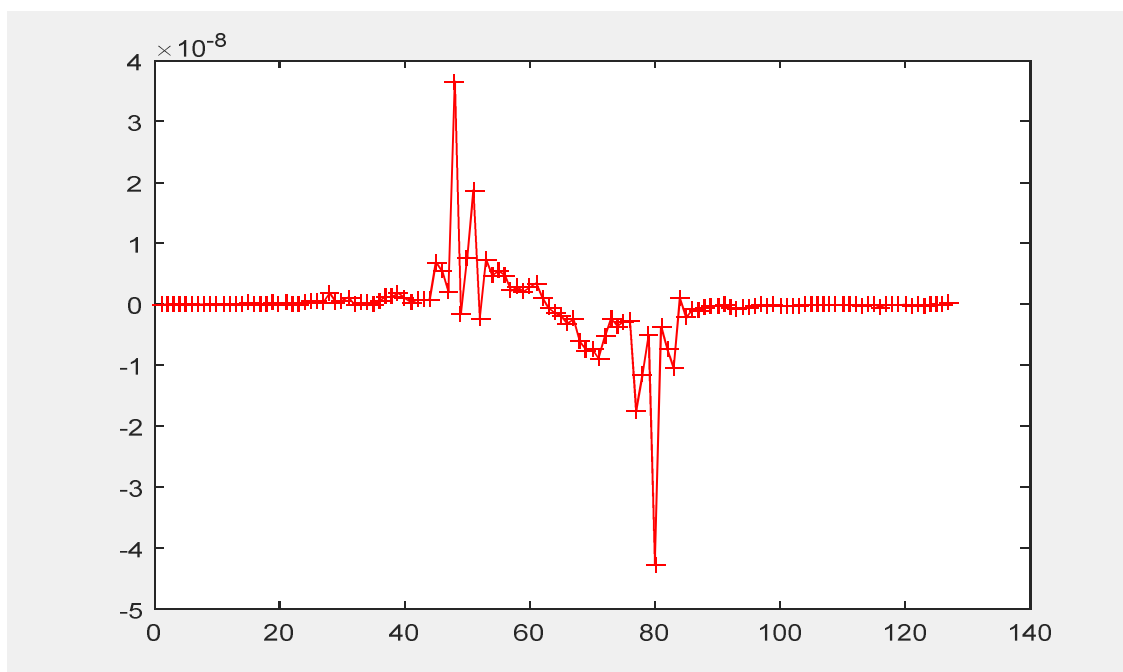
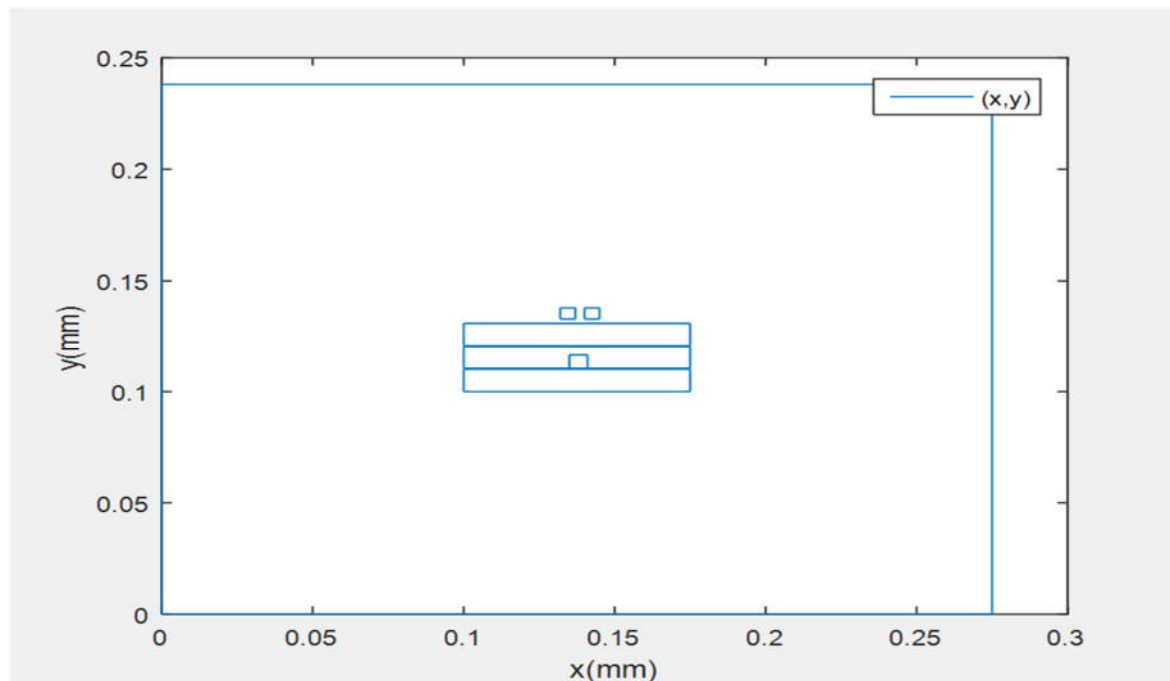
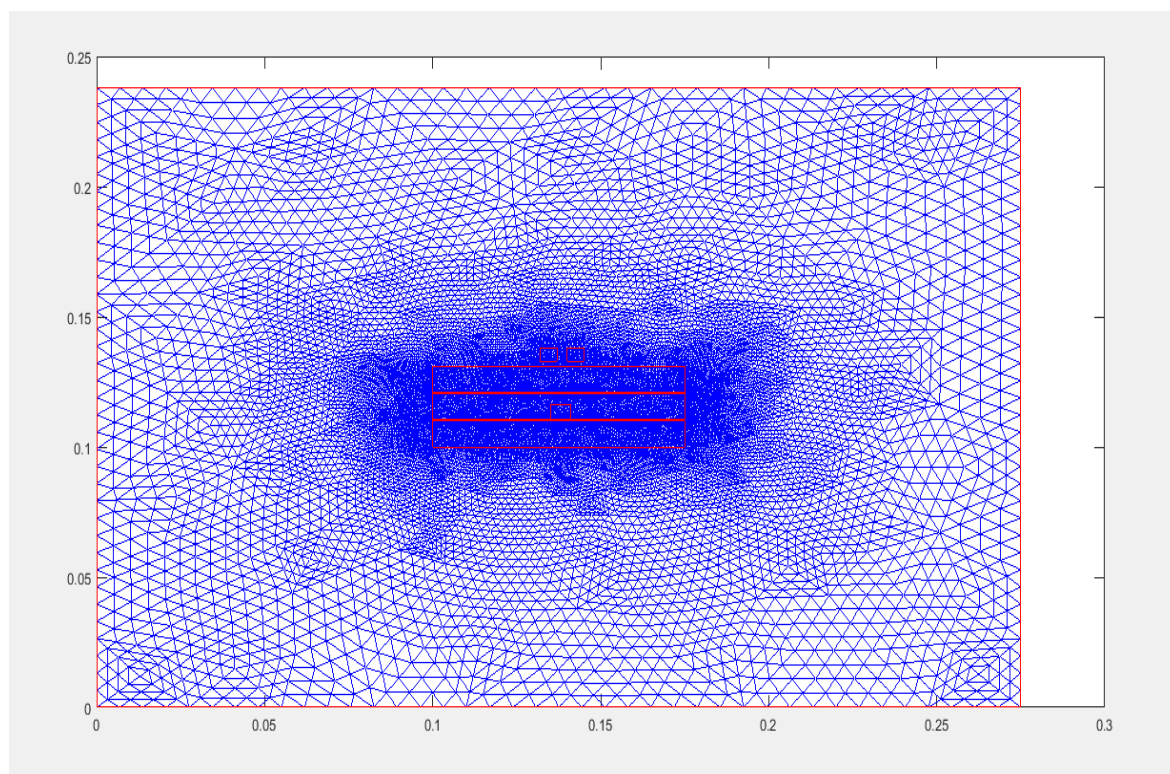


Figure III. 24 : L'impédance de la sonde

b). 2ème pièce avec fissure, la première et la troisième sans défaut

1. $\mu_r = 1$

**Figure III. 25: Domaine d'étude****Figure III. 26 : le Maillage de Domaine**

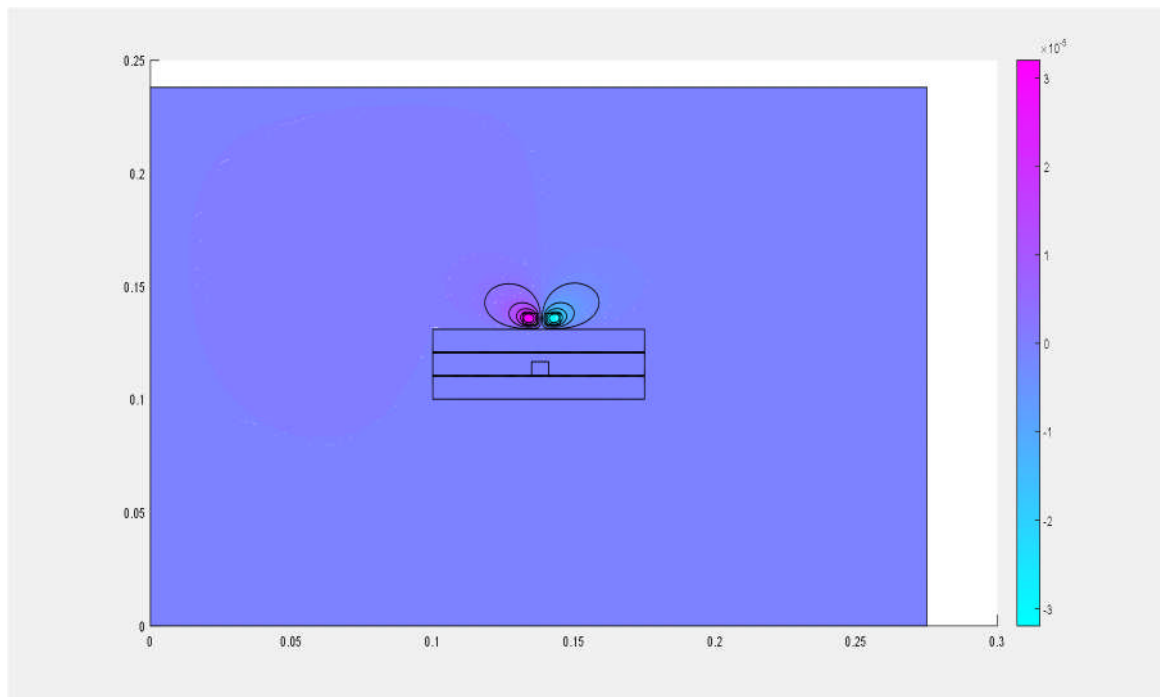


Figure III. 27: le Potentiel magnétique Vecteur A

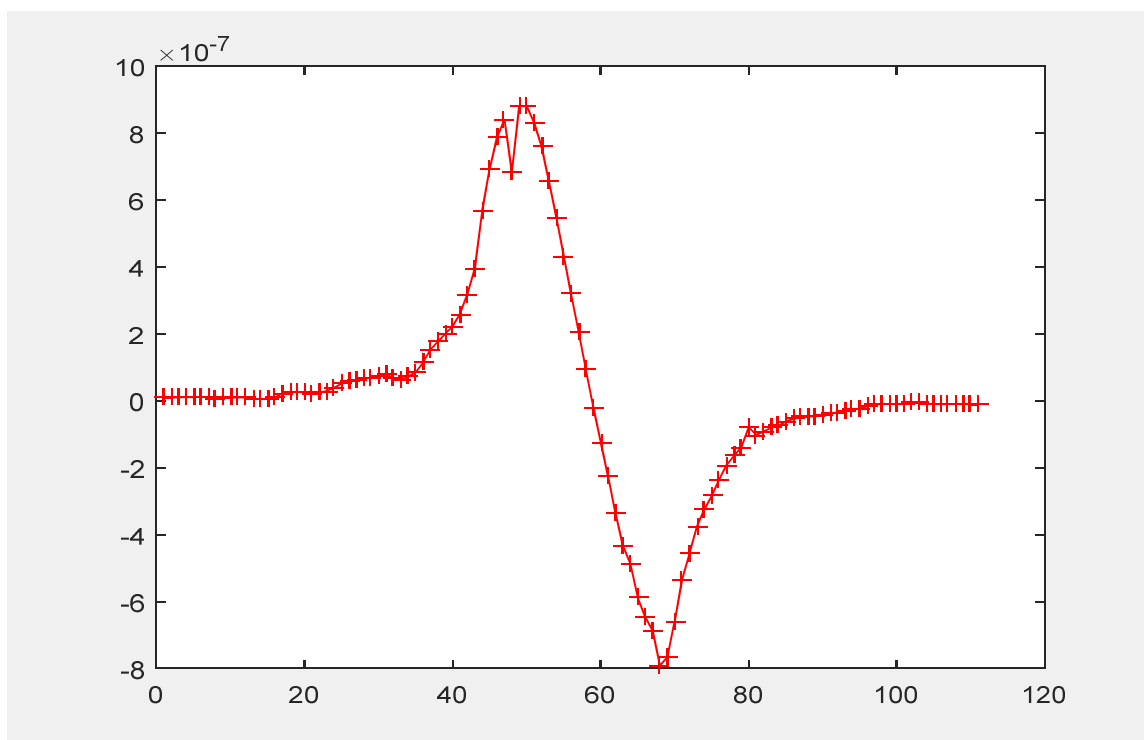
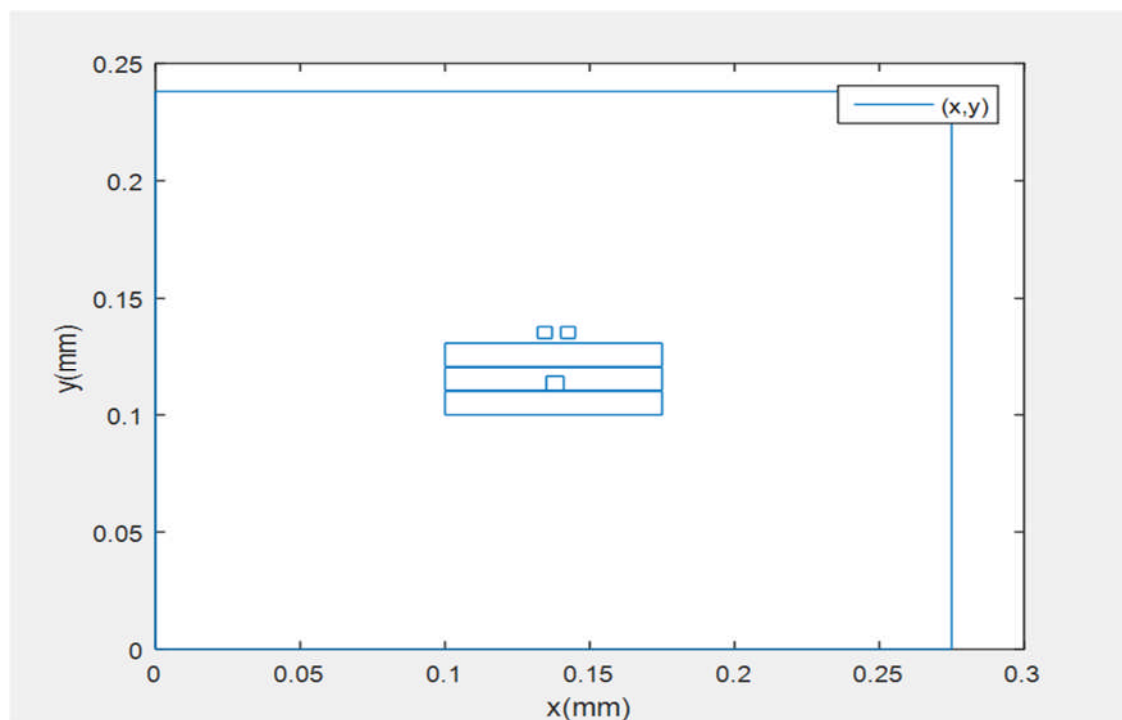
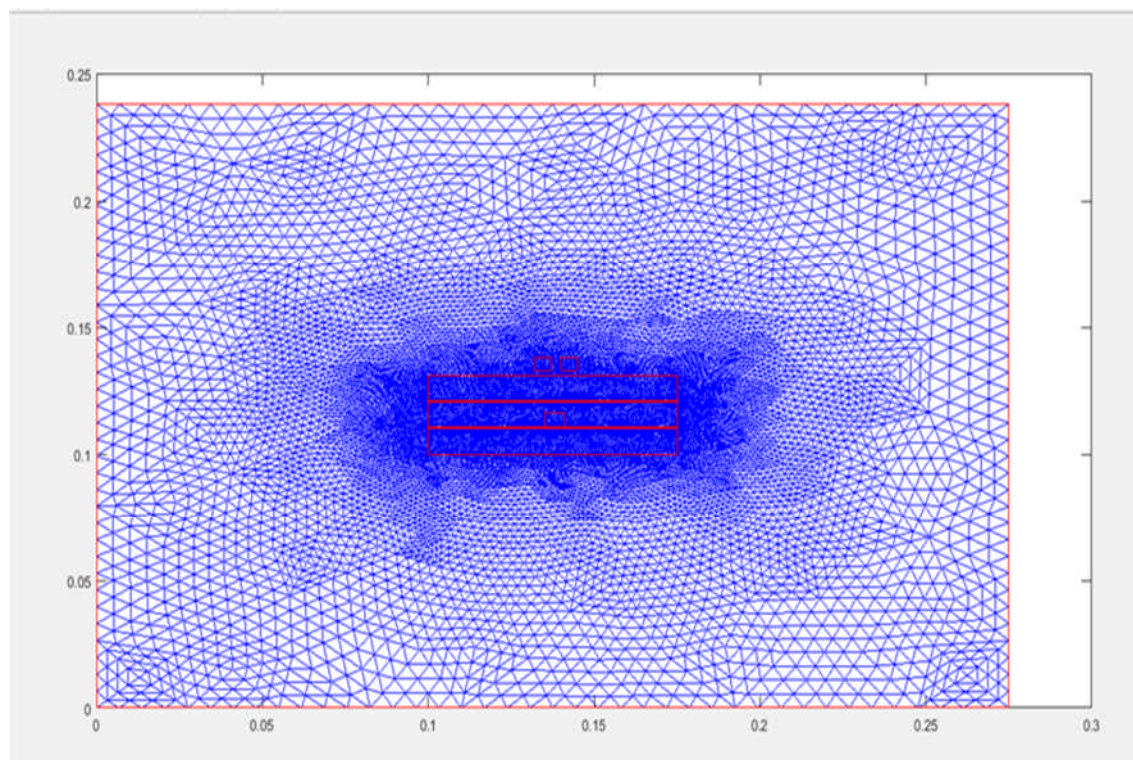


Figure III. 28: L'impédance de la sonde

2. $\mu_r = 10$ **Figure III. 29: domaine****Figure III. 30 : le Maillage de Domaine**

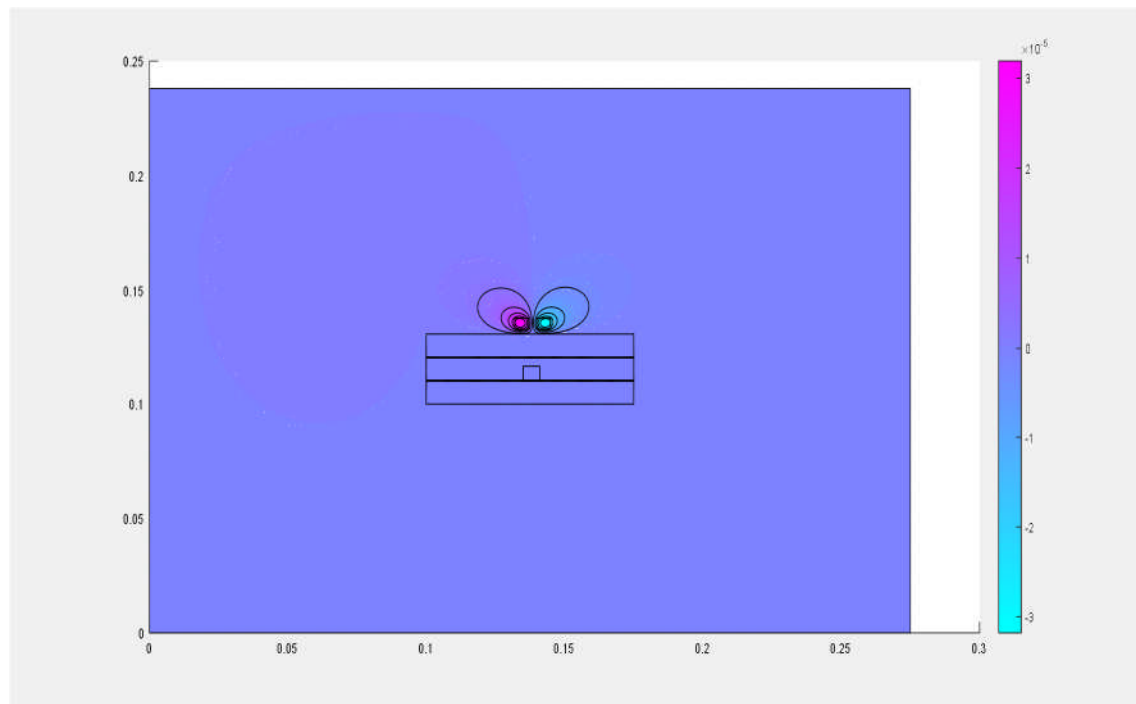


Figure III. 31: Le potentiel magnétique vecteur A

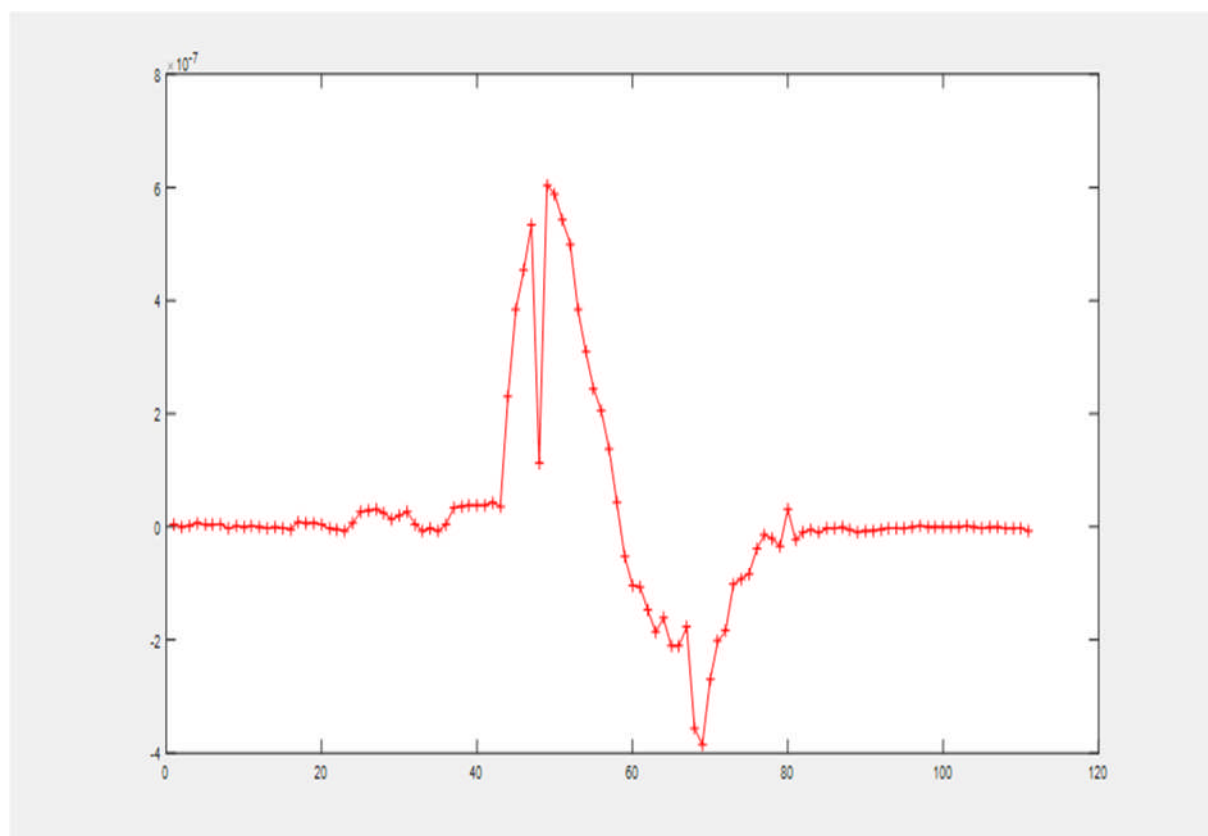


Figure III. 32: L'impédance de la sonde

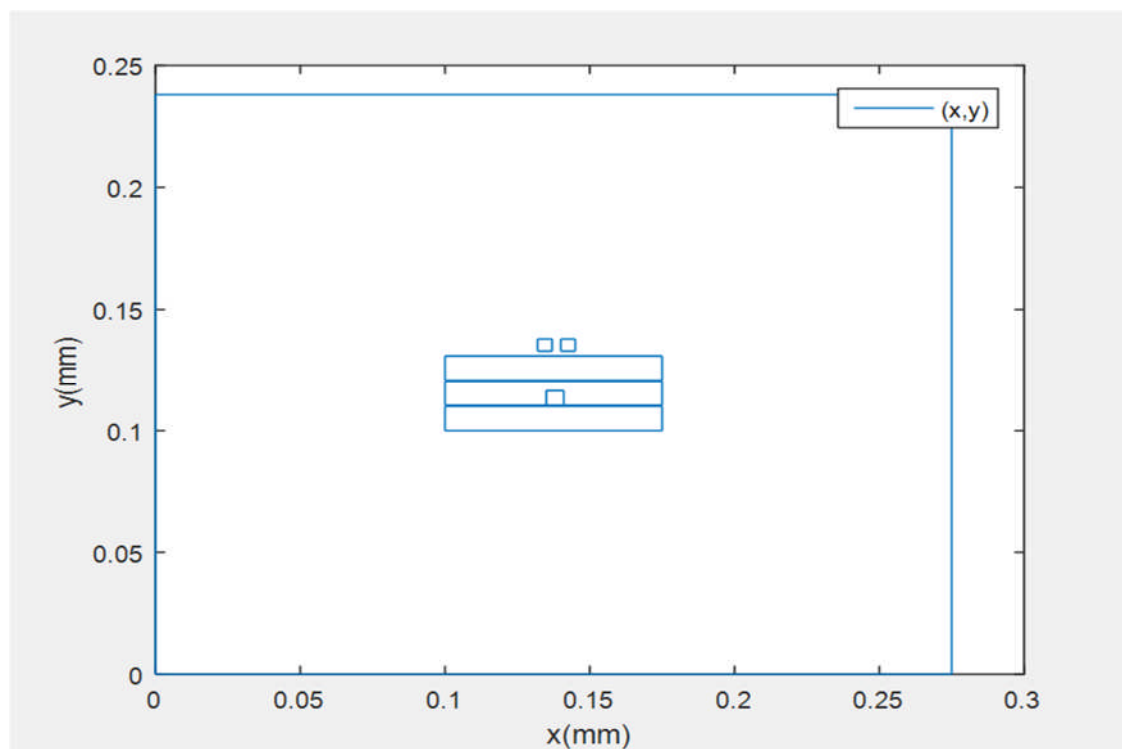
2. $\mu_r = 50$ 

Figure III. 33: domaine d'étude

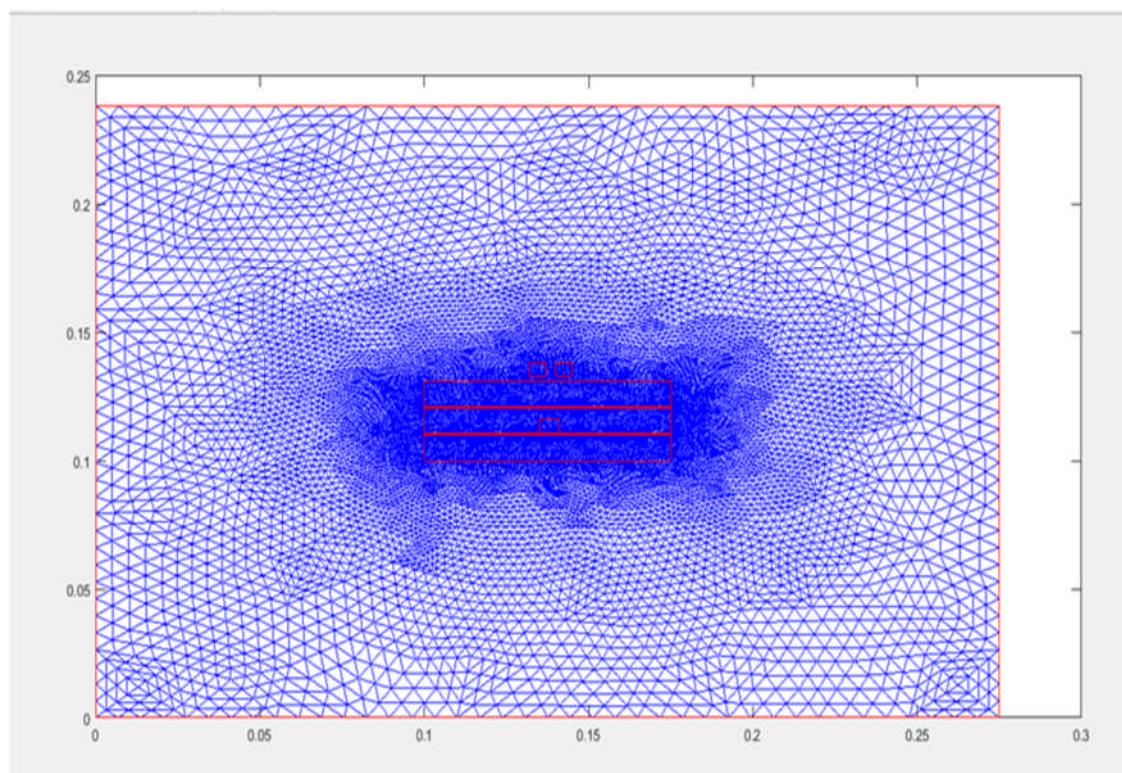


Figure III. 34: Maillage de domaine

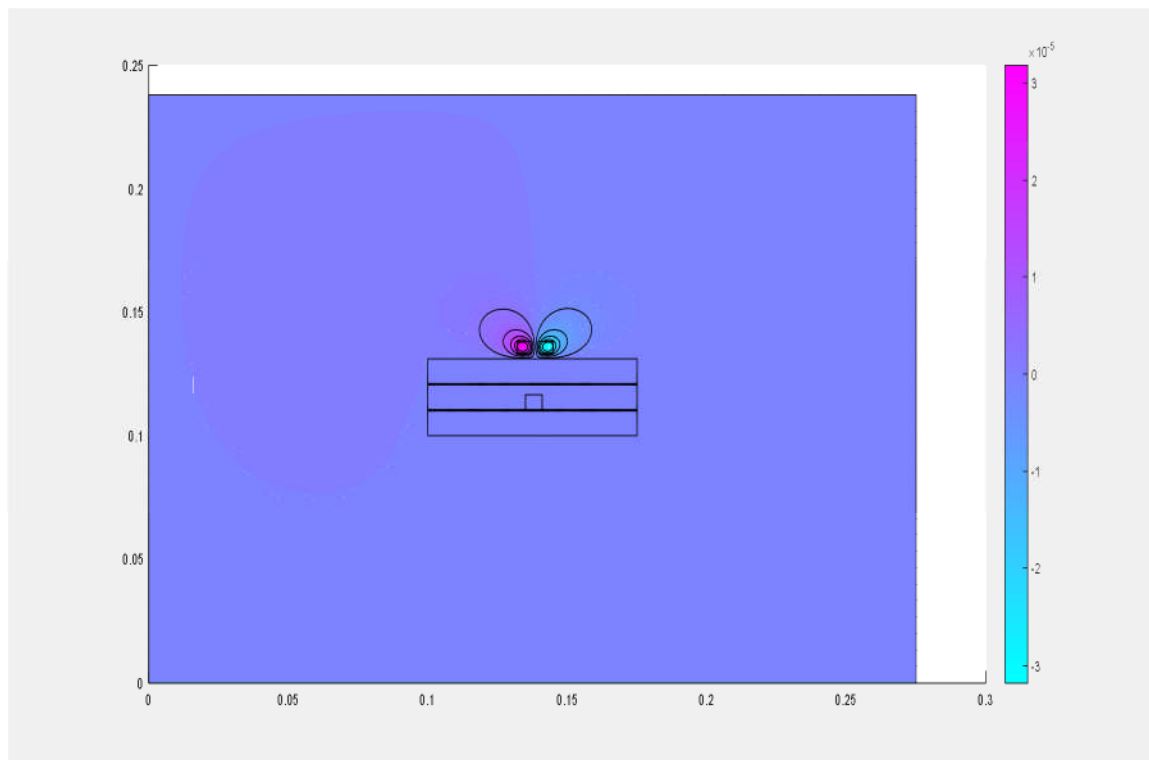


Figure III. 35: le potentiel vecteur magnétique A

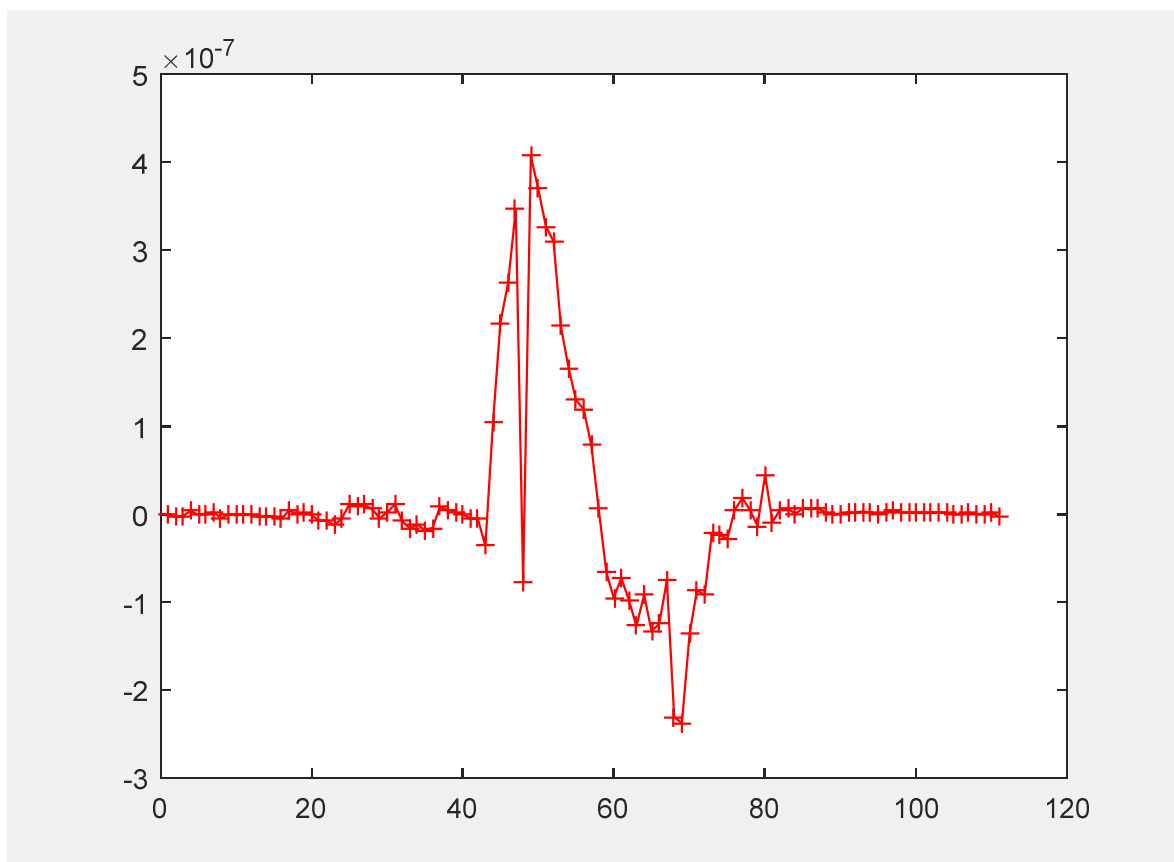
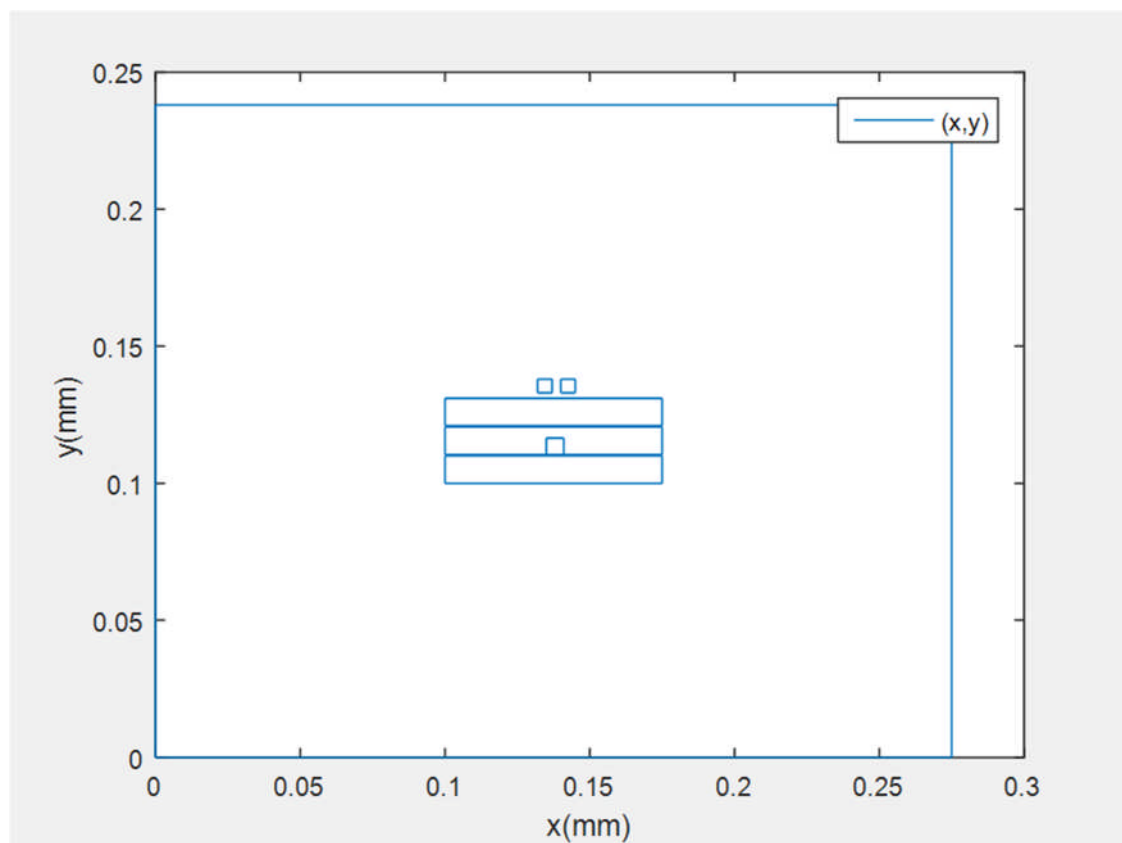
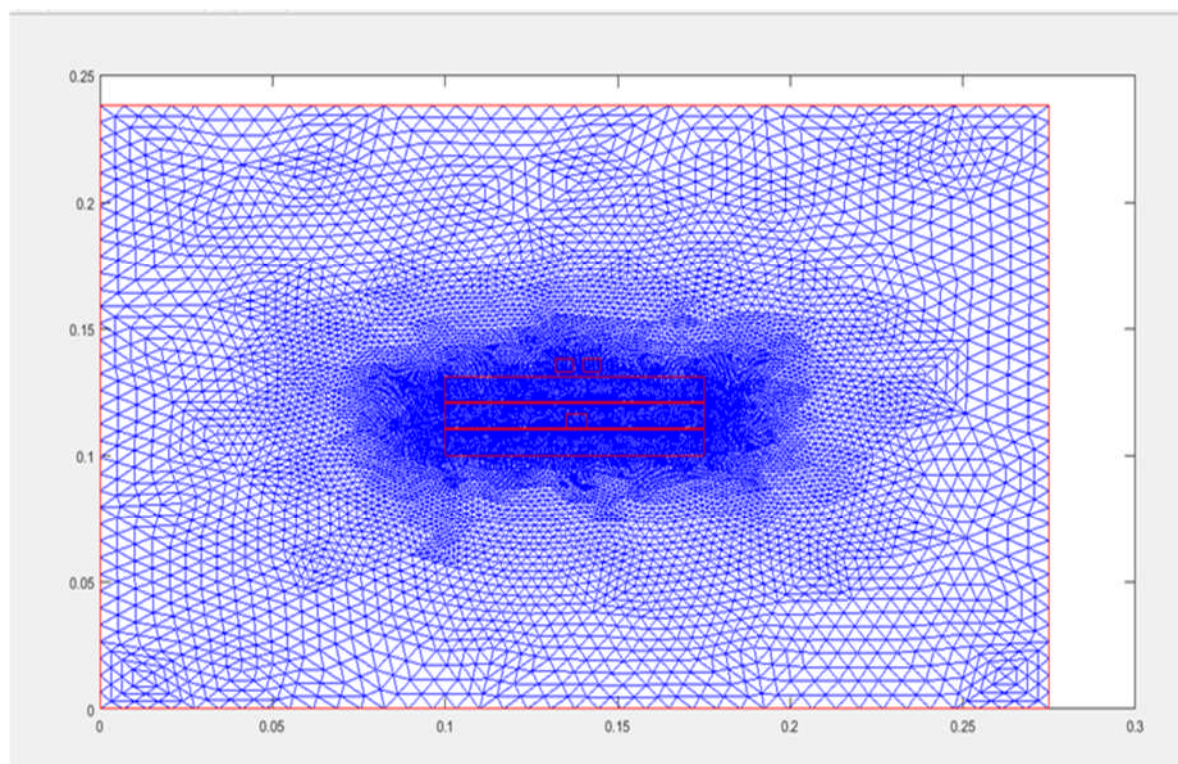


Figure III. 36: L'impédance de la sonde

3. $\mu_r = 500$ **Figure III. 37: domaine d'étude****Figure III. 38: Maillage de domaine**

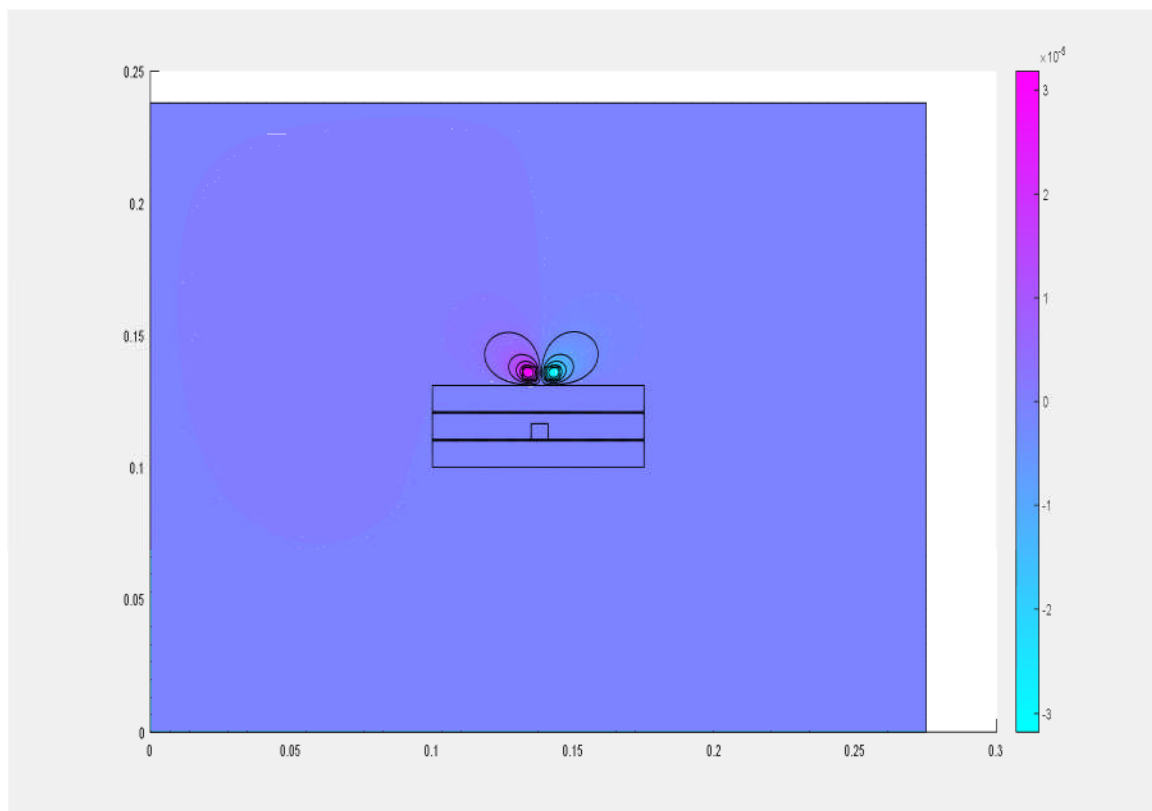


Figure III. 39: Le potentiel vecteur magnétique A

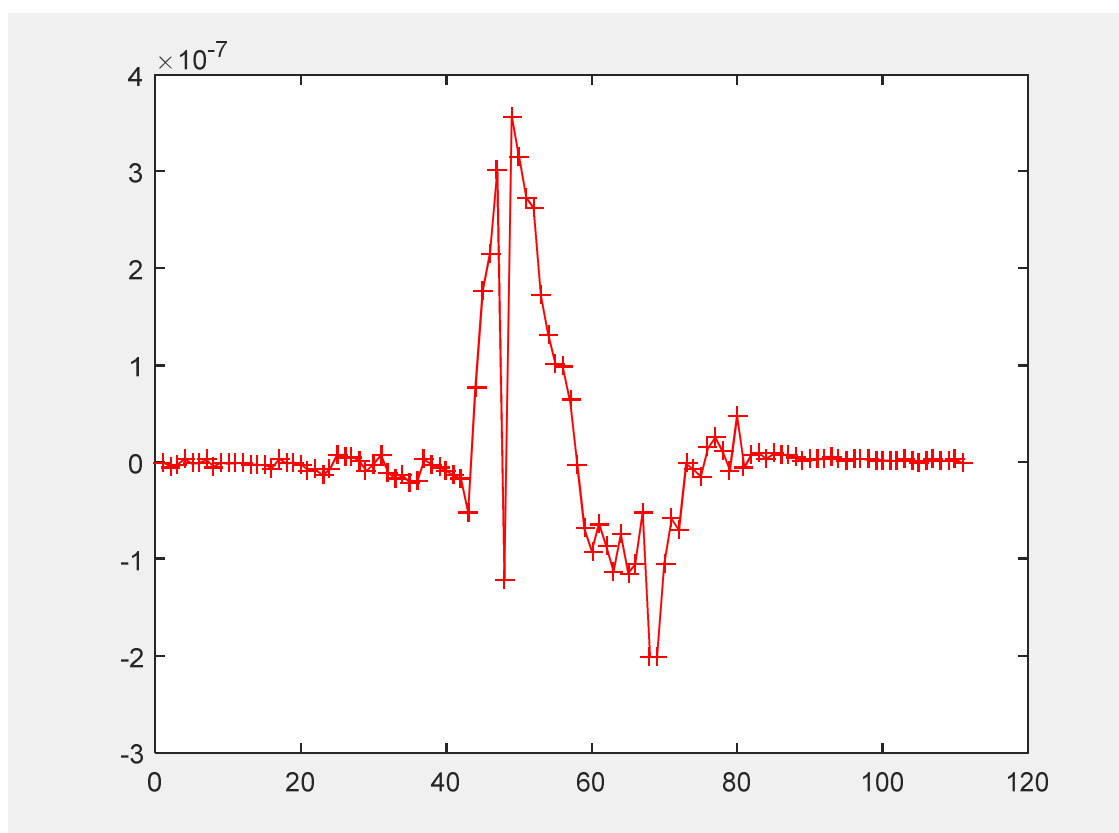
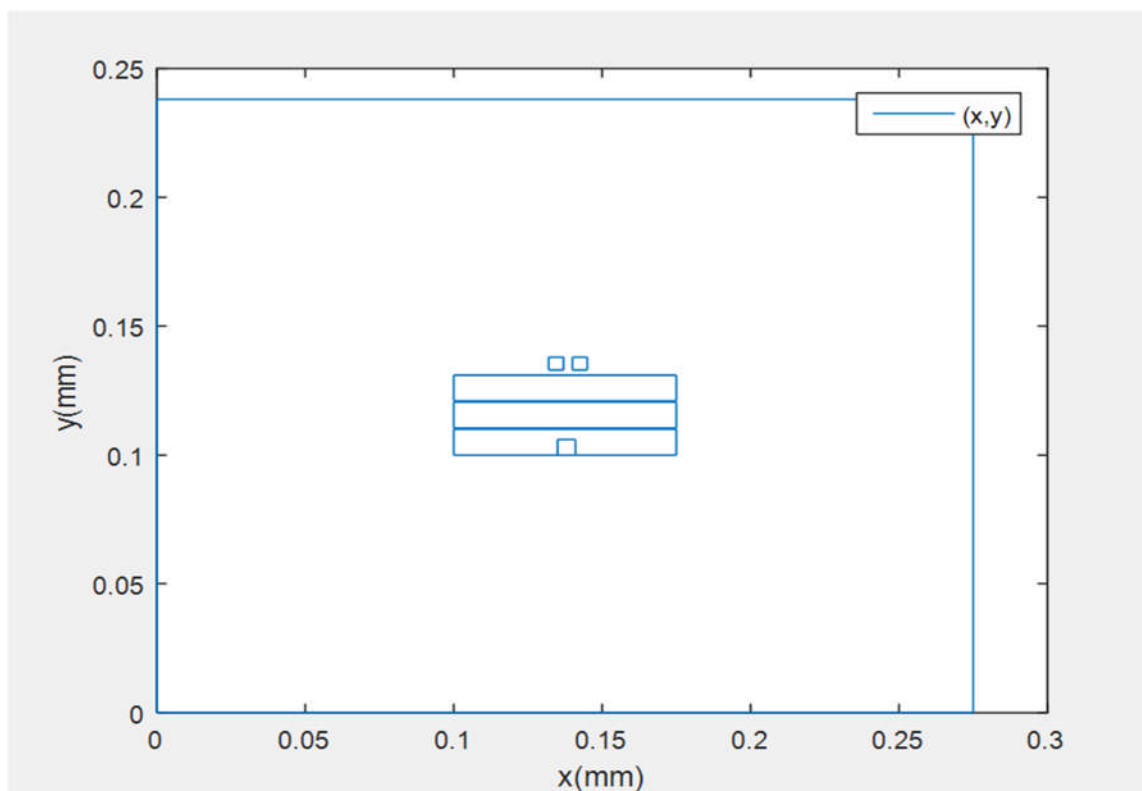
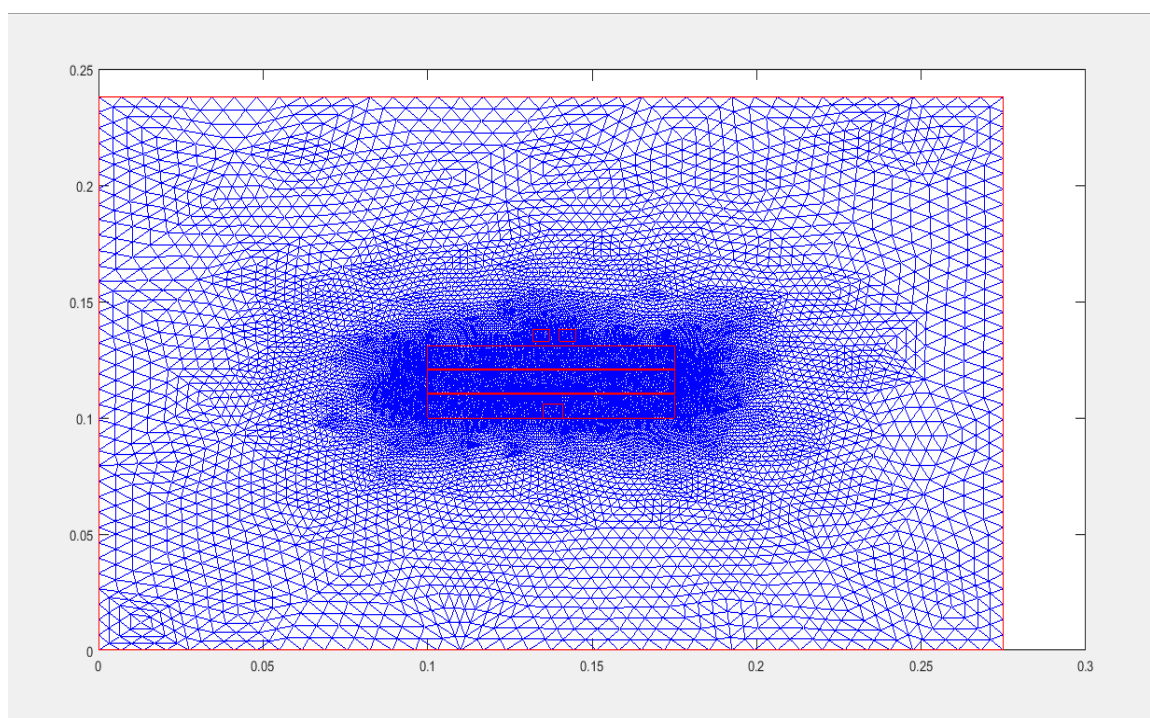


Figure III. 40: L'impédance de la sonde

c). Pièce (03) avec fissure, la 2^{ème} et la 1^{er} pièce sans défaut**1. $\mu_r = 1$** **Figure III. 41 : Domaine d'étude****Figure III. 42 : Maillage de domaine**

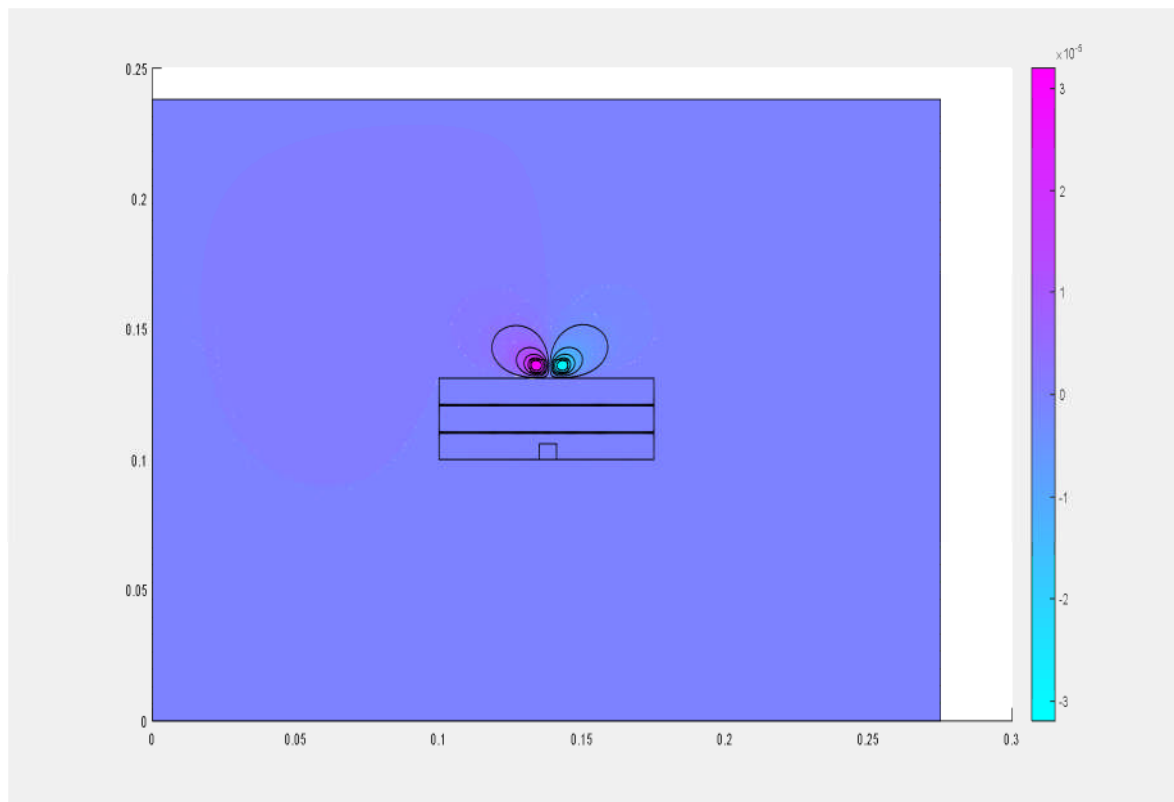


Figure III. 43 : le Potentiel magnétique Vecteur A

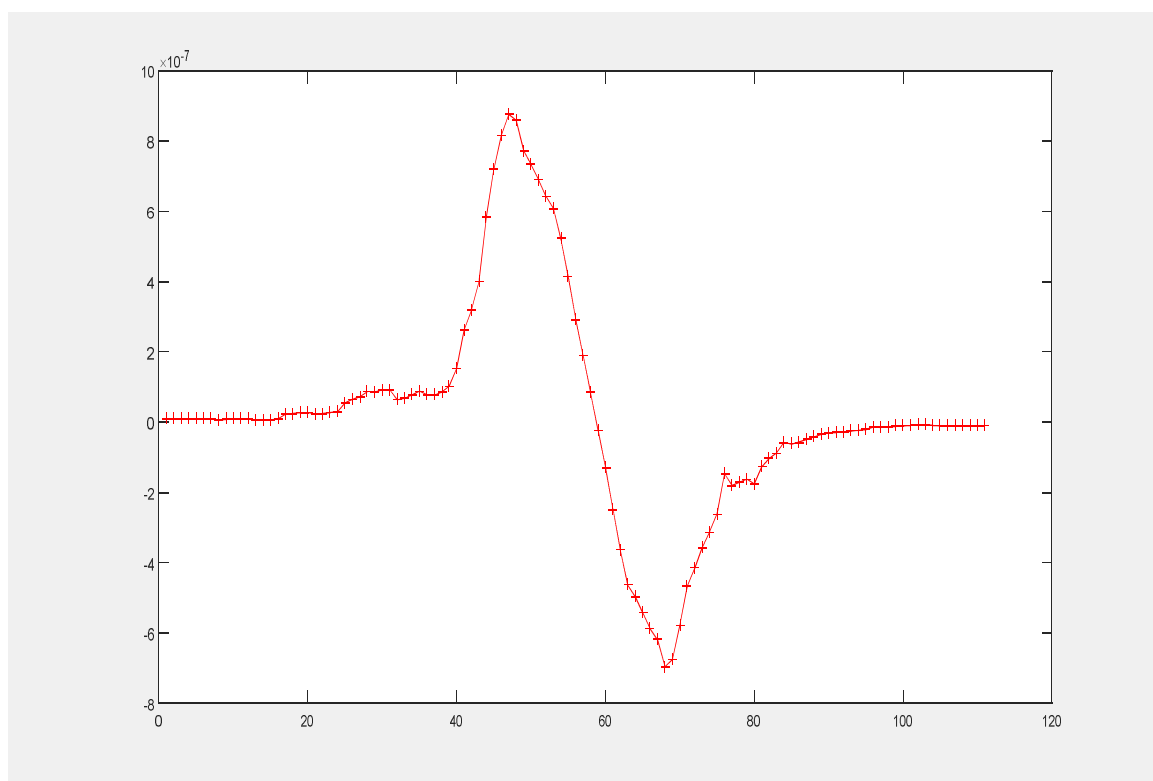


Figure III. 44 : L'impédance

2. $\mu_r = 50$

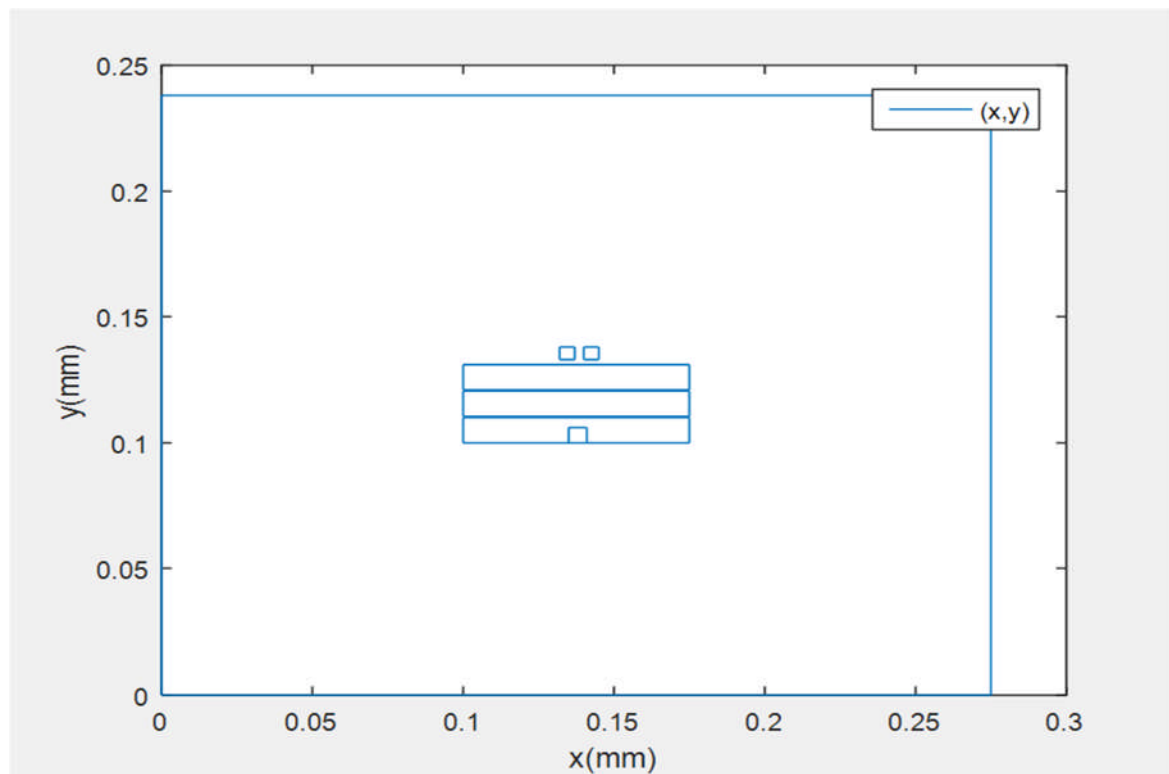


Figure III. 45 : Domaine d'étude

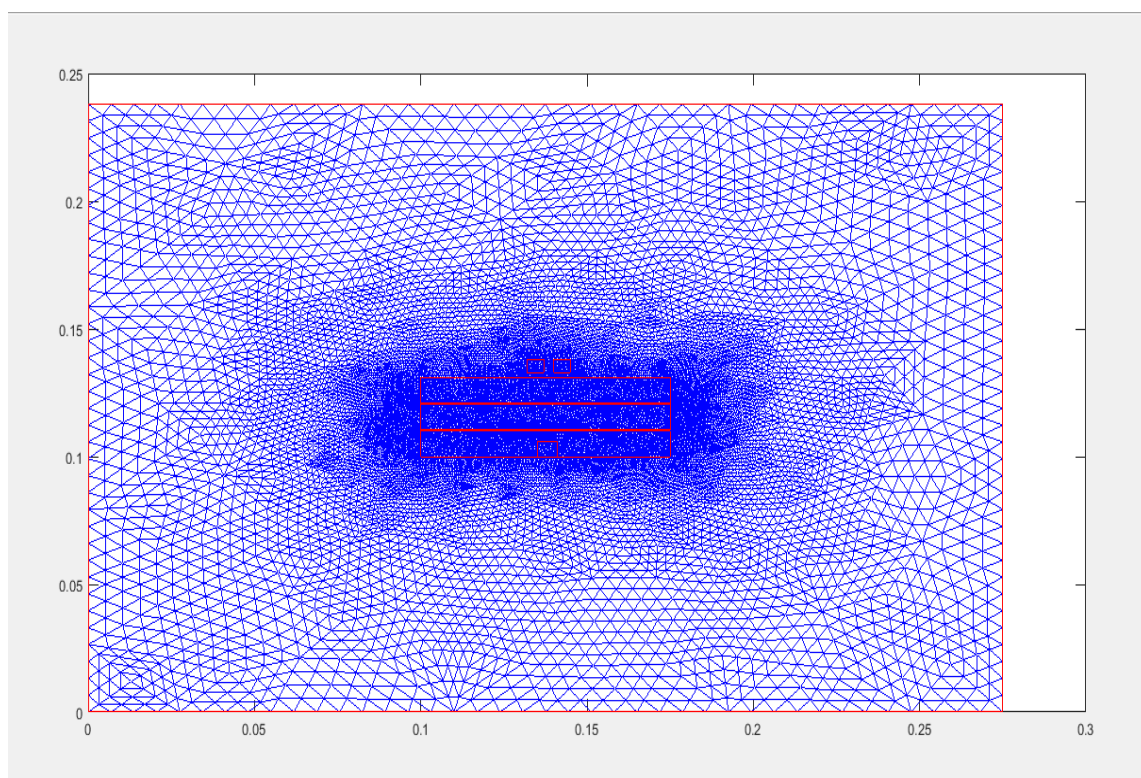


Figure III. 46 : Maillage de domaine

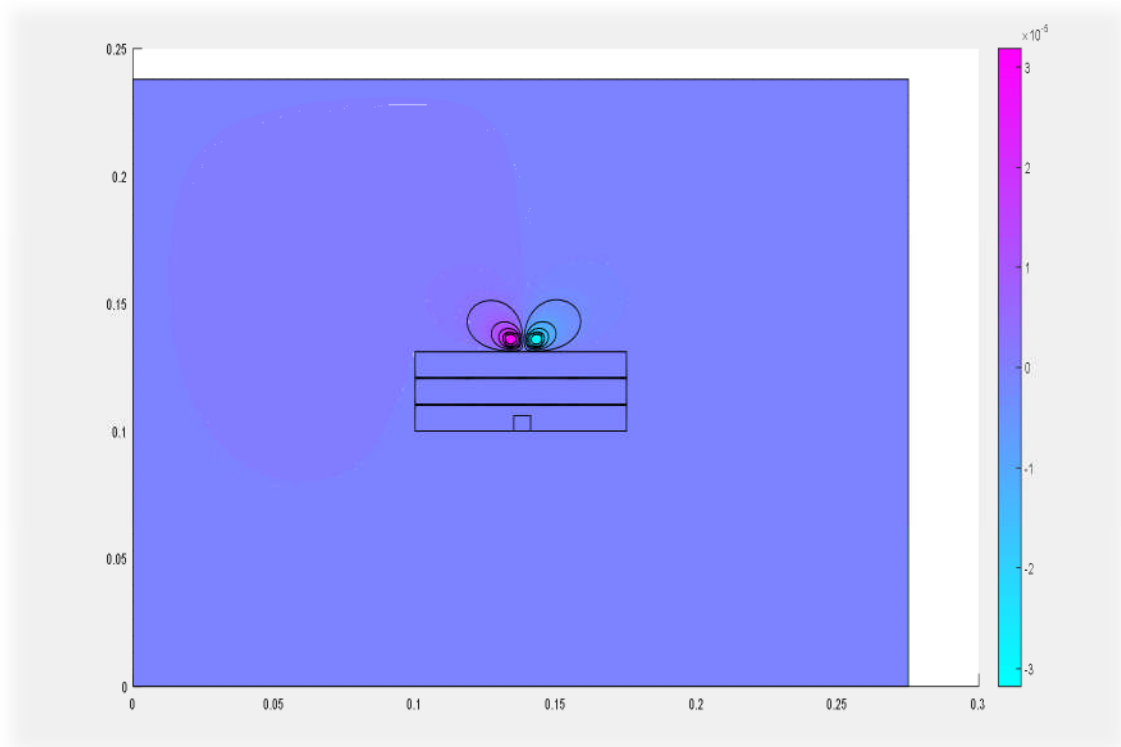


Figure III. 47 :le potentiel magnétique vecteur A

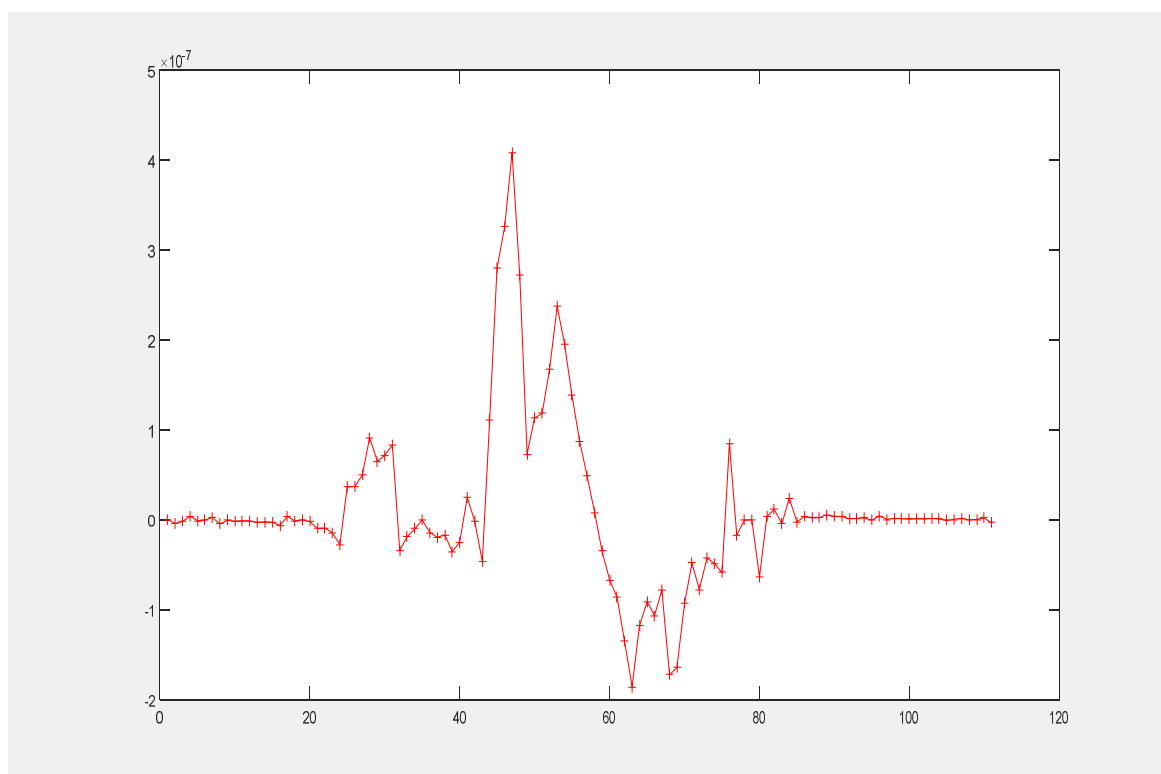


Figure III. 48 : L'impédance de la sonde

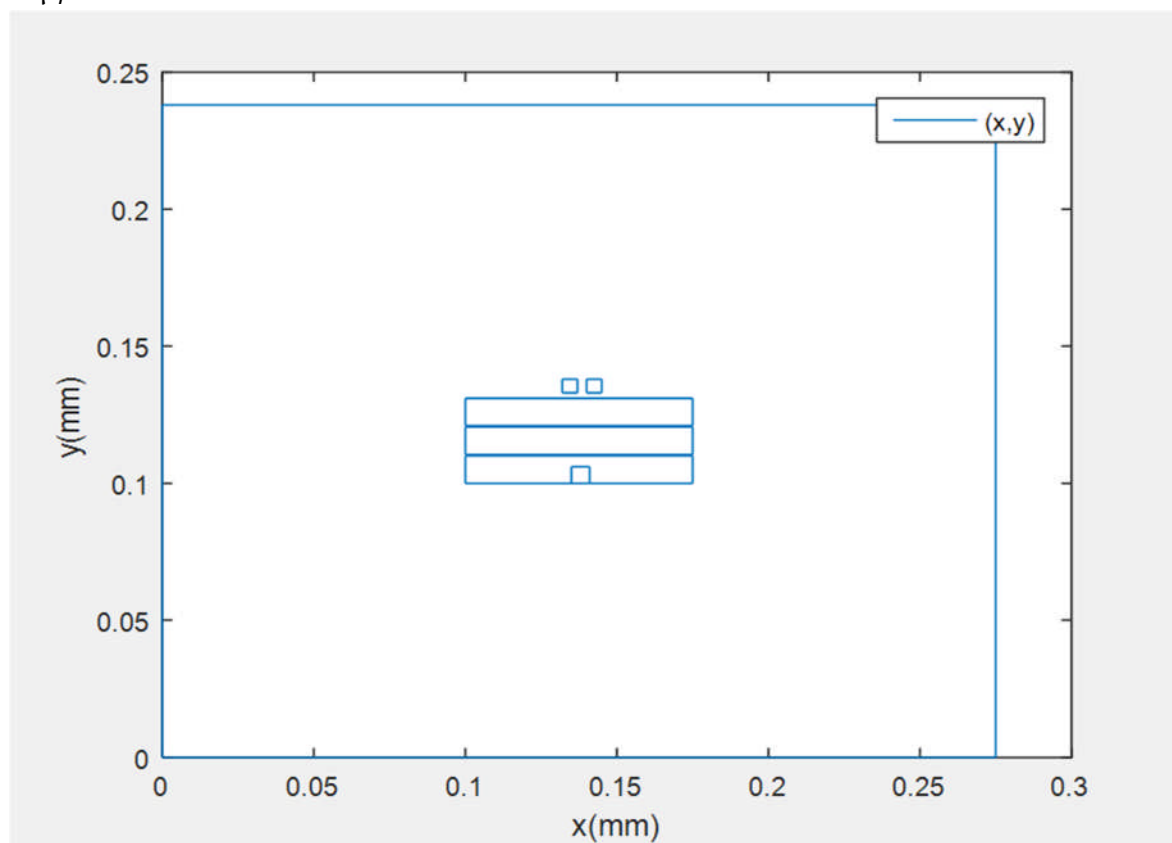
1. $\mu_r = 500$ 

Figure III. 49: domaine

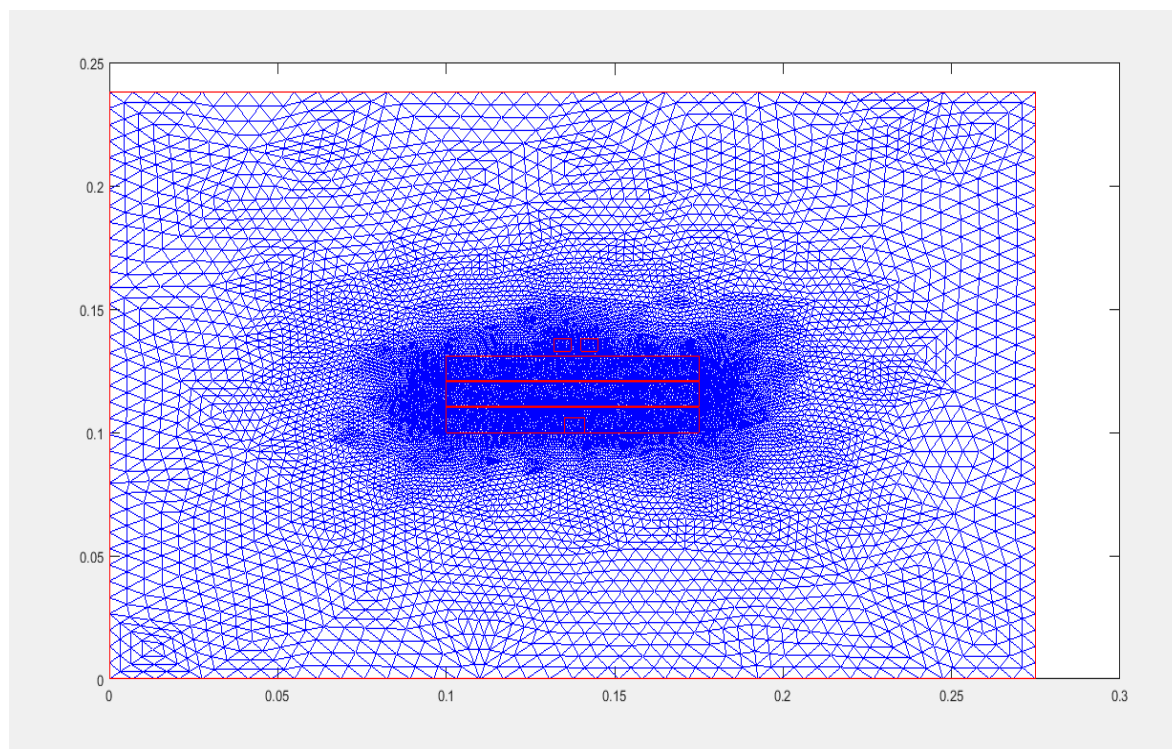


Figure III. 50 : Maillage de domaine

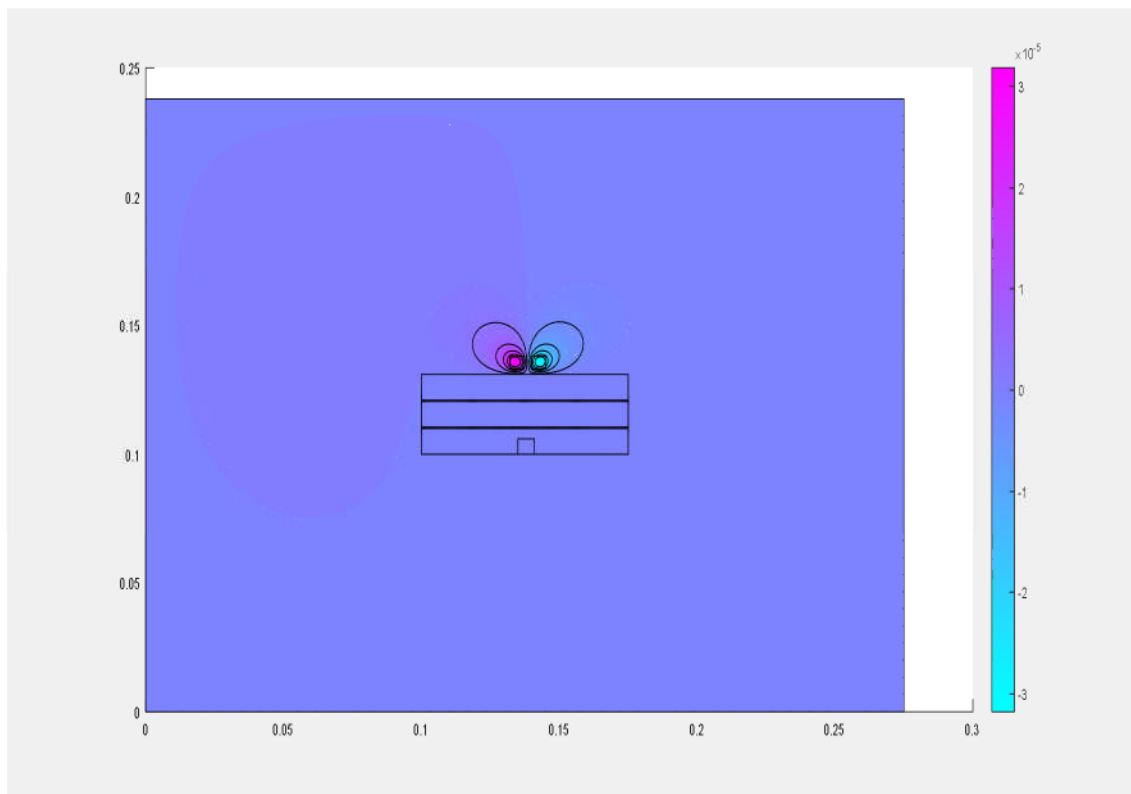


Figure III. 51 : le potentiel magnétique vecteur A

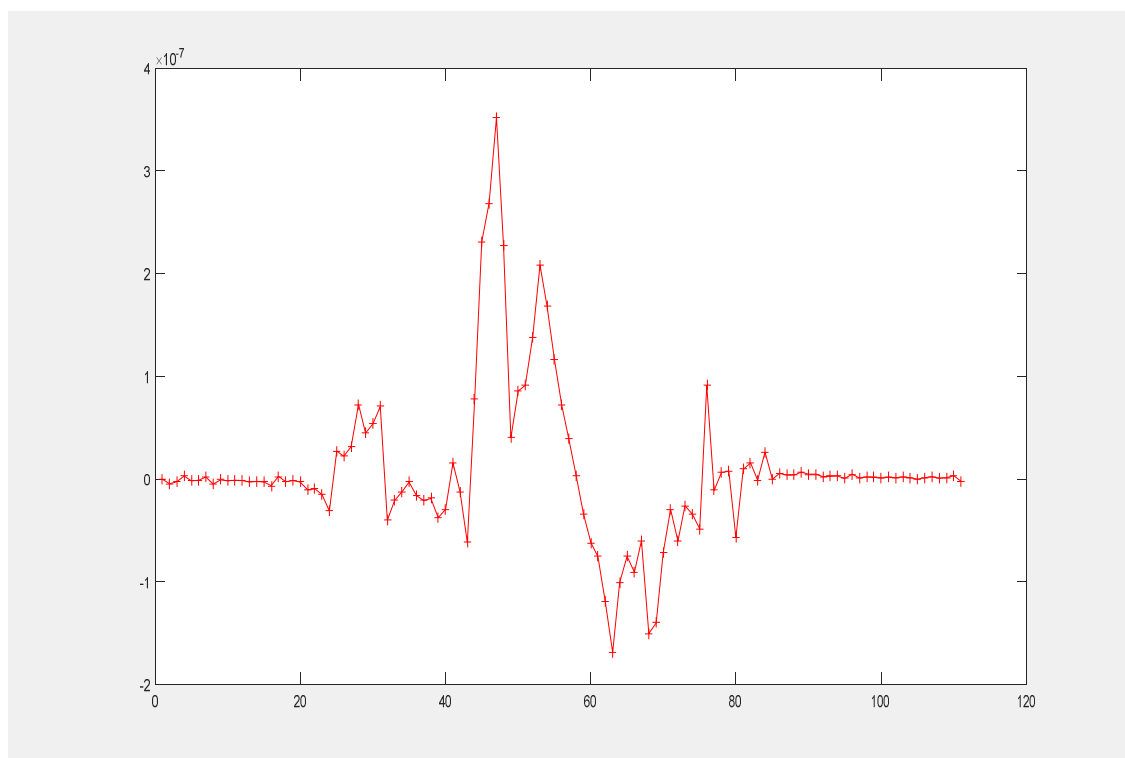


Figure III. 52 : L'impédance de la sonde

III. 6. 3. La troisième étape la pièce avec huit (08) couche

- On effectue une variation de la perméabilité magnétique
 - a). Détection de défauts dans une structure stratifiée avec huit (08) couches.
- Etude de l'effet de la présence d'un entrefer entre les plaques (couches stratifiées).
 1. $\mu_r = 1$

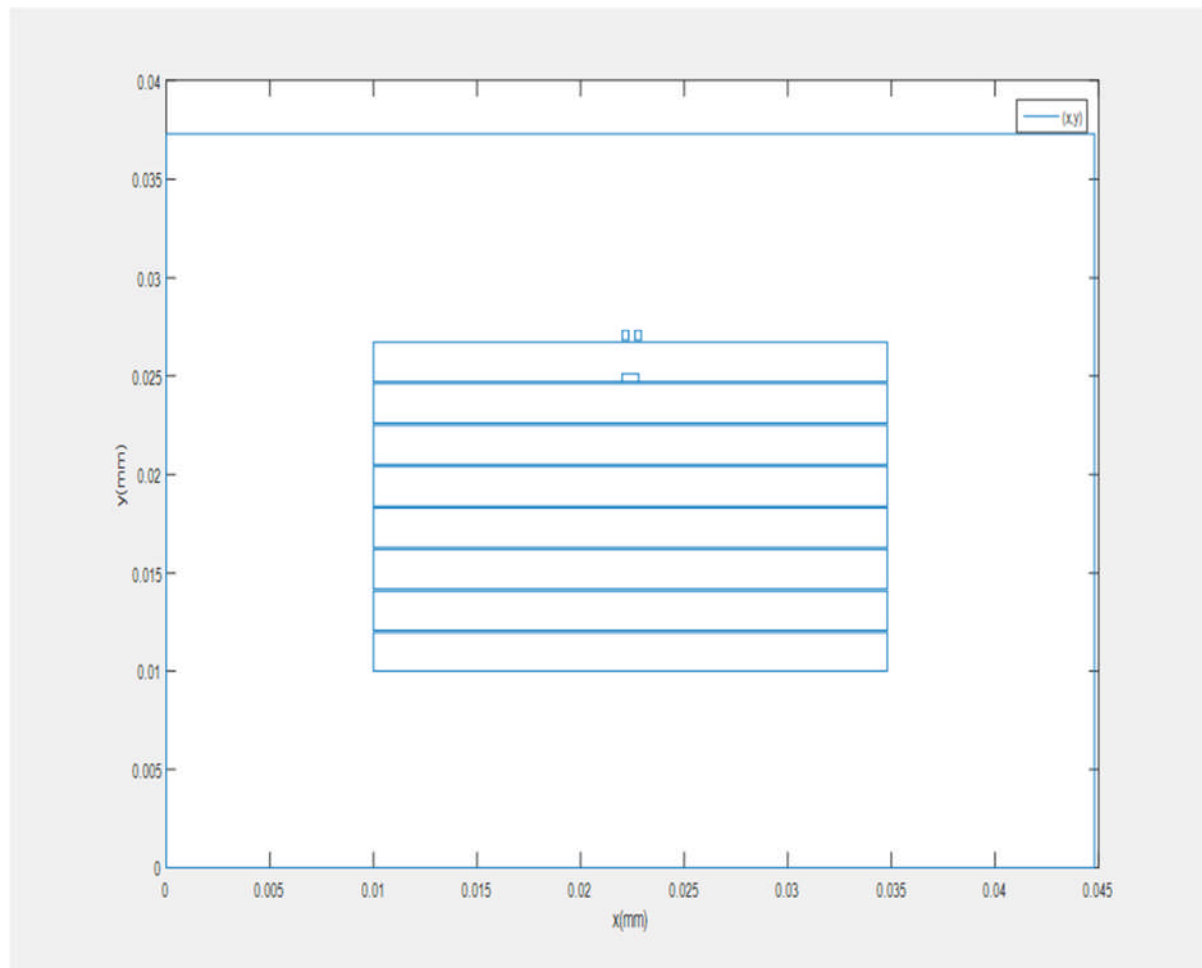


Figure III. 53 : domaine d'étude

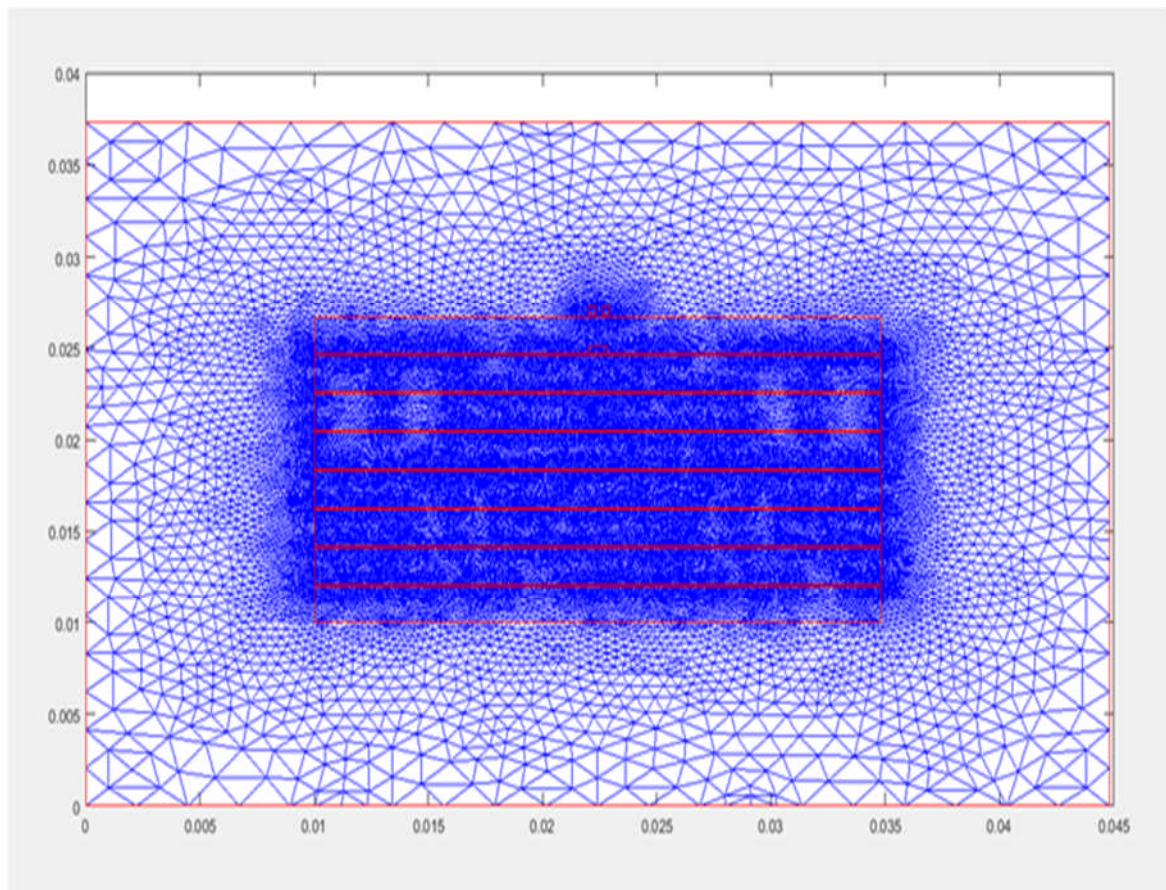


Figure III. 54: Maillage de domaine

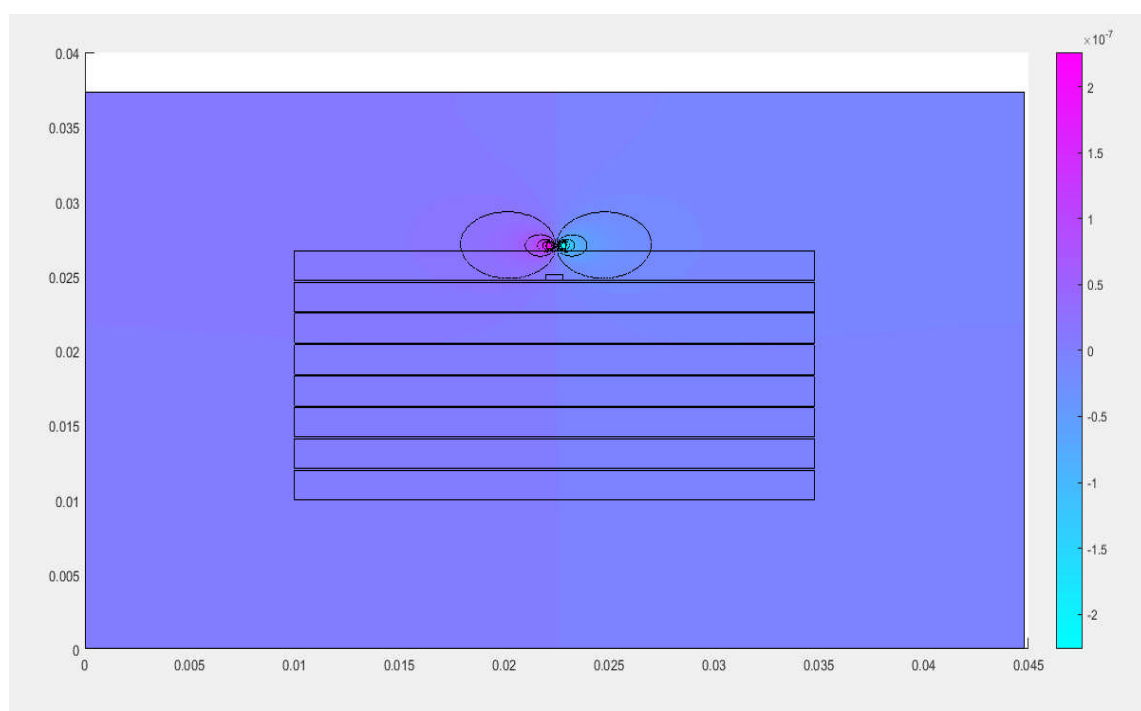


Figure III. 55 : le potentiel magnétique vecteur A

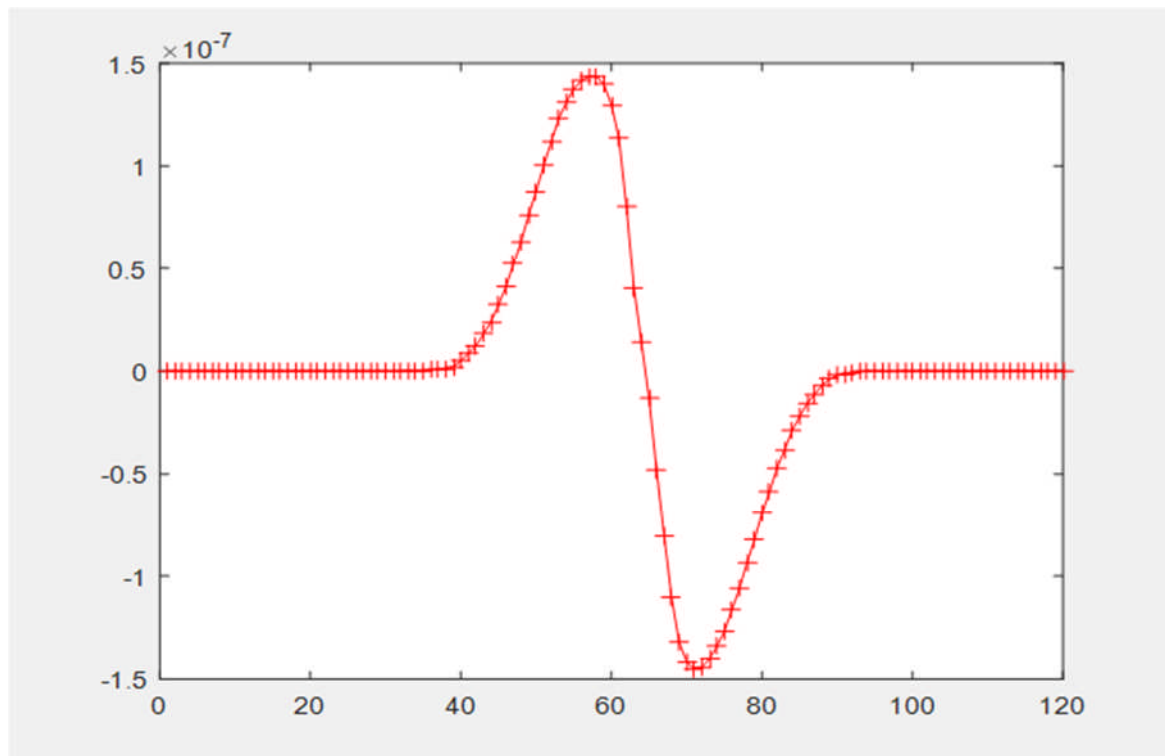


Figure III. 56 : L'impédance

2. $\mu_r = 10$.

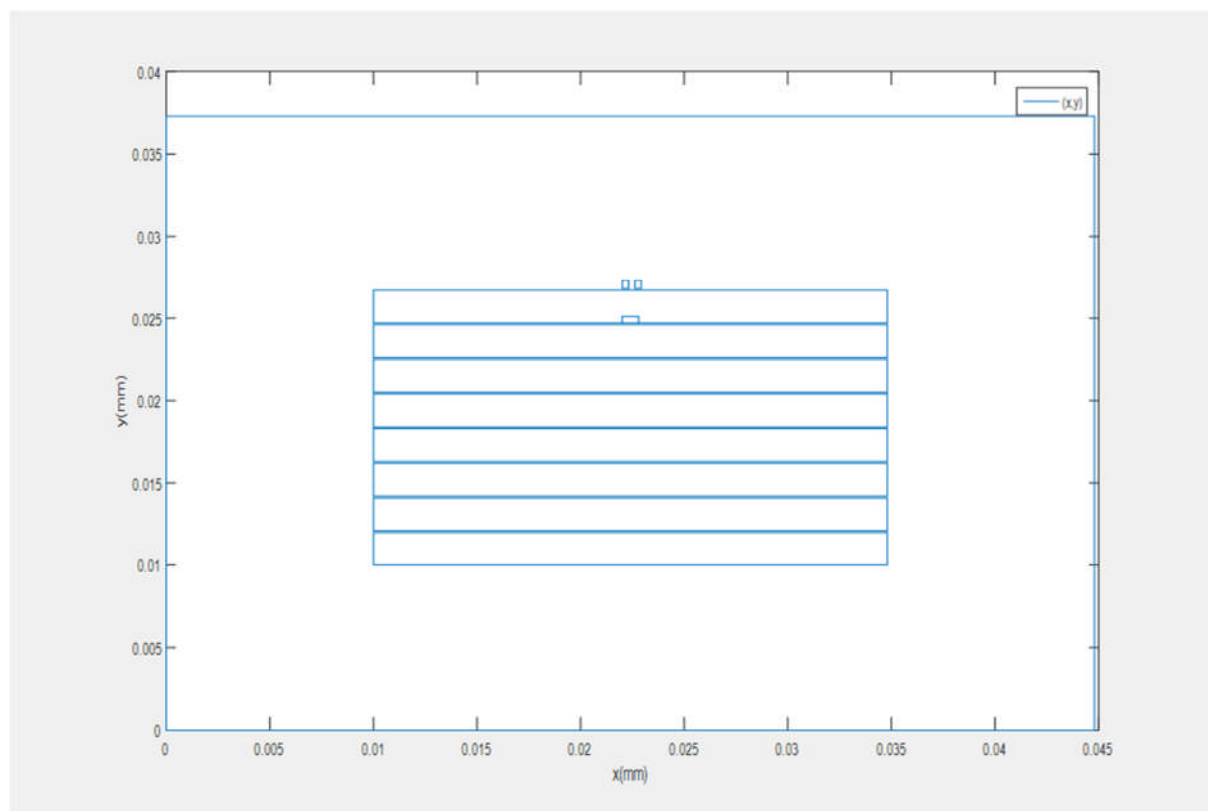
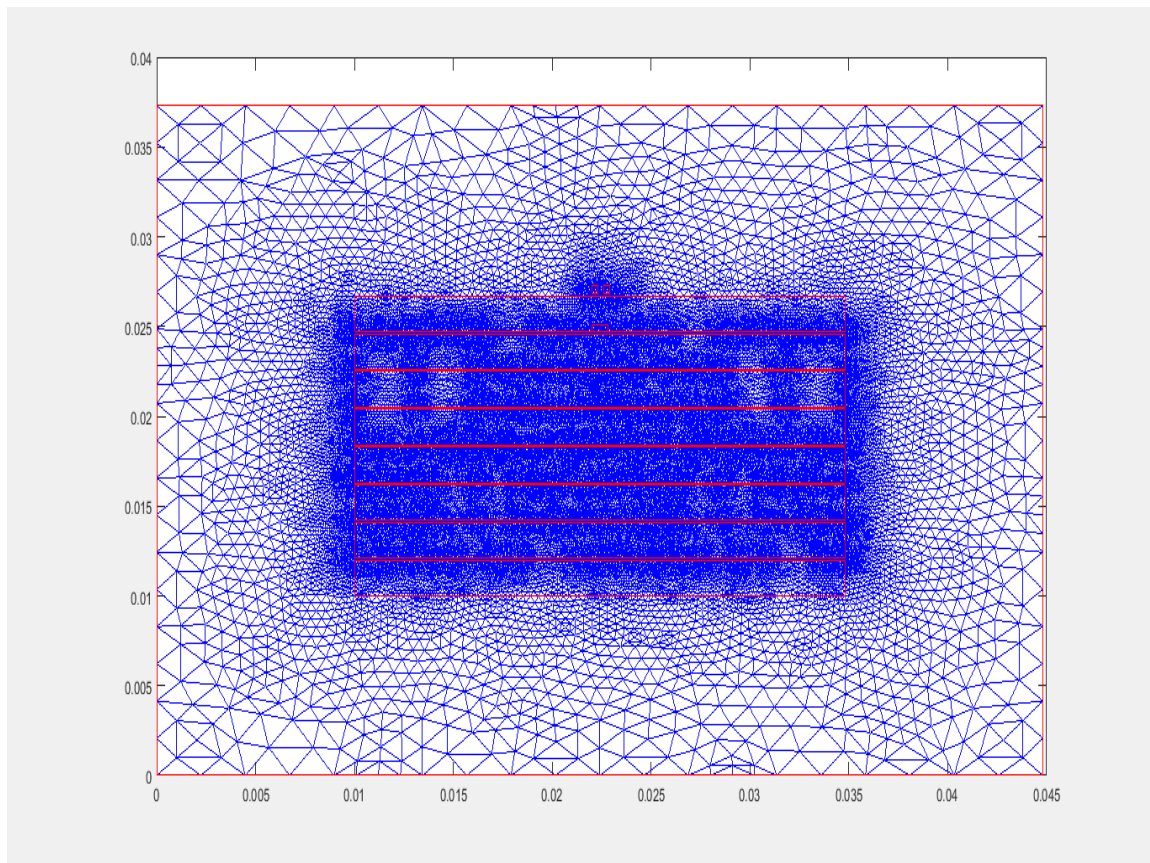
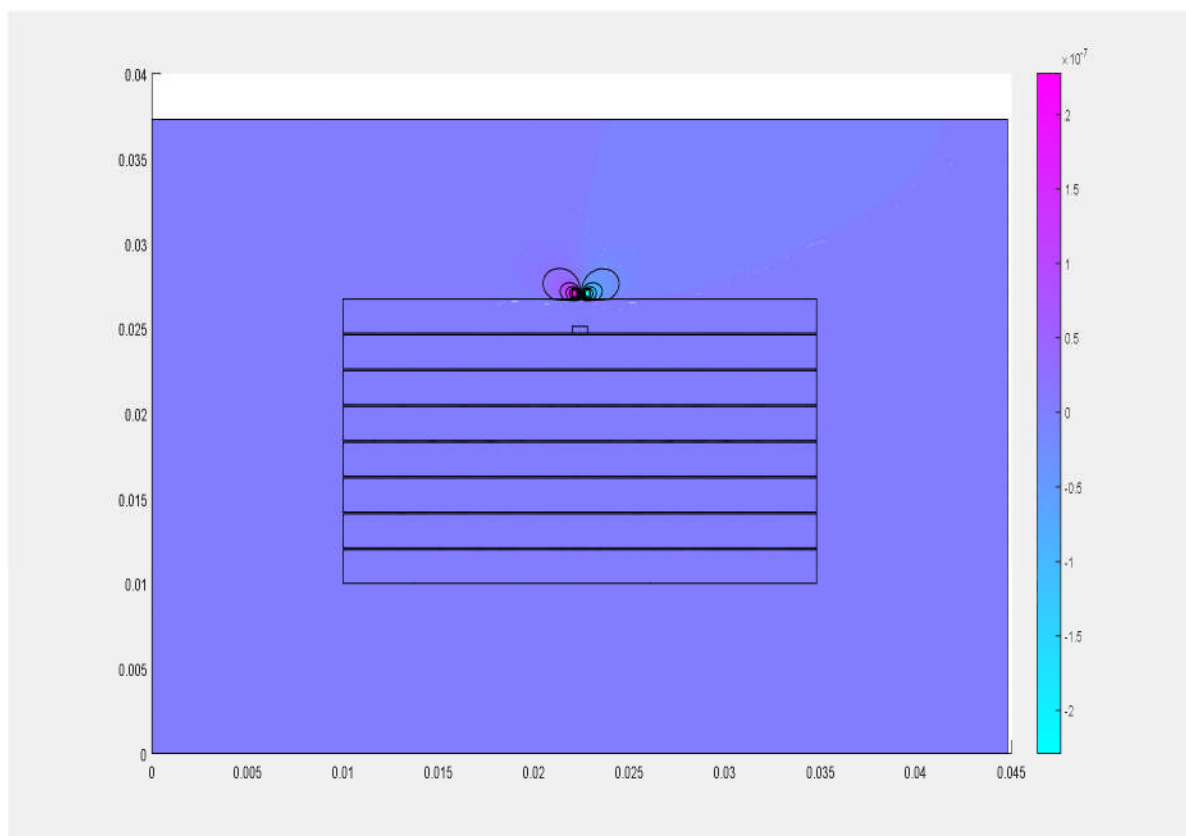


Figure III. 57 : domaine d'étude

**Figure III. 58 : Maillage de domaine****Figure III. 59 : le potentiel magnétique vecteur A**

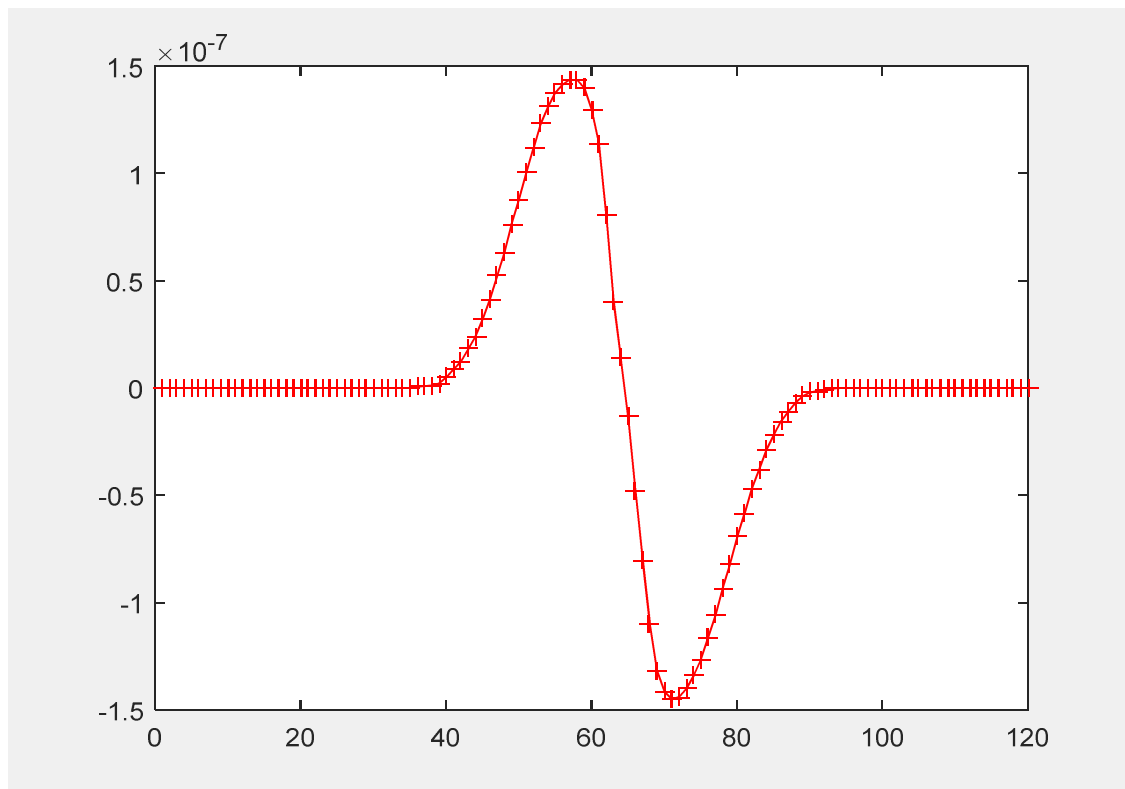


Figure III. 60 : L'impédance de la sonde

3. $\mu_r = 50$.

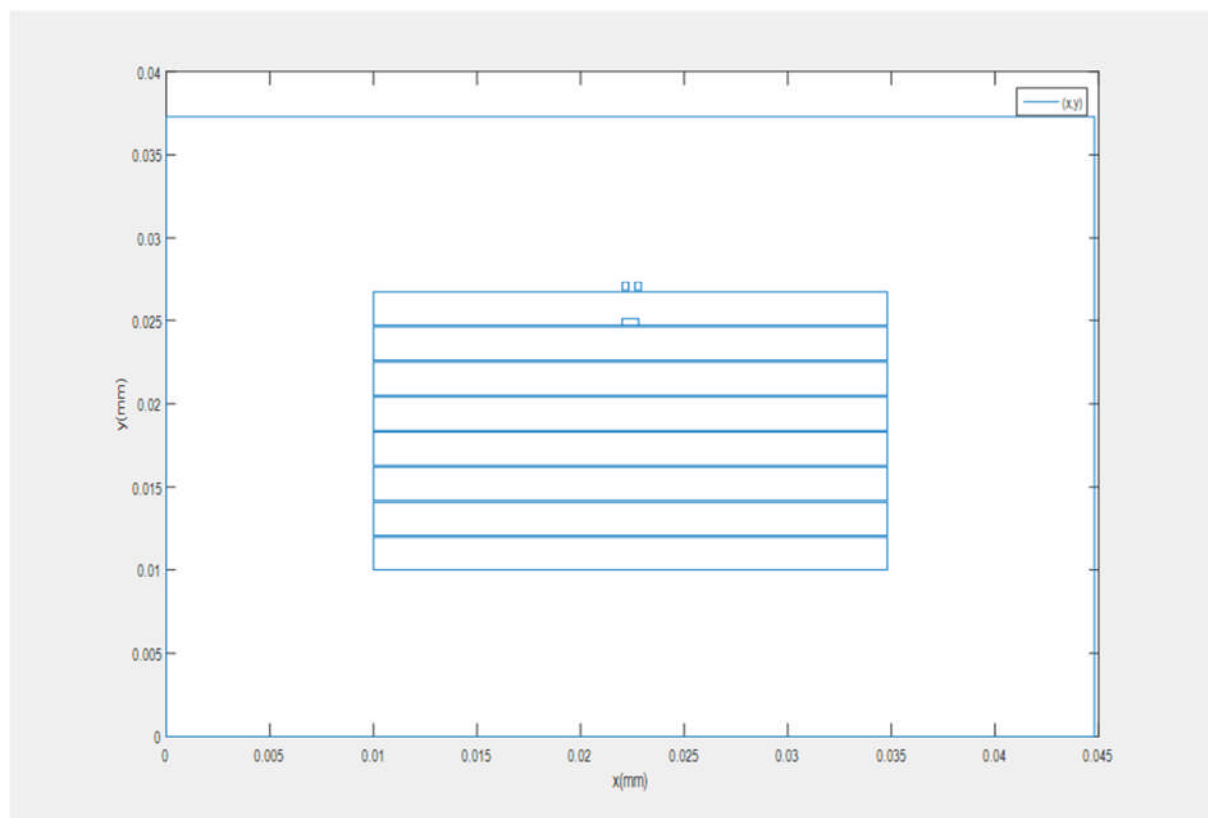
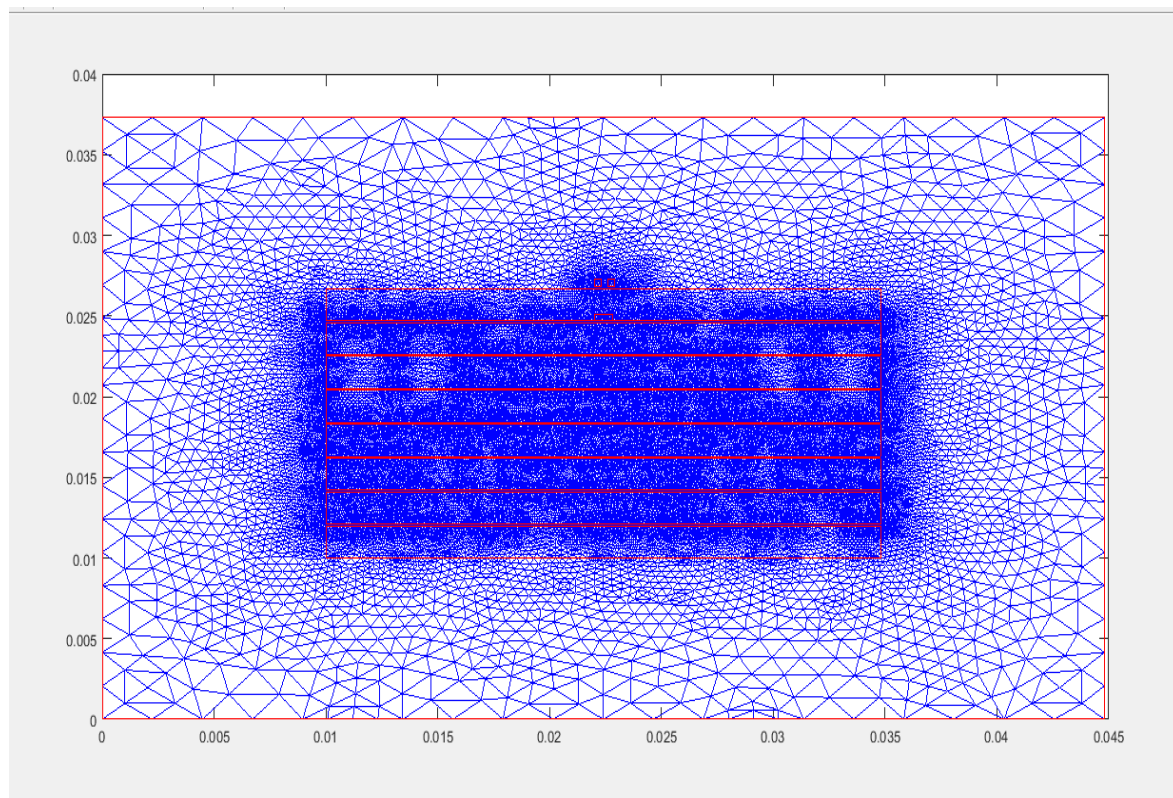
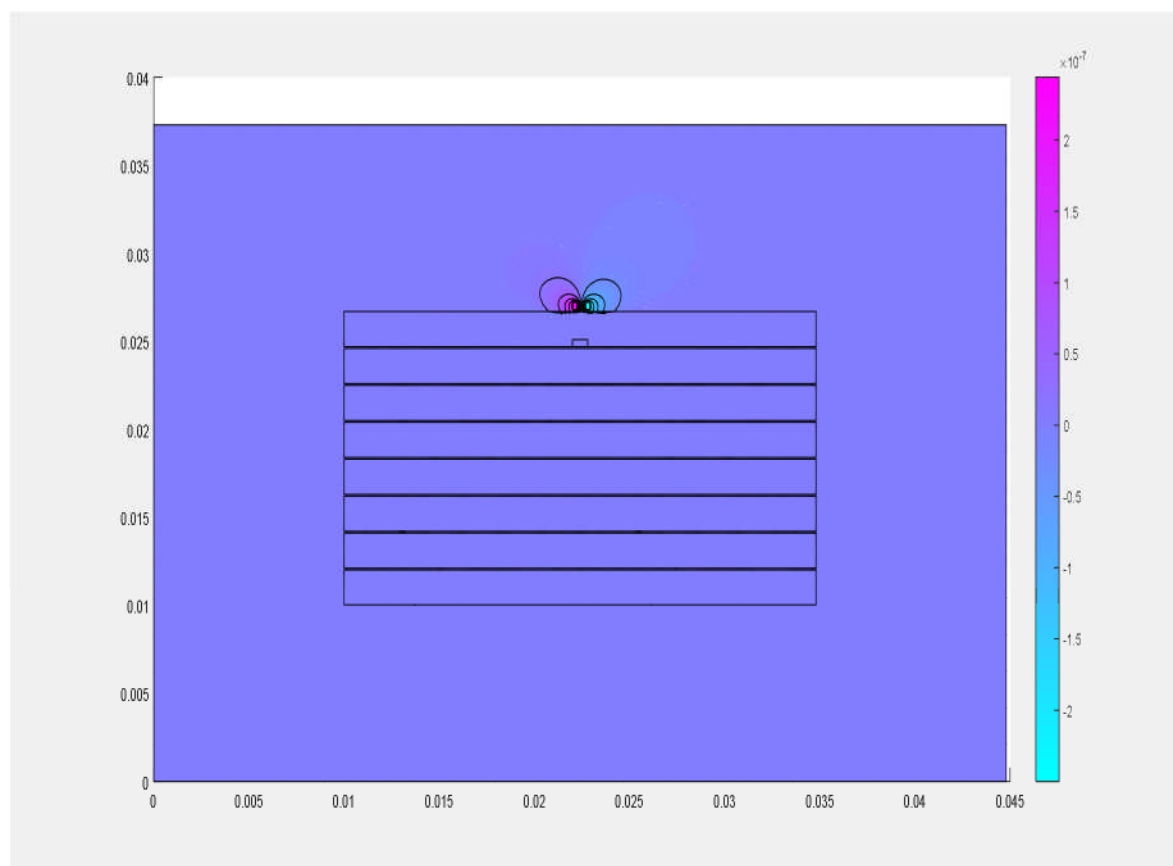


Figure III. 61 : domaine d'étude

**Figure III. 62 : Maillage de domaine****Figure III. 63: Le potentiel magnétique vecteur A**

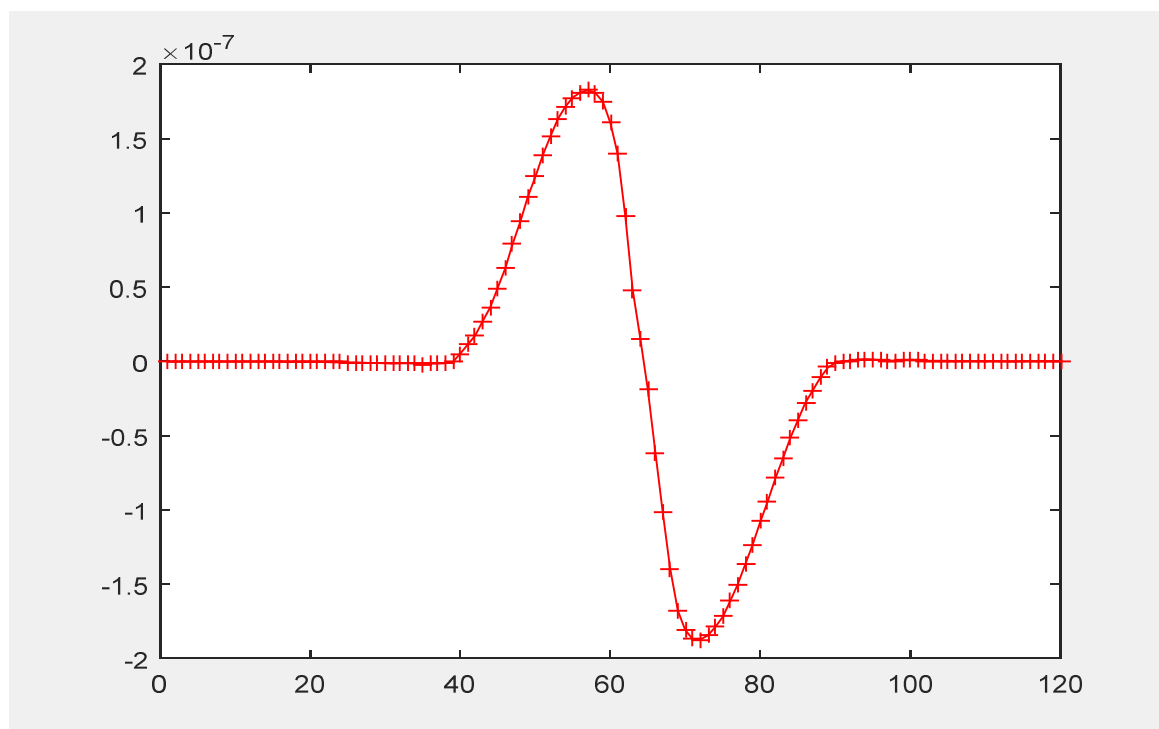


Figure III. 64 : L'impédance de la sonde

3. $\mu_r = 500$.

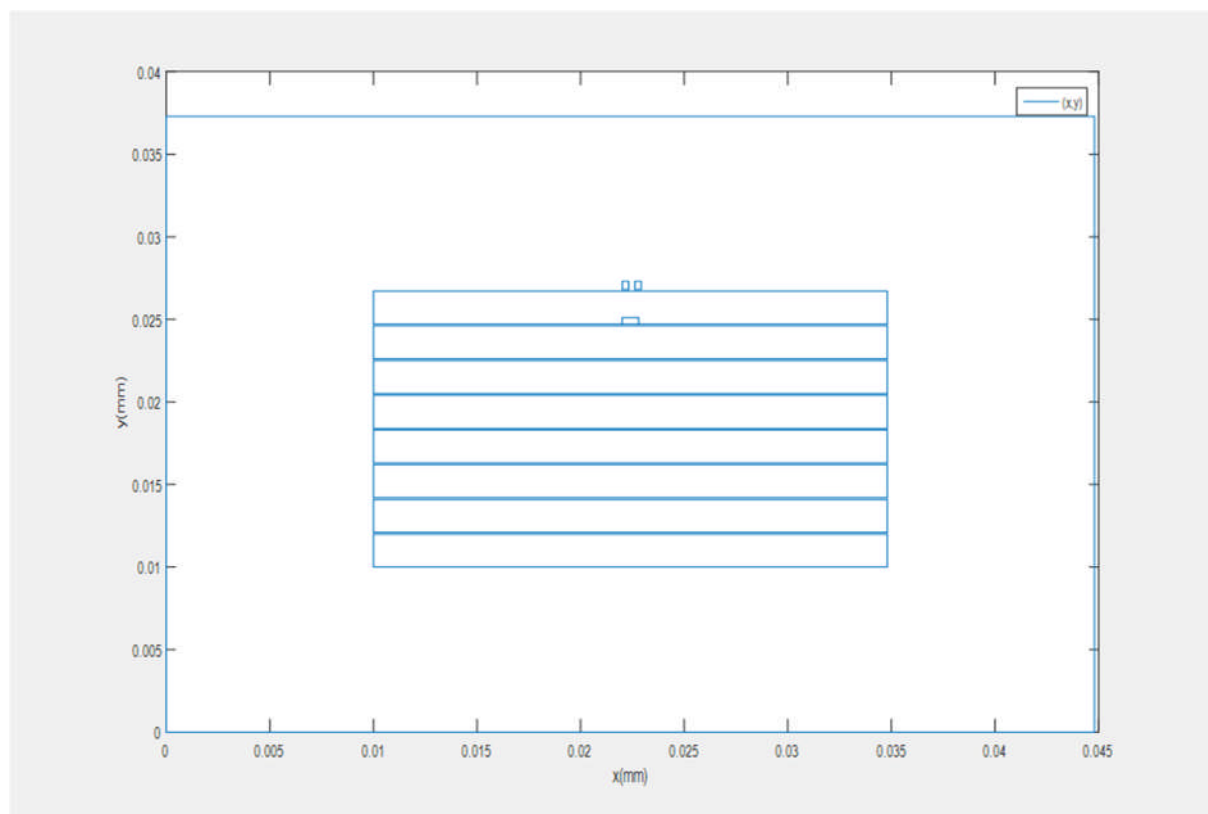


Figure III. 65 : domaine d'étude

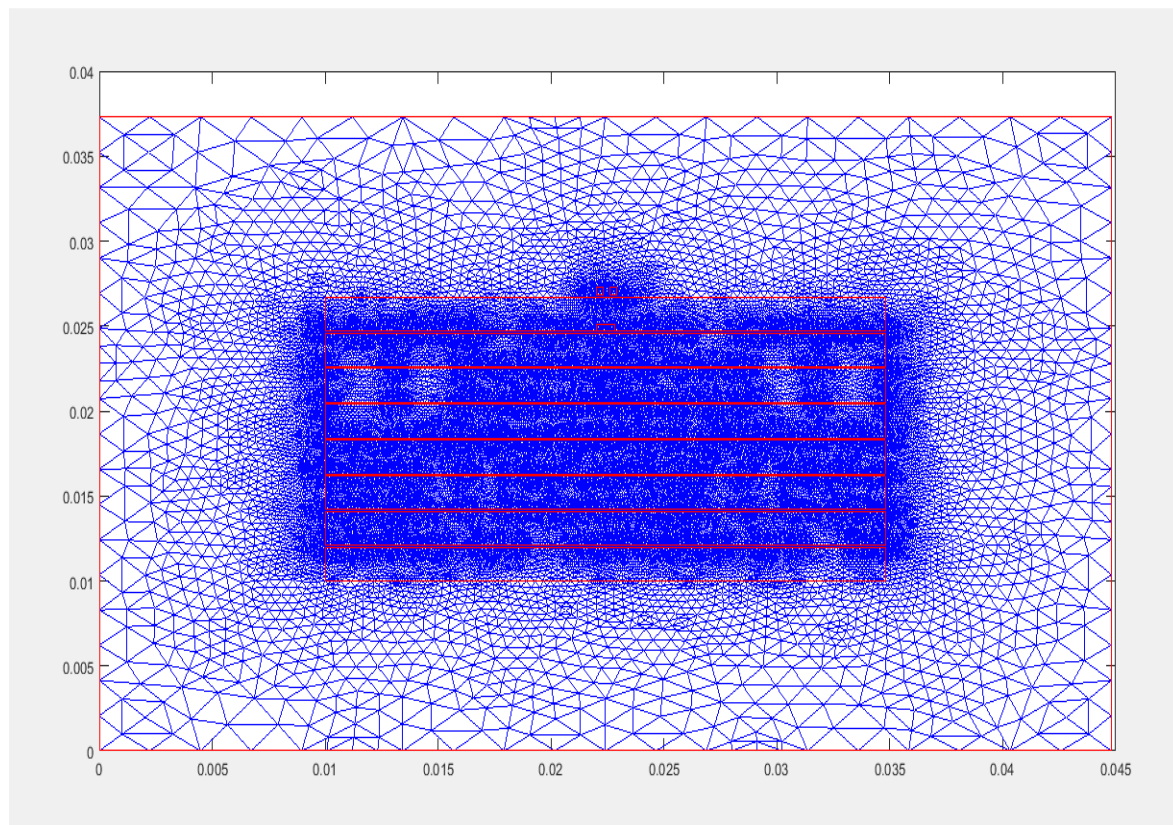


Figure III. 66: Maillage de domaine

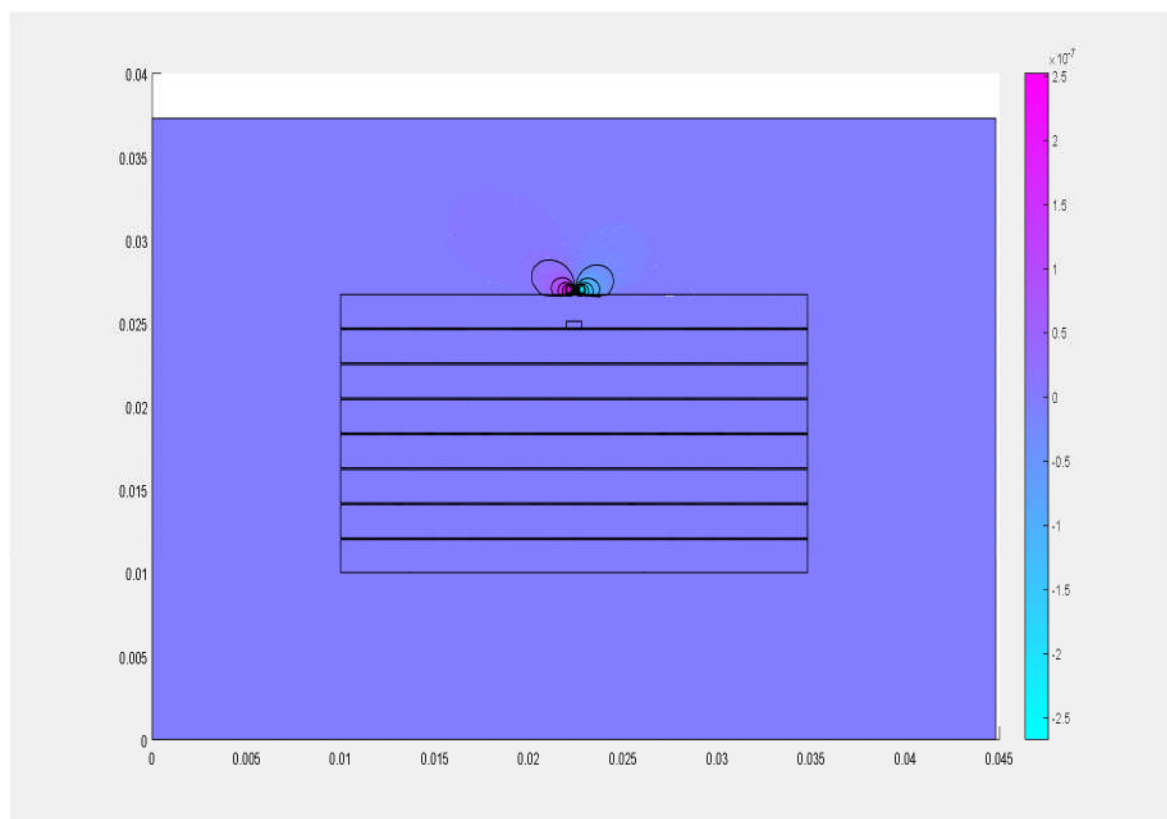


Figure III. 67 : le potentiel magnétique vecteur A

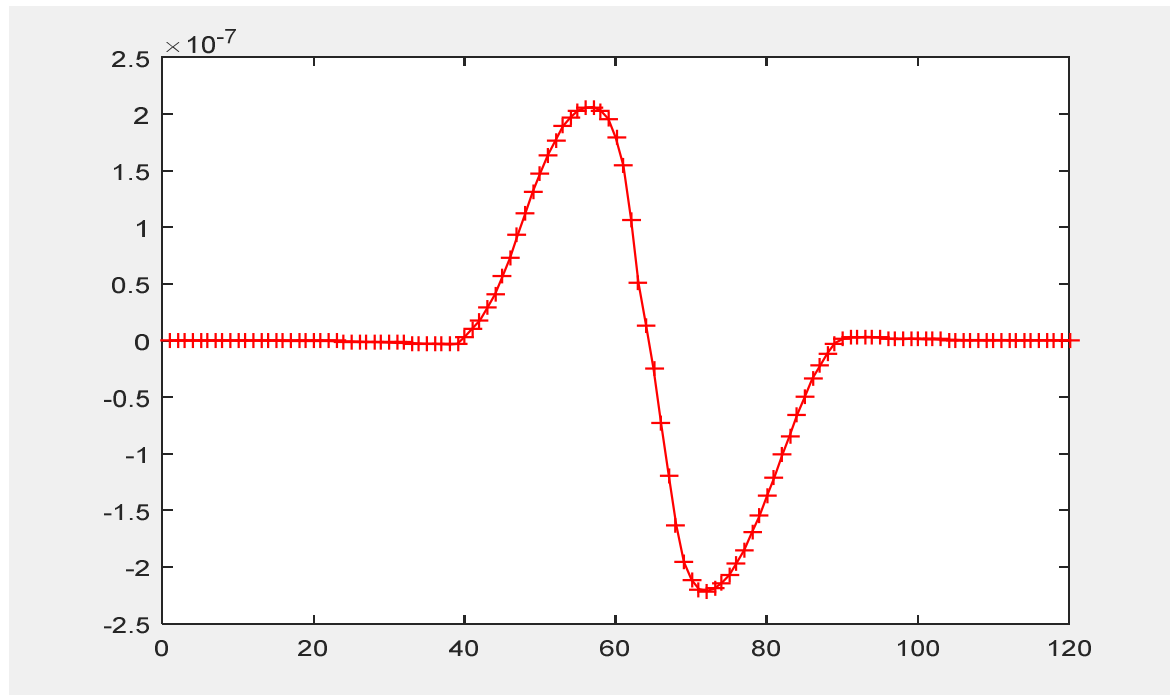


Figure III. 68 : L'impédance de la sonde

III. 7 Interprétation des résultats et commentaire

Afin de tester le comportement de notre modèle dans des différentes configurations, nous avons simulé d'après plusieurs étapes dont on a pris des pièces avec des différents paramètres, d'où nous avons commencé par une seule structure d'une pièce conductrice, puis trois (03) et huit (08) couche stratifié avec un types de sonde double fonction. On a eu des résultats recueillir par la simulation sous Matlab.

La progression de ces modèles adaptatif nous a permet d'aboutir à une analyse qui nous renseigne, que l'influence des paramètres électromagnétique comme la variation de la perméabilité, la variation de la profondeur qui affecte l'impédance, étant donné que ce son changement est contribuer par l'énergie dissiper par les courants de Foucault, crée un second champ magnétique lors de la survenance de l'interaction quand la pièce est en contact avec les deux bobines lors de tests simulait pour le premier, seconde, troisième modèle.

On remarque à travers la simulation des différentes modèles à partir d'une pièce avec une seule couche, arrivé aux structures stratifié qui compose de trois (03) et huit (08) couche, dont on admet que les courants de Foucault affect la charge de la bobine ainsi son impédance, d'où le défaut est tant détecter par la variation de l'impédance qui est provoquer par la décroissance de la charge de la sonde.

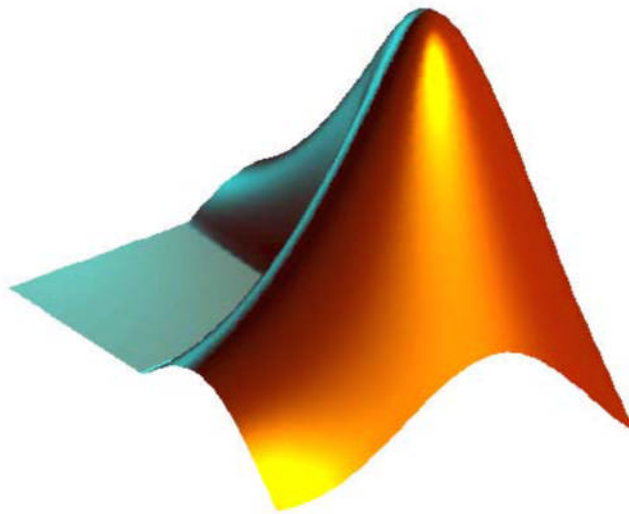
Cette simulation nous permet de déduire que la réponse des courants de Foucault est affectée par quelque facteur :

- L'augmentation et la diminution de la perméabilité pour la pénétration dans un matériel conducteur avec une basse fréquence.

Commentaire

On aura peut faire simuler avec déplacement de défaut pour le 3^{ème} Cas avec le modèle huit (08) couches stratifié, pour voir la variation d'impédance de la sonde.

III. 8. Présentation de logiciel de simulation MATLAB



MATLAB est d'abord un langage de programmation qu'on peut qualifier de "orienté objet". Il est particulièrement prévu pour le calcul numérique matriciel ou vectoriel. Par cette qualité de base, le programmeur est souvent dispensé d'écrire des boucles. La syntaxe des programmes **MATLAB** rappelle un peu d'autres langages tels que « Ada », « C ou Pascal ».

(Une autre spécificité de **MATLAB** est sa très vaste bibliothèque de fonctions déjà comprise dans la version de base. Cela permet de rédiger des programmes d'application extrêmement compacts utilisant des algorithmes éprouvés. Chaque fonction est spécifiée par ses entrées, variables et paramètres, la tâche à exécuter et ses sorties. En comparant à d'autres langages dans lesquels l'affichage est très coûteux en temps de codage, **MATLAB** offre des routines très simples d'emploi et très performantes.

Le langage **MATLAB** n'est pas seulement conçu pour les études universitaires et associées, mais aussi pour l'usage industriel où il est très prisé. Mathworks vend aussi des paquets de fonctions (**Toolboxes**), (boîte à utile) orientés plus particulièrement pour tel ou tel domaine d'application, avec des outils spécifiques.

MATLAB (Matrix Laboratory) est un logiciel crée au début pour le calcul matriciel.

III. 9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons peut réaliser un contrôle par courants de Foucault, dont on a manipulé les pièces avec un seul défaut, à partir de plusieurs paramètres soit géométriques ou physique, qui s'influence sur les performances de la sonde utiliser, dont on change de paramètres comme, la profondeur, perméabilité, mais avec une fréquence de 100 kHz. Les

outils développés permettent l'analyse de l'interaction de la fissure et du champ électromagnétique. Dans le cas d'une unique fissure comme dans notre étude, la répartition est relativement simple à décrire. De plus, le flux incident (second) du courant traversant la surface de la fissure permet dans une première approximation d'obtenir la variation d'impédance de la sonde. Mais en fait sa serait plus intéressant de simuler en 3D pour avoir une approche virtuelle avec des résultats que on peut recueillirai dans la pratique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail une modélisation par éléments finis d'une structure stratifiée a été effectuée en hypothèse bidimensionnelle.

L'équation aux dérivées partielles régissant le comportement des courants induits dans les milieux conducteurs a été résolue. Un programme de calcul par éléments finis 2D a été mis en œuvre sous environnement MATLAB en exploitant les fonctions PDETOOL. Plusieurs structures de milieu induit ont été considérées. Structure à une seule couche dont on peut observer l'influence d'un paramètre en premier temps en prend dans ce cas plusieurs pourcentage de profondeur à partir de 20%, 40%, 60%, 80%, puis en arrive à la structures de trois couches stratifiées de même nature, et même paramètres électromagnétiques comme la conductivité électrique et la perméabilité magnétique, aussi la densité de courants, et aussi de dimensions. Dans ce cas on a créé un écart entre les trois pièces qui sont séparées par un entre fer de 0.1 mm , tous on déplaçant le défaut à travers les trois plaques. On termine par huit couches stratifiées de plaques ont même nature, aussi de même paramètres cité au part avant, et de même dimensions, ces plaques sont espacés l'un de l'autre de 10^{-3} mm , le défaut se situe seulement dans la première couche sans déplacement de celui-ci à travers les plaques. Dont on fait l'objet d'étude à travers ces différentes types de cas de simulation ou adapte une méthode numérique, c'est la méthode des éléments finis. Dans chaque cas, on recueille les résultats de comportement du potentiel vecteur magnétique ainsi que de l'impédance des bornes du capteur absolu double fonction ce qui nous a permet le pouvoir d'aboutir à notre objectif d'investigations lorsque les défauts sont simulés à l'intérieur des couches conductrices. Les résultats trouvés sont jugés cohérents et conformes à ceux attendues.

Ce travaille on estime bien de fait qu'il soit plus intéressant, et plus exploitable dans l'avenir.

Références bibliographiques

- [1] Yann le Bihan, " Modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault : Approche basé sur la méthode des éléments finis", Laboratoire de génie électrique de paris.
- [2] Tao PENG. "Conception et réalisation de micro-capteur à magnéto-impédance pour le contrôle non destructif", Thèse de Doctorat, université Paris - Sud, 2014.
- [3] Y. Choua, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault", Thèse de Doctorat, université Paris - Sud, 2009.
- [4] C. Zorni, C. Reboud, J.-M. Decitre, M. Lambert, CEA, LIST, " Modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault de matériaux magnétiques", "EDDY CURRENT TESTING MODELLING OF MAGNETIC MATERIALS". Département Imagerie Simulation pour le Contrôle, Département de Recherche en Électromagnétisme, Laboratoire des Signaux et Systèmes UMR 8506 (CNRS - SUPELEC - Université Paris-Sud).
- [5] H. Menana, M. Féliachi et G. Berthiau, "Modélisation des courants de Foucault dans un matériau composite en vue de la caractérisation de défauts", Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique IREENA-IUT.
- [6] A. Le Blanc, J.-L. Le Chien, M. Talvard, G. Delsarte et M. Piriou, " Subsurface cracks detection in Inconel using pulsed eddy currents technique". In 14th International Conference on NDE in the nuclear and pressure vessel industries, pages 347–349. ASM International, janvier 1996.
- [7] Y.Y. Hunga, H.P. Hob: Shearography "An optical measurement technique and Applications". *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49(3):61–87, 2005.
- [8] Institut de soudure industrie, RDT-ISI-1035, "Principale limites des techniques d'examen non destructif note a l'attention des donneurs d'ordres, Rév 3 mai 2013.
- [9] CND-radio, outils pour contrôles non destructifs. Application android: [https://play.google.com/store/apps/details?id= appinventor.ai_flamstudio.cndradio&hl=fr/](https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_flamstudio.cndradio&hl=fr/) ET WEB: <http://www.cnd-radio.com/>. Consulter le 04/04/2016.
- [10] C.N. Depinoir « License versus diploma? Materials evaluation », Vol 44, P 492, 1986.
- [11] M. Klank, O. Hagedorn, C. Holthaus, M. Shamonin, H. Dötsch "Characterization and optimization of magnetic garnet films for magneto-optical visualization of magnetic field distributions". *NDT & E International*, 36(6):375–381, septembre 2003.
- [12] J. Haueisen, R. Unger, T. Beuker, M.E. Bellemann "Evaluation of inverse algorithms in the analysis of magnetic fluxleakage data". *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(3):1481–1488, mai 2002.

- [13] N. Child, "X-ray techniques provide real-time proof of foam filter performance in steel castings". *Foundry Practice*, 233:12–16, 2000.
- [14] R. Da Silva, M. Siqueira, M. De Souza, J. Rebello, L. Calôba, "Estimated accuracy of classification of defects detected in welded joints by radiographic tests". *NDT & E International*, 38(5):335–343, 2005.
- [15] J. Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND), technique de l'ingénieur, 1996.
- [16] F. Champigny, "Inspection des REP", technique de l'ingénieur, 2005.
- [17] C. Ravat, "Conception de multi capteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif", Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, 2008.
- [18] D. Hagemaiier. "Eddy current impedance plane analysis". *Materials Evaluation*, Vol. 41, pp. 211–218, 1982.
- [19] M. Q. Lê and D. Placko, "Nouvelle structure de capteur à courants de Foucault et algorithme associé pour la mesure des propriétés électriques et magnétiques d'un métal", *Journal de Physique III* **5** (1995), 807–824.
- [20] D. Waidelich, *Measurement of coating thickness by use of pulsed eddy currents*, *Materials Evaluation* **14** (1956), 14–15.
- [21] J.C. Bour, E. Zubiri, P. Vasseurh, and A. Billmat, *Etude de la répartition des courants de Foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructif*, *Journal de Physique III* **6** (1996), P 7–22.
- [22] T. Leduc, "Développement de méthodes intégrales de volume en électromagnétisme basse fréquence prise en compte des matériaux magnétiques et des régions minces conductrices dans la Méthode PEEC", 2011.
- [23] P. Louis Veuillermoz "les courants de Foucault, Principes, Mesures et contrôle", éditeur AFNOR, 1994.
- [24] J. M. Courty, "les conducteurs Electriques", Notes de cours Version 0.2, UPMC - L3 – Physique 6 PGA.
- [25] H. Cheriet, "Etude de l'effet de la Jauge de Coulomb dans les problème magnétostatiques tridimensionnels par la méthode de volume finis, Thèse de doctorat, 2007.
- [26] P. GELLEC et A. Dubouchet, "programmation de calcul par la méthode éléments finis", 1972.
- [27] A. Sophie Bonnet- Bendhia, S. FLISS, P. Joly et Ph. Moireau, "Différences Finis" 2012.

- [28] S. Nosal. "Modélisation électromagnétique de structures périodiques et matériaux artificiels : Application à la conception d'un radome passe-bande", Ecole Centrale Paris, 2009.
- [29] A. Ait Hamou, "Mise en œuvre d'un Modèle couplé analytique-numérique pour la détection de défauts à vitesse élevée", Mémoire de Magister, 20015.
- [30] **R. Laurent**, "Déférénces Finis pour la résolution numérique des équations de la mécanique des fluides", 2006.
- [31] **Jean-Christophe Cuillière**, Introduction à la méthode des éléments finis, Dunod, Paris, 2011 (ISBN 978-2-10-056438-5), p. 3-4.
- [32] **M. Kern**, " introduction à la méthode des éléments finis ", Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, 2004-2005.
- [33] **L. Champaney**, "Méthode d'approximation de solution de solution pour les problèmes de physique, "Notes de cours du module MP 3, Université de Versailles, ST-Quentin en Y vehnes.
- [34] **H. Mohellebi**, " Cours de la modélisation Numériques d'un système d'entrainements Electriques ", Cours Master 2 ; Master Académique, Option Entrainements Electriques, Université de MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou, 2015.
- [35] **K. Gueraoui**, " Module 9 : Analyse numérique. Méthode des volumes finis", *Master: Énergie et technologie des matériaux (E.T.M)*, Rabat, 2009-2010.
- [36] A. Stonkov, "Introduction à la mécanique des fluides Numériques : Méthodes de volumes Finis", 2006-2012.
- [37] **F. Bouillault, Z. Ren et A. Razek**, Modélisation tridimensionnelle des courants de Foucault à l'aide de méthodes mixtes avec différentes formulations, *Revue Phys. Appl.* 25 (1990) 583-592.
- [38] **Fr. Thollon**, Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 1995.
- [39] **B. Helifa**, "contribution à la simulation du CND par courants de Foucault en vue de la caractérisation des fissures débouchantes", Thèse de doctorat, université de Nantes, 2012.
- [40] N. Boucherou, M. Zergoug, A. Hammouda, G. Kamel, H. Boudjelal, Amar Boutaghane & O. Bourgjam, "Evaluation des matériaux conducteurs par courant de Foucault pulsé", Centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle Division des Procédés Electrique et Magnétique, Alger, Grenoble, 2007.

[41] M. Hamel, "Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques", Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.