

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° :



DOMAINE : Génie électrique
FILIERE :E.L.M
OPTION :M.E.I

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

Etude d'un Système de Détection par Courants de Foucault
Multiéléments Alimenté en Mode Harmonique Multiplexé
Application aux Échangeurs de chaleur

Présenté par :

Khalil Medjedel & Kamal Bensaiette

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. GHEMARI Zine	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Président
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Examineur
Dr. BOUCHALA Tarik	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Rapporteur
Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Co-Rapporteur

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2021 / 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على اشرف

المرسلين وخاتم النبيين ورحمة الله للعالمين سيدنا

. محمد وعلى اله وصحبه أجمعين

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail A mes très
chers parents qui m'ont guidé durant
les moments les plus pénibles de ce long
chemin, à la lumière de ma vie Maman qui
a été à mes côtés et ma soutenue durant
toute ma vie, et mon cher papa qui a
sacrifié toute sa vie afin de me voir
devenir ce que je suis.*

*A mes frères et mes
sœurs et à toute ma famille
et mes amis tout avec son nom*

Khalil Medjedel

*Je dédie ce travail à mes très chers parents,
pour leurs soutiens et leurs confiances,
que Dieu, leurs procurent santé et longue vie.*

A mes frères.

A mes sœurs.

A toute ma famille.

A mes collègues et mes amis.

A tous ceux que j'aime.

Kamal Bensaillette

Remerciements

*Tout d'abord, Nous tenons à remercier **DIEU LE TOUT PUISSANT** de nous 'avoir guidés dans la réalisation de ce travail*

*On profite aussi de cette occasion pour adresser nos sincères remerciements à notre **Dr. Tarek BOUCHALA** et **Dr. ABDOU Abdelhak** qui nous ont fait bénéficier de leurs conseils et de leurs compétences, soulignant ainsi l'intérêt constant qu'ils portent à nos travaux. On les remercie pour leurs confiances qu'ils nous ont témoignées, leurs pédagogies, patiences, disponibilités et leurs dévouements.*

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir accepté de participer au jury.

*On tient à remercier l'ensemble du cadre administratif de **Maintenance Equipment industriel** .Notre pensée va aussi à toutes les personnes que nous avons rencontrées durant ces derniers mois, pour leur sympathie et leur aide.*

*On tient à remercier tous les enseignants qui ont accepté de juger ce travail. On tient à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ainsi que toute la promotion **ÉLECTROMECHANIQUE 2020/2021**.*

Résumé

La technologie d'imagerie à courants de Foucault dans le domaine de contrôle non destructif (CND) est basée sur des capteurs multiéléments constitués de plusieurs sondes à courants de Foucault placées côte à côte pour l'acquisition de données. L'assemblage des sondes est possible grâce au multiplexage, qui évite l'inductance mutuelle entre les sondes individuelles. Cette technique conduit à un gain important de temps lors du contrôle de pièces conductrices avec un nombre de balayage très réduit.

Nous avons utilisés cette méthode pour la caractérisation des défauts de type arrachement de matière ou de corrosion qui peuvent subvenir sur des pièces utilisées en structure d'échangeur de chaleur

Mots clés : Contrôle non destructif, imagerie à courants de Foucault, capteur multiéléments, multiplexage

ملخص:

تعتمد تقنية التصوير بالتيار فوكو في مجال الاختبار غير المدمر على مجموعة من ملتقطات فوكو موضوعة جنبًا إلى جنب للحصول على البيانات.

من الممكن بفضل التغذية الموجهة للوشائع ، ان نتجنب الحث المتبادل بين الملتقطات الفردية . تؤدي هذه التقنية إلى توفير كبير للوقت عند فحص الأجزاء الناقلة للتيار و ذلك لان المساحة المفحوصة تعتبر نسبيًا كبيرة خلال تنقل واحد فقط .

لقد استخدمنا هذه الطريقة لمراقبة الأجزاء المستخدمة في صناعة المغيرات الحرارية عند حدوث خلل من الصنف سحب المواد أو التأكسد الذي يمكن أن يحدث على. الاختبار ،

الكلمات الدالة: تصوير التيار فوكو مصفوفة من ملتقطات فوكو ، التغذية الموجهة للوشائع

Table des matières

Introduction générale :	2
I.1 Introduction :	4
I.2 Types de défaut à détecter par le contrôle non destructif :	5
I.2.1 Principe de détection des défauts :	5
I.3 Méthodologie de développement des systèmes de CND :	5
I.4 Différentes méthodes de CND :	6
I.4.1 Examen visuel	6
I.4.2 Le ressuage	7
I.4.3 La magnétoscopie :	8
I.4.4 Radiographie :	9
I.4.5 Thermographie	9
I.4.6 La mesure du bruit Barkhausen :	10
I.4.7 Ultrasons :	11
I.5 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault :	12
I.5.1 Principe :	12
I.5.2 Effet de peau :	12
I.5.3 Objectifs du CND-CF :	14
I.5.4 Classification des capteurs :	14
I.6 Selon la position :	15
I.6.1 Sonde interne :	15
I.6.2 Sonde encerclant :	16
I.6.3 Bobine ponctuelle (Palpeur)	16
I.6.4 Bobine plate :	16
I.6.5 Sonde interne tournante	17
I.6.6 Selon la Fonction du capteur	17
I.6.7 Capteur double fonction	18
I.6.8 Capteurs à fonctions séparées	18
I.7 Selon le mode :	19
I.7.1 Mode absolu :	19
I.7.2 Mode différentiel	19
I.7.3 Capteurs multiéléments	20
I.7.4 Déplacement	20
I.8 Motif	21
I.9 Paramètres définissant un capteur multiélément	21
I.9.1 La couverture	21
I.9.2 La résolution	21
I.9.3 L'uniformité du signal	22
I.10 Différentes fonctions de capteurs :	22
I.10.1 Capteurs à fonctions séparées :	23
I.11 Différents types de mesures :	23
I.11.1 Capteur à mesure absolue :	23
I.11.2 Capteur à mesure différentielle :	23
I.12 Différents types de bobines :	24
I.12.1 Bobines classiques :	24
I.12.2 Bobines gravées :	24
I.12.3 Bobines souples :	25
I.13 Avantages et limites du CND par courants de Foucault :	25
I.13.1 Avantages :	25
I.13.2 Limites :	26
I.14 Conclusion	26

II.1	Introduction.....	27
II.2	Principe des capteurs inductifs :	27
II.3	Formulation en potentiel vecteur A-V :	28
II.4	Modélisation mathématique du système :	28
II.5	Relations de continuité Conditions aux interfaces :	30
	Dans la cible :	33
II.6	Équation magnétodynamique bidimensionnelle :	33
II.7	Conditions aux limites :	35
II.8	Conclusion :	36
III.1	Introduction :	38
III.2	Résultats de simulation	38
	III.2.1 Modèle développé.....	38
	III.2.1.1 Domaine d'étude.....	38
	III.2.1.2 Maillage	40
	III.2.2 Effet des paramètres électriques et géométriques sur les performances de l'imagerie pour un défaut interne	40
	III.2.2.1 Effet de fréquence	41
	III.2.2.2 Effet des pas de déplacement	44
	III.2.3 Effet des paramètres électriques et géométriques sur les performances de l'imagerie pour un défaut externe.....	47
	III.2.3.1 Effet des pas de déplacement.....	47
III.3	Conclusion	51
	Conclusion générale :	52
	Référence bibliographique	51

Liste des Figures

Figure I. 1– L'examen visuel.....	7
Figure I. 2– Principe du ressuage [1].....	7
Figure I. 3– Principe de la magnétoscopie [13].....	9
Figure I. 4– Principe de la radiographie [3].....	9
Figure I. 5– Détection par thermographie IR [1].....	10
Figure I. 6– Influence des sollicitations mécaniques sur le bruit Barkhausen [4].....	11
Figure I. 7– Principe du CND par Ultrason.....	11
Figure I. 8– Principe du CND par courant de Foucault [6].....	12
Figure I. 9– Répartition des courants de Foucault sous une surface plane [10].....	13
Figure I. 10– Objectif du CND par CF.....	14
Figure I. 11– Critères de classification des capteurs.....	15
Figure I. 12– Sonde interne [9].....	15
Figure I. 13–Bobine ponctuelle (Palpeur) [9].....	16
Figure I. 14– Bobine ponctuelle (Palpeur) [9].....	16
Figure I. 15– Bobine plate [5].....	17
Figure I. 16– Sonde interne tournante [9].....	17
Figure I. 17– Capteur à double fonction [9].....	18
Figure I. 18– Capteur à fonctions séparées [9].....	18
Figure I. 19– Capteur absolue en mode compensé [9].....	19
Figure I. 20– Capteur en mode différentiel [9].....	19
Figure I. 21– Perturbation du signal d'alimentation [9].....	20
Figure I. 22– Représentation schématisé de balayage en peigne et linéaire obtenu respectivement avec un élément simple et un capteur multiélément.....	20
Figure I. 23– – Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution.	21
Figure I. 24– – Uniformité de signal CF sur un montage multiélément [12].....	22
Figure I. 25 – Capteur à fonction double [6].....	22
Figure I. 26 –Capteur à fonctions séparées [6].....	23
Figure I. 27 – Etapes de réalisation des bobines micro moulées [5].....	24
Figure I. 28 – Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple. Chaque couple est constitué d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice [5].....	25
Figure II. 1– Capteur Magnétique ou CM.....	28
Figure II. 2– Capteur a courant de Foucault ou CCF.....	28
Figure II. 3–Equation mise en jeu dans les déférentes régions.....	33
Figure III. 1 Vue 3D du système à étudier.....	39
Figure III. 2 Maillage du dispositif en 3D.....	40
Figure III. 3 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=20\text{khz}$	41

Figure III. 4	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=40\text{kHz}$...	42
Figure III. 5	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=60\text{kHz}$	43
Figure III. 6	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=2\text{mm}^4$	44
Figure III. 7	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=1\text{mm}^4$	45
Figure III. 8	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=0.5\text{mm}^4$	46
Figure III. 9	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=2\text{mm}^4$ défaut externe.....	48
Figure III. 10	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=1\text{mm}^4$ défaut externe.....	49
Figure III. 11	Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=0.5\text{mm}^4$ défaut externe.....	50

Nomenclature

\vec{B} :	Induction magnétique [T].
\vec{H} :	Champ magnétique [A/m].
\vec{E} :	Champ électrique [V/m].
\vec{D} :	Induction électrique [C/m ²].
\vec{A} :	Potentiel vecteur magnétique [Wb/m].
V :	Potentiel électrique scalaire.
f :	Fréquence d'alimentation.
μ_r :	Perméabilité magnétique relative du matériau.
μ_0 :	Perméabilité magnétique du vide.
Z :	Profondeur considérée à l'intérieur de la cible.
J(z) :	Module de la densité de courant en fonction de la profondeur.
δ :	Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.
\mathbf{j} :	Densité de courant [A/m ²].
ρ :	Densité volumique des charges électriques [C/m ³].
μ :	Perméabilité magnétique [H/m].
σ :	Conductivité électrique [S/m].
ϵ :	Permittivité électrique [F/m].
\vec{B}_r :	Induction magnétique rémanente [T].
\vec{T} :	Potentiel vecteur électrique [A/m].
ϕ :	Potentiel scalaire magnétique [A].
\vec{J}_{ind} :	Densité de courant induit.
\vec{J}_{exi} :	Densité de courant d'excitation.
\vec{E} [v/m] :	Champ électrique .
\vec{j} [A/m ²] :	Densité du courant .
ρ [C/m ³]:	Charge volumique.
μ [H/m]:	Perméabilité magnétique.

Abréviations

CND :	Contrôle Non Destructif.
CF :	Courants de Foucault.
CND-CF :	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault .
MEF:	Méthode des Eléments Finis. .
MDF :	Méthode des différences finis .
3D:	Tridimensionnel.

Introduction générale

Introduction générale

Le contrôle non destructif (CND) comprend l'ensemble des techniques et des procédés qui peuvent fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations pour leur utilisation ultérieure. Ces essais ont pour objectif la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. En ce sens, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits.

A travers son objectif, le CND est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, qui mettent en œuvre ou qui utilisent des matériaux, des produits et des structures de toute nature. A l'heure où la qualité et la sécurité sont devenues des impératifs difficilement contournables, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et certaines activités où la sécurité est primordiale telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Les techniques du CND sont utilisées en contrôle de qualité pour assurer la bonne qualité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance. Elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de déceler le manque de matière, les fissures, ...etc.

Les principales techniques du CND sont le ressuage, la magnétoscopie, les ultrasons, le contrôle par rayons X, la thermographie stimulée et les courants de Foucault. qui sera le sujet de ce mémoire, [1].

Ce mémoire comportera trois chapitres structurés comme suit :

- Le premier chapitre sera dévoué à une recherche bibliographique concernant les techniques du CND ainsi que leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'application. On terminera cette partie par un Tableau récapitulatif sur les différentes techniques et leurs applications.
- Au deuxième chapitre, (la partie sera dédiée au capteur inductif, les paramètres qui influent sur le contrôle, la mise en œuvre, c'est-à-dire aux différents types de sondes, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle), par contre la deuxième partie sera consacrée aux rappels des Principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique (équation de Maxwell) pour formuler les équations en régime de la magnétodynamique, ces équations sont des équations différentielles aux dérivées partielles dont la solution dépend entièrement des conditions aux limites.

- Quant au troisième chapitre, on présentera les dispositifs à étudier, plaque avec alésage pour une inspection interne et tube pour une inspection externe, ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques. pour clôturer ce chapitre nous présentons les résultats de simulation avec les interprétations appropriées.
- Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués

Tout l'intérêt du contrôle par courant de Foucault est la simplicité de sa mise en œuvre, sa robustesse et sa sensibilité aux défauts type manque de matière (fissures, inclusion, corrosion...), en effet les capteurs utilisés pour ce genre de contrôle sont de simples bobines qui génèrent un champ magnétique pour induire des courants dans les pièce à contrôler, ce qui s'avère idéale pour des pièces métalliques conductrices d'électricité même dans le cas ou elles présentent une géométrie complexe , [2] [3] [4].

L'objectif de ce travail est l'étude d'un système de Détection par Courant de Foucault Multiéléments Alimenté en Mode Harmonique Multiplexé application aux Structure Aéronautique travers une simulation d'un capteur qui présente des défauts de profondeurs différentes. La résolution des équations formulées s'est faite par la méthode des éléments finis implantés sous environnement COMSOL multiphysics. Ce logiciel permet de simuler un nombre important de phénomène physique et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF, [1] [5] [6].

Chapitre I. Généralités sur les techniques de (CND)

I.1 Introduction :

Le Contrôle non destructif (CND) est l'utilisation des méthodes physiques qui testeront les matériaux, les composants et les assemblages pour détecter les défauts de leur structure sans nuire à leur utilité future. Le CND se préoccupe de révéler des défauts dans la structure d'un produit. Les méthodes de CND vont du simple au compliqué. L'inspection visuelle est la plus simple de toutes. Imperfections de surface invisible à l'œil peut être révélé par des méthodes pénétrantes ou magnétiques. Si des défauts de surface vraiment graves sont détectés, il est souvent inutile de procéder à des examens plus compliqués de l'intérieur par ultrasons ou radiographie. Les méthodes CND qui sont couramment utilisées comprennent l'inspection visuelle ou optique, les tests de pénétration de liquide, les tests de particules magnétiques, les tests par courants de Foucault, les tests radiographiques et les tests ultrasoniques. Les méthodes CND sont celles utilisées uniquement pour des applications spécialisées et sont par conséquent limitées dans leur utilisation, comprennent la radiographie neutronique, l'émission acoustique, les tests thermiques et infrarouges, la détection des contraintes, les techniques micro-ondes, les tests d'étanchéité, l'holographie, etc. Il faut également se rappeler qu'aucune de ces méthodes ne peut nous apporter de solutions à tous les problèmes possibles, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas des alternatives optionnelles mais plutôt complémentaires les unes des autres [8] [9] .

Les techniques de CND sont nombreuses. Citons, [6] :

- Le ressuage
- La magnétoscopie
- Les courants de Foucault
- Les ultrasons
- La radiographie

Auxquelles il faut ajouter l'émission acoustique (en plein développement), la tomographie et la neutronographie. Certains classent également la thermographie, l'holographie, le contrôle d'étanchéité et l'analyse de signature mécanique parmi les techniques de CND [7].

I.2 Types de défaut à détecter par le contrôle non destructif :

Différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe,) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service). Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes catégories. les défauts surfaciques et les défauts internes :

- Les défauts surfaciques sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'aspect, c'est-à-dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.
- Les défauts internes sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses [9].

I.2.1 Principe de détection des défauts :

Exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée, [4] [8] :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- Détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée, [8].

I.3 Méthodologie de développement des systèmes de CND :

Indépendamment de la technique de CND utilisée, l'élaboration d'un système peut être décomposée en cinq phases fortement couplées figure (I.1). Tout d'abord, on se fixe l'objectif du contrôle qui est souvent, [2] [11] :

- Caractérisation (électrique, magnétique et géométrique) des matériaux ;
- Recherche des défauts dans la structure des matériaux ;
- Caractérisation des défauts.

La première phase consiste à essayer de comprendre et d'analyser l'interaction entre le champ émis par le capteur et la pièce à contrôler.

Ensuite, vient la traduction des phénomènes mis en jeu par des modèles analytiques, semi-analytiques ou numérique. Ces outils de simulation sont à la base de la conception et l'optimisation des capteurs. Ils permettent aussi d'inverser le rapport capteur/pièce, cela permet à partir de signaux recueillis de s'informer des caractéristiques de la pièce (ou du défaut), [10].

I.4 Différentes méthodes de CND :

Les techniques de CND utilisées sont diverses : la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, le bruit Barkhausen, les courants de Foucault... Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui sera l'objet d'étude de ce manuscrit, [2] [10] [7].

I.4.1 Examen visuel

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. Elle nécessite uniquement les "bons yeux" d'un opérateur, [2] [11] [10] [12], Fig (I.1).

Les procédures d'Examen visuel comprennent :

- Vérification de l'état de surface de l'éprouvette ;
- Vérification de l'alignement des surfaces de contact ;
- Vérification de la forme du composant ;
- Vérification des signes de fuite ;
- Vérification des défauts latéraux inter.



Figure I. 1– L'examen visuel.

I.4.2 Le ressuage

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchant, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement, [2] [10] [7], Fig (I.2)



Figure I. 2– Principe du ressuage [1].

Par ordre décroissant de sensibilité et de coût, les processus de pénétration des liquides peuvent être classés comme :

1. Colorant fluorescent post-émulsionnable ;
2. Pénétrant fluorescent amovible au solvant ;
3. Pénétrant fluorescent lavable à l'eau ;
4. Colorant visible post-émulsionnable.
5. Pénétrant de colorant visible amovible au solvant ;
6. Colorant visible lavable à l'eau.

Certains des avantages des tests de ressuage sont les suivants :

- Coût relativement faible ;
- Méthode CND hautement portable ;
- Très sensible aux discontinuités fines et serrées ;
- Méthode assez simple ;
- Peut être utilisé sur une variété de matériaux ;
- Toutes les discontinuités de surface sont détectées en une seule opération, quelle que soit l'orientation.

Certaines des limites des tests de ressuage sont les suivantes :

- La surface d'essai doit être exempte de tout contaminant (saleté, huile, graisse, peinture, rouille, etc.) ;
- Détecte uniquement les discontinuités de surface ;
- Ne peut pas être utilisé sur des échantillons poreux et est difficile à utiliser sur des surfaces très rugueuses ;
- L'enlèvement de tous les matériaux pénétrants, après le test, est souvent nécessaire ;
- Il n'y a pas de méthode simple pour produire un enregistrement permanent.
-

I.4.3 La magnétoscopie :

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructive pour la détection des défauts débouchant ou sous-jacents (de 1 à 2 mm de la surface) dans les matériaux ferromagnétiques. Elle consiste à créer un flux magnétique intense dans les structures entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux ou, de façon plus marginale, par une mesure directe avec des capteurs. Il s'agit, dans la majorité des cas, d'une inspection visuelle réalisée par un opérateur. La sensibilité de détection est liée en partie à la granulométrie des poudres magnétiques utilisées, qui doivent être très homogènes. Le contrôle peut se faire de façon automatisée sur des pièces de forme simple, en particulier toutes les pièces axisymétriques du type barres et tubes, à l'aide de capteurs électriques sensibles aux champs magnétiques, [13] [5], Fig (I.3).

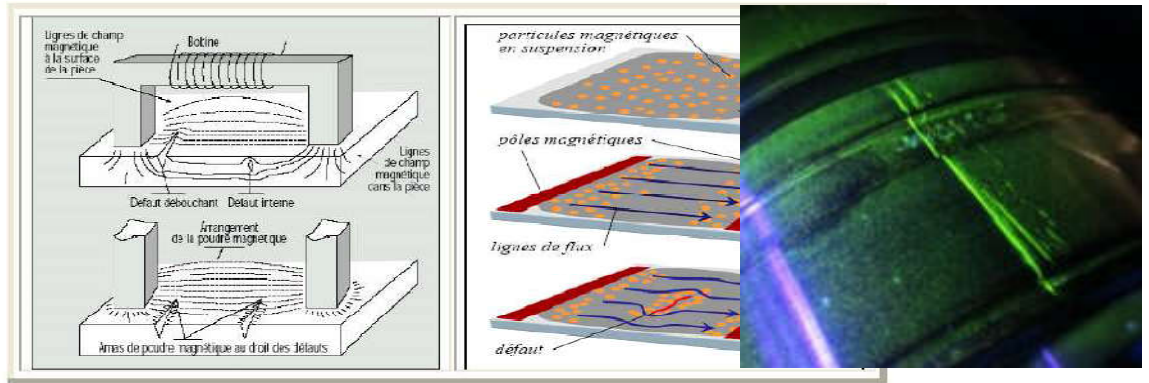


Figure I.3– Principe de la magnétoscopie [13].

I.4.4 Radiographie :

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou γ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé. Comme l'illustre la figure 1.3. Ce contrôle peut s'appliquer à de très nombreux types de matériaux pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure..., au stade de la production ou en maintenance. Les défauts se présentant perpendiculairement à la direction du faisceau sont plus difficilement détectables, [4] [7] [8], Fig (I.4).

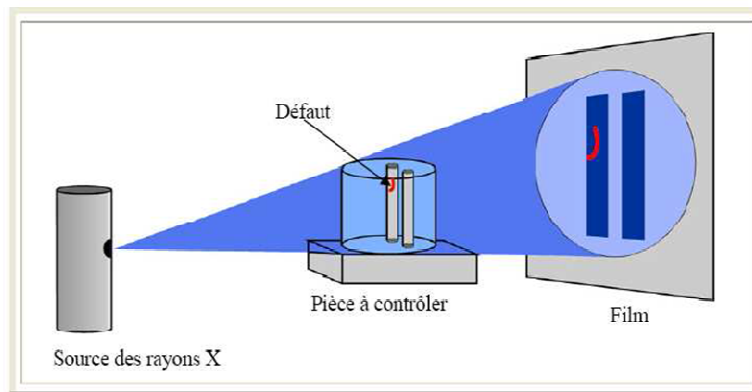


Figure I.4– Principe de la radiographie [3].

I.4.5 Thermographie

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain

temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres, [4] [7] [8], Fig (I.5).

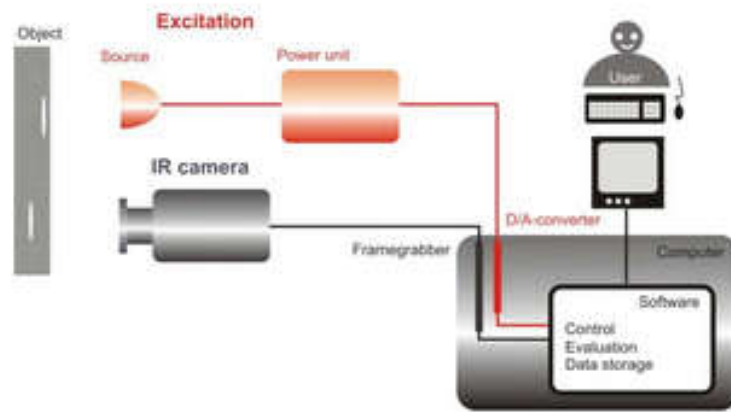


Figure I. 5– Détection par thermographie IR [1].

I.4.6 La mesure du bruit Barkhausen :

L'effet Barkhausen est dû à une émission locale d'ondes électromagnétiques qui se créent au coeur même des cristaux d'un matériau sous l'effet d'un champ magnétique. Basée sur la microstructure magnétique et sa réorganisation, la technique Barkhausen est très proche du matériau et permet ainsi d'avoir des informations précises sur son état métallurgique et son niveau de contraintes résiduelles. Les émissions Barkhausen peuvent être mesurées par l'intermédiaire de sondes encerclantes ou de sondes de côté constituées de bobines plates posées à la surface de l'échantillon. Le bruit Barkhausen est généralement représenté par sa courbe enveloppe, tracée en fonction du champ appliqué, et qui a la forme d'un pic, [7] [11], Fig (I.6).

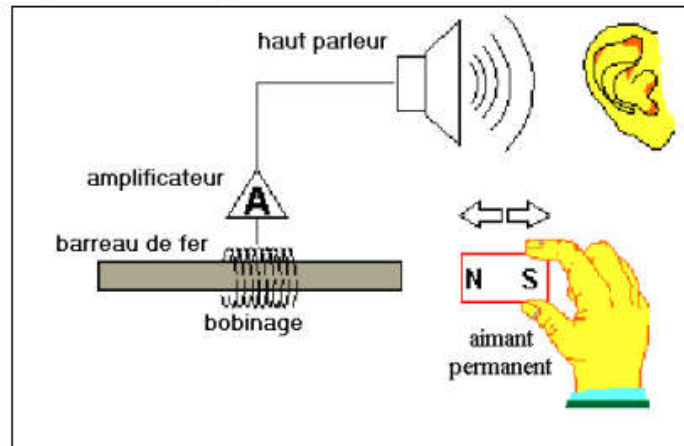


Figure I. 6– Influence des sollicitations mécaniques sur le bruit Barkhausen [4].

I.4.7 Ultrasons :

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce) [6], Fig (I.7).

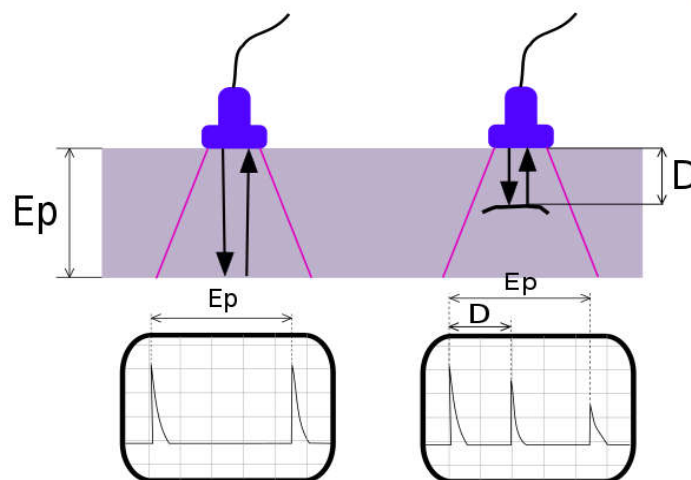


Figure I. 7– Principe du CND par Ultrason.

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

I.5 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault :

I.5.1 Principe :

Le contrôle par courant de Foucault est l'une des méthodes les plus privilégiées parmi les méthodes électromagnétiques de CND. Cette méthode ne s'applique qu'aux pièces électriquement conductrices et s'adapte très bien aux pièces cylindriques (barres, tubes,) pour mettre en évidence les défauts superficiels ou sous-cutanés ou une quelconque variation des paramètres physiques du matériau à contrôler (σ , μ), [8]. Pour appliquer la technique de CND par CF, une bobine (appelée émetteur ou excitateur) parcourue par un courant alternatif est placée au voisinage de la pièce conductrice testée. Des courants de Foucault se développent dans la pièce en formant des boucles. Ces courants ont la même fréquence que le courant émetteur et génèrent, [1][13] [14], Fig (I.8).

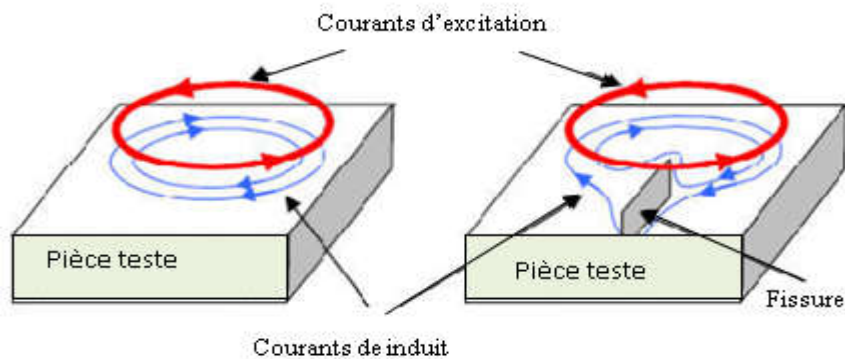


Figure I. 8– Principe du CND par courant de Foucault [6].

En CND par CF, on utilise des fréquences généralement faibles (au plus quelques dizaines de MHz), ce qui implique que la longueur d'onde est grande par rapport aux dimensions de la pièce. Ceci permet de négliger l'effet de propagation de l'onde, [13] [14].

I.5.2 Effet de peau :

Ce phénomène existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant quand on s'enfonce dans un conducteur. Le module de la densité de courant, dans une pièce d'épaisseur infinie excitée par une nappe de courants extérieure et parallèle à son plan, est représenté dans la Figure 1.9

L'équation de l'effet de peau est exprimée par la relation suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (0.1)$$

- f : Fréquence d'alimentation.
- μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau.
- μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.
- σ : Conductivité électrique.

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

$$J(z) = J_0 \cdot e^{-z\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (0.2)$$

- Z : Profondeur considérée à l'intérieur de la cible[m].
- $J(z)$: Module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/m*m].
- σ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau[m].

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

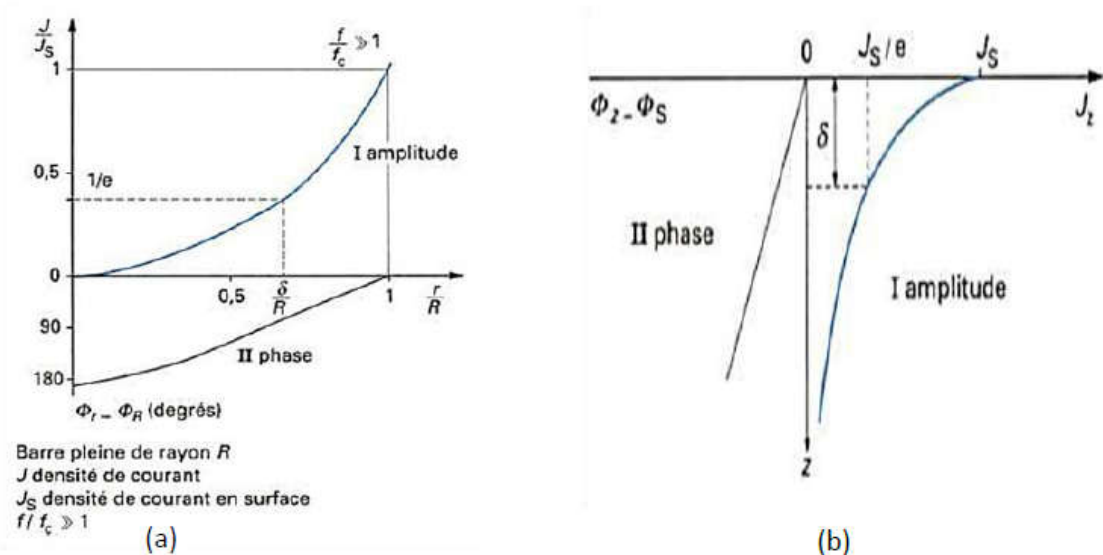


Figure I. 9– Répartition des courants de Foucault sous une surface plane [10].

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas il s'agit de mesurer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) représentative de la variation d'un flux.

Cette mesure s'effectue souvent par l'intermédiaire d'une bobine [3][6].

I.5.3 Objectifs du CND-CF :

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

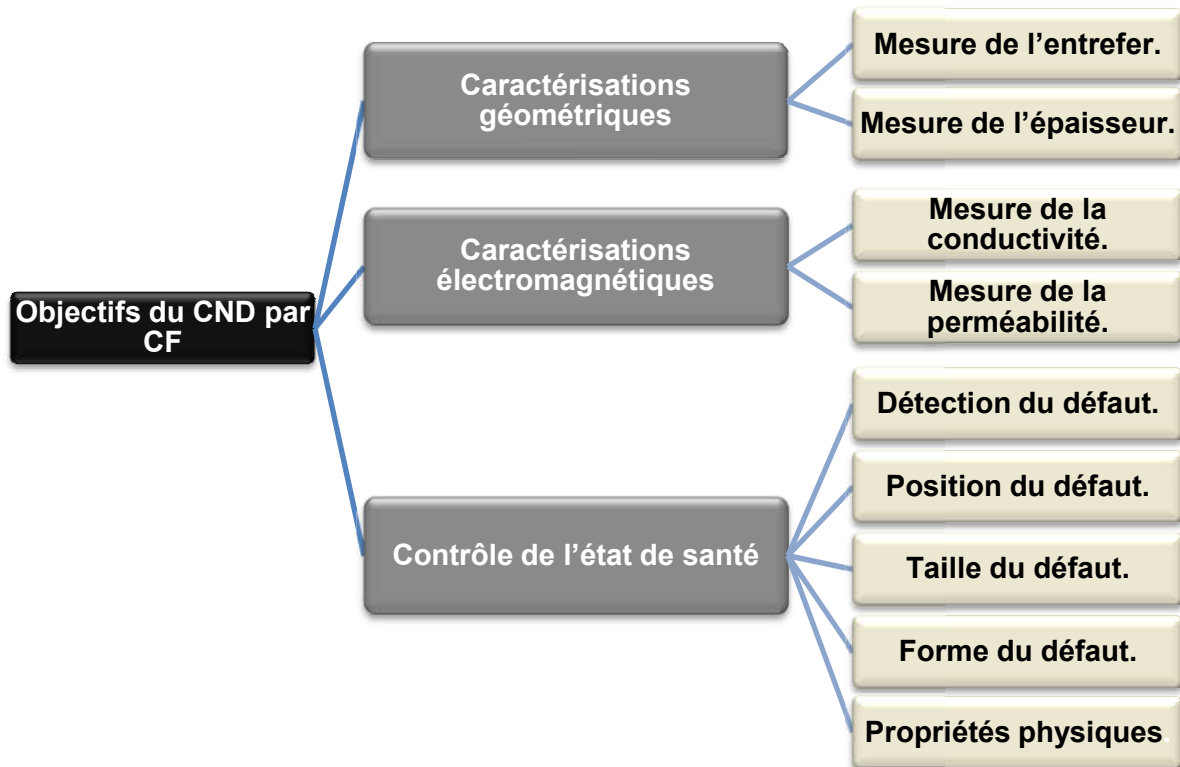


Figure I. 10– Objectif du CND par CF.

I.5.4 Classification des capteurs :

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle. La résume les trois critères déjà cités, [2] [4] [7], Fig (I.11).

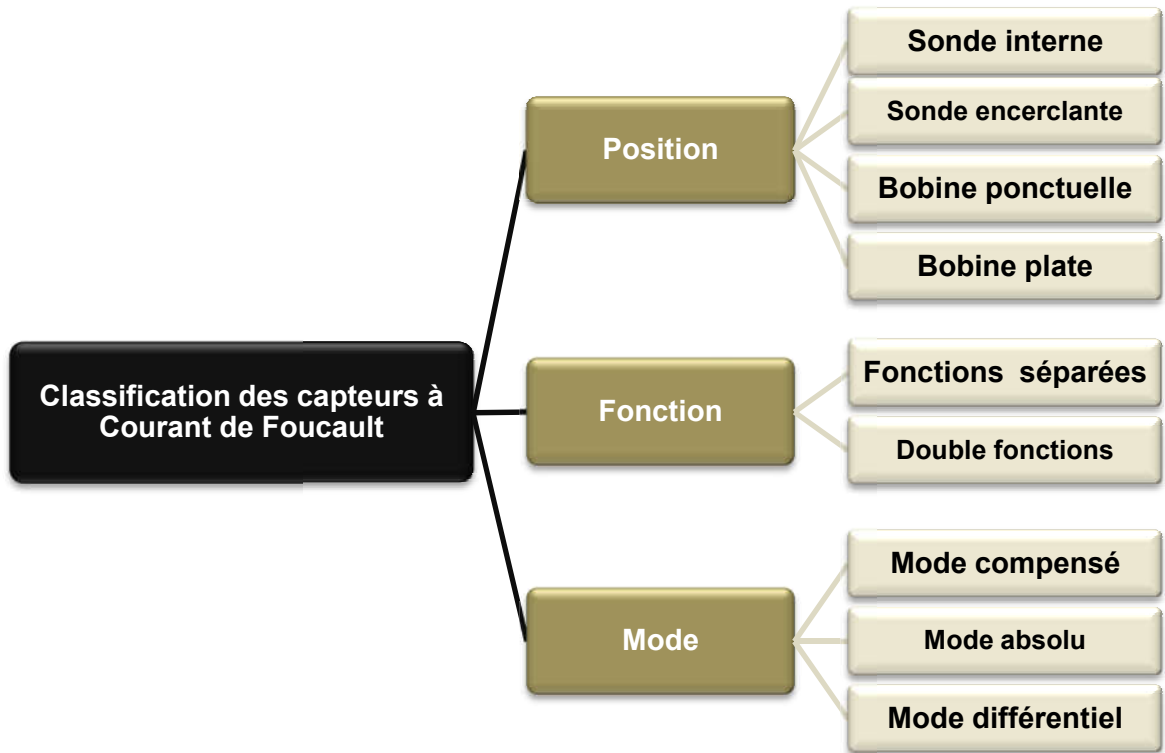


Figure I. 11– Critères de classification des capteurs.

I.6 Selon la position :

I.6.1 Sonde interne :

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau [1], Fig (I.12).

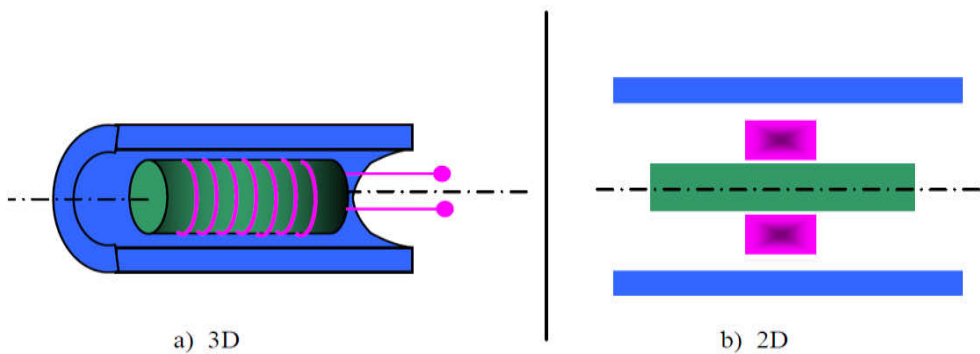


Figure I. 12– Sonde interne [9].

I.6.2 Sonde encerclant :

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner (Figure I.13). Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres. [9]

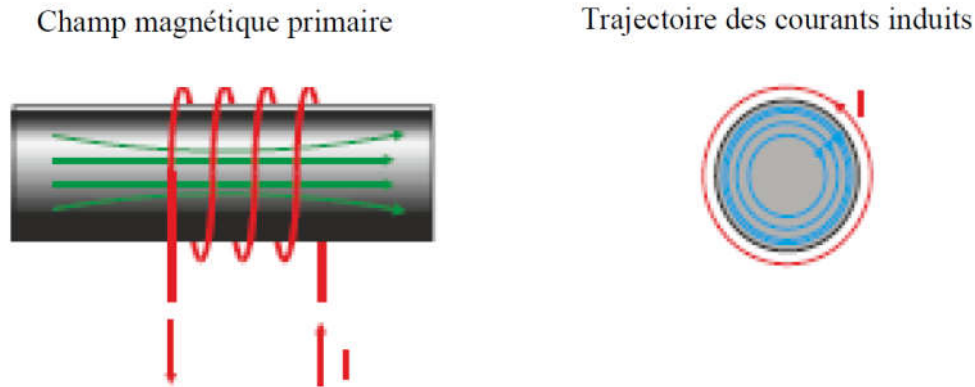


Figure I. 13–Bobine ponctuelle (Palpeur) [9].

I.6.3 Bobine ponctuelle (Palpeur)

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube [1], Fig (I.14).

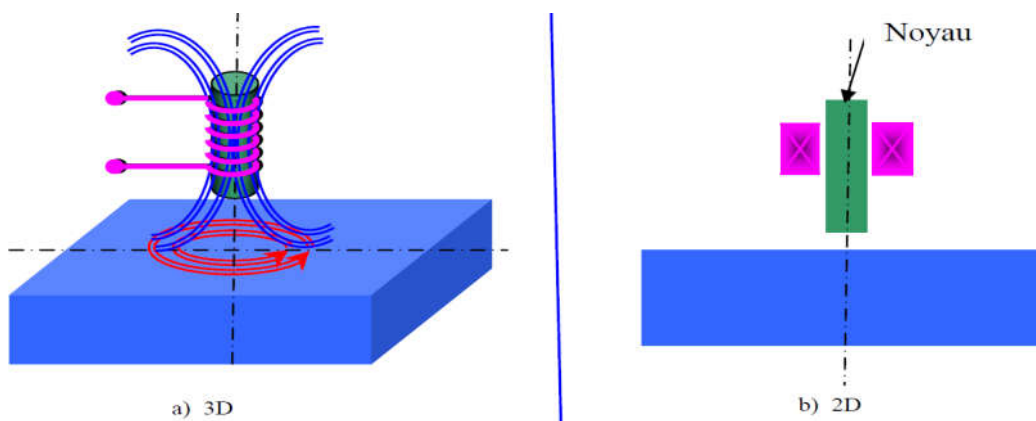


Figure I. 14– Bobine ponctuelle (Palpeur) [9].

I.6.4 Bobine plate :

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large [10], Fig (I.15).

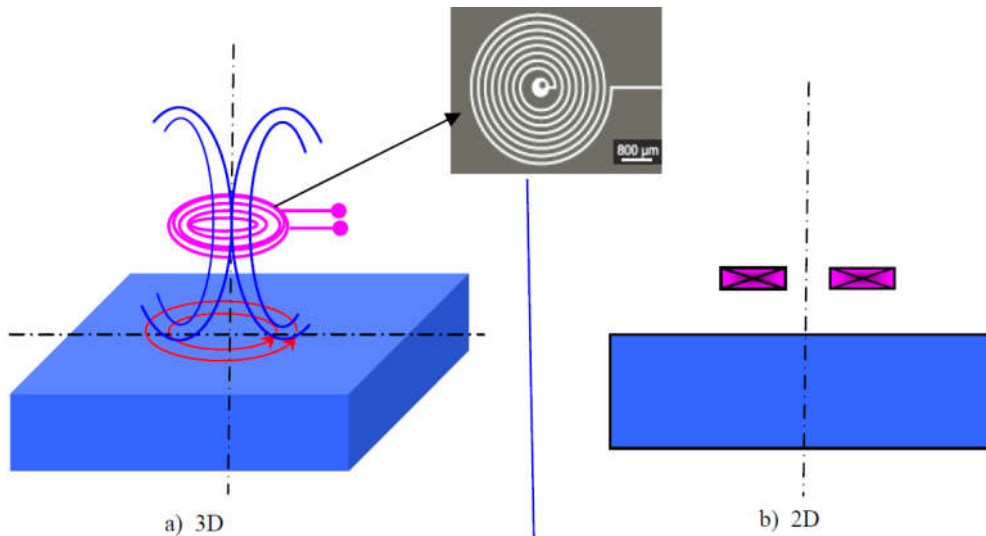
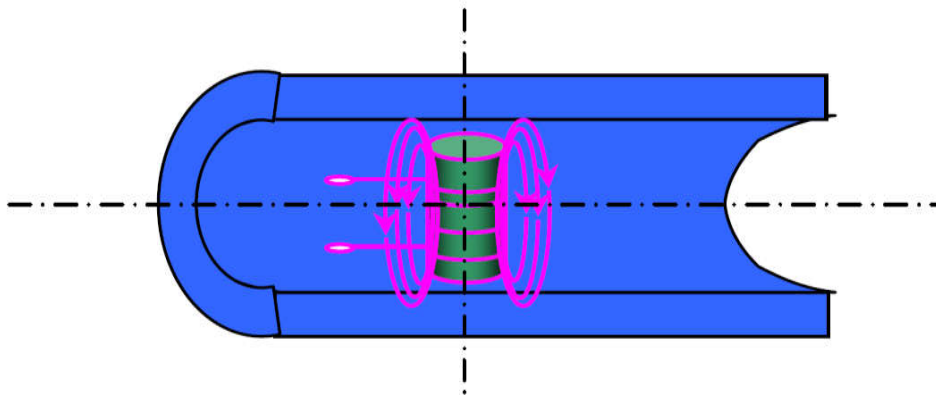


Figure I. 15– Bobine plate [5].

I.6.5 Sonde interne tournante

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



[1].

Figure I. 16– Sonde interne tournante [9].

I.6.6 Selon la Fonction du capteur

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés [8] , Fig (I.16).

I.6.7 Capteur double fonction

Le montage le plus simple est celui de la sonde à double fonctions constituée d'une seule bobine. Les fonctions d'émission et de réception sont assurées par la même bobine. L'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement [8] , Fig (I.17).

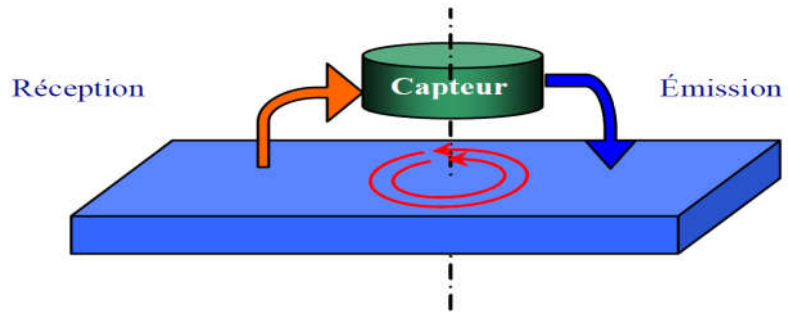


Figure I. 17– Capteur à double fonction [9].

I.6.8 Capteurs à fonctions séparées

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci, Fig (I.18).

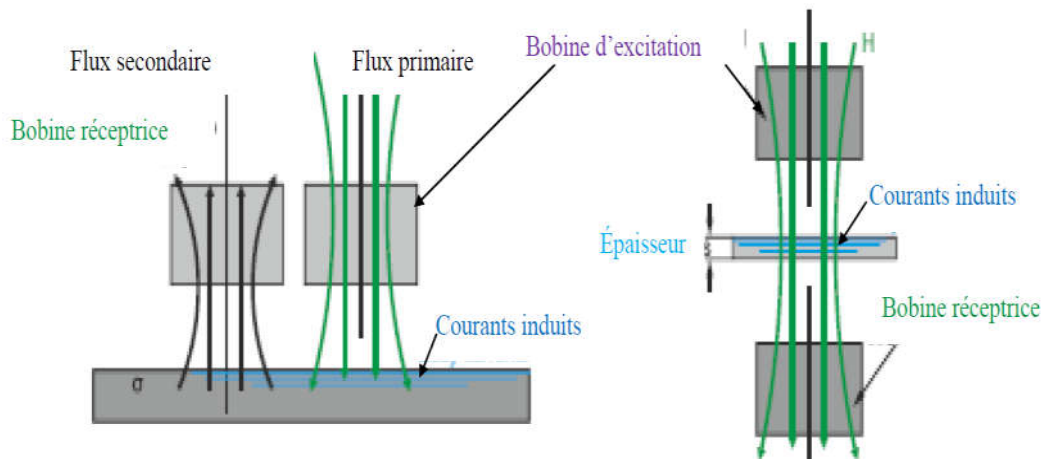


Figure I. 18– Capteur à fonctions séparées [9].

I.7 Selon le mode :

I.7.1 Mode absolu :

Ce type de capteur est sensible à tous les paramètres géométriques et électromagnétiques de l'environnement. Typiquement le récepteur est constitué d'un seul élément. Avant le contrôle d'une pièce un étalonnage peut être effectué sur une pièce de référence (maquette), [8] , Fig (I.19).

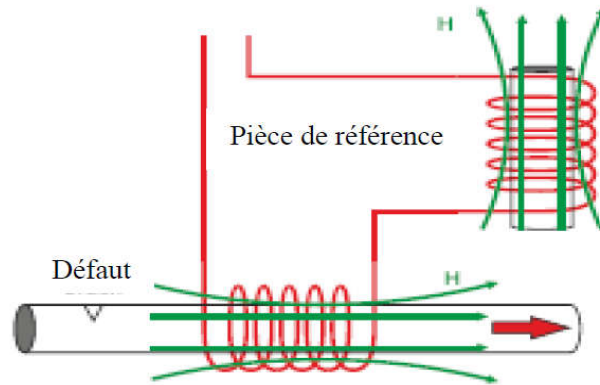


Figure I. 19– Capteur absolue en mode compensé [9].

I.7.2 Mode différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés, Fig (I.20).

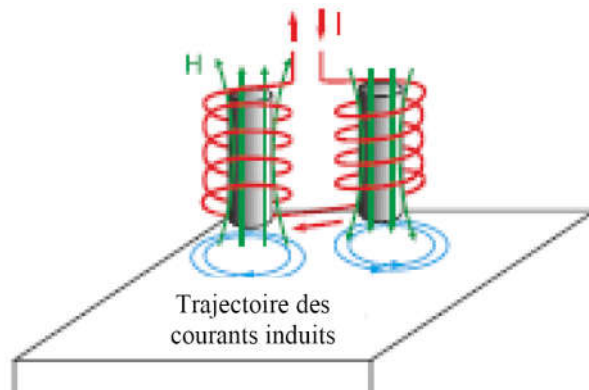


Figure I. 20– Capteur en mode différentiel [9].

En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle. Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée [9] , Fig (I.21).

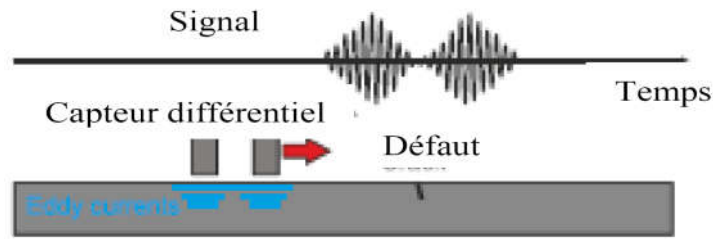


Figure I. 21– Perturbation du signal d'alimentation [9].

I.7.3 Capteurs multiéléments

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

I.7.4 Déplacement

Pour produire des capteurs multiéléments, plusieurs bobines placées de manière spécifique (ex. côte à côte, avec un motif particulier) dans un même assemblage, sont électroniquement activées selon un séquençement dédié. Ceci permet d'obtenir une zone active plus large et donc de diminuer efficacement le nombre de balayage nécessaire à l'inspection d'un composant donnée comparé au capteur conventionnel. Par exemple, un balayage mono-élément en peigne est maintenant remplacé par un balayage linéaire de capteur multiéléments (Figure I.22). A noter qu'il est aussi possible d'effectuer des balayages en peigne avec des capteurs multiéléments, augmentant encore plus la zone d'inspection et donc la rapidité du contrôle [12].

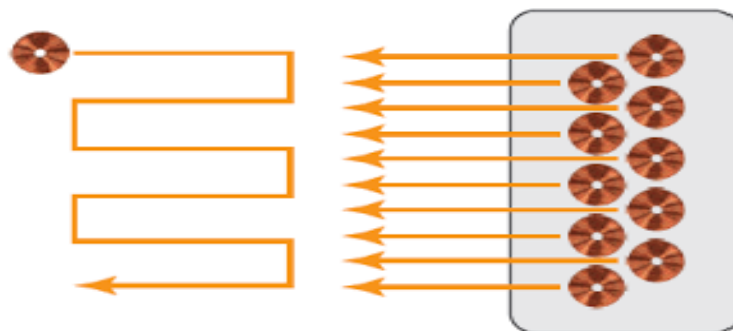


Figure I. 22– Représentation schématisé de balayage en peigne et linéaire obtenu respectivement avec un élément simple et un capteur multiélément.

I.8 Motif

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

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

I.9 Paramètres définissant un capteur multiélément

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

I.9.1 La couverture

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

I.9.2 La résolution

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

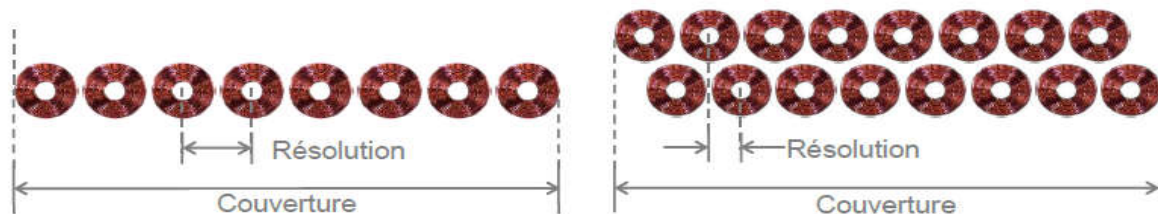


Figure I. 23-- Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution [12].

I.9.3 L'uniformité du signal

D'un capteur est sa capacité à obtenir la même signature CF pour un défaut donné quel que soit l'élément du capteur le détectant. Ce paramètre est primordial pour maximiser la probabilité de détection du défaut recherché. Il est affecté par le design physique des éléments et le motif du capteur. De manière générale, les éléments d'un capteur CFM sont agencés de manière à atteindre un niveau de sensibilité adéquat et uniforme [12], Fig (I.24).

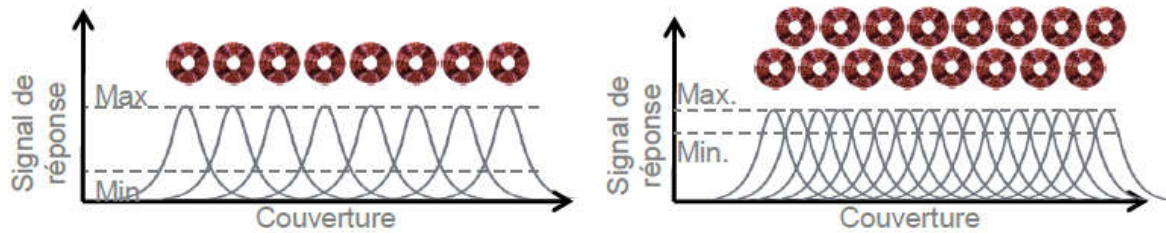


Figure I. 24 – Uniformité de signal CF sur un montage multiélément [12].

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

I.10 Différentes fonctions de capteurs :

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés, [4], Fig (I.25).

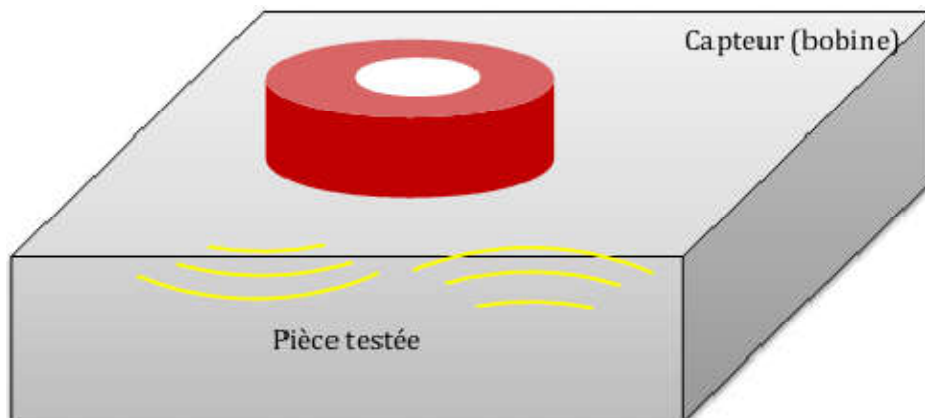


Figure I. 25 – Capteur à fonction double [6].

I.10.1 Capteurs à fonctions séparées :

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci, [3] [11].

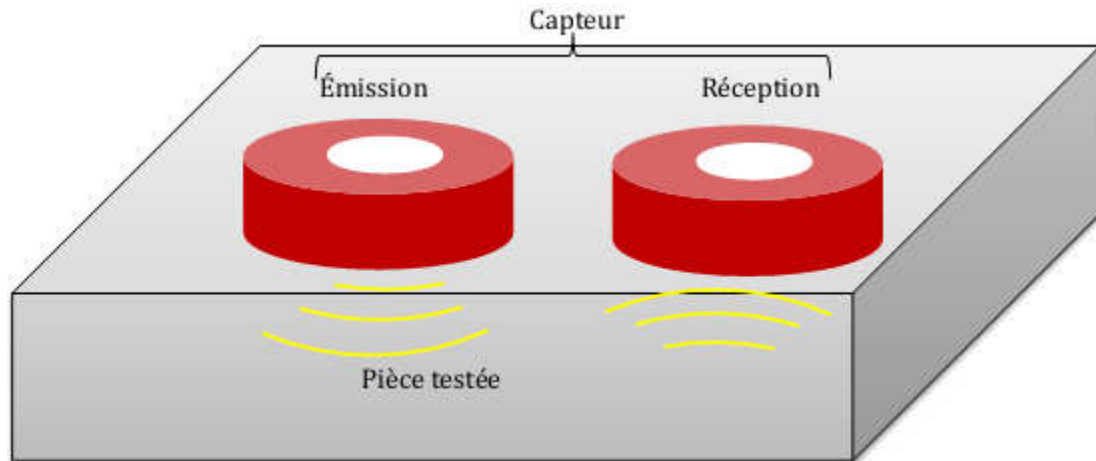


Figure I. 26 –Capteur à fonctions séparées [6].

I.11 Différents types de mesures :

I.11.1 Capteur à mesure absolue :

Ce type de capteur est sensible à tous les paramètres géométriques et électromagnétiques de l'environnement. Typiquement le récepteur est constitué d'un seul élément. Avant le contrôle d'une pièce un étalonnage peut être effectué sur une pièce de référence (maquette), [5].

I.11.2 Capteur à mesure différentielle :

Ce mode de mesure est, par opposition à un capteur à mesure absolue, sensible uniquement à des variations locales de l'objet à inspecter. Il permet de détecter les changements dus aux discontinuités lors du déplacement du capteur le long du produit examiné en se débarrassant des perturbations lentes telles que la variation du lift-off, conductivité... Typiquement, le récepteur est constitué d'au moins deux éléments voisins. Cette approche revient à effectuer la différence de mesures réalisées conjointement sur les deux éléments. Le signal fourni par un capteur différentiel est idéalement nul lorsque la pièce est saine, [2] [5].

I.12 Différents types de bobines :

La bobine est un élément qui peut réaliser l'émission et/ou la réception. Il existe deux principales classes de bobine, [5] [6].

I.12.1 Bobines classiques :

La bobine est fabriquée par l'enroulement hélicoïdal d'un conducteur (cuivre) émaillé autour d'un noyau. Le noyau est généralement diélectrique (isolant) ou magnétique (ferrite...). L'utilisation d'un noyau magnétique permet de focaliser le champ magnétique autour de la bobine, [5] [6].

I.12.2 Bobines gravées :

Il existe deux types de bobines gravées :

- Bobines réalisées sur circuit imprimé en utilisant les technologies PCB standards,
- Micro bobines (taille de l'ordre du mm) réalisées en salle blanche par des moyens de micro technologies. La fabrication fait appel à différentes étapes de dépôts et de gravure telles que montrées dans la figure I.27, [5] [6].

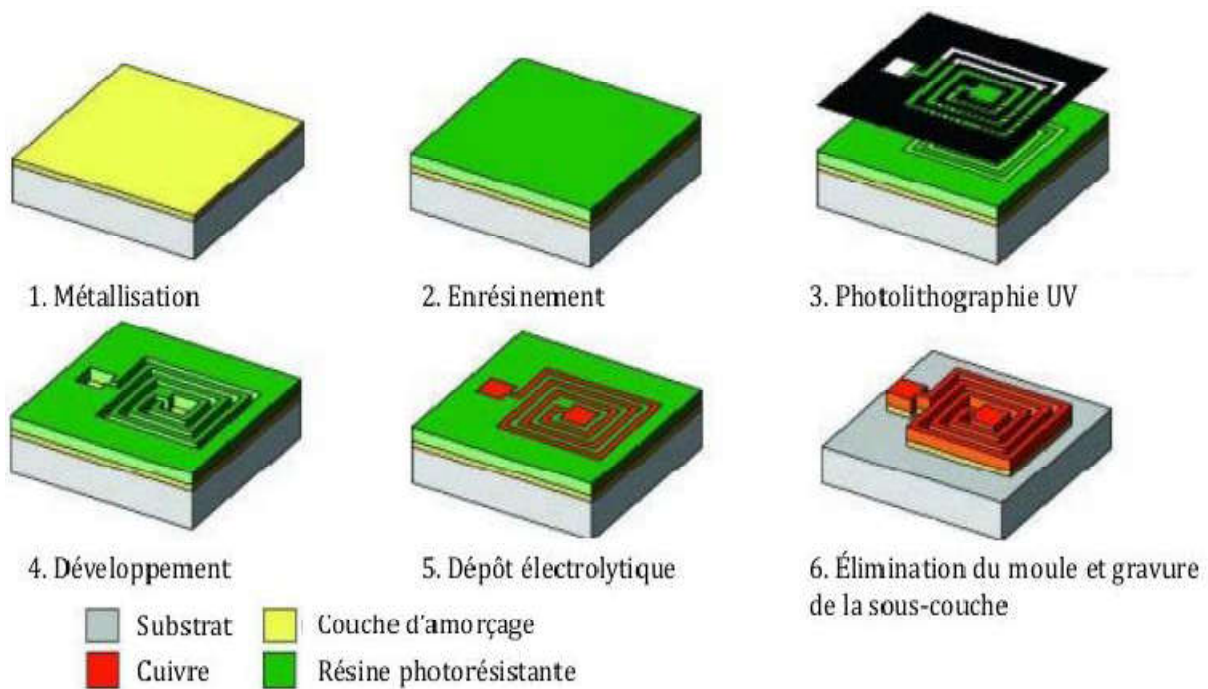


Figure I. 27 – Etapes de réalisation des bobines micro moulées [5].

I.12.3 Bobines souples :

L'utilisation de capteurs traditionnels dans une application de CND par CF est mal adaptée pour l'examen d'objets dont la surface est de forme complexe (comme la variation du rayon de courbure). Le capteur n'épousera pas la forme de la pièce et son couplage magnétique avec celle-ci sera mauvais. Des études spécifiques sont alors nécessaires, ce qui alourdit les coûts de développement. Pour pallier à ces obstacles et apporter aux utilisateurs des solutions efficaces, un recours à un capteur flexible apparaît comme une solution adéquate. En déplaçant le capteur sur la surface irrégulière, sa flexibilité lui permet d'épouser la surface de la pièce testée en minimisant la variation du lift-off durant le scan des surfaces complexes, [5] , Fig (I.28).

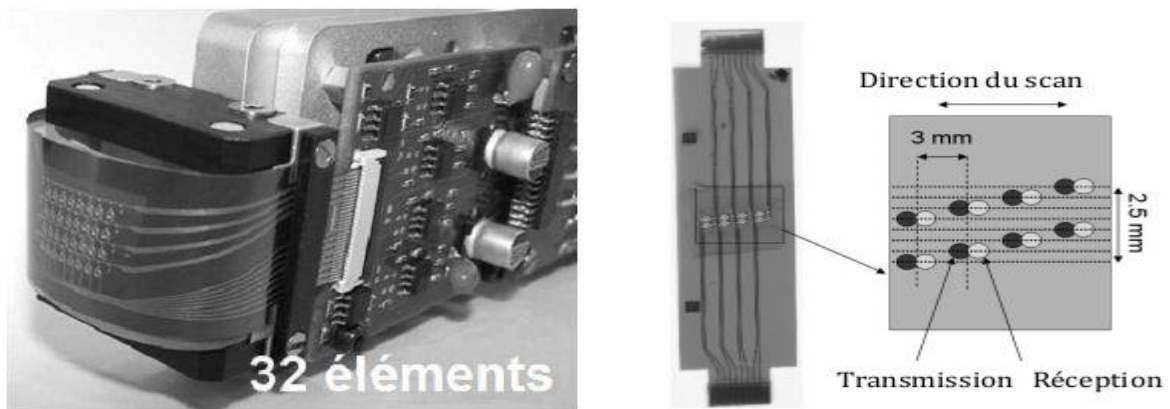


Figure I. 28 – Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple. Chaque couple est constitué d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice [5].

La conception de capteurs souples fait l'objet de développements récents. On voit ainsi apparaître des capteurs mettant en œuvre des petites bobines montées sur un support souple ou encore de grandes bobines souples. La figure 1.11 montre un exemple de capteur développé au CEA constitué de plusieurs bobines gravées sur support flexible, [5].

I.13 Avantages et limites du CND par courants de Foucault :

I.13.1 Avantages :

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

- Simplicité de mise en œuvre ;
- Rapidité de balayage et de détection ;
- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement en fois (quelques mm) dans tout matériau conducteur ;

- Aucune nuisance ou pollution ;
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.

I.13.2 Limites :

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

- Il ne s'applique qu'aux matériaux éclectiquement conducteurs ;
- Il n'est pas adapté a détecté pour détecter des défauts à forte profondeur;
- L'interprétation des signaux est souvent complexe ;
- Probabilité d'instabilité de lift-off du capteur CF durant la procédure du scan qui peut ;
- Conduire à des perturbations au niveau de la détection de la variation d'impédance.

I.14 Conclusion

Le CND consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation des paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses, ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité, [7]. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs. Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des différentes techniques du contrôle non destructif en générale et plus particulièrement le contrôle par capteurs à courants de Foucault et les différentes sondes utilisées pour ce type de contrôle.

La modélisation d'un contrôle par courants de Foucault requière la connaissance des lois qui le régissent, ce qui fera l'objet du chapitre suivant, [2] [3].

Chapitre II. Capteur et Modélisation pour le CND par Courants de Foucault

II.1 Introduction

Le contrôle non destructif par les courants de Foucault est fondé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour développer des modèles mathématiques précises afin de faire des simulations et des améliorations dans la conception des capteurs efficace et minimiser les problèmes rencontrés dans le contrôle non destructifs.

La mise en évidence des différentes technologies des capteurs inductifs et des signaux qui sont indispensable au le CND par courant de Foucault est présenté au début de ce chapitre. Après ça on va définir l'équation qui régit notre système qui est l'équation de la magnétodynamique en régime quasi stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique et le potentiel électrique scalaire $A^{\vec{}} - V$.

En suite la résolution de cette équation qui est une équation différentielle aux dérivées partielles se fait avec des méthodes numériques en l'occurrence la méthode des éléments finis.

II.2 Principe des capteurs inductifs :

Un capteur inductif est principalement constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité, sur lequel sont bobinés un ou plusieurs enroulements parcourus par un courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et / ou magnétique dans l'entrefer du circuit modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de réluctance et de pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible [6].

Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants surfaciques dénommés courants de Foucault, qui à leur tour génèrent un champ magnétique opposant au champ excitateur. On parle dans ce cas de "Capteurs à courants de Foucault" ou "CCF", Fig (II.1).

L'effet produit par l'approche d'une cible magnétique non conductrice se traduit par une modification des lignes de champ, qui se trouvent attirées par le matériau en regard. Le dispositif fonctionne alors en "Capteur Magnétique" ou "CM", Fig (II.2).

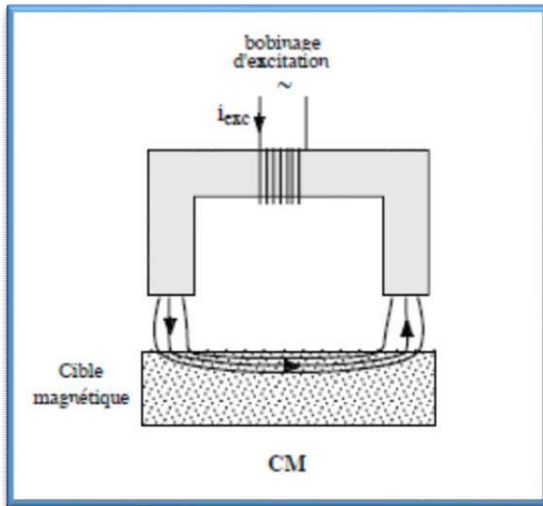


Figure II. 1– Capteur Magnétique ou CM

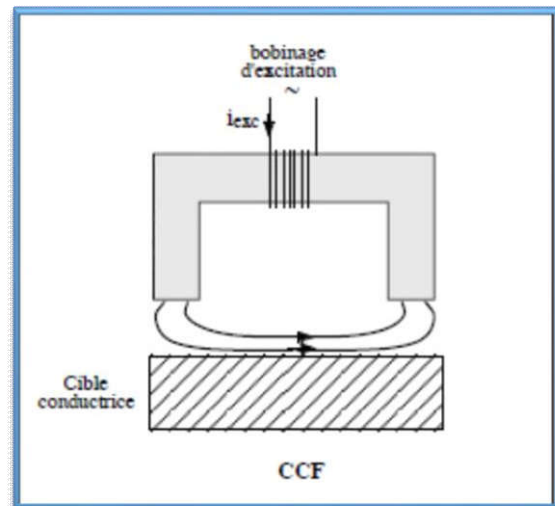


Figure II. 2– Capteur a courant de Foucault ou CCF

II.3 Formulation en potentiel vecteur A-V :

Il existe deux familles de formulations pour la résolution des équations de Maxwell. L'une repose sur le calcul du champ électrique et l'autre sur le calcul du champ magnétique [11].

Cependant du fait des fortes discontinuités de certaines variables aux interfaces entre deux régions de propriété différentes, la résolution directe des équations de Maxwell est délicate. Pour faciliter la résolution, ces équations sont transformées en équations de potentiels. Ceci conduit à la définition des formulations duales en potentiels combinés. La formulation la plus connue est la formulation en $A^{\vec{}} - V$.

Cette formulation utilise le potentiel vecteur magnétique $A^{\vec{}}$ dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique V uniquement dans les régions conductrices [9].

II.4 Modélisation mathématique du système :

Tous les phénomènes d'électromagnétisme variables dans le temps et dans l'espace dans nos études des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell suivantes, [14] [15] :

- Loi de Maxwell Faraday (induction) :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (0.2)$$

- Loi de Maxwell Gauss (électrique) :

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad (0.2)$$

- Loi de Maxwell Ampère :

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (0.3)$$

- Loi de Maxwell Gauss (magnétique) :

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (0.4)$$

\vec{E} [V/m] Et \vec{H} [A/m]: Champ électrique et magnétique.

\vec{D} [A · s/m] Et \vec{B} [T]: Induction électrique et magnétique.

\vec{J} [A/m²] Et ρ [C/m³]: Densité du courant et la charge volumique.

Tel que :

$$\vec{J} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_{exi}$$

Avec :

- \vec{J}_{ind} : La densité de courant induit.
- \vec{J}_{exi} : La densité de courant d'excitation.

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré sont, [14] [16] [24] :

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (0.5)$$

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

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \end{cases} \quad (0.7)$$

- ϵ [F/m]: Permittivité diélectrique.
- $\epsilon_0 = 8.8510^{-12}$ [F/m]: Constante diélectrique du vide.
- ϵ_r : Permittivité électrique relative du milieu.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (0.8)$$

Où :

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

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasi-stationnaires), ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites, dans notre cas d'étude nous allons considérer que, [14] [15] [16] :

Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de 10^6S.m^{-1} , et ϵ_0 de l'ordre de $8.85 \cdot 10^{-32} \text{F/m}$ jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHz nous avons $\omega \cdot \epsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \mathbf{0}$$

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

Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient, [12][14][16] :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (0.9)$$

$$\text{div}(\vec{D}) = 0 \quad (0.10)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J} \quad (0.11)$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (0.12)$$

II.5 Relations de continuité Conditions aux interfaces :

La méthode des éléments finis, lorsque l'inconnue recherchée aux nœuds est le potentiel vecteur magnétique, impose la continuité à l'interface de deux milieux de nature différente. Si $A1$ et $A2$ sont respectivement les potentiels du milieu 1 et 2 à l'interface alors, [2] [3] :

$$A1 = A2$$

La continuité du potentiel assure la continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface. Compte tenu des équations de passage qu'on rappelle ci-après, [2] [3] [28] :

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (0.13)$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (0.14)$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (0.15)$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K} \quad (0.16)$$

- \vec{n} : Le vecteur normal a la surface.
- \vec{K} : Représente la composante de la densité de courant perpendiculaire à l'axe du plan.

De plus les vecteurs ont généralement trois composantes augmentant de ce fait le nombre d'inconnues, et par la même le temps de calcul, [7].

Pour pallier à ce problème, on fait appel à une entité purement mathématique connue sous le nom de potentiel, si ce potentiel n'a aucun sens physique, sa variation, elle, est très significative, [3].

La relation (II.12) nous renseigne sur l'existence d'un vecteur \vec{A} , et nous permet d'écrire [28] :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (0.17)$$

Pour assurer l'unicité de la solution nous allons imposer une condition de jauge (condition de coulomb) de telle sorte que :

$$\mathbf{div}(\vec{A}) = 0$$

En remplaçant (II.13) dans (II.9), on obtient :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\overrightarrow{rot}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (0.18)$$

Le rotationnel étant associatif on aura

$$\overrightarrow{rot}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (0.19)$$

On remarque que la quantité $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$ est conservée donc c'est une dérivée d'un potentiel V alors :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad}(V) \quad (0.20)$$

Alors la loi d'ohm (II.8) est :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) \quad (0.21)$$

Ce qui me permet de définir les deux densités de courant cité précédemment :

$$\vec{j}_{\text{ind}} = -\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (0.22)$$

$$\vec{j}_{\text{exi}} = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (0.23)$$

La combinaison entre l'équation (II. 6) et (II.13) donne :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (0.24)$$

En remplaçant (II.18) dans (II.19), en tenant compte que l'alimentation est sinusoïdale $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \vec{j}_s \quad (0.25)$$

ω : La pulsation d'alimentation.

$j^2 = -1$: Nombre complexe.

Avec :

$$\vec{j}_s = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

L'équation (II.20) représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} avec un terme source.

Dans la plupart des problèmes de modélisation, les phénomènes électromagnétiques dans le domaine du contrôle non destructif réalisés jusqu'à présent, considèrent une bobine inductrice ou le courant est imposé, une région ferromagnétique ou conductrice qui représente la cible à contrôler et la troisième région qui représentera l'air environnant, [2] [3]

L'adaptation de l'équation (II.20) aux différentes régions constituera le dispositif d'étude et nous permet d'écrire :

Dans l'air :

La région qui entoure le dispositif est caractérisée par l'absence de source ainsi qu'une conductivité électrique nulle, l'équation qui lui sera associée s'écrira :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = 0 \quad (0.27)$$

Dans l'inducteur :

Les inducteurs sont des fils fins de cuivre, l'équation (II.20) pourra alors s'écrire sur la forme suivante :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \vec{j}_s \quad (0.28)$$

Dans la cible :

La pièce à contrôler est obligatoirement conductrice, l'équation électromagnétique dans cette région s'écrit alors :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = 0 \quad (0.29)$$

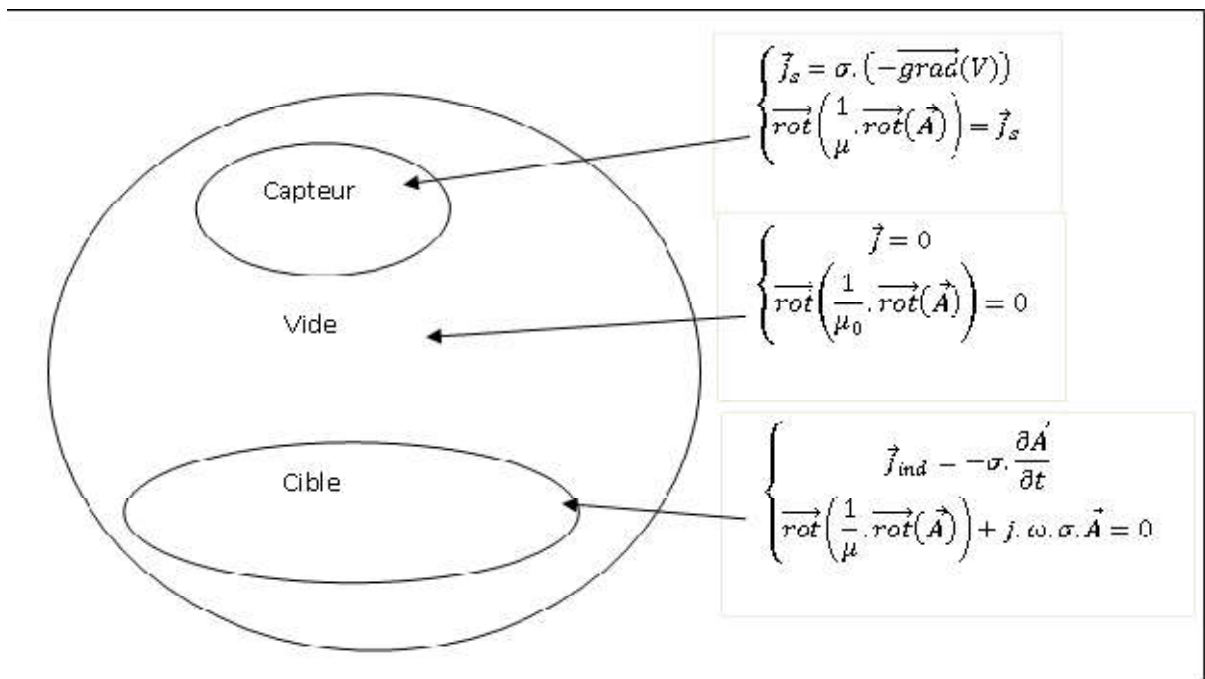


Figure II. 3—Equation mise en jeu dans les différentes régions.

II.6 Équation magnétodynamique bidimensionnelle :

Dans les problèmes bidimensionnels on peut avoir deux types :

Le premier concerne les systèmes à symétrie translationnelle, ou aucune variation n'est enregistrée sur l'une des trois directions d'un plan cartésien. On choisit généralement l'axe (oz), [3] [12].

Dans l'autre cas on trouve les systèmes axisymétriques, ou aucune variation n'a lieu le long de la direction ortho radiale (φ). Dans un plan cylindrique (r, φ, z)

Le potentiel vecteur dans ce cas n'a qu'une seule composante parallèle à (oz). A partir (II.8) et (II.16) il vient que \vec{A} et \vec{E} doivent être dans la même direction que] alors : $\vec{A}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, A_z)$ et $\vec{j}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, j_z)$.

En coordonnée cylindrique le potentiel vecteur magnétique ne présente que la composante ortho radiale, d'où : $\vec{A}(0, A_\varphi, 0)$ et $\vec{j}(0, j_\varphi, 0)$.

D'où l'équation du rotationnel peut s'écrire en coordonner cartésiennes :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (0.30)$$

Avec \vec{k} le vecteur unitaire selon Oz Et en coordonner cylindriques :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] \cdot \vec{u}_\varphi \quad (0.31)$$

Avec \vec{u}_φ le vecteur unitaire selon la direction orthogonale.

a) Dans l'air :

En coordonnée cartésienne :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = j_z \quad (0.32)$$

En coordonnée cylindrique :

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = 0 \quad (0.33)$$

b) Dans l'inducteur :

En coordonnée cartésienne :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = j_z \quad (0.35)$$

En coordonnée cylindrique :

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = j_{s\varphi} \quad (0.36)$$

c) Dans la charge :

En coordonnée cartésienne :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_z}{\partial t} = -j_z \quad (0.37)$$

En coordonnée cylindrique :

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = 0 \quad (0.38)$$

Ces équations étant posées, leur solution dépend entièrement des conditions de limites qui lui seront associées on peut distinguer trois sortes de conditions aux limites qu'on peut généralement rencontrer.

II.7 Conditions aux limites :

- Condition de Dirichlet (ou condition du premier problème aux limites) : on cherche une solution de l'équation qui prend des valeurs données sur le bord du domaine, on cherche donc à résoudre le système d'équation, [9] [17] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ A = A_0 & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (0.39)$$

- Condition de Neumann (ou condition du deuxième problème aux limites): on cherche la solution de l'équation différentielle dont on connaît la valeur du gradient sur le bord du domaine de résolution, notant que n la normale unitaire dirigée vers l'extérieur de Ω , on cherche donc à résoudre le problème, [2][4][12]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial n} = A_n & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (0.40)$$

- Condition de mixte (ou condition de Dirichlet Neumann) :
on cherche une solution qui vérifie la troisième condition de bord qui est, [12] [17] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial n} = c & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (0.41)$$

Où: a, b sont des constantes et A et 1 l'inconnus du problème.

On note que :

- Δ : L'opérateur Laplacien
- f : Terme source.
- Ω : Le domaine d'étude.
- $\partial\Omega$: Le bord du domaine d'étude.

II.8 Conclusion :

Ce chapitre a été essentiellement consacré au rappel des équations de l'électromagnétisme, et à leurs formulations en termes de potentiel vecteur magnétique dans le repère cartésien pour ensuite faciliter le passage aux coordonnées cylindriques. On obtient ainsi l'équation de la magnétodynamique transitoire pour les adaptés finalement à notre dispositif d'étude, [2] [3].

**CHAPITER III: Simulation du
Comportement de Système Capteur CF
Multiéléments pour Tube Echangeur de
Chaleur**

Chapitre III. Simulation du Comportement de Système Capteur CF Multiéléments pour Tube Échangeur de Chaleur

III.1 Introduction :

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides.

La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou chauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile à refroidir ou à chauffer directement, par exemple l'eau d'un circuit de refroidissement ou de chauffage.

On distingue différents modes d'échange thermique qui interviennent dans un échangeur de chaleur. Différents types d'échangeur sont utilisés par conséquent.

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

Dans ce chapitre, nous étudierons les performances de détection d'un capteur multiéléments opérant sur un tube d'échangeur de chaleur sous Comsol_multiphysics.

III.2 Résultats de simulation

III.2.1 Modèle développé

III.2.1.1 Domaine d'étude

Le domaine d'étude (vue 3D et 2D) est composée d'un tube d'échangeur en cuivre ainsi que les huit bobines sont données par la Figure III.1.

- l'air
- la plaque
- la bobine3

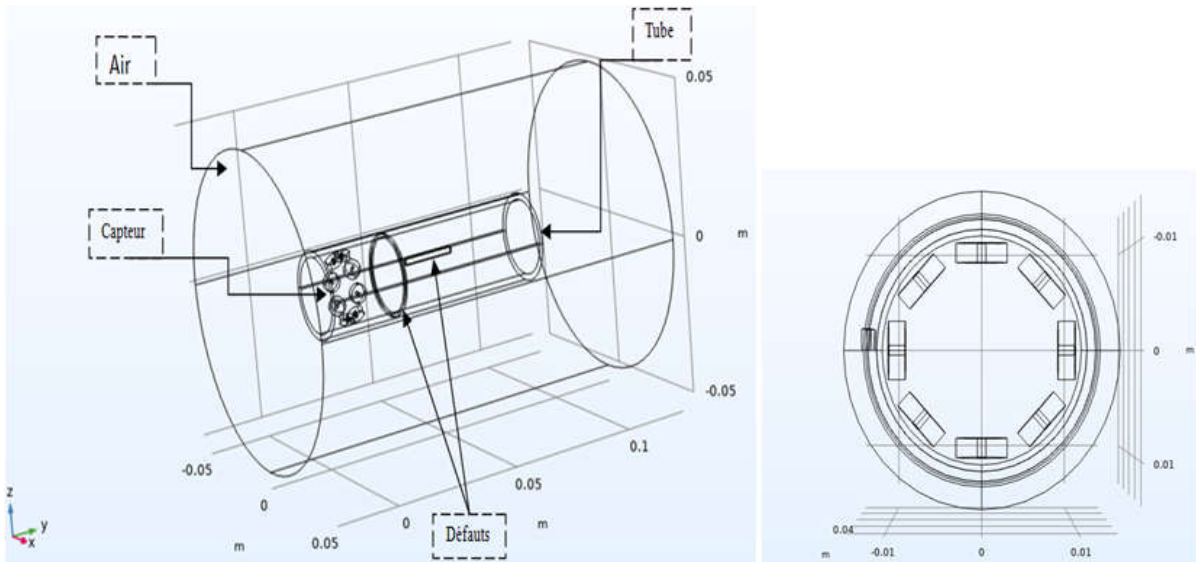


Figure III. 1 Vue 3D du système à étudier.

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

Tableau III. 1 Description de la configuration

Capteur			Tube		
Rayon externe (mm)	3		Rayon externe (mm)	14	
Rayon interne (mm)	0.5		Rayon interne (mm)	12	
Hauteur (mm)	2		Longueur (mm)	90	
Nombre de spires	125		Conductivité électrique(S*m ⁻¹)	5.87*10e7	
Pas angulaire(°)	45		Défaut cylindrique		
Défaut Parallélépipède			Type de défaut	Interne	Externe
Type de défaut	Interne	Externe	Rayon externe (mm)	13	14
Longueur (mm)	20	20	Rayon interne (mm)	12	12.5
Largeur (mm)	2	2	Largeur (mm)	1	1
Profondeur (mm)	1	1.5	Profondeur (mm)	1	1.5

III.2.1.2 Maillage

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

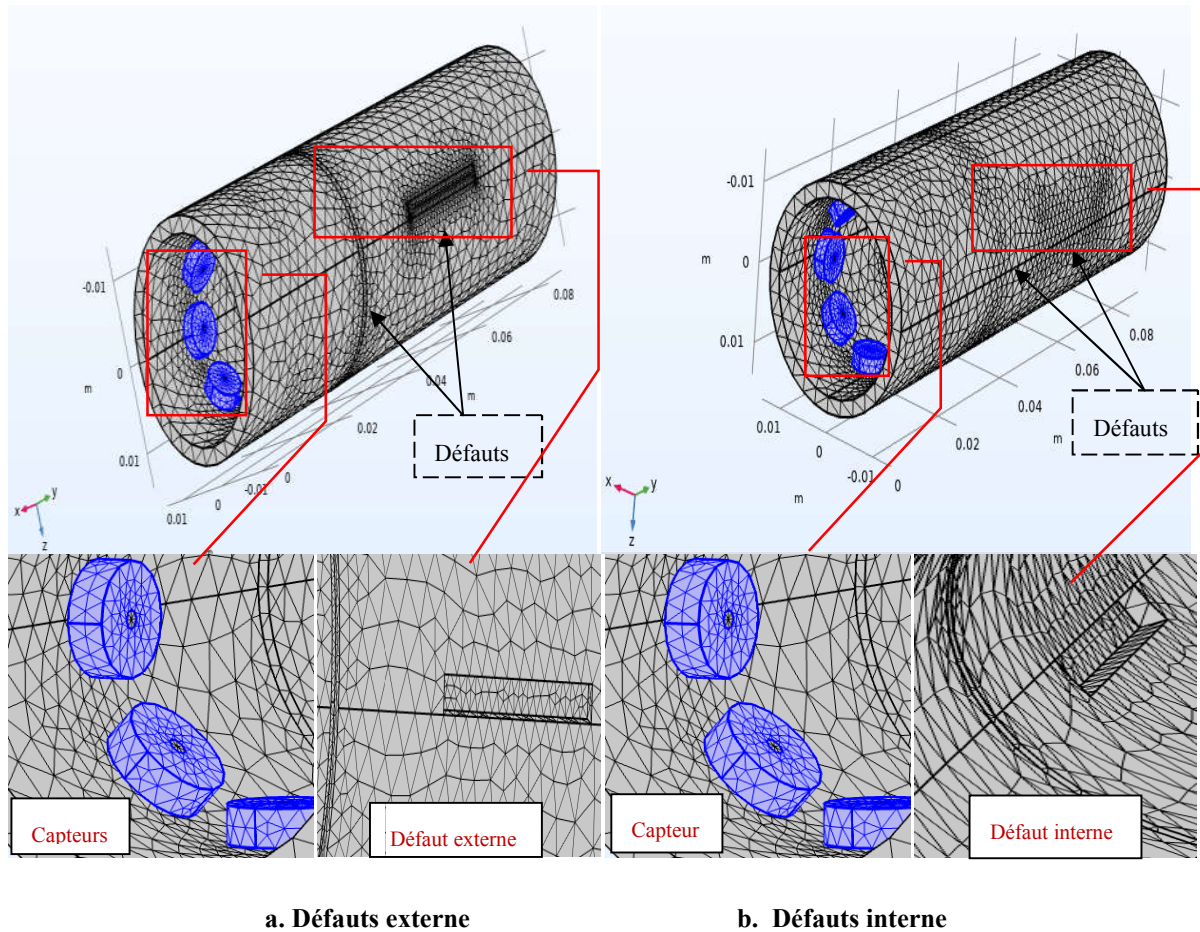


Figure III. 2 Maillage du dispositif en 3D.

III.2.2 Effet des paramètres électriques et géométriques sur les performances de l'imagerie pour un défaut interne

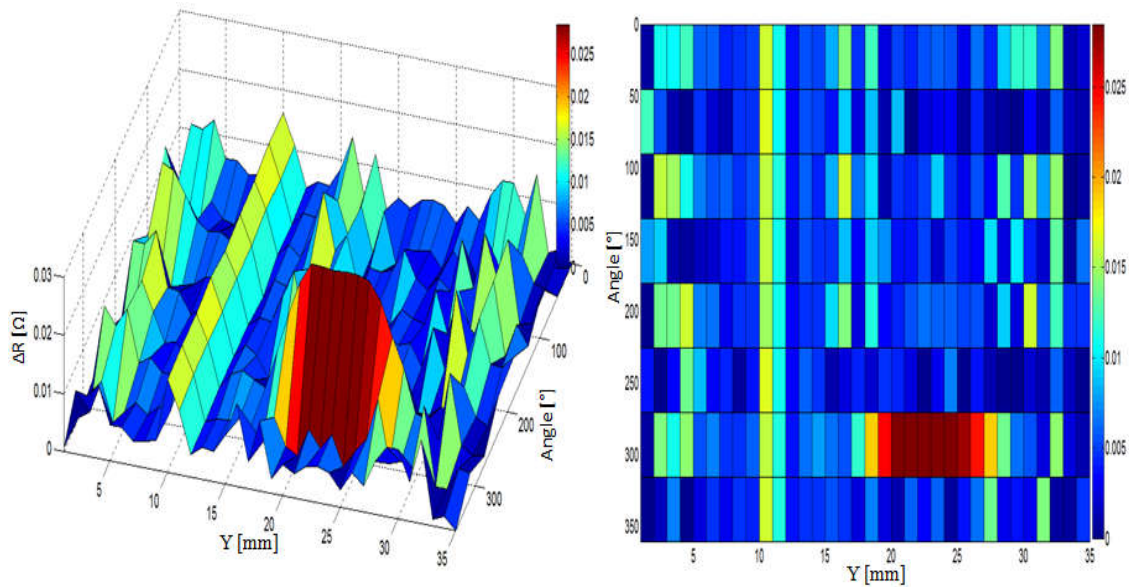
Dans cette partie, nous proposerons l'étude de l'effet de la fréquence et du pas de déplacement sur la qualité et les performances de la détection de défauts par imagerie par capteurs à courants de Foucault en mode multiplexé pour un échangeur de chaleur muni de défaut interne.

III.2.2.1 Effet de fréquence

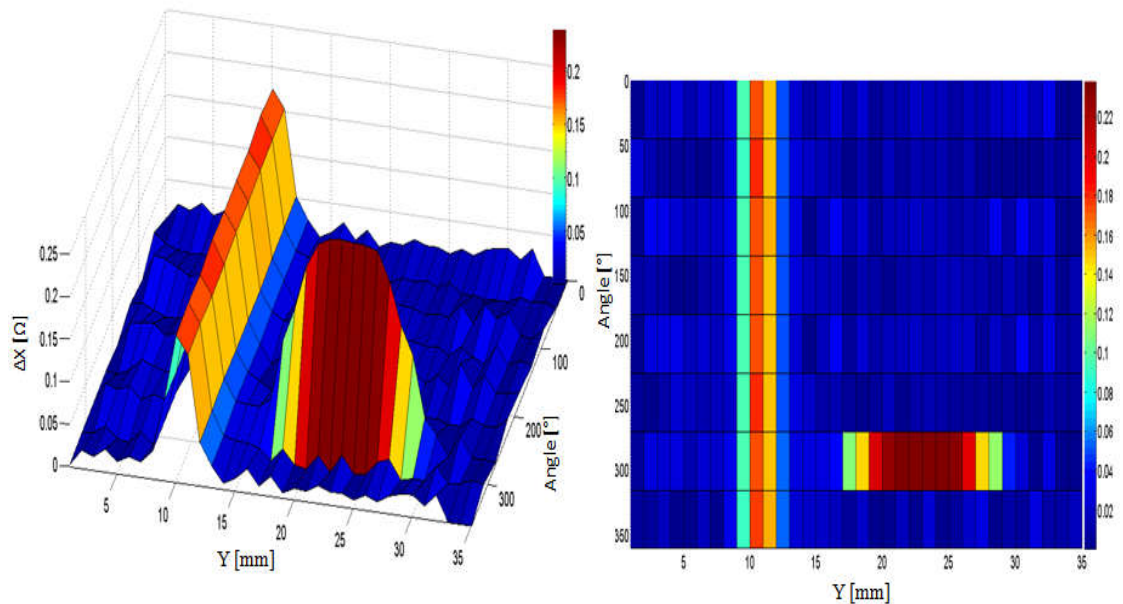
Les Figures ci-dessous montrent l'effet de la variation de la fréquence sur le signal de détection de défauts (vue en 3D et 2D).

Les résultats sont donnés pour les fréquences 20khz, 40khz, et 60khz avec un pas de 2mm.

➤ a. fréquence: 20kHz



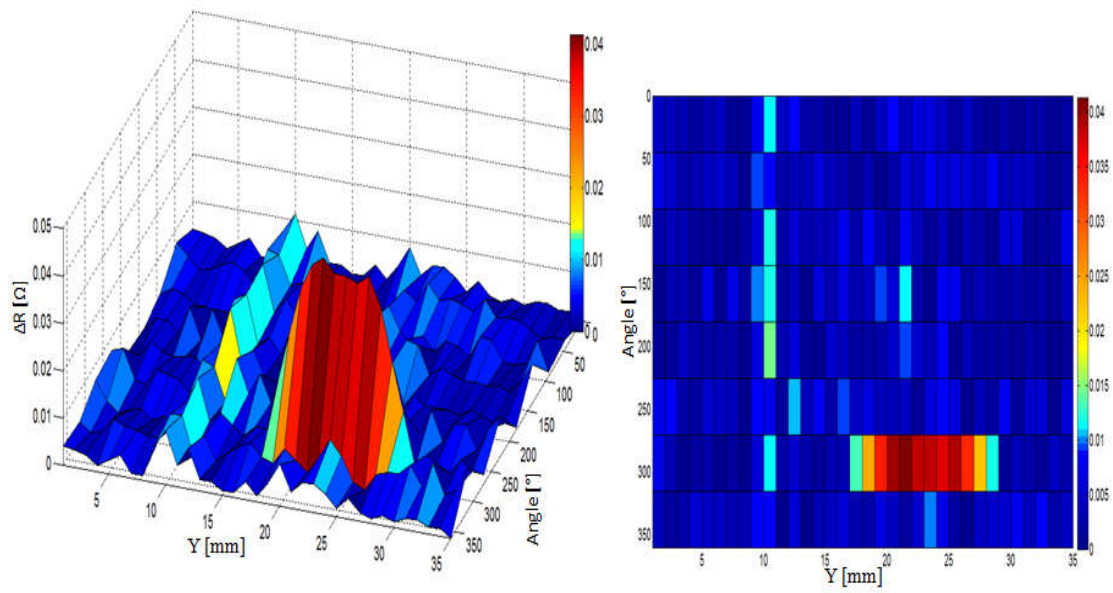
a. Partie réelle (résistance)



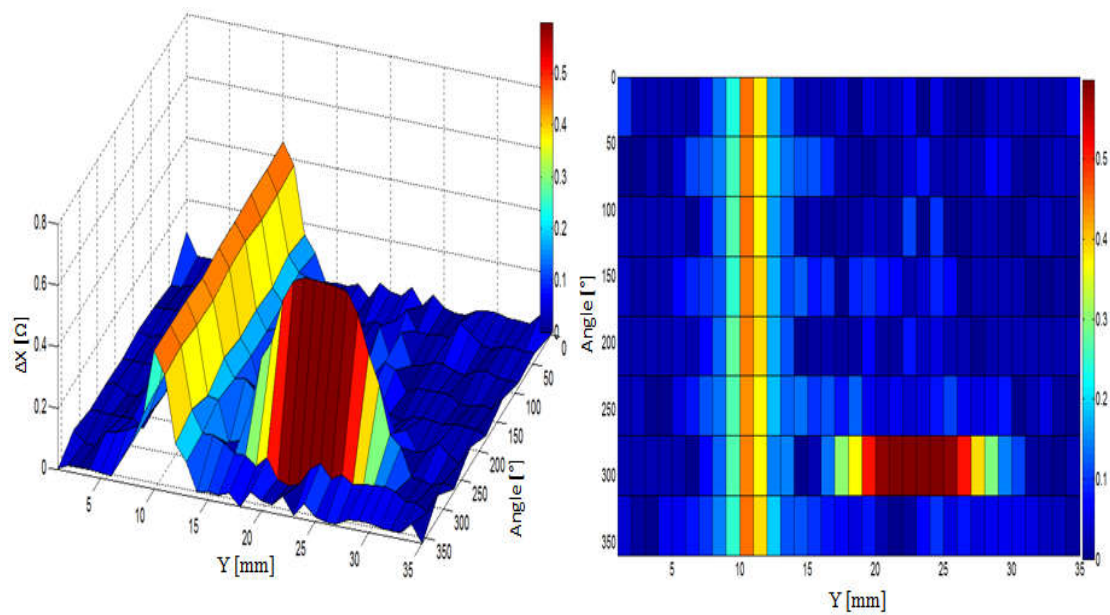
b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III. 3 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à f=20khz (3D et 2D).

➤ **b. Fréquence : 40 KHz**



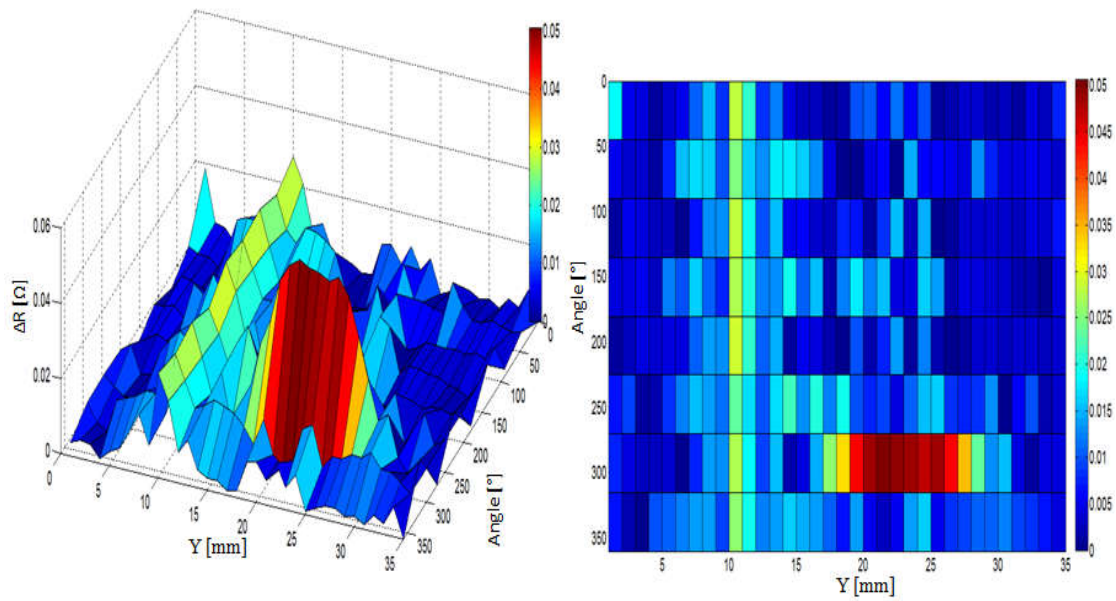
a. Partie réelle (résistance)



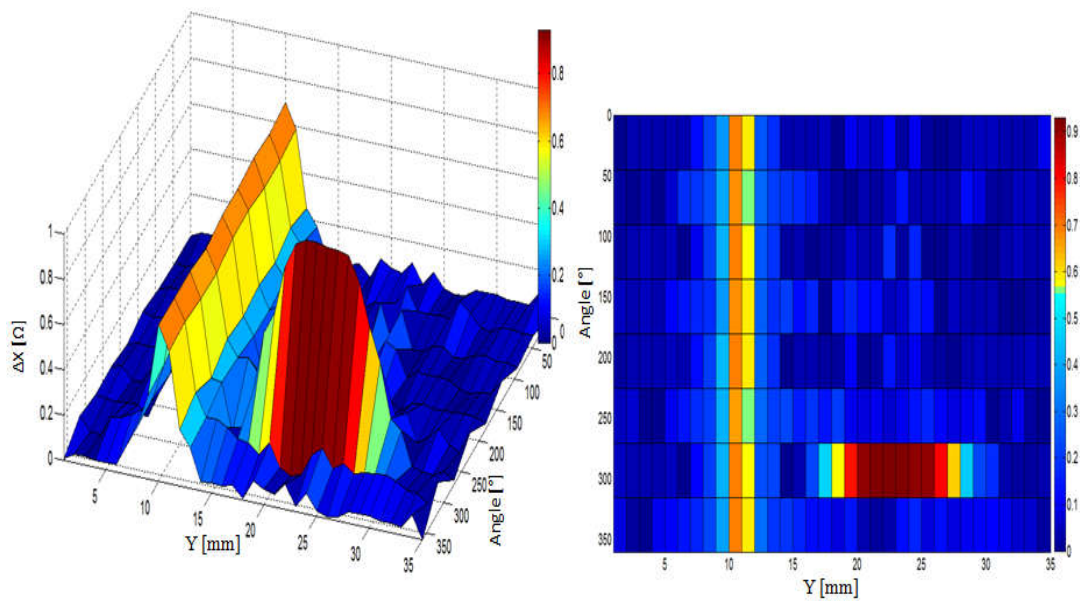
b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III. 4 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=40\text{kHz}$.

➤ c. fréquence: 60 kHz



a. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

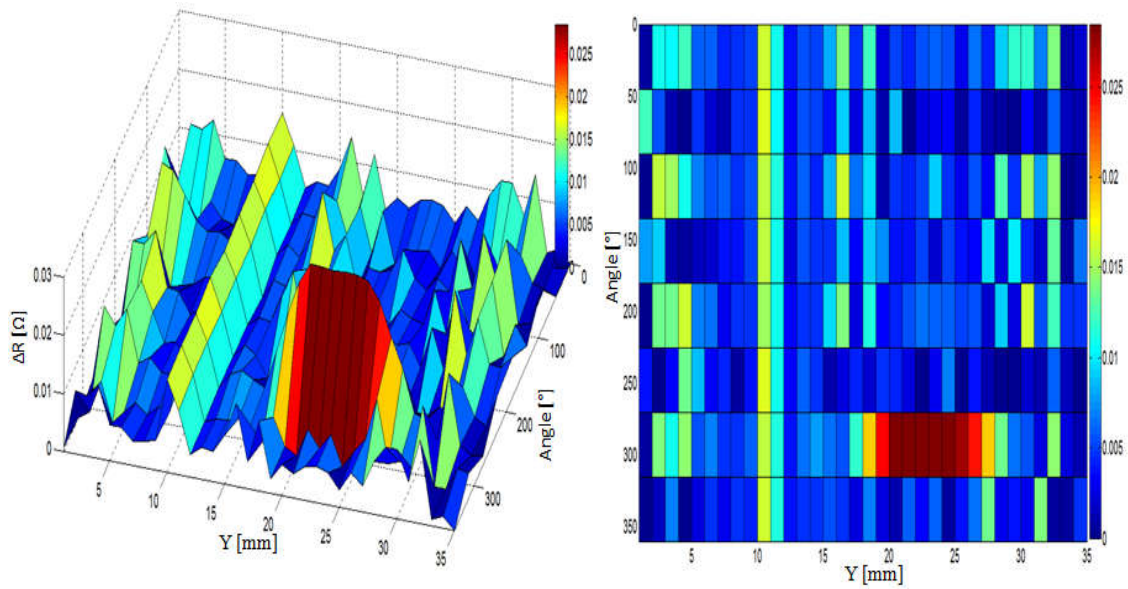
Figure III. 5 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur à $f=60$ khz.

D'après les figures (III.3-III.5) montrant l'effet de la variation de la fréquence sur les performances des imageries des composantes de l'impédance, l'amplitude de ces dernières (parties réelle et imaginaire de l'impédance) est proportionnelle à la variation de la fréquence, c'est pour cette raison que pour les défauts surfaciques les hautes fréquences sont les mieux adaptées.

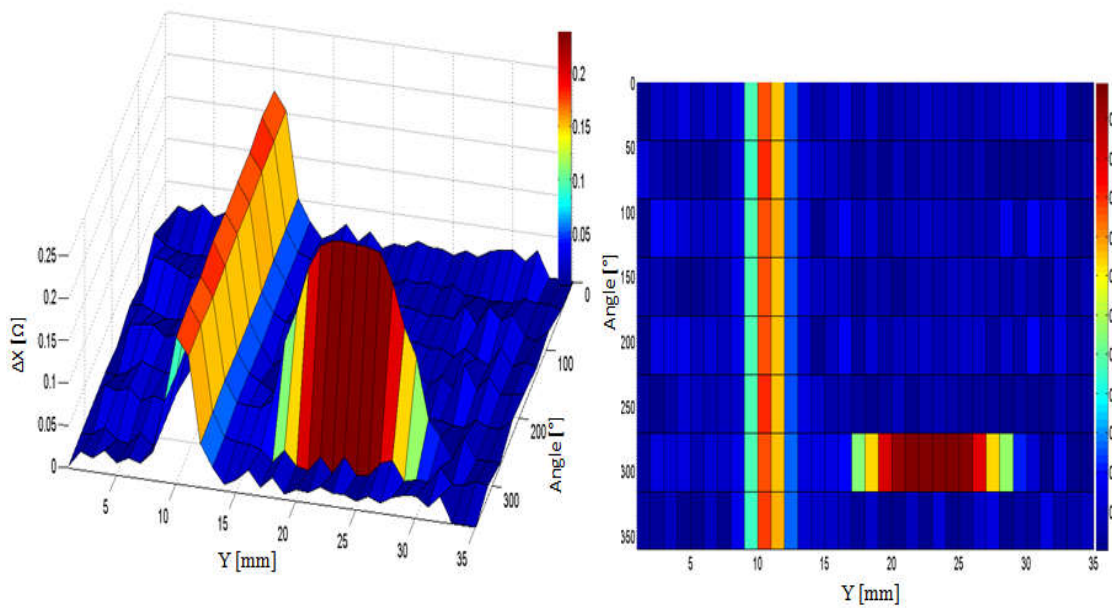
III.2.2.2 Effet des pas de déplacement

L'effet de la variation du pas est donné les figures (III.6-9), avec une fréquence fixe de 20 KHz .

➤ a. Pas : 2mm



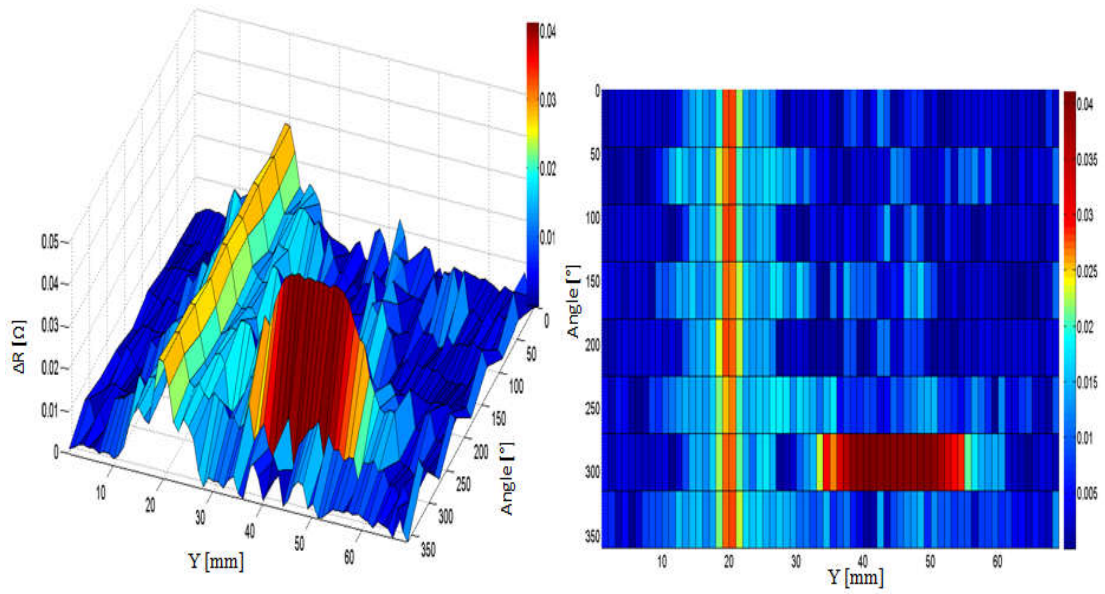
a. Partie réelle (résistance)



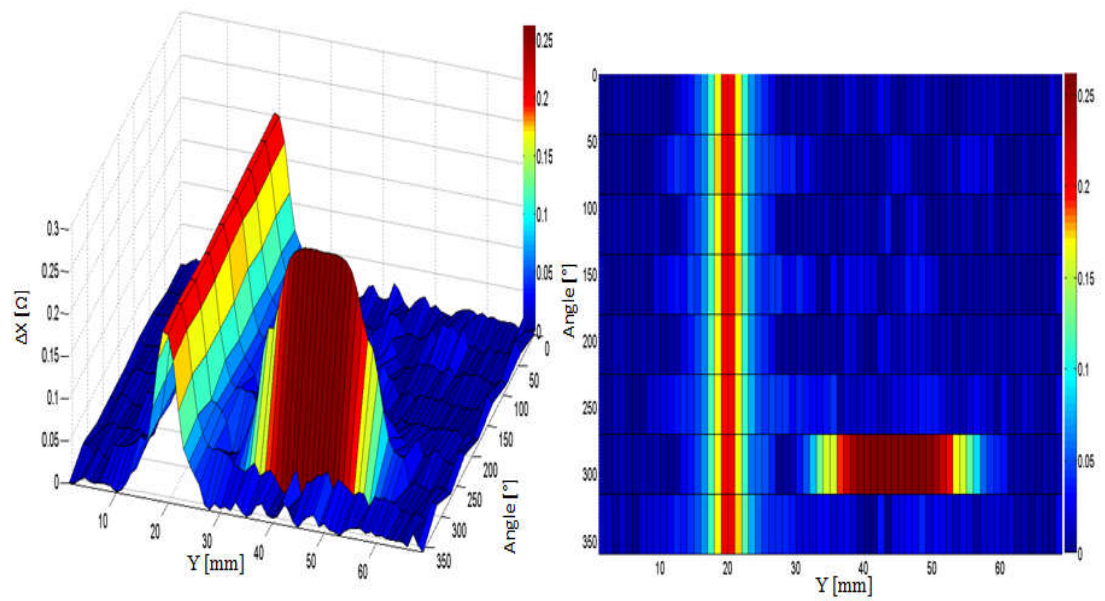
b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III. 6 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour P=2mm.

➤ **b. Pas : 1 mm**



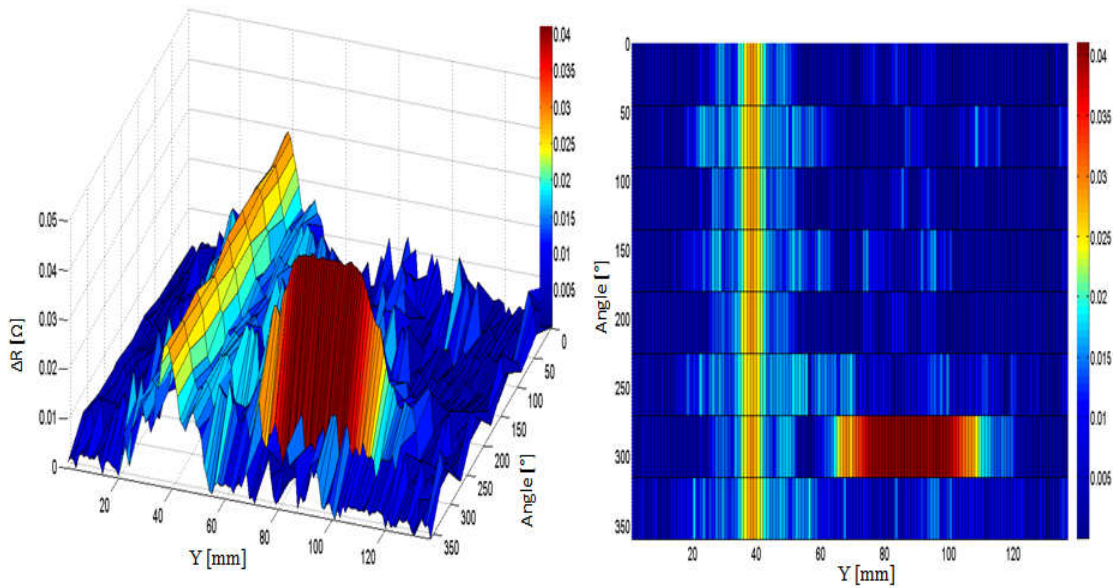
a. Partie réelle (résistance)



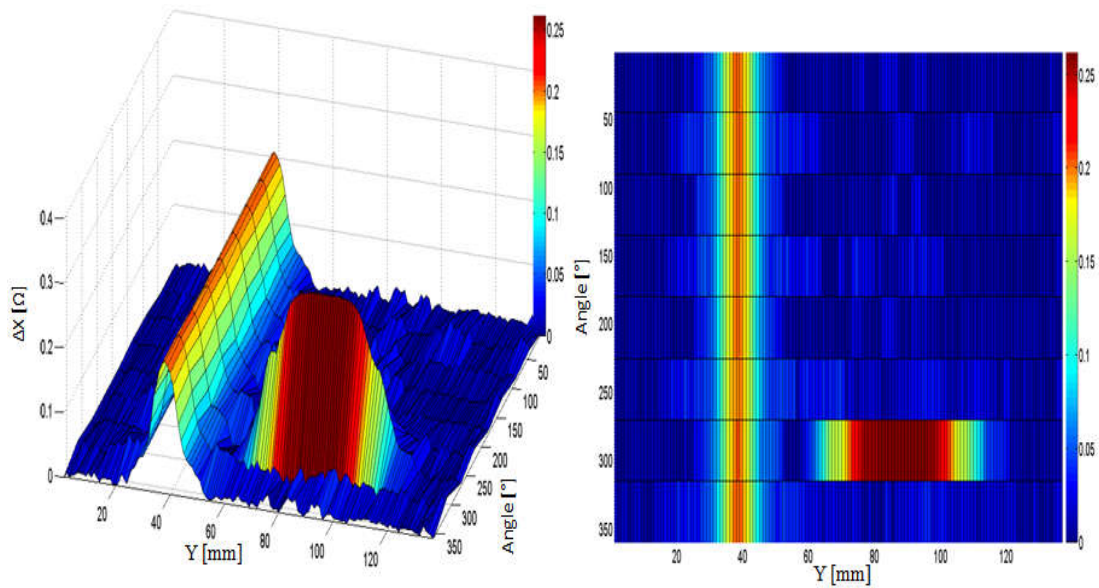
b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III. 7 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=1\text{mm}$.

➤ c. Pas :0.5 mm



a. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III. 8 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour P=0.5mm.

Les résultats obtenus, de l'effet de la variation du pas de déplacement sur le signal de détection, montrent clairement qu'il y a une nette amélioration de la résolution des imageries pour les pas réduits, Figures (III.6 - III.8).

III.2.3 Effet des paramètres électriques et géométriques sur les performances de l'imagerie pour un défaut externe

Etant donné que le défaut se trouve sur la surface externe du tube, on doit en premier lieu calculé la fréquence optimale d'inspection à partir de l'équation de (III.1).

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

Ou :

f : Fréquence d'alimentation.

μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

σ : Conductivité électrique.

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

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

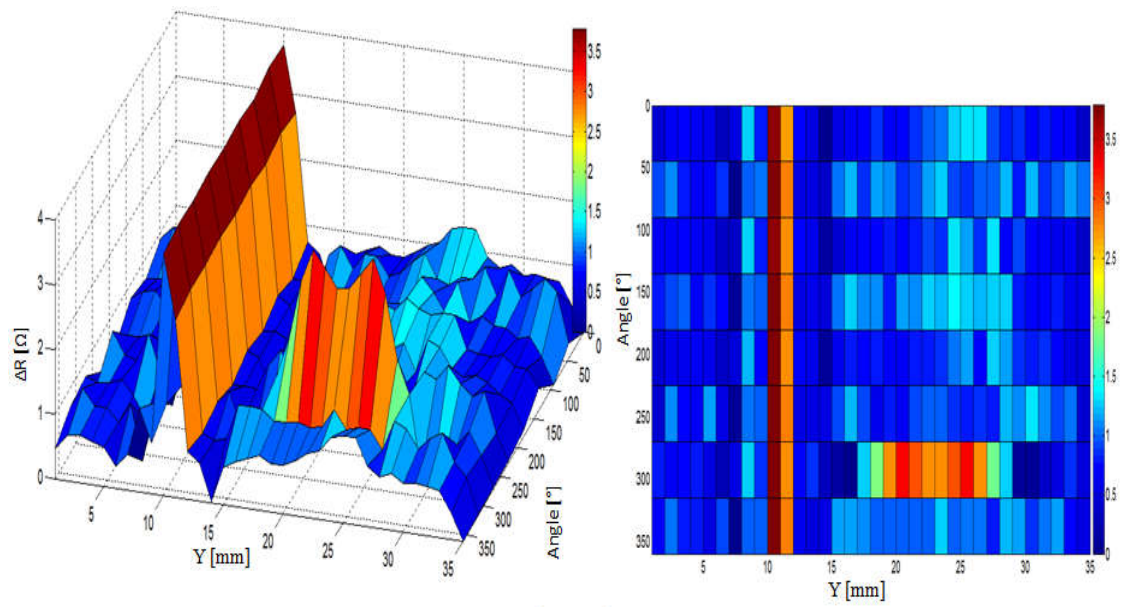
$$f = \frac{1}{\sigma \cdot \pi \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \delta^2} \quad \text{AN: } f \approx 1 \text{ khz}$$

Dans ce qui suit, on fait varier le pas de déplacement P avec une fréquence fixe de 1khz.

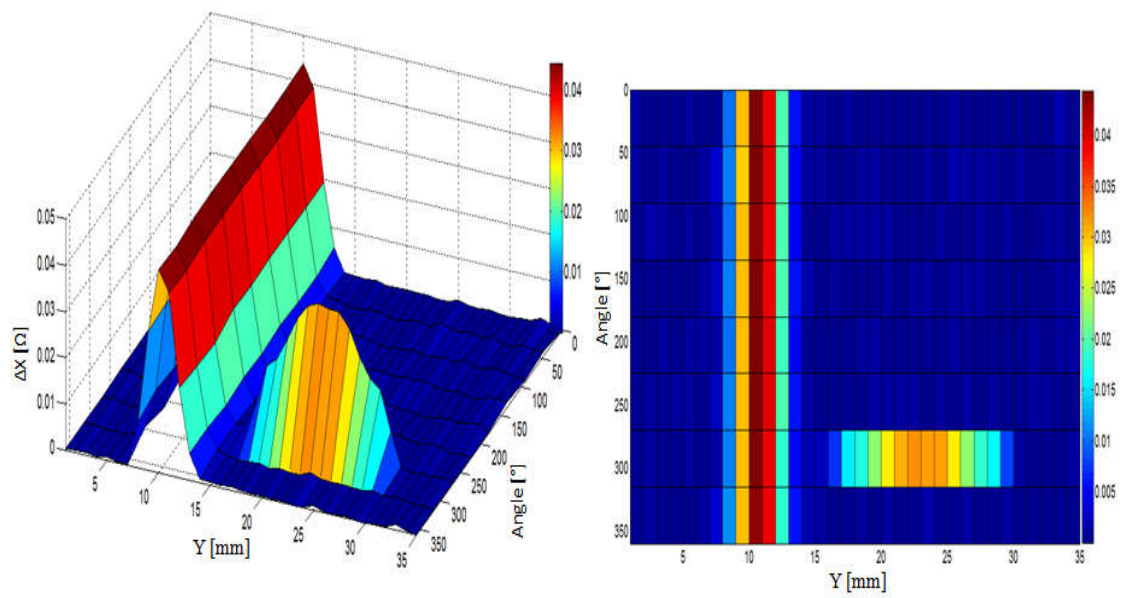
III.2.3.1 Effet des pas de déplacement

Les figures (III.9- III.10) présentent les cartographies de la partie réelle et la partie imaginaire le long de la surface externe de l'échangeur de chaleur pour P=2mm, P= 1mm et P=0.5mm.

➤ a. Pas : 2mm



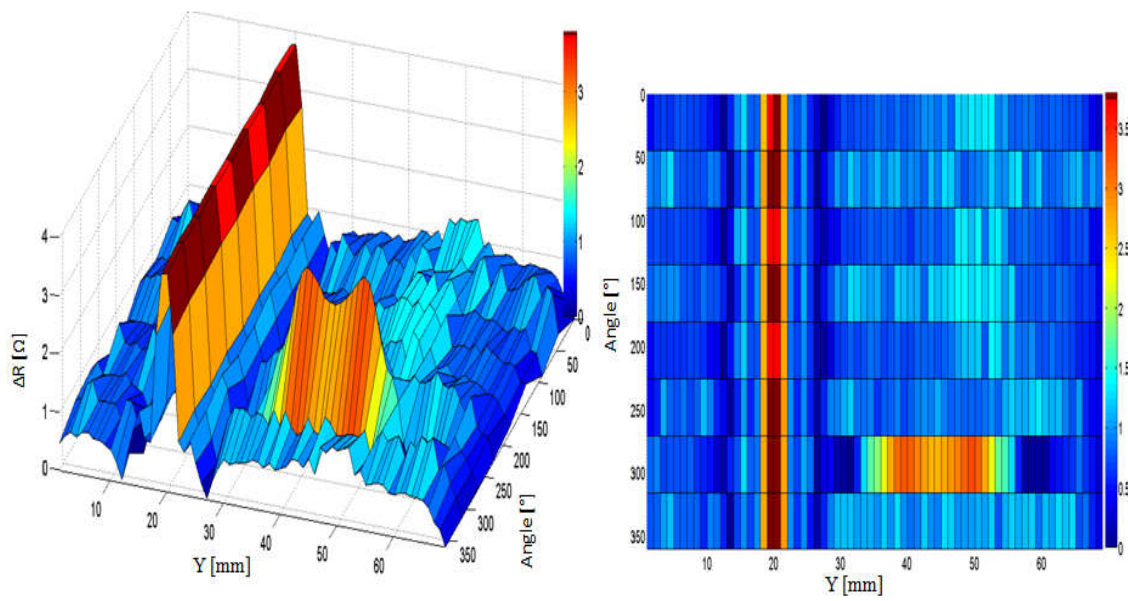
b. Partie réelle (résistance)



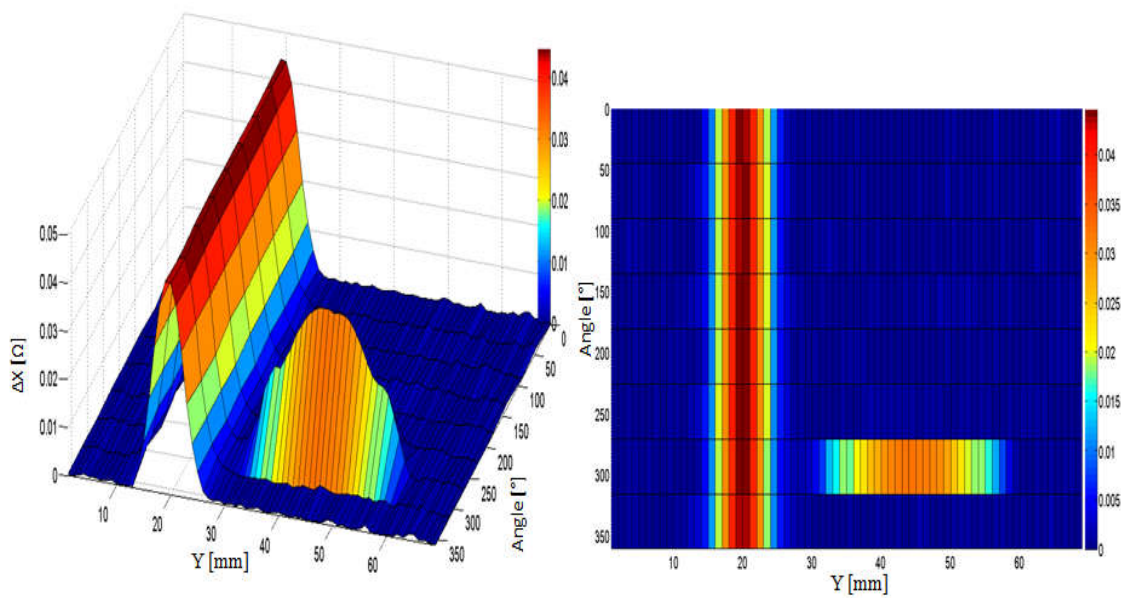
b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III. 9 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour P=2mm défaut externe.

➤ **b. Pas : 1mm**



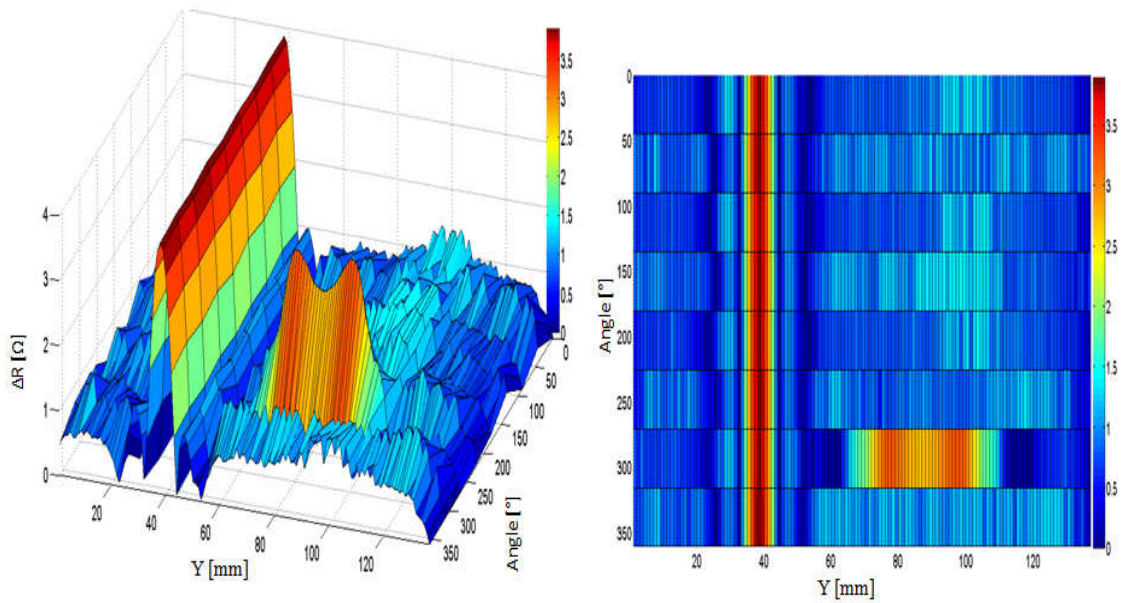
b. Partie réelle (résistance)



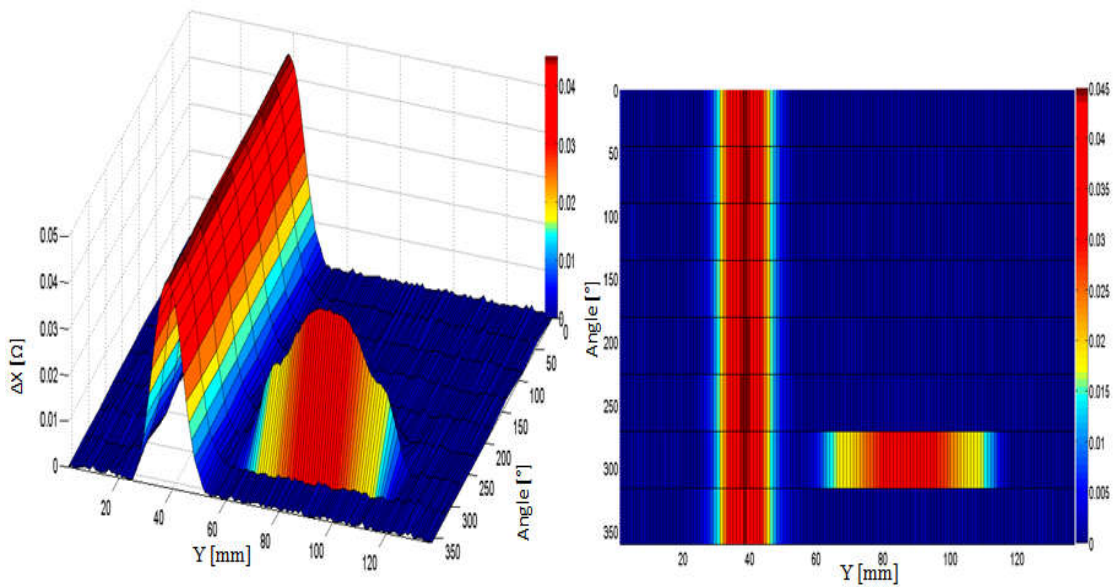
b. Partie imaginaire (réactance)

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

➤ c. Pas : 0.5mm



b. Partie réelle (résistance)



b. Partie imaginaire (réactance)

Figure III. 11 Variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur pour $P=0.5\text{mm}$ défaut externe.

D'après les figures (III.9, III.10 et III.11) on peut constater que la fréquence choisie est optimale car des imageries obtenues sont très représentatives. D'autre part, on diminuant le pas de déplacement du capteur de $P=2\text{mm}$ à $P=0.5\text{mm}$ la résolution des images s'améliore, ce qui conduit à une représentation précises des régions infectées.

III.3 Conclusion

Après avoir simulé le comportement électromagnétique du système de CND_CF par capteur multiéléments, nous avons exploité le modèle d'un échangeur de chaleur avec défaut interne et externe , pour étudier l'effet de la variation de la fréquence et la variation du pas de déplacement sur l'imagerie des variations de la résistance et la réactance du capteur.

En effet les résultats sont montré que :

- D'une part, l'augmentation de la fréquence pour la détection de défauts surfacique s'avère très efficace, étant donné que les résultats sont plus importants et leurs amplitude est proportionnelle à la fréquence.
- D'autre part, la réduction du pas de déplacement permet d'explorer un maximum de surface du tube échangeur, avec une augmentation du temps d'inspection, mais les images obtenues sont caractérisées par une haute résolution ; ce qui se traduit par une représentation fiable et précises des régions infectés.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif l'étude et l'analyse des performances des systèmes de CND par CF par imagerie issue des capteurs multiéléments. En premier lieu, nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie, et enfin le procédé la technique des courants de Foucault. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.

Quant à la deuxième partie, nous avons rappelés la modélisation du CND-CF par la méthode des éléments finis (MEF).

Dans le dernier chapitre, nous avons implémenté le modèle sous COMSOL-multiphysics. Ensuite, nous avons effectué une série de simulation à fin de tester la sensibilité et les performances du capteur proposé. En effet, les résultats obtenus ont montré la possibilité de détecter le défaut, de reconstituer sa forme, sa taille et son orientation avec une précision qui dépend de plusieurs paramètres tels que la fréquence, le pas de déplacement. Car:

-Le défaut surfacique est détecté avec une meilleure précision pour les hautes fréquences.

-Au fur et à mesure que le pas de déplacement est réduit la résolution de l'image devient élevée.

Perspectives

Ce travail a besoin des études complémentaires pour améliorer l'aspect qualitatif et quantitatif de ce mémoire :

- Étude de l'effet de la taille et le nombre des bobines du capteur sur les résultats.
- Comparer les performances de cette configuration avec un capteur rotatif fonctionnant en mode multiplexé.
- Réalisation d'une sonde multiélément et comparer les résultats expérimentaux avec les résultats obtenus.
- Remplacer l'alimentation en mode harmonique des bobines par le mode pulsé afin de permettre aux courants de Foucault de descendre en profondeur.

Références bibliographiques

- [1] Bilal Hannouf, Ammar Zeddou, « Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif », mémoire de mastère, Université de Jijel, Juin 2018.
- [2]. I. Dufour, M. Busawon, D. Premel, « General analysis of inductive sensor based systems ». France : J, phy. III., 1994. 1481-1493.
- [3]«modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs-pièce à défauts complexe pour le CND par CF», TIZI-OUZOU :, 2011. »
- [4]. WANIN, Maurice, «Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1) », Nancy
- [5]. Samir, BENSAID, «Cours théorie de champ. M'sila», : Université de M'sila, 2010
- [6]. Salvatore Baglio, Senior Member, IEEE, Salvatore Castorina, and Nicolò Savalli, «Integrated
- [7]. Salma, CHRIF, «modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs-pièce à défauts complexe pour le CND par CF», TIZI-OUZOU :, 2011
- [8] IAEA, Eddy Current Testing at Level 2: 2011.
- [9] B. Oussama, «Contrôle non destructif par courants de Foucault,» Université de Msila,
- [10]. MOHAMED, KHEBBAB, «Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », CONSTANTINE : 2007.
- [11]. BOUCHALA, TAREK, «Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault», Batna : s.n., 2008.
- [12]. ZAIDI, Houda, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples», Paris : 2012.
- [13]. Yahya, CHOUA, «Application de la méthode des éléments finis», Orsay : s.n., 2009. 9535.
- [14]. Salvatore Baglio, Senior Member, IEEE, Salvatore Castorina, and Nicolò Savalli, «Integrated Inductive Sensors for the Detection», Barcelona: IEEE SENSORS JOURNAL, 2005. Vol. 5, 3.

- [15]. HOANG, Dung, «Détermination simultanée de la résistivité et l'épaisseur des tôles métalliques et d'alliages non magnétiques par méthode électromagnétique sans contact», LYON : 2002. E.C.L 2002-8.
- [16] Georges Asch, «Les capteurs en instrumentation industrielle», Paris : DUNID, 1991. ISBN 2100002201.
- [17]. DUMONT-FILLON, Jacques, «Contrôle non destructif (CND) », Paris : , 2006. R 1 400–1.
- [18]. A. Mekhnache, R. Cedrati ; Les échangeurs de chaleur ; séminaire ; centre des Techniques appliquées de SKIKDA ; 2006 ; 86 p.
- [19]. Zoé Minville, Nasia Caney, Patrice Clement, Philippe Bandelier, Philippe Marty, Jean Antonie Gruss et Claude Roussel. Description des échangeurs de chaleur. Technique de l'ingénieur [BE 9516].
- [20] A.Menidjel. Exploitation des échangeurs à faisceaux et calendre. L.A.P/SPA Skikda. 2009
- [21]. André Bontemps. Echangeur de chaleur. Définitions et principes généraux. Technique de l'ingénieur [BE 9515].
- [22]. J. Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND)", Technique de l'ingénieur, traité mesure et contrôle R1400, 1996
- [23] . M. Lacroix, "Essais non destructifs", Techniques de l'ingénieur 7-1986
- [24] . "Contrôle non destructif", HOLO 3, 7 rue du Général Cassagnou F-68300 Saint-Louis, [www.http://www.holo3.com](http://www.holo3.com), 1999
- [26]. "Eddyfi Technologies" . <https://www.eddyfi.com/fr/application/default-defauts-de-tubes-dechangeurs-de-chaleur>
- [27]. TRANE BELGIUM <https://www.tranebelgium.com/fr/services/trane-services/>