

جامعة جيجل
مكتبة كلية العلوم والتكنولوجيا
رقم المجلد: M 1137

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE

IRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



M/ELEC.C.MDE

2012/06

01/02



UNIVERSITÉ MOHAMED SADIK BENYAHYA DE JIJEL
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département de Génie électrique

Mémoire de fin D'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en
électrotechnique

Option : modélisation et conception des dispositifs électromagnétiques

Thème

*Comparaison et amélioration des
performances de capteur à courant
de Foucault utilisé pour la
détection de défaut*

Encadré par :

Mr. Tarik HACIB

Réalisé par :

Mr. Houssem BOUGHADDA

Promotion 2012

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



06/2012
02/02

UNIVERSITÉ MOHAMED SADIK BENYAHYA DE JIJEL
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Département de Génie électrique

Mémoire de fin D'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en
électrotechnique

Option : modélisation et conception des dispositifs électromagnétiques

Thème

*Comparaison et amélioration des
performances de capteur à courant
de Foucault utilisé pour la
détection de défaut*

Encadré par :

Mr. Tarik HACIB

Réalisé par :

Mr. Housseem BOUGHADDA

Promotion 2012

Remerciements

DEDICACES

A mes parents,

A mes sœurs et Mes frères

A mes amies

A mes collègues

Et

À toute ma famille

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : « Principe et techniques du contrôle non destructif »	
Introduction	3
I.1. Principe de la détection d'un défaut dans le CND	3
I.2. Différentes méthodes de CND	4
I.2.1. Examen visuel	4
I.2.2. Ressuage	5
I.2.3. Magnétoscopie	5
I.2.4. Contrôle par ultrasons	7
I.2.5. Radiographie	8
I.2.6. Thermographie stimulée.....	9
I.2.7. CND par courant de Foucault	10
I.3. Avantages et inconvénients des techniques du CND	11
I.4. Classement des défauts détectés en CND	12
I.4.1. Défauts internes.....	12
I.4.2. Défauts de surfacique	12
I.4.3. Origines des défauts	13
I.5 Capteurs et transducteurs.....	14
I.5.1. Différents types des capteurs.....	14
I.5.2. Capteurs magnétiques	14
I.5.2.1. Capteurs inductifs.....	14
I.5.2.2. Capteurs GMI	15
I.5.2.3. Capteurs GMR	16
I.5.2.4. Capteurs fluxgates.....	18
Conclusion.....	18
Chapitre II : « Capteur inductif à courants de Foucault »	
Introduction	19
II.1. Capteur par courant de Foucault.....	19
II.1.1. Principe physique.....	19
II.1.2. Plan d'impédance normalisée	21

II.1.3. Principaux paramètres influant sur le contrôle	22
II.1.3.1. Paramètres liés au matériau à sonder	22
II.1.3.2. Paramètres liés au montage	22
II.1.3.3. Paramètres électriques	23
II.1.3.4. Effet de peau	24
II.2. Modélisation simplifiée du CND par CF : Cas simple du transformateur	24
II.3. Classification des capteurs dans le CND par CF.....	27
II.3.1. Classification suivant le type de sonde.....	27
II.3.1.1. Sonde à double fonction.....	27
II.3.1.2. Sonde à fonctions séparées	27
II.3.1.3. Sonde différentielle	28
II.3.2. Classification suivant le montage par rapport à la pièce contrôlé	28
II.3.2.1. Les bobine encerclant.....	28
II.3.2.2. Les bobines internes	28
II.3.2.3. Les bobines simples	29
II.3.2.4. Les bobines plates	29
II.3.3. Classification suivant le support du capteur	29
II.4. Les avantages et les inconvénients du CND par CF.....	30
II.4.1. Les avantages du CND par CF	30
II.4.2. les inconvénients du CND par CF.....	31
II.5. Application industrielle.....	31
II.5.1. Contrôle des tubes, barres et fils.....	31
II.5.2. Contrôle des surfaces planes	32
Conclusion.....	32

Chapitre III : « Problème électromagnétique: formulation et outils de modélisation »

Introduction	33
III.1. Analyse des phénomènes électromagnétiques	33
III.1.1. Les équations de Maxwell	33
III.1.2. Lois de comportement des milieux et loi d'ohm.....	34
III.1.3. Hypothèses simplificatrices	34
III.1.4. Relations de continuité	35
III.2. Définition des potentiels et conditions de jauge	36
III.3. Présentation et définition du modèle d'étude	38

III.3.1. Modèle considéré en 3D	38
III.3.2. Modèle considéré en 2D	39
III.4. Méthodes de résolution.....	39
III.4.1. Méthodes analytiques	40
III.4.2. Méthodes numériques	40
II.4.2.1. Méthode des différences finies	40
II.4.2.2. Méthode des éléments de frontières.....	40
II.4.2.3. Méthode des volumes finis	40
II.4.2.4. Méthode des éléments finis.....	40
III.4.3. Principe de la méthode des éléments finis	40
II.4.3.1. Discrétisation du domaine	40
II.4.3.2. Approximation et construction des fonctions d'interpolation.....	42
II.4.3.3. Formulation intégrale des équations aux dérivées partielles (EDP)	42
II.4.3.4. Forme matricielle élémentaire	44
II.4.3.5. Assemblage des matrices élémentaires	44
II.4.3.6. Introduction des conditions aux limites	44
III.5. Organigramme de calcul par éléments finis.....	45
III.6. Calcul de l'impédance	46
III.1.1. Méthode directe	46
III.1.2. Méthode de l'énergie.....	48
III.1.3. Calcul de l'impédance d'un capteur différentiel	49
Conclusion.....	49

Chapitre III : « Etude des performances d'un capteur à CF de forme E »

Introduction	50
IV.1. Caractéristiques du dispositif (capteur de forme E).....	50
IV.1.1. Caractéristiques physiques et géométriques	50
IV.2. Domaine de résolution et conditions aux limites.....	51
IV.3. Maillage du domaine d'étude	52
IV.4. Résultats de simulation du CND par courant de Foucault.....	52
IV.4.1. Plaque saine (sans défaut).....	53
IV.4.2. Plaque défectueuse (avec défaut)	53
II.4.2.1. Simulation pour la variation des propriétés géométriques	55

II.4.2.1. Simulation pour la variation des propriétés physiques.....	65
II.4.2.3. Simulation dans le cas d'une variation de la géométrie du défaut.....	67
Conclusion.....	71
Conclusion générale	72

Introduction générale

Introduction générale

Les processus industriels et les pièces fabriquées sont devenus de plus en plus complexes tout au long du siècle dernier. Le CND, dernière étape de ces processus, vise à contrôler sans endommager la qualité des pièces, en particulier mécanique. Il est devenu une nécessité industrielle, puisque la défaillance de ces pièces pouvant entraîner des conséquences plus ou moins importantes. Par exemple, dans les domaines aéronautique et nucléaire, ces conséquences s'expriment souvent en termes de sécurité des personnes ou de dégâts environnementaux. L'enjeu du CND est aussi d'ordre économique : la rapidité et la fiabilité des techniques employées sont capitales pour la réduction des coûts de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des installations.

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. 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 (recherche de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions d'inspection. Dans ce mémoire, nous nous intéresserons au CND par courants de Foucault. En effet, la possibilité d'un contrôle sans contact entre le capteur et la pièce ainsi qu'un déplacement rapide du capteur sur la pièce font que cette technique est très employée.

Le CND par capteurs à courants de Foucault (CF) est bien adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du défaut. La configuration du dispositif électromagnétique est constituée par capteur (bobine) absolue ou un capteur différentiel placé à l'extérieur ou à l'intérieur d'un tube conducteur.

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

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre va être réservé à l'étude bibliographique qui a pour but d'expliquer le contrôle non destructif à partir des différentes techniques mises en œuvre, mettant en avant les principes physiques qui les régissent. Nous rappelons aussi les avantages et les inconvénients des techniques du CND.
-

- Le second chapitre va être consacré aux capteurs inductifs à courants de Foucault. On va présenter leurs principes, leurs différentes géométries existantes ainsi que leurs différents circuits magnétiques. On va rappeler aussi les avantages, les inconvénients et les applications du contrôle par courants de Foucault.
- Le troisième chapitre va faire l'objet d'un rappel des principales lois qui régissent chaque phénomène électromagnétique (équation de Maxwell) à partir des quelles on peut formuler l'équation de la magnétodynamique en régime harmonique (équation différentielle aux dérivées partielles). De plus, une présentation des méthodes de résolution de ce type d'équations, va être effectuée. Un intérêt particulier sera consacré à la méthode des éléments finis avec la formulation des résidus pondérés.

Un code de calcul a été développé et implémenté sous environnement MATLAB. La mise en œuvre de ce code a permis de mettre en place une simulation contenant deux étapes : une étape utilisant la MEF pour la résolution de l'équation magnétodynamique. La seconde étape consiste à déterminer l'impédance du capteur en utilisant le potentiel vecteur magnétique obtenu dans la première partie et en prenant en considération les paramètres de la plaque et du défaut.

- Le quatrième chapitre est dédié à la présentation du modèle élaboré capteur-pièce à contrôlée. Ce modèle sera appliqué pour le cas d'un capteur à CF avec noyau magnétique de forme E variable, placé au dessus d'une pièce amagnétique plane de dimensions latérales infinies. Sur cette cible, plusieurs types de défauts ont été modélisés.

Enfin, ce mémoire va être terminé par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués, et par une liste adéquate de références bibliographiques.



Chapitre I

Principe et techniques du contrôle non destructif

Introduction

Les techniques de contrôle non destructif (CND) sont initialement développées vers les années 1960 pour répondre aux besoins des secteurs de pointe tels que l'industrie pétrolière, nucléaire, automobile, et l'aéronautique. Actuellement, elles sont généralisées à l'ensemble du monde industriel. Les techniques du CND sont utilisées lors des différentes étapes de la fabrication de produits, pour contrôler la conformité de produits finis ou bien encore lors des opérations de maintenance ou suite à la détection d'anomalies de fonctionnement.

L'objectif premier du CND est de détecter, de localiser et de dimensionner les défauts nocifs pouvant être présents en surface ou au cœur des matériaux (porosités, inclusions, fissures, piqûres...) de façon non intrusive, voire sans contact. Ces techniques permettent également de mesurer des variations de structures ou de propriétés mécaniques au sein des matériaux (gros grain, précipités, présence de contraintes résiduelles,...) ou encore de déterminer la nature du matériau contrôlé.

Dans ce premier chapitre, on présentera en premier lieu un bref rappel sur les méthodes de CND, ensuite on donnera un aperçu sur les capteurs employés par le CND en particulier les différents capteurs magnétique.

I.1. Principe de la détection d'un défaut dans le CND

Un système générique du CND est représenté dans la figure I.1. Son principe consiste à illuminer la zone à examiner avec un signal et à recueillir, avec un capteur, la réponse du milieu à cette excitation. Ensuite, le signal résultant va être analysé dans le but de déterminer les paramètres physiques et géométriques de manière à valider sa constitution et/ou détecter une éventuelle hétérogénéité.

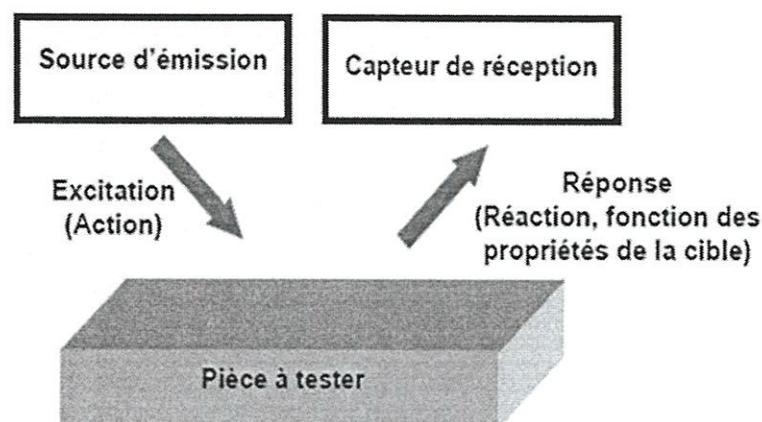


Figure I.1. Principe du contrôle non destructif

Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou γ . Perturbation des courants de Foucault... sont à la

base des essais non destructifs, ils peuvent servir à caractériser les matériaux (gros grain, anisotropie, dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou en profondeur...). Les techniques de CND diffèrent par l'énergie employée, énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...) [1].

I.2. Différentes méthodes de CND

Les techniques de CND utilisées sont diverses : la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, les courants de Foucault. Quelle que soit la méthode, les objectifs sont les mêmes : la fiabilité de l'examen, la reproductibilité, la localisation des défauts, leur caractérisation et classement. Les étapes d'un contrôle sont les suivantes :

- mise en œuvre d'un processus physique énergétique.
- modulation ou atténuation de ce processus par les défauts.
- détection de ces modifications par un capteur approprié.
- traitement des signaux et interprétation des résultats.

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.

I.2.1. Examen visuel

L'examen visuel est le plus ancien, le plus simple et le plus utilisé des contrôles non destructifs. C'est aussi le point de départ et le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour découvrir les défauts débouchant en surface (fissure, tapure, crique, arrachement,...), ainsi que les dégradations causées par les conditions de service ou d'environnement (corrosion, taches de différentes natures, ..). Il faut souligner l'importance du réglage de l'intensité et de l'orientation de l'éclairage lors d'un contrôle visuel. Les conditions d'éclairage sont en effet essentielles pour la fiabilité du contrôle optique [2].

On distingue le contrôle visuel direct (éventuellement aidé de dispositifs grossissants) du contrôle visuel indirect (avec dispositifs d'aide de type endoscopique ou télévisuel) [3].

L'endoscope est un appareil permettant d'observer les surfaces non directement accessibles à l'œil telles que les parois d'un tube ou d'une cavité. Il se présente sous la forme d'un tube ou d'un flexible comportant des dispositifs d'éclairage de la cavité, de génération et de transport d'image

(électronique, lentilles ou fibres optiques) et enfin de restitution d'image [4]. Les caméras numériques de télévision apportent également une aide au contrôle visuel en permettant une observation à distance. De plus, couplées à des moyens d'enregistrement et de traitement des images vidéo, elles permettent un contrôle optique automatique [5].

En résumé, le contrôle visuel permet la détection des défauts de surface dans tous types de matériaux. Toutefois, il ne permet pas de déterminer l'extension en profondeur des défauts.

1.2.2. Ressuage

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes. La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré ou fluorescent dit "pénétrant" est ensuite appliqué sur la surface à contrôler. Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...).

Le reste de pénétrant est ensuite éliminé par un lavage adapté. La surface est alors recouverte d'une fine couche de révélateur qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser. On dit alors que le révélateur fait ressuer le pénétrant (voir la figure I.2). Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent.

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

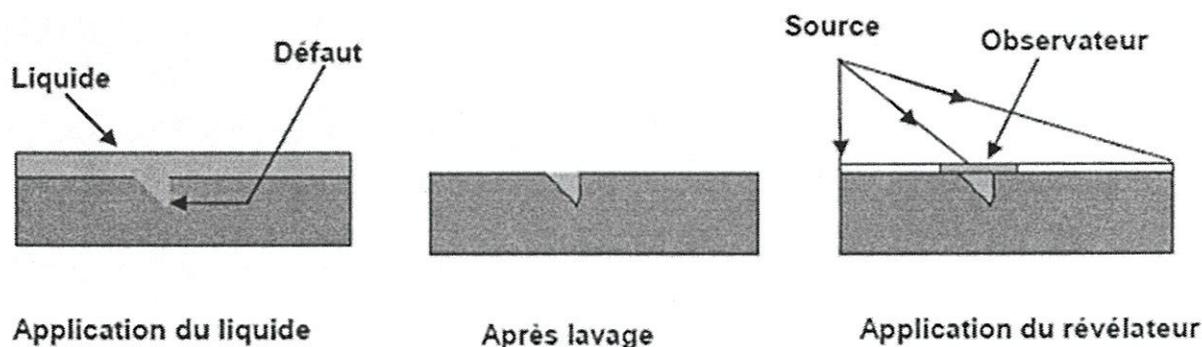


Figure I.2. Principe du ressuage

1.2.3. Magnétoscopie

C'est une technique de CND applicable uniquement aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte,...). Ce type d'examen ne convient pas aux matériaux amagnétiques. Cette méthode permet de mettre en évidence les défauts débouchant en surface ou sous-cutanés (jusqu'à 5 mm de la surface).

Le procédé consiste à aimanter la pièce à l'aide d'un champ magnétique d'excitation continu ou alternatif. La magnétoscopie exploite le fait qu'une discontinuité voisine de la surface provoque une distorsion des lignes de champ magnétique dans l'air au voisinage de la surface: il y a création de flux de fuites magnétiques. La perturbation est maximale lorsque les lignes de champ magnétique sont perpendiculaires au défaut.

Selon l'orientation présumée des anomalies, ainsi que la forme de la pièce, on utilisera une des deux techniques d'aimantation suivantes:

- L'aimantation par passage de flux magnétique : cette technique entraîne une aimantation longitudinale par rapport à l'axe de la pièce. Ce sont les anomalies transversales (perpendiculaires) qui perturberont les lignes de champ magnétique (figure I.3).
- L'aimantation par passage de courant : cette seconde technique consiste à transmettre à la pièce un courant qui crée un champ magnétique transversal à l'axe de la pièce. Ce champ sera perturbé par les défauts longitudinaux (parallèles).

Après la phase d'aimantation, on vient répandre sur la surface de la pièce, une poudre magnétique (sèche ou en suspension dans un liquide (liqueur magnétique)) contenant des traceurs magnétiques (oxydes de fer). La poudre se répartit de façon homogène si la pièce est saine. Par contre, lorsqu'une anomalie est présente dans la pièce au voisinage de la surface, des flux de fuites magnétiques apparaissent : l'orientation du flux magnétique est modifiée localement et son intensité en surface augmente. Il apparaît alors au droit du défaut une accumulation des particules magnétiques qui révèle sa présence.

L'utilisation d'un courant continu pour l'aimantation autorise une profondeur de détection jusqu'à quelques millimètres (environ 5 mm) tandis que l'utilisation d'un courant alternatif donne des champs importants surtout en surface et ne permet donc de détecter que des défauts débouchant en surface.

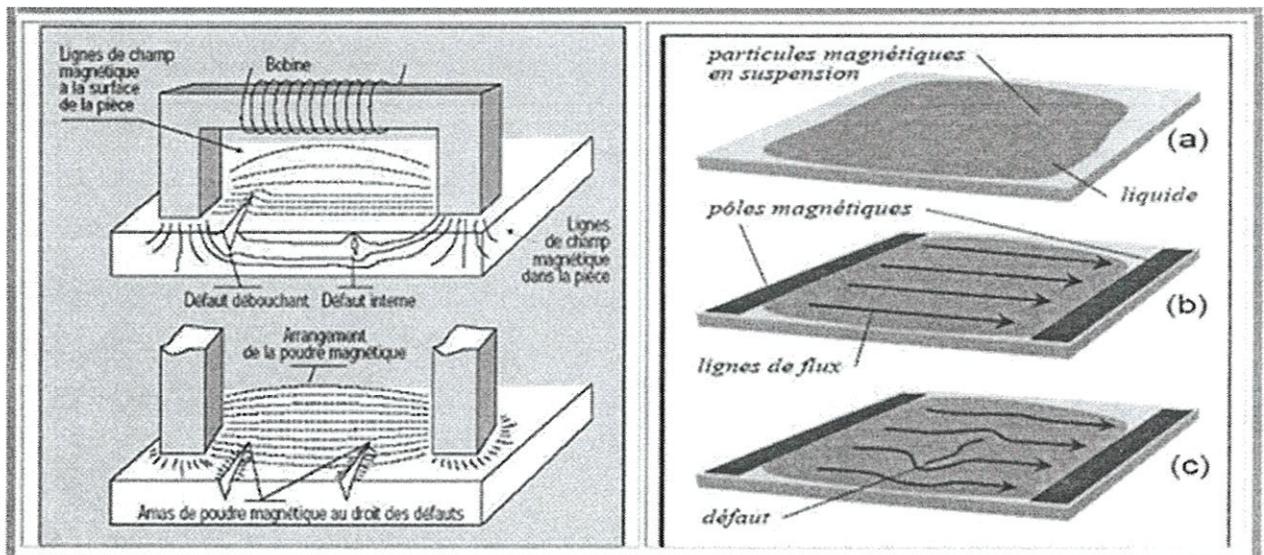


Figure I.3. Examen par magnétoscopie

L'observation de la répartition de la poudre magnétique est effectuée en lumière blanche avec des fonds contrastants et des traceurs colorés ou en lumière ultraviolette avec des traceurs fluorescents. Il est important de signaler que pour garantir la reproductibilité de l'examen magnétoscopique, il est nécessaire de démagnétiser la pièce après le contrôle.

Cette technique de contrôle est notamment utilisée pour le contrôle des pièces moulées (criques dans les congés de raccordement, réseaux de fissures superficielles...) des pièces forgées (criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion ...), des produits laminés. Elle permet également la détection de défauts après traitement thermique ou sur des soudures (fissures, retassures de cratères, manques de pénétration...).

I.2.4. Contrôle par ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. Ils correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à 20 kHz (limite d'audibilité de l'oreille humaine). Le contrôle par ultrasons mis en œuvre en CND est un examen volumique de type échographique [2]. Son principe consiste à émettre une onde ultrasonore qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (anomalies, limites de la pièce). Pour émettre et recevoir l'onde ultrasonore, on utilise des transducteurs (appelés aussi traducteurs ou palpeurs). A l'émission, le transducteur génère une onde ultrasonore par effet piézoélectrique. A la réception de l'onde, le transducteur convertit l'énergie mécanique perturbée en signal électrique. Lorsque l'émission et la réception sont réalisées par le même transducteur, le contrôle est appelé émission-réception. Au contraire, lorsque la réception est effectuée par un autre capteur, on lui donne le nom de contrôle avec émission/réception séparées, ce contrôle pouvant être effectué en réflexion ou en transmission (en positionnant les deux transducteurs de part et d'autre de la pièce sondée).

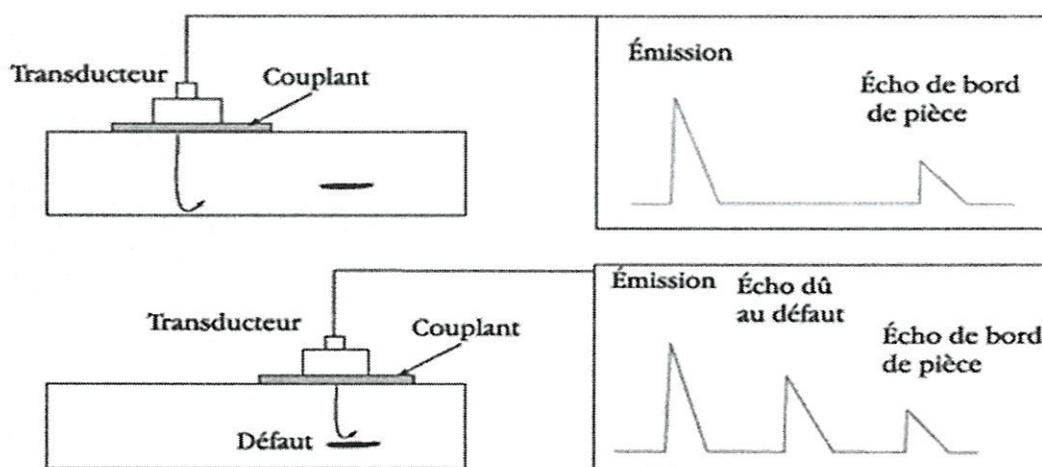


Figure I.4. Principe des ultrasons

Un des inconvénients du contrôle ultrasonore est l'existence d'une zone de silence (ou zone morte) dans le faisceau généré par le transducteur. Dans cette zone de silence, on observe un phénomène d'éblouissement sous la surface d'inspection et l'erreur sur le dimensionnement des défauts qui y sont situés est généralement importante. Des études portant sur la détection des défauts dans l'acier ont montré que les techniques ultrasonores industrielles ne permettent pas d'estimer correctement la profondeur des défauts débouchant (débouchant sur la surface d'inspection) ayant des profondeurs inférieures à 3 mm dans les conditions usuelles de mise en œuvre.

Les techniques ultrasonores ont connu des avancées majeures ces dernières années avec l'apparition des capteurs multiéléments, l'introduction de la technique TOFD (Time Of Flight Diffraction) et le développement des ultrasons à couplage air [6-7]. Ces méthodes sont capables de détecter et de dimensionner les défauts situés hors zone morte dans de nombreux matériaux et permettent de satisfaire aux exigences d'automatisation, de rapidité et de fiabilité requises dans de nombreux secteurs industriels. Elles sont utilisées notamment pour détecter les défauts des pièces composites utilisées en aéronautique, pour le contrôle fabrication des pièces métalliques et pour le contrôle des soudures dans les centrales nucléaires [8][9].

I.2.5. Radiographie

L'examen d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou δ) et à visualiser le rayonnement résiduel non absorbé après la traversée de l'objet au moyen de films photographiques (le plus souvent) ou d'écrans fluorescents comme l'illustre la figure I.5. Applicable généralement dans le domaine médical. Suivant le rayonnement utilisé, on parlera de radiographie X (rayons X : rayons dont la longueur d'onde est comprise entre 10^{-12} m et 10^{-8} m) ou de gammagraphie (rayons δ : rayons dont la longueur d'onde est inférieure à 10^{-12} m).

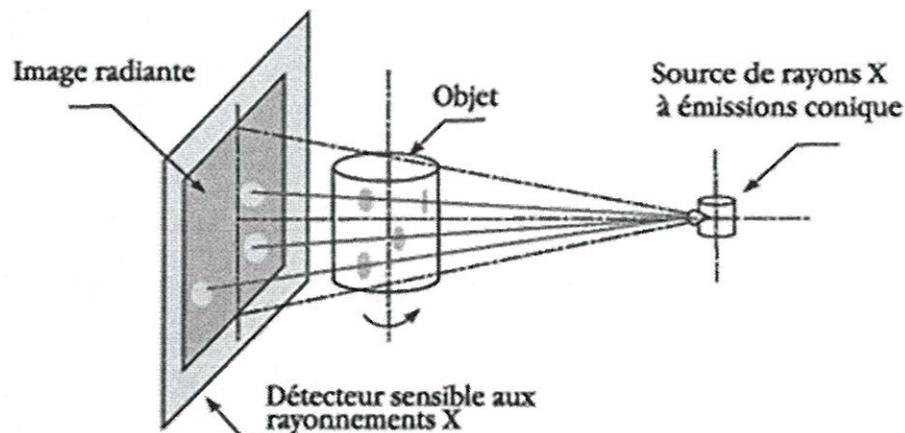


Figure I.5. Principe de la radiographie

De par son principe, la radiographie ne permet pas d'avoir d'information sur la localisation du défaut en profondeur dans la pièce examinée. Il faut pour cela réaliser plusieurs clichés sous des angles différents, ce qui n'est pas toujours possible. Un autre moyen est la tomographie industrielle.

Tomographie est une des méthodes les plus récentes appliquées dans le domaine industriel. Elle permet d'obtenir une image 2D virtuelle d'une coupe d'un objet. Cette image représente la cartographie de l'atténuation d'un pinceau de rayons X traversant la tranche de l'objet sous diverses incidences. La tomographie est basée sur le même principe que le scanner médical. Elle consiste à reconstruire à partir des mesures effectuées une succession de coupes en 2D. Ensuite, par agglomération (reconstruction algorithmique), elle fournit une image 3D virtuelle complète de l'objet étudié (Figure I.6) [10].

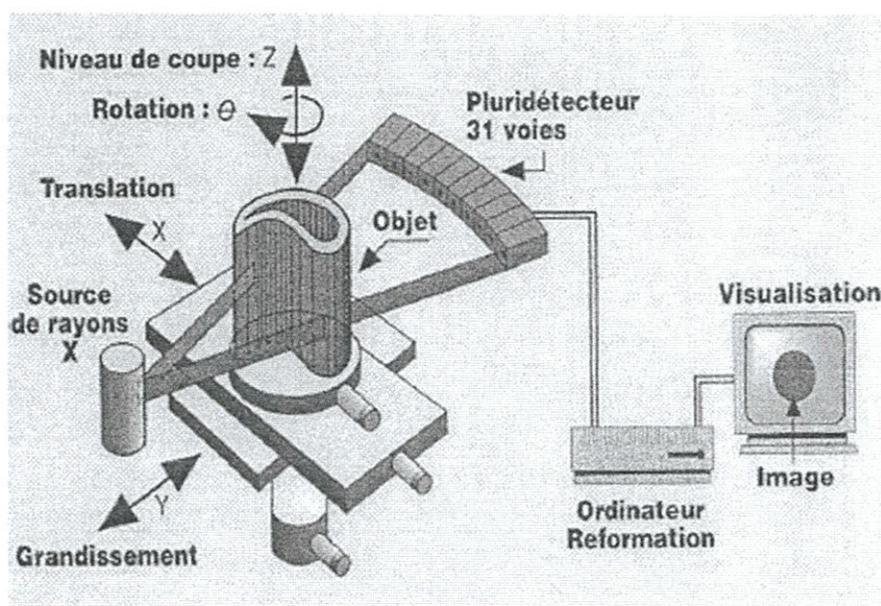


Figure I.6. Principe de la tomographie X

Le champ d'application de la radiographie est très vaste ; c'est en effet la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités à l'intérieur des objets de toute nature, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance.

1.2.6. Thermographie stimulée

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température est un indicateur mesurable. L'évolution spatio-temporelle du champ de température est décrite par l'équation de la chaleur (ou de diffusion) qui dans le cas d'un milieu isotrope s'exprime [11].

$$\Delta\theta - \frac{\rho \cdot c_p}{k} \frac{\partial\theta}{\partial t} + \frac{p}{k} = 0 \quad (\text{I.1})$$

L'équation (I.1) représente l'évolution spatio-temporelle de la température, avec:

θ : la température en (°C).

ρ : la masse volumique du milieu (kg/m³).

k : la conductivité thermique (W/m°C).

C_p : la chaleur spécifique (J/kg°C).

p : la source volumique de puissance (W/m³).

Δ : l'opérateur Laplacien.

Cette méthode repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur sur la pièce à contrôler, et cela se fait par l'application d'une source de chaleur (faisceau laser, air chaud,...) sur la cible. Et d'après la distribution de la température (qui est fonction des propriétés thermiques et géométriques de cette dernière, rendue visible par une caméra à infrarouge (qui mesure le rayonnement thermique) et par l'application des méthodes inverses les éventuels défauts pouvant être décelés.

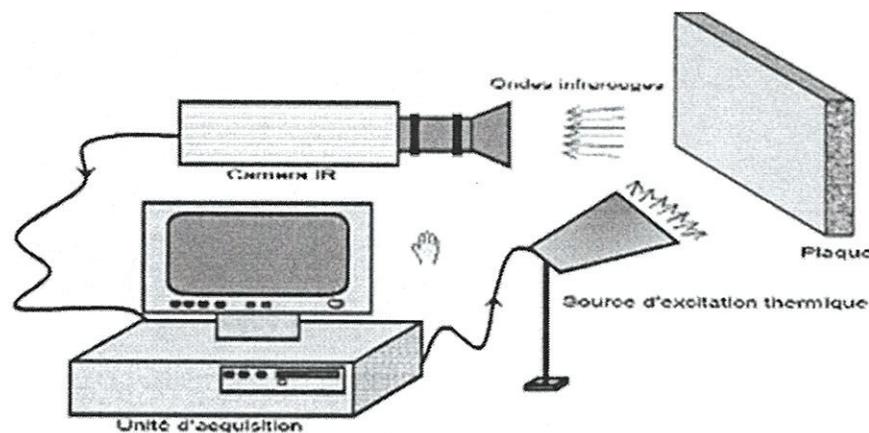


Figure I.7. Examen par thermographie

I.2.7. CND par courant de Foucault

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci, ce sont les courants de Foucault (physicien français 1819-1868).

Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits. Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique qui va s'opposer au champ initial, modifiant l'impédance Z ($Z=R+jL$) de la bobine [5]. Et le champ résultant sera fonction :

- Du signal d'excitation
- De la conductivité électrique

- De la perméabilité magnétique
- De la géométrie de la cible
- De la distance capteur-cible (lift-off)
- De la présence d'une anomalie (défaut) dans la pièce à contrôler près de la surface.

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs et ferromagnétiques, elle est utilisée pour détecter des défauts superficiels ou sous-cutanés, les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps le contrôle des, tubes, barres, fils, surface planes et même pour le tri de nuances de matériaux conducteurs et mesure dimensionnelle (cette technique sera développée avec plus de détails au chapitre II).

I.3. Avantages et inconvénients des techniques du CND

Les avantages et les inconvénients des techniques du CND sont résumés dans le tableau ci-dessous:

Tableau I.1. Avantages et inconvénients des techniques du CND

Types de CND	Avantages	Inconvénient
Examen visuel	- Examen simple, rapide et moins coûteux	- Pas de dimensionnement des défauts - Résolution et sensibilité limitées
Ressuage	- Procédé de contrôle relativement rapide - Bonnes sensibilités de détection des défauts débouchant avec appréciation de leurs longueurs - Résolution spatiale élevée (~10 µm)	- Pas de dimensionnement des défauts - Impossibilité de contrôler les matériaux poreux (bruit de fond trop important) - Nettoyage et dégraissage rigoureux des pièces avant le contrôle
Magnétoscopie	- Procédé de contrôle économique - Méthode de mise en œuvre plus rapide que le contrôle par ressuage - Facilité de détection des défauts débouchant et immédiatement. - Bonnes sensibilités de détection des défauts perpendiculaires au champ.	- Méthode de contrôle exclusivement réservée aux matériaux ferromagnétiques. - Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (> 2 mm de profondeur). - Risque électrique par passage direct de courant. - Démagnétisation obligatoire après contrôle
Ultrasons	- Méthode très sensible à la détection des défauts plans correctement orientés - Détection précise des défauts dans l'épaisseur de la pièce - Accès sur une seule face pour contrôler la totalité du volume - Souplesse d'utilisation sur les chantiers	- Utilisation obligatoire d'un couplant (eau, gel) entre le palpeur et la pièce - Difficulté de mise en œuvre sur faibles épaisseurs - Mise en œuvre fine sur matériau à structure métallurgique hétérogène (gros grains, fonte, moulé, centrifugé) - Zone morte ou aveugle

Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de détection des défauts internes des pièces - Rapidité relative d'obtention des résultats (de l'ordre de 15 minutes). - Bonnes sensibilités de détection des défauts. - Numérisation possible avec un traitement d'images 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement relativement important - Mise en œuvre fine sur chantier avec tube à rayons X. - Limitation du contrôle par les épaisseurs et par le matériel utilisé. - Sensibilité de détection liée à l'orientation du défaut par
Courant de Foucault	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie) - Détection possible à travers un revêtement surfacique - Aucune préparation particulière de la surface à contrôler - Pas de nécessiter d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante - Contrôle non polluant. - Détection des défauts fins (jusqu'à 10 μm d'ouverture) 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement important - Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites - Détection de défauts débouchant en surface - Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électrique. - Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant - Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants.

I.4. Classement des défauts détectés en CND

Le terme défaut est, relatif et peu précis. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et les défauts internes [12].

I.4.1. Défauts internes

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.

I.4.2. Défauts surfaciques

Les défauts surfaciques sont les plus problématiques sur le plan technologique. Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes:

- Défauts ponctuels correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer

à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de CND les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault).

- Défauts d'aspect, à des plages dans lesquels une variation de paramètres géométriques ou physiques attire le regard et rend le produit inutilisable (rugosité, surépaisseur, taches diverses). Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

1.4.3. Origines des défauts

Les origines et les causes des défauts sont multiples. On peut citer sans être exhaustif les exemples suivants [13] :

- Défaut de moulage.
- Défaut de soudage ou de brasage des pièces magnétiques.
- Détection de fissuration (interne ou débouchante).
- Endommagement (délaminage) de composites.
- Hétérogénéité dans les matériaux.
- Défaut de collage :
 - Absence de collage.
 - Défaut d'adhésion.
 - Fissuration de colle.
- Défaut de fixation des composants électroniques.

1.5. Capteurs et transducteurs

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable (par exemple : une tension, une hauteur de mercure, une intensité...). On fait souvent la confusion entre capteur et transducteur : le capteur est au minimum constitué d'un transducteur. Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données.

Les capteurs et les transducteurs servent à mesurer des grandeurs mécaniques, thermiques, électriques ou chimiques. Un capteur est sensible aux variations de la grandeur mesurée, par exemple la température d'un élément, la position d'une pièce d'une machine, ou la concentration chimique d'une solution. Les valeurs ainsi mesurées sont alors converties en signaux électriques par le transducteur, puis transmises à un dispositif capable de lire, enregistrer ou contrôler les grandeurs mesurées par rétroaction. Capteurs et transducteurs peuvent opérer dans des sites éloignés de l'opérateur, voire dans un environnement inaccessible ou hostile à l'être humain [14].

I.5.1. Différents types des capteurs

Selon les besoins, il existe plusieurs types des capteurs, on peut cité à titre d'exemple : capteur de lumière, de sons, de température, de pression, de débit, de niveau...[15].

La figure I.8 présente quelques exemples de capteurs :

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| a : capteur de fin de course. | b : capteur de niveau de liquide. |
| c : capteur d'humidité. | d : détecteur de choc. |
| e : capteur de proximité à ultrasons. | f : détecteur de gaz. |

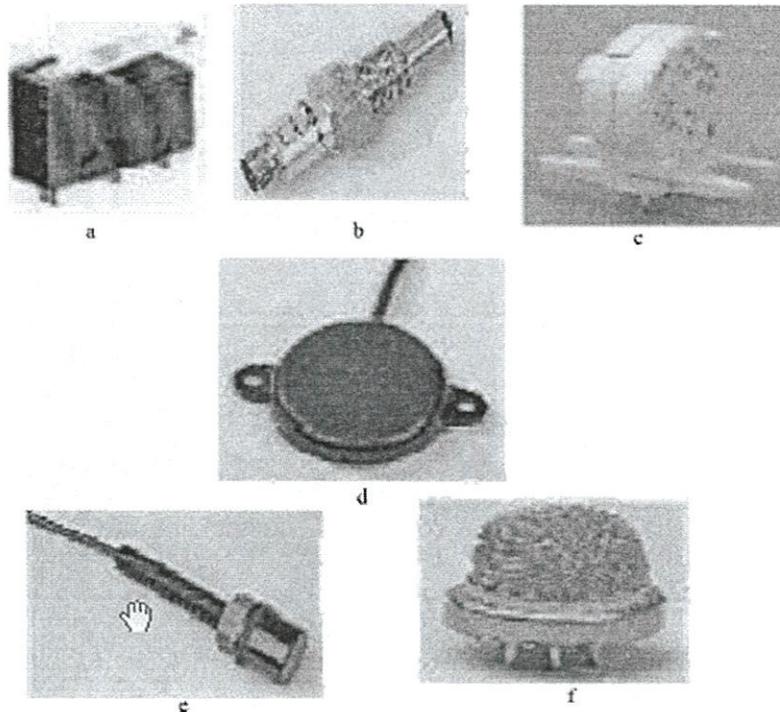


Figure I.8. Quelques types de capteurs

I.5.2. Capteurs magnétiques

Toute sonde à courants de Foucault mesure un champ électromagnétique alternatif et comporte nécessairement des capteurs magnétiques. Plusieurs technologies existent, quatre parmi les principales sont présentées ci-après. Les trois derniers types d'éléments sont des capteurs de champs magnétiques, ne pouvant effectuer que des mesures. L'émission du champ magnétique alternatif doit alors être réalisée par un autre élément à côté ou au-dessus du capteur.

I.5.2.1. Capteurs inductifs

Historiquement, les capteurs inductifs ont été les premiers éléments sensibles au champ magnétique connus. Les capteurs inductifs sont des bobines, qui peuvent être de différentes géométries, plates ou solénoïdes, et éventuellement contenir un noyau ferromagnétique afin de concentrer le champ magnétique et augmenter la sensibilité [16]. Un capteur inductif transforme un champ magnétique qui le traverse en tension grâce au phénomène d'induction par la loi de

Lenz-Faraday. Cette loi montre que la force électromotrice créée est proportionnelle à la dérivée temporelle de l'induction : la composante continue du champ magnétique est rejetée. Pour la même raison, la sensibilité en hautes fréquences est relativement grande.

Les capteurs inductifs ont été les premiers utilisés pour des raisons historiques, mais restent encore intéressants grâce à leur précision et leur robustesse. De plus, les bobines sont faciles à réaliser industriellement, du moins dans des dimensions raisonnables. L'inductance d'une bobine étant directement fonction de son nombre de spires et donc de sa taille, les bobines de petites dimensions présentent en général une sensibilité moindre [17] [18]. Néanmoins, des techniques évoluées permettent aujourd'hui la réalisation de bobines de faibles dimensions avec une grande sensibilité, grâce à des formes complexes ou un grand nombre de spires [19]. Le domaine fréquentiel d'utilisation d'un capteur inductif dépend grandement de son impédance, mais la fréquence d'utilisation est rarement inférieure à la dizaine de kHz.

I.5.2.2. Capteurs GMI

Le phénomène découvert en 1935 par Harrison ayant permis l'utilisation des magnéto-impédances géantes (giant magneto-impedances, GMI) repose sur l'effet de peau et sur la courbe d'aimantation $B = f(H)$ que montre la figure I.9 [20].

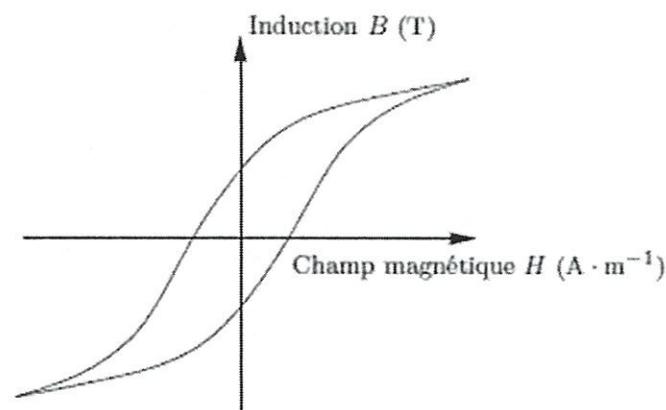


Figure. I.9. Exemple de courbe d'aimantation $B = f(H)$

Une GMI peut être un simple fil ferromagnétique, traversé par un courant alternatif. Si la fréquence est assez élevée, les courants ne traversent le fil qu'en surface, la profondeur de pénétration δ devenant plus faible que l'épaisseur du fil. L'impédance du fil est alors inversement proportionnelle à δ selon l'équation

$$Z = (1 + \iota) R \frac{a}{\delta} \quad (I.2)$$

où R est la résistance en basses fréquences du fil et a son rayon. ι est le nombre complexe. L'expression de δ montre que Z dépend de la perméabilité μ du matériau. Or selon la courbe

d'aimantation, le rapport $\mu = B/H$ dépend de la valeur de H . L'impédance varie en fonction du champ magnétique externe [21].

La recherche sur les GMI dans le domaine du CND par courants de Foucault a beaucoup progressé ces dernières années. Cette technologie permet de mesurer des champs magnétiques faibles sur une bande passante allant en général du continu à environ 10 kHz [22]. Il faut cependant que le champ magnétique extérieur soit supérieur au champ de saturation du matériau utilisé. Les dimensions classiques sont de l'ordre de quelques millimètres [23].

1.5.2.3. Capteurs GMR

Les magnétorésistances géantes (giant magneto-resistances, GMR) ont été découvertes à la fin des années 1980, simultanément par les deux récents prix Nobel à l'université Paris-Sud et Grunberg [24][25]. Le domaine physique utilisé est l'électronique de spin, et plus particulièrement le fait que les électrons d'un spin donné, qui peut être *up* ou *down*, ne se déplacent pas à la même vitesse selon l'orientation de l'aimantation du matériau traversé. La conductivité mesurée d'un matériau est directement reliée à la vitesse des électrons par la relation

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu_n \quad (\text{I.3})$$

où n est la densité des électrons, q la charge élémentaire et μ_n la mobilité, égale au rapport de la vitesse des électrons par le champ électrique qui crée leur mouvement.

Typiquement, une GMR est composée de plusieurs couches, deux couches ferromagnétiques séparées par une couche de matériau conducteur. L'orientation de l'une des deux couches ferromagnétiques, la « couche dure », est forcée. L'autre couche, la « couche douce », a son aimantation variable : lorsqu'un champ magnétique externe est présent, elle s'aligne à ce champ ; sinon, elle s'aligne parallèlement à l'aimantation de la couche dure, par couplage ferromagnétique indirect, à travers la couche conductrice.

La mesure de résistance est effectuée par passage d'un courant à travers l'ensemble des couches. Le courant peut alors être décomposé en deux courants élémentaires, celui des électrons de spin *up* et celui des électrons de spin *down* [26]. Comme indiqué sur la figure I.10, lorsque les deux aimantations sont parallèles, le courant *up* voit deux résistances r faibles et le courant *down* deux résistances R fortes. La résistance totale est, si $r \ll R$,

$$R_p = 2 \frac{Rr}{R+r} \approx 2r \quad (\text{I.4})$$

Au contraire, si les deux aimantations sont opposées ou antiparallèles, chaque courant traverse successivement une résistance r et une résistance R . Il vient alors

$$R_0 = \frac{R+r}{2} \approx \frac{R}{2} \quad (\text{I.5})$$

La résistance de la GMR varie ainsi entre ces deux valeurs extrêmes, en fonction du champ magnétique externe au capteur [27].

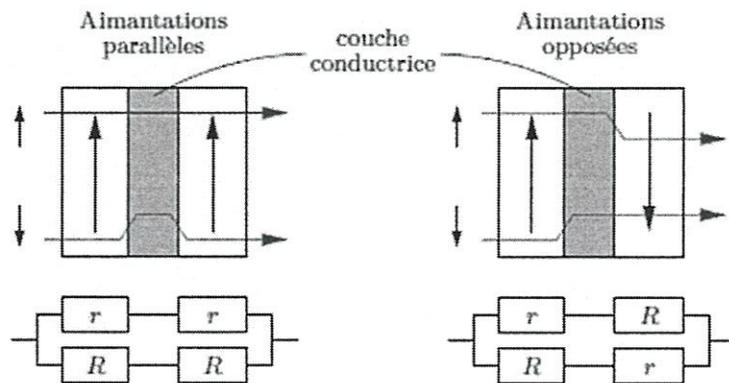


Figure I.10. Principe de fonctionnement des GMR

Même si les GMR sont avant tout connues en tant que tête de lecture dans tous les disques durs actuels [28], elles sont aussi utilisées dans le domaine du CND. Les premières GMR offraient des résultats inférieurs à ceux des GMI, mais la recherche sur ce type de capteur est très active depuis vingt ans. Pour une dimension active de quelques dizaines de micromètres, un champ magnétique faible peut être mesuré [29]. Son amplitude doit être inférieure à une valeur maximale pour laquelle les aimantations des deux couches ferromagnétiques seront opposées.

On peut enfin signaler l'existence d'autres types de magnétorésistances, comme les magnétorésistances anisotropes (anisotropic magneto resistances, AMR) ou les magnétorésistances à effet tunnel (tunnel magneto resistances, TMR) [30][31]. Toutes ces magnétorésistances sont en général utilisées pour détecter un champ magnétique de fréquence inférieure au kHz.

I.5.2.4. Capteurs fluxgates

Un dernier type de capteur de champ magnétique, d'une technologie assez récente, est représenté par les capteurs fluxgates. Il s'agit de capteurs formés autour d'un noyau magnétique, pouvant avoir des formes relativement diverses [32]. La figure I.11 montre trois exemples de géométries possibles.

Le matériau du noyau doit avoir une courbe d'aimantation $B = f(H)$ (figure I.9) comportant une forte saturation de l'induction lorsque le champ magnétique est élevé. Le permalloy est par exemple un matériau très utilisé dans ce type d'application.

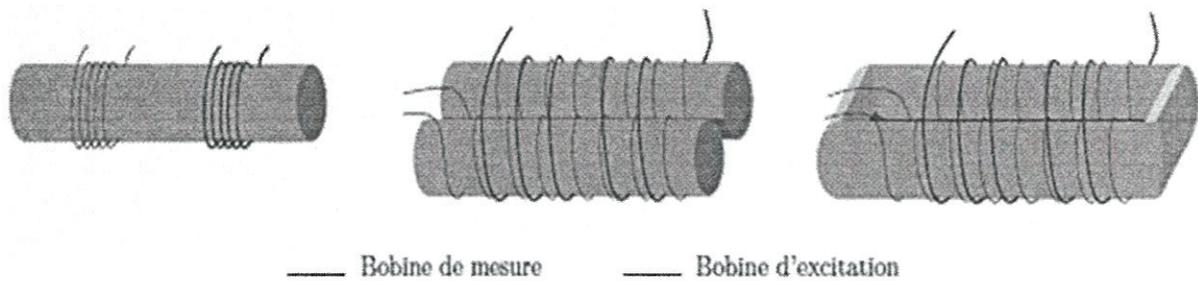


Figure I.11. Exemples de géométries de fluxgate

Un enroulement excitateur entourant au plus proche le noyau est parcouru par un courant alternatif non nécessairement sinusoïdal, créant un champ magnétique alternatif dans le noyau, localement parallèle à l'axe de l'enroulement. L'induction correspondante subit une saturation, symétrique par rapport à zéro. Un autre enroulement est disposé autour du noyau, son axe étant rectiligne. Il n'est pas alimenté, et la force électromotrice créée à ses bornes est, selon la loi de Lenz, proportionnelle à la dérivée du flux de l'induction magnétique dans la où les parties du noyau entourées. Lorsqu'un champ magnétique extérieur s'ajoute au champ d'excitation à l'endroit où est bobiné l'enroulement de réception, la saturation de l'aimantation n'est plus symétrique et la tension est déformée. Cette déformation est en général visible dans l'amplitude des harmoniques paires de la tension [32].

Les fluxgates ont une grande sensibilité, en particulier pour les champs magnétiques continus. Ils sont ainsi très employés dans les boussoles, car ils sont capables de détecter le champ magnétique terrestre. Dans les applications CND, leur mise en œuvre demande une miniaturisation importante, ce qui leur confère une réputation de technologie relativement coûteuse.

Conclusion

Le contrôle non destructif (CND) consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault qui est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs. Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des différentes techniques de CND et leurs avantages et inconvénients, aussi on a donné un aperçu sur les différents types de capteurs employés pour le CND. Le prochain chapitre sera consacré à la présentation des capteurs à courants de Foucault.

Chapitre II

Capteur inductif à courants de Foucault

Introduction

La technique des courants de Foucault (CF) est largement utilisée dans le domaine du CND, dès lors qu'il s'agit de matériaux électriquement conducteurs. Elle représente par exemple la moitié des contrôles dans le domaine de l'aéronautique. Cette méthode est en effet sensible à des défauts dans l'état géométrique ou électromagnétique d'une pièce, comme des inclusions, des fissures ou les effets de la corrosion. De plus, elle est aisée à mettre en œuvre, robuste dans le cadre des applications industrielles et relativement peu coûteuse. Cependant, le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité pour les opérations d'inspection requiert le développement de nouveaux systèmes de contrôle.

Le contrôle par CF est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre (il est très facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde) et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment créer une bonne répartition des CF permettant d'avoir un signal de défaut aussi important que possible ? Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les CF n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent.

Dans cette partie, on essayera de donner quelques notions sur les CF et le diagramme d'impédance. Ensuite on passera en revue les différents paramètres influant sur le CND par CF, et on terminera par les différents types de capteurs à CF.

II.1. Capteur par courant de Foucault

II.1.1. Principe physique

Le capteur à CF de base est constitué d'une bobine parcourue par un courant d'excitation variable dans le temps, qui engendre un champ magnétique d'excitation variable. Le champ émis par le capteur s'établit dans une zone de rayonnement qui dépend de sa géométrie. L'approche d'une pièce électriquement conductrice appelée cible provoque l'apparition de courants induits dans celle-ci. Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique de réaction qui s'oppose au champ d'excitation. Le champ résultant dépend du signal d'excitation, de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique, de la géométrie de la cible ainsi que de la distance capteur-cible. Une mesure directe de ce champ ou d'une grandeur dérivée peut permettre de caractériser la cible. La figure II.1 illustre le principe du CND par CF.

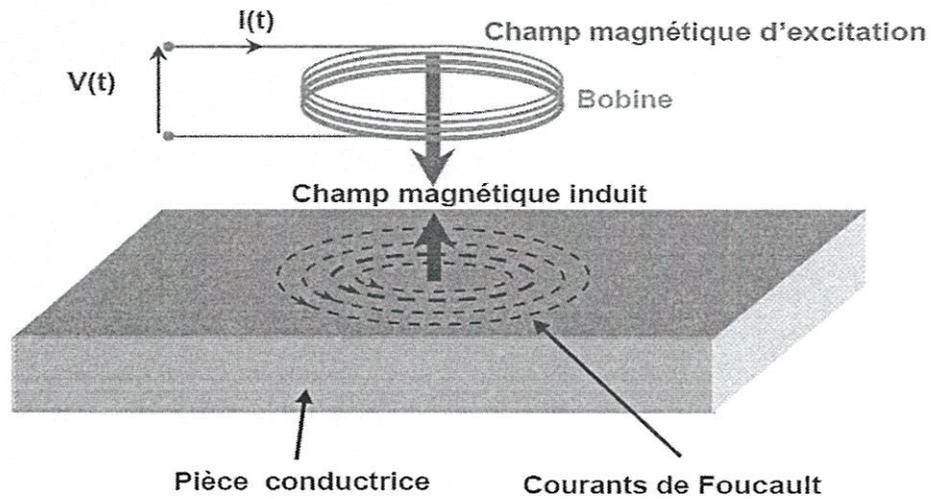


Figure II.1. Principe des capteurs à CF

Les CF sont des courants de surface leurs densités décroît rapidement à l'intérieur de la cible (Figure II.2). Considérons une cible plane semi-infinie excitée par une nappe de courants extérieure parallèle au plan (cas d'une onde plane). Dans cette situation, le module de la densité de courant décroît de manière exponentielle lorsque la profondeur augmente suivant la relation :

$$J(z) = J_0 \exp(-z \sqrt{\pi f \sigma \mu}) = J_0 \exp(-\frac{z}{\delta}) \tag{II.1}$$

Où :

z : la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce.

$J(z)$: le module de la densité de courant à la profondeur z .

J_0 : le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$).

δ : la profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

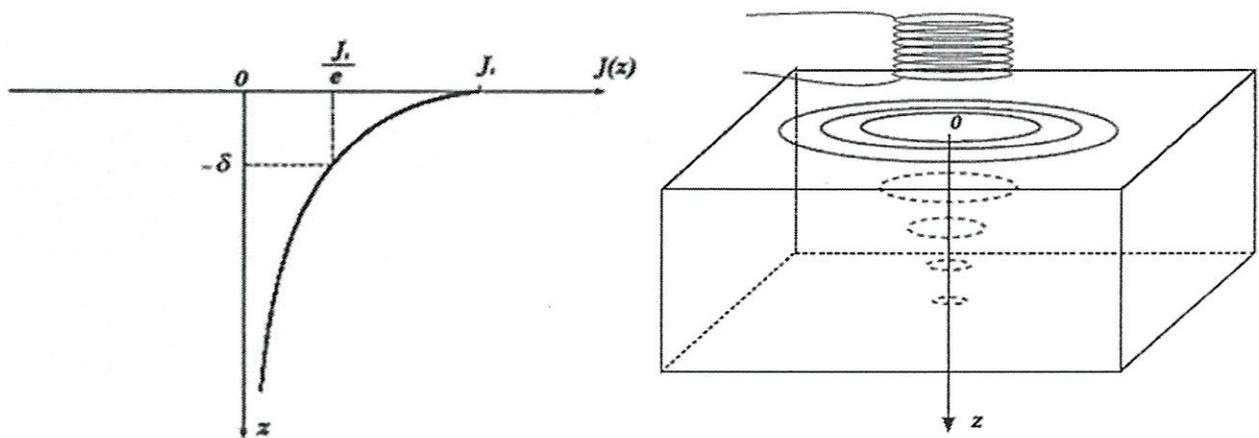


Figure II.2. Répartition des CF dans une cible

II.1.2. Plan d'impédance normalisée

L'interaction sonde-cible peut s'étudier dans le cas d'une sonde à double fonctions en examinant l'impédance complexe de la sonde. Pour un bobinage de N spires parcouru par un courant alternatif sinusoïdal I_{exc} , cette impédance est définie par :

$$Z = \frac{V_{exc}}{I_{exc}} = R + jX \quad (II.2)$$

Où V_{exc} et I_{exc} sont les grandeurs complexes associées à la tension et au courant d'excitation. Une sonde est donc caractérisée par deux grandeurs : la composante résistive R qui englobe les pertes par CF dues à la pénétration du champ dans la cible et les pertes internes du bobinage d'excitation, et le terme inductif X qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par la sonde. Pour ne conserver dans l'expression de l'impédance que les variations dues à la présence de la cible, on introduit traditionnellement la notion d'impédance normalisée. Cette impédance normalisée Z_n se déduit de l'impédance de la sonde Z à l'aide de l'expression [35] :

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad (II.3)$$

Où $Z_0 = R_0 + jX_0$ est l'impédance à vide de la sonde (impédance sans cible).

En procédant à cette normalisation, la mesure devient indépendante de certaines caractéristiques propres de la bobine excitatrice (nombre de spires, pertes à vide) et de la croissance de la réactance en fonction de la fréquence. Elle dépend uniquement des paramètres de structure que sont la fréquence d'excitation et la géométrie de la sonde, et des paramètres de la cible à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique σ , sa perméabilité magnétique μ et la distance sonde/cible (lift-off). L'étude des variations de Z_n s'effectue dans le plan d'impédance normalisée en traçant X_n en fonction de R_n . Pour une sonde donnée, toute variation de l'un des paramètres de la pièce induit un déplacement du point représentatif de Z_n dans le plan d'impédance normalisée.

La figure II.3 illustre l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la sonde pour des variations de conductivité électrique σ et de distance de mesure (lift-off).

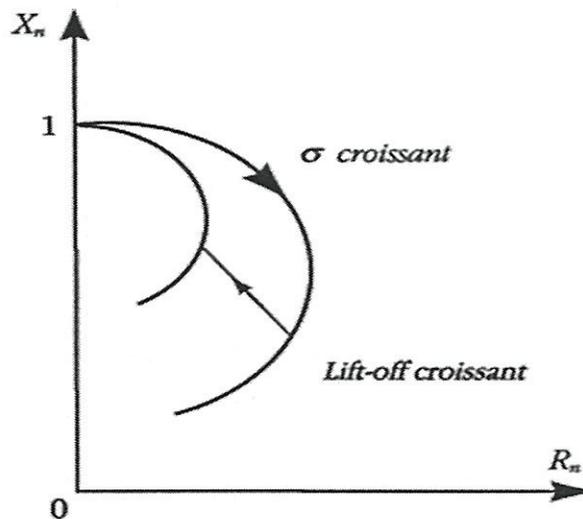


Figure II.3. Influence de σ et du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (Cas d'une pièce amagnétique)

La prédétermination de ces trajectoires pour une cible quelconque est un problème relativement complexe qui nécessite une modélisation complète du dispositif. Un modèle de type transformateur a par exemple permis d'identifier, à partir des deux mesures (R_n, X_n) , la conductivité locale de la cible et la distance séparant la sonde de la cible [36].

La présence de défauts ou d'inhomogénéités de la cible induit une modification dans l'espace de l'un ou de plusieurs des paramètres influents (σ , lift-off,...), qui se traduit dans le plan d'impédance (R_n, X_n) , par un déplacement du point représentatif de la sonde.

II.1.3. Principaux paramètres influant sur le contrôle

Les principaux paramètres à prendre en compte pour un contrôle résultent des considérations précédentes et peuvent se répartir en pratique en trois catégories :

II.1.3.1. Paramètres liés au matériau à sonder

Outre ceux liés à sa forme géométrique, ce sont sa conductivité électrique et sa perméabilité magnétique dont il importera de prendre en compte le niveau de stabilité le long de la pièce ou d'une pièce à l'autre, toute variation locale entraîne un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde [37]. La conductivité et la perméabilité du métal et surtout les variations locales parfois imprévisibles, sont absolument décisives sur la circulation des CF; ces variations ont des causes très diverses : présence de contraintes résiduelle importantes localement dues à la fabrication elle-même ou à des chocs ou aux contraintes contenant des carbures importants, etc.

II.2.3.2. Paramètres liés au montage

Il s'agit de la distance ou l'assiette dans le cas de sonde plate ou du coefficient de remplissage et de variation de diamètres dans le cas de la sonde encerclé ou de contrôle interne des tubes; soit

du lift-off. La répercussion de ces paramètres est aussi à rechercher pour éviter des effets perturbateurs trop importants sur le point moyen de fonctionnement [37].

II.1.3.3. Paramètres électriques

C'est essentiellement la fréquence d'excitation de la bobine, paramètre qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat ou observation particulière à la profondeur des défauts, on peut estimer la fréquence de contrôle en fonction des σ , μ_r et de l'épaisseur de la pièce à examiner, telle que :

$$f_c = \frac{1}{\pi \cdot \delta^2 \cdot \sigma \cdot \mu} \quad (\text{II.4})$$

La figure II.4 présente les variations de la profondeur de peau conventionnelle δ en fonction de la fréquence pour l'acier inoxydable 304L ($\sigma = 1,4 \cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ et $\mu_r = 1$).

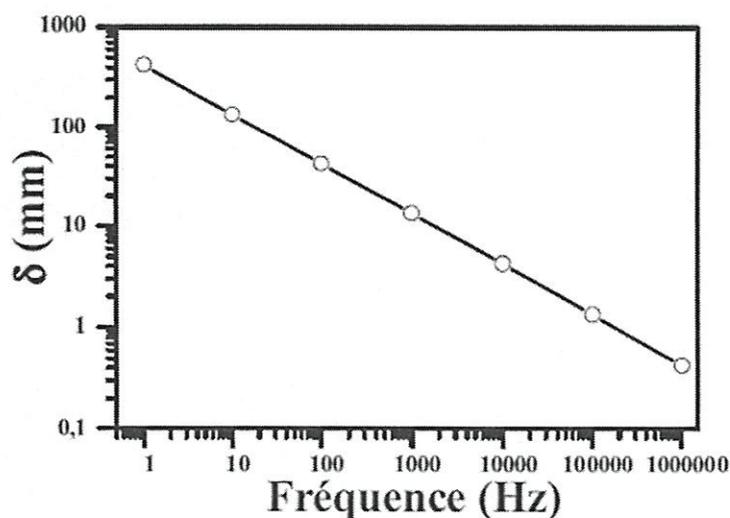


Figure II.4. Variations de la profondeur de peau conventionnelle en fonction de la fréquence pour l'acier inoxydable 304L

L'affaiblissement très rapide du champ électromagnétique dans les matériaux conducteurs explique pourquoi le contrôle par CF convient préférentiellement à la caractérisation de pièces minces et à la détection de défauts situés près de la surface de la pièce. Le seul degré de liberté pour augmenter la pénétration des CF dans le matériau est la fréquence de travail comme le montre la figure II.4. Ceci explique que les fréquences utilisées sont extrêmement variables en fonction des applications considérées. Ainsi, pour la détection des défauts débouchant ou des défauts internes situés dans les parois minces, et pour la mesure des dépôts de faible épaisseur, on utilise des fréquences élevées allant jusqu'à quelques centaines de kHz. Au contraire, pour le contrôle de la qualité des produits ferromagnétiques, on utilise des fréquences basses voire très basses (comprises entre 1 Hz et 1 kHz) en fonction de certaines considérations métallurgiques ou

dimensionnelles. La gamme de fréquence généralement employée pour les applications industrielles usuelles de CND est comprise entre 1 kHz et 1 MHz.

Une excitation mono fréquence ne donne que deux informations (amplitude et phase ou résistance et réactance) qui caractérisent le défaut, la détermination de la position et la nature du défaut nécessitent d'utiliser plusieurs fréquences dans le but d'avoir plus d'informations.

On distingue trois types d'alimentation pour les capteurs à CF:

- signal mono fréquentiel.
- signal multi fréquentiel.
- signal pulsé.

II.1.3.4. Effet de peau

L'amortissement des CF dans le matériau, dans le cas simple d'une onde plane harmonique d'incidence nulle, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau en regard.

On définit l'épaisseur de peau par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu f}} = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma \mu_0 \mu_r f}} \quad (\text{II.5})$$

Où :

δ : est la profondeur de peau conventionnelle (en m),

σ : est la conductivité électrique du matériau (en S.m^{-1}),

μ_0 : est la perméabilité magnétique du vide ($\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$),

μ_r : est la perméabilité magnétique relative du matériau (sans dimension) et f est la fréquence de contrôle, c'est-à-dire la fréquence du courant circulant dans la bobine inductrice (en Hz).

Dans le cas général, cette formule est rigoureuse mais elle renseigne néanmoins assez précisément sur la profondeur au delà de laquelle les courants induits sont trop faibles pour être influents.

II.2. Modélisation simplifié du CND par CF : Cas simple du transformateur

Comme montre la figure II.5, la bobine d'excitation sert aussi d'élément de mesure. L'exploitation se fait par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement. Cette impédance se calcule sur la base du modèle du transformateur, le primaire étant la bobine, le matériau constituant un secondaire en court-circuit.

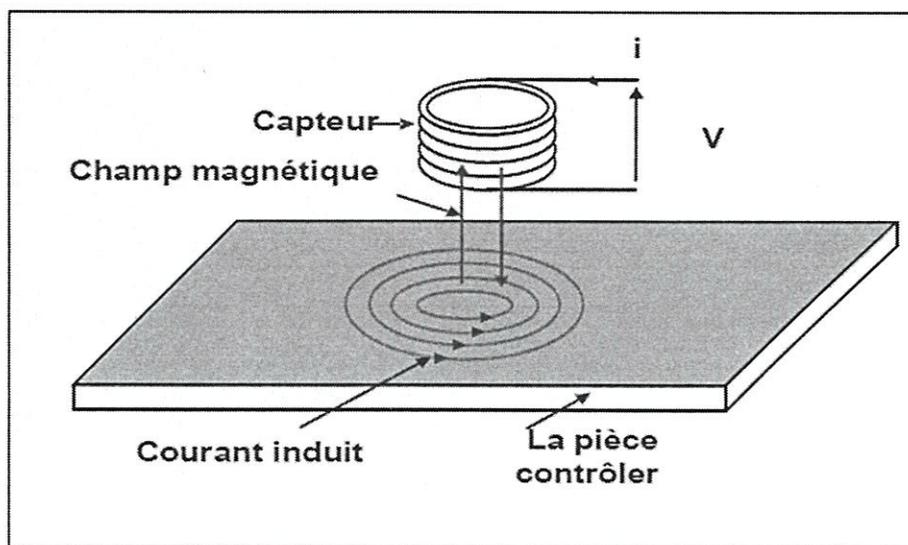


Figure II.5. Modèle real d'un CND par CF

En première approximation, le circuit formé par la bobine et le conducteur peut être représenté par le schéma de la figure II.6, Connaissant l'intensité I_1 du primaire, l'intensité I_2 du secondaire, l'interaction capteur/ cible s'étudie en examinant l'impédance complexe du capteur.

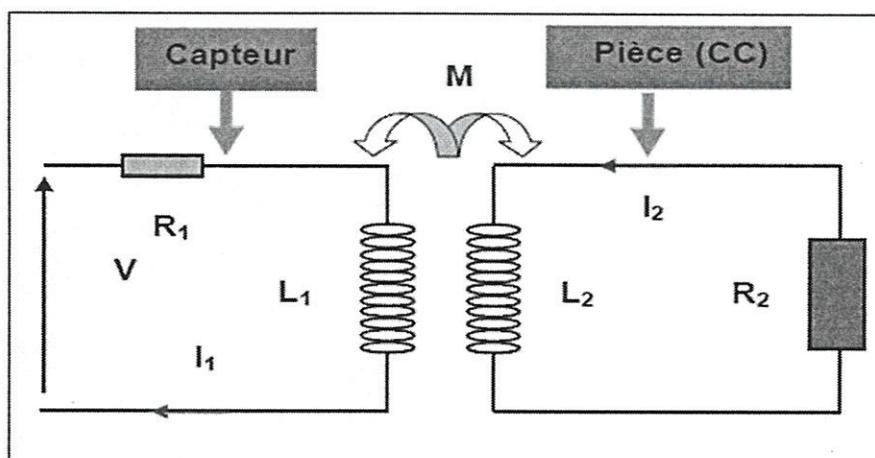


Figure II.6. Schéma équivalent d'un transformateur

⇒ L'impédance à vide du capteur (impédance sans cible).

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \tag{II.6}$$

⇒ A la présence de la cible, l'impédance devient:

$$Z = R_n + jX_n \tag{II.7}$$

⇒ Dans le schéma équivalent d'un transformateur on a le système suivant :

La tension instantanée V' des bornes de la bobine excitatrice s'écrit :

$$V' = R_1 I_1 + \frac{d\Phi_1}{dt} \tag{II.8}$$

⇒ La cible constitue également une bobine, la tension est nulle dans ses bornes puisque en réalité il forme un court circuit, on écrit :

$$0 = R_2 I_2 + \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (\text{II.9})$$

⇒ Le flux à travers chaque spire est égal à la somme de son flux propre et des flux produits par les autres spires :

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + M I_2 \quad (\text{II.10})$$

$$\Phi_2 = L_2 I_2 + M I_1 \quad (\text{II.11})$$

Où :

R_1 et L_1 sont la résistance et l'inductance du primaire,

R_2 et L_2 sont la résistance et l'inductance du secondaire,

M l'inductance mutuelle entre le primaire et le secondaire.

⇒ En régime harmonique on a : $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$

⇒ Remplaçons (II.7) et (II.8) dans le système on obtient:

$$V' = R_1 I_1 + j L_1 \omega I_1 + j M \omega I_2 \quad (\text{II.12})$$

$$0 = R_2 I_2 + j L_2 \omega I_2 + j M \omega I_1 \quad (\text{II.13})$$

⇒ Le courant induit est tiré à partir de l'équation (II.10):

$$I_2 = -\frac{j M \omega}{R_2 + j L_2 \omega} I_1 \quad (\text{II.14})$$

⇒ En reportant dans (II.9)

$$I_2 = \left(R_1 + j L_1 \omega + \frac{M^2 \omega^2}{R_2 + j L_2 \omega} \right) I_1 \quad (\text{II.15})$$

⇒ Pour un bobinage de N spires parcouru par un courant alternatif sinusoïdale, l'impédance est

définir par : $Z = \frac{V'}{I_1}$

$$Z = \frac{V'}{I_1} = R_1 + j L_1 \omega + \frac{M^2 \omega^2}{R_2 + j L_2 \omega} \quad (\text{II.16})$$

$$Z = R_1 + j L_1 \omega + \frac{M^2 \omega^2 (R_2 - j M L_2 \omega)}{(R_2 + j L_2 \omega)(R_2 - j M L_2 \omega)} \quad (\text{II.17})$$

⇒ L'impédance se compose de deux parties : partie réel est R_n et partie imaginaire X_n .

$$Z = R_1 + \frac{M^2 \omega^2 R_2}{(R_2^2 + L_2^2 \omega^2)} + j \left(L_1 \omega - \frac{L_2 M^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2} \right) \quad (\text{II.18})$$

$$R_n = R_1 + \frac{M^2 \omega^2 R_2}{(R_2^2 + L_2^2 \omega^2)} \quad (\text{II.19})$$

$$X_n = j(L_1 \omega - \frac{L_2 M^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2}) \quad (\text{II.20})$$

II.3. Classification des capteurs dans le CND par CF

II.3.1. Classification suivant le type de sonde

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.

II.3.1.1. Sonde à 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.

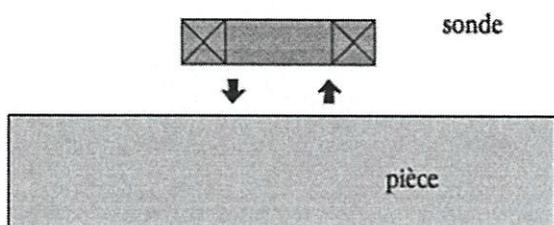


Figure II.7. Sonde à double fonctions

II.3.1.2. Sonde à fonctions séparées

La sonde à fonctions séparées est constituée d'au moins deux éléments. Les fonctions d'émission et de réception sont assurées par des éléments distincts. La réception peut alors se faire à un endroit différent de la position de l'émetteur. L'élément de mesure peut être une bobine aux bornes de laquelle on mesure la d.d.p induite ou un capteur de champ (GMR, GMI ...).

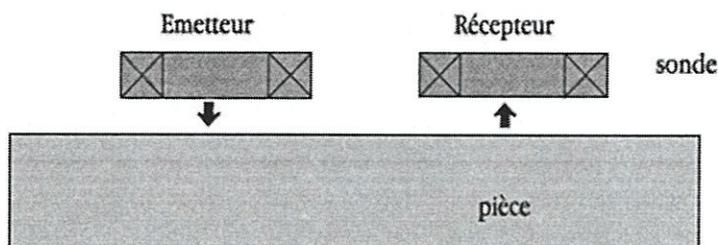


Figure II.8. Sonde à fonctions séparées

II.3.1.3. Sonde différentielle

Une sonde en mode différentielle est un système destiné à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines. La sonde peut être constituée de deux enroulements identiques dont on mesure l'écart de l'impédance (figure II.9). La mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Ce type de sonde est particulièrement utilisé pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce en s'affranchissant de perturbations induites, telles que les variations de la distance sonde-pièce (lift-off) ou de la conductivité.

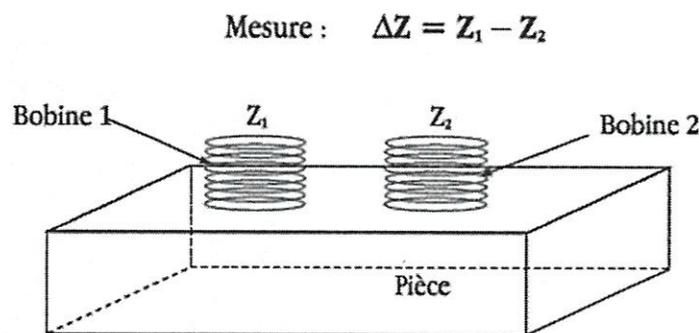


Figure II.9. Sonde différentielle

II.3.2. Classification suivant le montage par rapport à la pièce contrôlée

Du point de vue fonctionnel, le classement des capteurs est basé sur la géométrie du capteur et le type de produit à contrôler, on peut citer :

II.3.2.1. Les bobines encerclants

Destinés au contrôle produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres, tubes et petits profilés métallurgiques, les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit, afin d'obtenir un coefficient de couplage le plus voisin possible de l'unité. Cette condition est nécessaire pour avoir une bonne sensibilité de détection sans avoir à utiliser un taux d'amplification trop fort apportant une dégradation du rapport signal sur bruit [38].

II.3.2.2. Les bobines internes

Pour le contrôle des tubes par l'intérieur, pour lesquels les bobines sont aussi moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit. Ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire [39].

II.3.2.3. Les bobines simples

Elles servent à créer un champ magnétique alternatif, à détecter simultanément les défauts par la mesure de leur impédance.

II.3.2.4. Les bobines plates

Pour le contrôle de surfaces planes ou dont la courbure est faible devant le rayon de la bobine.

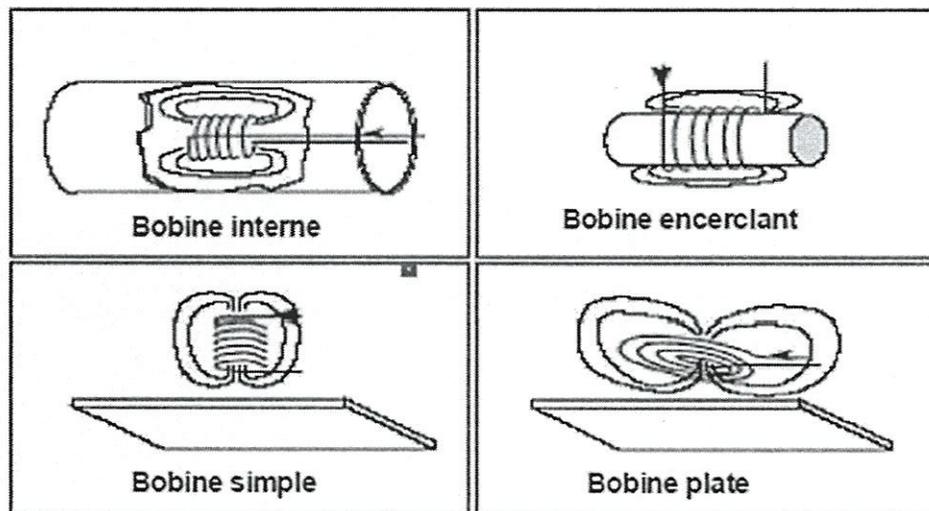


Figure II.10. Classification des capteurs suivant le montage par rapport à la pièce contrôlée

II.3.3. Classification suivant le support du capteur

De nombreuses études ont été effectuées dans le monde sur la modélisation analytique des structures des capteurs à CF. La modélisation des structures avec circuit magnétique de forme en U (figure II.11(a)), est effectivement difficile à cause du nombre d'interfaces entre les différents milieux qui le compose. Par contre d'autre auteur ont essayée de modéliser le capteur de forme en pot (figure II.11(b)), mais leurs modèles sont plutôt complexes et difficilement exploitables. Par ce que ce type de capteur présente des fuites magnétique importantes.

Les structure en forme « E » ou « H » (figure II.11(c,d)) sont plus complexes mais elles offrent la possibilité de réaliser des mesures par différence ce qui diminue fortement la sensibilité du capteur aux différentes dérives.

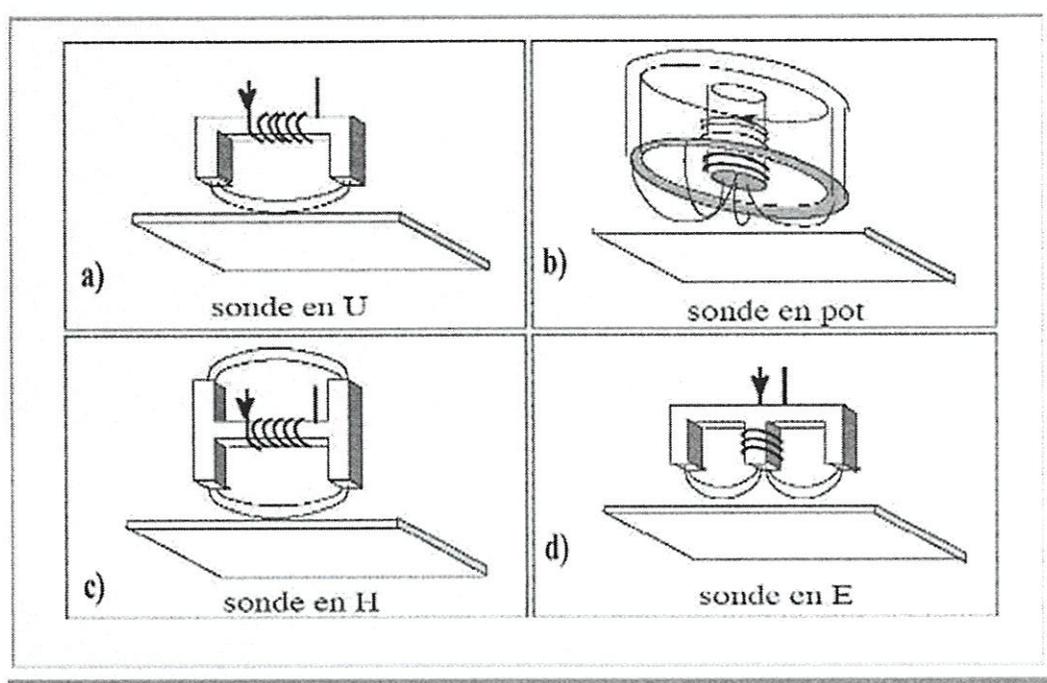


Figure II.11. Classification des capteurs suivant le support du Capteur

II.4. Avantages et Inconvénients du CND par CF

II.4.1. Avantages du CND par CF

a. la simplicité

Le principal avantage des sondes à CF est leur facilité de mise en œuvre. Le contrôle est réalisé sans contact, et par conséquent sans utilisation de couplant. Le signal CF est obtenu directement et instantanément.

b. l'intégration

La nature électrique du signal 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 d'augmentation des performances. Le signal CF est en effet directement utilisable pour d'éventuels traitements électroniques analogiques, suivis d'une numérisation et de traitements numériques ou informatiques. Cela permet d'envisager des appareils de contrôle à la fois plus petits, plus légers et plus rapides.

c. le coût

Un dispositif CF très simple est une unique bobine avec un générateur, un voltmètre et un ampèremètre. Il s'agit d'un dispositif très bon marché, qui même en augmentant la complexité de la technologie ou de l'instrumentation (utilisation de multiplexeur, de

détection synchrone, de capteurs de haute technologie), reste abordable et ne demande pas un investissement primordial trop important.

II.4.2. Inconvénients du CND par CF

a. la résolution

Un défaut ponctuel de dimensions micrométriques dévie toutes les lignes de courants qui s'approchent de lui. Si l'émetteur fait une surface de l'ordre du millimètre carré, les courants induits parcourent une surface au moins égale voire plus grande que celle-ci. Par conséquent, le défaut micrométrique correspond à une réponse qui s'étend sur plusieurs millimètres carrés, ce qui a pour conséquence de détériorer nettement la résolution spatiale d'une sonde à CF.

b. l'effet de peau

L'équation II.1 fait apparaître une décroissance exponentielle sur l'amplitude des courants, ceux-ci sont localisés à une faible profondeur. Ce phénomène, appelé effet de peau, a pour conséquence la difficulté voire l'impossibilité de détecter un défaut situé à une distance très supérieure à l'épaisseur de peau δ .

c. le positionnement

Un décollement ou une inclinaison de la sonde par rapport à la surface de la pièce sont les deux principaux problèmes de positionnement rencontrés, qui conduisent à une variation parasite de l'impédance mesurée. En particulier, le contrôle des surfaces non planes peut ainsi poser problème si la sonde ne se conforme pas à la surface [40].

II.5. Applications industrielles

II.5.1. Contrôle des tubes, barres et fils

La technique de détection des défauts par CF à l'aide de bobines encerclant se trouve très bien adaptée au contrôle industriel de tous les produits longs métalliques; aussi elle est très utilisée dans les industries métallurgiques des ferreux et des non-ferreux, où l'on détecte ainsi des défauts superficiels de nature variée sur des fils, des barres et des tubes de petits diamètres (inférieurs à quelques centimètres). Une telle technique peut mettre en évidence, sur ces produits, non seulement des défauts de santé superficiels tels que criques, piqûres, petites pailles, mais aussi des défauts de géométrie, tels que des variations brusques de diamètre ou d'épaisseur de paroi, des hétérogénéités de structure telles que des zones à gros grains,...etc [37].

Le contrôle des tubes en service est une application importante du contrôle par CF, étant donné l'importance que revêtent la maintenance des chaudières, des échangeurs et surtout des générateurs de vapeur des centrales nucléaires. On sonde ici les tubes par l'intérieur en utilisant un "furet" poussé et tiré par un câble et constitué par une ou des bobines longitudinales et concentriques au tube. L'utilisation séparée ou conjointe (système multifréquence) de fréquences bien choisies permet d'identifier les différents types de défauts recherchés, fissures en paroi externe ou interne du tube, cavité de corrosion,...etc [37].

II.5.2. Contrôle des surfaces planes

Le contrôle des surfaces planes, en ce qui concerne la recherche de petites criques, fissures ou hétérogénéités locales, peut être réalisé à l'aide d'une sonde pick-up que l'on glisse avec ou sans contact, qui comporte une bobine plate souvent associée à un noyau ferromagnétique destiné à concentrer et bien définir la zone sensible de la sonde. De très fins défauts peuvent être ainsi détectés sur tout produit conducteur, toutefois, le caractère ponctuel de la zone sensible oriente plus volontiers l'usage du procédé vers le contrôle de petites surfaces correspondant aux zones critiques dans la dégradation d'une pièce mécanique plutôt que vers l'examen systématique de grandes surfaces comme les tôles.

C'est ainsi que les CF sont couramment utilisés pour la recherche des fissures de fatigue au cours des opérations de maintenance du matériel aéronautique [37].

Conclusion

Ce deuxième chapitre a été consacré à donner une idée générale sur le principe de fonctionnement des capteurs à courants de Foucault (CF), avantages et inconvénients ainsi que les applications de ce type de contrôle, et les différents types de capteurs à CF. En effet, Les capteurs de contrôle à CF présente également l'avantage d'être facilement transportable et il permette un contrôle (manuel ou automatique) rapide des pièces métalliques.

Le prochain chapitre sera consacré à l'étude des problèmes de modélisation de CND à CF.

Chapitre III

Problème électromagnétique: formulation et outils de modélisation



Introduction

La modélisation du problème magnétodynamique dans un système du phénomène de courant de Foucault repose sur la résolution des équations de Maxwell. Les grandeurs électromagnétiques dans le composant varient à la fois dans l'espace et dans le temps. Pour calculer ces grandeurs à tout instant, la méthode la plus précise consiste à intégrer dans le temps les équations régissant le problème. En même temps, ces grandeurs sont évaluées en tout point de l'espace.

La méthode des éléments finis est très largement utilisée pour résoudre des problèmes physiques régis par des équations aux dérivées partielles. Elle s'avère très bien adaptée à la résolution des problèmes électromagnétiques, d'où son utilisation dans cette partie de notre étude.

Dans ce chapitre, on commence par présenter les formulations fondamentales de l'électromagnétisme obtenues à partir des équations de Maxwell. Dans notre cas ça sera l'équation de la magnétodynamique en régime harmonique pour une formulation en potentiel vecteur magnétique \vec{A} . En suite la résolution de cette équation (qui est une équation différentielle aux dérivées partielles) dans un problème de CND par CF se fait à l'aide des méthodes numériques en l'occurrence la méthode des éléments finis. Ainsi on détermine l'impédance d'un capteur absolu à courant de Foucault par deux méthodes (méthode d'énergie et la méthode directe), on exprime aussi l'impédance d'un capteur différentiel.

III.1. Analyse des phénomènes électromagnétiques

Tous les phénomènes électromagnétiques variables dans le temps et dans l'espace qu'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell.

III.1.1. Equations de Maxwell

Nous disposons alors du système des quatre équations suivantes :

$$\text{➤ Loi de Maxwell Gauss : } \operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{III.1})$$

$$\text{➤ Loi de conservation de flux: } \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$\text{➤ Loi de Maxwell Faraday: } \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{➤ Loi de Maxwell Ampère : } \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{tot}} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t \quad (\text{III.4})$$

Avec :

\vec{E} : Le vecteur champ électrique [V/m].

\vec{H} : Le vecteur champ magnétique [A/m].

\vec{B} : Le vecteur d'induction magnétique [T].

\vec{J}_{tot} : Le vecteur densité de courant totale [A/m^2].

\vec{D} : L'induction électrique [$A.S/m^2$].

ρ : La densité de charge [C/m^3].

t : le temps [s].

μ : La perméabilité absolue.

σ : La conductivité du matériau.

$\partial\vec{D}/\partial t$: La densité de courant de déplacement.

III.1.2. Lois de comportement des milieux et loi d'ohm

Pour définir complètement les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu, caractérisé du point de vue électromagnétique par une conductivité σ , une perméabilité μ et une permittivité ε , on ajout aux quatre équations précédentes (équation de Maxwell) les lois de comportement des milieux et la loi d'ohm:

- Relation magnétique :

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

- Relation électrique :

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{III.6})$$

- Loi d'ohm :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

III.1.3. Hypothèses simplificatrices

Ces équations décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais à l'heure actuelle, les équations de Maxwell telles quelles sont, s'adaptent mal à une résolution analytique. De plus, suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables, ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites, dans notre cas d'étude nous allons considérer que :

- Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de 10^6 S/m, et ε_0 est de l'ordre de $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHz nous avons $\omega \varepsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir $\partial D/\partial t = 0$.
- La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\rho = 0$).

- Selon les matériaux utilisés σ , μ , ε , peuvent être soit des scalaires modélisant alors le comportement isotrope, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie.
- les paramètres σ , μ , ε , sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système.
- $\partial/\partial t = j\omega$, car l'excitation est une tension périodique sinusoïdale d'amplitude constante.

Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient :

$$r\vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.8})$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{III.9})$$

$$r\vec{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.10})$$

$$\text{div}\vec{D} = 0 \quad (\text{III.11})$$

III.1.4. Relations de continuité

Les champs électrique et magnétique des différents milieux sont liés à l'interface par des relations de continuité. Soient deux milieux, M_1 et M_2 . On appelle $(E_1, B_1, H_1$ et $D_1)$ les différents champs de M_1 et $(E_2, B_2, H_2$ et $D_2)$ de M_2 . Soit n la normale unitaire à la frontière entre M_1 et M_2 , dirigée de M_1 vers M_2 , comme illustrer par la figure ci-dessous. A l'interface entre les deux milieux, les relations de continuité sont les suivantes [41] :

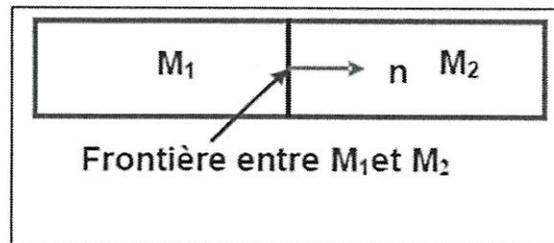


Figure III.1. Vecteur normal unitaire à la frontière entre M_1 et M_2

- La continuité de la composante tangentielle de \vec{E} .

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = 0 \quad (\text{III.12})$$

- La continuité de la composante normale de \vec{B} .

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.13})$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique due aux charges surfaciques s'ils existent.

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{III.14})$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{III.15})$$

Avec :

ρ_s : Densité de charge surfacique a l'interface.

\vec{n} : Vecteur normale a la surface.

III.2. Définition des potentiels et conditions de jauge

A partir de l'équation (III.9) l'induction magnétique s'écrit comme le rotationnel d'un vecteur appelée potentiel vecteur magnétique \vec{A} qui s'exprime par :

$$\vec{B} = r\vec{\text{ot}}(\vec{A}) \quad (\text{III.16})$$

En remplaçant le potentiel vecteur dans la loi de Maxwell Faraday, On obtient :

$$r\vec{\text{ot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} r\vec{\text{ot}}(\vec{A}) \quad (\text{III.17})$$

On peut récrire (III.14) comme suit :

$$r\vec{\text{ot}}(\vec{E}) = -r\vec{\text{ot}}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{III.18})$$

L'équation (III.15) devient :

$$r\vec{\text{ot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{III.19})$$

A partir de cette équation (III.19), on peut définir un potentiel scalaire électrique V tel que:

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -gr\vec{ad}V \quad (\text{III.20})$$

Remplaçant l'équation (III.20) dans la loi d'ohm :

$$\vec{J} = -\sigma\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + gr\vec{ad}V\right) \quad (\text{III.21})$$

L'expression de la densité de courant totale \vec{J} est :

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_s \quad (\text{III.22})$$

Elle peut être décomposée en deux parties distinctes, la densité de courant source \vec{J}_s et la densité de courants induits \vec{J}_i définies comme suit :

$$\vec{J}_i = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{J}_s = -\sigma.gr\vec{ad}V$$

Si on remplace (III.21) dans (III.8), on obtient :

$$r\vec{\text{ot}}(\vec{H}) = \sigma\left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - gr\vec{ad}(V)\right) \quad (\text{III.23})$$

La combinaison entre l'équation (III.5) et (III.16) donne :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{III.24})$$

En remplaçant (III.24) dans (III.23), on obtient :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) + \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\sigma \cdot \text{grad}(V) \quad (\text{III.25})$$

L'équation (III.25) représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en terme de potentiel vecteur magnétique \vec{A} avec un terme source. L'étude de cette équation en régime statique (indépendant du temps) constitue un régime magnétostatique. Mais si on prend en compte la dépendance au temps avec une alimentation sinusoïdale (ce qui est notre cas d'étude) cela va constituer un modèle magnétodynamique en régime harmonique avec $\partial/\partial t = j\omega$, et l'équation s'exprime par :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \vec{J}_s \quad (\text{III.26})$$

Pour assurer l'unicité de la solution de l'équation (III.26), une condition supplémentaire, appelée condition de jauge, est imposée :

$$\text{div}\vec{A} = 0 \quad (\text{III.27})$$

Dans la plupart des problèmes de modélisation, les phénomènes électromagnétiques dans le domaine du CND 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.

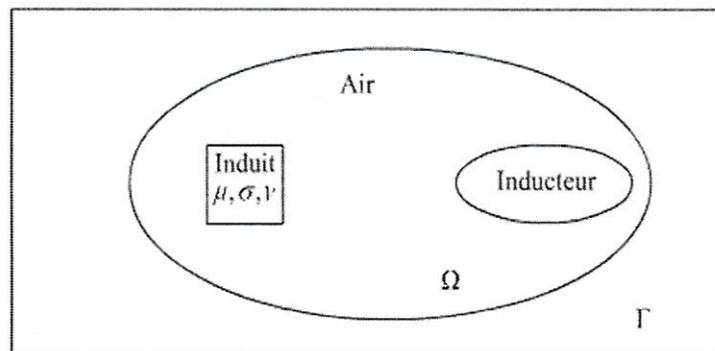


Figure III.2. Problème type en électrotechnique

Ω : représente l'air.

Γ : représente le domaine d'étude.

L'adaptation de l'équation (III.26) aux différentes régions constituera le dispositif d'étude nous permet d'écrire :

a. 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 :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) = 0 \quad (\text{III.28})$$

b. Dans l'inducteur

Les inducteurs sont des fils fins de cuivre, l'équation (III.26) pourra alors s'écrire sur la forme suivante :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J}_s \quad (\text{III.29})$$

c. Dans la cible

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

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{III.30})$$

Avec :

ω : est la pulsation.

$j^2 = -1$: nombre complexe

III.3. Présentation et définition du modèle d'étude

III.3.1. Modèle considéré en 3D

Le modèle considéré est une plaque amagnétique au dessous d'un capteur à CF de forme « E » parcourues par un courant alternatif sinusoïdal sur la plaque se trouve un défaut figurait par une fissure pouvant avoir une forme quelconque et qui n'est pas uniforme par rapport à l'une des directions considérées dans l'étude. Une modélisation tridimensionnelle est indispensable pour des dispositifs ayant des structures compliquées, et une telle modélisation s'avère difficile et très coûteuse en terme de temps de calcul.

La géométrie du dispositif de la figure III.3 est constituée d'un capteur à CF et d'une plaque amagnétique où le défaut est situé sur la surface latérale de la plaque.

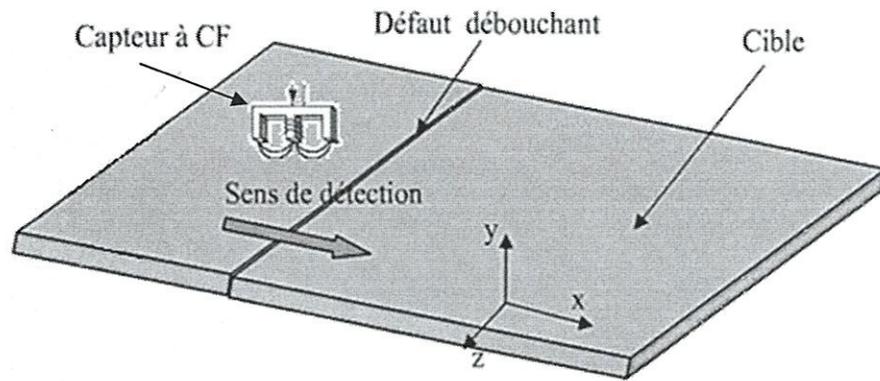


Figure III.3. Modèle proposé en 3D

III.3.2. Modèle considéré en 2D

L'emploi des modèles 2D est particulièrement simple, efficace et son choix est réalisable. Dans le cas de la plaque le passage du modèle en 3D vers celui en 2D se fait en éliminant l'axe (oz). Qui représente un axe de symétrie.

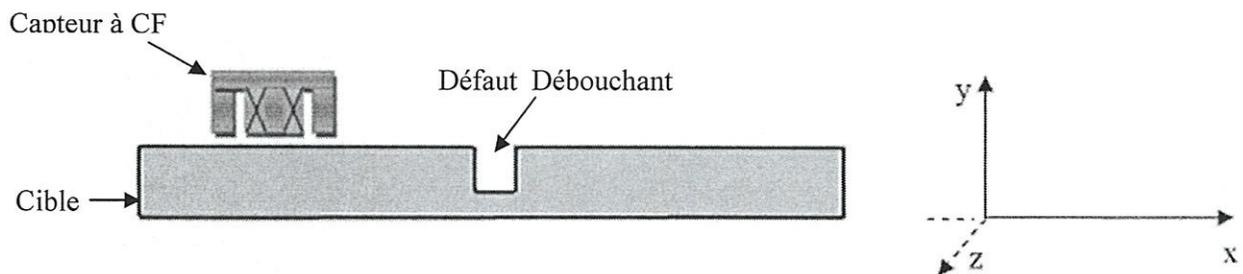


Figure III.4. Réduction du modèle en 2D

Considérons le système de longueur infini suivant l'axe (oz). L'étude peut se ramener donc à un système bidimensionnel dans le plan (x, y), ce qui réduit le système de la figure III.3 à celui présenté sur la figure III.4.

Le potentiel vecteur dans ce cas n'a qu'une seule composante parallèle à (oz). A partir de l'équation (III.7) et (III.21), il vient que \vec{A} et \vec{E} doivent être dans la même direction que \vec{J} . On a alors : $\vec{A}(0, 0, A)$ et $\vec{J}(0, 0, J)$.

III.4. Méthodes de résolution

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, d'une façon tout à fait générale, on peut classer les méthodes de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, en deux grandes catégories : Les méthodes numériques et les méthodes analytiques. Qui ont chacune leurs avantages et leur inconvénients.

III.4.1. Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples. Parmi les méthodes analytiques on peut citer : la méthode de séparations des variables, la méthode des séries d'exponentielles, la méthode des intégrales de frontière et les méthodes de transformation. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent soit impossible à obtenir, soit très complexe et très coûteuse en ressources de calcul. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques.

III.4.2. Méthodes numériques

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

III.4.2.1. Méthode des différences finies

Historiquement cette méthode, consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes [46].

III.4.2.2. Méthode des éléments de frontières

Repose sur la méthode plus générale des équations intégrales. Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse due à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques [42].

III.4.2.3. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation de l'espace comme la MEF et la MDF. Les volumes finis rapportent aux volumes entourant chaque point ou nœud (celui des différences finis) d'une maille. D'autre part, ces méthodes interviennent des intégrales sur des volumes de contrôle ce qui a pour effet de substituer les termes divergence par des intégrales de surfaces (théorème de Green-Ostrogorski). Ces termes sont alors évalués comme des flux sur

les surfaces de chaque volume fini. On utilise une fonction numérique pour faire une approximation des flux aux interfaces [47].

III.4.2.4. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Elle a fait son apparition en 1943, après la méthode des différences finies. Elle a d'abord été utilisée pour résoudre des équations d'élasticité et de mécanique des structures et adaptée plus tard à l'électromagnétisme.

Cette méthode a connu des développements importants dans différents domaines scientifiques et industriels durant les dernières décennies [43].

III.4.3. Principe de la méthode des éléments finis

Le principe de la méthode est basé sur le concept de la représentation des modèles (comportements) physiques d'un milieu continu à l'aide d'un modèle mathématique. Ce modèle est obtenu par la discrétisation du modèle géométrique en sous domaine plus simple (éléments finis).

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues à l'intérieur de chaque élément pour transformer l'équation aux dérivées partielles associée à un système d'équations algébriques.

Pour analyser un problème par la méthode des éléments finis il faut :

- Comprendre le problème physique étudié et connaître la nature de la solution
- Discrétiser le domaine de la solution en sous-domaines dit : éléments finis.
- Approximer les fonctions inconnues par sous-domaines et construire les fonctions d'interpolation.
- Construire les équations du système étudié, pour cela deux méthodes existent : la méthode des résidus pondérés et la méthode variationnelle.
- Intégrer et résoudre le système d'équations algébriques en prenant en compte les conditions aux limites.

III.4.3.1. Discrétisation du domaine

Le domaine de résolution est discrétisé en petits domaines appelés éléments finis, l'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément, grâce aux fonctions d'interpolation.

L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément. On parle alors d'interpolation nodale.

a. Eléments finis réels

Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, les éléments seront choisis en fonction du degré de la courbure d'interpolation qui leur est associés. On rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

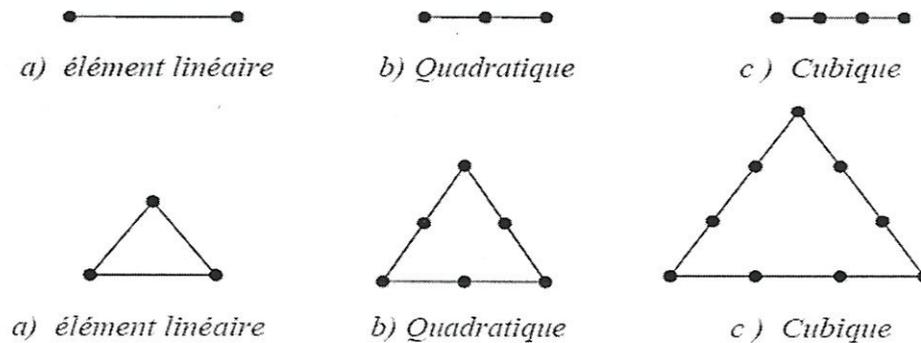


Figure III.5. Eléments classiques en une et deux dimensions

III.4.3.2. Approximation et construction des fonctions d'interpolation

La fonction d'inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodal, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométrique de ces nœuds.

L'inconnue A est décrit dans chaque élément e par une combinaison linéaire des valeurs A_i^e aux nœuds :

$$A^e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \cdot A_i^e \quad (\text{III.31})$$

Les α_i sont les fonctions de pondération devant vérifier :

$$\alpha_i(x_i, y_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

i et j sont les numéros des nœuds de l'élément fini considéré.

III.4.3.3. Formulation intégrale des équations aux dérivées partielles (EDP)

La formulation intégrale des EDP peut être effectuée soit par une méthode variationnelle qui minimise une fonction équivalente au problème différentiel posé ou bien en utilisant une méthode de projection (méthode des résidus pondérés) qui traite directement l'EDP.

a. Principe de la formulation variationnelle

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

$$F(A) = \int_{\Omega} L \cdot d\Omega \quad (\text{III.33})$$

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

$$L = W_c - W_p$$

Ω : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variationnel défini par la fonction d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonctionnelle. La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \quad (\text{III.34})$$

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_3} = \dots \dots \dots \frac{\partial F(A)}{\partial A_n}$$

(III.35)

n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.

A_i : inconnue au nœud i du domaine.

b. Formulation résidus pondérés

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

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{III.36})$$

R : est le résidu de l'approximation

$L(A)$: opérateur différentiel

f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : l'inconnue à chercher

A l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en

N points du domaine Ω .

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \phi_i \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III.37})$$

ϕ : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu. Plusieurs méthodes peuvent être déduites de la formulation résidus pondérés, ces dernières sont essentiellement liées au choix des fonctions de pondérations, parmi elles on citera :

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

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

On se limitera dans ce qui suit à présenter la méthode projective de Galerkinge qui est utilisée dans le cadre de ce travail.

III.4.3.4. *Forme matricielle élémentaire*

Il s'agit de mettre sous forme matricielle, les formes intégrales de l'équation à résoudre, dans chaque domaine élémentaire alors :

$$[K]^e [A]^e = [F]^e \quad (\text{III.38})$$

III.4.3.5. *Assemblage des matrices élémentaires*

L'assemblage est l'opération qui consiste à construire la matrice globale $[K]$ et le vecteur global $[F]$ à partir des matrices élémentaires $[K]^e$ et des vecteurs élémentaires $[F]^e$, on obtient ainsi un système de la forme :

$$\sum_{e=1}^{ne} [K]^e \cdot [A]^e = \sum_{e=1}^{ne} [F]^e \quad (\text{III.39})$$

ne : étant le nombre d'élément sur le domaine Ω .

Ainsi nous obtenons un système d'équation algébrique de la forme :

$$[K][A] = [F] \quad (\text{III.40})$$

$[K]$: est la matrice globale discrétisée, obtenue par la somme des matrices élémentaires étendues.

De la même manière on réalise une expansion de $[F]^e$ qui donne le vecteur source $[F]$.

III.4.3.6. *Introduction des conditions aux limites*

Après avoir construit le système matriciel global, on passe à l'introduction des conditions aux limites imposées sur les frontières de domaines.

Les conditions de Neumann sont introduites dans la forme intégrale faible. Par contre les conditions de Dirichlet doivent être introduites explicitement dans le système matriciel global.

Il existe trois méthodes qui nous permettent d'introduire ce type de condition, à savoir :

- Méthode du terme diagonal dominant.
- Méthode du terme unité sur le diagonal.
- Méthode de suppression des équations.

III.5. Organigramme de calcul par éléments finis

Pour l'implémentation du modèle sous environnement MATLAB, on procédera à plusieurs étapes pour définir la solution de l'équation décrite précédemment (équation elliptique) :

- 1- Description de la géométrie du domaine.
- 2- Construction d'un maillage triangulaire du domaine Ω . On utilisera des fonctions spécifiques pour la génération automatique du maillage aussi bien que pour son raffinement. Le maillage sera décrit par trois matrices de format fixe contenant : les coordonnées des nœuds (matrice p), les segments de la frontière (matrice e) et la numérotation des éléments triangulaires (matrice t).
- 3- Imposition des conditions aux limites : MATLAB offre les deux conditions usuelles sur un domaine à deux dimensions sous la forme algébrique suivante :
 - Condition de Dirichlet : $h A = r$
 - Condition généralisée de Neumann :

$$n.(c\nabla A) + q.A = f \quad (\text{III.41})$$

Avec :

n Le vecteur normal,

h, r, c, q, f les matrices construites à partir coordonnées des nœuds,

A est l'inconnu du problème.

- 4- Définition des caractéristiques de chaque région, en affectant à chaque sous-domaine ses propriétés physiques (σ, μ) pour obtenir un système linéaire $\mathbf{K}.A = \mathbf{F}$ où le vecteur u contient les valeurs de la solution approximative sur les points du maillage ; \mathbf{K} est construite à partir des coefficients c, h, a et q et le second membre \mathbf{F} contenant, essentiellement les contributions provenant de f .
- 5- La solution du système linéaire $\mathbf{K}.A = \mathbf{F}$ et l'exploitation des résultats. Dans notre cas, les grandeurs importantes sont le potentiel vecteur magnétique A ainsi que l'impédance du capteur Z .

Les différentes étapes citées peuvent se résumer sous la forme de l'organigramme suivant :

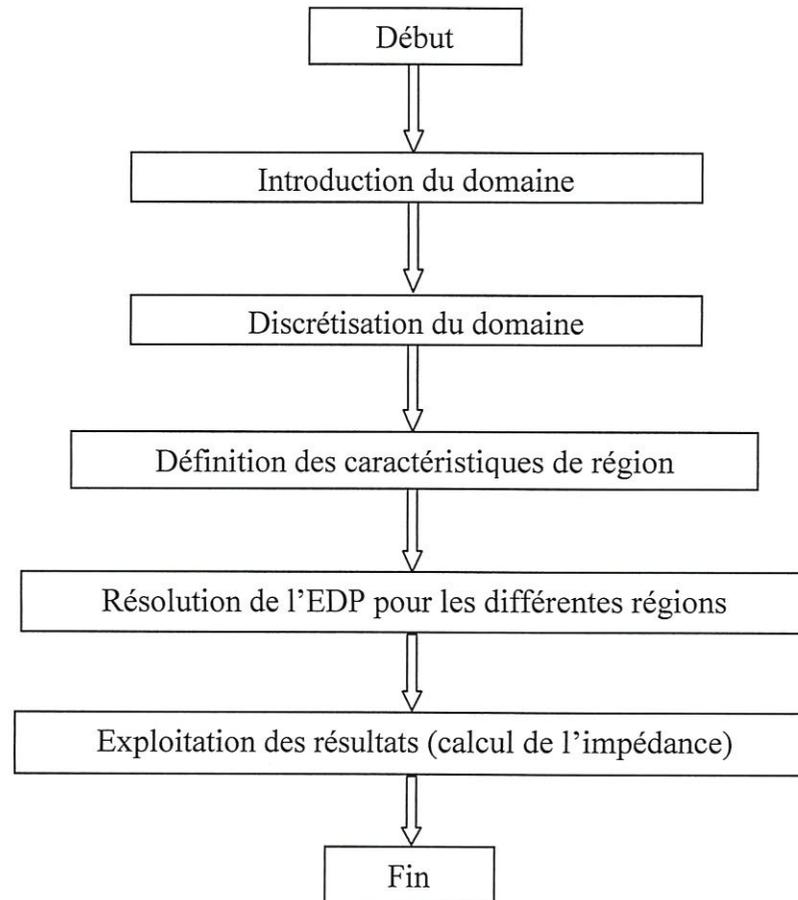


Figure III.6. Organigramme de calcul par éléments finis sous environnement MATLAB

III.6. Calcul de l'impédance

Après avoir déterminé le potentiel vecteur pour chaque point de maillage on peut déterminés les autres grandeurs, l'induction magnétique \vec{B} , champ magnétique \vec{H} , les courants induit et l'impédance du capteur Z . Le CND par CF est basé sur la variation d'impédance du capteur dans la présence d'un défaut. Deux différentes approches couramment utilisées pour l'estimation de cette valeur, sont considérées : la méthode directe et la méthode de l'énergie.

III.6.1. Méthode directe

L'impédance d'une seule spire de bobine (sonde) de rayon r parcouru par un courant alternatif I_s est donnée par:

$$Z = \frac{V}{I_s} \quad (\text{III.42})$$

Où V est la tension induite dans la bobine, exprimée en termes de l'intensité de champ électrique E comme:

$$V = - \int_c \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{III.43})$$

A partir de l'équation (III.17), nous avons :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad}(V) \quad (\text{III.44})$$

En régime harmonique :

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega \quad (\text{III.45})$$

Nous avons :

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \text{grad}(V) \quad (\text{III.46})$$

De plus la tension induite est indépendante du potentiel scalaire ($\text{grad}(V) = 0$) en remplaçant (III.46) dans (III.43), nous aurons :

$$V = j\omega \int_c A \cdot dl \quad (\text{III.47})$$

A partir de l'équation (III.42) l'impédance de la bobine est donnée par :

$$Z = \frac{j\omega}{I_s} \int_c A \cdot dl \quad (\text{III.48})$$

Qui, pour une seule spire de bobine de rayon r est :

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r \cdot A}{I_s} \quad (\text{III.49})$$

L'impédance du capteur est composée de deux parties, partie réel qui est la résistance et une partie imaginaire, la réactance. L'impédance de la bobine est toutefois calculée de façon approximative en utilisant la méthode des éléments finis. Considérons l'échantillon de la bobine, discrétisé par éléments triangulaires. Si les dimensions de ces éléments sont petits alors le potentiel vecteur magnétique de toutes les spires couvertes par l'élément (i) peut être approximé par la valeur centrale A_{ci} et similaire les rayons de toutes les spires de l'élément, peuvent être approchés par la valeur centrale r_{ci} . A partir de l'équation (III.49) l'impédance pour chaque spire à l'intérieur de l'élément i est donnée par [44] :

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci}}{I_s} \quad (\text{III.50})$$

Si N_s est le nombre total de spire de la bobine dans l'échantillon, N_t tours/m², est la densité de spire de l'élément, et a_i la surface de l'élément, l'impédance totale de l'ensemble des spires dans l'élément i est donnée par :

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot a_i \cdot N_t}{I_s} \quad (\text{III.51})$$

Si le nombre d'éléments dans l'échantillon de la bobine est N_c alors l'impédance total est donnée par :

$$Z = j \frac{2\pi\omega N_t}{I_s} \sum_{i=1}^{N_\xi} r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot a_i \quad (\text{III.52})$$

L'impédance de la bobine dans un problème 2D cartésien ou axisymétrique peut être calculée en utilisant la méthode expliquée ici. Cette méthode prend la valeur du potentiel vecteur magnétique constante suivant la longueur du dispositif qui est parallèle à la source dans ce cas le plan d'étude est (xoy) ou dans la direction circonférentielle de la bobine (cas axisymétrique). Une autre méthode de calcul de l'impédance est basé sur le calcul des énergies stocké et dissipé est expliqué dans la section suivante [44].

III.6.2. Méthode de l'énergie

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

$$W = \frac{1}{2} \int_v \vec{B} \cdot \vec{H} dv \quad (\text{III.53})$$

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

$$W_i = \frac{1}{2} v (B_{ri}^2 + B_{zi}^2) \cdot V_i \quad (\text{III.54})$$

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

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} v (B_{ri}^2 + B_{zi}^2) \cdot V_i \quad (\text{III.55})$$

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

$$L = 2 \frac{W}{I_s} \quad (\text{III.56})$$

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

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

$$P_i = \frac{J_i^2 \cdot V_i}{\sigma} \quad (\text{III.57})$$

Où J_i est la densité du courant induit définie par :

$$J_i = -j\omega\sigma A_{ci} \quad (\text{III.58})$$

Où A_{ci} est la valeur du potentiel vecteur magnétique central pour l'élément i .

Remplaçons l'équation (III.57) dans (III.56) et additionnons sur tous les éléments de la région du maillage, l'énergie dissipée total est donnée par :

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N V_i \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot A_{ci}^2 \quad (III.59)$$

La résistance de la bobine est donnée par :

$$R = \frac{P}{I_s^2} \quad (III.60)$$

L'impédance de la bobine est défini par :

$$Z = R + j\omega L \quad (III.61)$$

III.6.3. Calcul de l'impédance d'un capteur différentiel

L'impédance complexe différentielle liée au capteur par CF peu être calculée à partir du potentiel vecteur magnétique à chaque centre du triangle. L'impédance d'un capteur différentiel est donnée par [45] :

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot N_t}{I_s} \left[\sum_{i=1}^{N_b} r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot a_i - \sum_{i=1}^{N_a} r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot a_i \right] \quad (III.62)$$

Avec : N_a et N_b sont respectivement le nombre de spires des bobines a et b du capteur différentiel

Conclusion

Ce chapitre a été essentiellement consacré au rappel des équations de l'électromagnétisme, et à leurs formulations en termes du potentiel vecteur magnétique, En suite d'utilisée la méthode des éléments finis pour la modélisation du CND par CF. L'application de cette méthode, dans le domaine du CND, nous offre beaucoup d'avantages comparés à d'autres méthodes analytiques ou numériques. Aussi, Dans ce chapitre, on a présenté les deux méthodes de calcul d'impédance pour capteur absolu, la méthode d'énergie et la méthode directe.

Chapitre IV



Introduction

Après avoir formulé les équations régissant notre modèle d'étude dans le chapitre précédent, on va dans ce qui suit présenter les résultats de simulations effectuées sous environnement MATLAB (utilisant certaines fonctions de sa boîte à outils PDETOOL). Ceci, pour un capteur à courant de Foucault de forme E.

Ce dernier chapitre sera dédié essentiellement à la présentation des résultats obtenus en simulant la repense du système capteur-cible, par rapport aux propriétés physiques et géométriques du capteur, ainsi que par rapport à la géométrie du défaut.

IV.1. Caractéristiques du dispositif (capteur de forme E)

IV.1.1. Caractéristiques physiques et géométriques

Les tableaux IV.1 et IV.2 représentent respectivement les caractéristiques physiques et géométriques du dispositif étudié.

Tableau IV.1. Caractéristiques physiques

Paramètres	Valeurs numériques
Perméabilité de la bobine	1 (H/m)
Résistivité de la bobine	0 ($\Omega \cdot m$)
Densité de courant dans la bobine	$5 \cdot 10^6$
Fréquence des courants	200 kHz
Nombre de spires de la bobine	100
Perméabilité de pot	1100 (H/m)

Tableau IV.2. Caractéristiques géométriques

Paramètres	Valeurs numériques
Rayon externe de la bobine (r_2)	0.425 (mm)
Rayon interne de la bobine (r_1)	0.75 (mm)
Hauteur de la bobine (H_1)	0.9 (mm)
Rayon externe du pot (r_3)	1.2 (mm)
Hauteur du pot (H_2)	3 (mm)
lift-off (L_o)	0.1 (mm)

La figure IV.1 représente un capteur à CF de forme E placé au-dessus d'une cible qui a la forme d'une plaque rectangulaire. Ce système est destiné à la détection des défauts. Sa modélisation va être effectuée en bidimensionnel.

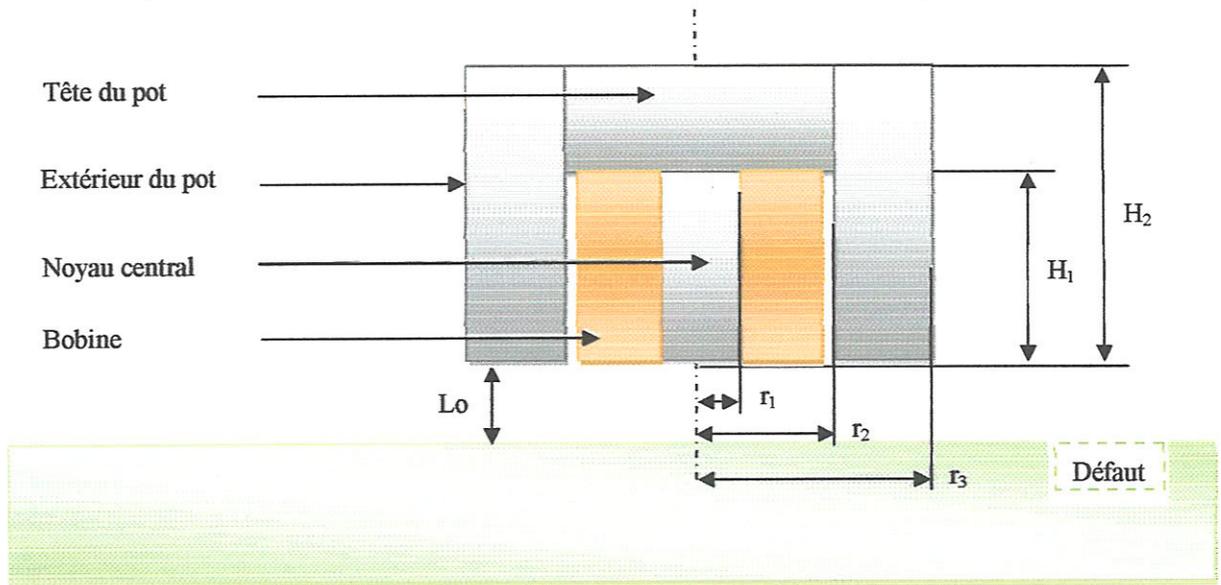


Figure IV.1. Description de la configuration capteur-cible

IV.2. Domaine de résolution et conditions aux limites

Théoriquement, le champ magnétique s'étend jusqu'à l'infini ($A=0$), mais en vue d'une modélisation magnétique, il est nécessaire de ramener les limites théoriques à une distance finie.

La figure IV.2 donne un aperçu sur la géométrie du dispositif à étudier, et les conditions aux limites qui lui sont associées (condition de type Dirichlet).

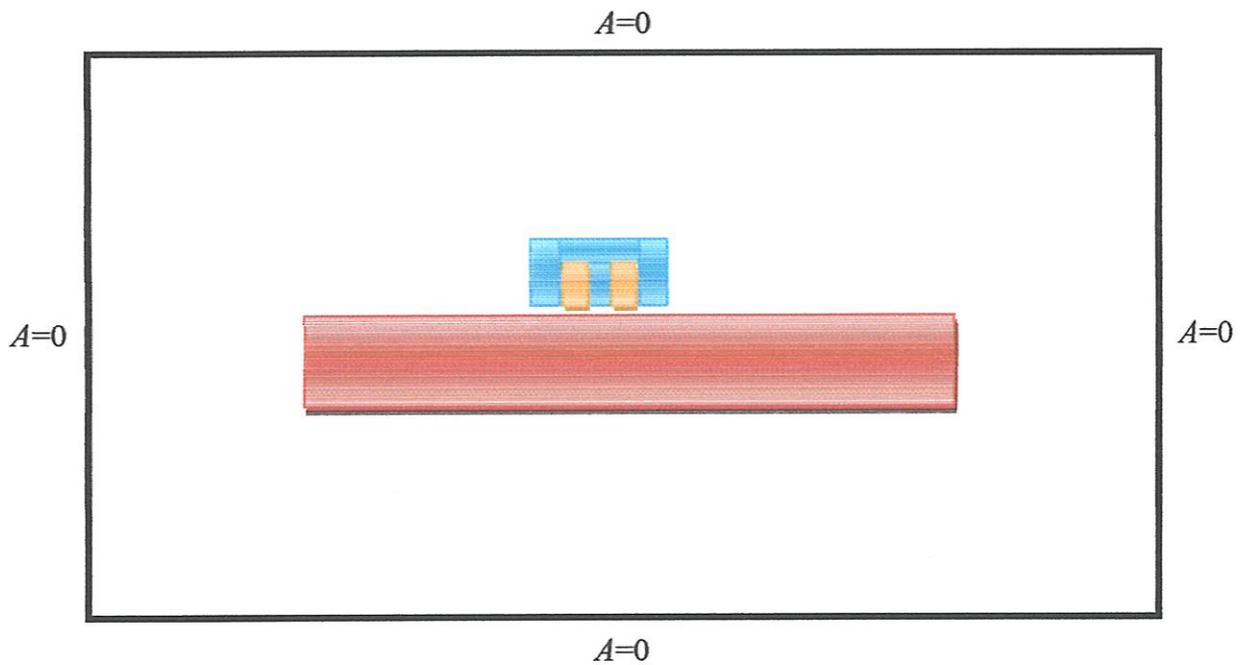


Figure IV.2. Domaine d'étude en 2D avec conditions aux limites

IV.3. Maillage du domaine d'étude

La méthode utilisée pour simuler le problème est développée sous environnement MATLAB. La figure IV.3 présente la discrétisation du domaine d'étude, réalisée avec le logiciel MATLAB. Il en résulte trois matrices qui sont:

- La matrice « p », ou matrice des points (nœuds), comprend les coordonnées du maillage.
- La matrice « e », ou matrice des segments (arrêtes), englobe les indices et les sous domaines de chaque segment.
- La matrice « t », ou matrice des triangles (éléments), contient les indices des points et les sous domaines de chaque triangle.

D'après le maillage de la géométrie (Figure IV.3), nous pouvons faire les deux remarques suivantes :

- Le maillage doit être suffisamment fin pour obtenir une précision suffisante.
- Le maillage ne doit pas être trop dense sous peine de ralentir fortement les calculs.

On retiendra que l'air peut être maillé relativement d'une manière grossière, alors que le capteur et surtout la plaque doivent être maillés plus finement.

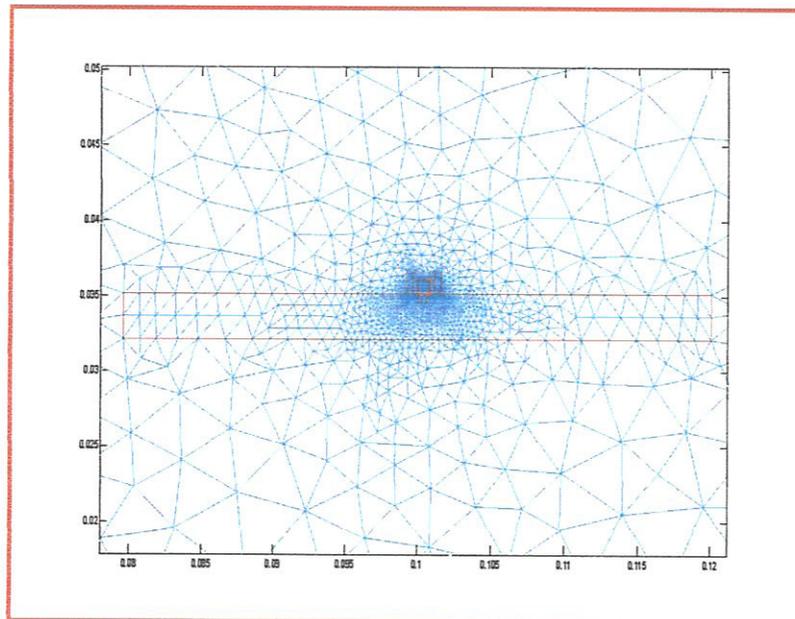


Figure IV.3. Maillage du domaine d'étude

IV.4. Résultats de simulation du CND par courant de Foucault

Dans cette étude, par contrôle non destructif par courants de Foucault, on a utilisé un capteur de forme E. L'objectif principal de la simulation est la détection du défaut, dans une pièce aimantée. Cette détection se traduit par la signalisation de la présence de celui-ci.

Après le balayage du capteur de toute la pièce (la plaque) dans le cas sans défaut et avec défaut, on calcule la variation d'impédance entre les deux cas (dz).

IV.4.1. Plaque saine (sans défaut)

Nous avons choisi de simuler une plaque amagnétique sans défaut caractérisée par une perméabilité égale à l'unité, une conductivité élevée ($\sigma = 0.7 \cdot 10^6$), excité par un courant sinusoïdal de densité $J = 5 \cdot 10^6$ (A/m²), de fréquence $f = 200$ kHz, et d'une épaisseur de peau $1.35 \cdot 10^{-3}$ (m). Le dispositif étudié ainsi que le maillage éléments finis correspondant sont montrés dans les figures IV.4 et IV.5. Il est composé d'un capteur de forme E et d'une pièce amagnétique.

Les résultats de simulation sont donnés par les figures IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9 qui représentent successivement : les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique, la répartition du potentiel vecteur magnétique, la distribution de l'induction magnétique et enfin la répartition des courants induits.

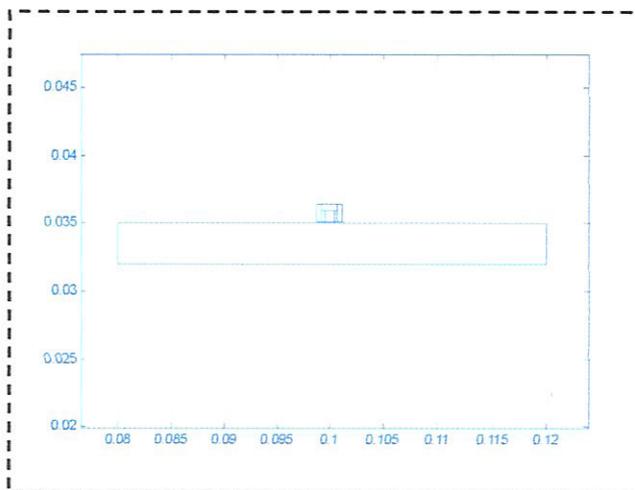


Figure IV.4. Géométrie du système

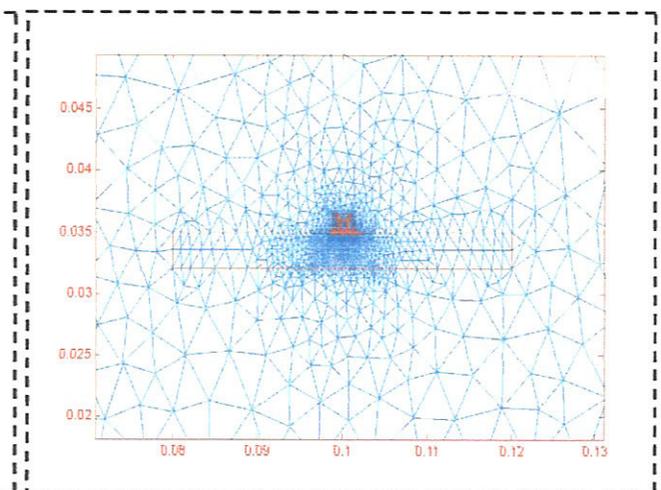


Figure IV.5 Maillage élément finis de la structure

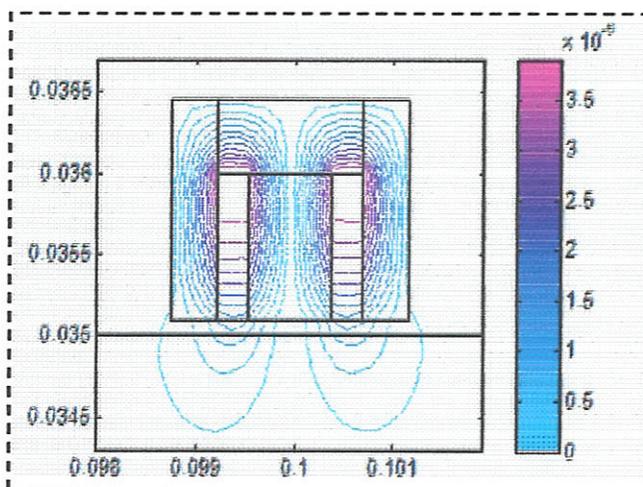


Figure IV.6. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique

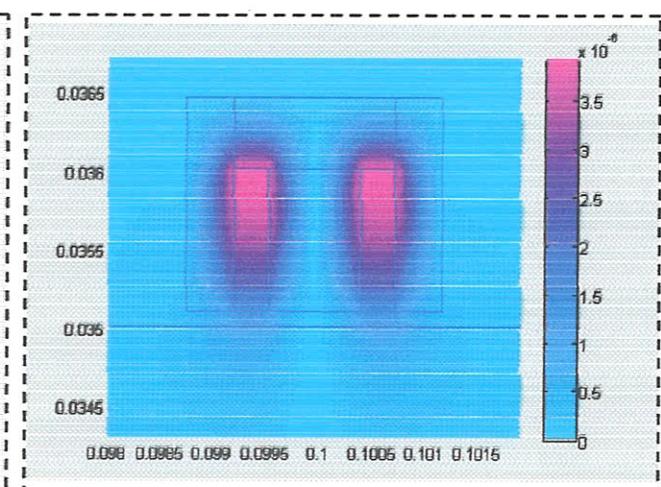


Figure IV.7. Répartition du potentiel vecteur magnétique

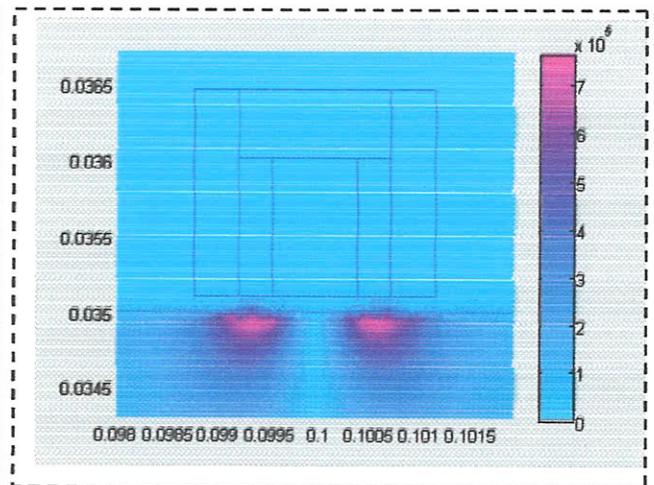
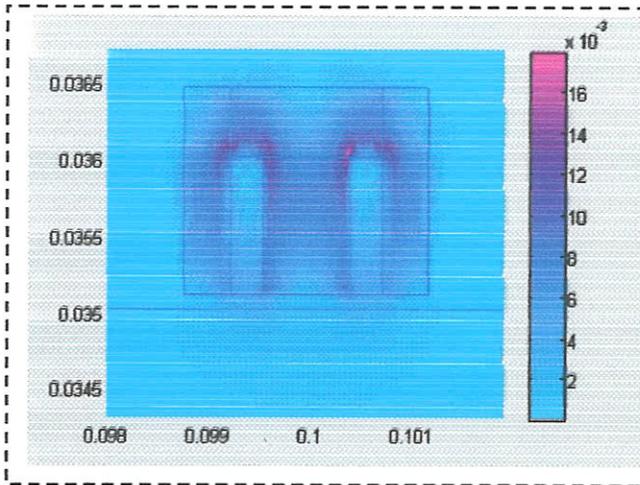


Figure IV.8. Distribution de l'induction magnétique

Figure IV.9. Répartition des courants induits

✚ *Interprétation des résultats*

A partir de la figure IV.6, on peut constater que les lignes du champ passent au niveau du capteur avec une pénétration dans la pièce qui n'est pas importante. Ceci se traduit par l'effet de peau d'une part, et par la nature de la pièce amagnétique d'une autre part.

La figure IV.7 montre la distribution de potentiel vecteur A , où on peut constater une forte concentration de ce dernier au niveau de l'inducteur (la bobine) mais avec des faibles amplitudes.

Même chose pour la figure IV.8, elle montre une concentration de l'induction magnétique au niveau des bobines.

En ce qui concerne la distribution des courants induits, présentée dans la figure IV.9, elle est perturbée par la présence du défaut. On constate que leurs valeurs sont très élevées, car la conductivité de la cible amagnétique est importante. Par contre elles sont relativement faibles si on les compare aux courants d'induction.

IV.4.2. Plaque défectueuse (avec défaut)

On prend la même plaque amagnétique précédente, mais endommagée par un défaut situé en son centre. Nous nous proposons d'étudier :

- l'influence des éléments géométriques du capteur (noyau, tête, extérieur et lift-off).
- l'influence des éléments physiques du capteur (conductivité, perméabilité et fréquence).
- l'influence de la géométrie du défaut.

Ce défaut présente les caractéristiques géométriques suivantes :

Longueur : 0.5 mm

Profondeur : 0.5 mm

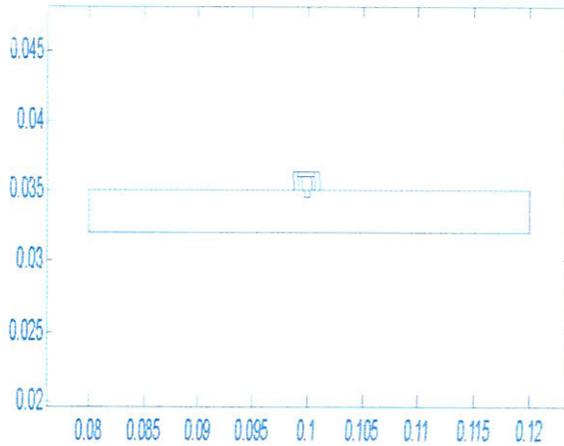


Figure IV.10. Géométrie du système

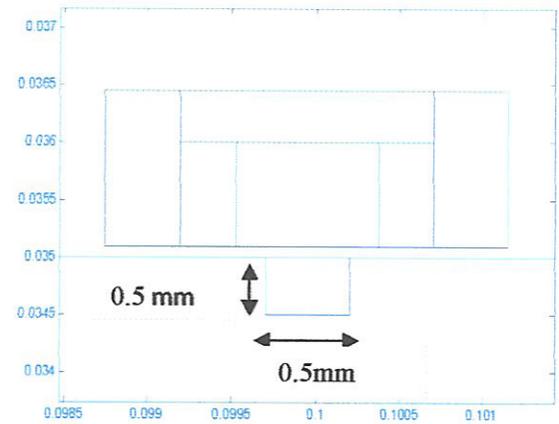


Figure IV.11. Zoom de la géométrie du système

IV.4.2.1. Simulation pour la variation des propriétés géométriques

Dans cette partie, on va s'intéresser essentiellement à la distribution du potentiel vecteur magnétique A , la densité des courants induits J , la répartition de l'induction magnétique, et comment évalue la variation maximum de l'impédance relative de la bobine, en fonction de la présence des éléments constitutifs de ce capteur (noyau, tête, extérieur et lift-off) (Figure IV.1).

Tout d'abord, nous commençons par une bobine seule, ensuite nous ajoutons les éléments constitutifs du capteur : noyau central, tête de pot, et extérieur de pot. Enfin nous étudions l'effet du lift-off sur la détection de défaut.

a) Influence de la bobine seule sur la détection de défaut

Dans cette application, nous avons utilisé seulement la bobine de capteur. C'est-à-dire la perméabilité de pot est égale à l'unité.

Les figures IV.12, IV.13, IV.14, IV.15, IV.16, IV.17 et IV.18 représentent respectivement la géométrie de la structure, son maillage éléments finis, les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique, la répartition du potentiel vecteur magnétique, la distribution de l'induction magnétique, la répartition des courants induits et enfin la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur par rapport à la cible.

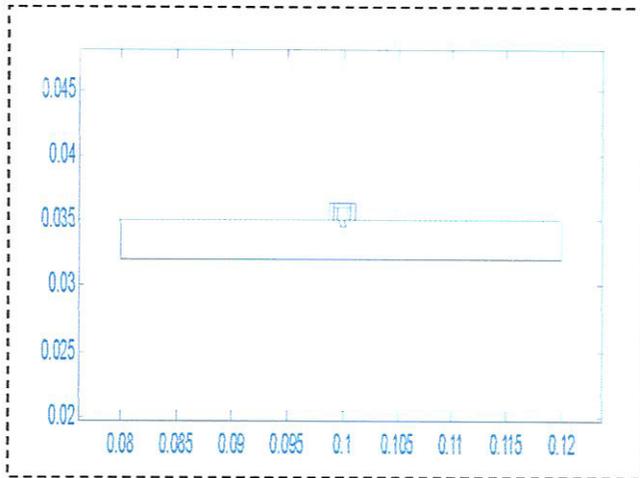


Figure IV.12. Géométrie du système

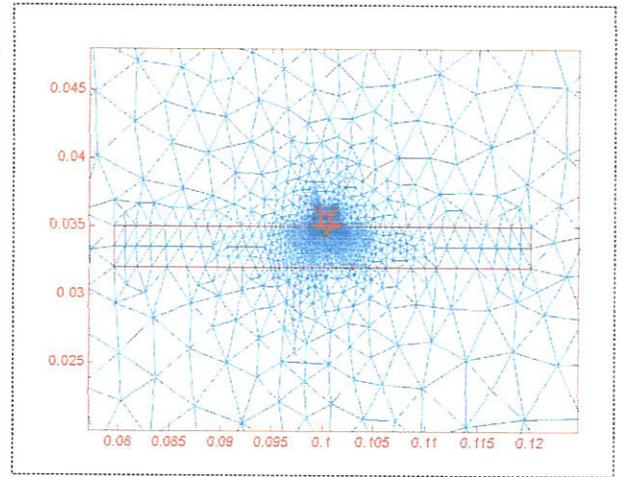


Figure IV.13. Maillage élément finis de la structure

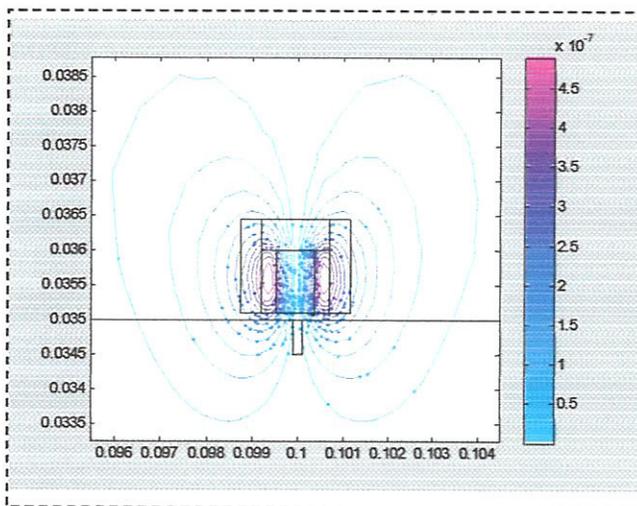


Figure IV.14. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique

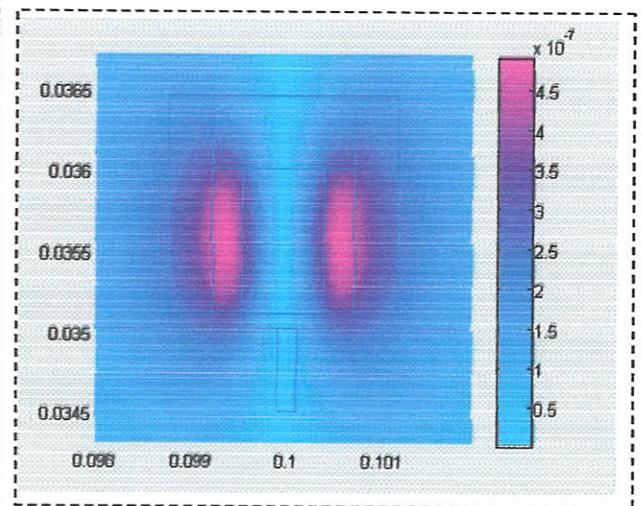


Figure IV.15. Répartition du potentiel vecteur magnétique

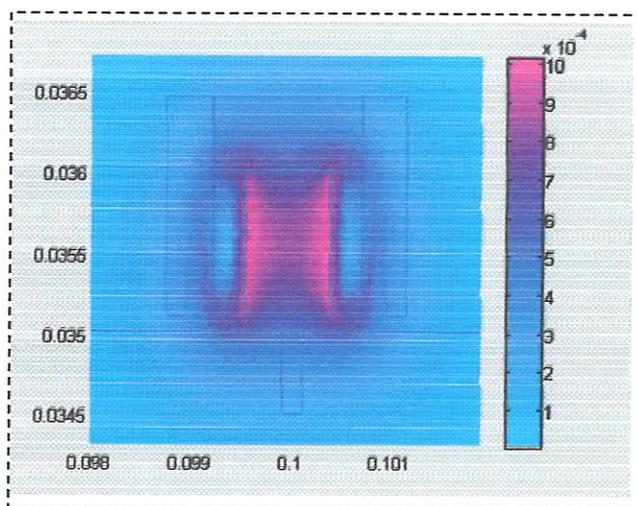


Figure IV.16. Représentation de l'induction magnétique

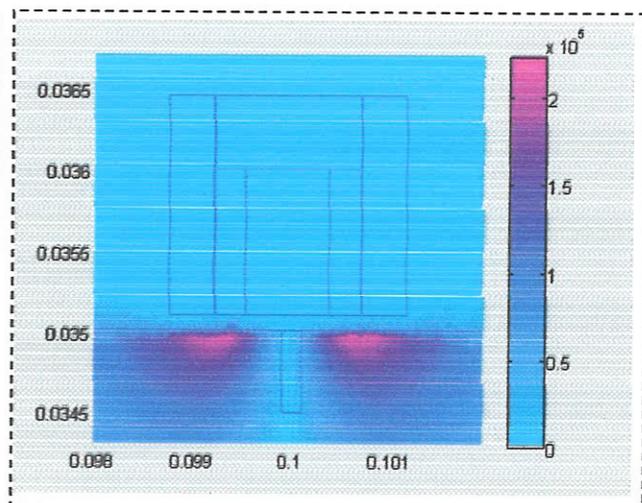


Figure IV.17. Répartition des courants induits

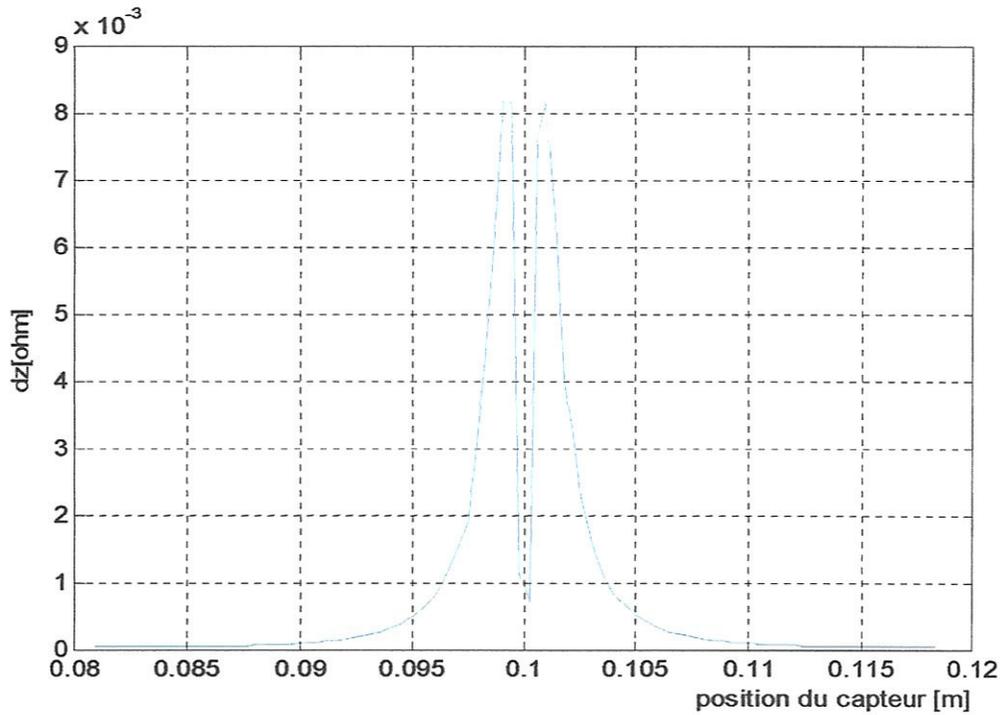


Figure IV.18. Courbe de la différence de l'impédance

b) Influence du noyau central sur la détection du défaut

Pour la deuxième application, nous avons additionné le noyau central au capteur. La perméabilité de ce noyau est égale à 1100.

Les figures IV.19, IV.20, IV.21, IV.22, IV.23, IV.24 et IV.25 représentent respectivement la géométrie de la structure, son maillage élément finis, les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique, la répartition du potentiel vecteur magnétique, la distribution de l'induction magnétique, la répartition des courants induits et enfin la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur par rapport à la cible.

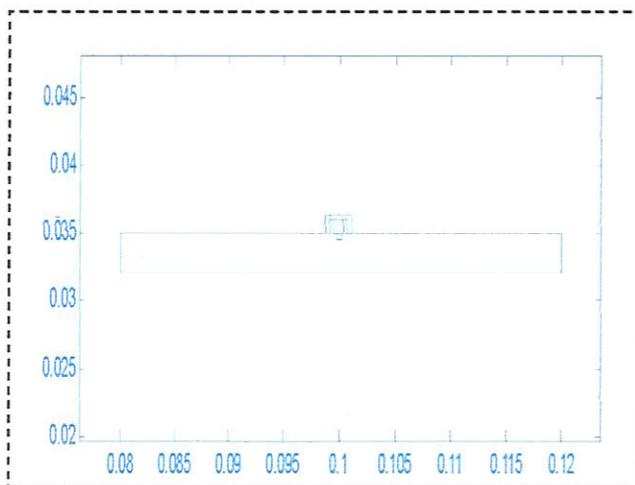


Figure IV.19. Géométrie du système

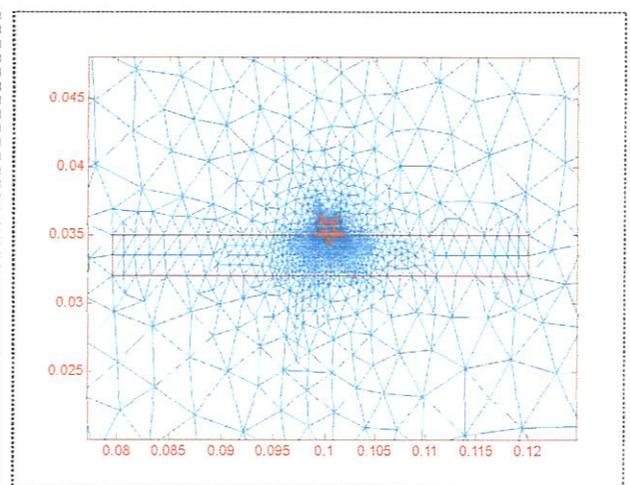


Figure IV.20. Maillage éléments finis de la structure

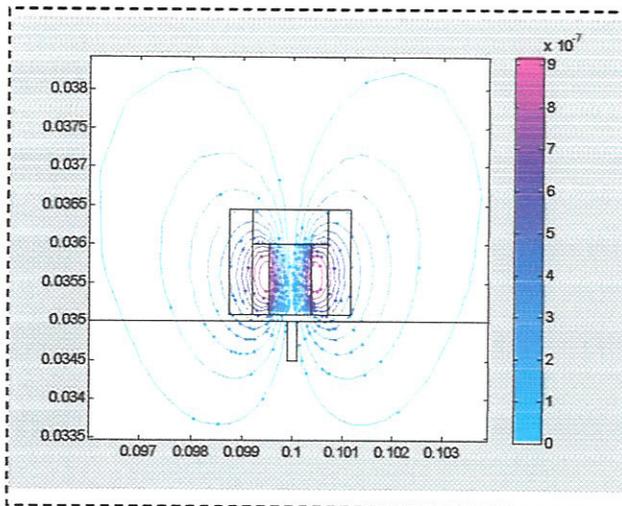


Figure IV.21. Lignes équipotentiels du potentiel vecteur magnétique

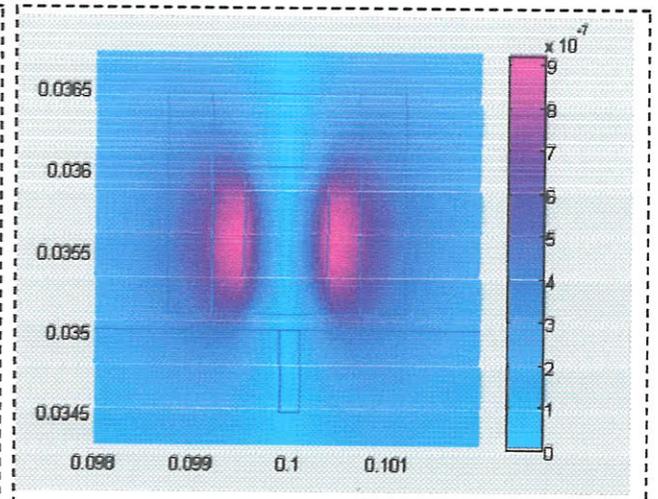


Figure IV.22. Répartition du potentiel vecteur magnétique

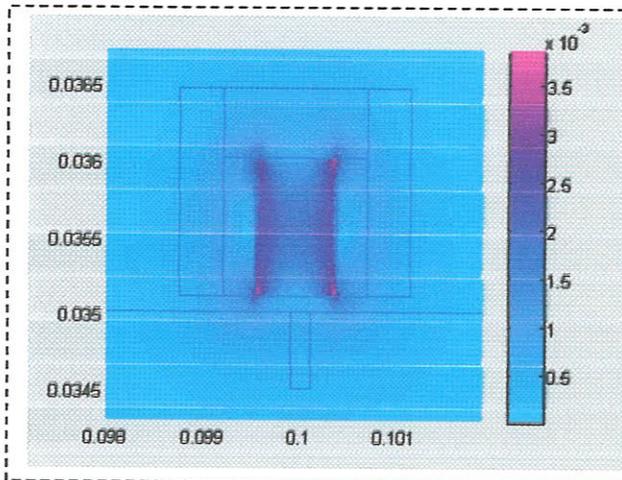


Figure IV.23. Représentation de l'induction magnétique

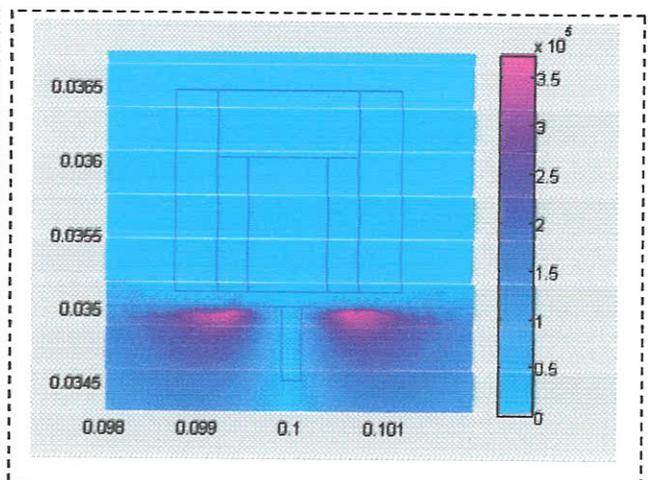
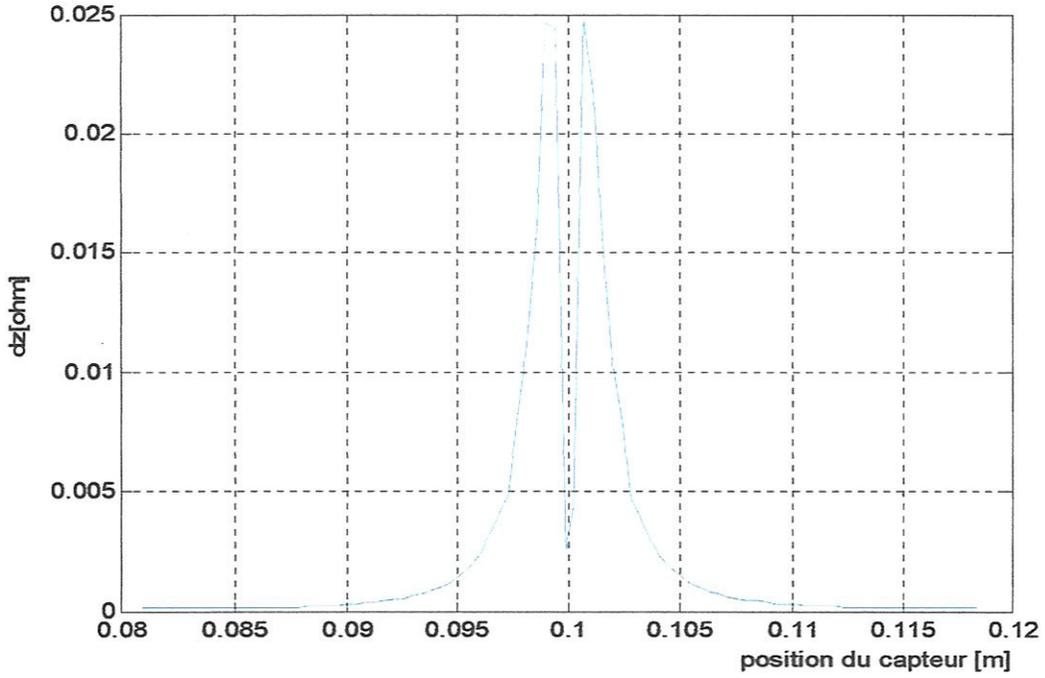


Figure IV.24. Répartition des courants induits



c) Influence de la Figure IV.25. Courbe de la différence de l'impédance

Pour la troisième application, nous avons ajouté la tête du pot au capteur. La perméabilité du noyau avec la tête du pot est égale à 1100.

Les figures IV.26, IV.27, IV.28, IV.29, IV.30, IV.31 et IV.32 représentent respectivement la géométrie de la structure et son maillage élément finis, les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique, la répartition du potentiel vecteur magnétique, la distribution de l'induction magnétique, la répartition des courants induits et enfin la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur par rapport à la cible.

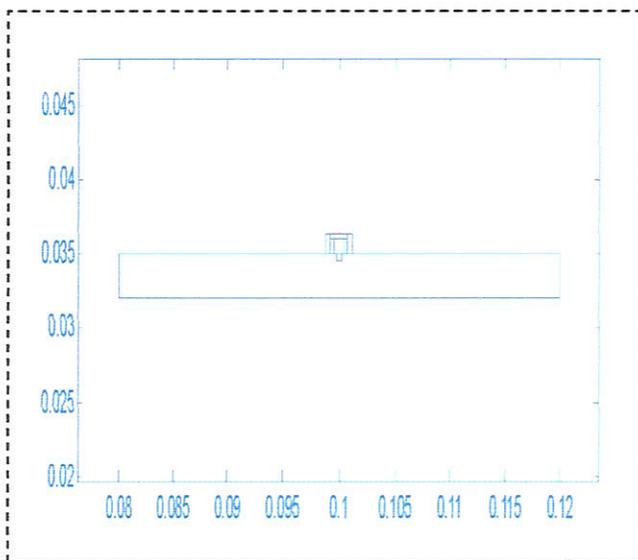


Figure IV.26. Géométrie du système

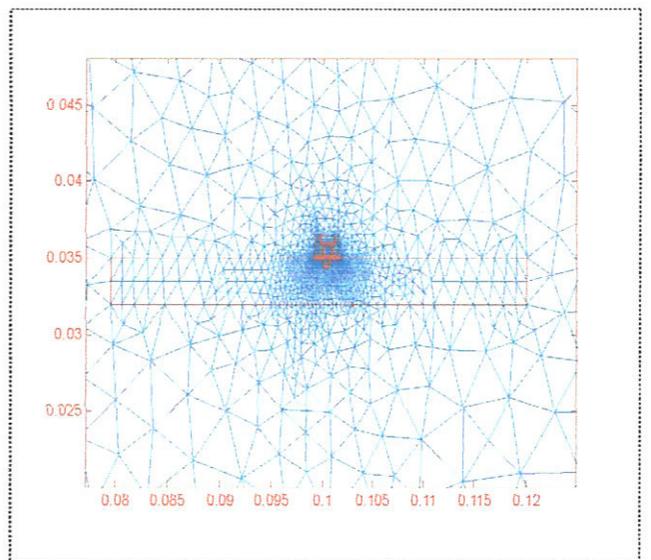


Figure IV.27. Maillage élément finis de la structure

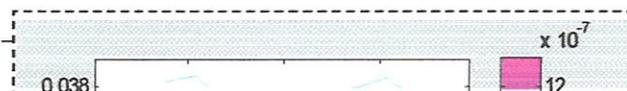


Figure IV.28. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique

Figure IV.29. Répartition du potentiel vecteur magnétique

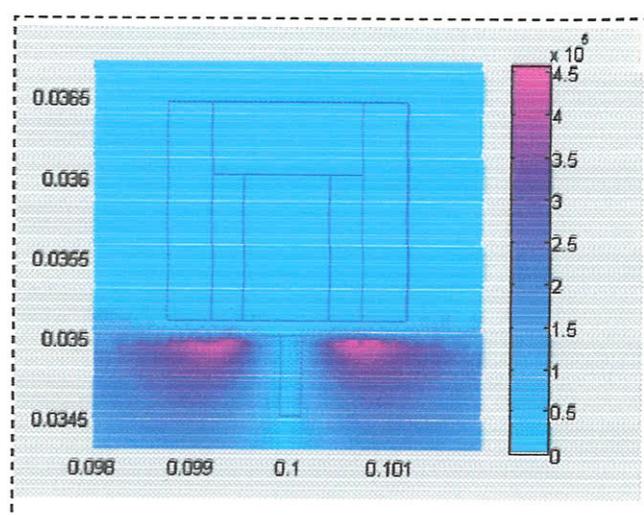
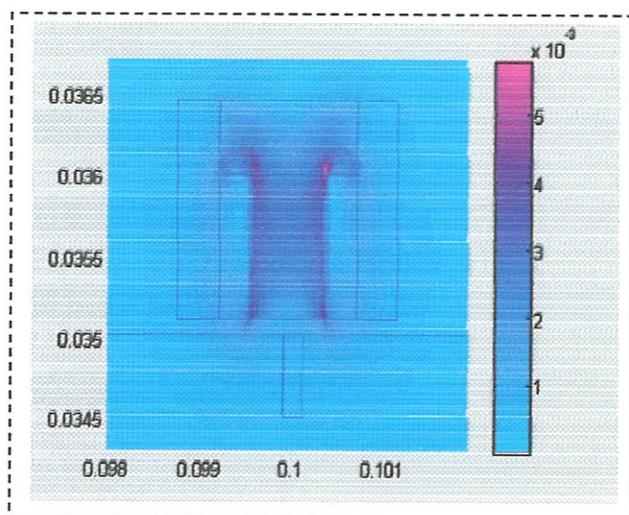


Figure IV.30. Représentation de l'induction magnétique

Figure IV.31. Répartition des courants induits

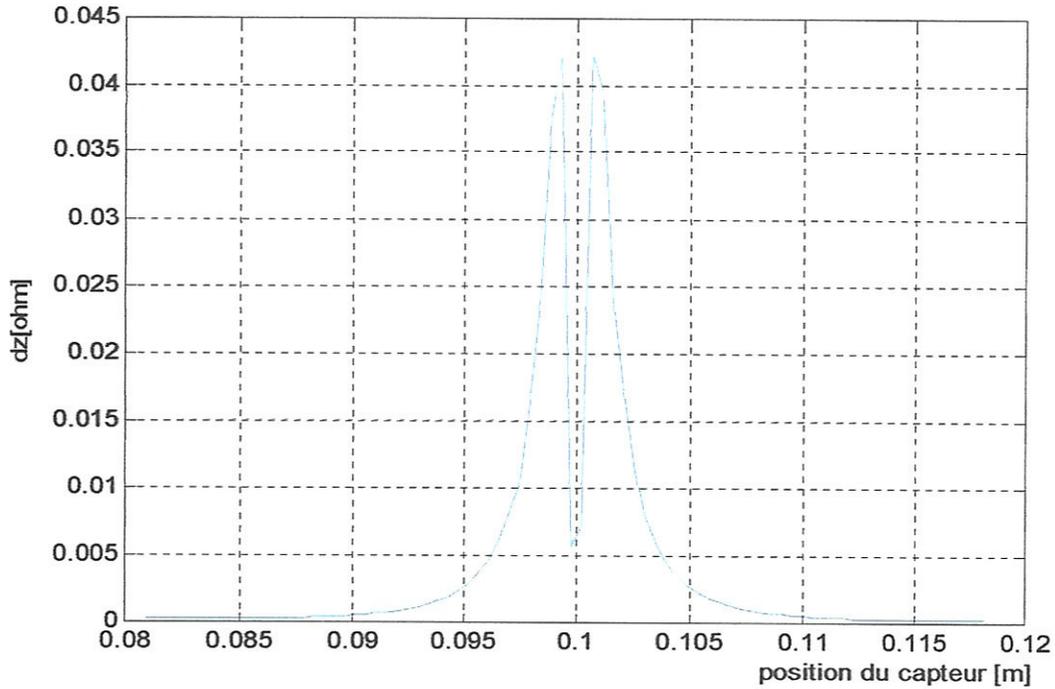


Figure IV.32. Courbe de la différence de l'impédance

d) Influence de l'extérieur du pot sur la détection du défaut

Pour la quatrième application, nous avons ajouté l'extérieur du pot au capteur. La perméabilité du noyau avec la tête et l'extérieur du pot est égale à 1100.

Les figures IV.33, IV.34, IV.35, IV.36, IV.37, IV.38 et IV.39 représentent respectivement la géométrie de la structure et son maillage élément finis, les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique, la répartition du potentiel vecteur magnétique, la distribution de l'induction magnétique, la répartition des courants induits et enfin la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur par rapport à la cible.

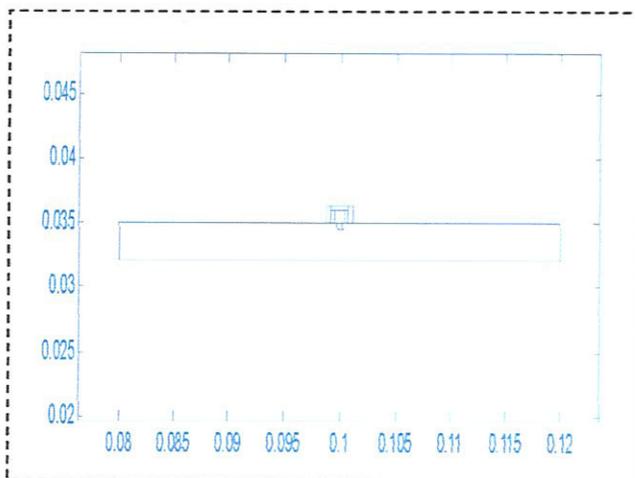


Figure IV.33. Géométrie du système

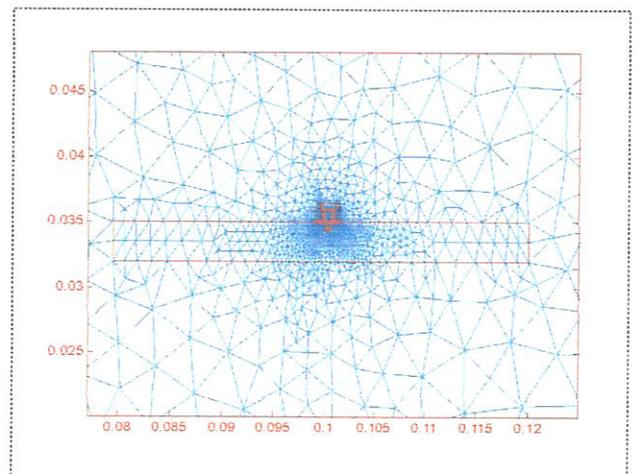


Figure IV.34. Maillage élément finis de la structure

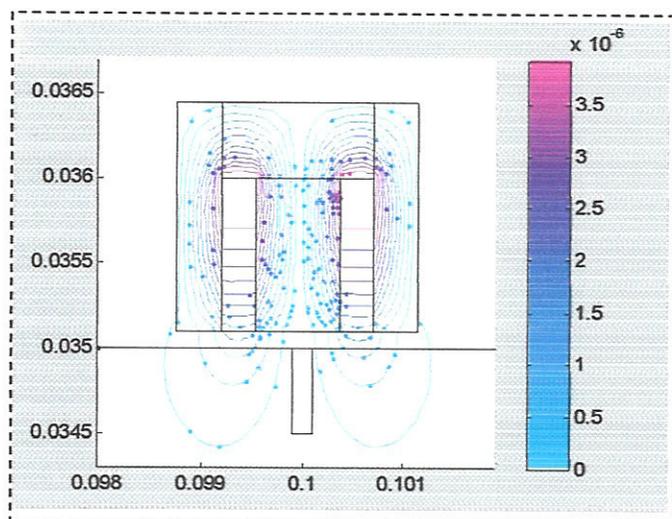


Figure IV.35. Lignes équipotentiels du potentiel vecteur magnétique

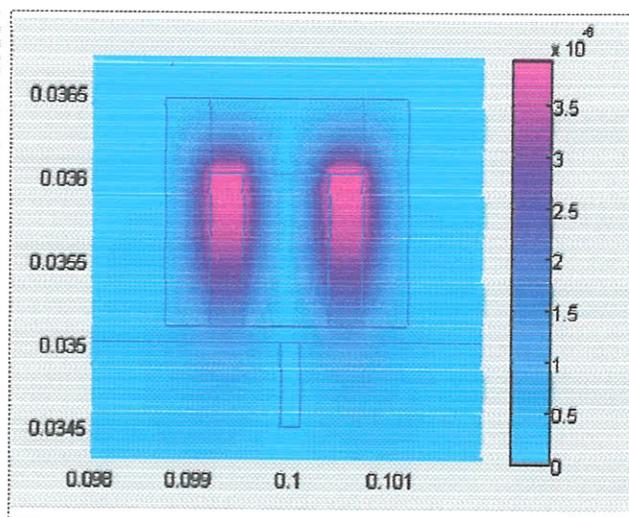


Figure IV.36. Répartition du potentiel vecteur magnétique

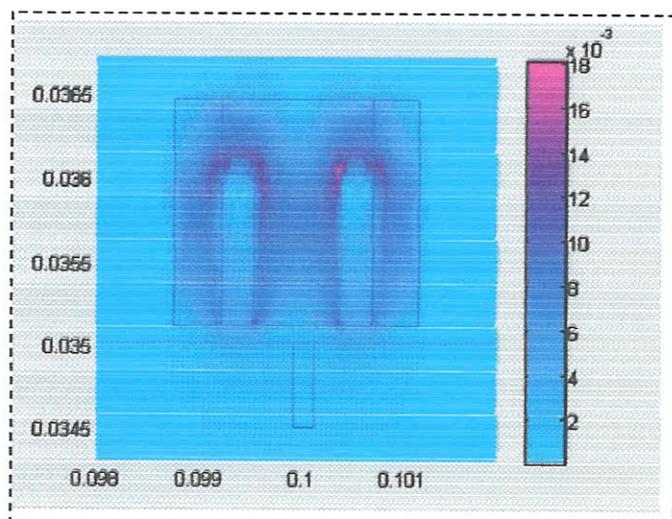


Figure IV.37. Représentation de l'induction magnétique

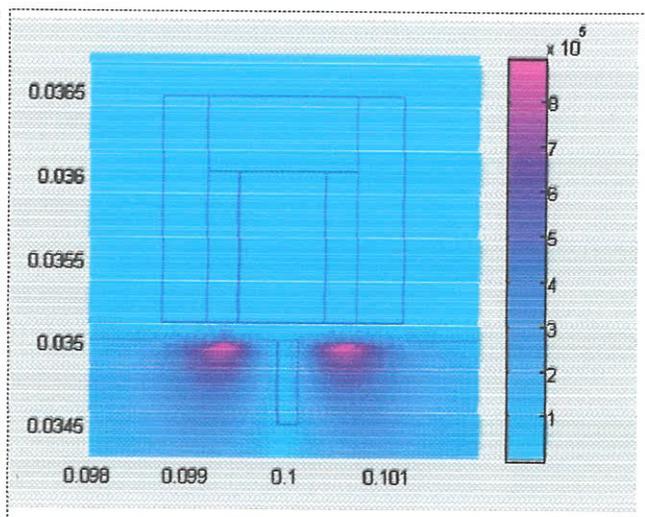


Figure IV.38. Répartition des courants induits

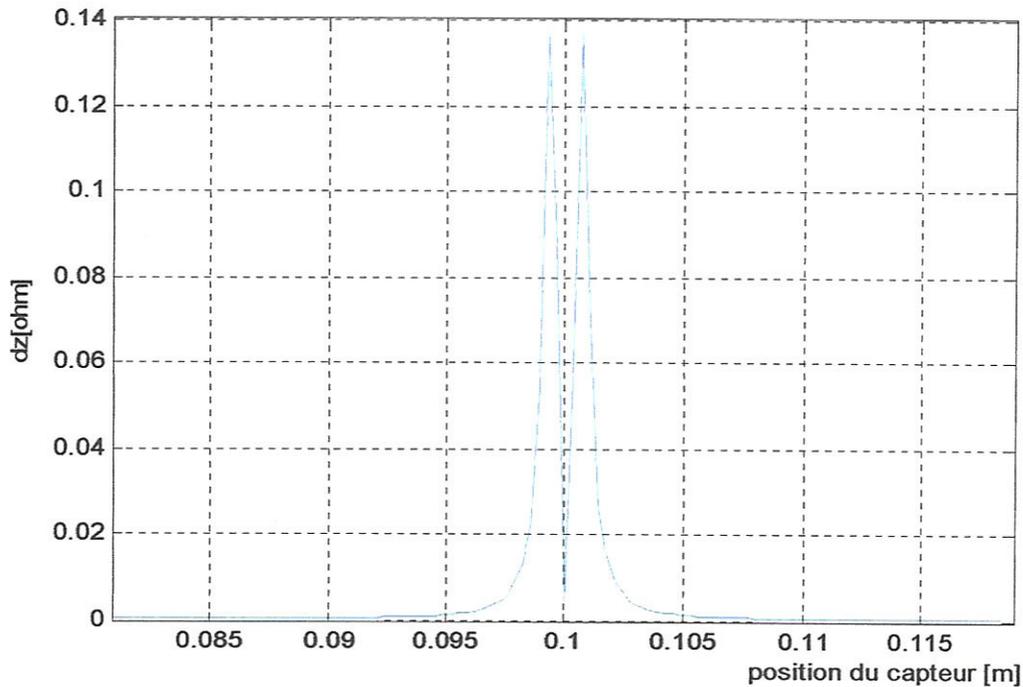


Figure IV.39. Courbe de la différence de l'impédance

✚ Interprétation des résultats

Les figures IV.14, IV.21, IV.28 et IV.35 représentent respectivement les lignes d'équipotielles du potentiel vecteur magnétique dans le cas d'un bobine seule, noyau centrale, tête de pot, et extérieure de pot. On peut remarque :

- Les lignes d'équipotielles du potentiel vecteur magnétique se canalisent vers, les éléments constitutifs de capteur, à chaque fois nous ajoutons l'un de ses éléments.
- L'augmentation des valeurs d'équipotielles du potentiel vecteur magnétique, et la diminution de leur pénétration dans la pièce à chaque fois nous ajoutons l'un des éléments du capteur.

Les figures IV.15, IV.22, IV.29, et IV.36 représentent respectivement la répartition du potentiel vecteur magnétique dans le cas bobine seule, noyau centrale, tête de pot, et extérieure de pot, dans le cas de la bobine, la répartition du potentiel vecteur magnétique occupe un partie important dans l'espace, mais après l'addition des éléments constitutif de capteur, la répartition du potentiel vecteur magnétique limité sur le capture.

Les figures IV.16, IV.23, IV.30, et IV.37 représentent respectivement la répartition de l'induction magnétique dans le cas de bobine seule, noyau centrale, tête de pot, et extérieure de pot, qui canalisent vers, les éléments constitutifs de capteur, à chaque fois nous ajoutons l'un de ses éléments. et aussi sa valeur elle augment à chaque fois.

Les figures IV.17, IV.24, IV.31, et IV.38 représentent Répartition des courants induits dans le cas de bobine seule, noyau centrale, tête de pot, et extérieure de pot, la présence du défaut les courants induit perturbe en raison de la présence du défaut.

La figure IV.40 regroupe les courbes de la différence de l'impédance obtenues pour tous les cas précédents :

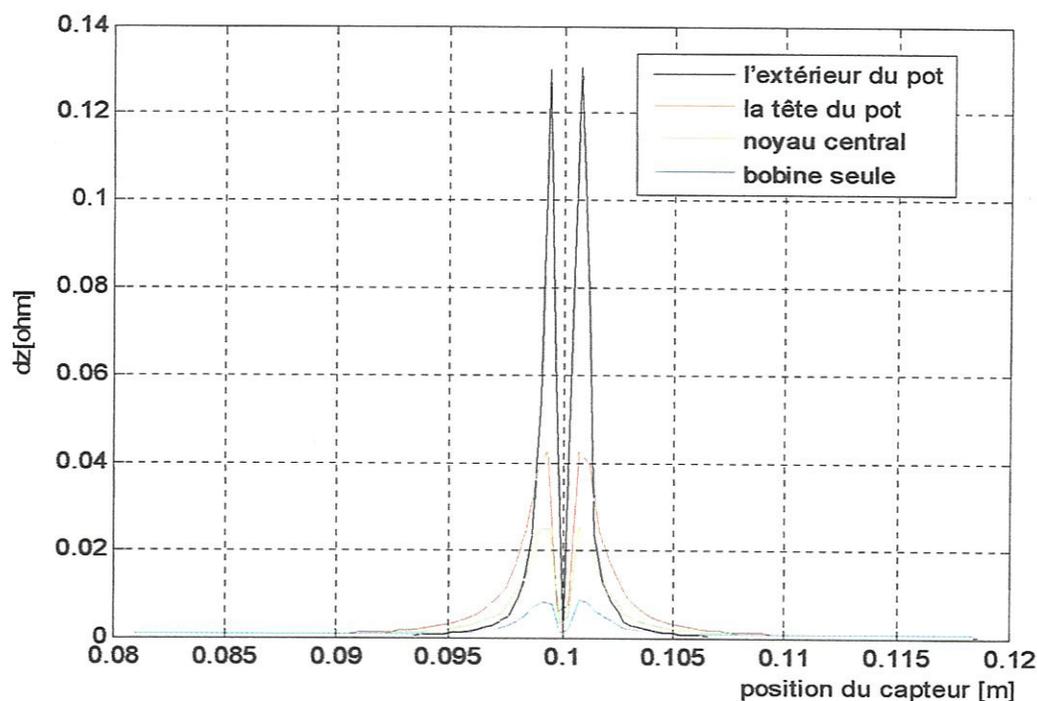


Figure IV.40. Courbes des différences de l'impédance pour tous les cas simulés

Cette figure présente les courbes des différences de l'impédance obtenues, par la méthode de l'énergie, en fonction du déplacement du capteur. On remarque que chaque courbe a deux sommets qui correspondent aux deux extrémités du défaut de la pièce lorsque l'une des bobines est directement au dessus du défaut, ce qui donne deux pics pour chaque cas. La valeur minimale correspond au centre du défaut, c'est-à-dire lorsque l'axe des deux bobines du capteur se trouve à une équidistance des extrémités du défaut.

D'après les cas précédents et la figure IV.40 on peut définir le tableau suivant :

Tableau IV.3. Différence d'impédance maximale pour différents cas simulés

Différents cas simulés	Différence d'impédance (dz) maximale
Bobine seule	$8 \cdot 10^{-3}$
Bobine + noyau	0.025
Bobine + noyau + tête	0.04
Bobine + noyau + tête + extérieur du pot	0.13

D'après ces quatre simulations on peut déduire, que la présence de tous les éléments constitutifs du capteur donne une valeur plus importante de la différence d'impédance, d'une part, et une sensibilité plus élevée du capteur, d'autre part. Donc une meilleure réponse du capteur.

e) Influence de lift-off sur la détection du défaut

Rappelons que le lift-off est la distance entre le bas du capteur et le haut de la cible. En pratique au cours du déplacement du capteur au-dessus de la pièce contrôler, le lift-off prend plusieurs valeurs différentes. Une variation du lift-off entraîne une variation de la repense du capteur.

Dans cette partie, nous allons simuler une variation de lift-off (lift-off=0.1, lift-off=0.2, et lift-off=0.3) lors d'une détection de défaut, dans le cas du capteur complet, pièce amagnétique, et fréquence constante.

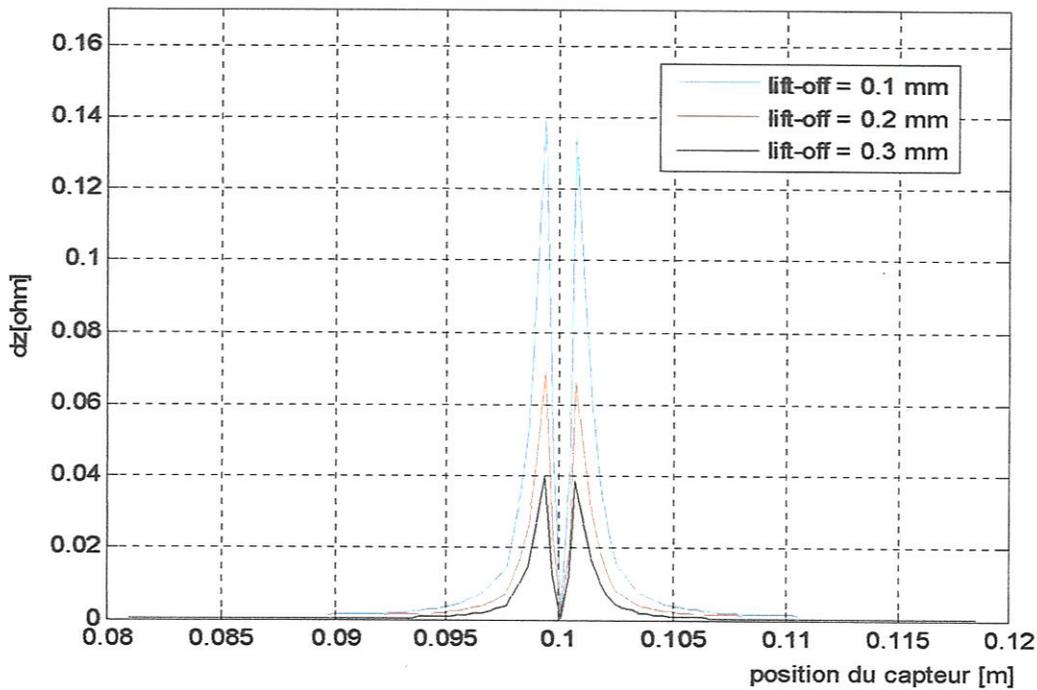


Figure IV.41. Influence du lift-off lors de la détection d'un défaut

D'après la figure IV.41 qui représente les différences des impédances par rapport au déplacement, on peut déduire que la diminution de la distance lift-off (capteur-cible) provoque une augmentation de la réponse du capteur par rapport au même défaut. Donc le lift-off joue un rôle très important dans la détection de défaut.

On peut conclure que la différence d'impédance est inversement proportionnelle au lift-off, donc la nécessité de choisir un lift-off minimum pour assurer une meilleure détection.

IV.4.2.2. Simulation pour la variation des propriétés physiques

a) Effet de la conductivité sur la détection du défaut

Une autre simulation a été réalisée en considérant trois valeurs de la conductivité ($\sigma=0.7 \cdot 10^6$, $\sigma=1 \cdot 10^7$ et $\sigma=1.5 \cdot 10^7$), dans le cas du capteur complet, pièce amagnétique, et fréquence constante. La figure ci-dessous représente les différences des impédances en fonction de la position du capteur par rapport à la cible.

L'augmentation de la conductivité du défaut provoque, pour une fréquence donnée, une diminution de la différence de l'impédance à cause de la variation de la densité de courants de Foucault par effet de peau, et une canalisation du flux par le capteur qui est proportionnel au flux émis par ces courants de Foucault.

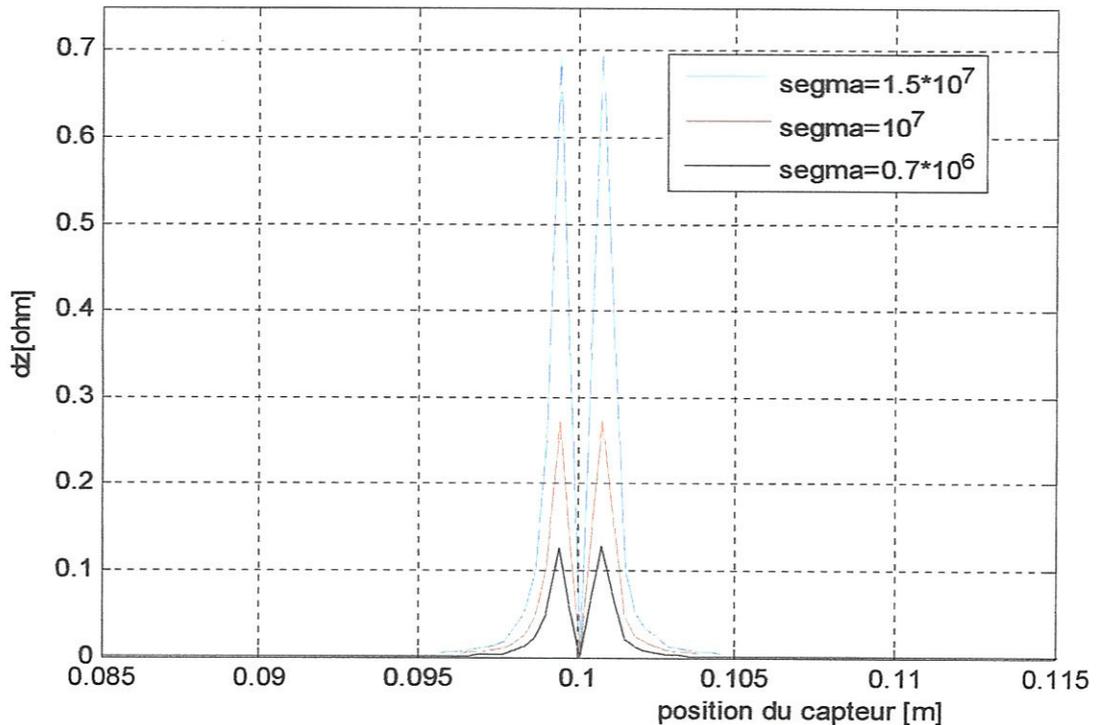


Figure IV.42. Influence de la conductivité sur la détection d'un défaut

b) Effet de la perméabilité sur la détection du défaut

Dans ce cas, on a considéré trois valeurs de la perméabilité (μ_0 , $2\mu_0$ et $4\mu_0$) de la pièce, dans le cas du capteur complet, et fréquence constante. La figure IV.43 représente les différences des impédances en fonction de la position du capteur par rapport à la cible.

L'augmentation de la perméabilité de la cible, pour une fréquence donnée, provoque une augmentation de la différence d'impédance à cause de la variation du flux émis par cette cible, et qui est proportionnel à la densité des courants de Foucault. Ces courants de Foucault varient suivant l'effet de peau.

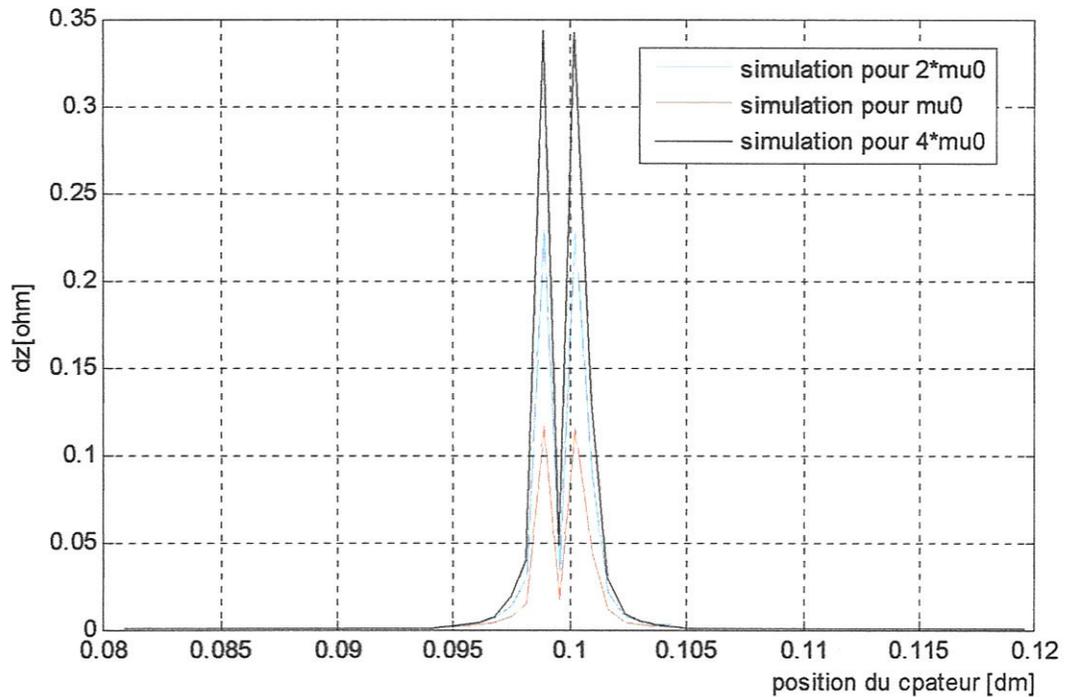


Figure IV.43. Courbe de la différence de l'impédance

c) Effet de la fréquence sur la détection de défaut

Dans cette application on considère trois valeurs de la fréquence: 100 khz, 200 khz, et 300 khz. On a pris les mêmes propriétés physiques et géométriques pour le capteur et la pièce et qui sont défini dans les tableaux IV.1, IV.2 et IV.3.

A chaque valeur de la fréquence correspond une valeur de l'épaisseur de peau, comme il est montré dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.4. Variation de l'épaisseur de peau en fonction de la fréquence

Fréquence	100 khz	200 khz	300 khz
Epaisseur de peau	1.9 mm	1.3 mm	1.1 mm

La figure IV.44 montre les résultats de simulation représentant la variation de la différence d'impédance par rapport au déplacement pour trois fréquences différentes.

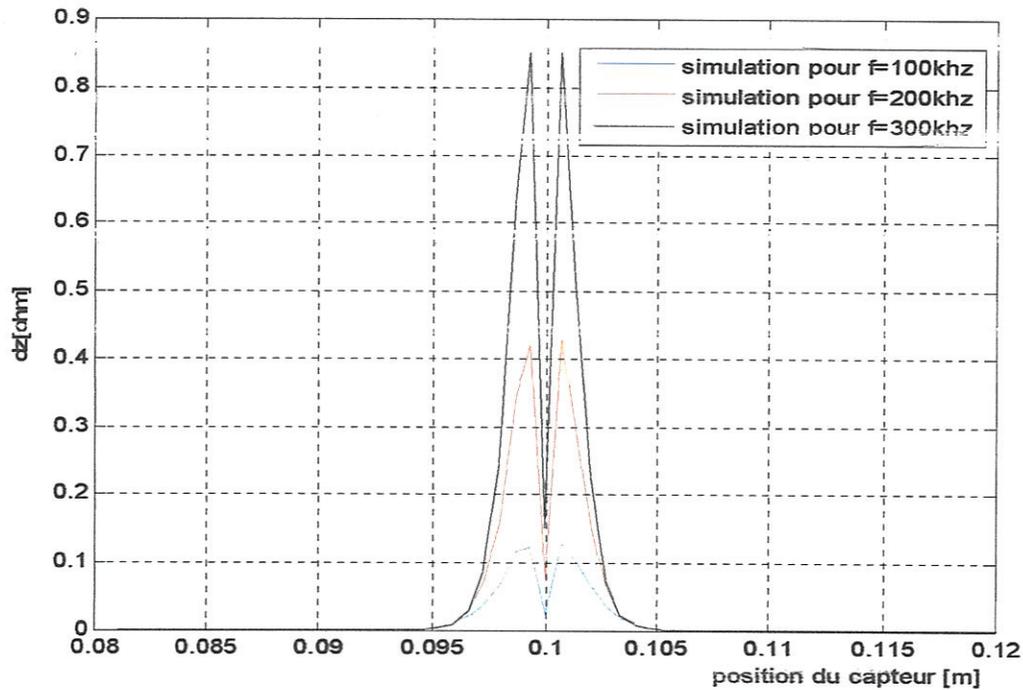


Figure IV.44. Influence de la fréquence sur la détection d'un défaut

On peut conclure que plus la fréquence est élevée plus la différence d'impédance (dz) est importante. Donc, il faut bien choisir la fréquence qui donne une meilleure détection du défaut.

On peut justifier cette augmentation par la variation de l'épaisseur de peau qui engendre une variation de la densité du courant de Foucault (Tableau IV.4).

IV.4.2.3. Simulation dans le cas d'une variation de la géométrie du défaut

a) Effet de la largeur du défaut sur la détection du défaut

Pour voir cet effet sur la détection du défaut, on a proposé les géométries présentées dans les figures IV.45, IV.46, IV.47 et IV.48. On a pris un capteur complet et on a considéré les mêmes propriétés physiques et géométriques du capteur et de la pièce aimantée définies précédemment. Les défauts réalisés sur la cible ont la même profondeur. Par contre, ils ont des largeurs différentes. Les caractéristiques géométriques de ces défauts sont données par le tableau ci-dessous :

Tableau IV.5. Caractéristiques géométriques du défaut

Type de défaut	Largeur de défaut	Profondeur de défaut
1 ^{ier} défaut	0.5 mm	0.5 mm
2 ^{ième} défaut	0.35 mm	0.5 mm
3 ^{ième} défaut	0.2 mm	0.5 mm

Les figures IV.46, IV.47 et IV.48 représentent le zoom du premier, du deuxième et du troisième défaut, respectivement.

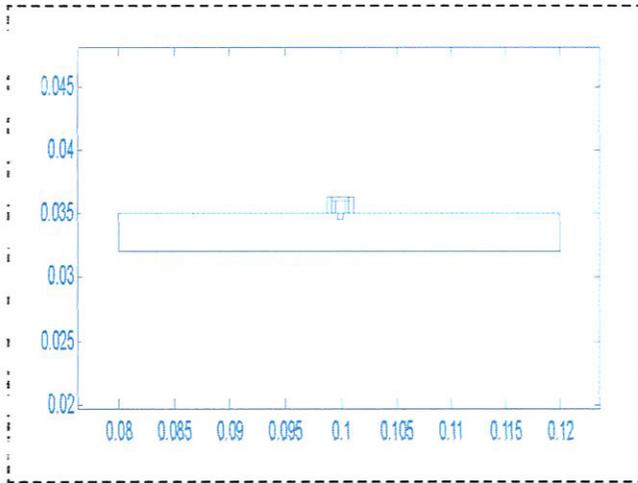


Figure IV.45. Géométrie du défaut

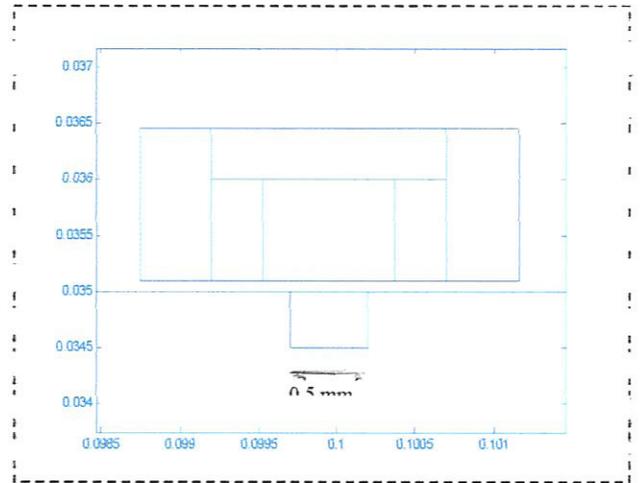


Figure IV.46. Zoom du premier défaut

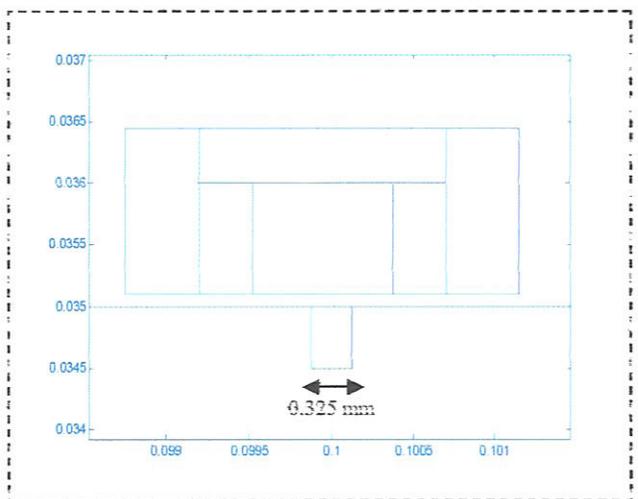


Figure IV.47. Zoom du deuxième défaut

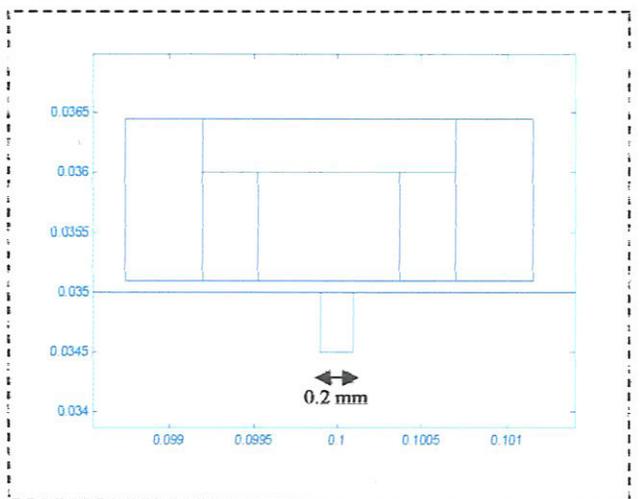


Figure IV.48. Zoom du troisième défaut

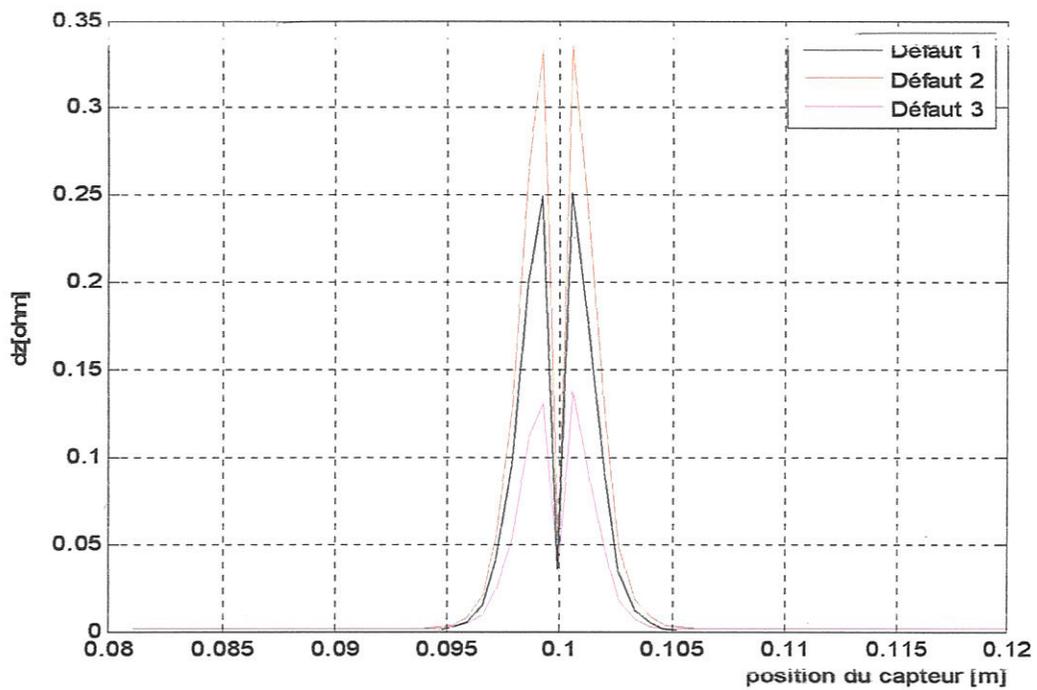


Figure IV.49. Comparaison des résultats de simulation

✚ Interprétation des résultats

Les résultats de simulation du système capteur-cible obtenus pour les trois types de défauts sont présentés dans la figure IV.49. Cette dernière montre la variation de la différence d'impédance par rapport au déplacement du capteur, pour ces trois défauts.

D'après ces résultats, on peut conclure que la variation de la géométrie du défaut (largeur) provoque la perturbation de la répartition des courants induits, donc la variation de la réponse du capteur (la différence de l'impédance). L'augmentation de la réponse du capteur est proportionnelle à l'augmentation de la largeur de défaut.

b) Effet de la profondeur du défaut sur la détection du défaut

Pour voir l'effet de la variation de la profondeur du défaut sur la détection du défaut, on a proposé les géométries présentées sur les figures IV.50, IV.51, IV.52, et IV.53. On a pris les mêmes propriétés physiques et géométriques pour le capteur et la pièce et qui sont défini dans les tableaux IV.1 et IV.2. Avec une fréquence de 200 kHz. Les défauts réalisés sur la pièce ont la même largeur mais avec des profondeurs différentes. Leurs caractéristiques géométriques sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.6. Caractéristiques géométriques du défaut

Type de défaut	Largeur de défaut	Profondeur de défaut
1er défaut	0.5 mm	0.5 mm
2eme défaut	0.5 mm	1 mm
3eme défaut	0.5 mm	2 mm
4eme défaut	0.5 mm	2.5 mm

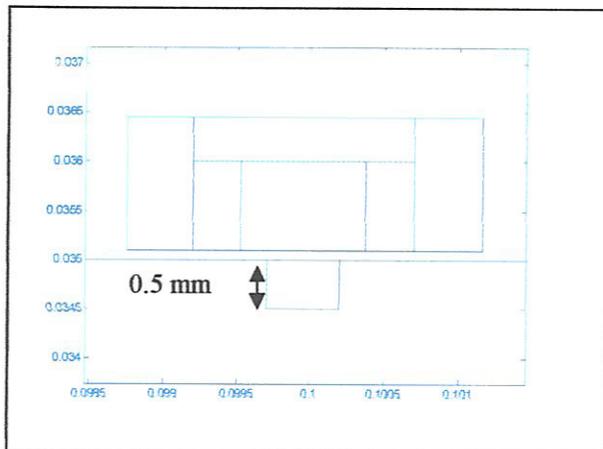


Figure IV.50. Zoom du premier défaut

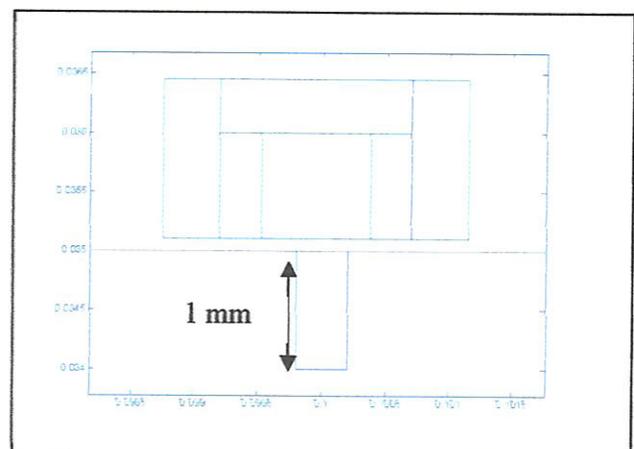


Figure IV.51. Zoom du deuxième défaut

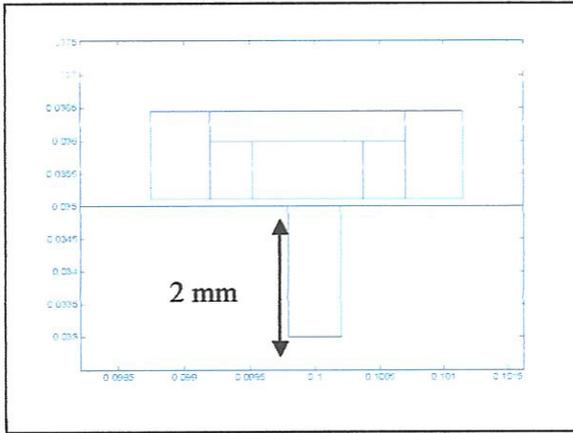


Figure IV.52. Zoom du troisième défaut

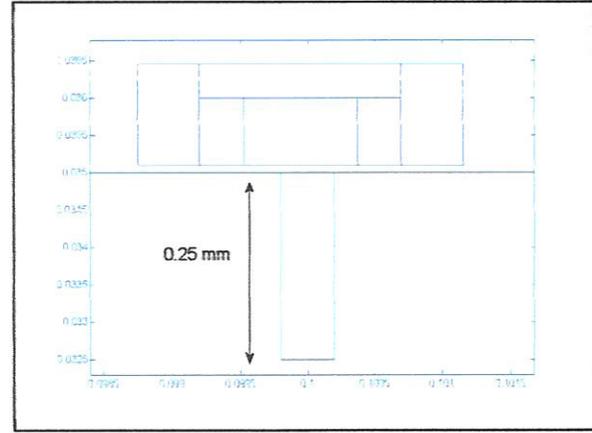


Figure IV.53. Zoom du quatrième défaut

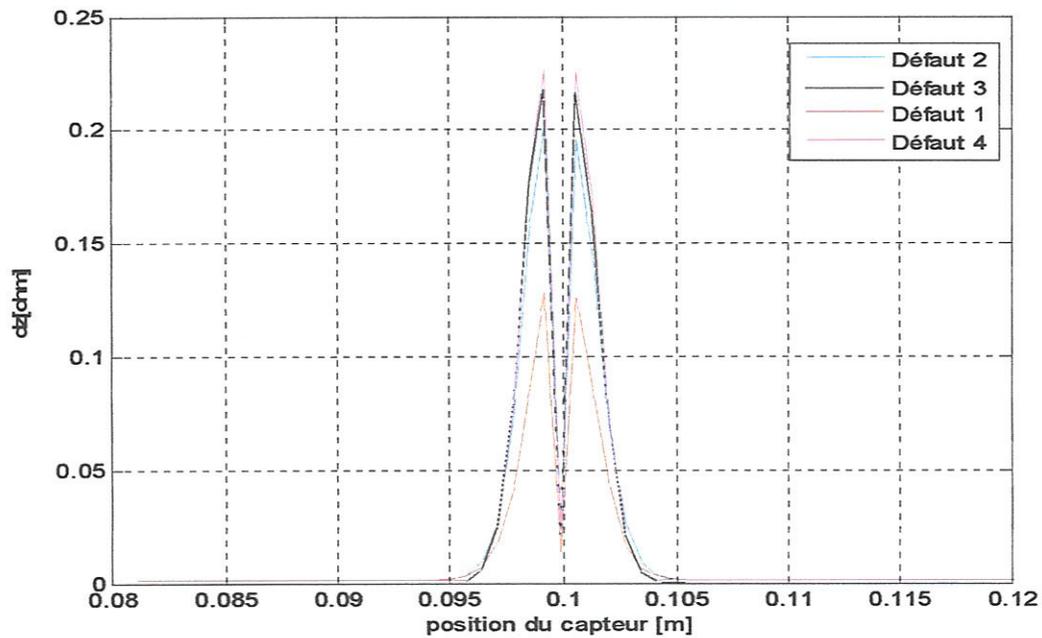


Figure IV.54. Comparaison des résultats de simulation

On remarque que les amplitudes des différences d'impédance correspondantes aux trois derniers défauts sont presque les mêmes. Cela peut être expliqué par l'influence de l'épaisseur de peau ($\delta = 1.3\text{mm}$). Donc la détection des défauts qui ont des profondeurs supérieures à l'épaisseur de peau n'a pas pu être effectuée. Pour cela il faut agir sur la fréquence des courants d'excitation pour augmenter l'épaisseur de peau.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la solution de l'équation de la magnétodynamique en régime harmonique qui a été formulée précédemment. C'est à dire la répartition du potentiel vecteur magnétique A , la distribution de l'induction magnétique, la distribution des courants

induits. De plus, on a déterminé la différence de l'impédance par rapport au déplacement du capteur qui est situé au dessus d'une pièce amagnétique avec défaut. Pour montrer les limites du fonctionnement du système capteur-cible on a étudié l'influence des différents paramètres (géométriques, physiques et fréquence). On a pu montrer l'intérêt du bon choix de la fréquence pour une meilleure détection du défaut (La détection d'un défaut surfacique nécessite l'excitation du capteur par des fréquences élevées).

Conclusion générale

Conclusion Générale

L'utilisation des courants de Foucault (CF) permet un contrôle non destructif (CND) fiable, rapide et peu coûteux. Sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse d'utilisation, et son caractère électromagnétique sans contact en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Le CND est une technique qui assure un bon fonctionnement des dispositifs et des matériels, en les protégeant de toute fissure et donnant plus de sécurité au personnel.

Notre étude s'est basée sur la méthode du CND par CF, appliquée aux matériaux conducteurs, exploitant le phénomène électromagnétique en deux dimensions. Notre dispositif de contrôle, est constitué d'un capteur par CF de forme E placé au dessus d'une cible. Cette dernière est une pièce conductrice.

L'équation qui régit le fonctionnement de notre système de CND a été formulée à partir des équations de Maxwell pour aboutir à une équation différentielle aux dérivées partielles, qu'on a résolu numériquement par la méthode des éléments finis. Ceci, dans le but de déterminer la répartition du potentiel vecteur magnétique ainsi que celle des différentes grandeurs qui peuvent être dérivés directement de celui-ci (c'est-à-dire l'induction magnétique et le courant induit dans la charge), à chaque point de notre domaine d'étude (capteur, air et cible).

Ensuite, on a exploité cette solution pour voir l'influence des différents paramètres géométriques (forme du noyau magnétique, forme du défaut et distance capteur-cible) et physiques (perméabilité magnétique, conductivité électrique et fréquence) sur la réponse du capteur qui représente la différence d'impédance en absence et en présence du défaut.

Les différentes applications qu'on a effectuées sont énumérées comme suit:

- Influence de la variation des propriétés géométriques du capteur sur leur sensibilité.
 - le noyau central.
 - la tête du pot.
 - la distance capteur-cible (lift-off).
- Influence de la variation des propriétés physiques sur la sensibilité du capteur.
 - la conductivité électrique de la pièce.
 - la perméabilité magnétique de la pièce.
 - la fréquence du courant d'excitation.
- Influence de la variation de la géométrie du défaut sur la sensibilité du capteur.
 - la largeur du défaut.
 - la profondeur du défaut.

En conclusion, la présence des éléments constitutifs du capteur (circuit magnétique) permet une détection très sensible, donc une meilleure réponse du capteur. Le contrôle par CF se limite aux défauts surfaciques (débouchant), c'est à dire pour quelques millimètres d'épaisseur (de l'ordre de l'épaisseur de peau). Pour augmenter la pénétration des CF dans le matériau il faut donc travailler à des basses fréquences.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Document internet, [WWW,mesure.com/archives/642FICHE%2043.pdf](http://WWW.mesure.com/archives/642FICHE%2043.pdf)
- [2] J. Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND)", Techniques de l'ingénieur, dossier R1400, janvier 1996.
- [3] A. Cartailac Moretti, et F. Dufour, "La colorimétrie et les illuminants adéquats en CND ressuage coloré", Journées COFREND Toulouse 2008, mai 2008.
- [4] E. Rayer, F. Daubigney, et M. Peyrot, "L'utilisation de la vidéoendoscopie en remplacement de la radiographie pour les contrôles non destructifs", Journées COFREND Toulouse 2008, mai 2008.
- [5] J. Harvent, F. Bugarin, J.-J. Orteu, M. Devy, P. Barbeau, et G. Marin, "Inspection de pièces aéronautiques pour la détection de défauts de forme à partir d'un système multi-caméras", Journées COFREND Toulouse 2008, mai 2008.
- [6] O. Zahran and W. Al-Nuaimy, "Image Processing for Accurate Sizing of Weld Defects Using Ultrasonic Time-Of-Flight Diffraction", conférence ECNDT 2006, Berlin, septembre 2006.
<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/author~1.htm>
- [7] J. Kunkle, R. Vun, T. Eischeild, M. Langron, N. Bhardwaj, and M. Bhardwaj, "Phenomenal Advancements in Transducers and Piezoelectric Composites for Non-Contact Ultrasound and Other Applications", conférence ECNDT 2006, Berlin, septembre 2006.
<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/author~1.htm>
- [8] A. Segura, F. Lesage, B. Bisiaux, S. Petit, "Analyse et interprétation en ligne d'images ultrasonores pour améliorer la sélectivité des installations de contrôle de tubes en acier", Journées COFREND Toulouse 2008, mai 2008.
- [9] B. Chassignole, O. Dupond, L. Doudet, E. Abittan, et N. Etchegaray, "Influence de la structure sur le contrôle ultrasonore d'une soudure de piquage sur la tuyauterie primaire de centrale nucléaire", Journées COFREND Toulouse 2008, mai 2008.
- [10] P. Hairy, P. Bouvet, Y. Gaillard, V. Buecher, et F. Granereau, "Quantification des défauts en fonderie sous pression par radioscopie numérique et tomographie haute résolution", Journées
- [11] B. Eyglunent. "*Thermique théorique et pratique*". Editions Hermès, 1994.
- [12] J. Dumont-Fillon : Contrôle non destructif (CND). Techniques de l'Ingénieur, R1400.
- [13] M. Lacroix, "Essais non destructifs", Techniques de l'ingénieur 7-1986.
- [14] « courants de Foucault », Encyclopédie multimédia, Atlas et organise-notes, Microsoft encarta, collection 2006.

- [15] F. Mehmaï, M. Ghoul, "Étude générale d'un processus industriel "trifileuse" commandée par PLC Siemens S7-300 à travers le bus de terrain "Profibus", Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du brevet de technicien supérieur en Maintenance des machines automatisée, Batna, 2007. COFREND Toulouse 2008, mai 2008. [1.39] J. Krautkrämer, and H. Krautkrämer
- [16] T. Chady, M. Enokizono, T. Todaka, Y. Tsuchida et R. Sikora: A family of matrix type sensors for detection of slight flaws in conducting plates. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5):3655–3657, septembre 1999.
- [17] H.E. Bryan : Printed inductors and capacitors. *Tele-Tech & Electronic Industries*, 14(12):68, décembre 1955.
- [18] F.E. Terman : *Radio Engineers' Handbook*. McGraw-Hill, New-York, 1943.
- [19] M. Woytasik, J.-P. Grandchamp, É. Dufour-Gergam, J.-P. Gilles, S. Megherbi, É. Martincic, H. Mathias et P. Crozat : Two- and three-dimensional microcoil fabrication process for three-axis magnetic sensors on flexible substrates. *Sensors and Actuators A: Physical*, 132(1):2–7, novembre 2006.
- [20] E.P. Harrison, G.L. Turney et H. Rowe : Electrical properties of wires of high permeability. *Nature*, 135:961, 1935.
- [21] M. Knobel et K.R. Pirota : Giant magnetoimpedance : concepts and recent progress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242-245:33–40, avril 2002.
- [22] F. Vacher, F. Alves et C. Gilles-Pascaud : Eddy current non destructive testing with giant magneto-impedance sensor. *NDT & E International*, 40(6):439–442, septembre 2007.
- [23] P. Jantaratana et C. Sirisathitkul : Giant magnetoimpedance in silicon steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 281(2-3):399–404, octobre 2004.
- [24] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich et J. Chazelas : Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Physical Review Letters*, 61(21):2472–2475, novembre 1988.
- [25] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach et W. Zinn : Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Physical Review B*, 39(7):4828–4830, mars 1989.
- [26] M. Hehn, F. Montaigne et A. Schuhl : *Magnétorésistance géante et électronique de spin*. Techniques de l'Ingénieur, E2135.
- [27] F. Vacher : *Développement d'un imageur magnétique pour le contrôle non destructif par courants de Foucault*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, juin 2007.

- [28] D.D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki et K. Ando : 230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions. *Applied Physics Letters*, 86(9), février 2005.
- [29] S. Yamada, K. Chomsuwan, T. Hagino, H. Tian, K. Minamide et M. Iwahara : Conductive microbead array detection by high-frequency eddy-current testing technique with SV-GMR sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(10):3622–3624, octobre 2005.
- [30] P. Mlejnek, M. Vopálenský et P. Ripka : AMR current measurement device. *Sensors and Actuators A : Physical*, 141(2):649–653, février 2008.
- [31] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki et K. Ando: Giant roomtemperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. *Nature Materials*, 3:868–871, décembre 2004.
- [32] P. Ripka : Advances in fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A : Physical*, 106(1- 3):8–14, septembre 2003.
- [35] D. Hagemaiier. "Eddy current impedance plane analysis". *Materials Evaluation*, Vol. 41, pp. 211–218, 1982.
- [36] I. Dufour. "Separation of conductivity and distance measurements for eddy current non destructive inspection of graphite composite materials". *Journal de Physique III*, Vol. 3, pp. 1065–1074, 1993.
- [37] Frija Mounir, "Contrôle non Destructif", Institut Supérieur des Systèmes Industriels de Gabès.
- [38] C. Miki, "Non-Destructive Evaluation (NDE)", Department of Civil Engineering, Institute of Technology, Tokyo, www.cv.titech.ac.jp/~miki-lab/english/class/retrofit-eng/Cladd-8-
- [39] P. S. Naidu, "Sensor array signal processing", International standard book, Library of congress card, United States of America, 2001.
- [40] S. Nath, B. Wincheski, J.P. Fulton et M. Namkung : Study of the new eddy current non-destructive testing sensor on ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(6):4644–4646, novembre 1994.
- [41] L. Rémy, "Modélisation Phénoménologique des Signaux Courants de Foucault en Vue de la caractérisation des Défauts des Tubes des Générateurs de Vapeur ", Direction de L'information Scientifique et Technique, CEA/SACLAY, Gif-Sur-Yvette, France, 1997.
- [42] N. Ida. *Numerical Modeling for Electromagnetic Non-Destructive Evaluation*. Chapman&Hall, 1995.

- [43] Jayathi Y. Murthy, "Numerical Methods in Heat, Mass, and Momentum Transfer", Spring, 2002.
- [44] S. N. Rajesh," Probability of Detection Models for Eddy Current NDE Methods", Thesis submitted to Iowa State University, Prepared for the U.S. Department of Energy, April 30, 1993.
- [45] R.Palanisamy et W. Lord, "Prediction of Eddy Current Probe Signal Trajectories", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-16, NO. 5. September 1980.
- [46] Y. Choua "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault" le 01 octobre 2009
- [47] P. Molfino, M. Repetto, "Fully coupled quasi-axisymmetric magnetothermal model for skin effects analysis in resistive tokamaks coils", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No.5, September 1989.

