

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université El Hadj Lakhdar Batna**  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'Electrotechnique

**Mémoire de  
Magistère En Electrotechnique**

Option : Matériaux Electrotechniques

Présenté Par

**NABIL BENHADDA**

Ingénieur en Electrotechnique - Université de Batna

Thème

**Modélisation des Capteurs Inductifs  
à Courants de Foucault**

Devant le Jury Composé de :

Dr A. CHAGHI  
Prof. A. GUETTAFI  
Prof. A. BENOUDJIT  
Prof. K. SRAIRI  
Dr. F.Z. LOUAI

Université de Batna  
Université de Batna  
Université de Batna  
Université de Biskra  
Université de Batna

Président  
Rapporteur  
Co-Rapporteur  
Examineur  
Examineur

Septembre 2006

*DEDICACES*

*A mes parents,*

*Mes frères,*

*Mes sœurs,*

*Et à toute ma famille*

**NABIL**

## *Remerciements*

*Ce travail a été effectué dans le laboratoire d'Electrotechnique de l'université de Batna.*

*Que tous qui, tout au long de l'élaboration de ce travail, m'ont aidé et apporté leurs connaissances trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*J'adresse mes remerciements les plus sincères à :*

*Monsieur A/AZIZ CHAGHI, Maître de conférence à l'université de Batna, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Monsieur AMOR GUETTAFI, Professeur à l'université de Batna et rapporteur, de ce mémoire pour la confiance qu'il m'a fait en me proposant ce thème ainsi que son aide et pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer en toutes occasions.*

*Monsieur AZEDDINE BENOUDJIT, Professeur à l'université de Batna, co-rapporteur de ce mémoire pour l'intérêt avec lequel il a suivi mes travaux et pour ses conseils judicieux et son soutien moral.*

*Monsieur KAMEL SRAIRI, Professeur à l'université de Biskra, pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de ce mémoire.*

*Madame F.Z. LOUAI, Maître de conférences à l'université de Batna, pour avoir excepté de faire partie de ce jury de mémoire, en n'oubliant pas la documentation efficace qu'elle m'a fournie.*

*Je tiens à remercier aussi :*

*SALIM SRAIRI de l'université de Belfort, pour son aide documentaire et son soutien fraternel.*

*Messieurs BACHIR ABDELHADI, CHERIF FETHA, HAMOUDI NASRI, M<sup>me</sup> KADID, SAIDA, SAMIR LAGGOUNE, Enseignants au département d'électrotechnique*

*ABDOU ABDELHAK, BENAMOR MESSAOUD, LAZHER BOUHIDEL et HOUCINE pour leur aide amicale et l'ambiance favorable qu'ils m'ont permis de mener à terme ce travail.*

*En fin que tous mes amis trouvent ici mes sincères remerciements.*

**NABIL**

# Table des Matières

---

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 01 |
|----------------------------|----|

## Chapitre Un

### Notions sur le CND et Généralités sur les Capteurs

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 03 |
| 1.1 Techniques de CND et concepts généraux.....            | 03 |
| 1.1.1 Techniques de CND.....                               | 03 |
| 1.1.2 Principes généraux.....                              | 04 |
| 1.2 Différentes topologies de Contrôle non destructif..... | 04 |
| 1.2.1 Examen visuel.....                                   | 04 |
| 1.2.2 Ressuage.....  | 05 |
| 1.2.3 Radiographie.....                                    | 06 |
| 1.2.4 Magnétoscopie.....                                   | 08 |
| 1.2.5 Ultrasons.....                                       | 09 |
| 1.2.6 Thermographie.....                                   | 10 |
| 1.2.7 Courants de Foucault.....                            | 11 |
| 1.3 Principes de détection des défauts.....                | 13 |
| 1.4 Définition d'un capteur.....                           | 14 |
| 1.4.1 Paramètres des capteurs.....                         | 15 |
| 1.4.2 Domaines d'utilisation des capteurs.....             | 15 |
| 1.4.3 Critères de choix d'un capteur.....                  | 16 |
| 1.5 Différentes types de capteurs.....                     | 16 |
| 1.5.1 Capteurs de distance.....                            | 16 |
| 1.5.2 Capteurs résistives.....                             | 16 |
| 1.5.3 Capteurs à inductance variable.....                  | 17 |
| 1.5.4 Transformateurs différentiels.....                   | 17 |
| 1.5.5 Capteurs magnétosoniques.....                        | 17 |
| 1.5.6 Capteurs inductifs magnétométriques.....             | 17 |
| 1.5.7 Capteurs capacitifs.....                             | 18 |
| 1.5.8 Capteurs d'intensité.....                            | 19 |
| 1.5.9 Capteurs à propagation d'onde.....                   | 20 |
| 1.5.10 Capteurs à ultrason.....                            | 20 |
| 1.5.11 Capteurs optiques.....                              | 21 |
| 1.5.12 Capteurs de température.....                        | 21 |
| 1.5.13 Capteurs d'humidité.....                            | 21 |
| 1.5.14 Capteurs inductifs.....                             | 22 |
| 1.5.15 Différentes formes de capteur inductif.....         | 23 |
| 1.6 Capteurs plus utilisés en CND.....                     | 24 |
| 1.7 Conclusion.....  | 25 |

## Chapitre Deux

### Théorie des Capteurs Inductifs par Courants de Foucault

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 26 |
| 2.1 Courants de Foucault.....                                | 26 |
| 2.2 Principe du capteur inductif à courants de Foucault..... | 27 |
| 2.3. Mesure du champ magnétique.....                         | 28 |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.3.1 | Moyens du CND.....   | 28 |
| 2.3.2 | Comportement du champ magnétique par rapport aux caractéristiques de la cible..... | 29 |
| 2.3.3 | Contrôle par des courants de Foucault.....   | 29 |
| 2.4   | Plan d'impédance normalisé et paramètres influents .....                           | 30 |
| 2.4.1 | Définition .....   | 30 |
| 2.4.2 | Principe et approche du problème .....   | 30 |
| 2.4.3 | Paramètres influençant l'impédance.....  | 31 |
| 2.5   | Analogie avec le transformateur .....  | 32 |
| 2.5.1 | Effet de la conductivité .....   | 33 |
| 2.5.2 | Effet de la distance capteur/cible (lift off) .....                                | 35 |
| 2.5.3 | Influence de la fréquence sur l'impédance du capteur.....                          | 36 |
| 2.6   | Différentes géométries des bobines à CF .....                                      | 37 |
| 2.6.1 | Bobines internes .....   | 38 |
| 2.6.2 | Bobines différentielles.....   | 38 |
| 2.6.3 | Bobines émettrice-réceptrice .....   | 38 |
| 2.7   | Différentes structures des circuits magnétiques des capteurs à CF.....             | 39 |
| 2.7.1 | Capteurs encerclants.....  | 39 |
| 2.7.2 | Capteurs internes.....   | 40 |
| 2.7.3 | Capteurs-sondes .....  | 40 |
| 2.7.4 | Sondes de réflexion .....  | 40 |
| 2.7.5 | Sondes avec noyaux en ferrite.....   | 40 |
| 2.7.6 | Sondes sans noyau.....   | 41 |
| 2.7.7 | Capteurs multiples.....  | 41 |
| 2.8   | Différents modes d'excitation.....   | 43 |
| 2.9   | Modélisation analytique d'un capteur inductif différentiel .....                   | 43 |
| 2.9.1 | Principe et schéma du capteur.....   | 43 |
| 2.9.2 | Caractérisation du défaut.....   | 46 |
| 2.9.3 | Simulation et analyse des résultats.....   | 46 |
| 2.10  | Conclusion.....  | 47 |

### **Chapitre Trois**

#### **Approche d'analyse en 2D par Élément Finis d'un Capteur Inductif Différentiel à Courants de Foucault**

|         |  |    |
|---------|--|----|
|         | Introduction.....  | 48 |
| 3.1     | Analyse des phénomènes électromagnétiques .....            | 49 |
| 3.1.1   | Equation de Maxwell .....                                  | 49 |
| 3.1.2   | Hypothèses simplificatrices.....                           | 50 |
| 3.2     | Formulation en potentiel vecteur.....                      | 50 |
| 3.3     | Equation électromagnétique d'un système axisymétrique..... | 51 |
| 3.4     | Mise en équation du système électromagnétique étudié ..... | 52 |
| 3.4.1   | Présentation du dispositif en 3D.....                      | 52 |
| 3.4.2   | Modèle en 2D .....   | 53 |
| 3.5     | Mise en équation du modèle axisymétrique .....             | 54 |
| 3.6     | Divers méthodes numériques de résolution .....             | 54 |
| 3.6.1   | Méthode des intégrales de frontières.....                  | 55 |
| 3.6.2   | Méthode des différences finis .....                        | 55 |
| 3.6.3   | Méthode des volumes finis.....                             | 55 |
| 3.6.4   | Méthode des circuits couplées.....                         | 56 |
| 3.6.5   | Méthodes des éléments finis .....                          | 56 |
| 3.6.6.1 | Méthode de Galarkine .....                                 | 56 |
| 3.6.6.2 | Forme matricielle élémentaire.....                         | 57 |
| 3.6.6.3 | Assemblage des matrices élémentaires .....                 | 57 |

---

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.7     | Conditions aux limites et conditions des interfaces .....         | 57 |
| 3.7.1   | Conditions aux limites.....                                       | 58 |
| 3.7.2   | Conditions d'interfaces .....                                     | 58 |
| 3.8     | Résolution du système.....  | 58 |
| 3.8.1   | Discretisation du domaine.....                                    | 58 |
| 3.8.2   | Maillage en éléments triangulaires linéaires .....                | 59 |
| 3.9     | Formulation éléments finis des équations électromagnétiques ..... | 59 |
| 3.9.1   | Equation électromagnétique linéaire .....                         | 59 |
| 3.9.1.1 | Formulation intégrale .....                                       | 60 |
| 3.9.1.2 | Introduction des conditions aux limites .....                     | 60 |
| 3.9.1.3 | Formulation matricielle .....                                     | 60 |
| 3.9.2   | Calcul d'impédance .....  | 60 |
| 3.10    | Conclusion.....   | 62 |

## **Chapitre Quatre**

### **Simulation et Analyse des Résultats**

|       |  |    |
|-------|--|----|
|       | Introduction .....   | 63 |
| 4.1   | Élaboration et définition de l'approche d'étude .....  | 63 |
| 4.1.1 | Présentation et structure du programme développé .....   | 63 |
| 4.1.2 | Applications proposées .....   | 65 |
| 4.1.3 | Présentation et définition du modèle d'étude.....  | 66 |
| 4.2.  | Maillage du domaine d'étude .....  | 66 |
| 4.3   | Simulation d'un capteur- tube amagnétique sans défaut.....   | 67 |
| 4.3.1 | Interprétation des résultats.....  | 68 |
| 4.4   | Simulation d'un (capteur - tube amagnétique) avec défaut externe.....                                  | 69 |
| 4.4.1 | Interprétation des résultats de simulation.....  | 70 |
| 4.5   | Simulation d'un (capteur - tube magnétique) avec défaut externe.....                                   | 70 |
| 4.5.1 | Interprétation des résultats.....  | 72 |
| 4.6   | Simulation d'un capteur et un tube magnétique avec défaut interne .....                                | 72 |
| 4.6.1 | Interprétation des résultats.....  | 74 |
| 4.7   | Simulation d'un capteur et un tube amagnétique avec défaut externe avec déplacement<br>du capteur..... | 75 |
| 4.8   | Allure de l'impédance pour trois fréquences différentes.....   | 78 |
| 4.9   | Effet d'un défaut externe sur l'impédance .....  | 79 |
| 4.9.1 | Interprétation des résultats.....  | 80 |
| 4.9.2 | Teste des performances du capteur pour différents défauts .....  | 80 |
| 4.10  | Conclusion.....  | 81 |
|       | Conclusion générale .....  | 82 |

## **Références**

## **Annexes**

## 1. Généralités et Problématique

*Les contrôles non destructifs (CND) sont nés de la nécessité devant laquelle se sont trouvés les ingénieurs de devoir garantir la sécurité des personnes et des matériels.*

*Ainsi, dans les industries de pointe telles l'industries aéronautique et nucléaire, se sont implantées des techniques sophistiquées pour « débusquer » dans le stade final de l'élaboration des produits et les dernières imperfections de la matière, [1, 2, 3, 4]. Aujourd'hui, on assiste à une demande très importante et généralisée, provenant de tous les secteurs industriels. La « qualité » est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante. Devant cette réalité et à l'image des précurseurs que furent les Japonais, « l'assurance Qualité » s'est implantée dans les entreprises sous la forme d'une organisation visant à répertorier et à minimiser les facteurs de «non Qualité»: facteurs techniques, facteurs liés à la structure de l'entreprise, facteurs humains,...etc. Les CND étant un moyen d'évaluer un aspect de cette qualité, sont donc plus largement utilisés aujourd'hui, et voient ainsi leurs performances mises à l'épreuve d'une grande variété de problèmes, [2].*

*Ces dernières années des dispositifs innovants ont été développés, Ils utilisent des méthodes d'induction améliorées et de nouveaux capteurs magnétiques à haute sensibilité comme dispositifs de mesure, [3]. La qualification détaillée de ces nouveaux systèmes est devenue nécessaire au regard des systèmes conventionnelles, tant en terme de performances de détection, liées notamment à l'accroissement des profondeurs d'inspection qu'en terme de rapidité, facilité d'utilisation et optimisation.*

*De plus, la conception de nouvelles configurations et l'optimisation de ces nouveaux dispositifs de CND par Courants de Foucault demande une modélisation fine des phénomènes physiques mis en jeu tant au sein de l'échantillon étudié qu'à sa surface. La méthode de simulation par éléments finis est l'une des plus couramment utilisée, elle fournit des résultats reproductibles et proches des conditions expérimentales, [5]. La simulation de ces techniques joue également un rôle croissant lors de la conception de sondes et permet de démontrer à moindre coût les performances de ces méthodes. De plus, elle constitue un facteur crucial d'augmentation de la fiabilité d'un contrôle, dans la mesure où elle permet de maîtriser les paramètres mis en oeuvre pendant l'inspection. Le rapprochement de ces simulations avec les mesures effectives permettra de valider et de simplifier les modèles, [3]. C'est dans ce cadre que s'inscrit la problématique de ce travail.*

## 2. Objectifs

Trois objectifs seront visés à travers ce travail:

- ▶▶ Une recherche bibliographique sur le CND tout en mettant l'accent sur les techniques utilisant les Courants de Foucault.
- ▶▶ Modélisation analytique de l'ensemble capteur-pièce ainsi qu'une étude des méthodes de résolution, conduisant au choix d'une approche.
- ▶▶ Élaboration d'un programme de calcul pour la simulation de différentes applications

## 3. Présentation du mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera dévoué à une recherche bibliographique concernant les techniques du CND ainsi que leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'application. Ceci sera suivi par un aperçu général sur les différents capteurs, et on terminera par une étude comparative.

Dans le deuxième chapitre, on présentera les notions de base concernant les capteurs inductifs à courants de Foucault, avec leurs principes, leurs différentes géométries existantes ainsi que leurs différents circuits magnétiques. Une simulation d'un exemple de ces capteurs (capteur différentiel) constituera la dernière partie de ce chapitre.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation du modèle analytique élaboré (capteur en tube cylindrique creux), ainsi que les différentes méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis sera exploitée pour la résolution des équations électromagnétiques. L'expression de l'impédance sera présentée à la fin de ce chapitre.

Le dernier chapitre sera dédié aux différentes applications et aux résultats de simulation d'un ensemble d'applications énumérées comme suit :

- ▶▶ Simulation d'un tube magnétique avec et sans défaut;
- ▶▶ Simulation d'un tube magnétique avec défaut;
- ▶▶ Simulation d'un tube magnétique avec défaut situé à la face interne du tube;
- ▶▶ Tube avec défaut magnétique associé par le déplacement du capteur;
- ▶▶ Simulation d'un tube magnétique avec défaut d'épaisseur variable;

Finalement le test des performances de ce capteur étudié par la variation de la largeur du défaut fera l'objectif de la dernière application.

On terminera notre travail par une conclusion générale où on résumera les travaux réalisés à travers ce mémoire, les difficultés rencontrées et les perspectives envisagées.



## Introduction

*Dans l'industrie aéronautique, comme dans la plupart des industries du transport, les essais non destructifs peuvent faire la différence entre la vie et la mort [3]. Comme son nom l'indique, le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Cette définition est assez large ; pour être plus précis, le CND concerne exclusivement la "santé de la matière", [4] et consiste à rechercher les défauts internes des structures, matériaux, pièces et assemblages. Les mesures dimensionnelles et de formes n'entrent donc pas dans le domaine d'application du CND.*

*Les techniques de CND sont utilisées en contrôle de qualité pour s'assurer de la conformité et de la normalité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance. Elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de déceler le manque de matière, les fissures, la présence de corps étrangers...etc. L'idéal serait d'obtenir un dimensionnement très précis de tous les défauts décelés. L'état actuel de la technologie ne le permet pas, sauf dans certains cas particuliers. Le mot "Contrôle" n'en figure pas moins dans "CND", [6]. Ce que l'on recherche, c'est avant tout la qualification ou la localisation d'un défaut, sans nécessairement le quantifier. On a tenu, les mesures de tous types de grandeurs physiques, comme leur traitement et leur exploitation, il est très souhaitable de transposer immédiatement sous la forme d'un signal électrique chacune des grandeurs physiques intéressantes. C'est le rôle du capteur que d'assurer cette duplication de l'information en la transférant du point même où se fait la mesure de la grandeur physique (non électrique) qui est lui propre, sur une grandeur électrique (courant, tension, charge, ou impédance...),[7] . Dans ce premier chapitre on présentera les différentes techniques exploitées par l'industrie du CND. Ensuite on donnera un aperçu général sur les capteurs employés par cette technique et on terminera par une synthèse et un choix de la méthode qu'on utilisera dans notre étude.*

## 1.1 Techniques de CND et concepts généraux

### 1.1.1 Techniques du CND

Les techniques de CND sont nombreuses, Citons à titre d'exemple :

►◄ L'examen visuel.

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

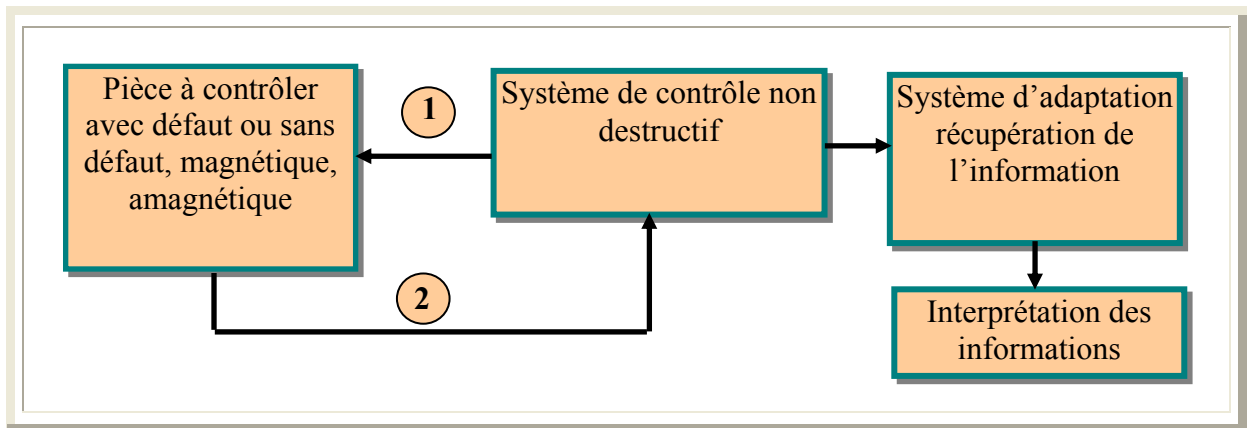
Le contrôle non destructif permet de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais

exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut). Il faut donc déterminer, à la casse et de façon empirique, quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce et la remplacer si besoin, ces techniques sont très utilisées dans :

- ▶▶ L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs)
- ▶▶ L'industrie navale (contrôle des coques des bateaux)
- ▶▶ L'aéronautique (poutres, ailes d'avion)

### 1.1.2 Principes Généraux

Quelque soit la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la figure 1.1.



**Figure 1.1** Schéma synoptique de CND

Quelle que soit la nature de la cible (pièce à tester), magnétique ou amagnétique, elle se caractérise par un ensemble de paramètres ( $\mu, \sigma, \dots$ ), que l'on va chercher à estimer afin de formuler un diagnostic d'intégrité.

Le système de contrôle non destructif représente la technique (ressuage, ultrason, magnétoscopie, contrôle par courants de Foucault.....) utilisée pour déterminer l'état de la cible, Le système d'adaptation et récupération de l'information est un système d'acquisition, dont le rôle est de concrétiser les résultats du contrôle. Les moyens utilisés dans cette étape diffèrent suivant le type de procédé utilisé, on peut trouver un impédance mètre, un microscope, un caméscope ou l'oeil nu.

## 1.2 Différentes topologies du contrôle non destructif

Dans ce paragraphe, seront présentées brièvement les diverses techniques mises en œuvre pour le contrôle des pièces en précisant pour chaque type, ses caractères propres, ses possibilités et ses limitations, [4].

### 1.2.1 Examen visuel

Chronologiquement l'examen visuel est le plus ancien. Cette procédure techniquement très simple fait toutefois appel à une véritable expertise et à un sens aigu de l'observation des agents qui l'effectuent. L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus

général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure ou d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique, [2], [3]. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles, [1] (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect inadmissibles pour des produits plats du types tôles, tissus, verres, ...etc. Toutefois l'examen pûrement visuel présente des limites de différentes natures, que nous allons examiner et justifiant l'utilisation de toute une gamme de procédés de contrôle optique (éclairage, loupe, miroir, ...).

### **b) Avantages**

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

### **a) Inconvénients**

- ▶▶ Détection limite aux défauts visibles;
- ▶▶ La surface doit être propre.



**Figure 1.2** Examen visuel des traces de corrosion

## **1.2.2 Ressuage**

C'est une technique destinée à révéler la présence de fissures en surface de pièces planes ou quasi-planes, [5]. Elle consiste à badigeonner la cible avec un liquide fluorescent, qui pénètre dans les fissures. Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et en réagissant avec le liquide restant dans les fissures, va les révéler. Le ressuage présente des avantages et des inconvénients :

### **a) Avantages**

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

### **b) Inconvénients :**

- Il est nécessaire de faire un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection;
- L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation (ex: centrale nucléaire où cette technique va être complètement abandonnée pour des raisons de normes de dépollution). [6].
- Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammable.

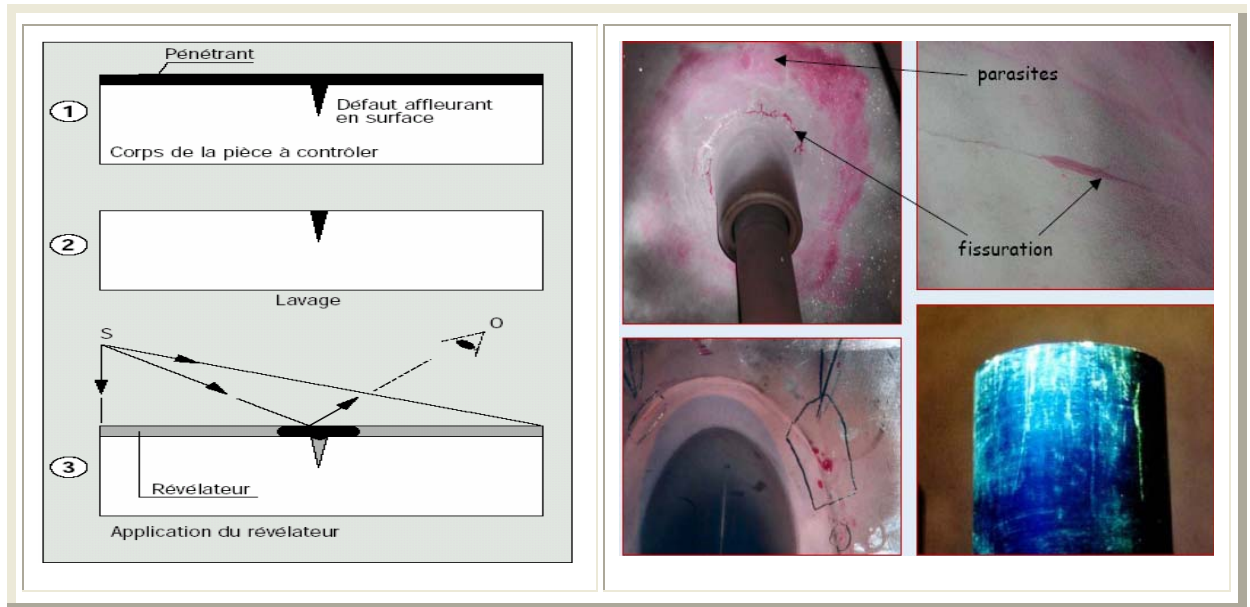


Figure 1.3 Examen par ressuage, [6].

### c) Domaine d'application

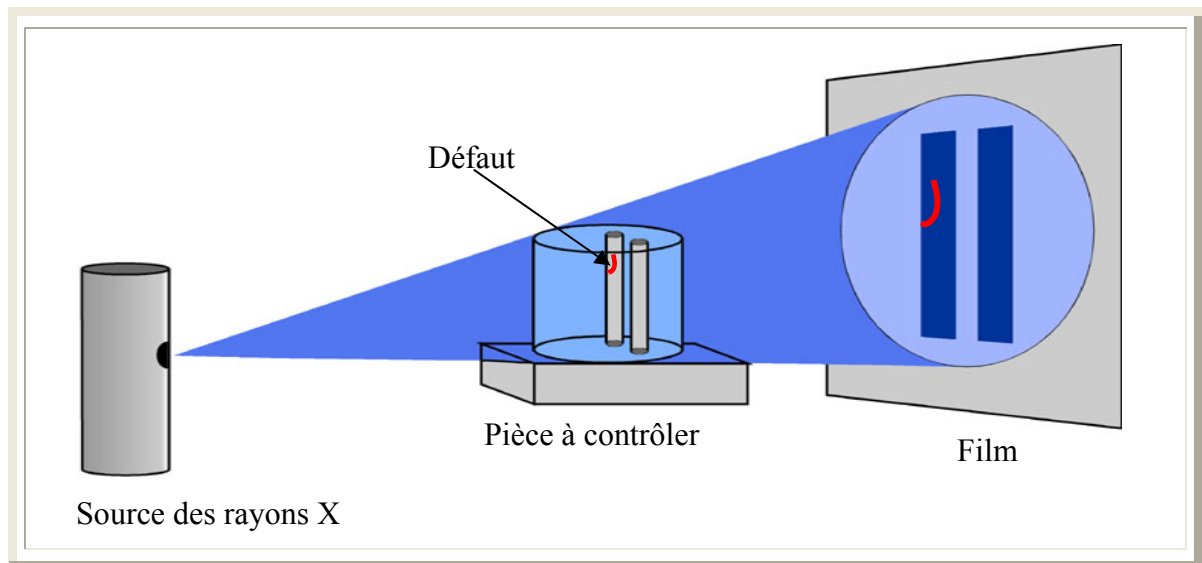
Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant, [3].

A titre indicatif, sa sensibilité est très bonne, puisqu'on peut estimer et obtenir une détection fiable de défauts de 80  $\mu\text{m}$  de largeur pour 200  $\mu\text{m}$  de profondeur pour un ressuage coloré pratiqué en atelier sur une surface usinée, alors que le ressuage fluorescent conduit dans les mêmes conditions à une limite de détection de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  en largeur pour 20 à 30  $\mu\text{m}$  en profondeur, [3].

### 1.2.3 Radiographie

La radiographie est une technique basée sur le bombardement d'un corps (un tube, une pièce...) par les rayons X ou  $\gamma$ . Applicable généralement dans le domaine de médecine, mais actuellement elle s'applique dans d'autres domaines (mécanique, électrotechnique, matériaux...); c'est en

effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui de contrôle de maintenance, [6].



**Figure 1.4** Examen par radiographie

**a) Avantages** Les avantages majeurs des techniques radiographiques X et  $\gamma$  sont :

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

**b) Inconvénients**

- toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée;
- la nécessité de mettre en oeuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel.
- le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau;
- la faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films;

**c) Domaine d'application**

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries métallurgiques, [2].

#### 1.2.4 Magnétoscopie

La magnétoscopie consiste à soumettre une zone à contrôler à l'action d'un champ magnétique continu ou alternatif. Les défauts éventuels engendrent un champ de fuite à la surface de la pièce. Ce champ de fuite est matérialisé au moyen d'une poudre ferromagnétique très fine, pulvérisée sur la surface à examiner et attirée au droit du défaut par les forces magnétiques. Il existe de nombreux moyens d'aimantation et de produits (poudre sèche ou en suspension dans un liquide), [6] adapté à :

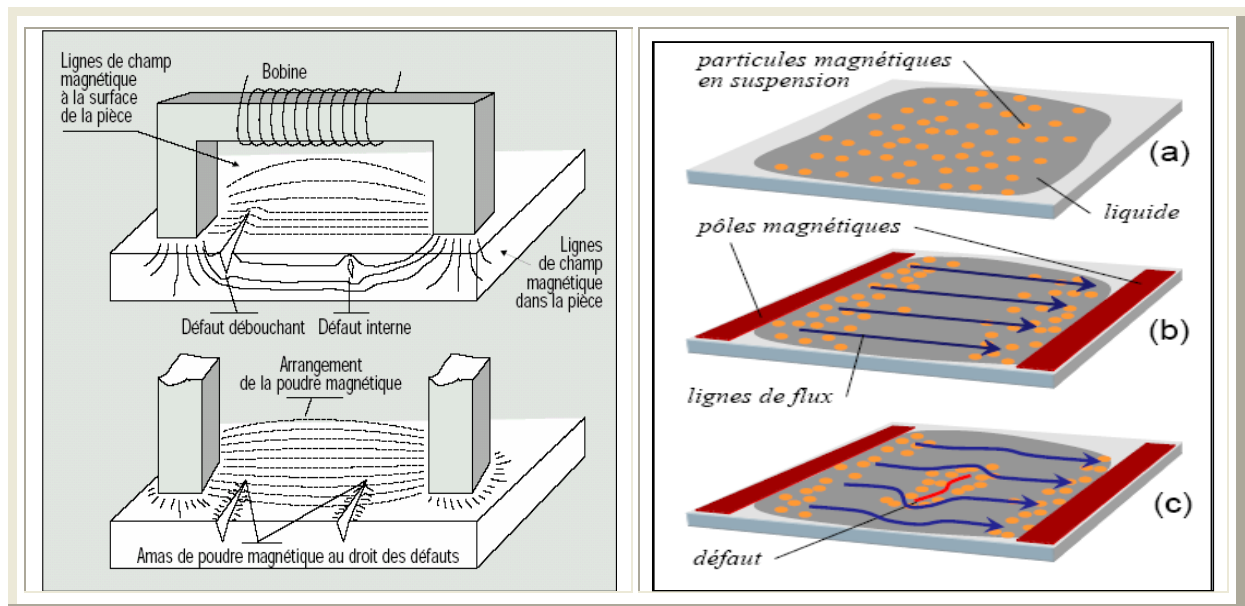
- la forme de la pièce;
- l'orientation de défaut rechercher;
- la méthode est rapide car les phénomènes d'aimantation sont immédiats.

#### a) Avantages

- ▶▶ facilité à mettre en oeuvre manuellement;
- ▶▶ économique;
- ▶▶ résultats quasi immédiats;
- ▶▶ détection des défauts débouchant et des défauts sous-jacents.

#### b) Inconvénients

Cette méthode à champ magnétique continu ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques.



**Figure 1.5** Examen par Magnétoscopie, [4].

#### c) Domaine d'application

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de densité débouchant en surface ou proches de la surface sur des matériaux ferromagnétiques tels que aciers ordinaire au carbone, aciers ferritiques ordinaires et au chrome (13 % de chrome), fontes, nickel, cobalt. Les aciers austénitiques ne sont pas ferromagnétiques. On considère qu'un matériau est ferromagnétique lorsque soumis à un champ continu de 2400 A/m, il présente une induction d'au moins 1 tesla, [4].

La magnétoscopie est utilisée pour le contrôle:

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

### 1.2.5 Ultrasons

L'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut, [3]. Cette méthode représente des avantages, et des inconvénients :

#### a) Avantages

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

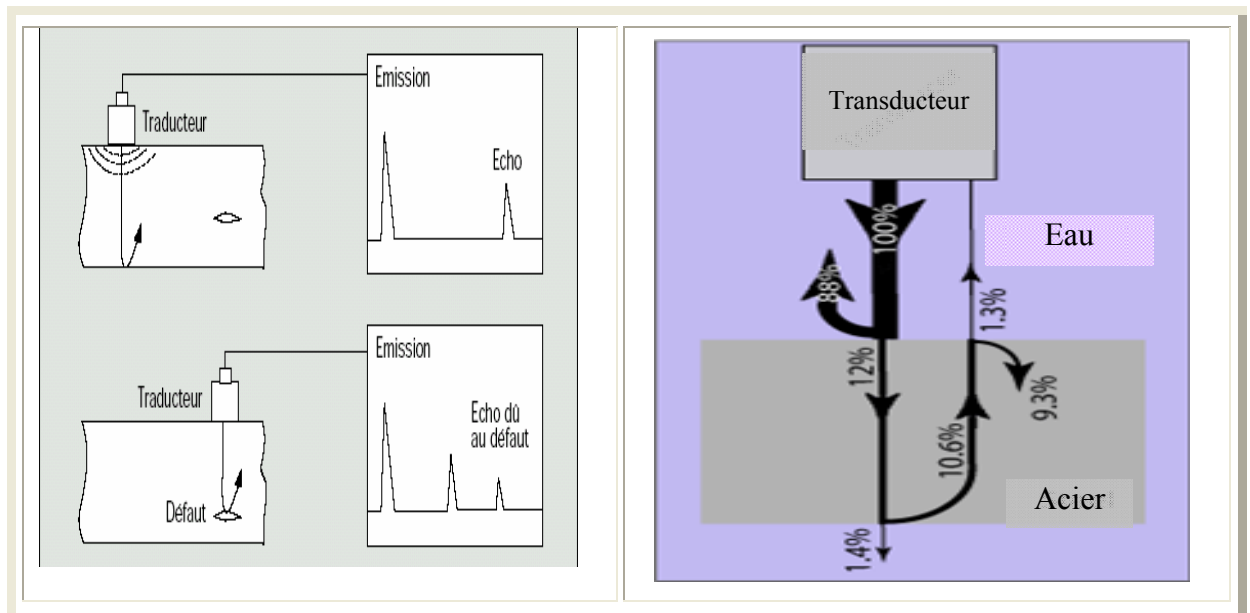


Figure 1.6 Examen par ultrason [4], [6].

#### b) Inconvénients

- pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire;



- méthode impliquant un très haut niveau de technicité;
- sensible à la géométrie (forme, rugosité);
- sensible à la nature et à l'orientation des défauts;
- technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle).

### c) *Domaine d'application*

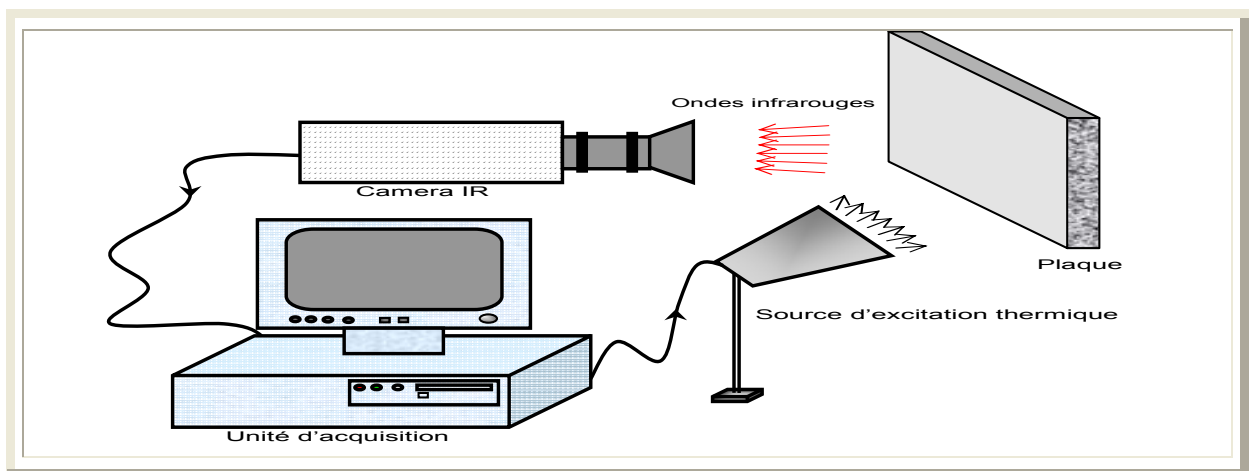
L'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques. Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope.

Les ultrasons sont très employées pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers, ...etc.

### 1.2.6 Thermographie

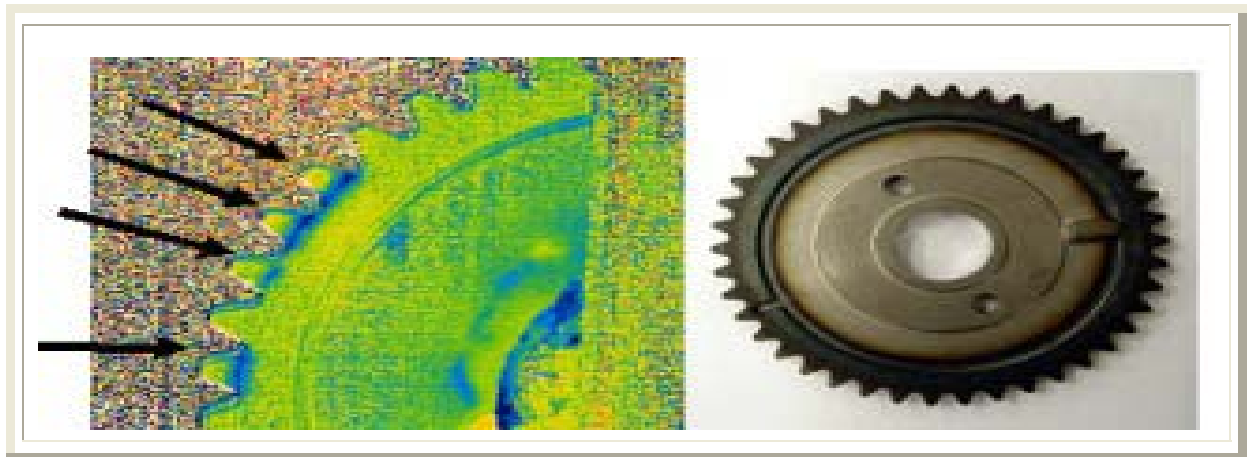
Les méthodes de contrôle thermique consistent à exciter un matériau ou une structure par un apport d'énergie (mécanique, chauffage par induction, air chaud ...). La diffusion de la chaleur dans le matériau et l'impact qu'elle a sur la distribution de la température sur la surface renseignent sur les propriétés thermo physiques des matériaux et sur d'éventuels défauts à l'aide d'une camera infrarouge les résultats d'examen sont implantés sur un PC figure (1.7). Les principaux avantages de l'ensemble de ces techniques résident dans la possibilité d'effectuer un contrôle sans contact et automatisable.

Les inconvénients sont liés à la lenteur du contrôle, au coût de l'investissement et à la difficulté de mise en œuvre des étapes d'inversion pour établir le diagnostic.



**Figure 1.7** Examen par Thermographie





**Figure 1.8** Exemple d'examen par Thermographie

**a) Thermographie pulsionnelle**

Elle consiste à déposer à un instant  $T_0$ , une impulsion spatialement uniforme de chaleur sur la surface de la pièce à contrôler et à observer l'évolution de la température de surface au cours du transfert de chaleur par conduction dans l'épaisseur. La présence d'une discontinuité dans le matériau perturbe le flux thermique ce qui se traduit par un écart de température appelé contraste thermique. La mesure de ce contraste et de l'instant  $T$  pour lequel il est maximum renseigne sur la nature et la profondeur du défaut, [3].

**b) Thermographie modulée:**

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

**c) Méthode surfacique:**

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

### 1.2.7 Courants de Foucault

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

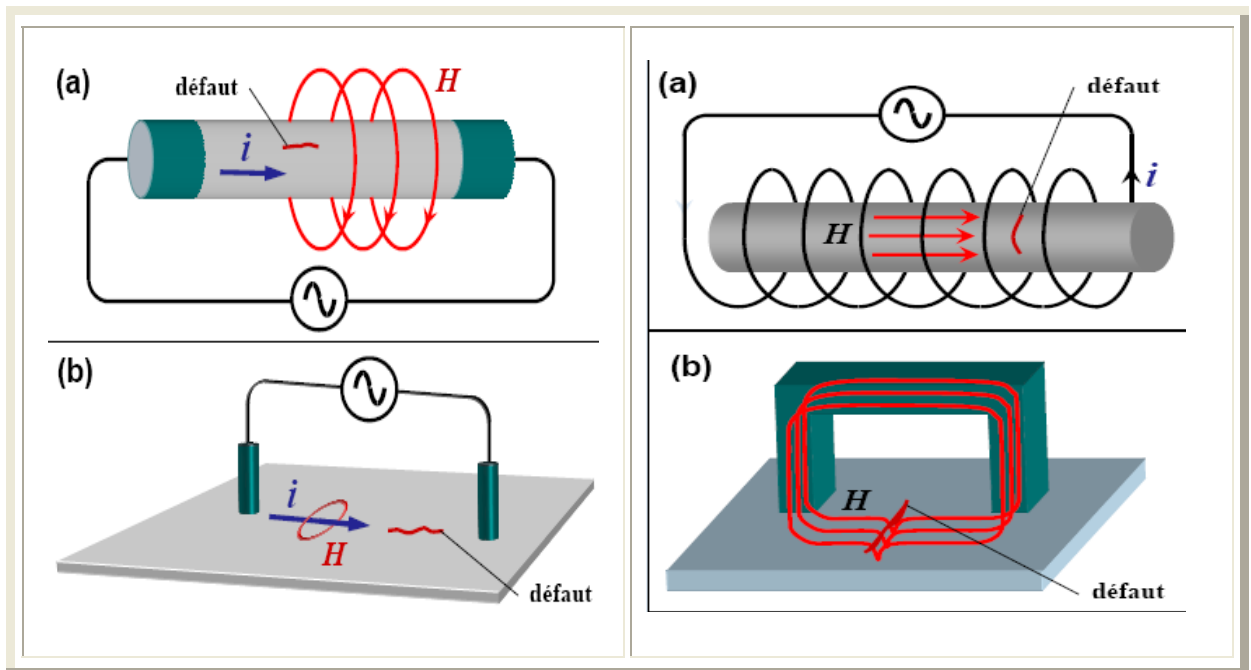
La présence d'un défaut, perturbe la circulation des courants de Foucault, entraînant une variation de l'impédance du solénoïde. La technique est applicable à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Dans l'examen par les courants de Foucault citons deux méthodes :

**a) Méthode directe**

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

**b) Méthode indirecte**

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



**Figure 1.8** Examen par courants de Foucault d'un défaut Transversal (méthode directe)

**Figure 1.9** Examen par courants de Foucault d'un défaut Transversal (méthode indirecte)

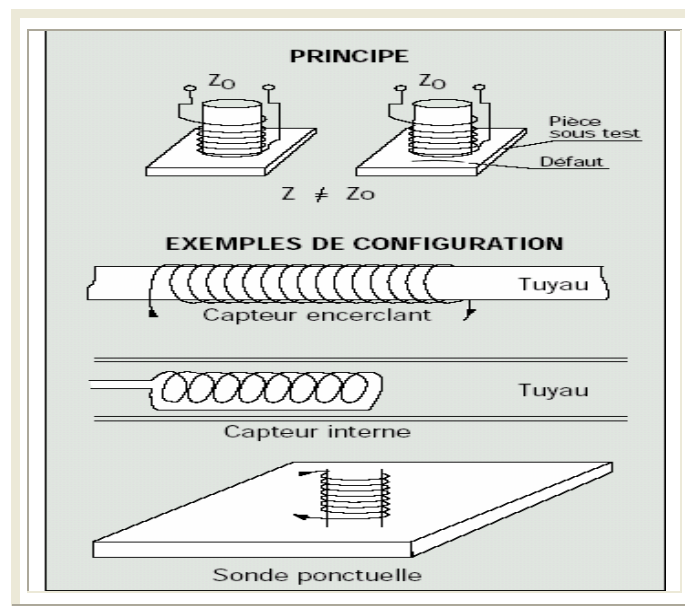
Pour la détection des défauts, on utilise deux types de courants de Foucault dans le C.N.D. :

- Les courants de Foucault basse fréquence (ordre du Hz/kHz).  
Les courants de Foucault basse fréquence permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine. On distingue en général trois types de pièces (tendre, adéquat et dur), [4].
- Les courants de Foucault haute fréquence (50 kHz à 500 kHz).  
Les courants de Foucault à haute fréquence permettent de localiser en surface des bulles d'air dans le métal, en déplaçant une bobine au dessus du défaut. Il faut donc pouvoir mettre la pièce en rotation. Toutefois, il reste possible de créer une sonde rotative que l'on approche de la pièce mais le contrôle est plus complexe à réaliser (à cause de la variation d'entrefer plus importante), [6].

## ★ Domaine d'application

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

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques;
  - Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau;
  - Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...);
  - Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...),
  - Suivi d'installations et de matériels en service;
  - Mesure d'épaisseur de matériaux amagnétiques;
- ✎ Contrôles de soudures ne présentant pas de vagues de solidifications de soudage trop marquées.



**Figure 1.10** Examen par courant de Foucault

*Remarque : les avantages, inconvénients de cette technique seront représentés à la fin de ce mémoire.*

### 1.3 Principes de détection des défauts.

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

#### 1.3.1 Hétérogénéités et défauts

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité, [En fait, détecter un

défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Brièvement les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes, [4].

### 1.3.2 Défauts de surface

Se sont des défauts accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'oeil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

La première catégorie (défauts ponctuels) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques  $\mu\text{m}$ ) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons, [3].

La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques, [5].

### 1.3.3 Défauts internes

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

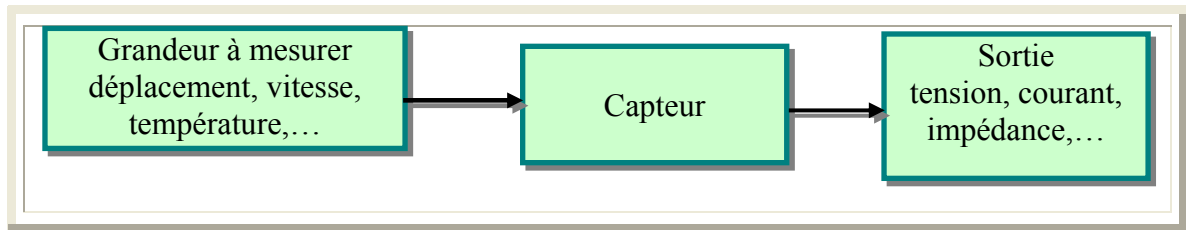
Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger dans le produit emballé.

Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, [1] ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'imagerie infrarouge, ... la majorité des techniques précédemment citées utilisent le capteur comme outil de détection des défauts. Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure.

## 1.4 Définition d'un capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique (information entrante) une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du temps, électrique). Cette grandeur, représentative de la grandeur prélevée, est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

Description : La figure (1.9) donne le principe d'un capteur



**Figure 1.11** Principe d'un capteur

#### 1.4.1 Paramètres du capteur

Comme beaucoup de composants ou ensembles électroniques, il existe un certain nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs. Ils caractérisent les performances et donc leurs utilisations dans un environnement donné, [7].

##### a) Précision :

La précision d'un capteur est caractérisée par l'incertitude absolue obtenue sur la grandeur électrique obtenue à la sortie du capteur. Elle s'exprime en fonction de la grandeur physique mesurée.

##### b) Sensibilité :

Ce paramètre caractérise l'aptitude du capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur à mesurer.

##### c) Étendue de mesure :

Cette caractéristique donne la plage de fonctionnement du capteur pour la grandeur à mesurer. Elle est souvent notée E.M.

##### d) Linéarité :

Un capteur est dit linéaire s'il présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi.

##### e) Fidélité :

Un capteur est dit fidèle si le signal qu'il délivre ne varie pas pour une série de mesures concernant la même valeur de la grandeur d'entrée.

#### 1.4.2 Domaines d'utilisation des capteurs

| <b>MECANIQUE</b>       | <b>ELECTRIQUE</b> | <b>CLIMATIQUE</b>  | <b>DIVERS</b>       |
|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| indication de présence | tension           | température        | rayonnement         |
| déplacement linéaire   | courant           | humidité           | luminosité          |
| déplacement angulaire  | puissance         | vent               | niveau acoustique   |
| vitesse                | fréquence         | pluviométrie       | célérité acoustique |
| accélération           | champ électrique  | ensoleillement     | champ magnétique    |
| force                  | charge            | durée d'insolation | débit               |
| pression               | /                 | durée de pluie     | couleur             |
| couple                 | /                 | /                  | salinité            |

**Tableau 1** Différents domaines d'application des capteurs

### 1.4.3 Critères de choix d'un capteur

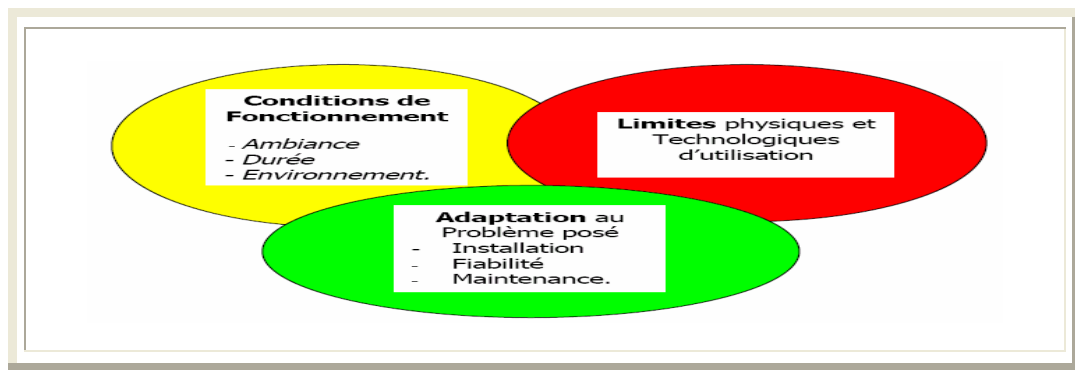


Figure 1.12 Critères de choix d'un capteur

## 1.5 Différents types des capteurs

Avec l'avancement des recherches actuelles dans tous les secteurs industriels, la technologie des capteurs trouve sa place privilégiée, ce qui conduit aux multitudes nouveaux types et séries des capteurs dans ce travail on y intéresser uniquement aux quelques types.

### 1.5.1 Capteurs de distance

Les dispositifs existants sont très nombreux et différentes classifications sont possibles. On peut distinguer les capteurs actifs et passifs, suivant la manière directe ou indirecte de génération de l'information.

D'autre part, la représentation de celle-ci peut se faire sous forme logique (capteur tout ou rien), numérique, ou analogique, ce qui peut être aussi la base d'une classification. Nous préférons présenter les capteurs en fonction de la nature de leur interaction avec les objets étudiés. C'est ainsi que dans la suite, nous étudierons successivement les capteurs avec et sans contact, et les divers principes physiques associés [8].

### 1.5.2 Capteurs résistifs

Un potentiomètre est constitué d'une résistance fixe sur laquelle peut se déplacer un contact électrique : le curseur; Celui-ci est solidaire mécaniquement de l'objet dont on veut traduire le déplacement. La valeur de la résistance entre le curseur et l'une des extrémités du potentiomètre est fonction de: [9].

►◄ La position du curseur, et donc de la position de l'objet mobile étudié;

►◄ Le mode de réalisation de la résistance fixe, constituée soit par un fil bobiné (nickel cuivre, nickel-chrome, ...), soit par une piste conductrice (plastique chargée, métal verre, ...). Les potentiomètres permettent la mesure de déplacements rectilignes ou angulaires. L'étendue de mesure est caractérisée par la course électrique utile, c'est-à-dire, la plage de variation du curseur dans laquelle la résistance est une fonction linéaire du déplacement. La course électrique varie de 10mm à 1m pour les potentiomètres rectilignes classiques. La meilleure résolution est obtenue

avec les potentiomètres à piste conductrice. Elle est de l'ordre de  $0,1 \mu m$ . La simplicité du principe conduit à des capteurs de coût modéré.

### 1.5.3 Capteur à inductance variable

L'élément mobile est un noyau ferromagnétique dont le déplacement peut être mis en évidence par modification du coefficient d'auto-induction d'une bobine. L'association en opposition de deux bobines, dont les coefficients varient en sens contraire, permet de compenser les non linéarités. La course nominale de ce type de capteur peut varier de  $0,5$  à  $300 \text{ mm}$  selon les modèles et les constructeurs, [10,11].

### 1.5.4 Transformateur différentiel

Il est constitué d'un enroulement primaire et de deux enroulements secondaires reliés en opposition, et placés symétriquement par rapport au primaire. Ce dernier est alimenté par une tension sinusoïdale. Le déplacement d'un noyau ferromagnétique modifie le couplage entre le primaire et chacun des deux secondaires, entraînant ainsi une variation de l'amplitude du signal recueilli. Le signal alternatif délivré par le capteur est ensuite démodulé et filtré. La plage de mesure des déplacements rectilignes varie entre  $0,1$  et  $1000 \text{ mm}$  selon les modèles.

Ces capteurs sont avantageux par leur bon fonctionnement en milieux difficiles (huiles, pression, température, ...) et leurs bonnes performances métrologiques, ainsi que leur coût relativement faible, [11].

### 1.5.5 Capteurs magnéto-soniques

L'effet utilisé par ce type de capteur est caractérisé par la déformation de torsion que subit un matériau magnétique quand il est soumis à une variation appropriée du champ magnétique dans lequel il est plongé. L'appareil est constitué par un tube rigide ou flexible dont l'axe est matérialisé par un conducteur électrique. Un champ magnétique local est établi dans le tube par un système d'aimant coulissant à l'extérieur du tube sans le toucher, et solidaire de l'objet qui se déplace. Si on envoie une impulsion électrique dans le conducteur, une impulsion ultrasonore est créée au niveau de l'aimant et se propage dans le tube. En réception un compteur permet d'obtenir la durée de propagation du train d'impulsions, ce qui, connaissant la vitesse de propagation de l'onde, donne la distance à l'objet. Ce principe permet la mesure de grands déplacements (jusqu'à  $8,50m$ ), [11].

### 1.5.6 Capteurs inductifs magnétométriques

Parmi les capteurs magnétométriques utilisant l'induction magnétique, nous avons répertorié trois types de capteurs fonctionnant aux fréquences supérieures à  $10\text{kHz}$  : les boucles sans noyau, les barres fluxmètre et les magnétomètres supraconducteurs. Ces capteurs fournissent un signal électrique dépendant de la fréquence. Ils ont donc une bande passante limitée,[12].

**a) Boucles sans noyau**

Le principe des boucles sans noyau, ou boucles à air, appelées "loop antennas", est l'un des plus simple permettant de détecter un champ magnétique. Pour augmenter la sensibilité de la boucle on peut la réaliser avec plusieurs spires et augmenter sa section. Cette dernière est un paramètre important fixant la gamme de fréquence d'utilisation de la boucle, qui s'étend depuis quelques Hz jusqu'au GHz. pour les fréquences élevées, il est nécessaire de réduire sa taille, car elle se comporte comme un dipôle électrique au-delà d'une certaine fréquence, [12].

Le choix du nombre de spires permet également d'ajuster l'inductance et la capacité de la boucle et de situer sa fréquence de résonance de la bande souhaitée. L'augmentation du nombre de spires augmente la surface effective du capteur du champ magnétique sans modifier la taille.

**b) Barres fluxmètres**

Les barres fluxmètres, "search-coils" sont constituées d'un bobinage réalisé sur un barreau magnétique. Ce dernier est un matériau ferromagnétique présentant une perméabilité initiale  $\mu_i$  nettement supérieur à celle du vide, afin de concentrer les lignes de champ et d'augmenter la sensibilité, [12].

**c) Magnétomètres supraconducteur**

Ces capteurs utilisent des composants supraconducteurs appelés SQUID (superconducting Quantum Interference Device), présentant des propriétés spécifiques lorsque leur température descend en dessous d'une température critique  $T_c$ .

Il existe aujourd'hui deux grandes familles de supraconducteur : ceux dits à basse température critique (LTC) et ceux à haute température critique (HTC), [12].

Les supraconducteurs LTC sont soit des métaux purs, soit des alliages, alors que les supraconducteurs HTC sont pour la plupart des céramiques à base d'oxyde de cuivre (récemment il est apparu des matériaux ne contenant pas de cuivre  $MgB_2$  et des polymères). Un SQUID est formé d'un anneau de matériau supraconducteur diamétralement, sa forme circulaire lui confère une propriété particulière, dans la mesure où le flux magnétique traversant le centre de l'anneau est nécessairement un nombre entier de quantum de flux, [12].

**1.5.7 Les capteurs capacitifs**

Un capteur capacitif est très généralement réalisé avec une électrode plane entourée d'un anneau de garde. L'électrode forme avec la pièce à mesurer un condensateur plan. La détermination de la distance  $d$  entre cette électrode et la surface de la pièce à mesurer est réalisée en mesurant la capacité  $C$  du condensateur. Elles sont liées par l'équation

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (1.1)$$

Avec

- $\varepsilon$  permittivité du diélectrique existant entre le capteur et la pièce à mesurer,
- $S$  surface de l'électrode du capteur.
- $d$  distance à mesurer.



La mesure de la capacité du condensateur est réalisée en injectant un courant alternatif  $i$  et en mesurant la tension  $V$  qui apparaît à ses bornes. Leurs valeurs sont liées par la relation :

$$V = \frac{i}{jC\omega} = \frac{i.d}{j.\omega\varepsilon.S} \quad (1.2)$$

Avec

$\omega$  : pulsation du courant d'alimentation :  $\omega = 2\pi f$ .

Cette tension  $V$  est proportionnelle à la distance  $d$ .

En polarisant un capteur capacitif par l'intermédiaire d'une résistance de grande valeur (100 M $\Omega$ ) il est possible de mesurer les variations de distance à très haute fréquence, [13]: on n'est alors plus limité par la fréquence de la porteuse utilisée. Pendant les variations de distance rapides la charge électrique  $Q$  du condensateur formant le capteur est constante, les variations de tension aux bornes du capteur sont proportionnelles aux variations de distance, mais dans ce cas, l'information de distance absolue n'est pas disponible :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{Q.d}{\varepsilon.S} \quad (1.3)$$

Un capteur capacitif peut aussi être utilisé pour mesurer la position d'une pièce isolante à condition que sa constante diélectrique soit différente de celle de l'air. Le condensateur de mesure n'est plus formé entre le capteur et la pièce mais entre deux électrodes du capteur. La réponse du capteur est fonction de la permittivité relative  $\varepsilon_r$  de la pièce mesurée. Elle n'est plus linéaire, la courbe de variation de la capacité en fonction de la distance se rapprochant d'une hyperbole, [13].

#### **a) Mesure d'épaisseur**

La mesure d'épaisseur de tôle ou de plaque peut être réalisée en utilisant deux capteurs indépendants mais il peut être plus performant et plus économique de placer les électrodes de mesure de part et d'autre de la pièce à mesurer.

#### **b) Domaine d'application**

Les capteurs capacitifs sont principalement utilisés pour mesurer de petites distances (quelques micromètres à 10mm) avec une très petite incertitude de mesure. Il est possible d'obtenir des résolutions inférieures au nanomètre et cela dans des conditions extrêmes de température et de pression. Ils peuvent donc être utilisés pour effectuer des contrôles dimensionnels de haute précision, les contrôles de circularité, la mesure de jeu entre cylindres, d'entrefers.

Ils sont aussi beaucoup utilisés pour le contrôle de lignes d'arbres, de paliers, la mesure d'épaisseur de film d'huile, et le carter de réacteurs à haute température. Et aussi utilisés pour mesurer la pression exercée par le rayonnement solaire sur un satellite, [13].

### **1.5.8 Capteurs d'intensité**

Leur principe repose sur la mesure de l'intensité du signal reçu, qui dépend de l'atténuation due au fait que l'onde soit sphérique, de l'atténuation due au milieu, et des caractéristiques de

rétrodiffusion de la cible. Ces deux inconvénients limitent la portée de ces capteurs et conduisent généralement à les utiliser en capteur tout ou rien, [8].

### 1.5.9 Capteurs à propagation d'ondes

Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore, optique ou hyperfréquence, de forme déterminée et à observer en réception les caractéristiques de l'onde réfléchi par la cible étudiée.

Différentes techniques qui sont employées dans la :

- mesure d'intensité,
- ▶▶ mesure de temps de propagation,
- ▶▶ mesure par triangulation.

### 1.5.10 Capteurs à ultrasons

L'ultrason est une onde acoustique dont la fréquence est trop élevée pour être audible par l'être humain. Il peut dans certaines applications remplacer avantageusement le capteur inductif ou capacitif et il peut détecter des objets jusqu'à plusieurs mètres.

L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier. L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis (1 temps + 2 temps) pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne, [10].

#### a) Différents types

- ▶▶ détection de présence ou de non présence d'objets (tout ou rien).
- ▶▶ évaluation de la distance séparant l'objet du détecteur (système analogique souvent sortie 4 – 20 mA).
- ▶▶ évaluation de la distance séparant l'objet du détecteur (système analogique-numérique sortie sur 8 bits) Permet le traitement par automates programmables et P.C.

#### b) Caractéristiques

- ▶▶ le capteur permet de détecter tout type de matériau sauf les objets absorbant les ondes sonores tel que la ouate, le feutre;
- ▶▶ le signal est transmis grâce à la présence de l'air, il faut donc éviter les courants d'air qui détourneraient le signal de leurs destinations;
- ▶▶ aucun fonctionnement possible dans le vide;
- ▶▶ le signal n'est pas influencé par la poussière et les environnements brumeux;
- ▶▶ il faut éviter de détecter des objets dont l'angle d'inclinaison est trop grand car le signal risque de ne plus revenir, ce qui rendrait toute détection impossible;

### 1.5.11 Capteurs optiques

Ces capteurs reposent sur l'émission et la réception d'un faisceau lumineux: Trois modes d'utilisation se côtoient :

**a) Système barrage :** Émetteur et récepteur sont séparés. Particulièrement adapté pour :

- ▶▶ la détection des matériaux opaques;
- ▶▶ les environnements pollués (pluie, poussière...);
- ▶▶ les longues distances;

**b) Contrainte :**

- ▶▶ détection de matériaux non transparents;
- ▶▶ nécessite un alignement rigoureux;

**c) Système reflex :** Émetteur et récepteur sont dans le même boîtier. L'objet empêche le retour du faisceau lumineux.

Adapté pour :

- les applications où la détection n'est possible que d'un coté;
- les environnements relativement propres;

### 1.5.12 Capteurs de température

De toutes les grandeurs physiques, la température est certainement l'une de celle dont la mesure est la plus fréquente. C'est pourquoi dans le monde de l'industrie sa mesure et son contrôle sont indispensables.

Du nombre important de propriétés de la matière et de phénomène physiques sensible à la température résulte une grande diversité de méthodes de mesures, [8].

Ces capteurs sont constitués d'un élément sensible, isolé électriquement et protégé par une gaine. Ils permettent de mesurer une température dans un but de contrôle (simple visualisation), de régulation de la puissance de systèmes chauffants ou de sécurité.

Ils permettent de mesurer des températures dans des échanges par conduction ou par convection. Les capteurs doivent être choisis soigneusement, notamment lorsqu'ils sont utilisés en tant que composants dans une chaîne de régulation. Il est nécessaire de tenir compte :

- de la sensibilité du capteur suivant l'utilisation souhaitée, la précision de la mesure;
- du milieu d'utilisation, par exemple en cas de chocs thermiques ou mécaniques;
- de l'inertie thermique du capteur, du système de régulation; [7].

### 1.5.13 Capteur d'humidité

Ils sont utilisés pour le contrôle permanent de l'humidité dans l'industrie, l'agroalimentaire, les milieux hospitaliers, les habitations, les pièces frigorifiques ...etc.

Les techniques utilisées par les capteurs d'humidité sont très variées, elles dépendent de la précision de la mesure et du milieu dans lequel on veut mesurer l'humidité. Les principes de détection sont basés sur l'optique (variation du flux réfléchi) la piézoélectricité, le thermique (variation de température), la mécanique (variation de capacité), l'électricité (variation de conductivité). Parmi les nombreux avantages de ce capteur citant, [9].

- ▶▶ Système d'interrogation du capteur en pulsé: faible consommation électrique;

- ▶▶ Pas de saturation du capteur;
- ▶▶ Possibilité de réchauffage du module Peltier en inversant le sens du courant: augmentation de la fréquence de mesure;

#### 1.5.14 Capteurs inductifs

Les capteurs utilisant des méthodes magnétiques sont capables de mesurer la position ou les déplacements de pièces qui sont : soit aimantées, soit ferromagnétiques, soit seulement conductrices.

La mesure d'une distance est réalisée par :

La mesure de l'induction magnétique ou de ses variations, ou la mesure de l'impédance, ou le couplage de bobinages montés sur un circuit magnétique.

La mesure de l'induction magnétique peut être faite à l'aide de :

Détecteurs à effet Hall, de magnétorésistances ou de circuits magnétiques saturables. Pour mesurer les variations de l'induction magnétique, un bobinage monté sur un circuit magnétique peut être utilisé.

Des capteurs inductifs sont réalisés en utilisant un ou deux bobinages alimentés par un courant alternatif. Ils permettent de mesurer la réluctance du circuit magnétique utilisé ou les pertes générées par les courants de Foucault, [13].

##### 1.5.14.1. Capteurs mesurant l'induction magnétique

Ces capteurs sont utilisables pour mesurer les déplacements d'une pièce aimantée ou ferromagnétique.

##### 1.5.14.2. Mesure des déplacements d'une pièce aimantée

La pièce aimantée est souvent constituée d'un barreau ferromagnétique qui présente une forte rémanence. Les matériaux pour les réaliser sont très nombreux:

- ▶▶ Des aciers durs;
- ▶▶ Des ferrites durs;
- ▶▶ Des terres rares, comme les aimants au néodyme fer bore pouvant présenter une rémanence de 1,1 Tesla;

Des capteurs à effet Hall ou des magnétorésistances classiques sont utilisés pour mesurer l'induction magnétique. Différentes configurations de mesure sont possibles en fonction des positions relatives de la pièce aimantée et du capteur :

##### 1.5.14.3. Mesure dans l'axe de l'aimant

L'induction magnétique décroît en fonction de la distance entre le capteur et l'aimant en suivant une loi approximativement hyperbolique [10]. Et change de signe avec la position  $x$  du détecteur par rapport au centre de l'aimant. La loi de variation de l'induction magnétique est fonction de la longueur de l'aimant et de la distance du capteur. Le gradient sera plus important pour un capteur court.

#### 1.5.15 Différentes formes de capteurs inductifs

En fonction de leur utilisation, les capteurs inductifs peuvent prendre des formes différentes pour optimiser l'une ou l'autre de leurs caractéristiques, [11].

#### 1.5.15.1 Capteurs avec ou sans blindage :

Les deux capteurs ont la même étendue de mesure. Le capteur sans blindage a un diamètre plus petit mais il doit être plus éloigné d'un capteur semblable pour éviter leur influence mutuelle. Il ne doit pas être inclus dans une pièce conductrice trop proche de la bobine active. Le capteur avec blindage peut, quant à lui, être inséré dans une pièce conductrice.

#### 1.5.14.2 Capteurs à noyaux demi-tore ou demi-pot

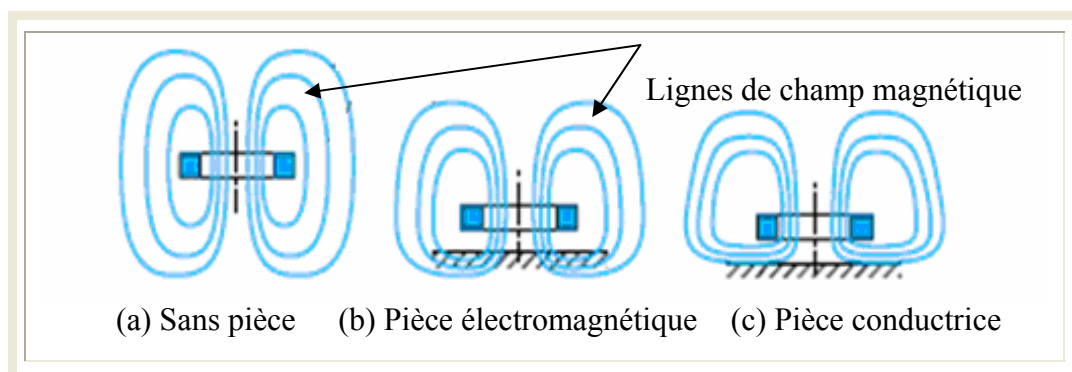
Pour la même étendue de mesure, le capteur inductif dont le noyau est composé d'un demi-tore est deux fois plus petit que celui dont le noyau est composé d'un demi-pot.

À basse fréquence, ces capteurs peuvent mesurer des pièces ferromagnétiques. À haute fréquence, on les utilise pour mesurer des pièces amagnétiques, seulement conductrices.

Si sa largeur est adaptée au pas, le capteur dont le noyau est en forme de bobine peut être utilisé pour contrôler la présence d'un filetage ou son diamètre moyen. Le capteur composé d'un solénoïde placé dans un tube ferromagnétique est assez insensible au centrage du fil s'il est assez long, sa réponse est proportionnelle à la section du fil, c'est-à-dire au carré de son diamètre, [13].

#### 1.5.15.3 Capteur inductif le plus simple

Le plus simple des capteurs inductifs est composé d'une simple bobine (figure 1.13 a). La proximité d'une pièce ferromagnétique favorisera le passage du flux magnétique (figure 1.13 b). En revanche une pièce conductrice s'opposera au flux magnétique par la génération de courants de Foucault (figure 1.13.c). Les lignes de champ sont canalisées par la pièce électromagnétique, la réluctance du circuit magnétique est alors diminuée. Elles sont repoussées par la pièce seulement conductrice, la réluctance est alors augmentée.



**Figure 1.13** Modification des lignes de champ en fonction de la nature de la pièce

## 1.6 Capteurs plus utilisés en CND

Les capteurs les plus utilisés dans le Contrôle non Destructif sont résumés dans le tableau sous dessous:

| Capteurs                                  | Domaines d'utilisation  |
|---|---|
| Capteurs inductifs à courants de Foucault | C'est un capteur de structure simple, de poids léger. Consacré à:<br>Détection de défauts interne ou externe (fissure, corrosion, humidité ....).<br>Basé sur la variation d'impédance.<br>Appliqué aux : Tube de gaz, d'eau, pièce plane, circulaire.... |
| Capteurs à ultrasons                      | Le capteur permet de détecter tout type de matériau sauf les objets absorbant (fissure, défauts interne, surfacique. Dans un tube, cylindrique, torique, une tôle, ...  |
| Capteurs Optiques                         | Structure simple, poids léger, haute précision, travail à haute température utilisé pour détecter les fissures dans les turbo-machnie par exemple.  |
| Capteurs de températures                  | Distribution de la température au niveau d'une pièce sous teste. Appliqué dans la technique de thermographie,   |
| Capteurs capacitifs                       | Structure simple, poids liéégé, durable, la détection est faite à travers son constante diélectrique, utilisé pour la détection des fissures dans les matériaux conducteurs de l'électricité, les, turbos-machines  |

**Tableau 1.2** Capteurs plus utilisés en CND

### 1.7 Conclusion

*Dans ce chapitre on a donné les différentes techniques du contrôle non destructif et leurs domaines d'application, leurs avantages et inconvénients ensuite on a donné un aperçu général*

sur les capteurs utilisés dans l'industrie du contrôle non destructif, Après cette étude on a choisi la technique des courants de Foucault ce choix est fait selon plusieurs critères :

- ▶▶ Technique simple est pas coûteuse, (temps, argent...);
- ▶▶ Nécessite un capteur à courant de Foucault (méthode électromagnétique);
- ▶▶ Réalisation simple (une pièce magnétique, amagnétique, entourée par un bobinage en cuivre);
- ▶▶ L'interprétation des résultats est simple, résultats acceptable (simulation, expérimentation). Une théorie et certaines notions de base sur les capteurs inductifs à courant de Foucault seront le but de notre deuxième chapitre.

## Introduction

*Le système de contrôle par les courants de Foucault c'est développé très rapidement ces dernières années par l'avancement de la technologie apportée aux dispositifs des mesures. Le micro-ordinateur a contribué énormément au développement de la physique des courants de Foucault, car il offre la possibilité de résoudre des problèmes de caractérisation matérielle, de la localisation d'imperfection et pour approfondir la recherche à l'échelle microscopique. Le développement important de l'informatique et du progrès dans leur capacité a influencé la recherche du contrôle par les courants de Foucault, [14].*

*Les capteurs à courants de Foucault (CCF) sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices notamment métalliques. De nos jours, la théorie des capteurs à courants de Foucault est déjà largement développée. Ils trouvent leurs applications dans divers domaines industriels qui vont de la mesure des propriétés de la matière, des mesures dimensionnelles jusqu'à la détection de défauts dans les pièces mécaniques, [15].*

*Dans cette partie, on essayera de donner quelques notions sur les courants de Foucault et le diagramme d'impédance. Ensuite on passera en revue les différents modes de détection, différents types de capteurs à courants de Foucault, différentes géométries des circuits magnétiques et on terminera par la simulation d'un capteur différentiel à courants de Foucault avec son modèle analytique ainsi que les résultats de simulation obtenus.*

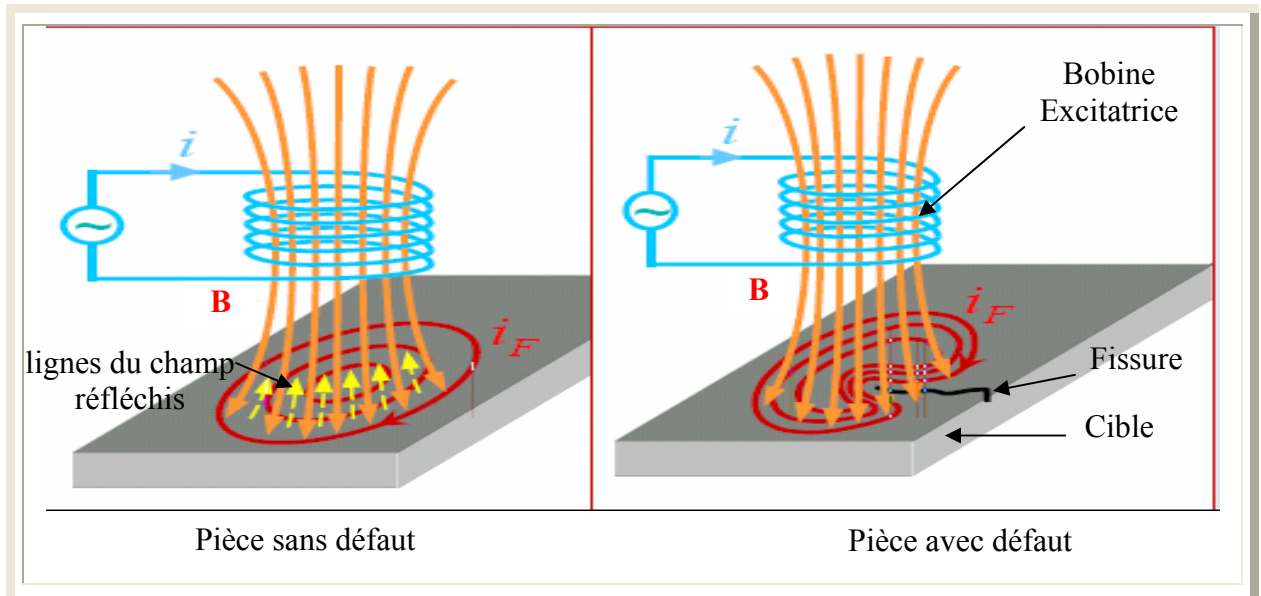
### 2.1 Courants de Foucault

Lorsqu'on soumet un conducteur massif à un champ magnétique d'excitation variant en fonction du temps, il apparaît, dans la masse du conducteur, des courants induits appelés courants de Foucault. Ces courants ont une répartition telle qu'ils créent un champ magnétique s'opposant à la variation du champ d'excitation qui leur a donné naissance, [4]. Leur intensité dépend, entre autres, des caractéristiques physiques (conductivité, perméabilité) et géométriques du conducteur ainsi que de la présence éventuelle de défauts dans celui-ci. On conçoit donc que la mesure de ces courants nous renseignera sur la constitution du conducteur étudié. En réalité, la mesure directe de ces courants est impossible, aussi seront-ils évalués en mesurant indirectement l'impédance électrique d'une bobine. Mieux, cette impédance étant un nombre complexe, la connaissance des composantes réelle et imaginaire permettra de caractériser et de nous renseigner sur l'anomalie, l'indication de la nature, du volume et profondeur.



## 2.2 Principe d'un capteur inductif à courant de Foucault

Un capteur inductif est en principe constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité, sur lequel est bobiné un ou plusieurs enroulements parcourus par un courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et/ou magnétique dans l'entrefer du circuit modifie la répartition des lignes de champs (figure 2.1) et se traduit par une réluctance et l'apparition des pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible.



**Figure 2. 1** Trajectoire des courants de Foucault, [6].

L'effet résultant de l'approche d'une cible peut être mis en évidence, puis analysé en mesurant l'impédance du bobinage d'excitation : l'enroulement primaire assure dans ce cas la double fonction d'alimentation et de mesure. On peut choisir de munir le circuit magnétique d'un second enroulement qui servira uniquement pour la mesure : on parle alors de mesure par trans-impédance ou de capteur à fonctions séparées. La réponse fournie, par un tel capteur, est sur le principe identique à celle d'un capteur à simple enroulement, avec en plus la possibilité d'optimiser de façon distincte l'inducteur et la bobine réceptrice (disposition, nombre de spires ...etc).

Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants surfaciques dénommés courants de Foucault, qui à leur tour génère un champ magnétique réfléchi, s'opposant au champ excitateur (loi de Lenz). La réponse doit être affichée par l'instrument de mesure. On parle dans ce cas de " capteur à courants de Foucault", (Figure 2.2).

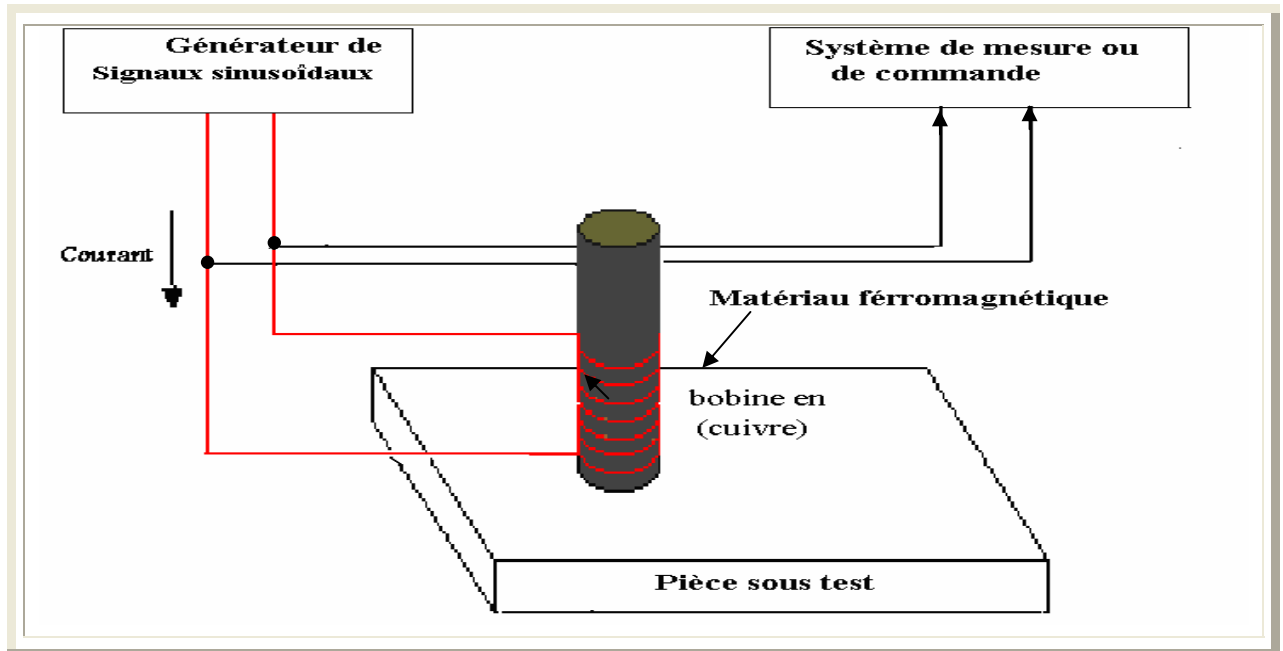


Figure 2. 2 Principe du capteur à courants de Foucault, [14].

## 2.3. Mesure du champ magnétique

### 2.3.1 Moyens du CND

Le signal d'excitation provoque au niveau de la cible des réactions qui peuvent se manifester sous différentes formes. Il en résulte un signal de retour qui peut être de la même nature que l'excitation ou non, [16].

Les moyens du CND sont variés en l'occurrence, Méthode optique, Méthode thermique et Méthode électromagnétique par courants de Foucault... etc.

#### a) Méthode Optique

- On éclaire une cible avec une source de lumière. La cible ne renvoie qu'une partie du spectre de cette lumière, ce ci en fonction de sa couleur. On peut ainsi déterminer la couleur de la cible. Le signal de retour est de la même nature que l'excitation (lumière).

#### b) Méthode Thermique

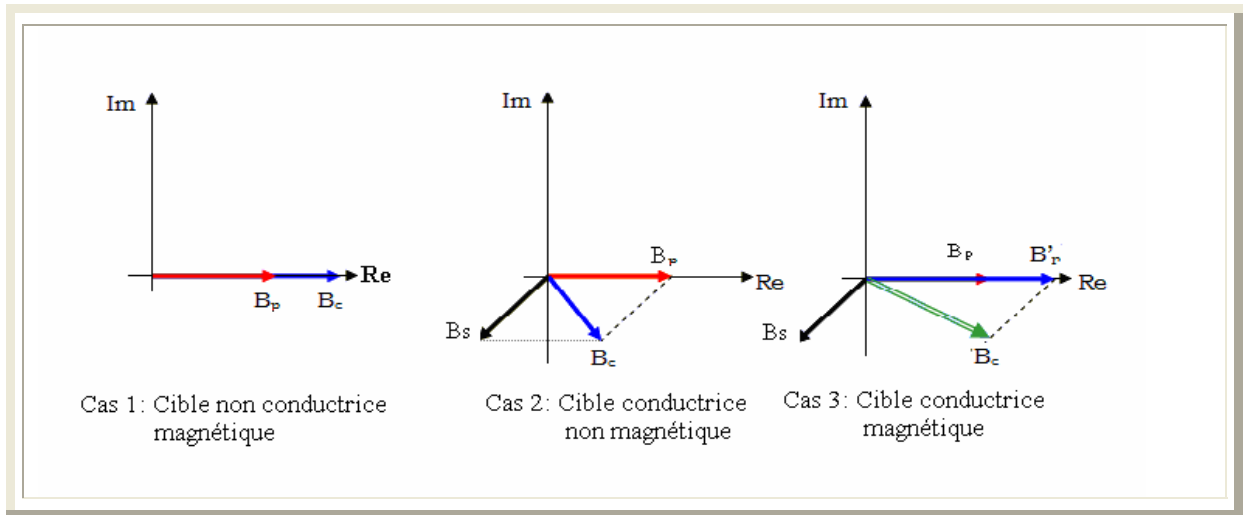
- On applique une impulsion de chaleur sur une cible et on y observe la distribution de la chaleur avec une caméra infrarouge. L'excitation n'est donc pas de la même nature que le signal de retour.

#### c) Méthode électromagnétique par courants de Foucault

- Dans le cas des capteurs à courants de Foucault, on peut mesurer le signal de retour par différentes méthodes :
  - Mesure du champ magnétique à la surface de la cible (directe).
  - Mesure de la variation du courant ou de la tension d'excitation (indirecte).

### 2.3.2 Comportement du champ magnétique par rapport aux caractéristiques de la cible

La nature de la cible à une grande influence sur le comportement du champ magnétique, la figure (2.3) illustre cet effet.



**Figure 2. 3** Comportement du champ magnétique par rapport aux caractéristiques de la cible

Où :

$B_p$  : champ magnétique primaire

$B_s$  : champ magnétique secondaire créé par les courants de Foucault

$B_c$  : champ magnétique composé

*Exemple de cibles :*

Ferrite : cible non conductrice, magnétique

Aluminium, cuivre, ou, laiton : cibles conductrices, non magnétiques (amagnétiques)

### 2.3.3 Contrôle par des courants de Foucault

Le contrôle par des courants de Foucault occupe une place privilégiée parmi les méthodes électromagnétique de CND. Les courants de Foucault sont des courants induits dans le matériau suite à une variation du champ magnétique. Les problèmes où interviennent les courants de Foucault peuvent être séparés en deux catégories, [16].

❖❖ Les problèmes stationnaires, l'inducteur et l'induit sont fixes. L'inducteur est alors alimenté en tension ou en courant variable dans le temps. La variation du champ ainsi créé induit des courants de Foucault.

❖❖ Les problèmes avec déplacement, l'inducteur et l'induit se déplacent l'un par rapport à l'autre. L'inducteur est alimenté en tension ou en courant variable ou continue. C'est le déplacement du champ inducteur qui crée les courants de Foucault.

Le champ résultant varie en module et en phase en fonction de l'épaisseur traversée.

La mesure des courants de Foucault devrait nous donner directement des informations sur les matériaux testés et/ou sur les éventuels défauts présents. Malheureusement cette mesure n'est pas directement accessible à l'expérience. On passe donc par une grandeur annexe qui est la mesure d'impédance, [16].

## 2.4 Plan d'impédance normalisé et paramètres influents

### 2.4.1 Définition

Le diagramme d'impédance est une représentation dans un plan complexe de l'impédance d'enroulement. Les parties réelles et imaginaires de cette impédance sont fonction de différentes variations des paramètres régissant la construction d'une sonde. Les courbes représentant les paramètres influents dans le plan de l'impédance peuvent être normalisées dans une courbe standard appelée le diagramme normalisé d'impédance. Les différents paramètres influençant l'impédance d'enroulement sont la conductivité électrique, la fréquence, la perméabilité, l'épaisseur et la présence d'imperfections, [14].

### 2.4.2 Principe et approche du problème

Les sondes de contrôle par courants de Foucault sont toujours des bobines de formes variées, uniques ou multiples, éventuellement couplées, caractérisées électriquement par une résistance  $R$  et une réactance  $X = L \omega$  se combinant en une impédance  $Z$ , le point de fonctionnement de la bobine peut être ainsi illustré par l'extrémité du vecteur  $\vec{Z}$  dans le plan complexe  $R, X$ .

Il est utile, pour définir les conditions d'un contrôle, de connaître l'influence des différents paramètres mis en jeu sur l'impédance  $Z$ , [2]. Le capteur à courants de Foucault élémentaire se compose seulement d'un bobinage à air de  $N$  spires parcourues par un courant alternatif  $i_{exc}$ , [17]. Pour caractériser le milieu sondé par le capteur à courants de Foucault, on peut introduire la notion de réluctance ou de perméance complexe si on exprime le rapport entre la différence de potentiel magnétique  $\Delta$  et le flux  $\Phi$  émis par le CCF:

$$\mathfrak{R} = \frac{\Delta}{\Phi} = \frac{1}{P} \quad (2.1)$$

$\Delta$  : étant fixée par les ampères-tours d'excitation :  $\Delta = N i_{exc}$ . On retrouve alors la relation entre l'impédance complexe  $Z$  du CCF et la perméance  $P$ , [14].

$$Z = j \frac{V}{i_{exc}} = j \frac{\omega N^2}{\mathfrak{R}} = j \omega N^2 P \quad (2.2)$$

En l'absence de la cible,  $Z$  possède une composante résistive  $R_0$ . Pour s'affranchir de  $R_0$  et la croissance des termes avec la fréquence, on préfère souvent travailler avec l'impédance normalisée  $Z_n$ , [15, 16, 17].

$$Z_n = \frac{R_c - R_0}{X_0} + j \frac{X_c}{X_0} = R_{cn} + jX_{cn} \quad (2.3)$$

Où  $X_0$  est la composante réactive (partie imaginaire) de  $Z$  en l'absence de la cible.  $Z_n$  est fonction de plusieurs paramètres, [4].

### 2.4.3 Paramètres influents l'impédance

Les principaux paramètres à prendre en compte pour un contrôle peuvent se répartir en pratique en trois catégories.

#### a) Paramètres liés au matériau à sonder

Outre ceux liés à sa forme géométrique (diamètre), ce sont sa conductivité électrique  $\sigma$  et sa perméabilité magnétique  $\mu$  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 entraînant un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde, [18].

#### b) Paramètres liés au montage

Qui gouvernent le *couplage* entre la bobine et le matériau: il s'agit soit du *coefficient de couplage* pour les bobines encerclantes, rapport entre la section de la barre et celle de la bobine ; soit du *lift-off*, terme désignant universellement la distance entre une sonde plate et la surface de la pièce, [17].

#### c) Paramètres électriques

C'est essentiellement *la fréquence* d'excitation de la bobine, paramètre dont on est maître et qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat eu égard en particulier à la profondeur des défauts, et d'un point de fonctionnement sur le diagramme complexe permettant une bonne discrimination des différents paramètres perturbateurs de l'impédance  $Z$ , [2].

#### d) Effet de peau

L'amortissement des courants de Foucault 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, [4].

$$\delta = \frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \quad (2.4)$$

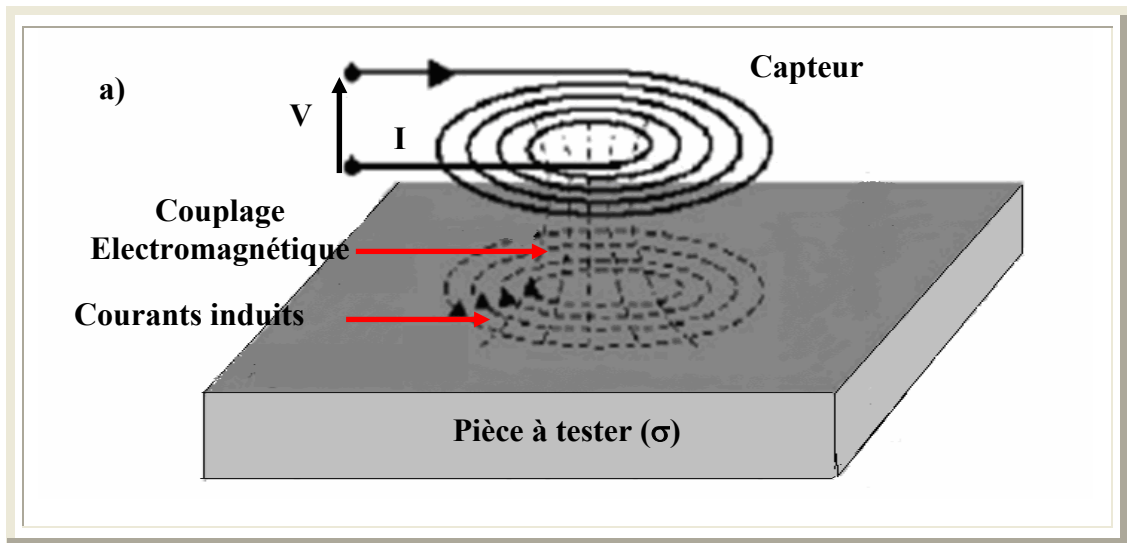
Avec:

- $f$ : Fréquence d'excitation;
- $\mu$ : Perméabilité magnétique;
- $\sigma$ : Conductivité électrique de la cible.

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

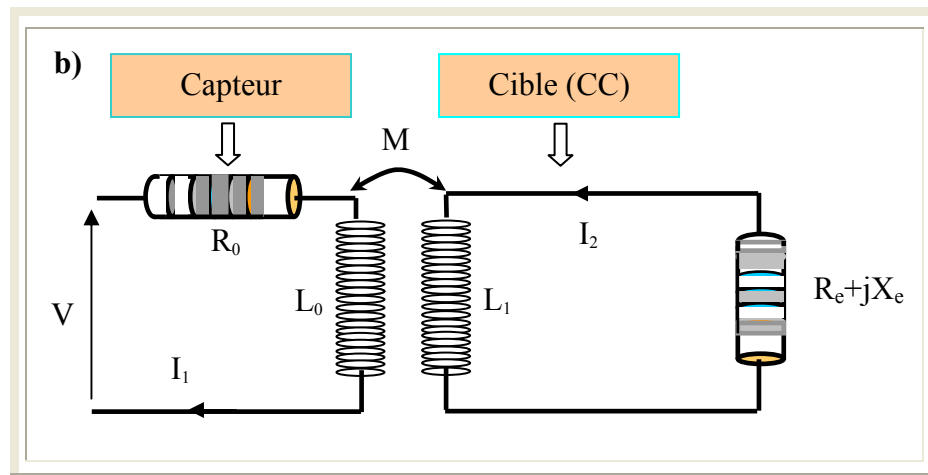
## 2.5 Analogie avec le transformateur

La figure 2.4 (a) illustre le modèle réel du contrôle non destructif, il s'agit d'un capteur à bobine unique (absolue) et une pièce conductrice.



a. Modèle réel [18].

L'interaction physique entre le capteur et la pièce peut être représentée électriquement par un circuit équivalent d'un transformateur, [18]. Cependant il reste une différence importante : le circuit secondaire (cible) n'est pas de forme constante. La cible étant massive, la distribution des courants de Foucault dépend de plusieurs facteurs, figure 2.4 (b).



b. Circuit équivalent du transformateur

**Figure 2. 4** Représentation de circuit de CND et son équivalence

L'impédance de la cible ( $Z_2 = R_e + jX_e$ ) est une impédance perçue indirectement aux bornes de la sonde dépend de nombreux paramètres, notamment de la géométrie de la pièce contrôlée. Le contrôle consiste alors à développer cette relation afin d'être en mesure de repérer la position d'un défaut et de déterminer ses paramètres à partir de la simple mesure de la tension  $V$  et du courant  $I_1$ , [19].

Quant il n'y a pas de cible devant le capteur, le coefficient de couplage  $k$  est nul. L'impédance mesurée est :

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (2.5)$$

Étant donné que la résistance  $R_{cn}$  et l'inductance  $X_{cn}$  pour les capteurs usuelles sont définis par, [15].

$$R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0} \quad (2.6)$$

Et

$$X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} \quad (2.7)$$

À la présence de la cible conductrice cette impédance devient, [15].

$$Z_c = R_0 + jL_0\omega + \frac{k^2 L_0 L_1 \omega^2 R_e}{R_e^2 + j(L_1\omega + X_e)^2} \quad (2.8)$$

$R_e$  : Proportionnel  $\frac{1}{\sigma}$ .

$X_e$  : L'inductance de fuite du circuit.

On obtient:

$$R_{cn} = \frac{k^2 L_1 \omega R_e}{R_e^2 + (L_1 \omega + X_e)^2} \quad (2.9)$$

Et

$$X_{cn} = 1 - \frac{k^2 L_1 \omega (L_1 \omega + X_e)}{R_e^2 + (L_1 \omega + X_e)^2} \quad (2.10)$$

Si le rapport  $\frac{X_e}{R_e} = \text{constant}$  pour une distance donnée on obtient [15] :

$$\left[ R_{cn} + \frac{k^2 X_e}{2R_e} \right]^2 + \left[ X_{cn} - 1 + \frac{k^2}{2} \right]^2 = \frac{k^4}{4} \left[ \frac{X_e^2}{R_e^2} + 1 \right]^2 \quad (2.11)$$

L'équation (2.11) est une équation d'un cercle. Pour vérifier toutes ces considérations nous avons effectué des simulations à l'aide de logiciel Matlab, comme l'impédance est fonction de plusieurs paramètres  $Z = \theta(k, \sigma, \mu, d, f)$ , en variant l'un de ces paramètres et en faisant les autres fixes, on arrivera à avoir une famille de courbes circulaire implantée sur le diagramme d'impédance normalisé.

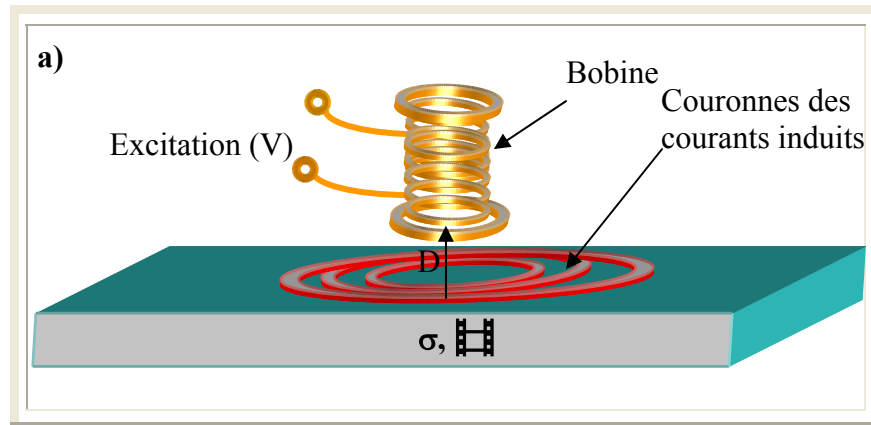
L'inductance  $X_{cn}$  en fonction de la résistance  $R_{cn}$  est défini par :

$$X_{cn} = 1 - \frac{L_1 \omega + X_e}{R_e} R_{cn} \quad (2.12)$$

### 2.5.1 Effet de la conductivité

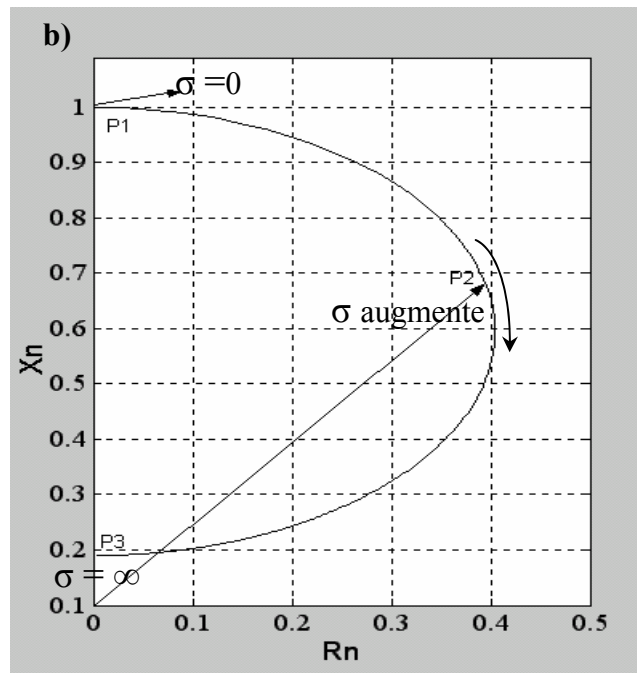
La figure 2.5 (a) montre un enroulement d'essai de courants de Foucault localisé à la distance  $D$  au-dessus d'un matériau conducteur. L'enroulement est considéré comme un enroulement "idéal"

sans pertes résistives. L'impédance de l'enroulement dans le plan complexe est illustrée sur la figure 2.5 (b). Cette impédance est fonction de la conductivité du matériau à la distance "D". Si le matériau est un isolant, sa résistivité serait infinie. La réactance de l'enroulement demeure sans changement au point "P<sub>1</sub>". Cependant, si le matériau est un conducteur, les pertes par courants de Foucault se produiront, l'enroulement détecte ce changement par des augmentations des pertes résistives avec une diminution simultanée de la réactance, et le point de fonctionnement du système se déplacera au point "P<sub>2</sub>". Figure 2.5 (b).



a. Montage d'une bobine en regard d'une pièce conductrice

Quand la conductivité du matériau tend vers l'infini (un supraconducteur), les pertes résistives deviennent presque nulles, d'où le déplacement du point de fonctionnement au point "P<sub>3</sub>", (forte diminution de la réactance).



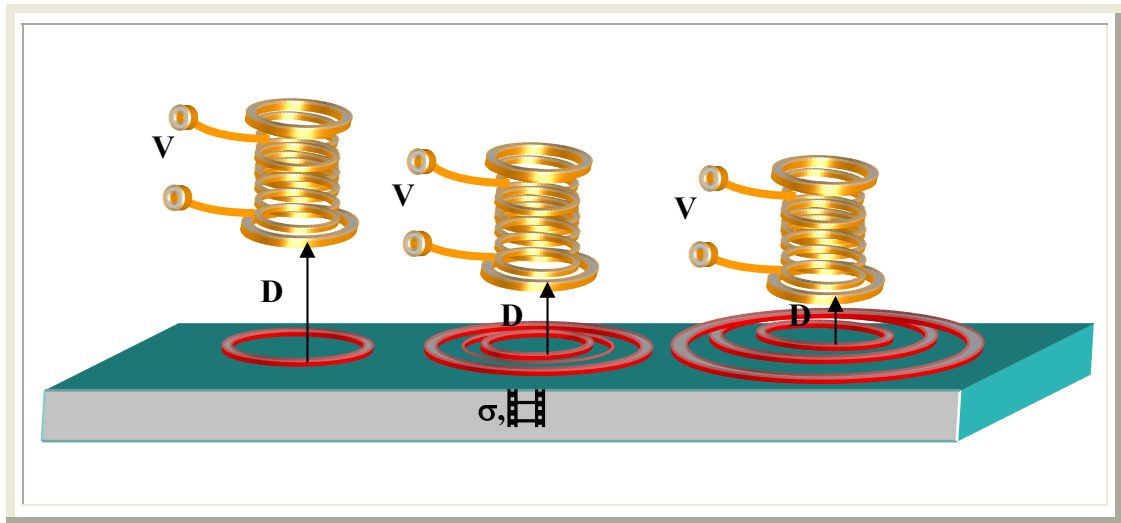
b. Représentation de l'enroulement dans le plan complexe  
**Figure 2. 5** Influence de la conductivité sur l'enroulement d'impédance



On peut conclure que la conductivité d'un matériau à un grand effet sur l'impédance d'enroulement. Cette dernière dépend de la somme de vecteur de la réactance inductive et de la résistance de l'enroulement, [20].

### 2.5.2 Effet de la distance capteur/cible (lift off)

La figure 2.6 illustre les différentes positions de la bobine par rapport à la pièce. Pour des grandes distances capteur/cible le champ n'atteint pas la surface du matériau et n'induit pas des courants de Foucault. Dans ce cas, l'impédance de l'enroulement demeure indépendante de toutes variations de conductivité.

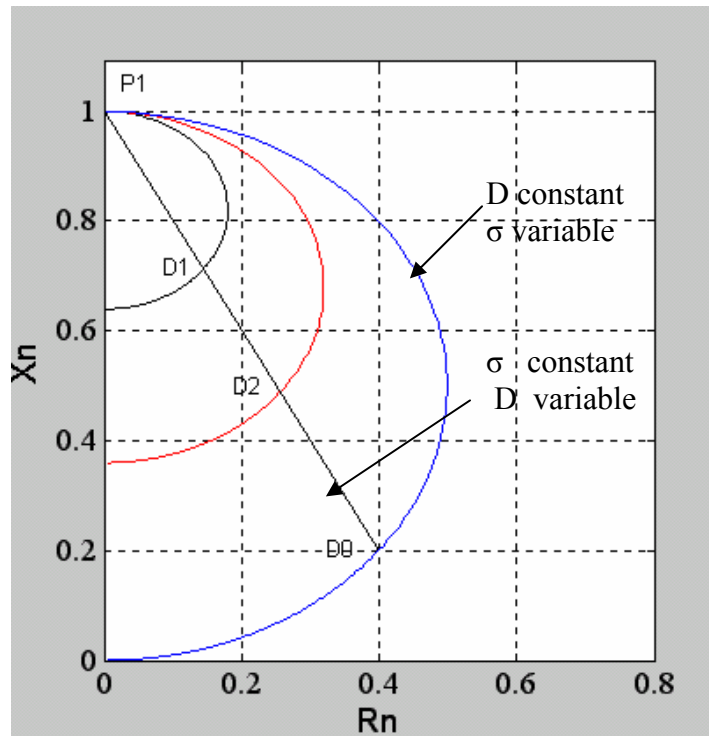


**Figure 2. 6** Différentes positions de la bobine par rapport à la cible

Cependant, comme l'enroulement s'approche progressivement de la surface, des courants de Foucault plus forts sont induits dans le matériau, ce qui se traduit par l'obtention de la famille des courbes dans le plan d'impédance figure 2.7. Si  $D$  est maintenue constante et la conductivité variable, une courbe circulaire s'aligne vers zéro est produite, [20].

Si la conductivité du matériau est maintenue constante et " $D$ " variable, la ligne droite du point " $P_1$ " à " $D_0$ " est générée en essayant de mesurer les variations de la conductivité, les changements de l'espace ou le décollage sont fortement indésirables.

Cependant, puisque l'effet de décollage est linéaire sur une gamme limitée de dégagement de sonde, des sondes de courant de Foucault peuvent être conçues pour mesurer les matériaux uniformément. L'impédance d'enroulement peut être calculée pour n'importe quelle combinaison connue du dégagement et la conductivité.



**Figure 2. 7** Influence du coefficient de couplage « lift off » sur l'enroulement d'impédance

### 2.5.3 Influence de la fréquence sur l'impédance du capteur

Nous savons que la réactance et l'impédance conductrices de l'enroulement sont affectées par la fréquence d'enroulement d'essai selon l'équation (2. 13), [2]:

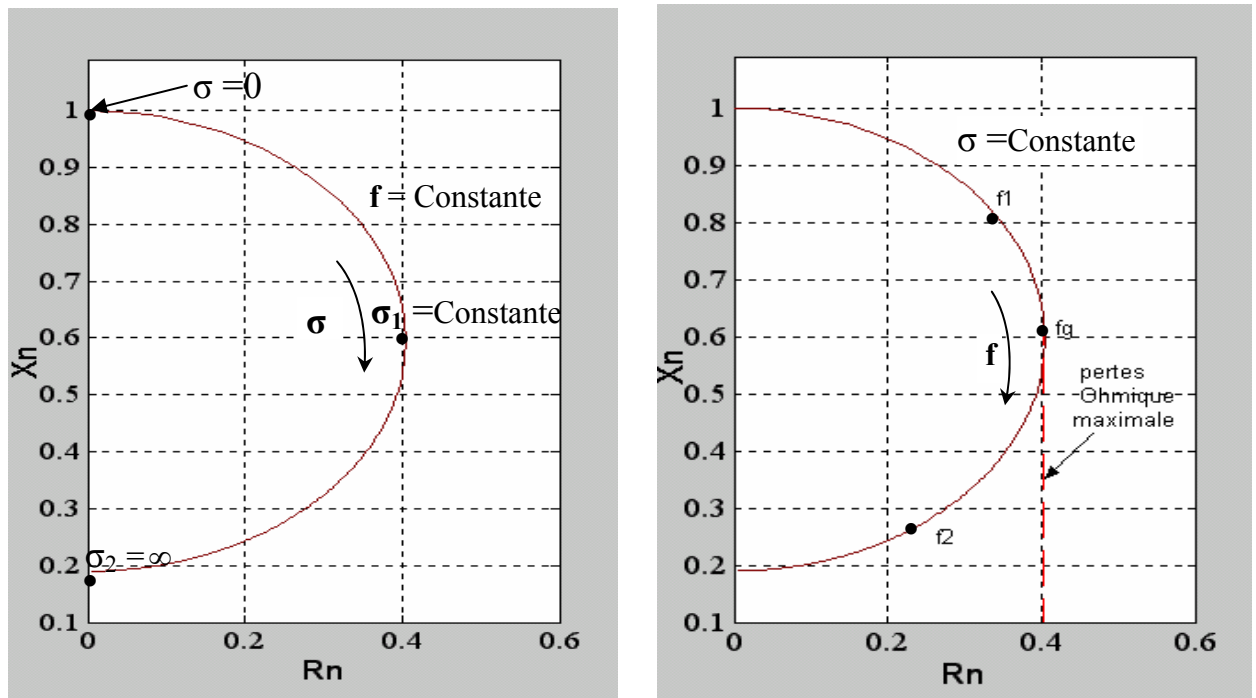
$$X_L + 2\pi fL \quad (2. 13)$$

La relation (2.13) montre que l'inductance et la fréquence affectent directement l'impédance d'enroulement. Ainsi, la conductivité et la fréquence ont exactement le même effet sur l'impédance d'enroulement.

La figure (2,8 (a)) montre l'effet de la fréquence à  $\sigma$  constante et variable et vice versa. Supposant que la conductivité du matériau est constante, on peut choisir une fréquence d'enroulement d'essai qui créera un point favorable de fonctionnement pour détecter des fissures tout en différenciant contre des indications non pertinentes.

La fréquence "fg" est la fréquence limite ou le point des accroissements plus ultérieurs de la fréquence n'augmentera pas les pertes résistive dans le matériau à tester, figure (2.8 (b)).

Quand la conductivité est connue, la fréquence optimale de fonctionnement d'enroulement d'essai peut être calculée ou déterminée expérimentalement, [20].



a Effet de la conductivité sur Z

b Effet de la fréquence sur Z

Figure 2. 8 Illustration de l'effet de la conductivité et de la fréquence sur l'impédance

La fréquence limite (point où les pertes résistives du matériau sont plus grandes) peut être calculé précisément par l'équation (2.14), [2, 20].

$$f_g = \frac{5056}{\sigma \cdot \mu \cdot \omega \cdot d} \tag{2.14}$$

### 2. 6 Différentes géométries des bobines à CF

Il existe un grand nombre de façons de mettre en oeuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les montages de base à partir desquels d'autres montages peuvent être envisagés selon la nature du produit à contrôler, [4, 19].

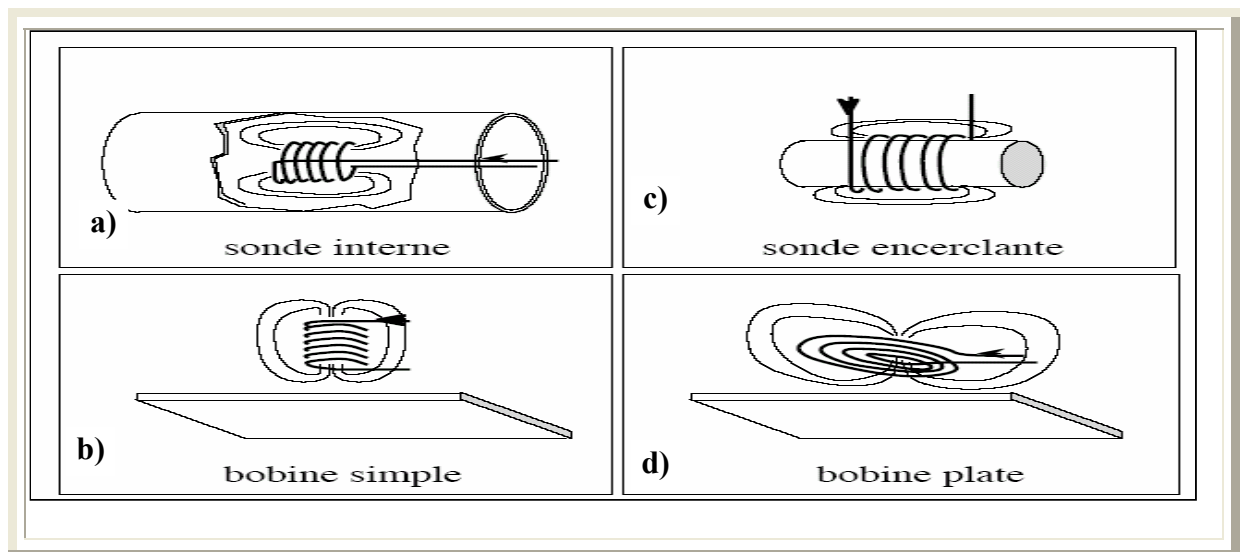


Figure 2. 9 Classification des sondes

### 2.6.1 Bobines internes

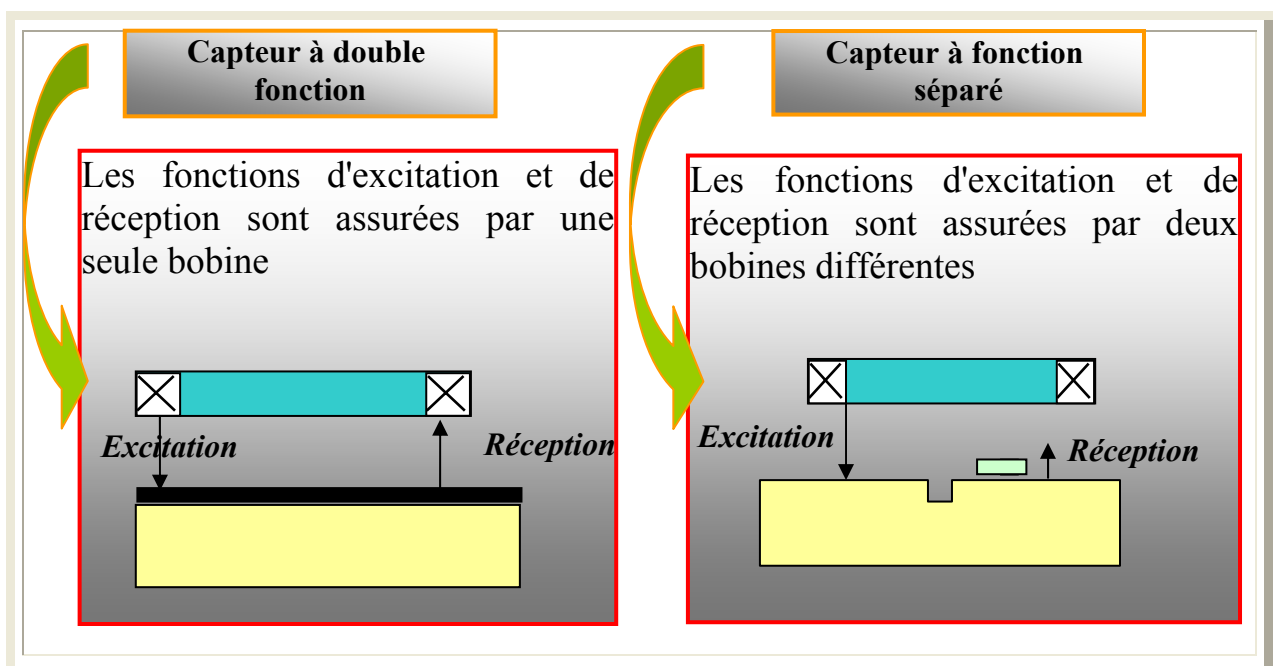
Ces bobines sont destinées à inspecter des objets internes, la figure (2.9 (a)), à titre d'exemple, montre une bobine à l'intérieur d'un tube (d'eau, gazoduc...).

### 2.6.2 Bobines différentielles

Dans de nombreux cas de contrôle, il est très difficile de neutraliser les effets perturbateurs qui brouillent les signaux de défauts, tels que les variations locales de *lift-off* ou de perméabilité magnétique par exemple, [21]. Une solution pour contourner cette difficulté inhérente à l'emploi d'une bobine unique est d'utiliser un capteur constitué de deux bobines identiques placées côte à côte et montées en différentiel électrique, de telle façon que les variations locales de propriétés électromagnétiques aient tendance à affecter les deux sondes et ne créent pas de déséquilibre, alors qu'un défaut unitaire affectera une bobine à la fois et pourra être détecté grâce au double signal de déséquilibre ainsi engendré.

### 2.6.3 Bobine émettrice-réceptrice

Le montage le plus simple figure (2.9 (b)) est celui du capteur à double fonction constitué d'une seule bobine émettrice-réceptrice figure (2.10.(a)), qui crée le flux alternatif grâce au courant qui le parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa tension complexe. Le capteur à fonctions séparées figure (2.10.(b)), à l'inverse, est constitué de deux bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications dues au matériau. Ces bobinages sont moulés dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle induction. Ce montage est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ( $f < 1000$  Hz), [21].



a. Capteur à double fonction

b. Capteur à fonction séparé

Figure 2.10 Exemple de capteurs à double fonction et à fonction séparé

## 2.7 Différentes structures des circuits magnétiques des capteurs à CF

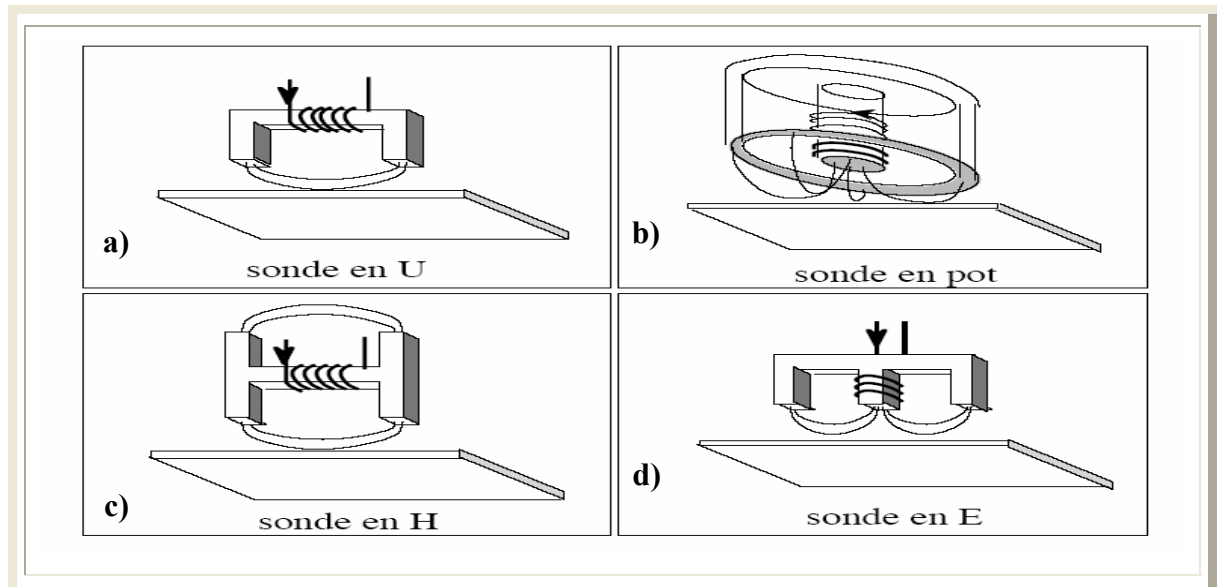
De nombreuses études ont été effectuées dans le monde sur la modélisation analytique des structures des capteurs à courants de Foucault.

La modélisation des structures avec circuit magnétique de forme en U figure (2.11 (a)), est effectivement difficile à cause du nombre d'interfaces entre les différents milieux qui le compose. Pour les capteurs de forme en U entourés par un blindage électromagnétique, la modélisation peut s'effectuer par le biais de la méthode des images électriques où les pôles du capteur sont assimilés à des charges ponctuelles, [15].

Par contre d'autre auteurs ont essayés de modéliser le capteur de forme en pot figure (2.11 (b)), mais leurs modèles sont plutôt complexes et difficilement exploitables. Par ce que ce type de capteur présente des fuites magnétiques importantes.

Dans le cas d'un capteur en forme de "U", la direction des lignes du champ est principalement celle reliant les deux pôles alors que la structure en "pot" ne privilégie aucune direction particulière des lignes du champ, [15]. Les structures en forme "E" ou "H" figure (2.11 (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, [1].

Le choix d'une structure plutôt qu'une autre est étroitement lié à la cible à inspecter et aux types de défauts qu'elle contient, [19].



*Figure 2. 11 Différents géométries du capteur inductif à CF*

### 2.7.1 Capteurs 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/bruit, [21].

### 2.7.2 Capteurs internes

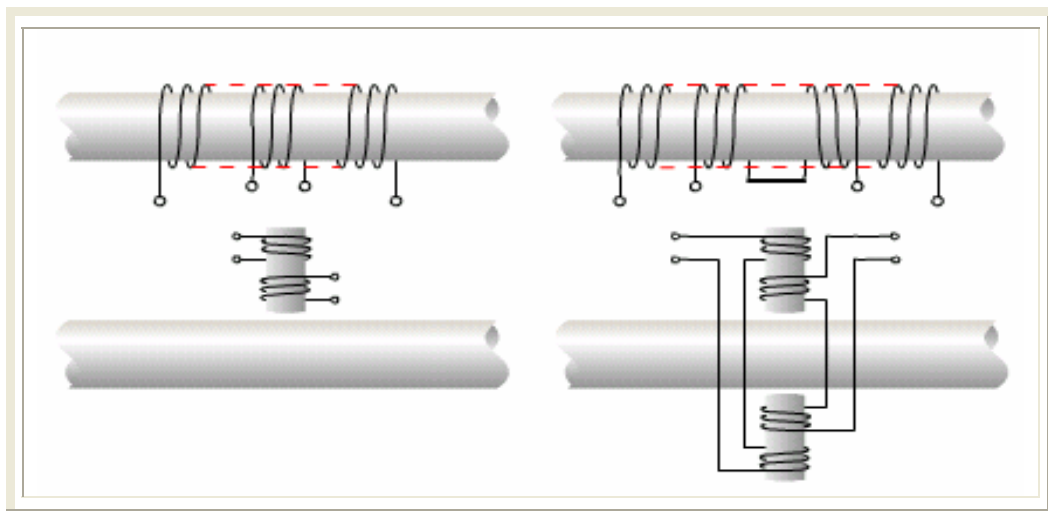
Pour le contrôle des tubes par l'intérieur, pour lesquels les bobines sont aussi moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit, ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire, [22].

### 2.7.3 Capteurs - sondes

Adaptés aux explorations ponctuelles en contrôle manuel ou au balayage de grandes surfaces en contrôle automatique ; ces sondes comportent un ou plusieurs bobinages moulés généralement sur un noyau de ferrite d'axe perpendiculaire à la surface, très perméable aux faibles champs alternatifs et dont le rôle est de permettre d'éloigner les enroulements de la surface à contrôler, tout en gardant une bonne sensibilité ponctuelle de détection des défauts les plus fins, [20].

### 2.7.4 Sondes de réflexion

Les sondes de réflexion ont deux enroulements semblables à une sonde différentielle, mais un enroulement est employé pour exciter les courants de Foucault et l'autre est employé pour sentir des changements du matériel d'essai. L'avantage des sondes de réflexion est que des enroulements de conducteur et de collecte peuvent être séparément optimisés pour leur but prévu. L'enroulement de conducteur peut être fait afin de produire un champ fort et uniforme de flux à proximité de l'enroulement de collecte; tandis que l'enroulement de collecte peut être rendu très petit de sorte qu'il soit sensible aux défauts très petits, [21].



*Figure 2. 12 Schéma de principe de capteur de réflexion*

### 2.7. 5 .Sonde avec noyau de ferrite

Parfois les enroulements sont enroulés autour d'un noyau de ferrite. Puisque la ferrite est ferromagnétique, le flux magnétique produit par l'enroulement est canalisé par la ferrite que par l'air. Par conséquent, le noyau de ferrite concentre le champ magnétique près du centre de la

sonde. Ceci, alternativement, concentre les courants de Foucault près du centre de la sonde. Des sondes avec des noyaux de ferrite tendent à être plus sensibles que les sondes de noyau d'air et à être affectées moins par les oscillations et par le décollage de la sonde, [22].

### 2.7.6 Sonde sans noyau

La sonde à courants de Foucault sans noyau est facile à modéliser mais elle n'est pas très sensible car la distribution dans l'espace de l'énergie émise par le capteur n'est pas optimale, [10]. On peut augmenter la sensibilité du capteur à courants de Foucault en augmentant son diamètre, mais ceci nuit à sa résolution latérale, [21].



*a Bobine sans noyau*

*b Bobine avec noyau*

**Figure 2.13** Exemple de bobines de sondes à CF

### 2.7.7 Capteurs multiples

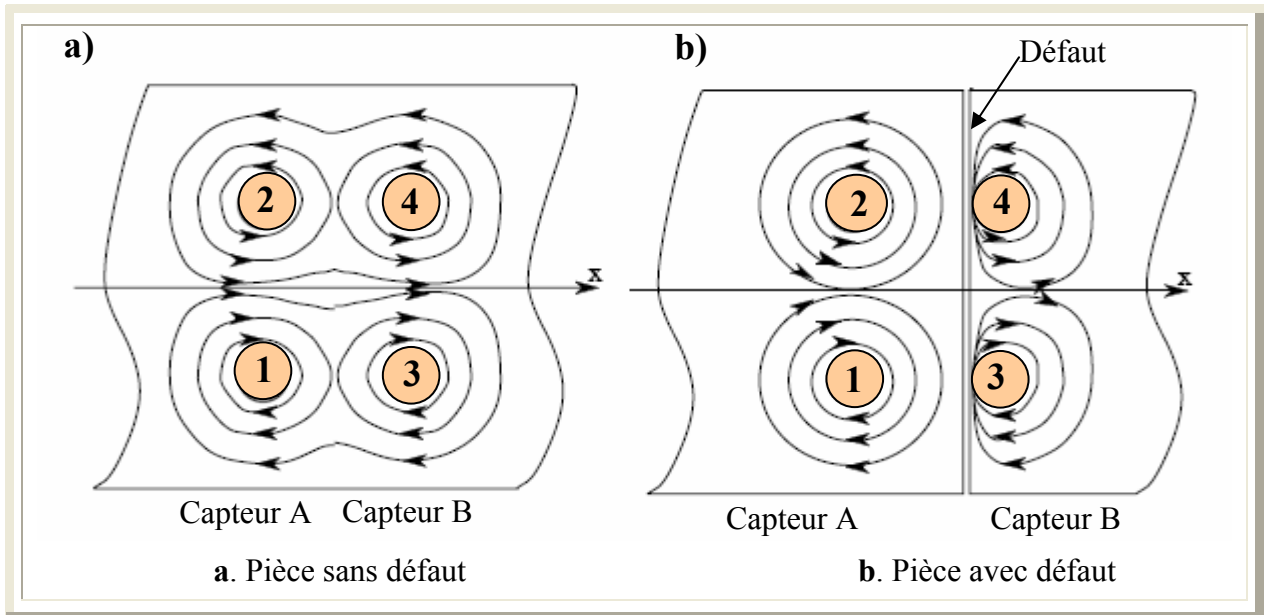
Dans plusieurs applications, la constitution d'un multicapteur est nécessaire pour répondre à certains impératifs :

► Pour les problèmes de CND d'une pièce selon un ou deux axes, la procédure d'inspection effectuée à l'aide d'un capteur unique peut s'avérer trop longue et nécessite l'association en ligne de plusieurs capteurs. En multiplexant les informations issues de chacun deux, il est possible d'accéder plus rapidement aux propriétés de la cible, [1]. Sur ce principe, des multicapteurs permettant la restitution du profil de la cible en utilisant l'information sur les distances séparant chaque capteur du profil, ont été développés.

► Le deuxième problème pour lequel un multicapteur peut apporter une réponse est la détection de défaut de géométrie particulière. L'association en série de plusieurs capteurs judicieusement espacés en fonction de la taille des défauts à détecter permet de recueillir des signaux riches en information. La figure 2.14 (a) illustre la trajectoire des courants induits engendrés par deux capteurs montés en série dans le cas d'une pièce sans défaut, on constate que, lorsque les deux capteurs A et B sont excités en phase (fonctionnement normal), les courants induits sous les plots (1 et 3) tournent dans le même sens, [1]. Il en est de même pour les plots (2) et (4) mais en sens inverse. Quand le capteur B passe sur la fissure, les courants de Foucault sont perturbés comme



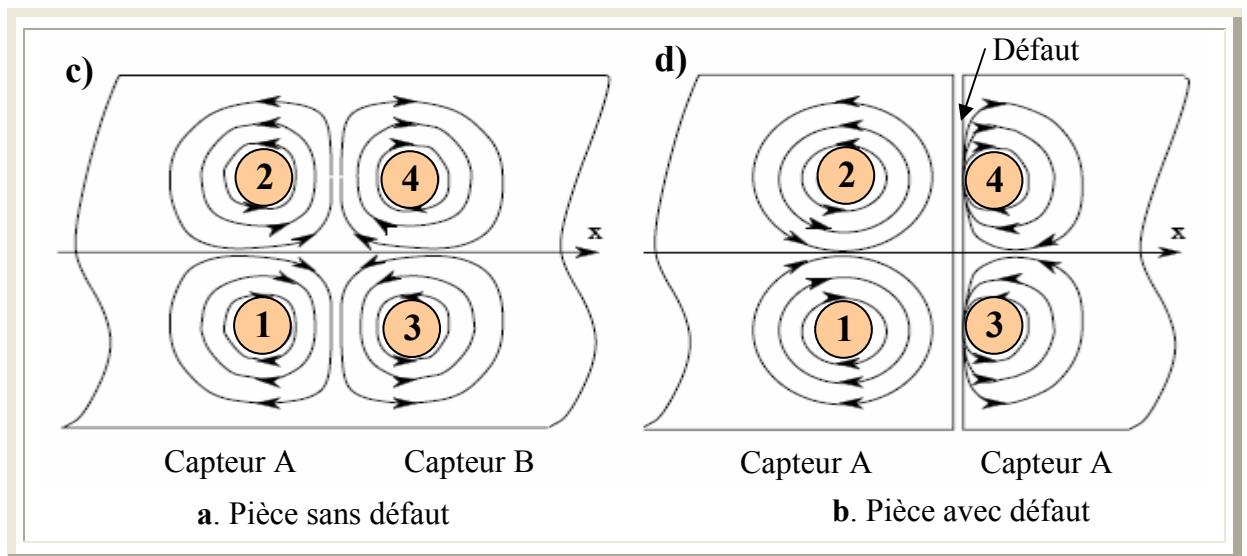
le montre la figure 2.14 (b). Dès que la fissure apparaît sous le capteur B, le capteur A détecte une perturbation du champ réfléchi de même signe que celle observée lorsque la fissure est à l'aplomb du capteur A.



**Figure 2. 14** Trajectoire des courants de Foucault avec champs incidents en phase, [1].

Dans le cas où les deux capteurs sont alimentés en opposition de phase, les courants de Foucault sous chaque plot et dans le cas de l'absence de défaut ont l'allure présentée sur la figure 2.15 (c).

Le moment où le capteur B est à l'aplomb du défaut, la répartition des courants sous les plots (3) et (4) est modifiée (figure 2.15 (d)) permettant aux courants induits par le capteur A de « mieux s'épanouir », [1].



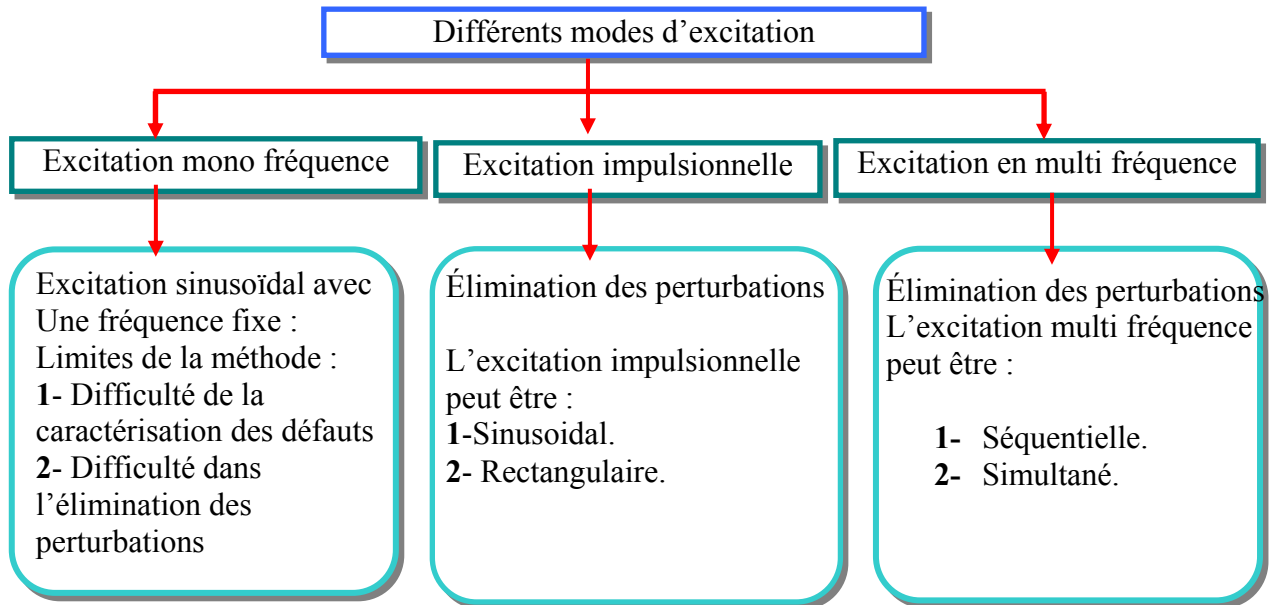
**Figure 2. 15** Trajectoire des courants de Foucault avec champs incidents en opposition de phase



Lorsque la fissure progresse sous le capteur A, celui-ci détecte une perturbation du champ réfléchi de signe opposé à celle qu'il observait lorsque le capteur B était sur la fissure figure (2.15 (d)). Un passage par zéro du signal de détection est obtenu lorsque la fissure se trouve au milieu des deux capteurs, car en théorie une fissure infiniment fine et centrée entre A et B ne perturbe pas les courants, [1].

## 2.8 Différents modes d'excitation

Quelque soit le type de capteur utilisé pour inspecter la santé d'une pièce, il existe pratiquement trois différents modes d'excitation qui sont résumés comme suit :



**Figure 2. 16** Représentation des différents modes d'excitation

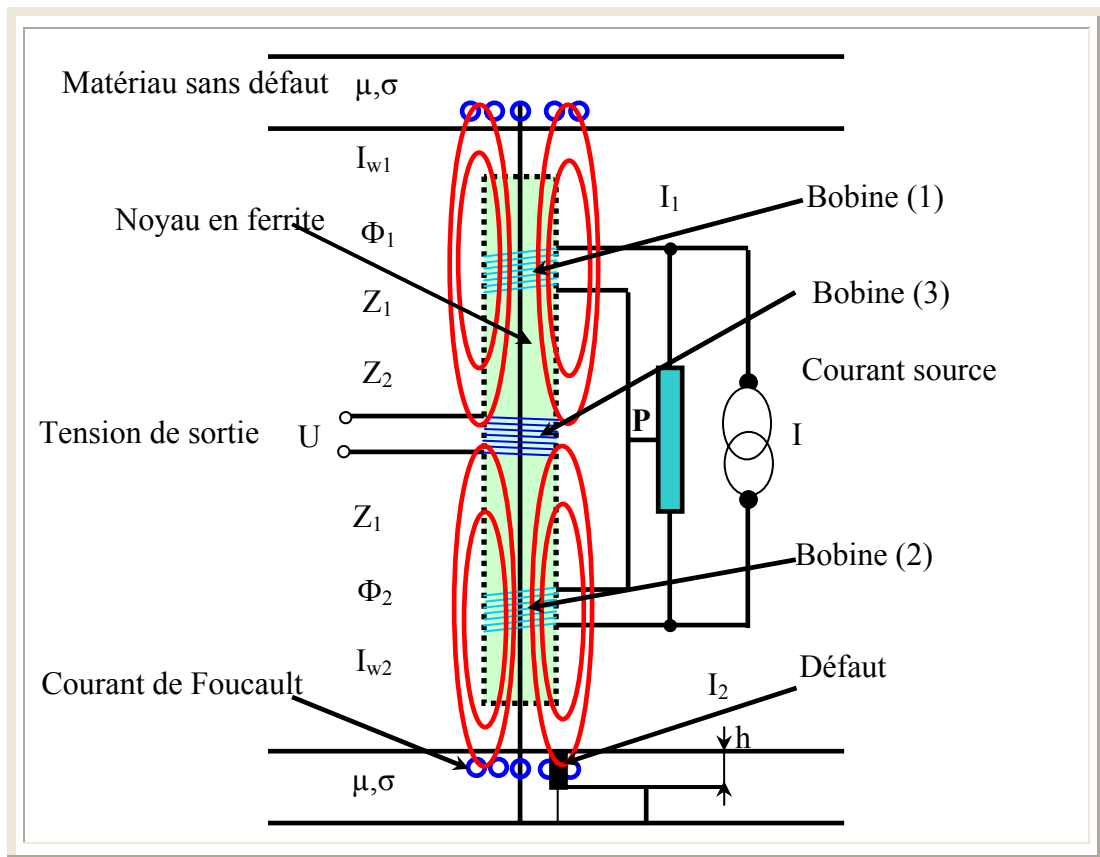
**Remarque:** cette technique de contrôle utilise les courants de Foucault sinusoïdale.

## 2.9 Modélisation analytique d'un capteur différentiel à CF

Dans cette partie on modélisera un capteur à courant de Foucault qui est utilisé dans un domaine bien spécifique, c'est un capteur différentiel son schéma et son principe sont indiqués ci- dessous.

### 2.9.1 Principe et schéma du capteur

Ce capteur est basé sur la différence entre deux flux  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ , il est composé de trois bobines la première bobine destinée à la création du flux  $\Phi_1$ , et la deuxième crée le flux  $\Phi_2$  de sorte que les deux flux sont de sens opposés. Si la différence entre  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  est zéro donc la troisième bobine n'indique rien ce qui conduit à une tension  $U_s$  nulle à la sortie du capteur (absence de défaut), mais si la différence n'est pas nul, la tension  $U_s$  à la sortie du capteur ne sera pas nulle ( $U_s \neq 0$ ) c.à.d (présence d'un défaut).



**Figure 2. 17** Modèle du capteur différentiel

Le modèle simplifié de ce type de capteur est représenté sur la figure (2.17), le circuit électrique équivalent est schématisé sur la figure (2.18), le circuit électrique a été synthétisé en utilisant la prétenion de simplification, que les enroulements sont alimentés avec une source de courant et la saturation du circuit magnétique n'est pas prise en considération, un potentiomètre est utilisé pour équilibrer le flux des deux bobines émettrices utilisant le circuit équivalent nous avons: [23].

$$\Phi_1 = \frac{\Theta_1}{R_\mu + R_{\mu 1} \cdot Z_{\mu 1} \cdot \frac{1}{R_{\mu 1} + Z_{\mu 1}}} \quad (2.15)$$

$$\Phi_2 = \frac{\Theta_2}{R_\mu + R_{\mu 1} \cdot Z_{\mu 2} \cdot \frac{1}{R_{\mu 1} + Z_{\mu 2}}} \quad (2.16)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu \omega}} \quad (2.17)$$

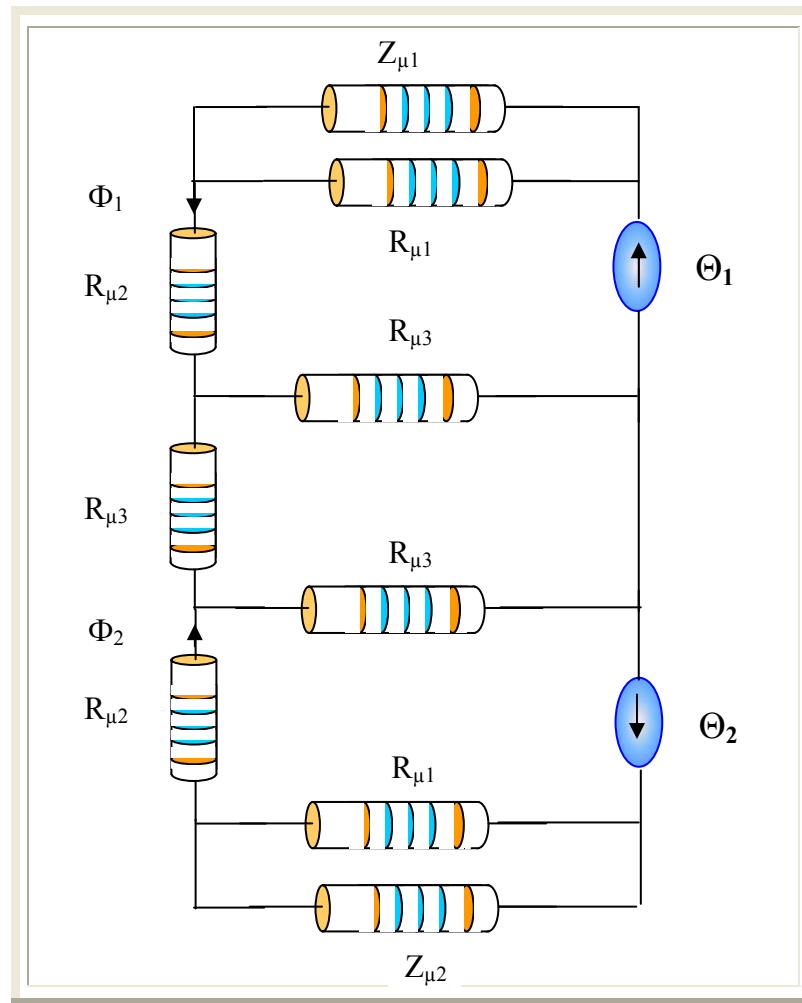


Figure 2. 18 Schéma électrique équivalent d'un capteur différentiel

Où  $\Theta_1 = Z_1 \cdot I_1$ , excitation (2.18)

$R_\mu = R_{\mu_2} + R_{\mu_3}$  réluctances dans le noyau et dans l'air.

$Z_{\mu_1}$  et  $Z_{\mu_2}$  sont deux impédances pour le chemin des courants de Foucault. On peut définir la tension par : [23].

$$|U| = \omega Z_2 (\Phi_1 - \Phi_2) \tag{2.19}$$

$$|U| = \frac{Z_2 \cdot \Theta \cdot \frac{h}{4 \cdot \delta} \left(1 - \frac{1}{l_0} \left(\sqrt{\frac{h^2}{4} - l^2}\right)\right)}{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot A \cdot \text{sig} \delta (k + 1)^2 \sqrt{1 + \left(1 - \frac{h}{4 \cdot \delta} \left(1 - \frac{1}{l_0} \left(\sqrt{\frac{h^2}{4} - l^2}\right)\right)\right)^2}} \tag{2.20}$$

$$A = \frac{N^2 a}{l} \tag{2.21}$$

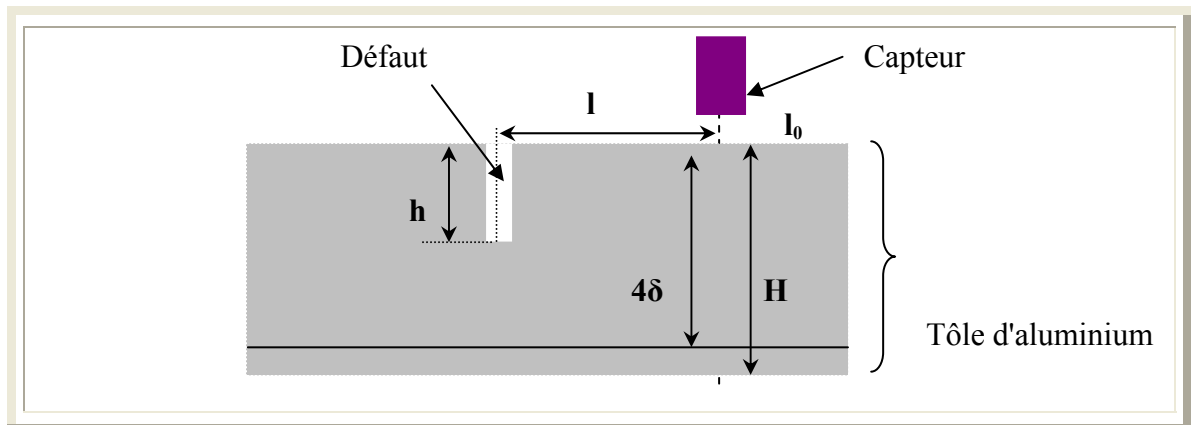
Où:

- A Coefficient de pénétration des courants induits.
- N Nombre de spire.
- A Largeur du capteur.

- $l$  Distance entre le centre du capteur et le centre de la fissure.  
 $l_0$  Position initiale du capteur.  
 $k = R_{\mu}/R_1$  Coefficient pour la présentation du chemin des courants de Foucault induit dans la plaque.

### 2.9.2 Caractérisation du défaut

Si le capteur est placé au dessus de la plaque de l'aluminium sans défaut, les deux flux sont égaux et de sens opposé et le signal de sortie  $U$  est nul. Quand le capteur est placé en dessous de la plaque en présence de défaut, les deux flux ont des valeurs différentes et de sens opposés est le signal de sortie dépend de plusieurs paramètres, (Figure 2.19). Le défaut considéré ici c'est un vide de perméabilité  $\mu = 1$ , [23].



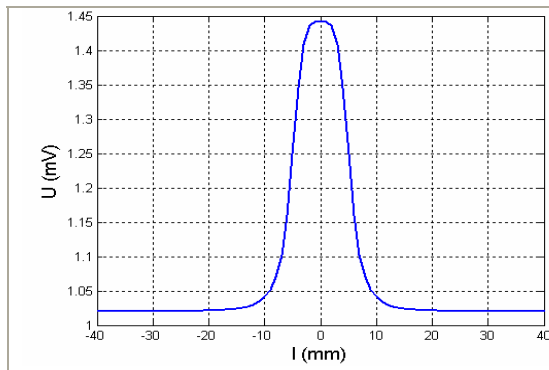
**Figure 2. 19** Caractérisation du défaut dans une tôle en Aluminium

### 2.9.3 Simulation et analyse de résultats

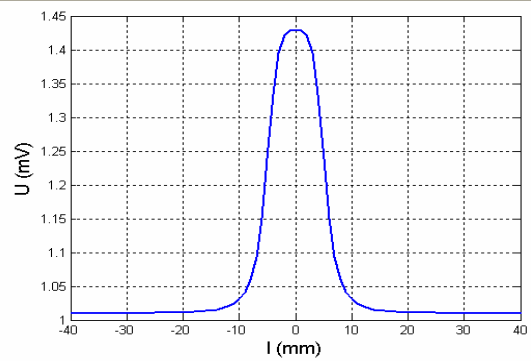
Les résultats de simulation sous Matlab pour les différentes valeurs de  $l$  et de  $h$ , sont illustrés par les figures ci dessous:

Après avoir placé le capteur à sa position initial ( $l_0$ ), on le déplace linéairement pour balayer toute la surface à inspecter, on constate comme l'indique la figure (2.20), que la valeur de tension commence à augmenter jusqu'au défaut de profondeur (0.1mm). Au niveau de ce dernier la valeur de la tension est maximale. Au-delà du défaut, elle commence à diminuer au fur à mesure que le capteur s'éloigne du défaut vers la limite de la plaque.

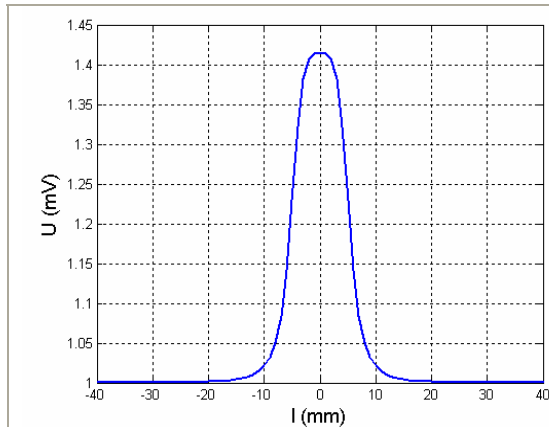
Les figures (2.21) et (2.22), illustrent la même allure de la tension, mais avec une amplitude faible par rapport à la première allure, à cause de la présence d'une fissure un peu plus profonde ( $h=0.11\text{mm}$ ), le signal à la sortie du capteur est faible si on le compare avec les deux premiers figure (2.23), on conclure que la profondeur de la fissure à un grand effet sur le signal capté ainsi plus la profondeur de la fissure est grande plus le signal récupéré est faible, ce qui veut dire que les informations sur l'objet inspecté ne sont pas suffisantes donc mauvaise analyse.



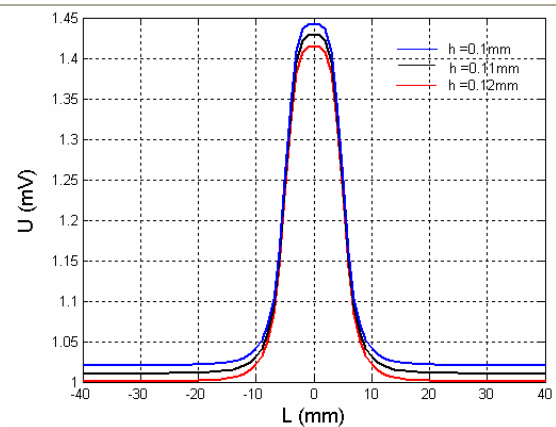
**Figure 2. 20** Allure de la tension pour  $h = 0.1\text{mm}$



**Figure 2. 21** Allure de la tension pour  $h = 0.11\text{mm}$



**Figure 2. 22** Allure de la tension pour  $h=0.12\text{mm}$



**Figure 2. 23** Allure de la tension pour  $h = 0.1, 0.11$  et  $0.12\text{mm}$

## 2.10 Conclusion

Une théorie et des notions de base sur les capteurs inductifs à courants de Foucault ont été présentées dans ce chapitre, un exemple de simulation sous Matlab d'un capteur inductif différentiel était illustré, mais ce dernier présente quelques inconvénients :

- ▶▶ La modélisation analytique de ce type de capteur avec noyau est difficile.
- ▶▶ La sensibilité du capteur est très affectée par le (lift off).
- ▶▶ Au delà d'une certaine profondeur le capteur devient un détecteur, [23].

Pour minimiser ces inconvénients un autre capteur du type différentiel fera l'objet du troisième chapitre, mais cette fois ci on utilisera une autre approche d'analyse à l'aide de la méthode des éléments finis.

## **Introduction**

*Avec l'avancement des ordinateurs puissants, rapides en exécution de calculs et économiques (coûts réduits), l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution des problèmes de champs électromagnétiques devient de plus en plus d'actualité.*

*Outre l'expérimentation, qui est toujours nécessaire, la conception ou l'amélioration des performances d'un dispositif technologique s'appuie sur un modèle de représentation et de simulation de son bon fonctionnement. Il devient ainsi possible de prévoir l'impact du choix de la géométrie ou des matériaux utilisés sur les performances de dispositif à réaliser. Aussi Un modèle précis et fiable permet d'éviter la construction d'un grand nombre de prototypes. Le domaine des capteurs comme d'autres, font appel pour leur mise au point à la simulation et l'expérimentation comme moyen d'aide à la conception, [16].*

*Dans le secteur industriel, la performance est fortement corrélée avec la fiabilité aussi bien pour le produit que pour l'outil de production. Ceci a donné lieu au concept de maintenance préventive et au contrôle non destructif.*

*Les méthodes traditionnelles de détection de défauts sont basées sur des essais qui font appel très souvent à l'immobilisation totale des installations à contrôler afin d'obtenir des informations complémentaires pour pouvoir intervenir efficacement sur l'origine de la panne. Ceci justifie l'intérêt des recherches actuellement menées dans le domaine du contrôle non destructif.*

*Plusieurs chercheurs se sont intéressés au domaine du contrôle non destructif (CND), aussi bien aux techniques qui y sont employées qu'aux capteurs utilisés, (yann le Behan, M. Feliachi)*

*C'est dans cette perspective que s'inscrit notre troisième chapitre intitulé analyse en deux dimensions par la méthode des éléments finis d'un capteur inductif à courant de Foucault pour la détection des défauts au niveau d'une pièce (tube creux). Ainsi la détermination de l'impédance d'un capteur inductif à courant de Foucault s'effectue par l'exploitation en deux dimensions des équations de Maxwell.*

### 3.1 Analyse des phénomènes électromagnétiques

L'étude d'un dispositif électromagnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et des équations de Maxwell.

#### 3.1.1 Équations de Maxwell

Tout dispositif électromagnétique obéit aux équations suivantes :

$$\operatorname{div}(\mathbf{B}) = 0 \quad \text{Equation de conservation du flux} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot}(\mathbf{E}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Equation de Maxwell Faraday} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{D}) = \rho \quad \text{Equation de Maxwell - Ampère} \quad (3.3)$$

$$\operatorname{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Equation de Maxwell - Ampère} \quad (3.4)$$

où :

$\mathbf{J}$  : Vecteur densité de courant.

$\rho$  : Densité de charge électrique.

$\mathbf{D}$  : Densité de courant déplacement.

A ces relations il faut rajouter les expressions suivantes :

Pour les milieux isotropes.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad \text{Induction du champ magnétique} \quad (3.5)$$

Où

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.6)$$

pour un milieu magnétique.

$\mu_r = 1$  pour un milieu amagnétique,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  perméabilité du vide et  $\mu_r$  perméabilité relative du milieu considéré.

Caractéristique diélectrique :

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad \text{Induction du champ électrique} \quad (3.7)$$

où  $\varepsilon_0$  permittivité de l'air et  $\varepsilon_r$  Permittivité relative du milieu considéré.

Pour un milieu conducteur la densité de courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_{ind} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{J}_{ind} = \sigma [\mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}] \quad (3.9)$$

où  $\sigma$  la conductivité électrique,  $\mathbf{v}$  le vecteur vitesse,  $\mathbf{J}_s$  la densité de courant imposé dans l'inducteur et  $\mathbf{J}_{ind}$  la densité du courant induit.

$\sigma \mathbf{E}$ , représente le courant de conduction résultant du champ électrique  $\mathbf{E}$ , et  $\sigma[\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}]$  exprime le courant résultant du mouvement à la vitesse  $\mathbf{v}$ .

Si le système est composé de deux milieux différents, il faut ajouter des conditions aux limites lors du passage d'un milieu à un autre qui se résument comme suit :

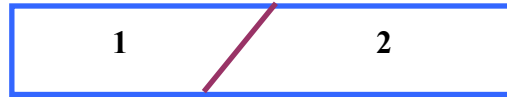


Figure 3.1 Interface entre deux milieux différents

### 3.1.2 Hypothèses simplificatrices

Conservation de la composante tangentielle du vecteur champ électrique  $\mathbf{E}$ .

$$\mathbf{E}_1 \wedge \mathbf{n} = \mathbf{E}_2 \wedge \mathbf{n} \quad (3.10)$$

Conservation de la composante normale du vecteur induction magnétique  $\mathbf{B}$ .

$$\mathbf{B}_1 \wedge \mathbf{n} = \mathbf{B}_2 \wedge \mathbf{n} \quad (3.11)$$

Conservation de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique  $\mathbf{H}$ .

$$\mathbf{H}_1 \wedge \mathbf{n} = \mathbf{H}_2 \wedge \mathbf{n} \quad (3.12)$$

Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique  $\mathbf{D}$ , en présence de charges superficielles  $\rho_s$

$$\mathbf{n} (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho \quad (3.13)$$

où

$\mathbf{n}$  est le vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2.

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot}(\mathbf{E}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \text{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J} \\ \text{div}(\mathbf{B}) = 0 \\ \text{div}(\mathbf{D}) = 0 \end{array} \right. \quad (3.14)$$

### 3.2 Formulation en terme de potentiel vecteur

A partir de l'équation (3.1), on définit le potentiel vecteur magnétique  $\mathbf{A}$  par l'équation suivante :

$$\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A}) \quad (3.15)$$

Dans le cas général, il existe une infinité de vecteur potentiel  $\mathbf{A}$  pouvant satisfaire la relation (3.15), [3]. En effet, puisque le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire  $f$  est nul, donc, tout vecteur  $(\mathbf{A} + \text{grad}(f))$  satisfaire la relation (3.15), d'où la nécessité d'imposer une condition de jauge afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous proposons d'utiliser la jauge de coulomb :

$$\text{div}(\mathbf{A}) = 0 \quad (3.16)$$



L'équation que nous allons établir s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels il y a présence de courant de Foucault provenant de la variation des champs dans le temps. En remplaçant  $\mathbf{B}$  par  $rot(\mathbf{A})$ , l'équation (3.2) devient

$$rot \left\{ \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right\} = 0 \quad (3.17)$$

A partir de cette équation, on peut définir un potentiel scalaire électrique  $V$  tel que :

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -grad(V) \quad (3.18)$$

La combinaison des équations (3.9) et (3.18) donne :

$$\sigma \mathbf{E} = \mathbf{J} - \mathbf{J}_s = \sigma \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + grad(V) \right\} \quad (3.19)$$

d'où

$$\mathbf{J} = - \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + grad(V) \right\} + \mathbf{J}_s \quad (3.20)$$

En remplaçant  $\mathbf{J}$  par son expression (3.20) dans le système d'équation (3.14), on abouti à l'expression vectorielle condensée du système d'équation (3.14) représentant ainsi l'équation électromagnétique en potentiel vecteur magnétique  $\mathbf{A}$ , donnée par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} rot(\mathbf{v} rot(\mathbf{A})) = -\sigma \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + grad(V) \right\} + \mathbf{J}_s \\ div(\mathbf{A}) = 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

où  $\mathbf{v} = \frac{1}{\mu}$  désigne la réductivité magnétique.

L'équation (3.21) prend différentes formes selon la région d'étude et les caractéristiques des différents milieux.

En exploitant les particularités des dispositions des matériaux des systèmes réels, les symétries de leurs structures et de leurs alimentations, on est amené à des modèles bidimensionnels qui représentent correctement les phénomènes avec des coûts de calcul raisonnables.

### 3.3 Équation électromagnétique d'un système axisymétrique

Dans une configuration axisymétrique (coordonnées cylindriques  $(r, z)$ ), la formulation utilisant le potentiel vecteur offre l'intérêt suivant : Lorsque le courant d'excitation est orienté suivant le directionnel le système présent une seule inconnue, la composante orthoradiale ( $A$ ) du vecteur  $\mathbf{A}$ . Dans une telle configuration, les courants sont perpendiculaires au plan d'étude.

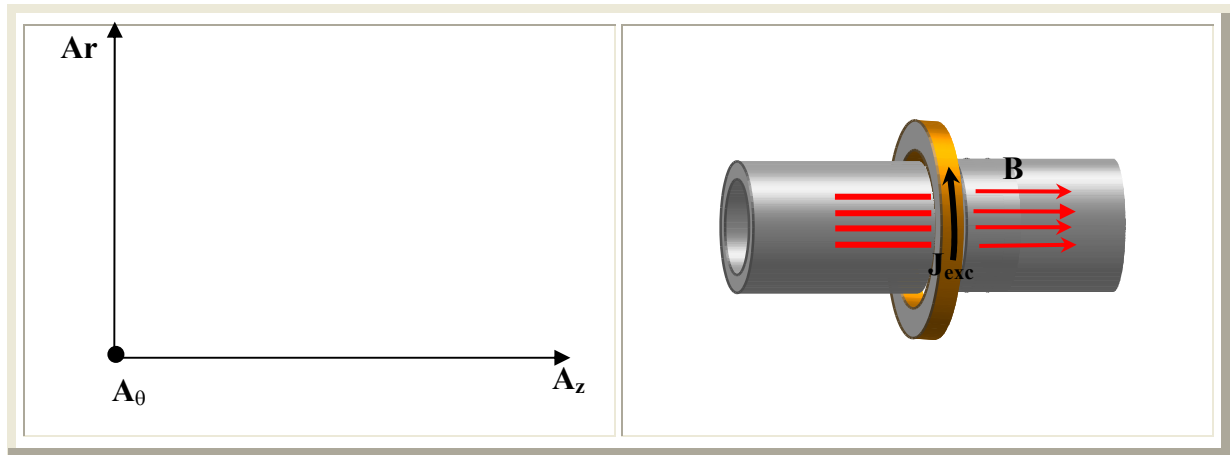


Figure 3.4 Dispositif axisymétrique

Les différentes grandeurs vectorielles ont les composantes suivantes :

$$\mathbf{J} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{J}_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{E}_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{A}_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{Bmatrix} \mathbf{H}_r \\ 0 \\ \mathbf{H}_z \end{Bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{Bmatrix} \mathbf{B}_r \\ 0 \\ \mathbf{B}_z \end{Bmatrix} \quad (3.22)$$

Comme le vecteur  $\mathbf{A}$  est confondu avec sa composante orthoradiale, sa divergence est donc automatiquement nulle. Dans ces conditions le système d'équation se réduit alors à :

$$\mathbf{v}(\text{rot}(\text{rot}(\mathbf{A}))) = -\sigma \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}(V) \right\} + \mathbf{J} \quad (3.23)$$

Or, dans une configuration axisymétrique, le terme  $\text{grad}(V)$  est nul. Ainsi l'équation (3.23) prend la forme:

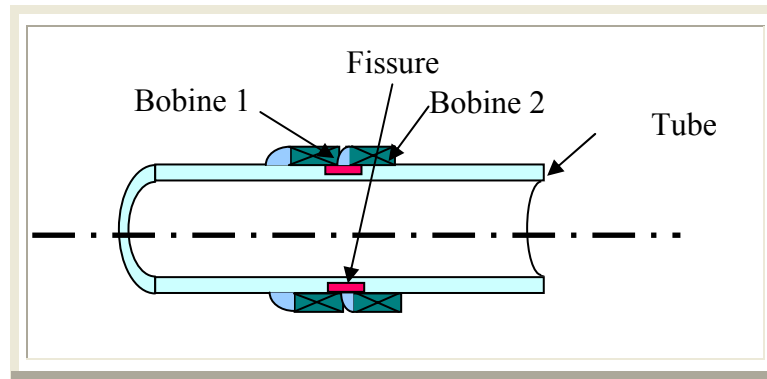
$$\mathbf{v}(\text{rot}(\text{rot}(\mathbf{A}))) = -\sigma \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right\} + \mathbf{J}_s \quad (3.24)$$

L'équation (3.24) décrit globalement tous les phénomènes électromagnétiques

### 3.4 Mise en équation du système électromagnétique étudié

#### 3.4.1 Présentation du dispositif en 3D

Le dispositif considéré pour notre étude est un tube creux de forme cylindrique entouré par deux bobines série excitées avec un courant alternatif sinusoïdal et dont les flux s'opposent. Sur le tube se trouve un défaut symbolisé par une fissure uniformément répartie comme l'indique la figure (3.2)



**Figure 3.2** Géométrie du dispositif en 3D

A première vue notre système nécessite une modélisation tridimensionnelle. Les modélisations tridimensionnelles sont de plus en plus nombreuses, mais pour des dispositifs ayant des structures compliquées, et constitués de matériaux possédant des caractéristiques non linéaires (les machines tournantes par exemple), une telle modélisation s'avère fastidieuse et coûteuse, [3]. En effet de tels problèmes possèdent quatre degrés de libertés par nœud et nécessitent un temps de calcul considérable surtout en présence de la saturation et/ou dans le cas d'un régime transitoire. C'est pourquoi cette alternative est à écarter, [26].

Le dispositif utilisé contient comme le montre la figure (3.2), un capteur (deux bobines), de l'air autour du capteur et la plaque qui à une épaisseur de (5mm), (le lift-off, distance entre le capteur et la plaque est de 1mm).

Le capteur est constitué de deux bobines entourant la face externe du tube. Concernant le défaut, il se situe soit sur la surface latérale externe ou interne du tube comme il peut être à l'intérieur de l'épaisseur du tube. Le défaut provoqué est géométriquement axisymétrique, ce dernier est caractérisé par une profondeur de 2mm.

Le modèle étant axisymétrique (il demeure inchangé par rotation autour de l'axe vertical passant par le centre du tube), il suffit donc de réaliser un modèle à deux dimensions, [26].

### 3.4.2. Modèle considéré en 2D

Le modèle à deux dimensions est constitué de quatre régions :

- L'air
- La pièce conductrice soit électriquement (Aluminium) ou bien magnétiquement (Ferrite).
- Les deux bobines montées en série avec un bobinage inversé pour assurer deux flux de sens opposés. La géométrie en deux dimensions est donnée par le schéma de la figure (3.3).

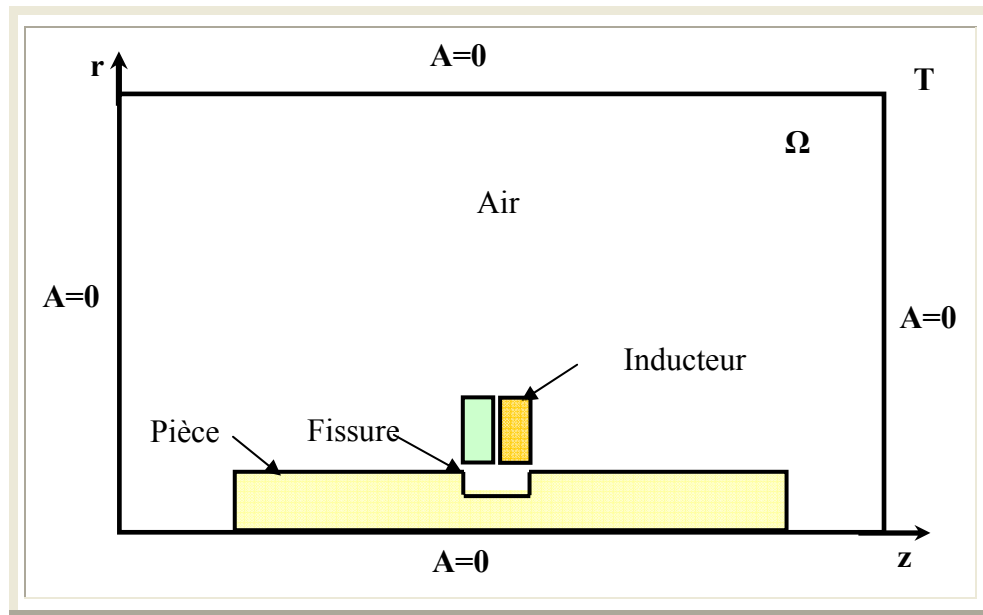


Figure 3.3 Géométrie du dispositif en 2D

### 3.5. Mise en équation du modèle axisymétrique 2D

L'ensemble des équations que nous avons présentées ci-dessus, décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais dans la plupart des cas, nous ne pouvons pas les résoudre directement. Suivant la forme des dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables ; par conséquent, les équations se simplifient pour donner lieu à des modèles plus simples.

- La densité volumique de charge est considérée nulle ( $\rho = 0$ ).
- Les courants d'alimentation sont supposés créés par un générateur de courant parfait.
- L'induction magnétique rémanente est considérée nulle ( $\mathbf{B}_r = 0$ ).

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre sont :

Dans un système de coordonnées cylindrique, nous avons :

$$\left[ -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left( r \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{r^2} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{\partial t} + \mu \mathbf{J}_{s\theta} \quad (3.25)$$

Ceci réduit la forme vectorielle (3.24) à la relation suivante :

$$-\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left( \frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{\partial \mathbf{r}} \right) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left( \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{\partial \mathbf{z}} \right) + \sigma \mu \cdot \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{\partial t} = \mu \mathbf{J}_s \quad (3.26)$$

### 3.6 Diverses méthodes numériques de résolution

Dans les paragraphes précédents, nous avons établi une équation aux dérivées partielles (3.26) décrivant les systèmes électromagnétiques. La résolution de cette équation par des méthodes analytiques est impossible dans le cas général où la géométrie des dispositifs étudiés est complexe, et/ou les matériaux ont des propriétés magnétiques non linéaires. Pour résoudre ce

type de problèmes on fait appel à des méthodes dites numériques telles que : la méthode des intégrales de frontières, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis, méthodes mixtes qui sont une combinaison de deux méthodes numériques (éléments finis+intégrales de frontières par exemple...) dont on donne un aperçu dans les paragraphes suivants.

### **3.6.1 Méthode des intégrales de frontières**

Cette méthode est basée sur une subdivision de nœuds distribués sur les frontières des différentes régions de dispositif. A partir des valeurs sur les frontières, il est possible dans certains cas de calculer les champs, si c'est nécessaire, à l'intérieur du domaine de résolution.

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de prendre en considération la saturation, la nécessité d'un espace mémoire et d'un temps de calcul importants, car les matrices issues de cette méthode sont de rang élevé. [27].

La méthode des intégrales de frontières est utilisée généralement en magnétostatique ou bien elle est couplée avec la méthode des éléments finis pour calculer des champs électromagnétiques dans les milieux linéaires et non conducteurs.

### **3.6.2 Méthode des différences finis**

C'est une méthode numérique simple à mettre en œuvre, est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles, en particulier celles concernant les problèmes de champs électromagnétiques. Cette méthode en 2D, consiste à mailler le domaine de résolution en éléments rectangulaires. En discrétisant aux nœuds du maillage l'équation (3.26) et en tenant compte des conditions aux limites appropriées et des conditions de passages entre les différents milieux, on aboutit à un système algébrique. La méthode des différences finies s'adapte difficilement aux géométries complexes. En plus, elle n'aboutit qu'aux valeurs nodales du vecteur potentiel, ce qui exige une interpolation pour déterminer les valeurs de  $A$  en d'autres points du domaine de résolution si c'est nécessaire.

### **3.6.3 Méthode des volumes finis**

La méthode des volumes finis, appelée aussi méthode des volumes de contrôle et développée par Spalding et Patankar. C'est une méthode de résidus pondérés. Pour la quelle les fonctions de poids sont égales à l'unité dans des volumes finis donnés. Elle consiste à discrétiser des équations aux dérivées partielles par une intégration sur des volumes finis entourant les nœuds du maillage plutôt qu'au nœud lui-même (cas de la méthode des différences finies). En effet, dans le cas de cette méthode, le domaine d'intégration est subdivisé en volumes de contrôle, chacun englobant un nœud de maillage.

Lors de l'assemblage des équations discrétisées, la matrice du système globale est construite par arrête contrairement aux matrices globales issues d'une discrétisation par éléments finis, pour la quelle la construction se fait par élément.

### 3.6.4 Méthode des circuits couplés

La base de méthode des circuits couplés, est de faire l'analogie entre les grandeurs électriques et thermiques par exemple, elle consiste à subdiviser le domaine d'étude en spires élémentaire. Par application des lois de Kirchhoff à ces circuits élémentaires, on peut calculer la distribution des variables en question.

### 3.6.5 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. [24].

Cette méthode appliquée au début à des problèmes de mécanique de structure, a connu des développements importants dans différents domaines scientifiques et industriels durant les dernières décennies. [25]

L'étude par éléments finis consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue recherchée pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. [24].

Cependant elle ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre. Les méthodes couramment utilisées pour obtenir la formulation intégrale sont la mise sous forme variationnelle et la méthode des résidus pondérés.

La méthode variationnelle de Ritz consiste à rendre extrémale une fonctionnelle qui est une intégral qui dépend de la fonction inconnue et de ses dérivées. Souvent, cette fonctionnelle représente l'énergie du système. Par contre la méthode des résidus pondérés permet de traiter directement l'équation aux dérivées partielles sans avoir à passer par un principe variationnelle, elle consiste à projeter l'équation à résoudre sur une base de fonction.

#### 3.6.5.1 Méthode de Galerkin

Cette méthode est un cas particulier où les fonctions de projection  $\psi_i$  sont identiques aux fonctions d'interpolation  $\alpha_i$ .

$$\psi_i(x, y) = \alpha_i(x, y) \quad (3.27)$$

La fonctionnelle de l'équation (3.36) s'écrit donc:

$$\Delta(f) = g(p_0) \quad (3.28)$$

$\Delta$  : est l'opérateur différentiel et  $g(p_0)$  la fonction connue qui dépend des sources indépendantes placées au point  $P_0$ .

$$\mathbf{R}_i = \iint_{\Omega} \mathbf{\alpha}_i(x, y) \left[ \Delta \left( \sum_{j=1}^{nm} \mathbf{\alpha}_i(x, y) f_i \right) - \mathbf{g} \right] d\Omega \quad (3.29)$$

Les  $\mathbf{\alpha}_i(x,y)$  sont calculées pour que  $\mathbf{R}_i$  soit nul. Dans chaque domaine élémentaire désigné par  $e$ ,  $\mathbf{R}_i$  est décrit par l'équation suivante:

$$\mathbf{R}^e_i = \iint_{\Omega^e} \mathbf{\alpha}_i(x, y) \left[ \Delta \left( \sum_{j=1}^{nm} \mathbf{\alpha}_i(x, y) f_i \right) - \mathbf{g} \right] d\Omega^e \quad (3.30)$$

$$\mathbf{R}_i = \sum_{e=1}^{ne} \mathbf{R}^e_i \quad (3.31)$$

$ne$  étant le nombre d'élément sur le domaine  $\Omega$ .

### 3.6.5.2 Forme matricielle élémentaire

Il s'agit de mettre sous forme matricielle, les formes intégrales de l'équation à résoudre, dans chaque domaine élémentaire  $\Omega^e$ . L'équation (3.31) prend alors la forme suivante:

$$\mathbf{R}^e = [\mathbf{K}]^e [\mathbf{A}]^e - [\mathbf{F}]^e \quad (3.32)$$

### 3.6.5.3 Assemblage des matrices élémentaires

La forme  $\mathbf{R}$  étendue au domaine  $\Omega$  est la somme des formes  $\mathbf{R}^e$  des domaines élémentaires  $\Omega^e$  :

$$\mathbf{R} = \sum_{e=1}^{ne} \mathbf{R}^e = 0 \quad (3.33)$$

On a donc

$$\mathbf{R} = \sum_{e=1}^{ne} [\mathbf{K}]^e \cdot [\mathbf{A}]^e - [\mathbf{F}]^e = [\mathbf{K}] [\mathbf{A}] - [\mathbf{F}] = 0 \quad (3.34)$$

$[\mathbf{K}]$  : Est la matrice globale discrétisée, obtenue par la somme des matrices élémentaires étendues. De la même manière on réalise une expansion de  $[\mathbf{A}^e]$  qui donne le vecteur source  $[\mathbf{F}]$ . Ainsi nous obtenons un système d'équation algébrique de la forme :

$$[\mathbf{K}] [\mathbf{A}] = [\mathbf{F}] \quad (3.35)$$

La résolution du système (3.35) se fait après introduction des conditions aux limites qui permettent d'évaluer les valeurs nodales du vecteur potentiel magnétique.

## 3.7 Conditions aux limites et conditions d'interfaces

Pour que le problème soit complètement défini, il faut déterminer la contribution des conditions aux limites sur les frontières du domaine d'étude, ainsi que les conditions de passage entre différents milieux constituant ce domaine, [27].

### 3.7.1 Conditions aux limites

On distingue essentiellement deux types de conditions aux limites, dans les problèmes de champ électromagnétique formulés en terme du vecteur potentiel magnétique :

**a) Conditions aux limites de Dirichlet ( $A=A_0$ ) :**

Dans ce cas, le vecteur potentiel magnétique  $\mathbf{A}$  est constant sur la frontière, ce qui veut dire que l'induction magnétique  $\mathbf{B}$  est parallèle à ce contour qui présente alors une équipotential. On rencontre cette condition lorsque une partie ou tout le contour se trouve à une distance suffisamment éloignée des sources d'excitation, pour pouvoir négliger les valeurs du vecteur potentiel magnétique sur cette partie de la frontière par rapport aux valeurs de ce même potentiel à l'intérieur du domaine (c'est-à-dire on suppose que  $(\mathbf{A} = 0)$ , [27].

**b) Condition aux limites de Neumann homogène ( $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0$ )**

On la trouve sur les plans où les axes d'axisymétrique.

### 3.7.2 Condition d'interface

Dans le cas général, un dispositif électrotechnique comporte des milieux différents (fer, air, aluminium, cuivre, ...etc.). Avant d'aborder la résolution du problème, il est nécessaire de connaître le comportement des champs électromagnétiques à travers l'interface entre chaque deux milieux différents. En effet, la composante normale de l'induction  $\mathbf{B}$  est continue au passage entre deux milieux différents telle que:

$$\mathbf{B}n_1 = \mathbf{B}n_2 \quad (3.36)$$

En plus la composante tangentielle du champ magnétique  $\vec{H}$  l'est également, en absence des courants surfaciques.

$$\mathbf{H}t_1 = \mathbf{H}t_2 \quad (3.37)$$

## 3.8 .Résolution du système

C'est la dernière étape qui mène à la détermination des valeurs  $f_i$  de la fonction  $f(x,y)$  recherchée en chaque nœud; il s'agit de résoudre le système (3.26) mais de plus, il faut tenir compte des conditions aux limites qui, en général, sont telles que certaines vecteurs de  $f_i$  ou ses dérivées sont connues sur les parties du contour du domaine d'étude  $\Omega$ .

### 3.8.1 Discrimination du domaine

Pour un domaine unidimensionnel qui est en fait une ligne droite ou curviligne, les éléments sont souvent de petits segments interconnectés entre eux pour former tout le domaine. Pour un domaine bidimensionnel, les éléments sont constitués des triangles ou rectangles. Dans le cas de problèmes tridimensionnels, le domaine peut être subdivisé en éléments tétraédriques, prismatiques, hexaédriques. Ces éléments nécessitent une description complète de leurs nœuds.



### 3.8.2 Maillage en éléments triangulaires linéaires

Étant donné que notre étude est bidimensionnelle (axisymétrique), la résolution triangulaire est la plus indiquée. Les triangles sont constitués de trois nœuds confondus avec leurs trois sommets. Pour affiner des parties du domaine de résolution nous changeons seulement la taille de ces éléments. La numérotation des nœuds est faite de gauche à droite puis de bas en haut. Tandis que pour les éléments, nous numérotions de gauche à droite, [25].

### 3.9 Formulation éléments finis des équations électromagnétiques

#### 3.9.1 Équation électromagnétique linéaire

##### 3.9.1.1 Formulation intégrale

Nous appliquons la méthode de Galerkin à l'équation (3.26). Dans le cas axisymétrique, nous ferons les changements de variables suivants, [27] :

$$\mathbf{A} = r \cdot \mathbf{A}_0 \quad (3.38)$$

En régime harmonique  $\frac{\partial}{\partial t} \equiv j\omega$

$$\int_{\Omega} \left( \frac{\alpha_i}{r} \left[ -\frac{\partial}{\partial r} \left( v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + j\omega\sigma \frac{A}{r} - J \right] \right) d\Omega = 0 \quad (3.39)$$

Avec

$$d\Omega = 2\pi r dr dz \quad (3.40)$$

Ou encore:

$$-\int_{\Omega} \left[ \frac{\alpha_i}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left( v \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{r}} \right) \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[ \frac{\alpha_i}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left( v \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{z}} \right) \right] d\Omega + \int_{\Omega} \left[ \frac{\alpha_i}{r} j\omega\sigma \frac{\mathbf{A}}{r} \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[ \frac{\alpha_i}{\mathbf{r}} \mathbf{J} \right] d\Omega = 0 \quad (3.41)$$

L'intégration par parties des termes comportant des dérivées d'ordre deux génère une forme plus simple. Cette forme comporte des intégrales de frontières qui permettent d'explicitier les conditions aux limites naturelles :

$$\left\{ \begin{aligned} & v \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial r} \right] \frac{dr dz}{r} + v \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right] \frac{dr dz}{r} - \left( v \int_T \left[ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial r} \cdot \alpha_i \cos(\mathbf{n}, r) \right] \frac{d\mathbf{T}}{r} - v \int_T \left[ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \cdot \alpha_i \cos(\mathbf{n}, z) \right] \frac{d\mathbf{T}}{r} \right) \\ & + \int_{\Omega} j\omega\sigma \alpha_i \cdot \mathbf{A} \frac{dr dz}{r} - \int_{\Omega} \alpha_i \cdot \mathbf{J} dr dz = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

$$= \left\{ \begin{aligned} & \int_{\Omega} \left[ v \left[ \frac{\partial \alpha_i}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial \mathbf{z}} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{z}} \right] \frac{dr dz}{\mathbf{r}} - \left( \int_T v \left[ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{r}} \cdot \alpha_i \cdot \cos(\mathbf{n}, r) \right] \frac{d\mathbf{T}}{\mathbf{r}} - v \int_T \left[ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{z}} \cdot \cos(\mathbf{n}, z) \right] \frac{d\mathbf{T}}{\mathbf{r}} \right) \right] \\ & + \int_{\Omega} j\omega\sigma \alpha_i \cdot \mathbf{A} \frac{dr dz}{\mathbf{r}} - \int_{\Omega} \alpha_i \cdot \mathbf{J} \cdot dr dz = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

Cos (n,r) et cos(n,z) sont les cosinus directeurs au point considéré de la frontière T du domaine de résolution.

On peut écrire l'équation (3.43) sous la forme suivante :

$$\int_{\Omega} [vgrad(\mathbf{a}_i)grad(\mathbf{A})] \frac{drdz}{r} - \int_T [(vgrad(\mathbf{A})n)\mathbf{a}_i] \frac{d\mathbf{T}}{r} + \int_{\Omega} [j\omega\sigma\mathbf{a}_i\mathbf{A}] \frac{drdz}{r} - \int_{\Omega} [\mathbf{a}_i\mathbf{J}] drdz = 0 \quad (3.44)$$

n: vecteur unitaire normal au point considéré de la frontière.

### 3.9.1.2 Introduction des conditions aux limites

Le terme  $\int_T [(vgrad(\mathbf{A})n)\mathbf{a}_i] \frac{d\mathbf{T}}{r}$  exprime la condition aux limites naturelle de type Neumann.

Dans le cas de conditions de type Dirichlet ( $\mathbf{A} = C^{te}$ ), ou de Neumann homogène, ce terme sur la frontière s'annule.

### 3.9.1.3 Formulation matricielle

La discrétisation de A à l'aide des fonctions d'interpolation conduit à l'équation suivante :

$$\sum_{j=1}^n \mu \left( \int_{\Omega} [grad(\mathbf{a}_i)grad(\mathbf{a}_j\mathbf{A}_j)] \frac{drdz}{r} + \left[ j\omega\sigma\mathbf{a}_i\mathbf{A}_j \frac{drdz}{r} \right] \right) = \int_{\Omega} \mathbf{a}_i\mathbf{J} drdz \quad (3.45)$$

i= 1,...,n (n étant le nombre de nœuds)

En faisant une extension de l'équation (3.45) pour tous les nœuds du domaine, nous obtenons l'équation algébrique suivante :

$$(j\omega[\mathbf{L}] + [\mathbf{M}])[\mathbf{A}] = [\mathbf{F}] \quad (3.46)$$

Avec :

$$\mathbf{L}_{ij} = \int_{\Omega} \sigma\alpha_i\alpha_j \frac{1}{r} drdz = \frac{1}{R_{eq}} \int_{\Omega} \sigma\alpha_i\alpha_j drdz \quad (3.47)$$

$$\mathbf{M}_{ij} = \nu \int_{\Omega} grad(\alpha_i)grad(\alpha_j) \frac{1}{r} drdz = \frac{\mu}{R_{eq}} \int_{\Omega} grad(\alpha_i)grad(\alpha_j) drdz \quad (3.48)$$

$$\mathbf{F}_i = \int_{\Omega} \mathbf{a}_i\mathbf{J} drdz \quad (3.49)$$

Où  $R_{eq}$  est la valeur moyenne du rayon r dans l'élément :

$$\mathbf{R}_{eq} = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3} \quad (3.50)$$

[A] est le vecteur correspondant aux valeurs du potentiel magnétique modifié aux nœuds du maillage. C'est un complexe qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^{(r)} + j\mathbf{A}^{(i)} \quad (3.51)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}^{(r)} + j\mathbf{J}^{(i)} \quad (3.52)$$

$\mathbf{A}^{(r)}, \mathbf{J}^{(r)}$  : partie réelle

$\mathbf{A}^{(i)}, \mathbf{J}^{(i)}$  : partie imaginaire

Nous avons :

$$(j\omega[\mathbf{L}] + [\mathbf{M}])\{\mathbf{A}^{(r)} + j\mathbf{A}^{(i)}\} = [\mathbf{F}] \quad (3.53)$$

### 3.9.2 Calcul de l'impédance

Après avoir déterminé le potentiel vecteur pour chaque point du maillage on peut déterminer les autres paramètres, l'induction magnétique ( $\mathbf{B}$ ), champ magnétique ( $\mathbf{H}$ ), les courants induits et l'impédance du capteur ( $\mathbf{Z}$ ). Le contrôle par les courants de Foucault basé sur la variation d'impédance du capteur dans la présence d'un défaut, deux méthodes sont employées pour la détermination de cette dernière; soit à travers le calcul du potentiel vecteur magnétique ( $\mathbf{A}$ ), où la source est de type courant comme dans notre cas; soit à partir du calcul de la tension. Ensuite l'impédance sera calculée par la loi d'Ohm. La deuxième méthode est la plus utilisée à cause de sa fiabilité.

Au niveau du capteur nous imposerons un courant alternatif de fréquence  $f$ , qui induit des courants de Foucault dans le matériau qui seront perturbés par un défaut. Cette perturbation se traduira par:

- Une variation des pertes joules, ce qui implique donc une variation de la résistance du capteur soit :

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (3.54)$$

- Une variation de l'énergie électromagnétique stockée, ce qui implique donc une variation de la réactance apparente du capteur, et par conséquent une variation de phase, soit :

$$\mathbf{X} = \omega \frac{W_m}{I^2} \quad (3.55)$$

Les pertes joules sont données par [16, 29]

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \int_V \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma} dV = \frac{1}{2} \int_V \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^*}{\sigma} dV \quad (3.56)$$

Comme  $J = \sigma E \Rightarrow J = -\sigma j\omega A$  (3.57)

$$\mathbf{P} = \frac{\omega^2}{2} \int_V \sigma \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^* dV \quad (3.58)$$

La substitution des équations (3.55) et (3.58) donne :

$$\mathbf{R} = \frac{\omega^2}{2} \int_V \frac{\sigma \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^*}{I^2} dV \quad (3.59)$$

La réactance peut être déterminé à partir de l'énergie électromagnétique stockée sur un volume, telle que :

$$\mathbf{X} = 2 \cdot \omega \frac{W_m}{I^2} \quad (3.60)$$

L'énergie électromagnétique stockée est donnée par l'expression :

$$\mathbf{W}_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV \quad (3.61)$$

$$\mathbf{W}_m = \frac{1}{2\mu} \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}^* dV \quad (3.62)$$

$$\mathbf{W}_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} dV \quad (3.63)$$

L'équation (3.63) est obtenue par la résolution de l'équation (3.26) et l'exploitation de l'équation  $\text{rot}(\mathbf{B}) = \mathbf{J}$ , [29].

Par substitution des deux équations (3.60) et (3.63) en obtins :

$$\mathbf{X} = \omega \int_V \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{J}^*}{I^2} dV = \omega \cdot L \quad (3.64)$$

Où L est l'inductance de la bobine.

L'impédance du capteur est composé de deux parties, partie réel qui est la résistance et une partie imaginaire qui la réactance, l'impédance est définie par:

$$\mathbf{Z} = R + jX \quad (3.65)$$

### 3.10 Conclusion

*Dans ce chapitre, nous avons porté sur une approche d'analyse par la méthode des éléments finis en a commencé par la formulation par MEF du modèle magnétodynamique du problème posé, cette formulation est étudié dans le cas d'un système axisymétrique, sans considérer la saturation du matériau sous teste.*

*L'emploi de cette méthode conduit à un système algébrique, ce qui facilite le calcul de l'impédance de l'ensemble capteur/cible, les résultats de simulation sont l'objectif de notre quatrième chapitre.*

## Introduction

L'obtention de résultats expérimentaux est bien sûr indispensable à la validation de toute méthode, mais ces mesures nécessitent un investissement important, [16] il est nécessaire de recommencer entièrement une mesure et sa mise en place pour chaque changement des paramètres, alors qu'une simulation, une fois mise en œuvre et validée, peut être relancée très rapidement avec de nouveaux paramètres. La simulation permet donc, par exemple, le développement de nouveaux types de capteurs.

La simulation du contrôle non destructif par courants de Foucault a maintenant atteint une maturité industrielle à travers les produits commerciaux FLUX2D, FLUX3D et CIVA. Ces outils complémentaires permettent de traiter la majorité des configurations de contrôle: configurations planes ou tubulaires avec le logiciel CIVA par exemple qui est basé sur la méthode des éléments finis. Ce dernier permet de traiter des géométries de pièces complexes. Les avancées techniques dans la simulation numérique des méthodes de contrôle non destructif par ultrasons ou radiographie ont permis à la simulation de prendre une place importante, aussi bien dans le nucléaire que dans l'aéronautique, [30]. Dans ces domaines, la modélisation est aujourd'hui un outil indispensable en amont du contrôle. Ce n'est pas encore le cas dans le domaine des courants de Foucault. Ces avancées conduisent à penser que la simulation du CND par CF devient ou va devenir très rapidement aussi mature que les simulations des autres techniques de CND.

En premier lieu, on donnera la structure de notre programme constitué de trois parties. Après avoir exposé dans le chapitre précédent les différentes étapes pour une modélisation numérique des phénomènes électromagnétiques, on procédera, dans ce chapitre, à la présentation des divers résultats de simulation du modèle élaboré.

### 4.1 Élaboration et définition de l'approche d'étude

#### 4.1.1 Présentation et structure du programme développé

Le programme développé sous l'environnement Matlab est constitué de trois blocs et structuré comme suit :



Figure 4.1 Différents blocs du programme

#### A) Bloc d'entrée (Pré-processeur)

Ce bloc est constitué de trois parties : partie base de données, partie de maillage et partie d'affectation. Dans ce bloc, on trouve les différentes données concernant la description de la géométrie du dispositif (capteur, pièce), la discrétisation, les différentes propriétés physiques, le

calcul des coefficients des équations algébriques et les conditions aux limites. Ces trois parties sont décrites comme suit :

### ***Partie base de donnée***

Cette partie est consacrée à la description de la géométrie du dispositif et englobe :

- \* Le nombre de régions du domaine d'étude.
- \* Les dimensions et la géométrie de chaque région.
- \* Le nombre de nœuds, triangles et éléments.

#### ***a) Partie de maillage***

Cette partie est dévoué à l'introduction des propriétés physiques et électromagnétiques (conductivité électrique, perméabilité magnétique) de chaque région selon le phénomène à étudier (thermique, magnétostatique, électrocinétique, magnétodynamique), en l'occurrence la fréquence d'excitation, la densité de courant source.

#### ***b) Partie d'affectation***

L'espace de cette partie est utilisé pour le calcul de coefficients des équations algébriques à résoudre à partir des propriétés physiques de la partie précédente.

### **B) Bloc de résolution (Processeur)**

Ce bloc est caractérisé par les équations algébriques discrétisées des inconnues, par les méthodes de résolution tel que la méthode de Gauss, Gauss Seidel qui provient de la formulation éléments finis, les résultats du calcul permettent d'évaluer les composantes du vecteur potentiel magnétique, densité des courants induits, champ magnétique, etc. Après avoir calculé le potentiel vecteur magnétique  $\mathbf{A}$ , on évalue les pertes Joules ainsi que l'énergie électromagnétique afin de déterminer la résistance et la réactance à partir de ces grandeurs (pertes joules, énergie électromagnétique). On déduira ensuite l'impédance du capteur.

### **C) Bloc de sortie (Poste processeur)**

Ce bloc est destiné à l'affichage et la visualisation de toutes les grandeurs électromagnétiques à savoir le potentiel vecteur magnétique les lignes de champ magnétique, la densité des courants induits et l'impédance du capteur sous forme des courbes où des surfaces en 2D.

L'organigramme de la figure (4.2) représente les différentes étapes pour la résolution de l'équation (3.26) électromagnétique lainière donnée dans le chapitre précédant.

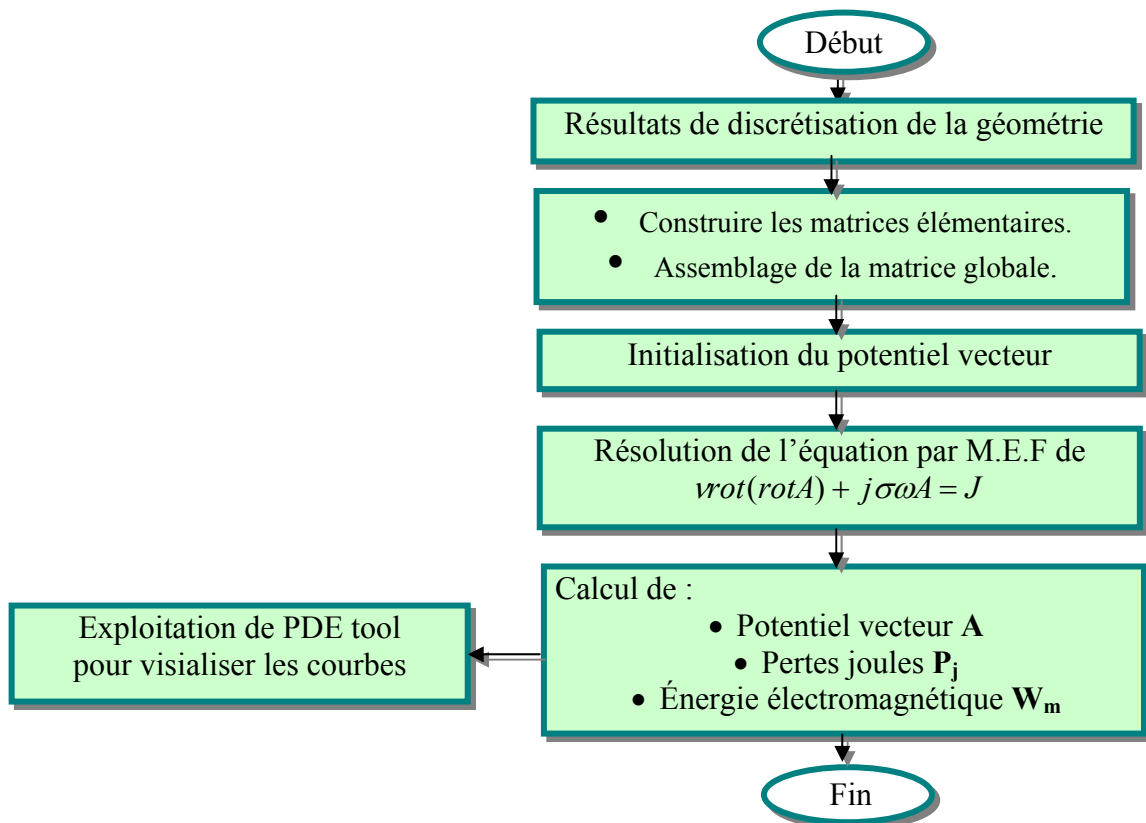


Figure 4.2 Organigramme du bloc électromagnétique

#### 4.1.2 Applications proposées

Pour valider le programme développé, nous avons choisi, cinq applications :

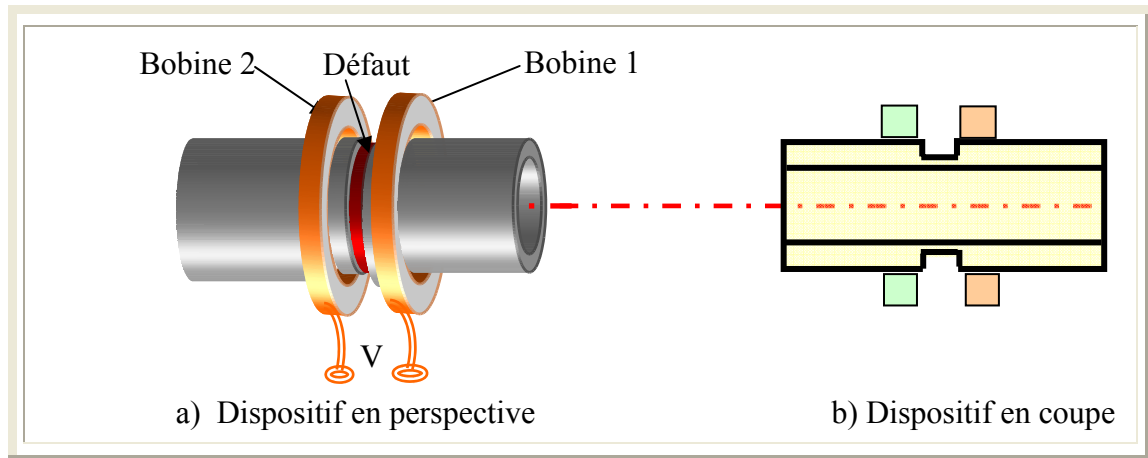
- ▶◀ La première application concerne un tube amagnétique sans défaut ;
- ▶◀ La deuxième application représente un exemple de tube amagnétique avec défaut externe ;
- ▶◀ La troisième application traite un exemple d'un tube magnétique avec défaut externe ;
- ▶◀ La quatrième application aborde une application sur un tube magnétique avec défaut interne;
- ▶◀ La cinquième application examine un tube amagnétique avec défaut externe, associé avec le déplacement du capteur.

Pour les quatre premiers cas, on détermine la valeur de l'impédance pour une seule position, par contre pour le cinquième cas le capteur balaye tout le tube. Pour tester les performances du capteur une application pour la variation de la largeur du défaut sera illustrée.

Comme le système considéré est caractérisé par une symétrie axiale et un plan de symétrie à la demi-longueur du tube, le domaine d'étude peut être réduit au quart de la coupe axiale du tube, ce qui restreint considérablement la taille des matrices et par conséquent le temps de calcul.

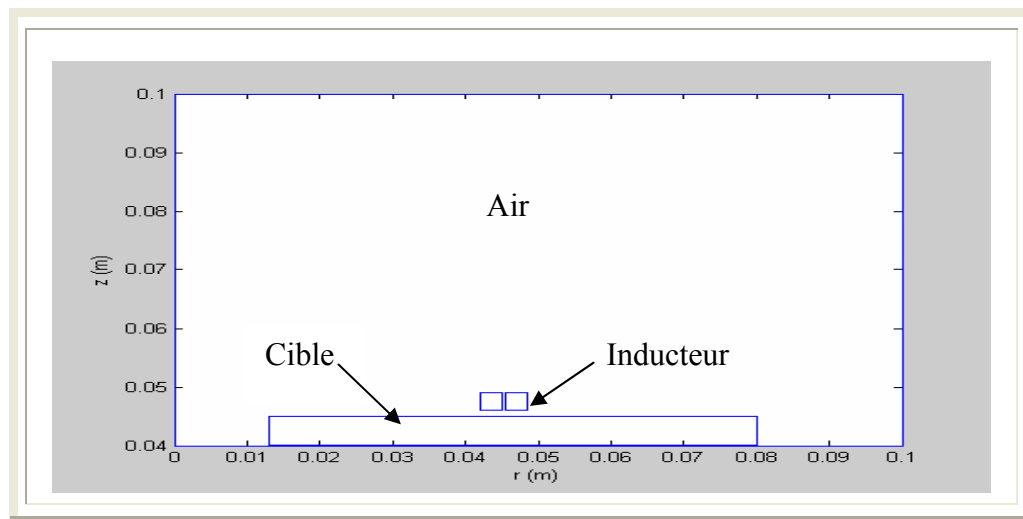
#### 4.1.3 Présentation et définition du modèle d'étude

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 qui peut être aussi grande que l'exigence de la précision. La figure (4.3) illustre le dispositif à étudier constitué d'un tube cylindrique creux.



**Figure 4.3** Modèle complet en coupe et en perspective

La figure 4.4 montre le quart du dispositif limité par le domaine de résolution, qui se compose d'un inducteur, pièce conductrice et l'air.



**Figure 4.4** Domaine de résolution

Les conditions aux limites associées à l'équation électromagnétique (3.26) sont du type de Dirichlet ( $A=0$ ). La figure (4.5) montre le maillage du domaine d'étude. Nous avons affiné ce maillage au niveau de la pièce et de l'inducteur pour avoir la meilleure précision possible.

## 4.2 Maillage du domaine d'étude

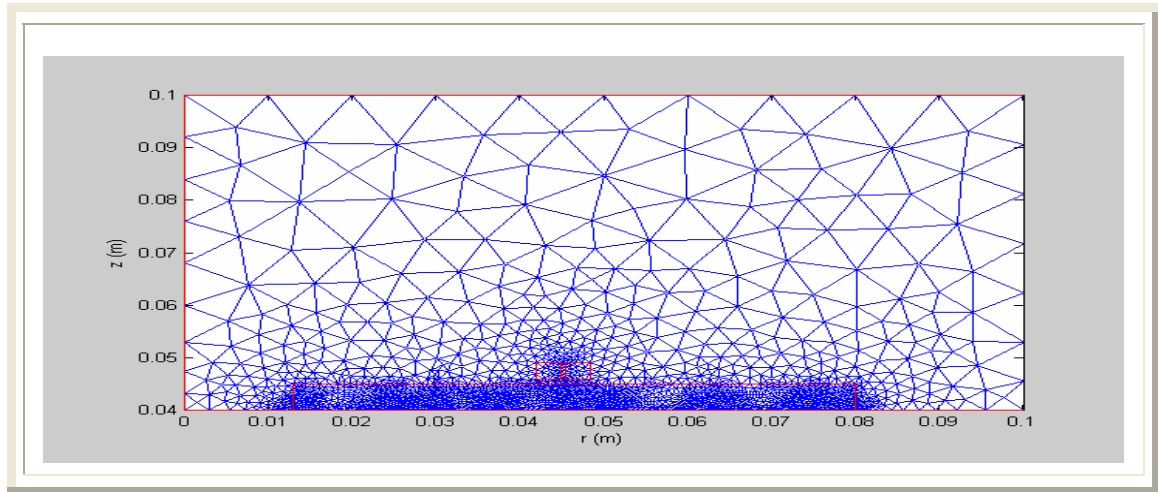
On utilise le mailler de Matlab au domaine d'étude présenté par la figure (4.5), il en résulte trois matrices caractéristiques suivantes:

- 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.

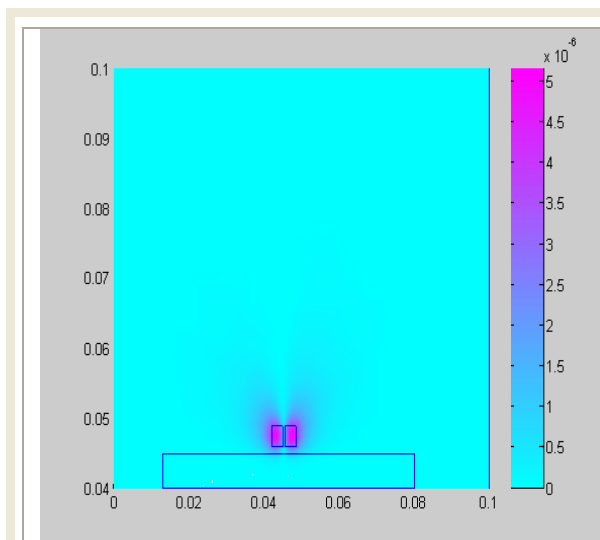
Le maillage obtenu est présenté sur la figure, (4.5).



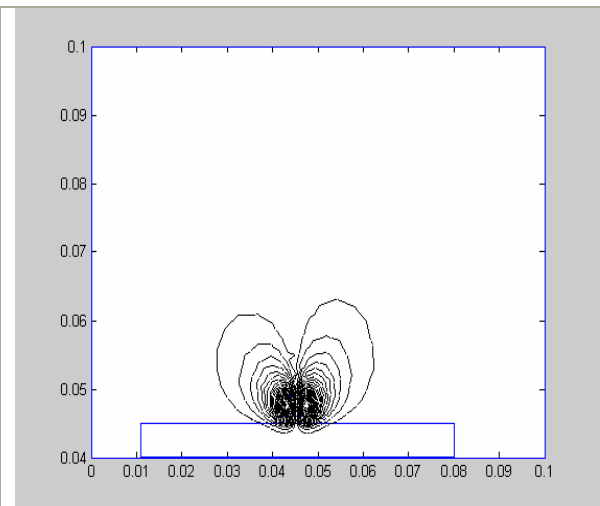
**Figure 4.5** Maillage du domaine de résolution

### 4.3 Simulation d'un (capteur – tube amagnétique) sans défaut

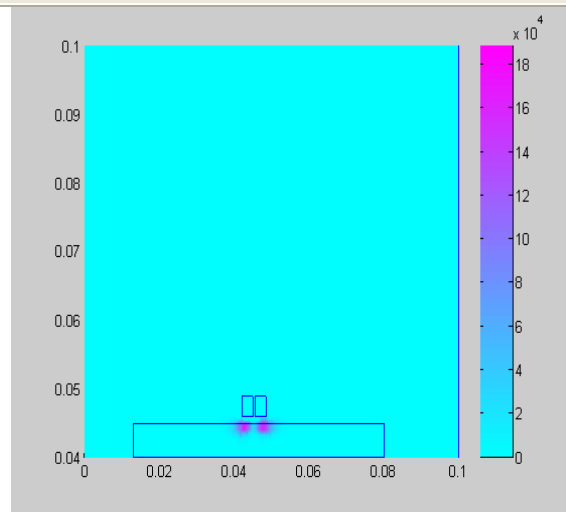
Pour la première application, nous avons choisi de tester un tube amagnétique sans défaut caractérisé par une perméabilité égale à l'unité, une conductivité élevée  $36.7 \cdot 10^6$  MS, excité par un courant sinusoïdal de densité de courant  $J = 2.67 \cdot 10^6$  A/m<sup>2</sup> et une fréquence de 10 kHz. Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous



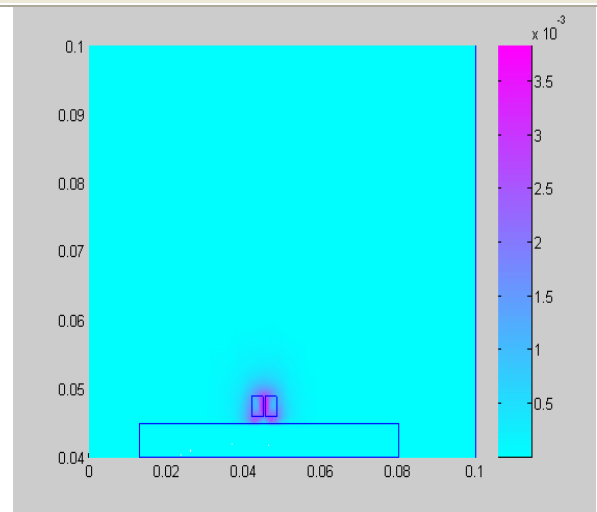
**Figure 4.6** Représentation du Potentiel vecteur



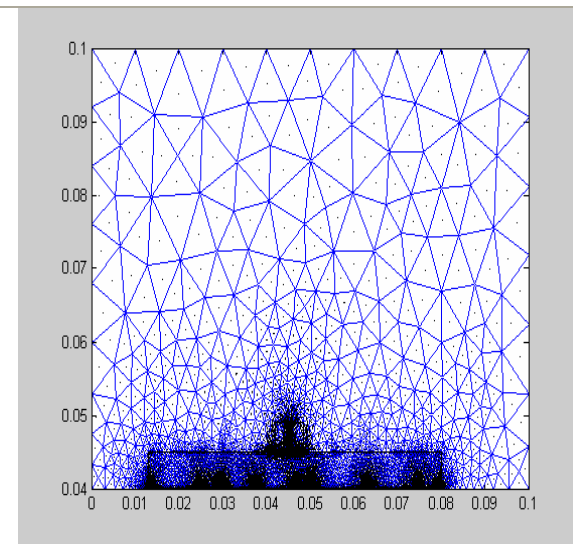
**Figure 4.7** Circulation des lignes du champ



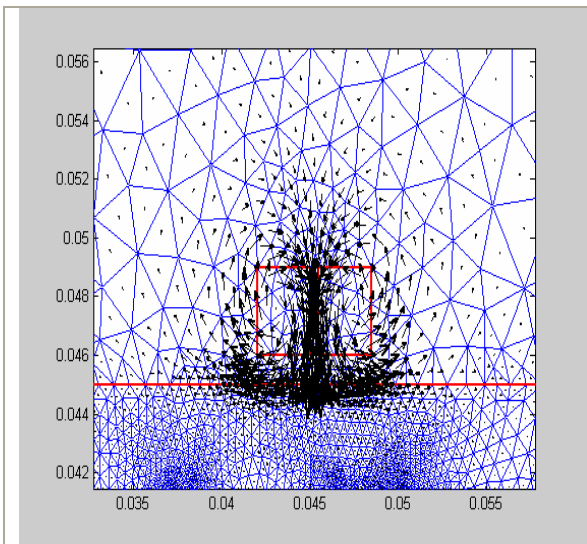
**Figure 4.8** Distribution de la densité des courants induits



**Figure 4.9** Représentation de l'induction magnétique



**Figure 4.10** Représentation des vecteurs d'induction  $B$



**Figure 4.11** Zoom des vecteurs d'induction

### 4.3.1 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un tube amagnétique sans défaut sont illustrés par un ensemble de figures.

La figure (4.6) correspond à la distribution du potentiel vecteur  $A$ . Elle montre une forte concentration de ce dernier au niveau de l'inducteur avec des faibles valeurs, et cela est dû à l'utilisation d'une fréquence élevée.

La figure (4.7) montre la distribution des lignes de champ. Ces derniers restent au niveau du capteur et leurs pénétration dans la pièce reste très minimale, cela traduit par l'effet de la profondeur de pénétration, ou en d'autre termes c'est l'effet de l'utilisation d'une fréquence élevée d'une part, et d'autre part la nature de la cible amagnétique jouant un rôle similaire.

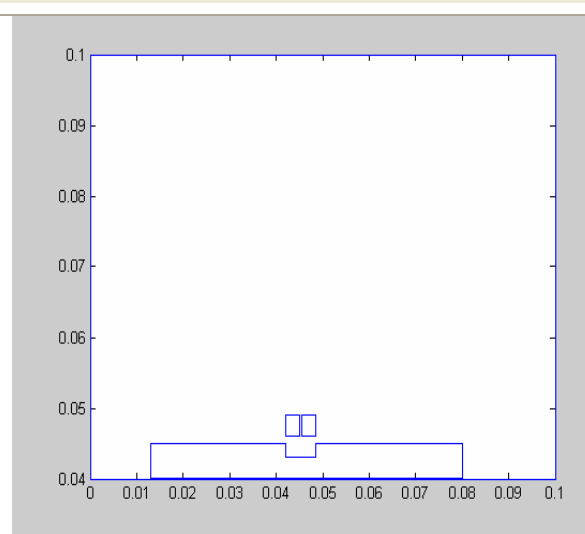
La figure (4.8) montre la distribution des courants induits à la surface. On constate que leurs valeurs sont élevées, car la conductivité de la cible amagnétique est importante ( $j = \sigma \cdot 2\pi \cdot f \cdot A$ ) mais sont relativement faibles comparativement aux courants inducteurs.

La figure (4.9) montre la distribution des vecteurs d'induction magnétique. Ces derniers sont concentrés au niveau des bobines, sans possibilité de pénétrer à l'intérieur de la plaque à cause de nature du matériau et de l'effet de la fréquence.

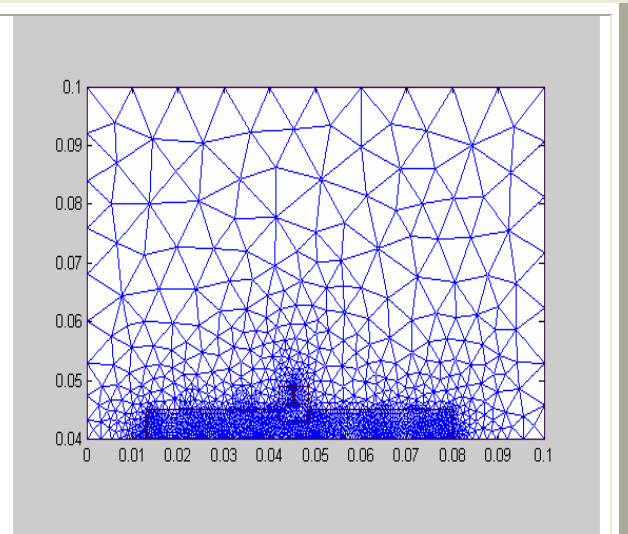
La figure (4.11) montre le zoom des vecteurs d'induction magnétique qui tournent autour des deux bobines dans des sens opposés à cause de l'excitation inverse des deux bobines.

#### 4.4 Simulation d'un (capteur-tube amagnétique) avec défaut externe

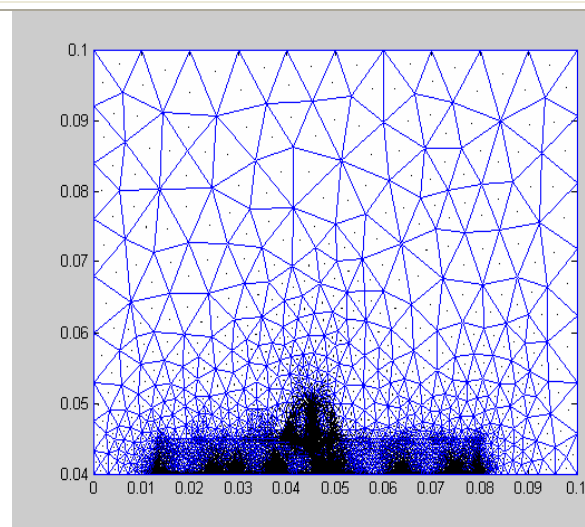
La deuxième application, s'appelante sur le même tube amagnétique, mais cette fois ci ce dernier est endommagé par un défaut géométriquement uniforme sur la surface externe du tube de profondeur 2mm. Les résultats de simulations sont illustrés par :



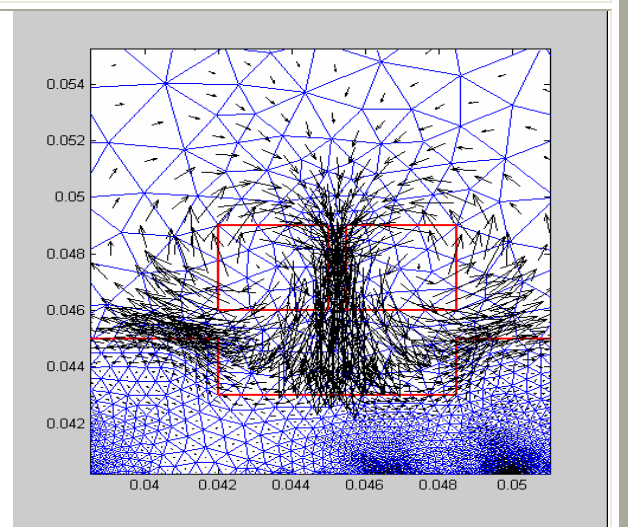
**Figure 4.12** Géométrie du dispositif avec défaut



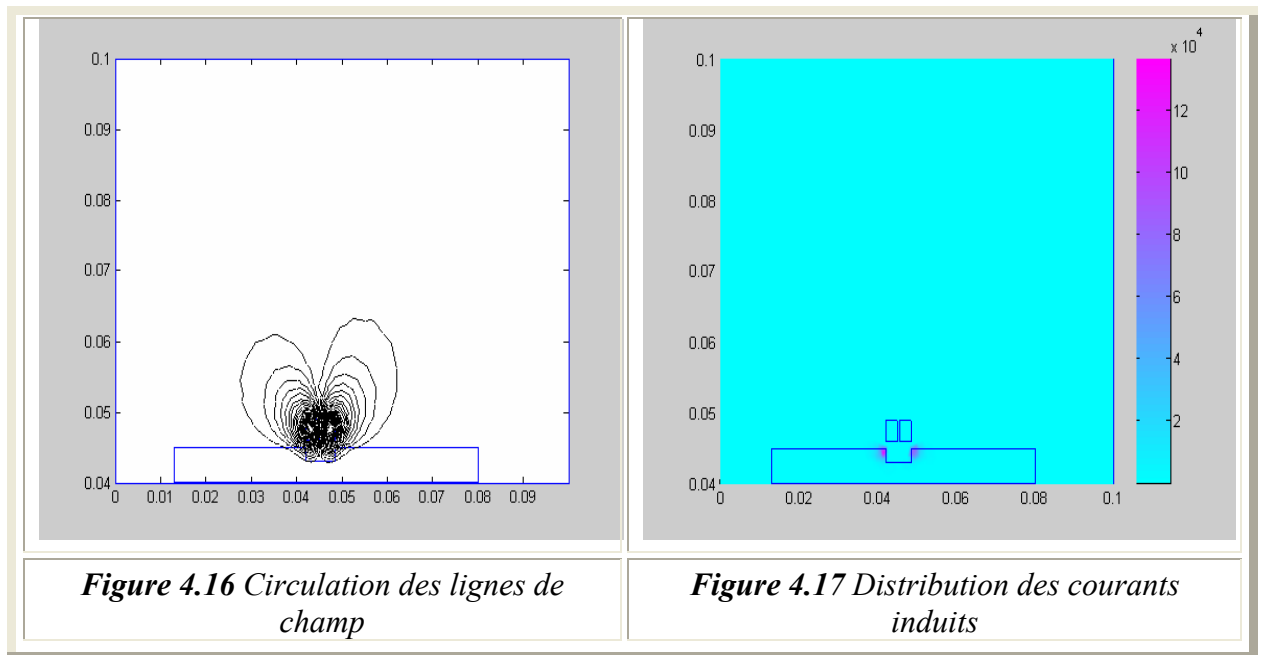
**Figure 4.13** Maillage du dispositif avec défaut



**Figure 4.14** Représentation des vecteurs induction magnétique **B**



**Figure 4.15** Zoom des vecteurs induction magnétique **B**



#### 4.4.1 Interprétation des résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un tube amagnétique avec défaut sont présentés comme suit :

Les figures (4.14) et (4.16) montrent la distribution des vecteurs d'induction magnétique et du champ magnétique. On constate que ces derniers restent concentrés au niveau de l'inducteur et embrassent les surfaces internes du défaut, car ce dernier est caractérisé par une faible perméabilité.

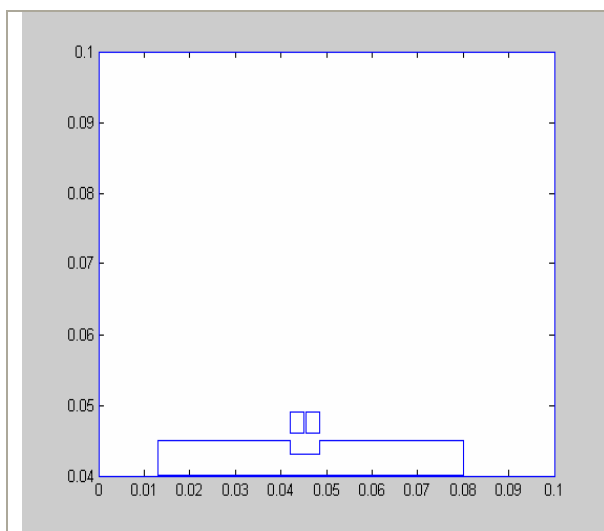
La figure (4.17) montre nettement que :

Les densités de courant élevées apparaissent à proximité de la surface de la plaque (effet de peau). Les densités importantes sont à la verticale de la sonde, c'est-à-dire aux endroits les plus proches de la bobine.

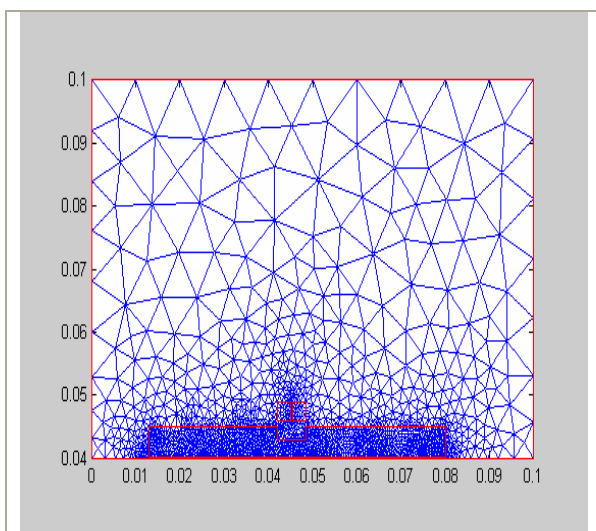
Les densités de courant dans la plaque et dans la bobine sont de signe opposé, ce qui rappelle la loi de Lenz : le courant induit s'oppose par ses effets à la cause qui lui donne naissance. De plus, la densité de courant induit est en valeur absolue inférieure à la densité de courant dans la bobine, ce qui semble intuitivement logique.

#### 4.5 Simulation d'un (capteur-tube magnétique) avec défaut externe

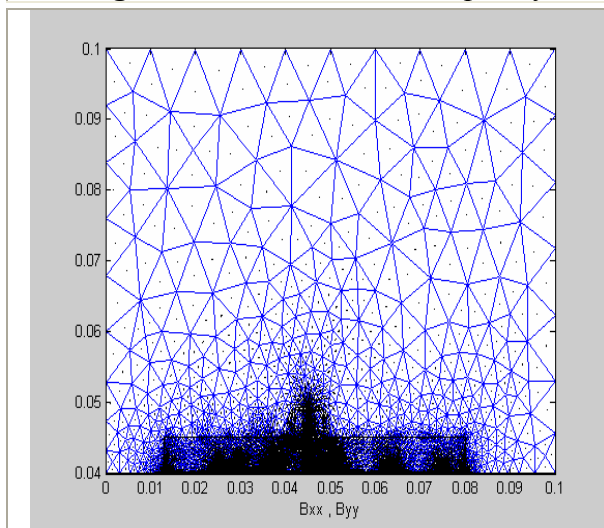
Les fissures doivent être présentés à des surfaces internes ou externes des matériaux amagnétiques comme sur les surfaces internes ou externes des matériaux magnétiques. La cause de ces derniers sont multiples (corrosion, humidités, longue durée d'entraînement...). Dans cette section on s'intéresse à la simulation d'un tube magnétique endommagé par une fissure de profondeur 2mm. Les résultats obtenus sont illustrés par :



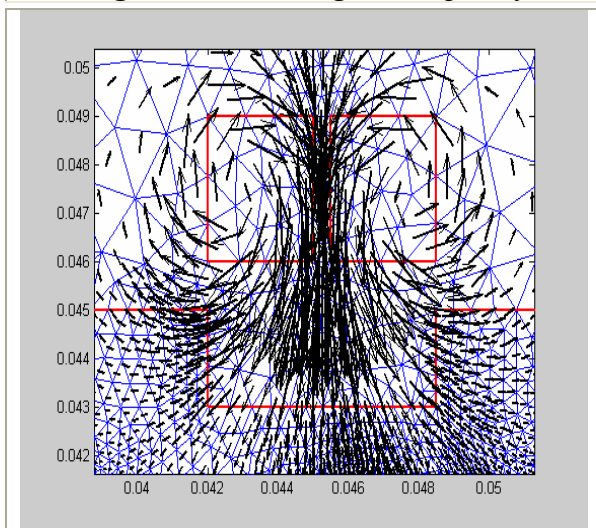
**Figure 4.18** Géométrie du dispositif



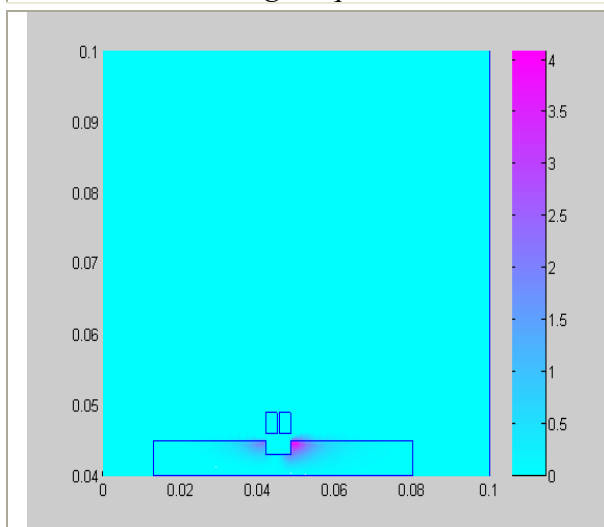
**Figure 4.19** Maillage du dispositif



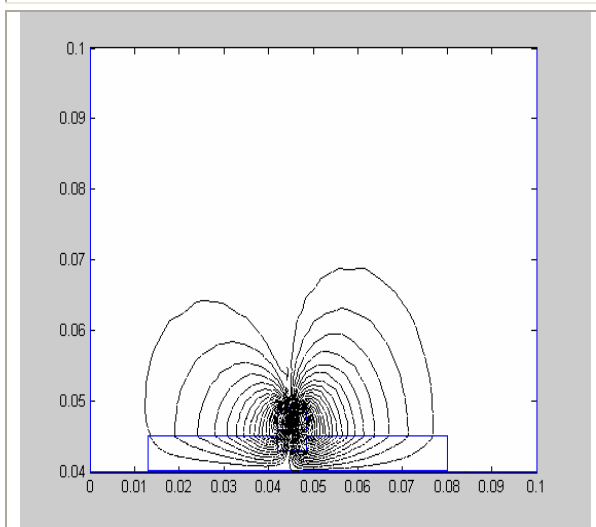
**Figure 4.20** Distribution Induction magnétique  $B$



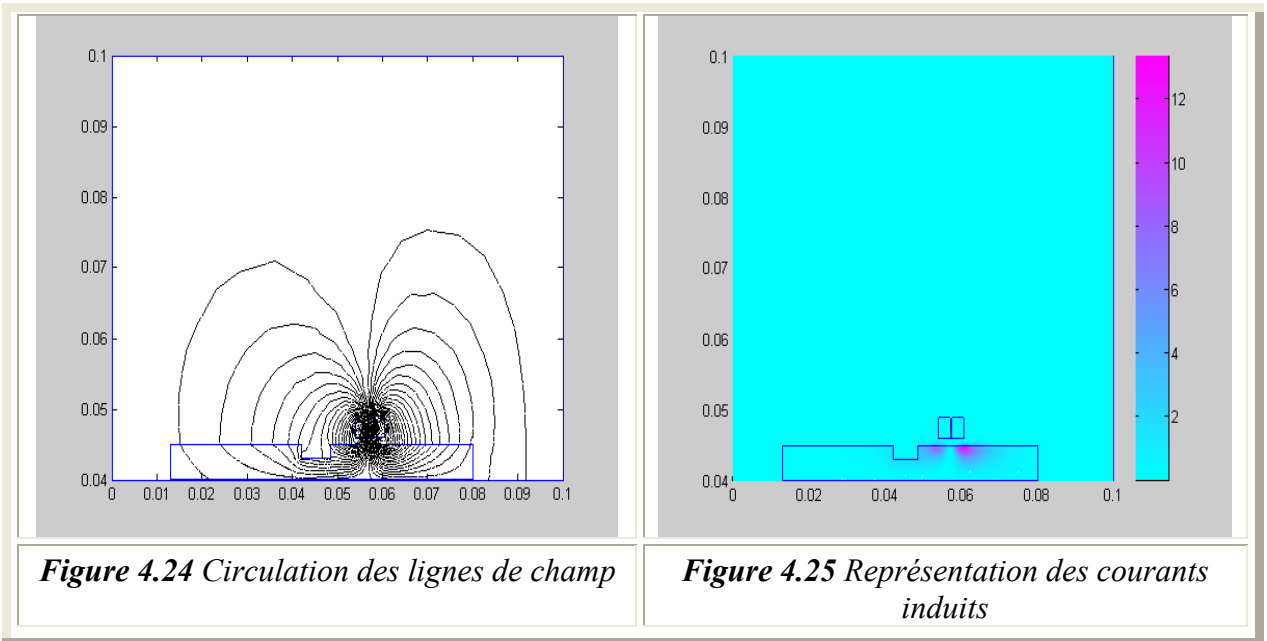
**Figure 4.21** Zoom de l'induction  $B$



**Figure 4.22** Représentation des courants induits



**Figure 4.23** Circulation des lignes de champ



#### 4.5.1 Interprétation des résultats

Les premières constatations, qu'on peut tirer de la deuxième partie de notre simulation sont :

↳ L'effet de la nature de la cible (perméabilité élevée) sur les grandeurs magnétiques, à savoir les vecteurs d'induction magnétique et lignes du champ, est nettement supérieur par rapport au cas du tube amagnétique, cela est illustré par une forte pénétration des lignes du champ et les vecteurs induction magnétique dans la cible. Voir les figures (4.21) et (4.23).

Les densités du courant induit dépendent toujours de la loi de Lenz, elles sont fortement concentriques à l'axe vertical du capteur, ce qui est vrai, mais avec de faibles valeurs, à cause de la nature du matériau sous test (conductivité faible), figure (4.22).

La figure (4.24) montre clairement la circulation des lignes du champ, qui sont canalisés dans la cible sans traverser le défaut caractérisé par une faible perméabilité par rapport à la cible.

#### 4.6 Simulation d'un (capteur-tube magnétique) avec défaut interne

Comme le capteur utilisé précédemment dans la simulation du défaut situé en face de sa dernière, on peut l'utiliser dans le cas où il se positionne à l'intérieur du tube, qui est un autre problème rencontré dans le domaine du contrôle non destructif. Le défaut a les mêmes dimensions que le cas précédent (2mm), avec une fréquence d'excitation est toujours fixée à 10 kHz. Les résultats de simulation pour un tube magnétique sont illustrés par les figures suivantes :

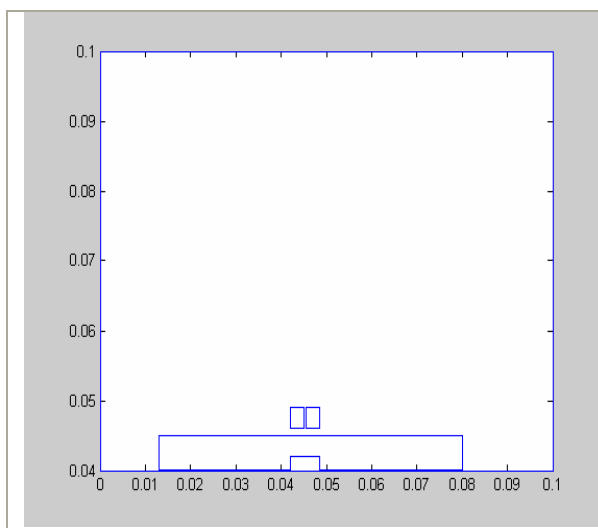


Figure 4.26 Géométrie du dispositif

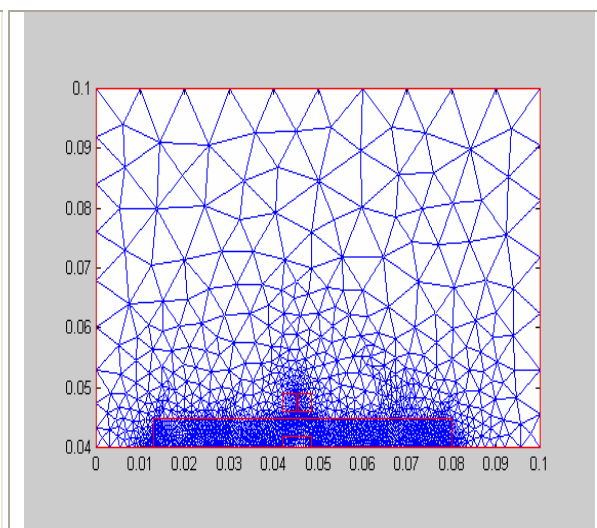


Figure 4.27 Maillage du dispositif

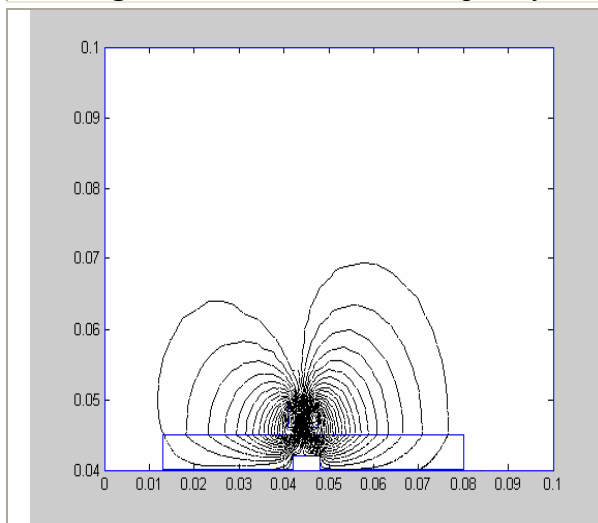


Figure 4.28 Circulation des lignes du champ

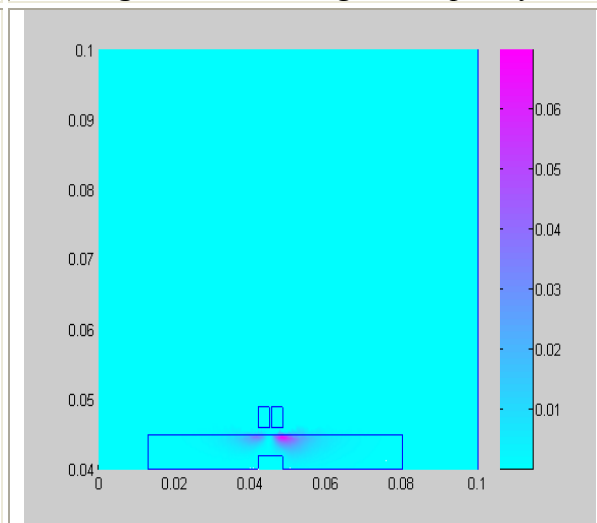


Figure 4.29 Représentation des courants induits

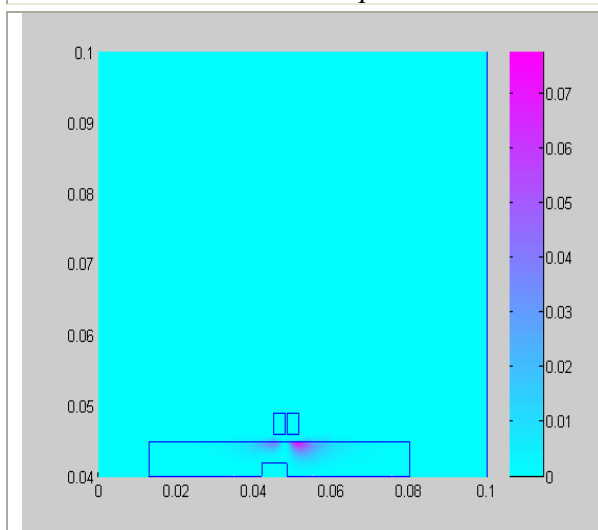


Figure 4.30 Représentation des courants induits capteur décalé

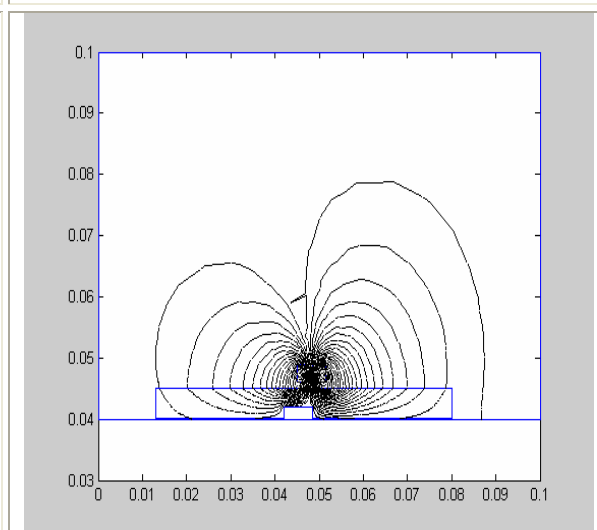
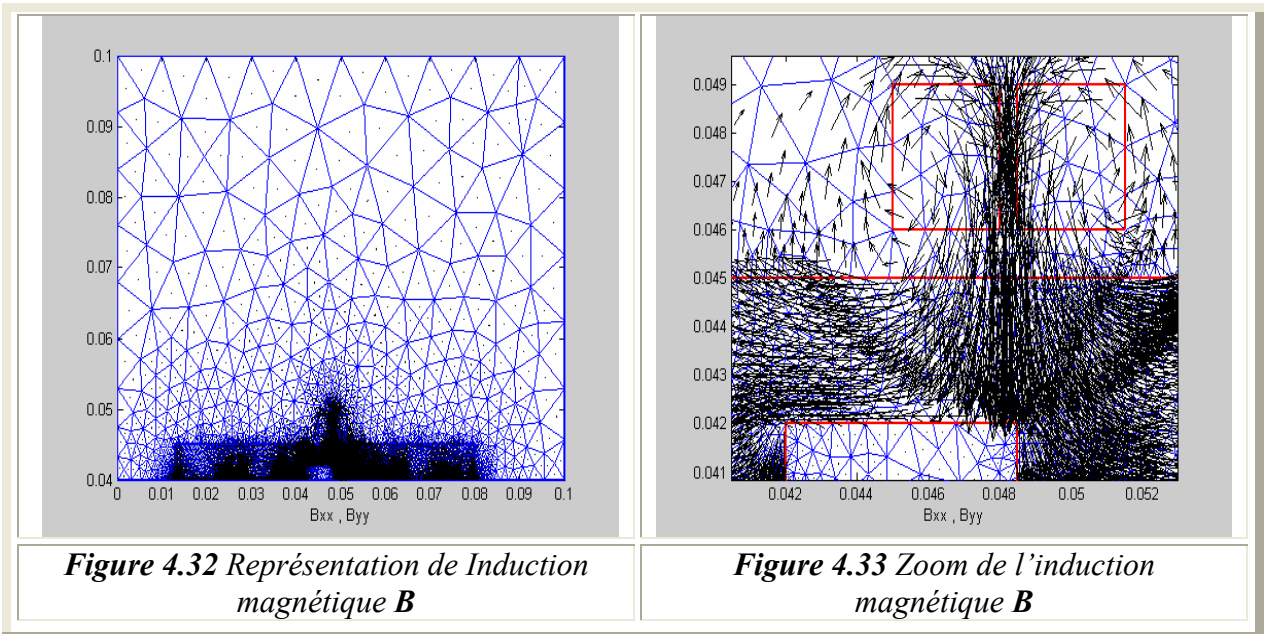


Figure 4.31 Circulation des lignes de champ





#### 4.6.1 Interprétation des résultats

La figure (4.28) représente les lignes du champ, on y constate une forte pénétration à cause de la forte perméabilité caractérisant le matériau, une déviation des lignes du champ est remarquée au niveau du défaut ce qui est logique car ce dernier est caractérisé par une perméabilité faible devant celle du matériau considéré (ferrite).

Les courants induits qui sont illustrés par la figure (4.29) pénètrent dans le tube, mais n'atteignent pas le défaut du fait de l'effet de peau (fréquence élevée).

La figure (4.30), illustre les courants de Foucault, mais cette fois-ci le capteur dans une nouvelle position, ses derniers pénètrent dans l'épaisseur du tube, la forte pénétration remarquée engendré par la bobine de gauche, mais toujours les courants d'induits ne s'atteignent pas le défaut. Par contre les lignes du champ présentent une forte pénétration. Une inégalité dans la répartition des lignes de champ est constatée, du fait du décalage du capteur vers la gauche.

La trajectoire de l'induction magnétique  $\mathbf{B}$  ainsi que son Zoom sont illustrés par les figures (4.32) et (4.33), on constate une trajectoire circulaire de l'induction magnétique au niveau des bobines.

Les valeurs de la variation de l'impédance pour les différents cas de simulation capteur/cible pour une seule position sont résumées dans le tableau ci suivant :

| Type du Tube \ Impédance | Tube sans défaut amagnétique | Tube avec défaut amagnétique | Tube avec défaut magnétique | Tube avec défaut interne magnétique |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Z ( $\Omega$ )           | 0.0546                       | 0.057                        | 3.2                         | 2.0269                              |

**Tableau 4.1** Résultats de simulation capteur/cible



La fiabilité de contrôle par Courant de Foucault repose sur l'évaluation de la variation d'impédance. D'après les résultats (Tableau 1), on remarque que l'impédance au niveau du défaut pour un matériau amagnétique est très faible (pratiquement nulle  $Z=0.0546 \Omega$ ), à cause de l'augmentation de la conductivité (résistivité faible). Elle augmente légèrement pour le même matériau à cause de la présence du défaut.

Par contre dans le cas d'un matériau magnétique avec défaut externe, l'impédance à une valeur élevée, cela est dû à la faible valeur de la conductivité du matériau d'une part, et d'autre part de la valeur importante de l'épaisseur de peau. En outre pour un défaut interne l'impédance diminue étant donné que ce défaut est éloigné par rapport au capteur. Finalement on peut dire que si nous cherchons un défaut en profondeur, on doit générer une fréquence faible (épaisseur de peau importante), [31]. Par contre, pour contrôler un défaut en surface, on excitera le capteur par des fréquences élevées.

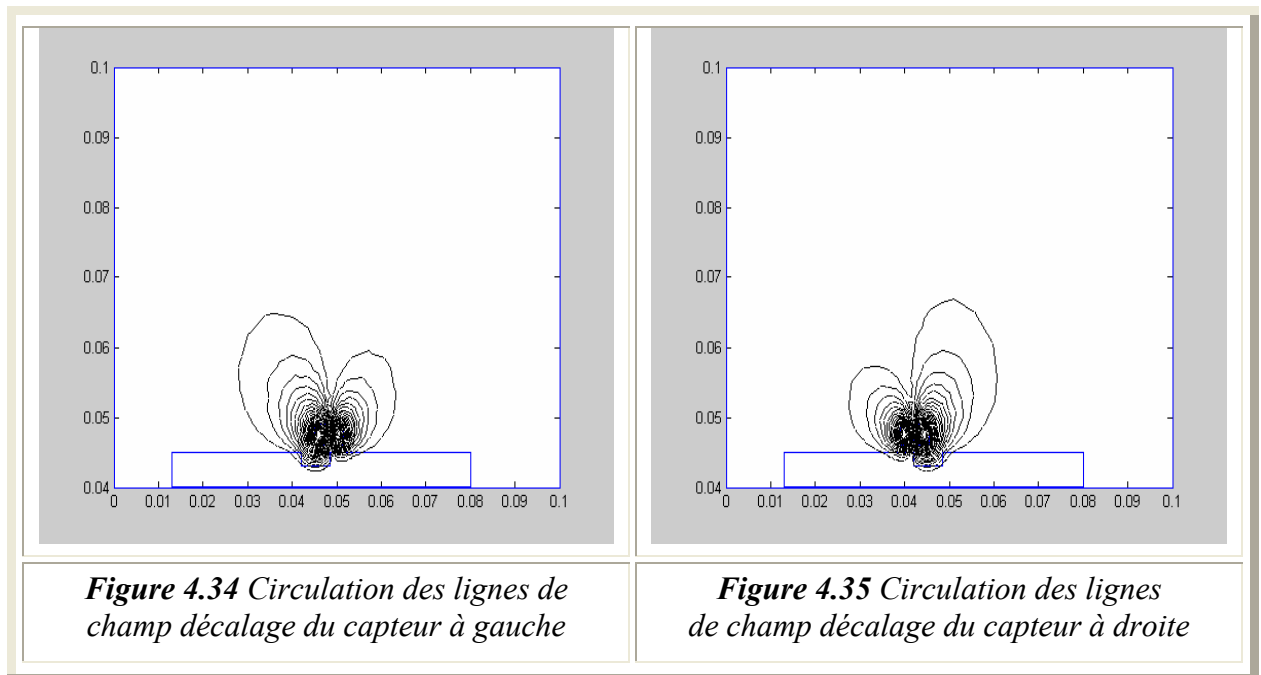
#### **4.7 Simulation d'un (capteur- tube amagnétique) avec défaut externe avec déplacement du capteur**

La détermination de l'impédance dans une seule position n'est pas suffisante pour détecter la présence ou l'absence du défaut. Pour cette raison qu'on n'est obligé de faire le déplacement du capteur, où ce déplacement se fait par plusieurs méthode (méthode de bande, méthode de macro élément et la répétition du maillage qui sera utilisé dans notre travail).

Du côté nature, le défaut se traduit soit par une absence de matière ou une anomalie non conductrice. Pour simuler la détection de ce défaut, le capteur est supposé en déplacement le long du tube amagnétique.

A chaque pas de déplacement, nous recueillons l'impédance du capteur, pour éviter les effets de coin causé par les extrémités du tube, nous faisons déplacer le capteur à partir d'une position où se dernier voit le tube comme sain et uniforme. La position choisie est ( $x = 30$  à  $60\text{mm}$ ).

Nous présentons dans cette section l'allure de l'impédance pour trois valeurs différentes de la fréquence : 10 kHz, 100kHz et 240kHz. Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous :



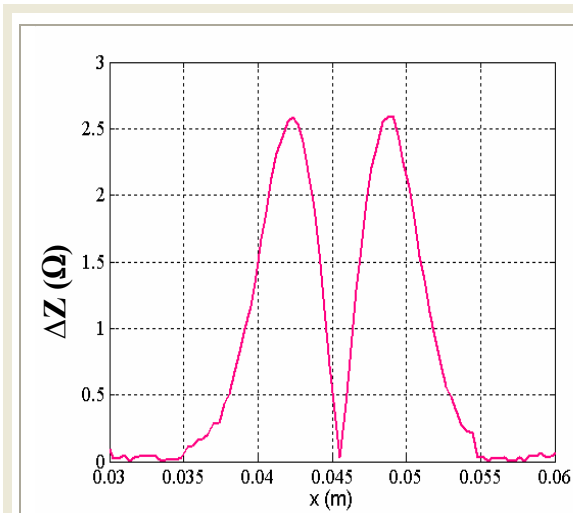
Plus le capteur s'approche du défaut, plus l'impédance augmente, quand le capteur atteint la position indiquée par la figure (4.34), une variation de (lift off) distance capteur/cible traduit par l'apparition du premier pic de l'impédance, le deuxième pic apparaît lorsque le capteur sera positionné selon la figure (4.35), le minimum de l'impédance est atteint lorsque les deux bobines sont au milieu du défaut.

L'organigramme du programme développé sous Matlab et PDE tool books est illustré par la figure (4.36) suivante :

#### 4.8 Allure de l'impédance pour trois fréquences différentes

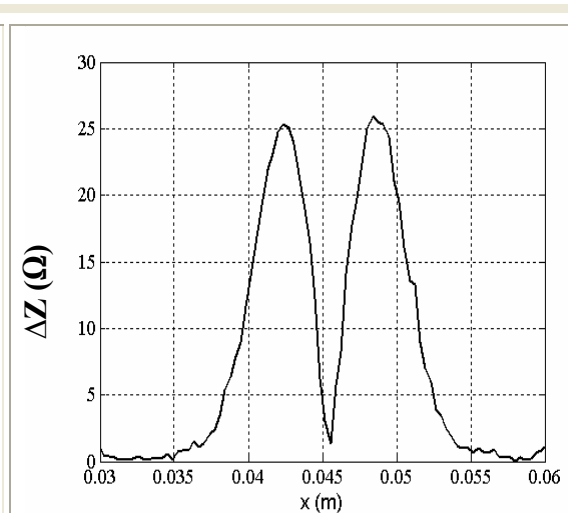
Comme la fréquence est l'un des paramètres affectaient directement l'impédance du capteur, trois essais à trois valeurs de fréquences différentes ( $f = 10, 100$  et  $240$  kHz) constitue l'objectif de cette partie de notre travail. Et comme le contrôle par courants de Foucault exige l'emploi des fréquences un peu élevées, (détection de défauts surfaciques). Après 210 itérations les résultats de simulation des allures de la variation de l'impédance sont données comme suit :

**Allure de l'impédance à  $F = 10$  kHz**



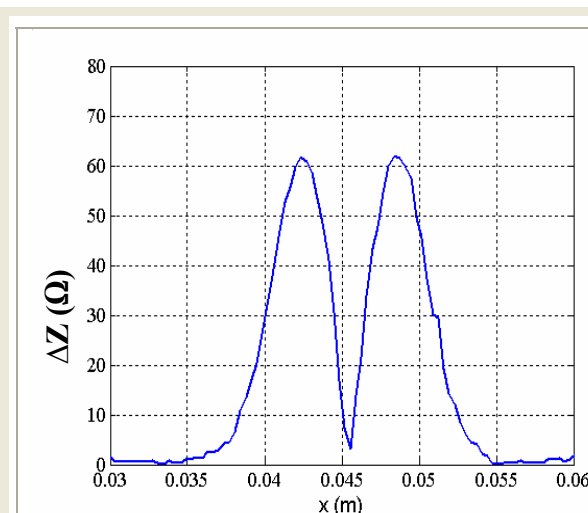
**Figure 4.37** Allure de  $\Delta Z$  pour  $F = 10$  kHz

**Allure de l'impédance à  $F = 100$  kHz**



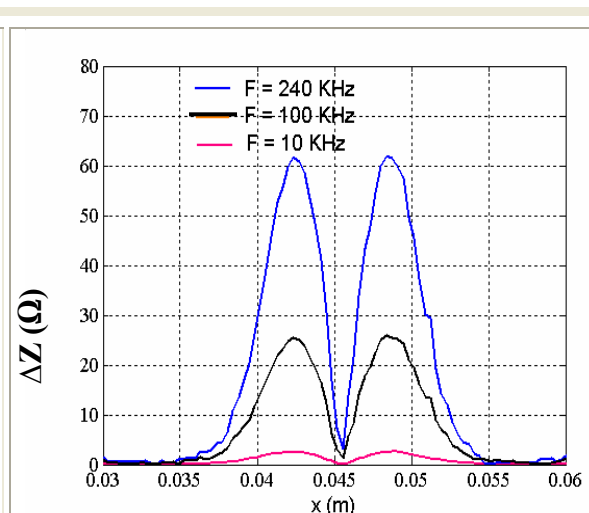
**Figure 4.38** Allure de  $\Delta Z$  pour  $F = 100$  kHz

**Allure de l'impédance à  $F = 240$  kHz**



**Figure 4.39** Allure de  $\Delta Z$  pour  $f = 240$  kHz

**Allure de L'impédance pour  $F = 10, 100$  et  $240$  kHz**



**Figure 4.40** Allure de  $\Delta Z$  pour  $F = 10, 100$ , et  $240$  kHz.

On sait que l'impédance complexe a deux parties, une partie réelle donnée par la résistance et une partie imaginaire donnée par la réluctance. L'analyse des figures (4.37), (4.38) et (4.39),

montre que plus la fréquence est élevée plus l'impédance  $Z$ , donnée par la différence entre les deux impédances constituant le capteur, augmente. Cette augmentation est due d'une part à l'effet de peau étant très important ( $\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma\mu\pi f}}$ ) et d'autre part, à l'approche du défaut.

La figure (4.40) regroupe les allures des courbes d'impédance pour trois fréquences différentes ( $f=10, 100$  et  $240$  kHz).

#### 4.9 Effet d'un défaut externe sur l'impédance

L'effet du défaut externe sur l'impédance  $Z$  dans le cas d'un tube amagnétique pour trois profondeurs 1, 2 et 3 mm à une fréquence de 10 kHz est donné par les figures (4.41-4.44)

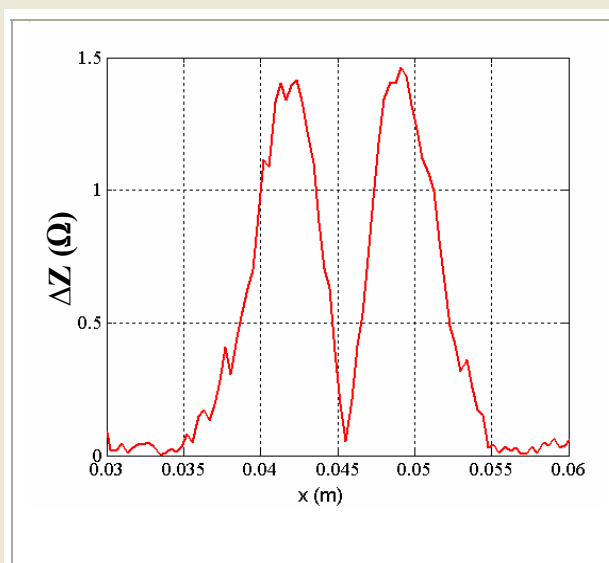


Figure 4.41 Allure de  $\Delta Z$  pour  $h=1$ mm

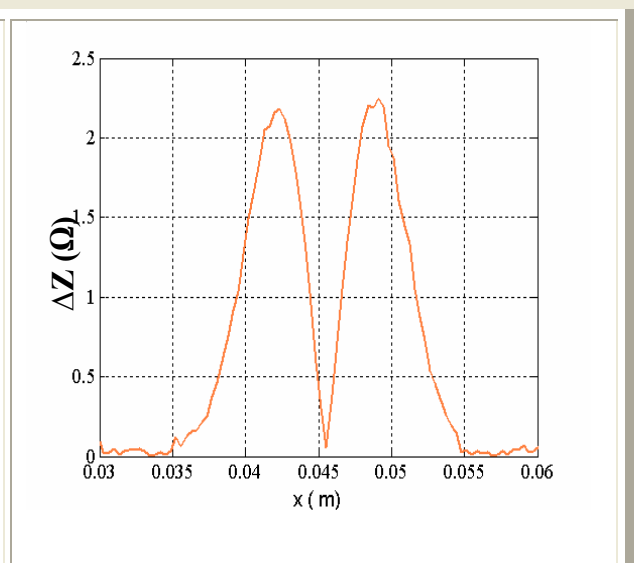


Figure 4.42 Allure de  $\Delta Z$  pour  $h=2$ mm

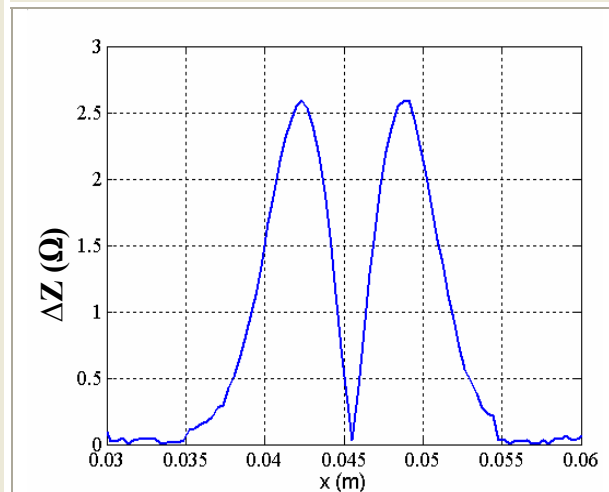


Figure 4.43 Allure de  $\Delta Z$ ,  $h=3$ mm

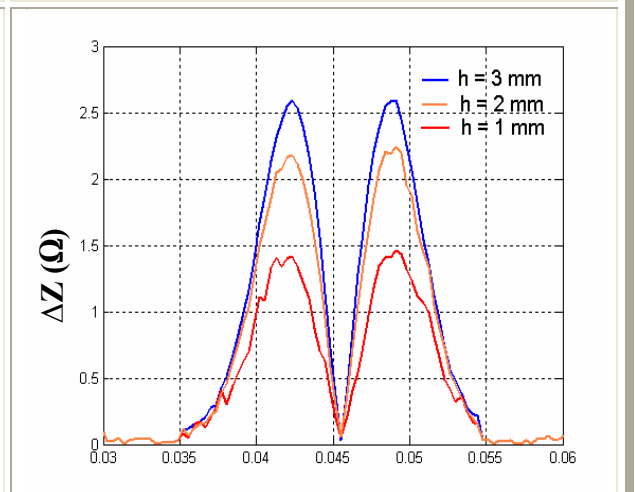
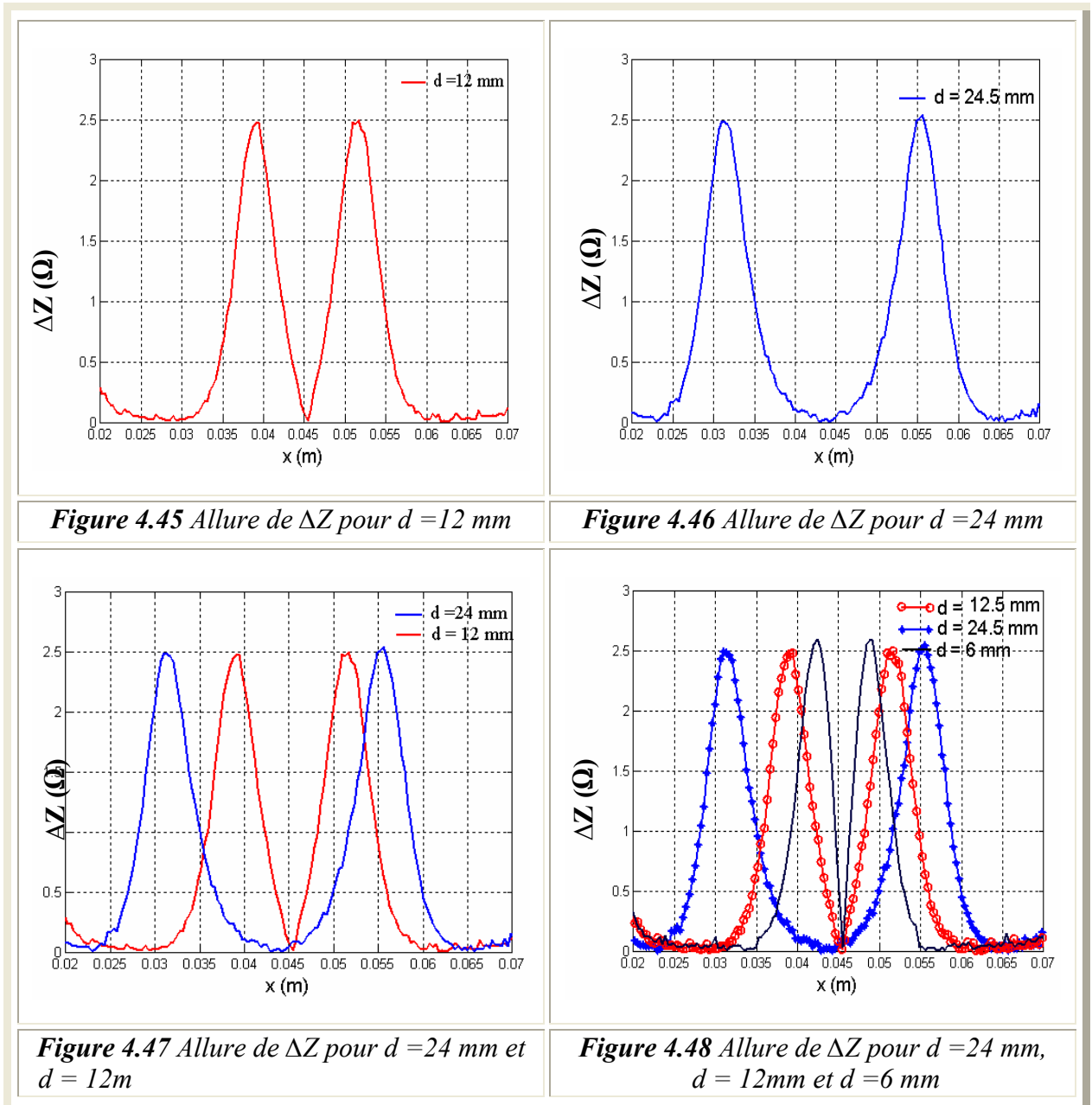


Figure 4.44 Allures de  $\Delta Z$  pour  $h=1, 2$ , et  $3$ mm

### 4.9.1 Interprétation des résultats de simulation

La présence de défaut perturbe la trajectoire des lignes du champ ce qui est traduit par la variation de l'impédance du capteur. La faible valeur de l'impédance est constatée sur la figure (4.41) qui correspond à un défaut de profondeur de 1mm. Plus le défaut est profond (effet de bord) plus la variation de l'impédance est importante, comme l'illustre par les deux figures (4.42) et (4.43), ces résultats sont en concordance avec les celle du référence [31].

### 4.9.2 Test des performances du capteur pour différents défauts



Pour tester les performances du capteur, on a simulé l'ensemble capteur/cible pour un défaut de largeur variable comme l'illustre les figures (4.45-4.47). La figure (4.48) regroupe trois défauts à partir de ces essais. Deux remarques peuvent être constatées :

- ▶◀ La largeur de défaut n'a aucune influence sur l'amplitude de l'impédance.
- ▶◀ Les défauts de géométrie inférieure à la géométrie du capteur sont détectables mais avec une amplitude faible, donc pour résoudre ce problème, et détecter les défauts de cette taille il faudrait des capteurs de même dimensions.

#### 4.10 Conclusion

*Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des différents cas de simulation. Cette étude comprend cinq cas de simulation de l'ensemble capteur/cible et on peut conclure que :*

▶◀ *Le calcul de l'impédance dans un seul point ne suffit pas de confirmer la présence ou l'absence d'un défaut pour les deux types de matériaux (amagnétique, magnétique), ce qui conduit au calcul de l'impédance le long du tube.*

▶◀ *La détection d'un défaut externe nécessite l'excitation du capteur par des fréquences élevées.*

▶◀ *La position de défaut (interne, au milieu ou externe) a un grand effet sur l'impédance.*

*Les résultats obtenus montrent la grande sensibilité du capteur différentiel à la détection des défauts surfaciques.*

*L'utilisation de ce capteur dans le domaine industriel est très répondeuse à cause de sa précision (erreur minimale) et son faible coût.*

*L'inconvénient majeur de ce type de capteur réside dans le fait qu'il est incapable de détecter un défaut situé à mi chemin entre les deux bobines, et pour le détecter on aura besoin d'une modélisation du système en trois dimensions, on espérons que les grandes axes cibler pour ce thème sont touchés, les perspectives pour la continuer de ce travail sont résumés dans la conclusion générale.*