



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

UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## MEMOIRE DE MAGISTERE EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Matériaux Electrotechniques

Présenté Par : **Wissem SLIMANE**

### THEME

# Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND)

Présenté et soutenu publiquement le : 14 / 02 / 2008  
Devant le Jury composé de:

**A. GUETTAFI**  
**A. BENOUDJIT**  
**B. ABDELHADI**  
**K. SERAIRI**  
**N. NAIT SAID**

**Prof. Université de Batna**  
**Prof. Université de Batna**  
**M.C. Université de Batna**  
**Prof. Université de Biskra**  
**M.C. Université de Batna**

**Président**  
**Rapporteur**  
**Co-Rapporteur**  
**Examineur**  
**Examineur**

## *Avant propos*

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

*J'adresse mes remerciements à :*

*Monsieur Azeddine Benoudjit, et Monsieur Bachir Abdelhadi tout deux Enseignants à l'université de Batna, rapporteur et co-rapporteur de ce mémoire, pour la confiance qu'ils m'ont faite en me proposant ce thème ainsi que leur aide et pour les précieux conseils qu'ils n'ont cessé de me prodiguer en toutes occasions.*

*Monsieur, Amor Guettafi, Professeur à l'université de Batna pour avoir accepté la présidence de mon jury, pour toutes ses qualités scientifiques et humaines*

*Monsieur Kamel Serairi, Professeur à l'université de Biskra, et monsieur Nasreddine Nait Said Maître de Conférence à l'université de Batna, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail et d'avoir honorer le jury par leurs présences.*

*Monsieur SALIM SRAIRI de l'université de Belfort, Monsieur Drid Said de l'université de Batna pour leurs aides documentaires qu'ils m'ont fournie. et leurs soutiens ininterrompus.*

*Je tiens encore à remercier :*

*Benhadda Nabil, Abdou Abdelhak, Samir Laggoun, Hawes Houcine, Bergoug Nassima pour leur aide amicale qui m'a permit de mener à terme ce travail.*

*A la fin, j'adresse toute ma profonde reconnaissance à mes parents pour leurs inconditionnels soutient tout au long de ces années d'études.*

*Je ne saurai terminer cette page de remerciements sans mentionner mes frères, ma sœur et son mari Azza Hamid ingénieur en hydraulique, chef de service à l'EPBA, qui ont tous laissés la marque de leurs encouragements à travers ce travail.*

# *DEDICACES*

*A mes parents,*

*A ma sœur et Mes frères*

*A mes amies*

*A mes collègues*

*Et*

*À toute ma famille*

## **Notions & Symboles**

## Notions et Symboles

CF	Courants de Foucault	
CCF	Capteur à courants de Foucault	
PEC	Courant de Foucault pulse (Pulsed eddy current)	
ECA	Capteur multiéléments à courants de Foucault (Eddy current array)	
ULA	uniforme linéaire array	
UCA	uniforme circuler array	
UPA	uniforme planair array	
MEF	Méthode des éléments finis	
$\vec{B}, B_z, B_y$	Vecteur d'induction magnétique, Coordonnée de $B$ selon les axes $Z$ et $Y$	$[T]$
$\vec{E}, E_\theta, E_x, E_y$	Champ électrique, Coordonnées de $\vec{E}$ selon les axes $U_\theta, X, Y$	$[V.m^{-1}]$
$\vec{H}, H_z, H_y$	Champ magnétique, Coordonnées de $\vec{H}$ selon les axes $X, Y$	$[A.m^{-1}]$
$\vec{A}, A_\theta, A_x, A_y$	Potentiel vecteur, Coordonnées de $\vec{A}$ selon les axes $U_\theta, X, Y$	$[Wb.m]$
$\vec{D}$	Densité de courant du déplacement.	$[A.m^2]$
$\vec{J}, J_\theta, J_x, J_y$	Densité de courant, Coordonnées de $\vec{J}$ selon les axes $U_\theta, X, Y$	$[A/m^2]$
$\rho$	Densité volumique de charge électrique	$[C.m^{-3}]$
$\mu$	Perméabilité magnétique	$[Hm^{-1}]$
$\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$	Perméabilité magnétique du vide	-
$\varepsilon$	Permittivité diélectrique	$[F.m^{-1}]$
$\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12}$	Permittivité diélectrique du vide	-
$\mu_r, \varepsilon_r$	Perméabilité magnétique relative du matériau, Permittivité diélectrique relative	-
$\sigma$	Conductivité électrique du matériau	$[\Omega^{-1}m^{-1}]$
$\eta$	Coefficient de remplissage	-
$j$	Base des nombres complexes ( $j^2 = -1$ )	-
$\omega$	Pulsation	$[rd.s^{-1}]$
$t$	Temps	$[s]$
$f, f_c$	Fréquence d'excitation, Fréquence caractéristique (Fréquence limite)	$[Hz]$
$\phi$	Flux émis par le CCF	$[Wb]$
$R, R_0, R_2, R_e$	Résistance, Résistance à vide, Résistance du primaire du transformateur, Résistance du secondaire du transformateur	$[\Omega]$
$X, X_0, X_e$	Partie imaginaire de l'impédance complexe $Z$	$[\Omega]$
$L, L_0, L_1$	Inductance, inductance du primaire du transformateur, inductance du secondaire du transformateur	$[H]$
$Z, Z_n, \Delta Z$	Impédance complexe, Impédance complexe normalisée, différence	$[\Omega]$

	d'impédance	
$\mathfrak{R}$	Réductance	$[Wb^{-1}.Atr]$
$P$	Perméance complexe	$[Wb.Atr^{-1}]$
$N$	Nombre de spires d'une bobine	$[tr]$
$i_{exc}$	Intensité du courant d'alimentation du circuit électrique	$[A]$
$V$	Tension d'alimentation du circuit électrique	$[V]$
$i_1, i_2$	Intensité des courants circulant dans le primaire et le secondaire du transformateur	$[A]$
$M, M_{12}, M_{13}$	Inductance mutuelle, Inductance mutuelle entre la première et la deuxième bobine, Inductance mutuelle entre la première et la troisième bobine.	$[H]$
$k$	Coefficient de couplage magnétique	-
$v$	Vitesse du mobile	$[m/s]$
$\delta$	Epaisseur de peau.	$[m]$
$d$	Lift-off	$[m]$
$\pi$	3.14	-
$e$	2.718	-
$\theta$	Angle	$[rd]$

---

# **Sommaire**

## TABLE DES MATIERES

### Nomenclature

### Introduction Générale

#### CHAPITRE UN

#### Techniques du CND

Introduction	01
1.1 Définition et intérêt du CND	01
1.2 Défauts et leur sources (origines)	01
1.2.1 Défauts internes	02
1.2.2 Défauts de surface	02
1.2.3 Origines des défauts	02
1.2.4 Caractéristiques des défauts	03
1.3 Techniques du CND	03
1.3.1 Procédés optiques	03
1.3.2 Ressuage	03
1.3.3 Radiologie	03
1.3.4 Ultrasons	04
1.3.5 Emission acoustique	04
1.3.6 Méthodes couplées	04
1.4 Procédé par courants de Foucault (CF)	04
1.4.1 Présentation des CF	06
1.2 Observation et description	06
1.4.3 Influence d'une bobine sur un conducteur	07
1.4.4 Epaisseur de peau	07
1.4.5 Principe du CND par CF	08
1.4.6 Paramètres significatifs	09
1.4.7 Principe de détection	09
1.4.8 Technique par courants pulsés	11
1.4.9 Avantages des courants pulsés	12
1.4.10 Technique multifréquences	12
1.4.11 Avantages et limites de la technique CF	13
Conclusion	13

---

**CHAPITRE DEUX****Multi-Capteurs et Capteur Multiéléments**

Introduction	14
2.1 Capteurs et transducteurs	14
2.1.1 Exemples de capteurs	15
2.2 Capteurs inductifs	15
2.2.2 Principe des capteurs inductifs	16
2.2.2.1 Cas de cible conductrice	16
2.2.2.2 Cas de cible magnétique	17
2.2.2.3 Cas général	17
2.3 Capteurs à courant de Foucault	17
2.3.1 Différentes géométries de sondes CF	17
2.3.2 Analogie avec le transformateur	19
2.3.3 Problèmes avec la CF conventionnelle	20
2.3.4 Exemples de structures complexes	20
2.4 Système multi-capteurs et capteurs multiéléments	20
2.4.1 Exemple d'un système multi-capteurs (Sonde multiéléments et caméra haute résolution)	21
2.4.1.2 Description générale du système	21
2.4.1.3 Caractérisation des défauts	22
2.4.1.4 Résultats	23
2.4.1.5 Perspectives du projet	23
2.4.2 Multi-capteurs à courants de Foucault	24
2.4.2.1 Technologie des courants de Foucault multiéléments	24
2.4.2.2 Qu'est ce qu'une sonde CF multiéléments?	25
2.4.2.3 Géométries d'une sonde CF multiéléments	25
2.4.2.3.1 Rangée linéaire uniforme	26
2.4.2.3.2 Rangée linéaire non uniforme	26
2.4.2.3.3 Rangée planaire	27
2.4.2.4 Interprétation du signal	28
2.4.2.5 Comparaison entre les techniques CF et CF multiéléments	28
2.4.2.6 Avantages des capteurs à courants de Foucault multiéléments	29
Conclusion	30

---

---

**CHAPITRE TROIS****Analyse par MEF et Simulation de la Détection par un CCF**

Introduction	31
3.1 Mise en équation du problème physique	31
3.2.1 Sans mouvement	31
3.2.1.1 Équations de Maxwell	32
3.2.1.2 Comportement des matériaux	32
3.2.1.3 Condition aux limites	33
3.2.1.4 Mise en forme de l'équation	33
3.2.1.4.1 Modèle à étudier (en 3D)	33
3.2.1.5 Méthodes de résolution	35
3.2.1.5.1 Méthodes analytiques	36
3.2.1.5.2 Méthodes numériques	36
3.2.1.6 Méthode des éléments finis	36
3.2.1.7 Organigramme de la MEF	37
3.2.1.8 Application de la MEF	38
3.2.1.9 Éléments finis 1 et 2D	38
3.2.1.10 Avantages et inconvénients	39
3.2.2 Prise en compte du mouvement	39
3.2.2.1 Méthodes hybrides	39
3.2.2.2 Méthodes de remaillage	39
3.2.2.3 Méthode avec surface de glissement	39
3.3 Détection avec un capteur à CF	40
3.3.1 Plaque saine	40
3.3.2 Plaque défectueuse	42
3.3.3 Déplacement	43
3.3.3.1 Notion d'impédance et différence d'impédance	43
3.3.3.2 Organigramme du programme établi	44
3.3.3.3 Dépendance des dimensions du défaut de celles du capteur	47
i. Effet de la variation de la géométrie du défaut	47
ii. Effet de la variation de la largeur du défaut sur la détection	49
iii. Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la détection	50
3.3.3.4 Forme du défaut	52
Conclusion	53

---

**CHAPITRE QUATRE****Simulation de la Détection par un Capteur Multiéléments à CF**

Introduction	54
4.1 Cas d'un cylindre	54
4.1.1 Effet de deux bobines adjacentes	54
4.1.1.1 Modèle à étudier	55
4.1.1.2 Modèle en 2D	55
4.1.1.3 Résultats et analyse	55
A. Cas sans défaut	55
B. Cas avec défaut	58
1. Organigramme du programme établi	60
4.1.2 Effet de trois bobines adjacentes	61
4.1.2.1 Modèle à étudier	61
4.1.2.2 Modèle en 2D	62
A. Cas sans défaut	62
B. Cas avec défaut	65
1. Organigramme du programme établi	65
4.1.3 Effet de la variation de la largeur du défaut	68
4.2 Cas d'une plaque	69
4.2.1 Modèle à étudier	69
4.2.2 Eléments finis en 3D	69
4.2.3 Représentation de la géométrie en 3D	72
4.2.4 Problème à étudier	72
4.2.4.1 Modèle en 2D	72
4.2.4.2 Organigramme du programme établi	73
4.2.4.3 Résultats et analyse	73
4.2.5 Effet du passage de la bobine par le défaut sur l'autre bobine	77
4.2.5.1 Systèmes équivalents	77
Conclusion	79
<b>Conclusion Générale</b>	
<b>Références Bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	

---

# **Introduction Générale**

## **Généralités et Problématique**

*Le contrôle non destructif (CND) des matériaux et des structures se situe dans le cadre général de l'amélioration de la qualité (lors de l'élaboration), de la sécurité (lors de la tenue en service) et concerne aussi des domaines très diversifiés. Si, au départ, son essor est venu des besoins de l'aéronautique et de l'industrie nucléaire, à l'heure actuelle, c'est une nécessité dans tous les secteurs.*

*Dans plusieurs secteurs industriels (aéronautique, nucléaire, ...) ils existe un besoin croissant pour le contrôle d'intégrité de pièces ou de matériaux complexes soumis à de fortes contraintes mécaniques, thermiques, ... Ceci conduit à une activité de recherche importante visant à développer des systèmes multi-capteurs permettant un contrôle rapide et fiable de ce type de pièces. [1,2, 3].*

*Le contrôle non destructif (CND) par capteurs à courants de Foucault est adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. En effet, il est simple à mettre en œuvre, robuste et sensible aux défauts de type manque de matière (fissures, inclusion, ...). La nécessité de contrôler des pièces de plus en plus complexes tout en améliorant l'efficacité économique conduit à concevoir des capteurs de plus en plus évolués. Un axe de recherche vise ainsi à développer des systèmes capteurs multiéléments innovants. Pour ce faire on utilise la modélisation électromagnétique qui permet de simuler l'interaction capteur-pièce testée et de définir une structure de capteur adaptée à un problème donné (sensibilité à un défaut donné, résolution spatiale, ...). Les voies à explorer concernant les architectures de capteurs sont multiples : structure du dispositif d'excitation, géométrie du circuit magnétique associé, nature et disposition des capteurs, [2,3, 4].*

*C'est dans ce cadre que s'inscrit la problématique de ce travail.*

## **Objectifs**

*Ce travail vise les objectifs suivants:*

- *Une recherche bibliographique sur le CND tout en mettant l'accent sur les techniques utilisant les Courants de Foucault, les multi-capteurs ainsi les capteurs multiéléments.*
- *Modélisation analytique de l'ensemble capteur-pièce et étude de la courbe  $\Delta Z$ .*
- *Élaboration d'un programme de calcul pour la simulation de différentes applications.*

*Concernant les capteurs multiéléments démunis des systèmes de multiplexage, dont porte l'intérêt de ce travail, les capteurs élémentaires (bobines) s'influent l'un sur l'autre à cause du*

---

*phénomène de mutualité. L'objectif principal de ce travail est la mise en évidence de se phénomène, et ses conséquences sur la détection.*

### ***Présentation du mémoire***

*Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :*

*Le premier chapitre sera dévoué à une recherche bibliographique concernant la technique à courants de Foucault après une revue générale sur les différentes techniques utilisées dans le CND.*

*Dans le deuxième chapitre, on présentera des notions concernant les capteurs inductifs à courants de Foucault, avec leurs principes, leurs différentes géométries existantes ainsi que leurs différents circuits magnétiques. Un aperçu sur les multi-capteurs et les capteurs multiéléments constituera la dernière partie de ce chapitre.*

*Le troisième chapitre sera consacré à la présentation du modèle analytique élaboré (capteur-pièce), 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. En fin la détection en utilisant un capteur à courants de Foucault fera le sujet de la dernière partie de ce chapitre.*

*L'examen de ces deux pièces s'accomplira au moyen de deux différentes structures de capteurs, la pièce cylindrique sera encerclée par un capteur à courants de Foucault qui balaye toute la surface de la pièce en effectuant un mouvement de translation tout au long du cylindre, la seconde sera surmontée et balayée par un simple capteur de forme cylindrique qui effectue un mouvement de translation selon un axe avec une incrémentation selon le deuxième axe à chaque fin de course (arrivée à bout et à l'autre bout de la plaque). Les résultats de la simulation de ces systèmes seront discutés.*

*Le dernier chapitre sera dédié aux capteurs multiéléments où on présentera deux applications les plus fréquentes le premier s'agit d'un système à détection multiéléments dont la cible présente un cylindre et le second présente une plaque.*

*Dans le cas d'un cylindre le système présente une axisymétrie dont on profite pour réduire le système de 3D à un autre en 2D, ce qui nous permet de mettre en évidence l'effet de l'inductance mutuelle. Dans le cas d'une plaque on ne peut pas réduire le système tridimensionnel à un autre bidimensionnel à cause de son non axisymétrie ce qui nous a poussé à proposer une méthode de résolution en 2D approchée à celle en 3D sauf que pour l'aboutissement de l'étude on ne prend pas en considération l'effet de l'inductance mutuelle, une contrainte exigée par la division de la*

---

*plaque en segments selon le nombre des capteurs élémentaires. Les résultats de la simulation de ces systèmes seront discutés.*

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

**CHAPITRE UN**

**Techniques du CND**

---

## Introduction

*Le contrôle non destructif regroupe l'ensemble des techniques qui permettent d'inspecter une pièce et d'en rechercher les éventuels défauts susceptibles d'avoir des conséquences néfastes sur la fonction qu'elle assure. Les techniques sont multiples (procédés optiques, ressuage, flux de fuites magnétiques, rayonnement ionisant, vibrations mécaniques, contrôle d'étanchéité, procédés électromagnétiques) et les applications variées.*

*Le contrôle en ligne se distingue du contrôle sur site, le premier est un contrôle de fabrication qui a pour but de vérifier la qualité d'un produit industriel avant sa mise en service, le deuxième est une inspection en service réalisable au cours de la vie du produit dont le but est de s'assurer de la non dégradation de la pièce soumise à des contraintes mécaniques, chimiques, thermiques et autres, [3].*

*Dans ce premier chapitre nous passerons en revue la définition du contrôle non destructif, son intérêt, les différentes techniques utilisées et on terminera par les applications de ce type de contrôle.*

### 1.1 Définition et intérêt du CND

Le contrôle non destructif CND est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de 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 quelle taille de défaut est acceptable de façon empirique à la casse (destruction) et ensuite pouvoir les détecter, sans détruire la pièce.

On parle aussi d'essais non destructifs ou d'examen non destructifs END, ce qui évoque plutôt les examens en laboratoire que la qualité industrielle.

En ce sens, le contrôle non destructif apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection et la mise en évidence des hétérogénéités, anomalies et défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné, plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce, [3].

### 1.2 Défauts et leur sources (origines)

Détecter un défaut c'est mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physiques ou chimiques préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Ça peut être des porosités, criques, rivets, soudures, fissures, délaminages, corrosion, collages, taux de fibre/matrice, décohésion fibre-matrice, cotation, forme, ...

On classe les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts internes, les défauts de surface, [3], [4].

### 1.2.1 Défauts internes

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agit des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle, dans l'industrie des métaux il peut s'agir de porosité, d'amas inclusionnaires endogènes ou exogènes, ou de fissures comme des flocons. Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office et on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND.

### 1.2.2 Défauts de surface

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- Défauts ponctuels correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault) ;
- Défauts d'aspect, à des plages dans lesquels une variation de paramètre géométriques ou physiques attire le regard et rend le produit inutilisable (rugosité, surépaisseur, taches diverses). Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

### 1.2.3 Origines des défauts

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

- ✿ Défauts de moulage ;
- ✿ Défauts de soudage ou de brasage des pièces mécaniques ;
- ✿ Détection de fissuration (interne ou débouchante) ;
- ✿ Endommagement (délaminage) de composites ;
- ✿ Hétérogénéité dans les matériaux ;
- ✿ Défauts de collage :
  - absence de colle ;
  - défaut d'adhésion ;
  - fissuration de colle.
- ✿ Défauts de fixation des composants électroniques, [5].

### 1.2.4 Caractéristiques des défauts

Un nombre quelconque de défauts peut être positionné dans tout le volume d'une pièce quelconque (géométrie complexe ou canonique, homogène ou hétérogène). Ces défauts sont de différents types

- Réflecteurs étalons : trou génératrice, trou à fond plat et trou à fond hémisphérique, sphère ;
- Défauts plans, de taille et d'orientation quelconque ;
- Défauts multi-facettes et défauts à contour ;
- Inclusions (de forme cylindrique ou elliptique) : défauts constitués d'un matériau solide.

### 1.3 Techniques du CND

Les méthodes de contrôle non destructif utilisées couramment sont les procédés optiques, le ressuage, la radiologie, les ultrasons, l'émission acoustique, le procédé par courants de Foucault.

#### 1.3.1 Procédés optiques

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple est le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhibitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique (contrôle optique automatique ou assisté, techniques optiques particulières), [3].

#### 1.3.2 Ressuage

C'est une méthode destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de la pièce métallique. Elle consiste à badigeonner la cible avec un liquide fluorescent ou coloré en rouge, qui pénètre dans les discontinuités. Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et en faisant ressuier le liquide resté dans les fissures, celles-ci vont être révélées.

#### 1.3.3 Radiologie

Comme la plupart des autres techniques de contrôle non destructif, la radiographie par rayons X est connue depuis de nombreuses années, et elle a largement fait ses preuves dans l'industrie. Son principe est simple. La pièce à contrôler est irradiée et traversée par des rayons X. Derrière elle, on place un récepteur, le plus souvent un film radiographique, afin de récupérer le rayonnement transmis. Une fois développé, le film permet d'obtenir une image de l'intérieur de la pièce et de localiser les éventuels défauts internes.

### 1.3.4 Ultrasons

Le contrôle par ultrasons classique est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le transducteur émet un faisceau ultrasonore au travers de l'objet suivant un angle fixé. 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.

### 1.3.5 Emission acoustique

L'émission acoustique est le phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des microdéplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à sollicitation. La méthode de contrôle par émission acoustique s'appuie sur une grande connaissance des matériaux (propriétés physiques, mécaniques, etc) et sur l'expérience en émission acoustique acquise à travers de nombreux travaux de recherche en laboratoire et en partenariat avec l'industrie.

### 1.3.6 Méthodes couplées

Les méthodes non destructives considérées isolément ne fournissent pas nécessairement l'ensemble des réponses aux questions posées : les réponses peuvent être partielles ou insuffisamment précises. L'association de différentes techniques peut compléter et améliorer le diagnostic.

Récemment, des méthodes couplées ont vu le jour, et pour certaines sont encore dans le domaine de la recherche : les méthodes électromagnétiques acoustiques, électromagnétiques ultrasonores ou magnéto-optiques.

L'association des techniques non destructives peut également permettre la diminution du nombre de contrôles ; certaines techniques, en effet, sont rapides et permettent de localiser les zones particulières qui méritent une auscultation plus précise ou un contrôle destructif ultérieur.

## 1.4 Procédé par courants de Foucault

Plusieurs objectifs sont acquis en tirant profit de cette technique, on cite, [6]:

### ✘ Détection de défauts sur tubes, barres, fils

Les défauts comme fissure, trou, griffure, manque de matière, rupture de brins sur les objets longilignes peuvent être détectés à l'aide de capteurs encerclants ou encerclants multiéléments.

Les tubes peuvent être aussi contrôlés de l'intérieur par un capteur interne.

### ✘ Contrôle de surface plane

Les surfaces planes sont les cibles idéales pour le contrôle non destructif par courants de Foucault.

Les types de contrôle suivants sont réalisables sur les surfaces planes :

- ➡ Détection de défauts transversaux ou longitudinaux, situés à la surface ou en profondeur ;
- ➡ Mesure de conductivité électrique ;

- ➡ Mesure de distance ;
- ➡ Mesure d'épaisseur.

### ✘ **Tri de pièces, contrôle de nuances**

Les capteurs à courants de Foucault sont très sensibles à la matière constituant la pièce. On peut réaliser les applications suivantes :

Tri de pièces selon leurs traitements thermiques ou chimiques : contacts électriques pour connecteurs, aiguilles de roulements, vis, boulons, pièces automobiles ;

Contrôle de la nuance de traitement des alliages, de la décarburation.

### ✘ **Mesure d'épaisseur**

En sortie de laminoir, les tôles sont en défilement et ne se prêtent pas au contrôle d'épaisseur manuel. Un capteur à courants de Foucault peut mesurer cette épaisseur à distance variable.

La mesure de l'épaisseur de tôle en continu sans contact permet de contrôler en permanence la qualité de la tôle. En cas de variation excessive de l'épaisseur, il est possible d'agir sur les paramètres mécaniques afin de rester dans les limites autorisées.

### ✘ **Contrôle de l'excentricité de tubes**

Quand l'épaisseur aux différents points de la circonférence d'un tube n'est pas constante, le tube est excentrique et présente un risque de rupture.

Les capteurs à courants de Foucault peuvent mesurer l'épaisseur unilatéralement et sans contact. Dans le cas des tubes, ils sont des outils idéaux pour contrôler leur excentricité.

Avec 4 capteurs répartis sur la circonférence du tube, on peut contrôler son excentricité en continu sur la chaîne de production.

### ✘ **Détection de déformations sur tubes ou barres**

En utilisant les capteurs à courants de Foucault conjointement avec les capteurs à barrière laser, on réalise un contrôle complet de la qualité géométrique de tubes ou de barres.

Les barrières laser permettent des mesures de quelques microns de précision.

En utilisant des capteurs intégrant plusieurs barrières, on peut contrôler toute la circonférence du tube.

### ✘ **Contrôle de structures multicouches**

Les structures multicouches (plaques empilées, revêtements sur substrat métallique) peuvent être contrôlées efficacement avec la technique des courants de Foucault.

Notamment, cette technique permet la détection de mauvais contacts électriques entre deux plaques.

On peut détecter aussi le manque d'épaisseur ou les défauts sur le substrat.

### ✘ **Détection d'objets métalliques parmi d'autres objets métalliques**

Les capteurs à courants de Foucault simples ne peuvent détecter que la présence d'un seul objet. Lorsqu'il y a plusieurs objets métalliques, il faut utiliser un capteur comportant plusieurs éléments

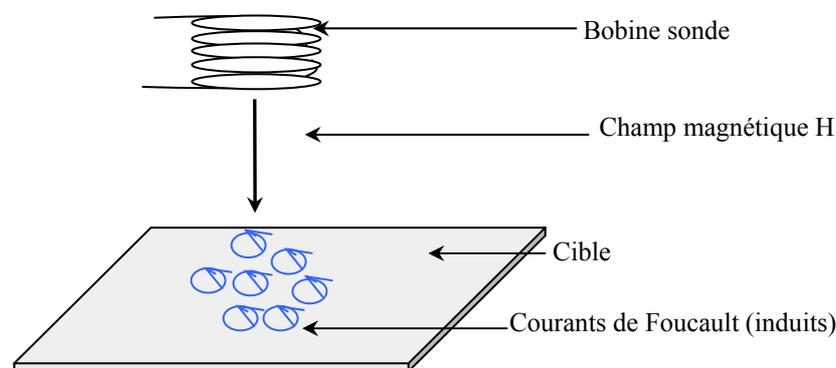
pour analyser la situation afin de détecter la présence d'un objet indésirable parmi d'autres objets utiles, [6]

### 1.4.1 Présentation des CF

Courants de Foucault, courants étudiés par le physicien français Léon Foucault, apparaissant dans la masse de tout matériau conducteur en mouvement dans un champ magnétique, ou dans tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable. Les lignes de ces courants sont fermées sur elles-mêmes : on parle de boucles de courants. Les courants de Foucault s'expliquent par le phénomène d'induction électromagnétique et sont décrits par la loi de Faraday, [7].

### 1.4.2 Observation et description

Les courants de Foucault peuvent facilement être mis en évidence en faisant osciller un pendule constitué d'une plaque métallique dans un champ magnétique : le mouvement du pendule est fortement freiné. Une force magnétique de Laplace agit sur la plaque (plongée dans le champ magnétique) parcourue par des courants induits par son mouvement. D'après la loi de Lenz, tout courant induit s'oppose au phénomène qui lui a donné naissance ; le pendule est donc freiné par la force magnétique et non accéléré, car cette force s'oppose au mouvement qui a donné naissance aux courants induits. Parallèlement la masse conductrice parcourue par les courants s'échauffe par effet Joule.



**Figure 1.1** Création des courants induits, [8]

Une expérience assez spectaculaire consiste à présenter un petit aimant au-dessus d'une plaque supraconductrice : celui-ci reste en lévitation magnétique. En effet, dès que l'aimant tend à bouger, il crée, par induction, des boucles de courants dans la plaque, qui engendrent sur l'aimant une force qui s'oppose à son mouvement. Comme la plaque est supraconductrice, elle n'oppose aucune résistance au passage des courants et ceux-ci ne disparaissent jamais : ainsi, l'aimant demeure en équilibre stable. Ce phénomène est mis en œuvre dans la réalisation de trains à lévitation magnétique, [7].

### 1.4.3 Influence d'une bobine sur un conducteur

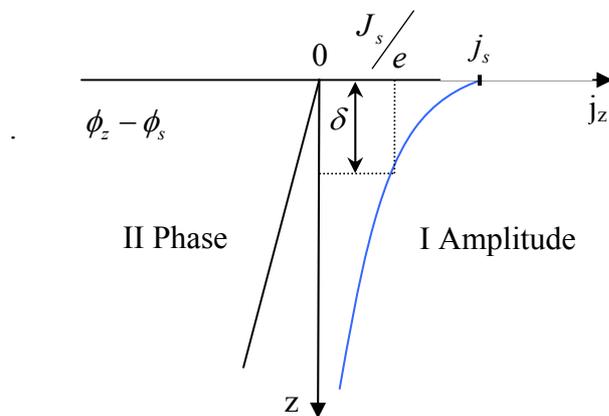
La figure 1.1, traduit l'influence des courants induits sur une bobine, le champ primaire créé par la bobine génère des courants induits dans la plaque conductrice qui à leur tour génèrent un champ secondaire. Ces courants diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de pénétration, [8].

### 1.4.4 Epaisseur de peau

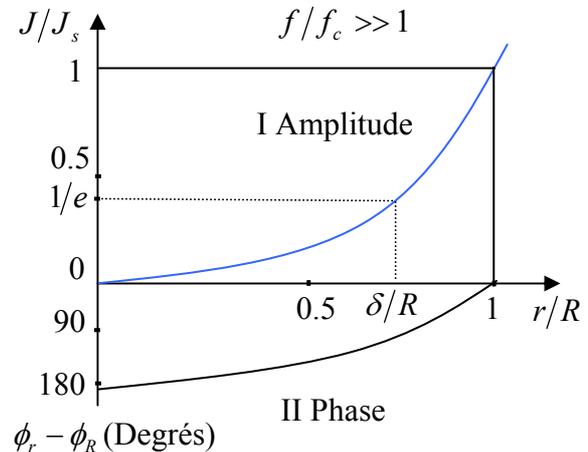
On a défini une profondeur de pénétration conventionnelle  $\delta$  pour laquelle le module du courant à la surface est divisée par  $e = 2.718$  la base des logarithmes népériens, [3, 4].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \quad (1.1)$$

Cette profondeur est pure convention. Appelée profondeur de pénétration ou épaisseur de peau, seuls 63% des courants de Foucault circulent dans cette épaisseur, se sont les couches les plus importantes du point de vue de la sensibilité aux interactions avec les défauts de surface.



**Figure 1.2** Répartition des courants de Foucault sous une surface plane, [3]



**Figure 1.3** Répartition des courants de Foucault sous un cylindre, [3]

$R$  : Rayon de la barre pleine ;

$J$  Densité de courant ;

$J_s$  : Densité de courant en surface ;

$J_z$  : Densité de courant à la profondeur  $z$  ;

$\phi_z$  : Phase des courants induits à une surface de profondeur  $z$  ;

$\phi_s$  : Phase des courants induits à la surface ;

$f_c$  : Fréquence caractéristique (ou fréquence limite)  $f_c = \frac{1}{2\pi R^2 \sigma \mu}$ .

Les courants de Foucault induit sont parallèles au courant inducteur et de même fréquence. Ils sont progressivement déphasés à partir de la surface ( $z = 0$ ) et décroissent exponentiellement en

amplitude (figure 1.2), et l'effet de peau résultant est caractérisé par une profondeur de pénétration  $\delta$  définie par l'équation (1.1).

Soit de façon pratique,  $f$  étant la fréquence d'excitation en hertz et  $\mu_r$  la perméabilité relative :

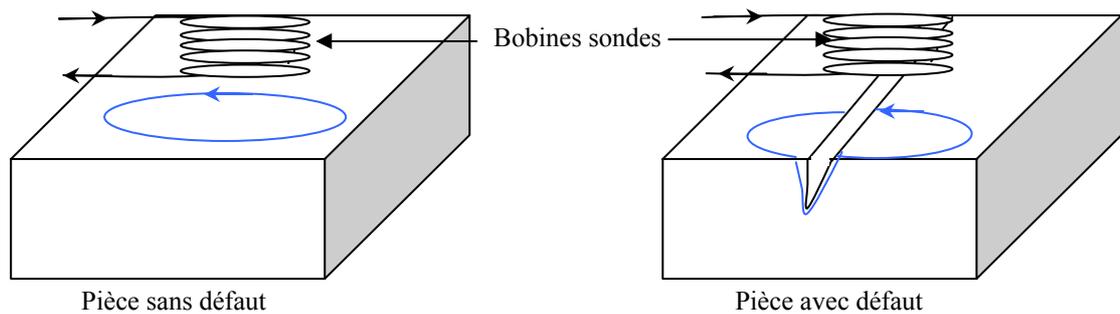
$$\delta = \frac{500}{\sqrt{f\sigma\mu_r}} \quad (1.2)$$

#### 1.4.5 Principe du CND par CF

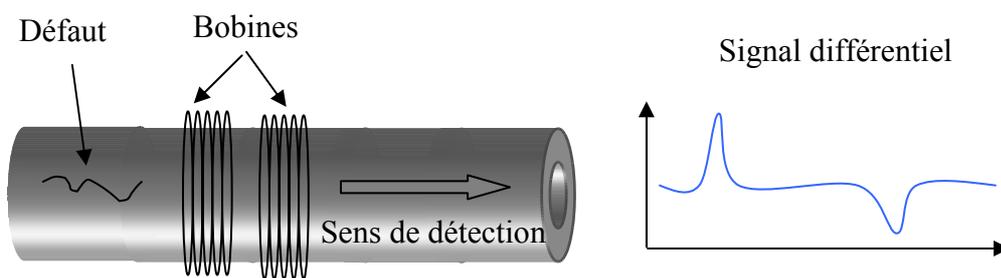
Le contrôle par courants de Foucault s'effectue en créant un champ magnétique dans une bobine que l'on va déplacer à la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation des lignes des courants induits dans la pièce, par un défaut, va se traduire par une modification du coefficient du self induction, qui sera détectée (figures 1.4 et 1.5).

En générale on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance  $Z$  de la bobine de la pièce contrôlée et celle d'une pièce de référence (sans défauts).

En jouant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, il est possible de contrôler jusqu'à quelques millimètres de la surface.



**Figure 1.4** Principe de la détection par courants de Foucault, [3]



**Figure 1.5** Détection d'un défaut avec une sonde encerclante différentielle, [9]

L'archivage électronique de signature des défauts et le traitement du signal constituent des voies de développement actuel permettant de simplifier l'exploitation de la technique du CND par courants de Foucault et d'en étendre le champ d'application. Ils sont aussi bien utilisés pour la mesure de corrosion uniforme que localisée. Ainsi, la corrosion sous contrainte, qui entraîne le développement de fissures, est souvent mesurée par courants de Foucault.

### 1.4.6 Paramètres significatifs

Les capteurs à courants de Foucault sont utilisés pour contrôler les pièces métalliques. Les paramètres caractérisant la nature du matériau tel que : la perméabilité relative  $\mu_r$  et la conductivité électrique  $\sigma$  d'un objet métallique dépendent fortement des contraintes mécaniques et thermiques que le matériau a subit et permettent donc d'apprécier sa qualité de fabrication. Par ailleurs, la distance entre le capteur et la pièce contrôlée constitue l'un des paramètres les plus influents sur les données brutes fournies par le capteur, [10]. Par ce fait, les paramètres influents sur le sondage se partagent en deux catégories : ceux qui sont liés au matériau à sonder (propriétés du matériau) et ceux qui sont liés au montage (lift-off, fréquence d'excitation, ...etc).

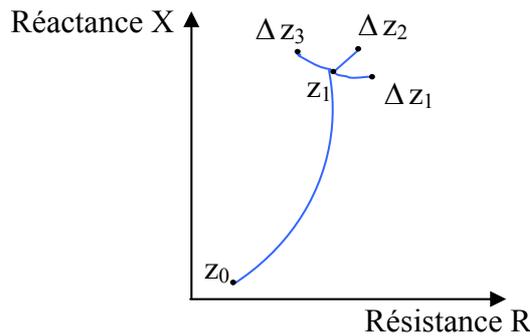


Figure 1.6 Représentation des variations d'impédance d'une bobine, [3]

La figure 1.6 présente les variations d'impédance d'une bobine à vide, au contact du métal et celles due à l'effet des variations des paramètres du sondage.

$Z_0$  : Impédance dans l'air à vide ;

$Z_1$  : Impédance au contact du métal ;

$\Delta Z_1, \Delta Z_2, \Delta Z_3$  : Petites variations de l'impédance dues à l'effet des variations des paramètres du sondage.

### 1.4.7 Principe de détection

Considérons un capteur à courants de Foucault élémentaire qui se compose simplement d'un bobinage à air muni de N spires parcourues par un courant alternatif  $i_{exc}$ . Pour caractériser le milieu sondé par le CCF, on peut introduire la notion de réluctance  $\mathfrak{R}$  ou de perméance complexe P si on exprime le rapport entre la différence de potentiels magnétiques A et le flux  $\phi$  émis par le capteur à courants de Foucault

$$\mathfrak{R} = \frac{A}{\phi} = \frac{1}{P} \tag{1.3}$$

a

b

c

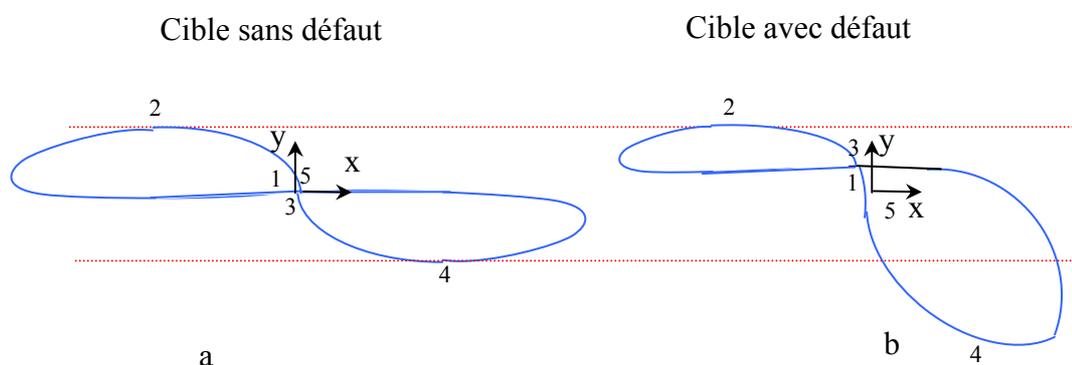
Figure 1.7 Réponse de la sonde (Plan d'impédance), [9]

$A$  étant fixée par les ampères-tours d'excitation :  $A = Ni_{exc}$ , on retrouve alors la relation entre l'impédance complexe  $Z$  du CCF et la perméance  $P$  :

$$Z = \frac{V}{i_{exc}} = \frac{j\omega N^2}{\Re} = j\omega N^2 P = R + jX \quad (1.4)$$

En pratique même en absence de la cible,  $Z$  possède une composante résistive  $R_0$ .  $Z_n$  varie selon les propriétés de la cible, de la distance capteur-cible (lift-off), de la fréquence du courant d'excitation et des dimensions du capteur, [10].

Quand la sonde passe au-dessus d'une cible exempte des défauts, on obtient un signal dans le plan d'impédance comme le montre la figure 1.7.a. Dans le but de faciliter l'interprétation, le signal est tourné jusqu'à ce qu'il ait une position horizontale (figure 1.7.c), [9].



**Figure 1.8** Plan d'impédance (plaque sans et avec défaut), [9]

Cette rotation facilite la définition d'un seuil d'alarme sur l'axe des ordonnées (Y), qui est habituellement le composant affecté par un défaut (voir figure 1.7).

Quand la sonde passe au-dessus d'un défaut, le signal croise le seuil d'alarme et le signal de l'axe des ordonnées montre clairement le défaut (figure 1.8.b), [9].

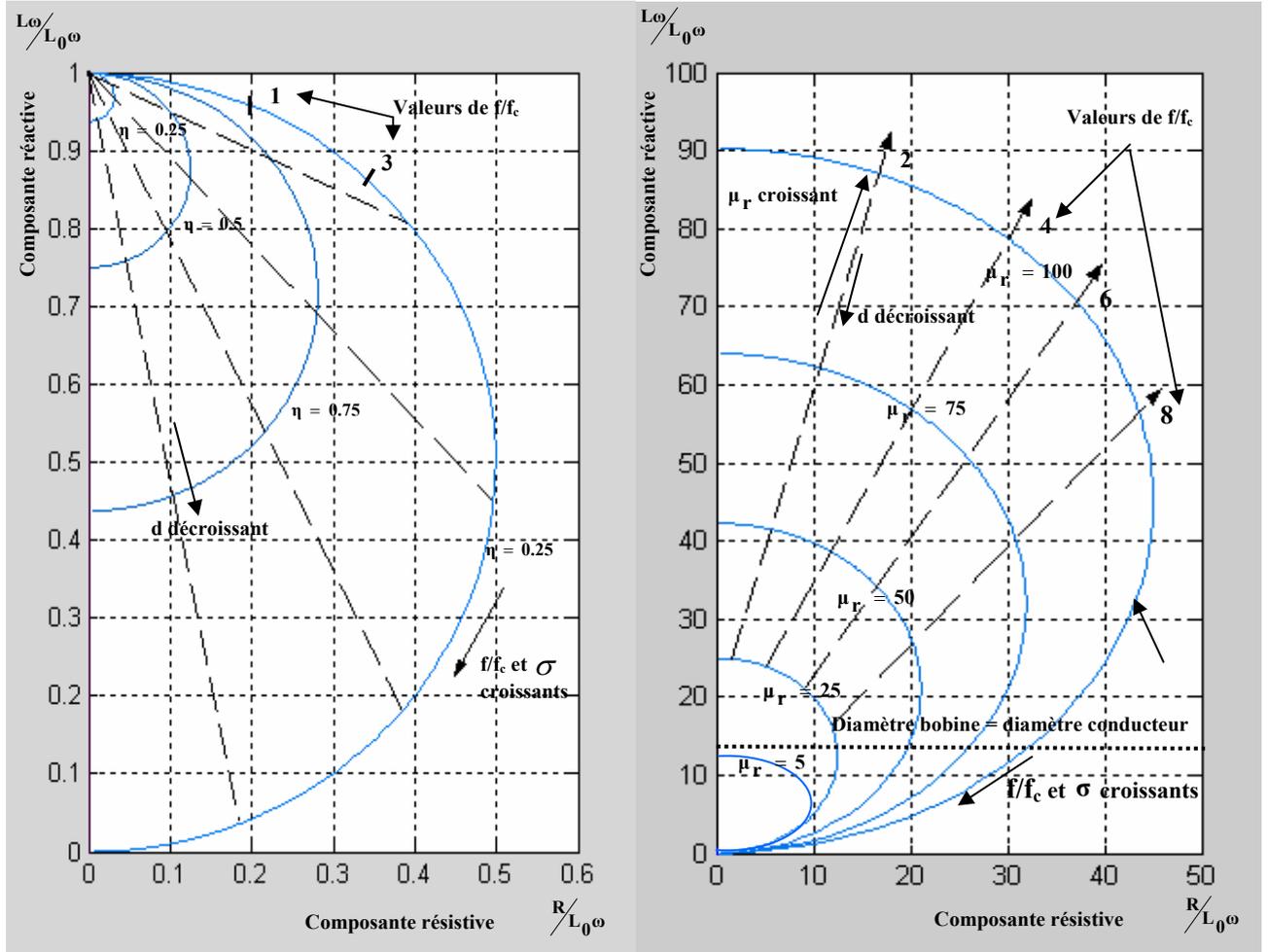
La modélisation des sondes permet de prévoir assez bien leur comportement réel. On a ainsi pu tracer des diagrammes rationnels, normalisés en  $L_0$  l'inductance dans l'air, sur ces diagrammes (figure 1.9) sont portés des courbes fonction de la fréquence et de la perméabilité.

Ces courbes sont en fait délicates d'emploi, et l'imprécision sur les lieux géométriques est trop forte pour permettre une utilisation commode. Ils permettent toutes fois d'apprécier, en fonction du métal ou l'alliage testé, dans quelle zone du plan complexe se situe le point de fonctionnement. Mais la normalisation masque l'effet de la fréquence, [3].

$\eta$  étant le coefficient de remplissage tel que :  $\eta = \left( \frac{d^2}{D} \right)$

$d$  : diamètre de la barre métallique

$D$  : diamètre de la bobine



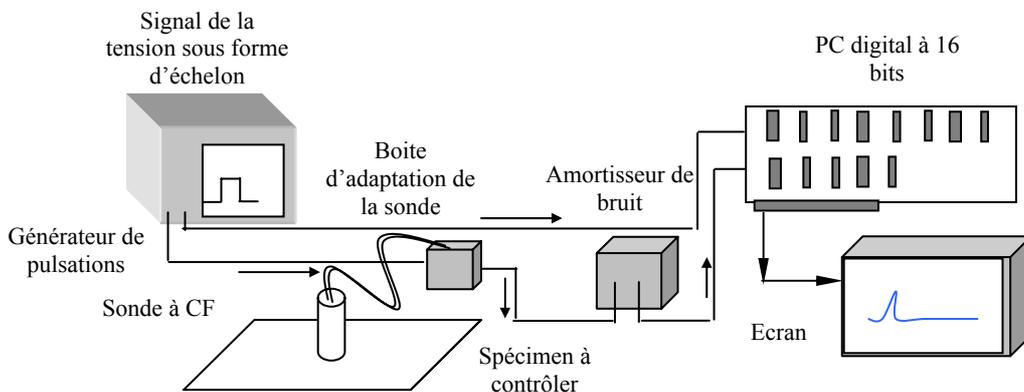
a : Cas d'une barre métallique non magnétique  $\mu_r = 1$

b : Cas d'une barre d'acier magnétique et d'un coefficient de remplissage  $\eta = 1$

**Figure 1.9** Diagrammes théoriques de l'impédance normalisée d'une bobine de diamètre D encerclant une barre métallique ferromagnétique ou non de diamètre d, [3].

### 1.4.8 Technique par courants pulsés

L'utilisation de courants pulsés conduit à une technique particulière en courants de Foucault, qui consiste à exciter la bobine sonde par des impulsions plutôt que par une tension sinusoïdale entretenue.



**Figure 1.10** Illustration d'appareillage utilisé pour les courants pulsés, [11]

L'onde électromagnétique ainsi engendrée se propage dans le matériau et est recueillie par une sonde réceptrice distincte et protégée du rayonnement direct de la bobine émettrice, le caractère «pseudo-échographique» des signaux les rend sensibles à la nature interne du matériau, se qui explique que cette technique est utilisée pour la mesure d'épaisseur des revêtements et pour la détection de défauts sous-cutané. La figure 1.10 illustre l'appareillage utilisé pour l'effectuation de cette technique, [11].

#### 1.4.9 Avantages de la technique à courants pulsés

- Excitation d'une gamme étendue de fréquences avec une impulsion simple ;
- Choix de fréquence à partir de la réponse de cette technique semblable à la technique multifréquence ;
- Une acquisition de données plus rapide qu'avec la EC multifréquence ;
- Détection efficace de fente et de corrosion dans le fuselage des structures complexes ;
- La possibilité d'analyse multifréquence après l'accomplissement du balayage ;
- L'application de la technique en 2D fournit la formation d'image instantanée du secteur sous la sonde.

#### 1.4.10 Technique multifréquences

La phase et l'amplitude d'un signal produit par un quelconque paramètre agissant sur l'équilibre d'un pont de bobines varient avec la fréquence d'excitation, et cette variation dépend elle-même du type de paramètre considéré. Ainsi, par exemple, certains paramètres donnent une réponse en amplitude forte à basse fréquence, d'autres à haut fréquence. On conçoit ainsi que l'utilisation simultanée de plusieurs fréquences d'excitation des sondes doit permettre une discrimination des divers paramètres d'action ; tel est le principe de la technique multifréquence qui permet effectivement ; dans les cas de contrôle difficile ; d'atténuer fortement l'effet des facteurs perturbateurs ; ou encore dans d'autres ; d'effectuer simultanément la détection de plusieurs types de défauts bien différenciés.

Le contrôle par courants de Foucault multifréquence est très utilisé pour l'inversion des données fournies par le capteur en vue de déterminer des paramètres du matériau en regard.

La méthode multifréquences consiste à choisir judicieusement les fréquences d'excitation du capteur de manière à recueillir des informations riches et complémentaires sur le matériau à contrôler. L'idéal serait que chaque paramètre ait une influence sur le signal de mesure à une fréquence et une seule. Ceci est évidemment difficile voire impossible à réaliser en pratique. Quant au nombre de fréquences d'alimentation nécessaire, il est étroitement lié aux nombres de paramètres à identifier et à la complexité du dispositif complet que l'on s'autorise, [12].

### 1.4.11 Avantages et limites de la technique CF

La méthode permet de rechercher des défauts situés à des profondeurs variables (de zéro à quelques millimètres) et de connaître la taille de la fissure ou de la piqûre. Toutefois, elle ne présente pas une grande sensibilité. Pour donner un ordre d'idées, les courants de Foucault détectent des fissures d'une longueur minimale de 0,2 mm et d'une largeur de 1 mm.

La technique par courants de Foucault offre les possibilités suivantes :

- Inspection rapide, simple et fiable pour la détection de défauts de surface et de faible profondeur sur des matériaux conducteurs ;
- Peut être utilisée pour mesurer la conductivité électrique de matériaux ;
- Mesure de revêtement non conducteur ;
- Inspection de trous avec l'utilisation de scanners tournant à grande vitesse et de sondes de surface, [13].

Le CND par courants de Foucault ne s'applique que sur les pièces réalisées en matériaux conducteurs en électricité.

### Conclusion

*Par leurs possibilités de détection, de reconnaissance et de dimensionnement de défauts isolés dans un matériau ainsi que l'estimation de ses caractéristiques microstructurales et propriétés d'emploi, les techniques de contrôle non destructif font partie des outils incontournables de l'évaluation de la qualité des produits. Dans ce chapitre nous avons passé en revue certaines méthodes de contrôle non destructif et présenté quelques procédures d'emploi et certains résultats d'application de quelques unes, après avoir rappelé la définition et le but de ce type de contrôle (CND).*

*L'une des techniques les plus utilisées est celle des courants de Foucault, l'intérêt que nous avons porté à celle-ci dans ce travail est le plus important à cause de son appartenance à notre domaine de formation (électromagnétisme) et c'est celle que nous allons exposer par la suite.*

*Dans le chapitre suivant nous allons passer en revue les capteurs en général et en particulier ceux à courants de Foucault pour leur application dans le CND par CF et on terminera par les nouvelles approches utilisant les multi-capteurs et les capteurs multiéléments.*

## **CHAPITRE DEUX**

# **Multi-capteurs et Capteurs Multiéléments**

## Introduction

*La technologie des courants de Foucault (CF) est une méthode d'inspection des pièces métalliques. Dans cette technique, la sonde, qui est excitée avec un courant alternatif, induit des courants de Foucault dans la pièce en inspection. Toutes discontinuités ou variations des propriétés du matériel qui changent la circulation des courants de Foucault dans la pièce sont détectées par la sonde en tant que défaut potentiel. Au fil des ans, la technologie des sondes et le traitement des données ont continuellement progressé, et aujourd'hui la technique par courants de Foucault est reconnue comme étant rapide, simple et précise. C'est la raison pour laquelle elle est utilisée largement dans les industries de l'aérospatiale, de l'automobile, de la pétrochimie et de la production d'énergie pour la détection de défauts de surface ou de faible profondeur dans des matériaux comme l'aluminium, l'acier inoxydable, le cuivre, le titane, le laiton, l'Inconel® (alliage de Nickel (80%), de chrome (14%) et du fer (6%) et même l'acier au carbone (défauts de surface seulement), [13].*

*Les exigences de sécurité et de qualité des produits utilisés dans les domaines de l'aéronautique, du nucléaire et du transport sont de plus en plus élevées, et l'on assiste aujourd'hui à une forte demande des industriels pour obtenir des procédés de contrôle rapides, fiables, et sensibles. L'inspection des grandes surfaces pose le problème du temps et du coût, les systèmes à courants de Foucault (CF) multiéléments peuvent répondre à ces besoins en fournissant en temps réel une "image magnétique" permettant de révéler des défauts débouchants ou enfouis dans des pièces de forme complexe, [14]. Les capteurs en général, les sondes et les multi-capteurs à courants de Foucault feront l'objet du présent chapitre.*

### 2.1 Capteurs et transducteurs

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

Les capteurs et les transducteurs servent à mesurer des grandeurs mécaniques, thermiques, électriques ou chimiques. Un capteur est sensible aux variations de la grandeur mesurée, par exemple la température d'un élément, la position d'une pièce d'une machine, ou la concentration chimique d'une solution. Les valeurs ainsi mesurées sont alors converties en signaux électriques par le transducteur, puis transmises à un dispositif capable de lire, enregistrer ou contrôler les grandeurs mesurées par rétroaction. Capteurs et transducteurs peuvent opérer dans des sites éloignés de l'opérateur, voire dans un environnement inaccessible ou hostile à l'être humain, [7].

### 2.1.1 Exemples de capteurs

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

La figure 2.1 présente quelques exemples de capteurs :

- a : Capteur de fin de course ;
- b : Capteur de niveau de liquide ;
- c : Capteur d'humidité ;
- d : Détecteur de choc ;
- e : Capteur de proximité à ultrasons ;
- f : Détecteur de gaz.

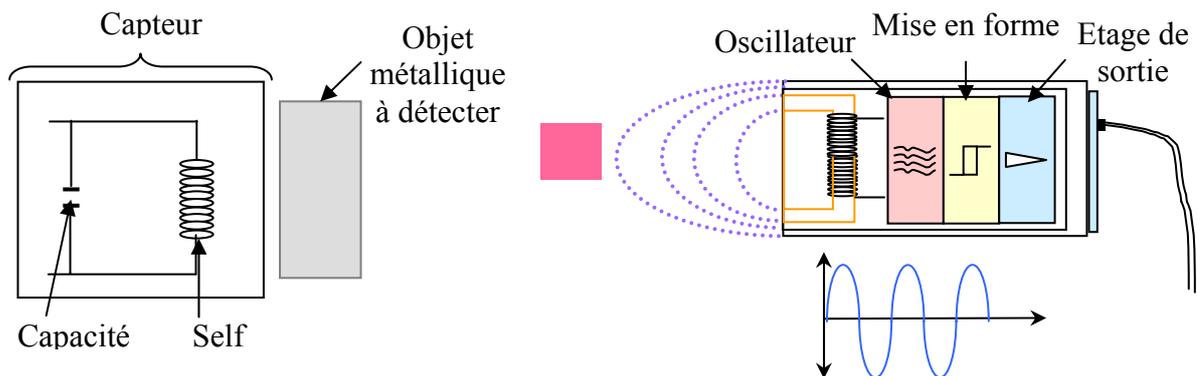


**Figure 2.1** Quelques exemples de capteurs, [15]

### 2.2 Capteurs inductifs

Les capteurs inductifs produisent à l'extrémité de leur tête de détection un champ magnétique oscillant. Ce champ est généré par une self et une capacité montée en parallèle. Lorsqu'un objet métallique pénètre dans ce

champ, il y a perturbation de ce champ puis atténuation du champ oscillant. Cette variation est exploitée par un amplificateur qui délivre un signal de sortie, le capteur commute, comme le montre la figure 2.2, [15].



**Figure 2.2** Capteur inductif et son principe de fonctionnement, [15]

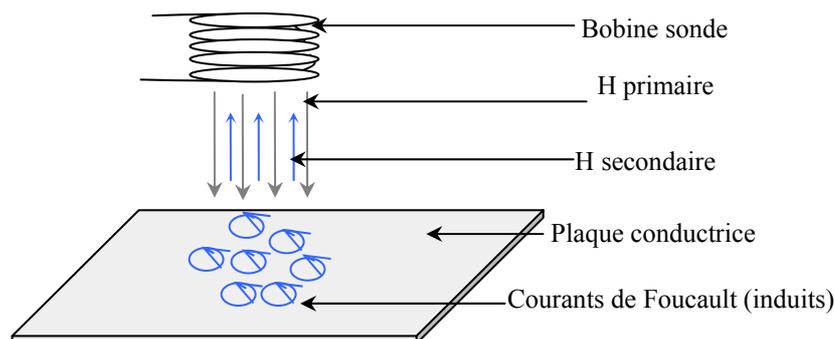
### 2.2.2 Principe des capteurs inductifs

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 courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et/ou magnétique dans l'entrefer du circuit modifie la répartition des lignes de champs et se traduit par une variation de réluctance et l'apparition de pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible.

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 tranche d'impédance ou de capteur à fonction 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.), [14].

#### 2.2.2.1 Cas de cible conductrice

Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants surfaciques (CF), qui à leur tour génèrent un champ magnétique réfléchi, s'opposant au champ exciteur (loi de Lorenz) comme montré sur la figure 2.3. On parle dans ce cas de capteur à courants de Foucault (CCF), (figure 2.4).



**Figure 2.3** Effet des courants induits sur une bobine, [8]

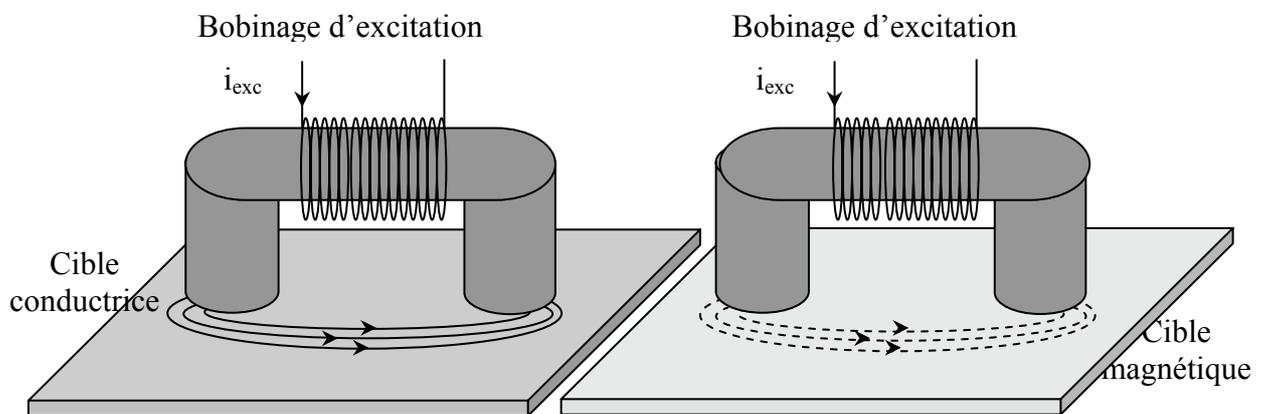
### 2.2.2.2 Cas de cible magnétique

L'effet produit par l'approche d'une cible magnétique non conductrice se traduit par une modification des lignes de champs, qui se trouvent attirées par le matériau en regard. Le dispositif fonctionne alors en capteur magnétique (CM), (figure 2.5).

### 2.2.2.3 Cas général

Dans le cas général plus complexe à étudier, où la cible présente à la fois de bonnes propriétés conductrices et magnétiques, seule la gamme de fréquence de l'alimentation du capteur distingue les deux technologies CCF et CM. Aux fréquences élevées, le champ développé ne pénètre quasiment pas dans la cible. Le dispositif fonctionne en CCF. Par contre, lorsque la fréquence du champ d'excitation est faible le capteur fonctionne en CM. Pour les fréquences d'excitation intermédiaires et à certaines distances de mesure, les deux phénomènes d'attraction et de répulsion du champ s'équilibrent et le dispositif peut être qualifié à la fois de capteur à courants de Foucault et de capteur magnétique. Les valeurs de ces fréquences intermédiaires dépendent des caractéristiques du matériau ; on travaille en générale assez peu à ces fréquences intermédiaires de manière à affirmer suffisamment le caractère CCF ou CM du capteur.

Alors le parti pris CCF ou CM dépend essentiellement des propriétés électriques et/ou magnétiques de la cible, de la nature et de la géométrie des défauts à détecter et enfin de l'environnement d'utilisation du capteur.



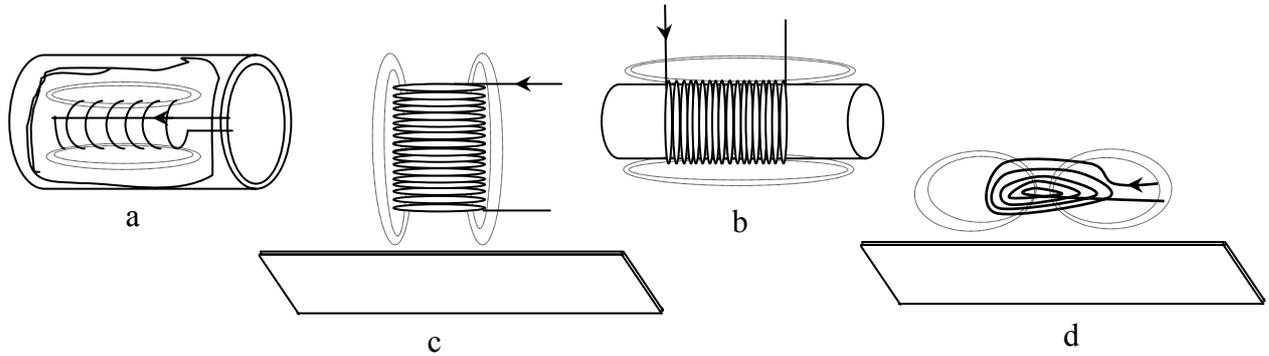
**Figure 2.4** Capteur à courants de Foucault (CCF), [12]

**Figure 2.5** Capteur magnétique (CM), [12]

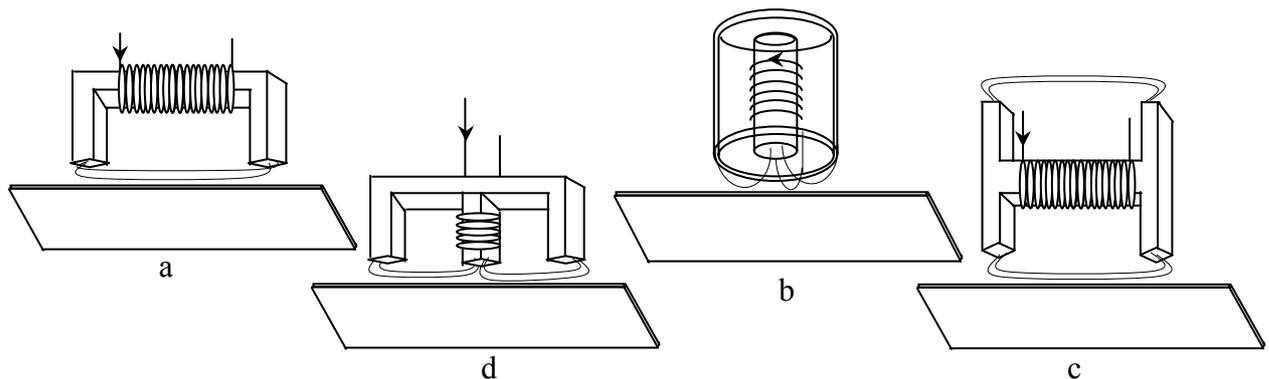
## 2.3 Capteurs à courants de Foucault

### 2.3.1 Différentes géométries de sondes CF

Il existe plusieurs configurations possibles pour la disposition du bobinage d'excitation relativement à la cible; chacune est dédiée au contrôle de cible de forme donnée. Sans dresser un panorama exhaustif de toutes les différentes méthodes d'auscultation, nous allons en citer trois principales:



**Figure 2.6** Classification des sondes selon la méthode d'auscultation, (a) : sonde interne, (b) : sonde encerclante, (c) : bobine simple, (d) : bobine plate, [12].



**Figure 2.7** Différentes géométries de circuit magnétique, (a) : sonde en U, (b) : sonde en pot, (c) : sonde en H, (d) : sonde en E, [12].

Les bobines internes: destinés à inspecter des objets creux par l'intérieur (figure 2.6.a).

Les bobines encerclantes: utilisées pour contrôler par l'extérieur des objets de faible section (figure 2.5.b).

Les bobines simples ou plates : utilisées pour l'inspection des objets par leur surface (figure 2.6.c et d).

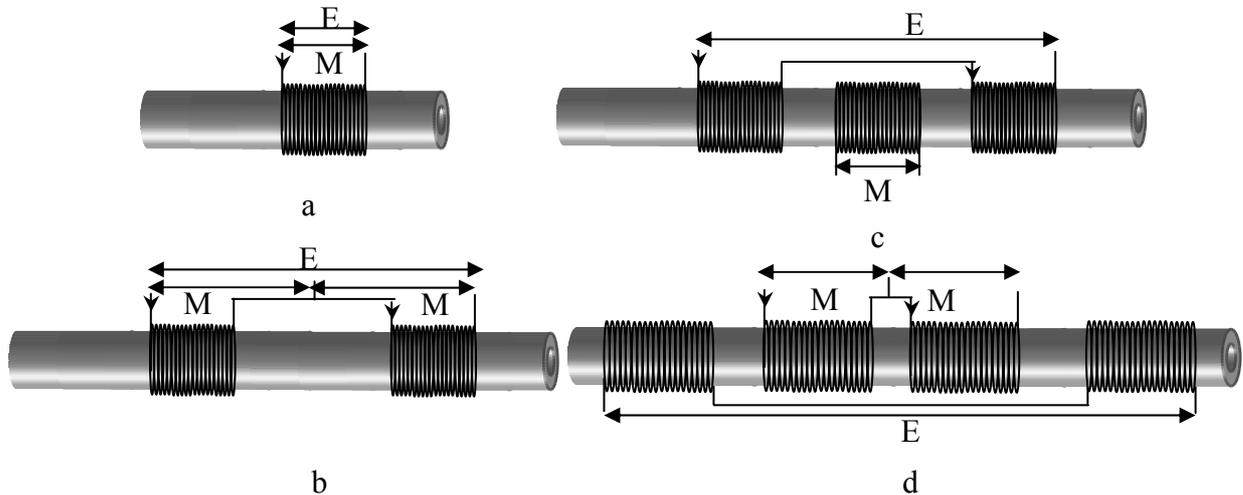
Les sondes précédentes ne comportent qu'un simple bobinage. Les champs qu'elles émettent s'épanouissent largement. Afin de limiter les zones d'interaction de la bobine, on couple généralement celle-ci avec un circuit magnétique de grande perméabilité. Celui-ci peut être réalisé en tôles feuilletées à basse fréquence ou en ferrite pour les fréquences plus élevées. Son rôle est de canaliser les lignes de champ magnétique vers la ou les zones d'espace où on placera la cible à inspecter. La géométrie du circuit varie selon les applications et la figure 2.7, en donne quatre exemples.

Les branchements électriques peuvent être variés, en particulier en prenant l'exemple des bobines encerclantes, on peut distinguer :

Les systèmes à bobinage simple, où le courant d'excitation passe dans la bobine de mesure elle-même, et qui peuvent être à sonde absolue (figure 2.8.a) ou à sonde différentielle (figure 2.8.b).

Les systèmes à bobinage double, ou primaire d'excitation est électriquement séparé d'un secondaire de mesure, qui peut toujours être soit absolu (figure 2.8.c), soit différentiel (figure 2.8.d).

La détectivité des défauts dépend de leur géométrie, de leur nature métallurgique, et la sonde utilisée doit être adaptée aux types de défauts recherché : en particulier, les défauts de type fissure ou ligne sont toujours plus délicats à détecter que les défauts de type arrachement ou paille, [4].



**Figure 2.8** Exemple de montage de sonde à courants de Foucault, montage simple: (a) : sonde absolue, (b) : sonde différentielle, bobinage double : (c) : sonde absolue, (d) : sonde différentielle, [4].



**Figure 2.9** Exemple de capteurs à courants de Foucault, [16]

La figure 2.9 présente deux sondes à courants de Foucault.

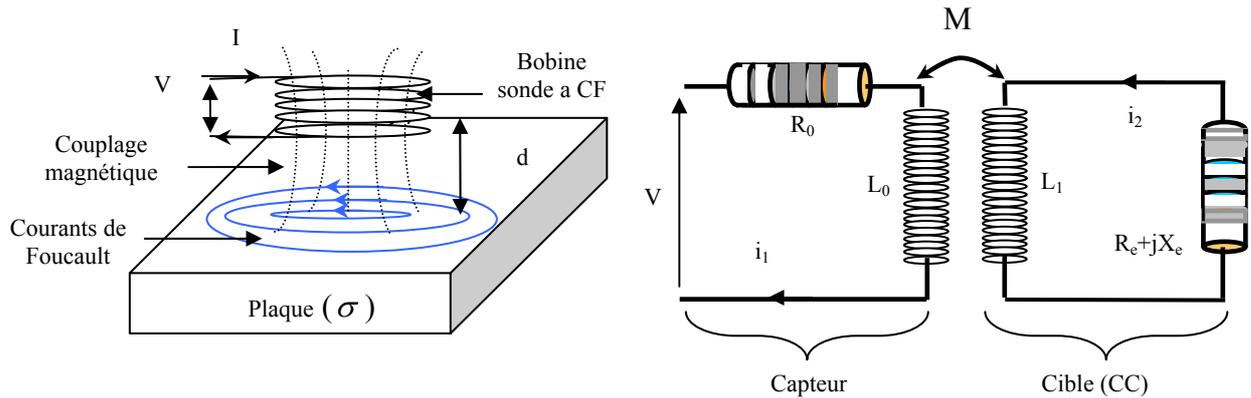
### 2.3.2 Analogie avec le transformateur

Considérons un capteur à courants de Foucault constitué d'une bobine d'excitation, (à gauche de la figure 2.10) ; l'interaction physique entre le capteur et la plaque conductrice amagnétique est analogue à celle d'un transformateur à deux bobines à noyau à air (à la droite de la figure 2.10).

L'inductance du circuit primaire  $L_0$  représente l'inductance propre du capteur et  $R_0$  sa résistance.

$L_1$  (l'inductance du secondaire) et  $Z_1$  l'impédance de la charge représentent la plaque.  $k$  est le coefficient de couplage entre le capteur et la plaque.

En général  $L_1$ ,  $Z_1$  et  $k$  sont tous fonctions de la géométrie, les propriétés physiques de la plaque et aussi de la position du capteur par rapport à la plaque, [17], [18].



**Figure 2.10** Analogie du système capteur-cible avec un transformateur, [18]

$$V(t) = R_0 i_1(t) + L_0 \frac{di_1(t)}{dt} + M_{12} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (3.1)$$

$$0 = R_e i_2(t) + L_1 \frac{di_2(t)}{dt} + M_{21} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (3.2)$$

$$M_{12} = M_{21} = L_0 L_1 k^2 \quad (3.3)$$

### 2.3.3 Problèmes avec la technique à courants de Foucault conventionnelle

- ➡ Difficulté de trouver des indications de crack/corrosion dans la présence des bords et des lacunes dans les couches.
- ➡ Dégradation d'enroulement du signal de basse fréquence

### 2.3.4 Exemples de structures complexes

- 1 à 5 couches d'aluminium rivetées ensemble ;
- Forme complexe des multicouches, lacunes entre couches, coins ;
- Joints épais du fuselage (8-50 millimètres) ;
- structure sandwichs ;
- Métal-composés (alliages).

## 2.4 Système multi-capteurs et capteurs multiéléments

L'efficacité des capteurs sera amplifiée par leur variété (multi-capteurs). L'émergence des techniques multiéléments (la multiplication dans l'espace de capteurs identiques) dans le domaine du contrôle non destructif ouvre de nouvelles possibilités d'inspection, en particulier sur les pièces de géométrie complexe. Les techniques multiéléments permettent notamment de mettre en oeuvre des méthodes de contrôle adaptatives prenant en compte la géométrie de la pièce et/ou les caractéristiques du défaut recherché (position, orientation ...).

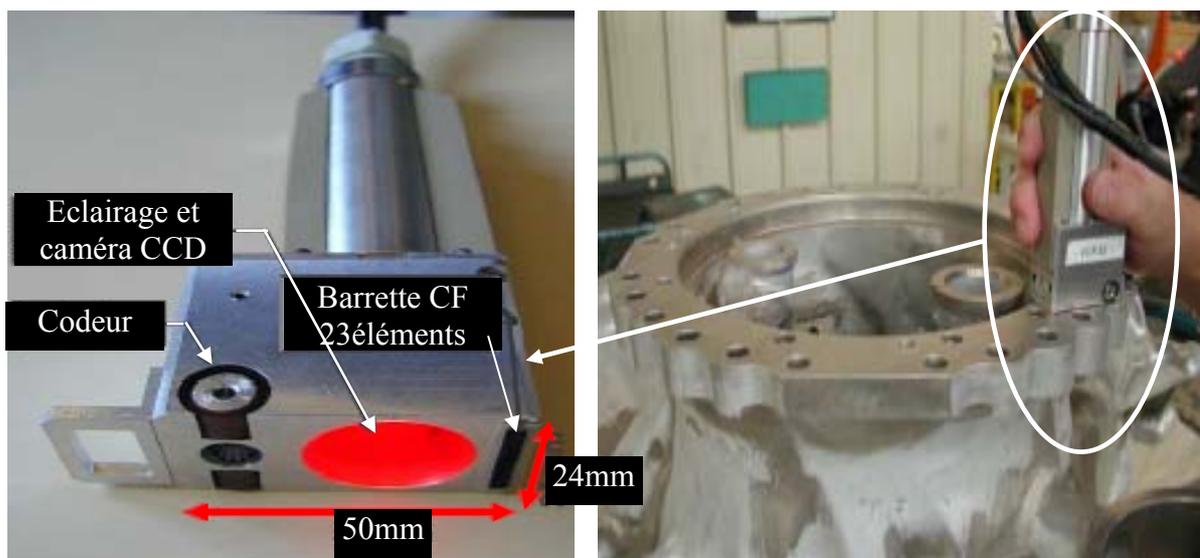
### 2.4.1 Exemple d'un système multi-capteurs (Sonde multiéléments et caméra haute résolution)

Cet exemple présente le développement récent d'une sonde multiéléments pour des applications aéronautiques. Le CEA a réalisé, en partenariat avec CYBERNETIX et EUROCOPTER, un système innovant, nommé CODECI et dédié au contrôle de petits défauts débouchants. Cet outil combine une sonde CF multiéléments et une caméra haute résolution afin d'assurer une description complète et fiable de défauts potentiels en temps réel (voir figure 2.11). La validation expérimentale de ce système confirme la très bonne détection des défauts, avec une précision d'évaluation de leur profondeur d'environ 0.2 mm.

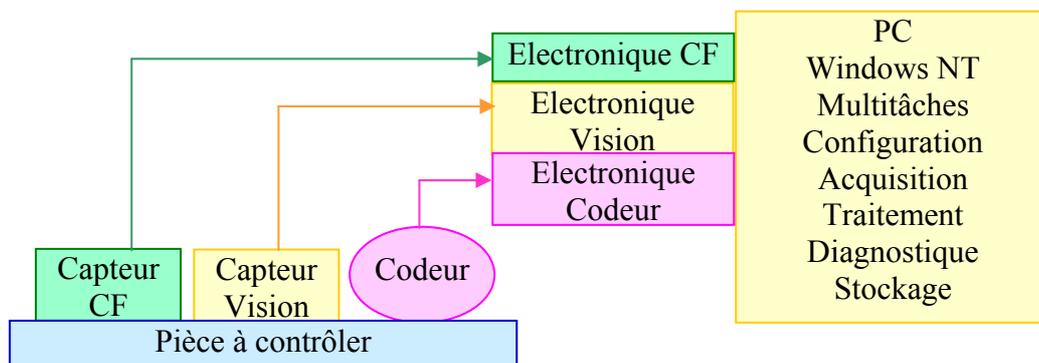
La particularité de ce projet est de combiner en temps réel deux technologies, vision et Courants de Foucault (CF), afin d'améliorer la détection et la caractérisation de petits défauts débouchants, [14]

#### 2.4.1.1 Description générale du système

Le système global est constitué d'une sonde bi-technologie et d'un système informatique implanté sur une plate-forme PC avec un système d'exploitation Windows NT (Figure 2.12). Le système informatique réalise en temps réel les fonctions d'acquisition et d'analyse des signaux.



**Figure 2.11** Vue générale de la sonde, et mise en situation du contrôle d'un carter de boîte de vitesse d'hélicoptère, [14]



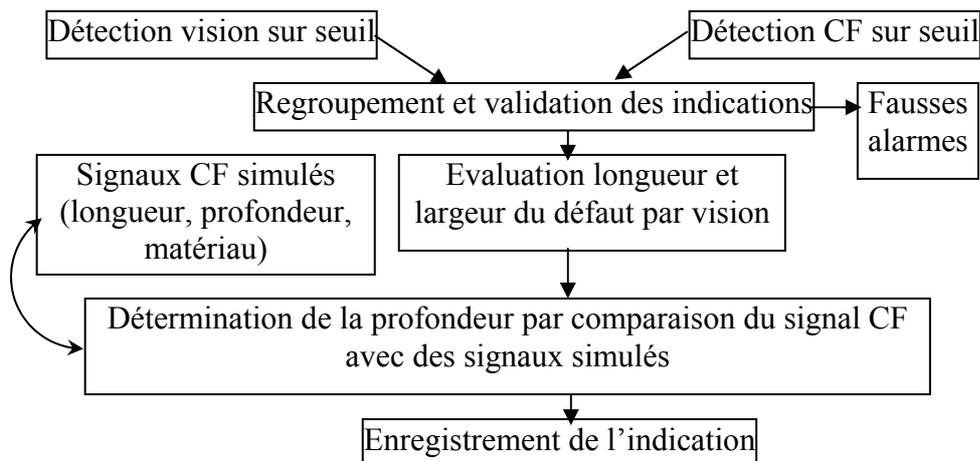
**Figure 2.12** Architecture globale du système, [14].

Un multiplexeur CF à 32 voies a été développé spécifiquement afin de piloter la commutation des voies. La fréquence de commutation est réglable de quelques Hz à 1 kHz, et la fréquence de récurrence résultante pour le balayage de toutes les bobines de la sonde est de 30 Hz.

Compte tenu des valeurs de la fréquence de commutation du multiplexeur et des paramètres d'échantillonnage, la vitesse de déplacement de la sonde est de 15 mm/s, [14].

### 2.4.1.2 Caractérisation des défauts

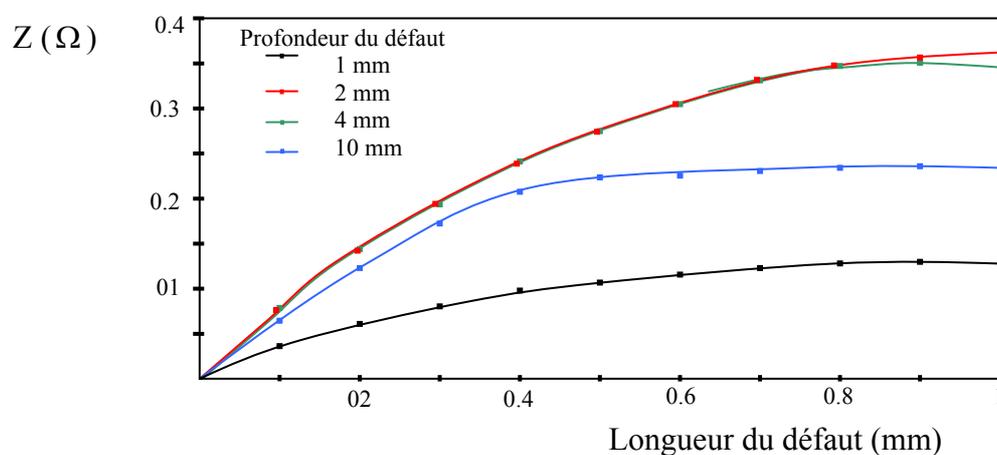
Les différentes étapes permettant la détection et l'analyse globale des défauts sont données sur la figure 2.13 qui présente l'algorithme d'analyse des défauts détectés.



**Figure 2.13** Algorithme d'analyse des défauts détectés, [14].

L'analyse simultanée des informations vision et CF présente deux intérêts : elle permet d'une part de fusionner les données et de trier les informations en fonction de leur gravité. Les fausses alarmes pouvant apparaître avec l'une de ces techniques de contrôle (rayures pour la vision, variation d'entrefer pour les CF) sont ainsi supprimées du diagnostic final.

Le couplage de ces deux technologies permet d'autre part d'améliorer la caractérisation des défauts (longueur, largeur et profondeur).



**Figure 2.14** Variation d'impédance, [14]

Ce comportement non linéaire est directement lié à l'atténuation quasiexponentielle des courants induits dans le matériau et a comme conséquence une estimation de la profondeur des défauts plus précise pour les défauts peu profonds.

La figure 2.14, présente la variation d'impédance obtenue par simulation pour différentes longueurs de défaut, et évaluation de la profondeur du défaut par comparaison entre résultats expérimentaux et simulation, [14].

### 2.4.1.3 Résultats

Un exemple de l'interface utilisateur de l'application CODECI est donné en Figure 2.15 pour des défauts de 1 mm de longueur et de différentes profondeurs dans un alliage d'aluminium.

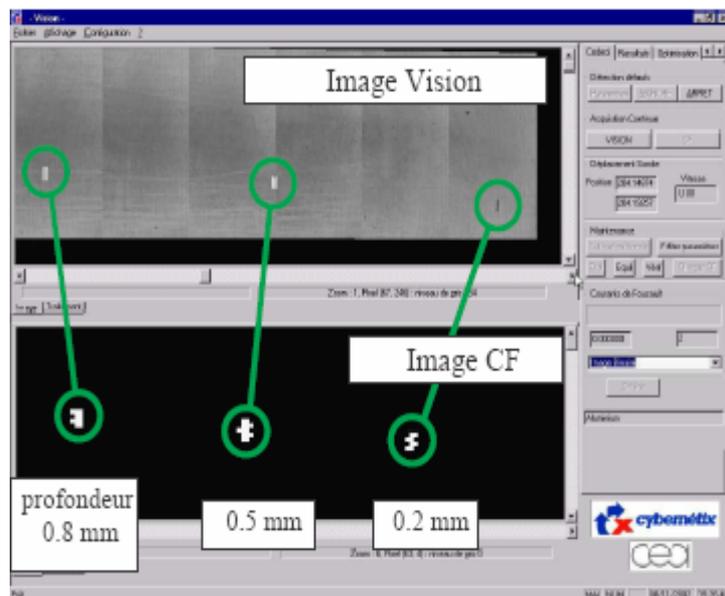


Figure 2.15 : Interface utilisateur de l'application CODECI, [14].

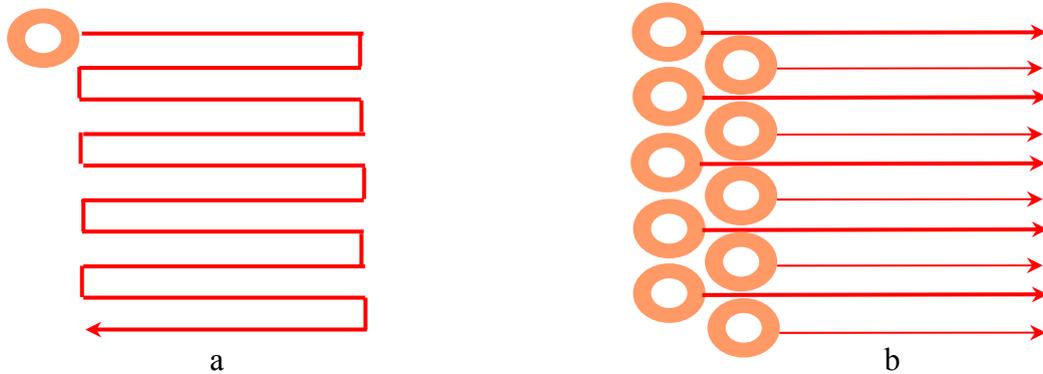
L'image supérieure est la concaténation des différentes images prises par la caméra et numérisées en niveau de gris. L'image inférieure est une image reconstituée à partir des données CF les défauts apparaissent en blanc sur fond noir. L'affichage des images est synchronisé au déplacement relatif de la sonde par rapport à la pièce à contrôler. Dans l'exemple présenté sur la Figure 2.15, la détection est très bonne et la précision de l'évaluation de la profondeur est d'environ 0.2 mm, [14].

### 2.4.1.4 Perspectives du projet

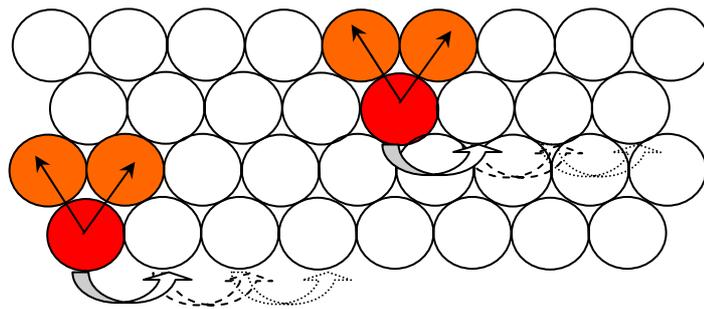
Des développements supplémentaires sont aujourd'hui nécessaires pour contrôler des géométries déformées, et contrôler des configurations complexes telles que des réseaux de fissures. Cette application montre d'autre part l'apport des outils de simulation CF pour optimiser le design des capteurs, et améliorer la caractérisation (longueur, largeur, profondeur) des défauts, [14].

### 2.4.2 Multi-capteur à courants de Foucault

L'emploi de sondes CF multiéléments permet de remplacer un des deux axes dans un balayage bidimensionnel et offre plus de souplesse dans la configuration des courants de Foucault (figure 2.16). La figure 2.17, montre le Principe du multiplexage entre les éléments



**Figure 2.16** Substitution d'un balayage de 10 parcours avec un autre d'un seul parcours  
 a : Bobine simple = balayage ligne par ligne ;  
 b : Bobines multiples = balayage sur une ligne, [13].

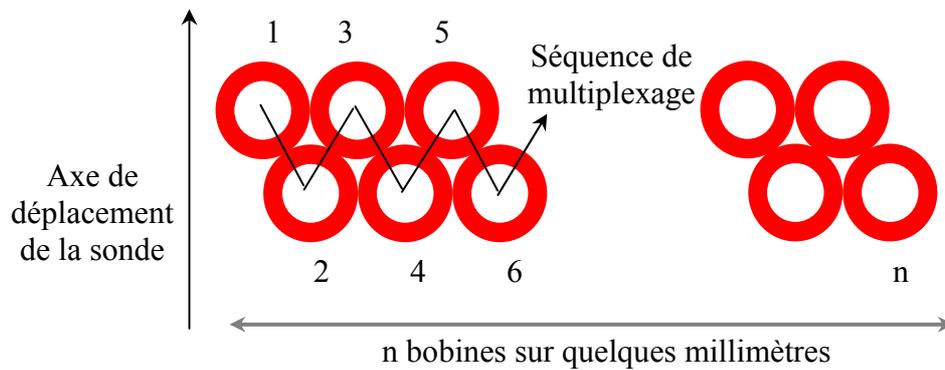


**Figure 2.17** Principe du multiplexage entre les éléments, [13]

#### 2.4.2.1 Technologie des courants de Foucault multiéléments

La technologie des courants de Foucault multiéléments (ECA, eddy current array) permet d'exciter et de lier électroniquement plusieurs capteurs CF disposés côte à côte dans un même assemblage de sonde. L'acquisition de données peut être réalisée au moyen du multiplexage, qui évite l'inductance mutuelle entre les capteurs individuels. Exemple de la configuration de test de l'OmniScan™ ECA supporte 32 bobines de capteur (jusqu'à 64 avec un multiplexeur externe) qui fonctionnent en mode pont ou émission-réception. La fréquence de fonctionnement varie entre 20 Hz et 6 MHz avec l'option qui permet d'utiliser plusieurs fréquences dans la même application, [13].

Figure 2.18, présente une implantation des bobinages pour la sonde multiéléments à courants de Foucault, et description de la séquence de commutation des voies.

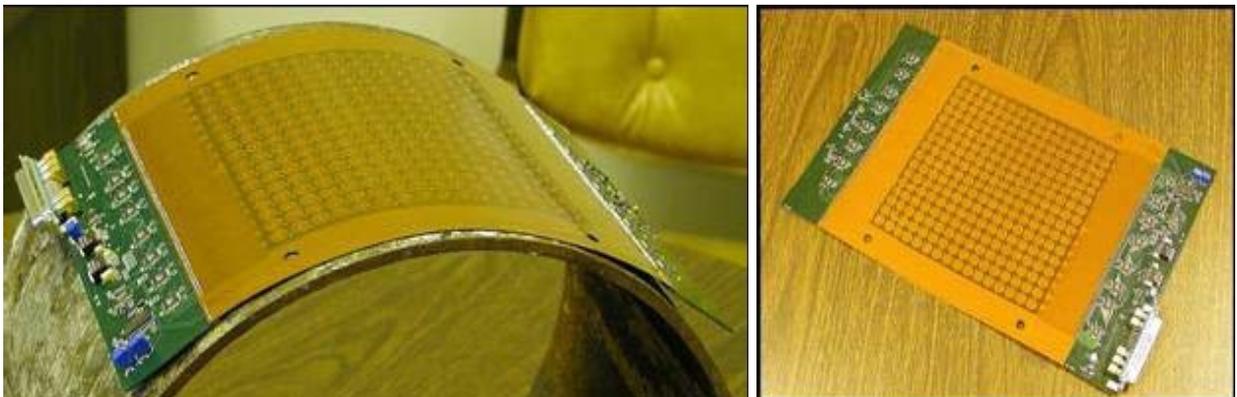


**Figure 2.18** Implantation des bobinages pour une sonde multiéléments à CF, [14]

### 2.4.2.2 Qu'est ce qu'une sonde CF multiéléments?

C'est une sonde qui est :

- Composée de beaucoup d'enroulements pour permettre une sensibilité plus élevée ;
- Chaque enroulement balaye un secteur spécifique ;
- Chaque enroulement est optimisé pour une application déterminée ;
- Aucune interférence entre les enroulements ;
- N'importe quelle forme est possible ;
- Multiplexage intégré spécial au besoin de l'électronique ;
- Peut être optimisé pour différentes applications ;
- Peut être formé à suivre la pièce à inspecter, [19].



**Figure 2.19** Une sonde multiéléments à courants de Foucault

La figure 2.19, montre une sonde multiéléments à courants de Foucault conforme à une forme courbée comme illustrer à gauche de la figure.

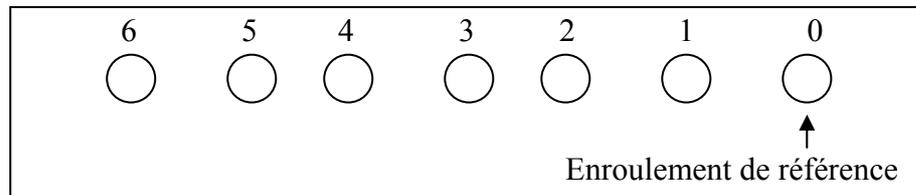
### 2.4.2.3 Géométries d'une sonde CF multiéléments

Généralement, les géométries d'un capteur multiéléments utilisés sont : la structure linéaire uniforme (ULA) et la structure circulaire uniforme (UCA). Une structure planaire uniforme (UPA) où des sondes sont placées sur une grille rectangulaire équiépacée.

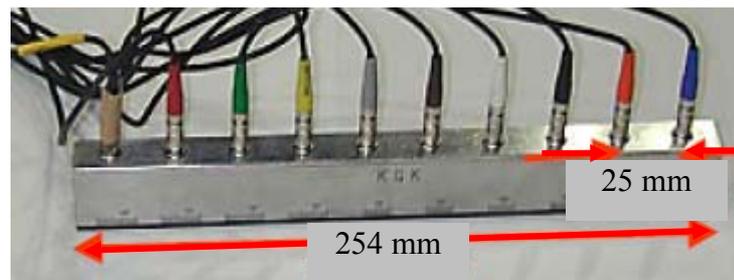
Un front d'ondes qui propage à travers les multiéléments est pris par toutes les sondes. Ainsi, nous n'avons pas un mais beaucoup de sorties qui constituent le signal de rangée. Dans le cas le plus simple, tous les signaux sont simplement des reproductions retardées d'une forme d'onde du signal de base. Dans le plus mauvais cas, les sorties individuelles de la sonde sont fortement corrompues avec le bruit et toute autre interférence, portant une ressemblance très petite parmi elles. Le traitement matriciel implique la combinaison de toutes les sorties d'une façon optimale de sorte que le signal principal émis est reçu et toutes autres perturbation sont au maximum jetées, [21].

### 2.4.2.3.1 Rangée linéaire uniforme

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



**Figure 2.20** Structure linéaire uniforme, [20]



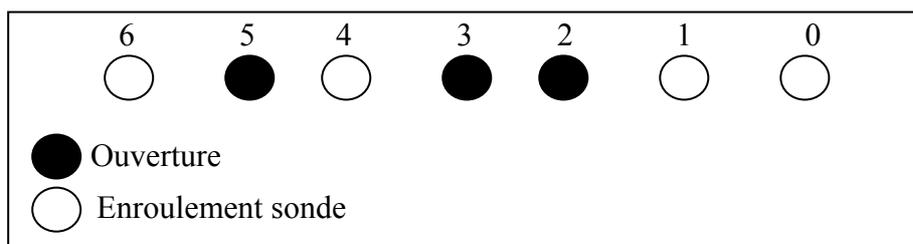
**Figure 2.21** Structure ULA réelle, [21]

La figure 2.20, montre une rangée linéaire uniforme de sondes. La sonde à l'extrême gauche est la sonde de référence par rapport à laquelle tout les retards sont mesurés.

La figure 2.21, montre un ULA réel de 254 mm de longueur et 25mm d'épaisseur, [20].

### 2.4.2.3.2 Rangée linéaire non uniforme

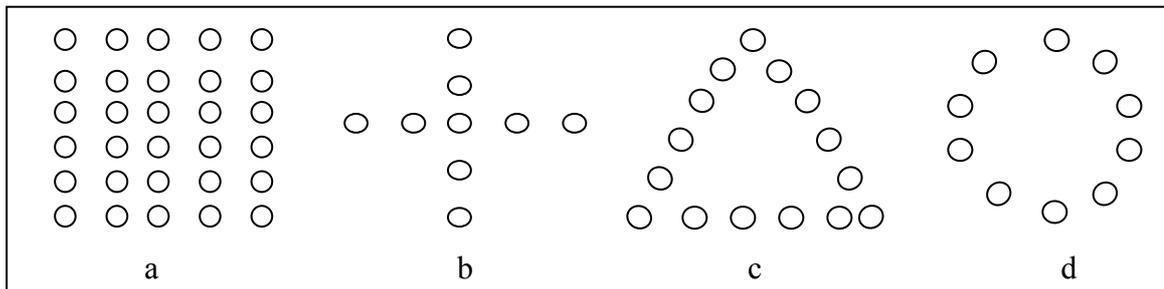
Une répartition d'une rangée de quatre sondes avec une inclusion de trois ouvertures, c'est une répartition non uniforme, (voir figure 2.22), [20].



**Figure 2.22** Une répartition d'une rangée de quatre sondes avec une rangée de 3 ouvertures, [20]

### 2.4.2.3.3 Rangée planaire:

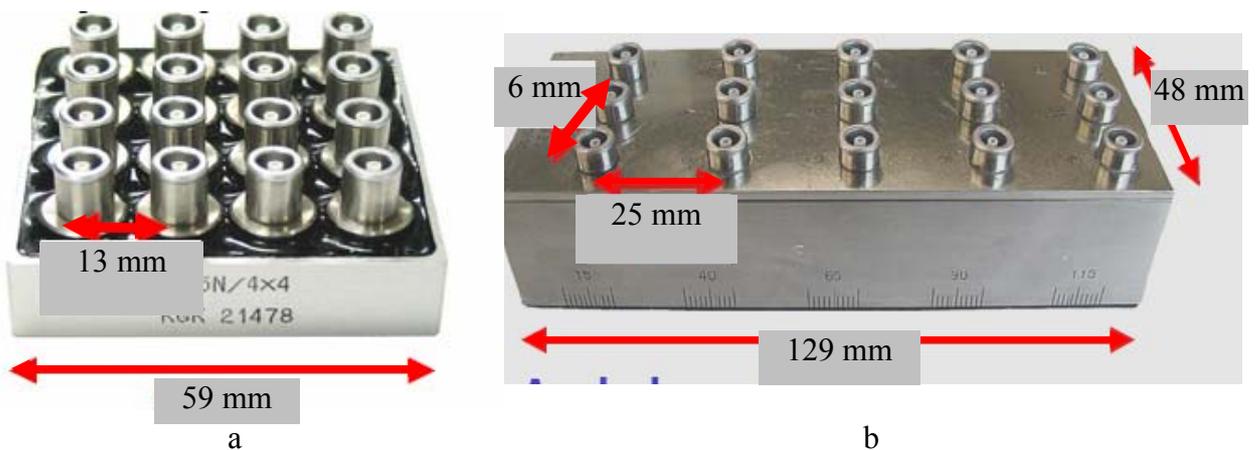
Il existe des rangées planaire uniforme (UPA) et non uniforme. Des géométries de rangée planaires sont montrées sur la figure 2.23, [20].



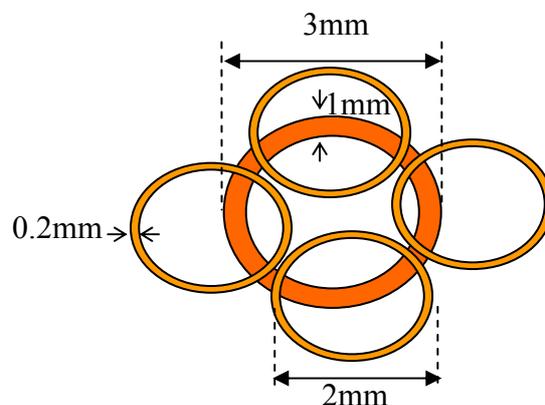
**Figure 2.23** Géométries planaires d'un multiéléments ; a : Structure carrée uniforme ; b : Structure croisée ; c : Structure triangulaire ; d : Structure circulaire, [20].

La distribution carrée (figure 2.23.a, on en voit une structure réelle sur la figure 24.a) ou rectangulaire dont on voit une structure réelle sur la figure 2.24.b. Les autres géométries sont des versions clairsemées de la structure carrée et rectangulaire.

La figure 2.25 représente une disposition organisée de quatre sondes de détections en plus d'une sonde excitatrice (d'une géométrie circulaire), [20].



**Figure 2.24** Structure carrée et rectangulaire uniforme, [21]



**Figure 2.25** Schéma de quatre sondes (forme circulaire UPA), [22]

### 2.4.2.4 Interprétation du signal

Ce paragraphe décrit les signaux qui sont produits l'or du passage de la sonde à courants de Foucault au-dessus du défaut.

La figure 2.26, montre l'image qui peut être construite quand une sonde multiéléments (ECA) passe au-dessus d'un défaut. Dans ce cas, l'enroulement juste au-dessus de la paille produit un signal fort.

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

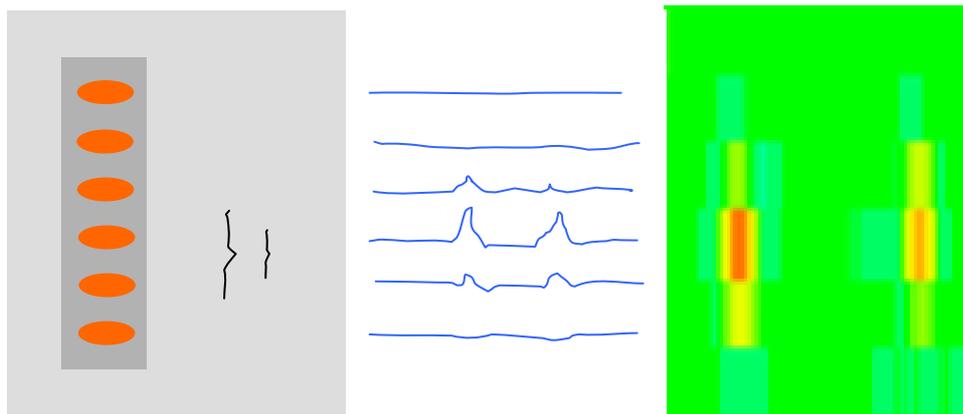


Figure 2.26 Principe de détection de défaut d'un ECA, [9]

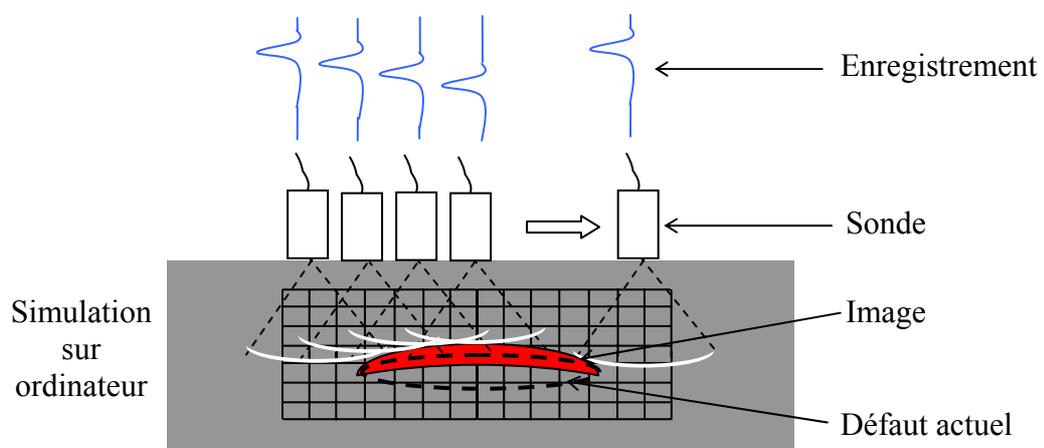


Figure 2.27 Principe de formation d'image du défaut, [21]

La figure 2.27 illustre le principe de formation d'image du défaut dans l'inspection par un capteur multiéléments. C'est le même principe employé pour l'inspection d'une cible par un capteur unique à courants de Foucault (paragraphe 1.7).

### 2.4.2.5 Comparaison entre les techniques CF et CF multiéléments

Une comparaison faite entre les sondes à courants de Foucault (encerclantes et tournantes) et les sonde multiéléments est résumée dans le tableau 2.1, [23]

Tableau 2.1

	Sonde encerclante	sonde tournante	Sonde multiéléments
Détecter les pailles courtes	oui	Non	Oui
Détecter les longues fontes	Non	Oui	Oui
Détecter les fontes transversales	Non	Non	Oui
Vitesse d'inspection	rapide	moyen	rapide
Vitesse de rotation	Non applicable	6,000 RPM à 18,000 RPM	60,000 RPM à 120,000 RPM
Adaptation aux formes non cylindriques	Oui, mais faible détection	Non	Oui, hexagonal, carré, plat, et d'autres

#### 2.4.2.6 Avantages des CCF multiéléments

Comparée avec la technologie CF monocanal, la technologie CF multiéléments procure les avantages suivants, [13] :

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

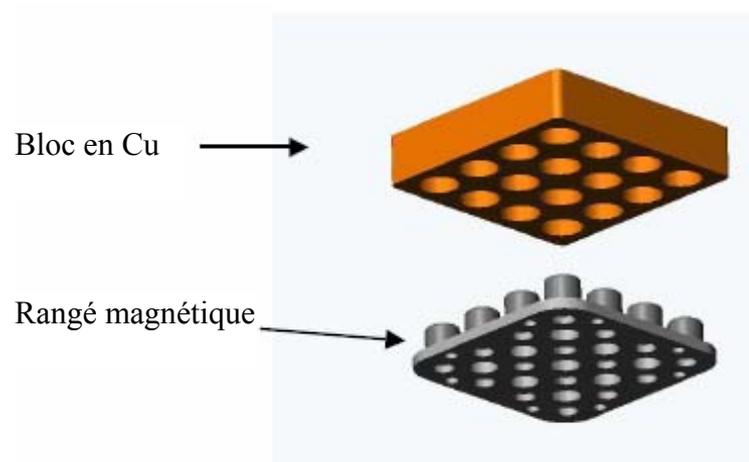
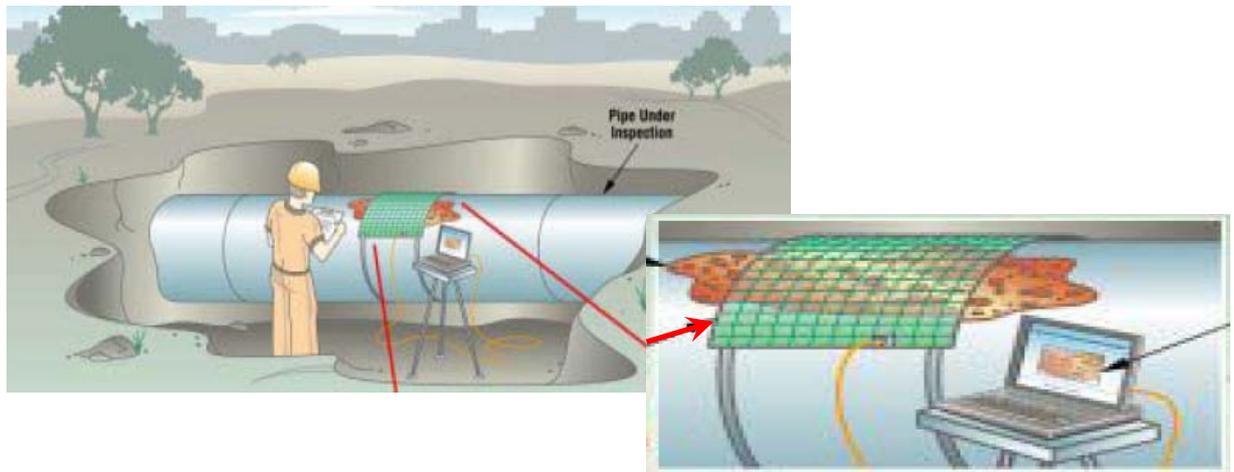


Figure 2.28 Exemple de ECA, [24]



**Figure 2.29** ECA flexible pour le contrôle des tubes, [25]

Les figures 2.28, 2.29, présentent des exemples de ECA, la première est munie d'un blindage amagnétique en cuivre elle peut détecter le défaut, sa profondeur et sa longueur, la deuxième est une sonde flexible pour le contrôle des tubes.

### Conclusion

*Des progrès technologiques importants ont été réalisés ces dernières années dans le domaine des capteurs multiéléments, la plupart du temps en terme de systèmes d'acquisition (versatilité, miniaturisation) et de technologie de capteurs. Un tel progrès fait de la technologie multiéléments un outil très puissant pour un grand nombre d'applications industrielles.*

*La simulation est un outil indispensable pour développer ces techniques (multiéléments). Elle intervient dès la phase de conception du traducteur pour définir la géométrie et optimiser la répartition des éléments en fonction de l'application.*

*Les outils de simulation du logiciel Matlab qui sera utilisé dans la suite du travail, permettent d'évaluer les performances de ces techniques dans des configurations de contrôle réalistes.*

*Dans le chapitre suivant, nous allons mettre en œuvre le contrôle par courants de Foucault, pour cela, on propose deux cibles avec les géométries les plus fréquemment rencontrées, il s'agit d'un cylindre exemple d'un pipe line et d'une plaque exemple de surface d'une pièce plate.*

## **CHAPITRE TROIS**

# **Analyse par MEF et Simulation de la Détection par un CCF**

## Introduction

*Les phénomènes électromagnétiques (électriques et magnétiques) se présentent dans plusieurs dispositifs tel que les machines électriques, les appareils de coupure, les appareillages à haute tension, etc. Ces phénomènes sont produits par des charges électriques, des courants et des aimants permanents. L'électromagnétisme considère les phénomènes électriques et magnétiques à un niveau macroscopique.*

*L'effet d'induction par courants de Foucault présente le phénomène électromagnétique prépondérant dans le contrôle non destructif par courants de Foucault qui est généré par un couplage des champs magnétiques et électriques dans un modèle magnétodynamique. La description de ce phénomène à l'intérieur d'une théorie unifiée de l'interaction électromagnétique fût l'œuvre de Maxwell en 1864. Grâce au remarquable travail de ce théoricien, on a pu décrire le comportement électromagnétique à l'aide des quatre équations fondamentales.*

*Parmi les logiciels les plus populaires dans les milieux scientifiques dans le domaine du calcul des courants induits nous citons, [26] : Maxwell 2D/3D, (USA), Trifou (MEF, méthode des éléments intégrales de frontières) (Fr), Flux 2D/3D (Fr), PC-Opera 2D/3D (UK), Matlab P.D.E Tool-Box (USA), etc...*

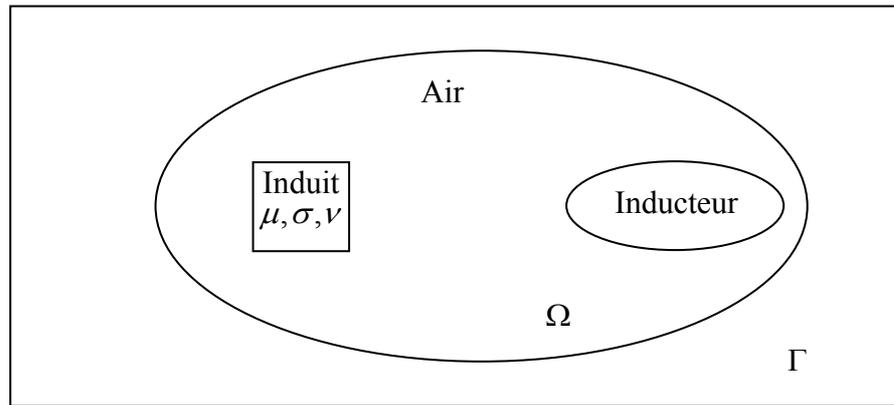
*Dans ce chapitre, nous allons modéliser l'ensemble capteur-cible en passant par les équations de Maxwell pour la mise en forme de l'équation qui gère le phénomène de la détection puis on passera en revue la méthode de résolution par éléments finis qui sera utilisée pour la résolution de ce problème électromagnétique.*

*Le programme établi pour la simulation, dont on présentera l'organigramme par la suite, sera appliqué pour la détection des défauts sur un cylindre et une plaque, deux cibles les plus fréquemment rencontrées, en plus on effectuera de différentes applications pour la validation de la détection. L'ensemble des résultats sera discuté.*

### 3.1 Mise en équation du problème physique

#### 3.2.1 Sans mouvement

Le problème type des dispositifs électrotechniques, peut se définir formellement par un dispositif constitué de bobines conductrices dans lesquelles circule un courant variable dans le temps, d'une boîte d'air englobante et de régions ferromagnétiques ou conductrices des courants induits et qui peuvent être en mouvement, figure 3.1, [27].



**Figure 3.1** Problème du type électromagnétique

$\Omega$  : représente l'air ;

$\Gamma$  : représente le domaine d'étude.

### 3.2.1.1 Équations de Maxwell

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques peut être décrit par six grandeurs qui dépendent du temps et de l'espace et qui sont les suivants:  $\vec{H}(x,t)$ ,  $\vec{E}(x,t)$ ,  $\vec{B}(x,t)$ ,  $\vec{D}(x,t)$ ,  $\vec{J}(x,t)$ ,  $\rho(x,t)$ .

Ces différentes grandeurs sont liées par les équations de Maxwell qui décrivent, de façon générale, les lois de l'électricité, [28].

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (3.4)$$

L'équation (3.1) et (3.2) expriment le couplage et l'évolution des grandeurs électriques et magnétiques, alors que l'équation (3.3) assure la conservation du flux magnétique.

La loi de la conservation de la charge électrique (3.5) est obtenue à partir des équations (3.1) et (3.4).

$$\text{div} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.5)$$

### 3.2.1.2 Comportement des matériaux

Les équations de Maxwell sont générales et s'appliquent à tous les milieux. Pour prévoir le comportement des phénomènes électromagnétiques, il faut ajouter à ces équations des relations particulières aux milieux considérés : les relations de constitution. Ces relations se formulent de la façon suivante :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (3.7)$$

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (3.8)$$

Les coefficients  $\varepsilon, \mu, \sigma$  sont particuliers aux milieux considérés. Dans le cas du vide  $\varepsilon$  prend la valeur  $\varepsilon_0$ ,  $\mu$  prend la valeur  $\mu_0$  et  $\sigma$  sera nulle, [28].

### 3.2.1.3 Conditions aux limites

Après avoir défini la géométrie, les caractéristiques électromagnétiques des matériaux utilisés et les sources actives et leurs valeurs, et afin de pouvoir résoudre le système d'équations d'état, il est nécessaire de définir des conditions aux limites caractérisant le dispositif étudié.

Elles sont nécessaires pour la prise en compte des symétries du système. Ces conditions aux limites sur le potentiel vecteur magnétique sont en rapport avec les phénomènes physiques que vérifie le champ sur les bords du domaine.

Afin de pouvoir résoudre entièrement cette équation, il est nécessaire d'imposer des conditions sur les limites du domaine d'étude. Trois types de conditions existent :

■ **Condition de Neumann** homogène qui impose que la dérivée normale du potentiel vecteur A

est égale à zéro  $\left(\frac{\partial A}{\partial n}\right) = 0$  sur la partie choisie de contour du domaine d'étude ;

■ **Condition de Dirichlet** qui impose la valeur du potentiel vecteur sur la partie choisie du contour du domaine d'étude.

■ **Condition de symétrie** ou **condition de périodicité** ou **anti-périodicité** selon la parité de la partie du système étudié, [29].

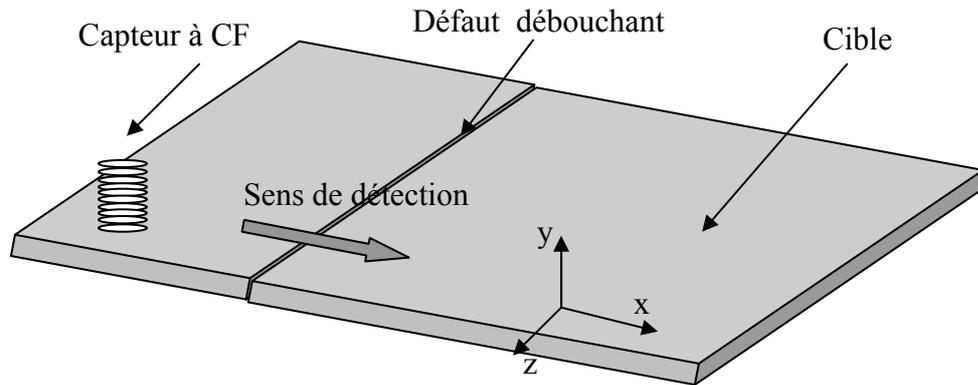
### 3.2.1.4 Mise en forme de l'équation

Tous les systèmes électrotechniques en mouvement sont régis par le système d'équations suivantes, [32] :

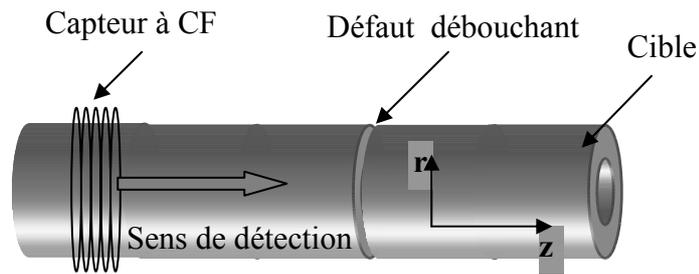
$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H} = \vec{J} \\ \text{div } \vec{B} = 0 \\ \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{B} = \vec{B}(H) \\ \vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \end{cases} \quad (3.9)$$

#### 3.2.1.4.1 Modèle à étudier (en 3D)

Pour mettre en évidence la détection par courants de Foucault on propose les deux systèmes les plus fréquemment rencontrés, dont la cible du premier représente une plaque (figure 3.1) et celle du second est cylindrique (figure 3.2).



**Figure 3.2** Premier modèle proposé en 3D



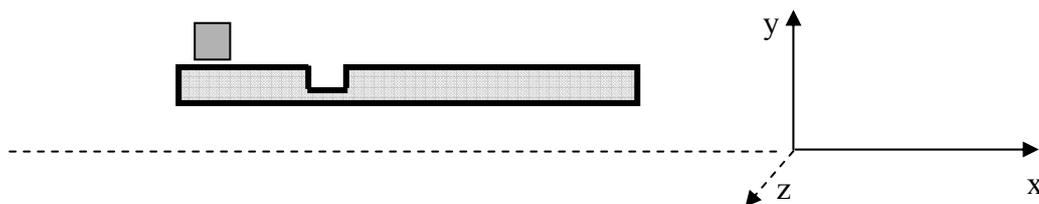
**Figure 3.3** Deuxième modèle proposé en 3D

Une analyse de la structure complète en 3D s'avère fastidieuse et coûteuse en terme de temps de calcul. D'autre part l'analyse à une dimension (1D) est peu représentative. L'emploi des modèles 2D est particulièrement simple, efficace et son choix est réalisable.

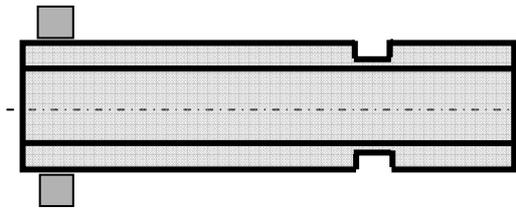
Dans le cas de la plaque le passage du modèle en 3D vers celui en 2D se fait en éliminant l'axe  $x$ , qui représente un axe de symétrie ce qui réduit le système de la figure 3.2 à celui présenté sur la figure 3.4.

Dans le cas du cylindre le système représente une symétrie par rapport à l'angle  $\theta$ . Le passage du modèle en 3D (figure 3.3) vers celui en 2D (figure 3.6) se fait en faisant deux coupes successives selon l'axe  $\vec{u}_\theta$ .

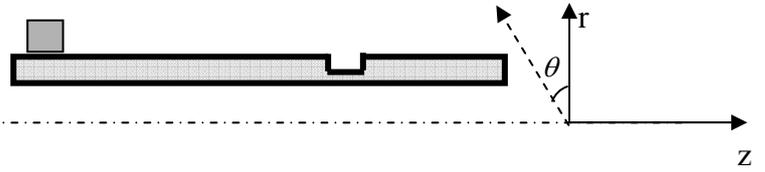
La modélisation d'une cible plane ou cylindrique dans ce cas là (un seul capteur) revient au même, le modèle en 2D du premier (figure 3.4) et celui du deuxième (figure 3.6) sont similaires.



**Figure 3.4** Réduction du modèle en 2D



**Figure 3.5** Réduction du modèle en 2D  
(première coupe)



**Figure 3.6** Réduction du modèle en 2D  
(deuxième coupe)

L'équation électromagnétique d'un système axisymétrique où le terme  $grad(V)$  est nul, est, [33] :

$$v(\text{rot}(\text{rot}(\vec{A}))) = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + \vec{J}_s \quad (3.10)$$

L'équation vectorielle projetée sur les axes de coordonnées cylindriques donne naissance à la formulation analytique suivante, [31] :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \sigma \mu \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial t} = \mu J_s \quad (3.11)$$

avec :

$$J = \begin{Bmatrix} 0 \\ J_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad E = \begin{Bmatrix} 0 \\ E_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad A = \begin{Bmatrix} 0 \\ A_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad H = \begin{Bmatrix} H_r \\ 0 \\ H_z \end{Bmatrix} \quad B = \begin{Bmatrix} B_r \\ 0 \\ B_z \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

L'équation vectorielle projetée sur les axes de coordonnées cartésiennes donne naissance à la formulation analytique suivante :

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) + \sigma \mu \frac{\partial A_x}{\partial t} = \mu J_s \quad (3.13)$$

avec :

$$J = \begin{Bmatrix} j_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad E = \begin{Bmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad A = \begin{Bmatrix} A_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad H = \begin{Bmatrix} 0 \\ H_y \\ 0 \end{Bmatrix} \quad B = \begin{Bmatrix} 0 \\ B_y \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

### 3.2.1.5 Méthodes de résolution

La modélisation des systèmes électriques peut être réalisée par deux types de méthodes différentes :

- 📌 Les méthodes analytiques ;
- 📌 Les méthodes numériques.

Qui ont chacune leurs avantages et leur inconvénients, [29, 30, 31].

### 3.2.1.5.1 Méthodes analytiques

Historiquement, l'étude des circuits magnétiques et des machines électriques a été réalisée de manière analytique et même géométrique, car l'outil de calcul disponible était faible. Par contre, ces méthodes permettent de rendre compte du fonctionnement de ces machines, ainsi que des principaux phénomènes mis en jeu, [29, 30, 31].

### 3.2.1.5.2 Méthodes numériques

C'est dernières décades, les progrès de l'informatique ont permis le développement des méthodes numériques donnant des résultats globaux précis. De plus, elles fournissent des résultats locaux, tels que les flux et les potentiels à l'intérieur de la machine, qui permet d'agir sur la conception, de façon à améliorer les performances. Ces nouveaux outils sont bien adaptés aux validations de dimensionnement des machines. Diverses méthodes existent mettant en œuvre des niveaux de complexités différents. Nous pouvons citer une méthode complète et complexe nécessitant des moyens informatiques lourds pour des résultats considérés comme étant des résultats de référence, c'est la méthode des éléments finis. A un niveau de complexité moindre, nous pouvons aborder la méthode de modélisation par schéma magnétique équivalent ou encore appelée méthode des réseaux [29, 30, 31].

### 3.2.1.6 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) est capable d'analyser des distributions de champ magnétique dans tous les dispositifs puisqu'elle peut inclure tous les détails de structure, de matériel et d'excitation. Afin d'obtenir l'exactitude acceptable de l'analyse finie d'élément, la machine doit être coupée en nombre énorme d'éléments géométriques. On assume que les valeurs de champ sont une fonction simple de la position dans ces éléments, permettant l'interpolation des résultats. Le temps requis pour calculer la distribution de champ, cependant, pourrait être très long, particulièrement dans l'étape d'optimisation de conception, qui a besoin d'un grand nombre d'itérations pour atteindre une conception optimum. C'est seulement possible avec les ordinateurs à grande vitesse avec de grandes RAM (mémoire à accès sélective) et il suggère que la méthode d'élément finis puisse ne pas être la méthode la plus efficace pour résoudre les problèmes journaliers dans la conception des systèmes électriques.

Cette méthode est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une bonne précision et d'étudier de façon précise la répartition interne du flux magnétique, en prenant en compte les phénomènes de saturation et de création de courants de Foucault à l'intérieur des matériaux. Cette méthode est fondée sur la résolution des équations de Maxwell, [29,30, 31].

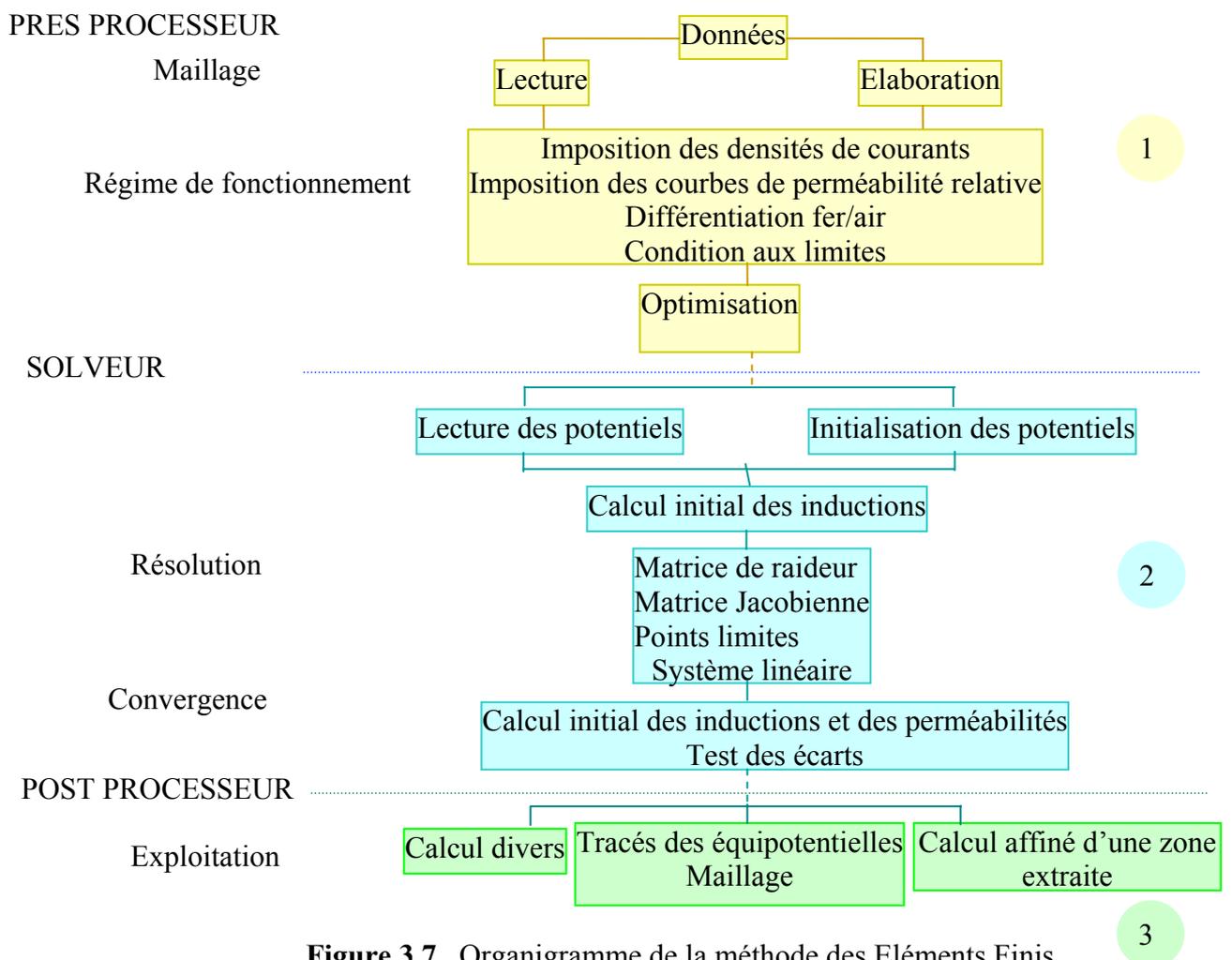
### 3.2.1.7 Organigramme de la MEF

L'organigramme (figure 3.7) est l'image de l'organisation générale d'un programme de calcul par éléments finis. Le déroulement séquentiel des opérations (hormis le rebouchage dû à la non linéarité du système) permet de distinguer trois groupes principaux :

- Préprocesseur, appelé communément mailleur, chargé de générer les données nécessaires à la résolution ;
- Processeur de résolution, dénommé solveur ;
- Postprocesseur d'exploitation des résultats.

Bon nombre d'études nécessitent l'utilisation de logiciels élément finis prenant en compte les régimes dynamiques engendrés par le déplacement d'une pièce par rapport aux autres. Ces derniers se caractérisent par des changements au niveau de l'entrefer. Le capteur et la cible du système sont considérés dans deux référentiels différents qui sont liés l'un à l'autre par l'application de modèles tels que la bande de mouvement ou le macro-élément.

Les logiciels éléments finis ont été validés par un grand nombre d'études donnant de très bons résultats avec une bonne précision, cependant l'inconvénient de cette méthode est un temps de calcul considérable pour des systèmes de grandes tailles en régime non linéaire [29, 30, 31].



**Figure 3.7** Organigramme de la méthode des Eléments Finis

### 3.2.1.8 Application de la MEF

Pour simuler numériquement le comportement magnétique des systèmes électrotechniques, nous utilisons le logiciel Matlab de calcul magnétique, électrique ou thermique par la méthode des éléments finis. Ce logiciel se décompose en quatre modules fondamentaux :

- Un module de description de la géométrie et du maillage de la structure ;
- Un module de définition des propriétés physiques de la structure à partir d'une banque de matériaux ;
- Un module de résolution, c'est-à-dire de calcul numérique (par la méthode des éléments finis) de la variable d'état (ici le potentiel vecteur) en tous les nœuds du maillage ;
  - La résolution est effectuée pour chaque pas de temps ;
  - En magnétique évolutif le pas de temps (en secondes) dépend de la vitesse.
- Un module d'exploitation permettant un calcul exhaustif des grandeurs microscopiques et macroscopiques (force électromagnétique, flux, ...).

Le logiciel utilisé sait exploiter les symétries d'une structure. Ainsi, il autorise à ne représenter qu'une section élémentaire du système, [29].

### 3.2.1.9 Eléments finis 1 et 2D

Les éléments 1D du premier, deuxième et troisième ordre sont montrés par la figure 3.8.

Deux types d'éléments en 2D du premier et deuxième ordre sont montrés par la figure 3.9. Ces éléments sont sous forme carrée et triangulaire, [26].

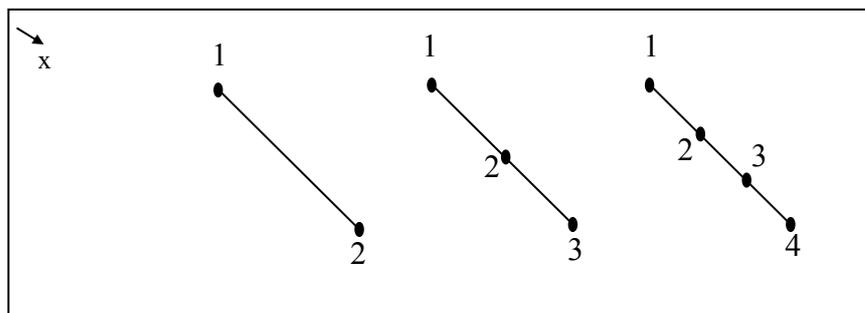


Figure 3.8 Géométrie des éléments finis en 1D, 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> ordre.

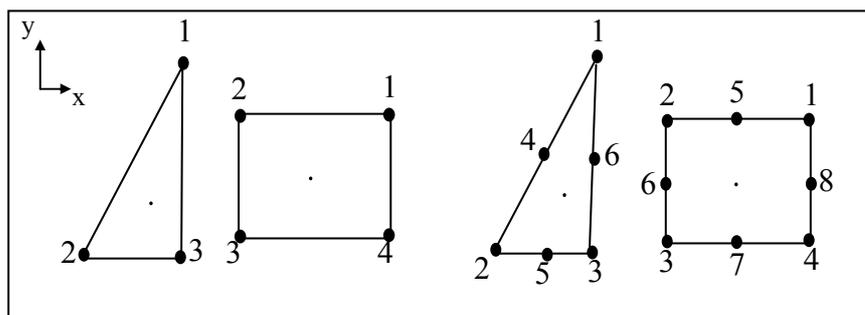


Figure 3.9 Géométrie des éléments finis en 2D, 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> ordre

### 3.2.1.10 Avantages et inconvénients

Les avantages de la méthode EF sont :

- ☞ Adaptation à des géométries complexes;
- ☞ Prise en considération de la non-linéarité physique.

Cette méthode présente des inconvénients qui sont les suivants:

- ☞ Mise en œuvre difficile ;
- ☞ Prise en considération de domaines infinis, [26].

### 3.2.2 Prise en compte du mouvement

La modélisation du mouvement dans de tels cas pose le problème de la continuité du champ entre les parties fixes et mobiles. Plusieurs approches ont été développées pour assurer la jonction entre les deux parties, [27].

#### 3.2.2.1 Méthodes hybrides

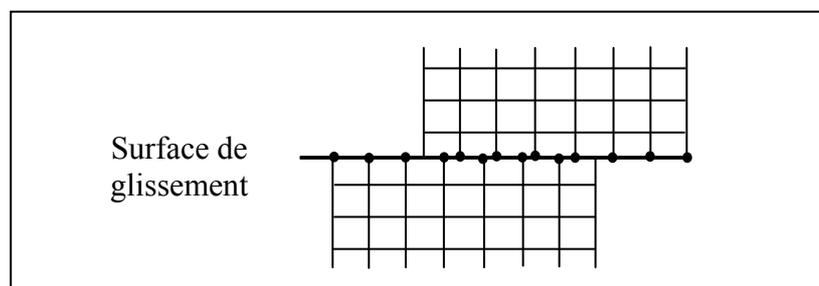
Elles reposent sur la combinaison de la méthode des éléments finis avec des techniques de résolution différente. Pendant que le reste du problème est classiquement maillé en éléments finis, l'entrefer est modélisé par une méthode analytique.

#### 3.2.2.2 Méthodes de remaillage

Dans un problème en mouvement, les positions relatives des régions fixes et mobiles varient dans le temps, et on peut donc envisager de remailler, à chaque pas de calcul, la nouvelle géométrie qui en résulte.

#### 3.2.2.3 Méthode avec surface de glissement

Si on considère que les régions du dispositif peuvent être réparties en deux maillages indépendants, glissant l'un par rapport à l'autre, et qu'il s'agit de reconnecter à chaque position relative, [27]



**Figure 3.10** Maillage indépendant avec surface de glissement

### 3.3 Détection avec un capteur à CF

Pour la détection par un capteur à CF, on propose les deux systèmes déjà présentés par les figures 3.2 et 3.3.

#### 3.3.1 Plaque saine

Il est nécessaire de connaître les phénomènes électromagnétiques régissant la détection des défauts. Pour cela on va visualiser les vecteurs d'induction, le potentiel vecteur, les lignes de champ et les courants induits dans une plaque (cible) magnétique.

La figure 3.11 montre l'organigramme du programme établi pour l'effectuation de la tâche.

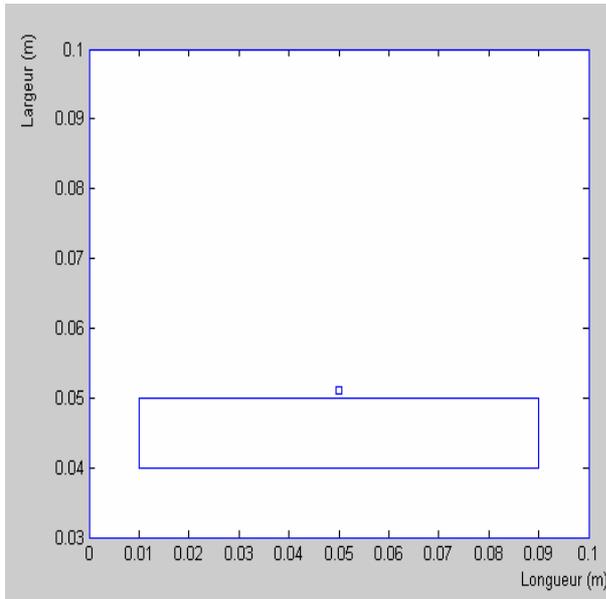
La figure 3.12, montre les contours de la géométrie du système décrit par Matlab.

Pour ce qui est du maillage de la géométrie (figure 3.12), nous pouvons faire les deux remarques suivantes :

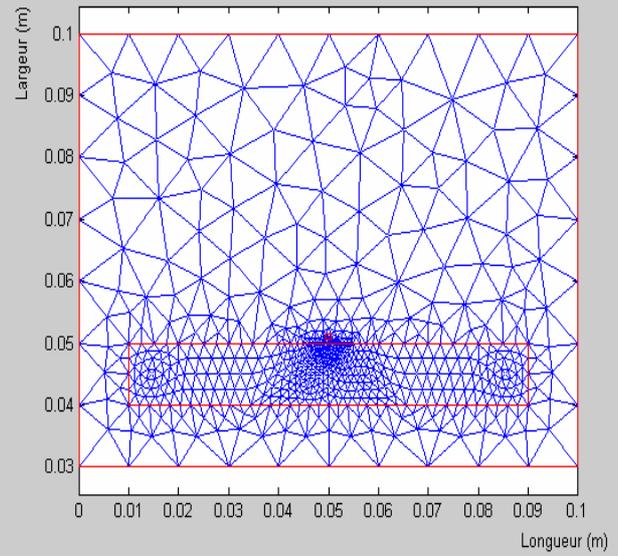
- ➡ Le maillage doit être suffisamment fin pour obtenir une précision suffisante ;
- ➡ Le maillage ne doit pas être trop dense sous peine de ralentir fortement les calculs.

On retiendra que l'air peut être maillé relativement d'une manière grossière, alors que le capteur et surtout la plaque doivent être maillés plus finement, [29].

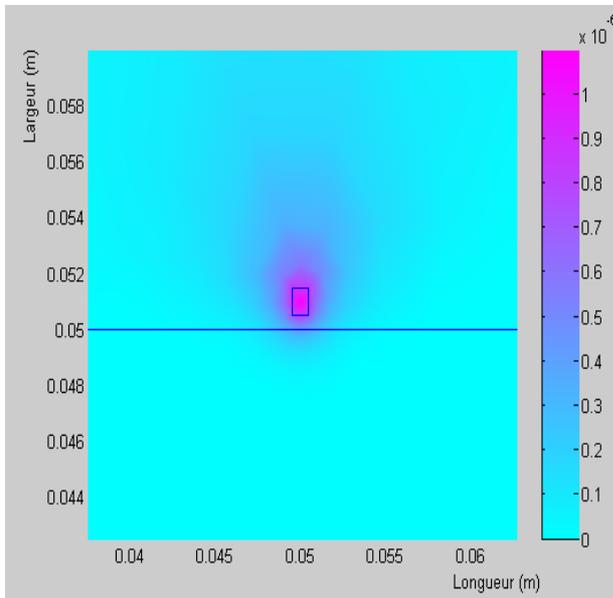
Les figures 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 représentent le maillage du système, le potentiel vecteur, les lignes de champ, les vecteurs d'induction et enfin les courants de Foucault, dans une plaque magnétique



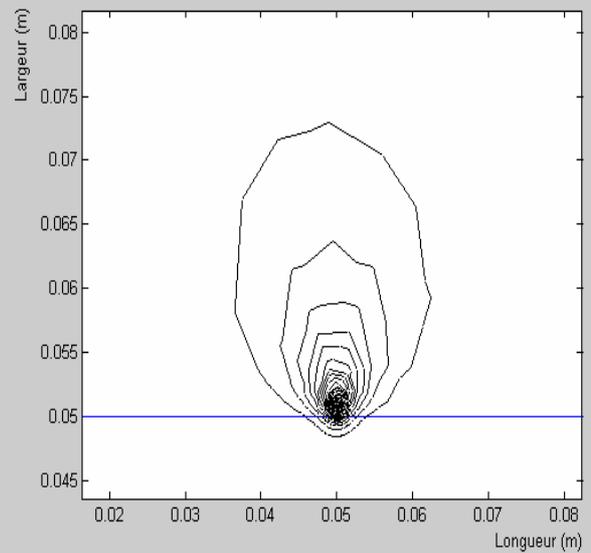
**Figure 3.12** Géométrie du système



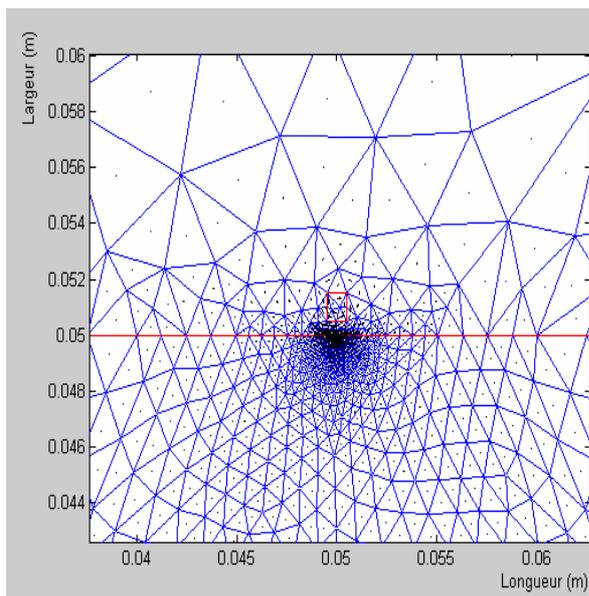
**Figure 3.13** Maillage de la géométrie



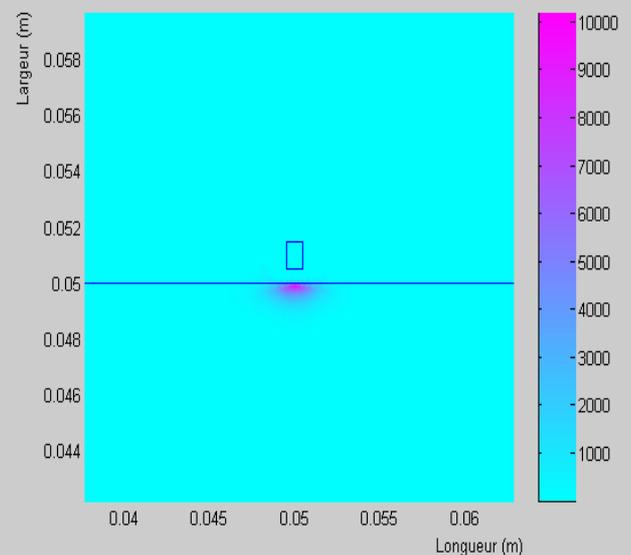
**Figure 3.14** Présentation du potentiel vecteur



**Figure 3.15** Présentation des lignes champs



**Figure 3.16** Présentation des vecteurs d'induction



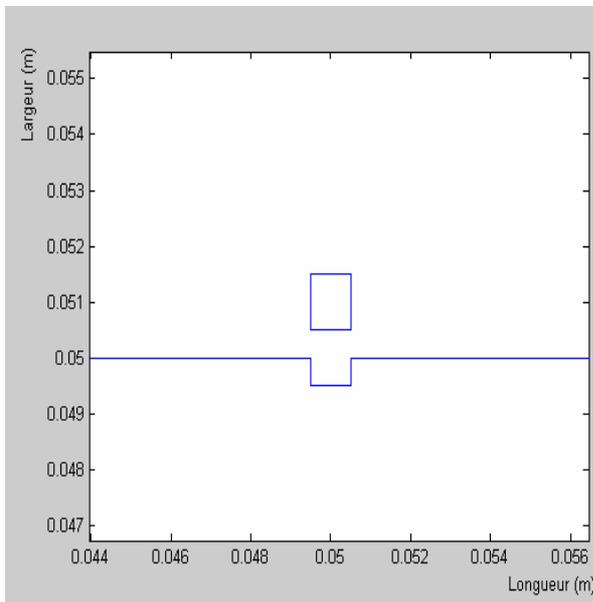
**Figure 3.17** Présentation des courants induits

### 3.3.2 Plaque défectueuse

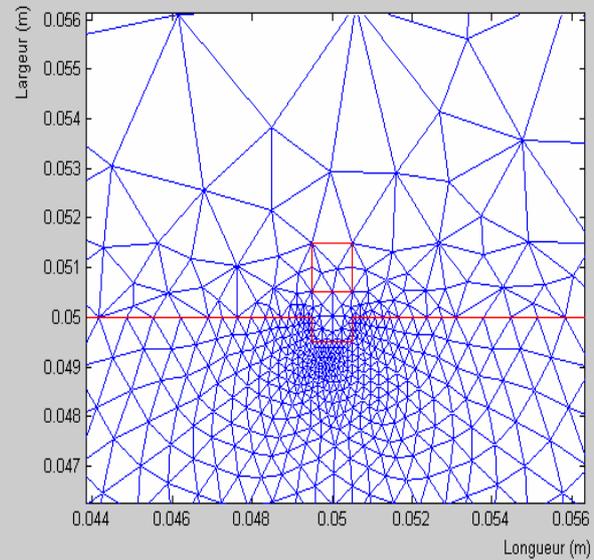
Dans le cas d'une plaque défectueuse, on obtient les figures 3.18, 3.19 ; 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, qui représentent successivement : la forme du défaut, le maillage de la structure, le potentiel vecteur, les lignes de champ, les vecteurs d'induction et enfin les courants de Foucault, dans la même plaque.

**Tableau 3.1**

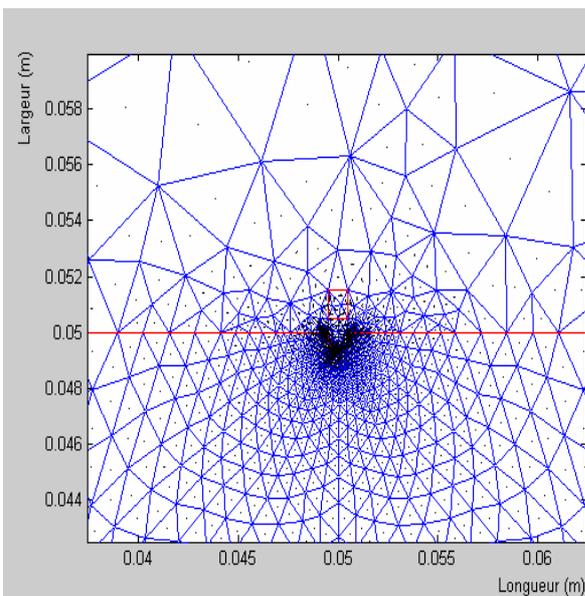
Largeur du défaut (selon l'axe z) (mm)	profondeur du défaut (selon l'axe r) (mm)	Z dans le cas d'une plaque saine ( $\Omega$ )	Z dans le cas d'une plaque défectueuse ( $\Omega$ )	$\Delta Z$ entre le cas d'une plaque saine et défectueuse ( $\Omega$ )
1	0.5	1.5241	1.5795	0.0554



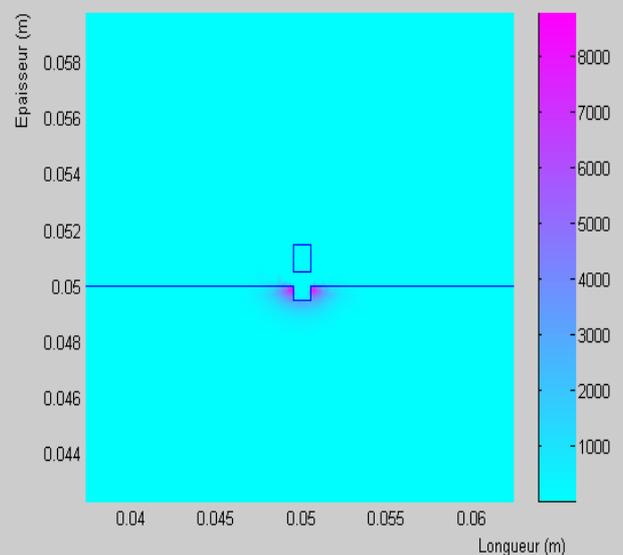
**Figure 3.18** Géométrie du défaut



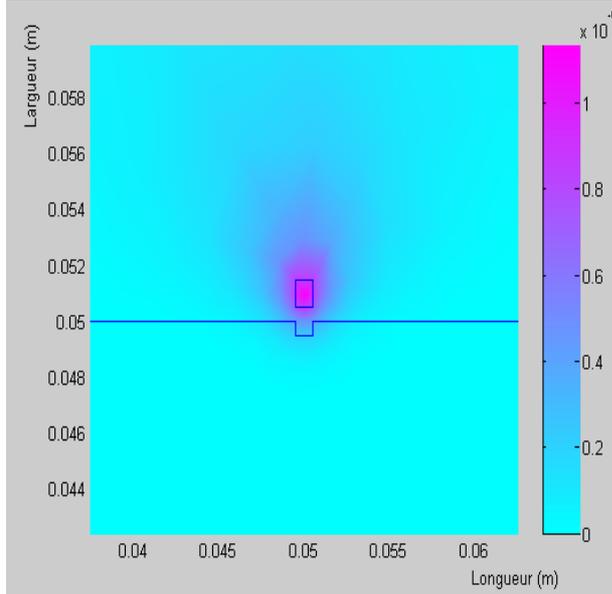
**Figure 3.19** Maillage de la géométrie



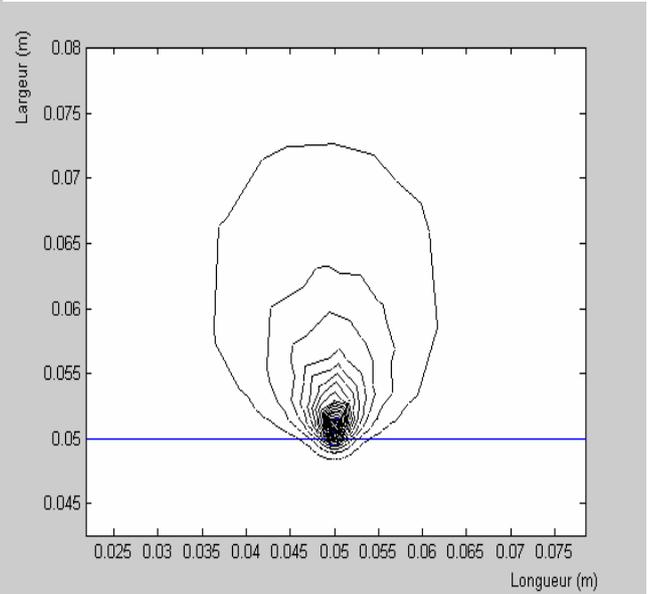
**Figure 3.22** Présentation des vecteurs d'induction



**Figure 3.23** Présentation des courants induits



**Figure 3.20** Présentation du potentiel vecteur



**Figure 3.21** Présentation des lignes champs

Le calcul de l'impédance dans le cas d'une plaque saine et une autre défectueuse est donné sur le tableau 3.1, ou on remarque une différence de  $Z$  dans les deux cas.

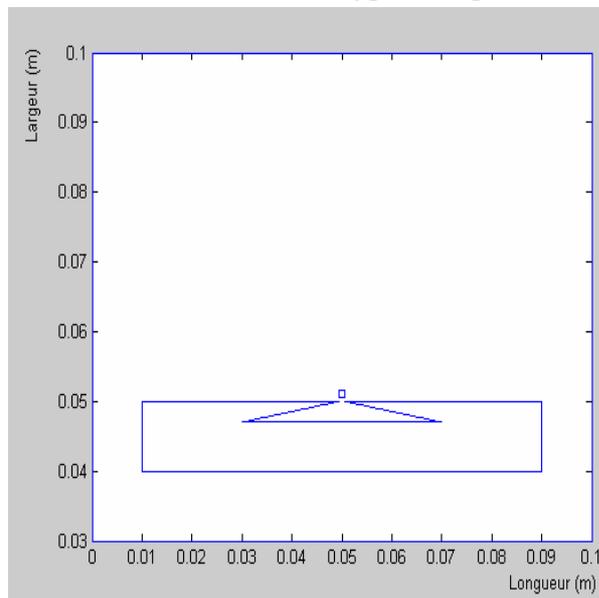
Malheureusement le calcul de l'impédance dans une seule position n'est pas suffisant de dire qu'il y a un défaut ou non.

### 3.3.3 Déplacement

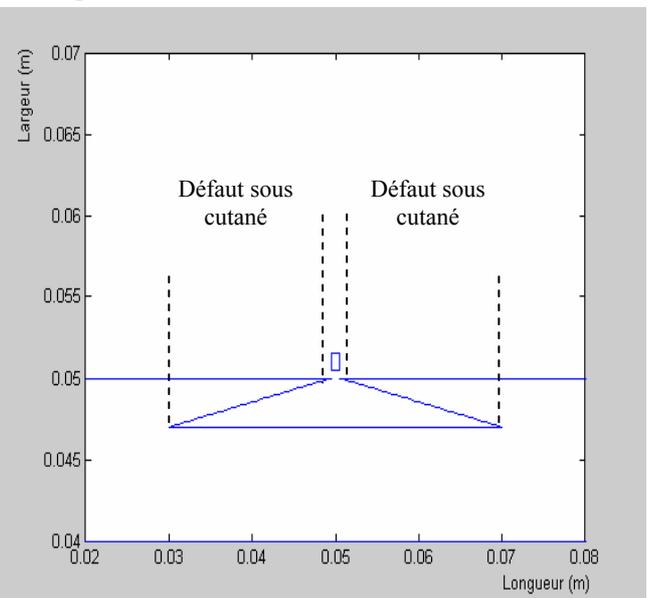
Pour tester la présence ou l'absence de défaut le long d'une plaque où d'un tube un balayage de ces deux derniers sera effectué par la suite, différents résultats ont été obtenus et discutés.

#### 3.3.3.1 Notion d'impédance $Z$ et différence d'impédance $\Delta Z$

Pour approcher cet objectif (différencier entre les deux notions), on propose une géométrie de défaut présenté sur la figure 3.24, cette géométrie nous permet de mettre en évidence la détection sous cutanée du défaut du type manque de matière, la figure 3.25 illustre un zoom sur le défaut.



**Figure 3.24** Géométrie du système



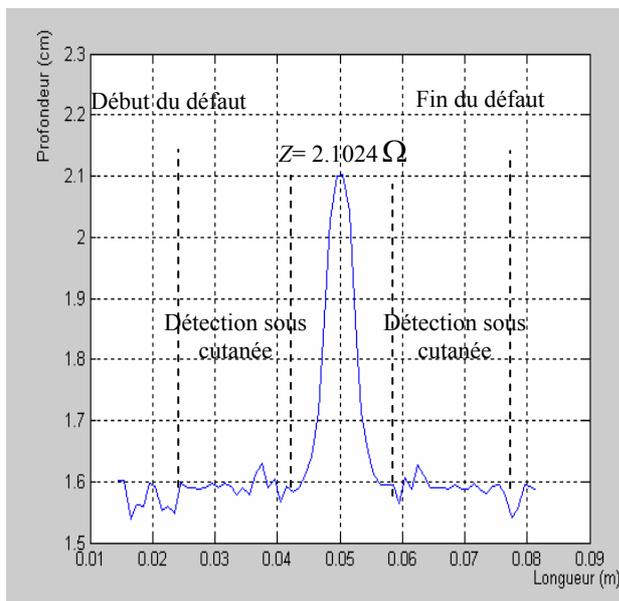
**Figure 3.25** Zoom de la géométrie du défaut

La courbe de l'impédance  $Z$  présentée sur la figure 3.26, a la forme d'un pic qui commence lorsque la bobine approche le défaut débouchant, le sommet du pic représente la plus grande valeur de l'impédance, elle est atteinte lorsque la bobine se situe au milieu du défaut.

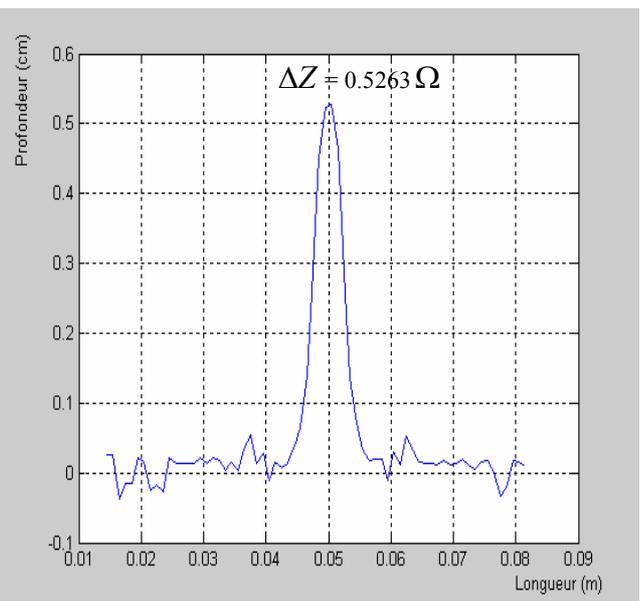
L'impédance à l'absence du défaut est la valeur de  $Z$  affichée lorsque le capteur se situe sous une zone loin du défaut, dans notre cas on prend la valeur moyenne du signal (valeur moyenne de  $Z$  avant le signal de la détection sous cutanée), cette valeur est de  $1.5761 \Omega$ .

La courbe  $\Delta Z$  (la différence entre l'impédance du système sans et avec défaut) est représentée par la figure 3.27.

Le signal de la détection sous cutanée est montré sur la courbe 3.26.



**Figure 3.26** Courbe de l'impédance  $Z$



**Figure 3.27** Courbe de la différence de l'impédance  $\Delta Z$

### 3.3.3.2 Organigramme du programme établi

Le programme développé sous Matlab et PDE tool books établi pour l'affichage de la courbe de l'impédance lors de la détection des défauts par un seul capteur est présenté par l'organigramme de la figure 3.28.

La figure 3.29 montre l'organigramme développé sous Matlab et PDE tool books du programme établi pour l'affichage de la courbe de la différence de l'impédance lors de la détection des défauts par un seul capteur.





### 3.3.3.3 Dépendance des dimensions du défaut de celles du capteur

Pour arriver à interpréter les signaux délivrés par le capteur (discussion de la forme de la courbe  $Z(x,y)$ ), il est nécessaire de connaître la signification de la longueur et la hauteur des pics de la courbe de l'impédance. Pour cela on propose d'étudier la dépendance des dimensions du défaut de celles du capteur, l'effet de la longueur et la hauteur du défaut sur le signal chacun à part.

#### i. Effet de la variation de la géométrie du défaut

Pour voir l'effet de la variation de la géométrie du défaut sur la détection on propose la comparaison entre la réponse du capteur en regard de deux défauts de structures similaires l'un en longueur et l'autre en profondeur.

La figure 3.30 présente la géométrie du premier défaut de longueur de 3mm et de 2mm de profondeur comme montré sur le zoom (figure 3.31).

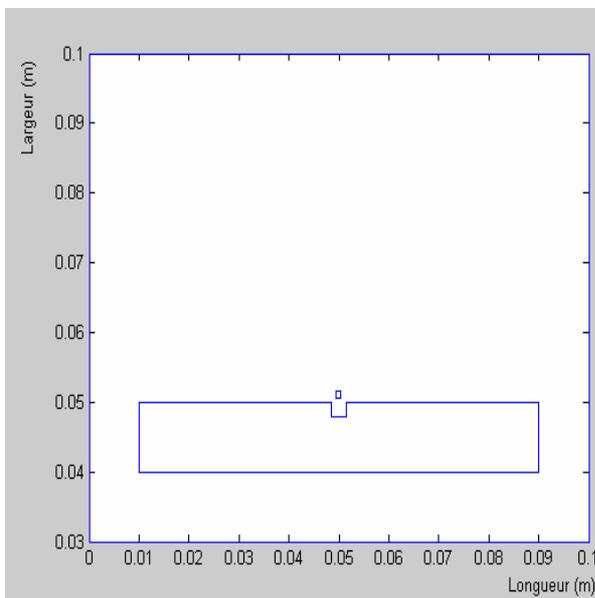


Figure 3.30 Géométrie du premier défaut

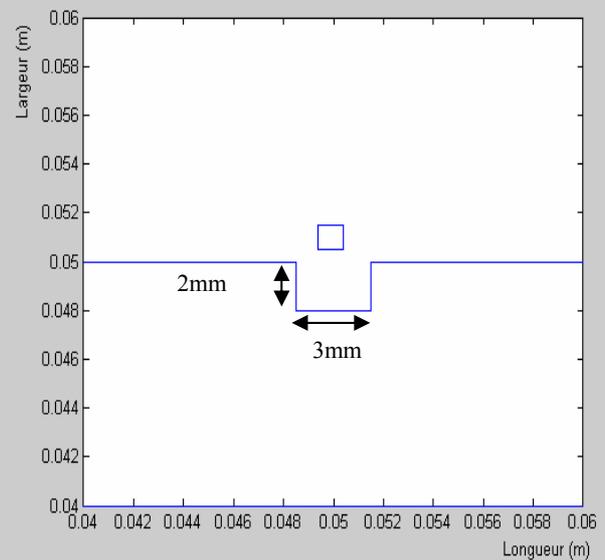


Figure 3.31 Zoom du premier défaut

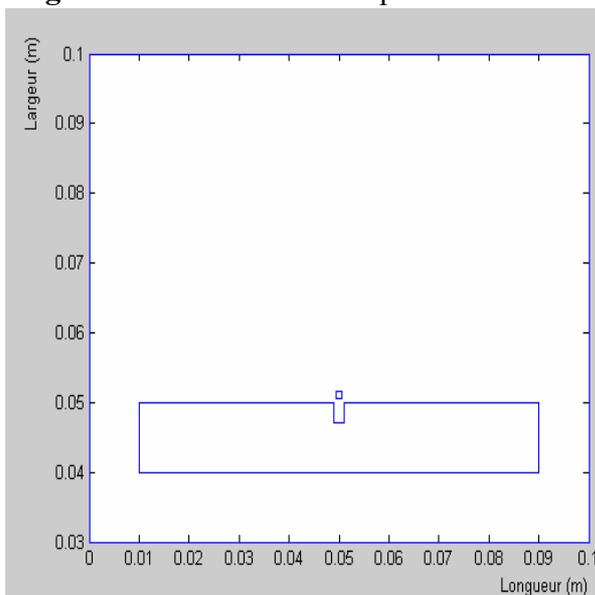


Figure 3.32 Géométrie du deuxième défaut

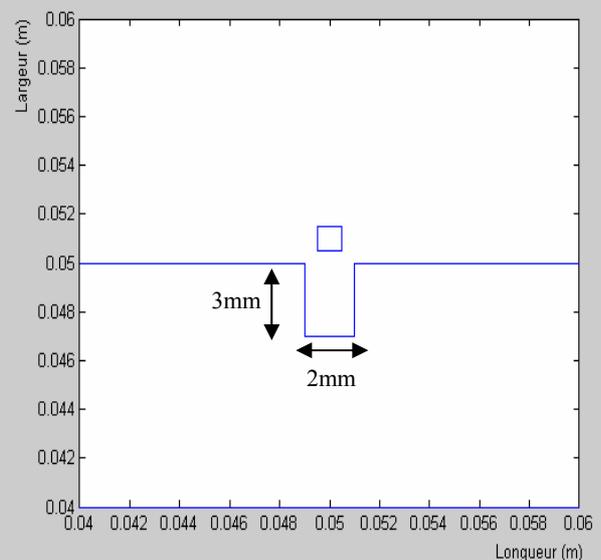
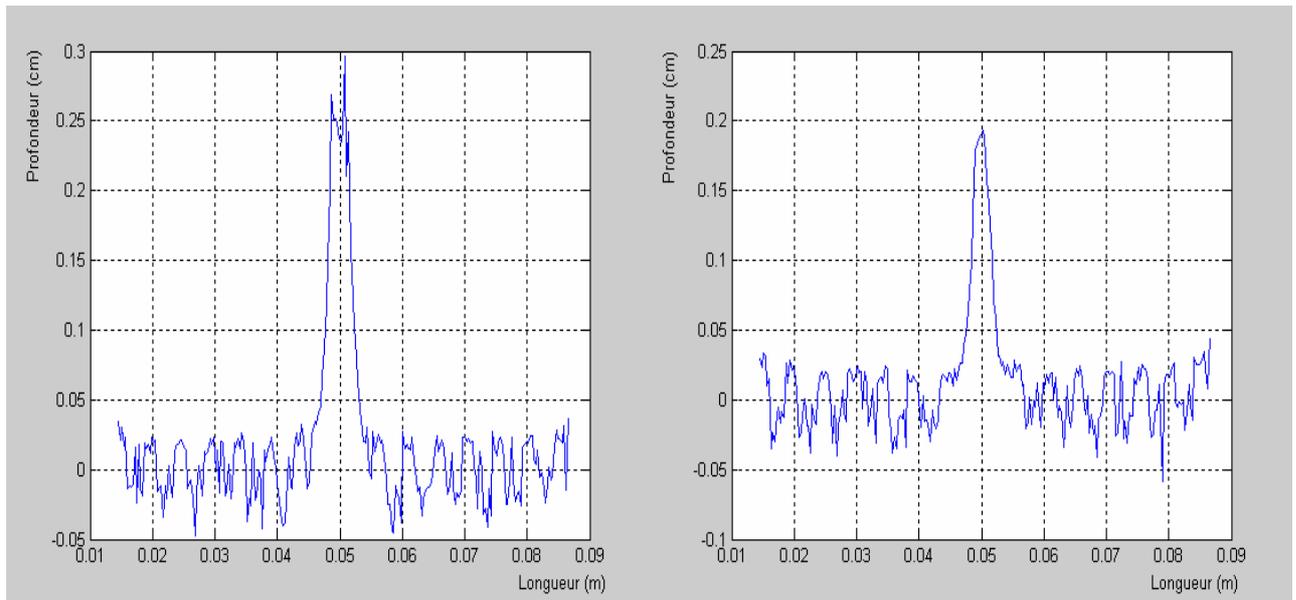


Figure 3.33 Zoom du deuxième défaut

La figure 3.32 présente la géométrie du deuxième défaut de longueur de 2mm et de 3mm de profondeur comme montrer sur le zoom (figure 3.33).

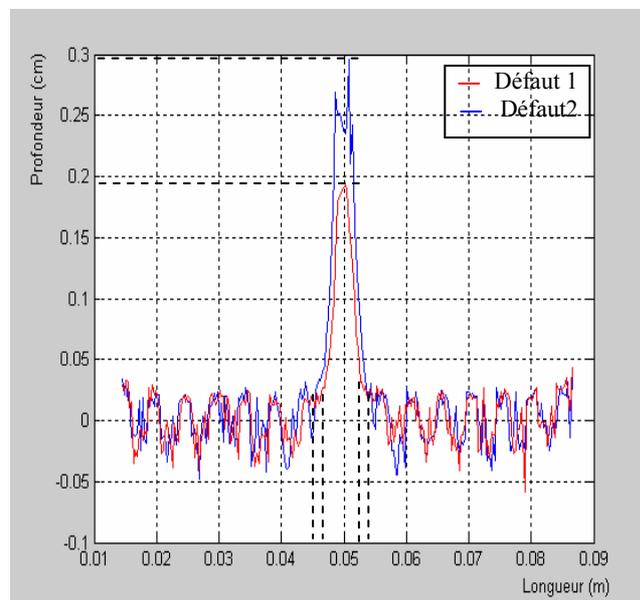
Le choix de ces deux géométries est justifié par l'égalité de la quantité du manque de la matière, ce qui nous permet la comparaison entre les courbes de  $\Delta Z$  des deux systèmes

Les réponses du capteur à ces propos son présentées sur les figures 3.34 et 3.35 séparément. La figure 3.36 illustre la superposition des deux courbes de  $\Delta Z$  pour la comparaison dont le signal en bleu est celui du premier défaut et en rouge du deuxième défaut.



**Figure 3.34** Courbe  $\Delta Z$  pour le premier défaut

**Figure 3.35** Courbe  $\Delta Z$  pour le deuxième défaut



**Figure 3.36** Superposition des deux courbes  $\Delta Z$

On remarque que les deux signaux affichent des impédances d'amplitude chacune correspondante à la profondeur de son défaut. La largeur du signal bleu est plus grande que celle du signal en rouge ce qui confirme la différence de la largeur des deux défauts.

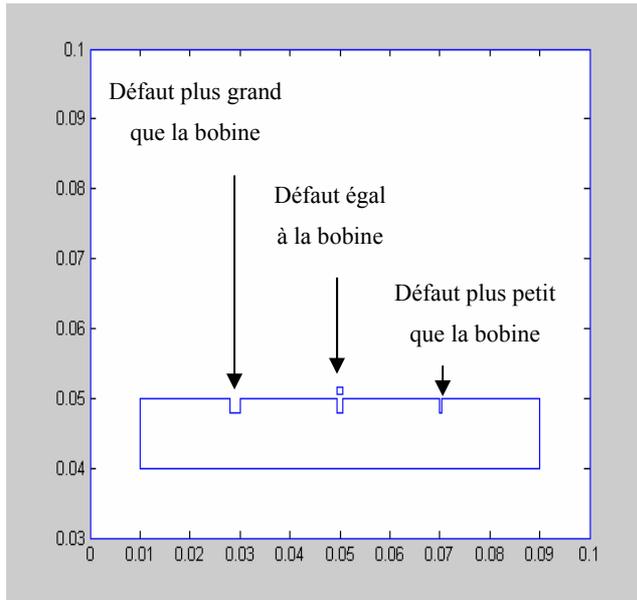
## ii. Effet de la variation de la largeur du défaut sur la détection

Pour voir l'effet de la variation de la largeur du défaut sur la détection on propose une géométrie de défaut présentée sur la figure 3.37.

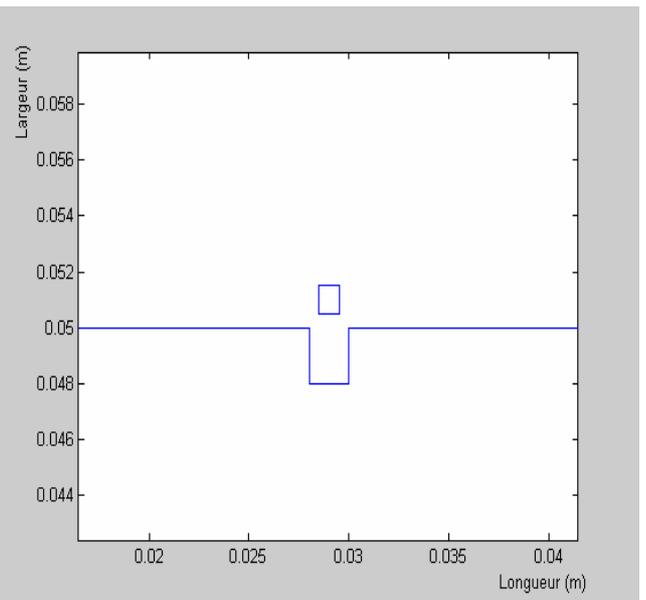
Les défauts réalisés ont la même profondeur mais de largeurs différentes.

Les trois défauts ont les caractéristiques suivantes (du point de vue longueur) :

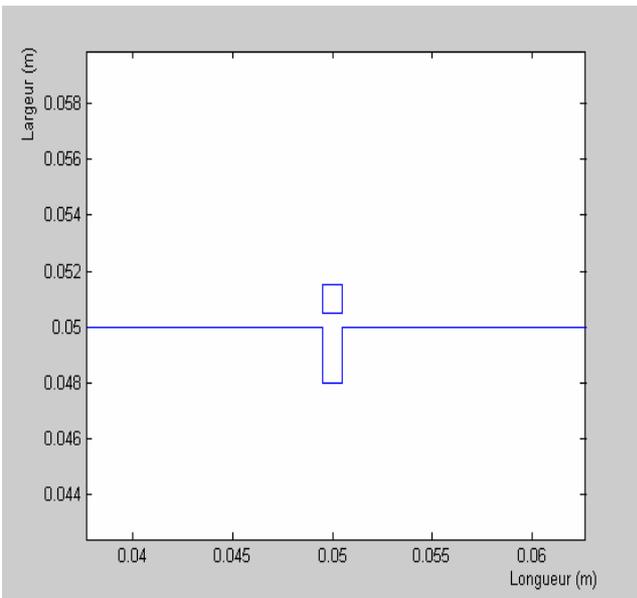
- i. Défaut plus grand que la bobine (défaut 1), comme montré sur la figure 3.38 ;
- ii. Défaut égal à la bobine (défaut 2), comme montré sur la figure 3.39 ;
- iii. Défaut plus petit que la bobine (défaut 3), comme montré sur la figure 3.40.



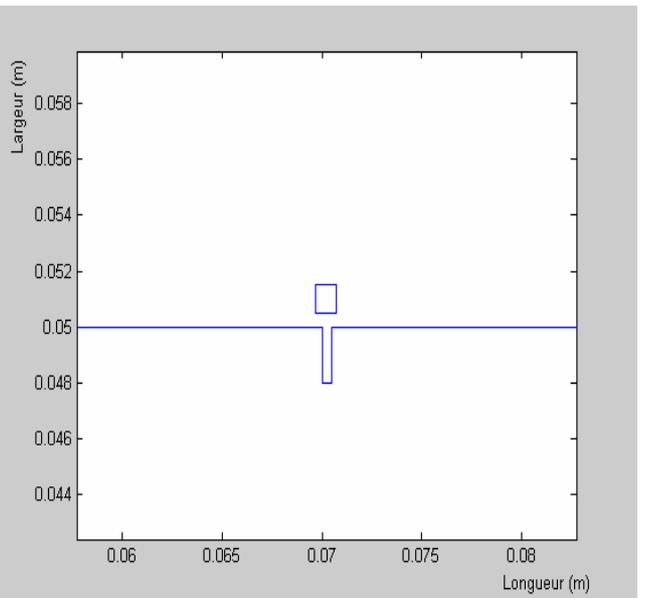
**Figure 3.37** Géométrie des trois défauts séparés



**Figure 3.38** Zoom du premier défaut



**Figure 3.39** Zoom du deuxième défaut

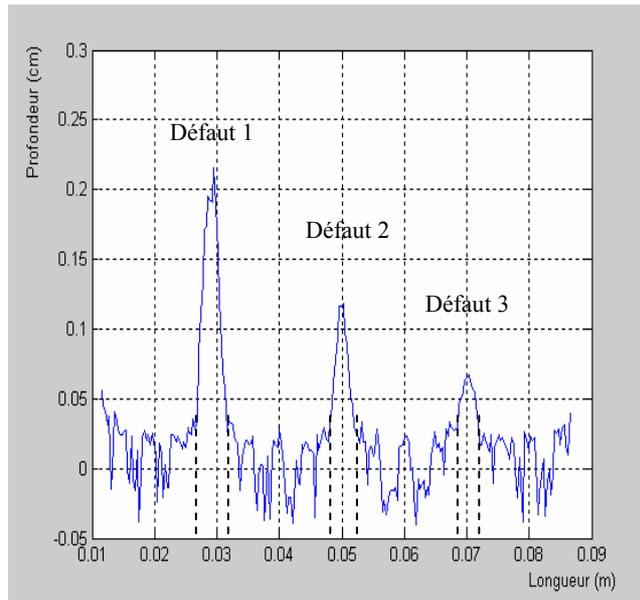


**Figure 3.40** Zoom du troisième défaut

En ce qui concerne le signal de l'impédance (figure 3.41), on peut faire les remarques suivantes :

1. La détection des trois défauts a été accomplie ;

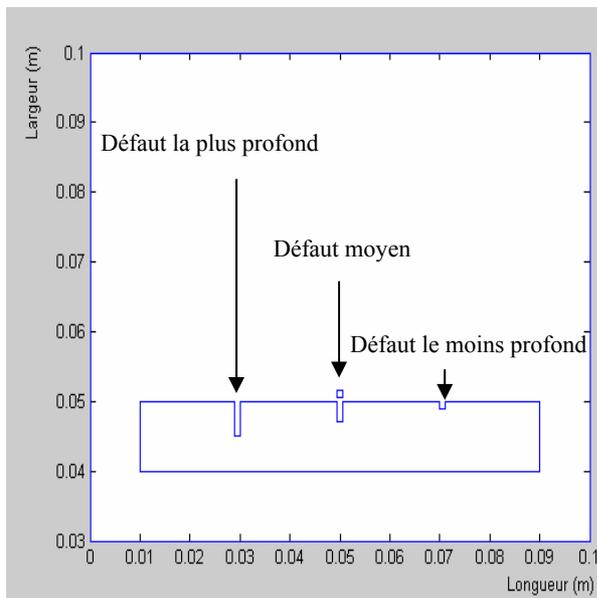
2. L'amplitude de l'impédance pour le premier défaut est supérieure au second qui est elle même supérieure a celle du troisième ;
3. Selon l'axe du balayage, les longueurs des pics de l'impédance des trois signaux correspondent à la longueur des trois défauts, le plus grand a le signal de détection le plus large, le deuxième représente la moitié du premier et le troisième la moitié du second.
4. Contrairement à la longueur qui a été correctement affichée, la profondeur des défauts ne l'a pas été. Malgré que les trois défauts aient la même profondeur les trois pics de l'impédance n'ont pas le même niveau du sommet.



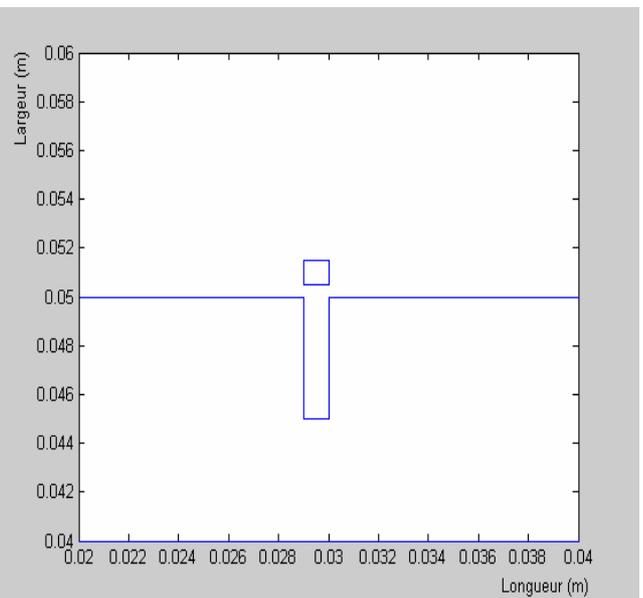
**Figure 3.41** Courbe  $\Delta Z$  pour les défauts séparés

### iii. Effet de la variation de la profondeur du défaut sur la détection

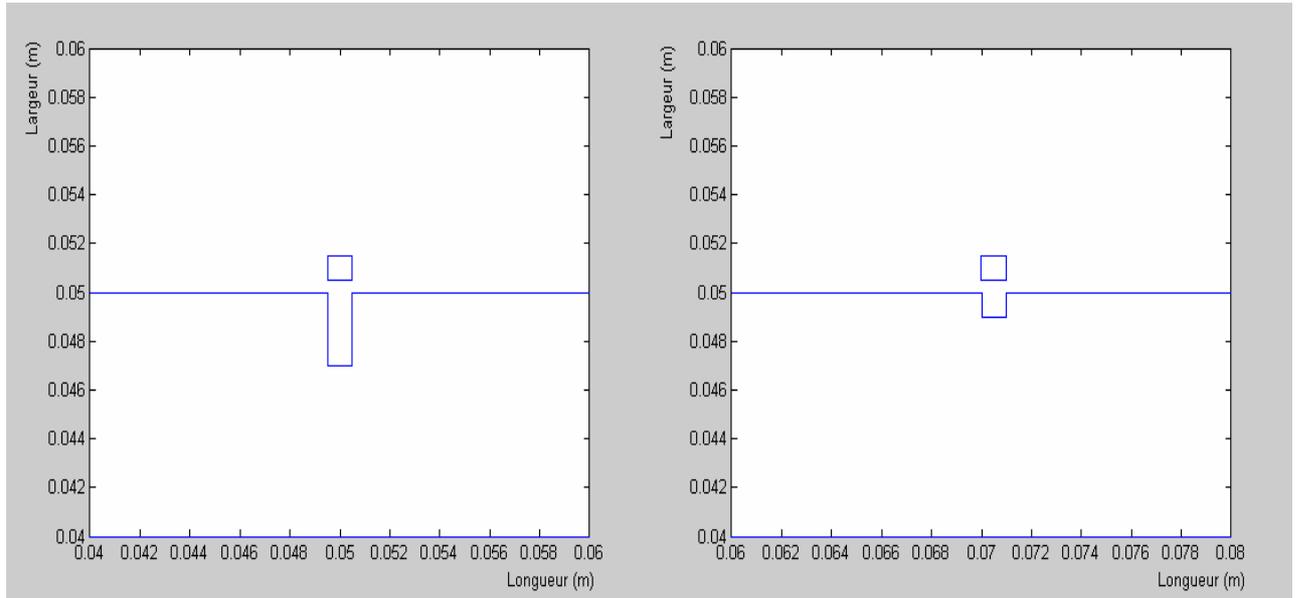
Pour voir l'effet de la variation de la profondeur du défaut sur la détection on propose une géométrie de défaut présentée sur la figure 3.42.



**Figure 3.42** Géométrie des trois défauts



**Figure 3.43** Zoom du premier défaut



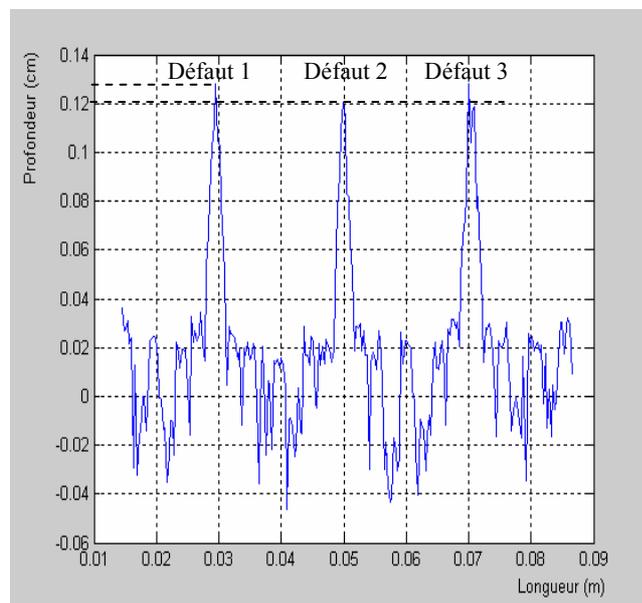
**Figure 3.44** Zoom du deuxième défaut

**Figure 3.45** Zoom du troisième défaut

Les défauts réalisés ont la même longueur égale à celle du capteur mais de profondeurs différentes.

Les trois défauts ont les caractéristiques suivantes (du point de vue hauteur) :

- i. Défaut le plus profond (défaut 1), comme montré sur la figure 3.43 ;
- ii. Défaut moyen (défaut 2), comme montré sur la figure 3.44 ;
- iii. Défaut le moins profond (défaut 3), comme montré sur la figure 3.45.



**Figure 3.46** Courbe  $\Delta Z$  pour les trois défauts

La courbe  $\Delta Z$  est présentée sur la figure 3.46.

On remarque que les amplitudes correspondantes aux trois défauts sont presque les mêmes sauf que la première est légèrement supérieur aux deux dernières. Cela peut être expliqué par l'égalité de la largeur du capteur à celles des défauts, la raison pour la quelle la détection de la profondeur des défaut n'a pas pu être détectée.

### 3.3.3.4 Forme du défaut

La combinaison des trois défauts présentés par la figure 3.42 est représentée par la figure 3.47, un zoom de la zone du défaut est présenté par la figure 3.48. La profondeur du défaut est de 2.5 mm et sa longueur est de 7 mm. Le choix de cette forme est justifié par son allure voisine de la forme réelle d'un défaut qui est en générale en forme de V large à la surface et étroite en profondeur

Cette géométrie nous permet de mieux interpréter les signaux de l'impédance, comparer les dimensions du défaut par rapport à celles du capteur et de discuter la forme du défaut. Trois défauts sont inclus (du point de vue dimensions) :

- i. Défaut plus grand que la bobine (défaut 1)
- ii. Deux défauts plus petits que la bobine (défaut 2)
- iii. Défaut égal à la bobine (défaut 3).

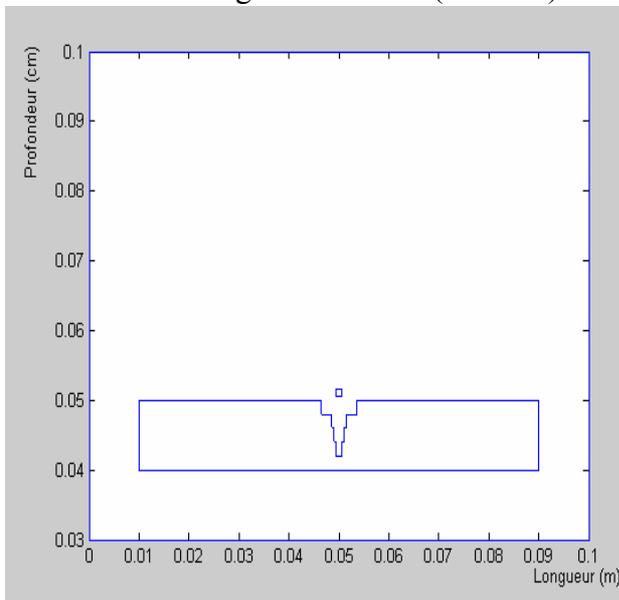


Figure 3.47 Défaut en escaliers

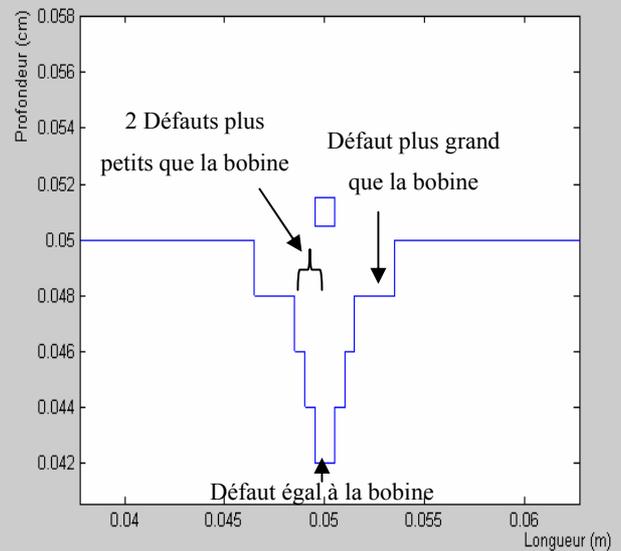


Figure 3.48 Zoom du défaut en escaliers

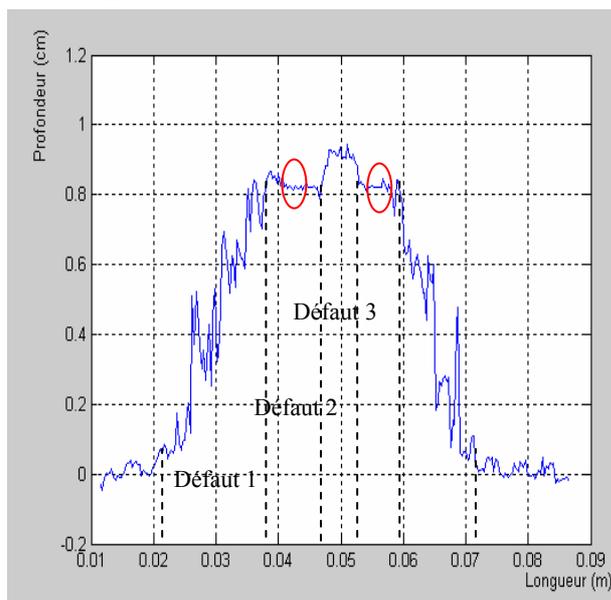


Figure 3.49 Courbe  $\Delta Z$  pour la géométrie escaliers

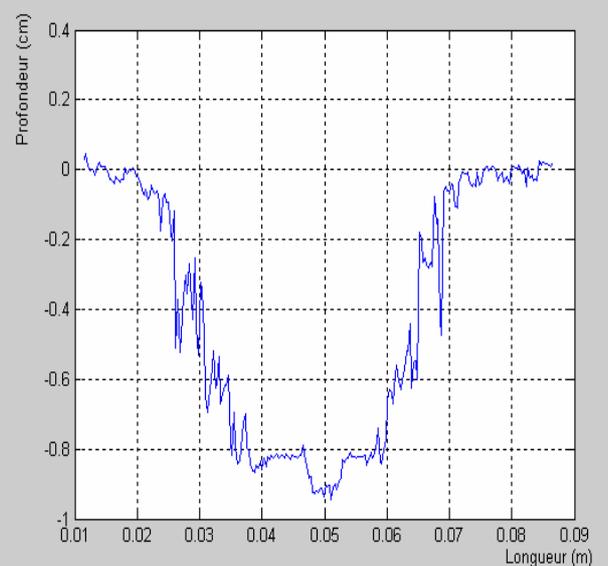


Figure 3.50 Courbe  $\Delta Z$  inversée

La courbe  $\Delta Z$  est présentée sur la figure 3.49, le signal est inversé sur la figure 3.50 pour avoir la même allure que le défaut (figure 3.47).

On remarque ce qui suit :

1. La détection du défaut 1 a été réalisée ;
2. Celle du défaut 2 a été enregistrée comme celle d'un seul défaut, les deux parties de ce dernier n'ont pas été détectées, mais le passage de la bobine entre les différentes zones a été marqué par un pic encerclé sur la figure 3.49.
3. La détection du défaut 3 a été réalisée.

## Conclusion

*Pour mettre en évidence la détection par courants de Foucault nous avons proposé les deux systèmes les plus fréquemment rencontrés, dont la cible du premier représente une plaque et celle du second un cylindre. La méthode des éléments finis permet d'étudier une grande variété de structures de capteurs et de pièces. Dans ce chapitre nous avons effectué la détection avec un capteur. D'après les résultats obtenus on déduit que :*

- *L'utilisation de la notion de la différence d'impédance  $\Delta Z$  est plus pratique que la mesure de l'impédance  $Z$  elle-même parce que ça facilite la reconnaissance des défauts surtout après la définition du défaut zéro, cela sera possible car, du côté simulation, la soustraction des deux signaux  $Z$  et  $Z_0$  élimine les perturbations engendrées par les calculs et du côté pratique, ça élimine les perturbations causées par exemple par l'homogénéité imparfaite du matériaux et donc ça évite les fausses alarmes.*
- *Le traitement des signaux délivrés par le capteur qui a été sujet de l'application du paragraphe 3.3.3.3, s'intéressait au décodage de la courbe d'impédance  $\Delta Z$  en amplitude et en largeur. Les différentes largeurs des défauts ont été détectées et affichées correctement. La profondeur des défauts qui sont plus larges que le capteur a été entièrement détectée et affichée, mais au dessous de celle-ci, la profondeur des défauts n'a pas été totalement détecté mais seulement une partie. Donc les dimensions du capteur influent sur la détection. Donc on peut conclure que pour la reconnaissance des dimensions des défauts, il vaut mieux utiliser un capteur dont la largeur est inférieure ou égale à celle des défauts suspects.*

*Dans le chapitre suivant nous allons proposer un système multiéléments de capteurs à courants de Foucault. Dans ce contexte nous allons nous intéresser à la mutuelle entre les bobines successives.*

## **CHAPITRE QUATRE**

# **Simulation de la Détection par un Capteur Multiéléments à CF**

## Introduction

*Le chapitre précédent a été l'objet de la détection des défauts de type manque de matière avec un seul capteur. Le présent chapitre traitera la détection du même type de défauts mais en utilisant un capteur multiéléments. Pour ce faire nous allons proposer l'utilisation de deux capteurs le premier se compose de deux bobines, et le second de trois bobines adjacentes. L'effet de l'inductance mutuelle sera mis en évidence en déplaçant les bobines l'une par rapport à l'autre, les signaux ainsi délivrés (individuels à chaque bobine) seront comparés à chaque changement de distance.*

*La position des bobines dans un multiéléments décide de l'efficacité du capteur lui-même cause de l'influence (inductance mutuelle) des bobines l'une sur l'autre. Nous étudierons l'état statique pour voir l'influence des bobines l'une sur l'autre et analyserons l'effet de la mutuelle sur la détection (lors du mouvement).*

*Dans ce dernier chapitre qui sera dédié aux capteurs multiéléments où on présentera deux applications les plus fréquentes le premier s'agira d'un système à détection multiéléments dont la cible présente un cylindre et le second présente une plaque. Les résultats de la simulation de ces systèmes seront discutés. Pour cela nous examinerons les réponses d'un ensemble de deux capteurs mis côte à côte pour des distances variées, ensuite nous effectuerons le même travail pour un autre à trois bobines. Des organigrammes des programmes établis pour effectuer chaque application seront présentés.*

### 4.1 Cas d'un cylindre

Pour étudier l'effet de la mutuelle entre les bobines on propose un système axisymétrique se composant d'un tube axisymétrique comportant un défaut débouchant, un capteur multiéléments se composant de deux et de trois bobines pour traiter les deux différents cas.

#### 4.1.1 Effet de deux bobines adjacentes

La juxtaposition des bobines sondes influe sur le signal de détection à cause de la mutualité inter bobines. La modélisation de l'ensemble capteur multiélément de deux bobines et de la cible est nécessaire pour l'évaluation de l'importance de ce phénomène.

### 4.1.1.1 Modèle à étudier

Le modèle proposé pour l'étude de l'effet de l'inductance mutuelle présenté sur la figure 4.2 comporte deux bobines séparées pour la détection et d'une cible sous forme d'un cylindre comme illustré sur la figure 4.1.

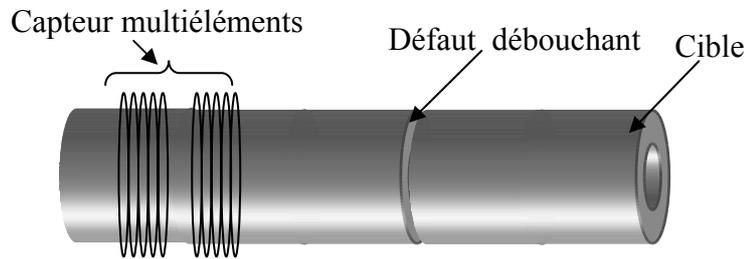


Figure 4.1 Modèle proposé en 3D

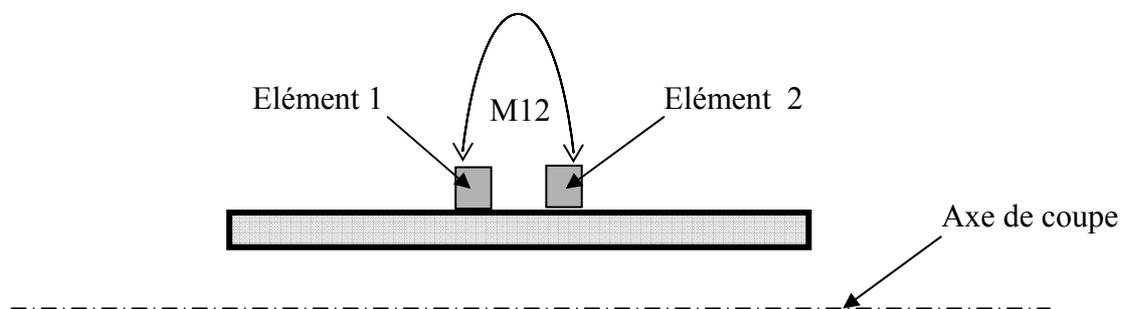


Figure 4.2 Représentation de l'inductance mutuelle de deux bobines

### 4.1.1.2 Modèle en 2D

Le système précédent (figure 4.2) se réduit à un autre en 2D (figure 4.3.a), à cause de son axisymétrie, il peut être présenté par la figure 4.3.b.

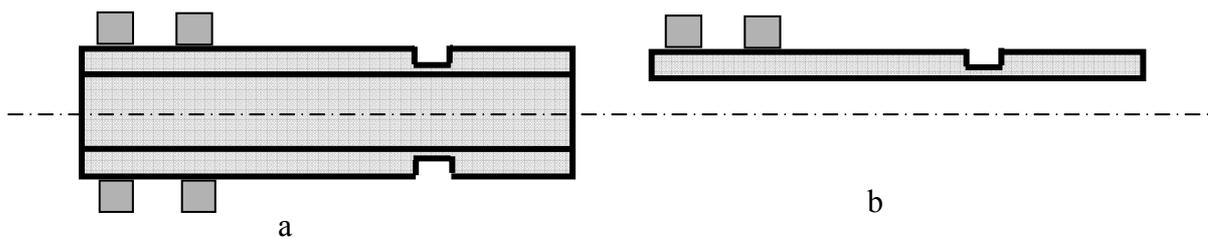


Figure 4.3 Modèle proposé en 2D (effectuaiton de deux coupes)

### 4.1.1.3 Résultats et analyse

Afin d'étudier l'effet de proximité des bobines sondes, la simulation du modèle d'un système multi-capteurs à deux bobines (figure 4.3), donne les résultats suivants :

#### A. Cas sans défaut

L'étude du système sans défaut est effectuée dans ce travail pour avoir des informations qui nous seront utiles pour la mise en évidence et l'évaluation du phénomène de l'inductance mutuelle.

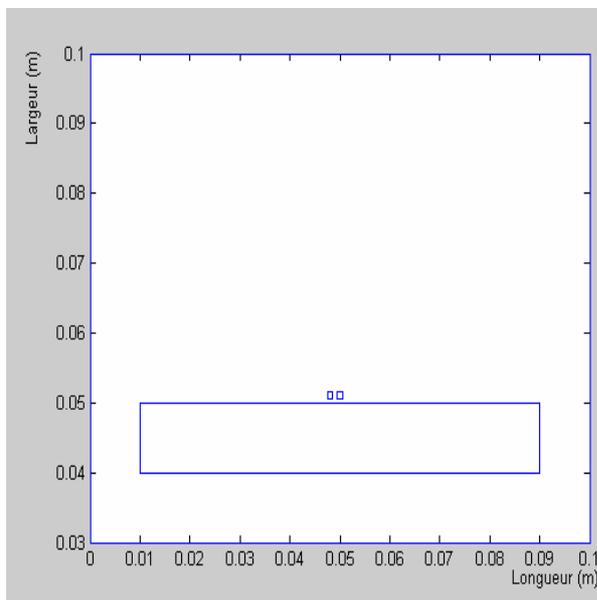
Les figures 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, présentent les géométries du système de détection mais avec des distances inter bobines de 0.001, 0.002, 0.004, 0.006, 0.008, 0.012m respectivement.

Les figures 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15, présentent la forme des lignes de champs pour les mêmes distances précédentes.

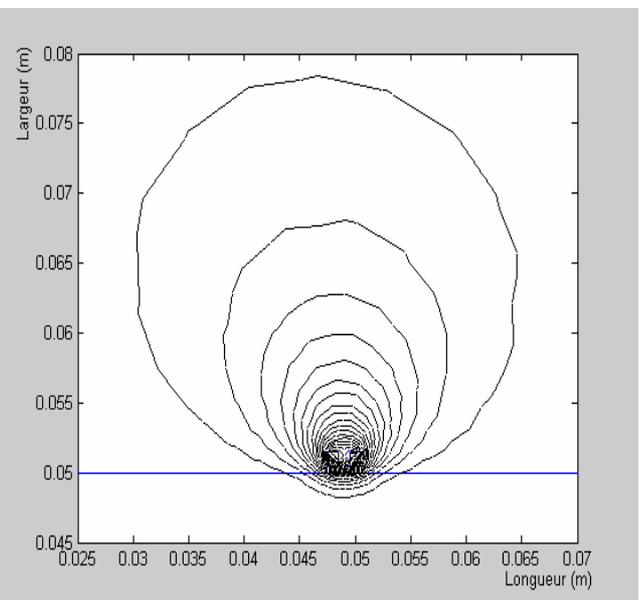
**Tableau 4.1**

Distance inter bobines (mm)	1	2	4	6	8	12
Z de la première bobine (mm)	2.0189	1.7645	1.5973	1.5225	1.4698	1.3759
Z de la deuxième bobine (mm)	2.0189	1.7645	1.5973	1.5225	1.4698	1.3759

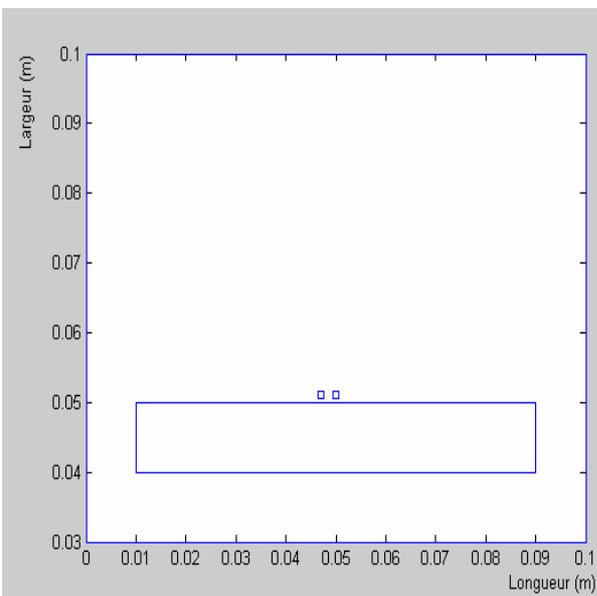
Le tableau 4.1 donne l'impédance  $Z_0$  du système avec une plaque sans défaut est dans une seule position pour de différentes distances inter bobines. Les deux bobines donnent la même valeur d'impédance.



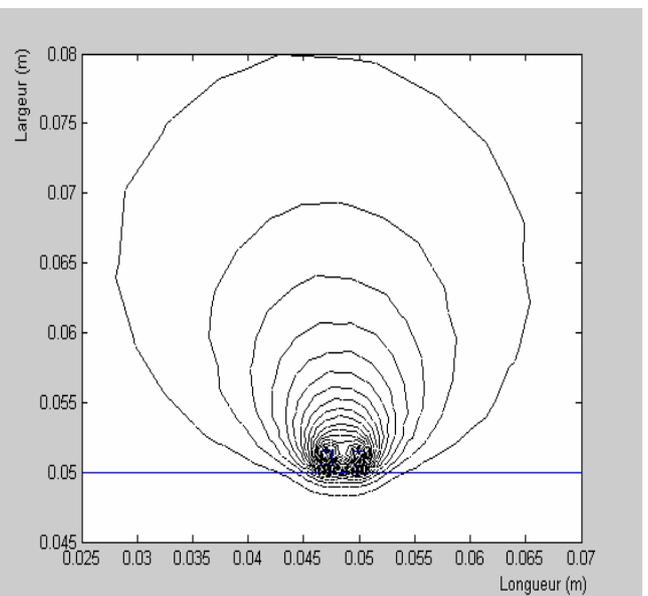
**Figure 4.4** Géométrie (distance de 0.001m)



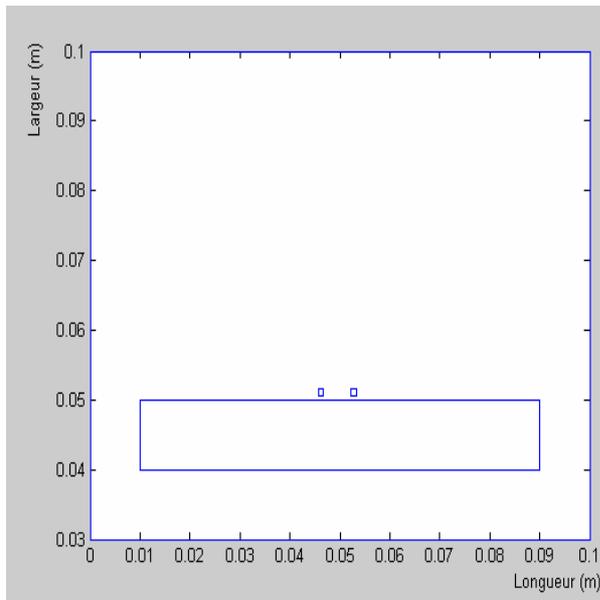
**Figure 4.5** Lignes de H (distance de 0.001m)



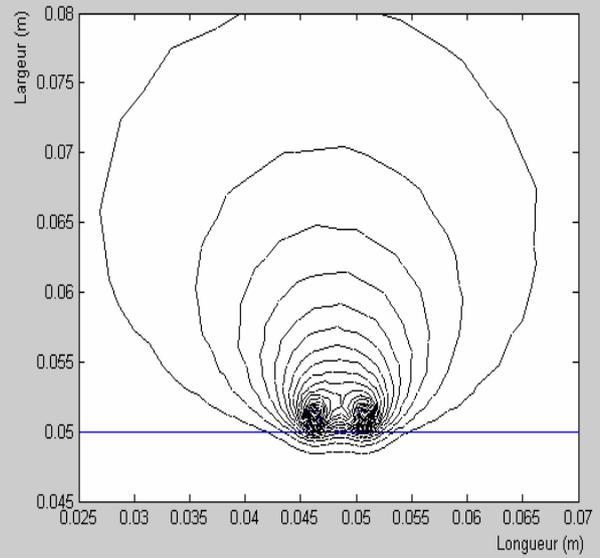
**Figure 4.6** Géométrie (distance de 0.002m)



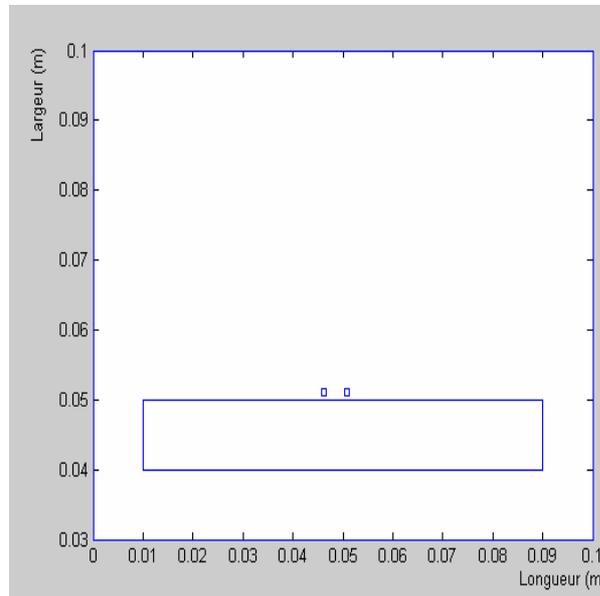
**Figure 4.7** Lignes de H (distance de 0.002m)



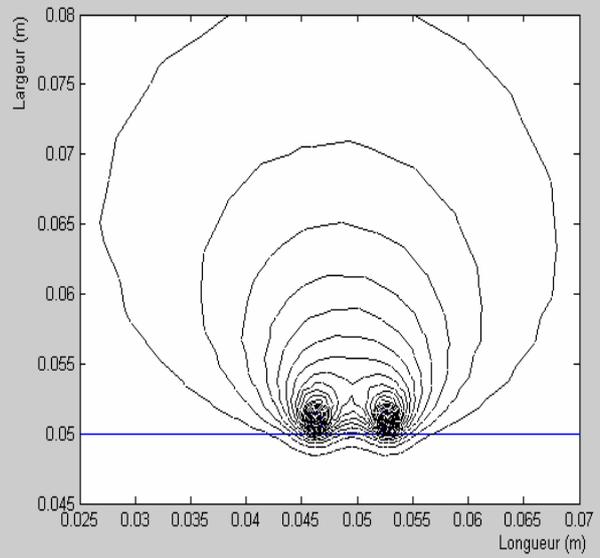
**Figure 4.8** Géométrie (distance de 0.004m)



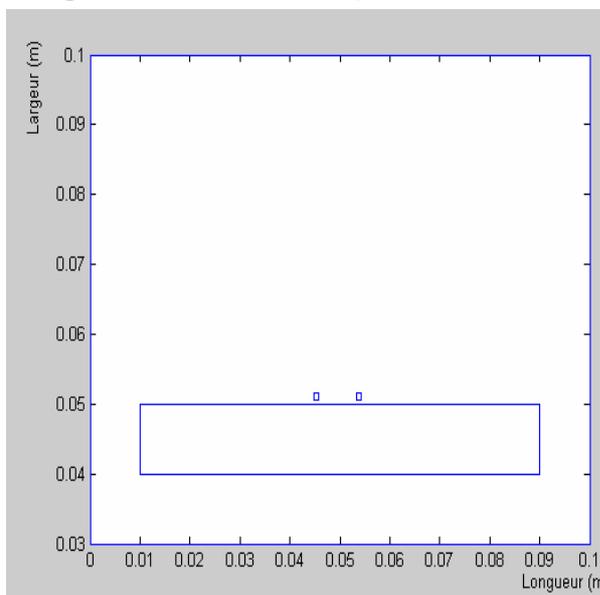
**Figure 4.9** Lignes de H (distance de 0.004m)



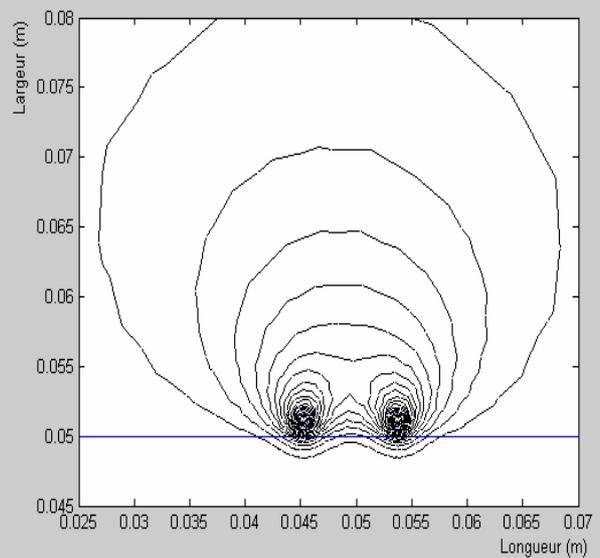
**Figure 4.10** Géométrie (distance de 0.006m)



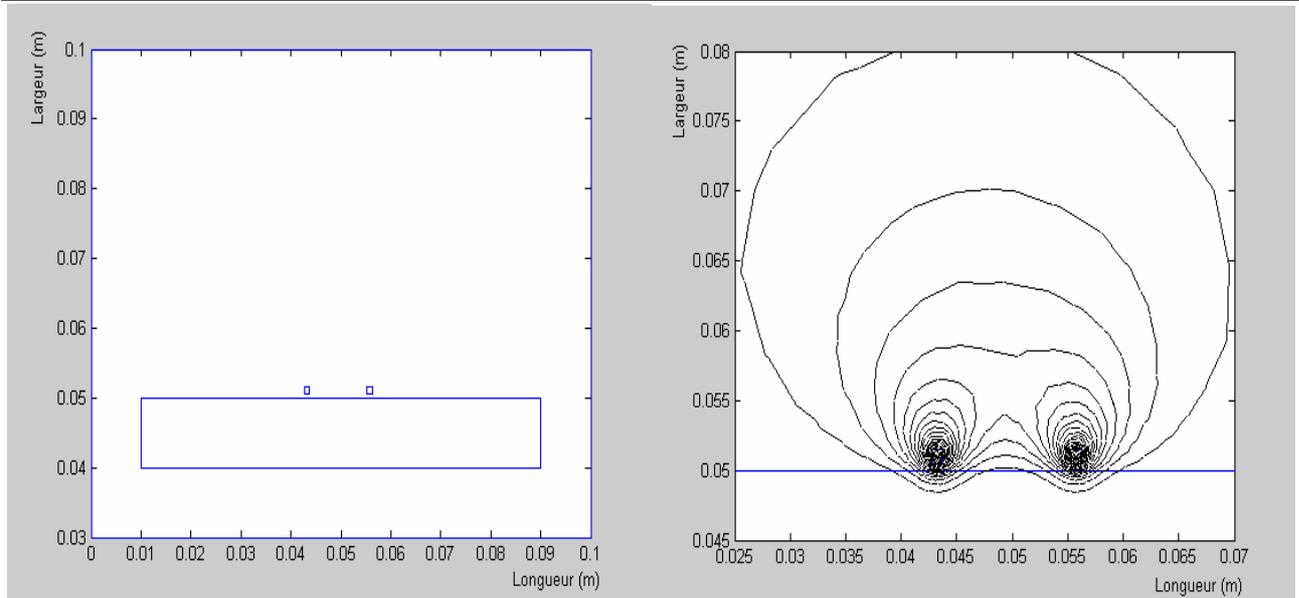
**Figure 4.11** Lignes de H (distance de 0.006m)



**Figure 4.12** Géométrie (distance de 0.008m)



**Figure 4.13** Lignes de H (distance de 0.008m)



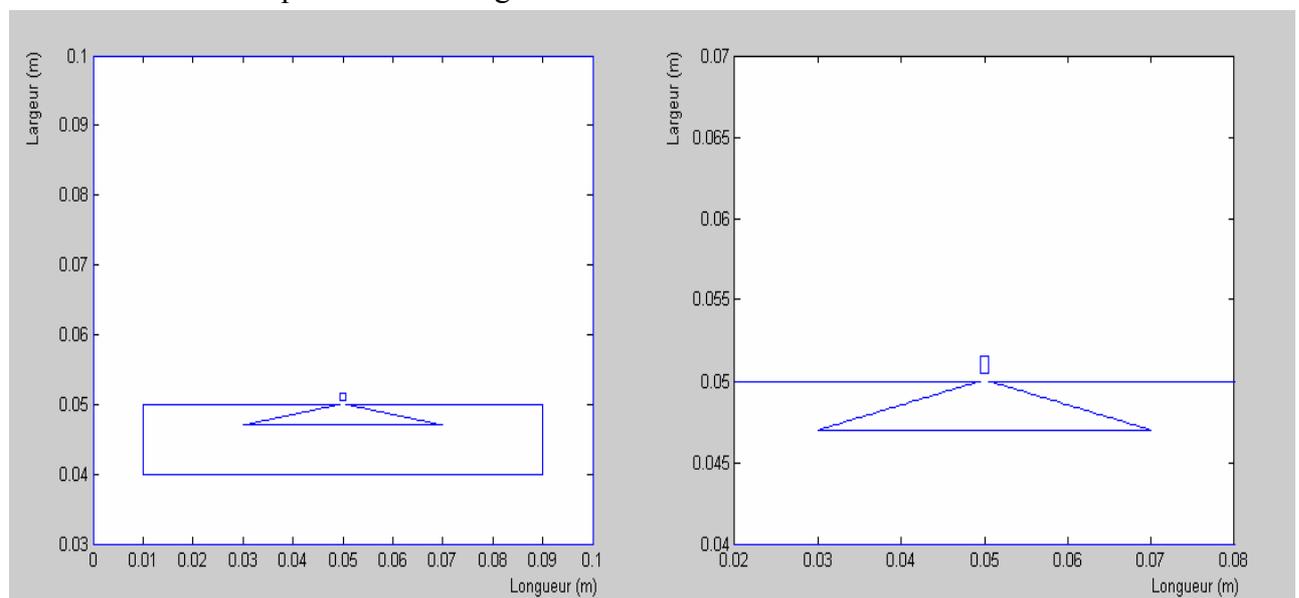
**Figure 4.14** Géométrie (distance de 0.012m) **Figure 4.15** Lignes de H (distance de 0.012m)

Les résultats fournissent les informations suivantes :

- ☞ Les lignes de champ dans le cas de la première distance entourent les deux bobines ensemble. Ce système de détection est équivalent à celui d'une bobine dont les grandeurs sont celles des deux bobines additionnées ;
- ☞ En augmentant la distance inter bobines, les lignes de champ séparent les deux bobines et les entourent séparément ;
- ☞ Dans le cas de la distance de 0.012m, les lignes de champs sont séparées mais l'effet de l'inductance mutuelle est présent.

### B. Cas avec défaut

Dans ce cas là le déplacement est nécessaire pour la détection du défaut le long de la cible. Pour avoir la courbe  $\Delta Z$ , on utilise une plaque défectueuse présentée par la figure 4.16, un zoom de la zone de ce défaut est présenté sur la figure 4.17.



**Figure 4.16** Géométrie du système

**Figure 4.17** Zoom de la géométrie du défaut

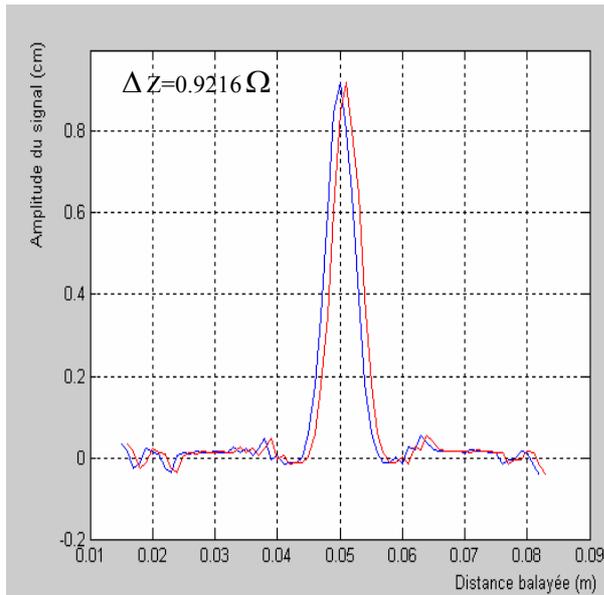


## 1. Organigramme du programme établi

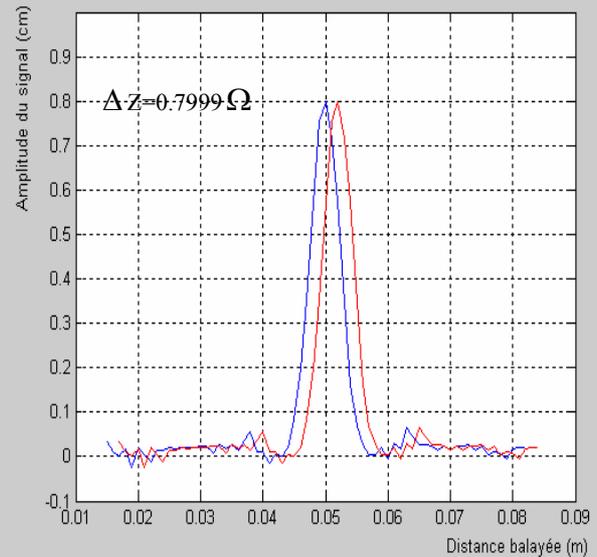
Le programme développé sous Matlab et PDE tool box établi pour l'affichage de la courbe de l'impédance lors de la détection des défauts par un seul capteur est présenté par l'organigramme de la figure 4.18.

Les figures 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 et 4.24, présentent les courbes de  $\Delta Z$  pour les mêmes distances.

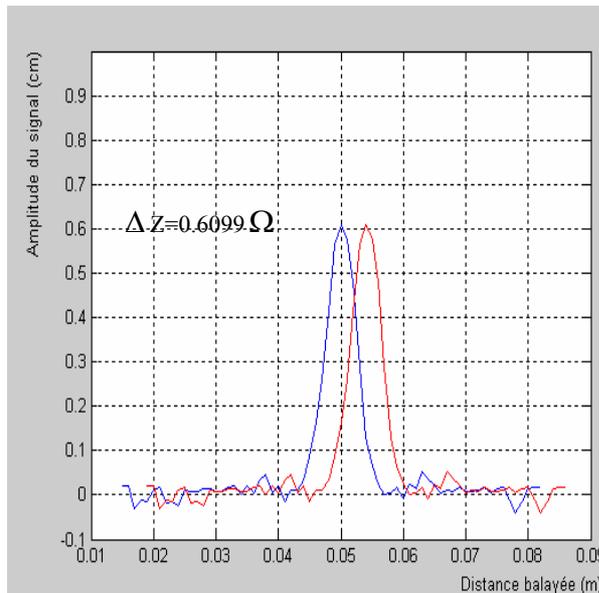
Les résultats de la simulation sont présentés par les figures 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23.



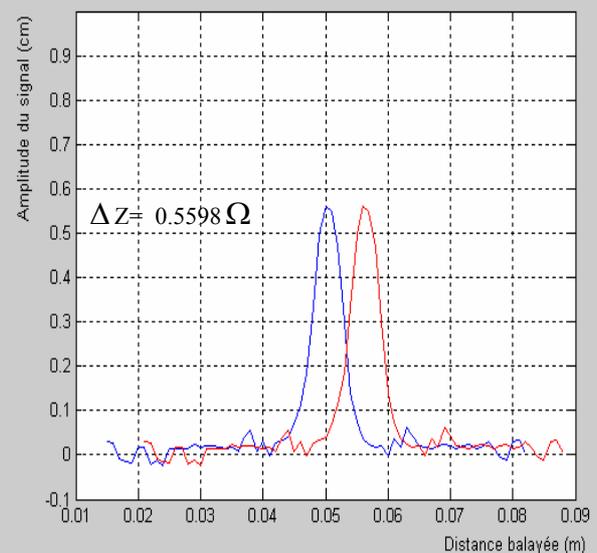
**Figure 4.19** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.001m)



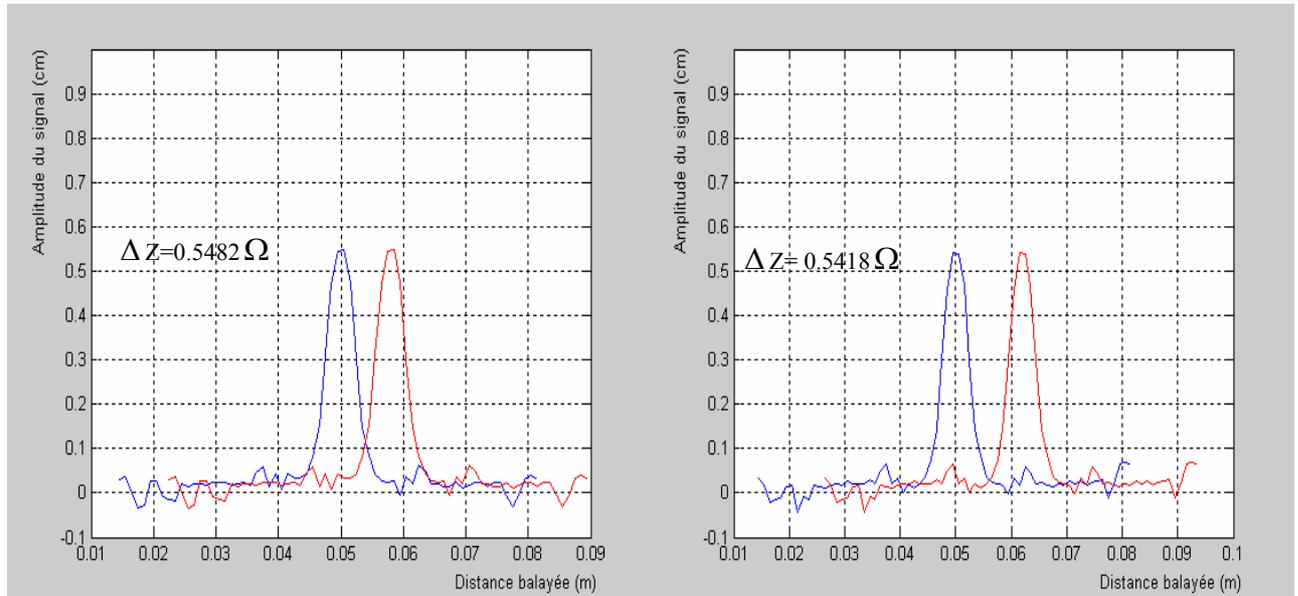
**Figure 4.20** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.002m)



**Figure 4.21** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.004m)



**Figure 4.22** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.006m)



**Figure 4.23** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.008m)

**Figure 4.24** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.012m)

En ce qui concerne les courbes de  $\Delta Z$ , on remarque ce qui suit :

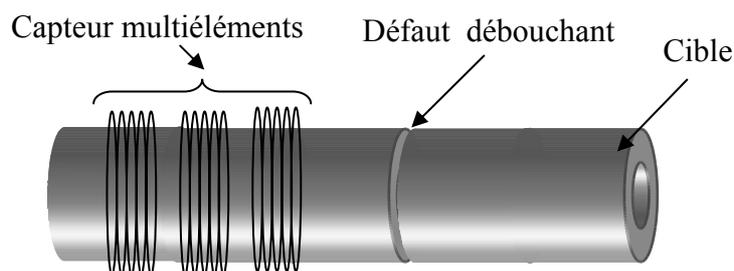
- ☞ Pour la distance de 0.001m,  $\Delta Z$  prend presque le double de sa valeur lors de la détection avec un capteur, on peut déduire que les  $\Delta Z$  s'additionnent ;
- ☞ En augmentant la distance inter bobines, on diminue l'effet de l'inductance mutuelle jusqu'à une distance de 0.008m ou l'effet de la mutuelle devient négligeable et  $\Delta Z$  prend une valeur proche de celle lors de la détection avec un capteur ;
- ☞ Au-delà de la distance de 0.008,  $\Delta Z$  diminue pour atteindre la valeur de celle lors de la détection avec un seul capteur.

#### 4.1.2 Effet de trois bobines adjacentes

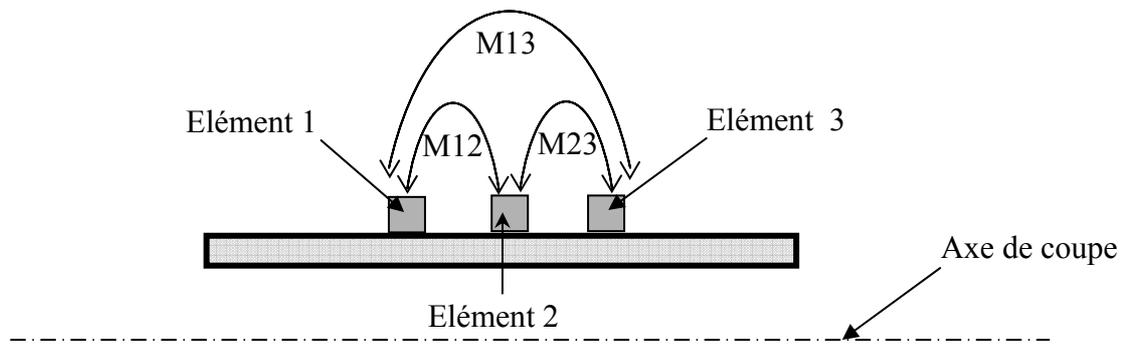
Afin d'étudier l'effet de proximité des bobines sondes, la simulation du modèle d'un système multi-capteurs à deux bobines a été effectuée. On propose maintenant l'étude d'un autre système multi-capteurs à trois bobines présenté par la figure 4.24.

##### 4.1.2.1 Modèle à étudier

Le modèle proposé pour l'étude de l'effet de l'inductance mutuelle présenté sur la figure 4.26 comporte trois bobines séparées pour la détection et d'une cible sous forme d'un cylindre comme présenté sur la figure 4.25.



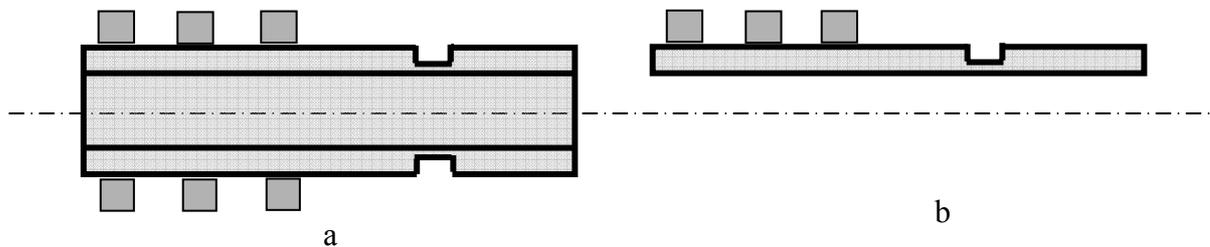
**Figure 4.25** Modèle proposé en 3D



**Figure 4.26** Représentation de l'inductance mutuelle de trois bobines

#### 4.1.2.2 Modèle en 2D

L'axisymétrie du système nous permet d'effectuer deux coupes successives la première est représentée par la figure 4.27.a et la deuxième par la figure 4.27.b ce qui réduit le modèle de la figure 4.25 à celui présenté sur la figure 4.27.b.



**Figure 4.27** Modèle proposé en 2D

La simulation de ce système de détection dans les deux cas sans et avec défaut fournit les résultats suivants :

#### A. Cas sans défaut

Afin d'étudier l'effet de proximité des bobines sondes, la simulation du modèle d'un système multi-capturs à deux bobine présenté sur figure (4.26) donne les résultats suivants :

Les figures 4.28, 4.30, 4.32, 4.34, 4.36, 4.38, présentent les géométries du même système mais avec des distances inter bobines de 0.001, 0.002, 0.004, 0.006, 0.008, 0.012m successivement.

Les figures 4.29, 4.31, 4.33, 4.35, 4.37, 4.39, présentent la forme des lignes de champs pour les mêmes distances précédentes.

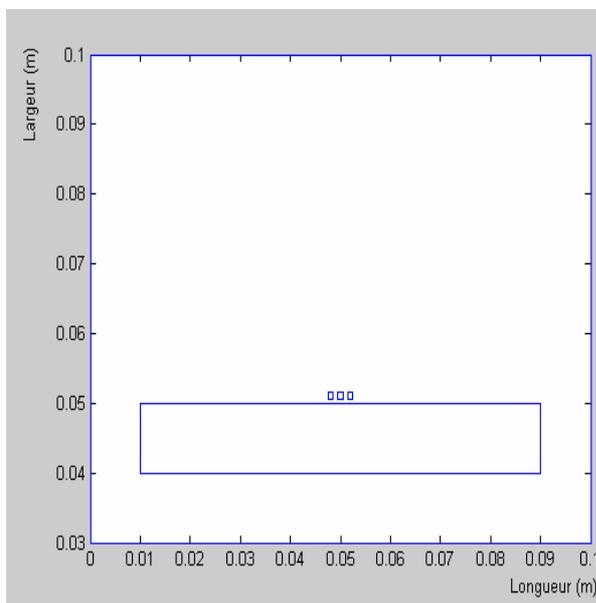
**Tableau 4.2**

Distance inter bobines (mm)	1	2	4	6	8	12
Z de la première bobine (mm)	2.3520	2.0662	1.8978	1.8764	1.6441	1.6043
Z de la deuxième bobine (mm)	2.3520	2.0662	1.8978	1.8764	1.6441	1.6043
Z de la troisième bobine (mm)	2.3520	2.0662	1.8978	1.8764	1.6441	1.6043

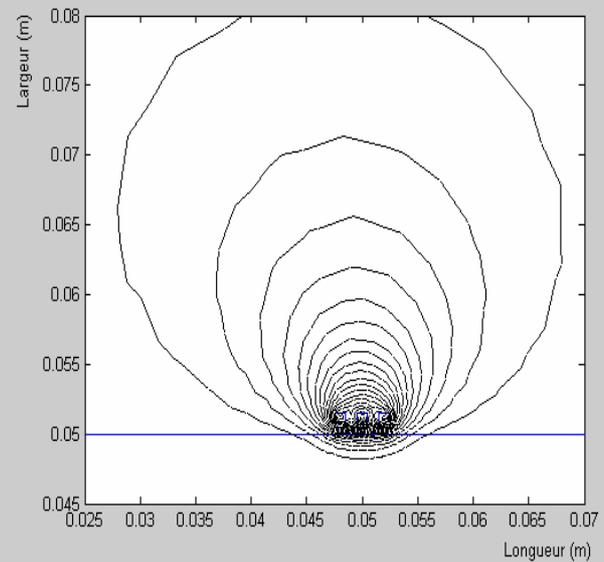
Le tableau 4.2 donne l'impédance  $Z_0$  du système avec une plaque sans défaut est dans une seule position pour de différentes distances inter bobines. Les trois bobines donnent la même valeur d'impédance.

Les résultats fournissent les informations suivantes :

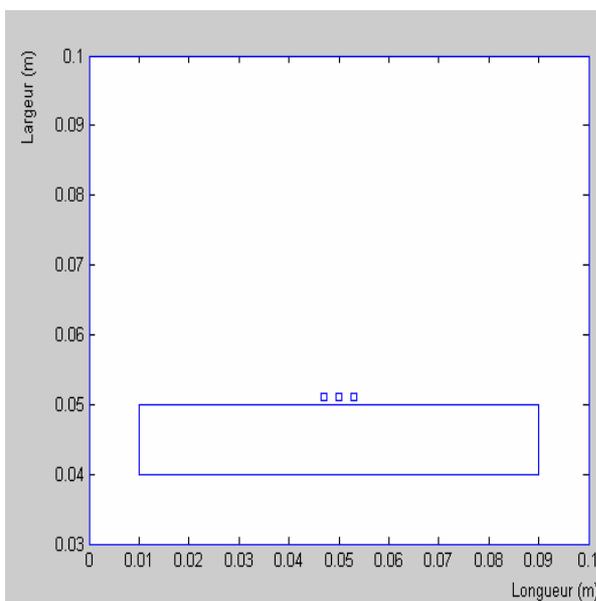
- ☞ Les lignes de champ dans le cas de la première distance entourent les trois bobines ensemble. Ce système de détection est équivalent à celui d'une bobine dont les grandeurs sont celles des trois bobines additionnées ;
- ☞ En augmentant la distance inter bobines, les lignes de champ séparent les trois bobines et les entourent séparément ;
- ☞ Dans le cas de la distance de 0.012m, les lignes de champs sont séparées mais l'effet de l'inductance mutuelle est présent ;



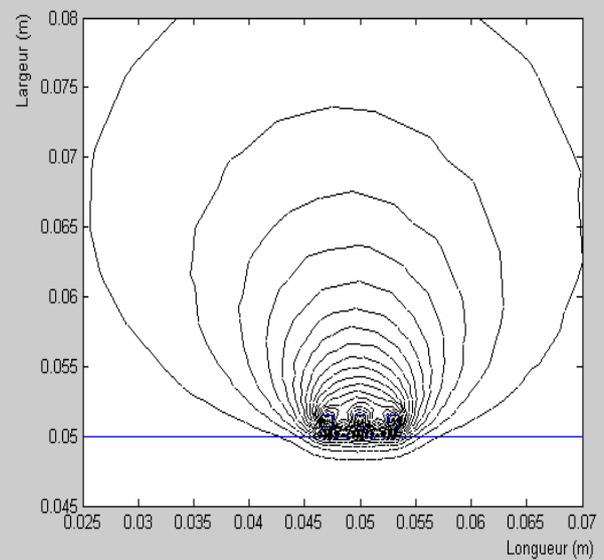
**Figure 4.28** Géométrie (distance de 0.001m)



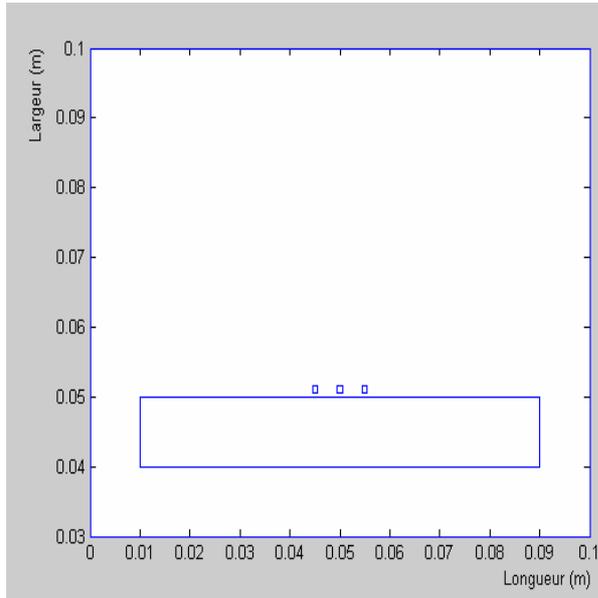
**Figure 4.29** Lignes de H (distance de 0.001m)



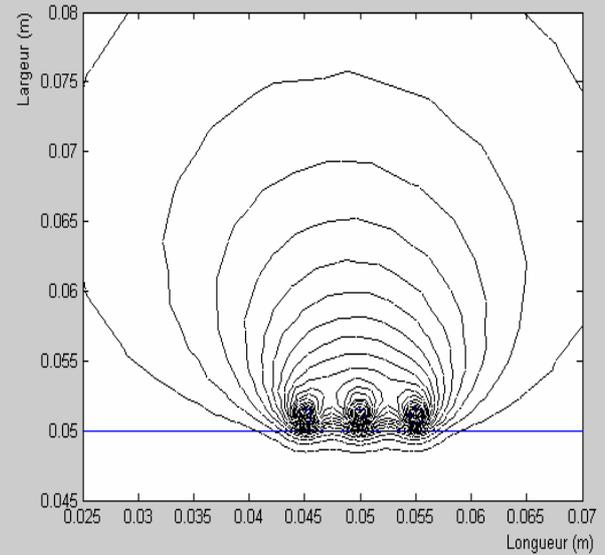
**Figure 4.30** Géométrie (distance de 0.002m)



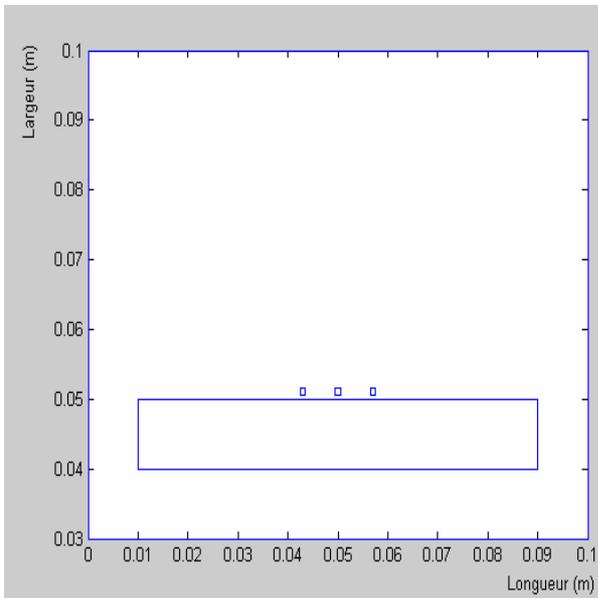
**Figure 4.31** Lignes de H (distance de 0.002m)



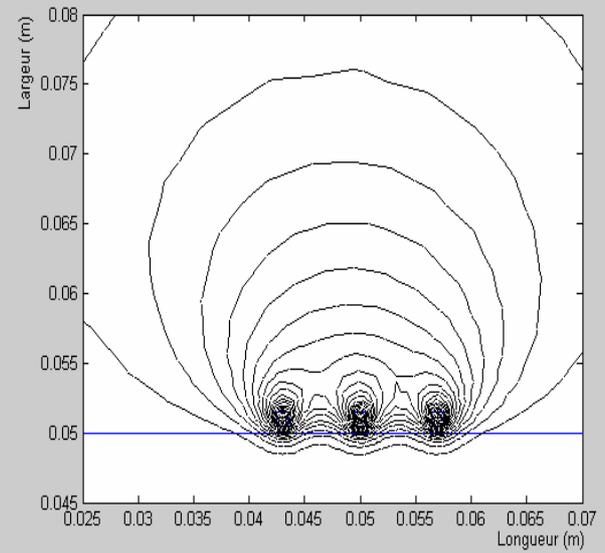
**Figure 4.32** Géométrie (distance de 0.004m)



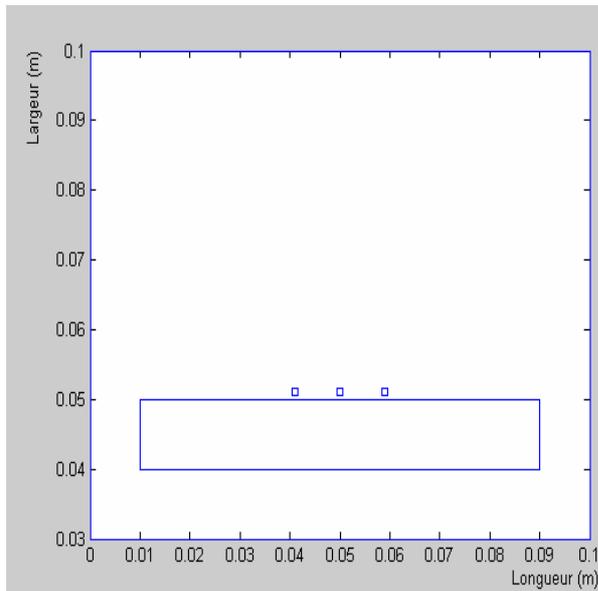
**Figure 4.33** Lignes de H (distance de 0.004m)



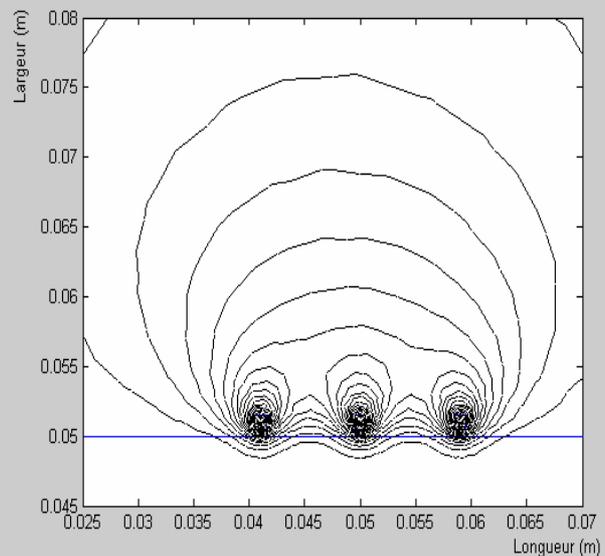
**Figure 4.34** Géométrie (distance de 0.006m)



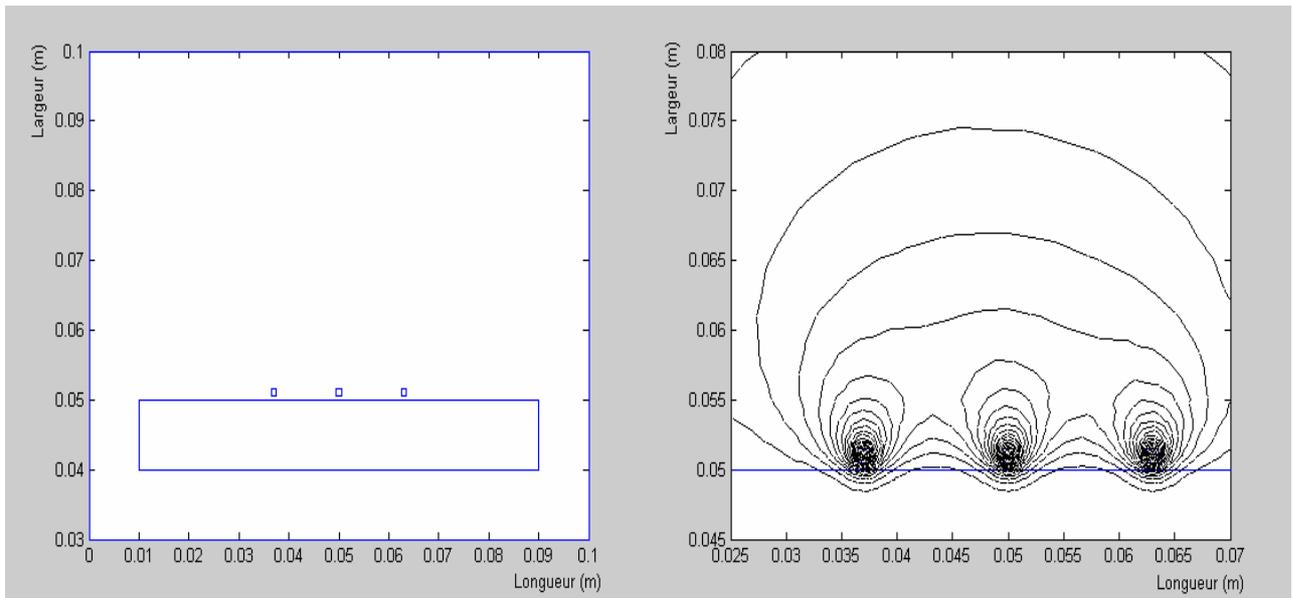
**Figure 4.35** Lignes de H (distance de 0.006m)



**Figure 4.36** Géométrie (distance de 0.008m)



**Figure 4.37** Lignes de H (distance de 0.008m)



**Figure 4.38** Géométrie (distance de 0.012m) **Figure 4.39** Lignes de H (distance de 0.012m)

## B. Cas avec défaut

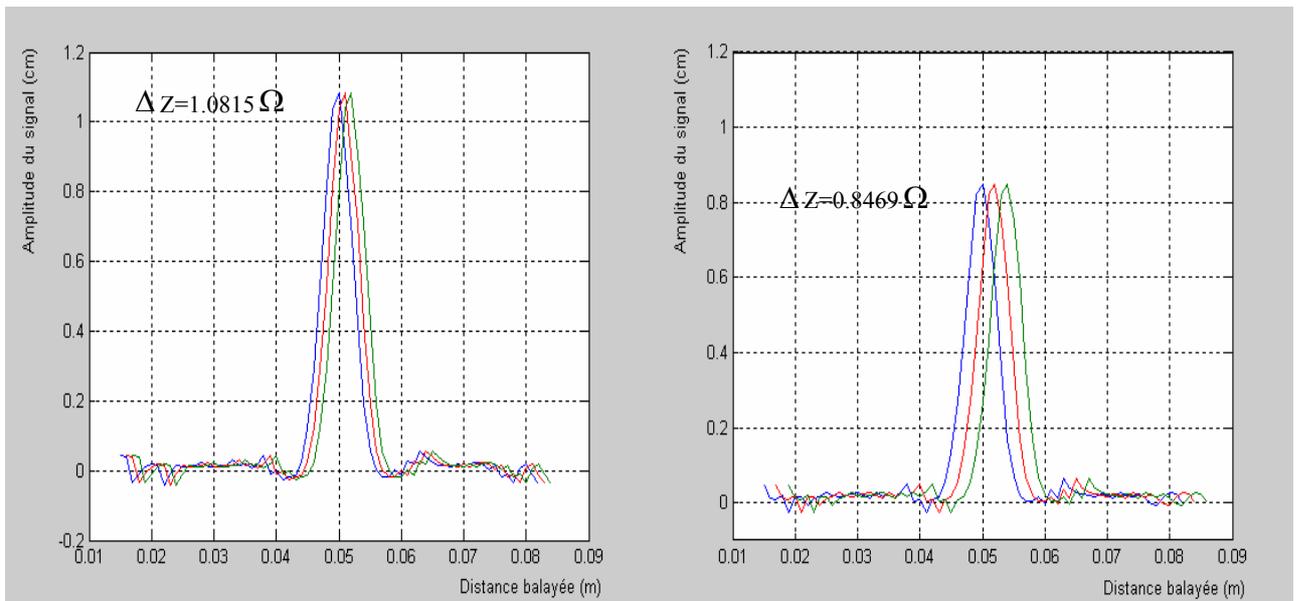
Dans ce cas là le déplacement est nécessaire pour la détection du défaut le long de la cible. Pour avoir la courbe  $\Delta Z$ , on utilise une plaque défectueuse présentée par la figure 4.16.

### 1. Organigramme du programme établi

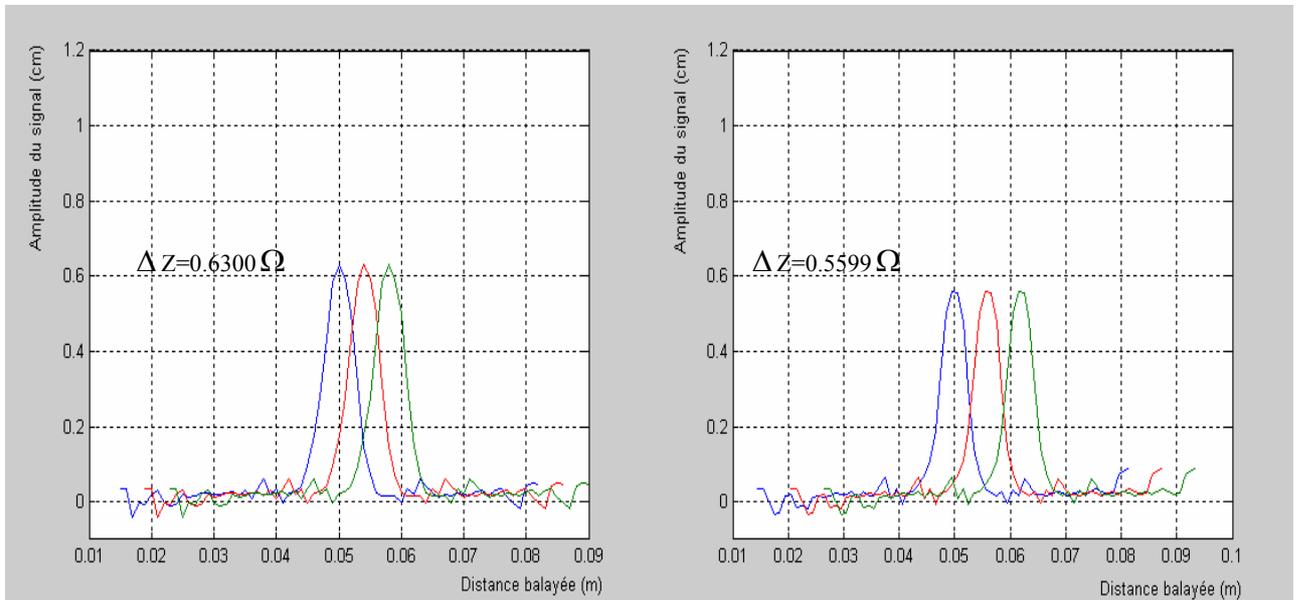
Le programme développé sous Matlab et PDE tool box établi pour l'affichage de la courbe de l'impédance lors de la détection des défauts par un seul capteur est présenté par l'organigramme de la figure 4.40.

Les figure 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45 et 4.46, présentent les courbes de  $\Delta Z$  pour les mêmes distances.

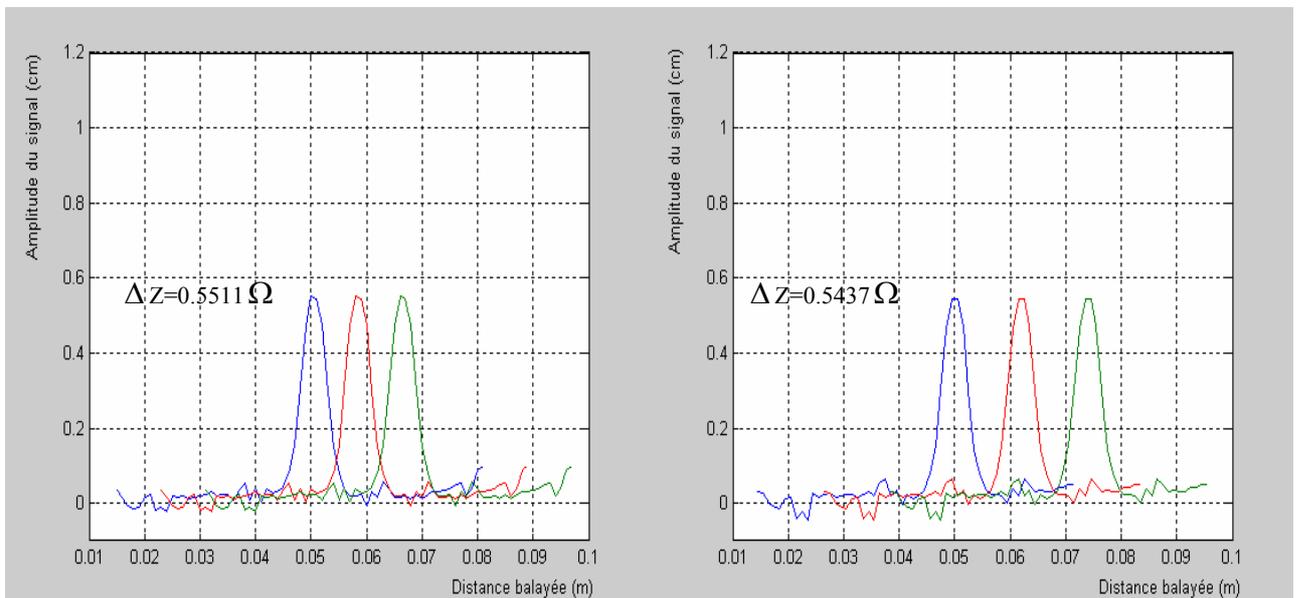




**Figure 4.41** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.001m) **Figure 4.42** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.002m)



**Figure 4.43** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.004m) **Figure 4.44** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.006m)



**Figure 4.45** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.008m) **Figure 4.46** Courbes  $\Delta Z$  (distance de 0.012m)

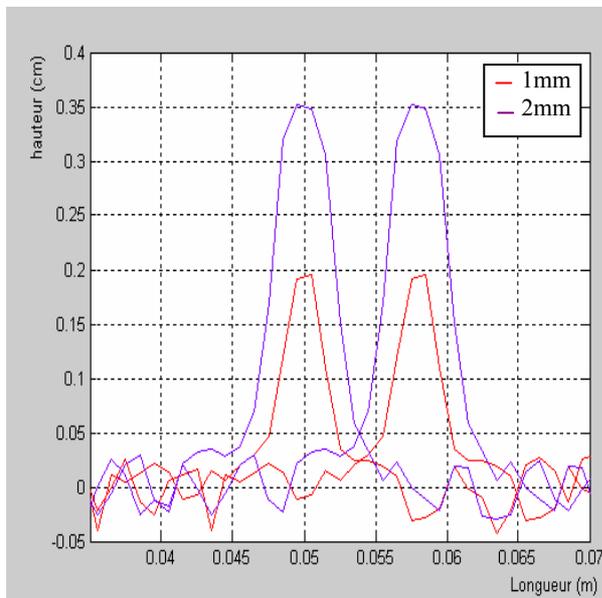
En ce qui concerne les courbes de  $\Delta Z$ , on remarque ce qui suit :

- ☞ Pour la distance de 0.001m,  $\Delta Z$  prend presque le triple de sa valeur lors de la détection avec un capteur, on peut déduire que les  $\Delta Z$  s'additionnent ;
- ☞ En augmentant la distance inter bobines, on diminue l'effet de l'inductance mutuelle jusqu'à une distance de 0.008m où l'effet de la mutuelle devient négligeable et  $\Delta Z$  prend une valeur proche de celle lors de la détection avec un capteur ;
- ☞ Au-delà de la distance de 0.012m,  $\Delta Z$  diminue pour atteindre la valeur de celle lors de la détection avec un seul capteur.

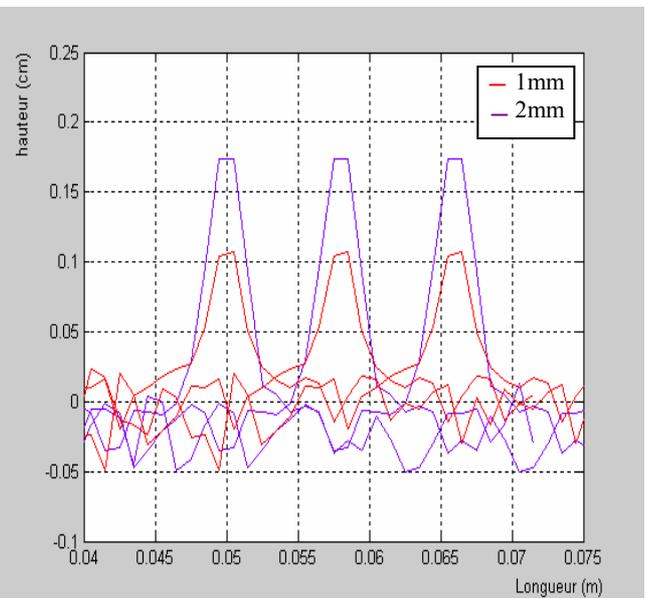
#### 4.1.3 Effet de la variation de la largeur du défaut

La variation de la largeur du défaut influe sur la courbe d'impédance, pour voir cet effet, on propose d'effectuer un balayage en utilisant un multi-capteurs de deux bobines et un autre de trois bobines.

Les figures 4.47 et 4.48, montrent les résultats de simulations.



**Figure 4.47**  $\Delta Z$  pour différentes largeurs de défaut utilisant deux capteurs élémentaires



**Figure 4.48**  $\Delta Z$  pour différentes largeurs de défaut utilisant trois capteurs élémentaires

#### Remarque

Dans le cas d'un multi-capteurs de deux comme celui de trois bobines, on remarque une nette différence de l'amplitude du signal délivré par le multi-capteurs lorsque la largeur du défaut change. Donc le changement de la largeur de défaut n'influe pas seulement sur la largeur du signal mais aussi sur son amplitude.

## 4.2 Cas d'une plaque

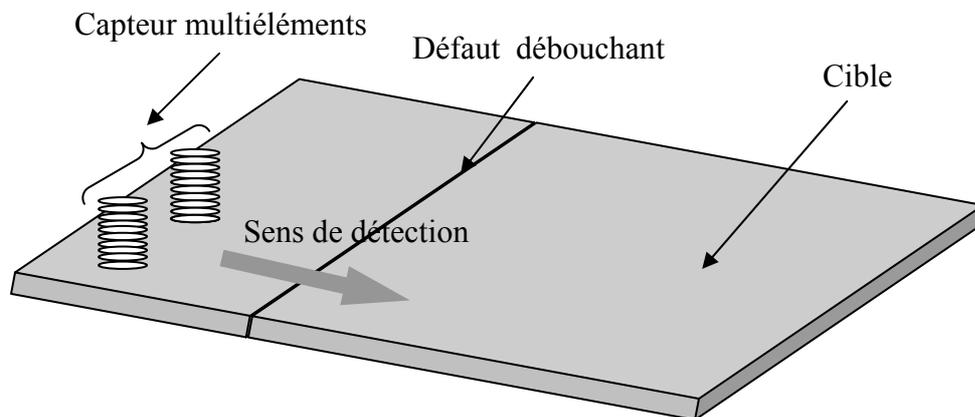
Si le cas d'une cible cylindrique a été procédé pour l'étude de l'effet de la mutualité inter bobines à cause de son axisymétrie, le cas d'une cible plane ne présente pas les mêmes disponibilités à cause de son non axisymétrie sauf dans le cas de la détection avec un seul capteur. Pour cela on va proposer une étude en 2D approchée à celle en 3D mais qui ne prend pas en considération l'effet de la mutualité.

### 4.2.1 Modèle à étudier

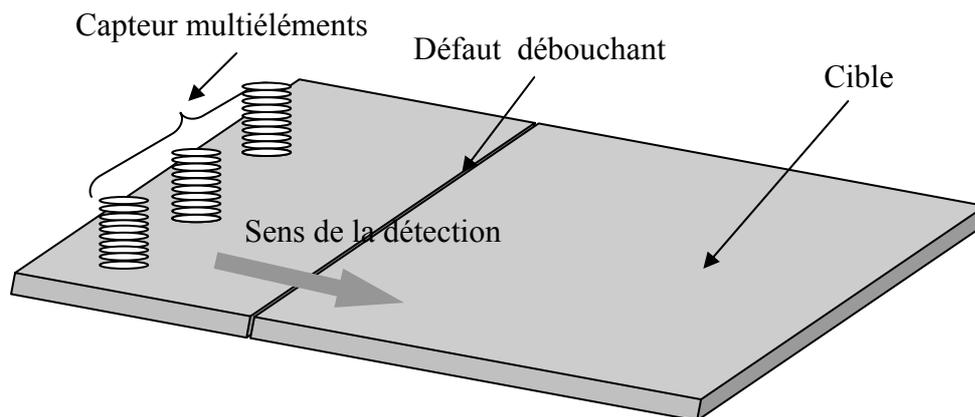
Pour la modélisation du problème de la détection des défauts sur une plaque par un capteur multiéléments, on ne peut pas réduire le système en 2D à cause de son non axisymétrie. Ce qui nous conduit à l'utilisation des éléments finis en 3D.

La figure 4.49, présente le modèle en 3D d'un capteur multiéléments de deux bobines et une plaque.

La figure 4.50, présente le modèle en 3D d'un capteur multiéléments de trois bobines et une plaque.



**Figure 4.49** Modèle proposé en 3D de deux capteurs élémentaires



**Figure 4.50** Modèle proposé en 3D de trois capteurs élémentaires

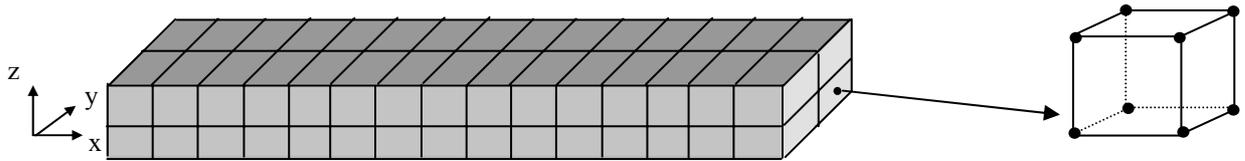
### 4.2.2 Éléments finis en 3D

Un élément fini tridimensionnel peut être considéré comme le cas le plus général de tout les éléments finis parce que toutes les variables sont selon  $x$ ,  $y$  et  $z$ . La structure 3D est montrée sur les figures 4.51, 4.52. Un solide 3D peut également avoir une forme arbitraire. Typiquement, un

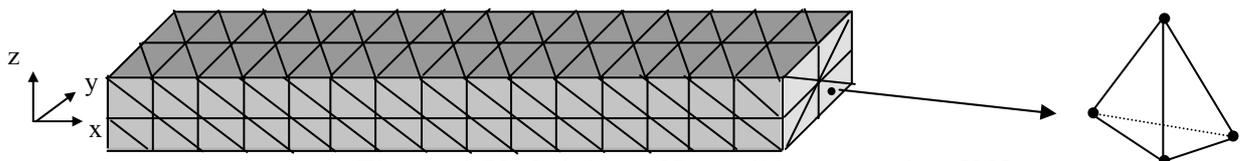
élément 3D peut être un tétraèdre ou un hexaèdre dont la forme des surfaces plates (figure 4.53) ou incurvées (figure 4.54). Chaque noeud de l'élément aura trois degrés de liberté en translation. L'élément peut être déformé ainsi dans les trois directions de l'espace.

Puisque l'élément 3D serait l'élément le plus général, les éléments 2D peuvent tous être considérés comme des cas spéciaux de l'élément 3D.

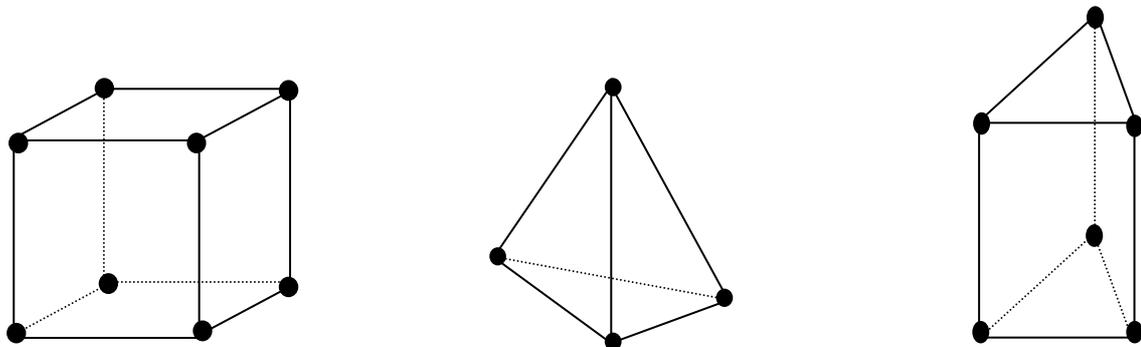
On emploie les éléments 3D seulement quand on n'a aucun autre choix. La formulation de ces derniers est une prolongation des éléments 2D. Toutes les techniques utilisées en 2D peuvent être utilisées en 3D, mais toutes les variables sont maintenant des fonctions de  $x$ ,  $y$  et de  $z$ , [32], [33].



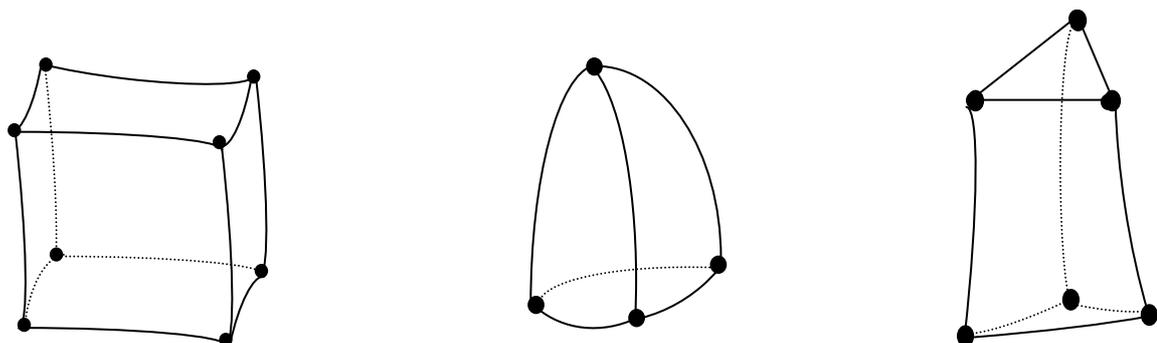
**Figure 4.51** Solide en 3D maillé en cubes, [32]



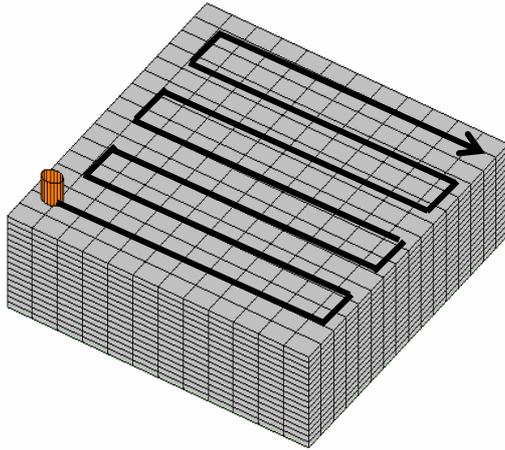
**Figure 4.52** Solide en 3D maillé en triangles, [32]



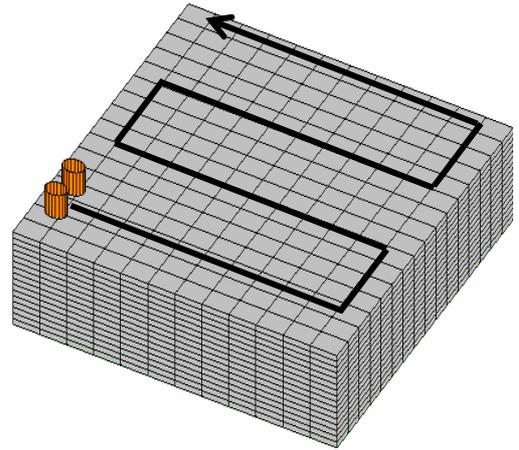
**Figure 4.53** Eléments finis en 3D carré triangle et hexaèdre (forme des surfaces plates), [33]



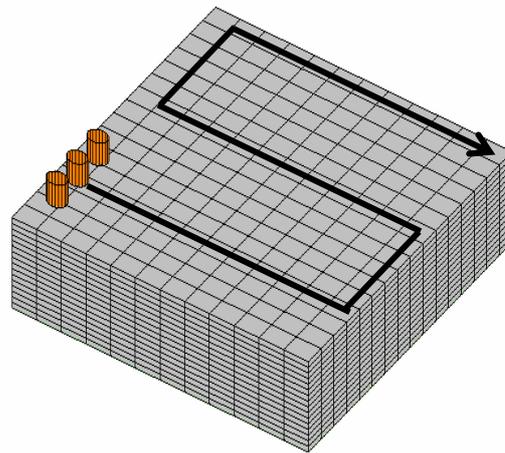
**Figure 4.54** Eléments finis en 3D carré triangle et hexaèdre (forme des surfaces incurvées), [33]



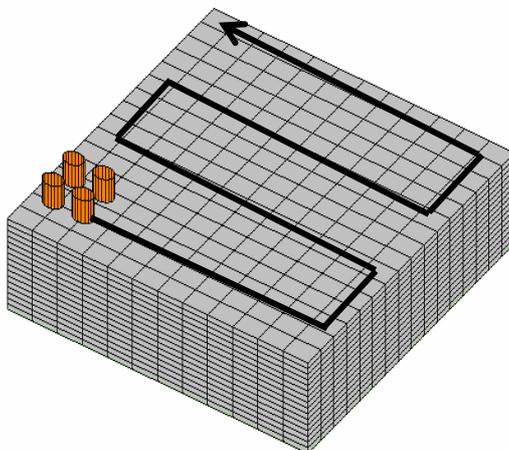
**Figure 4.55** Modèle d'une cible plane et un capteur (1×1)



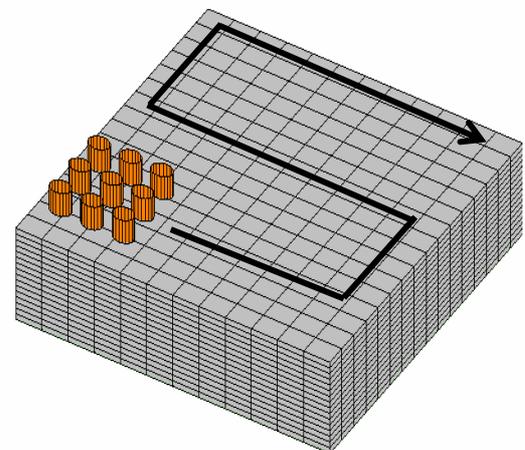
**Figure 4.56** Modèle d'une cible plane et deux capteurs élémentaires (2×1)



**Figure 4.57** Modèle d'une cible plane et trois capteurs élémentaires (3×1)



**Figure 4.58** Modèle d'une cible plane et quatre capteurs élémentaire en matrice (2×2)



**Figure 4.59** Modèle d'une cible plane et neuf capteurs élémentaires en matrice (3×3)

### 4.2.3 Représentation de la géométrie en 3D

Une représentation de la géométrie en 3D a été effectuée sur Matlab, la figure 4.55 représente un système d'un capteur et une bobine. Les figures 4.56 et 4.57, représentent deux systèmes le premier de deux bobines et une plaque et le second de trois bobines (capteur multiéléments en train) et une plaque. Les figures 4.58 et 4.59, représentent deux systèmes de deux capteurs multiéléments en matrice le premier de quatre bobines et le second de 9 bobines.

#### Conclusion

*Dans un système multiéléments (démuni du système de multiplexage), l'inductance mutuelle des bobines adjacentes influe sur l'impédance totale du système (capteur-cible) donc sur la réponse des capteurs élémentaires. Dans ce chapitre nous avons proposé plusieurs distances inter bobines pour l'atténuation de cet effet.*

*Le cas d'un cylindre a été traité dans ce chapitre par la méthode des éléments finis en 2D à cause de son axisymétrie, le cas d'une plaque nécessite une étude tridimensionnelle que nous proposerons comme un travail futur.*

## **Conclusion Générale**

### **Travail accompli**

*Le contrôle non destructif par courant de Foucault comme toutes les autres techniques, exige des connaissances complémentaires des phénomènes qui peuvent existés lors de la détection des défauts (électromagnétiques, thermiques, ...etc), en plus des connaissances dans le domaine du traitement du signal.*

*En ce qui concerne ce travail, les deux premiers chapitres furent un état de l'art sur le CND et les multi-capteurs.*

*Le but du troisième chapitre était de modéliser l'ensemble capteur-cible et le simuler pour différencier à travers les résultats obtenus entre  $Z$  et  $\Delta Z$ , choisir la quelle des deux notions est la plus efficace, décoder le signal délivré par le capteur.*

*Un système de multiplexage est utilisé dans les systèmes multiéléments pour éviter la mutuelle entre les bobines. Notre étude s'effectue dans le cadre des capteurs multiéléments démunis d'un tel système.*

*Dans ce travail nous avons porté notre intérêt sur l'influence de la présence des bobines adjacentes sur l'impédance totale du système capteur-cible. Pour cela nous avons proposé l'étude de deux système multiéléments l'un porteur de deux et l'autre de trois capteurs élémentaires. La variation de la distance inter bobines influe sur la réponse des capteurs élémentaires, ainsi une variation de l'impédance totale du système a été détectée.*

*Dans le quatrième chapitre, nous avons manifesté l'effet de la mutuelle entre les capteurs élémentaires. La variation de la distance inter bobines a été effectuée pour le choix d'une distance convenable et efficace.*

*En plus du travail accompli on cite l'élaboration d'un programme pour le calcul et l'affichage de la courbe de l'impédance dans le cas de la détection avec un capteur unique, un capteur multiéléments de deux et de trois capteurs élémentaires.*

### **Analyse des résultats et discussion**

*Le manque de matière dans la cible est détecté par le signal  $\Delta Z$ , l'utilisation de cette notion savère plus pratique que l'utilisation de l'impédance car les différentes perturbations lors de la détection du coté simulation et pratique s'éliminent grâce à la soustraction des deux signaux  $Z_0$  et  $Z$ . Dans notre travail nous avons effectué la soustraction d'une seule valeur de  $Z_0$  de celle de  $Z$  faute de la saturation de la mémoire virtuelle de l'ordinateur lorsque le programme tourne.*

*Le choix des dimensions du capteur pour des applications bien définies est nécessaire surtout si une reconnaissance des dimensions des défauts s'y impose ; si la détection se fait le long de la*

---

*cible la largeur du capteur doit être inférieure ou égale à celle des défauts. Au dessus de cette largeur la profondeur du défaut ne sera pas exactement mesurée.*

*En ce qui concerne les résultats obtenus, l'effet de l'inductance mutuelle a été mis en évidence par la variation de l'amplitude des signaux de détection lors de la variation de la distance inter bobines. Mais ce qui n'a pas été prouvé c'est que la présence de la deuxième bobine à proximité de la première influe sur le signal de détection mutuellement. Ce que nous avons remarqué dans notre cas c'est un certain changement de la valeur de l'impédance après le passage de la première bobine par le défaut et avant pour la seconde. Cette variation sera aussi régit par le phénomène de l'inductance mutuelle.*

*Dans le cas d'une pièce cylindrique encerclée par un capteur multiéléments, il est suffisant de choisir la distance inter bobines qui donne une  $\Delta Z$  la plus proche de celle obtenue dans le cas d'un seul capteur encerclant. Mais cette application ne s'avère pas très pratique sauf dans le cas des techniques à courants pulsés ou multifréquences ou peut être des applications particulières.*

*Dans le cas d'une pièce cylindrique ou plate surmontée par un capteur multiéléments, la distance inter bobines la plus pratique pourrait être celle qui donne une différence  $\Delta Z$  la plus proche de celle obtenue dans le cas d'un seul capteur. Ce choix aurait pu être validé par une simulation en 3D ou les signaux risquent de se modifier, une explication sera présentée comme annexe A.*

### **Observations et problèmes rencontrés**

*Parmi les difficultés rencontrées, on cite la nouveauté du thème, l'absence de la documentation au niveau de notre université durant ce travail, même les articles disponibles sur Internet, donnent une idée sur le niveau de recherche actuel, mais ne permettent pas l'amélioration des connaissances théoriques des différentes techniques.*

*Une plus grande précision aurait pu être obtenue avec un matériel informatique plus performant.*

*Une validation des résultats obtenus aurait été effectuée, mais le manque de matériels a été un obstacle majeur pour l'aboutissement de la validation.*

### **Perspectives**

*Dans un travail prochain, on propose l'étude du même phénomène mais tout en s'intéressant cette fois-ci aux signaux individuels des capteurs élémentaires surtout en qualité.*

*Un autre axe de recherche porté sur la modélisation 3D qui est indispensable pour la détection des défauts en utilisant un capteur multiéléments, car la disposition des capteurs élémentaires se*

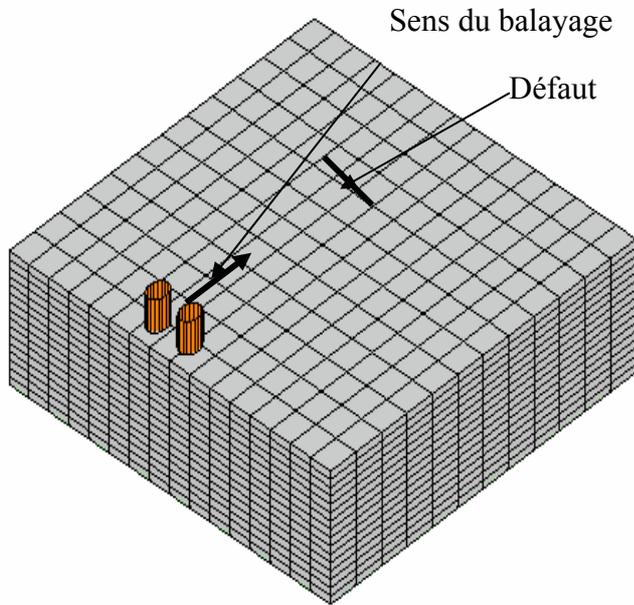
---

*fait sur un ou deux axes et la détection dans un troisième. Cette méthode est aussi indispensable dans le cas d'une cible plane même pour aboutir au but de notre étude.*

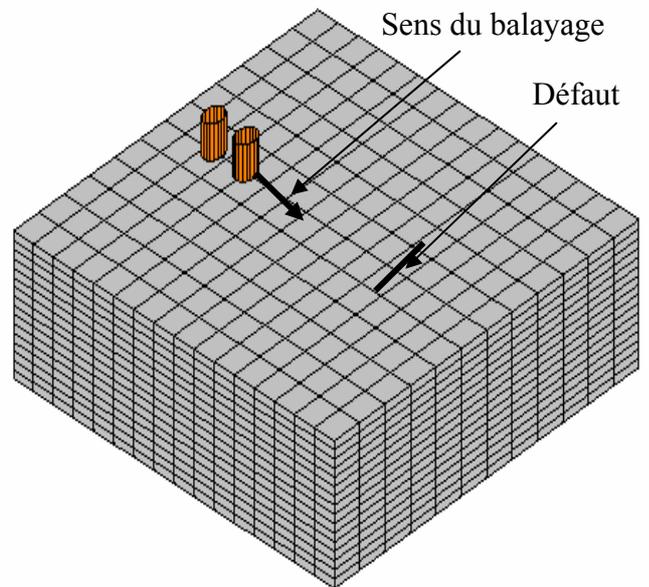
*La réalisation d'un prototype pédagogique puis industriel d'un capteur multiéléments associé avec une chaîne de mesure sera visée par notre recherche.*

## **Annexes**

## Annexe A



**Figure 1** Position 1 (côte à côte)



**Figure 2** Position 2 (en train)

La position 1 montrée sur la figure 1 est une mise côte à côte des bobines élémentaires du capteur multiéléments. La position 2 montrée par la figure 2 est une mise en train des bobines élémentaires du capteur multiéléments.

Dans le premier cas qui est le plus intéressant, une étude en 3D est indispensable, contrairement à l'autre cas qui peut se réduire à un modèle en 2D dont l'étude est faite dans ce travail (même cas du cylindre)

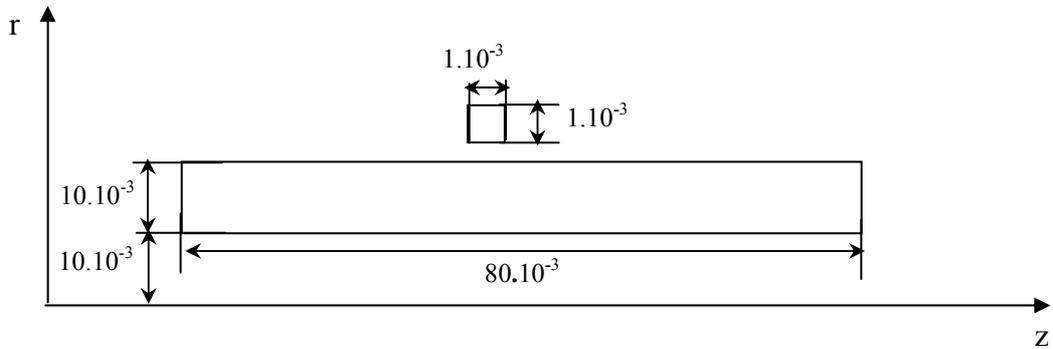
En ce qui concerne la détection, dans le premier système les deux bobines passent par le défaut simultanément. L'influence du changement de  $Z_1$  sera subite par la deuxième bobine et celle de  $Z_2$  par la première en même temps, ce qui rend la séparation du signal efficace du perturbateur délicate.

Dans le deuxième cas les deux bobines passent par le défaut séparément l'une après l'autre, le changement de l'impédance  $Z_1$  influe sur l'amplitude de  $Z_2$  et vis versa, mais les deux signaux (efficace et perturbateur) restent séparés et différenciés

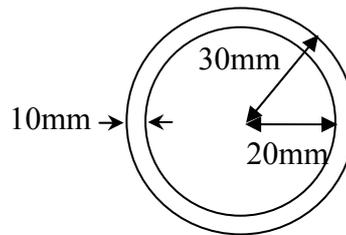
## Annexe B

### Dimensions du capteur et la cible utilisés

Ces dimensions sont montrées sur les figures 1, 2 et les deux tableaux T1 et T2 donnent certaines caractéristiques



**Figure 1** Dimensions latérales du système (cible cylindrique ou plane)



**Figure 2** Coupe radiale de la cible cylindrique

**Tableau T1**

Matériau	Longueur de la bobine (mm)	Largeur de la bobine (mm)	Nombre de spires	Fréquence (kHz)
Cuivre	1	1	15	10

### Paramètres de la cible

**Tableau T2**

Longueur (mm)	Épaisseur (mm)	Conductivité ( $S.m^{-1}$ )	Perméabilité relative ( $H.m^{-1}$ )
Cuivre	1	1	15

## **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] C. Marchand, Y. Le Bihan, P-Y. Joubert, "Conception de multi-capteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif", Proposition de thèse, Laboratoire de Génie Electrique de Paris, Universités Paris VI et Paris XI, 2005.
  - [2] C. Marchand, Y. Le Bihan, P-Y. Joubert, "Modélisation et conception de sondes multicapteurs pour le contrôle non destructif par courants de Foucault", Universités Paris VI et Paris XI, 2005.
  - [3] J. Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND)", Technique de l'ingénieur, traité mesure et contrôle R1400, 1996.
  - [4] M. Lacroix, "Essais non destructifs", Techniques de l'ingénieur 7-1986.
  - [5] "Contrôle non destructif", [HOLO 3, 7 rue du Général Cassagnou F-68300 Saint-Louis, www.http://www.holo3.com](http://www.holo3.com), 1999.
  - [6] "Contrôle non destructif et dimensionnel de pièces par courants de Foucault et par laser", [www.physique.gla.ac.uk/igr/advligo/Registred%20Documents%20Glasgow/ALUGLA0045aAUG03.pdf](http://www.physique.gla.ac.uk/igr/advligo/Registred%20Documents%20Glasgow/ALUGLA0045aAUG03.pdf), 2000 .
  - [7] "Courants de Foucault", Encyclopédie multimédia, Atlas et organise-notes, Microsoft encarta, collection 2006.
  - [8] V.Thomas, "Etude pour la conception d'une sonde multicapteurs à courants de Foucault pour le contrôle non destructif", Rapport de stage, Université de Paris-Sud XI, 2006/2007
  - [9] E. Pelletier, M. Grenier, A. Chahbaz, T. Bourgelas, "Array eddy current for fatigue crack detection of aircraft skin structures", Proceeding, V<sup>th</sup> International workshop, Advances in signal processing for Non destructive evaluation of materials, Québec City, Canada, August 2005.
  - [10] M. Q Lê, D. Placko, "Nouvelle structure de capteur à courants de Foucault et algorithme associé pour la mesure des propriétés électrique et magnétique du métal", Journal de Physique, France, Mai 1995.
  - [11] M.S.Safizadeh, Z.Liu, C. Mandache, D.S.Forsyth, and A.Fahr, "Automated pulsed eddy current method for detection and classification of hidden corrosion", Proc. 5<sup>th</sup> international workshop, Advances in signal processing for non destructive evaluation of materials, Québec city (Canada), August, 2005.
  - [12] L. Oukhellou, "Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. application à la reconnaissance des défauts de rails par courant de Foucault", Thèse de doctorat, université de Paris XI, Orsay, 04 Juillet 1997.
  - [13] "Ultrasons, use multiéléments, courants de Foucault et CF multiéléments, R/D tech", [sofranel.com/Doc/OmniScan\\_1204F.pdf](http://sofranel.com/Doc/OmniScan_1204F.pdf), 2004.
  - [14] C.gilles-Pascaud, J.-M. Decitre, "Système CF multiéléments pour le contrôle de petits défauts débouchants", CEA/LIST, Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette France, 29 Juillet 2005.
-

- [15] F. Mehmmai, M. Ghoul, "Etude générale d'un processus industriel "trifileuse" commandée par PLC Siemens S7-300 à travers le bus de terrain "Profibus"", Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du brevet de technicien supérieur en Maintenance des machines automatisée, Batna, 2007.
  - [16] "Sondes à courants de Foucault", IBS PE est membre de la MHP, Association Française de la Mécanique de Haute Précision et d' EUSPEN Société Européenne pour l'ingénierie de précision et la nanotechnologie, [www.ibspe.com](http://www.ibspe.com), Mai 2006
  - [17] Y. Le Bihan, "Study on the transformer equivalent circuit of eddy current non-destructive evaluation", NDT&E. International, Vol 36, N° 5, page 297/302, France, 2003.
  - [18] J.H.V.Lefebvre, C.Mandache, J.Letarte, "Pulsed eddy current empirical modelin", Proc. 5<sup>th</sup> international workshop, Advances in signal processing for non destructive evaluation of materials, Québec city (Canada), 2-4 August, 2005.
  - [19] A. Lamarre, "Ultrasonic phased-array and eddy current array as approved methods for aircraft maintenance", ATA conference, Olympus NDT, Fort Worth, Texas, 2006.
  - [20] P. S. Naidu, "Sensor array signal processing", International standard book, Library of congress card, United States of America, 2001.
  - [21] C. Miki, "Non-Destructive Evaluation (NDE)", Department of Civil Engineering, Institute of Technology, Tokyo, [www.cv.titech.ac.jp/~miki-lab/english/class/retrofit-eng/Cladd-8-NDE.pdf](http://www.cv.titech.ac.jp/~miki-lab/english/class/retrofit-eng/Cladd-8-NDE.pdf), 2001.
  - [22] Z. Chena,, K. Miyaa, M. Kurokawab, "Rapid prediction of eddy current testing signals using  $A_\varphi$  method and data base", Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo, 26 March 1998.
  - [23] A. E. Crouch, "Defect assessment using conformable array data", Applied physics division, West Virginia, July 2003.
  - [24] M. Plissi, "Update on ECD measurements", Institute for Gravitational Research, University of Glasgow, [www.ligo.caltech.edu/docs/P/P060013-00.pdf](http://www.ligo.caltech.edu/docs/P/P060013-00.pdf), 2000.
  - [25] Olympus NDT, "Wire and Rod en 0605", parc-technologique, Québec, Canada, , [www.olympusndt.com](http://www.olympusndt.com), 2005-2006.
  - [26] M. Sabai, "Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans le procédé du contrôle non destructif par association : Méthode des éléments finis - Technique des transformation conformes (MEF-TTC)", thèse de magistère, Université de Biskra, 14/02/2005.
  - [27] B. Bendjima, "Contribution à la modélisation par éléments finis des phénomènes électromagnétiques relatifs au magnétoformage", Thèse de doctorat en électronique, option génie électrique, université de Nantes, 27 Novembre 1997.
  - [28] T. Abassi, "Implémentation sous l'environnement Matlab d'un modèle analytico-numérique couplé de calcul de courants de Foucault dans les dispositifs à symétrie axiale", Thèse de magistère en électrotechnique, option électricité industrielle, Université de Biskra, 2002.
-

- [29] F. J. Ahmed, "Modélisation par réseaux de perméances de la désaimantation dans la machine à aimant permanent", Rapport de stage, Laboratoire de recherche en Electronique, Electronique et Systèmes, France, 2003-2004
  
  - [30] N. Benhadda, "Modélisation des capteurs inductifs à courants de Foucault", Mémoire de Magistère En Electrotechnique, Option : Matériaux électrotechniques, Université de Batna, Septembre 2006.
  
  - [31] G. R. Liu, S. S. Quek "The finite element method: A practical course", Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Butterworth-Heinemann, An imprint of Elsevier Science, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington MA 01803, First published 2003.
  
  - [32] A.Guettafi, "Electromagnétisme approfondi", Cours de magistère, Université de Batna, 2005.
  
  - [33] G. Dhondt, "The finite element method for three-dimensional thermomechanical applications", England, 2004.
-

**Titre :** Conception d'un Capteur Multiéléments à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND).

**Résumé :**

La technologie des capteurs multi-éléments à courants de Foucault mène à l'utilisation de plusieurs sondes à courants de Foucault placées côte à côte pour l'acquisition de données. L'assemblage des sondes est possible grâce au multiplexage, qui évite l'inductance mutuelle entre les sondes individuelles.

Pour évaluer au mieux la détection d'un capteur multiéléments démunie du système de multiplexage, il est nécessaire de connaître l'influence de l'effet de la présence d'une deuxième bobine sur la détection. Un minimum de distance tel qu'un maximum est recommandé. La distance optimale peut être décidée par simulation ou la détection se fait en changeant la position des bobines l'une par rapport à l'autre. Une meilleure détection est jugée par un meilleur signal.

**Abstract**

The technology of ECA lets lead electronically and to read several probes of EC placed coast at coast in the same overall. Data acquisition of probe is made possible by the use of the multiplexing, which avoids mutual inductance between the individual probes.

As well as possible to evaluate the detection of an eddy current array sensor stripped system of multiplexing, it is necessary to know the influence of the effect of the presence of a second reel on detection. A minimum of distance such as a maximum is recommended. The optimal distance can be decided in simulation or detection is done by changing the position of the reels one compared to the other. Best detection is judged by a better signal.

**Mots-clés :** Contrôle Non Destructif (CND), Courants de Foucault (CF), Capteur Multiéléments à Courants de Foucault, Méthode des Eléments Finis (MEF).

**Keywords:** Non Destructive Testing (NDT), Eddy Currents (EC), Eddy Current Array Sensor (ECAS), Finite Element Method (FEM).