



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغزور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

## Mémoire de fin d'étude

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande Electrique**

*Présentés par :*

*Slama Tariq – Djerboua Abbes*

### THEME

***Modélisation Par Eléments Finis 3D D'une  
Structure Métallique Utilisant Un Capteur A  
Courants De Foucault Pour Le Contrôle Non  
Destructif (CND)***

*Soutenu le 20/06/2018 devant la commission d'examen composée de :*

Mr. BOURAS Mostafa

M.A.A à l'Université de Khenchela

Président

Mr. BENHADDA Nabil

M.C.B à l'Université de Khenchela

Encadreur

Mr. SAIDI Abdelkader

M.A.A à l'Université de Khenchela

Examineur

**Promotion 2017/2018**



# DEDICACES

*J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail à :  
Ma très chère mère qui ne cesse de pensée à moi.  
Mon très cher père qui a sacrifier sa vie pour moi.*

*Mes très chers frères et sœur*

*YASSINE, ABD ELBAKI, BASMA, SANA, OUSSAMA.*

*Et spécialement pour ma petite ange SIRINE*

*Et surtout pour ma femme*

*A tous mes amis que j'ai connus dans ma vie*

*Surtout : ADEL, RAFIK, FARID, HAMID*

*A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'électrotechnique option  
commande électrique promotion 2018 et spécialement HACENE,  
YASSER,*

*A tous les enseignants et toutes les enseignantes qui ont contribué*

*A ma formation tout au long de ma vie d'étudiant*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*



*S.TAREK*



# DEDICACES



*J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère qui ne cesse de pensée à moi.*

*Mon très cher père qui a sacrifier sa vie pour moi.*

*Mes très chers frères*

*Ammara, Walid, Djalel, Rafik*

*Et spécialement pour l'ange Amer.*


*A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'électrotechnique option*

*commande électrique promotion 2018 .*

*A tous les enseignants et toutes les enseignantes qui ont contribué*

*A ma formation tout au long de ma vie d'étudiant*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*



*Dj.ABBES*



# REMERCIEMENTS

*Nous devons tout d'abord remercier Allah notre créateur, pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail*

*Arrivons au terme de cette étude nous sommes frappés l'idée qu'aucun auteur ou peut vraiment prétendre être un "self made man" un livre, une édition, une publication, une communication, une thèse, une étude ou un mémoire n'est seulement que l'aboutissement de la pensée et de la collaboration de beaucoup de gens, et nous voulons exprimer notre gratitude à ceux qui ont contribué à l'élaboration du présent mémoire*

*Nous devons beaucoup à feu **Monsieur BENHADDA Nabil**, qui éclairci le chemin.*

*Je tiens à exprimer mes sincères gratitudees à tous les enseignants de la département de génie industriel option commande électrique.*

*Nous remercions encore tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce Modeste travail.*

*Slama TARIQ et Djerboua ABBES*

# Résumé

*Le contrôle non destructif (CND) est un domaine interdisciplinaire, utilisé dans des contextes industriels, qui vise à diagnostiquer l'état d'intégrité ou de santé d'une pièce, d'un composant ou d'une structure industrielle sans qu'il en résulte une altération préjudiciable à leurs utilisations ultérieures.*

*La technique CND-CF est l'une des techniques les plus utilisées pour son efficacité, sa simplicité de mise en œuvre.*

*Ce travail comprend deux parties, la première donne un aperçu général sur les différentes techniques de CND ainsi qu'un état de l'art sur les capteurs utilisés en CND-CF, les équations qui régissent ce contrôle et les différentes formulations en potentiels permettant de résoudre les problèmes magnétodynamiques. Quant à la seconde partie, elle traite de la modélisation et de la validation par la méthode des éléments finis pour différentes configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault.*

*le premier volet de cette dernière partie, aborde l'utilisation de la méthode des éléments finis, sous le logiciel COMSOL Multiphysics, pour la modélisation tridimensionnelle (3D) d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) en mode absolu, cette modélisation vise d'une part à déterminer l'interaction entre le capteur et la pièce à inspecter à travers le calcul de l'impédance d'un capteur à courants de Foucault. C'est dans ce contexte qu'un modèle s'appuyant sur la discrétisation des équations de Maxwell en régime magnétodynamique a été développé puis une validation de ce modèle. Ce modèle a été par la suite enrichi par une étude comparative de la sensibilité de la réponse capteur à CF pour les différents paramètres influant sur la partie réel et imaginaire de l'impédance, tels que les grandeurs géométriques de la fissure, la fréquence, lift-off, le profondeur et la conductivité électrique.*

*Mots clés : Contrôle non Destructif, Courants de Foucault, Éléments Finis, Contrôle en Mode Absolu.*

## ملخص

إن المراقبة الغير مدمرة، أو الغير متلفة للقطعة المراد مراقبتها و تعرف أيضا بالتقييم الغير متلف، ميدان متداخل الاختصاصات يستعمل في الميدان الصناعي، حيث يكمن دوره في مراقبة حالة القطع للمكونات أو الهياكل الصناعية دون حدوث أي ضرر يؤثر على استخدامها في المستقبل.

البحوث المقدمة في هذا الميدان تحث على عدد كبير من تقنيات المراقبة الغير متلفة ، و هـ في تزايد دائم. تعتبر تقنية تيارات فوكو من التقنيات الأكثر استعمالا و ذلك لسهولة استعمالها و لفعاليتها.

الأعمال المقدمة في هذه الأطروحة تنقسم إلى قسمين : الأول يتضمن، نظرة شاملة لمختلف طرق المراقبة الغير متلفة الأكثر استعمالا، لمحة حول الملتقطات الحثية المستعملة في المراقبة بواسطة تيارات فوكو، المعادلات التي تصف النظام و كذا مختلف القوانين التي تمكن من حل الحالات التي تتعلق بالأنظمة المغنطيسية-حركية. أما القسم الثاني يتعلق بالتمذجة بواسطة طريقة العنصر المحدود بالنسبة لتقنية المراقبة الغير مدمرة عن طريق تيارات فوكو و يشتمل على استعمال النمذجة بواسطة طريقة العنصر المحدود وذلك بواسطة برمجية *COMSOL Multiphysics*، لتمذجة ثلاثية الأبعاد لنظام يمثل تقنية المراقبة الغير متلفة عن طريق تيارات فوكو في حالة الطريقة المطلقة. هذه النمذجة تهدف إلى تحديد التفاعل بين أجهزة الاستشعار و القطعة المراد مراقبتها من خلال حساب ممانعة الملتقط في حالة شرخ في القطعة. في هذا السياق تم برمجة نموذج يعتمد على معادلات ماكسويل. حيث تم إدراج الحالة التي يكون فيها الشرخ السطحي للقطعة مملوء بمادة ناقلة للتيار. بعد ذلك تم إثراء هذا العمل عبر مقارنة حساسية الملتقط للخصائص الهندسية للشرخ، ذبذبة إشارة التغذية الكهربائية، البعد بين الملتقط و القطعة الناقلة، عمق الشرخ وأخيرا الناقلية الكهربائية أثناء المراقبة.

الكلمات الرئيسية :

المراقبة الغير مدمرة، تيارات فوكو، طريقة العناصر المحدودة، الملتقطات الحثية، التحكم المطلق.

# *Table Des Matières*

Résumé	
Liste des figures .....	v
Liste des tableaux .....	vii
Notation et Symboles .....	viii
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre Un : Etat de l'art sur les différentes techniques de contrôle Non destructif</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Généralités sur le Contrôle Non Destructif .....	4
I.2.1. Principe .....	4
I.2.2. Champ d'application actuel .....	4
I.2.3. Les différents défauts détectés en (CND) .....	5
I.2.3.1. Les défauts surfaciques .....	5
I.2.3.2. Les défauts internes .....	6
I.2.4. Procédure de CND .....	6
I.3. Les techniques de contrôle non destructif .....	7
I.3.1. Examen visuel .....	7
I.3.2. Ressuage .....	8
I.3.3. Essais ultrasonores .....	10
I.3.4. Contrôle par Laser .....	11
I.3.5. Radiographie .....	11
I.3.6. Magnétoscopie .....	13
I.3.7. Thermo-inductive .....	14
I.3.8. Thermographie .....	16
I.3.9. Courants de Foucault .....	18
I.4. Synthèse comparative des techniques utilisées en CND .....	19
I.5. Conclusion .....	20

**Chapitre Deux : Capteurs utilisés dans le domaine de Contrôle Non**

**Destructif**

II.1. Introduction .....	21
II.2. Définition d'un capteur .....	21
II.2.1. Paramètres du capteur .....	21
II.2.2. Critères de choix d'un capteur .....	22
II.3. Principe des capteurs .....	22
II.4. Domaines d'utilisation des capteurs .....	23
II.5. Capteurs à courants de Foucault .....	24
II.5.1. Profondeur de pénétration .....	25
II.5.2. Mise en œuvre du contrôle .....	26
II.5.2.1. Montage des sondes .....	27
II.5.2.2. Branchements électriques .....	28
II.5.2.3. Mode de contrôle .....	29
II.5.3. Disposition des bobines .....	30
II.5.3.1. Capteurs encerclants .....	31
II.5.3.2. Capteurs internes .....	32
I.5.3.3. Capteurs sondes .....	32
II.5.3.4. Sondes particulières .....	33
II.5.4. Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND .....	35
II.6. Capteurs plus utilisés en CND .....	36
II.7. Différents modes d'excitations .....	36
II.8. Conclusion .....	37

**Chapitre trois : Modélisation par élément finis 3D d'un capteur à courants de**

**Foucault en mode absolu**

III.1. Introduction .....	38
III.2. Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault .....	38
III.3. Modélisation du dispositif de CND par CF .....	40
III.4. Mise en équations .....	41
III.4.1. Equations de MAXWELL .....	41
III.4.2. Lois constitutives .....	42

III.4.3. Conditions aux limites .....	43
III.4.4. Conditions de continuité .....	43
III.4.5. Conditions de Jauge .....	44
III.4.6. Hypothèses simplificatrices .....	44
III.4.7. Champs et potentiels .....	45
III.4.8. Formulations magnétodynamiques .....	46
III.4.8.1. Formulations de type électrique .....	46
III.4.8.1.1. Formulation en champ électrique $\vec{E}$ .....	46
III.4.8.1.2. Formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique .....	47
III.4.8.2. Formulations de type magnétique .....	48
III.4.8.2.1. Formulation en champ magnétique H .....	48
III.4.8.2.2. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique .....	49
III.5. Méthodes numériques de résolution .....	49
III.5.1. Méthode des intégrales de frontières .....	50
III.5.2. Méthode des différences finis .....	50
III.5.3. Méthode des volumes finis .....	51
III.5.4. Méthode Des Eléments Finis MEF .....	51
III.5.4.1. Présentations De La Méthode Des Eléments Finis MEF .....	51
III.5.4.2. Etude Et Développements De La Méthode Des Eléments Finis MEF .....	52
III.5.4.2.1. Discrétisation Du Domaine .....	52
III.5.4.2.2. Type De Maillage Utilisé .....	53
III.5.4.2.3. Sélection Des Fonctions D'interpolation .....	54
III.5.4.2.3.1. Fonctions D'interpolation D'un Triangle à Trois Nœuds .....	54
III.5.4.2.4. Formulation Du Système D'équation .....	55
III.5.4.2.4.1. Méthode De Galèrkine .....	56
III.5.4.2.4.2. Forme Matricielle Elémentaire .....	57
III.5.4.2.5. Résolution Du Système .....	58
III.6. Calcul de l'impédance .....	58
III.7. Conclusion .....	59

---

<b>Chapitre Quatre : Validations et discussions des résultats</b>	
IV.1. Introduction .....	60
IV.2. Modèle géométrique et description .....	60
IV.3. Modèle géométrique .....	61
IV.4. Description sur le logiciel utilise .....	61
IV.5. Déroulement de la simulation 3D avec COMSOL Multiphysics .....	62
IV.5.1. Création du domaine de travail .....	62
IV.5.2. Caractéristiques géométriques et physiques .....	63
IV.5.3. Maillage .....	63
IV.6. Simulation du CND par CF .....	65
IV.6.1. Résultats de simulation pour défauts conducteurs .....	65
III.6.1.1. Cartographie des courants induits .....	65
IV.7. Paramètres influents sur CND-CF pour défaut fin .....	66
III.7.1. Effet de la fréquence .....	67
IV.7.2. Effet de la variation du Lift-Off .....	68
III.7.3. Effet de variation de la profondeur du défaut .....	69
III.7.4. Effet de la conductivité .....	70
III.8. Conclusion .....	71
<b>Conclusion Générale</b> .....	72
<b>Références et Bibliographiques</b> .....	74

# Liste des Figures

## Chapitre Un : Etat de l'art sur les différentes techniques de contrôle

### Non destructif

Fig. I.1.	Schéma synoptique d'un système de CND .....	7
Fig. I.2.	Exemples de contrôle visuel .....	8
Fig. I.3.	Inspection par ressuage .....	9
Fig. I.4.	Théorie de l'opération Impact-Echo .....	10
Fig. I.5.	Inspection par radiographie .....	12
Fig. I.6.	Inspection par magnétoscopie .....	13
Fig. I.7.	Distributions du champ magnétique et température .....	14
Fig. I.8.	Inspection par thermo-inductive .....	15
Fig. I.9.	Inspection par thermographie .....	17
Fig. I.10.	Inspection par Courants de Foucault .....	18

## Chapitre Deux : Capteurs utilisés dans le domaine de Contrôle

### Non Destructif

Fig. II.1.	Principe d'un capteur .....	21
Fig. II.2.	Principe des capteurs inductifs .....	23
Fig. II.3.	Variation de l'impédance lors de l'apparition d'un défaut .....	25
Fig. II.4.	Profondeur de pénétration .....	26
Fig. II.5.	Bobines réelles .....	27
Fig. II.6.	Exemples de différentes géométries de circuit magnétique .....	28
Fig. II.7.	Fonctions d'un capteur .....	29
Fig. II.8.	Contrôle en mode absolu .....	29
Fig. II.9.	Contrôle en mode différentiel .....	30
Fig. II.10.	Capteurs encerclants .....	31
Fig. II.11.	Capteurs internes .....	32
Fig. II.12.	Capteur sonde .....	33
Fig. II.13.	Sonde rotative .....	34
Fig. II.14.	Sonde à bobines perpendiculaires .....	34
Fig. II.8.	Représentation des différents modes d'excitation .....	37

**Chapitre trois : Modélisation par élément finis 3D d'un capteur à courants de Foucault en mode absolu**

Fig. III.1.	Schéma de principe du contrôle non destructif par courants de Foucault...	39
Fig. III.2.	Chemin des courants de Foucault .....	40
Fig. III.3.	Système capteur-fissure .....	40
Fig. III.4.	Problème magnétodynamique type .....	41
Fig. III.5.	Interface entre deux milieux .....	43
Fig. III.6.	Les Eléments De Base .....	52
Fig. III.7.	Type D'éléments Utilisés .....	53
Fig.III.8.	Découpage En Eléments Finis Du Domaine $\Omega$ .....	53
Fig.III.9.	Elément Réel .....	54

**Chapitre Quatre : Validations et discussions des résultats**

Fig. IV.1.	Géométrie du dispositif à modéliser .....	61
Fig. IV.2.	Domaine de travail sous COMSOL Multiphysics .....	63
Fig. IV.3.	Maillage de plaque à tester sous COMSOL Multiphysics .....	64
Fig. IV.4.	Cartographies de la densité des courants induits .....	66
Fig. IV.5.	Effet de la variation de la fréquence sur $\Delta R$ et $\Delta X$ .....	67
Fig. IV.6.	Effet de la variation de Lift-Off sur $\Delta R$ et $\Delta X$ .....	68
Fig. IV.7.	Effet de la variation de la profondeur du défaut sur $\Delta R$ et $\Delta X$ .....	69
Fig. IV.8.	Effet de la variation de la conductivité sur $\Delta R$ et $\Delta X$ .....	70

# Liste des Tableaux

## Chapitre Un : Etat de l'art sur les différentes techniques de contrôle

### Non destructif

Tableau I.1.	Comparaison des procédés de CND les plus connus .....	19
Tableau I.2.	Comparaison des performances des principaux procédés de CND .....	20

## Chapitre Deux : Capteurs utilisés dans le domaine de Contrôle

### Non Destructif

Tableau II.1.	Différents domaines d'application des capteurs .....	23
Tableau II.2.	Capteurs plus utilisés en CND .....	36

## Chapitre trois : Modélisation par élément finis 3D d'un capteur à courants de

### Foucault en mode absolu

Tableau III.1.	Comparaison entre les formulations les plus utilisées dans le CND-CF....	49
----------------	--	----

## Chapitre Quatre : Validations et discussions des résultats

Tableau IV.1.	Paramètres géométriques et physiques du système à modéliser .....	63
---------------	---	----

# Notations et Symboles

## Acronymes

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CCF	Capteur par Courants de Foucault.
CF	Courants de Foucault
CND	Contrôle Non Destructif
CND-CF	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
MEF	Méthode des Éléments Finis
END	Essai Non Destructif / Examens Non Destructif
TP	Thermographie Pulsée
TM	Thermographie Modulée
TPP	Thermographie de Phase Pulsée
EM	Etendue de Mesure
ARQS	Approximation des Régimes Quasi Stationnaires
EDP	Equation aux Dérivées Partielles
EDO	Equation aux Dérivées Ordinaires
EAD	Equation Algébro-Différentiels
r1	Rayon extérieur de la bobine
r2	Rayon intérieur de la bobine

## Symboles

$\vec{E}$	Champ électrique	[V/m]
$\vec{H}$	Champ magnétique	[A/m]
$\vec{B}$	Induction magnétique	[T]
$\vec{B}_r$	Induction magnétique rémanente	[T]
$\vec{D}$	Induction électrique	[C/m <sup>2</sup> ]
$\vec{j}$	Densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
$\vec{j}_{sur}$	la densité surfacique de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
$\vec{j}_s$	Densité du courant en surface.	[A/m <sup>2</sup> ]
$\vec{T}$	Potentiel vecteur électrique	[A/m]

$\vec{A}$	Potentiel vecteur magnétique	[Wb/m]
$v$	Potentiel scalaire électrique	[V]
$\phi$	Potentiel scalaire magnétique	[A]
R	Résistance électrique	[ $\Omega$ ]
X	Réactance	[ $\Omega$ ]
Z	Impédance	[ $\Omega$ ]
$\Delta R$	variation de la résistance	[ $\Omega$ ]
$\Delta X$	variation de la réactance	[ $\Omega$ ]
$\mu$	Perméabilité magnétique	[H/m]
$\sigma$	Conductivité électrique	[S/m]
$\varepsilon$	Permittivité électrique	[F/m]
$\delta$	Épaisseur de peau	[m]
$\varepsilon_0$	Permittivité électrique absolue du vide	$36\pi 10^{-9}$ [F/m]
$\varepsilon_r$	Permittivité électrique relative	
$\mu_0$	Perméabilité magnétique absolue du vide	$4\pi 10^{-7}$ [H/m]
$\mu_r$	Perméabilité magnétique relative	
$\rho$	Résistivité électrique	[ $\Omega.m$ ]
$\omega$	Pulsation électrique	[rad/s]
$f$	Fréquence	[Hz]
$\Gamma$	Frontière du milieu	
$n$	Nombre de nœuds dans l'élément choisi	
$\alpha_i(x, y)$	Fonction d'interpolation	
$f_i$	Valeur de l'inconnue au nœud $i$	
$\Delta^e$	Représente l'aire de l'élément « e »	
$\Delta$	l'opérateur différentiel	
$F$	la fonction inconnue à déterminer	
$g$	la fonction de forçage	
$\Psi_i$	les fonctions de projection	

***Introduction***

***Générale***

# **Introduction Générale**

*Les méthodes de CND sont pour la plupart fondées sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique dépendant des propriétés constitutives ou géométriques du matériau et éventuellement perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité (défaut). Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même du contrôle envisagé, les plus répandues sont : les ultrasons, les rayons ionisants (X ou gamma), le ressuage, la thermographie et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault), [4, 21, 22, 23].*

*Dans le domaine du contrôle de pièces métalliques, la technique des courants de Foucault est l'une des plus anciennes. Dès 1926 les premiers appareils de mesure d'épaisseur apparaissent. Ces techniques se sont développées essentiellement de manière expérimentale. Les bases techniques et pratiques du contrôle ont été établies durant les années 1950 et 1960, correspondant au développement des techniques nucléaires, [24].*

*Comme le capteur et son conditionneur sont les premiers éléments de la chaîne de mesure lors d'un contrôle non destructif par courants de Foucault et qu'ils doivent refléter avec précision la variation de l'impédance « capteur-pièce » par un signal électrique. De plus, les performances de l'ensemble de la chaîne de contrôle dépendent la qualité de la conception du capteur et du choix du conditionneur, c'est dans ce cadre s'inscrit la problématique de ce travail.*

*Les objectifs fixés à travers ce travail est de faire, une recherche bibliographique des techniques de CND les plus utilisées, avoir un aperçu global sur les capteurs à courants de Foucault et leurs domaines d'applications, modélisation analytique de l'ensemble capteur-pièce ainsi qu'une étude des méthodes de résolution, conduisant au choix d'une approche. Ensuite, Élaboration d'un programme de calcul sous COMSOL Multiphysics pour la simulation de différentes applications.*

*Ce mémoire est structurée en quatre chapitres comme la suite :*

*Le premier chapitre présente la définition, le but du contrôle non destructif (CND), les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut ainsi que les bases physiques qui gouvernent les procédés et leurs performances. Egalement, sont exposées les différentes techniques de contrôle non destructif les plus en plus utilisées dans le secteur industriel, On terminera cette chapitre par un Tableau récapitulatif sur un synthèse comparative des techniques utilisées en CND.*

*Le second chapitre est consacré à donner quelques notions sur les capteurs (définition, principe, domaine d'application). Ensuite on passera en revue les différents types de capteurs à courants de Foucault, différentes formes géométriques des circuits magnétiques, modes d'excitation et on terminera par un Tableau récapitulatif sur les différents capteurs utilisés en CND.*

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

*Le dernier chapitre, nous commencerons par présenter la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique, puis nous donnerons une description des étapes de modélisation sous le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics, ceci sera suivie par une présentation des résultats de simulation pour les défauts conducteur, lors d'un CND-CF en mode absolu, une comparaison sera faite avec ceux des simulations manque de matière et enfin nous terminerons par la visualisation de l'effet des différents paramètres influent sur le contrôle, tels que la fréquence, la distance capteur-pièce "lift-off" et les caractéristiques géométriques du défaut.*

*Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués, les problèmes rencontrés et enfin les perspectives envisagées pour la continuité de ce travail.*

***Chapitre Un***  
***Etat de l'art sur les différentes***  
***techniques de contrôle Non destructif***

### ***1.1. Introduction***

Le contrôle Non Destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structure ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans la phase de maintenance. Les termes « Essais Non Destructif » (END) ou « Examens Non Destructifs » évoquent aussi le diagnostic que le médecin formule alors de l'examen de son patient. Le même principe appliqué aux pièces industrielles consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour apprécier sans destruction leur état de santé et formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées.

Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement, la définition de CND suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts, de leur évolution dans le temps, des lois générales de la mécanique de rupture et, dans la pratique, les spécialistes en Contrôle Non Destructif sont plutôt confortés à des problèmes d'interprétation de résultats de contrôle par rapport à des critères établis en liaison avec le concepteur de la pièce.

Une définition des contrôles non destructifs plus proche de la réalité industrielle consiste donc à dire qu'il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à normes de recette ». L'exécution de cette tâche demande une bonne connaissance des méthodes d'investigation mises en œuvre, de leur limites et surtout une adéquation parfaite entre le pouvoir de détection de chacune d'elle et les critères appliqués pour la mise en œuvre [1,2].

Les techniques utilisées dans le CND sont très variées, le choix d'une entre elle peut être conditionnée par un certain nombre de paramètres dont les principaux sont :

- ✓ La nature du matériau à contrôler (propriétés physique) ;
- ✓ L'information recherchée (détection, mesure, dimensionnement du défaut, ...) ;
- ✓ L'environnement du contrôle (nature des perturbations externes, ...) ;
- ✓ Le type de contrôle à effectuer (pièce mobile, possibilité de contact ou non, ...) ;
- ✓ Contraintes économiques [3] ;

## ***1.2. Généralités sur le Contrôle Non Destructif***

### ***1.2.1. Principe***

L'ensemble des techniques et procédés de CND apte à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif d'elles qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

Généralement on peut distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la technique d'inspection employée :

- ✓ Mise en œuvre d'un processus physique ;
- ✓ Modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- ✓ Détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- ✓ Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée [1].

### ***1.2.2. Champ d'application actuel***

A l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

Le champ d'application du CND est très vaste, il englobe, [4] :

- ✓ La détection et évaluation de défauts; la détection de fuite ;
- ✓ La mesure dimensionnelle ;

- ✓ La caractérisation d'une structure ou d'une microstructure ;
- ✓ L'estimation des propriétés mécaniques et physiques d'un matériau ;
- ✓ La mesure de contrainte; la détermination de la composition chimique d'un matériau.

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'applications se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même :

- ✓ Le contrôle en cours de fabrication;
- ✓ Le contrôle en recette;
- ✓ Le contrôle en service.

### ***1.2.3. Les différentes défauts détectés en (CND)***

Un défaut (défautuosité) détecter dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

#### ***1.2.3.1. Les défauts surfaciques***

Ces défauts sont accessibles à l'observateur directement mais pas toujours visibles à l'œil nu, à cet effet on peut les classés en deux types distincts :

##### ***➤ Les 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. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime ( de l'ordre de quelque  $\mu m$ ) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection des méthodes sensibles et non destructives, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons.

➤ **Les défauts d'aspect**

C'est à dire à des plages dans lesquelles une variation des paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche souvent à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

**1.2.3.2. Les défauts internes**

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge et la neutronographie.

**1.2.4. Procédure de CND**

L'opération de contrôle non destructif d'un objet ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen.

Ce sont des opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde, de traitement des données qui permettent d'atteindre ces objectifs désormais dans des bonnes conditions, grâce à l'apport intensif de l'informatique en temps réel, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND suivant le synoptique de la figure (I.1.).

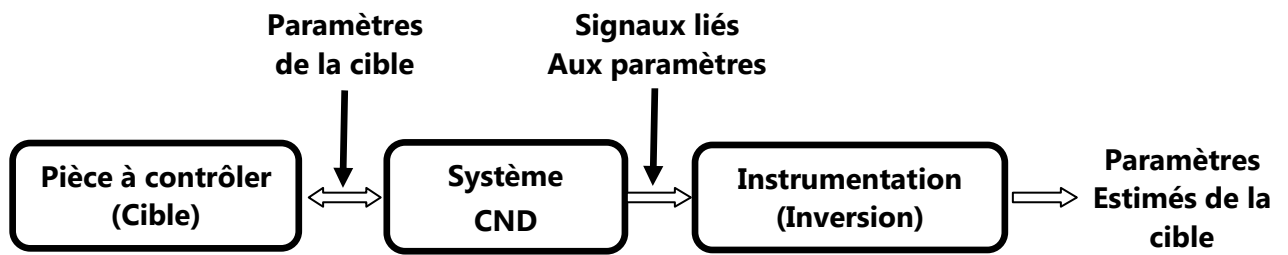


Fig. I.1. Schéma synoptique d'un système de CND

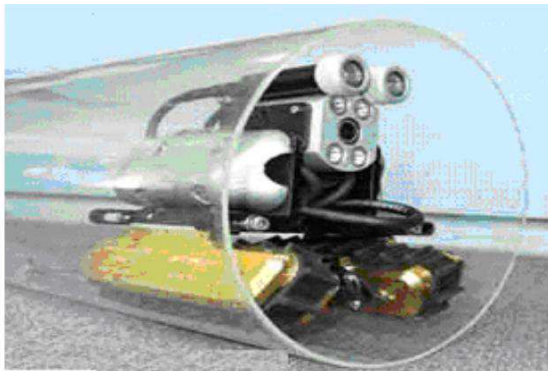
La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce [1, 2,5].

### ***1.3. Les techniques de contrôle non destructif***

Il existe plusieurs techniques de CND, peuvent être classées comme suit :

#### ***1.3.1. Examen visuel***

L'inspection visuelle est la plus ancienne procédure de contrôle, continu à développer dans une société américaine d'évaluation des méthodes de contrôle non destructif (ASNT). Cette procédure d'évaluation est la plus simple et générale. L'examen visuel nécessite un bon éclairage localisé sur les régions suspectes. Les résultats prospères ont dépendu de la compétence de l'opérateur, le bon nettoyage, illumination adéquate de la zone inspecté et la qualité de l'instrument optique. Ces facteurs sont encore importants aujourd'hui, mais le matériel est devenu beaucoup plus sophistiqué. Habituellement, l'inspection visuelle ne peut pas être utilisée pour vérifier des résultats de test, ni ce peut être utilisé pour remplacer d'autres méthodes de CND. Cependant, quand l'examen visuel direct ne peut pas être fait, les instruments optiques sophistiqués peuvent être utilisés pour fournir une inspection éloignée de régions critiques [1, 5].



a) Inspection robotisée d'un pipeline

b) Inspection du réacteur d'un avion

Fig. I.2. Exemples de contrôle visuel, [4]

➤ Avantages

- ✓ Examen simple, rapide et pas coûteux ;
- ✓ Souplesse d'inspection.

➤ Inconvénients

- ✓ Détection limitée aux défauts superficiels ;
- ✓ La surface doit être propre ;
- ✓ Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

### ***1.3.2. Ressuage***

La méthode « huile et poussière de craie », autrefois utilisée par les industries ferroviaires dans les années 1920. Le contrôle par liquide de pénétration (ressuage) a été ranimé en 1941 par Robert et Joseph Switzer. Le ressuage est un moyen de recherche des défauts superficiels qui consiste l'amélioration de l'inspection visuelle de défektivité. Il consiste à l'aspiration du pénétrant par la couche poudreuse du révélateur, le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux quatre phases illustrées sur la figure (I.3) : application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. L'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminosité [1, 5,6,10].

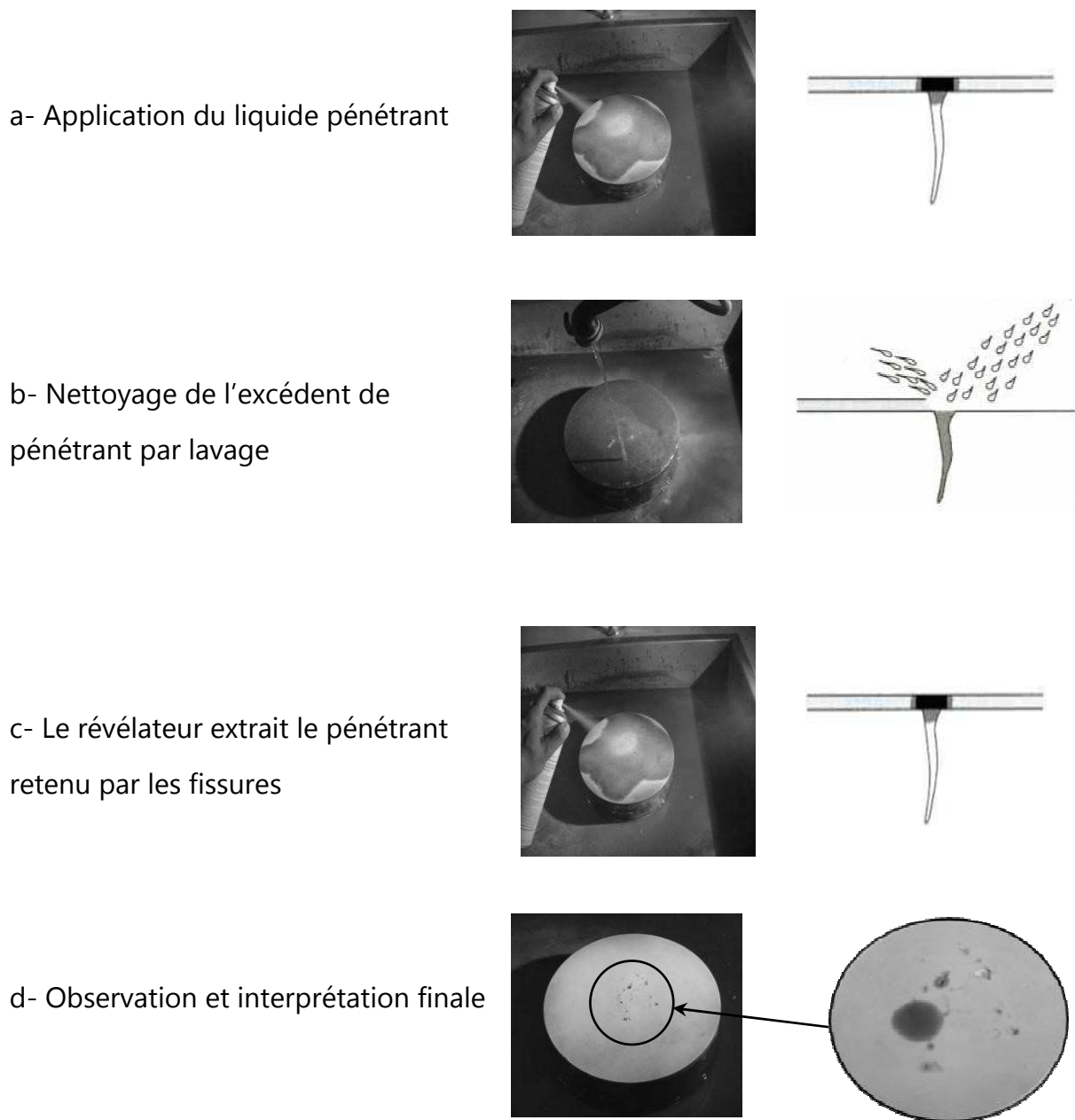


Fig. I.3. Inspection par ressuage

➤ Avantages

- ✓ Facilité de mise en œuvre et relativement sensible aux fissures débouchants ;
- ✓ Appliqué sur les matériaux diélectriques et non ferromagnétique.

➤ Inconvénients

- ✓ Limite de l'application sur les matériaux non poreux ;
- ✓ L'interprétation des résultats est subjective : Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts ;
- ✓ Danger des solvants toxiques, corrosifs et inflammable.

### 1.3.3. Essais ultrasonores

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel présentant une certaine élasticité. Les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15kHz à plus de 100MHz. L'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler figure (I.4). 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'un émetteur/récepteur. L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut [1,8,10].

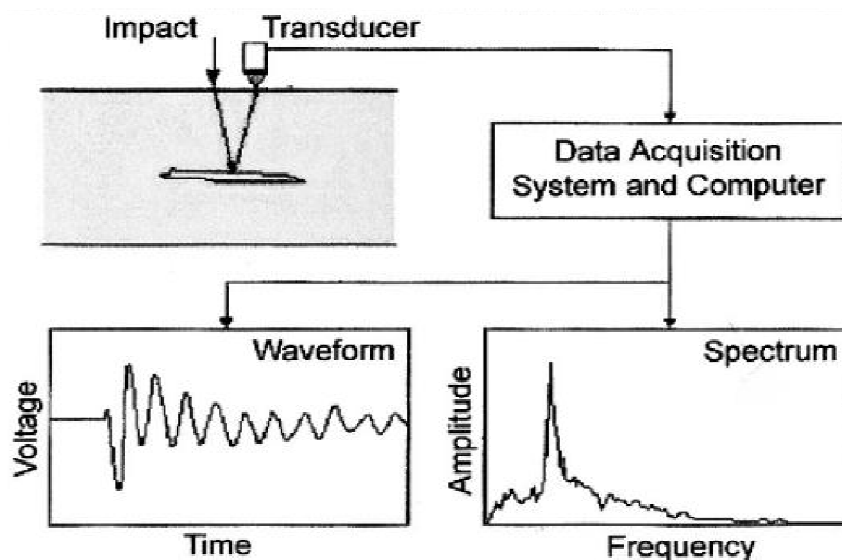


Fig. I.4. Théorie de l'opération Impact-Echo

#### ➤ Avantages

- ✓ Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge) ;
- ✓ Haute sensibilité de détection de défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore) ;
- ✓ Détection, localisation et dimensionnement des défauts ;
- ✓ Inspection et détection en temps réel.

#### ➤ Inconvénients

- ✓ Sensible à la nature et à l'orientation des défauts ;
- ✓ Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle) ;
- ✓ Inspection limitée par la complexité de la forme de la pièce contrôlée.

### ***1.3.4. Contrôle par Laser***

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en contrôle non destructif. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Le mot laser est un acronyme pour amplification légère de la radiation de l'émission stimulée. Cette lumière est très intense, essentiellement monochromatique (longueur d'onde unique), plan polarisé (unidirectionnel) et très stable. Les méthodes de contrôle non destructif par laser sont populaires dans les industries aéronautique et automobile [1,2].

➤ Avantages

- ✓ Inspection sans contact, ne nécessite pas la préparation de surface de la pièce à contrôler ;
- ✓ Pas de consommables : liquide de pénétration, matériaux de marquage, ...etc. ;
- ✓ Avec les capteurs électro-optiques comme les caméras CCD, des mesures en temps réel sont possibles.

➤ Inconvénients

- ✓ Une composante de chargement est nécessaire pour voir les résultats ;
- ✓ Les résultats dépendent de la composante de cisaillement ;
- ✓ L'interprétation des résultats est subjective.

### ***1.3.5. Radiographie***

L'examen d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique (rayons X ou  $\gamma$ ) de très courte longueur d'onde comprises entre environ 0,1pm et 1000pm, et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure (I.5.).

On caractérise couramment ces rayonnements par l'énergie unitaire, cette dernière requise en contrôle non destructif se situe dans une gamme allant de 50keV à 20meV. L'interaction entre les rayons X ou  $\gamma$  et la matière implique les phénomènes suivants :

- un effet photoélectrique, correspondant à un transfert complet d'énergie entre le photon incident et un électron, conduisant à son absorption totale et

éventuellement à une réémission de fluorescence X. Cet effet est d'autant plus grand que l'énergie des photons est basse.

- L'effet Compton, correspondant à un transfert partiel d'énergie du photon vers un électron ; les photons sont déviés, alors que les électrons activés provoquent une émission secondaire ; cette diffusion Compton devient prépondérante, vers 1meV, vis-à-vis de l'effet photoélectrique et constitue le phénomène prédominant en radiographie industrielle ;

Ces trois phénomènes d'interaction expliquent d'une part l'absorption des rayons X et  $\gamma$  par la matière, mais aussi un phénomène de diffusion dû aux réémissions d'ondes de plus basse énergie que l'onde incidente. Ce dernier phénomène est très gênant en radiographie, alors que l'on met en œuvre le premier pour détecter et visualiser les défauts.

Dans la pratique, le choix entre radiographie X ou gammagraphie résulte de multiples considérations liées aux avantages et inconvénients de chacune de ces techniques, comme par exemple : taille et coût modeste des sources  $\gamma$ , forte pénétration de ces rayonnements mais durée d'exposition beaucoup plus longue qu'en radiographie X qui elle, par contre, nécessite la présence d'une source électrique mais offre l'avantage de pouvoir choisir plus aisément les paramètres de contrôle [1, 2,3].

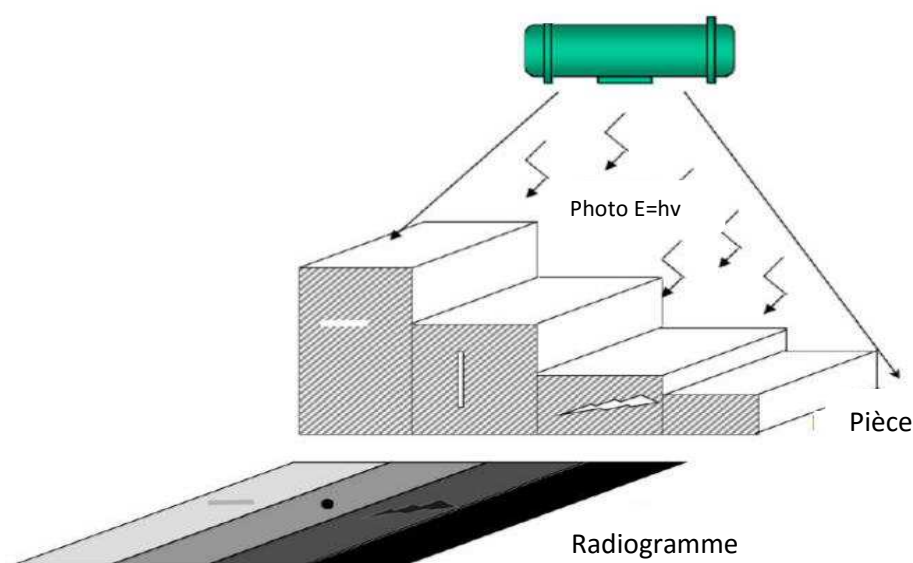


Fig. I.5. Inspection par radiographie

- Avantages
  - ✓ Contrôle des objets de forme compliquée ;
  - ✓ Facile à Transporté (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radioactive portatifs) ;
  - ✓ Apprécier la nature et la taille des défauts.
- Inconvénients
  - ✓ L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur ;
  - ✓ Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel ;
  - ✓ Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité ;
  - ✓ Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.

### I.3.6. Magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie [1,5,10] fait appel aux propriétés magnétiques du matériau inspecté. L'effet de dispersion du flux de fuite peut être mis en évidence en aspergeant la surface contrôlée d'une liqueur magnétique constituée de très fines particules ferromagnétiques et d'un liquide porteur (poudre de fer ou de magnétite colorée). Les particules noires ou fluorescentes viennent s'agglomérer sur le champ de fuite, à l'endroit du défaut, le rendant ainsi parfaitement visible, comme l'illustre la figure (I.6.).

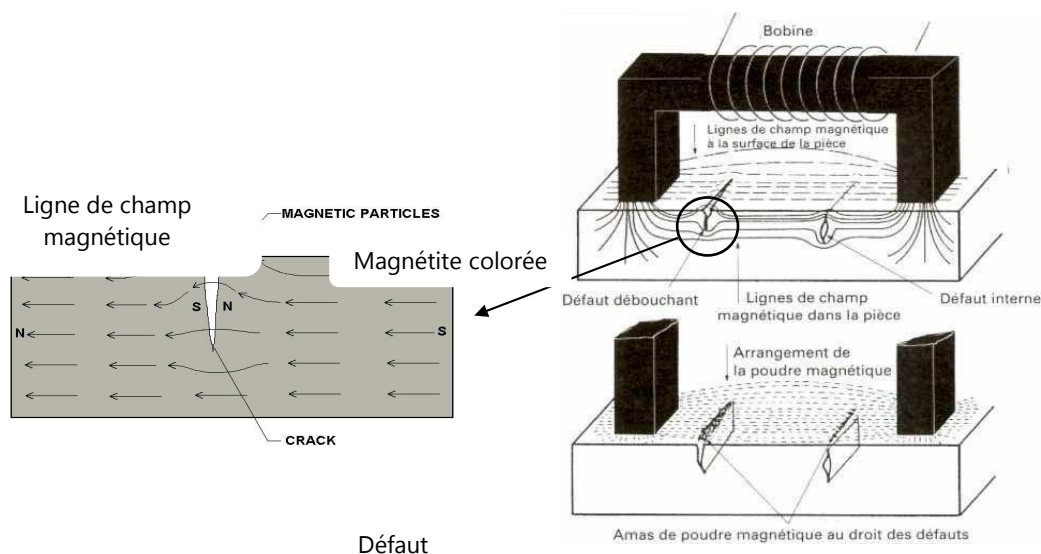


Fig. I.6. Inspection par magnétoscopie

- Avantages
  - ✓ Simple, peu coûteux et rapide ;
  - ✓ Détection des défauts débouchant et sous-jacents.
- Inconvénients
  - ✓ Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques ;
  - ✓ Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée ;
  - ✓ La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce.

### 1.3.7. Thermo-inductive

Ce mode d'examen consiste, à chauffer la zone d'une pièce électriquement conductrice inspectée par induction magnétique. En cas de présence d'un défaut, l'anomalie dans la distribution de la densité de courants induits, crée une concentration de la densité de puissance autour du défaut qui se traduit par des surchauffes locales. L'inhomogénéité de la distribution de la température se propage à la surface du matériau, et peut être détectée par une caméra infrarouge, figure (I.7).

Donc un défaut sera révélé par la combinaison des phénomènes électromagnétique et thermique d'une façon complémentaire.

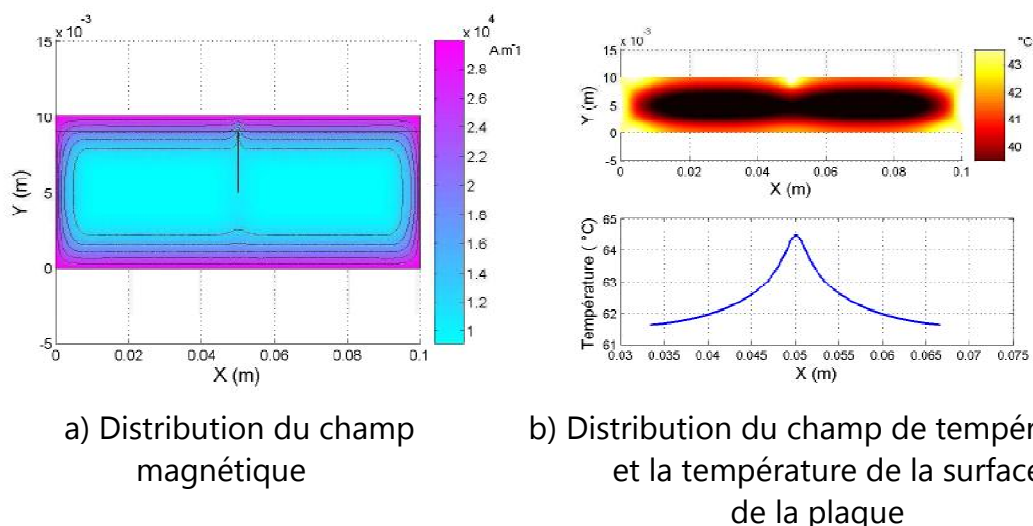


Fig. I.7. Distributions du champ magnétique et température

L'intérêt de cette méthode est d'augmenter la probabilité de détection des défauts de surface et d'améliorer l'interprétation des données par une corrélation des résultats

obtenus avec les deux méthodes du CND : par courant de Foucault et par thermographie infrarouge. Elle présente l'avantage de créer une perturbation supplémentaire due à la concentration des courants induits autour du défaut, où une pièce de forme d'une plaque a été inspectée, figure (I.8).

La présence du défaut perturbe les lignes de courants induits et crée des surchauffes supplémentaires qui s'ajoutent au retour de l'onde thermique à la surface après la stimulation thermique. Cela engendre une élévation de température à la surface au-dessus du défaut. La technique thermo-inductive permet également de contrôler facilement la puissance induite, de chauffer à la surface ou au cœur et de s'adapter aux différentes géométries des pièces inspectées et des défauts rencontrés [1,10].

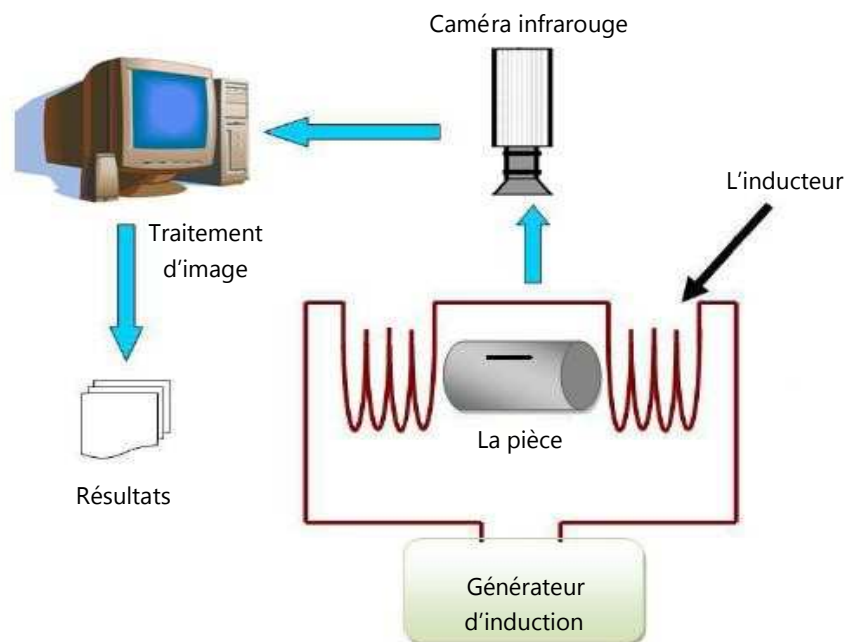


Fig. I.8. Inspection par thermo-inductive

➤ Avantages

- ✓ Méthode relativement rapide et sans contact ;
- ✓ La technique est globale et elle permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois ;
- ✓ Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- ✓ Grande sensibilité de détection des défauts ;
- ✓ L'automatisation est possible pour des pièces de géométries constantes.

- Inconvénients
- ✓ La technique s'applique seulement pour les matériaux électriquement conducteurs ;
- ✓ Sensible au chauffage non uniforme ;
- ✓ L'interprétation des mesures n'est pas toujours facile, surtout pour identifier la nature des défauts.

### ***1.3.8. Thermographie***

Cette technique consiste à chauffer la surface du matériau inspecté par apport d'énergie (mécanique, air chaud, lampes flash) et à mesurer l'élévation de température résultante avec une caméra infrarouge. L'inspection en thermographie infrarouge peut se faire selon deux approches : la thermographie active et passive. Dans les deux cas, l'investigation consiste à détecter la présence d'un gradient de température qui révèle la présence d'un défaut, gradient qui peut-être provoqué soit par une hausse ou une baisse de température. En thermographie active, le processus de détection nécessite l'apport d'une stimulation thermique extérieure afin de provoquer l'apparition d'un gradient. Par opposition, la thermographie passive n'utilise pas de stimulation extérieure, l'objet ou le défaut à détecter générant un gradient thermique naturellement. L'approche active comporte principalement trois volets : la stimulation thermique du spécimen, l'acquisition temporelle de la réponse thermique et l'analyse numérique de la réponse, figure (I.9). Les techniques d'inspection par thermographie infrarouge ont été développées et continuent d'être améliorées dans le domaine de la thermographie active. Les trois principales technique sont la thermographie pulsée (TP), elle consiste à générer une impulsion thermique de courte durée. La thermographie modulée (TM) en régime permanent thermique, la température de la surface varie périodiquement avec un module et un déphasage distinct entre les zones saines et les zones défectueuses et la thermographie de phase pulsée (TPP), combinaison entre les deux précédentes technique [1,3,10].

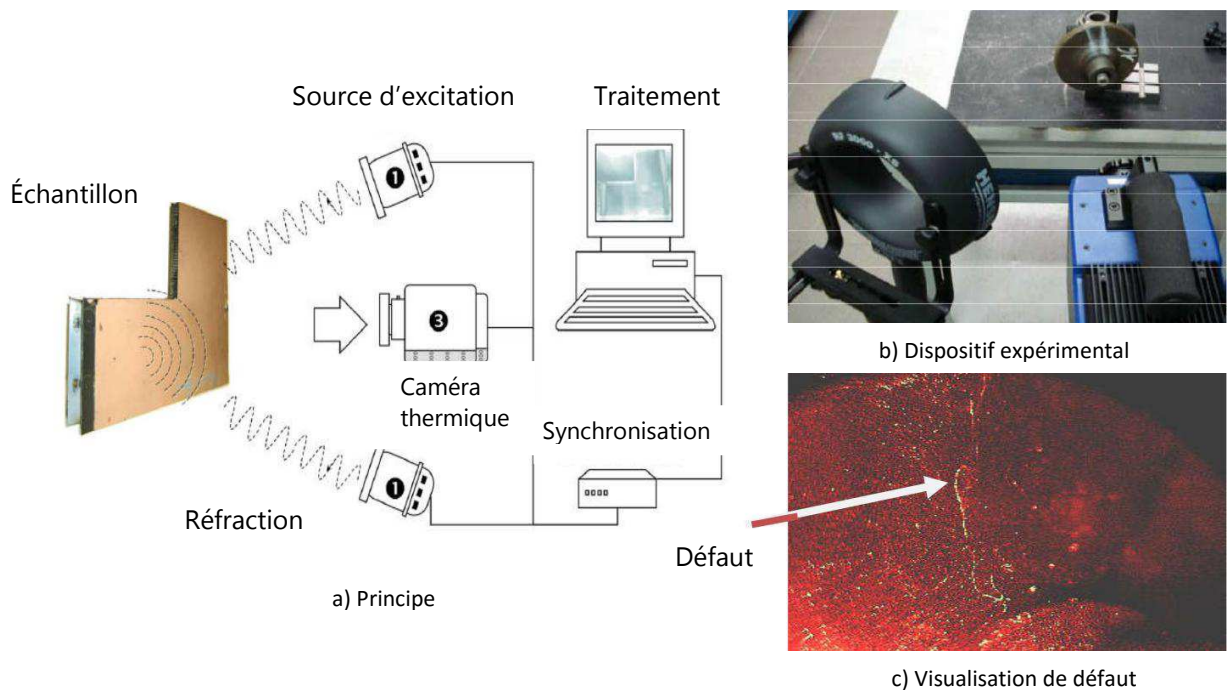


Fig. I.9. Inspection par thermographie

➤ Avantages

- ✓ Méthode relativement rapide et sans contact ;
- ✓ Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- ✓ Les cavités (champs de bulles d'air, fissures, délaminages, ...) sont bien détectées ;
- ✓ La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;

➤ Inconvénients

- ✓ Des difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs ;
- ✓ Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts, du fait que l'image obtenue donne une projection de ces derniers sur le plan de la pièce testée ;

### I.3.9. Courants de Foucault

Les courants de Foucault ce sont des courants induits développés en circuit fermé à l'intérieur d'un objet conducteur placé dans un champ magnétique variable dans le temps. L'examen par les courants de Foucault est basé sur le fait que si une bobine est alimentée par un courant variable et apportée à proximité d'une cible conductrice, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifie ainsi l'impédance de cette bobine. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation [1,3,5,8,10]. La figure (I.10) représente le procédé de l'inspection par courants de Foucault.

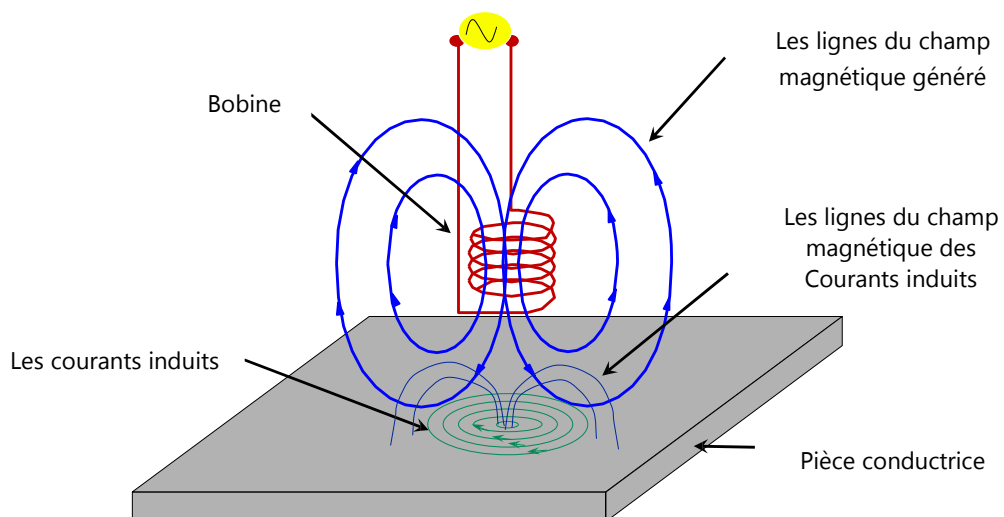


Fig. I.10. Inspection par Courants de Foucault

### I.4. Synthèse comparative des techniques utilisées en CND

Le Tableau (I.1.) donne un aperçu global des différents procédés les plus utilisés en CND, il englobe le principe physique, les défauts détectés, les domaines d'applications et enfin les principaux avantages et inconvénients.

Procédé	Principe physique	Défauts détectés	Domaines d'applications	Principaux avantages	Principaux inconvénients
<b>Visual</b>	Vision direct ou assistée des défauts	Détection des défauts superficiels et aspect	Contrôle industriel en ligne, bandes de tôle, verre, plastique ou produit en grande série	Simple et il peut être assisté par un réseau de caméra, point commun avec d'autre procédé	Limitation de la vision humaine, l'assistance des caméras pour les productions en grande série est obligatoire
<b>Ressuage</b>	Imprégnation nettoyage de surface, application d'un révélateur	Détection de défauts superficiels	Applicable à tous les matériaux non poreux et ne présentant pas une trop grande rugosité	Simple à mettre en œuvre, application globale aux pièces, complété par la détection visuelle	Examen lent, d'où coût élevé, précaution d'hygiène à l'emploi des produits émulsifs
<b>Ultrasons</b>	Perturbation d'une onde Echographie	Défauts internes Défauts débouchants	Tous les matériaux, même en domaine médical	Inspection en profondeur, résultats immédiats	Coûteuse, difficile pour les très petites pièces
<b>Radiographie</b>	Atténuation d'un flux de rayons X ou Y	Défauts internes	Tous les matériaux	Fiabilité, profondeur importante d'examen, résultats archivables	Protection du personnel, coût élevé, interprétation difficile
<b>Courant de Foucault</b>	Perturbation des courant induits	Défauts débouchants ou sous cutanés	Applicable aux matériaux conducteurs et ferromagnétiques	Sensible, sans contact, automatisation facile même à température élevée	Valable uniquement aux matériaux conducteurs

Tableau I.1. Comparaison des procédés de CND les plus connus

Ces techniques sont parfois difficilement comparables car elles répondent à un cahier des charges ou à des mises en œuvre particulières. Mais leurs performances respectives peuvent éventuellement être évaluées voire comparées à l'aide des critères tels que: le coût, la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité. Le Tableau (I.2.) présente un simple comparatif des principales techniques de CND, [9,10].

Procédé	Coût	Durée de contrôle	Reproductibilité	Sensibilité	Contraintes
<b>Thermographie</b>	Plus cher	Longue	Facile	Sensible	Lenteur du contrôle
<b>Ressuage</b>	Cher	Longue	Difficile	Moins Sensible	Toxicité
<b>Ultrasons</b>	Plus cher	Longue	Difficile	Très Sensible	Nécessite couplant
<b>Radiographie</b>	Trop cher	Longue	Facile	Moins Sensible	Rayon X
<b>Courants de Foucault</b>	Moins cher	Moins longue	Très facile	Sensible	Matériaux conducteurs

Tableau I.2. Comparaison des performances des principaux procédés de CND

#### ***1.4. Conclusion***

Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, le contrôle par laser, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la technique des courants de Foucault, la thermographie et enfin le procédé thermo-inductive. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients. C'est l'examen par les courants de Foucault qui constitue le sujet de ce travail. Le choix d'un tel contrôle est justifié par sa simplicité, réalisation pratique non coûteuse. Dans le deuxième chapitre, nous rappelons les notions de base sur les capteurs inductifs utilisés dans le domaine de contrôle non destructif.

# ***Chapitre Deux***

## ***Capteurs utilisés dans le domaine de Contrôle Non Destructif***

## II.1. Introduction

L'examen non destructif par capteurs inductifs est un procédé relativement répandu dans le secteur industriel. Les capteurs à courants de Foucault sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices notamment métalliques. De nos jours, la théorie des capteurs à courants de Foucault est déjà largement développée. Ils trouvent leurs applications dans divers domaines industriels qui vont de la mesure des propriétés de la matière, des mesures dimensionnelles jusqu'à la détection de défauts dans les pièces mécaniques [1].

Dans ce chapitre, on essaiera de donner le principe des capteurs inductifs. Ensuite on passera en revue sur les différents types de capteurs à courants de Foucault, les différentes formes géométries des circuits magnétiques, on terminera par les différents modes d'excitation.

## II.2. Définition d'un capteur

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

Description : La figure (II.1) donne le principe d'un capteur

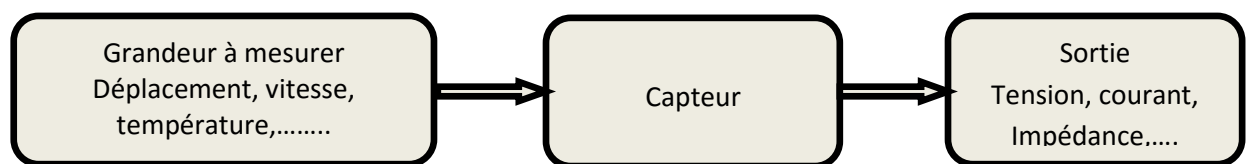


Fig. II.1. Principe d'un capteur

### II.2.1. Paramètres du capteur

Comme beaucoup de composants ou ensembles électroniques, il existe un certain nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs. Ils caractérisent les performances et donc leurs utilisations dans un environnement donné, [8].

**a) Précision**

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

**b) Sensibilité**

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

**c) Étendue de mesure**

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

**d) Linéarité**

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

**e) Fidélité**

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

**II.2.2. Critères de choix d'un capteur**

- **Conditions de fonctionnement**
  - ✓ Ambiance
  - ✓ Durée
  - ✓ Environnement.
- **Adaptation au problème posé**
  - ✓ Installation
  - ✓ Fiabilité
  - ✓ Maintenance.
- **Limites** physiques et Technologiques d'utilisation, [8].

**II.3. Principe des capteurs :**

Un capteur inductif est constitué d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps, génère des courants induits dans les objets métalliques apportés à proximité de ce capteur. Ces courants créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur modifient ainsi l'impédance du capteur. C'est l'analyse de cette variation

d'impédance qui fournira les indications exploitables pour le contrôle. En effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques des objets considérés, et bien entendu des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants induits, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation, comme l'illustre la figure (II.2), [1,3,5].

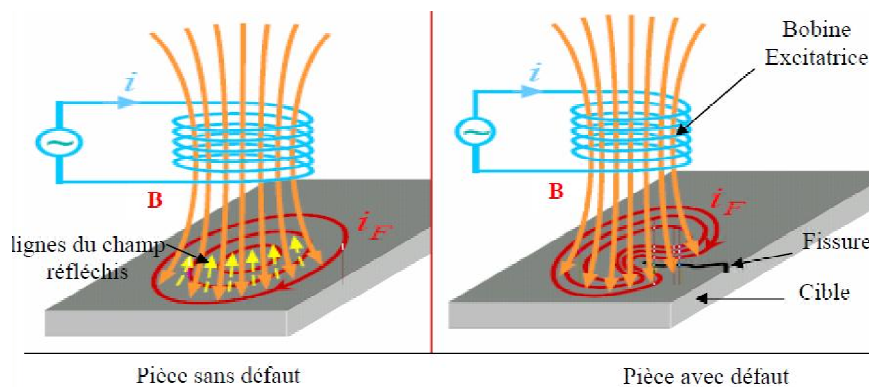


Fig. II.2. Principe des capteurs inductifs.

**II.4. Domaines d'utilisation des capteurs**

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

Tableau II.1. Différents domaines d'application des capteurs

### **II.5. Capteurs à courants de Foucault**

Les capteurs à courants de Foucault utilisent les propriétés conductrices de la cible en regard de laquelle est placé un circuit magnétique de grande perméabilité (en ferrite généralement) sur lequel est bobiné un enroulement d'excitation alimenté avec des fréquences élevées de manière à réduire l'épaisseur de peau. A l'approche du circuit magnétique, cette cible devient le siège de nappes de courants surfaciques (dits de *Foucault* ou encore désignés dans le monde anglo-saxon par *eddy-current* "courants tourbillonnants"), elles-mêmes génératrices d'un champ magnétique qui s'oppose au champ incident, [11].

La conjonction des deux sources de champ entraîne une nouvelle répartition des lignes de champ qui se traduit par une modification de la réluctance au niveau du capteur. La détection se fait, soit par la mesure de l'amplitude des oscillations, soit par celle du courant consommé par l'oscillateur due à la variation de la réluctance, soit encore par un bobinage secondaire qui recueille la force électromotrice créée par la variation de la réluctance, [9].

En contrôle par capteurs à courants de Foucault, c'est l'analyse de la variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, ce qui conduit à une modification du champ induit, lequel s'oppose à chaque instant au champ d'excitation (loi de Lenz). Conséquence, le courant traversant la bobine d'excitation varie. Autrement dit, l'impédance  $Z_0$  de la bobine est modifiée ( $Z_2 \neq Z_1 \neq Z_0$ ), Figure (II.3.).

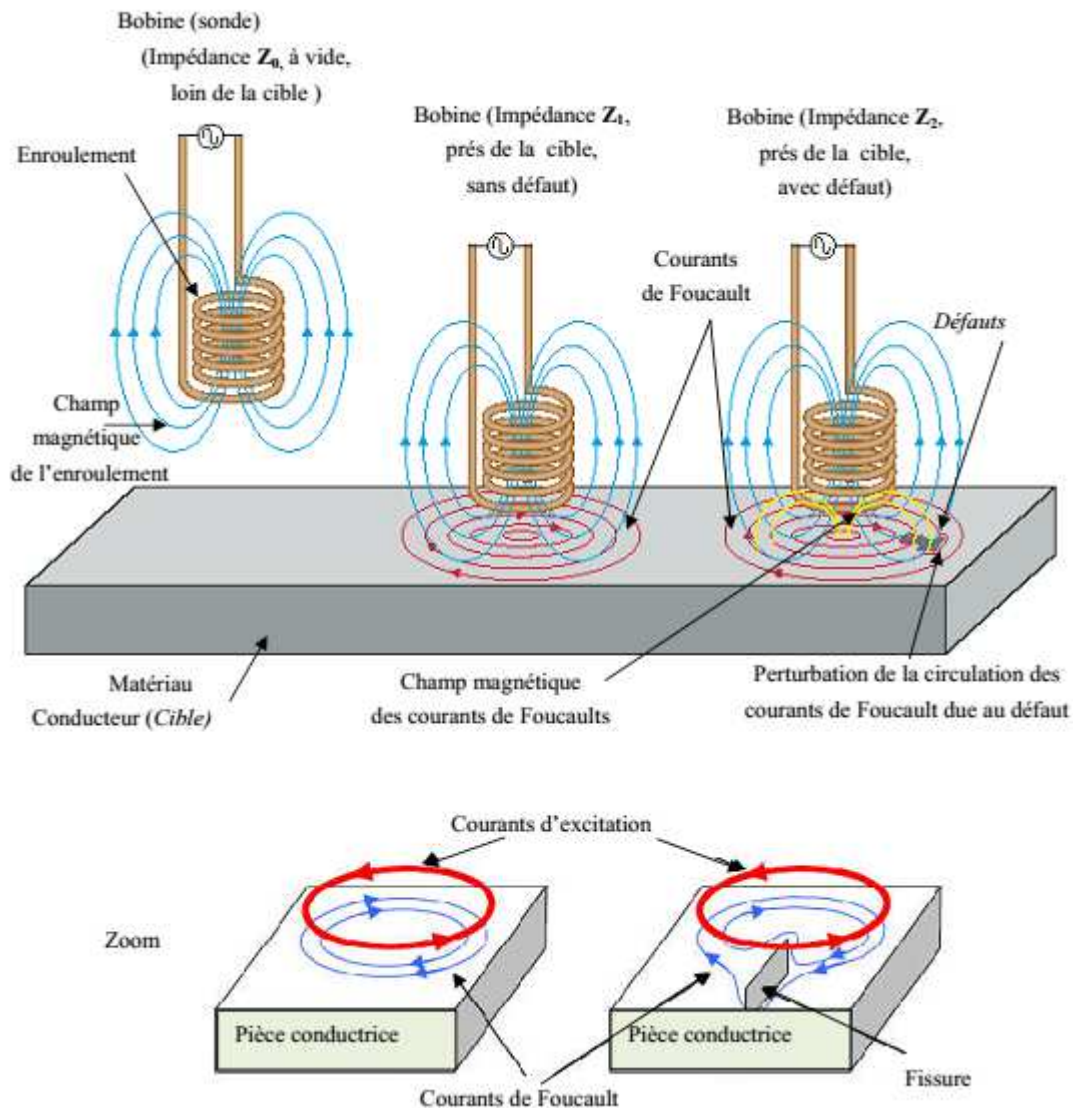


Fig. II.3. Variation de l'impédance lors de l'apparition d'un défaut.

**Remarque :** Il est à noter que les fissures parallèles aux courants de Foucault ne sont détectées car ils ne perturbent pas la trajectoire de ces courants.

### II.5.1. Profondeur de pénétration

Le principe des capteurs inductifs est surtout utilisé pour détecter des défauts situés à proximité de la surface de la pièce étudiée, car les courants de Foucault ont tendance à se cantonner dans les couches proches de la surface du conducteur. Cette épaisseur moyenne  $\delta$  (en m) dite de "peau" dans laquelle circulent les courants peut être estimée à l'aide de la formule :

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

Avec :  $\sigma$  : Conductivité électrique en S.m (Siemens - mètre).

$\mu$  : Perméabilité magnétique en H/m (Henry par mètre).

$f$  : Fréquence de travail ( $\omega = 2\pi f$  : pulsation) en Hz (Hertz).

La densité de courant décroît de façon exponentielle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface, Figure (II.4). On quantifie cet effet de peau par une profondeur de pénétration  $\delta$ , profondeur sous la surface pour laquelle la densité de courant de pénétration  $J_\delta$  est :

$$J_\delta = \frac{J_s}{e} \quad \text{II.2}$$

Où :  $J_s$  : Densité du courant en surface.

$e = 2,718$ , Base des logarithmes népériens.

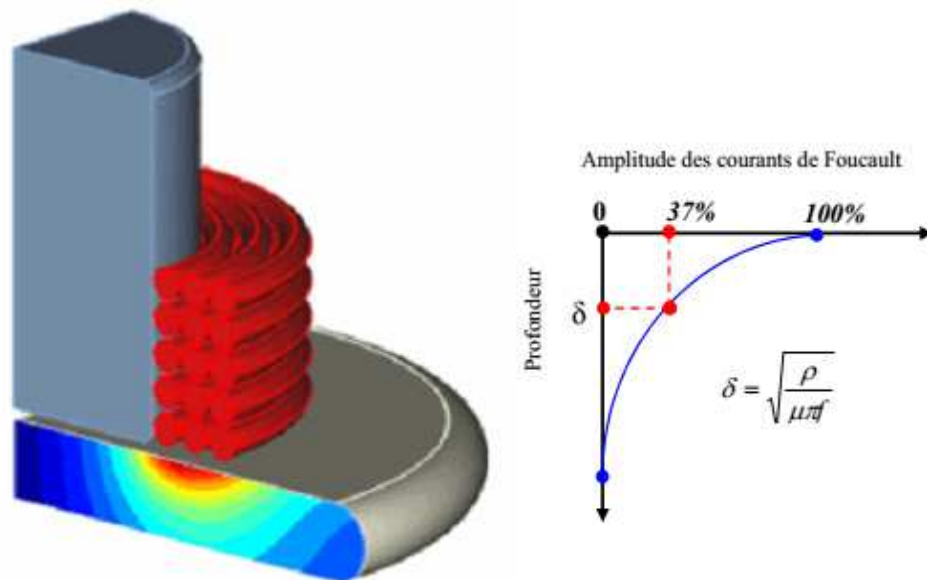


Fig. II.4. Profondeur de pénétration

Il en résulte qu'environ 63 % des courants induits passent entre la surface et cette profondeur  $\delta$ , créant une zone de forte sensibilité et qui est très importante du point de vue de la sensibilité aux interactions avec les défauts de surface, [9].

### II.5.2. Mise en œuvre du contrôle

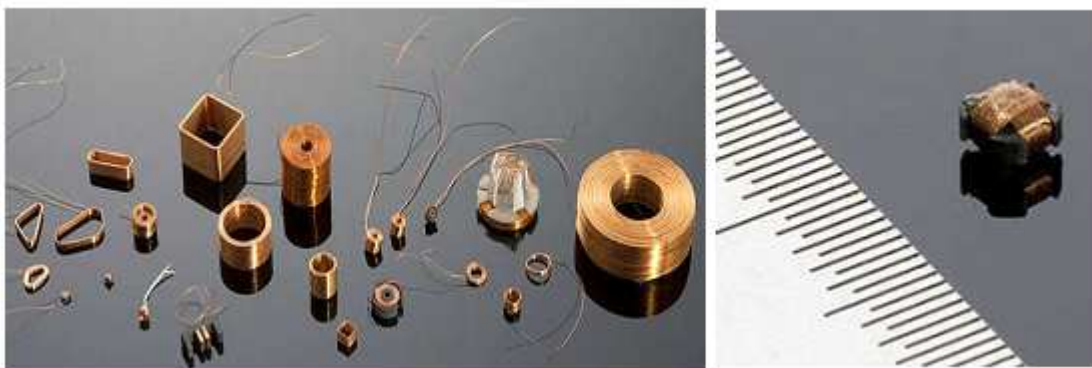
Dans les dispositifs du CND-CF, la topologie des courants de Foucault créés au sein d'une pièce est riche d'informations. Cependant, ces courants ne sont pas directement accessibles à la mesure. C'est par l'intermédiaire d'un capteur inductif constitué d'un inducteur ou un ensemble de bobines, que les informations nécessaires

au contrôle sont obtenues. En effet, la variation d'impédance ou la différence de potentiel aux bornes d'une bobine représente la quantité de flux magnétique créé et la puissance dissipées due à la présence des courants de Foucault dans la pièce à contrôler. La forme du capteur, sa position relative au matériau (lift-off), sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Dans ce contexte, on peut classer les capteurs suivant leurs caractéristiques :

- ✓ Structure
- ✓ Forme
- ✓ Fonction
- ✓ Mode de contrôle.

### **II.5.2.a. Montage des sondes**

Les sondes comporte des bobines avec ou sans noyau magnétique, Figure (II.5.) ce dernier est utilisé pour 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 tôle feuilletée à basse fréquence ou en ferrite pour les fréquences élevées. Son rôle est de canaliser les lignes de champ magnétique [9].



a) Bobines sans noyau magnétique

b) Bobine avec noyau magnétique (Ferrite)

Fig. II.5. Bobines réelles

La géométrie du circuit magnétique varie selon les applications et la Figure (II.6.) on montre quatre exemples, [9].

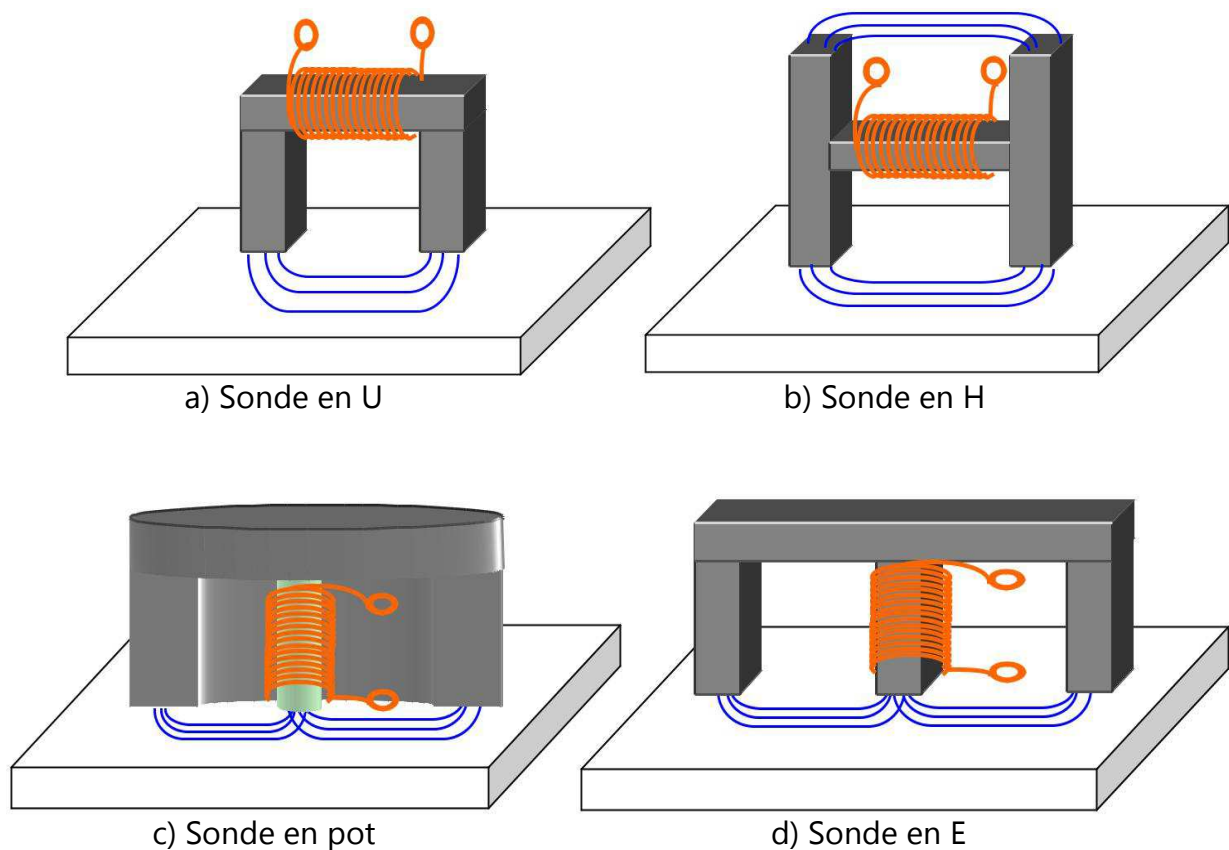


Fig. II.6. Exemples de différentes géométries de circuit magnétique

### II.5.2.b. Branchements électriques

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les montages de base à partir desquels d'autres montages peuvent être envisagés selon la nature du produit à contrôler. Selon leurs fonctions, il existe deux types de capteurs, Figure (II.7.) :

- ✓ Capteur à double fonction;
- ✓ Capteur à fonctions séparées.

#### ➤ **Capteur à double fonction**

Connu aussi sous le nom de systèmes à bobinage simple, est dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par le ou les mêmes enroulements. C'est le montage le plus simple, il est constitué d'une seule bobine émettrice réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa tension complexe.

#### ➤ **Capteur à fonctions séparées**

Connu aussi sous le nom de systèmes à bobinage double, dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par des enroulements distincts. A l'inverse du

premier, il est constitué de 2 bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications dues au matériau, c'est-à-dire qu'elle servira uniquement pour la mesure ; on parle alors de mesure par trans-impédance, [9].

Ces bobinages sont moulés dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle induction. Ce montage est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ( $f < 1000$  Hz) pour le contrôle de matériaux magnétiques (élimination de l'effet de variations de température), Figure (II.7.).

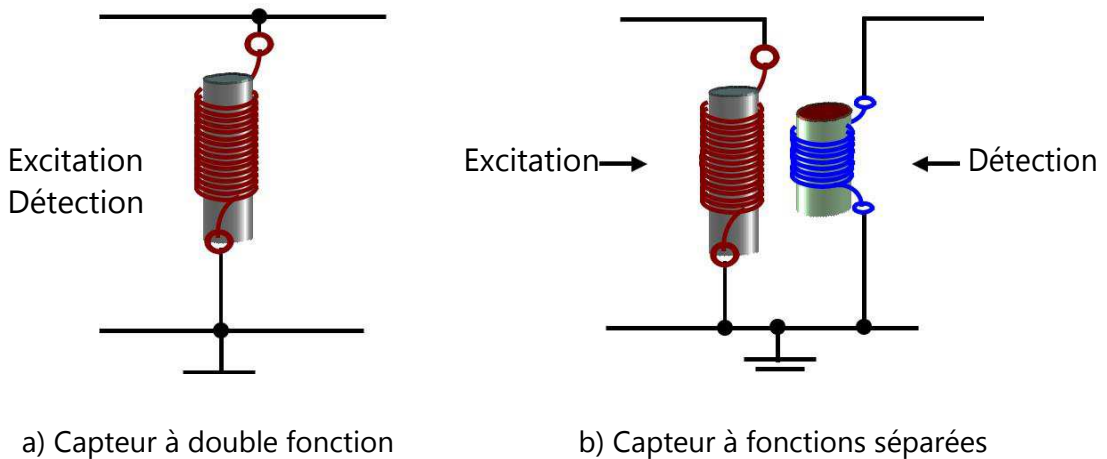


Fig. II.7. Fonctions d'un capteur

**II.5.2.c. Mode de contrôle**

Le mode de contrôle peut se faire en mode absolu ou différentiel.

➤ **Mode absolu**

Un capteur en mode absolu permet d'accéder à toutes les grandeurs utiles et également perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique  $\mu$  et la conductivité électrique  $\sigma$  du matériau à tester), Figure (II.8.), [12].

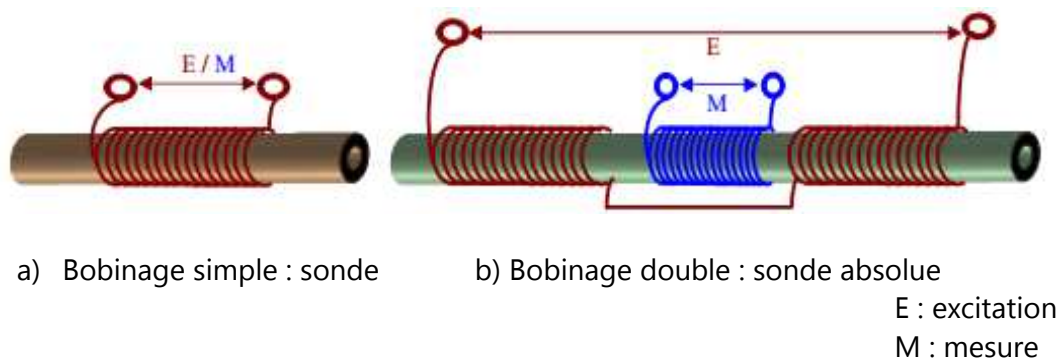


Fig. II.8. Contrôle en mode absolu

### ➤ Mode différentiel

Un capteur en mode différentiel est un capteur destiné à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines, [13]. La bobine de réception comporte deux enroulements montés en opposition. Dans de nombreux cas de contrôle, il est très difficile de neutraliser les effets perturbateurs qui brouillent les signaux de défauts, tels que les variations locales du *lift-off* ou de la perméabilité magnétique par exemple. Une solution élégante pour contourner cette difficulté inhérente à l'emploi d'une bobine unique est d'utiliser un capteur constitué de deux bobines identiques placées côte à côte et montées en différentiel électrique, de telle façon que les variations locales de propriétés électromagnétiques aient tendance à affecter les deux sondes et ne créent pas de déséquilibre, alors qu'un défaut unitaire affectera une bobine à la fois et pourra être détecté grâce au double signal de déséquilibre ainsi engendré (détection de défauts par asymétrie trié). La Figure (II.9.) présente un montage différentiel pour le contrôle d'une barre pour un bobinage simple et double.

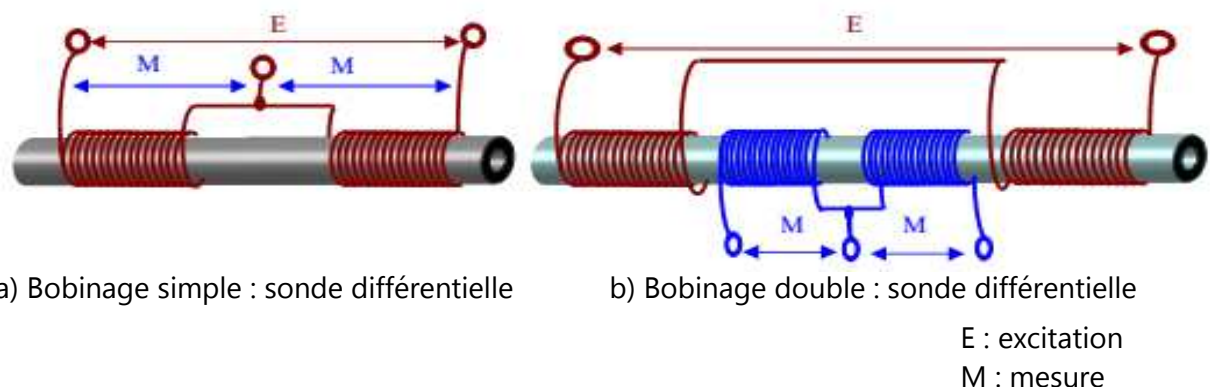


Fig. II.9. Contrôle en mode différentiel

Caractéristiques des sondes en mode différentiel :

- ✓ Constituée par deux bobines côte à côte ou concentriques ;
- ✓ Moindre sensibilité au lift off ;
- ✓ Détection de défauts par asymétrie ;
- ✓ Application: recherche de défauts courts.

### II.5.3. Disposition des bobines

Les sondes à courants de Foucault sont extrêmement variées et il est impossible de les décrire toutes brièvement. Leurs dimensions varient du millimètre pour les plus petites

sondes pick-up utilisant un noyau de ferrite, jusqu'à 120 ou 140 mm de diamètre pour les sondes les plus encombrantes, [9].

On rencontre en pratique essentiellement trois types de capteurs à courants de Foucault :

### II.5.3.a. Capteurs encerclants

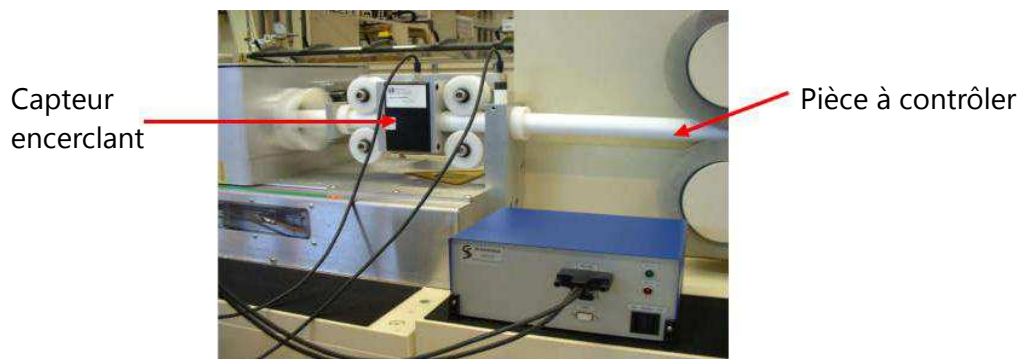
Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Elles analysent un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active de la bobine; les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit. Les capteurs encerclants sont destinés au contrôle au défilé des produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres, tubes et petits profilés métallurgiques, Figure (II.10.), [9,12].



a) Contrôle d'un tube



b) Différents modèles de capteurs encerclants

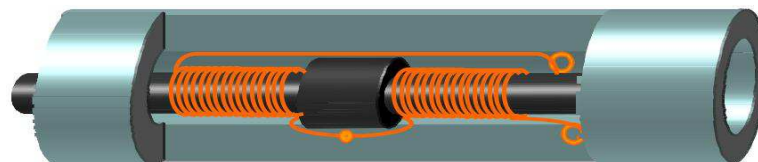


c) Contrôle de tube en cours de production

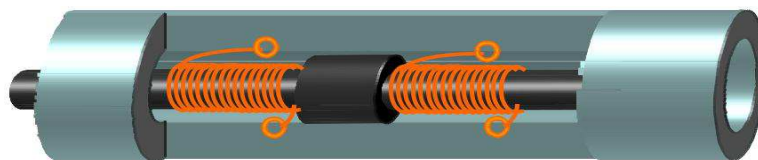
Fig. II.10. Capteurs encerclants

### II.5.3.b. Capteurs internes

Ils sont destinés à l'examen d'un produit par l'intérieur pour le contrôle des produits par l'intérieur, les bobines sont moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit; ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques, condensateurs ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire, Figure (II.11.), [9].



a) Capteur interne type différentiel



b) Capteur interne type à fonction séparée



c) Capteurs internes réels.

Fig. II.11. Capteurs internes

### I.5.3.c. Capteurs sondes

Ils sont connus aussi sous le nom de palpeurs ou bobines ponctuelles. Ces sondes comportent un ou plusieurs bobinages et peuvent être placées sur, ou à proximité de la surface de la pièce à contrôler, ils sont généralement moulées sur un noyau de ferrite d'axe perpendiculaire à la surface, très perméable aux faibles champs alternatifs, tout en gardant une bonne sensibilité ponctuelle de détection des défauts les plus fins. Ils analysent une zone quasiment égale à l'aire de leurs sections transversales. Ils

permettent donc une inspection locale de la pièce et ils peuvent atteindre des régions d'accès réputées difficiles.

La géométrie des sondes est fonction des cibles à contrôler et du dimensionnement des fissures recherchées, ainsi on peut trouver des sondes plus ou moins à tête large (embase plate) pour le contrôle de surface importante et pour défauts relativement grands, Figure (II.12.a.). D'autre part on trouve des sondes à tête très fine (tête de crayon) pour permettre l'inspection dans les espaces restreints et pour détecter de petites discontinuités. Elles sont disponibles avec un support droit ou coudé, qui facilite la manipulation, Figure (II.12.b.).

Ces capteurs sont adaptés aux explorations ponctuelles en contrôle manuel ou au balayage de grandes surfaces en contrôle automatique [9].



a) Sondes à tête large (embase plate)

b) Sondes à tête fine

Fig. II.12. Capteur sonde

### **II.5.3.d. Sondes particulières**

#### **➤ Sonde tournante**

C'est une sonde interne ou encerclante particulière, le produit à contrôler est déplacé longitudinalement à travers des sondes tournantes créant ainsi un pas d'inspection hélicoïdal. Figure (II.13.); les vitesses (translation et rotation) sont combinées pour avoir un recouvrement des zones contrôlées à chaque passage.

Plus sensible que les sondes encerclante avec une meilleure détection de fissures axiales, mais plus fragile en plus d'un allongement du temps d'examen, étant donnée, la vitesse de rotation (800 à 1500 tr/min suivant les modèles) et la distance entre sonde et cible, [12].

La longueur minimale d'un défaut pouvant être détecté de manière systématique est fonction de la vitesse de rotation des sondes et de la vitesse de déplacement du produit. Elles sont utilisées pour, la détection de défauts type fissure sur fil étiré à froid ou barres en longueur, le contrôle en ligne avec opérations sur fil en continu telles que étirage, formage y compris fabrication de ressorts, re-bobinage ou dressage et coupe.

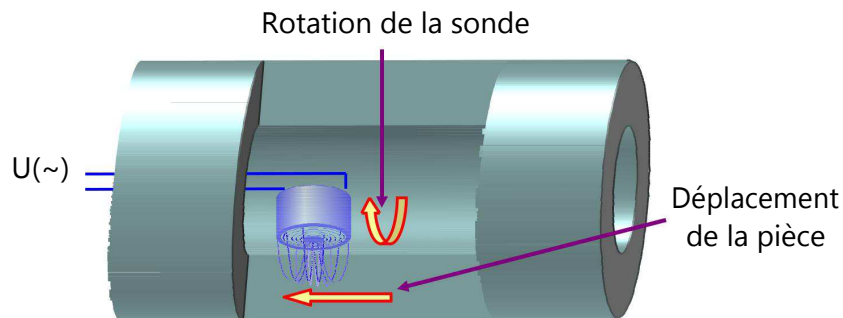


Fig. II.13. Sonde rotative

Une tête de contrôle comprenant 4 sondes à 90° est en général utilisée pour diminuer la vitesse de rotation et l'influence des variations d'entrefer. Les liaisons électriques sonde – appareillage de contrôle sont réalisées par l'intermédiaire de collecteurs ou de transformateurs tournants.

#### ➤ **Sonde à bobines perpendiculaires**

Constituée de deux bobines perpendiculaires entre elles, généralement utilisée en mode différentiel, caractérisée par, Figure (II. 14) :

- ✓ Une forte sensibilité aux fissures orientées selon l'un des axes de bobine,
- ✓ Une faible influence du lift off, de la conductivité et de la perméabilité,
- ✓ Une faible sensibilité aux fissures orientées à 45° ou 135°.

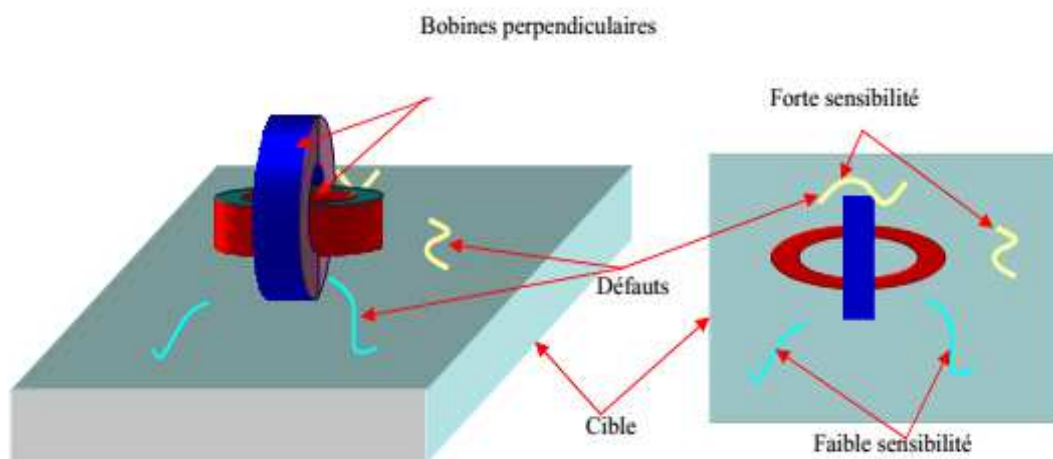


Fig. II.14. Sonde à bobines perpendiculaires

#### ***II.5.4. Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND***

Les courants de Foucault constituent un moyen de contrôle particulièrement fidèle, les plus faibles variations du signal étant exactement reproduites lors d'un second contrôle dans les mêmes conditions. Cette caractéristique est particulièrement intéressante en maintenance des matériels, notamment pour suivre leur évolution lors des contrôles périodiques.

L'automatisation des systèmes de contrôle ainsi que l'archivage électronique de "signatures" de défauts et le traitement du signal constituent des voies de développements actuels permettant de simplifier l'exploitation de la technique du CND par courants de Foucault et d'en étendre le champ d'application, on distingue :

- ✓ Mesure de conductivité électrique ;
- ✓ Mesure de l'épaisseur de revêtements isolants ;
- ✓ Détection de fissures ;
- ✓ Contrôle des tubes, barres et fils ;
- ✓ Détection d'objets métalliques dans un environnement isolant [9].

## II.6. Capteurs plus utilisés en CND

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

capteurs	Domaines d'utilisation
Capteurs inductifs à courants de Foucault	C'est un capteur de structure simple, de poids léger. Consacré à : Détection de défauts interne ou externe (fissure, corrosion, humidité ...). Basé sur la variation d'impédance. Appliqué aux : Tube de gaz, d'eau, pièce plane, circulaire...
Capteurs à ultrasons	Le capteur permet de détecter tout type de matériau sauf les objets absorbant (fissure, défauts interne, surfacique. Dans un tube, cylindrique, torique, une tôle, ...
Capteurs Optiques	Structure simple, poids léger, haute précision, travail à haute température utilisé pour détecter les fissures dans les turbo-machine par exemple.

Tableau II.2. Capteurs plus utilisés en CND

## II.7. Différents modes d'excitations

Quelque soit le type de capteur utilisé pour inspecter la santé d'une pièce, il existe pratiquement trois différents modes d'excitation qui sont résumés comme suit, [8] :

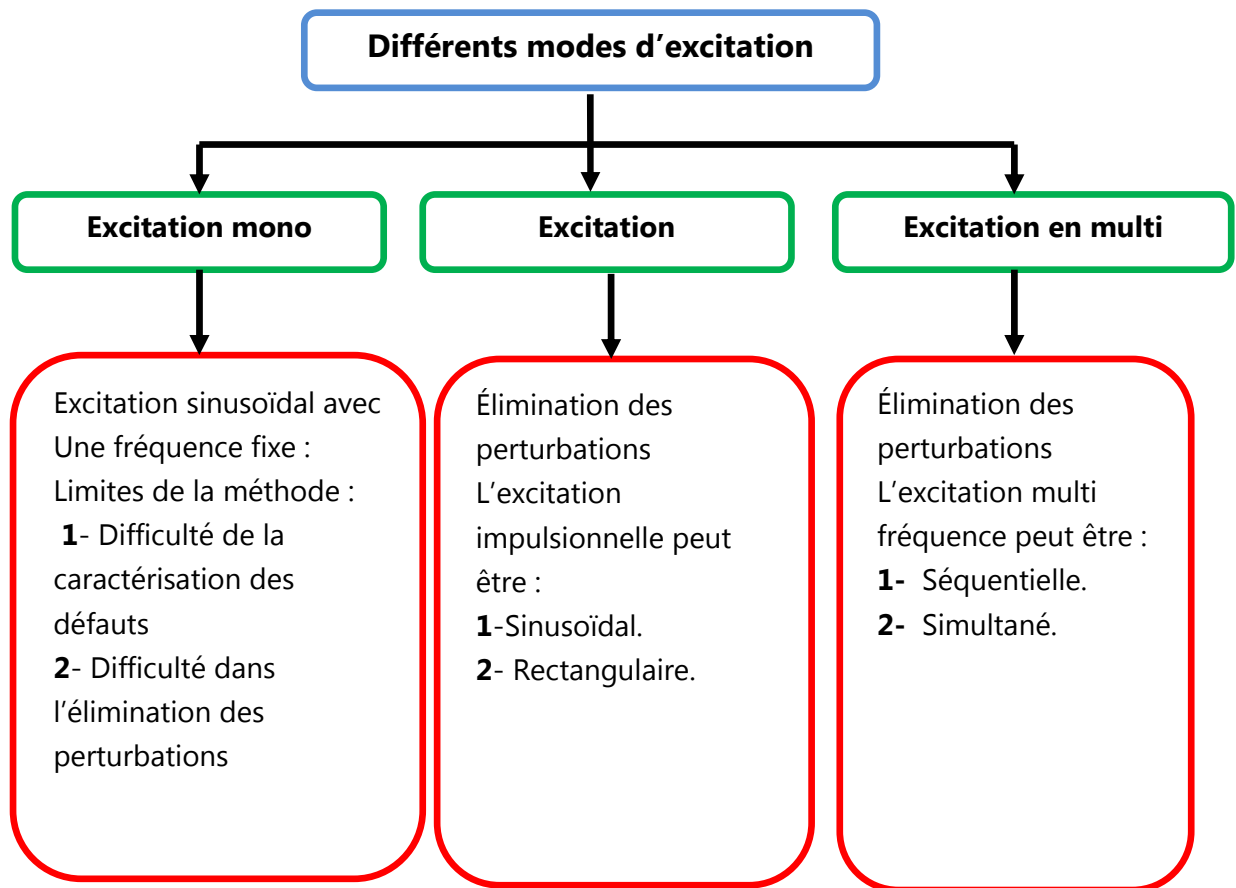


Fig. II.15. Représentation des différents modes d'excitation

## II.8. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre on a donné quelques notions sur les capteurs inductifs (définition, paramètres, critères de choix, principe, domaine d'application). Ensuite on passera en revue les différents types de capteurs à courants de Foucault, mise en œuvre du contrôle, disposition des bobines, domaines d'application. On terminera par un Tableau récapitulatif sur les différents capteurs utilisés en CND et les différents modes d'excitations.

Dans le troisième chapitre, on applique la méthode des éléments finis pour l'étude d'un problème tridimensionnel 3D de CND par courants de Foucault en mode absolu.

## ***Chapitre trois***

# ***Modélisation par élément finis 3D d'un capteur à courants de Foucault en mode absolu***

### ***III.1. Introduction***

Le développement d'un système doit s'appuyer non seulement sur l'expérimentation mais aussi sur un modèle de comportement du dispositif en cours de conception. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix des matériaux,..) sans avoir à réaliser un prototype. L'utilisation de la modélisation a donc un intérêt économique évident. Cependant, tout outil de modélisation doit être manipulé en connaissant parfaitement les hypothèses simplificatrices utilisées.

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

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

Dans ce chapitre on a présentées les diverses méthodes numériques de résolution et formulations fondamentales de l'électromagnétisme obtenus à partir des équations de Maxwell. La méthode des éléments finis est appliquée pour la résolution d'un problème du CND par CF dans une configuration tridimensionnel 3D. Ainsi on détermine l'impédance d'un capteur absolu à courant de Foucault par deux méthodes (méthode d'énergie et la méthode directe).

### ***III.2. Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault***

Les techniques de contrôle par courants de Foucault sont utilisées depuis 1926. Le principe du contrôle non destructif par courants de Foucault est basé sur les phénomènes de L'induction électromagnétique. D'après la loi de Lenz, une variation de

flux d'un champ magnétique (champ primaire) à travers un conducteur induit dans celui-ci une force électromotrice. Cette force électromotrice donne naissance à des courants induits appelés courants de Foucault, [14]. Ces courants créent un champ magnétique (champ secondaire) ; qui s'oppose à celui qui leur a donné naissance, comme illustré sur la figure (III.1).

La technique du contrôle non destructif par courants de Foucault consiste à produire un champ magnétique primaire variable et à mesurer le flux du champ magnétique secondaire ; produit par les courants induits. Le champ magnétique primaire est produit par un enroulement de fil, appelé « bobine excitatrice », parcouru par un courant variable dans le temps. Dans celle qui nous intéresse ici, le courant d'excitation est sinusoïdal.

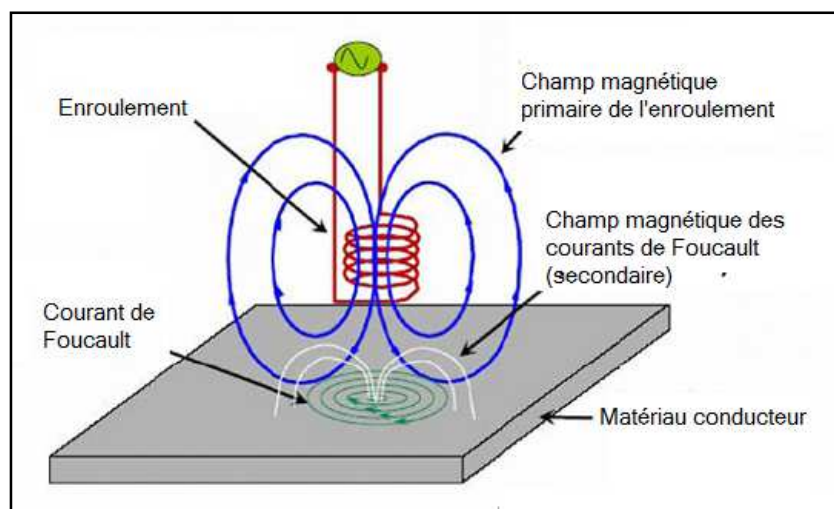


Fig. III.1. Schéma de principe du contrôle non destructif par courants de Foucault

Lorsque le matériau conducteur à contrôler est non ferromagnétique les liaisons du flux nettes de la bobine diminuent ce qui diminue l'inductance de la bobine. La diminution de l'inductance accompagnant une augmentation de la résistance de la bobine, les pertes par courant de Foucault encourues dans le matériau doit être rencontré par la source d'excitation fondamentale.

Le processus sous-jacent est plus compliqué lorsque le matériau conducteur à contrôler est Ferromagnétiques. Parallèlement à la diminution de l'inductance due à l'influence des courants de Foucault il y'a une augmentation de l'inductance due à la haute perméabilité de matériau.

Ce dernier effet est plus prédominant, et donc lorsque la bobine est à proximité d'un matériau ferromagnétique, sur toutes les inductances de la bobine augmente avec une augmentation de sa résistance. La présence d'un défaut dans la pièce contrôlée modifie le trajet des courants de Foucault, comme illustré par la figure (III.2) ce qui provoque une variation d'impédance de la bobine.

Le changement dans l'impédance de la bobine produit par un défaut est généralement général très faible comparé à l'irrégularité d'impédance dans le cas sans défaut. De plus le signal inclut des effets de plusieurs facteurs tels que conductivité électrique, perméabilité, lift off, fréquence etc ...

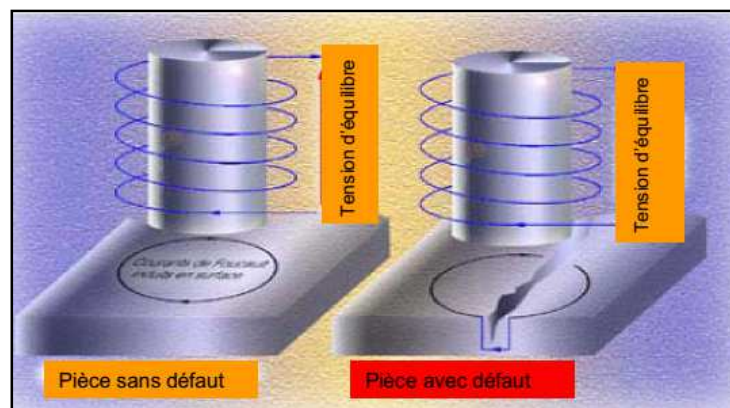


Fig. III.2. Chemin des courants de Foucault, [15]

### III.3. Modélisation du dispositif de CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la figure (III.3). Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée, [16].

#### Fissure :

Longueur :  $l$

Épaisseur :  $e$

Profondeur :  $p$

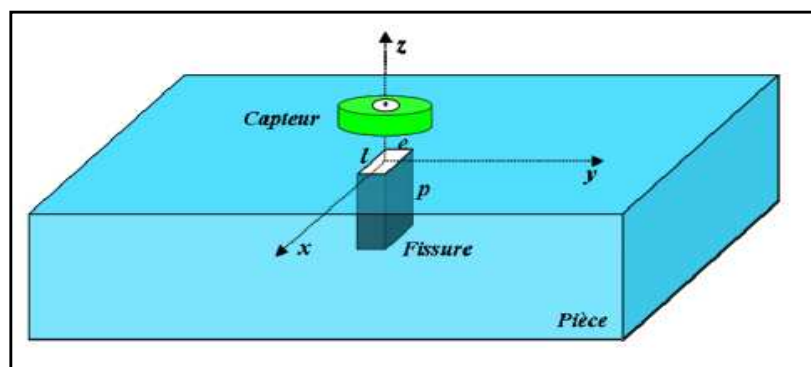


Fig. III.3. Système capteur-fissure

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce défectueuse ainsi que la variation d'impédance de la bobine.

Les dispositifs de CND que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire. Il s'agit des dispositifs constitués d'inducteurs filaires, de régions conductrices, non conductrices magnétiques ou amagnétiques et de sources de courant.

La modélisation de ces dispositifs peut être ramenée, dans le cas général, à un problème magnétodynamique type comme indiqué sur la figure (III.4).

L'ensemble de ce système forme le domaine de calcul  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$ .

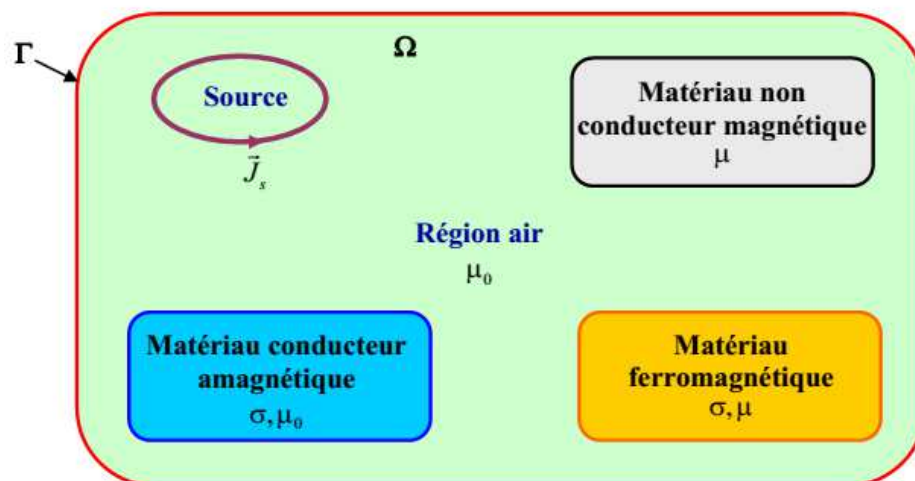


Fig.III.4. Problème magnétodynamique type

### III.4. Mise en équations

Pour décrire le comportement du champ électromagnétique dans le système modélisé, nous démarrons des quatre équations de MAXWELL auxquelles nous associons les lois constitutives et les conditions de passage aux frontières.

#### III.4.1. Equations de MAXWELL

Les équations de MAXWELL sont l'expression la plus généralisée des lois de l'électromagnétisme classique. Elles constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques et de leurs sources respectives : charges et densités de courant, et traduisent l'interdépendance de ces quatre grandeurs :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Théorème de Gauss} \quad (\text{III.1})$$

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

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

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \vec{J} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Théorème d'Ampère-Maxwell} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$\vec{E}$  : Champ électrique [V/m]

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m]

$\vec{B}$  : Induction magnétique [T]

$\vec{D}$  : Induction électrique [C/m<sup>2</sup>]

$\vec{J}$  : Densité de courant [A/m<sup>2</sup>]

$\rho$  : Densité volumique des charges électriques [C/m<sup>3</sup>]

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

### III.4.2. Lois constitutives

Les équations précédentes sont associées aux relations constitutives (lois de comportement) des matériaux.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{III.7})$$

où

$\mu$  : Perméabilité magnétique [H/m]

$\sigma$  : Conductivité électrique [S/m]

$\varepsilon$  : Permittivité électrique [F/m]

$\vec{B}_r$  : Induction magnétique rémanente [T]

$\sigma$ ,  $\mu$  et  $\varepsilon$  peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotropes, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie.

La relation entre l'induction magnétique  $\vec{B}$  et le champ magnétique  $\vec{H}$  peut être non linéaire.

Pour assurer l'unicité de la solution du système (III.1 à III.7), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions : les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les jauges, [16].

### III.4.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites (spatiales) s'énoncent de façon générale pour un domaine  $\Omega$  de Frontière  $\Gamma$  avec  $\vec{n}$  un vecteur normal (unitaire) à  $\Gamma$  pour la variable  $u$ .

- ✓ Condition de Dirichlet homogène  $u \cdot \vec{n} = 0$
- ✓ Condition de Neumann homogène  $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$

### III.4.4. Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu 1 à un milieu 2, figure (III.5), les grandeurs de champs subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables.

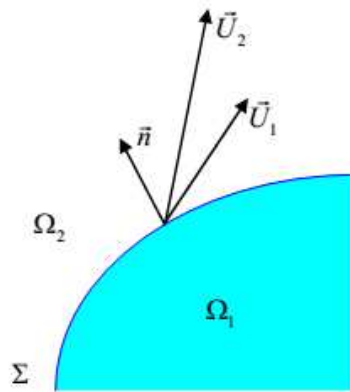


Fig. III.5. Interface entre deux milieux

Les relations entre les grandeurs électromagnétiques à l'interface, dites relations de transmission, s'écrivent alors :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (\text{III.8})$$

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.9})$$

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{J}_{sur} \quad (\text{III.10})$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{III.11})$$

où  $\rho_{sur}$  est la densité surfacique de charge,  $\vec{J}_{sur}$  la densité surfacique de courant et  $\vec{n}$  le vecteur normal à la surface de séparation des deux milieux  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  et dirigé vers l'extérieur du milieu 1.

### III.4.5. Conditions de Jauge

Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jagues dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution. Soient  $\vec{U}$  et  $\vec{W}$  deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par :

$$\operatorname{div} \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{III.12})$$

$$\operatorname{div} \vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{III.13})$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'arêtes} \quad (\text{III.14})$$

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près. La jauge de Coulomb s'écrit donc :  $\operatorname{div} \vec{A} = 0$

### III.4.6. Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux accomplis jusqu'à présent dans le domaine de calcul des champs et des courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, sont fondés sur les hypothèses suivantes :

- Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$  (Approximation des Régimes Quasi Stationnaires ARQS)
- Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité  $\sigma \vec{E}$  peut être décomposée en une partie imposée  $\vec{J}_s$  (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation  $E$  qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.15})$$

- La densité volumique de charge est considérée comme nulle.
- Généralement, le courant n'existe qu'en volume ( $\vec{J}_{sur} = \vec{0}$ ), c'est-à-dire que la conductivité est finie et que la fréquence d'excitation n'excède pas quelques MHz (basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle

du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée, [16].

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{III.16})$$

- L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ( $\vec{B}_r = \vec{0}$ ) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent.

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{III.17})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.19})$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.20})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.21})$$

### III.4.7. Champs et potentiels

Les champs de vecteurs  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{J}$  peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires :

$$\vec{H} = \vec{H} - \text{grad} \phi \quad (\text{III.22})$$

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (\text{III.23})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} v \quad (\text{III.24})$$

$$\vec{J} = \text{rot } \vec{T} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

$\vec{T}$  : Potentiel vecteur électrique [A/m]

$\vec{A}$  : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m]

$v$  : Potentiel scalaire électrique [V]

$\phi$  : Potentiel scalaire magnétique [A]

Ainsi, pour un problème donné, plusieurs combinaisons sont envisageables (il existe a priori un grand nombre de formulations possibles). De telles combinaisons aboutissent à des formulations électromagnétiques.

### III.4.8. Formulations magnétodynamiques

La mise en œuvre d'un outil éléments finis 3D nécessite le choix d'une formulation basée sur une grandeur caractéristique et en association avec les relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge. On entend par formulation le choix des variables inconnues et leur mise en équation.

On préfère souvent exprimer les champs électrique et magnétique en fonction de potentiels. En effet, a montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs  $(\vec{E}, \vec{H})$  converge moins bien que si on travaille avec des potentiels.

Différentes formulations électromagnétiques ont été élaborées dans la littérature pour résoudre ces équations [16].

En exprimant les champs de vecteurs  $\vec{E}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{J}$  en fonction de nouvelles variables, telles que les potentiels vecteurs magnétique  $\vec{A}$  et électrique  $\vec{T}$  ou des potentiels scalaires électrique  $V$  et magnétiques  $\phi$  et réduits  $\Phi_r$ , équations (III.22 à III.25), d'autres formulations sont obtenues exprimant sous d'autres formes les équations de Maxwell, et dont la résolution conduit aux diverses grandeurs locales ou globales du problème.

Les formulations électromagnétiques sont classées en deux grandes familles :

- Les formulations utilisant des variables de type champ :  $\vec{E}$  ou  $\vec{H}$
- Les formulations utilisant des variables de type potentiel :  $\vec{A} - V$ ,  $\vec{A}^*$  ou  $\vec{T} - \Phi$

#### III.4.8.1. Formulations de type électrique

Les principales formations de type électrique sont les formations en champ  $E$ , en potentiels  $\vec{AV} - \vec{A}$ .

##### III.4.8.1.1. Formulation en champ électrique $\vec{E}$

Cette formulation est obtenue en dérivant par rapport au temps l'équation d'Ampère-Maxwell (III.4) et en faisant l'hypothèse que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit :

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{E} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{III.26})$$

Elle nécessite l'utilisation des éléments d'arêtes pour prendre en compte les conditions aux limites (de façon naturelle) et les discontinuités sur les composantes normales aux interfaces des champs de vecteur.

### III.4.8.1.2. Formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\vec{A}V - \vec{A}$

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique uniquement dans les régions conductrices, [16,17].

En reprenant l'équation (III.17), on peut montrer que l'induction magnétique  $\vec{B}$  peut être considérée comme le rotationnel d'un potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  tel que :

$$\vec{B} = \overline{rot} \vec{A} \quad (\text{III.27})$$

De même en remplaçant III.27 dans III.18 on obtient :

$$\overline{rot} \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (\text{III.28})$$

A partir de la relation précédente, nous pouvons définir un potentiel scalaire électrique  $v$  par la relation :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overline{grad} v \Leftrightarrow \vec{E} = -\overline{grad} v - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.29})$$

La combinaison des équations III.20 et III.28 nous donne :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} = \vec{J}_s - \sigma \left( \overline{grad} v + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{III.30})$$

L'équation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\overline{rot} \frac{1}{\mu} \overline{rot} \vec{A} + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overline{grad} v \right) = \vec{J}_s \quad (\text{III.31})$$

A cette équation s'ajoute la conservation de la densité de courant :

$$\overline{div} \vec{J} = \overline{div} \left( -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overline{grad} v \right) \right) = 0 \quad (\text{III.32})$$

Le potentiel vecteur n'étant défini qu'à un gradient près ( $\vec{A} = \vec{A}_0 + \overline{grad} v$ ), l'unicité du potentiel doit être assurée par l'utilisation d'une jauge. En  $\vec{A} - V$  la jauge de Coulomb semble être la plus efficace, [16] :

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{III.33})$$

Cette jauge est généralement introduite par pénalité en ajoutant le terme.

$$-\operatorname{grad} \left( \frac{1}{\mu} \operatorname{div} \vec{A} \right) = 0 \quad (\text{III.34})$$

En posant la transformation :

$$v = \frac{\partial V}{\partial x} \quad (\text{III.35})$$

Nous obtenons le système d'équations électromagnétique symétrique à résoudre, dit formulation  $\vec{A} - V$  :

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} \right) - \operatorname{grad} \left( \frac{1}{\mu} \operatorname{div} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A} + \overline{\operatorname{grad} V}) = \vec{J}_s \quad (\text{III.36})$$

$$\operatorname{div} \left( \sigma \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A} + \overline{\operatorname{grad} V}) \right) = 0 \quad (\text{III.37})$$

### 3.4.8.2. Formulations de type magnétique

La relation vérifiée par le champ magnétique  $\vec{H}$  est obtenue en combinant les équations de Maxwell. Elle donne lieu à plusieurs formulations de type magnétique dont les deux principales sont : la formulation en  $\vec{H}$  et la formulation en  $\vec{T} - \Phi$ .

#### 3.4.8.2.1. Formulation en champ magnétique $H$

En combinant les relations (III.19) et (III.20), nous obtenons l'équation à résoudre :

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \vec{H} \right) + \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.38})$$

Cette équation associée à des conditions aux limites adéquates admet une solution unique. Cependant il faut assurer la continuité de la composante normale de l'induction magnétique, soit en terme de  $\vec{H}$  :

$$(\mu_1 \vec{H}_1 - \mu_2 \vec{H}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.39})$$

Cette relation implique la discontinuité de la composante normale de  $\vec{H}$  dans le cas de discontinuité de  $\mu$ . Ceci rend la formulation beaucoup moins intéressante dans le cas des éléments finis nodaux. En revanche, elle est bien adaptée aux éléments d'arêtes puisque la continuité de la composante tangentielle de  $\vec{H}$  est vérifiée, [10].

### III.4.8.2.2. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique $\vec{T} - \Phi$ :

En éléments finis nodaux, cette formulation est la duale de la formulation  $\vec{A} - V$ . En effet, lorsqu'il n'y a pas d'accumulation de charge, l'équation de continuité s'écrit  $div\vec{j} = 0$  et permet de définir le potentiel  $\vec{T}$ , tel que  $\vec{j} = rot\vec{T}$ . Comme pour la formulation  $\vec{A} - V$ , l'unicité de la solution nécessite l'introduction d'une jauge (Jauge de Coulomb par exemple) ; ce qui donne l'expression ci-dessous :

$$rot\left(\frac{1}{\sigma}rot\vec{T}\right) - grad\left(\frac{1}{\sigma}div\vec{T}\right) + \frac{\partial}{\partial t}\mu(\vec{T} - \overline{grad}\Phi) = \vec{0} \quad (\text{III.40})$$

$$div\mu(\vec{T} - \overline{grad}\Phi) = 0 \quad (\text{III.41})$$

### III.4.8.2.3. Comparaison entre les formulations

Le Tableau (III.1) récapitule une comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF, [16].

Formulation	Potentiels régions non conductrices	Potentiels régions conductrices	Avantages	Inconvénients
$\vec{A}V - \vec{A}$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	Pas de problèmes régions multiples identiques	Nombres d'inconnues Importants
$\vec{T} - \Phi$	$\Phi$	$\vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z, \Phi$	Faible temps de calcul – Réduction inconnues	Problèmes de Régions multiples connexes

Tableau III. 1 Comparaison entre les formulations les plus utilisées dans le CND-CF

## III.5. Méthodes numériques de résolution

Dans les paragraphes précédents, nous avons établi une équation aux dérivées partielles (III.36) décrivant les systèmes électromagnétiques. La résolution de cette équation par des méthodes analytiques est impossible dans le cas général où la géométrie des dispositifs étudiés est complexe, et/ou les matériaux ont des propriétés magnétiques non linéaires. Pour résoudre ce type de problèmes on fait appel à des méthodes dites

numériques telles que : la méthode des intégrales de frontières, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et nous présentons une étude détaillée de la méthode des éléments finis, méthodes mixtes qui sont une combinaison de deux méthodes numériques (éléments finis+intégrales de frontières par exemple...) dont on donne un aperçu dans les paragraphes suivants.

### **III.5.1. Méthode des intégrales de frontières**

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

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de prendre en considération la saturation, la nécessité d'un espace mémoire et d'un temps de calcul importants, car les matrices issues de cette méthode sont de rang élevé. [8].

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

### **III.5.2. Méthode des différences finis**

C'est une méthode numérique simple à mettre en œuvre, est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles, en particulier celles concernant les problèmes de champs électromagnétiques. Cette méthode en 3D, consiste à mailler le domaine de résolution en éléments rectangulaires.

En discrétisant aux nœuds du maillage l'équation (III.36) et en tenant compte des conditions aux limites appropriées et des conditions de passages entre les différents milieux, on aboutit à un système algébrique. La méthode des différences finies s'adapte difficilement aux géométries complexes. En plus, elle n'aboutit qu'aux valeurs nodales du vecteur potentiel, ce qui exige une interpolation pour déterminer les valeurs de  $\mathbf{A}$  en d'autres points du domaine de résolution si c'est nécessaire.

### **III.5.3. Méthode des volumes finis**

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

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

### **III.5.4. Méthode Des Eléments Finis MEF**

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques [linéaire ou non linéaire, stationnaires ou dépendant du temps] définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. Appliquée tout d'abord, il y a environ 50 ans, à des problèmes de mécanique de structure, cette méthode a connu des développements importants dans différents domaines scientifiques et industriels, [1].

#### **III.5.4.1. Présentations De La Méthode Des Eléments Finis MEF**

La méthode des éléments finis MEF a été introduite par P. SILVESTR et M.V.K CHARI au début des années 1970 dans le domaine du calcul électromagnétique car au départ cette méthode n'était utilisée que dans le domaine du génie mécanique ou du génie civil pour le calcul des efforts sur les structures, [8,17].

Actuellement, elle est la plus utilisée dans le domaine d'électromagnétisme et la preuve est l'existence d'un grand nombre de codes. Citons en les plus utilisés au mode :

- ◆ Flux 2D/3D [cédrat recherche / Magsoft / L.E.G / France] MEF;
- ◆ Maxwell 2D/3D [Ansoft / USA] MEF;
- ◆ Matlab PDE Tool-Box 2D [USA] MEF;

- ◆ COMSOL Multiphysics ;

C'est la méthode la plus populaire dans les milieux scientifiques dans le domaine des courants induits.

### **III.5.4.2. Etude Et Développements De La Méthode Des Eléments Finis**

Le principe de la MEF est de remplacer un domaine continu par un nombre de sous domaines où la fonction inconnue recherchée est approximée par de simple fonctions d'interpolation avec des coefficients à déterminer en fonction de l'espace. Pour transformer les équations aux dérivées partielles en une formulation intégrale.

Celle-ci est obtenue par l'application de méthodes d'approximations pour obtenir un système d'équations algébriques. On retrouve la simulation par la résolution de ce système [1,18].

Pour revoir tout cela en détail, reprenons étape par étape la MEF, celle-ci inclue les étapes fondamentales suivantes :

- ◆ Discrétisation ou subdivision du domaine ;
- ◆ Choix des fonctions d'interpolation ;
- ◆ Formulation du système d'équation algébrique ;
- ◆ Solution du système d'équation algébrique.

#### **II.5.4.2.1. Discrétisation Du Domaine**

Pour un domaine unidimensionnel qui est en fait une ligne droite ou curviligne, les éléments sont souvent des petits segments interconnectés entre eux pour former tout le domaine fig. (III.6.a). Pour un domaine bidimensionnel, les éléments sont constitués des triangles ou rectangles fig. (III.6.b). Dans le cas de problème tridimensionnel, le domaine peut subdiviser en éléments tétraédriques, prismatiques, hexaédriques fig. (III.6.c).

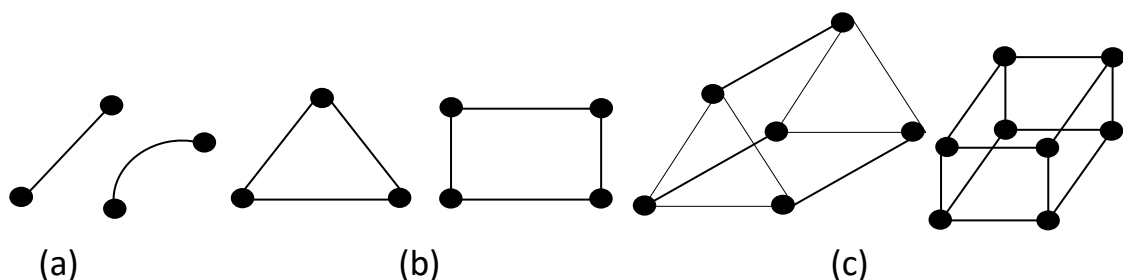


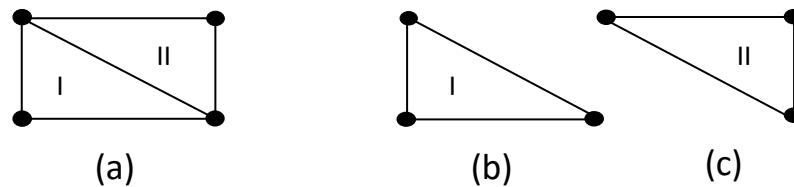
Fig.III.6. Les Eléments De Base

Ces éléments nécessitent une description complète de leurs nœuds. En pratique, cette description est un tableau qui contient les valeurs des coordonnées des nœuds, un nombre local et un nombre global sont généralement attribués à ces nœuds.

Le nombre local d'un nœud indique sa position dans l'élément tandis que le nombre global désigne sa position dans le système global.

**III.5.4.2.2. Type De Maillage Utilisé**

Etant donné que notre étude est bidimensionnelle (axisymétrique), la résolution par éléments triangulaire est la plus indiquée. Les triangles sont constitués de trois nœuds confondus avec leurs trois sommets. Pour affiner des parties du domaine de résolution nous changeons seulement la taille de ces éléments. La numérotation des nœuds est faite de gauche à droite puis de bas en haut. Tandis que pour les éléments, nous numérotions de gauche à droite tous les triangles du type I (Fig. (III.7.b)) d'une couche horizontale puis ceux du type II (Fig. (III.7.c)) de la même couche. Nous continuons ensuite la numérotation des éléments de bas en haut. Ainsi, pour chaque couple de triangle, nous distinguons deux types d'éléments dont la numérotation locale des nœuds se fait dans le sens trigonométrique.



- (a) Couple d'éléments triangulaire
- (b) Élément triangulaire de type I
- (c) Élément triangulaire de type II

Fig.III.7. Type D'éléments Utilisés

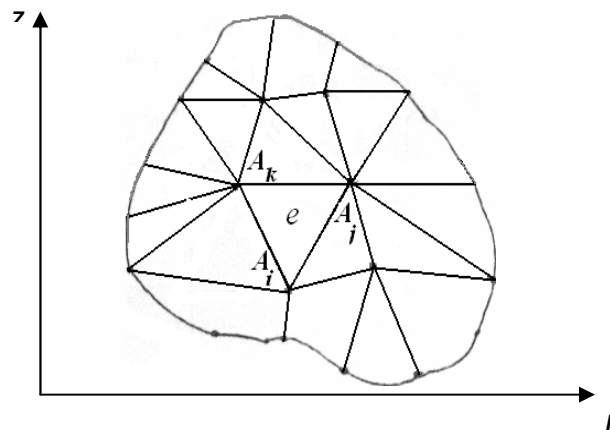


Fig.III.8. Découpage En Eléments Finis Du Domaine  $\Omega$

### III.5.4.2.3. Sélection Des Fonctions D'interpolation

La seconde étape de la MEF est de « sélectionner une fonction d'interpolation » qui fournit une approximation de solution inconnue à l'intérieur d'un élément. L'interpolation est fréquemment appelée à être un polynôme du premier (linéaire), second (quadratique), on plus grand ordre, un polynôme de plus grand ordre, quoique plus précis, aboutir fréquemment à une formulation compliquée par conséquent la simple et basique interpolation linéaire reste largement utilisée. Une fois que l'ordre du polynôme est sélectionné on peut tirer une expression en remplaçant la solution inconnue par élément appelé « e », sous la forme suivante :

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x, y) f_i \quad (\text{III.42})$$

avec :

$n$  : Nombre de nœuds dans l'élément choisi ;

$\alpha_i(x, y)$  : Fonction d'interpolation ;

$f_i$  : Valeur de l'inconnue au nœud  $i$  ;

Une importante caractéristique des fonctions d'interpolation  $\alpha_i$  est qu'elles existent seulement à l'intérieur de l'élément « e » et en dehors elles sont nulles.

#### III.5.4.2.3.1. Fonctions D'interpolation D'un Triangle à Trois Nœuds

Afin de simplifier notre étude nous avons opté pour une approximation linéaire.

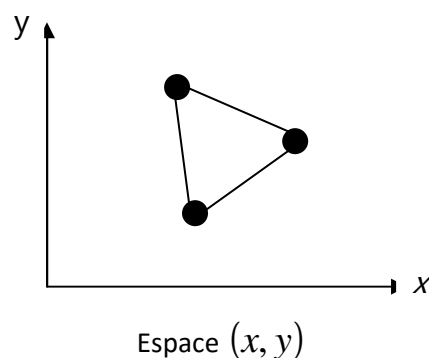


Fig.III.9. Élément Réel

Dans ce cas, les trois nœuds sont à la fois nœuds d'interpolation et nœuds géométriques des variables nodales :

$$[f_n] = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix} \quad (\text{III.43})$$

L'interpolation linéaire sur l'élément réel triangulaire s'écrit :

$$f^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y \quad (\text{III.44})$$

$a^e$ ,  $b^e$  et  $c^e$  sont les paramètres à déterminer.

Ou bien

$$F(x, y) = [\alpha_1(x, y) \alpha_2(x, y) \alpha_3(x, y)] \begin{bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_k \end{bmatrix} \quad (\text{III.45})$$

avec :

$$\alpha_j^e(x, y) = \frac{1}{2\Delta^e} (a_j^e + b_j^e x + c_j^e y) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{III.46})$$

$$a_1^e = x_2^e y_3^e - y_2^e x_3^e \quad b_1^e = y_2^e - y_3^e \quad c_1^e = x_3^e - x_2^e$$

$$a_2^e = x_3^e y_1^e - y_3^e x_1^e \quad b_2^e = y_3^e - y_1^e \quad c_2^e = x_1^e - x_3^e \quad (\text{III.47})$$

$$a_3^e = x_1^e y_2^e - y_1^e x_2^e \quad b_3^e = y_1^e - y_2^e \quad c_3^e = x_2^e - x_1^e$$

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} = \frac{1}{2} (b_1^e c_2^e - b_2^e c_1^e) \quad (\text{III.48})$$

$\Delta^e$  : Représente l'aire de l'élément « e ». Rappelons que :

$$\alpha_j^e(x_i^e, y_i^e) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Nous observons que les fonctions  $\alpha_j(x, y)$  dépendent seulement des coordonnées des nœuds.

#### III.5.4.2.4. Formulation Du Système D'équation

La résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis, est définie par l'équation différentielle suivante :

$$\Delta F - g = 0 \quad (\text{III.49})$$

où :

$\Delta$  : est l'opérateur différentiel.

$F$  : la fonction inconnue à déterminer.

$g$  : la fonction de forçage.

La troisième étape, consiste à « formuler le système d'équations algébriques ». Les méthodes couramment utilisées pour obtenir la formulation intégrale sont :

- ✓ La méthode variationnelle.
- ✓ La méthode des résidus pondérés.

La méthode variationnelle de Ritz, consiste à rendre extrémale une fonctionnelle qui est une intégrale qui dépend de la fonction inconnue et ses dérivées. Par contre la méthode des résidus pondérés permet de traiter directement l'équation aux dérivées partielles sans passer par un principe variationnelle. Elle consiste à projeter l'équation à résoudre sur une base de fonction. En déterminant les fonctions d'interpolation  $\alpha_i$ .

La méthode des résidus pondérés consiste alors à déterminer des fonctions poids  $\Psi_i$  qui annulent la forme intégrale :

$$\int_{\Omega} \Psi_i R \, d\Omega = 0 \quad (\text{III.50})$$

Selon le choix de  $\Psi_i$ , l'équation (III.49) prend plusieurs formes. Il y a plusieurs méthodes pour choisir  $\Psi_i$ , parmi les différentes méthodes nous citerons :

- ✓ La méthode de collocation par points ;
- ✓ La méthode de collocation par sous domaine ;
- ✓ La méthode des moindres carrées ;
- ✓ La méthode de Galèrkine.

Pour le développement des formulations intégrales, nous utiliserons dans nos analyses la méthode de Galèrkine pour sa simplicité, [18].

#### **III.5.4.2.4.1. Méthode De Galèrkine**

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

$$\Psi_i(x, y) = \alpha_i(x, y)$$

La fonctionnelle de l'équation (III.49) s'écrit donc :

$$R_i = \iint_{\Omega} \alpha_i(x, y) \left[ \Delta \left( \sum_{j=1}^3 \alpha_j(x, y) f_j \right) - g \right] d\Omega \quad (\text{III.51})$$

Les  $\alpha_i(x, y)$  sont calculées pour que  $R_i$  soit nul. Dans chaque domaine élémentaire désigné par « e »,  $R_i$  est décrit par l'équation suivante :

$$R_i^e = \iint_{\Omega^e} \alpha_i(x, y) \left[ \Delta \left( \sum_{j=1}^3 \alpha_j(x, y) f_j \right) - g \right] d\Omega^e \quad (\text{III.52})$$

$$R_i = \sum_{e=1}^{ne} R_i^e \quad (\text{III.53})$$

N'étant le nombre d'éléments sur le domaine  $\Omega$ .

### III.5.4.2.4.2. Forme Matricielle Élémentaire

Il s'agit de mettre sous forme matricielle, les formes intégrales de l'équation à résoudre, dans chaque domaine élémentaire  $\Omega^e$ . L'équation (III.51) prend alors la forme suivante :

$$R_e = [k]_e \{f\}^e - \{F\}^e \quad (\text{III.54})$$

En mettons :

$$[k]^e = \int_{\Omega^e} \alpha_i(x, y) \cdot \Delta \left( \sum_{j=1}^{nm} \alpha_j(x, y) \right) d\Omega_e$$

$$\{F\}^e = \int_{\Omega^e} \alpha_i(x, y) \cdot g d\Omega^e$$

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

$$R = \sum_{e=1}^{ne} R^e = 0 \quad (\text{III.55})$$

On à donc :

$$R = \sum_{e=1}^{ne} [k]^e \{f\}^e - \{F\}^e = [k] \{f\} - \{F\} = 0 \quad (\text{III.56})$$

$[k]$  Est la matrice globale discrétisée, obtenue par la somme des matrices élémentaires étendues. De la même manière on réalise une expansion de  $\{F\}^e$  qui donne la vectrice source  $\{F\}$ . Ainsi, nous obtenons un système d'équations algébriques de la forme :

$$[k] \{f\} = \{F\} \quad (\text{III.57})$$

### III.5.4.2.5. Résolution Du Système

C'est la dernière étape qui mène à la détermination des valeurs  $f_i$  de la fonction  $f(x, y)$  recherchée en chaque nœud ; Il s'agit de résoudre le système (III.56) mais de plus, il faut tenir compte des aux conditions limites qui, en général sont telles que certaines valeurs de  $f_i$  ou sa dérivée sont connus sur les parties du contour du domaine d'étude  $\Omega$ .

### III.6. Calcul de l'impédance

Après avoir déterminer le potentiel vecteur pour chaque point du maillage on peut déterminés les autres paramètres, l'induction magnétique (**B**), champ magnétique (**H**), les courants induits et l'impédance du capteur (**Z**). Le contrôle par les courants de Foucault basé sur la variation d'impédance du capteur dans la présence d'un défaut, deux méthodes sont employées pour la détermination de cette dernière; soit a travers le calcul du potentiel vecteur magnétique (**A**), où la source est de type courant comme dans notre cas; soit à partir du calcul de la tension. Ensuite l'impédance sera calculée par la loi d'Ohm. La deuxième méthode est la plus utilisée à cause de sa fiabilité, [8].

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

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

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (\text{III.58})$$

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

$$X = \omega \frac{W_m}{I^2} \quad (\text{III.59})$$

Les pertes joules sont données par [16, 29]

$$P = \frac{1}{2} \int_v \frac{J^2}{\sigma} dv = \frac{1}{2} \int_v \frac{J \cdot J^*}{\sigma} dv \quad (\text{III.60})$$

Comme :

$$J = \sigma E \Rightarrow J = -\sigma j \omega A \quad (\text{III.61})$$

$$P = \frac{\omega^2}{2} \int_v \sigma A \cdot A^* dv \quad (\text{III.62})$$

La substitution des équations (III.59) et (III.62) donne :

$$R = \frac{\omega^2}{2} \int_v \frac{\sigma A A^*}{l^2} dv \quad (\text{III.63})$$

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

$$X = 2 \cdot \omega \frac{W_m}{I^2} \quad (\text{III.64})$$

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

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v B \cdot H dv \quad (\text{III.65})$$

$$W_m = \frac{1}{2\mu} \int_v B \cdot B^* dv \quad (\text{III.66})$$

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v A \cdot J dv \quad (\text{III.67})$$

L'équation (III.67) est obtenue par la résolution de l'équation (III.36) et l'exploitation de l'équation  $rot B = J$ , [8].

Par substitution des deux équations (III.64) et (III.67) en obtins :

$$X = \omega \int_v \frac{A \cdot J^*}{l^2} dv = \omega \cdot L \quad (\text{III.68})$$

Où  $L$  est l'inductance de la bobine.

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

$$Z = R + jX \quad (\text{III.69})$$

### III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons porté sur une approche d'analyse par la méthode des éléments finis en a commencé par le principe de CND par CF puis la formulation par MEF (les équations de Maxwell) du modèle magnétodynamique du problème posé cette formulation est étudié dans le cas d'un système 3D, sans considérer la saturation du matériau sous teste.

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

# ***Chapitre Quatre***

## ***Validations et discussions des résultats***

### ***IV.1. Introduction***

Les outils numériques de simulation d'aujourd'hui sont devenus très performants grâce d'une part aux avancées technologiques des machines (vitesse d'exécution, mémoire allouée), et d'autre part, aux développements de modèles numériques de plus en plus adaptés aux problèmes rencontrés. Ces outils sont généralement intégrés à des plateformes de simulations, telles que FLUX 2D ou 3D, ANSYS, CIVA ou COMSOL Multiphysics. Ces logiciels, qui sont en évolution permanente, constituent une plateforme pour toute modélisation de CND visant à caractériser des défauts. Pour notre cas nous avons choisi COMSOL Multiphysics 5.0 vue sa caractéristique principale à savoir qu'il est multidisciplinaire, [9].

Ce chapitre, en premier lieu, nous présenterons le modèle géométrique CND-CF 3D en mode absolu. Elle est basée sur le potentiel vecteur magnétique, nous allons mettre en évidence l'impact du défaut conducteur sur le signal de l'impédance Capteur-Pièce. Puis, nous étudierons l'effet des paramètres influant sur la réponse du capteur tels que les grandeurs géométriques et électriques, la fréquence, la profondeur, le lift-off et la conductivité.

### ***IV.2. Modèle géométrique et description***

Différentes structures de capteurs inductifs sont disponibles pour détecter une large variété de défauts. En général, ces capteurs ou sondes captent les défauts avec une grande sensibilité lorsque les courants induits dans la pièce sous test sont fortement altérés. Les capteurs de type pancake sont formés de bobines dont l'axe est perpendiculaire à la surface de la pièce à tester. Ces capteurs sont destinés pour l'inspection des objets plats, [9].

En effet, les courants induits dans la cible sont des circonférences parallèles à la surface. Quand une fissure pénétrante se produit sur la surface, le courant est fortement modifié et la fissure peut être détectée. Cependant, ces types de sondes ne sont pas convenables pour les défauts parallèles à la surface car les courants induits ne sont pas fortement déformés.

### IV.3. Modèle géométrique

La géométrie axisymétrique du dispositif à modéliser pour un contrôle non destructif par courants de Foucault est représentée sur la Figure (IV.1.). Cette dernière inclut la plaque massive conductrice, constituant la pièce à tester et contenant une fissure, elle est soumise à l'action d'un champ électromagnétique produit par la bobine représentant le capteur CF en mode absolu alimenté en courant sinusoïdal, où une densité de courant variable dans le temps est imposée.

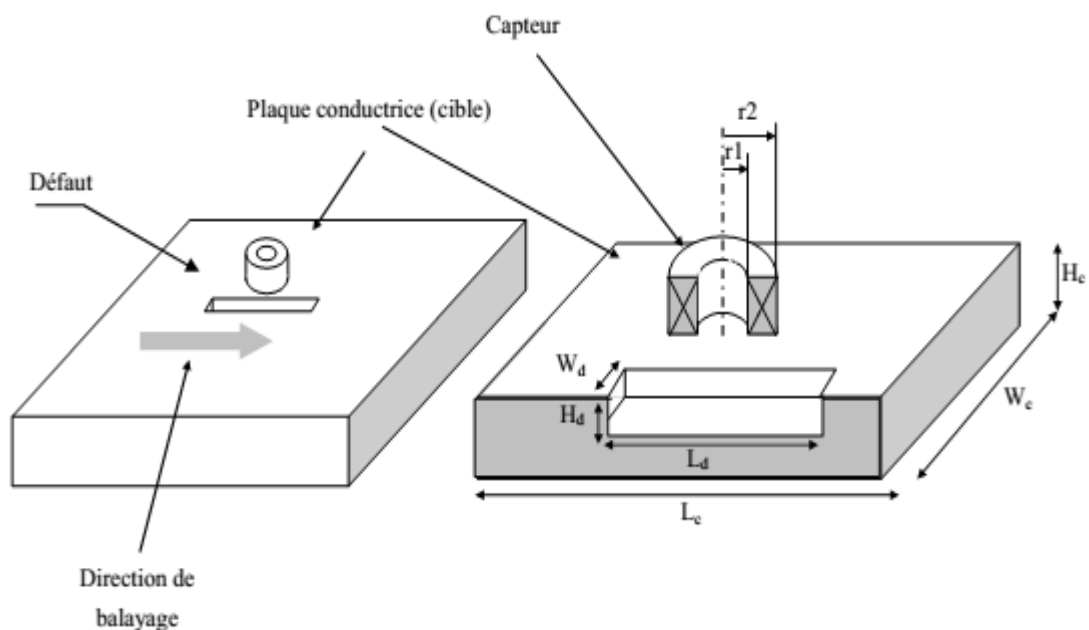


Fig. IV.1. Géométrie du dispositif à modéliser

### IV.4. Description sur le logiciel utilisé

Actuellement, divers logiciels de simulation numérique sont disponibles et permettent de faciliter la résolution numérique des systèmes d'équations aux dérivées partielles décrivant les phénomènes électromagnétiques intervenant dans le CND-CF.

Le logiciel utilisé est le COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis, ce choix fût conditionné par son aspect multidisciplinaire d'une part et d'autre part, ce logiciel offre la possibilité à l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles, soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires et des équations algébro-différentiels sont également possibles.

Ce logiciel permet aussi la possibilité de se coupler à MATLAB. Par conséquent, l'ensemble COMSOL-MATLAB permet de réaliser à la fois l'analyse par EF des structures électromagnétiques et d'autre fois à exploiter les outils d'optimisation disponible sous Matlab.

Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algébro-différentiels (EAD) sont également possibles [9].

#### ***IV.5. Déroulement de la simulation 3D avec COMSOL Multiphysics***

Une simulation électromagnétique avec COMSOL se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. Elle se décompose en trois étapes principales :

- ✓ Pré-traitement ;
- ✓ Calcul ;
- ✓ Post-traitement.

L'étape de pré-traitement inclut la description géométrique et physique du domaine de travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL Multiphysics. Finalement, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement.

La résolution du problème EF peut être faite dans COMSOL avec plusieurs types de solveurs directs ou itératifs. Nos simulations numériques ont été réalisées avec le solveur direct FGMRS.

##### ***IV.5.1. Création du domaine de travail***

La Figure (IV.2.), présente le système CND-CF en mode absolu à modéliser, il est composé par un domaine qui englobe une plaque d'aluminium présentant un défaut, au dessus duquel va se déplacer une bobine, cette dernière est utilisée comme émettrice et réceptrice.

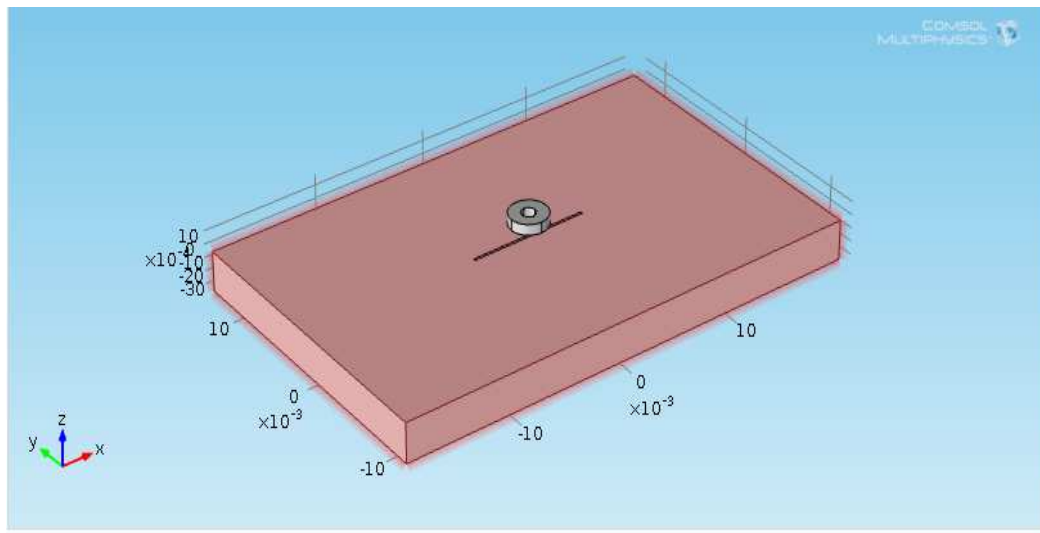


Fig. IV.2. Domaine de travail sous COMSOL Multiphysics

### IV.5.2. Caractéristiques géométriques et physiques

Le Tableau (IV.1.), englobe les caractéristiques géométriques et physiques du système à modéliser.

Plaque		Bobine		Défaut	
Largeur	40 (mm)	Hauteur	0.8 (mm)	Largeur	10 (mm)
Profondeur	25 (mm)	Rayon extérieur (r2)	1.6 (mm)	Profondeur	0.2 (mm)
Hauteur	3 (mm)	Rayon intérieur (r1)	0.6 (mm)	Hauteur	1.5 (mm)
Conductivité ( $\sigma$ )	$1e^6$ (S/m)	Nombre de spire	140		
Perméabilité ( $\mu r$ )	1	Conductivité ( $\sigma$ )	$60e^6$ (S/m)		
Permittivité ( $\epsilon r$ )	1	Intensité de courant	0.8		

Tableau IV.1. Paramètres géométriques et physiques du système à modéliser

### IV.5.3. Maillage

Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme) sont proposées par COMSOL Multiphysics. Le type d'élément utilisé conditionne en partie le nombre de degrés de liberté nécessaire au final pour la résolution numérique du problème. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes, [20], Figure (IV.3.).

Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue. Le maillage est très extrêmement fin au niveau du défaut, encore plus fin pour la bobine et la plaque et normal dans le reste du domaine.

La géométrie finalisée a 4 domaines, 28 frontières, 60 arêtes et 40 points. Le maillage complet consiste en 98209 éléments de domaine, 14682 éléments de frontière et 837 éléments d'arêtes.

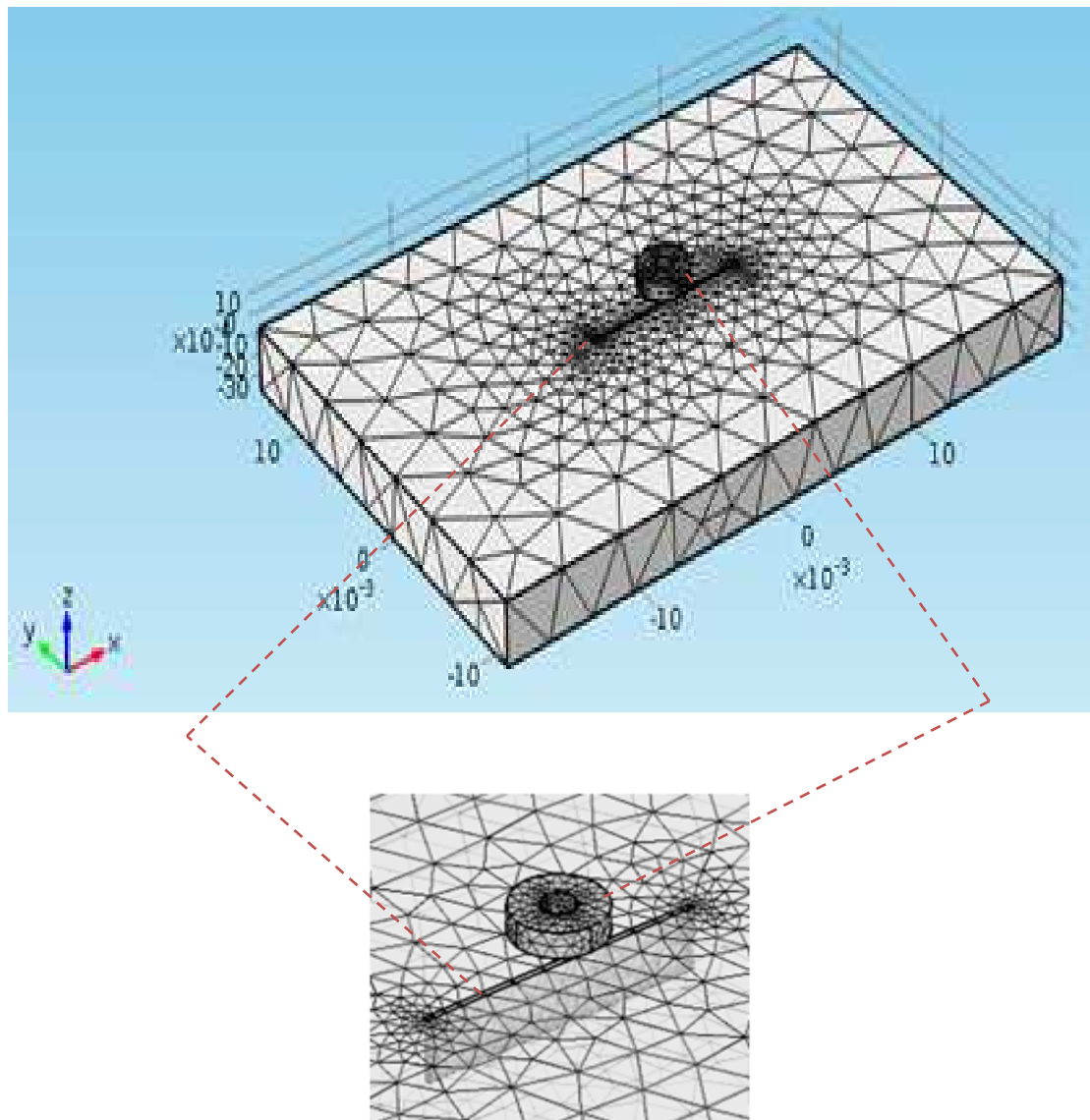


Fig. IV.3. Maillage de plaque à tester sous COMSOL Multiphysics

### IV.6. Simulation du CND par CF

Dans les sections précédentes, nous avons présenté les bases d'une modélisation tridimensionnelle par éléments finis dédiée au contrôle non destructif par courants de Foucault. Les principales étapes à l'application de la méthode des éléments finis au problème magnétodynamique ont été rappelées. La procédure générale de leur insertion dans un code éléments finis a été détaillée.

En exploitant le modèle ainsi décrit, nous pouvons passer à l'étape de simulation du CND par CF.

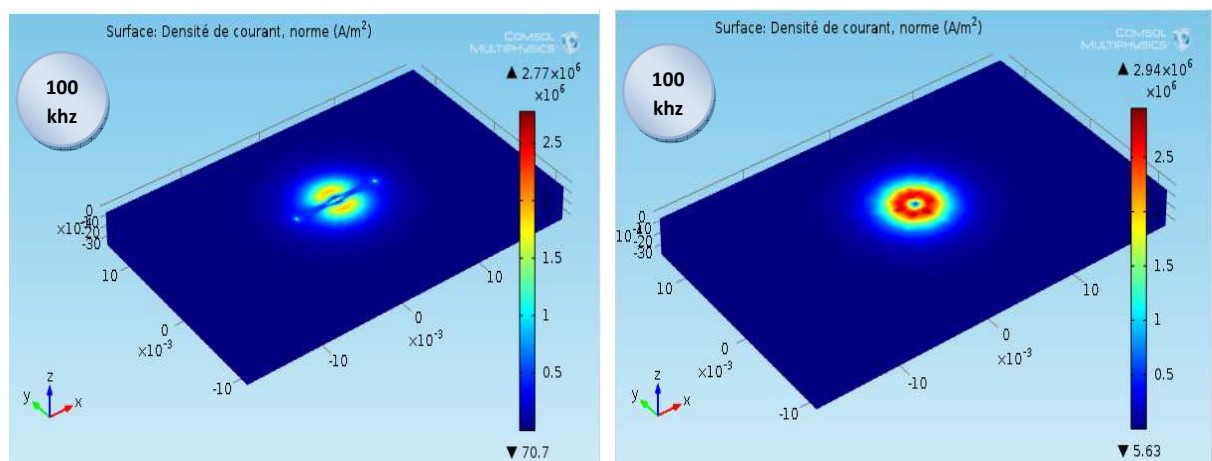
Notre objectif est de simuler, de manière simple et exploitable, le calcul de la variation d'impédance pour des défauts donnés. Nous finirons par montrer les fondements de construction de bases de données pour l'inversion, [16].

#### IV.6.1. Résultats de simulation pour défauts conducteurs

Une grande partie des travaux scientifiques dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault considèrent une fissure comme une rupture du réseau cristallin ou comme défaut avec manque de matière. Cependant, d'autres types de cas particulier de défauts peuvent apparaître sans qu'il y ait perte de matière ou fissures avec pertes de matière mais contenant des matériaux polluants conducteurs, [13].

##### III.6.1.1. Cartographie des courants induits

La Figure (IV.4.) illustre la cartographie des courants induits pour une variation de fréquence et des mêmes profondeurs de défauts dans la plaque avec et sans défaut.



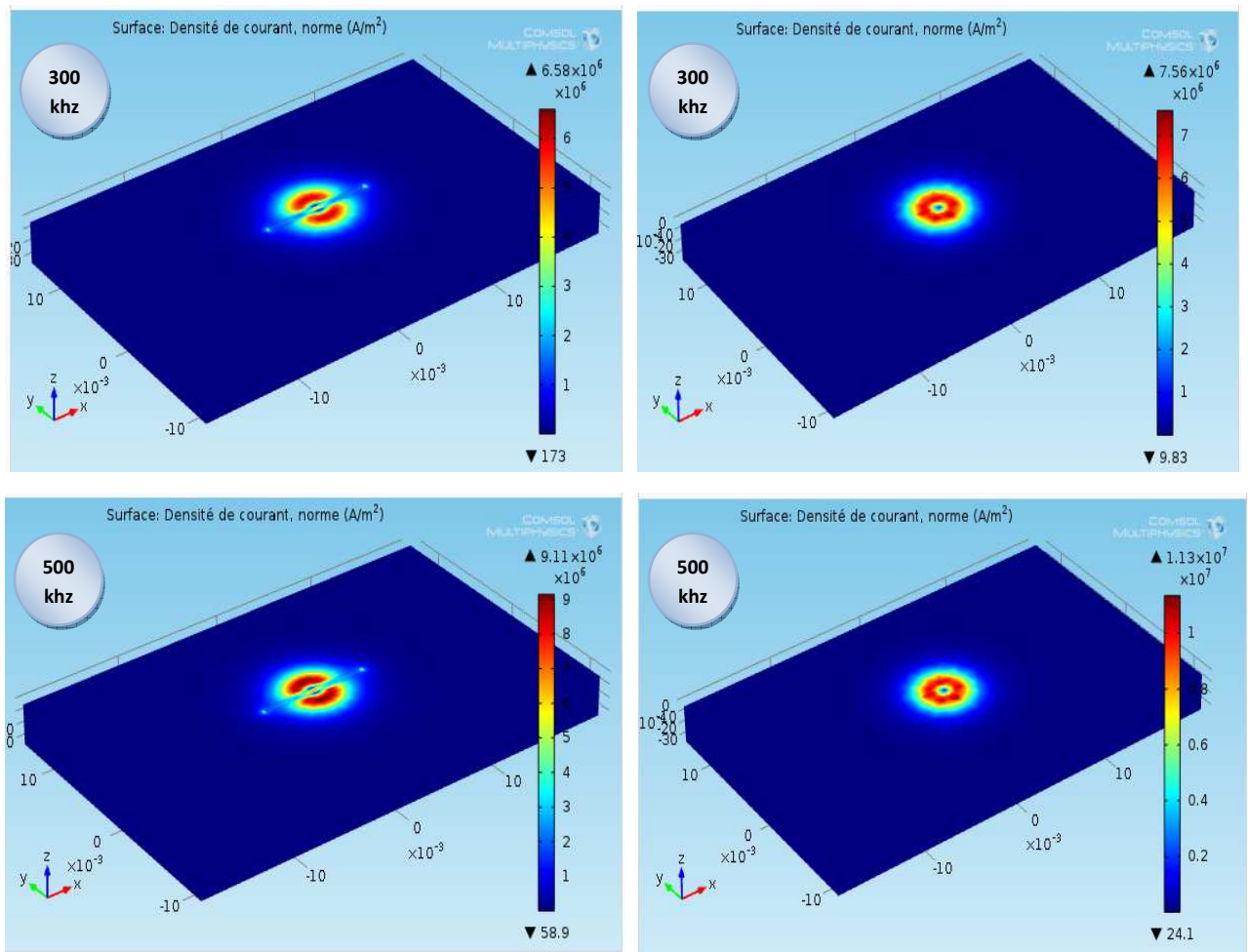


Fig. IV.4. Cartographies de la densité des courants induits

En effet, la Figure (IV.4.) montre la cartographie des courants induits dans le volume des défauts conducteurs. On constate que s'il n'y a pas de défaut au niveau de la plaque, les courants induits sont sous forme circulaire mais à l'existence de ce dernier il y a une discontinuité des courants induits au niveau de défaut.

La valeur des courants induits est proportionnelle à celle de leur conductivité électrique.

#### **IV.7. Paramètres influents sur CND-CF pour défaut fin**

La réponse et la sensibilité d'un capteur utilisé en CND-CF dépendent, uniquement des paramètres de structure qui sont la fréquence d'excitation et la géométrie de la sonde, et des paramètres de la cible à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique  $\sigma$ , sa perméabilité  $\mu$  et de la distance sonde/cible (lift-off).

### III.7.1. Effet de la fréquence

Pour différentes valeurs de fréquence, les figures (IV.5.) représentent les variations de la réactance et la résistance respectivement, en fonction de la position du capteur.

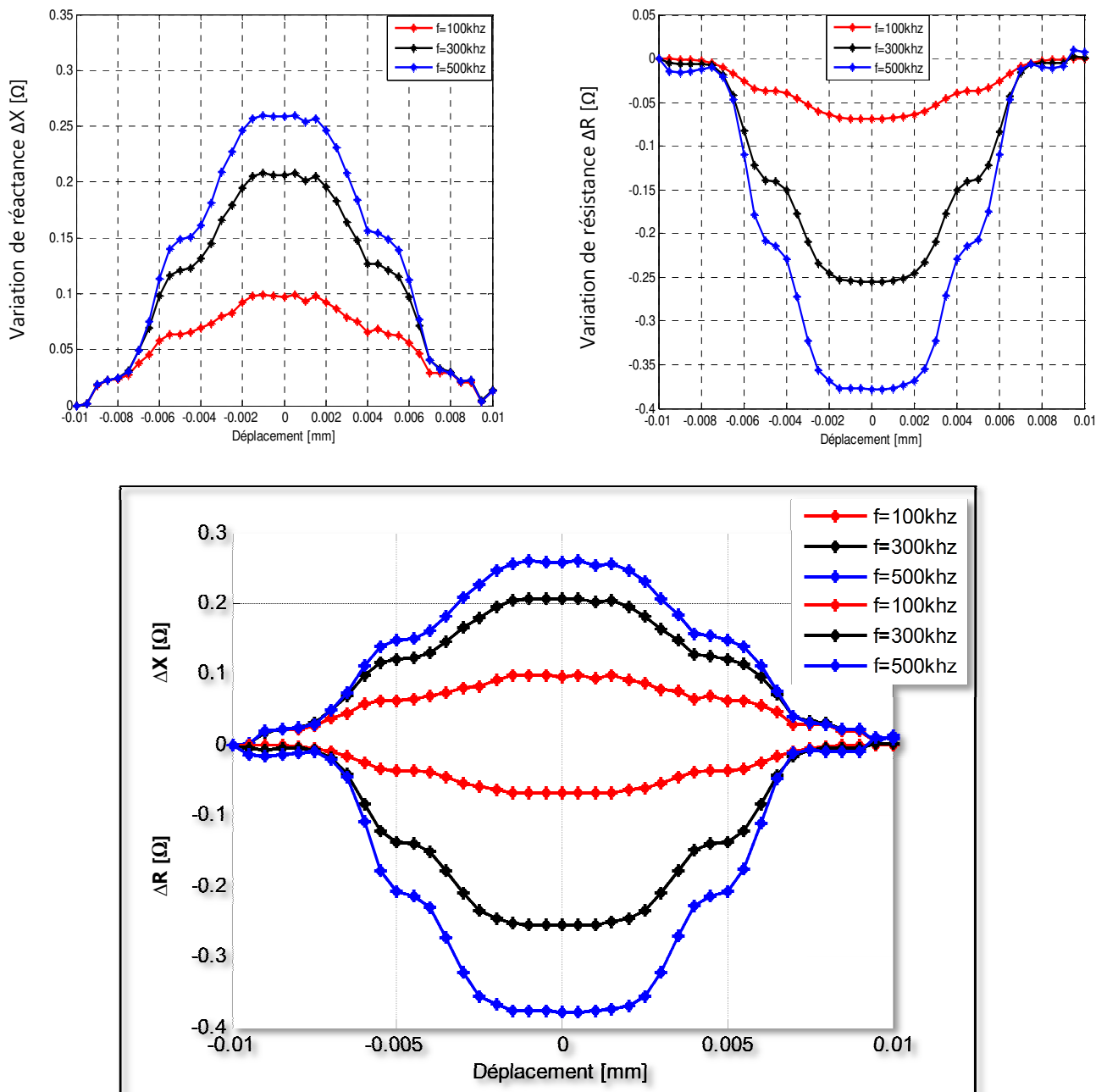


Fig. IV.5. Effet de la variation de la fréquence sur  $\Delta R$  et  $\Delta X$

D'après les résultats on constat que la variation de  $\Delta R$  et  $\Delta X$ , en fonction du déplacement du capteur, est liée à l'augmentation de la fréquence, lorsque la fréquence d'excitation augmente, les variations de la réactance et la résistance augmentent. Alors on peut dire que ces derniers proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence.

### IV.7.2. Effet de la variation du Lift-Off

La fréquence d'excitation étant 100kHz. Les figures (IV.6.) représentent respectivement la variation de la réactance et la résistance du capteur pour différentes valeurs du Lift-Off : 0.5mm, 1mm et 1.3mm.

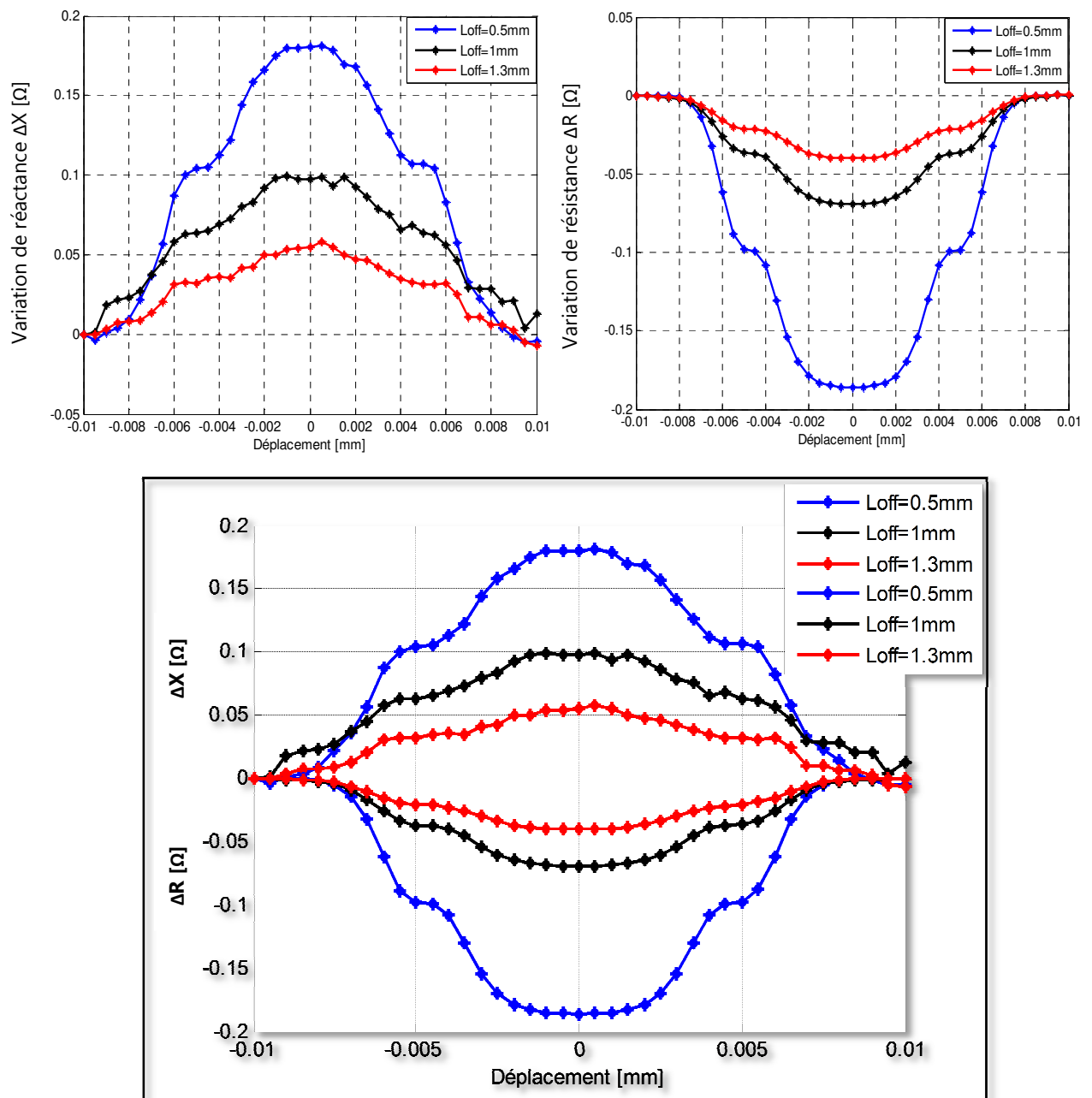


Fig. IV.6. Effet de la variation de Lift-Off sur  $\Delta R$  et  $\Delta X$

Les Figures (IV.6.), illustrent les résultats de simulation pour différentes valeurs du Lift-Off "Loff", distance capteur-pièce. On remarque que la variation de la partie réel et imaginaire, est inversement proportionnellement avec l'augmentation du lift-off. Tout

cela peut être justifié par le fait que l'effet du champ inverse des courants induits démunie avec l'augmentation du lift-off ( $L_{off}=1.5mm$ ).

### III.7.3. Effet de variation de la profondeur du défaut

Pour une fréquence d'excitation de 100kHz et un lift-off de 1.5mm, on fait varier la valeur de la profondeur du défaut comme suit : 2mm, 1.5mm, 1mm et 0.5mm. Les figures (IV.7.) montrent respectivement la variation de la réactance et la résistance en fonction de la position du capteur pour les différentes valeurs de la profondeur du défaut.

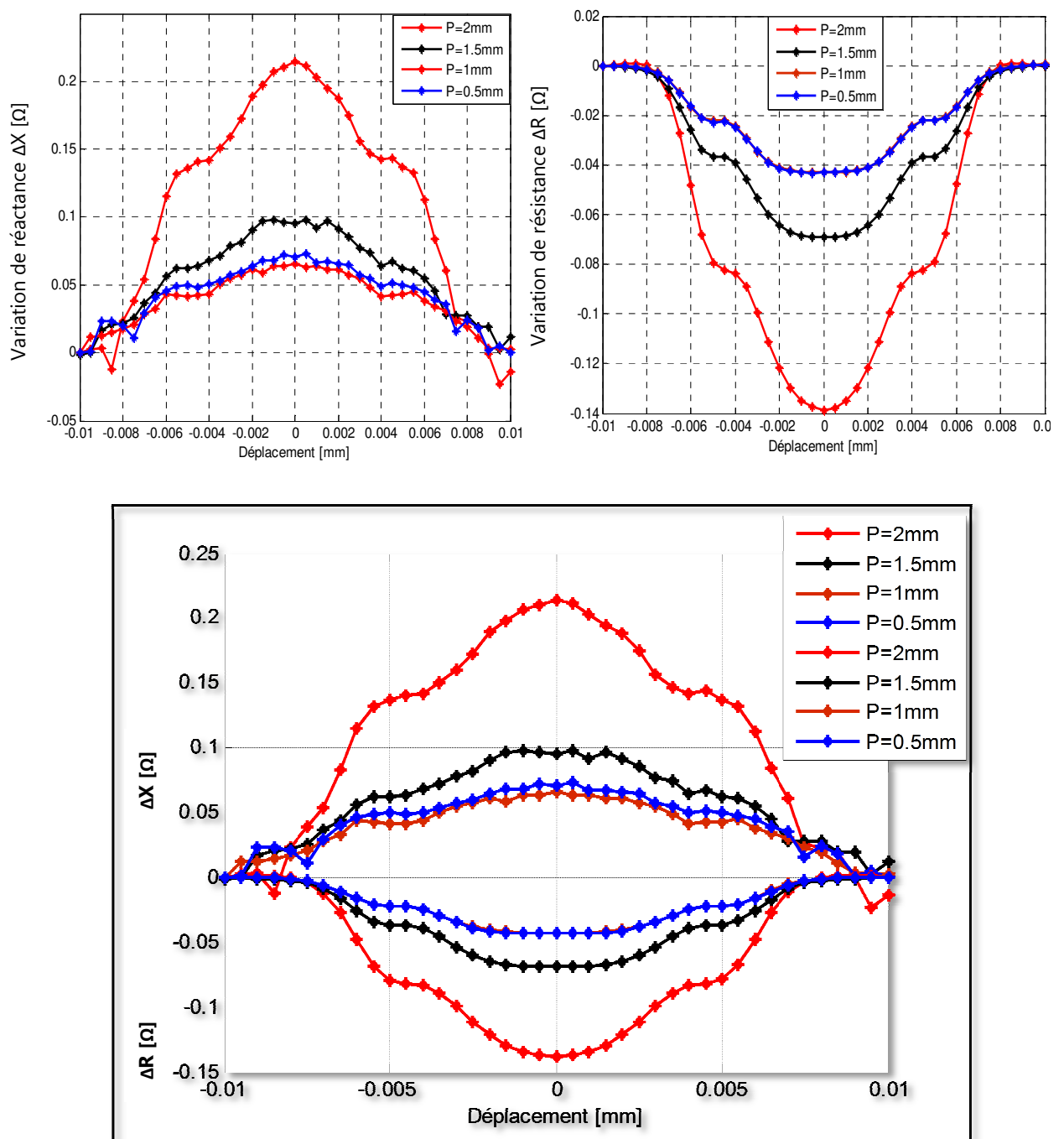


Fig. IV.7. Effet de la variation de la profondeur du défaut sur  $\Delta R$  et  $\Delta X$

Les Figures (IV.7.) montrent les résultats de simulation pour différentes valeurs de profondeur de défaut. On constate que l'amplitude des signaux  $\Delta R$  et  $\Delta X$ , varie proportionnellement avec la variation de profondeur, et pour  $P=2.5\text{mm}$ , les courants induits sont limités sur l'épaisseur de peau.

### III.7.4. Effet de la conductivité

Pour une profondeur du défaut égale 0.5mm, les figures (IV.8.) illustrent la variation de la réactance et la résistance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux .

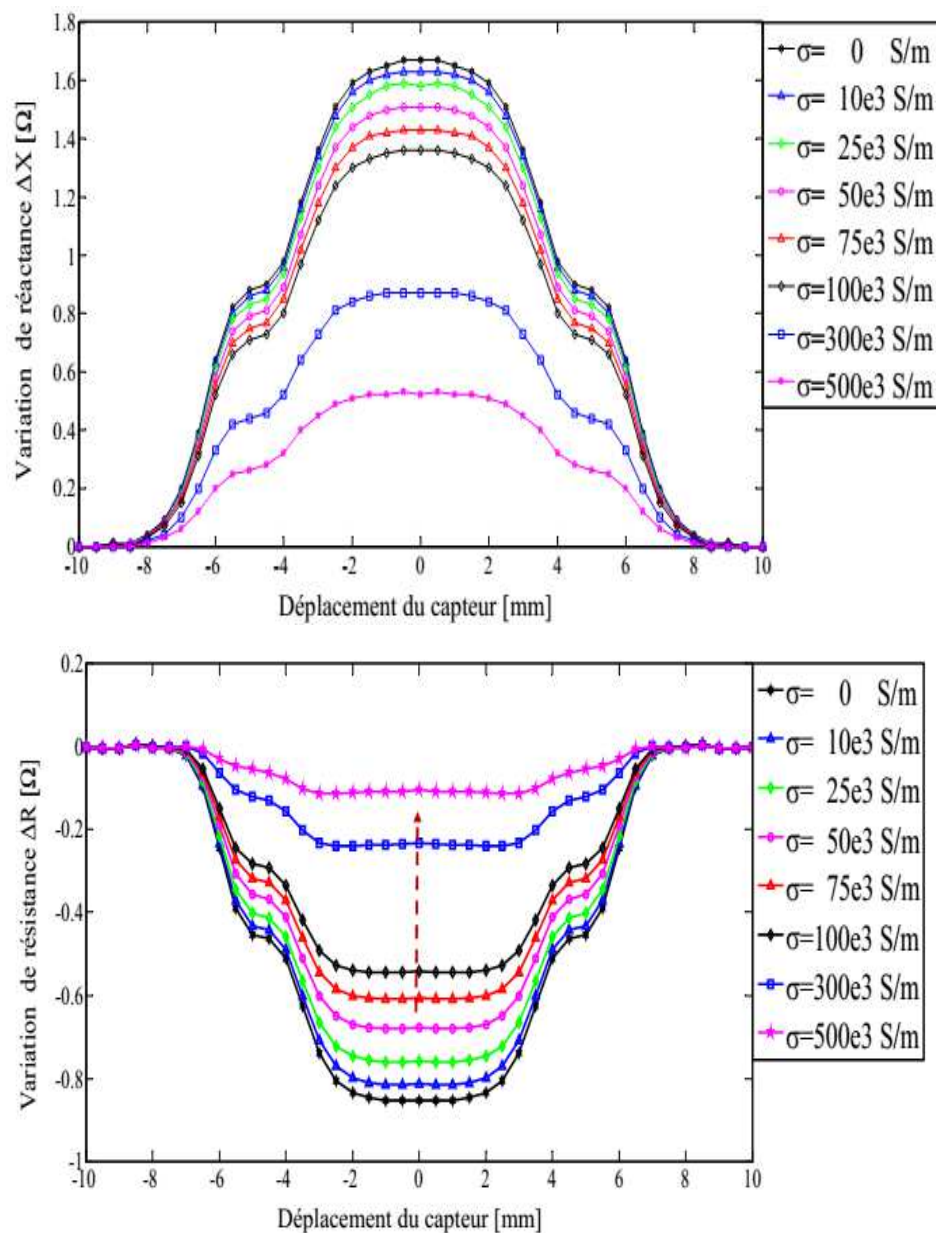


Fig. IV.7. Effet de la variation de la conductivité sur  $\Delta R$  et  $\Delta X$

Les Figures (IV.7.), illustrent les résultats de simulation pour différentes valeurs de conductivité électrique du matériau. On remarque, que l'augmentation de la conductivité du matériau conducteur se traduit par une diminution de l'amplitude des signaux de  $\Delta R$  et de  $\Delta X$ . Alors on peut dire que la variation d'amplitude de la partie réel et imaginaire, est inversement proportionnellement avec l'augmentation de la conductivité  $\sigma$ .

Lorsque le capteur est loin du défaut, les composants de variation d'impédance (variation résistance et variation de réactance) sont nuls. À mesure que le capteur approche du défaut, une augmentation de ces composants est observée.

### **III.8. Conclusion**

A travers ce chapitre, en premier lieu, un modèle 3D, du CND-CF en mode absolu avec fissure volumique, basé sur la méthode des éléments finis a été implémenté sous le logiciel COMSOL Multiphysics. Une formulation magnétique a été utilisée pour modéliser notre système, au cours de cette dernière, l'utilisation de cette formulation avec le logiciel COMSOL Multiphysics a permis d'économiser des ressources informatiques en particulier en ce qui concerne le temps de calcul et de la mémoire requise pour les simulations. L'approche que nous avons développée a permis de simuler le déplacement rectiligne du capteur, c'est-à-dire la simulation du mouvement a été prise en compte pour ce modèle géométrique en 3D.

En dernier lieu, l'étude de la sensibilité nous a permis de mettre en évidence l'effet des paramètres influant sur le CND-CF tels que le lift-off, la fréquence et les grandeurs géométriques du défaut, il en résulte que :

- ✓ Les composantes de la variation de l'impédance du capteur sont dépendent des grandeurs géométriques de la fissure, principalement de la profondeur ;
- ✓ Les composantes de la variation de l'impédance du capteur sont dépendent des paramètres tels que la fréquence et le lift-off ;

***Conclusion***

***Générale***

## Conclusion Générale

*Le contrôle non destructif (CND) par courants 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.*

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

*Dans ce travail, la première partie a été consacrée à la recherche bibliographique, le premier volet concerne les principaux procédés du contrôle non destructif les plus utilisés comme, l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, le contrôle par laser, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie, thermo-inductive, enfin les procédés par courants de Foucault. Quant au second volet, et partant du fait que le capteur inductif est l'élément de base du contrôle non destructif par courants de Foucault, il a été utilisé pour la mise en évidence des différents types de capteurs inductifs, leurs branchements électriques, leurs modes de contrôle et les différents paramètres influant sur le contrôle qui est basé sur la mesure de l'impédance.*

*La deuxième partie, a été réservée à la modélisation de l'interaction d'un champ électromagnétique avec une structure en matériau conducteur, régie par les équations de Maxwell dans le domaine CND-CF, ainsi qu'a la présentation des différentes formulations en champ électrique et magnétique. Le choix de l'approche de modélisation numérique de type éléments finis, fut conditionné par le fait que cette dernière est caractérisée par son efficacité, sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes pour la résolution des problèmes CND-CF.*

*Dans la dernière partie, nous avons développé un modèle tridimensionnelle 3D adapté aux problématiques du CND-CF pour une plaque conductrice avec défauts débouchants. Le contrôle est assuré par un capteur à courants de Foucault en mode absolu. Ensuite, nous avons clôturé cette partie par une étude de la sensibilité du signal  $\Delta X$  et  $\Delta R$ , concernant les différentes grandeurs géométriques et électriques en l'occurrence la fréquence, la profondeur, le lift-off ainsi que la conductivité.*

*Comme perspectives pour la continuité de ce travail :*

- ✓ *Réalisation d'un banc d'essai ;*
- ✓ *Caractérisation des matériaux ferromagnétiques ;*
- ✓ *Prendre en considération la géométrie des capteurs ;*
- ✓ *réalisation d'un prototype expérimental qui nous permet de valider les différents résultats obtenus ;*
- ✓ *Modélisation des capteurs souples.*

***Références***

***Bibliographiques***

## *Références Bibliographiques*

**[1] : A. LAKHDARI**

« Etude Et Modélisation De Capteurs En Contrôle Non Destructif : Application A La Détection Des Fissures », thèse de magister en Electricité Industrielle, université de Biskra, 2011.

**[2] : Site Internet**, « Contrôle Non Destructif », [www.techno-Science.net](http://www.techno-Science.net).

**[3] : A. ABDOU**

« Contrôle Non Destructif Par Courant De Foucault : Etude Et Réalisation D'un Capteur Inductif », thèse de magister en Electrotechnique, université de Batna, 2006.

**[4] : M. VIENS**

« Essais Mécanique Et Contrôle Non Destructif », Ecole de Technologie Supérieur, université de Québec, 2006.

**[5] : B. BENRAMDAN**

« Contribution A La Modélisation Tridimensionnelle De La Technique Thermo-Inductive De Contrôle Non Destructif : Développement D'un Outil De Conception, D'analyse Et D'aide A La Décision », thèse doctorat en Electrotechnique et Génie Electrique, université de Nantes, 2009.

**[6] : M. BENCHARIF**

« Contrôle Par Ressuage », Vinçotte International Algérie, Mai 2007.

**[7] : J. ATTAL**

« Microscopie Acoustique », Technique de L'ingénieur R1402, 1996, pp. (1-10).

**[8] : N. BENHADDA**

« Modélisation Des Capteurs Inductif Par Courant De Foucault », thèse de magister en Electrotechnique, université de Batna, 2006.

**[9] : A. ABDOU**

« Contrôle Non Destructif (CND) : Etude Et Modélisation D'un Capteur Inductif A Courants De Foucault », thèse de doctorat en Electrotechnique, université de Batna, 2018.

**[10] : Y. CHOUA**

« Application De Méthode Des Eléments Finis Pour La Modélisation De Configurations De Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault », thèse de doctorat, université de Paris-Sud 11, 2010.

**[11] : T. BOUCHALA**

« Développement De Méthode Rapides Pour La Résolution Des Problèmes Directes Dans Les Systèmes De Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault », thèse de doctorat, université de Batna, 2014.

**[12] : M. LACROIX**

« Essais Non Destructif », Technique de L'ingénieur M110 et M111, 1996, pp. (1-17).

**[13] : N. BENHADDA**

« Modélisation Et Etude Pour La Réalisation D'un Capteurs A Courant De Foucault En Mode Différentiel Pour Le Contrôle Non Destructif (CND) », thèse de doctorat en Sciences, université de Batna 2, 2015.

**[14] : A. LATRECHE**

« Etude Du Contrôle Non Destructif Par La Méthode De Galèrkine Sans Maillage », thèse d'ingénieur en Electrotechnique, université de Batna, 2009.

**[15] : M. FRIJA**

« Contrôle Non Destructif », Institut Supérieur des Systèmes Industriels de Gabès.

**[16] : B. HELIFA**

« Contribution A La Simulation Du Contrôle Non Destructif En Vue De La Caractéristique Des Fissures Débouchantes », thèse doctorat en Electrotechnique et Génie Electrique, université de Nantes, 2012.

**[17] : F. AZZOUZ**

« Contribution A La Modélisation Des Tôles Ferromagnétique Par Impédance De Surface Et Elément Finis », thèse doctorat, université de Nantes, 2000.

**[18] : T. SLAMA et B. BOUZIANE**

« Modélisation Et Simulation D'un Dispositif Electromagnétique Par La Méthode Des Eléments Finis MEF », thèse d'ingénieur en Electrotechnique, centre universitaire Larbi Ben M'hidi D'Oum Elbouaghi, 2007.

**[19] : A. BEGHADAD**

« Etude Du chauffage par induction axisymétrique par la méthode des éléments finis », thèse d'ingénieur en Electrotechnique, université de Bejaia, 2002.

**[20] : H. Rimond**

« Performances et Apports des Capteurs Magnétiques à très Haute Sensibilité aux Systèmes de Contrôle non Destructif par Courant de Foucault », thèse de doctorat, université de Caen, 2006.

**[21] : J. DUMONT-FILLON**

« Contrôle non destructif (CND) », techniques de l'ingénieur R1400,1996, pp.(1-42).

**[22] : M. WANIN**

« Evaluation non destructive de la qualité des matériaux partie 1 et partie 2 » techniques de l'ingénieur R4130 et R4132 , 1996, pp.( 1-26 et 1-16) .

**[23] : M. LACROIX**

« Essais non destructifs », techniques de l'ingénieur M110 et M111, juillet 1996 pp.(1-21 et 1-17).

**[ 24] : P. BELTRAME**

« Modélisation de la perturbation électromagnétique au voisinage d'une fissure mince dans un matériau conducteur. Application au Contrôle Non Destructif par courants de Foucault », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2002.