

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Saad DAHLEB. Blida
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'Aéronautique



Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur
d'Etat en Aéronautique

Spécialité : construction et maintenance aéronautique
Option : Structure

Thème

Détermination de la répartition des
courants et contours des défauts par
l'utilisation des courants de
FOUCAULT (CF)

Présenté par :

MANSOURI Essaïd

SABRI Abdelkader

Encadré par :

M :M ZERGOUG

M^{elle} :S MAKHLOUF

2009-2010

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو محاكاة ظاهرة الإختبار غير التخريري لتيارات فوكولت " تيارات إيدي" مع وجود شائبة و ذلك بالإعتماد على النموذج الطاقوي لـ"IDA" و كذلك صياغته باستعمال طريقة العناصر المنتهية. المحاكاة أنجزت باستعمال برنامج « Matlab » و بالتحديد الأداة « pdetool » و ذلك من أجل اكتشاف الشائبة الموجودة في الصفيحة المعدنية و التمكن من رسم حدودها.

كلمات مفتاحية : الإختبار غير التخريري، تيارات فوكولت، العناصر المنتهية، شائبة.

Résumé :

L'objectif de ce travail est de simuler le phénomène de contrôle par courants de FOUCAULT en présence de défaut en appuyant sur le modèle énergétique de IDA et sa formulation tridimensionnelle en éléments finis. Cette simulation a été réalisée par le logiciel « Matlab » et précisément l'outil « pdetool », afin de détecter le défaut et tracer son contour.

Le travail a été validé par des résultats de simulation de logiciel CIVA® et Flux® qui sont spécialisés en CND par CF

Mot clés : CND, CF, IDA, Eléments finis, Défaut.

Abstract :

The objective of this work is to simulate the phenomenon of control by eddy currents in the presence of defect. The energy model of IDA and its three-dimensional formulation in finite elements will be our supports. This simulation was carried out by the software "Matlab" and precisely the tool "pdetool", in order to detect the defect and to trace its contour.

Work was validated by results of simulation of software CIVA® and Flux® which are specialized in NDT by EC.

Key words : NDT, EC, IDA, finite elements, Defect.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma très chère mère, mon très cher père,

Ma sœur, et mes frères

Ainsi qu'à toute ma famille et mes amis.

MANSOURI Essaid

Remerciements

Nous voudrions remercier nos encadreurs :

M. M. ZERGOUG et M^{elle} .S.MAKHLOUF qui ont impulsé et orienté avec tact notre travaux, tout au long du projet, nous inspirant la rigueur nécessaire et un certain professionnalisme. Ils se sont fortement impliqués dans ce travail et nous leur en sommes reconnaissants.

Nos sincères remerciements vont aussi à monsieur le président et les honorables membres de jury pour avoir expertisé notre travail et nous avoir honoré par leur présence.

Liste des symboles

\vec{A}	: le vecteur potentiel (vecteur réel) en (Weber/m)
$\overset{\square}{A}$: le vecteur potentiel (vecteur complexe) en (Weber/m)
A_x, A_z, A_y	: les composantes de vecteur potentiel suivant x, y et z
$\{A\}$: la matrice réelle des valeurs inconnues du potentiel vecteur
$\left\{ \overset{\square}{A} \right\}$: la matrice complexe des valeurs inconnues du potentiel vecteur
A_{jk}	: $\frac{\partial}{\partial k} A_j$
a_{ij}	: coefficients dans la matrice $[G]$
\vec{B}	: densité de flux (vecteur réel) en (Tesla)
B	: l'excitation magnétique (Tesla)
B_x, B_y, B_z	: les composantes de la densité de flux suivant x, y et z
CF	: les courant de foucault
CND	: Contrôle Non Destructif
NDT	: NonDestructive Testing
d	: la profondeur de défaut en (mm)
D	: l'excitation électrique ($C.m^{-2}$)
$D(\vec{\chi}')$: la fonction de pondération
E	: le champ électrique en ($V.m^{-1}$)
EF	: élément finis
\vec{E}_0	: le champ électrique en absence du défaut en ($V.m^{-1}$)
$f(\)$: fonction à intégrer dans l'énergie fonctionnelle
$f(\vec{\chi}) g(\vec{\chi})$: les fonctions approchées de la densité de courant
f	: la fréquence en KHz
F	: énergie fonctionnelle
G	: le noyau de Green
$[G]$: matrice globale des coefficients réels
H	: le champ magnétique ($A.m^{-1}$)
\vec{H}_0	: le champ magnétique en absence du défaut en ($A.m^{-1}$)
i_{exc}	: le courant d'excitation en (Ampère)
$\overset{\square}{I}_s$: la valeur de la courant de source (Ampere)
$[I]$: la matrice d'identité

j	: l'opérateur complexe
J_0	: la densité de courant à la surface en (Ampère)
\vec{J}	: vecteur de la densité de courant (réel) en A/m^2
J_0	: la densité du courant en absence du défaut ($A.m^{-2}$)
$\Delta \vec{J}$: les courants différentielles ($A.m^{-2}$)
$\overset{\square}{J}$: vecteur de la densité de courant (complexe) en A/m^2
$\{J\}$: vecteur de la densité de courant (réel)
$\left\{ \overset{\square}{J} \right\}$: vecteur de la densité de courant (complexe)
$[J]$: Jacobian
J_s	: la densité de courant à la surface en (Ampère)
J_x, J_y, J_z	: les composantes de la densité de courant suivant x, y et z (A/m^2)
J_{ex}, J_{ey}, J_{ez}	: les composantes de la densité de courant de Foucault suivant x, y et z (A/m^2)
j_x	: la densité de courant à un point interne situé à une distance x de la surface en (Ampère)
J_z	: la densité de courant à la profondeur z
$\vec{k}(\vec{x}, \vec{x}')$: le courant au point \vec{x}
L	: inductance de la sonde en (Henry)
L_0	: l'inductance du bobine à vide
L'	: l'inductance en présence du défaut
L_i	: les coordonnées naturelles de l'élément tétraédrique
$[L]$: matrice triangulaire inférieur
m	: la condition d'interface limité
N	: nombre des noeuds
P_i	: énergie dissipée dans $i^{\text{ème}}$ élément (Joule)
P ou P_d	: énergie dissipée <i>totale</i> (Joule)
R	: résistance de la sonde (Ohm)
R_0	: la résistance du bobine à vide
R'	: la résistance en présence du défaut
s	: surface
S	: le vecteur de poynting
S_F	: la surface fermée
$[S]$: la partie réel de la matrice des coefficients dans l'équation des éléments finis
$[U]$: matrice triangulaire supérieure
v	: volume
v_i	: volume de l'élément i

W_i	: l'énergie stockée dans $i^{\text{ème}}$ élément en (Joule)
W ou W_s	: l'énergie stockée (totale)
X	: réactance d'une sonde de courant de Foucault (Ohm)
\hat{x}	: vecteur d'unité dans la direction de x
x	: coordonnée (cartésien) suivant x (metre)
\hat{y}	: vecteur d'unité dans la direction de y
y	: coordonnée (cartésien) suivant y (metre)
Z	: impédance de la sonde (Ohm)
z_0	: l'impédance du bobine à vide en (Ω)
z'	: l'impédance en présence du défaut en (Ω)
Z_{probe}	: impédance totale d'une sonde de courant de Foucault (ohm)
ΔZ	: la variation d'impédance (Ω)
\hat{z}	: vecteur d'unité dans la direction de z
z	: coordonnée (cartésien) suivant z (metre)
Φ	: le flux émis par le capteur à courants de Foucault en (Weber)
Φ_s	: la phase des courants induits à la surface
Φ_z	: la phase des courants induits à une surface de profondeur z
ψ	: le potentiel scalaire
∇	: opérateur différentiel
$\partial()$: différentiel partiel
δ	: la profondeur de pénétration en mm
τ	: la distance à une extrémité de fissure
ϵ	: le coefficient diélectrique en (V/m)
ϵ_0	: le coefficient diélectrique à vide en (V/m)
η	: le coefficient de remplissage
ω	: la pulsation
ρ	: la charge volumique ($C.m^{-3}$)
μ	: la perméabilité magnétique en (F/m)
μ_r	: la perméabilité magnétique en (F/m)
σ	: la conductivité électrique en Ωm^{-1}
σ_0	: la conductivité électrique du conducteur Ωm^{-1}
σ_f	: la conductivité électrique de défaut Ωm^{-1}
$\Delta\sigma$: la différence conductivité électrique en Ωm^{-1}
$[]^{-1}$: inverse d'une matrice
\rightarrow	: notation de vecteur
\square	: notation complexe de vecteur

Table des figures

<i>Figure I-1</i>	<i>Equipement d'aide au contrôle visuel</i>	7
<i>Figure I-2</i>	<i>Indication colorée ou fluorescente caractéristique du défaut</i>	8
<i>Figure I-3</i>	<i>Schéma de principe de mise en œuvre</i>	9
<i>Figure I-4</i>	<i>Le contrôle magnétique</i>	10
<i>Figure I-5</i>	<i>La radiographie</i>	11
<i>Figure I-6</i>	<i>Schéma de principe du contrôle par radiographie</i>	12
<i>Figure I-7</i>	<i>Utilisation dans le domaine aéronautique</i>	13
<i>Figure I-8</i>	<i>principe de détection des défauts par ultrason</i>	15
<i>Figure II-1</i>	<i>Création des courants de FOUCAULT</i>	17
<i>Figure II-2</i>	<i>Répartition des courants de Foucault sous une surface plane</i>	19
<i>Figure II-3</i>	<i>Diagramme d'impédance</i>	19
<i>Figure II-4</i>	<i>Application des CF en aéronautique</i>	22
<i>Figure II-5</i>	<i>Bobine au dessus de deux conducteurs plans illimités.</i>	25
<i>Figure II-6</i>	<i>Bobine entourant deux conducteurs cylindriques illimités coaxiaux.</i>	25
<i>Figure II-7</i>	<i>Modèles de Giordano, Meergelas et Atherton</i>	27
<i>Figure II-8</i>	<i>Fissure de section en V en présence de lignes de courant.</i>	28
<i>Figure III-1</i>	<i>Les types d'éléments finis</i>	31
<i>Figure III-2</i>	<i>Un volume qui contient une source d'énergie électromagnétique</i>	32
<i>Figure III-3</i>	<i>Élément tétraédrique</i>	37
<i>Figure IV-1</i>	<i>Maillage non régulier de la surface de résolution(203 nœuds et 352 triangles)</i>	48
<i>Figure IV-2</i>	<i>Maillage régulier de la surface de résolution(289 nœuds et 512 triangles)</i>	48
<i>Figure IV-3</i>	<i>Raffinement du maillage non structuré de la surface de résolution(11473 nœuds et 22528 triangles)</i>	49

<i>Figure IV-4</i>	<i>Représentation de la répartition du champ électrique</i>	50
<i>Figure IV-5</i>	<i>Représentation de la répartition du densité de courant</i>	50
<i>Figure IV-6</i>	<i>Représentation de la densité des courants de FOUCAULT en fonction de la profondeur $J=f(z)$</i>	51
<i>Figure IV-7</i>	<i>Représentation de la plaque avec défaut</i>	52
<i>Figure IV-8</i>	<i>Maillage de la plaque avec défaut(15078noeuds et 28480 triangles)</i>	52
<i>Figure IV-9</i>	<i>La détection du défaut (3D)</i>	53
<i>Figure IV-10</i>	<i>La répartition de la densité des CF</i>	53
<i>Figure IV-11</i>	<i>L'influence du défaut sur la densité des courants de FOUCAULT</i>	54
<i>Figure IV-12</i>	<i>Déviaton de la répartition du courant</i>	54
<i>Figure IV-13</i>	<i>Variation de l'impédance en fonction de la position du défaut</i>	55
<i>Figure IV-14</i>	<i>La forme du défaut</i>	55
<i>Figure IV-15</i>	<i>Plaque et défaut</i>	57
<i>Figure IV-16</i>	<i>Maillage de la plaque et du défaut</i>	57
<i>Figure IV-17</i>	<i>Variation d'impédance due au défaut rectangulaire</i>	59
<i>Figure IV-18</i>	<i>Influence du défaut sur les densités de courant de Foucault</i>	60

Table des matières

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Le contrôle non destructif (CND)	
Introduction :	3
I-1-Le contrôle non destructif (CND):.....	4
I-1-1-Définition :.....	4
I-1-2- Les objectifs du CND :	4
I-1-3-Importance de CND :.....	6
I-1-4- Les différentes techniques :	6
I-1-4-1- Le contrôle visuel (VT) :	6
I-1-4-2- Le ressuage(PT) :	8
I-1-4-3- La magnétoscopie(MT) :	9
I-1-4-4- La radiographie(RT) :.....	11
I-1-4-5- La thermographie Infrarouge(IRT) :.....	13
I-1-4-6- L'ultrasons(UT) :	13
Conclusion :.....	16
CHAPITRE II : Les CF et les modèles existants	
II-1-Les courants de FOUCAULT(CF) :.....	17
II-1-2- Répartition des CF :.....	17
II-1-2-1- Profondeur de pénétration standard(δ):.....	18
II-1-3-Diagramme d'impédance:	19
II-1-3-1-Influence des quelques paramètres sur le diagramme d'impédance :	20
II-1-4-Principe du CND par CF :	21
II-1-5-Application de CND par CF :.....	21
II-1-6-Avantages et inconvénients du contrôle par CF :.....	23
II-2-Les modèles existants :.....	23
II-2-1-Les modèles en absence de défauts :.....	23
II-2-1-1-Modèles axisymétriques :.....	24
II-2-2-Les modèles en présence de défaut :	26
II-2-2-1- Le défaut vu comme une source :.....	26
II-2-2-2-Approche par la résolution numérique des équations de Maxwell :	28
II-2-3-Le modèle de IDA :	29

CHAPITRE III : Le modèle de IDA et la formulation en éléments finis

Introduction :	30
III-1-La méthode des éléments finis en électromagnétique :	31
III-1-1.Equation de propagation dans un milieu conducteur :	31
III-1-2- Le théorème de Poynting[9] :	32
III-1-3-La Formulation Tridimensionnelle Des Élément Finis [5][6][7]:	35
IIII-1-3-1- Énergie Fonctionnelle pour les CF (3D) :	35
III-1-3-2- Discrétisation du domaine :	36
III-1-3-3-Les quantités mesurables :	38
III.5. Les techniques de solution pour les équations en éléments finis[2] :	40
III.5.1. Solution des systèmes linéaires des équations (Méthodes Directes) :	40
III.5.2-Solution des systèmes linéaires des équations (Méthodes Itératives) :	41
Conclusion :	43

CHAPITRE IV : Simulation numérique et interprétation des résultats

Introduction :	44
IV-1-Le Maillage :	44
IV-2-Les hypothèses :	44
IV-3-Approche numérique :	45
IV-3-1-Simulation de l'effet de peau (pièce sans défaut):	45
IV-3-2-Simulation d'un défaut rectangulaire:	46
IV-4-Résultats et interprétations :	47
IV-4-1-Simulation numérique de l'effet de peau :	47
IV-4-1-1-Maillage du domaine de résolution de l'EDP :	47
IV-4-1-2-interprétation des résultats :	51
IV-4-2-Simulation numérique de la détection d'un défaut :	52
Création de la géométrie :	52
Le maillage de la plaque :	52
Interprétation :	56
Validation des résultats [13],[14]:	56
Conclusion :	59
Conclusion générale	61

Introduction générale

La modélisation numérique des champs électromagnétiques a pris un essor important ces dernières années, car elle offre la possibilité de résoudre des problèmes qui étaient inabordable par les méthodes classiques, en raison de leur complexité.

La solution des problèmes tridimensionnels de champ électrique était et reste une procédure compliquée et chère, en termes de ressources et de temps. Dans le domaine de l'essai non destructif, n'importe quelle défectuosité réaliste est tridimensionnelle. La caractérisation de telles défectuosités exige des spécifications complètes des champs magnétiques et des densités de courant à proximité des défectuosités, une tâche qui peut être accomplie par la solution des équations de champs tridimensionnelles.

Un des rôles principaux d'un modèle théorique dans le **CND**, est de faciliter une bonne compréhension de la physique concernée dans l'interaction de la source d'énergie et du matériau examinés. Cette interaction est compliquée par la présence des défauts, alors qu'une approximation bidimensionnelle de la situation tridimensionnelle n'est pas toujours adéquate.

Le développement des modèles théorique pour le **CND** est important particulièrement depuis que les résultats obtenus par les méthodes classiques non pas été concluants.

L'écriture des équations aux dérivées partielles (EDP) qui décrivent tous les phénomènes électromagnétiques, s'obtient à partir des équations de Maxwell et les propriétés des matériaux qui composent les systèmes étudiés telles que la perméabilité magnétique et la conductivité électrique.

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude, compte tenu

des conditions aux limites. Elles consistent à mettre en relief un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des champs (potentiel vecteur magnétique, champ électrique, densité du courant ...etc.

Le travail effectué dans ce mémoire est basé sur le modèle de **IDA**. L'objectif de ce travail est la simulation à travers les énergies stockées et emmagasinées, permettant de déterminer les variations d'impédance. Elle a pour but la détection, la position de défaut ainsi que sa forme. L'outil **MATLAB** permettra d'effectuer le traitement des données.

Pour cela notre travail est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à une recherche bibliographique concernant le contrôle non destructif et ses techniques.
- Le deuxième chapitre parle particulièrement des courants de **FOUCAULT**.
- Le troisième chapitre décrit le modèle **IDA** et sa formulation en éléments finis.
- Le dernier chapitre représente l'approche physique et la description des résultats de simulation obtenus à travers le modèle **IDA**.

Chapitre I

Le contrôle non destructif (CND)

Introduction :

On regroupe sous l'expression « essais non destructifs ou encore contrôles non destructifs » (ce dernier évoque mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) l'ensemble des techniques et procédés aptes 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 des contrôles non destructifs 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.

En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce.

Situé ainsi aux frontières de la métrologie, de l'instrumentation industrielle, scientifique et médicale, le domaine des contrôles non destructifs constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent des industriels fabricants ou distributeurs spécialisés, des organismes d'étude et de formation, des sociétés de service, ainsi que les départements spécialisés d'un certain nombre de grosses entreprises industrielles fortement utilisatrices de ces techniques.

I-1-Le contrôle non destructif (CND):

I-1-1-Définition :

Comme son nom l'indique, le Contrôle Non Destructif (CND)(NDT : Non Destructive Testing) a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Cette définition est assez large. Pour être plus précis, disons que le CND concerne exclusivement la « santé de la matière » et consiste à rechercher les défauts internes des structures, matériaux, pièces et assemblages. Les mesures dimensionnelles et de formes n'entrent donc pas dans le champ d'application du CND, sauf lorsqu'elles constituent un moyen détourné de mettre en évidence un défaut interne.

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

Les techniques de CND sont nombreuses, citons :

- L'examen visuel
- Le ressuage
- La magnétoscopie
- La radiographie
- Les ultrasons
- La thermographie infrarouge
- Les courants de Foucault

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

I-1-2- Les objectifs du CND :

Le contrôle non destructif a pour but, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un

objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

La rapidité d'exécution :

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

Le coût :

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

La reproductibilité :

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

La fiabilité :

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

La sensibilité :

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesure. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesure sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

La résolution :

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

I-1-3-Importance de CND :

Le CND joue un rôle important dans le contrôle de qualité d'un produit. Il est employé pendant toutes les étapes de sa fabrication. Il est aussi employé pour surveiller son comportement durant son emploi et pour surveiller la qualité du :

- Matières premières qui sont employées dans la construction du produit.
- Processus de fabrication qui est employé pour fabriquer le produit.
- Le produit fini avant lui est mis en service.

L'utilisation de CND pendant toutes les étapes de la fabrication a comme conséquence les avantages suivants :

- Elle augmente la sûreté et la fiabilité du produit lors du fonctionnement.
- Elle diminue le coût du produit en réduisant la chute et en conservant les matériaux, le travail et l'énergie.
- Elle augmente la réputation du fabricant comme producteur des marchandises de qualité.

Tous les facteurs ci-dessus amplifient les ventes du produit qui apportent des avantages plus économiques au fabricant.

Le CND est également appliqué lors de contrôle courant ou périodique de la qualité des usines et des structures pendant le service. Ceci augmente la sûreté de l'opération.

I-1-4- Les différentes techniques :

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement.

I-1-4-1- Le contrôle visuel (VT) :

Les procédés optiques constituent un type de techniques qu'il convient de séparer en deux catégories, selon que le contrôle soit automatisé ou non. L'examen visuel, contrôle le plus élémentaire, est la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision. Il reste cependant sujet aux inconvénients liés

à l'œil humain, c'est-à-dire, une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité. De façon automatique, sont réalisées en général des acquisitions d'images par balayage laser, ou par utilisation de barrettes de capteurs optiques, suivies de traitement d'images tel que le seuillage ou la reconnaissance de formes.

Ce type de contrôle, beaucoup plus efficace, est cependant beaucoup plus complexe à mettre en œuvre et par conséquent restreint à des applications très particulières.

Il faut toutefois rappeler que les outils naturels de cette technique (l'œil et le cerveau) sont très sensibles à différents facteurs, difficiles à chiffrer et à répertorier comme ceux d'ordre psychique ou physiologiques. La qualité d'observation de l'œil se dégrade avec l'âge, elle est très sensible à l'état d'esprit et à l'expérience de l'observateur, elle reste limitée en termes de dimension du défaut et rend problématique le contrôle des objets en mouvement.

L'utilisation de moyens d'aide optique à la vision tels qu'une loupe binoculaire, un microscope, un endoscope, un microscope, la télévision..., donne au contrôle visuel une nouvelle dimension. Ces techniques, bénéficient actuellement des moyens numériques d'acquisition et de traitement d'images, qui leurs donnent beaucoup plus de rapidité, d'efficacité et de fiabilité. Ces techniques exploitent pleinement les moyens modernes de l'informatique et de l'intelligence artificielle.

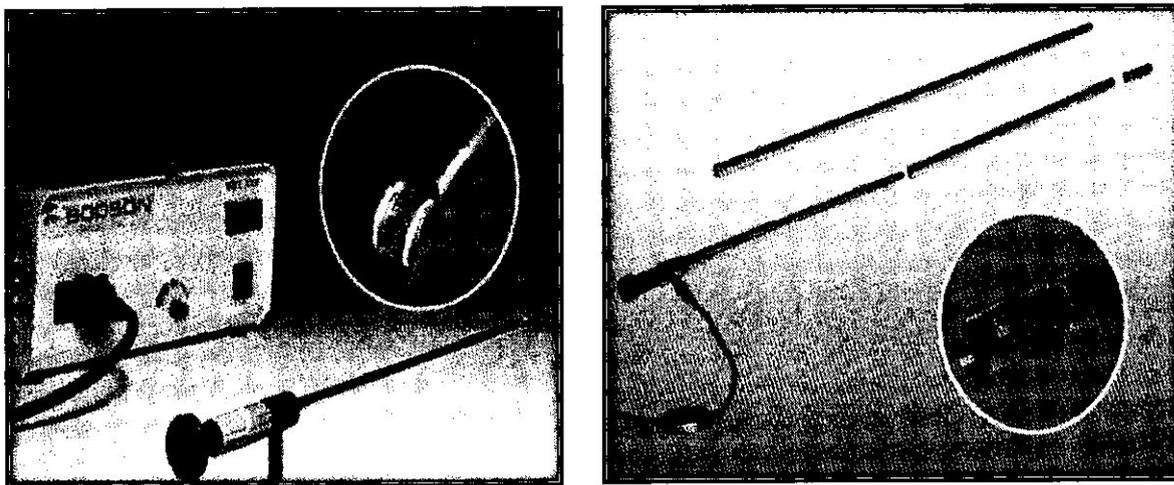


Figure I-1 : Equipement d'aide au contrôle visuel

Les applications de l'essai visuel incluent :

- Vérification de l'état extérieur du spécimen d'essai.
- Vérification de l'alignement des surfaces de contact.

- Vérification de la forme du composant.
- Vérifiant l'évidence de la fuite.
- Vérifiant les défauts latéraux internes.

I-1-4-2- Le ressuage(PT) :

Le contrôle par ressuage (Penetrant Testing : **PT**) est une méthode de contrôle non destructif, très utilisée dans l'aéronautique, l'industrie de production d'énergie, les transports et les prothèses chirurgicales.

Le ressuage consiste à appliquer sur la surface de la pièce à contrôler, préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent. Ce liquide pénètre, par capillarité, dans les ouvertures des défauts. Après un certain temps correspondant à la pénétration du liquide d'imprégnation dans les défauts, l'excès de liquide présent à la surface de la pièce est éliminé par lavage. La surface est ensuite recouverte d'un révélateur qui attire le liquide d'imprégnation retenu dans les défauts, ce que désigne le terme « ressuage ». Il donne ainsi une indication renforcée de ceux-ci, dont l'observation est alors généralement réalisée visuellement.



Figure I-2 : Indication colorée ou fluorescente caractéristique du défaut

Principe :

Depuis cette époque, la technique de ressuage a été perfectionnée et codifiée. On utilise actuellement, des pénétrants plus perfectionnés que l'huile. Ce sont généralement des produits pétroliers colorés ou fluorescents : le classement par sensibilité varie selon les normes applicables.

Pour les pénétrants fluorescents existent 5 niveaux (de 1/2 à 4). Il existe 2 niveaux de sensibilité pour les pénétrants colorés, selon la norme ISO 3452, alors que les documents américains ne font état que d'un seul niveau. Mais, quelle que soit la couleur, le principe reste le même :

- Après une préparation de surface très soignée, et appropriée au matériau à contrôler et aux polluants à éliminer de la surface , mais aussi de l'intérieur des éventuelles discontinuités, on enduit la pièce à contrôler de pénétrant, par pulvérisation électrostatique ou par immersion (parfois par pulvérisation de pénétrant en aérosol, notamment dans le cas de ressuage localisé sur une ou plusieurs zones désignées d'une pièce volumineuse),
- On lave la pièce pour éliminer le pénétrant qui est déposé en surface. Les conditions de lavage (pression, température, durée) sont déterminées par la gamme de ressuage, afin de laver soigneusement le produit en surface sans éliminer celui qui a pénétré dans les éventuels défauts débouchant de la pièce,
- On sèche la pièce à l'étuve, parfois à l'aide d'air comprimé (air sec) à très basse pression, ou de chiffons propres, secs et non pelucheux,
- On applique ensuite le révélateur, en poudre, en suspension ou en solution,
- Enfin, on examine la pièce, en lumière naturelle dans le cas de pénétrant coloré , sous éclairage UV (ultraviolet) dans le cas de pénétrant fluorescent , dans les délais impartis par la méthode de contrôle.

On établit ensuite un rapport de contrôle et/ou une déclaration de conformité.

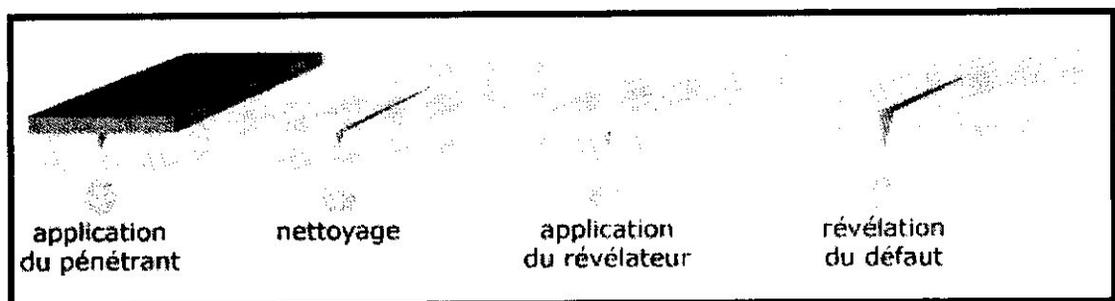


Figure I-3 : Schéma de principe de mise en œuvre

I-1-4-3- La magnétoscopie(MT) :

Le contrôle par flux de fuite magnétique consiste à soumettre la pièce ou une partie de celle-ci à un champ magnétique constant. Les défauts superficiels provoquent, par l'importante variation de réluctance qu'ils représentent, une déviation des lignes de

champ. Des flux de fuite magnétique sont engendrés localement. Ils sont ensuite généralement visualisés soit à l'aide d'un produit indicateur porteur de limaille de fer (magnétoscopie), soit à l'aide d'un film magnétisable (Magnétographie), soit à l'aide d'appareils de mesure de champ magnétique.

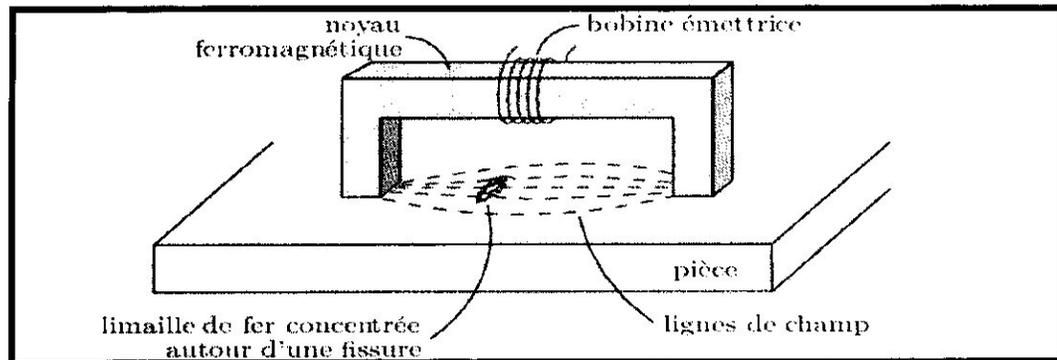


Figure I-4 : Le contrôle magnétique

Principe :

- Application du fond blanc sur la structure à contrôler(soudure).
- Application du champ magnétique avec électro-aimant suivant deux direction perpendiculaire.
- On place la pince du fond dans l'axe de la première , sur l'axe de la soudure et on pulvérise simultanément une liqueur magnétique.
- Le champ magnétique traverse l'assemblage à contrôler, s'il y a une discontinuité le champ magnétique sera perturbé et passe alors dans l'air.
Ce champ de fuite attire les particules ferromagnétiques pulvérisées.
- Les particules magnétiques forment alors une ligne noire contrastant avec le fond blanc.

Domaines d'application :

Le magnétoscopie est utilisé pour le contrôle :

- des soudures bout à bout ou d'angle.
- des pièces moulées (craquelures dans les congés de raccordement, réseaux de fissures superficielles...).
- des pièces forgées (craquelures correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion...).

Elle peut aussi intervenir :

- après traitement thermique.

- avant, pendant et après le soudage.

I-1-4-4- La radiographie(RT) :

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons γ , la matière à inspecter. Lors de leur passage à l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie. Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de la densité optique.

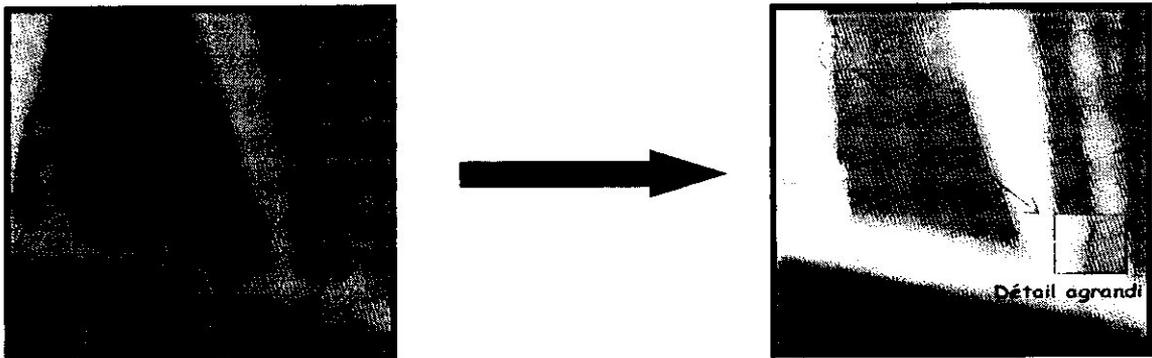


Figure I-5 : La radiographie

Principe :

Le principe est connu depuis pratiquement un siècle : il s'agit de former une image qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ionisant qui a traversé l'objet à contrôler.

Les rayons X et γ utilisés sont des rayonnements électromagnétiques, c'est-à-dire de même nature que la lumière ou les ondes radio. Ces rayonnements sont dits ionisants du fait de leur capacité à agir sur la matière et à créer des charges électriques.

Les rayons X, mis en évidence par Röntgen en 1895, sont créés en envoyant des électrons accélérés sur une cible en tungstène. Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre 10^{-7} m et 10^{-12} m, ce qui correspond à une gamme d'énergie allant de 10 eV à 1 000 keV. Toutefois, seuls les rayons X de longueur d'onde inférieure à $2,5 \cdot 10^{-10}$ m (c'est à dire d'énergie supérieure à environ 5 keV environ) ont un pouvoir pénétrant suffisant pour être utilisés industriellement. Avec les accélérateurs linéaires, on sait aujourd'hui produire des rayonnements X de quelques MeV, capables de

radiographier des épaisseurs d'acier souvent supérieures à 200 mm. Il va sans dire que ce type d'équipement est très coûteux.

Les rayonnements γ (gamma) sont créés par désintégration spontanée d'un élément radioactif tel l'iridium 192 (période de 74 jours) ou le cobalt 60 (période de 5,3 ans). Les énergies produites (entre 0,3 et 0,6 MeV pour l'iridium, entre 1,1 et 1,3 MeV pour le cobalt) permettent de radiographier des pièces plus épaisses qu'avec les rayons X produits par des moyens classiques : pour fixer les idées, les épaisseurs d'acier acceptables vont jusqu'à 20 mm avec les rayons X classiques, et jusqu'à 150 mm avec les rayons gamma.

Dans la plupart des applications industrielles, la formation de l'image radiographique s'effectue grâce à un film qui, après développement, est observé par transparence. La procédure est un peu complexe, prend du temps (quelques heures, si on veut une image de qualité) et coûteuse si on a beaucoup de contrôles. Mais c'est celle qui conduit – et de loin – à la meilleure qualité d'image. D'autres techniques existent pour obtenir l'image d'absorption des rayons X ou γ : les écrans fluorescents, la xérogaphie (l'image est obtenue en moins de deux minutes), les images enregistrées par caméra (assurant un contrôle en temps réel).

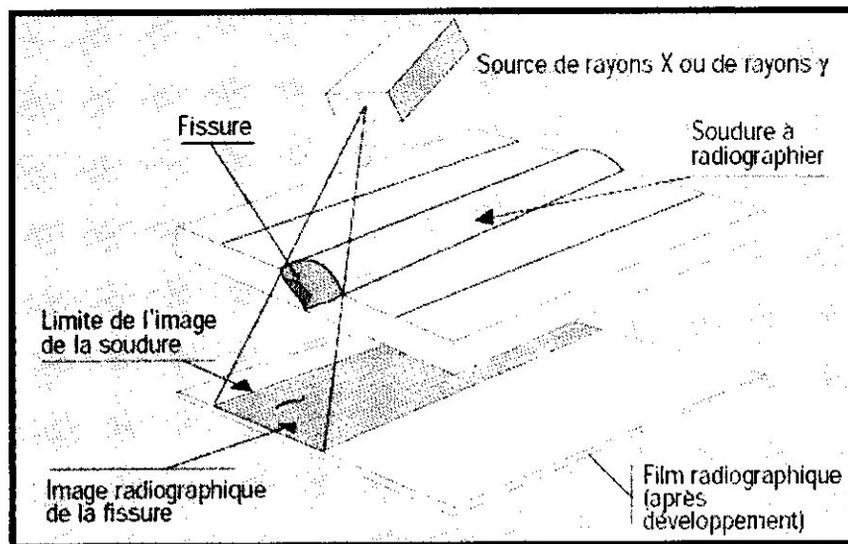


Figure I-6 : Schéma de principe du contrôle par radiographie

I-1-4-5- La thermographie Infrarouge(IRT) :

La thermographie infrarouge est devenue un des outils de diagnostic incontournables de la maintenance prédictive. En effet, la plupart des défauts se traduisent par un échauffement ou un refroidissement anormal. Seule la Thermographie Infrarouge vous permet d'observer rapidement une scène thermique et de mettre en évidence, sans contact, des différences de températures à la surface de tout type d'objet. Ainsi, en détectant ces anomalies, souvent invisibles à l'œil nu, la thermographie permet des actions correctives avant l'apparition de pannes ou problèmes coûteux.

Définition :

L'AFNOR définit la thermographie comme la « technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge ».

Principe :

La structure est sollicitée par un flux thermique qui la traverse. Une interruption dans la propagation de la chaleur engendre un écart de température Δt sur la surface opposée. La caméra infrarouge décèle l'anomalie au sein de l'image thermique de la surface.

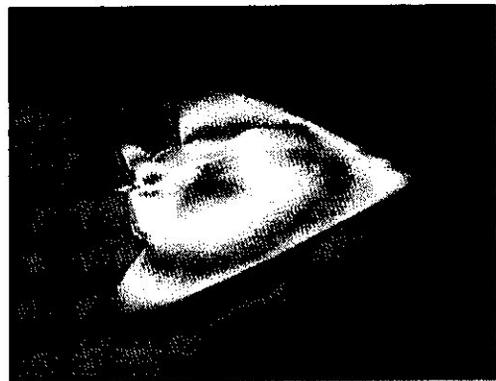
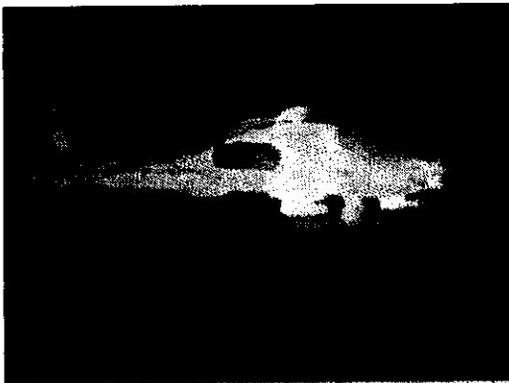


Figure I-7 :Utilisation dans le domaine aéronautique

I-1-4-6- L'ultrasons(UT) :

Le contrôle par ultrasons est une méthode d'examen relativement récente. Les premières applications industrielles ont été réalisées, à titre expérimental la veille de la seconde guerre mondiale, soit vers 1935. En raison de la lente évolution des matériels de contrôle tributaires des progrès de l'électronique, le développement du contrôle par ultrasons n'apparut qu'à partir de 1955 environ.

Depuis, cette méthode de contrôle constitue un puissant outil d'investigation. Elle présente à l'heure actuelle un vaste champ d'application qui s'étend aux matériaux métalliques, plastiques ou composites et aux milieux à structure hétérogène tels les bétons.

Cette méthode d'examen s'applique alors : aux produits moulés, aux produits forgés, aux produits laminés (tôles, rails), aux produits étirés (tubes, ronds,...), aux assemblages soudés, brasés ou collés..

Le contrôle par ultrasons permet de détecter des manques ou des discontinuités de la matière dans des produits à l'état d'ébauche ou fini quel que soit le mode d'élaboration de ceux-ci.

Toutefois, la propriété que possèdent les ultrasons est de se propager sur des distances de plusieurs décimètres, voire de plusieurs mètres. De ce fait, il est possible de détecter des défauts de faible importance dans des pièces dont l'épaisseur n'en permettrait pas le contrôle radiologique. En ce sens, le contrôle par ultrasons permet de mesurer les épaisseurs de parois dont l'une des faces est inaccessible. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kHz à plus de 100 MHz.

Principe :

L'angle de réflexion dépend de l'orientation du défaut. Pour être sûr de ne pas "perdre" des échos, on peut être amené à utiliser plusieurs transducteurs pour la réception (et non plus un seul, qui sert à la fois à l'émission et à la réception). Dans le même ordre d'idée, certaines applications ne se satisferont pas d'un transducteur droit (émission et réception perpendiculairement à la surface) et il faudra utiliser des transducteurs travaillant de façon oblique : ce genre de situation se présente par exemple lorsqu'on rencontre des défauts longitudinaux orientés perpendiculairement à la surface de la pièce, et donc très difficiles à détecter avec les transducteurs droits. Les transducteurs focalisés, qui permettent de focaliser l'énergie ultrasonore en certaines zones de la pièce à contrôler, contribuent également à détecter certains défauts difficiles d'accès pour les transducteurs classiques. Aux fréquences utilisées, les ultrasons ne se propagent pas dans l'air pour assurer le passage des ultrasons entre le transducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre eux un milieu couplant. Dans les contrôles manuels, l'opérateur applique un liquide (graisse, huile, gels) sur la pièce à contrôler et déplace

le traducteur sur le film ainsi constitué, en prenant bien soin de rester en contact. Dans les contrôles automatiques, où le déplacement des traducteurs est assuré par des bras motorisés, la solution consiste à immerger la pièce et le traducteur dans de l'eau ; ici, il n'est pas nécessaire que le traducteur soit en contact avec la pièce.

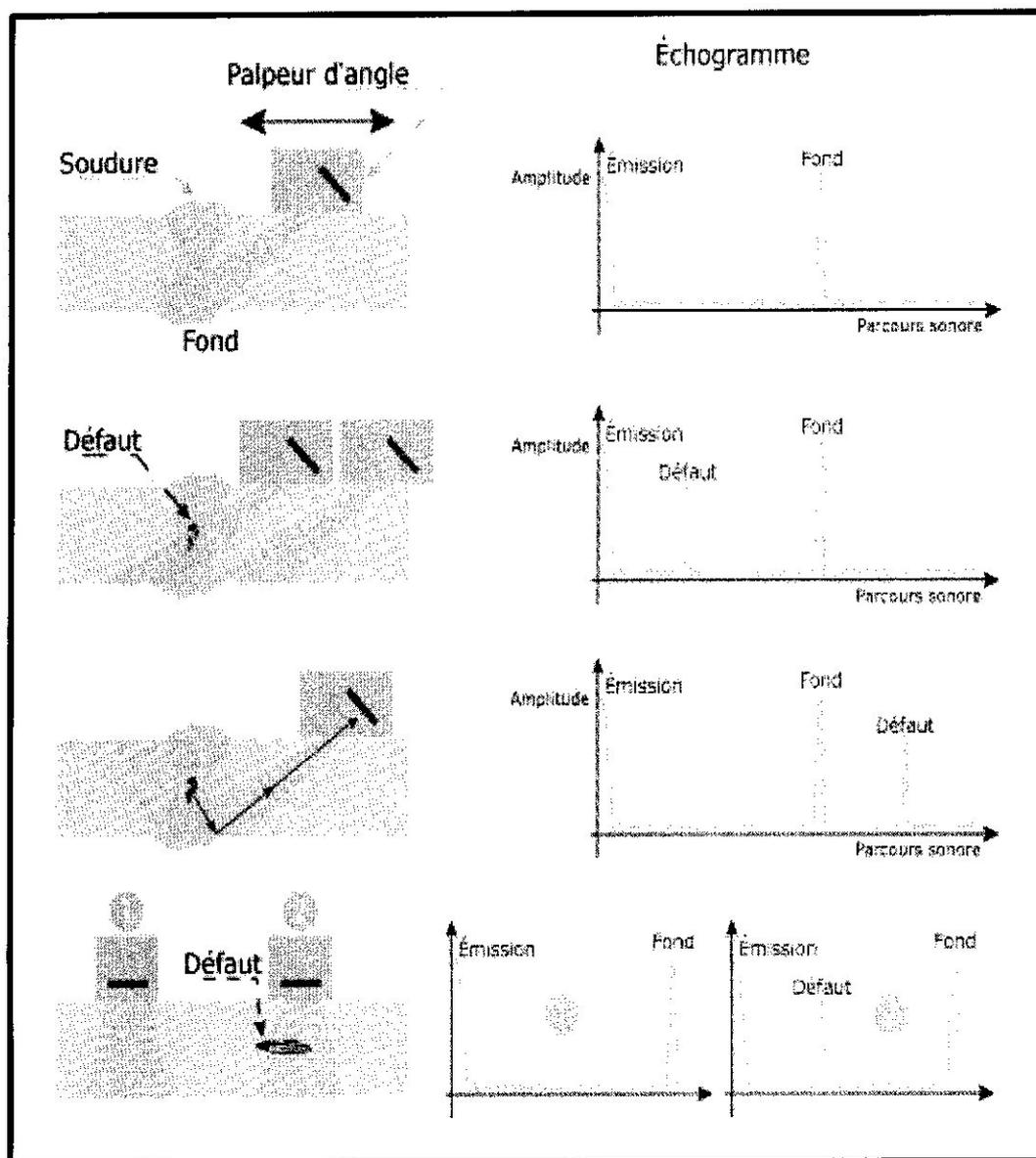


Figure I-8 : principe de détection des défauts par ultrason

Application :

Les applications des ultrasons sont variées :

- En médecine, avec notamment l'échographie et la thérapie par ultrasons focalisés ;
- Dans l'industrie, par exemple, en alimentaire pour la découpe des fromages, des pâtes, viandes, poissons, gâteaux à très haute vitesse et sans pertes ;
- En agriculture, par vibration (nébulisation) de l'eau qui se transforme en aérosol et alimente le système racinaire en oxygène ;
- En télémétrie, le sonar pour mesurer les distances; par exemple, dans l'industrie automobile, afin d'éviter les obstacles ;
- Calcul du débit par ultrason (via le temps de transit ou effet doppler) ;
- pour chasser des animaux réputés nuisibles, tels les rongeurs, sans produit chimique toxique (générateurs *Pest Chaser*) ;

Conclusion :

On a parlé brièvement dans ce chapitre de quelques techniques de contrôle non destructif, qui sont citées au début ; il nous reste une dernière méthode qui sera le sujet du chapitre suivant, où on va essayer d'éclaircir toute ambiguïté liée à cette méthode. Les courants de FOUCAULT (CF) et les modèles étudiants ce phénomène seront notre deuxième chapitre.

Chapitre II

Les CF et les modèles existants

II-1-Les courants de FOUCAULT(CF) :

Lorsque on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable, dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci, ce sont les courants de Foucault (physicien français 1819 - 1868). Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifient par la même 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).

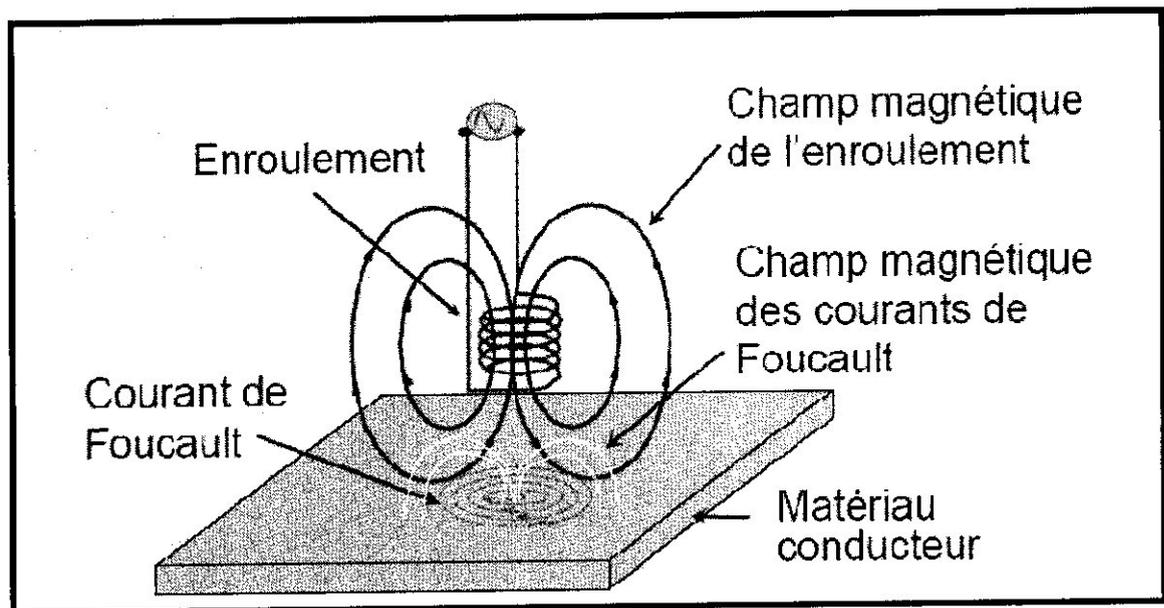


Figure II-1 : Création des courants de FOUCAULT

II-1-2- Répartition des CF :

Les courants de Foucault suivant des trajectoires fermées perpendiculaires au flux magnétique induit. Ils sont normalement parallèles aux spires du bobinage. Dans n'importe quelle position interne de la surface, loin du bord et des discontinuités, la distribution des CF est constante. Dans, ou près, du bord ou d'une discontinuité (ex : crique), la distribution des CF est perturbé.

L'addition d'une bobine de mesure permet de donner des informations sur la réaction des CF avec le matériau. De ces principes proviens la base de contrôle par CF.

II-1-2-1- Profondeur de pénétration standard(δ):

C'est la profondeur pour laquelle la densité de courant diminue d'un facteur de $\frac{1}{e}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (\text{II-1})$$

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{II-2})$$

ω = Pulsation

μ = Perméabilité

f = Fréquence

σ = conductivité

En remplaçant $\mu = \mu_0\mu_r$ avec $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{\sigma\mu_r f}} \quad (\text{II-3})$$

Cas d'un conducteur plan :

Il existe un rapport entre la densité du courant à la surface j_0 et un point interne situé a une distance x de la surface j_x (voir figure 2) il est donner par l'équation :

$$\frac{j_x}{j_0} = e^{-\beta} \sin(\omega t - \beta) \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$$\beta = \frac{-x}{\delta}$$

Un matériaux ferromagnétique est plus difficile à contrôler qu'un non magnétique.

L'augmentation de la perméabilité magnétique et la fréquence provoque une démunissions de la pénétration, les CF circulent en plus en plus en surface (effet de peau), la conductivité électrique influence moins sur la pénétration.

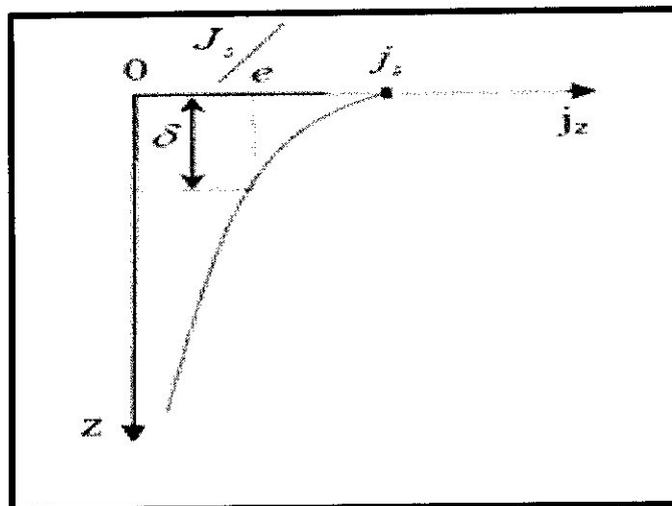


Figure II-2 : Répartition des courants de Foucault sous une surface plane

II-1-3-Diagramme d'impédance:

Le diagramme d'impédance est une représentation de l'impédance de la bobine. Ses parties réelle et imaginaire dans un plan complexe sont en fonction de la variation d'un paramètre donné. L'ensemble des courbes représentant les paramètres influent dans le plan d'impédance, peuvent être normalisé en courbe standard appelée diagramme d'impédance normalisé.

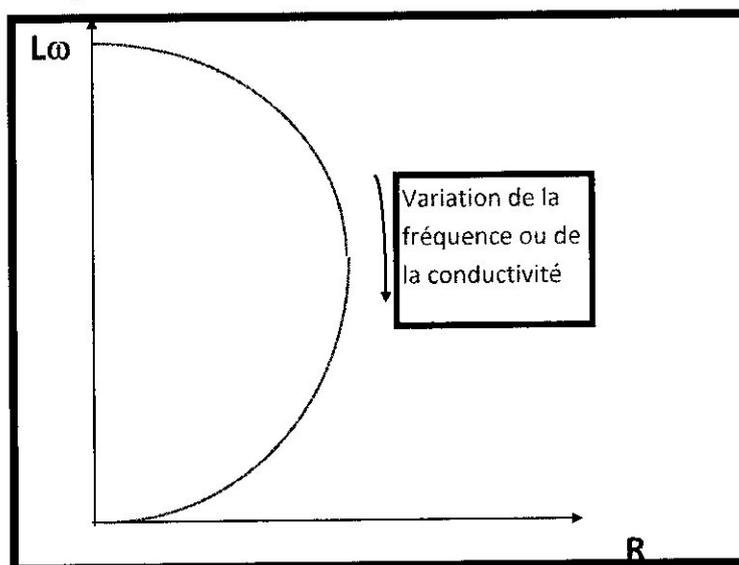


Figure II-3 : Diagramme d'impédance

Les points caractéristiques du diagramme :

- **Le point (0,0)** signifie que :
 - Matériau supraconducteur (σ très importante).
 - f très élevée, les CF circulent en surface (effet de peau).
- **Le point (0,1)** signifie que :
 - Pas de matériau (sonde vide)
 - Le matériau est isolant
 - Le courant d'excitation est continu

Différentes grandeurs sont dépendante linéairement de la fréquence.

Pour éliminer cet effet « d'amplification », on divise les impédances par la pulsation ω

Cela permet d'éliminer toute dépendance du nombre de spires

Le diagramme $L/L_0=f(R/L_0\omega)$ est appelé diagramme d'impédance normalisé.

II-1-3-1-Influence des quelques paramètres sur le diagramme d'impédance :***Influence de la conductivité électrique :***

Une conductivité nulle représentant un isolant correspond au point géométrique haut de la courbe. L'impédance de la sonde est due seulement à sa propre inductance, par contre une conductivité infinie représenterait les supraconducteurs, le point géométrique est présenté au bas de la courbe.

Une augmentation de la conductivité électrique correspond à un déplacement le long de la courbe d'impédance.

Influence de la fréquence :

L'influence de la fréquence pour une conductivité électrique et une perméabilité magnétique constante, est la même que l'influence de la conductivité électrique.

Pour une fréquence nulle correspondant au point haut de la courbe, les CF sont nul (champ magnétique constant). Par contre, pour une fréquence infinie, la constante de pénétration standard tend vers zéro, la circulation des CF est en surface.

Une augmentation de la fréquence à un déplacement le long de la courbe d'impédance à partir du haut.

Influence de la perméabilité :

A la différence de la conductivité électrique et de la fréquence, l'influence de la perméabilité se manifeste par un déplacement de la courbe d'impédance. Dès que celui-

ci se trouve différent de l'unité, les résultats peuvent masquer la variation des autres paramètres. Pour remédier à cette influence la saturation du matériau est recommandée.

Influence des défauts :

Elle est caractérisée par la modification des lignes de courants de Foucault induits dans le matériau. Une anomalie dans sa structure physique affecte ces caractéristiques électriques ou magnétiques. La localisation d'un défaut est possible par la concentration des courants de Foucault. Le choix de la fréquence permet de dimensionner le défaut en question.

II-1-4-Principe du CND par CF :

Une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère des courants induits, qui créent eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifiant par là-même 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 (ou de tout autre bobinage situé dans le champ).

Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau).

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

II-1-5-Application de CND par CF :

Contrôle des surfaces planes :

Le contrôle des surfaces planes, en ce qui concerne la recherche de petites criques, fissures ou hétérogénéités locales, peut être réalisé à l'aide d'une sonde pick up que l'on glisse avec ou sans contact, qui comporte une bobine plate souvent associée à

un noyau ferromagnétique destiné à concentrer et bien définir la zone sensible de la sonde.

De très fins défauts peuvent être ainsi détectés sur tout produit conducteur, toutefois, le caractère ponctuel de la zone sensible oriente plus volontiers l'usage du procédé vers le contrôle de petites surfaces correspondant aux zones critiques dans la dégradation d'une pièce mécanique plutôt que vers l'examen systématique de grandes surfaces comme les tôles.

C'est ainsi que les CF sont couramment utilisés pour la recherche de fissures de fatigue au cours des opérations de maintenance du matériel aéronautique. Le contrôle peut être manuel mais, dans certains cas de contrôle en série, on pourra aisément automatiser le procédé en utilisant un bras manipulateur pour déplacer la sonde et un système de traitement de l'information conduisant à une cartographie et à un archivage des résultats du contrôle.

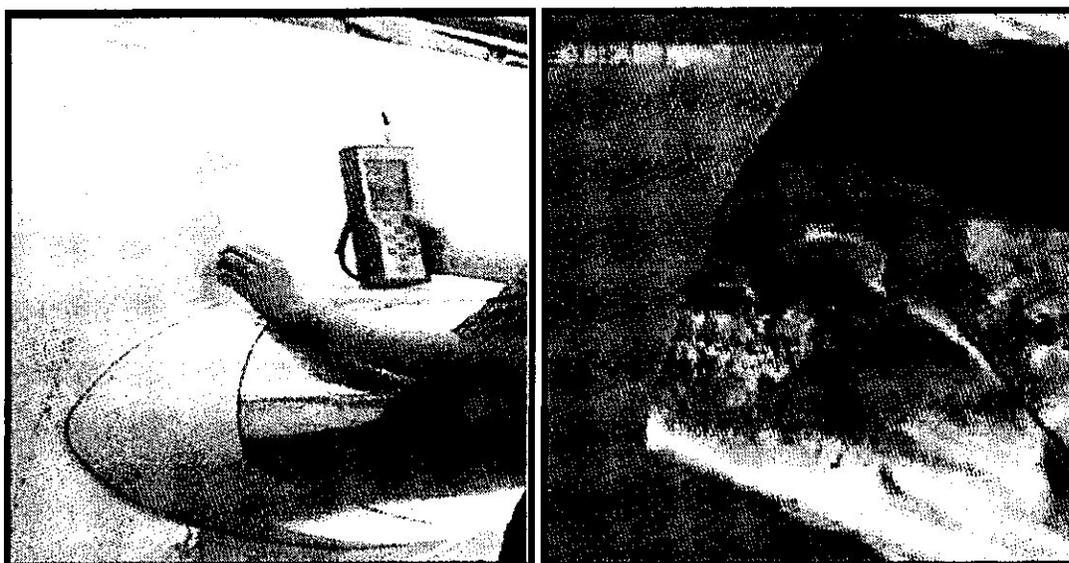


Figure II-4 : Application des CF en aéronautique

On trouve aussi quelques applications des courants de Foucault dans le domaine des mesures dimensionnelles, l'intérêt étant de disposer ainsi d'une méthode de mesure sans contact avec la pièce, ce qui n'est pas le cas en métrologie traditionnelle ou avec les procédés ultrasonores. On mesure ainsi des diamètres de tubes et l'on peut mettre en évidence des amincissements de parois.

Notons enfin que les procédés de détection par courants de Foucault sont utilisés en dehors de l'industrie dans des domaines très variés, dont le plus connu est sans doute celui de la détection d'objets métalliques dans un environnement isolant. Qu'il s'agisse des détecteurs de mines ou des appareils de sécurité dans les aéroports ou autres lieux

publics, on base la détection sur l'emploi de bobines de grandes dimensions susceptibles de créer un champ suffisamment volumineux pour être perturbé à bonne distance par la présence d'un objet métallique dans lequel vont se développer les courants de Foucault.

La mise au point et le réglage de ces appareils présentent les mêmes subtilités et utilisent les mêmes fondements théoriques que dans le cas des appareils dédiés à l'industrie.

II-1-6-Avantages et inconvénients du contrôle par CF :

Avantages :

- Rapidité de palpage et de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie)
- Détection possible à travers un revêtement surfacique
- Aucune préparation particulière de la surface à contrôler
- Qualité de détection indépendante de la vitesse de palpage
- Pas de nécessité d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation
- Contrôle non polluant. Pas de traitement d'effluents

Inconvénients :

- Investissement important
- Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites
- Détection de défauts débouchant en surface
- Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électrique.
- Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant
- Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants

II-2-Les modèles existants :

II-2-1-Les modèles en absence de défauts :

Dans la plupart des modèles en absence de défaut, le conducteur est de conductivité et de perméabilité uniforme ; sa géométrie est définie soit par un demi-espace, soit par un tube parfait infini, soit par une plaque infinie d'épaisseur constante.

Les modèles axisymétriques sont élaborés pour des configurations (capteur et

conducteur) qui admettent une symétrie suivant un axe de révolution. Les grandeurs physiques ne peuvent être exprimées qu'en fonction des deux coordonnées (r,z) d'un système de coordonnées cylindriques (r,θ,z) . Les modèles axisymétriques sont une classe particulière des modèles bidimensionnels.

II-2-1-1-Modèles axisymétriques :

L'un des premiers modèles en absence de défaut a été développé par Dodd et Deeds. Sous l'approximation des régimes quasi-stationnaires, ils déterminent la formule analytique du potentiel vecteur en tout point de l'espace. Sa connaissance permet de déduire les autres grandeurs physiques (impédance, courants induits, champs magnétique et électrique...). Le calcul du champ potentiel est réalisé pour les deux configurations axisymétriques suivantes :

- bobine au dessus de deux conducteurs plans illimités (Figure II- 5)
- bobine entourant deux conducteurs cylindriques illimités coaxiaux (Figure II- 6)

Dans le cas de la figure (Figure II-5), le conducteur 1 est une plaque infinie d'épaisseur finie, alors que le conducteur 2 est un demi-espace.

Dodd et Deeds étendent leurs calculs à des régimes non quasi-stationnaires et à d'autres configurations axisymétriques.

Luquire et Al ; et Cheng et Al généralisent les modèles de Dodd et Deeds à des conducteurs plans multicouches. Uzal et Rose appliquent le modèle de Cheng à des conducteurs plans dont la perméabilité et la conductivité varient continûment en fonction de la profondeur.

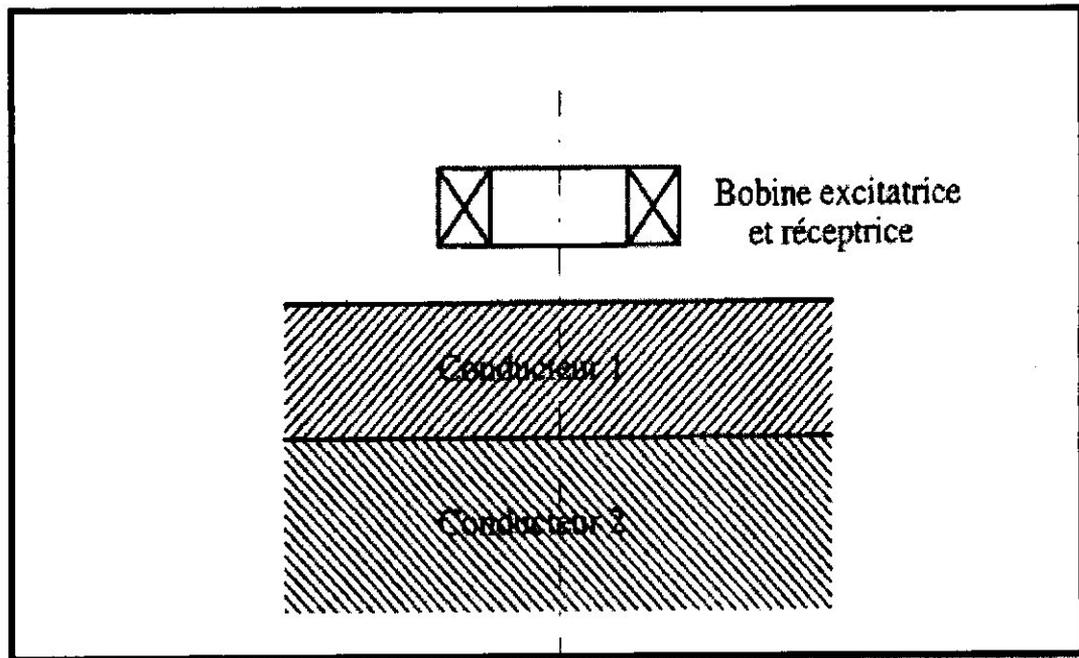


Figure II-5 : Bobine au dessus de deux conducteurs plans illimites.

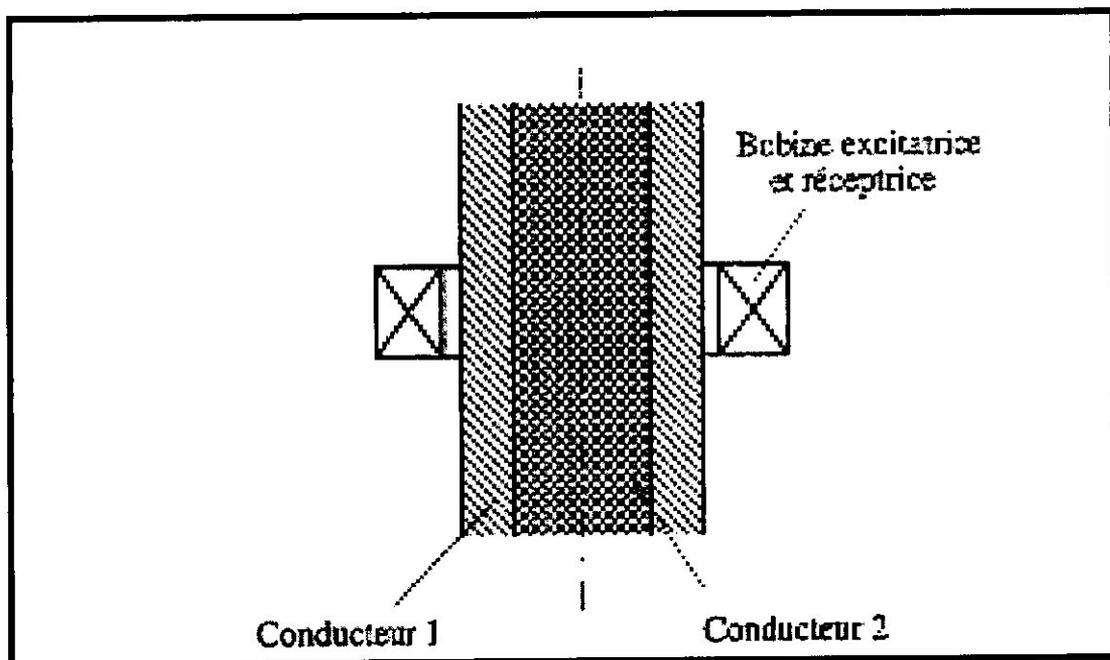


Figure II-6 : Bobine entourant deux conducteurs cylindriques illimites coaxiaux.

II-2-2-Les modèles en présence de défaut :

Suivant les mêmes hypothèses, les mêmes approximations et les mêmes approches s'appliquent indifféremment aux modèles bidimensionnels et aux modèles tridimensionnels en présence de défaut. La classification "modèles bidimensionnels" et "modèles tridimensionnels", utilisée pour les modèles en absence de défaut, ne peut être faite avec pertinence pour les modèles en présence de défaut.

Nous avons donc choisi de classer les modèles suivant leur approche. Cinq approches se sont dégagées :

- le défaut est vu comme une source électrique ou magnétique,
- sous certaines hypothèses, les équations de Maxwell sont résolues analytiquement,
- les équations de Maxwell sont résolues par des méthodes numériques,
- approche basée sur la méthode des perturbations,
- les modèles paramétriques.

II-2-2-1- Le défaut vu comme une source :

L'un des premiers modèles en présence de défaut a été développé par Burrows. Dans ce modèle, les défauts sont supposés éloignés de la surface du conducteur et sont de taille très inférieure à δ et aux dimensions de la bobine d'excitation. Par ces hypothèses, Burrows suppose qu'à l'intérieur des défauts, le champ électrique et le champ magnétique sont constants dans l'espace et égaux à ceux qui existent en absence de défaut. Les champs électrique et magnétique en présence de défaut sont calculés analytiquement en considérant les défauts comme des dipôles électrique et magnétique et en approchant leur géométrie par des ellipsoïdes.

Hill et Wait utilisent la même méthode pour calculer les champs électrique et magnétique produit par un défaut, situé dans un câble métallique, considéré comme infiniment long.

Burke et Rose modélisent une fissure comme une distribution continue de sources élémentaires de courant, appelées "vortex". Ce modèle ne s'applique qu'aux plaques contenant des fissures traversantes, dont l'épaisseur c est largement inférieure à δ ($c \ll \delta$). Les vortex engendrent les courants différence $\Delta \vec{J}$, correspondant à la différence des courants \vec{J} en présence de la fissure et ceux \vec{J}_0 en absence de la

fissure.

La difficulté de ce modèle réside dans la détermination de la fonction de pondération D . La variation d'impédance est calculée analytiquement pour les fissures droites de longueur a , soit infinie soit très courte ($\frac{ac}{\delta^2} \ll 1$, c : épaisseur de la plaque).

Pour les fissures de longueur intermédiaire, la variation d'impédance ne peut être déterminée que par des méthodes numériques.

Burke et Rose étudient en détail le cas de la fissure droite très courte, la variation d'impédance est calculée à partir des deux premiers termes de son développement asymptotique suivant $\frac{ac}{\delta^2}$. Burke étend le modèle au cas d'une plaque finie fissurée située au dessus ou en dessous d'une plaque non fissurée.

Dans des travaux parallèles, Giordano, Mergelas et Atherton ont montré, respectivement par un calcul aux éléments finis et par l'expérimentation, qu'une fente se comporte qualitativement comme un ensemble de trois bobines (Figure II-6). Une des bobines a pour axe le fond de la fente. Les deux autres ont pour axes les bords verticaux de la fente.

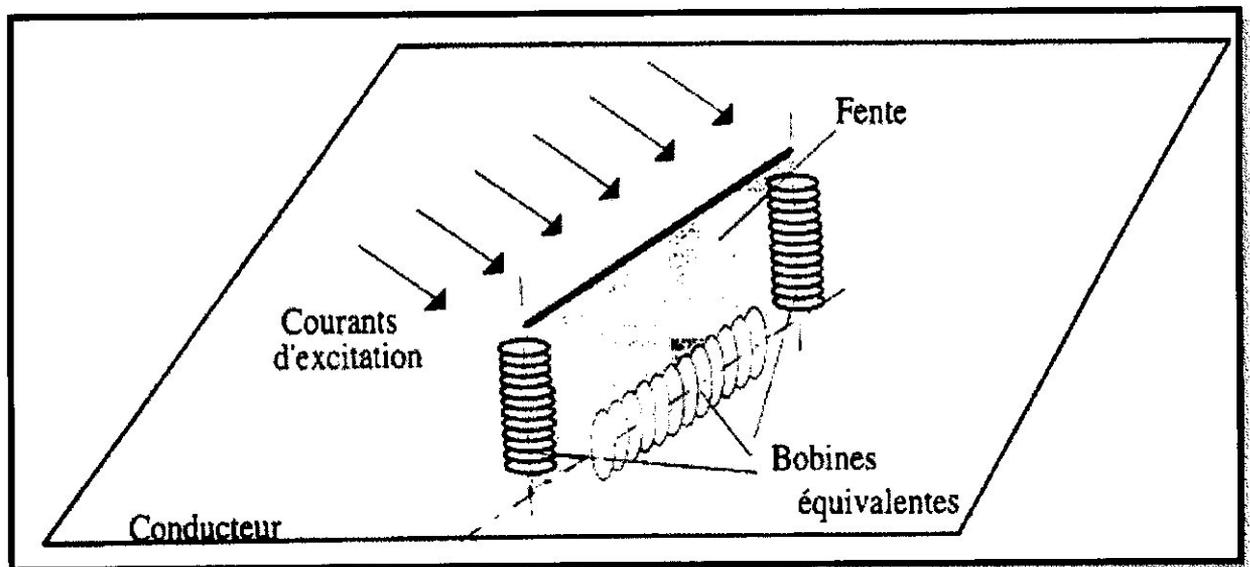


Figure II-7 : Modèles de Giordano, Meergelas et Atherton

II-2-2-2-Approche par la résolution numérique des équations de Maxwell :

A partir des équations de Maxwell, Sabbagh et Al expriment le champ électrique par une équation de Fredholm :

$$(\vec{E}_0 - \vec{E})(\vec{r}) = j\omega\mu_0 \iiint_{\text{Défaut}} G(\vec{r}, \vec{r}') \vec{E}(\vec{r}') (\sigma_0 - \sigma_f)(\vec{r}') d\vec{r}' \dots\dots\dots (II-5)$$

Où G est un noyau de Green, σ_0 et σ_f sont les conductivités du conducteur et du défaut, \vec{E}_0 le champ électrique en absence du défaut. Pour résoudre cette équation, ils utilisent la méthode des moments.

Kahn étudie le cas particulier d'une fissure débouchante de longueur infinie et de section en V (Figure II-8). Le champ d'excitation est produit par deux lignes de courants opposés et parallèles à la fissure. Les équations de Maxwell sont exprimées en fonction du potentiel vecteur \vec{A} . La détermination de \vec{A} passe par la résolution d'un système d'intégrales de surface couplées. Cette résolution est réalisée par la méthode des moments.

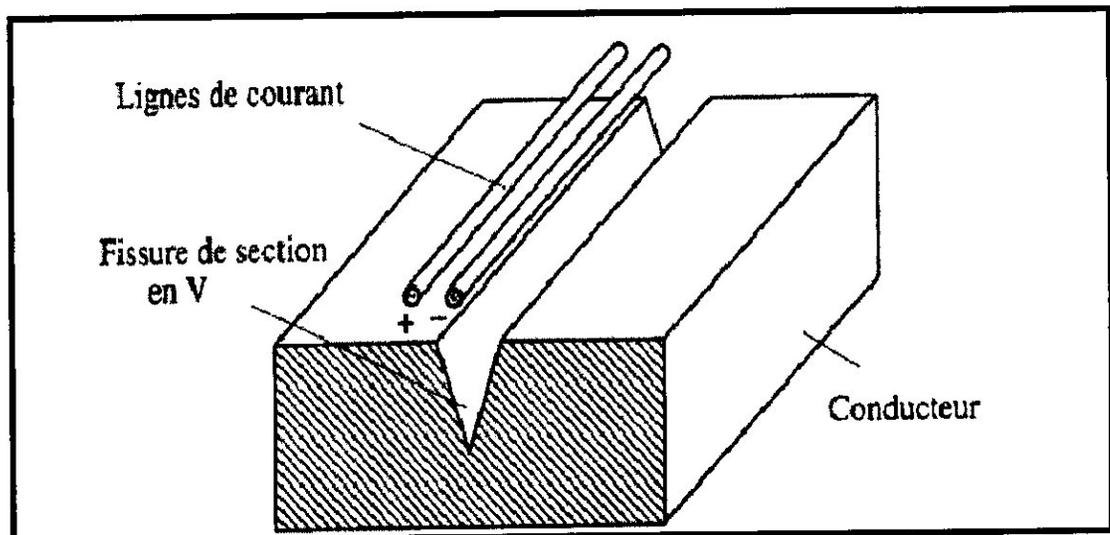


Figure II-8 : Fissure de section en V en présence de lignes de courant.

Dunbar présente une méthode pour résoudre une équation intégrale dérivant des équations de Maxwell, méthode similaire à la méthode des moments. Le volume d'intégration est discrétisé en éléments parallélépipédiques. Dans chacun des éléments, le champ \vec{E} est considéré constant. Après discrétisation, l'équation intégrale

devient un système d'équations algébriques. Les inconnues du système sont les composantes du champ \vec{E} , considérées comme constantes dans chaque élément de discrétisation.

McKirdy a amélioré cette méthode proposée par Dunbar. Il considère que le champ \vec{E} varie linéairement dans chacun des éléments de discrétisation.

II-2-3-Le modèle de IDA :

Le modèle de IDA présenté dans sa thèse de doctorat en 1983 qui décrit la formulation tridimensionnelle en éléments finis pour les problèmes magnéostatiques et les problèmes des courants de FOUCAULT, en utilisant la méthode énergétique pour le calcul des impédances (résistance, réactance).

D'abord l'énergie générale fonctionnelle pour des problèmes de champ électromagnétique peut être écrite :

$$F = \int_V (\text{énergie stockée} - \text{énergie d'entrée} + \text{énergie dissipée}) dv \quad (\text{II-6})$$

Où l'énergie stockée est due au champ magnétique, l'énergie d'entrée est dérivé des densités de courant appliquées et de l'énergie dissipée résulte des densités des CF dans les parties conductrice, à l'exclusion des sources.

On a :

$$Z = R + j\omega L \quad (\text{II-7})$$

L'énergie stockée dans la bobine peut être calculée à partir de la densité de flux magnétique :

$$W = \sum_{i=1}^N W_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (v_x B_{xi}^2 + v_y B_{yi}^2 + v_z B_{zi}^2) v_i \quad (\text{II-8})$$

v_i : le volume de l'élément i .

Et l'énergie dissipée est :

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N v_i |J_{ei}|^2 / \sigma \quad (\text{II-9})$$

J_{ei} : la densité moyenne des CF.

On peut écrire donc :

$$Z = \frac{1}{j^2} (P + 2j\omega W) \quad (\text{II-10})$$

Chapitre III

Le modèle de IDA et la
formulation en éléments
finis

Introduction :

La méthode d'élément fini (FEM) a son origine dans le domaine de l'analyse structurale. Bien que la demande de règlement mathématique plus tôt de la méthode ait été fournie par Courant en 1943, la méthode n'a pas été appliquée aux problèmes (EM) électromagnétiques jusqu'en 1968. Depuis lors la méthode a été utilisée dans des endroits divers tels que des problèmes de guide d'ondes, des machines électriques, des dispositifs de semi-conducteur et du micro rubans.

Bien que la méthode de différence finie (FDM) et la méthode des moments (MOM) soient conceptuellement plus simple et plus facile à programmer que la méthode d'éléments finis (FEM), cette dernière est une technique numérique plus puissante et plus polyvalente pour traiter des problèmes concernant les géométries complexes et des systèmes non homogènes.

La généralité systématique de la méthode permet pour construire des programmes informatiques d'usage universel pour résoudre un éventail de problèmes. En conséquence, des programmes développés pour une discipline particulière ont été appliqués avec succès pour résoudre des problèmes dans un domaine différent avec peu ou pas de modification.

L'analyse par éléments finis de n'importe quel problème concerne fondamentalement quatre opérations :

- discrétisation de la région de solution dans un numéro fini des sous-régions ou des éléments,
- dérivant des équations de gouvernement pour un élément typique,
- se réunir de tous les éléments dans la région de solution,
- résolvant le système des équations obtenues.

La figure ci-dessous montre quelques éléments typiques pour un problème (1D, 2D et 3D).

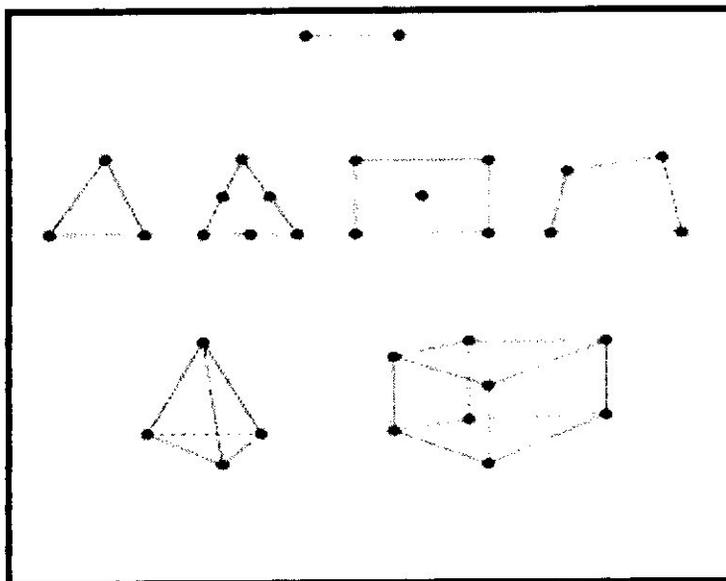


Figure III-1 : Les types d'éléments finis

III-1-La méthode des éléments finis en électromagnétique :

III-1-1.Equation de propagation dans un milieu conducteur :

Les équations de Maxwell dans leur généralité traduisent les interactions entre les grandeurs magnétiques B et H et électriques E et D. En introduisant les caractéristiques σ et μ du milieu, et en appelant J la densité de courant, ces relations s'écrivent :

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III-1})$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{III-2})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III-3})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III-4})$$

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

Chacune de ces équations traduit les propriétés physiques des grandeurs électromagnétiques.

C'est ainsi que (III-1) caractérise la conservation du flux, (III-2) le théorème d'Ampère, (III-3) la loi de Lenz et (III-4) la loi d'Ohm.

Dans ces expressions, on suppose que le courant de conduction est prépondérant vis-à-vis du courant de déplacement, hypothèse largement vérifiée dans le domaine des courants forts.

A ces équations, il convient d'ajouter l'expression de la loi de Lorentz lorsque le repère lié au dispositif étudié se déplace à la vitesse V par rapport au repère fixe. Le champ électrique E' vu par le repère mobile est alors relié au champ E du repère fixe par la relation :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III-6})$$

Dans un grand nombre de cas pratiques, on est amené à introduire le potentiel vecteur A . Le potentiel vecteur A est relié à l'induction B par la relation :

$$B = \text{rot}A \quad (\text{III-7})$$

On fait les hypothèses suivantes pour un matériau parfait :

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (\text{III-8-a})$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (\text{III-8-b})$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (\text{III-9})$$

On obtient l'équation générale de propagation d'un champ magnétique dans un milieu conducteur.

$$\Delta B - jk^2 B = 0 \quad (\text{III-10})$$

La solution de cette équation sera donnée dans l'annex1.

III-1-2- Le théorème de Poynting[9] :

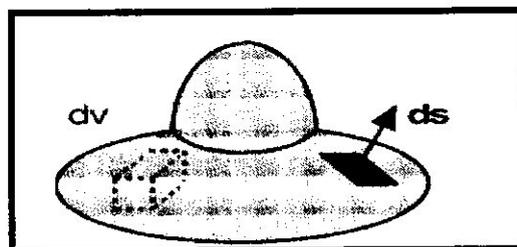


Figure III-2 : Un volume qui contient une source d'énergie électromagnétique

Pour obtenir le *théorème de Poynting* pour un volume arbitraire représenté sur la figure (Figure III-2), nous exigerons de deux équations de maxwell et une identité de vecteur. Les deux équations de maxwell qui sont exigées pour cette dérivation sont :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{III-11})$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (\text{III-12})$$

Prenons le produit scalaire de E avec l'équation (III-12) et soustrayons-le du produit scalaire H avec l'équation (III-11)

On obtient :

$$H \cdot \nabla \times E - E \cdot \nabla \times H = H \cdot \frac{\partial B}{\partial t} - E \cdot \left[\frac{\partial D}{\partial t} + J \right] \quad (\text{III-13})$$

Le côté gauche de cette équation peut être remplacé en utilisant l'identité de vecteur

$$\nabla \cdot (A \times B) = B \cdot \nabla \times A - A \cdot \nabla \times B \quad (\text{III-14})$$

Par conséquent, nous obtenons :

$$\nabla \cdot (E \times H) = -H \cdot \frac{\partial B}{\partial t} - E \cdot \frac{\partial D}{\partial t} - E \cdot J \quad (\text{III-15})$$

Après l'introduction des relations constitutives (III-8-a), (III-8-b), (III-12), les dérivés de temps peuvent être écrits comme :

$$-H \cdot \frac{\partial B}{\partial t} - E \cdot \frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} [\mu H \cdot H + \varepsilon E \cdot E] = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} [\mu H^2 + \varepsilon E^2] \quad (\text{III-16})$$

En Substituant (III-16) dans (III-15) et intégrant les deux côtés de l'excédent résultant d'équation de même volume ΔV . Ce volume est complètement joint par la surface s . en effectuant cette intégration nous obtenons :

$$\int \nabla \cdot (E \times H) dv = -\frac{d}{dt} \int \frac{1}{2} [\mu H^2 + \varepsilon E^2] dv - \int E \cdot J dv \quad (\text{III-17})$$

L'intégrale de volume du côté gauche de l'équation (III-17) peut être convertie en intégrale de surface fermé par l'intermédiaire du théorème de divergence. Avec la loi d'ohm de substitution $J = \sigma E$, nous obtenons finalement :

$$\oint (E \times H) \cdot ds = -\frac{d}{dt} \int_{\Delta v} \frac{1}{2} [\mu H^2 + \epsilon E^2] dv - \int_{\Delta v} \sigma E^2 dv \quad (\text{III-18})$$

Où :

$S = E \times H$ s'appelle le vecteur de Poynting. C'est la densité de puissance des champs électromagnétiques rayonnés. La direction de la puissance rayonnée est incluse dans ce vecteur. Maintenant donnons une interprétation physique à chacune des trois limites qui apparaissent dans cette équation. Les unités de l'intégrale extérieure fermée sont des WATTS.

Cette limite correspond au dérivé de temps de l'énergie électromagnétique stockée dans le volume. Les unités de la deuxième intégrale de volume correspondent au chauffage de Joule dans le volume et elles sont également en termes de watts.

La référence au chauffage de Joule indique que la puissance électromagnétique est convertie en chaleur et cette puissance ne peut pas être récupérée. Un grille-pain emploie le chauffage de Joule. Par conséquent, le théorème de Poynting déclare que la puissance qui laisse une région est égale à l'affaiblissement temporel dans l'énergie qui est stockée dans le volume sans la puissance qui est absorbée comme chaleur. L'équation de la conservation d'énergie (III-18) peut également être écrite en forme différentielle. Rappelant que la densité d'énergie électromagnétique est définie comme:

$$W = \frac{1}{2} [\mu H^2 + \epsilon E^2] \quad (\text{III-19})$$

et la densité de perte de puissance est indiquée ci-dessous :

$$P_L = \sigma E^2 \quad (\text{III-20})$$

Nous pouvons réinterpréter de l'équation (III-17) sous la forme différentielle de la conservation d'énergie du système suivante :

$$\nabla \cdot S + \frac{\partial W}{\partial t} = -P_L \quad (\text{III-21})$$

Cette équation est un peu semblable à l'équation de la continuité avec une limite qui correspond à l'effet de Joule.

III-1-3-La Formulation Tridimensionnelle Des Élément Finis [5][6][7]:

Parmi les nombreuses méthodes disponibles pour la formulation des éléments finis des problèmes généraux, la méthode résiduelle (**Galerkin**) et l'utilisation d'une **énergie fonctionnelle** provenant d'un concept global de bilan énergétique.

La méthode de **Galerkin** est plus commandée quand seulement les équations différentielles et leurs états de frontière sont disponibles et quand l'interprétation physique du problème est importante, la formulation de bilan énergétique offre les meilleurs résultats.

L'approche de bilan énergétique est présentée ici :

Une énergie générale fonctionnelle pour des problèmes de champ électromagnétique peut être écrite comme

$$F = \int_V (\text{énergie stockée} - \text{énergie d'entrée} + \text{énergie dissipée}) dv \dots \text{(III-22)}$$

Là où l'énergie stockée est due au champ magnétique, l'énergie d'entrée est dérivée des densités de courant appliquées et de l'énergie dissipée résulte des densités des CF dans les parties conductrices, à l'exclusion des sources.

III-1-3-1- Énergie Fonctionnelle pour les CF (3D) :

L'énergie fonctionnelle pour les problèmes de courant de Foucault peut être écrite comme suit :

$$F(A) = \int_V \left[\frac{1}{2} \left[\nu_x (A_{zy} - A_{yz})^2 + \nu_y (A_{xz} - A_{zx})^2 + \nu_z (A_{yx} - A_{xy})^2 \right] - (J_x A_x + J_y A_y + J_z A_z) + \frac{1}{2} j \omega \sigma (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) \right] dx dy dz \quad \text{(III-23)}$$

La fonction à intégrer pour ce problème est :

$$f = \frac{1}{2} \left[\nu_x (A_{zy} - A_{yz})^2 + \nu_y (A_{xz} - A_{zx})^2 + \nu_z (A_{yx} - A_{xy})^2 \right] - (J_x A_x + J_y A_y + J_z A_z) + \frac{1}{2} j \omega \sigma (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) \quad \text{(III-24)}$$

Avec :

$$\frac{\partial f}{\partial A_x} = -J_x + j\omega\sigma A_x \quad (\text{III-25})$$

$$\frac{\partial f}{\partial A_y} = -J_y + j\omega\sigma A_y \quad (\text{III-26})$$

$$\frac{\partial f}{\partial A_z} = -J_z + j\omega\sigma A_z \quad (\text{III-27})$$

Donc :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[v_z (A_{yx} - A_{xy}) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[v_y (A_{xz} - A_{zx}) \right] = J_x - j\omega\sigma A_x \quad (\text{III-28})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[v_x (A_{zy} - A_{yz}) \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[v_z (A_{yx} - A_{xy}) \right] = J_y - j\omega\sigma A_y \quad (\text{III-29})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[v_y (A_{xz} - A_{zx}) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[v_x (A_{zy} - A_{yz}) \right] = J_z - j\omega\sigma A_z \quad (\text{III-30})$$

Et cette formulation est ainsi équivalente à l'équation originale décrivant le problème de courant de Foucault.

Le vecteur potentiel est défini en termes de composants de \vec{A} :

$$B = \nabla \times \vec{A} = \hat{x} (A_{zy} - A_{yz}) + \hat{y} (A_{xz} - A_{zx}) + \hat{z} (A_{yx} - A_{xy}) \quad (\text{III-31})$$

III-1-3-2- Discrétisation du domaine :

La solution de la formulation de la magnétostatique ou des équations de courant de Foucault présentées dans les sections précédentes est exécutée en trouvant un ensemble de fonctions A qui réduisent au minimum l'énergie fonctionnel F (A).

Le maillage (Élément Tétraédrique) :

Le procédé de discrétisation est un procédé géométrique et par lui-même n'est pas suffisant pour s'assurer que les éléments choisis peuvent être employés pour la solution. Un ensemble des fonctions spéciales, appelé des fonctions d'interpolation doit être choisi pour élément.

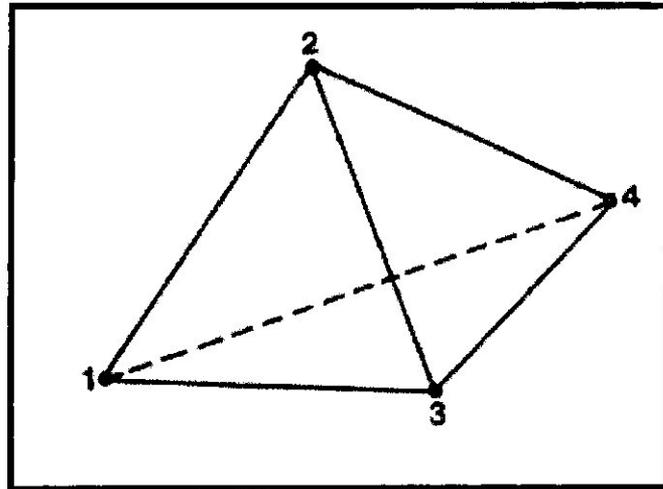


Figure III-3 : Elément tétraédrique

Les fonctions d'interpolation L_i peuvent être dérivées en termes d'ensemble de coordonnées cartésiennes. Vu le tétraèdre dans la Figure III-3, les coordonnées cartésiennes globales peuvent être liées aux coordonnées cartésiennes en résolvant le système suivant des équations :

$$x = L_1x_1 + L_2x_2 + L_3x_3 + L_4x_4 \quad (\text{III-32})$$

$$y = L_1y_1 + L_2y_2 + L_3y_3 + L_4y_4 \quad (\text{III-33})$$

$$z = L_1z_1 + L_2z_2 + L_3z_3 + L_4z_4 \quad (\text{III-34})$$

$$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 1 \quad (\text{III-35})$$

Où les indices (1.2.3.4) indiquent le nombre de nœud dans l'élément. La solution pour L_i peut écrire les coordonnées cartésienne du tétraèdre comme :

$$L_i = \frac{1}{6v} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) ; i=1, 2, 3, 4 \quad (\text{III-36})$$

Le vecteur potentiel peut être écrit :

$$A_x(x, y, z) = A_{x1}L_1 + A_{x2}L_2 + A_{x3}L_3 + A_{x4}L_4 \quad (\text{III-37})$$

$$A_y(x, y, z) = A_{y1}L_1 + A_{y2}L_2 + A_{y3}L_3 + A_{y4}L_4 \quad (\text{III-38})$$

$$A_z(x, y, z) = A_{z1}L_1 + A_{z2}L_2 + A_{z3}L_3 + A_{z4}L_4 \quad (\text{III-39})$$

L'équation matricielle pour chaque élément dans la maille est de la forme :

$$v_i \{ [s] + j [R] \} \cdot \{ A \} - \frac{v_i}{4} \{ J \} = 0 \quad (\text{III-40})$$

Où :

v_i : Le volume de l'élément et 4 c'est le nombre des nœuds dans l'élément.

$[s]$: 12×12 C'est une matrice qui représente la partie réelle de la matrice élémentaire.

$[R]$: 12×12 c'est une matrice de la partie imaginaire.

$\begin{Bmatrix} A \end{Bmatrix}$ 12×1 C'est le vecteur potentiel complexe qui est inconnu aux nœuds de

l'élément et $\begin{Bmatrix} J \end{Bmatrix}$ est le vecteur 12×1 des densités de courant complexes.

En additionnant toutes les matrices élémentaires on obtient un système global des équations :

$$[G] \cdot \{ A \} = \{ Q \} \quad (\text{III-41})$$

Et l'équation du problème de CF :

$$\{ [S] + j\omega\sigma[R] \} \{ A \} = \{ Q \} \quad (\text{III-42})$$

Les conditions aux limites :

Les équations formulées en termes d'éléments finis dans les équations du problème des CF peut être résolu on fournit un ensemble correct d'états de frontière. Soit l'état de frontière de **Dirichlet** ou l'état de frontière de **Neumann**.

III-1-3-3-Les quantités mesurables :

La densité de flux :

Après avoir le vecteur potentiel la densité de flux est donnée par :

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \quad (\text{III-43})$$

$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (\text{III-44})$$

$$B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (\text{III-45})$$

La densité des CF dans des conducteurs :

$$J_{ex} = -j\omega\sigma A_x \quad (\text{III-46})$$

$$J_{ey} = -j\omega\sigma A_y \quad (\text{III-47})$$

$$J_{ez} = -j\omega\sigma A_z \quad (\text{III-48})$$

Les énergies :

L'énergie stockée est donnée par:

$$W = \sum_{i=1}^N W_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\nu_x B_{xi}^2 + \nu_y B_{yi}^2 + \nu_z B_{zi}^2) \nu_i \quad (\text{III-49})$$

L'énergie dissipée est donnée par :

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N \nu_i |J_{ei}|^2 / \sigma \quad (\text{III-50})$$

Où :

ν_i : est le volume de l'élément i.

J_{ei} : est la densité moyenne de courant de Foucault dans l'élément i.

$$\nu = \frac{1}{\mu}$$

L'impédance des enroulements :

$$Z = R + j\omega L \quad (\text{III-51})$$

La résistance de l'enroulement peut être écrite comme :

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (\text{III-52})$$

P : est l'énergie dissipée.

L'inductance est donnée par :

$$L = \frac{2W}{I^2} \quad (\text{III-53})$$

W : est l'énergie emmagasinée.

Donc :

$$Z = \frac{1}{f^2} (P + 2j\omega W) \quad (\text{III-54})$$

III.5. Les techniques de solution pour les équations en éléments

finis[2] :

La formulation en éléments finis présentée précédemment est basée sur un système d'équations linéaires de la forme :

$$[G]\{X\} = \{Q\} \quad (\text{III-55})$$

Où le système est complexe et non symétrique pour le cas des CF.

III.5.1. Solution des systèmes linéaires des équations (Méthodes Directes) :

Encore majoritairement employée dans les codes actuels à cause de leur robustesse, et d'une prévision fine du coût (nombre d'opérations, stockage nécessaire), elles deviennent coûteuses en temps et en encombrement lorsque le système à résoudre devient très grand.

Les méthodes directes pour résoudre des systèmes de N équations linéaires sont basées sur l'algorithme d'élimination de gauss. On simplifie le système pour le rendre triangulaire supérieur par utilisation de combinaisons linéaires des lignes (c'est à dire d'équations).

L'algorithme d'élimination de gauss peut être récapitulé par :

$$a_{ij}^{k+1} = a_{ij}^k - a_{ik}^k \left[a_{kk}^k \right]^{-1} a_{kj}^k \quad i, j > k \dots \dots \dots (\text{III-56})$$

$$q_i^{k-1} = q_i^k - a_{ik}^k \left[a_{kk}^k \right]^{-1} q_k^k \quad i > k \dots \dots \dots (\text{III-57})$$

Ce qui exprime les opérations effectuées à la kème étape ; k=1,2 , N-1

Commençant par $[G]' = [G]$ et $\{Q\}' = \{Q\}$

Après cette étape, connue sous le nom de l'étape d'élimination le système des équations est triangulaire et la solution est obtenue :

$$X_k = [a_{kk}^k]^{-1} (q_k - \sum_{j=k+1}^N a_{kj}^k X_j), \quad k=N, N-1, \dots, 1; \quad (\text{III-57})$$

La forme triangulaire résultant du processus d'élimination dépend de la matrice originale. Pour les matrices symétriques elle prend la forme :

$$[G] = [U][D][U] \quad (\text{III-58})$$

Là où [U] est la matrice triangulaire supérieure et [D] est la matrice diagonale

. Dans les matrices non-symétriques la matrice décomposée prend la forme :

$$[G] = [L][D][U] \quad (\text{III-59})$$

III.5.2-Solution des systèmes linéaires des équations (Méthodes Itératives) :

Ce sont plus simples pour mettre en application et il n'y a aucune décision de convergence et d'exactitude à faire.

Une méthode itérative de forme :

$$\{X\}^{k+1} = \Phi \{X\}^k \quad (\text{III-60})$$

Est considéré. Un algorithme itératif peut être établi en présentant une matrice non singulière [S] de $n \times n$:

$$[S]\{X\} + [G] - [S]\{X\} = Q \quad (\text{III-61})$$

Et par la mise de :

$$[S]\{X\}^{k+1} + [G] - [S]\{X\}^k = \{Q\} \quad (\text{III-62})$$

Et ceci peut alors être résolu pour l'étape (k+1) de l'étape précédente :

$$\{X\}^{k+1} = \{X\}^k - [S]^{-1}[G]\{X\}^k - \{Q\} = \{I\} - [S]^{-1}[G]\{X\}^k + [S]^{-1}\{Q\} \quad (\text{III-63})$$

En utilisant la décomposition de matrice [G] :

$$[G] = [D] - [E] - [F] \quad (\text{III-64})$$

Où :

$$[D] = \begin{bmatrix} a_{11} & & & 0 \\ & a_{22} & & \\ & & \cdot & \\ 0 & & & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{III-65}$$

$$-[E] = \begin{bmatrix} 0 & \dots\dots\dots & \dots & 0 \\ & & & \cdot \\ a_{21} & \cdot & & \cdot \\ & & & \cdot \\ & & & 0 \\ a_{n1} & \dots\dots\dots & a_{n,n-1} & 0 \end{bmatrix} \tag{III-66}$$

$$-[F] = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} \dots\dots\dots & \dots & a_{1n} \\ & & & \cdot \\ 0 & 0 & & \cdot \\ & & & \cdot \\ & & & 0 \\ & & & a_{n-1,n} \\ 0 & \dots\dots\dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{III-67}$$

Et les abréviations :

$$[L] = [D]^{-1} [E] \tag{III-68}$$

$$[U] = [D]^{-1} [F] \tag{III-69}$$

$$[J] = [L] + [U] \tag{III-70}$$

$$[H] = ([I] - [L]^{-1}) [U] \tag{III-71}$$

On peut définir les méthodes bien connues de Jacobi et de Gauss-Seidel comme suit :

Dans la méthode de Jacobi $[B]=[D]$ et $[J]=[I]-[S]^{-1}[G]$ et là l'itération est écrite comme :

$$a_{jj}X_j^{k+1} + \sum_{i \neq j} a_{ji}X_i^k = q_j \quad ; j=1,2,\dots,n; \quad k=0,1,2,\dots \quad (\text{III-72})$$

Ou :

$$X^k = \{X_1^k, \dots, X_n^k\}^T \quad (\text{III-73})$$

Dans la méthode de Gauss-Seidel, $[B]=[D]-[E]$ et $[H]=([I]-[S]^{-1})[U]$

Le processus itératif est défini :

$$\sum_{i < j} a_{ji}X_i^{k+1} + a_{jj}X_j^{k+1} + \sum_{i > j} a_{ji}X_i^k = q_j \quad ; j=1,2,\dots,n; \quad k=0,1,2,\dots \quad (\text{III-74})$$

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques puis aux formulations des éléments finis pour le modèle d'IDA.

Dans notre travail, nous avons opté pour le modèle énergétique pour la simulation des CF avec l'approche énergétique élaboré par N.IDA.

Ensuite on a passé aux méthodes numériques de résolution des systèmes linéaires.

Dans ce qui suit nous passerons à la discrétisation des équations aux dérivées partielles et les méthodes pour générer le maillage du domaine d'étude par la méthode des éléments finis.

Chapitre IV

Simulation numérique et
interprétation des résultats

Introduction :

La méthode des éléments finis occupe une position dominante et son champ d'application est vaste mais elle devient laborieuse et inefficace pour certains problèmes dont la géométrie n'est pas simple étant donné qu'elle nécessite un raffinement du maillage et une augmentation de la densité des éléments aux voisinages des régions critiques, ce qui augmente les exigences pour les machines de calculs en ce qui concerne le temps de calcul et l'espace de stockage .

IV-1-Le Maillage :

La définition du maillage est une étape très importante dans cette étude, il existe deux méthodes pratiques pour placer le réseau de points ou maillage et leurs volumes de contrôle associés. La première consiste à placer d'abord les nœuds, puis les interfaces seront placées à mi-distance de deux nœuds consécutifs. Cette pratique exige des équations supplémentaires pour le traitement des nœuds frontaliers.

La deuxième consiste à partager le domaine en un ensemble de volume élémentaire, puis les nœuds sont placés au centre des volumes.

Cette pratique est souvent utilisée en raison de sa simplicité et ne nécessite pas un traitement spécial pour les nœuds frontières.

Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue.

Un raffinement du maillage et une augmentation de la densité des éléments aux voisinages des régions critiques est indispensable, ce qui conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul long qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels.

IV-2-Les hypothèses :

- La variation de champ électrique E suivant les directions x et y est négligeable.
- Nous avons pris comme hypothèse que la variation électromagnétique due au CF est suivant la profondeur uniquement (selon l'axe Z)

$$E_x = E_y = E \quad (IV-1)$$

- L'inductance B est donnée par la relation suivante :

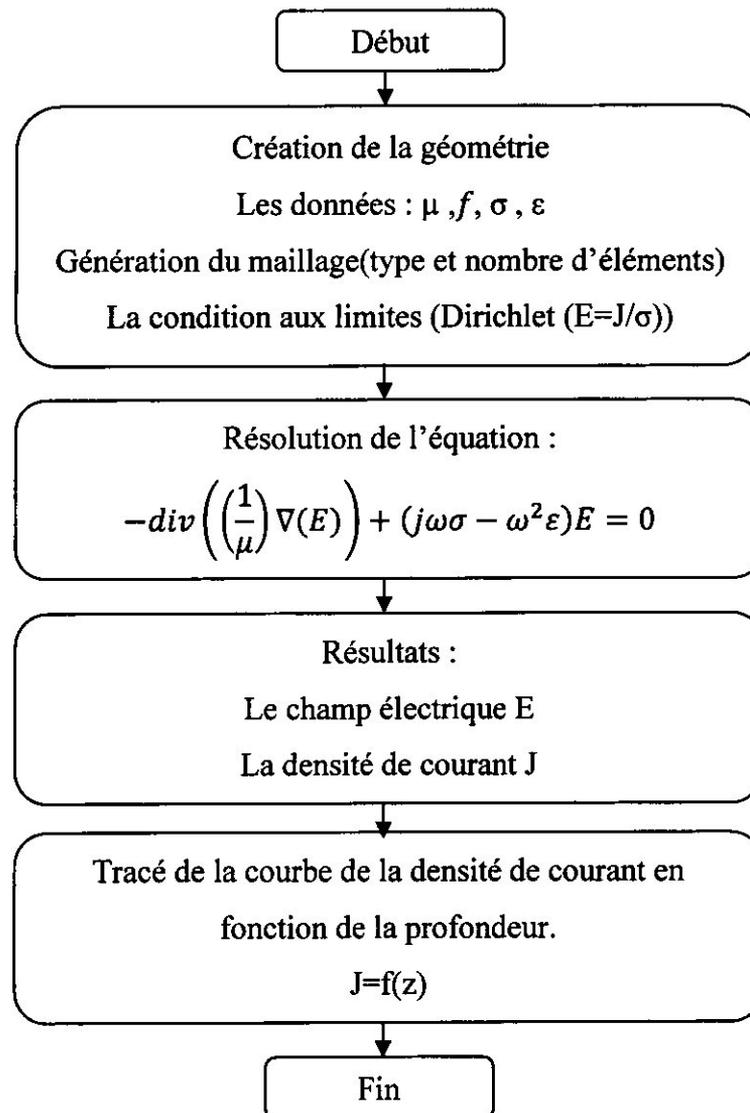
$$B = \frac{j}{\omega} E \quad (IV-2)$$

- On a supposé que notre sonde est de forme cylindrique de section droite. nous avons assimilé la surface de contact à un point ponctuelle.

IV-3-Approche numérique :

IV-3-1-Simulation de l'effet de peau (pièce sans défaut):

Organigramme :



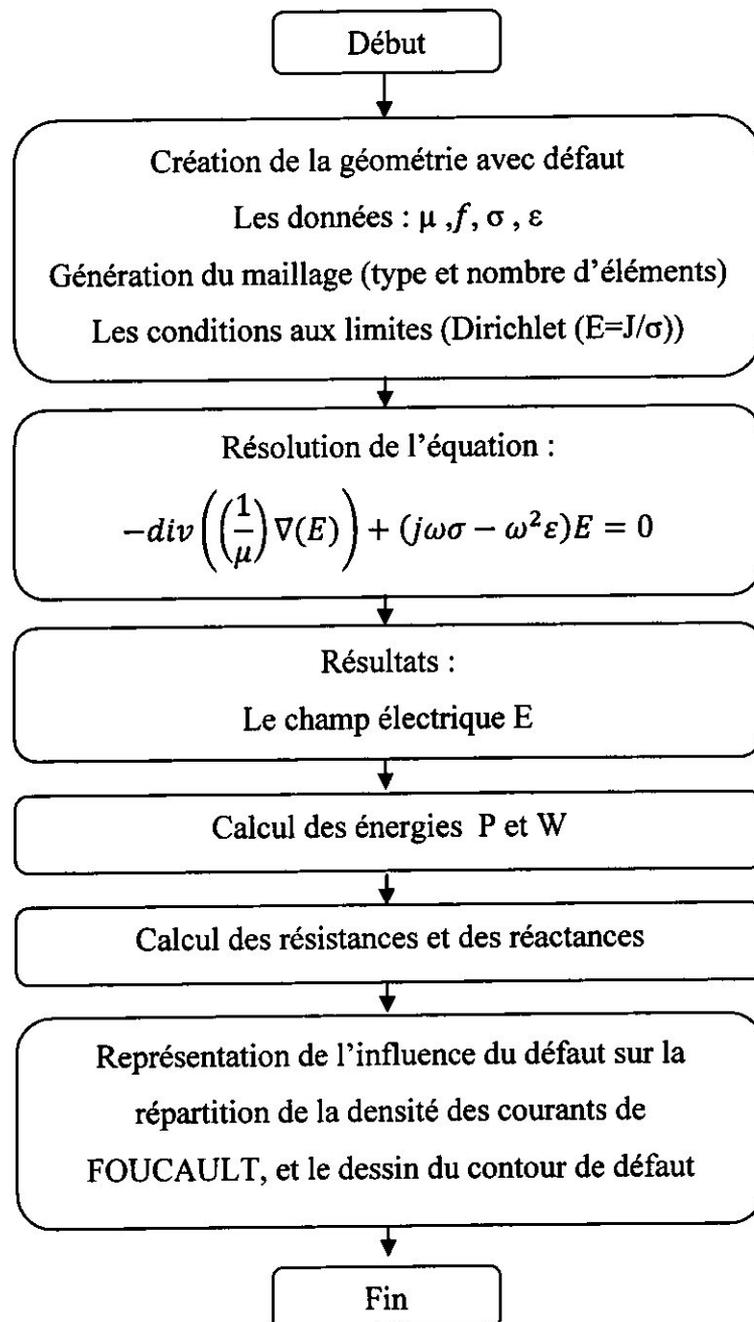
Explication des étapes :

- 1- La discrétisation de la géométrie en éléments triangulaires.
- 2- Les données pour résoudre l'EDP :
 - La fréquence $f = 500 \text{ KHz}$
 - La perméabilité magnétique $\mu = 4.7\pi \cdot 10^{-7} \text{ F/m}$
 - La conductivité électrique $\sigma = 19 \cdot 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$
 - Le coefficient diélectrique $\epsilon = 8.8 \cdot 10^{-12} \text{ V/m}$

- 3- Les conditions aux limites sont ceux de DIRICHLET.
- 4- Résolution de l'équation : $-\text{div}\left(\left(\frac{1}{\mu}\right)\nabla(E)\right) + (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)E = 0$
- 5- Choix des points pour tracer la courbe de la densité de courant en fonction de la profondeur $J=f(z)$.

IV-3-2-Simulation d'un défaut rectangulaire:

Organigramme :



Explication des étapes :

- 1- Création de la géométrie avec un défaut (qui a une autre conductivité).
- 2- La discrétisation de la géométrie en éléments triangulaires.
- 3- Les données pour résoudre l'EDP.
 - La fréquence $f = 50$ KHz
 - La perméabilité magnétique $\mu = 4.7\pi \cdot 10^{-7}$ F/m
 - La conductivité électrique $\sigma = 35 \cdot 10^6$ (Ωm)⁻¹
 - Le coefficient diélectrique $\varepsilon = 8.8 \cdot 10^{-12}$ V/m
- 4- Les conditions aux limites sont ceux de DIRICHLET.
- 5- Résolution de l'équation : $-\text{div} \left(\left(\frac{1}{\mu} \right) \nabla(E) \right) + (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)E = 0$
- 6- Calcul des énergies de dissipations P.
- 7- Calcul des résistances R.
- 8- Tracé du contournement de défaut (taille et position du défaut).

IV-4-Résultats et interprétations :**IV-4-1-Simulation numérique de l'effet de peau :****IV-4-1-1-Maillage du domaine de résolution de l'EDP :**

Le maillage est fait à l'aide du logiciel MATLAB et précisément l'outil (pdeTool)¹, qui est sensé faire la résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis.

Il existe deux types de maillage :

- Le maillage non régulier.
- Le maillage régulier.

On préfère travailler avec le premier type parce que la qualité de ses triangles est meilleure par rapport à celle du maillage structuré.

Trois matrices sont le résultat de ce maillage par MATLAB :

- « p » matrice des nœuds (points) : d'une dimension (2 X nombre des nœuds), contient la position (x, y) de chaque nœuds.

¹ : voir l'annexe A

- « e » matrice des arrêtes (edges) : d'une dimension ($7 \times$ nombre des arrêtes), contient les indices des nœuds formants le segment, les sous domaines voisins et les numéros de segments.
- « t » matrice des mailles (triangles) : d'une dimension ($4 \times$ nombre des triangles), contient les indices des nœuds formants la maille et les sous domaines.

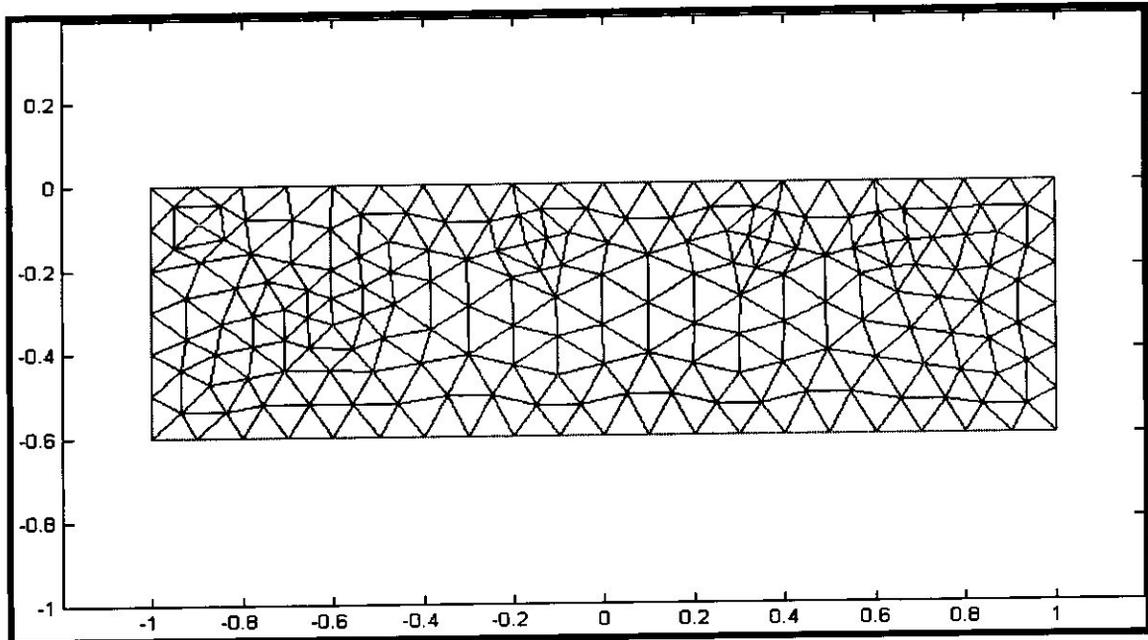


Figure IV-1 : Maillage non régulier de la surface de résolution (203 nœuds et 352 triangles)

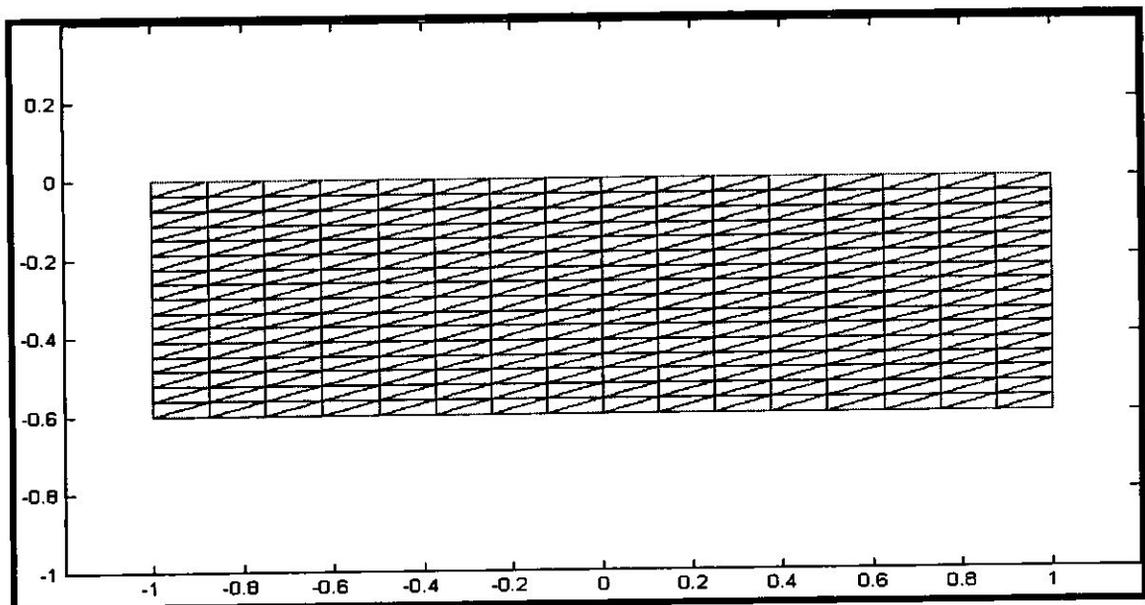


Figure IV-2 : Maillage régulier de la surface de résolution (289 nœuds et 512 triangles)

Pour des bons résultats de calcul, on fait un raffinement au maillage dans les limites de notre machine de calcul.

Le raffinement est décrit par les étapes suivantes :

- Sélectionner l'ensemble initial de triangles à raffiner.
- Diviser toutes les arêtes des triangles choisis dans la moitié (amélioration régulière), ou diviser la plus longue arête dans la moitié (la plus longue amélioration d'arête).
- Diviser la plus longue arête de n'importe quel triangle qui a une arête divisible.
- Répéter l'opération précédente jusqu'à ce qu'aucune autre arête ne soit divisible.
- Introduire les points neufs de toutes les arêtes divisées, et remplacer toutes les entrées divisées dans « e » par deux entrées neuves.
- Former les triangles neufs.

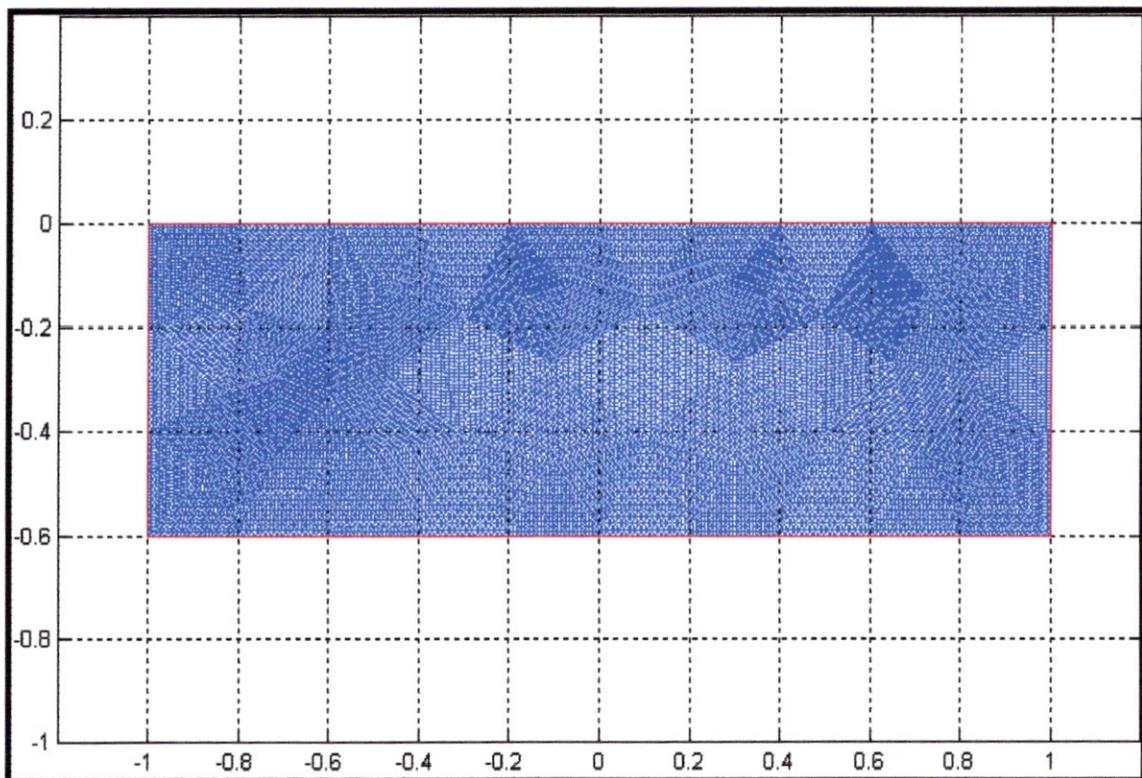


Figure IV-3 :Raffinement du maillage non structuré de la surface de résolution(11473 nœuds et 22528 triangles)

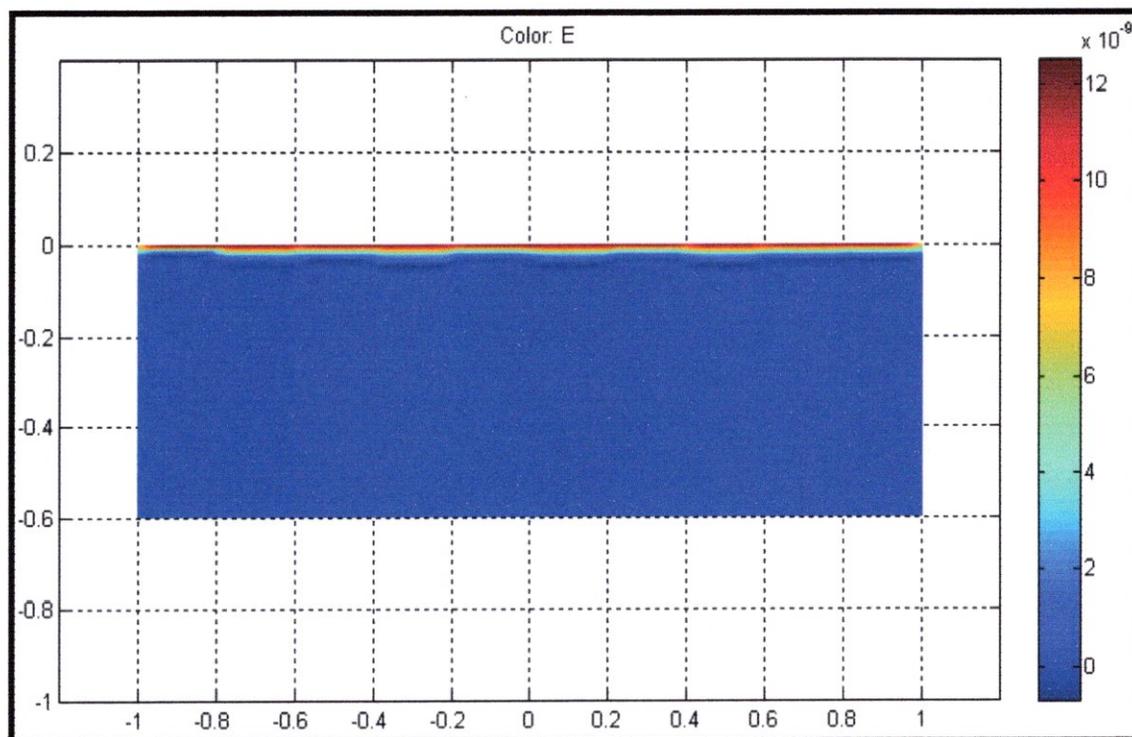


Figure IV-4 : Représentation de la répartition du champ électrique

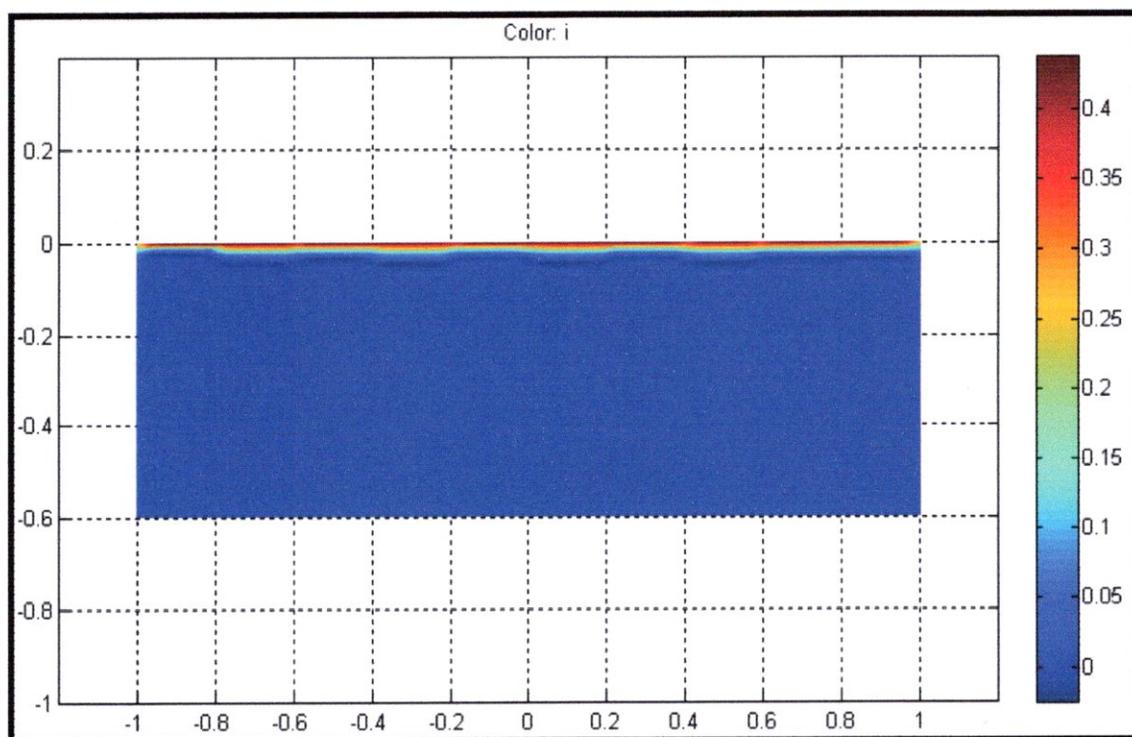


Figure IV-5 : Représentation de la répartition de la densité de courant

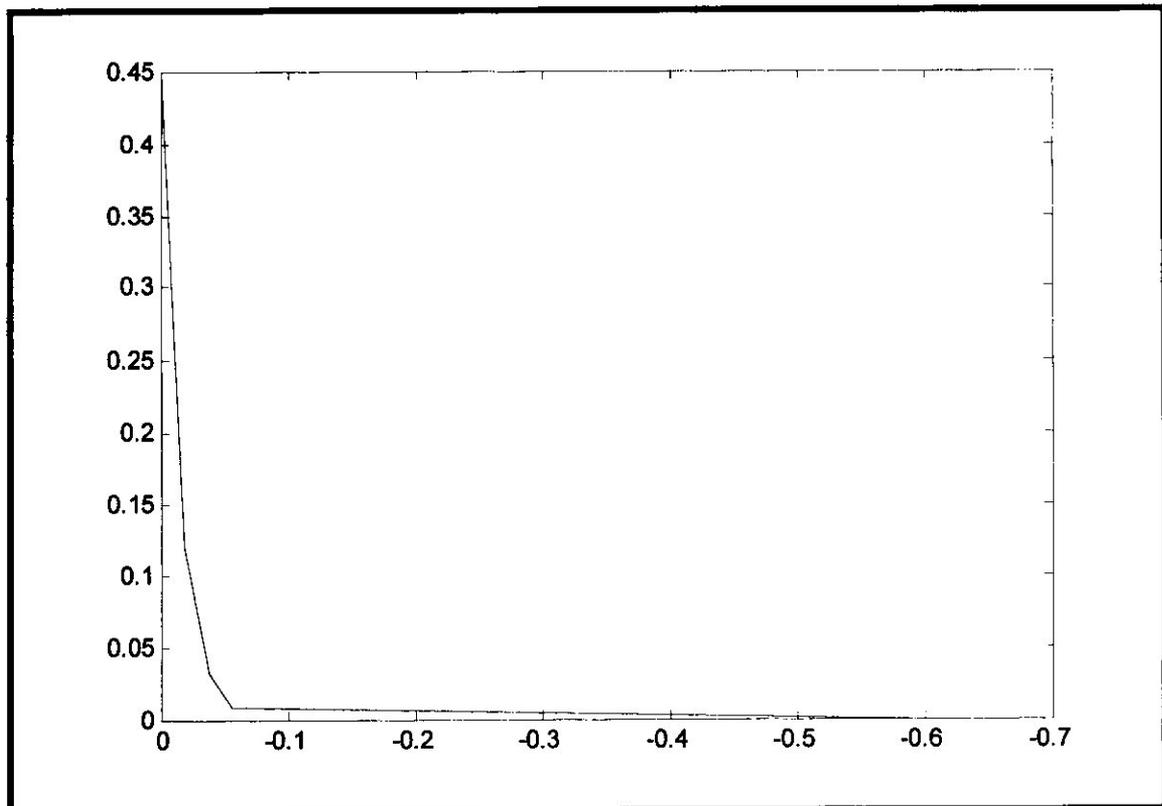


Figure IV-6 : Représentation de la densité des courants de FOUCAULT en fonction de la profondeur $J=f(z)$

IV-4-1-2-interprétation des résultats :

La Figure IV-4 représente la distribution du champ électrique sur une plaque sans défaut.

La Figure IV-5 représente la distribution de la densité des courants de FOUCAULT sur cette plaque, on peut voir qu'il y a une concentration surfacique des CF, ce phénomène est appelé *l'effet de peau*, qui est dû à la fréquence très élevée des courants.

En haute fréquence les courants de Foucault qui se développent à l'intérieur des conducteurs, conduisent à une augmentation parfois très importante des pertes. Ces courants de Foucault sont dus aux variations rapides des champs magnétiques dans lesquels sont plongés les conducteurs.

Le graphe représenté par la Figure IV-6 montre que la densité des CF soit maximale à la surface de la pièce ($z=0$) puis elle décroît d'une façon exponentielle en fonction de la profondeur.

IV-4-2-Simulation numérique de la détection d'un défaut (cordon de soudure):***Création de la géométrie :***

La plaque à tester dans cette partie a les caractéristiques suivantes :

- La conductivité électrique $\sigma = 19 \cdot 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$
- Le coefficient diélectrique $\varepsilon = 8.8 \cdot 10^{-12} \text{ V/m}$

Le défaut est un cordon d'un autre matériau qui a une conductivité électrique différente, la figure (Figure IV-7) représente le problème à simuler.

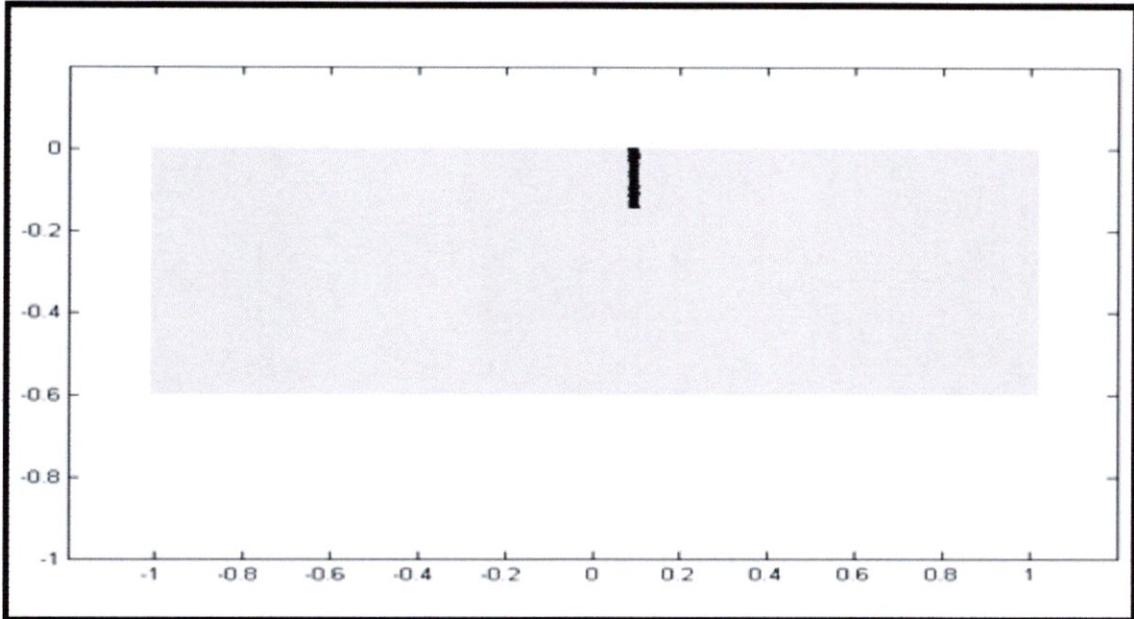


Figure IV-7 : Représentation de la plaque avec défaut

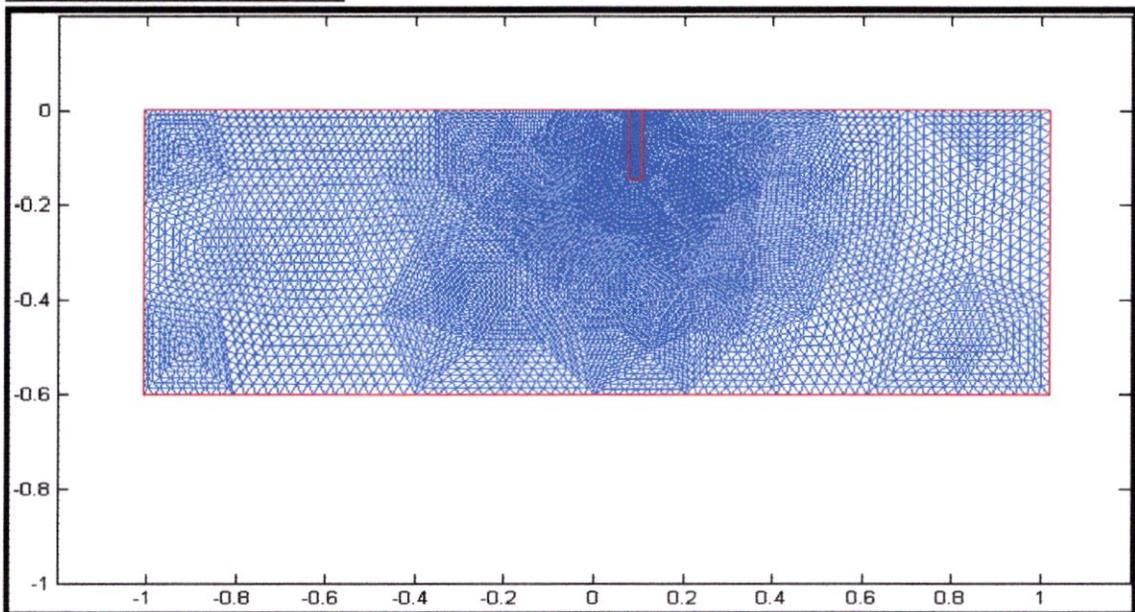
Le maillage de la plaque :

Figure IV-8 : Maillage de la plaque avec défaut (15078noeuds et 28480 triangles)

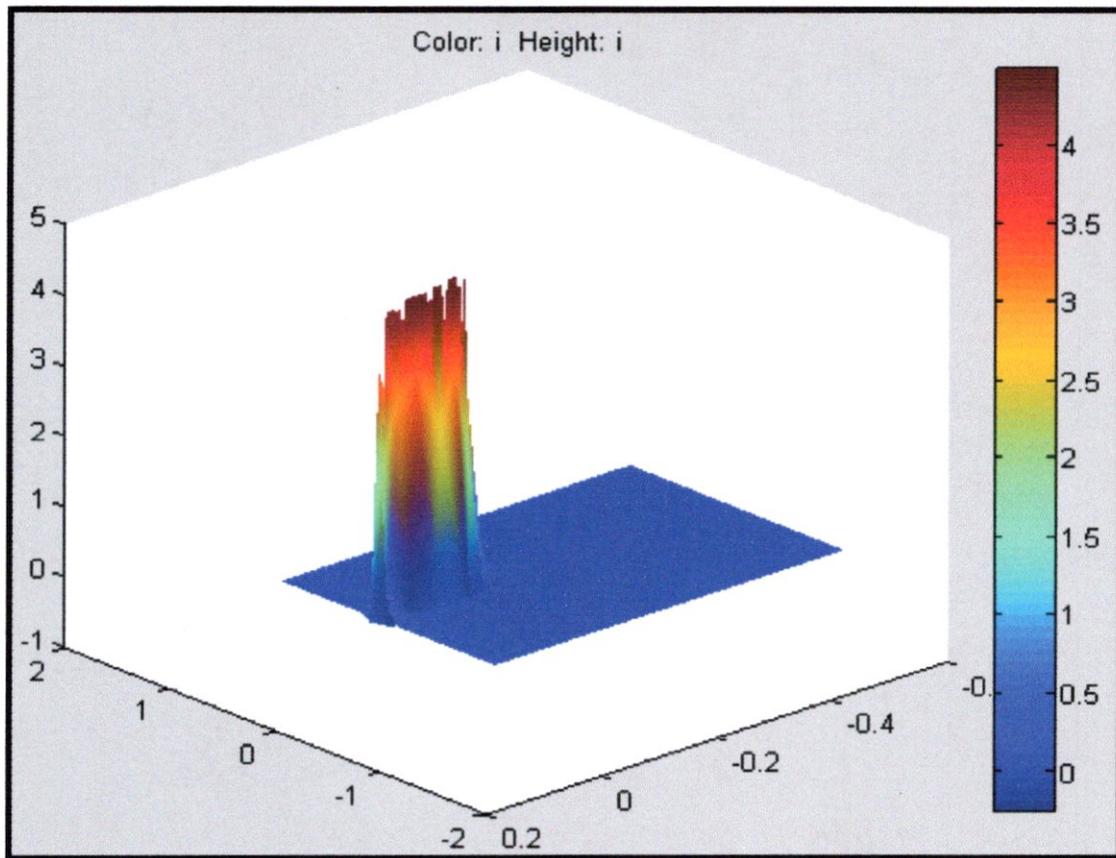


Figure IV-9 : la représentation de la densité des CF au voisinage de défaut (3D)

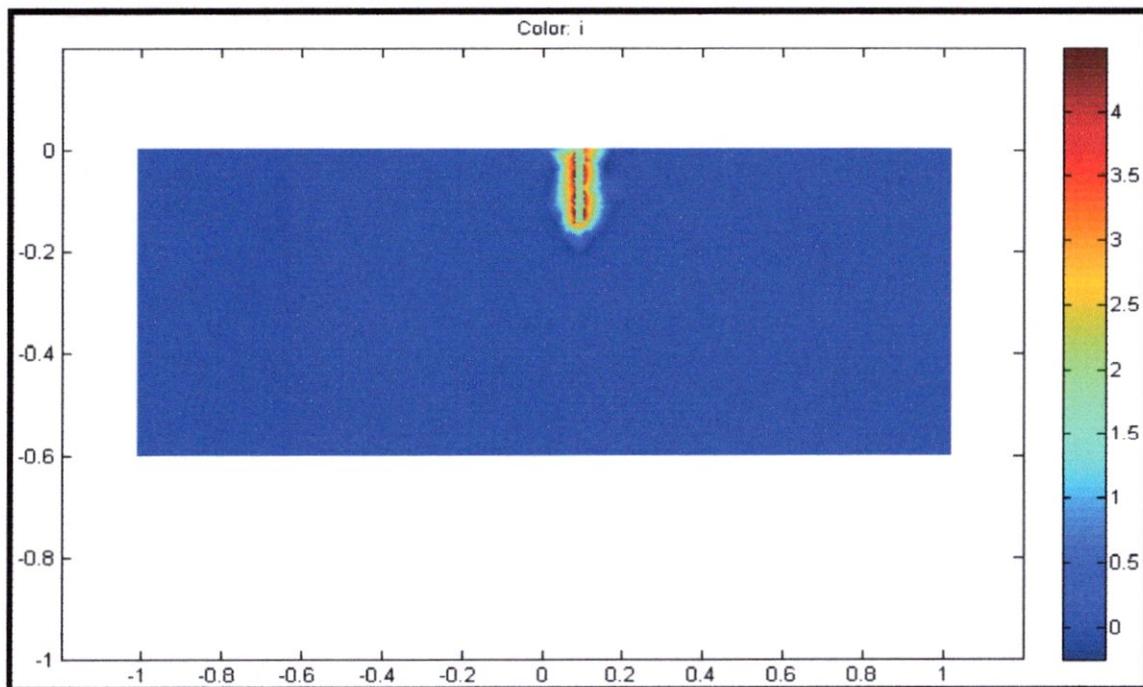


Figure IV-10 : La répartition de la densité des CF autour du défaut

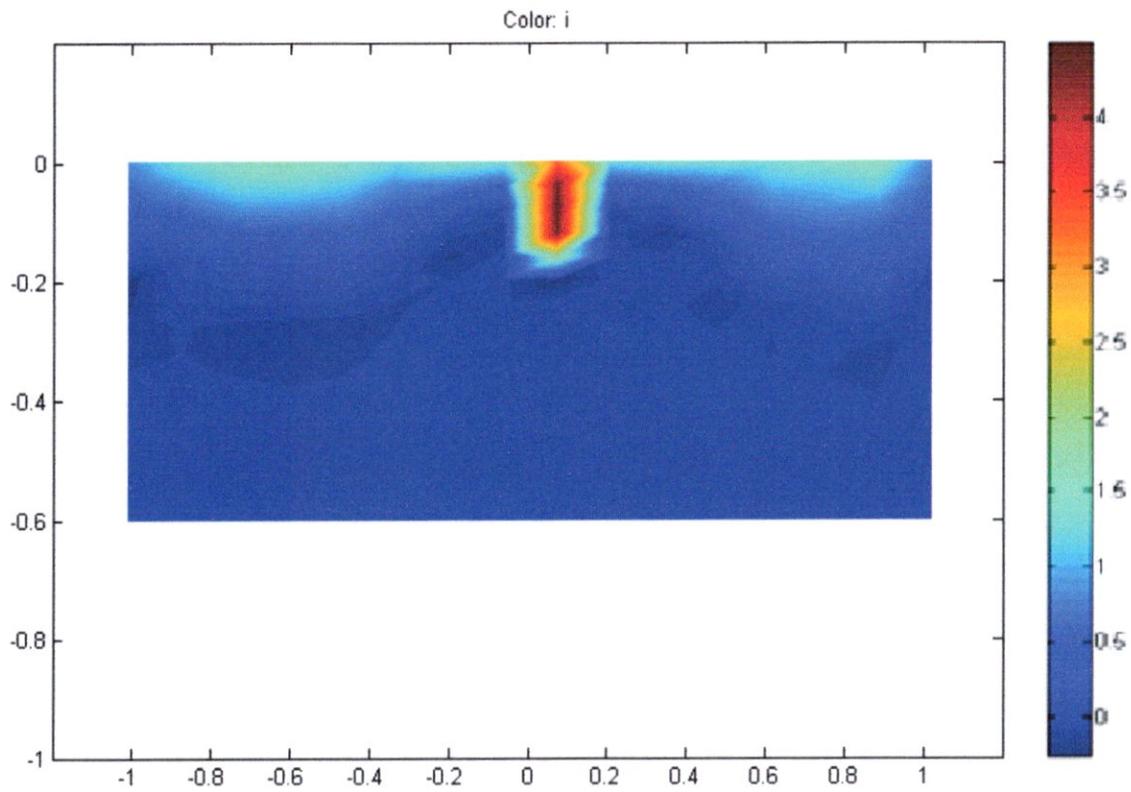


Figure IV-11 : L'influence du défaut sur la densité des courants de FOUCAULT

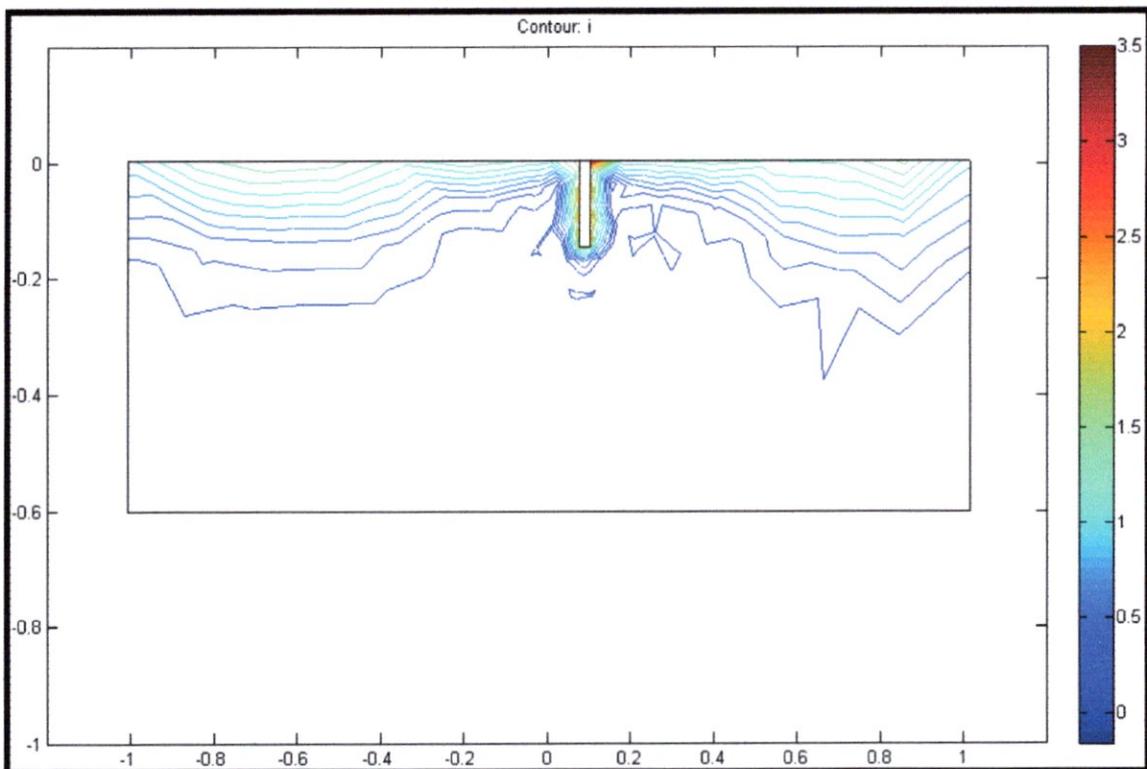


Figure IV-12 : Déviation de la répartition du courant autour du défaut

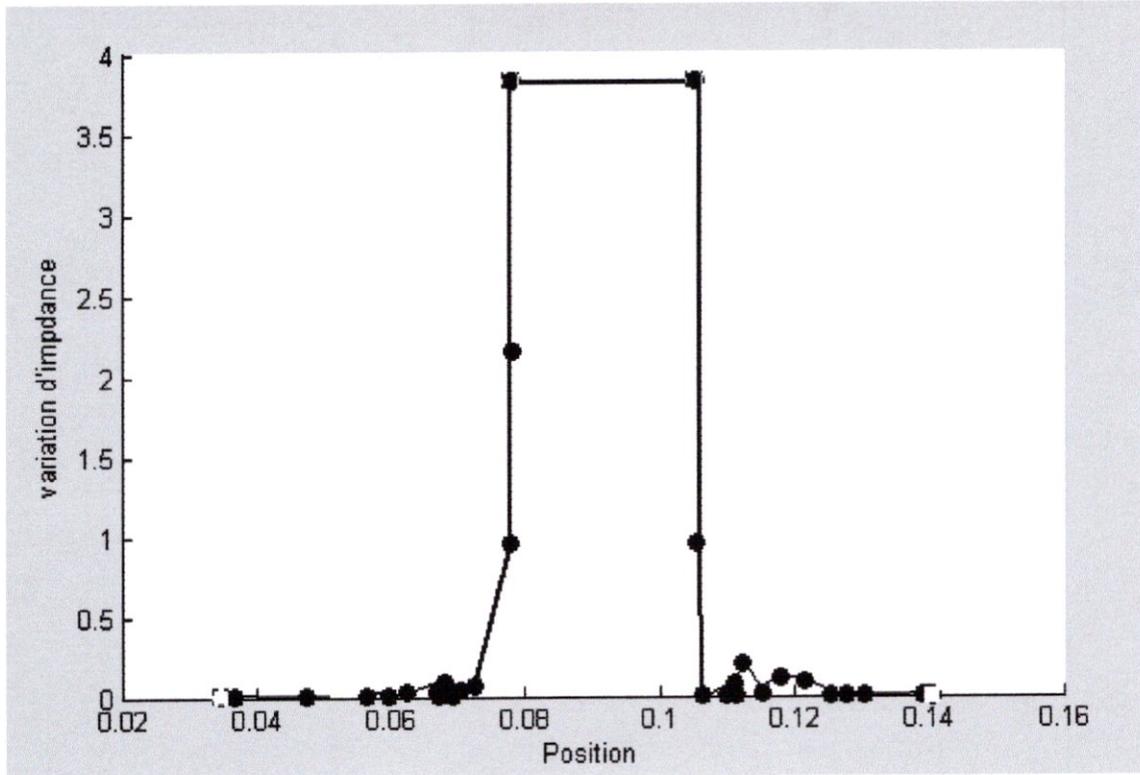


Figure IV-13 : Variation de l'impédance en fonction de la position du défaut

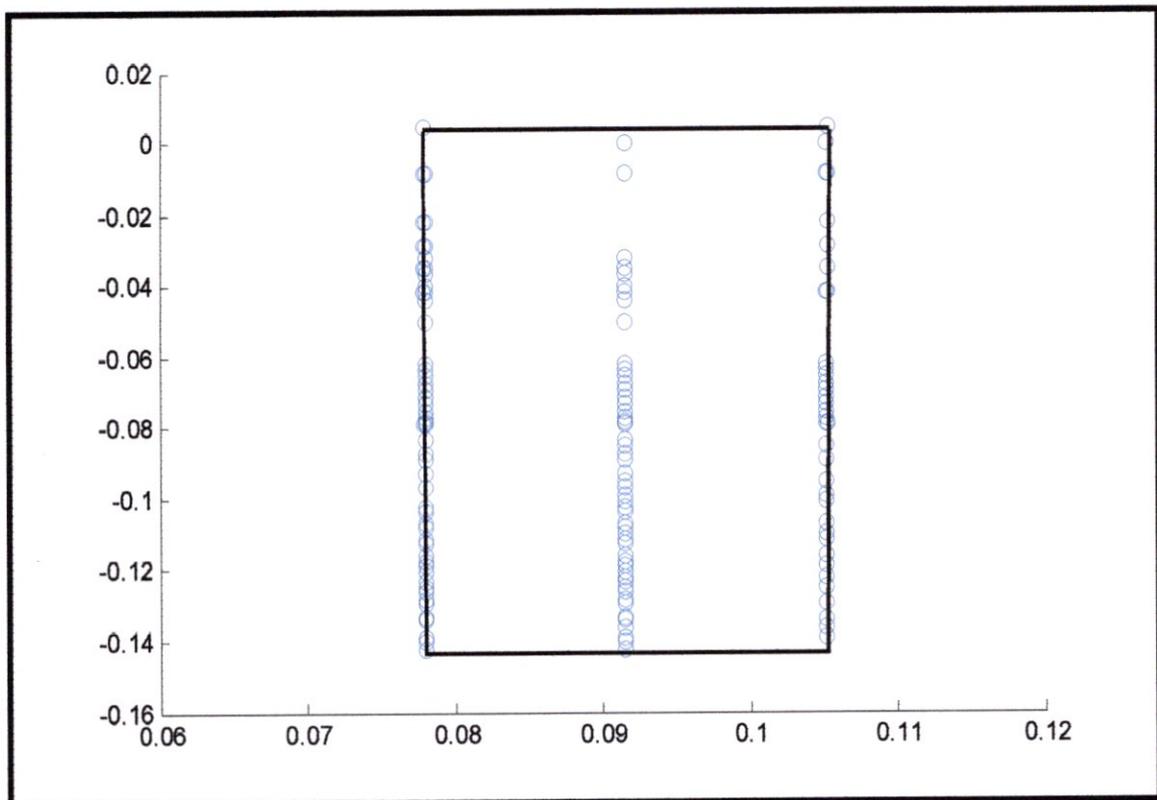


Figure IV-14 : La forme du défaut

Interprétation :

La figure (IV-9) montre que le champ électrique E augmente au voisinage du défaut, ce qui résulte une augmentation directe de la puissance dissipée P et par conséquent la résistance R .

Les figures (IV-10) et (IV-11) représentent la concentration de la densité des CF, la première fait un zoom sur le défaut lui-même, la deuxième représente l'influence du défaut sur la répartition des densités des CF.

La figure (IV-12) représente les lignes où la densité des CF est égale et leur déviation lorsqu'elles atteignent le défaut. C'est une autre représentation de la figure (IV-11), celle ci représente des nappes de courants concentrique sur le défaut ou aussi nous remarquons la répartition exponentielle

La variation de la densité des courants de FOUCAULT (J) et du champ électrique (E) résulte une variation des résistances et des réactances et par conséquent les impédances.

La figure (IV-13) montre la variation de l'impédance Z en fonction de la position. On remarque qu'il y a une variation importante autour du défaut.

Comme l'indique la figure (IV-13), la valeur de Z au début reste relativement constante puis elle commence à augmenter au niveau de défaut. Au-delà du défaut, elle commence à diminuer au fur a mesure que le capteur s'éloigne du défaut vers la limite de la plaque.

Après calcul de la variation d'impédance, la localisation du défaut, sa position et sa forme a été effectuée et est représentées sur la figure (IV-14).

Validation des résultats [13],[14]:

Pour valider les résultats trouvés, on a effectué une comparaison avec des résultats obtenus par d'autres travaux réalisés au sein du CEA (Les partenaires concernés par cette expérience sont : (EDF, G2ELAB,L2EP,CEA, CEDRAT)², pour le but de valider des codes de simulation en END par courants de FOUCAULT.

² :voir Annexe B

Le travail effectué par ces équipes de recherche consiste en des défauts rectangulaires sur des plaques d'aluminium, figure(IV-15).

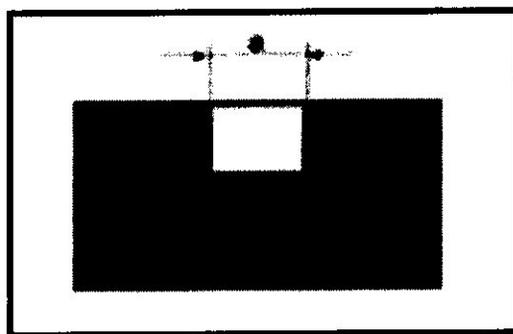


Figure IV-15 : Plaques et défauts

Ils ont aussi fait le maillage de la plaque et du défaut en 3D.

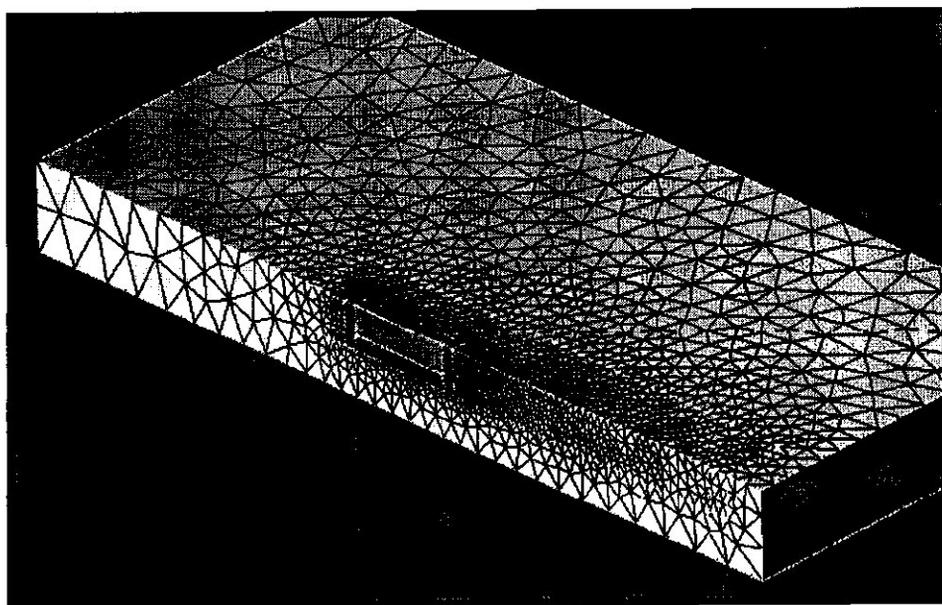


Figure IV-16 : Maillage de la plaque et du défaut

Ils ont réalisé une simulation de contrôle par CF de la plaque avec défaut.

Le graphe ci-dessous représente la variation de l'impédance (énergies) en fonction de la position du capteur (position du défaut).

Les résultats en bleu sont obtenus par mesure expérimentale, et les résultats en rose sont celles du logiciels (FLUX 3D).

A partir de ces résultats on peut savoir la position du défaut et sa forme (dimensions).

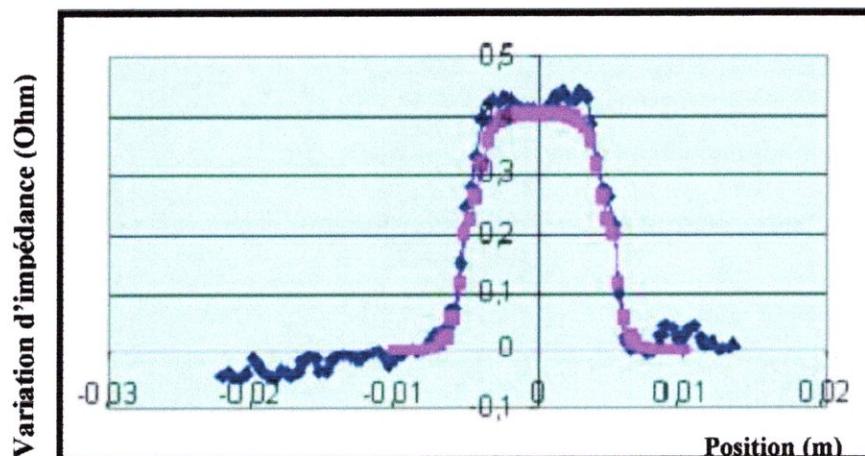


Figure IV-17 : Variation d'impédance due au défaut rectangulaire

La figure (IV-17) est similaire à la figure (IV-13), la valeur de Z au début reste relativement invariable (constante) puis elle commence à augmenter au niveau de défaut, puis elle commence à diminuer au fur et à mesure que le capteur s'éloigne du défaut vers la limite de la plaque.

La figure (IV-18) représente l'influence du défaut sur la répartition de la densité des courants de FOUCAULT dans la plaque testé.

On voit une dégradation de la densité des CF comme celle qui est représentée sur les figures (IV-10) et (IV-11), cette dégradation est due à la présence du défaut.

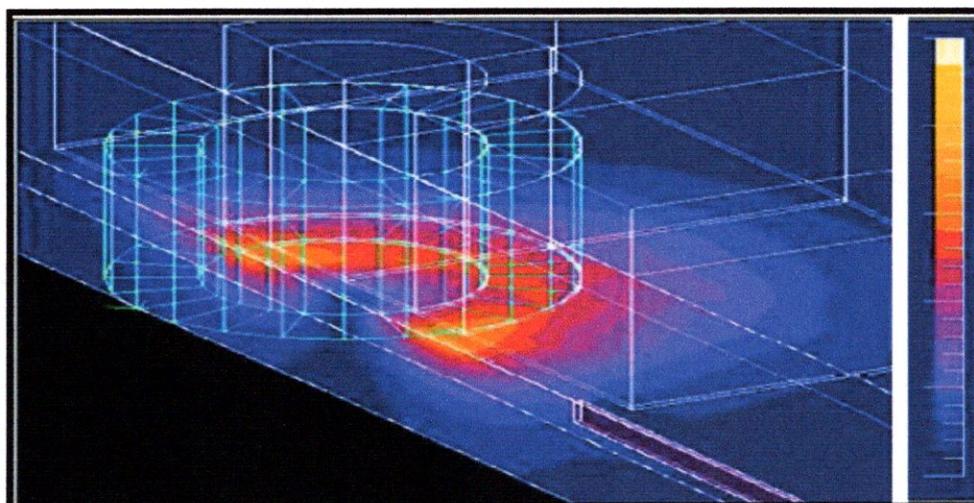


Figure IV-18 : Influence du défaut sur les densités de courant de Foucault

Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les étapes de notre simulation de contrôle non destructif par courants de FOUCAULT en présence d'un défaut rectangulaire, les résultats obtenus sont représentés successivement puis comparés avec les résultats expérimentaux et numériques disponibles, de bons résultats ont été acquis. On a montré que notre simulation est satisfaisante dans le sens que, par comparaison avec le logiciel Flux, les résultats sont identiques. de plus notre travail permet de déterminer les différentes variations pouvant être régies par le défaut et donc par la répartition des courants.

Conclusion générale

Le CND par CF constitue une méthode de contrôle très utilisée en aéronautique grâce à ses avantages.

Parmi les approches de résolution des problèmes de CF, l'utilisation des méthode à éléments finis permet la solution de problèmes complexes.

L'utilisation du modèle de IDA basé sur le calcul énergétique, nous a permis de déterminer les impédances à travers lesquelles on a pu tracer le contour du défaut.

Le modèle est basé sur une formulation fonctionnelle d'énergie. Cette approche modélise les changements des différents champs (magnétiques, électriques) qui sont directement liés aux propriétés et phénomènes régissant le matériaux à travers les inducteurs. C'est un outil intéressant pour améliorer notre compréhension de la physique des interactions de défectuosité d'inducteur.

Les outils de modélisation s'imposent de manière croissante comme des appuis utiles dans les applications d'Examens Non Destructifs (END), qu'il s'agisse de la mise au point des procédures de contrôle, de la compréhension des phénomènes physiques induits, ou bien de la démonstration de performances inhérente aux démarches de qualification réglementaires.

les résultats obtenus permettent de déterminer la répartition des nappes de courants induits à différentes profondeurs. Ce résultat est important dans le sens ou il permet de déterminer la répartition énergétique due au CF .

la méthode des éléments finis nous a permis aussi de suivre, à travers les nappes de courants, le contour du défaut.

Dans le cas de variation de propriétés (conductivité), cette simulation permet de déterminer l'évolution microstructurale dans le matériau dû à un phénomène quelconque.

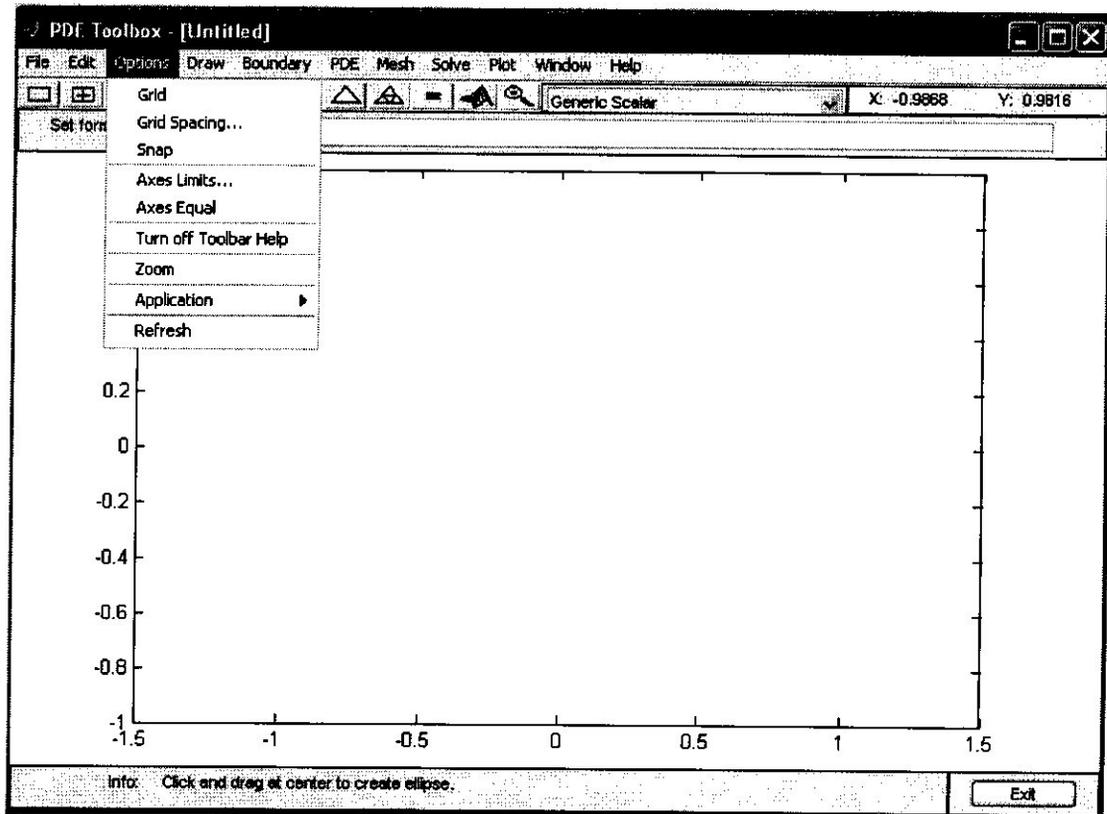
Enfin, l'avantage de cette simulation est la caractérisation du défaut, par sa forme et sa position.

La validité de notre simulation a été effectuée par la mesure d'impédance sur des échantillons ayant des défauts étalants. Les résultats sont satisfaisants dans la détermination des caractéristiques du défaut. De plus, notre simulation réalisée par MATLAB nous a donné des bons résultats, en effet une comparaison avec le code semi analytique du CEA "Civa-CF" et le logiciel Flux 3D de CEDRAT a présenté des résultats similaires.

Comme perspective, il est intéressant de traiter le problème à 3 dimensions.

Pour vous mettre en route, employons l'interface graphique d'utilisateurs du *pdetool* (GUI), qui est un outil d'équation différentielle partielle, pour résoudre un PDE point par point.

D'abord, appeler MATLAB. Pour mettre en marche le GUI, écrire **pdetool** dans la fenêtre des commandes. Le GUI semble assimilé à la figure suivante,



Création de la géométrie :

La première opération est de créer la géométrie sur laquelle vous voulez résoudre le PDE. Le GUI fournit quatre types fondamentaux d'objets solides :

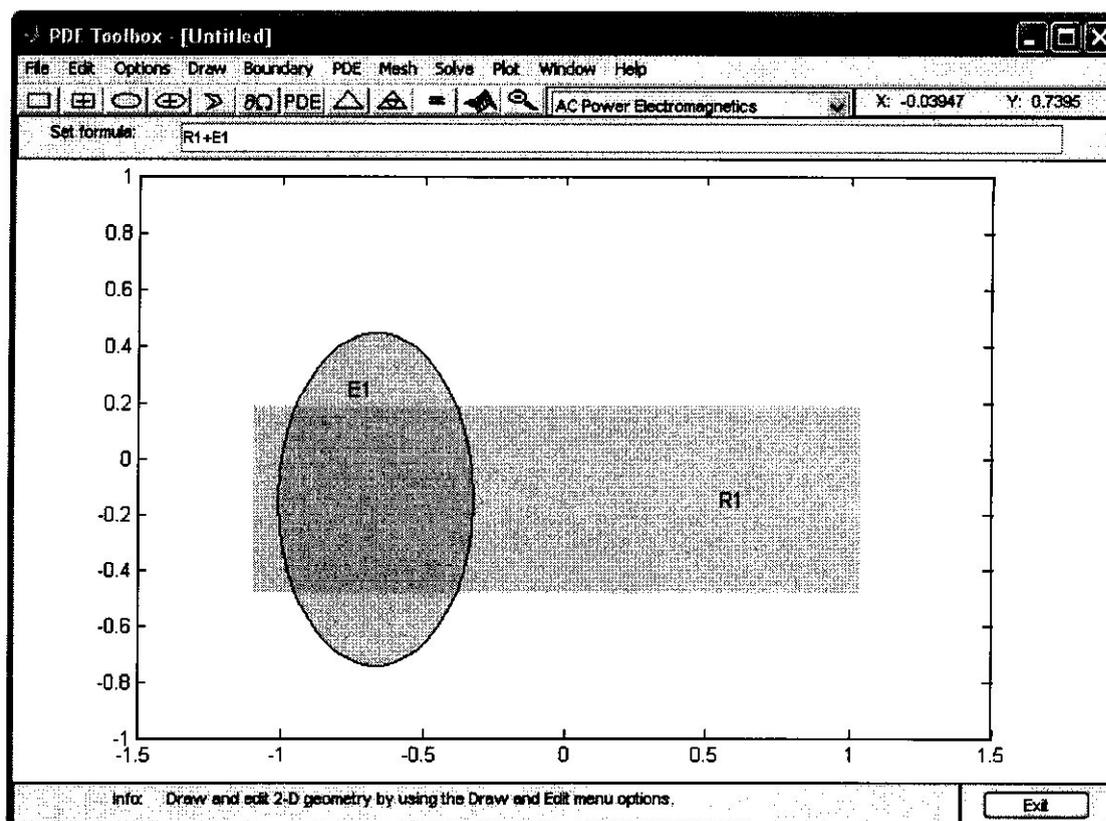
polygones, rectangles, cercles, et ellipses.

Les objets sont employés pour produire un modèle constructif de la géométrie solide.

Chaque objet solide est affecté une étiquette unique.

Cliquer et frotter un objet pour le déménager, double-click sur un objet pour ouvrir une zone de dialogue, où vous pouvez écrire des coordonnées exactes d'emplacement.

Vous pouvez également changer l'étiquette. Si vous n'êtes pas satisfait, vous pouvez supprimer le rectangle en cliquant la touche d'effacement.



Les conditions de frontières :

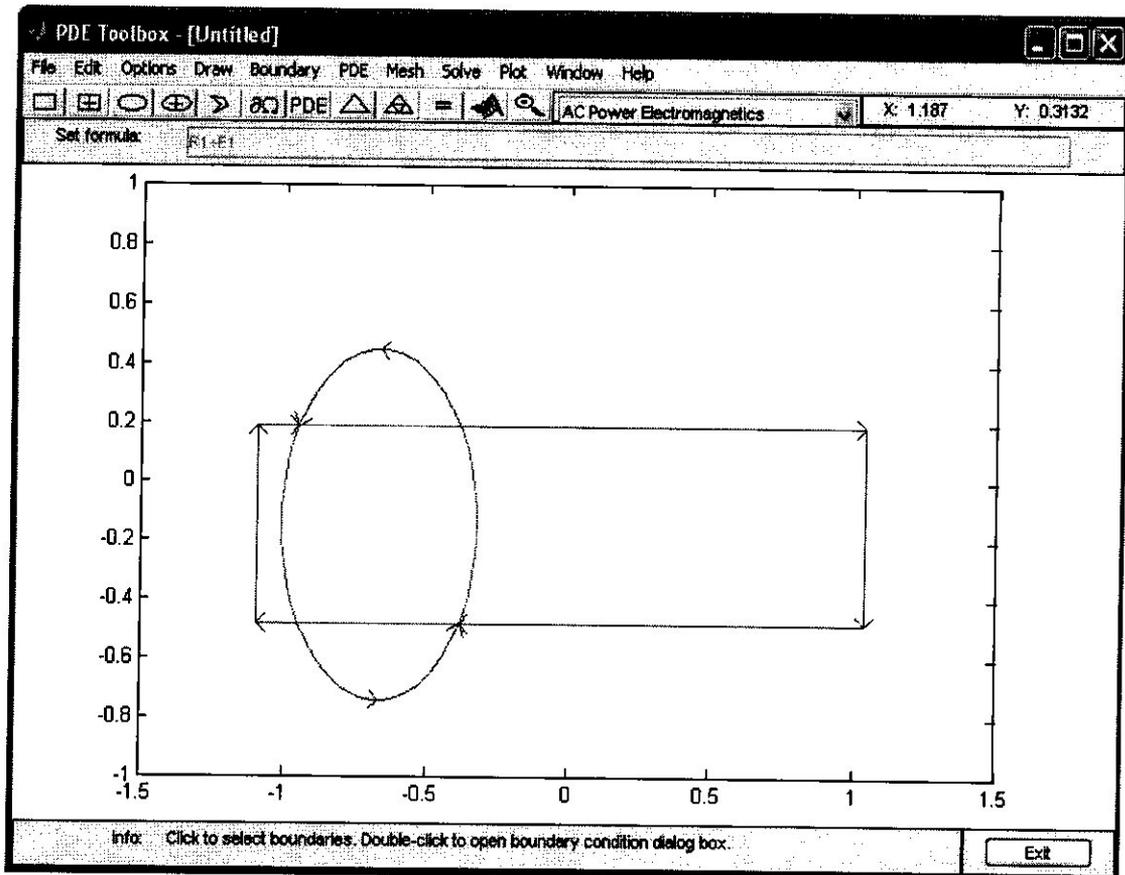
Vous pouvez maintenant définir les conditions de frontière pour les frontières extérieures.

Entrer le mode de frontière en cliquant l'icône ou en choisissant le mode de frontière à partir du menu de frontière.

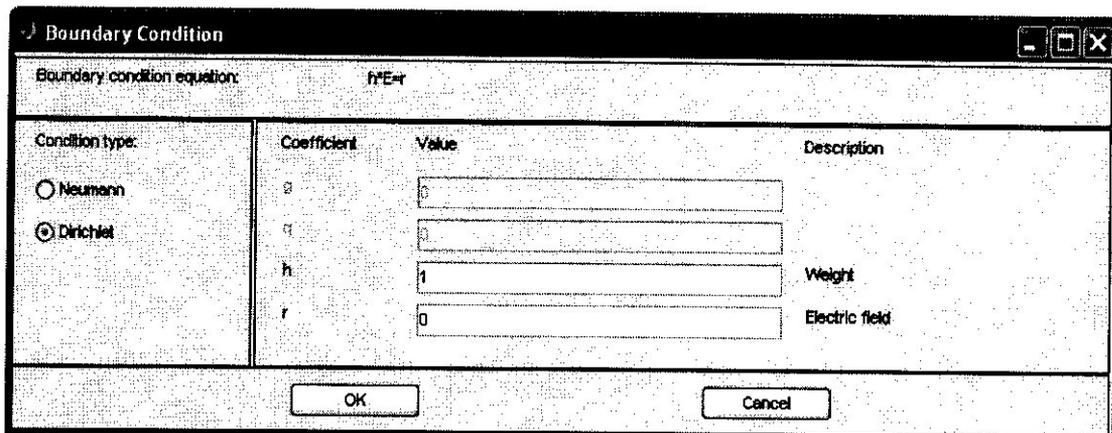
Vous pouvez maintenant enlever des frontières de subdomain et définir les conditions de frontière. Les segments gris sont des frontières de subdomain induites par les intersections des objets solides originaux.

Des états de frontière de Dirichlet sont indiqués par couleur rouge. Les conditions de frontière peuvent également être d'un Neumann généralisé (bleu) ou de type (vert) mélangé.

Vous choisissez les conditions de frontière que vous voulez changer par le click pour choisir un segment de frontière, par Shift+click pour choisir des segments multiples, ou en employant l'option de menu d'édition choisir tous pour choisir tous les segments de frontière.



Double click n'importe où sur les segments choisis de frontière ouvre la zone de dialogue d'état de frontière. Ici, vous choisissez le type d'état de frontière, et écrivez l'état de frontière.



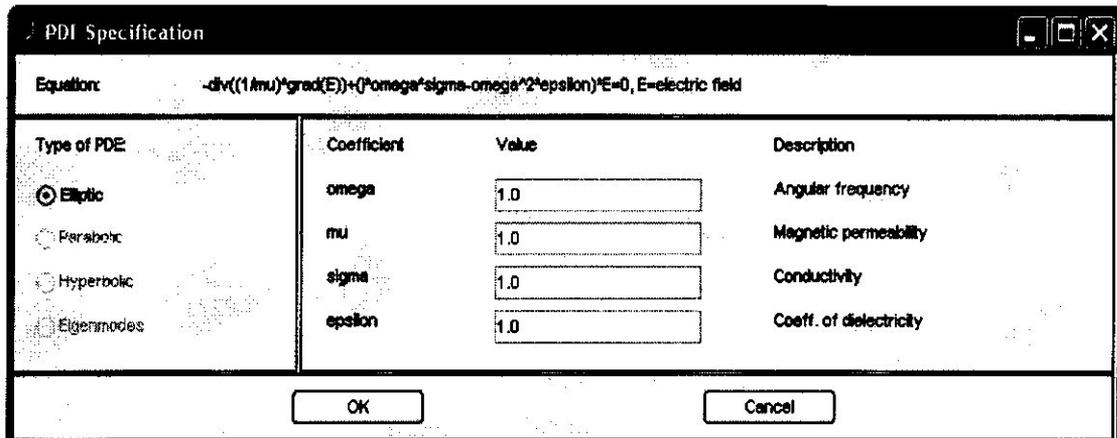
Les coefficient de l'équation :

Après, spécifier le PDE lui-même par une zone de dialogue qui est accédée en cliquant le bouton PDE ou en choisissant des spécifications de PDE à partir du menu de PDE.

En mode de PDE, vous pouvez également accéder à la zone de dialogue de spécifications de PDE par double-click sur un subdomain.

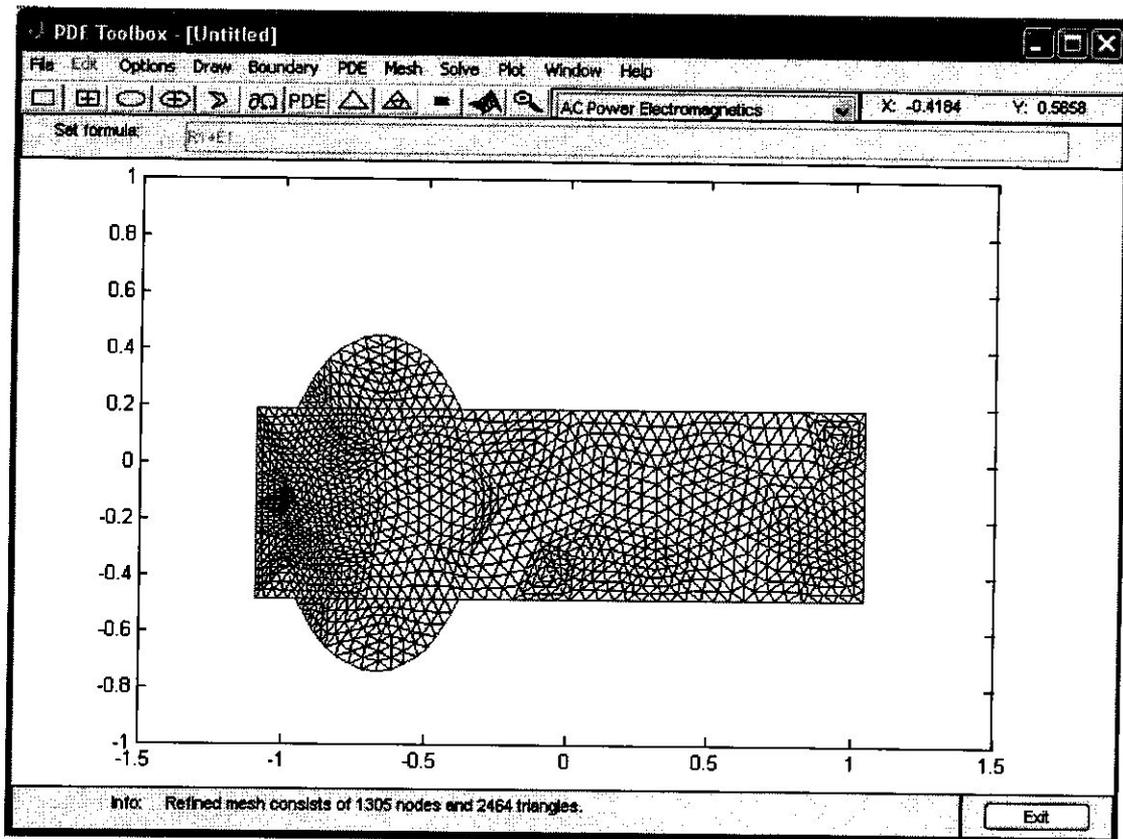
Vous pouvez choisir le type de PDE (elliptique, parabolique, hyperbolique, ou eigenmodes) et définir les coefficients applicables selon le PDE. Ce problème se compose d'un PDE elliptique défini par l'équation

$$-\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu}\nabla(E)\right) + (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)E = 0$$



Le maillage :

La maille triangulaire est produite et manifestée quand cliquant le bouton  pour initialiser la maille. Si vous voulez une solution plus précise, la maille peut être successivement raffinée en cliquant le bouton  ou en choisissant l'option de maille de raffinement à partir du menu de maille. Utilisant l'option de maille de secouer, la maille peut être secouée pour améliorer la qualité de triangle.

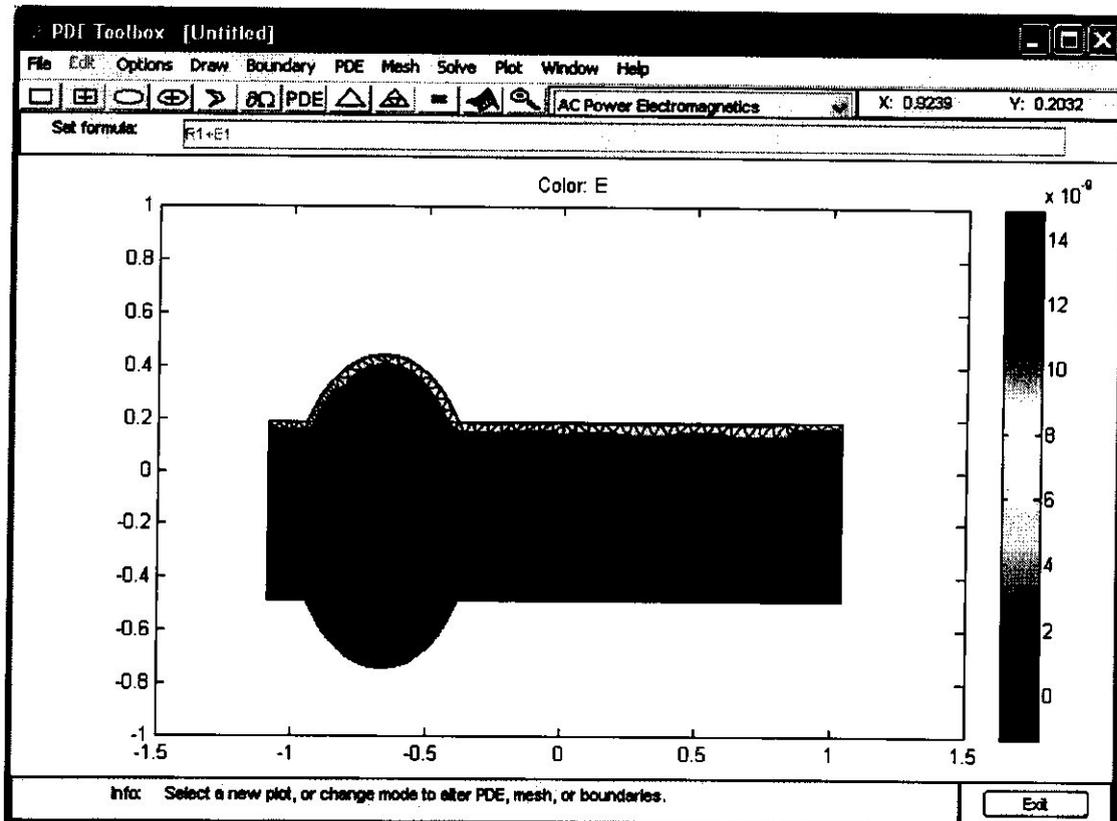


La résolution de l'équation :

Nous sommes maintenant prêts à résoudre le problème.

Cliquer sur le bouton  ou choisir résoudre PDE du menu de résoudre pour résoudre le PDE. La solution est alors tracée.

Par défaut, le plot emploie la coloration interpolée et une carte couleur linéaire. Un colorbar est également fourni pour tracer les différentes nuances aux valeurs numériques de la solution. Si vous voulez, la solution peut être exportée comme vecteur vers la zone de travail de force de MATLAB.



Il y a beaucoup plus de modes de plot pour vous aider à concevoir la solution.

Cliquer le bouton  ou choisir les paramètres à partir du menu de plot pour accéder à la zone de dialogue pour le choix des différentes options de plot. Plusieurs types de plot sont disponibles, et la solution peut être tracée dans le GUI ou dans une figure séparée comme plot à trois dimensions. Maintenant, choisir un plot où la couleur et la taille les deux représentent .

L'objectif du projet consiste au développement de méthodes numériques, d'une interface homme-machine métier, de l'exploitation des développements issus du projet MUTSIC (en particulier le couplage FLUX-CIVA) ainsi que la validation des résultats de simulation.

Pour parvenir à cet objectif on s'appuie sur l'existence d'outils de simulation des CND aboutis et déjà utilisés dans l'industrie tels que les logiciels CIVA développé par le CEALIST et FLUX développé par CEDRAT.

Les partenaires du projet

- **EDF** : Un industriel concerné par l'exploitation des méthodes de CND, et utilisateur final de l'outil de simulation.
- **Le G2ELAB** : un laboratoire universitaire du domaine de l'électromagnétisme basse fréquence (INPG Grenoble).
- **Le L2EP** : un laboratoire universitaire du domaine de l'électromagnétisme basse fréquence (l'ENSAM et l'université de Lille).
- **CEA-LIST** : un centre de recherche, développeur de modèles physiques pour le contrôle et de l'outil de simulation CIVA.
- **CEDRAT** : une PME innovante éditeur d'un logiciel de modélisation et de simulation électromagnétique (FLUX) et distributeur de CIVA.

Bibliographie

- [1] Nondestructive Evaluation and Quality. Metals Handbook.ASM Handbook.
- [2] Abdelhak ABDOU , Contrôle non destructif par courant de FOUCAULT, étude et réalisation d'un capteur inductif, mémoire de magister université de Batna, 2006.
- [3] M.L.KHENE, Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures à géométrie complexe par adaptation de la méthode des volumes finis, mémoire de magister université de Batna, 2006.
- [4] Paul E.MIX. Introduction to nondestructive testing, A training guide, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION,2005.
- [5] Nathan Ida.« Three dimensional finite element modeling of electromagnetic nondestructive testing phenomena », PhD thesis, department of Electrical Engineering ,Colorado State University, Fort Collins,Colorado,1983.
- [6] Nathan Ida and William Lord , « A Finite Element Model for Three –Dimensional Eddy Current NDT phenomena »,IEEE Transactions on Magnetics, Mag 19(5) ,1983,2260-2265.
- [7] Nathan Ida and William Lord , « A Finite Element Model for Three –Dimensional Eddy Current NDT phenomena », IEEE Transactions on Magnetics, Mag 21(6) November 1985,2615-2643.
- [8] Nathan Ida «Numerical modeling for Electromagnetic Non Destructive Evaluation » Chapman and Hall,New York,1995.
- [9] Nathan Ida Joao P.A. Bastos, Electromagnetics and Calculation of Fields”Second Edition SPRINGER, 1997.
- [10] J. Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND)", Technique de l'ingénieur, R1400, 1996.
- [11] N.IDA, R.PALANISAMY and W.LORD “Eddy current probe design using finite element analysis” American society for nondestructive testing,1983.
- [12] Brian D. Hahn and Daniel T. Valentine “ Essential matlab for engineers and scientists” third edition.2007
- [13] A.Schumm, G. Pichenot, M; Mayos : « Une démarche de validation et comparaison des codes de modélisation en courants de Foucault » . Journées COFREND 2005, Beaune
- [14] F. Foucher, X. Brunotte, A. Kalai, Y. Le Floch, G. Pichenot and D. Prémel “ Simulation of eddy current testing with CIVA® and Flux® “