

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

**Mémoire de Master**

Présenté par

**Mlle. HAOUCHENE Leticia**

**Mlle. OUADOU Mounira**

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

---

## **Etude et simulation d'un système d'imagerie par courants de Foucault.**

---

**Soutenu le 21 / 09 /2020 devant le jury composé de:**

Mme. Mziou	Nassima	Professeur	UMBB	Président
Mr. Hamel	Meziane	MCB	UMBB	Rapporteur
Mlle. Larabi	Zina	MAA	UMBB	Examineur
Mr. Aouzellag	Haroune	MCB	UMBB	Examineur

**Année Universitaire : 2019/2020**

# Remerciements

---

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques (ISE) de l'université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès (UMBB).

Nous tenons à remercier tout particulièrement Monsieur Meziane Hamel, notre encadreur, MCB à l'UMBB, pour sa précieuse aide et ses conseils avisés mais surtout pour ses qualités autant que personne et enseignant. Il a été pour nous un mentor pendant tout le long de notre parcours universitaire. Nous lui exprimons toute notre gratitude.

Nous tenons à remercier Air Algérie de nous avoir donné l'opportunité de faire notre stage de fin d'étude au sein de sa base de maintenance.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers Messieurs RAHNI Djamel et HAMIA Riad, ingénieurs à la base de maintenance, pour leur accueil et leur assistance durant notre période de stage. Ils nous ont orientées, expliqué et répondu à toutes nos questions concernant les CND.

Nous remercions l'ensemble du personnel de la cellule NDT, qui nous a consacré son temps et partager avec nous son expérience.

Nous remercions Madame Nassima MZIOU, Professeur à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Enfin, nous remercions Mademoiselle Zina LARABI, MAA à l'UMBB, et Monsieur AOUZELLAG Haroune, MCB à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

# Dédicaces

---

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à dédier ce travail à:

Au modèle de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père, Djamel.

Ma chère mère Hassiba (Qu'elle repose en paix et qu'elle soit au paradis).

À tous mes frères et sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir leur revient en premier pour leurs encouragements, que Dieu les garde et les oriente sur le bon chemin.

Toute ma grande famille, toutes mes chères amies et tous mes camarades et collègues, et tous ceux que j'aime. Je Présente mes excuses à ceux qui ne sont pas mentionnés.

**Mounira.**

Je tiens à dédier ce travail à ma mère et mon père qui m'ont toujours soutenu et qui m'ont offert tous les moyens de réussir, je vous serais éternellement reconnaissante mes chers parents. Que dieu vous garde et vous protège.

À ma petite sœur Kamélia sans qui, la vie n'aurait pas de goût.

À mes chères amies, Nawel et Sarra, qui ont toujours été là, merci de faire partie de ma vie.

Ainsi qu'à tous mes amis qui ont fait que ses années soient plus agréables.

**Leticia.**

# Sommaire

---

Liste des figures .....	I
Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale .....	1

## **Chapitre I**

### **Présentation de la base de maintenance d’Air Algérie**

I.1. Présentation générale de l’entreprise .....	3
I.2. Le hangar de maintenance de la base d’Air Algérie.....	3
I.3. Politique de qualité et de sécurité .....	4
I.4. Protection des installations et des locaux de maintenance .....	5
I.5. Les types d’avions de Air Algerie .....	5
I.6. Fonctionnement de l’entreprise .....	6
I.7. Organigramme de la base de maintenance .....	7
I.8. La cellule NDT .....	7
I. 9. Contrôle par courants de Foucault.....	8
I.9.1. Les opérations de contrôle .....	8
I.9.2. Les étapes à suivre .....	8
I.9.3. Quelques applications des courants de Foucault à la cellule NDT.....	9
I.10.Conclusion.....	12

## **Chapitre II**

### **Généralités sur le contrôle non destructif**

II.1. Introduction .....	13
II.2. Historique.....	13
II.3. Le contrôle non destructif .....	14
II.4. Principe physique du CND.....	15
II.5. Techniques du CND .....	16
II.5.1. L’examen visuel .....	16
II.5.2. Ressuage.....	17
II.5.3. Ultrasons.....	18
II.5.4. Radiographie .....	18
II.5.5. Magnétoscopie .....	19

II.5.6. Thermographie Infrarouge .....	20
II.5.7. Le contrôle par courants de Foucault .....	21
II.6. Principe de fonctionnement du CND par courants de Foucault.....	21
II.7. Schéma synoptique du dispositif.....	22
II.8. Principaux paramètres influant sur le contrôle.....	23
II.8.1. Paramètres liés au matériau à sonder .....	23
II.8.2. Paramètres liés au montage .....	23
II.8.3. Paramètres électriques.....	23
II.9. Mode de contrôle.....	23
II.9.1. Mode de contrôle absolu .....	24
II.9.2. Mode de contrôle compensé.....	24
II.9.3. Mode de contrôle différentiel .....	25
II.10. Objectifs des CND-CF .....	25
II.10.1. Caractérisation géométrique.....	25
II.10.2. Caractérisation électromagnétique .....	26
II.10.3. Contrôle de l'état de la santé .....	26
II.11. Classification des capteurs .....	26
II.11.1. Classification selon la géométrie.....	26
II.11.2. Classification selon la fonction .....	28
II.12. Gammes de fréquences .....	29
II.13. Epaisseur de peau .....	30
II.14. Eléments perturbateurs.....	31
II.15. L'imagerie pour l'évaluation non destructive .....	31
II.16. Avantages du CND par courants de Foucault .....	32
II.17. Limites du CND par courants de Foucault.....	33
II.18. Conclusion.....	33

### **Chapitre III**

#### **Modélisation numérique des structures du CND-CF**

III.1. Introduction.....	34
III.2. Les équations de Maxwell .....	34

III.2.1. Maxwell-Gauss .....	34
III.2.2. Maxwell-Faraday .....	35
III.2.3. Conservation du flux.....	35
III.2.4. Maxwell-Ampère .....	36
III.3. Lois de comportement des milieux.....	36
III.3.1. Relations du milieu .....	36
III.3.2. Loi d'Ohm.....	37
III.4. Hypothèses simplificatrices .....	37
III.5. Formulations de la magnétodynamique.....	38
III.5.1. Formulation $\vec{A} - V$ .....	38
III.5.2. Formulation $\vec{T} - \Phi$ .....	39
III.6. Méthodes de résolution.....	40
III.6.1. Méthodes analytiques.....	40
III.6.2. Méthodes numériques .....	40
III.7 Méthode des différences finis (MDF).....	40
III.8 Méthode des éléments finis (MEF).....	41
III.8.1. La discrétisation .....	41
III.8.2. Fonction d'interpolation: .....	43
III.9. Calcul de la variation d'impédance .....	43
III.9.1. Impédance à travers les énergies électromagnétiques .....	44
III.10. Conclusion .....	45

## **Chapitre IV**

### **Applications et validations**

IV.1. Introduction .....	46
IV.2. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell.....	46
IV.3. Simulation d'un système capteur/plaque avec défaut.....	47
IV.3.1. Variation de la fréquence.....	48
IV.3.2. Variation du lift-off.....	50
IV.3.3. Variation de la longueur du défaut .....	50

IV.3.4. Maillage .....	51
IV.3.5. Distribution des courants induits .....	51
IV.4. Simulation d'un système d'imagerie par courants de Foucault.....	52
Configuration I : pièce sans défaut .....	55
Configuration II : pièce avec défaut .....	56
IV.II.1. Variation de la longueur du défaut.....	56
IV.II.2. Variation de la largeur du défaut.....	58
IV.II.3. Variation du lift-off.....	59
IV.II.4. Variation de la profondeur .....	62
IV.5. Conclusion .....	63
Conclusion générale .....	64
Bibliographie.....	65

# Liste des figures

---

## **Chapitre I. Présentation de la base de maintenance d’Air Algérie**

Fig. I. 1. Situation de l'entreprise de satellite.....	3
Fig. I. 2. Hangar de maintenance d’Air Algérie. ....	4
Fig. I. 3. Quelques types d’avions.....	6
Fig. I. 4. L'organigramme de la base de maintenance.....	7
Fig. I. 5. L’appareil qui sert au CND-CF ainsi qu’une sonde et un étalon. ....	8
Fig. I. 6. Rototest.....	9
Fig. I. 7. Contrôle du fuselage d’un avion par courants de Foucault. ....	9
Fig. I. 8. Calcul par courants de Foucault de la profondeur de la bosse. ....	10
Fig. I. 9. Calcul des paramètres exigés par le job order.....	10
Fig. I. 10. Contrôle par VEESCAN d’une roue. ....	11
Fig. I. 11. L’écran du VEESCAN.....	11
Fig. I. 12. Roue A330.....	11

## **Chapitre II. Généralités sur le contrôle non destructif**

Fig. II. 1.Principe de détection d'un défaut. ....	16
Fig. II. 2. L’examen visuel.....	17
Fig. II. 3. Les étapes du ressuage. ....	18
Fig. II. 4. Le principe de contrôle par ultrasons.....	18
Fig. II. 5. Le principe de radiographie. ....	19
Fig. II. 6. Le principe de CND par les Rayons. ....	19
Fig. II. 7. Le principe de contrôle par la magnétoscopie. ....	20
Fig. II. 8. Le système expérimental de la technique TIR.....	21
Fig. II. 9. Le controle par courants de Foucault.....	21
Fig. II. 10. Le principe de CND par courants de Foucault.....	22
Fig. II. 11. Schéma synoptique de la chaine de contrôle. ....	22
Fig. II. 12. Mesure en mode absolu. ....	24
Fig. II. 13. Mesure en mode compensé.....	24
Fig. II. 14. Mesure différentielle.....	25
Fig. II. 15. Bobine encerclante.....	26
Fig. II. 16. Bobine interne glissante avec noyau.....	27
Fig. II. 17. Bobine simple avec noyau. ....	27
Fig. II. 18. Bobine plate. ....	28
Fig. II. 19. Capteur à double fonction.....	28

Fig. II. 20. Capteurs à fonctions séparées. ....	29
Fig. II. 21. Répartition des courants de Foucault dans une pièce. ....	30
Fig. II. 22. Dénomination des représentations A-scan, B-scan et C-scan par ultrasons. ....	31

### **Chapitre III. Modélisation numérique des structures du CND-CF**

Fig. III. 1. Élément à une dimension. ....	42
Fig. III. 2. Élément triangulaire à deux dimensions. ....	42
Fig. III. 3. Élément carré à deux dimensions. ....	42
Fig. III. 4. Éléments à trois dimensions. ....	43
Fig. III. 5. Triangle de Pascal. ....	43

### **Chapitre IV. Applications et validations**

Fig. IV. 1. La fenêtre Maxwell 3D. ....	46
Fig. IV. 2. L'organigramme de calcul sous Ansys-Maxwell. ....	47
Fig. IV. 3. Géométrie du système A. ....	48
Fig. IV. 4. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=50\text{kHz}$ . ...	49
Fig. IV. 5. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=100\text{kHz}$ . .	49
Fig. IV. 6. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour $f=150\text{kHz}$ . .	49
Fig. IV. 7. Variation d'impédance du capteur en fonction du déplacement. ....	50
Fig. IV. 8. Changement de la longueur du défaut $L=8\text{mm}$ . ....	50
Fig. IV. 9. Maillage au milieu du défaut. ....	51
Fig. IV. 10. Maillage à l'extrémité du défaut. ....	51
Fig. IV. 11. Maillage dans la zone saine. ....	51
Fig. IV. 12. Densité du courant au milieu du défaut. ....	52
Fig. IV. 13. Densité du courant induit à l'extrémité du défaut. ....	52
Fig. IV. 14. Densité du courant dans la zone saine. ....	52
Fig. IV. 15. L'avion L-382/C-130. ....	53
Fig. IV. 16. La pièce et son positionnement dans l'avion. ....	53
Fig. IV. 17. Le support de la charnière de la porte du train d'atterrissage avant. ....	54
Fig. IV. 18. Géométrie étudiée (a) sans défaut (b) avec défaut. ....	54
Fig. IV. 19. B-scan de la pièce sans défaut. ....	56
Fig. IV. 20. C-scan de la pièce sans défaut. ....	56
Fig. IV. 21. La variation de l'impédance en fonction de la longueur du défaut. ....	57
Fig. IV. 22. C-scan du défaut pour $L=2.5\text{mm}$ . ....	57
Fig. IV. 23. C-scan du défaut pour $L= 5 \text{ mm}$ . ....	57
Fig. IV. 24. C-scan du défaut pour $L=7.5\text{mm}$ . ....	58

Fig. IV. 25. C-scan du défaut pour L= 10mm.....	58
Fig. IV. 26. Variation de l'impédance en fonction de l'épaisseur du défaut. ....	58
Fig. IV. 27. C-scan du défaut pour e = 0.5mm .....	59
Fig. IV. 28. C-scan du défaut pour e = 1mm .....	59
Fig. IV. 29. C-scan du défaut pour e = 1.5mm. ....	59
Fig. IV. 30. Variation de l'impédance en fonction du lift-off. ....	60
Fig. IV. 31. C-scan du défaut pour lift-off = 0.13mm .....	60
Fig. IV. 32. C-scan du défaut pour lift-off = 0.26mm .....	60
Fig. IV. 33. C-scan du défaut pour lift-off = 0.5mm .....	60
Fig. IV. 34. C-scan du défaut pour lift-off = 0.75mm .....	60
Fig. IV. 35. C-scan du défaut pour lift-off = 1mm .....	61
Fig. IV. 36. C-scan du défaut pour lift-off = 1.25mm .....	61
Fig. IV. 37. C-scan du défaut pour lift-off = 1.5mm .....	61
Fig. IV. 38. C-scan du défaut pour lift-off = 1.75mm .....	61
Fig. IV. 39. C-scan du défaut pour lift-off = 2.25mm. ....	61
Fig. IV. 40. Variation de la profondeur du défaut. ....	62
Fig. IV. 41. C-scan du défaut pour P=10% .....	62
Fig. IV. 42. C-scan du défaut pour P=20% .....	62
Fig. IV. 43. C-scan du défaut pour P= 30% .....	63
Fig. IV. 44. C-scan du défaut pour P=100%.....	63

# Liste des tableaux

---

Tab. IV.1. Dimensions du système A. ....	48
Tab. IV.2. Dimensions du système B. ....	55

# **Abréviations et symboles**

---

## Abréviations

CND :	Contrôle non destructif
CF :	Courants de Foucault
END :	Essai non destructif
MEF :	Méthode des éléments finis
NDT :	Non-destructive testing
TIR :	Thermographie infrarouge

## Symboles

$\vec{B}$ :	Induction magnétique
$\vec{H}$ :	Champ magnétique
$\delta$ :	Epaisseur de peau
$f$ :	Fréquence
$\sigma$ :	Conductivité électrique
$\mu$ :	Perméabilité magnétique
$\vec{J}$ :	Densité de courants
$\vec{E}$ :	Champ électrique
$\vec{D}$ :	Induction électrique
$\rho$ :	Densité de charge électrique
$\varepsilon$ :	Permittivité électrique
$\vec{T}$ :	Potentiel vecteur électrique
$\Phi$ :	Potentiel scalaire magnétique
$I$ :	Intensité de courant
$N$ :	Nombre de spires
$U$ :	Tension
$R$ :	Résistance
$P_j$ :	Pertes joules
$W_m$ :	Energie magnétique emmagasinée
$S$ :	Section d'une bobine

# **Introduction générale**

---

# Introduction générale

L'objectif du contrôle non destructif (CND) est de détecter des dégradations ou inhomogénéités dans les matériaux sans les altérer. Le CND est par conséquent un enjeu crucial dans le milieu industriel et notamment lors des opérations de maintenance. Parmi le panel de procédés (optique, électromagnétique, thermique, chimique, ultra-sonores, etc...), ceux basés sur les courants de Foucault (CF) se distinguent dès lors que l'on a affaire à des matériaux électriquement conducteurs. Leur robustesse et leur simplicité de mise en œuvre en font une des méthodes les plus utilisées.

Le vieillissement du parc aéronautique impose aux techniques de maintenance des exigences de contrôles en termes de fiabilité et rapidité accrues. Les principaux enjeux sont la détection et la caractérisation, au plus tôt dans le cycle de vie d'un produit, des fissures dans les pièces sensibles. Les pièces les plus souvent concernées sont les structures rivetées de fuselage.

Les méthodes de détection ont largement été développées au cours du siècle dernier, l'enjeu aujourd'hui est à la caractérisation des défauts détectés et l'optimisation des méthodes. Ainsi des techniques d'imagerie par CF ont fait leur apparition afin de produire des images de cartographies de surface des pièces à contrôler. Le principe repose généralement sur un capteur à CF qui balaye la structure et récupère les informations sur l'état de surface.

Les capteurs plus couramment utilisés en CND par CF sont les bobines « filaires ». Leur conception est la plus simple à réaliser et la moins coûteuse, caractéristiques qui les rendent très intéressantes pour des applications industrielles. Ils sont constitués d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau qui peut être composé d'air ou de ferrite.

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

Ce travail se place dans le cadre applicatif de la technique des éléments finis pour la modélisation numérique d'imagerie par CF dédié à la détection et la caractérisation de défauts de type fissure pouvant apparaître au sein des pièces rivetées dans les fuselages d'avions.

Ce mémoire est ainsi organisé comme suit :

Le premier chapitre est une présentation de la base de maintenance de l'entreprise nationale Air Algérie où nous avons effectué notre stage de fin d'étude et assisté aux différentes applications de la technique CND par CF dans le domaine de l'aéronautique.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les méthodes de CND. Les principales méthodes de CND sont rappelées. Le contrôle basé sur les CF est particulièrement détaillé.

Le troisième chapitre développe la modélisation numérique des dispositifs de CND par CF. Une structure mathématique regroupant l'ensemble des équations de Maxwell est établie. Les formulations en potentiels permettant de résoudre les problèmes de CF sont introduits avec la MEF.

Le quatrième chapitre est dédié aux applications et aux résultats. Une première application est consacrée à la validation des résultats de simulation numérique d'une configuration CND par CF dont on a les données expérimentales. Tandis que la deuxième est une simulation de la technique d'imagerie par CF d'une pièce rivetée d'un avion entretenu à la base de maintenance d'Air Algérie.

Et nous terminons par une conclusion générale et les perspectives de ce travail.

# Chapitre I

## Présentation de la base de maintenance d'Air Algérie

---

I.1. Présentation générale de l'entreprise .....	3
I.2. Le hangar de maintenance de la base d'Air Algérie .....	3
I.3. Politique de qualité et de sécurité .....	4
I.4. Protection des installations et des locaux de maintenance .....	5
I.5. Les types d'avions de air Algérie .....	5
I.6. Fonctionnement de l'entreprise .....	6
I.7. Organigramme de la base de maintenance .....	7
I.8. La cellule NDT .....	7
I.9. Contrôle par courants de Foucault .....	8
I.9.1. Les opérations de contrôle .....	8
I.9.2. Les étapes à suivre .....	8
I.9.3. Quelques applications des courants de Foucault à la cellule NDT .....	9
I.10. Conclusion .....	12

### I.1. Présentation générale de l'entreprise

Située à Dar El Beïda et mitoyenne de l'aéroport international Houari Boumediene, la base de maintenance d'Air Algérie est l'une des plus importantes unités stratégiques d'Air Algérie dans la maintenance aéronautique. La base de maintenance de Dar El Beïda est leader dans son domaine, avec son matériel de pointe, et ses techniciens qualifiés. Ces derniers assurent le contrôle à l'arrivée et au départ de chaque avion pour détecter d'éventuelles anomalies d'ordre technique et garantir la conformité des avions.



Fig. I. 1. Situation de l'entreprise de satellite.

### I.2. Le hangar de maintenance de la base d'Air Algérie

Les photographies ci-dessous montrent le hangar où sont entreposés les avions à contrôler, c'est ici que différentes opérations de maintenance ont lieu.

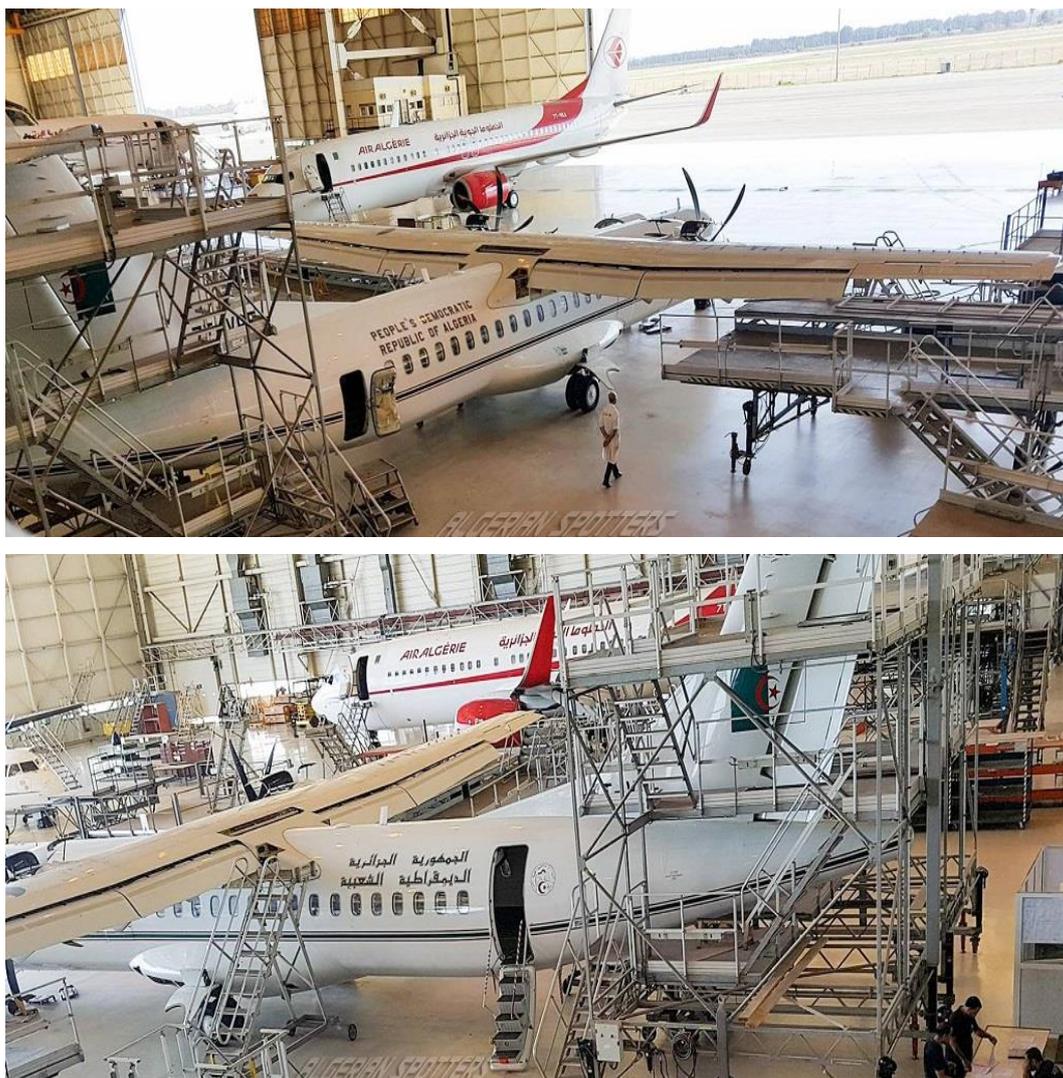


Fig. I. 2. Hangar de maintenance d'Air Algérie.

### I.3. Politique de qualité et de sécurité

La base de maintenance d'Air Algérie s'engage à mettre en œuvre une politique qualité et sécurité visant à :

- Faire appliquer les principes de sécurité liés aux « facteurs humains ».
- Mettre en place une formation initiale et continue liée aux facteurs humains.
- Encourager le personnel à rapporter toute erreur d'entretien.
- Reconnaître la sécurité comme une préoccupation de tout instant pour l'ensemble du personnel.
- Reconnaître que l'application des procédures, des normes de qualité, des normes de sécurité et de la réglementation doit concerner tous les personnels de l'organisme.
- Reconnaître le besoin de coopération de tout le personnel avec les auditeurs qualité de l'organisme.

- S'assurer que les standards de sécurité ne doivent pas être amoindris par des impératifs commerciaux.
- Veiller à bien utiliser les ressources et s'attacher à bien exécuter l'entretien.
- Avoir une organisation rigoureuse et cherchant à progresser à chaque instant.
- Mettre en place un environnement de travail adapté pour attirer et garder le personnel compétent motivé.
- Fournir au personnel les outillages, les matériels, les instructions et le temps suffisant pour exécuter l'entretien en accord avec les procédures [1].

#### **I.4. Protection des installations et des locaux de maintenance**

Toutes les installations de la base de maintenance sont implantées sur l'aéroport Houari Boumediene et répondent aux caractéristiques ci-après :

- Les locaux sont couverts, fermés et surélevés assurant une protection contre les intempéries.
- Les locaux de stockages sont prévus pour garantir la bonne préservation des matériels et produits stockés.
- Les ateliers spécialisés sont cloisonnés, pour prévenir toute contamination de l'environnement et de la zone de travail.
- Les ateliers sont adaptés aux travaux réalisés et sont équipés de toutes les servitudes permettant au personnel d'effectuer les opérations d'entretien avec efficacité.
- Les bureaux sont adaptés à la gestion des travaux.
- Les conditions de travail sont adaptées à la tâche effectuée et sont telles que l'efficacité du personnel ne soit pas dégradée. Dans tous les cas, les règles relatives à l'hygiène, la sécurité et les conditions de travail sont appliquées et contrôlées par la sous-direction Moyens Techniques [1].

#### **I.5. Les types d'avions de Air Algerie**

- **BOEING :**

MODEL: -B737-600

-B737-700

-B737-800

- **AIRBUS :**

MODEL: - A330-200

- A330-300

- **ATR-GIE** (Avions de Transport Régional) :  
MODEL: - ATR 42-500  
- ATR 72-212 A



Fig. I. 3. Quelques types d'avions.

### I.6. Fonctionnement de l'entreprise

La base de maintenance d'Air Algérie est spécialisée dans la maintenance et la rénovation du matériel aéronautique, elle dispose des moyens très importants sur le plan des ressources humaines qu'en matériels et équipements. En général, toutes les activités de l'entreprise sont mises en œuvre pour soutenir la réparation/rénovation des aéronefs.

L'opération de la rénovation se fait selon la chronologie suivante :

- Réception : réception des fuselages des aéronefs endommagés ou qui sont objet des opérations d'entretien.
- Démontage : enlèvement des pièces ou des accessoires endommagés (défectueux) ou les pièces critiques nécessitant un contrôle périodique.
- Inspection : les différentes pièces subissent différents contrôles pour la vérification de leur état de santé.
- Réparation : elle consiste à restaurer ou rénover les pièces endommagées ou en état de panne.
- Montage : remise en place des éléments réparés ou les pièces de rechange.
- Mise au point : action d'améliorer et d'augmenter l'efficacité.
- Essais en sol et en vol : mise en marche des machines début au sol puis en vol.
- Livraison : la mise sur site pour l'exploitation.

**I.7. Organigramme de la base de maintenance**

L’image suivante est une schématisation de l’organisation de la base de maintenance d’Air Algérie :

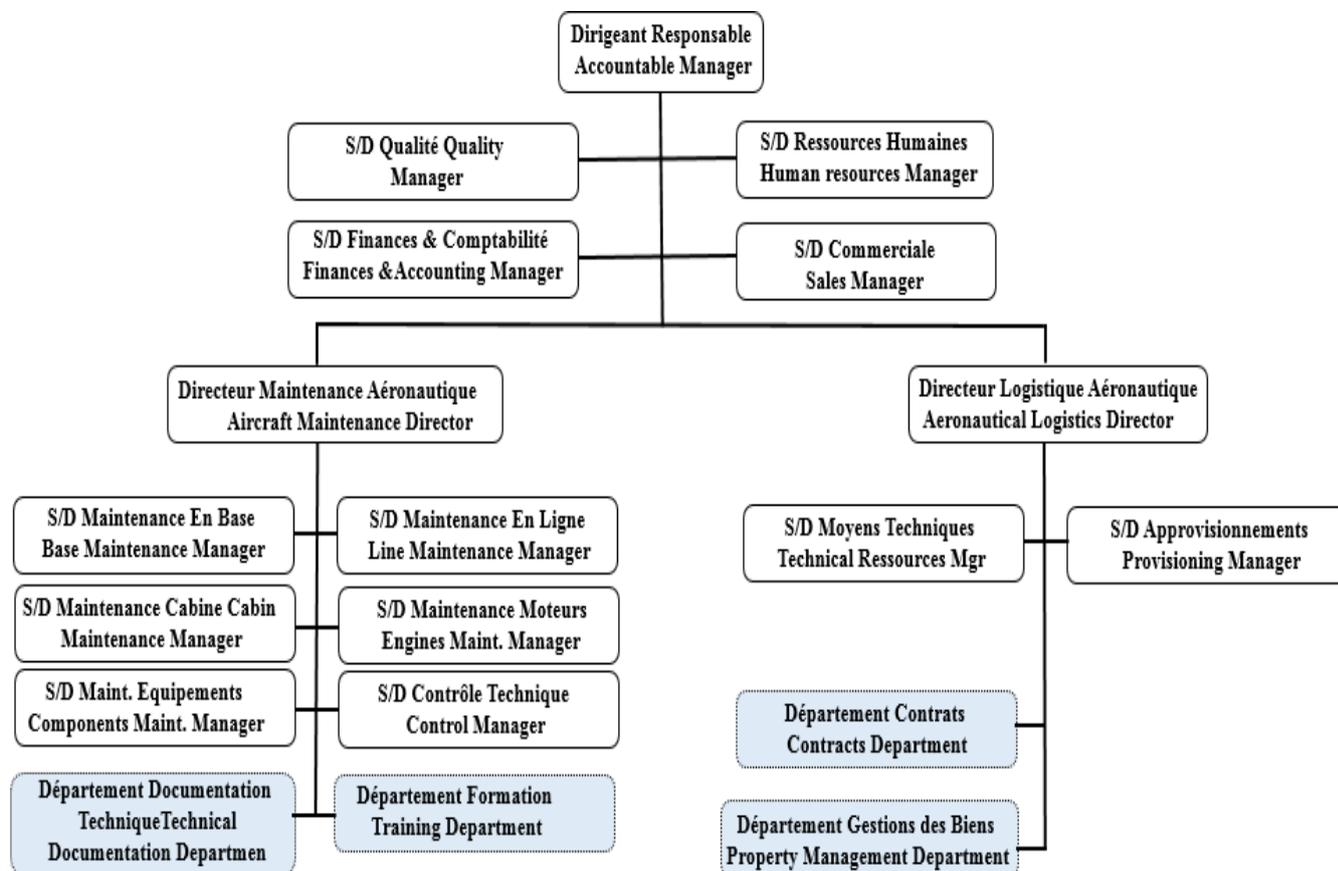


Fig. I. 4. L’organigramme de la base de maintenance.

**I.8. La cellule NDT**

La cellule NDT s’occupe du contrôle non destructif des pièces d’avions de la base de maintenance d’Air Algérie, qui nécessite un examen sans dégrader ou altérer l’état de la pièce. Elle permet de détecter et caractériser les différents défauts et imperfections qui pourraient nuire à son bon fonctionnement. Pour ce fait, plusieurs méthodes sont utilisées : l’examen visuel, ressuage, contrôle par courant de Foucault, magnétoscopie, ultrason et radiographie et prochainement la thermographie.

Air Algérie doit répondre à des normes internationales européennes et américaines : EN 4179 et NAS 410, pour ce fait les membres de la cellule NDT sont certifiés.

La maîtrise de chaque méthode demande une formation qui dure une semaine, à la fin un examen est exigé pour recevoir une certification. La certification dure 5ans et des tests sont faits chaque année, à la fin de cette durée les ingénieurs doivent repasser leurs certifications.

L'ingénieur reçoit un work order ou job order, qui lui donne en détail toute la procédure à suivre depuis le démontage de la pièce jusqu'à ce qu'elle arrive à la cellule NDT. La méthode qu'il faut suivre est exigée par le constructeur ainsi que le matériel à utiliser et la manière de contrôler la pièce. Alors l'employé, procède à un examen minutieux à la fin duquel il déterminera la validité et la conformité de la pièce.

## I. 9. Contrôle par courants de Foucault

### I.9.1. Les opérations de contrôle

- Haute fréquence (détecter les discontinuités surfaciques).
- Basse fréquence (détecter les discontinuités un peu plus profonde).
- Rototest.
- Mesure de conductivité.
- Mesure d'épaisseur de la peinture.

### I.9.2. Les étapes à suivre

- Choisir la sonde appropriée pour le contrôle.
- Configuration de l'appareil, calibration, fréquence, phase, équilibrage, gain, filtres.
- Etalonnage de l'instrument avec un bloc normalisé (l'étalon).
- Ajustement final des paramètres.
- Pratique du contrôle.
- Vérifier qu'il réponde aux critères d'acceptations.



Fig. I. 5. L'appareil qui sert au CND-CF ainsi qu'une sonde et un étalon.



Fig. I. 6. Rototest.

### I.9.3. Quelques applications des courants de Foucault à la cellule NDT

La cellule NDT reçoit des work order ou Job order qui désigne les pièces à contrôler, leurs références et l'endroit exact à contrôler ainsi que la sonde à utiliser... L'ingénieur se déplace sur l'avion pour inspecter le fuselage à l'endroit exact indiqué. Dans le cas où c'est une bosse intérieure, des mesures doivent être prises et transmises à l'engineering pour étudier la tolérance. Dans d'autres cas il doit simplement vérifier s'il n'y a pas de défaut à l'endroit indiqué.



Fig. I. 7. Contrôle du fuselage d'un avion par courants de Foucault.



Fig. I. 8. Calcul par courants de Foucault de la profondeur de la bosse.



Fig. I. 9. Calcul des paramètres exigés par le job order.

Par ailleurs, les roues de chaque avion ont un rythme différent de contrôle, mais chacune doit régulièrement être vérifiée. Les roues du train principal sont plus sujettes à défauts que les roues avant, car elles absorbent la majeure partie du poids.

La surface extérieure de la roue se fait automatiquement grâce au nouveau VEESCAN mais le reste de la roue se fait de manière manuelle. Sachant que dans les roues aucune crique n'est tolérée car une fois que le pneu est gonflé il risque d'aggraver la fissure.

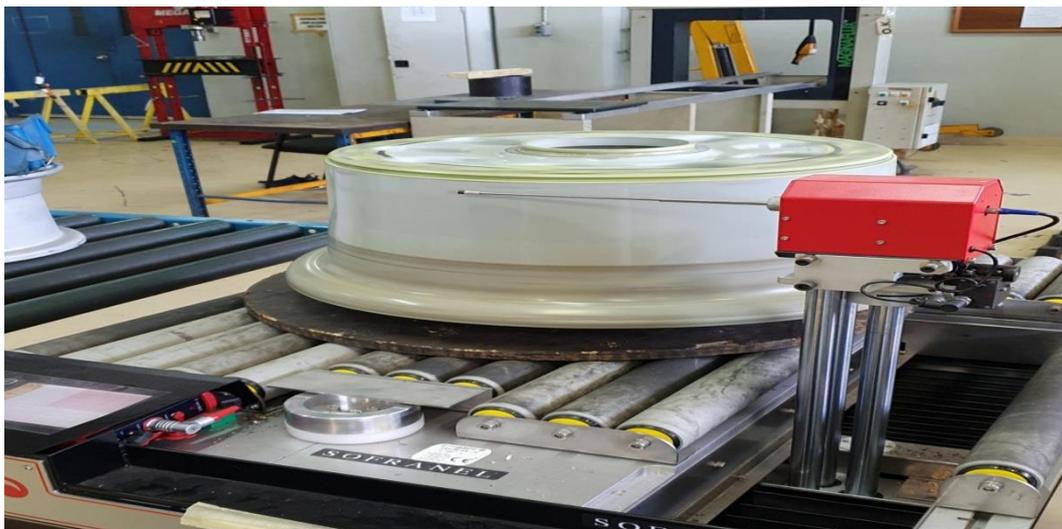


Fig. I. 10. Contrôle par VEESCAN d'une roue.



Fig. I. 11. L'écran du VEESCAN.

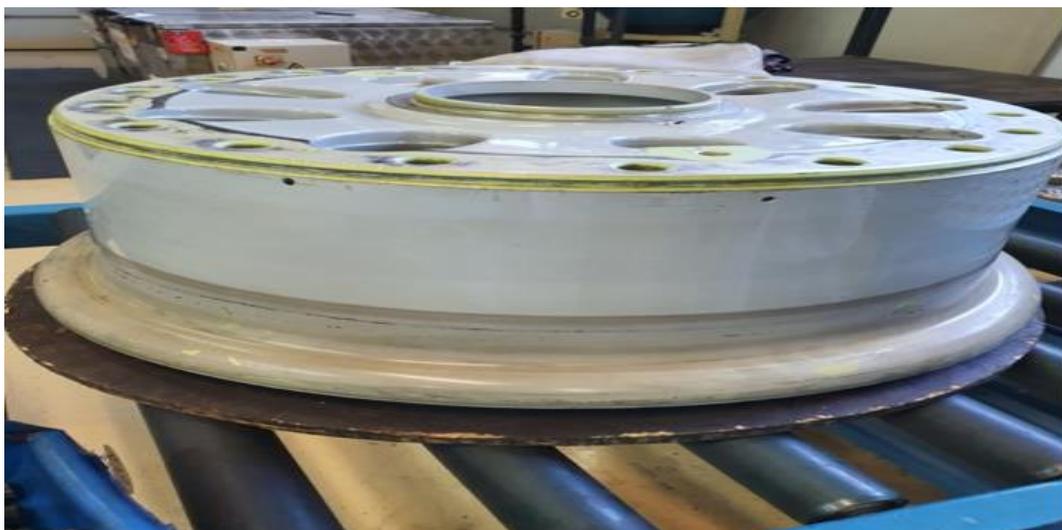


Fig. I. 12. Roue A330.

**I.10. Conclusion**

Après avoir acquis quelques connaissances sur le contrôle non destructif, nous avons obtenu un stage au sein de la base de maintenance d'Air Algérie. Ce stage nous a permis d'enrichir nos informations ainsi que de comprendre la procédure de contrôle des pièces aéronautiques. Cette expérience a été très bénéfique pour nous car elle nous a permis d'assister aux différentes techniques de contrôle et de nous concentrer sur celle des courants de Foucault, sujet de notre mémoire.

# Chapitre II

## Généralités sur le contrôle non destructif

---

II.1. Introduction .....	13
II.2. Historique .....	13
II.3. Le contrôle non destructif .....	14
II.4. Principe physique du CND.....	15
II.5. Techniques du CND .....	16
II.6. Principe de fonctionnement du CND par courants de Foucault.....	21
II.7. Schéma synoptique du dispositif.....	22
II.8. Principaux paramètres influant sur le contrôle.....	23
II.8.1. Paramètres liés au matériau à sonder .....	23
II.8.2. Paramètres liés au montage .....	23
II.8.3. Paramètres électriques.....	23
II.9. Mode de contrôle.....	23
II.9.1. Mode de contrôle absolu .....	24
II.9.2. Mode de contrôle compensé.....	24
II.9.3. Mode de contrôle différentiel .....	25
II.10. Objectifs des CND-CF .....	25
II.10.1. Caractérisation géométrique.....	25
II.10.2. Caractérisation électromagnétique .....	26
II.10.3. Contrôle de l'état de la santé .....	26
II.11. Classification des capteurs .....	26
II.11.1. Classification selon la géométrie.....	26
II.11.2. Classification selon la fonction .....	28
II.12. Gammes de fréquences .....	29
II.13. Epaisseur de peau .....	30
II.14. Eléments perturbateurs.....	31
II.15. L'imagerie pour l'évaluation non destructive .....	31
II.16. Avantages du CND par courants de Foucault.....	32
II.17. Limites du CND par courants de Foucault.....	33
II.18. Conclusion.....	33

**II.1. Introduction**

L'appellation Contrôle Non Destructif (CND) fait naturellement penser au diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient : le même principe est appliqué aux pièces mécaniques qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures ou des matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, ou en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenance. De nos jours les techniques de CND ont une importance majeure dans le contrôle de la qualité des produits ainsi que dans la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens.

Dans ce chapitre, nous présentons le principe du CND ainsi que les différentes techniques de Contrôle.

**II.2. Historique**

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Pourtant l'introduction des contrôles non destructifs remonte à la fin des années 1940 dans le domaine du génie civil, lors de la période de reconstruction qui a suivi la fin de la deuxième guerre mondiale. À cette époque, les ingénieurs avaient besoin de techniques pour suivre l'évolution de la résistance à la compression du béton à jeune âge afin, par exemple, de savoir quand procéder au décoffrage ou à l'application de la post-tension. Différentes techniques ont été développées à cette fin, dont la plupart ont été normalisées dans les années 1970. Cette évolution est due en partie au développement rapide des secteurs très demandeurs tels que l'industrie automobile, l'aéronautique civile et le génie des centrales électriques nucléaires. Plus tard, dans les années 1980, les besoins des ingénieurs ont évolué. Compte tenu du vieillissement des ouvrages et des structures, les ingénieurs ont développé de nouvelles techniques pour l'évaluation de la résistance des matériaux âgés et pour la détection et la caractérisation des défauts dans ces matériaux. Avec l'industrialisation massive, les pièces doivent être régulièrement contrôlées car tout défaut non détecté peut avoir des conséquences dramatiques, ce qui a conduit par la suite au développement des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante; on assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique [2] [3].

Le CND a atteint aujourd'hui un stade de développement notable, il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le localiser et le caractériser. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des

hétérogénéités physiques complexes ou irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans les composites, des variations de texture ou de rugosité sur une surface [2].

### II.3. Le contrôle non destructif

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes et procédés qui fournissent des informations sur la santé du matériau, permettant ainsi de caractériser l'état d'intégrité de la structure ou de la pièce, sans les dégrader, tout au long de sa durée de vie. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs [4].

L'objectif du contrôle non destructif est de contrôler l'état des pièces industrielles ; c'est-à-dire détecter et caractériser les différents défauts et imperfections qui pourraient nuire au bon fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques.

Cette procédure de contrôle se produit souvent soit en cours de fabrication ou au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants [3] :

- La reproductibilité : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- La fiabilité : le contrôle doit remplir son cahier de charges, il doit détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.
- La possibilité d'inspection globale et locale : il s'agit de la manière dont l'inspection est réalisée. Soit la technique permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois, on parle d'une inspection globale, ou juste d'une partie de celle-ci, ce sera alors une inspection locale.
- La sensibilité : il s'agit du rapport entre la variation de la mesure et la grandeur que l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur mesurée sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- La rapidité d'exécution : il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant au niveau des coûts et qu'il puisse s'intégrer dans un cycle de production.
- Le coût : le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- La résolution : elle est la plus petite variation du signal pouvant être détectée, par exemple la dimension du plus petit défaut. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

#### II.4. Principe physique du CND

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter une hétérogénéité dans un matériau. Cela consiste à induire une perturbation dans le matériau investigué, et à enregistrer sa réponse à cette excitation. Le défi du contrôleur consiste alors à traiter cette réponse de manière à en extraire l'information sur le matériau.

La technique de CND la plus populaire est sans nul doute celle consistant à taper sur le matériau sous investigation avec un marteau, et à écouter le bruit émis par ce matériau suite à l'impact. Si le bruit est sourd, cela veut dire que le matériau est sain. Par contre, un bruit creux est révélateur d'un vide dans ce matériau. Les technologies modernes de CND utilisent toutefois différents types d'excitations (mécaniques, électriques et thermiques), et une panoplie d'outils plus ou moins complexes d'acquisition et de traitement des données. La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont en fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce.

Les techniques de CND diffèrent généralement par l'énergie employée, cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection de défauts est généralement mis en place. Il est constitué de deux étapes principales : la détection et la localisation des défauts (décider que le système est en défaut ou non et déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification (estimer l'ampleur et le types des défauts) [2][5].

Les phénomènes physiques comme l'atténuation ou diffraction des rayons X, réflexion ou diffraction des ultrasons, perturbation des courants de Foucault, sont à la base des essais non destructifs où ils peuvent servir à caractériser les matériaux (présence de fissures...). En effet, par CND on sous-entend toujours qu'il ne s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité [6].

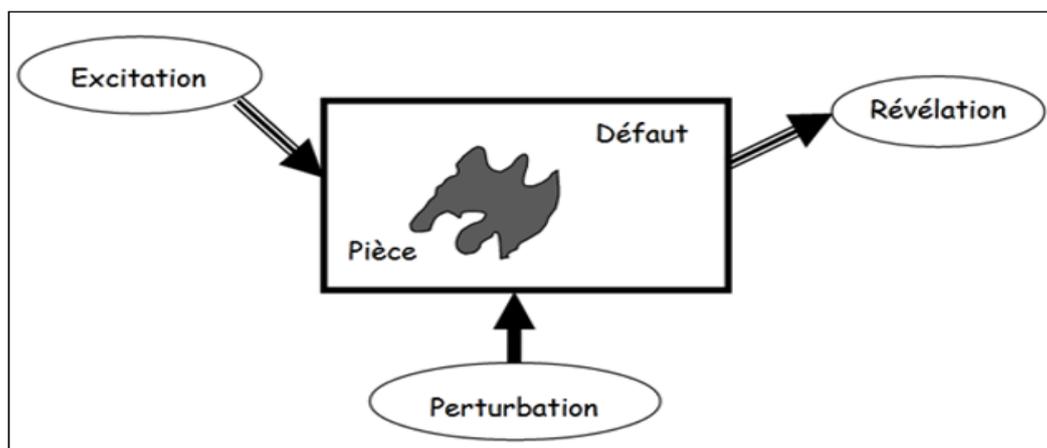


Fig. II. 1.Principe de détection d'un défaut.

## II.5. Techniques du CND

Le choix d'une méthode optimale de CND, c'est-à-dire la mieux adaptée au problème posé, est essentiel. Dans le cas de la recherche de défauts, le choix doit se faire en prenant en compte les caractéristiques générales du couple « pièce-défaut », ainsi que celles de l'environnement. Et doit répondre à certains critères : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet. 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 [7] [8].

### II.5.1. L'examen visuel

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

Si le défaut est visible il n'est généralement pas tolérable, ou dans d'autres cas il permet de repérer un possible défaut ou anomalie. Mais à cause de sa faible fiabilité il est nécessaire de pratiquer d'autres examens pour être plus précis et de savoir l'état de la pièce.

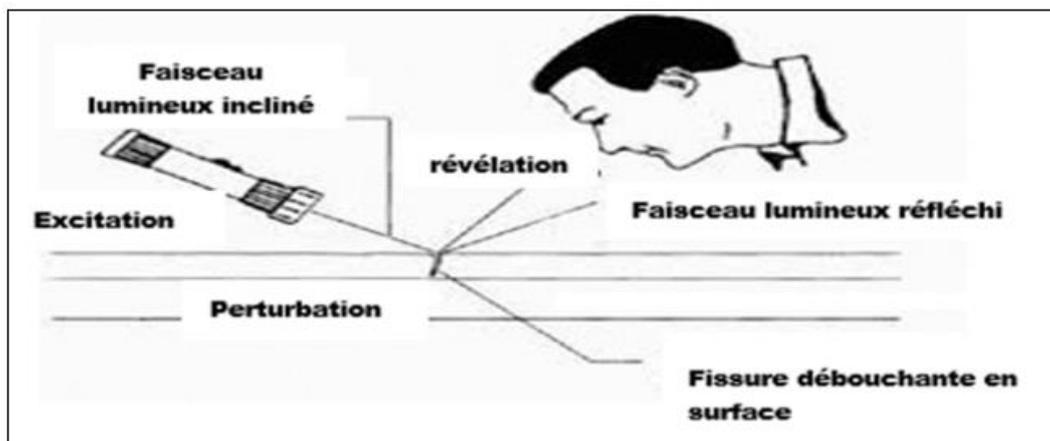


Fig. II. 2. L'examen visuel.

### II.5.2. Ressuage

Le ressuage est par définition la résurgence d'un liquide (ou d'un gaz) d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement introduit au cours d'une opération d'imprégnation. Prolongement logique de l'examen visuel, cette méthode permet donc de détecter les discontinuités débouchant en surface de la pièce contrôlée sous forme d'indications colorées ou fluorescentes, observées respectivement sur un fond noir. Cette méthode peut être utilisée pour tous types de matériaux sauf poreux [9].

Le ressuage se fait sur plusieurs phases, la première étape consiste à appliquer sur la pièce un pénétrant ; il se fait de deux manières différentes (cela dépend de la pièce). On peut soit l'appliquer sur la surface à contrôler dans une chambre électrostatique ou émerger la pièce dans le pénétrant pendant une durée de 15min pour qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités à la surface. La pièce est ensuite rincée avec de l'eau à une certaine pression pour éliminer l'excès du pénétrant, suivis par l'étape de séchage dans une étuve chauffante. Après elle est mise dans une autre étuve pour fixer le révélateur sur la pièce.

Enfin la pièce est mise dans une chambre noire ou elle sera examinée sous rayons ultraviolet et comparée à l'étalon pour déterminer si elle entre dans la fourchette de tolérance ou non.

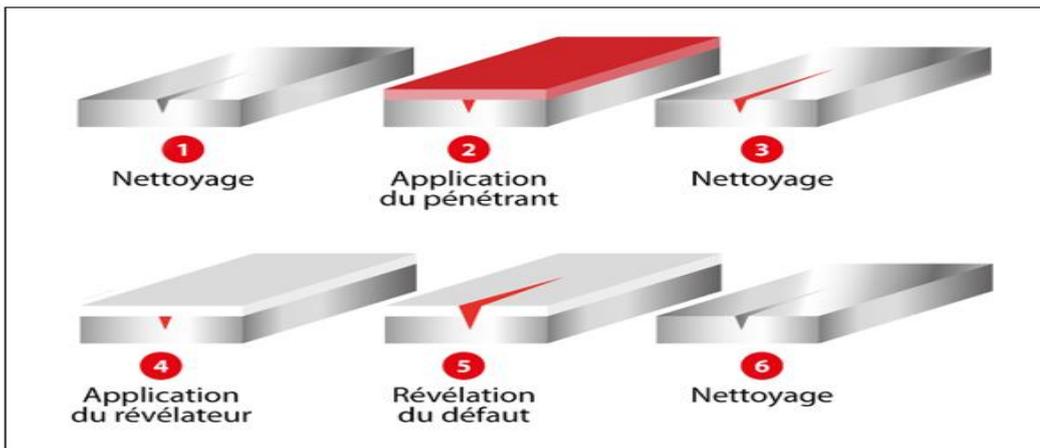


Fig. II. 3. Les étapes du ressuage.

**II.5.3. Ultrasons**

Le principe du contrôle par ultrasons consiste à faire propager dans la pièce une onde ultrasonore (vibration acoustique) générée à l'aide d'un transducteur. Le contrôle est basé sur la réflexion (écho) ou la transmission de l'onde ultrasonore au niveau des défauts.

L'observation est réalisée en visualisant les signaux des échos ou de l'onde transmise. Cette méthode est applicable sur tous matériaux, et permet de mettre en évidence des défauts de surface et des défauts internes. Elle peut également être utilisée pour réaliser des mesures d'épaisseur. Il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur (capteur) et la pièce pour assurer la transmission des ondes [1].

Le CND par ultrasons est une technique très utilisée, parce qu'elle est relativement flexible et simple pour détecter des défauts internes [3].

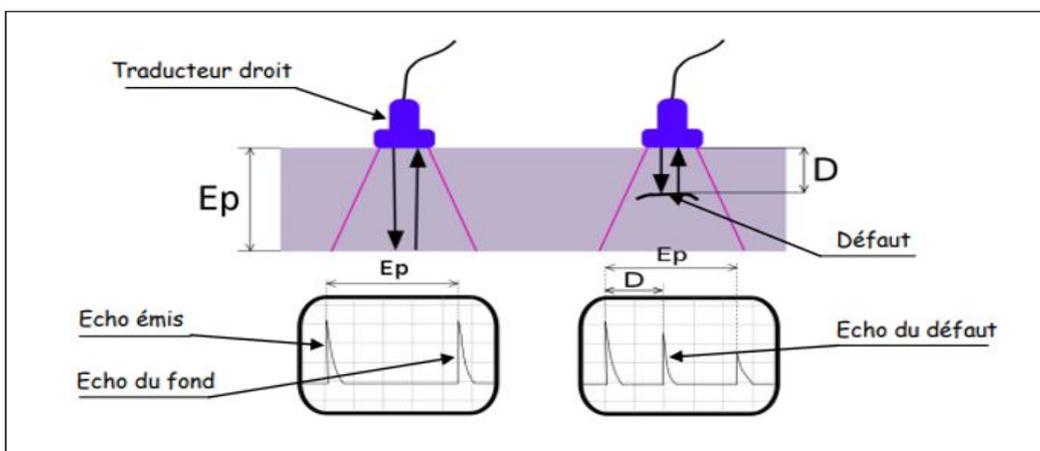


Fig. II. 4. Le principe de contrôle par ultrasons.

**II.5.4. Radiographie**

La radiographie est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à obtenir une image d'un objet traversé par un rayonnement électromagnétique X ou gamma généré par la

source, sont plus ou moins absorbés dans la pièce à contrôler. La mise en évidence des défauts est assurée par une variation de densité optique sur le radiogramme (film radiographique irradié et développé), suite aux différences d'absorption des rayons X entre une zone saine et une zone défectueuse, il convertit l'image radiante invisible en image visible.

Cette méthode est applicable sur tous matériaux et permet de mettre en évidence des défauts de surface et des défauts internes [1].

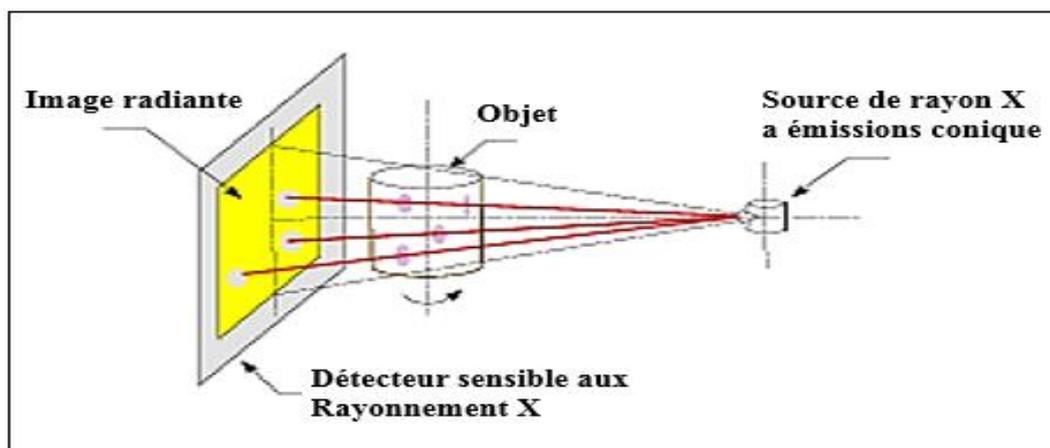


Fig. II. 5. Le principe de radiographie.

En radiologie industrielle, les rayons X sont produits par un tube à rayons X (le plus souvent) ou par un accélérateur de particules pour les applications à haute énergie.

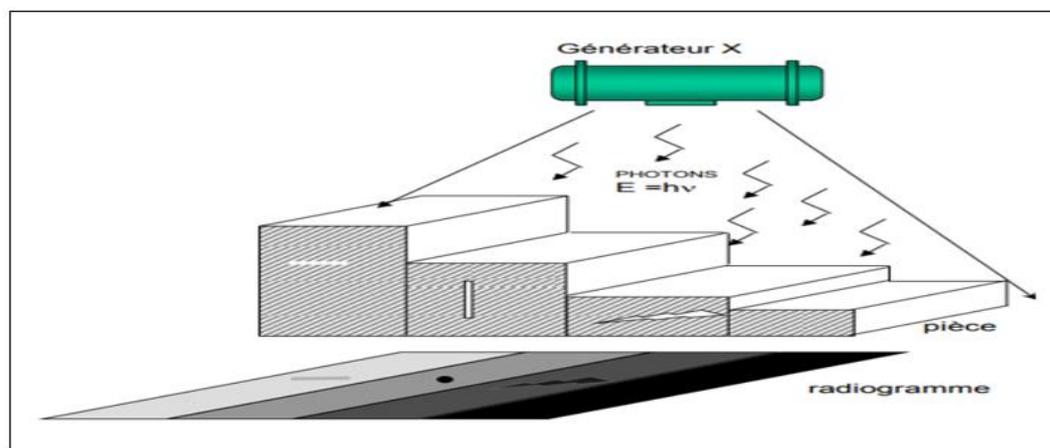


Fig. II. 6. Le principe de CND par les Rayons.

### II.5.5. Magnétoscopie

La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les défauts superficiels provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mises en évidence par un produit indicateur (composé d'une poudre magnétique Limaille de fer avec le Kérosène), généralement fluorescent, déposé à la surface de la pièce, et attiré au niveau des fuites magnétiques pour former des indications.

La présence d'un défaut à la surface de la pièce est détectée par aimantation de celle-ci par passage de champ magnétique ou par passage de courant. L'observation est souvent réalisée visuellement [1].

Cette technique s'applique exclusivement sur des matériaux dits «ferromagnétiques»: il s'agit principalement de pièces en acier (acier carbone et acier faiblement allié).

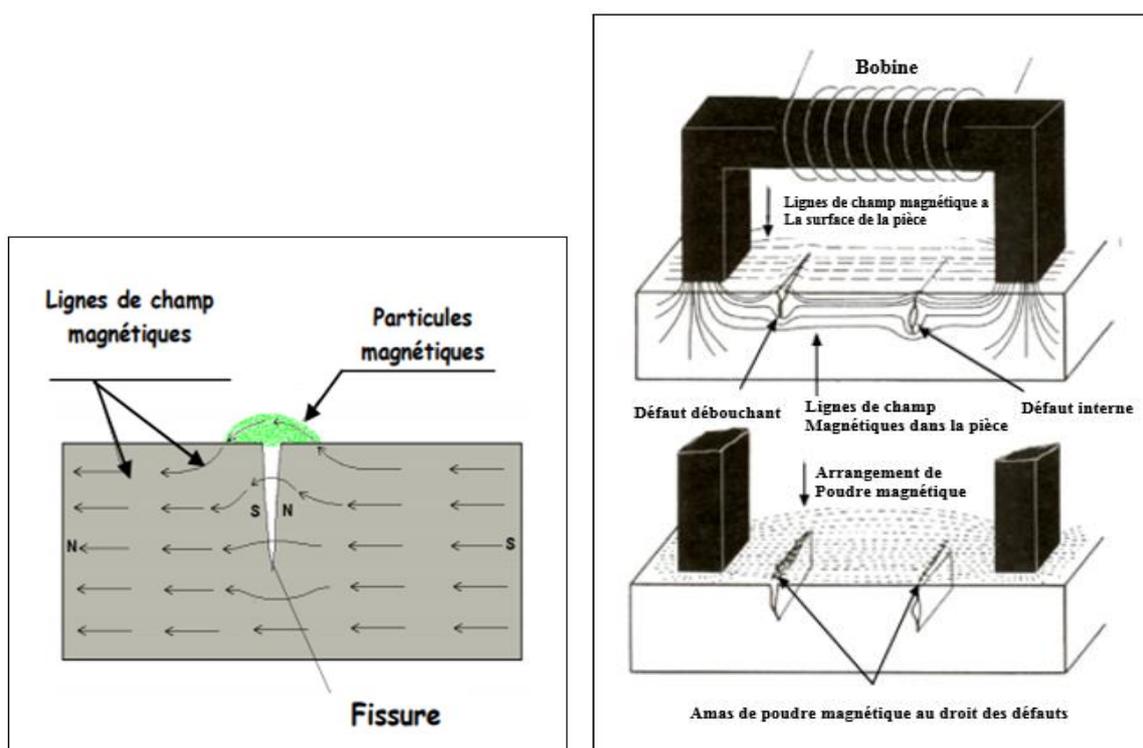


Fig. II. 7. Le principe de contrôle par la magnétoscopie.

### II.5.6. Thermographie Infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique permettant à distance et sans contact, d'observer des scènes thermiques et d'en mesurer les températures avec une précision variable en fonction des critères recherchés.

La thermographie infrarouge « TIR » est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance. La TIR est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production et réduire au maximum les coûts d'entretien.

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en

signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle « thermogramme » [8].

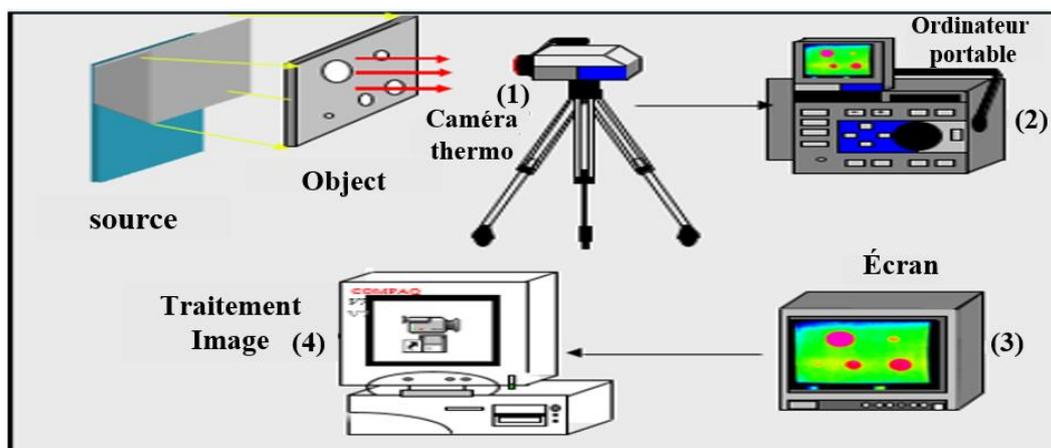


Fig. II. 8. Le système expérimental de la technique TIR.

### II.5.7. Le contrôle par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est utilisé pour les pièces réalisées d'un point de vue électromagnétique de matériaux conducteurs.

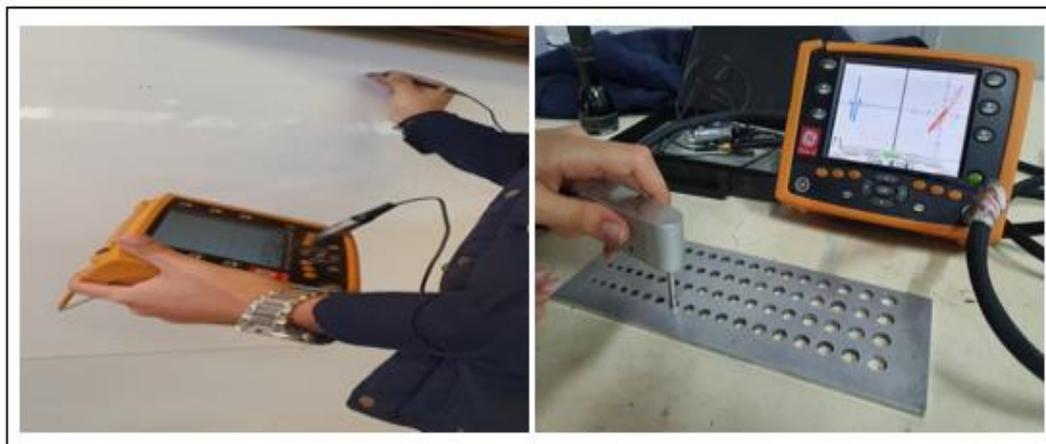


Fig. II. 9. Le controle par courants de Foucault.

### II.6. Principe de fonctionnement du CND par courants de Foucault

Le principe de cette méthode consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'une bobine (excitatrice) parcourue par un courant électrique variable, ce qui va créer des courants induits dans la pièce à contrôler. La trajectoire, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques (interne) et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique qui va s'opposer au champ initial d'excitation (loi de Lenz) et le champ résultant sera fonction des paramètres physiques et géométriques de la cible. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur [10].

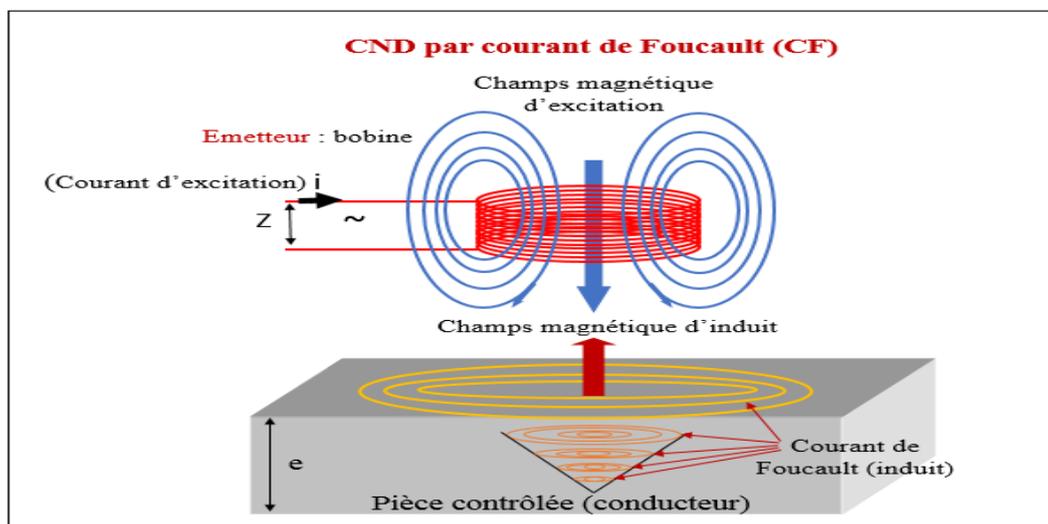


Fig. II. 10. Le principe de CND par courants de Foucault.

Une mesure directe de ce champ ou d'une de ces grandeurs dérivées (tension, impédance...etc.) permettra de caractériser la cible [2] [11].

### II.7. Schéma synoptique du dispositif

Le contrôle non destructif par courant de Foucault comprend essentiellement un générateur alimentant le capteur, le capteur lui-même, le produit à contrôler dont éventuellement la présence de défauts et enfin le système d'observation qui visualise une grandeur dérivée des courants de Foucault [2].

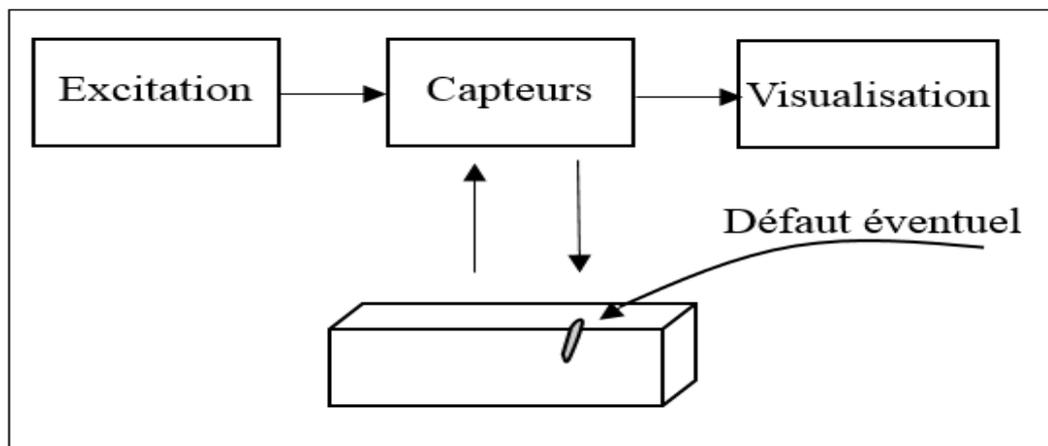


Fig. II. 11. Schéma synoptique de la chaîne de contrôle.

## II.8. Principaux paramètres influant sur le contrôle

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

### II.8.1. Paramètres liés au matériau à sonder

Outre ceux liés à sa forme géométrique, ce sont sa conductivité électrique  $\sigma$  et sa perméabilité magnétique  $\mu$  dont il importera de prendre en compte le niveau de stabilité le long de la pièce ou d'une pièce à l'autre, toute variation locale entraînant un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde [12] [13].

Les variations de conductivité électrique  $\sigma$  ou de perméabilité magnétique  $\mu$  ont des causes très diverses : présence de contraintes résiduelles importantes localement dues à la fabrication elle-même, ou à des chocs, présence de défaut, etc... [14].

### II.8.2. Paramètres liés au montage

Ils gouvernent le couplage entre la ou les bobines et le matériau : il s'agit du lift-off, terme désignant universellement la distance entre une sonde plate et la surface de la pièce. Les variations de la distance capteur-cible (entrefer) sont dues aux variations de la géométrie de surface, c'est-à-dire tous les aspects liés à la rugosité ou épaisseur de la pièce [12] [13] [14].

Les variations de position du capteur par rapport à la surface de la pièce provoquent des fluctuations d'impédance. Ces fluctuations peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront les indications caractéristiques de défauts [15].

### II.8.3. Paramètres électriques

C'est essentiellement la fréquence d'excitation de la bobine, paramètre dont on est maître et qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat en particulier à la profondeur des défauts, et d'un point de fonctionnement sur le diagramme complexe permettant une bonne discrimination des différents paramètres perturbateurs de l'impédance  $Z$ . L'intensité de magnétisation alternative, liée à l'intensité électrique envoyée dans la bobine, n'est pas un facteur déterminant du contrôle, dans la mesure où elle est choisie suffisamment faible pour éviter une saturation magnétique qui introduirait des non linéarités rendant l'exploitation des signaux très compliquée [11] [12] [13].

## II.9. Mode de contrôle

On distingue trois modes de contrôle qui sont :

II.9.1. Mode de contrôle absolu

Le schéma suivant montre la mesure en mode absolu par un pont d'impédance

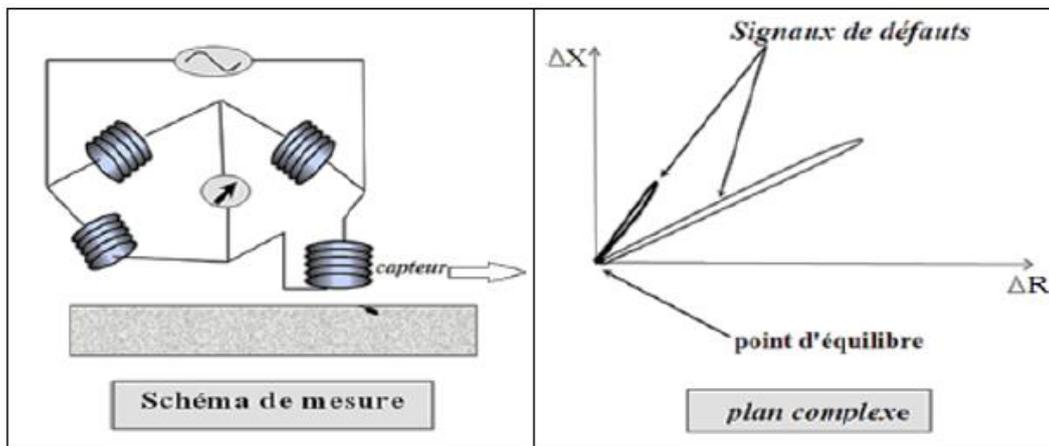


Fig. II. 12. Mesure en mode absolu.

- La bobine d'examen est une branche d'un pont d'impédance alimenté par un oscillateur. En absence de défaut, le pont est équilibré.
- Un signal apparait dans le pont complexe dès que la sonde s'approche du défaut. L'amplitude du signal est liée au volume de la matière affectée par le défaut de même, la phase est en fonction du type du défaut et de la profondeur [11].

II.9.2. Mode de contrôle compensé

Pour s'affranchir des grandeurs perturbatrices, on réalise le mode absolu compensé. Dans ce mode de contrôle on utilise deux bobines.

L'une est positionnée à proximité d'une surface d'une pièce à contrôler et l'autre à proximité d'une autre surface saine du même matériau. La première capte les grandeurs utiles et perturbatrices alors que l'autre ne capte que les signaux perturbateurs. Une mesure comparative permet d'extraire seulement les signaux utiles.

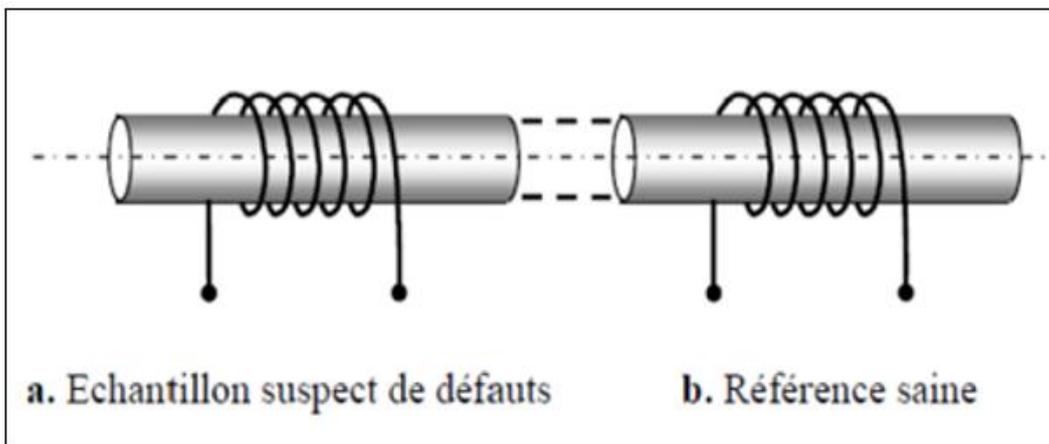


Fig. II. 13. Mesure en mode compensé.

### II.9. 3. Mode de contrôle différentiel

Ils sont constitués d'au moins deux éléments de mesure rigidement liés dans le capteur. Dans le cas d'un capteur à deux éléments, la mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Ce type de capteur est particulièrement utilisé pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce s'affranchissant des perturbations induites par une variation d'épaisseur ou de conductivité.

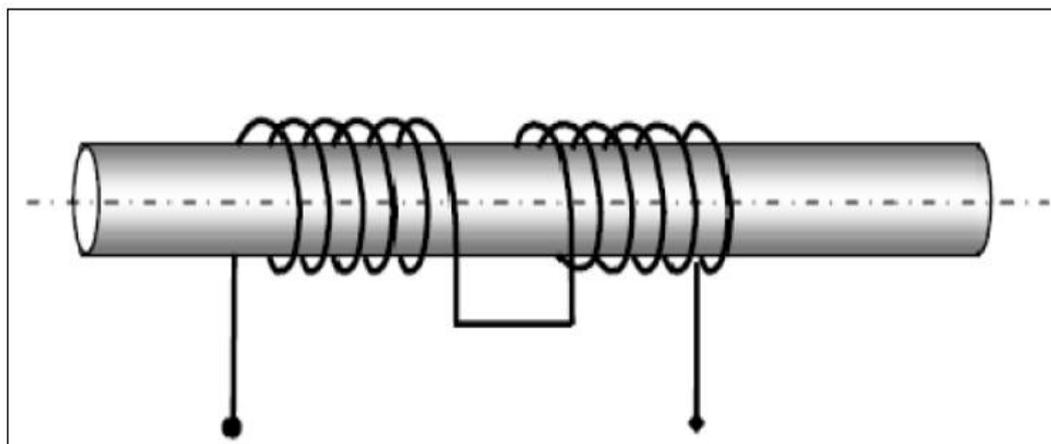


Fig. II. 14. Mesure différentielle.

Cette méthode est essentiellement utilisée en contrôle de santé. Elle permet de mettre en évidence des défauts métallurgiques (anisotropie) et les variations dimensionnelles brutales telles que des fissures. Les défauts ponctuels sont bien détectés.

L'avantage de ce mode de mesure réside dans la suppression de tout signal dû à des variations lentes telles que les variations dimensionnelles ou les fluctuations de température ou de conductivité.

### II.10. Objectifs des CND-CF

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches. Du fait que l'impédance du système capteur/pièce est en fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Cette technique est parfois utilisée pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d'autre fois pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et caractérisant les défauts [16].

#### II.10.1. Caractérisation géométrique

- Mesure de l'entrefer.
- Mesure de l'épaisseur.

### II.10.2 Caractérisation électromagnétique

- Mesure de la conductivité.
- Mesure de la perméabilité.

### II.10.3. Contrôle de l'état de la santé

- Détection du défaut.
- Position du défaut.
- Taille du défaut.
- Forme du défaut.
- Propriété physique

### II.11. Classification des capteurs

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle.

#### II.11.1. Classification selon la géométrie

- **La bobine encerclant**

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes [11].

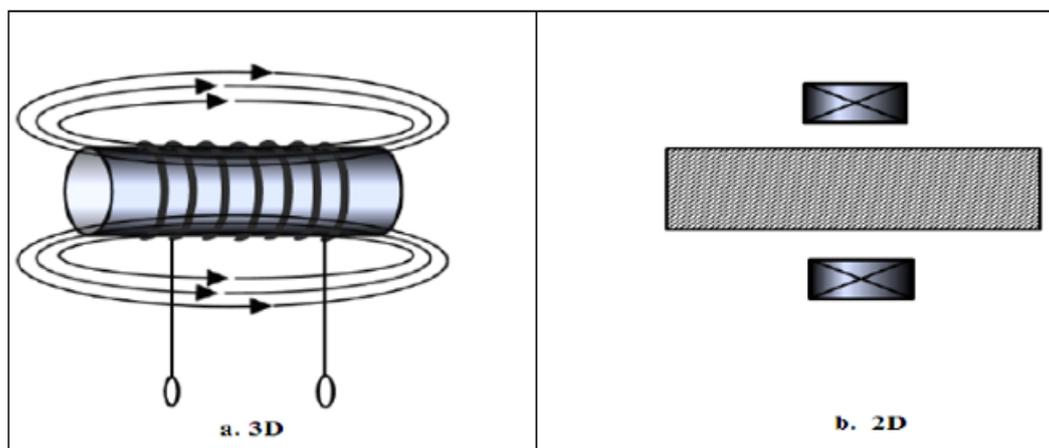


Fig. II. 15. Bobine encerclante.

- **Sonde interne**

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau.

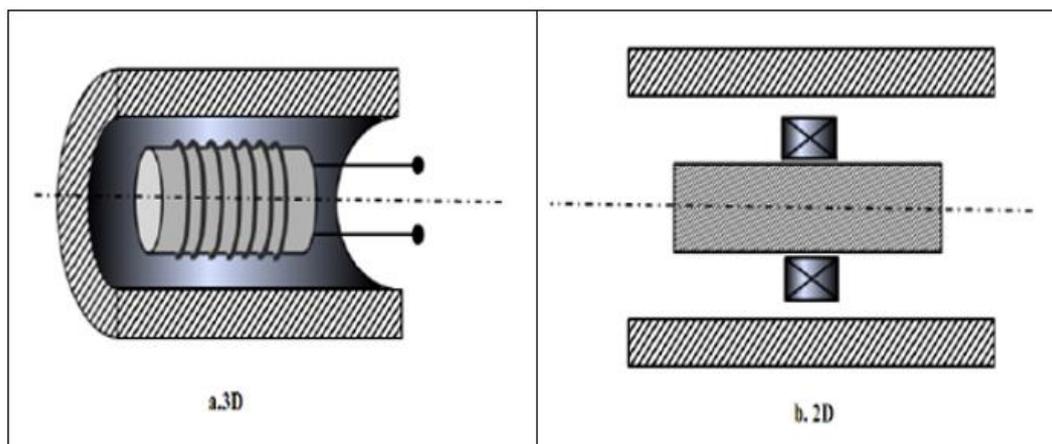


Fig. II. 16. Bobine interne glissante avec noyau.

- **Sonde ponctuelle**

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe [11].

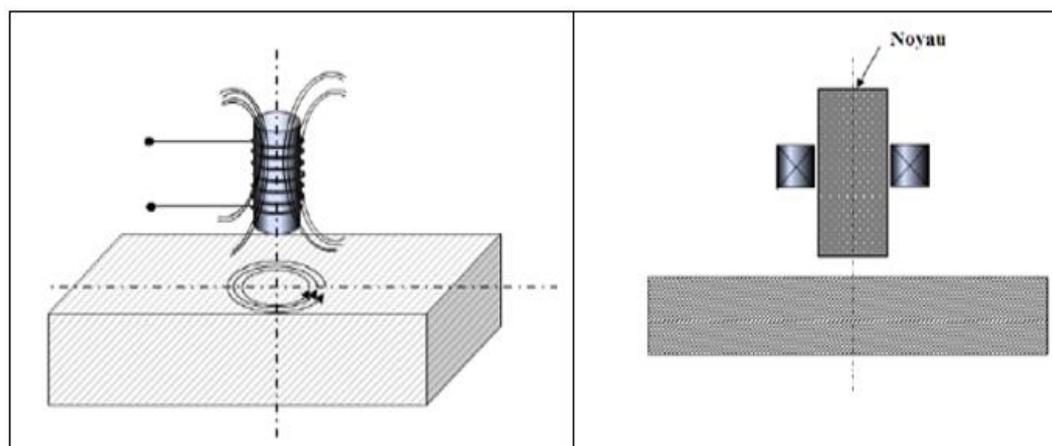


Fig. II. 17. Bobine simple avec noyau.

- **Bobine plate**

De la même que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large figure (II.18).

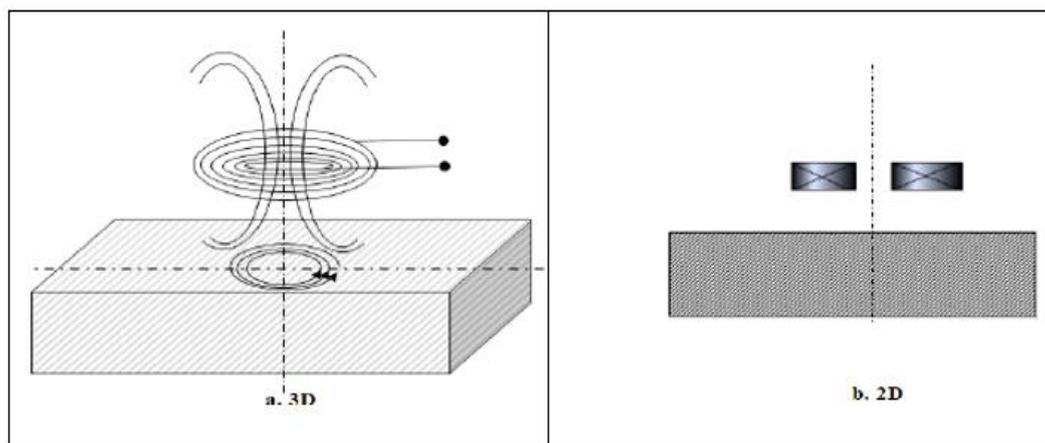


Fig. II. 18. Bobine plate.

### II.11.2. Classification selon la fonction

En principe, tous les capteurs assurent deux fonctions : la fonction d'alimentation et de mesure. Si ces dernières sont assurées par un seul enroulement, on parle de capteur à double fonction, sinon il s'agit un capteur à fonction séparée [11].

- **Capteur à double fonction**

C'est le cas dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par la ou les mêmes bobines.

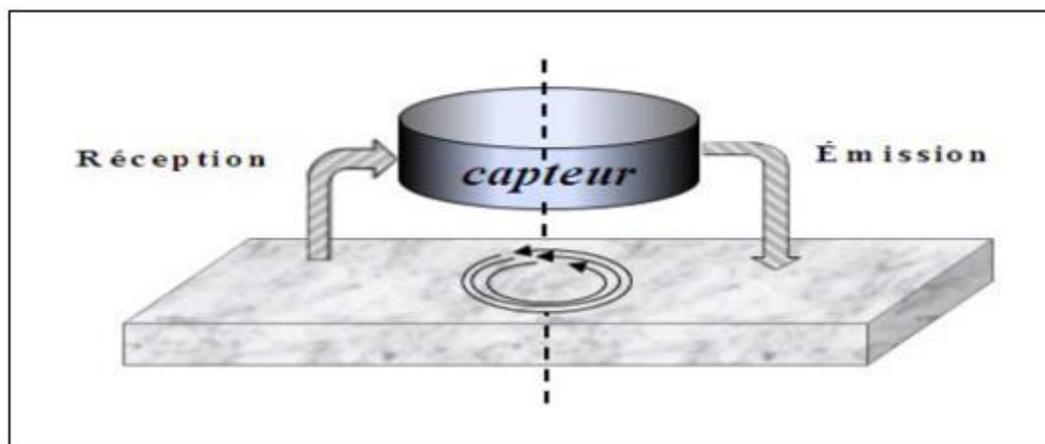


Fig. II. 19. Capteur à double fonction.

L'extraction des informations se fait par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou due à la présence d'un défaut dans ce matériau. Ce type de capteur favorise la mesure de grandeurs à évolution lentes tels que l'épaisseur de revêtement, l'entrefer (lift-off) et la conductivité.

- **Capteurs à fonctions séparées**

La détection des défauts profonds favorise une augmentation des dimensions de la bobine d'excitation. Cependant, cet accroissement de la taille de l'émetteur se fait au détriment de la résolution spatiale du capteur.

C'est un type de capteurs où la fonction d'excitation et de réception est assurée par des éléments distincts. La réception peut alors se faire à un endroit différent de la position de l'émetteur. L'élément de mesure peut être une bobine plus petite aux bornes de laquelle on mesure la variation d'impédance [11].

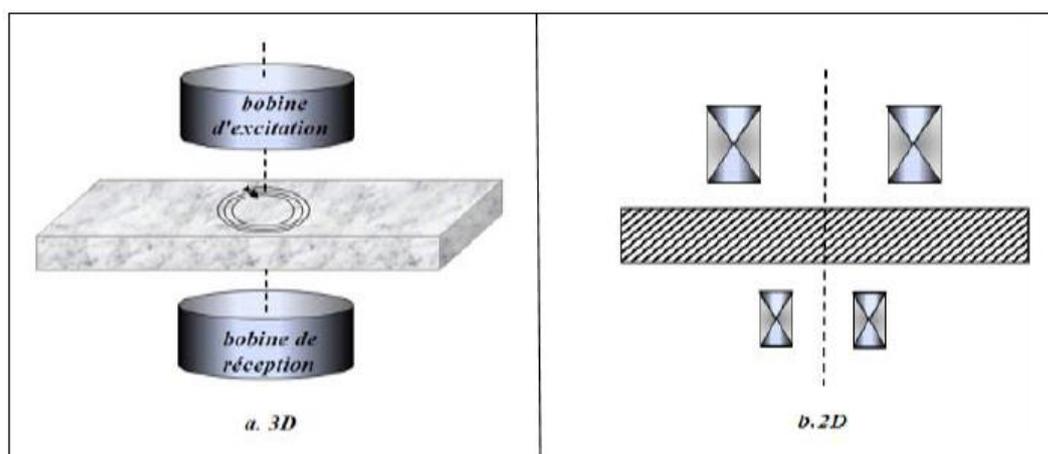


Fig. II. 20. Capteurs à fonctions séparées.

## II.12. Gammes de fréquences

- **Gamme basse fréquence [1Hz :1kHz]**

Les courants de Foucault à basse fréquence permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine. Cette technique convient pour le contrôle de produits de forte épaisseur ou le contrôle de qualité (tri de matériaux selon leur nuance à cœur) et les défauts volumiques et profonds. Elle est utilisée préférentiellement pour les produits ferromagnétiques en raison des problèmes liés à la profondeur de pénétration. C'est une technique très répandue dans l'industrie. Elle est relativement simple à mettre en œuvre, très peu coûteuse, très sensible au manque de matières et une résolution spatiale réduite. Néanmoins, si la fréquence est trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la mesure ne sera pas précise à cause du bruit [2].

- **Gamme moyenne fréquence [1kHz :1MHz]**

C'est le domaine le plus employé en mesure de faibles épaisseurs, telles que les plaques ou barres Co-filées. Ce domaine fréquentiel couvre également le contrôle de santé (détection

hétérogénéité du type fissures débouchantes, inclusions, occlusions, ...) ainsi que le contrôle de caractéristiques métallurgiques (traitements superficiels, conductivité, ...) [2].

• Gamme haute fréquence >1MHz

Les fréquences supérieures à 1MHz sont très peu utilisées. Elles peuvent engendrer des capacités parasites entre les spires du capteur et entre le capteur et le matériau. Son utilisation se limite essentiellement à des mesures d'entrefer, la détection de micro fissure de surface et la modélisation de micro-bobines utilisées dans le domaine de la télécommunication et de la résonance magnétique nucléaire [2].

II.13. Epaisseur de peau

Les courants de Foucault sont très sensibles à différents paramètres géométriques (la présence de défauts, la distance entre la bobine et la pièce, l'épaisseur de la pièce), électromagnétiques (la conductivité, la perméabilité) et thermiques. Le paramètre perturbateur est la température car elle modifie localement ou totalement la perméabilité ou la conductivité du matériau et donc l'impédance de la bobine réceptrice [2].

Quand on s'intéresse à une caractéristique électromagnétique ou géométrique, les autres sont par conséquent des paramètres perturbateurs. Cependant, si un contrôle cherche à mettre en évidence une caractéristique, il faut déterminer les paramètres de réglages optimaux (points de fonctionnement) et minimiser au maximum leurs variations. Par conséquent, la connaissance de l'influence de ces différents paramètres est nécessaire.

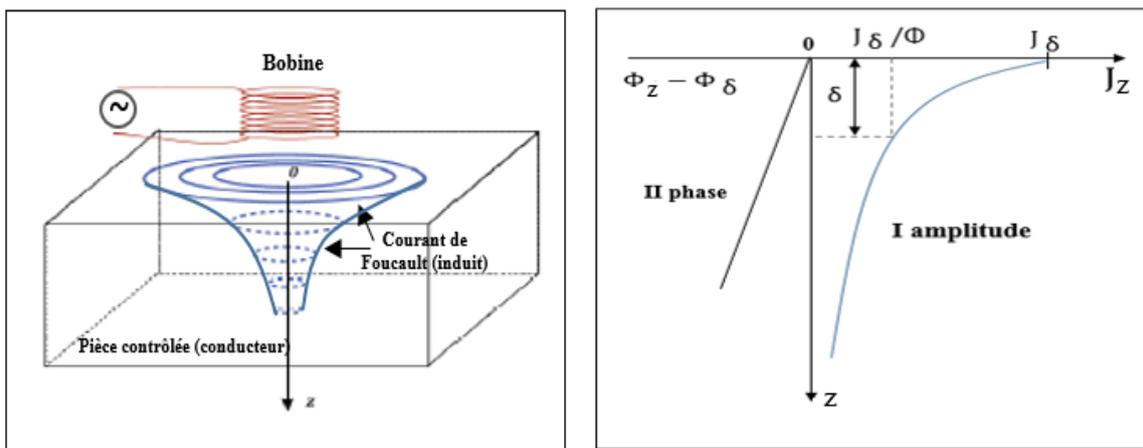


Fig. II. 21. Répartition des courants de Foucault dans une pièce.

La fréquence de travail, la conductivité et la perméabilité apparaissent dans l'épaisseur de peau électromagnétique telle que :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu_0 \mu_r \sigma f}} \tag{II.1}$$

$f$  : la fréquence d'alimentation.

$\sigma$  : La conductivité électrique.

$\mu_0$  : La perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r$  : La perméabilité magnétique relative du matériau.

Sous une surface plane environ 63 % des courants induits passent entre la surface et la profondeur  $\delta$ . On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur.

$$J(z) = J_0.e^{-z/\delta} \tag{II.2}$$

$Z$  : la profondeur considérée à l'intérieur de la cible.

$J_0$  : Le module de la densité de courant en fonction de la profondeur.

$\delta$  : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

**II.14. Eléments perturbateurs**

Dans le domaine de contrôle et d'évaluation non destructifs par courants de Foucault, la température est le seul élément purement perturbateur. La perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau varient avec la température. Toute variation thermique devient très gênante pour les appareils qui assurent une mesure absolue tels que ceux destinés à des mesures d'épaisseur ou de détection d'anomalies.

**II.15. L'imagerie pour l'évaluation non destructive**

Différents types de représentations des données sont couramment employés en fonction du mode d'acquisition. On peut en citer trois, venant du domaine des ultrasons:

- A-scan, B-scan et C-scan figure (II.22).

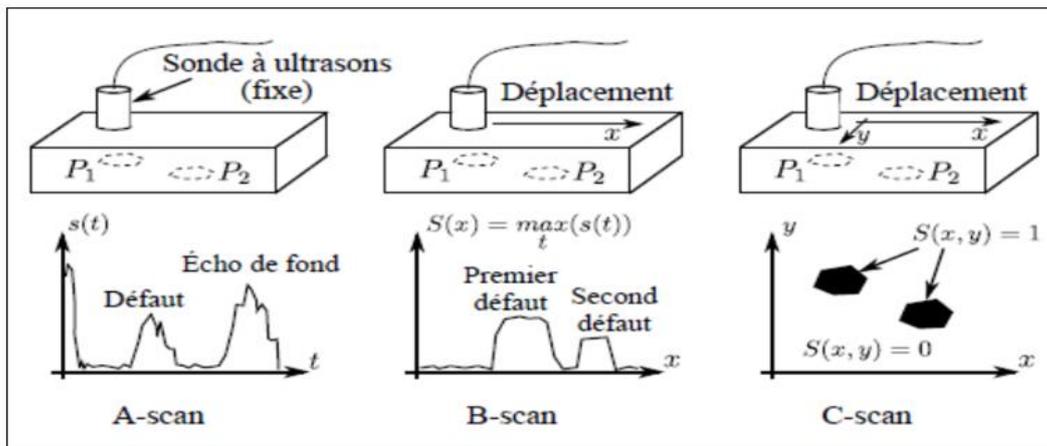


Fig. II. 22. Dénomination des représentations A-scan, B-scan et C-scan par ultrasons.

La dénomination A-scan représente l'amplitude du signal d'écho ultrasonore reçu par un récepteur fixe, en fonction du temps. La dénomination B-scan consiste à mesurer le signal pour différentes positions du récepteur déplacé le long d'une ligne. Le maximum du signal pour chaque position est représenté en fonction de l'abscisse correspondante [17].

On peut ainsi obtenir, selon la méthode utilisée, une représentation en coupe de la pièce inspectée. Enfin, la représentation C-scan représente elle aussi le maximum du signal mesuré pour une position donnée mais cette fois le capteur est déplacé sur un espace en deux dimensions  $(x, y)$  correspondant à la surface de la pièce. Cette dernière représentation offre une image à part entière de la pièce.

La représentation des données issues des capteurs sous forme 2D (images) est séduisante car elle en facilite l'interprétation. Les méthodes de type ressuage et magnétoscopie fournissent des représentations de type C-scan et sont très répandues dans l'industrie quoi qu'elles n'aient pas connu d'évolution ces dernières années et semblent avoir tendance à être délaissées au profit de méthodes permettant une meilleure caractérisation de défauts comme la radiographie.

Celle-ci tire son épingle du jeu car bien que fournissant des images de type C-scan en 2D, il est possible par un jeu de rotation autour de l'objet inspecté d'appliquer des techniques de tomographie similaires à celles utilisées dans le corps médical et ainsi de construire des images 3D représentant la structure interne d'une pièce.

A l'instar de la radiographie, les techniques de courants de Foucault ont permis de développer des sondes d'imagerie multiéléments. En CF, l'obtention de représentations C-scan est aussi possible. Elle se fait couramment par le balayage selon le plan  $(x, y)$  à l'aide d'un capteur unique, ou encore par utilisation d'un ensemble multi-capteur, ce qui permet de réduire les déplacements du système expérimental et donc le temps d'acquisition [18].

Les contrôles gagnent ainsi en traçabilité, rapidité et simplicité. La reconstruction de défauts 3D en imagerie CF est plus difficile à mettre en œuvre à cause de problèmes de diffusion de l'onde électromagnétique ou de problèmes d'accès à plus d'une face de la pièce [2].

#### **II.16. Avantages du CND par courants de Foucault**

- Grande sensibilité de détection.
- Contrôle rapide.

- Les tests par courants de Foucault ne sont pas risqués; il n'y a pas de danger de rayonnement ou d'autres dangers.
- Équipement disponible pour une utilisation sur le terrain est devenu de plus en plus léger et portable. En plus, de nombreux instruments sont à base de microprocesseur, qui permet que les configurations du test peuvent être enregistrées dans la mémoire et les résultats du test vont être enregistrés sur le disque pour l'archivage et l'analyse.

### **II.17. Limites du CND par courants de Foucault**

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe.

### **II.18. Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre, nous avons introduit le contrôle non destructif ainsi que les différentes techniques utilisées et les principes physiques qui les régissent. Nous avons développé particulièrement le CND par courant de Foucault.

Cette méthode est basée sur la mesure de la variation de l'impédance, cette grandeur dépend de plusieurs paramètres, mais elle nous permet d'avoir les caractéristiques physiques et géométriques de la pièce à contrôler ainsi que son état de santé. De ce fait nous ne nous intéressons qu'au calcul des courants de Foucault et de la variation d'impédance qui en résulte à travers le modèle général de Maxwell qui fera l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre III

## Modélisation numérique des structures CND- CF

---

III.1. Introduction.....	34
III.2. Les équations de Maxwell .....	34
III.2.1. Maxwell-Gauss .....	34
III.2.2. Maxwell-Faraday .....	35
III.2.3. Conservation du flux .....	35
III.2.4. Maxwell-Ampère .....	36
III.3. Lois de comportement des milieux .....	36
III.3.1. Relations du milieu .....	36
III.3.2. Loi d'Ohm.....	37
III.4. Hypothèses simplificatrices .....	37
III.5. Formulations de la magnétodynamique .....	38
III.5.1. Formulation $\vec{A} - V$ .....	38
III.5.2. Formulation $\vec{T} - \Phi$ .....	39
III.6. Méthodes de résolution .....	40
III.6.1. Méthodes analytiques.....	40
III.6.2. Méthodes numériques .....	40
III.7. Méthode des différences finis (MDF).....	40
III.8. Méthode des éléments finis (MEF).....	41
III.8.1. La discrétisation .....	41
III.8.2. Fonction d'interpolation.....	43
III.9. Calcul de la variation d'impédance.....	43
III.9.1. Impédance à travers les énergies électromagnétiques .....	44
III.10. Conclusion .....	45

### III.1.Introduction

Le développement de toute technologie s'appuie non seulement sur l'expérimentation qui demeure nécessaire, mais aussi sur un modèle de simulation qui décrit le plus fidèlement possible le comportement du dispositif à concevoir.

La simulation consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système. Elle s'appuie sur une modélisation et fait appel à des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. En chaque point du système considéré, plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température, champ électromagnétique . . .) décrivent son état. Ces grandeurs physiques ne sont pas indépendantes, mais liées par des équations, généralement aux dérivées partielles. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui régissent le comportement du système.

Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique [19].

Dans ce chapitre nous allons étudier les équations électromagnétiques de base ; les équations de Maxwell ainsi que les conditions aux limites associées. Ensuite, nous présenterons les différentes formulations magnétiques utilisables pour un tel problème.

### III.2. Les équations de Maxwell

James Clark Maxwell est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations l'électricité, le magnétisme et l'induction en développant la formulation mathématique des travaux précédents réalisés par Michael Faraday et André-Marie Ampère. Il a démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière. Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne ou est due à l'existence d'un autre champ au même point [2].

#### III.2.1. Maxwell-Gauss

La valeur de la divergence d'un champ en un volume élémentaire nous donne une indication sur l'allure des lignes de champ en ce volume. Si la divergence est positive, nous sommes en présence d'une source de champ et les lignes sortent de ce volume et divergent. Si la divergence est négative, nous sommes en présence d'un puits et les lignes de champ

convergent vers ce volume et entrent dans le volume. Si la divergence est nulle, alors les lignes de champs sont parallèles entre elles, elles entrent et sortent du volume sans modification.

L'équation de Maxwell-Gauss est l'expression différentielle du théorème de Gauss en électrostatique qui stipule que le flux du champ électrique passant à travers une surface fermée quelconque est proportionnel à la charge électrique contenue dans le volume fermé par cette surface.

Son expression, est donnée par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{III.1})$$

### III.2.2. Maxwell-Faraday

L'équation de Maxwell-Faraday modélise un phénomène bien connu qui est l'induction électromagnétique. Prenez un solénoïde et reliez ses extrémités à un galvanomètre sensible. Déposez un aimant près du solénoïde : pas de réaction sur le galvanomètre. Maintenant faites faire à votre aimant un va et vient à l'intérieur du solénoïde : vous constaterez une déviation du galvanomètre. En bougeant l'aimant, vous avez provoqué une variation du champ magnétique dans le solénoïde et donc une variation du champ électrique et la création d'un courant électrique.

Le signe (-) devant la dérivée du champ magnétique indique que la variation du champ électrique est opposée à celle du champ magnétique.

Son expression est comme suit :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

### III.2.3. Conservation du flux

Le champ magnétique que nous notons  $\vec{B}$ , n'est pas créé par des charges "magnétiques", analogues aux charges à l'origine du champ électrique, mais par des courants électriques ou des aimants.

Raisonnons par analogie avec le champ électrique : sa divergence en un point est proportionnelle à la densité de charge en ce point. Ce qui laisse supposer que les charges électriques existent et soient à l'origine de ce champ.

Exprimer que la divergence du champ magnétique est toujours nulle, c'est exprimer qu'il n'existe pas de charge "magnétique" que l'on pourrait isoler, de monopôle magnétique, comme il existe un électron, charge électrique unitaire. Du moins, c'est que l'on dit

classiquement en prépa et en licence. En fait, rien n'interdit dans les lois de la physique l'existence de monopôles magnétiques.

Son expression est la suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.3})$$

### III.2.4. Maxwell-Ampère

Cette équation nous renseigne sur la nature des sources du champ magnétique : une variation temporelle du champ électrique, assimilée à un courant, et la présence de courant électrique. On retrouve là le résultat d'une expérience célèbre. Celle d'Oersted, qui constata que la circulation d'un courant électrique provoquait la rotation de l'aiguille d'une boussole.

le terme  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  n'a rien d'expérimental. C'est Maxwell qui a introduit ce terme pour rendre cohérent son ensemble d'équations et en l'assimilant à un courant électrique dit "courants de déplacement". Ce terme signifie qu'une variation du champ électrique peut produire un champ magnétique, même en l'absence de courant électrique. Son expression :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.4})$$

Où  $\vec{E}$  [V/m] et  $\vec{H}$  [A/m] sont respectivement le champ électrique et magnétique.

$\vec{D}$  [A. s/m] et  $\vec{B}$  [T] sont respectivement l'induction électrique et magnétique.

$\vec{J}$  [A / m<sup>2</sup> ] et  $\rho$  [q / m<sup>3</sup> ] sont respectivement la densité de courant de conduction et de charge électrique.

### III.3. Lois de comportement des milieux

Les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent. Ainsi, pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu :

#### III.3.1. Relations du milieu

Les relations du milieu expriment le lien entre les vecteurs champs électriques et déplacement électrique à travers la permittivité électrique d'une part, et la relation qui existe entre les vecteurs champs magnétiques et induction magnétique à travers la perméabilité magnétique d'autre part [20].

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (\text{III.6})$$

$\mu$ : Perméabilité magnétique [ $\text{H. m}^{-1}$ ].

$\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré [ $\text{H. m}^{-1}$ ].

$\mu_0$ : Perméabilité magnétique du vide,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H. m}^{-1}]$

$\varepsilon$ : Permittivité électrique [ $\text{F/m}$ ].

$\varepsilon_r$ : Permittivité électrique relative du milieu considéré [ $\text{F. m}^{-1}$ ].

$\varepsilon_0$ : Permittivité électrique du vide,  $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} [\text{F. m}^{-1}]$

### III.3.2. Loi d'Ohm

Elle exprime la relation liant la densité du courant  $\vec{J}$  au champ électrique  $\vec{E}$  à travers la conductivité  $\sigma$ , elle est donnée par :

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

$\sigma$ : Conductivité électrique [ $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ].

### III.4. Hypothèses simplificatrices

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

Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique à basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$ .

Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité  $\sigma \vec{E}$  peut-être décomposée en une partie imposée  $\vec{J}_s$  (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, laquelle on gardera la notation  $\sigma \vec{E}$  qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.8})$$

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

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont

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

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

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.11})$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.12})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.13})$$

### III.5. Formulations de la magnétodynamique

Plusieurs formulations ont été développées pour représenter le modèle de la magnétodynamique en vue de sa modélisation. Les principales formulations rencontrées peuvent être classées en deux grandes familles [21] :

- Formulations de type électrique:  $\vec{E}$ ,  $\vec{A}$  et  $\vec{A} - V$
- Formulations de type magnétique :  $\vec{H}$  et  $\vec{T} - \Phi$

#### III.5.1. Formulation $\vec{A} - V$

D'après (III.3) on a :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \exists \vec{A} / \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{III.14})$$

De l'équation (III.5):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \Rightarrow \vec{H} = \vec{B} / \mu \quad (\text{III.15})$$

En combinant (III.14) et (III.2) on trouve :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \quad (\text{III.16})$$

D'après (III.16) on a :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \Rightarrow \exists \frac{V}{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad (\text{III.17})$$

D'où :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.18})$$

En combinant les équations (III.18) et (III.7):

$$\vec{J} = -\sigma \vec{\nabla} V - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.19})$$

On pose :

$$\vec{J}_s = -\sigma \vec{\nabla} V \quad (\text{III.20})$$

$$\vec{J} = \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.21})$$

De (III.4) et (III.14), (III.21) on aura :

$$\vec{\nabla} \left( \frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{A}}{\mu} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (\text{III.22})$$

C'est l'équation magnétodynamique en termes de  $\vec{A}$ .

### III.5.2. Formulation $\vec{T} - \Phi$

La formule  $\vec{T} - \Phi$ , décrit la distribution du champ électromagnétique par l'utilisation du potentiel vecteur électrique  $\vec{T}$  et du potentiel scalaire magnétique  $\Phi$ . Cette formulation a l'avantage de permettre une réduction du coût de calcul en diminuant les degrés de liberté de trois à un dans toutes les zones non conductrices [22].

Pour la solution du problème nous considérons une autre fois la condition de la continuité

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{III.23})$$

A partir de l'équation (II.23), l'expression de la densité de courant en termes de potentiel vecteur électrique est donnée par l'équation :

$$\vec{J} = \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \quad (\text{III.24})$$

On peut noter des équations (II.4) et (II.24) que  $\vec{T}$  et  $\vec{H}$  diffère par le gradient scalaire  $\Phi$ :

$$\vec{H} = \vec{T} - \vec{\nabla}\Phi \quad (\text{III.25})$$

La combinaison des équations (II.2), (II.5) et (II.7) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Phi) = 0 \quad (\text{III.26})$$

A partir de l'équation (II.3) on obtient:

$$\vec{\nabla} \cdot \left( \mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Phi) \right) = 0 \quad (\text{III.27})$$

Dans l'air l'expression du champ magnétique est réduite à :

$$\vec{H} = -\vec{\nabla}\Phi \quad (\text{III.28})$$

On remplaçant (II.28) dans (II.3) :

$$-\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{\nabla}\Phi = 0 \quad (\text{III.29})$$

La divergence de  $\vec{T}$  n'est pas encore défini et par conséquent  $\vec{T}$  et  $\Phi$  restent ambigu. Pour y remédier on utilise l'une des jauges communément utilisée en électromagnétisme en l'occurrence la jauge de Coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (\text{III.30})$$

Cette condition nous autorise à rajouter à l'équation (II.26) le terme :

$$\vec{\nabla} \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) \quad (\text{III.31})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \vec{\nabla} \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Phi) = 0 \quad (\text{III.32})$$

C'est ce modèle que nous avons adopté pour nos simulations en 3D.

### III.6. Méthodes de résolution

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles, décrites précédemment

#### III.6.1. Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples. À titre d'exemple on peut citer les travaux qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles par la méthode de séparation des variables. Parmi ces travaux on retrouve [11] :

- Une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de deux couches métalliques parallèles de matériaux différents.
- Une bobine de section rectangulaire encerclant deux cylindres métalliques concentriques

Des développements plus récents permettent notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent soit impossible à obtenir, soit très complexe et très coûteuse en ressources de calcul. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques.

#### III.6.2. Méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. L'essor de l'informatique, dans les années 50, a permis de mettre au point plusieurs méthodes numériques dans le domaine de l'électromagnétisme. Celles-ci sont d'autant plus utilisées que les configurations à traiter sont complexes que ce soit du côté géométrie ou phénoménologiquement hétérogène et non linéaire [2].

Les méthodes numériques les plus connues sont :

- Méthode des intégrales de frontières (MIF).
- Méthode des volumes finis (MVF).
- Méthode des différences finis (MDF).
- Méthode des éléments finis (MEF).

### III.7 Méthode des différences finis (MDF)

C'est la méthode la plus ancienne, connue depuis Gauss. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse,

permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égales au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées [23].

### **III.8 Méthode des éléments finis (MEF)**

Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation. Les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue.

La méthode conduit à des systèmes algébriques de grande taille, et par conséquent nécessite une mémoire importante des calculateurs. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important, [11] [21].

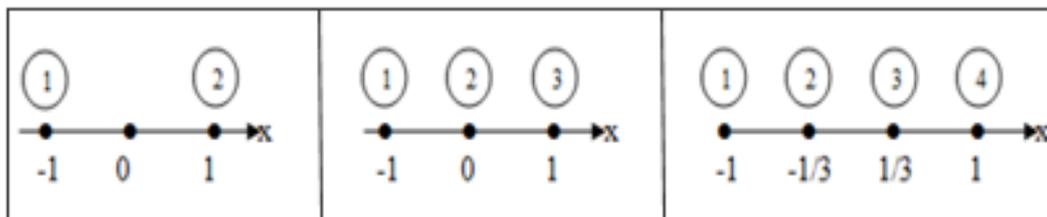
#### **III.8.1. La discrétisation**

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre finis de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément à l'aide des fonctions d'interpolation. La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatifs aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodale.

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définis selon le degré de la courbe d'interpolation qui lui est associée. On rencontre généralement, des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

• **Eléments à une dimension**

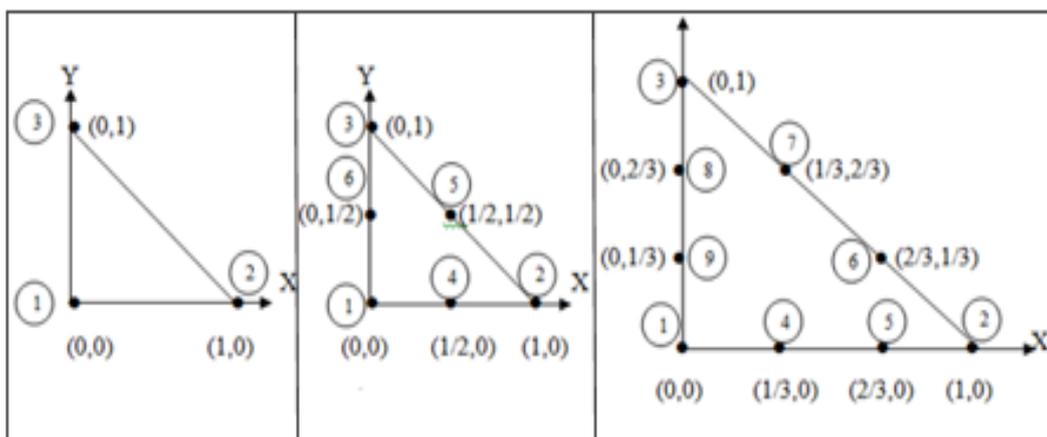


- Linéaire (2 nœuds)      - Quadratique (3 nœuds)      - Cubique (4 nœuds)

Fig. III. 1. Élément à une dimension.

• **Eléments à deux dimensions**

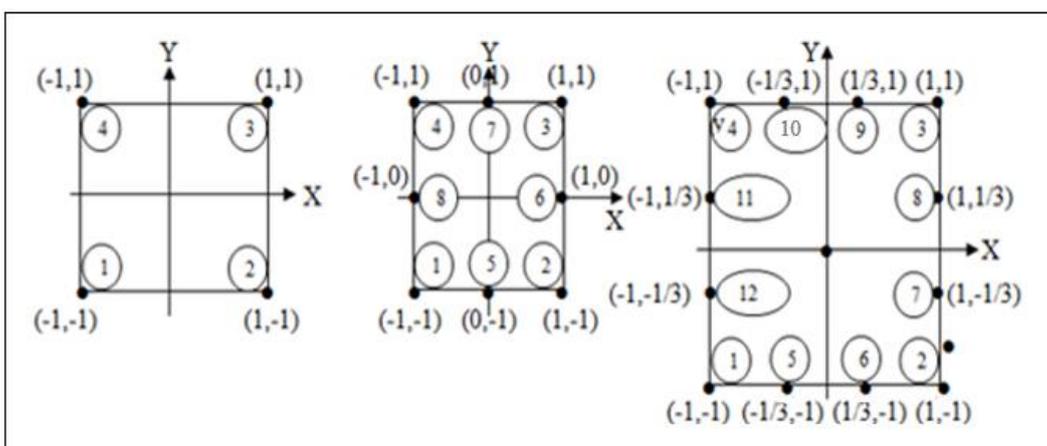
○ **Eléments triangulaires**



- Linéaire (3 nœuds)      - Quadratique (6 nœuds)      - Cubique (9 nœuds)

Fig. III. 2. Élément triangulaire à deux dimensions.

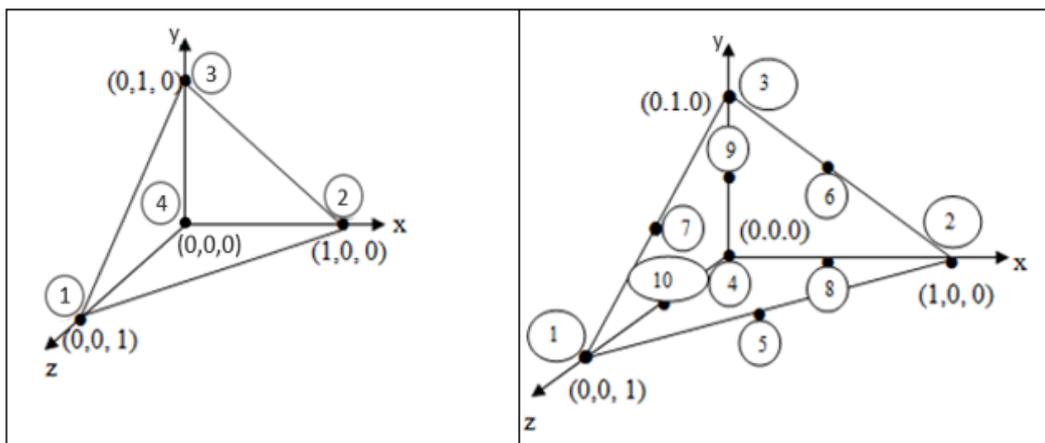
○ **Eléments carrés**



- Linéaire (4 nœuds)      - Quadratique (8 nœuds)      - Cubique (12 nœuds)

Fig. III. 3. Élément carré à deux dimensions.

○ Eléments à trois dimensions



- Linéaire (4 nœuds)

- Quadratique (10 nœuds)

Fig. III. 4. Eléments à trois dimensions.

**III.8.2. Fonction d'interpolation:**

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de Pascal, donné ci-dessous :

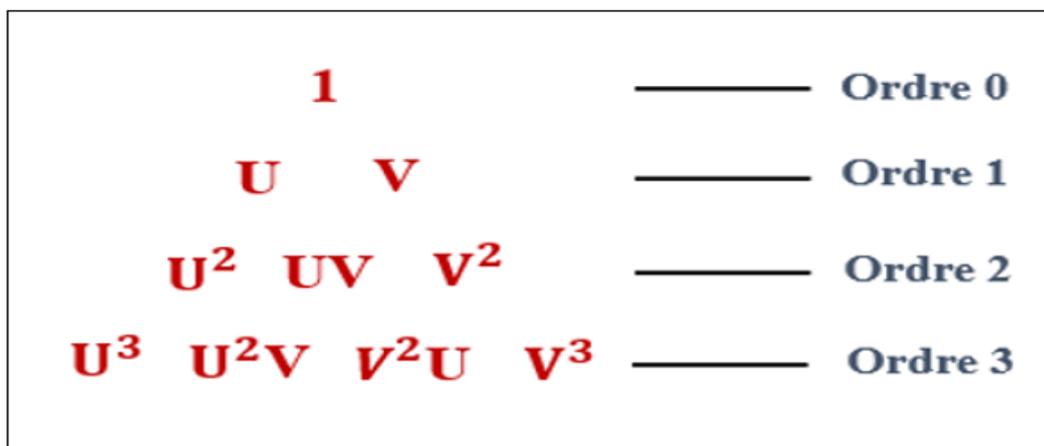


Fig. III. 5. Triangle de Pascal.

**III.9. Calcul de la variation d'impédance**

La mesure des CF n'est pas directement accessible à l'expérience, et il faut donc passer nécessairement par la mesure d'une grandeur connexe, en l'occurrence :

- La mesure de l'induction, généralement par effet Hall.
- La mesure de l'impédance du capteur.

La mesure de ces grandeurs doit être faite pour un matériau sain et pour un matériau comportant des défauts.

Notre choix s'est porté sur le calcul de l'impédance, étant donné que nos expériences sont basées sur la mesure de la variation d'impédance de la bobine. On doit disposer tout d'abord d'un modèle qui nous permet de calculer le champ électrique en présence et en absence du défaut. Il est nécessaire de trouver ensuite une méthode pour calculer la variation d'impédance engendrée par la présence de défaut. L'impédance de la sonde est appelée  $Z$  et sa variation  $\Delta Z$ .

### III.9.1. Impédance à travers les énergies électromagnétiques

Le comportement électromagnétique de l'ensemble bobine - matériau à contrôler peut-être étudié au moyen d'une analogie électrique : un circuit constitué de deux bobines couplées de manière inductive est équivalent à un seul circuit dont les paramètres sont ramenés à la bobine source. D'après cette équivalence, l'énergie magnétique du système (capteur - pièce) est égale à l'énergie magnétique du circuit équivalent. Il en est de même pour l'énergie dissipée par effet Joule.

La résistance  $R$  vue par le capteur peut être évaluée à travers le calcul de la puissance perdue par effet Joule, soit :

$$P_j = \iiint_v \frac{J^2}{\sigma} \cdot dv \quad (\text{III.33})$$

$$P_j = RI^2 \quad (\text{III.34})$$

D'où:

$$R = \frac{N^2}{S^2 J^2} P_j \quad (\text{III.35})$$

De même l'énergie magnétique emmagasinée nous permet de déduire l'inductance du système.

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_v \frac{B^2}{\mu} \cdot dv \quad (\text{III.36})$$

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{III.37})$$

D'où:

$$L = \frac{2N^2}{S^2 J^2} W_m \quad (\text{III.38})$$

C'est cette méthode qui a été adoptée pour nos calculs d'impédance, elle permet de calculer la résistance et l'inductance (réactance) d'une bobine de manière extrêmement simple et rapide même si cette bobine est en présence d'un matériau réactif. Néanmoins, cette méthode est applicable uniquement aux capteurs double fonctions, c'est-à-dire aux capteurs faisant office en même temps d'émetteur et de récepteur [23].

### III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux lois qui constituent la base de l'électromagnétisme à savoir les équations de Maxwell. Celles-ci contiennent l'essence même de la nature et de la structure du champ électromagnétique. Ajoutées à quelques lois régissant l'interaction du champ électromagnétique avec la matière, cet ensemble d'équations nous permet de calculer le champ électromagnétique en tout point de notre système à travers les modèles électromagnétiques.

Dans le cas 3D la formulation  $\vec{T} - \Phi$  permet de réduire considérablement les temps de simulations des configurations CND-CF. Cette approche est intégrée dans le logiciel éléments finis Ansys-Maxwell, permet de simuler avec efficacité l'interaction capteur/cible avec défauts

# Chapitre IV

## Applications et validations

---

IV.1. Introduction .....	46
IV.2. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell .....	46
IV.3. Simulation d'un système capteur/plaque avec défaut.....	47
IV.3.1. Variation de la fréquence .....	48
IV.3.2. Variation du lift-off.....	50
IV.3.3. Variation de la longueur du défaut.....	50
IV.3.4. Maillage .....	51
IV.3.5. Distribution des courants induits.....	51
IV.4. Simulation d'un système d'imagerie par courants de Foucault.....	52
Configuration I : pièce sans défaut .....	55
Configuration II : pièce avec défaut .....	56
IV.II.1. Variation de la longueur du défaut .....	56
IV.II.2. Variation de la largeur du défaut .....	58
IV.II.3. Variation du lift-off .....	59
IV.II.4. Variation de la profondeur.....	62
IV.5. Conclusion .....	63

### IV.1. Introduction

Dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions capteur/pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances. La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction capteur/pièce et prévoir les résultats des différents scénarios (configuration géométrique de la pièce, dimensions du défaut, choix de matériaux, . . .) tout en limitant le nombre de prototype à réaliser [11].

On s'intéresse dans ce chapitre à la simulation de la détection par CND-CF des défauts de type fissure. Les défauts présentant ce type de géométrie sont fréquemment rencontrés en CND-CF, notamment en aéronautique. La modélisation des systèmes capteurs/pièces se fera par la méthode des éléments finis intégrée dans le logiciel Ansys-Maxwell. Cette étude se place aussi dans le cadre applicatif de la technique d'imagerie par CF à la détection et la caractérisation de défauts qui peuvent apparaître dans les différentes pièces d'un aéronef.

### IV.2. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell

Ansys-Maxwell est un logiciel leader dans la conception, l'analyse et l'optimisation 2D et 3D des dispositifs électromagnétiques, tels que les machines électriques tournantes, les transformateurs, les actionneurs, des isolateurs, des bobines...etc. Ansys-Maxwell utilise l'approche par éléments finis pour résoudre des équations de Maxwell et le calcul du champ électromagnétique dans les structures avec la prise en compte des conditions aux limites [24].

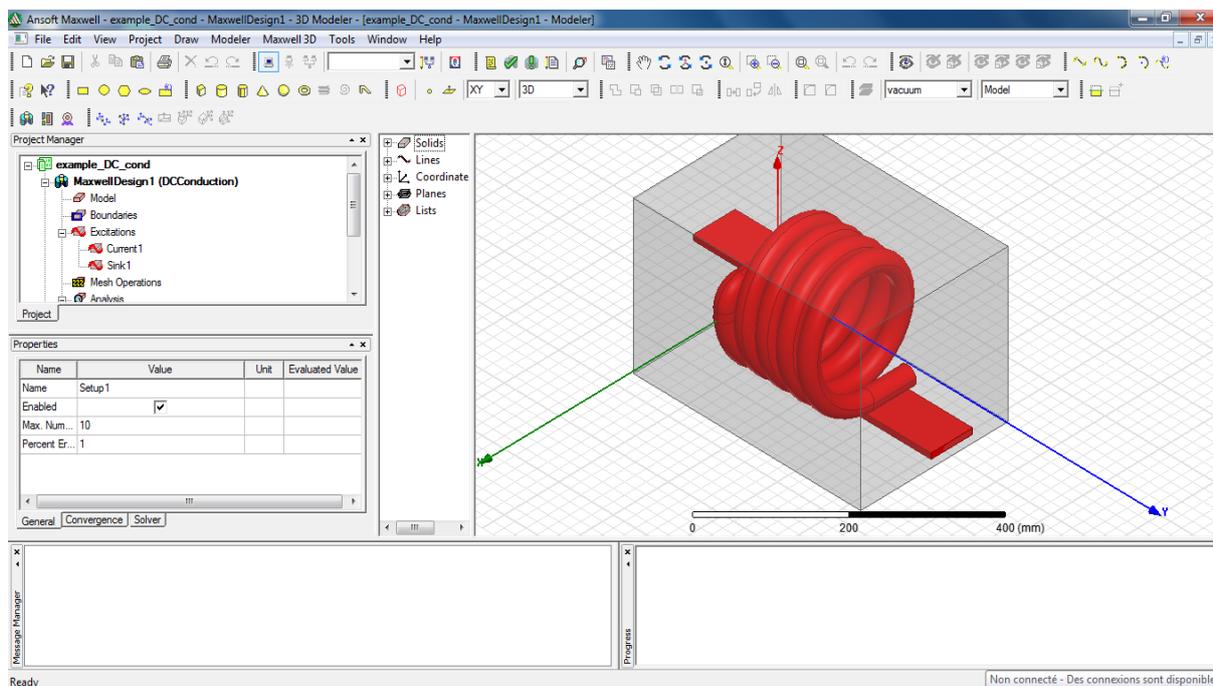


Fig. IV. 1. La fenêtre Maxwell 3D.

L'organigramme de calcul sous Ansys-Maxwell est donné par la figure ci-après :

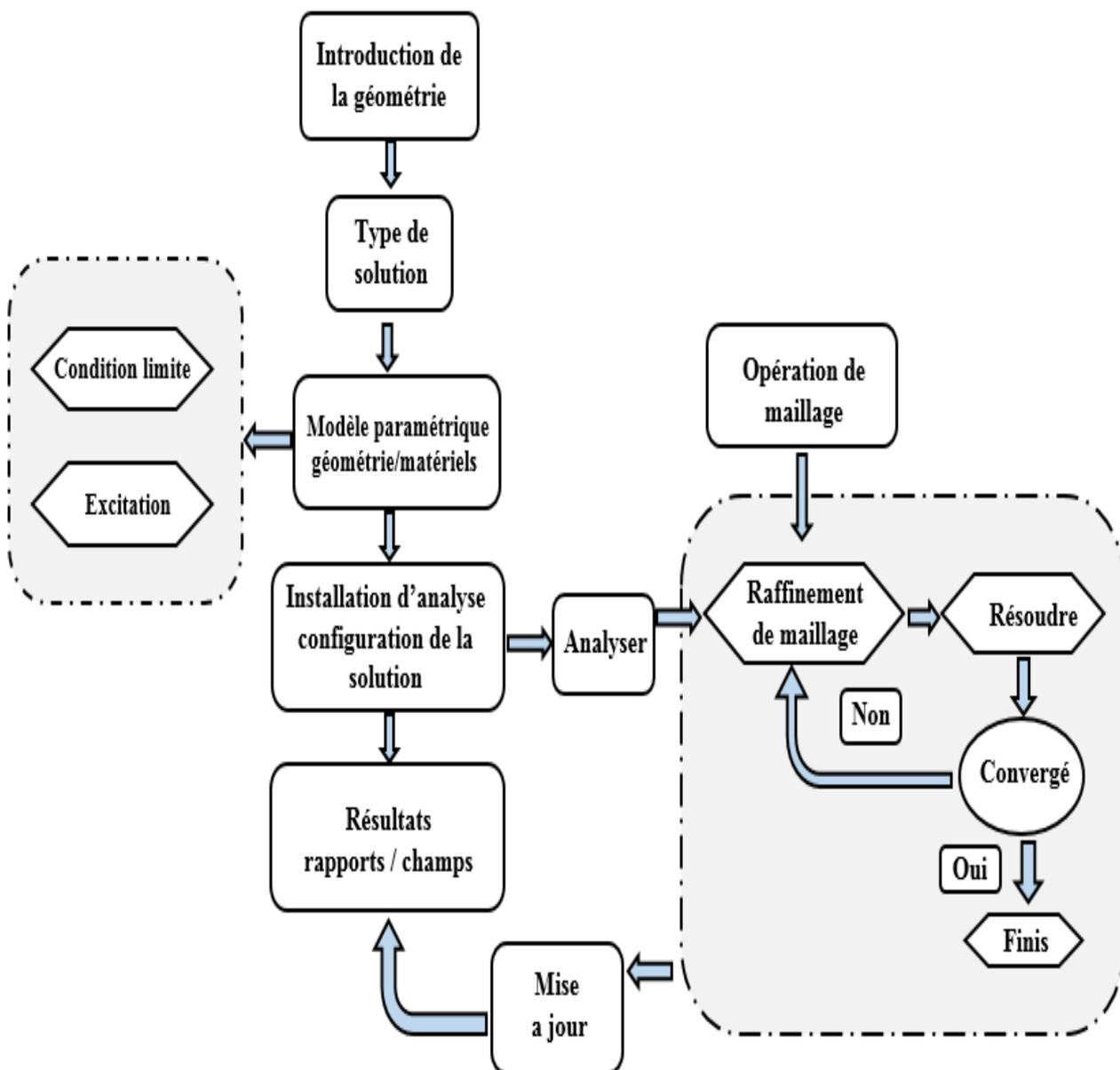


Fig. IV. 2. L'organigramme de calcul sous Ansys-Maxwell.

### IV.3. Simulation d'un système capteur/plaque avec défaut

Il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au-dessus d'une plaque métallique comportant une fissure débouchante orientée selon l'axe Oy. La fréquence et la distance bobine-pièce (lift-off) sont toutes les deux imposées et la variation de l'impédance,  $\Delta Z = Z - Z_0$ , de la sonde (bobine) est mesurée en fonction de la position de celle-ci. Z est l'impédance de la sonde en présence de la fissure et  $Z_0$  est l'impédance de sonde sans fissure. Tous les résultats sont normalisés par rapport à la valeur de l'impédance maximale du capteur  $Z_{Max}$ . Les différents paramètres du système sont listés dans le Tableau (IV.1) [25].

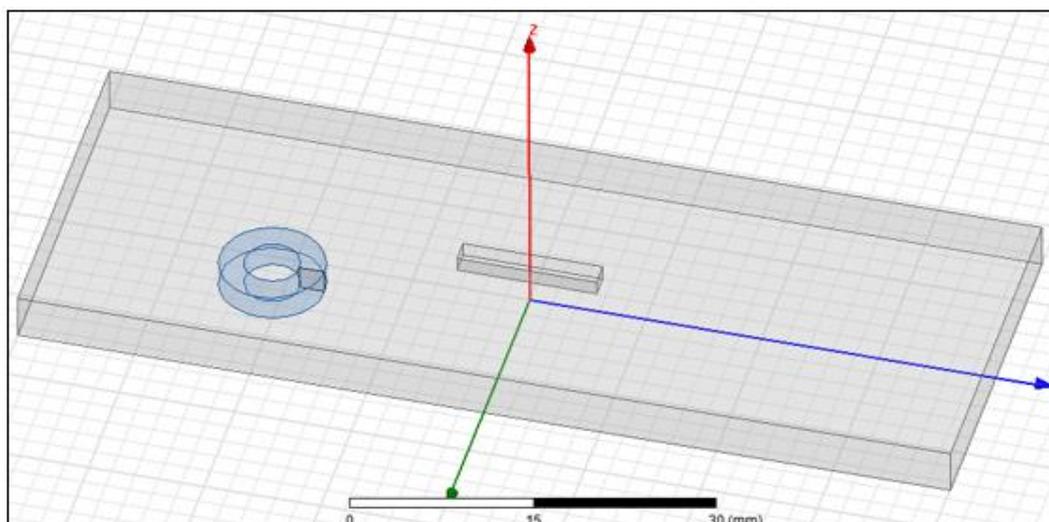


Fig. IV. 3. Géométrie du système A.

Paramètre	Valeur
<b>Bobine</b>	
Rayon intérieur	2.35 mm
Rayon extérieur	4.5 mm
Hauteur	2.2 mm
Lift-off	0.13 mm
Nombre de spires	175
Fréquence	50,100,150 kHz
<b>Plaque</b>	
Epaisseur	4 mm
Largeur	30 mm
Longueur	80 mm
<b>Fissure</b>	
Longueur	12 mm
Largeur	2 mm
Profondeur	5 mm

Tab. IV.1. Dimensions du système A.

Afin de valider les résultats de la simulation, nous avons comparé ces derniers à ceux obtenus par un LCR mètre [23]. Nous avons effectué les validations suivantes :

#### IV.3.1. Variation de la fréquence

Dans un premier temps nous allons varier la fréquence d'excitation du capteur de 50 kHz, 100kHz et 150kHz. Les figures (IV.4, IV.5 et IV.6) montrent la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux. Dans tous les cas, nous avons un très bon accord entre les deux résultats.

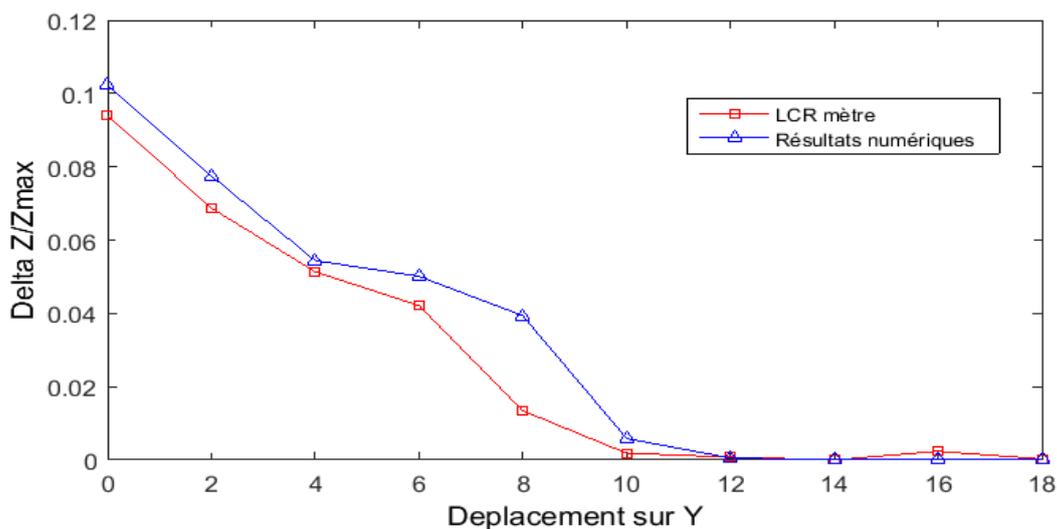


Fig. IV. 4. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour f=50kHz.

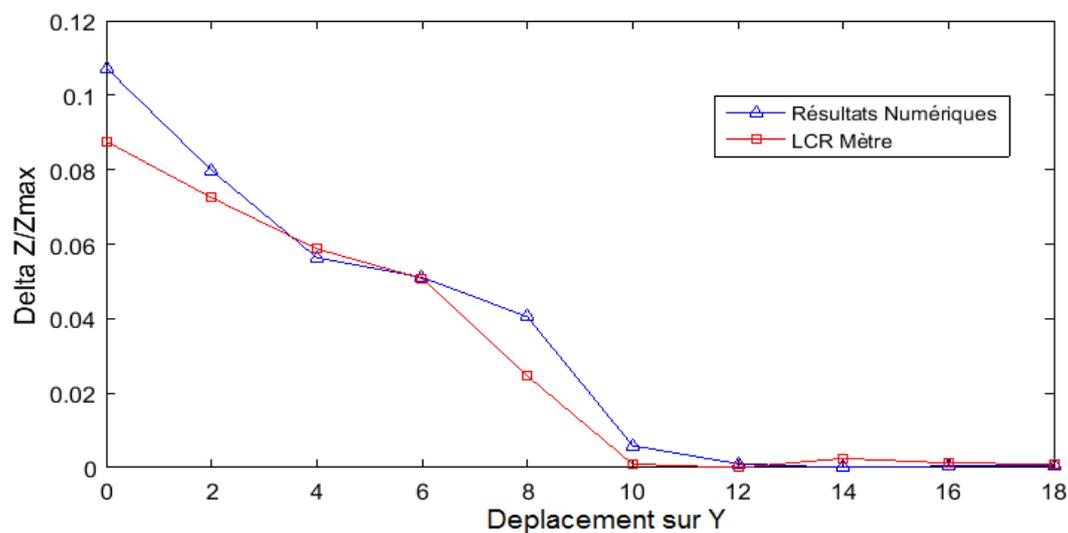


Fig. IV. 5. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour f=100kHz.

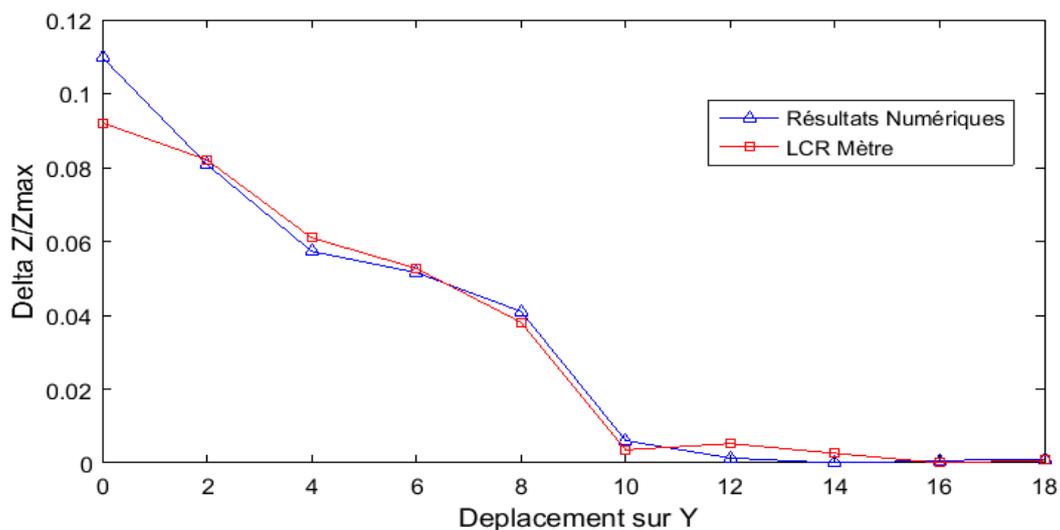


Fig. IV. 6. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour f=150kHz.

### IV.3.2. Variation du lift-off

Dans un second temps, nous avons augmenté le lift-off à 0,52 mm. La figure (IV.7) montre la variation d'impédance du capteur en fonction du déplacement. Dans ce cas également, nous avons une très bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux.

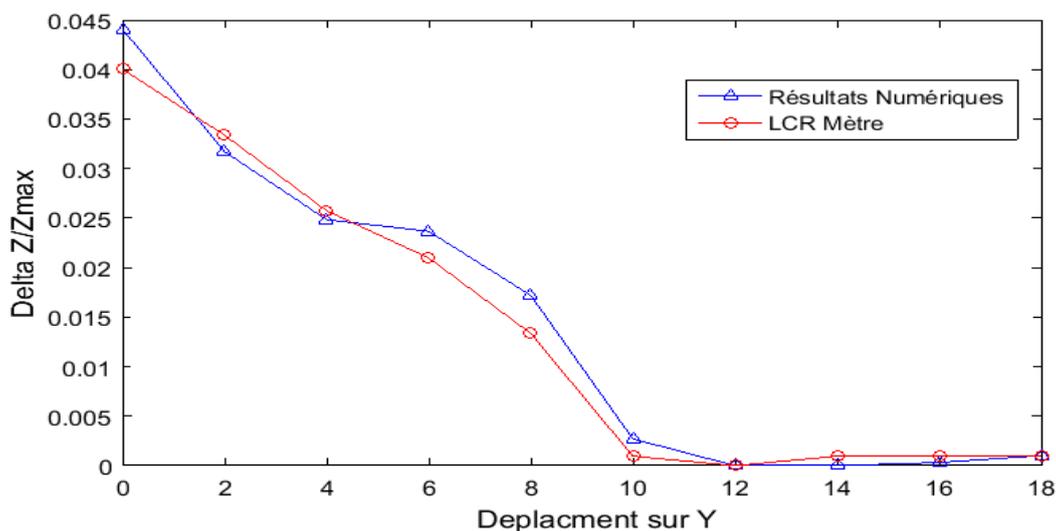


Fig. IV. 7. Variation d'impédance du capteur en fonction du déplacement.

### IV.3.3. Variation de la longueur du défaut

La troisième validation est relative au cas du changement de la longueur du défaut. La figure IV.8 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques en fonction de la position de la bobine pour un défaut de 8 mm de longueur. Dans ce cas aussi nous avons trouvé une bonne concordance.

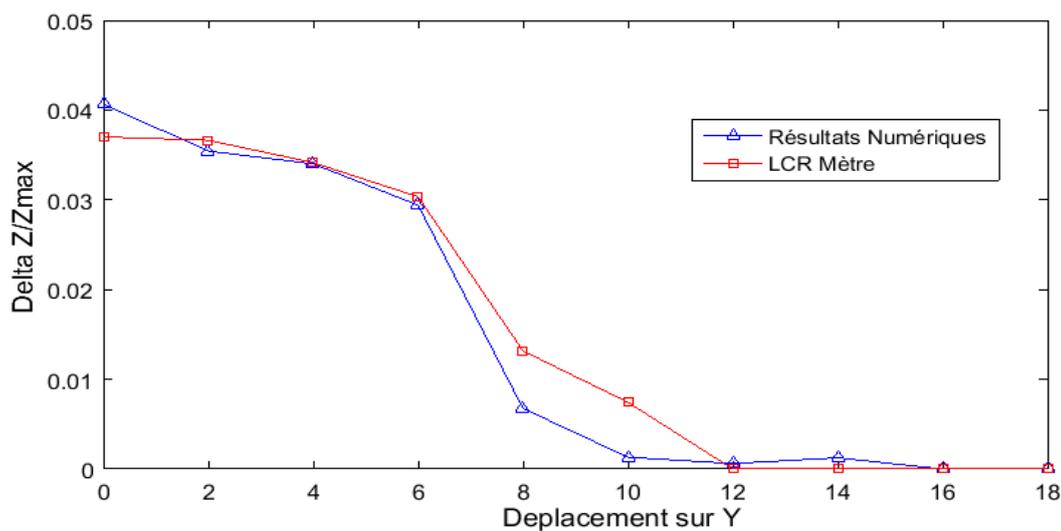


Fig. IV. 8. Changement de la longueur du défaut L=8mm.

### IV.3.4. Maillage

Le maillage du système capteur/pièce pour différentes positions du capteur est illustré par les figures (IV.9, IV.10, IV.11). Nous remarquons que la densité du maillage est plus importante près de la source et elle diminue en s'éloignant de cette dernière.

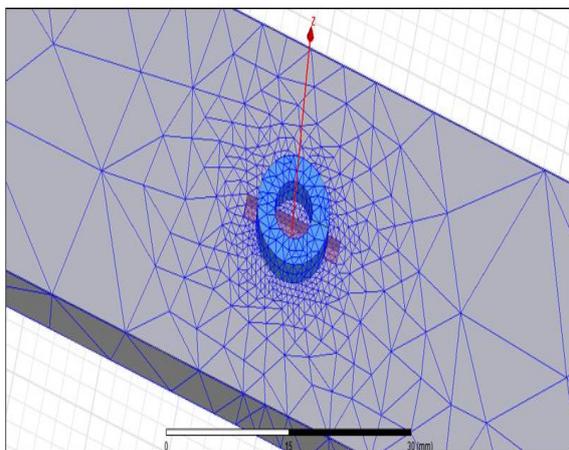


Fig. IV. 9. Maillage au milieu du défaut.

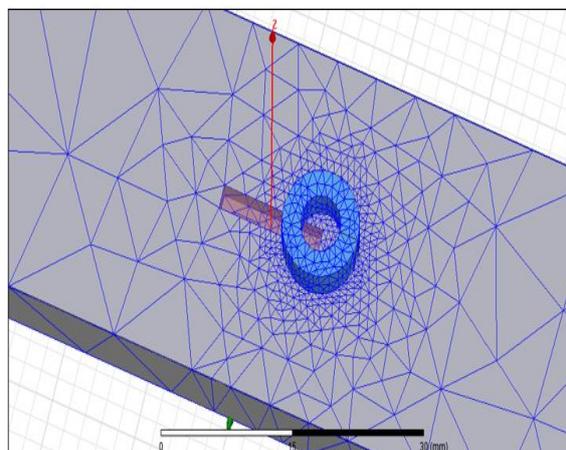


Fig. IV. 10. Maillage à l'extrémité du défaut.

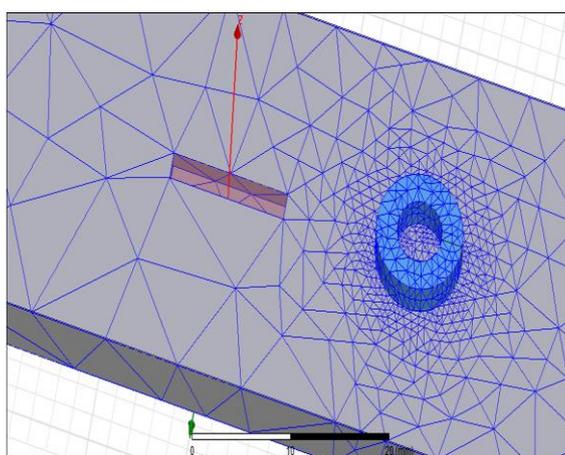


Fig. IV. 11. Maillage dans la zone saine.

### IV.3.5. Distribution des courants induits

Les figures (IV.12, IV.13 et IV.14) montrent les cartographies des CF en fonction de la position du capteur. Les trois images montrent bien que la fissure agit comme une barrière imperméable aux courants induits ce qui va modifier la répartition du champ réfléchi et de ce fait l'impédance du capteur.

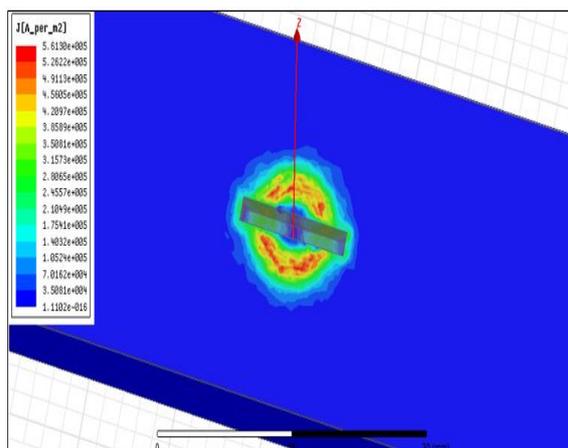


Fig. IV. 12. Densité du courant au milieu du défaut.

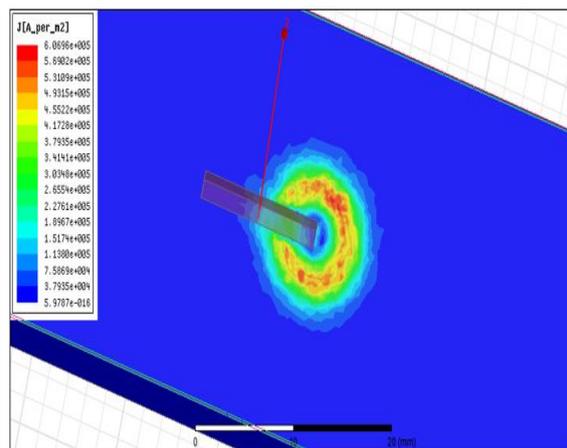


Fig. IV. 13. Densité du courant induit à l'extrémité du défaut.

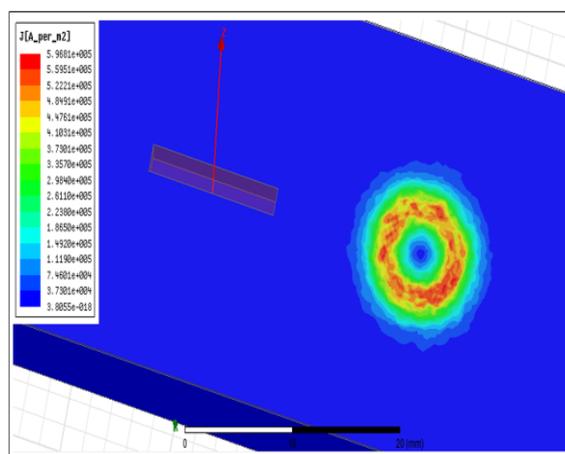


Fig. IV. 14. Densité du courant dans la partie saine.

#### IV.4. Simulation d'un système d'imagerie par courants de Foucault

Dans cette application, la pièce inspectée représente le support de la charnière de la porte du train d'atterrissage avant de l'avion militaire L-382/C-130 (voir figure IV.15). Cette pièce est sujette de différentes fissures qui apparaissent le long de la direction radiales des rivets de fixation.



Fig. IV. 15. L'avion L-382/C-130.

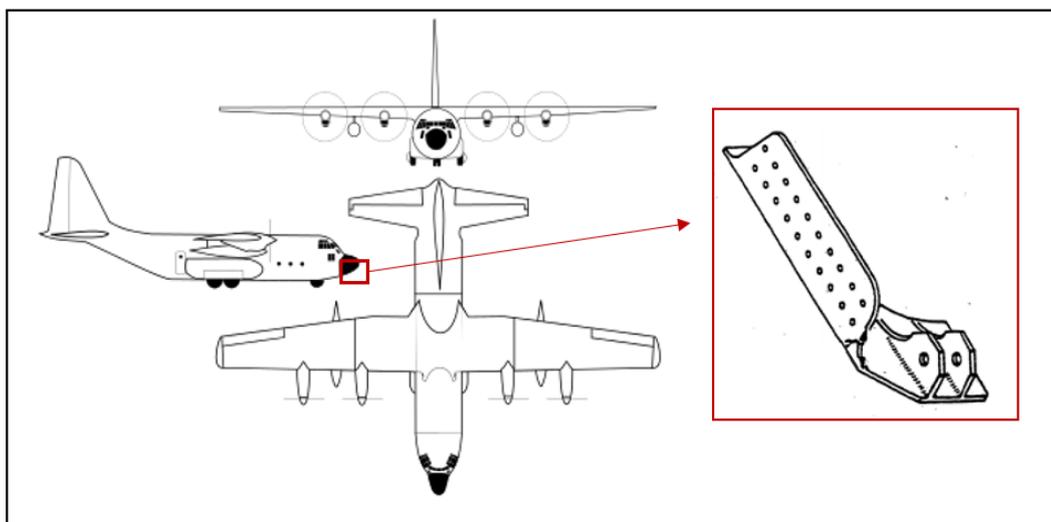


Fig. IV. 16. La pièce et son positionnement dans l'avion.

Une plaque en aluminium a été utilisée pour simuler la structure en question. La plaque a des dimensions de longueur de 40mm et largeur de 40mm, une épaisseur de 5 mm et elle est trouée au centre. De plus, pour simuler les défauts, une fissure adjacente au rivet a été insérée par la suite.

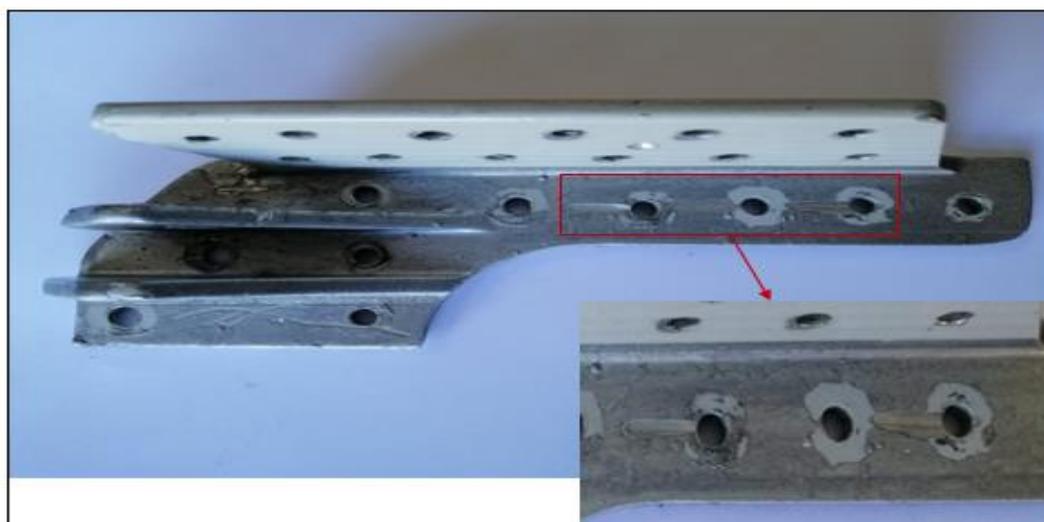


Fig. IV. 17. Le support de la charnière de la porte du train d’atterrissage avant.

La géométrie du système sous l’environnement de simulation Ansys-Maxwell est donnée par la figure ci-dessous :

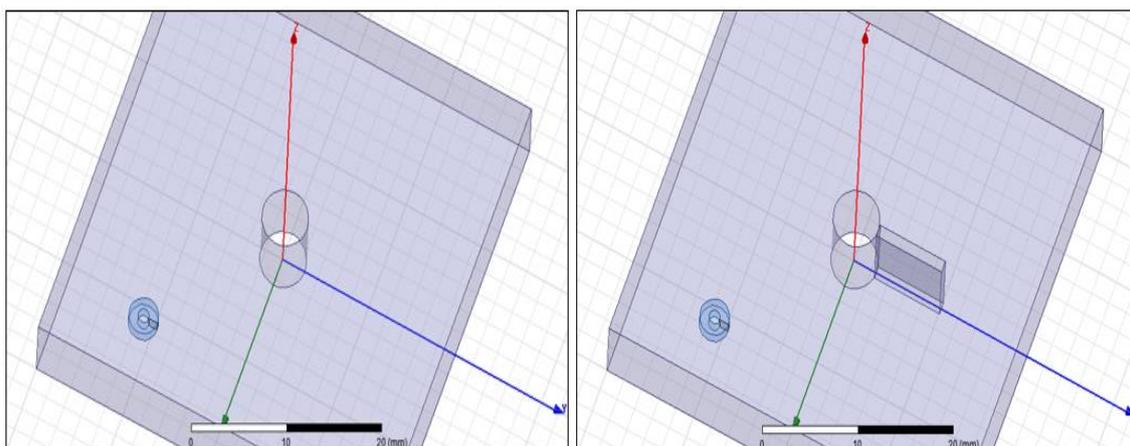


Fig. IV. 18. Géométrie étudiée (a) sans défaut (b) avec défaut.

Les principales dimensions ainsi que les différents paramètres électromagnétiques du système étudié sont listés dans le tableau (IV.2) :

Paramètre	Valeur
<b>Bobine</b>	
Rayon intérieur	0.6 mm
Rayon extérieur	1.6 mm
Hauteur	0.8 mm
Lift-off	0.13 mm
Nombre de spires	140
Fréquence	50 kHz
<b>Plaque</b>	
Epaisseur	5 mm
Largeur	40 mm
Longueur	40 mm
<b>Fissure</b>	
Longueur	2.5, 5, 7.5 et 10 mm
Largeur	0.5, 0.75 et 1 mm
Profondeur	100% d, 70% d, 50% d, 30% d, 20 % d et 10% d
<b>Trou</b>	
Rayon	2.5 mm
Hauteur	5 mm

Tab. IV.2. Dimensions du système B.

Auparavant, seules les données du B-scan étaient fournies pour l'impédance de la bobine. Dans ce qui suit, nous fournissons aussi des résultats de scan de surface (C-scan).

Les valeurs de l'impédance ont été obtenues pour chaque pas de déplacement de la bobine. Un balayage C-scan a été effectué, recouvrant une surface de longueur de 20mm et de largeur de 20 mm et de pas de 1 mm au-dessus du rivet. Des représentations B-scan sont aussi fournies couvrant une ligne de 80mm. Les résultats sont normalisés par rapport à la valeur de l'impédance du capteur dans l'air et évalués par rapport à plusieurs cas des figures.

### Configuration I : pièce sans défaut

Dans cette configuration, seul le trou est présent dans la pièce. Le signal obtenu est représenté sur la figure (IV.19). Nous remarquons que le signal est symétrique par rapport au centre du trou situé à ( $x = 0$  et  $y = 0$ ).

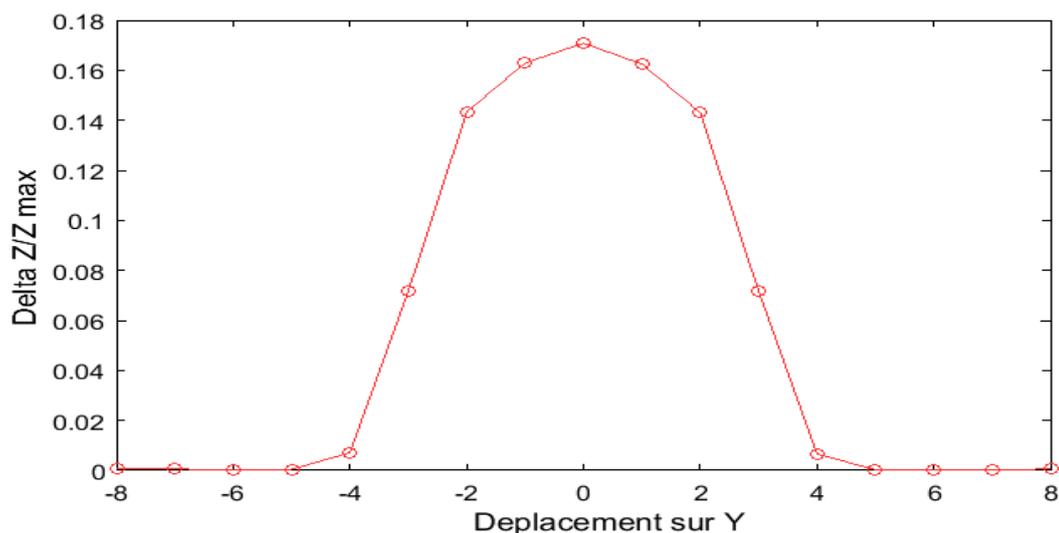


Fig. IV. 19. B-scan de la pièce sans défaut.

L'image de l'impédance pour la pièce sans défaut est donnée par la figure (IV.20), nous remarquons que la structure du rivet est reproduite et que nous pouvons intuitivement et par expérience déceler les dimensions du rivet.

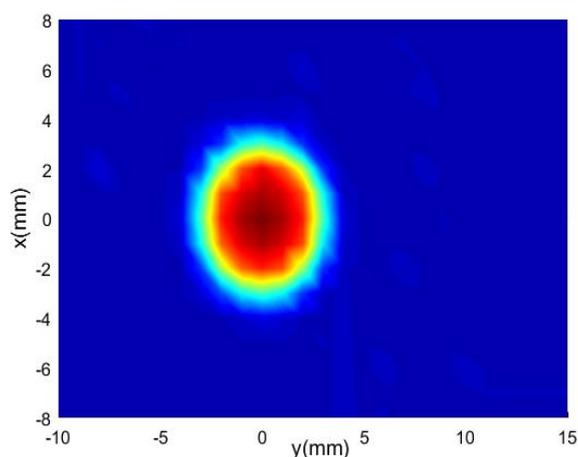


Fig. IV. 20. C-scan de la pièce sans défaut.

## Configuration II : pièce avec défaut

### IV.II.1. Variation de la longueur du défaut

Dans ce cas, le capteur scanne la pièce avec un trou et une fissure. La figure (IV.21) montre l'évolution de l'amplitude de l'impédance de la bobine en fonction du déplacement de cette dernière. L'asymétrie dans les signaux révèle la présence de la fissure radiale et ce pour différentes longueurs de cette dernière.

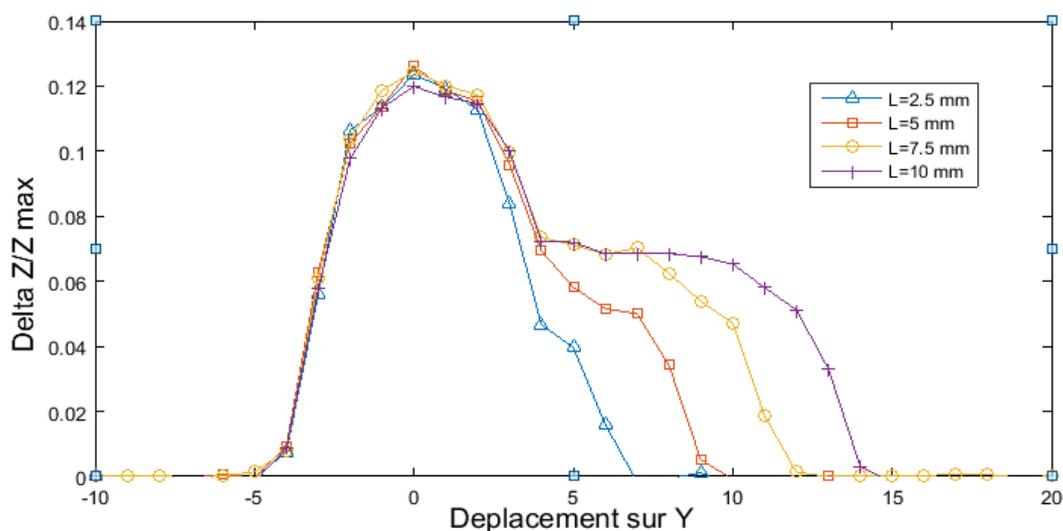


Fig. IV. 21. La variation de l'impédance en fonction de la longueur du défaut.

Sur les figures (IV.22, IV.23, IV.24 et IV.25), sont représentées les cartographies de l'impédance pour les différentes longueurs de la fissure adjacente. Comme il était prévisible, et grâce aux simulations nous avons pu reconstruire la forme du défaut et mettre en évidence la variation de sa longueur.

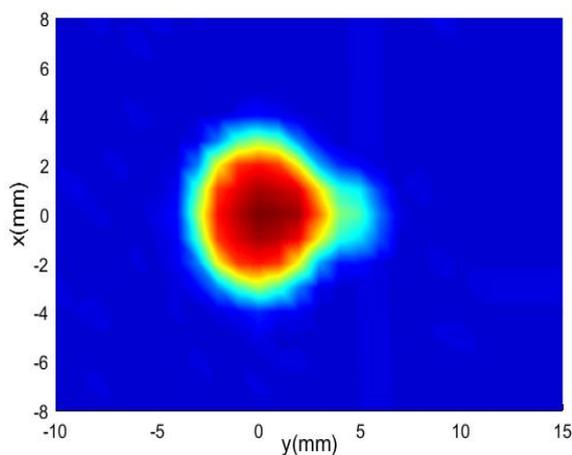


Fig. IV. 22. C-scan du défaut pour L= 2.5mm.

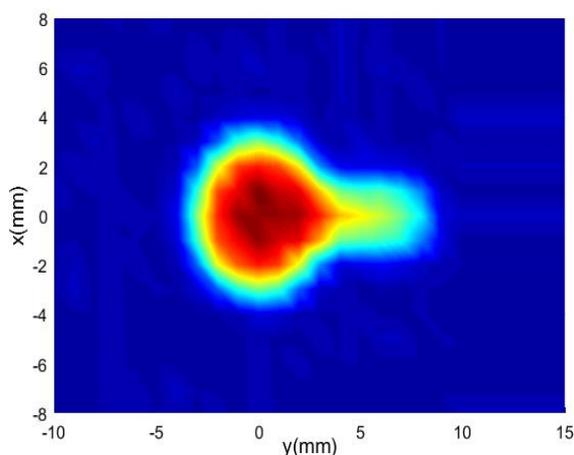


Fig. IV. 23. C-scan du défaut pour L= 5 mm.

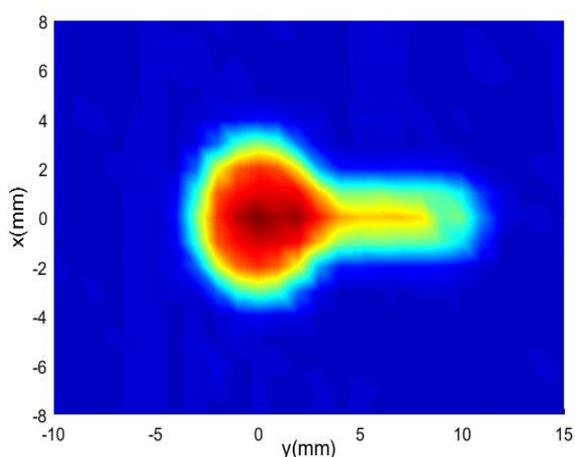


Fig. IV. 24. C-scan du défaut pour L= 7.5mm

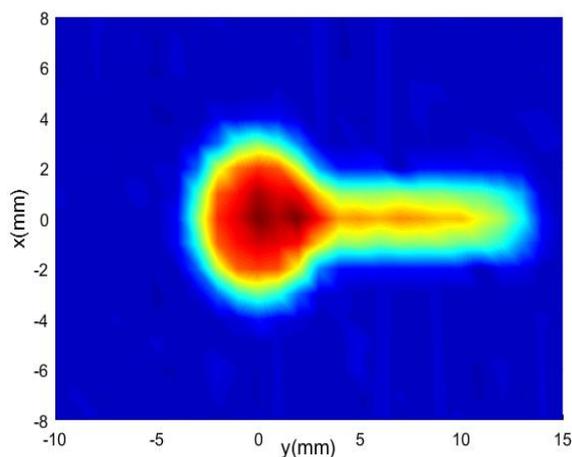


Fig. IV. 25. C-scan du défaut pour L= 10mm.

### IV.II.2. Variation de la largeur du défaut

La troisième simulation est relative à la variation de l'épaisseur du défaut pour une longueur et une profondeur fixe de 7.5 mm et 100% d respectivement. La figure (IV.26) montre les résultats numériques en fonction de la position de la bobine. Nous remarquons que plus l'ouverture de la fissure est grande plus le signal est important.

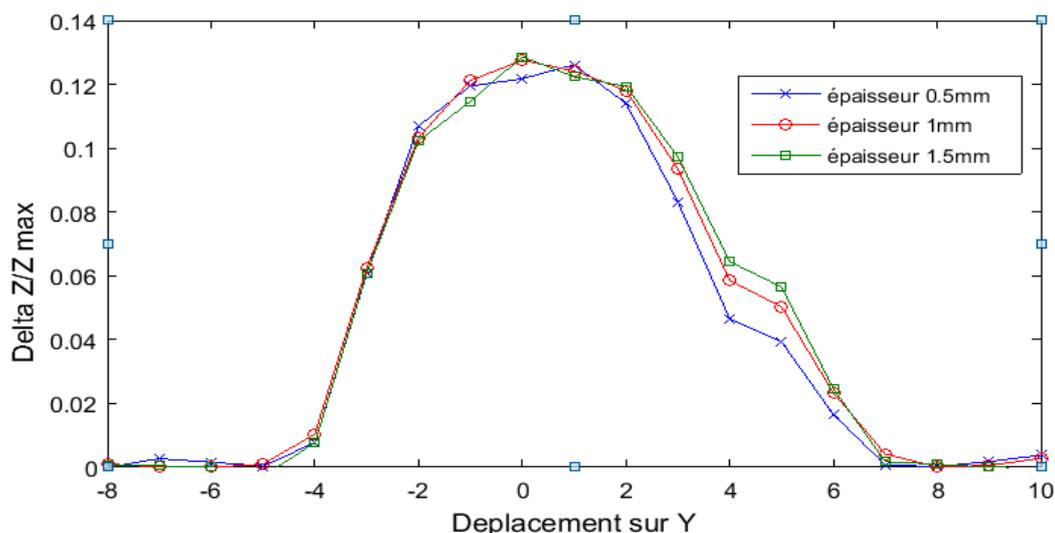
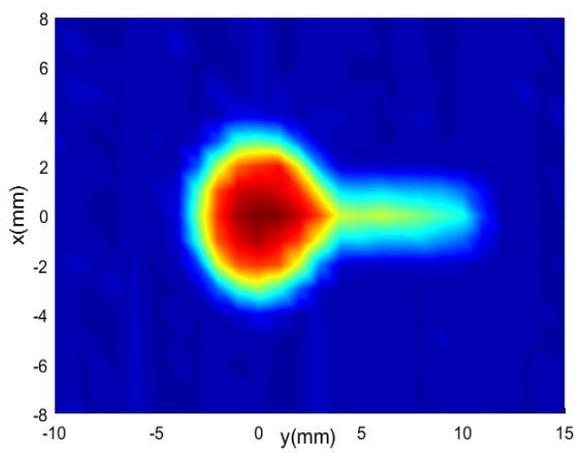
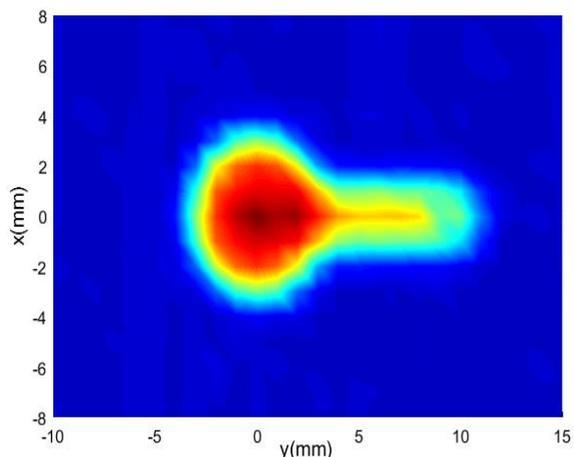
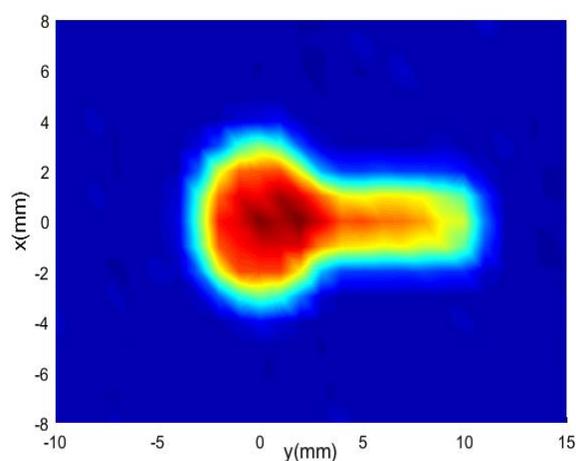


Fig. IV. 26. Variation de l'impédance en fonction de l'épaisseur du défaut.

Les images suivantes permettent la visualisation de la forme géométrique des différentes fissures. On voit que les images C-scan des différents défauts permettent facilement de les localiser et de les caractériser. Dans notre cas on constate clairement que la largeur de fissure varie d'une pièce à une autre.

Fig. IV. 27. C-scan du défaut pour  $e = 0.5\text{mm}$ .Fig. IV. 28. C-scan C-scan du défaut pour  $e = 1\text{mm}$ .Fig. IV. 29. C-scan du défaut pour  $e = 1.5\text{mm}$ .

### IV.II.3. Variation du lift-off

Pour mettre en évidence l'effet du lift-off sur la détection du défaut et la qualité de l'imagerie, nous avons réalisé une simulation d'une pièce avec une entaille de 7.5 mm de longueur et 0.5mm d'épaisseur, en faisant augmenter le lift-off à chaque fois un peu plus. Nous constatons que plus le lift-off est important plus l'impédance diminue.

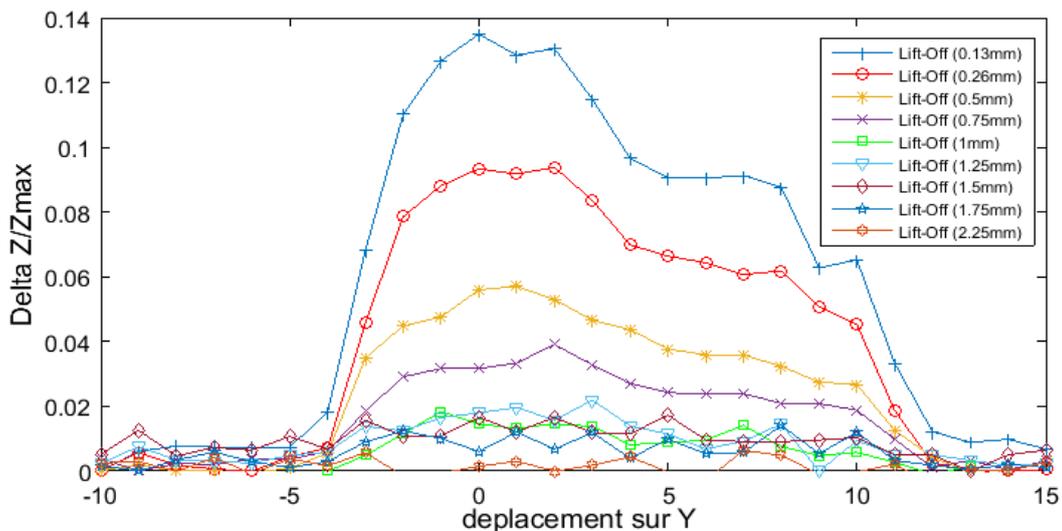


Fig. IV. 30. Variation de l'impédance en fonction du lift-off.

Les figures suivantes (IV.31, IV.32, IV.33, IV.34, IV.35, IV.36, IV.37, IV.38, IV.39) représentent les c-scans avec différents lift-off.

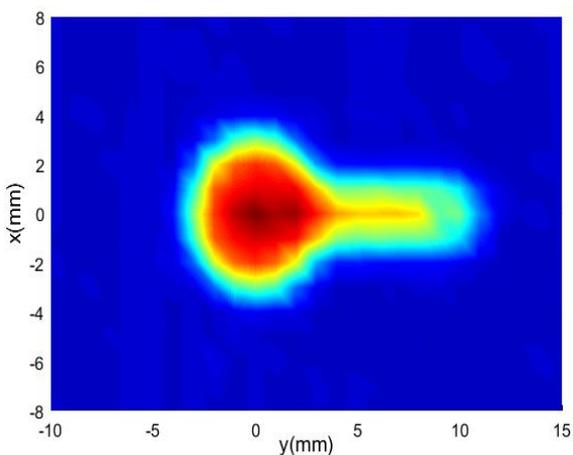


Fig. IV. 31. C-scan du défaut pour lift-off = 0.13mm.

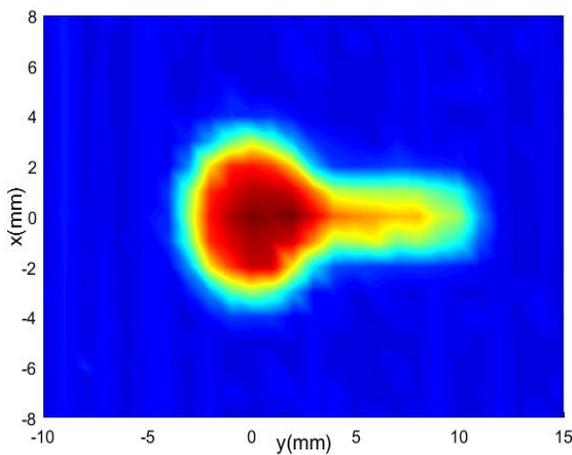


Fig. IV. 32. C-scan du défaut pour lift-off = 0.26mm.

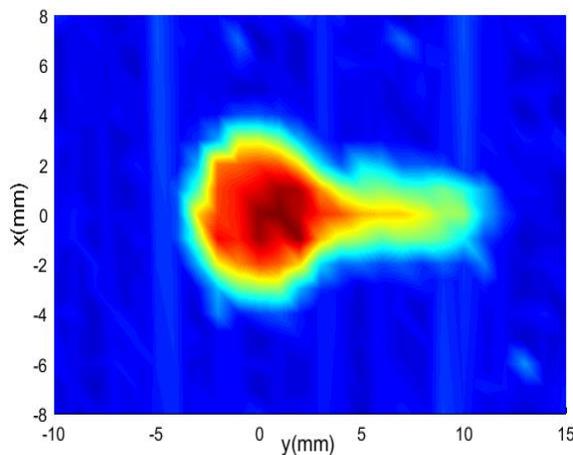


Fig. IV. 33. . C-scan du défaut pour lift-off = 0.5mm.

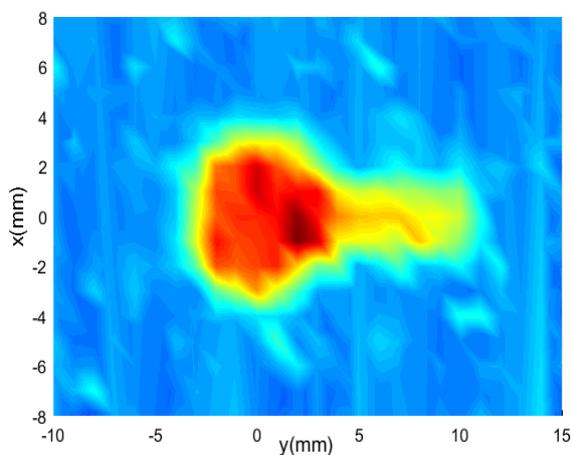


Fig. IV. 34. . C-scan du défaut pour lift-off = 0.75mm.

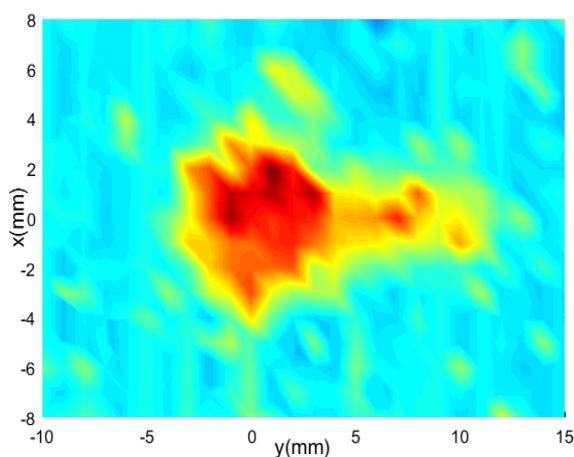


Fig. IV. 35. . C-scan du défaut pour lift-off = 1mm.

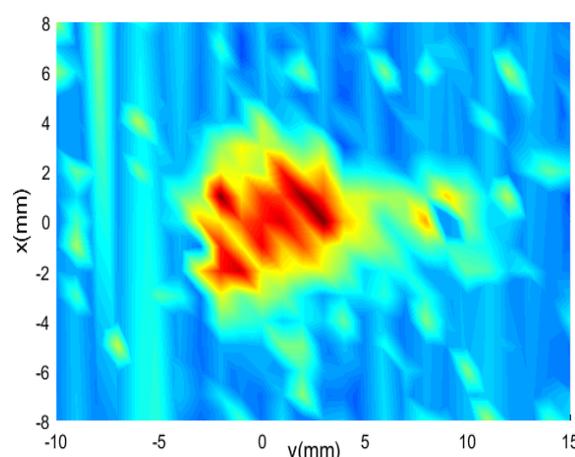


Fig. IV. 36. . C-scan du défaut pour lift-off = 1.25mm.

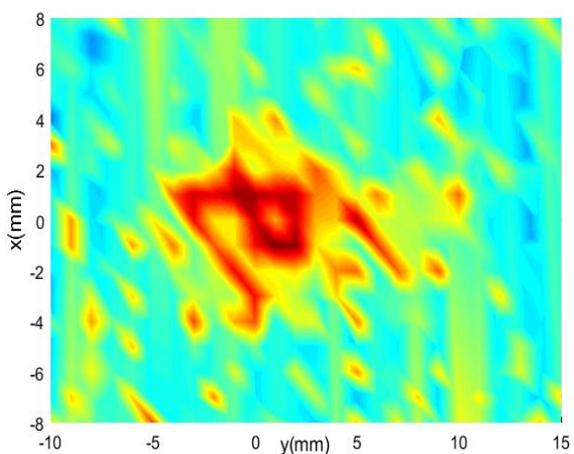


Fig. IV. 37. . C-scan du défaut pour lift-off = 1.5mm.

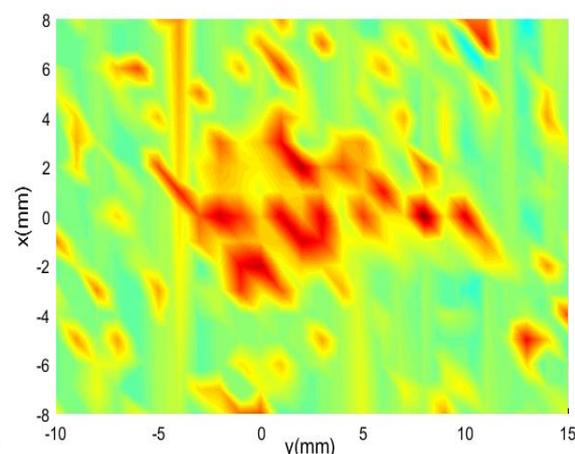


Fig. IV. 38. . C-scan du défaut pour lift-off = 1.75mm.

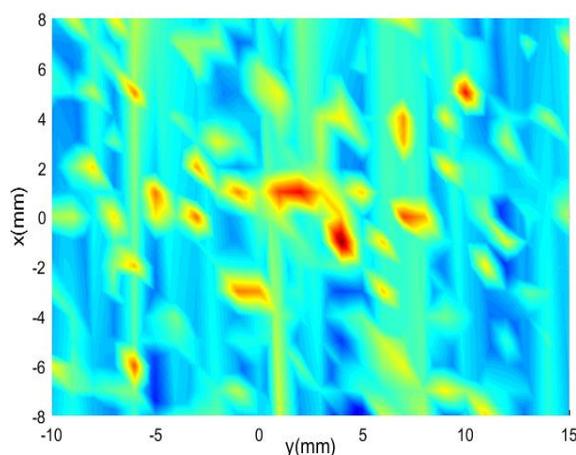


Fig. IV. 39. . C-scan du défaut pour lift-off = 2.25mm.

Les résultats obtenus montrent clairement que la qualité de la détection devient de moins en moins bonne en augmentant le lift-off. Ceci peut être expliqué par la perte du couplage électromagnétique en éloignant le capteur de la pièce.

### IV.II.4. Variation de la profondeur

Pour une fréquence de 50Khz, une longueur de 7.5mm et une épaisseur de 0.5mm, nous allons changer la profondeur du défaut radial (10%,20%,30%,50%,70%,100%) et étudier l'effet de cette variation.

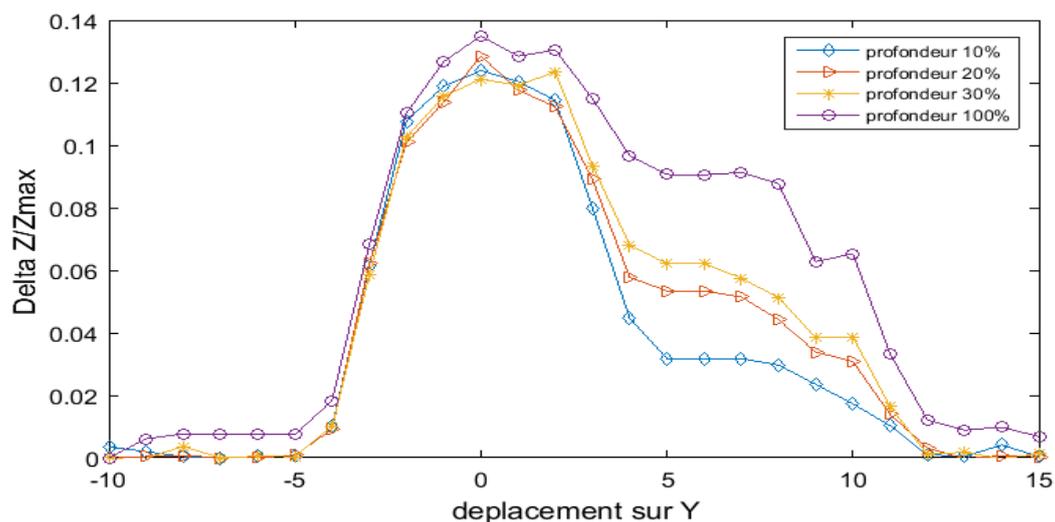


Fig. IV. 40. Variation de la profondeur du défaut.

Les figures (IV.40, IV.42, IV.43, IV.44) représentent les cartographies de l'impédance en fonction de la profondeur du défaut (10%*d*,20%*d*,30%*d*,100%*d*). Nous constatons que plus le défaut est profond, meilleur est la qualité de détection.

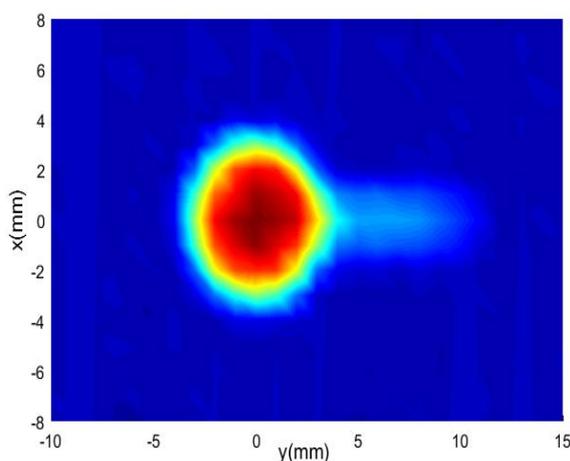


Fig. IV. 41. C-scan du défaut pour P=10%.

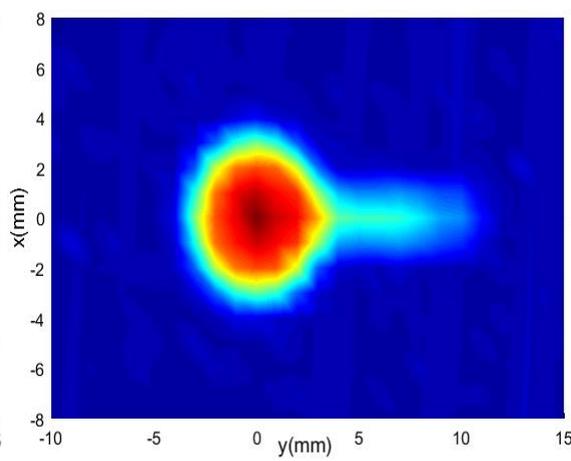


Fig. IV. 42. C-scan du défaut pour P=20%.

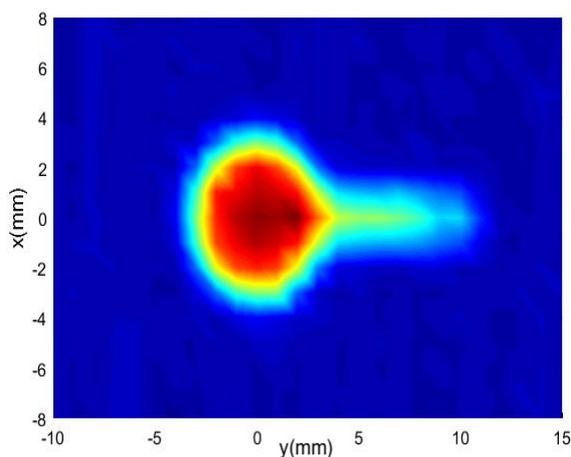


Fig. IV. 43. C-scan du défaut pour P=30%.

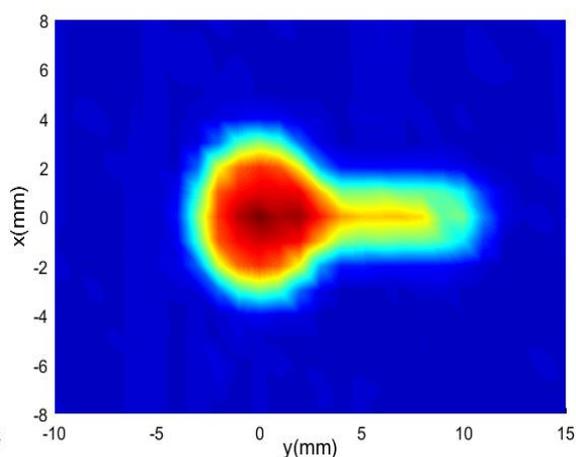


Fig. IV. 44. C-scan du défaut pour P=100%.

### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés tour à tour à l'étude d'un système de CND-CF composé d'un capteur et une plaque avec défaut. Ce système a été étudié afin de valider la méthode de détermination de l'impédance du capteur à travers le calcul de l'énergie magnétique, puis nous avons entamé une série de simulations en mode C-Scan sur une pièce critique de l'avion L-382/C-130.

Les résultats et les images obtenus démontrent la capacité de la méthode d'imagerie par courants de Foucault à estimer avec une bonne précision et quantitativement les différents défauts dans la pièce inspectée. Les images en mode C-scan révèlent directement l'emplacement et la forme du défaut dans la pièce.

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit présente la modélisation numérique d'un système d'imagerie par courants de Foucault des zones rivetées dans les pièces aéronautiques. Nous nous sommes basées sur la conception assistée par ordinateur afin de réaliser un système « capteur/pièces avec défauts » et montrer l'influence de différents paramètres physiques sur la réponse du capteur à courants de Foucault.

Avant d'aborder les objectifs de cette étude, nous avons jugé utile, à travers une recherche bibliographique, de rappeler et de synthétiser les éléments constituant les dispositifs du CND-CF, et les grandeurs électriques mesurables.

Par la suite, nous avons opté pour une modélisation numérique du système moyennant les équations de Maxwell et la formulation  $\vec{T}-\Phi$ . Parmi les méthodes de résolution des équations à dérivées partielles qui régissent le système, on a choisi la méthode numérique des éléments finis qui s'adapte bien à ce type de problème. Grâce à sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes, cette méthode occupe une place importante dans le cadre des techniques de modélisation utilisées dans le CND par CF.

Dans ce cadre, deux applications ont été étudiées et mises en œuvre. La première est une validation des résultats numériques obtenus à partir d'une configuration comprenant une plaque conductrice avec défaut et une bobine à air. La validation a été faite en comparant les résultats numériques obtenus pour différents paramètres du système aux résultats expérimentaux trouvés dans la littérature. La deuxième, concerne l'application de l'imagerie par courants Foucault au CND d'une pièce rivetée représentant le support de la charnière de la porte du train d'atterrissage avant de l'avion militaire L-382/C-130. Les résultats de l'imagerie montrent la capacité de la technique à détecter les défauts et la possibilité de quantifier certains de leurs paramètres géométriques.

En termes de perspectives, nous proposons la réalisation et le développement d'un système expérimental de détection de défaut, compact et mobile. Un système qui peut servir comme outil portable pour la maintenance.

# Bibliographie

- [1] Documentation interne de la base de maintenance d'Air Algérie.
- [2] M. Hamel, « Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques », mémoire magister, Tizi-Ouzou, 2012.
- [3] B. Ramdane, « Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision », thèse de doctorat, Saint Nazaire, 2009.
- [4] J. Dumont-Fillon, « contrôle non destructive (CND) », Technique de l'ingénieur, R1400, 2003.
- [5] C. Zourni « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction », thèse doctorat, 2012.
- [6] D. Abla, E. Berthelot, Y. Le Bihan, L. Daniel, « Caractérisation non destructive par courants de Foucault de l'état de contraintes dans les matériaux magnétiques », Symposium de Génie Électrique, Cachan, 2014.
- [7] B. Delabre, « Développement de capteurs flexible à courants de Foucault : applications a la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique », thèse de doctorat, Paris, 2016.
- [8] C. Thanh Long, « évaluation non-destructive quantitative de structures aéronautiques par la méthode des courants de Foucault », thèse de doctorat, Paris ,2012.
- [9] Y. Diraison, « Imagerie a courants de Foucault pour l'évaluation non-destructive de structure rivetées aéronautiques », thèse de doctorat, Paris,2008.
- [10] E. Ghdamsi, M Taleb, « Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur », mémoire de master, Ouargla, 2012.
- [11] Y. Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », thèse doctorat, paris, 2009.
- [12] J. Dumont-Fillon, « Contrôle non destructif (CND) », techniques de l'ingénieur R1400,1996, pp. (1-42).
- [13] M. Wanin, « Evaluation non destructive de la qualité des matériaux partie 1 », et Partie 2, techniques de l'ingénieur R4130 et R4132, 1996, pp. (1-26 et 1-16).
- [14] M. Lacroix, « Essais non destructifs », techniques de l'ingénieur M110 et M111, Juillet 1996, pp. (1-21 et 1-17).

- [15] P. Mix, « Introduction to nondestructive testing », A Training Guide, Second Edition, Wiley interscience, United States of America, 2005.
- [16] A. Dahia, E. Berthelot, Y. Le Bihan, L. Daniel, Caractérisation non destructive par courants de Foucault de l'état de contraintes dans les matériaux magnétiques, symposium de génie électrique, Paris, 2014.
- [17] V. Thomas, « Système multi-capteurs et traitement des signaux associés pour l'imagerie par courants de Foucault de pièces aéronautique », thèse doctorat, Paris, 2010.
- [18] V. Doirat, « Contribution à la modélisation de système de Contrôles non destructifs par courants de Foucault, application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique », thèse doctorat, Nantes, 2007.
- [19] H. Gareh, « Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques par la Méthode des Volumes Finis », mémoire de master, Biskra, 2013.
- [20] N. Oukacine, « Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive », mémoire magister, Tizi-Ouzou, 2012.
- [21] B. HALIFA, « Simulation par éléments finis de la mesure par courants de Foucault des fissures débouchantes dans les matériaux conducteurs », thèse doctorat, Alger, 2012.
- [22] Y. LE FLOCH, « Développement de formulations 3D éléments finis  $\vec{T} - \Phi$  pour la prise en compte de conducteurs massifs et bobinés avec un couplage circuit », thèse doctorat, Rennes, 2002.
- [23] M. Hamel, « étude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive », thèse de doctorat, Tizi-Ouzou, 2018.
- [24] P. Testoni, « Implementation in the ANSYS finite element code of the electric vector potential  $\vec{T} - \Phi$ ,  $\Phi$  formulation and its validation with magnetic vector potential  $\vec{A} - V$ ,  $\vec{A}$  formulation », thèse de doctorat, Cagliari, 2003.
- [25] J. Martinos, T. Theodoulidis, N. Poulakis and A. Tamburrino, « A benchmark problem for eddy current nondestructive evaluation », IEEE trans. Magn, vol 50, 7026104, 2004.

## Résumé

Le vieillissement du parc aéronautique, mais aussi la volonté de prolonger le cycle de vie des appareils, impose aux techniques de maintenance des exigences de contrôle accrues en termes de fiabilité et de rapidité. Les principaux enjeux étant la détection, et surtout la caractérisation des fissures pouvant apparaître dans les pièces sensibles des appareils.

Ce manuscrit présente une modélisation numérique par éléments finis d'un système d'imagerie par courants de Foucault. Cette modélisation, ici appliquée à l'imagerie de défauts de type fissure pouvant apparaître dans les rivets d'assemblage des fuselages d'avions. Le système est simulé sous l'environnement Ansys-Maxwell et les résultats obtenus permettant effectivement de mettre en évidence les défauts de type fissure recherchés dans la pièce inspectée.

**Mots-clés :** Contrôle non destructif, courants de Foucault, formulation  $\vec{T} - \Phi$ , imagerie, méthode des éléments finis.

## Abstract

The aging of the aeronautical fleet, but also the desire to extend the life cycle of aircraft, imposes on maintenance techniques increased control requirements in terms of reliability and speed. The main challenges are the detection, and especially the characterization of cracks that may appear in sensitive parts of devices.

This manuscript presents a numerical modeling by finite element of an eddy current imaging system. This modeling is applied to the imaging of crack defects that can appear in the assembly rivets of aircraft fuselages. The system is simulated under the Ansys-Maxwell environment and the results obtained effectively highlight the desired crack defects in the inspected part.

**Key words:** Eddy currents, imaging, nondestructive testing, finite element method,  $\vec{T} - \Phi$  formulation.

