

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Génie Electrique

Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de

Doctorat en science en : Génie électrique
Spécialité (Option) : Electrotechnique.

**Modélisation en Volumes Finis de CND des
Matériaux Faiblement Conducteurs par Courants
de Foucault et de Déplacement.**

Présentée par :

Ala Eddine Lakhdari

Soutenue publiquement le 27 / 10 / 2019

Devant le jury composé de :

Salah Eddine Zouzou	Professeur	Président	Université de Biskra
Ahmed Cheriet	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Mouloud Feliachi	Professeur	Co-Rapporteur	IUT de Saint Nazaire France
Souri Mohamed Mimoune	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Samir Bensaid	Professeur	Examineur	Université de Bouira
Bachir Helifa	MC.A	Examineur	Université de Laghouat

Liste des travaux liés à ce travail de thèse

Publications Internationales

Lakhdari, A. E., Cheriet, A., & Feliachi, M. (2018). 3D-FVM anisotropic model for eddy current problems related to composite materials. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 33(4), 438-450.

Lakhdari, A. E., Cheriet, A., & El-Ghoul, I. N. (2019). Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. *IET Science, Measurement & Technology*, 13(2), 255-259.

Conférences Internationales

Lakhdari, A. E., Cheriet, A., Lamamra, B., Bellouti, B., Bensaïd, S., & El Ghou, I. N. (2018, Octobre). Gap Estimation of Disbanding Failure Appears in Hybrid Laminate Material by Means of an Eddy Current Evaluation. *3^{ème} Conférence internationale en sciences et technologies électrique au Maghreb (CISTEM'18)* (pp. 1-5). IEEE., Alger, Algérie.

Lakhdari, A. E., Cheriet, A., Lamamra, B., Achour, T., Hamadi, B., & Boucherma, D. (2018, Novembre). Numerical analysis of eddy current distribution in laminated CFRP materials. *6^{ème} Conférence internationale sur le soudage, le contrôle non destructif et l'industrie des matériaux (IC-WNDT-MI'18)*, Skikda, Algérie.

Lakhdari, A. E., Cheriet, A., Feliachi, M., & El Ghoul, I. N., (2013, Décembre). 3D-FVM Skin Effect Model For Hidden Crack Position Evaluation. *5^{ème} conférence internationale en électrotechniques (ICEL'13)*, Oran, Algérie.

Conférences nationales

Lakhdari, A. E., Cheriet, A., El Ghoul, I. N., & Mabrouk, A. E. (2013, Avril). Estimation de la position d'une fissure enfouie par capteur inductif différentiel. *3^{ème} Colloque sur l'inductique (OI'03)*, Tizi-Ouzou, Algérie.

Remerciement

Ce travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire de Génie Electrique (LGEB) de l'Université de Biskra ALGERIE et en collaboration avec l'Institut de Recherche en Electronique et Electrotechnique de Nantes Atlantique (IREENA) de Saint-Nazaire FRANCE.

En premier lieu, je tiens à remercier et exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur **Ahmed CHERIET**, Professeur à l'Université de Biskra, à mon co-directeur de thèse, Monsieur **Mouloud FELIACHI**, Professeur à l'Université de Nantes, pour m'avoir acceptés de diriger les travaux de recherche et pour leurs précieux conseils qui m'entraînent systématiquement vers le haut. Egalement, je souhaite ici saluer leurs patiences, leurs qualités humaines qui sont autant à louer que leurs nombreuses compétences scientifiques. Ce fut un réel honneur de travailler avec vous.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements aux membres du jury, Monsieur **Salah Eddine ZOZOU**, Professeur à l'Université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma thèse. Monsieur **Souri Mohamed MIMOUNE**, Professeur à l'Université de Biskra, pour avoir accepté de juger ce travail. Monsieur **Samir BENSAID**, Professeur à l'Université de Bouira, pour avoir accepté de juger ma thèse, et également ses conseils avisés et Monsieur **Bachir HELIFA**, Professeur à l'Université de Laghouat, pour avoir accepté de participer à mon jury.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres des laboratoires LGEB et LMSE. Egalement à l'ensemble du personnel du département de génie électrique de l'université de Biskra. Je tiens à remercier particulièrement Madame **Meriem SAADI**, secrétaire du laboratoire LGEB, pour sa serviabilité et ses encouragements. Et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, je souhaite également remercier ma famille pour le soutien qu'ils m'ont apporté et je ne désespère pas de réussir un jour à leur faire comprendre en quoi consiste ma thèse.

Dédicaces

A mes parents qui m'ont fait connaître le monde,

A ma femme, A mes enfants, A ma sœur,

A tous les membres de ma famille,

A mes amis et mes collègues

..... .

Table des matières

Liste des figures	9
Liste des tableaux	12
Introduction générale	14
Chapitre I: Généralité sur les matériaux composites	
I.1 Introduction	19
I.2 Matériaux composites	20
I.3 Renfort	20
I.3.1 Composite à particules	21
I.3.2 Composite à fibres	22
I.3.2.1 Les fibres courtes	22
I.3.2.2 Les fibres longues	22
I.4 La matrice	27
I.4.1 Matrices organiques	27
I.4.1.1 Matrice thermoplastique (TP)	28
I.4.1.2 Matrice thermodurcissable (TD)	29
I.4.2 Matrices métalliques	30
I.4.3 Matrices céramiques	30
I.5 Architecture structurelle des matériaux composites	30
I.5.1 Les monocouches	30
I.5.2 Les stratifiés	31
I.5.3 Les sandwiches	33
I.6 Endommagement des composites stratifiés à fibres longues	33
I.6.1 Décohésions fibre-matrice	34
I.6.2 Porosité	35
I.6.3 Rupture de fibres	36
I.6.4 Fissuration matricielle	37
I.6.5 Délaminage	37
I.7 Méthodes de détection de l'endommagement	38
I.7.1 Emission acoustique	40
I.7.2 Ultrasons	41
I.7.3 Séarographie	42
I.7.4 Radiographie et tomographie	43
I.7.5 Thermographie infrarouge	45
I.7.6 Auto-détection par la résistance électrique	47
I.7.7 Courants de Foucault	48
I.8 Applicabilité des méthodes de CND	50
I.9 Conclusion	52

Chapitre II: Contrôle & Evaluation par courants de Foucault

II.1	Introduction	54
II.2	Bref Historique de CND-CF	54
II.3	Principe du CND-CF	55
II.4	Densité et profondeur de pénétration de CF	57
II.4.1	Densité de CF	57
II.4.2	Profondeur de pénétration standard	58
II.5	Indicateurs exploitables en CND-CF	59
II.6	Capteurs inductifs	61
II.6.1	Configurations de capteurs	62
II.6.1.1	Capteur à double fonctions	62
II.6.1.2	Capteur à fonctions séparées	63
II.6.1.3	Capteur à fonctions différentielles	64
II.6.2	Types de bobines	65
II.6.2.1	Bobine classique	65
II.6.2.2	Bobine gravée (imprimée)	66
II.6.3	Impédance du capteur	66
II.6.3.1	Impédance normalisée	68
II.6.4	Signaux d'excitation du capteur	70
II.6.4.1	Excitation mono-fréquence	70
II.6.4.2	Excitation multifréquences	70
II.6.4.3	Excitation pulsée	71
II.7	Capteurs magnétiques	72
II.7.1	Dispositif supraconducteur à interférence quantique (SQUID)	73
II.7.2	Le fluxgate	74
II.7.3	Effet Hall	74
II.7.4	Magnétorésistance anisotrope (AMR)	74
II.7.5	Magnétorésistance géante (GMR)	75
II.7.6	Magnéto-impédance géante (GMI)	75
II.8	Conclusion	76

Chapitre III: Modélisation et formulation mathématique de problème électromagnétique

III.1	Introduction	78
III.2	Description du problème de CND-CF	78
III.2.1	Les équations de Maxwell	79
III.2.2	Conditions de passage	81
III.2.3	Conditions aux limites	82
III.2.4	Simplification des équations	83
III.3	Formulation électromagnétique	83
III.3.1	Formulation A-V	84
III.4	Tenseurs de propriétés électriques d'un stratifié anisotrope	87
III.5	Mise en œuvre de la MVF	90
III.5.1	Modélisation numérique 3D	91
III.5.2	Développement de $-\nu_0 \oint_S \nabla \mathbf{A} \, ds$	92

III.5.3 Développement de $j\omega \iiint_{PE_p} [\tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] dv^*$	94
III.5.4 Développement du terme de source $\iiint_{PE_p} \mathbf{J}_s dv^*$	95
III.5.5 Développement de $-j\omega \oiint_s \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v) \mathbf{ds}$	95
III.5.5.1 Développement du sous terme ψ_1	95
III.5.5.2 Développement du sous terme ψ_2	97
III.5.6 Système algébrique final	97
III.6 Conclusion	98
Chapitre IV: Mise en applications et validations	
IV.1 Introduction	100
IV.2 Organigramme du code de calcul	100
IV.3 Modélisation de CFRP stratifié	102
IV.3.1 Description du problème	102
IV.3.2 Résultats et discussions	103
IV.4 Validation expérimentale du code de calcul	105
IV.4.1 Matériau à faible taux d'anisotropie (Al-B)	105
IV.4.1.1 Description du problème	105
IV.4.1.2 Résultats et discussions	106
IV.4.2 Matériau à fort taux d'anisotropie (CFRP)	110
IV.4.2.1 Description du problème	110
IV.4.2.2 Résultats et discussions	112
IV.4.3 Evaluation du défaut de délaminage	116
IV.4.3.1 Description du problème	116
IV.4.3.2 Résultats et discussions	117
IV.5 Conclusion	122
Conclusion générale	125
Annexes	
A. La méthode MVF-Hexaédrique liée aux milieux anisotropes	128
B. Application du modèle 3D-MVF-HEXA	132
Bibliographie	136

Liste des figures

1. Evolution de l'usage des matériaux composite dans les avions.	14
1.1. La répartition des matériaux sur le Boeing 787.	19
1.2. Différentes natures de renfort.	21
1.3. Les types de composites selon la géométrie du renfort.	21
1.4. Diamètre de fibre carbone devant le cheveu humain.	24
1.5. Différentes familles de matrices.	27
1.6. Schéma structurale des polymères plastiques.	28
1.7. Matériaux composites monocouches.	31
1.8. Matériau composite stratifié.	31
1.9. Exemple de séquence d'empilement d'un stratifié.	32
1.10. Exemple d'un stratifié hybride (Aluminium (Al)/Carbone fibre renforcé époxy (CFRP)).	32
1.11. Matériau composite en structure sandwich.	33
1.12. Dégât de ruine d'une structure composite d'un hélicoptère.	33
1.13. Schématisation de différents endommagements dans les composites stratifiés.	34
1.14. Décohésion fibre/matrice.	35
1.15. Image tomodensitométrie sur la présence de la porosité (0.9%).	36
1.16. Rupture de fibres.	36
1.17. Fissuration matricielle.	37
1.18. Délaminage survenu par la fissuration matricielle.	38
1.19. Principe du CND.	39
1.20. Principe de la méthode d'émission acoustique.	40
1.21. Principe du contrôle ultrasons.	42
1.22. Système de contrôle par séarographie.	42
1.23. Principe de contrôle radiographie et tomographie.	44
1.24. Principe d'acquisition de la thermographie infrarouge passive.	45
1.25. La thermographie infrarouge active.	46
1.26. Estimation dimensionnelle de délaminage du stratifié à fibre de carbone par la méthode de la résistance électrique.	48

1.27. Principe du contrôle par courants de Foucault.	49
2.1. Principe de base du CND-CF.	56
2.2. Distribution et perturbation des courants de Foucault.	56
2.3. Répartition des courants de Foucault dans le matériau.	57
2.4. Capteurs inductifs.	61
2.5. Capteur à double fonctions.	63
2.6. Présentation schématisée.	64
2.7. Capteur à fonction différentielle.	65
2.8. Bobine classique plate à fil de cuivre.	65
2.9. Multi-bobines gravées.	66
2.10. Circuit équivalent du système de CND-CF.	67
2.11. Plan d'impédance normalisée.	69
2.12. Excitation multifréquence.	71
2.13. Excitation pulsée.	72
3.1. Représentation schématique du problème étudié.	79
3.2. Interface entre deux milieux.	82
3.3. Représentation schématisée d'un plan de symétrie.	86
3.4. Référentiels fixe et lié aux fibres.	88
3.5. Maillage non structuré du problème d'étude de CND-CF.	91
3.6. Description 3D de l'élément de prisme.	92
3.6. Projection de deux nœuds adjacents sur les plans xy et xz.	93
3.7. Schématisation des nœuds fictifs.	94
3.8. Schématisation du nœud fictif sur la facette.	96
4.1. Organigramme du processus de calcul.	101
4.2. Présentation schématisée du problème de test.	103
4.3. Densité et distribution des courants induits dans le CFRP stratifié.	104
4.4. Schématisation du problème de CND-CF de composite Al-B.	106
4.5. Variation de la Réactance à vide (X_0) et l'impédance normalisée (Z_n) en fonction de la fréquence (Al-B).	107
4.6. Variation de la résistance (R_n) et la réactance normalisées (X_n) en fonction de la fréquence (Al-B).	107
4.7. Erreur et temps de calcul en charge (Al-B).	109
4.8. Convergence du calcul à vide en fréquence 10^4 Hz (Al-B).	109

4.9. Distribution de la partie réelle des courants induits à la fréquence 10 ⁴ Hz (Al-B).	110
4.10. Montage réalisé au laboratoire.	111
4.11. Variation de la Réactance à vide (X ₀) et l'impédance normalisée(Z _n) en fonction de la fréquence (CFRP).	112
4.12. Variation de la résistance (R _n) et la réactance normalisées (X _n) en fonction de la fréquence (CFRP).	113
4.13. Erreur et temps de calcul en charge (CFRP).	114
4.14. Convergence du calcul à vide pour une fréquence de 10 ⁴ Hz.	114
4.15. Distribution de la partie réelle des courants induits à la fréquence 10 ⁴ Hz.	115
4.16. Description du problème traité.	116
4.17. Maillage du domaine numérique.	118
4.18. Variation de la résistance (R _n) et la réactance normalisées (X _n) en fonction de la fréquence (CARAAL).	118
4.19. Résultats expérimentaux : Partie réelle (ΔR*) et imaginaire (ΔX*) de la variation de l'impédance du capteur en fonction de la fréquence (CARAAL).	119
4.20. Organigramme du problème inverse.	121
4.21. Convergence de la fonction objective (F _c) à la fréquence 22 kHz.	122
A.1. Volume élémentaire hexaédrique (D _p).	128
A.2. Projection de l'élément D _p sur les plans.	130
B.1. Densité de la partie réelle des courants de Foucault à la fréquence 1MHz, $\bar{\sigma} = [\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 9 \cdot 10^4]$ (S/m).	133
B.2. Distribution des courants de Foucault à la fréquence 1 MHz, $\bar{\sigma} = [\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 9 \cdot 10^4]$ (S/m).	133
B.3. Densité de la partie réelle des courants de Foucault à la fréquence 1MHz, $\bar{\sigma} = [\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 10^2]$ (S/m).	134
B.4. Densité des courants de Foucault à la fréquence 1 MHz, $\bar{\sigma} = [\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 10^2]$ (S/m).	134

Liste des tableaux

1.1. Propriétés des fibres clés de renforcement.	23
1.2. Propriétés des fibres de carbone PAN-T300 et Pitch-P55.	25
1.3. Applicabilité des méthodes de CND pour la caractérisation d'endommagement.	51
2.1. Spécification de différents capteurs de CND-CF.	60
4.1. Dimensions du problème.	102
4.2. Paramètres géométriques et physiques de CND-CF (Al-B).	106
4.3. Caractéristiques géométriques et physiques de CND-CF (CFRP).	111
4.4. Caractéristiques géométriques et physiques de CND-CF (CARAAL).	117
4.5. Récapitulatif des résultats.	121

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la recherche et du développement de modèles numériques tridimensionnels (3D) précis et rapides adaptés aux problèmes de contrôle et de caractérisation non destructive par les courants de Foucault des matériaux composites. Cependant, le développement d'un modèle numérique, par conséquent, un code de calcul ne peut pas être effectué sans une compréhension approfondie du matériau, leur comportement électromagnétique, ainsi que la nature des différents défauts qui peuvent apparaître.

Dans la littérature, un matériau composite a pris son nom par leur définition, c.-à-d., il est le résultat de la composition d'au moins deux constituants distincts ayant des propriétés physiques différentes afin d'obtenir des performances souhaitées. Sinon, il serait impossible de les obtenir séparément pour chacun de ces constituants. Grâce aux nombreux avantages offerts par cette famille de matériaux par rapport aux matériaux classiques, tels que la facilité de mise en forme, une faible sensibilité à la corrosion et à la fatigue et une résistance élevée par rapport au poids. Par conséquent, ces matériaux ont montré un grand potentiel dans les secteurs stratégiques d'industrie, notamment l'aéronautique. La progression de leurs usages dans la conception et la fabrication des avions, est clairement apparue dans ces dernières années, comme le montre la FIGURE 1.

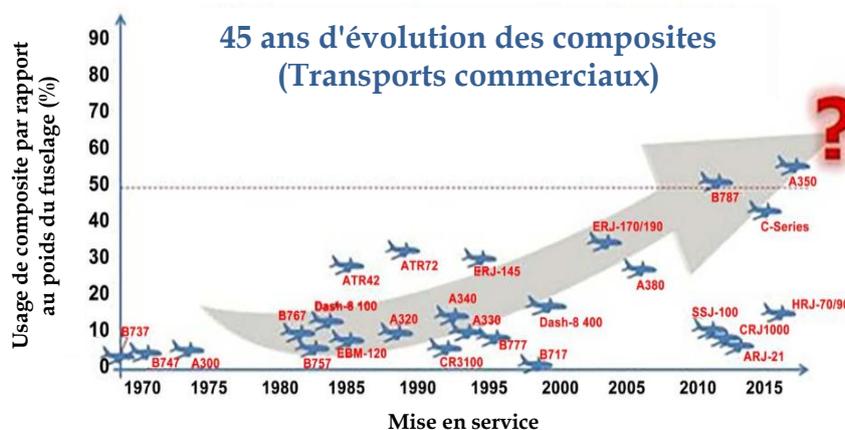


FIGURE 1. Evolution de l'usage des matériaux composite dans les avions [1].

Compte tenu de l'importance des matériaux composites dans l'industrie, cependant, il est indispensable de contrôler leurs dommages, qui peuvent être causés par la surcharge mécanique et/ou le vieillissement des matériaux. De ce fait, il existe une grande variété de méthodes de contrôle non destructif qui peuvent être adaptées à ce type de matériaux.

De nombreux chercheurs préfèrent de solliciter la méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF), en raison de leurs avantages, tels que l'efficacité, la simplicité et l'intérêt en terme de coût de l'opération. En outre, la maîtrise et l'analyse précise de la fiabilité de la méthode de CND-CF nécessitent de faire appel à la modélisation numérique.

À cet effet, la modélisation numérique des problèmes de CND-CF relatifs aux matériaux composites est un outil indispensable pour leurs caractérisation, ainsi que, pour prédire, classifier et évaluer les dommages qui peuvent être y apparaissent. Dans ce contexte, il existe plusieurs méthodes de modélisation numérique afin de développer un modèle pertinent pour les problèmes en questions. La méthode la plus connue est la méthode des éléments finis (MEF), elle montre leur fiabilité en termes de précision du calcul. Néanmoins, il existe d'autres méthodes offrant une précision très raisonnable dont les coûts de calcul est considérablement réduits, tels que la méthode des volumes finis (MVF). Cette méthode est largement utilisée pour résoudre les problèmes d'ingénieries, elle a montré son efficacité en tant qu'outil de simulation puissant pour les problèmes fondés sur les lois de conservation. Comparé à d'autres méthodes numériques, ses principaux avantages sont la simplicité, la rapidité et nécessitent une mémoire de stockage réduite. De ce fait, Nous cherchons alors à développer un modèle numérique 3D basé sur la méthode MVF qui est capable de modéliser les problèmes de CND-CF liés aux matériaux composites anisotropes, tout en préservant la fiabilité de simulation en termes de précision et temps de calcul.

Le travail de cette thèse est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, une brève étude bibliographique sur les matériaux composites dont leurs constituants, leurs architectures structurelles et les

mécanismes d'endommagement les plus connus dans les structures en composite, notamment à l'architecture structurelle stratifiant sera présentée. Compte tenu de la diversité de ces endommagements et afin de garantir la sécurité accrue des structures, il est évoqué de faire appel à des méthodes de contrôle non destructive. De ce fait, nous présenterons les méthodes de CND les plus couramment utilisées pour le diagnostic des structures en composite, ainsi que, ses applicabilités pour l'identification des dommages.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons un bref historique sur le contrôle non destructif par les courants de Foucault (CND-CF), ensuite leur principe de fonctionnement, la densité et la profondeur de pénétration des courants de Foucault, ainsi que les indicateurs qui peuvent être exploités en CND-CF. De plus, les capteurs adaptés au régime de fréquences élevées, à savoir les capteurs inductifs, ainsi que ses configurations possibles. Les types de bobines qui peuvent être utilisées en tant que capteur inductif. Nous présenterons aussi, les différents types de signaux d'excitation du capteur. Enfin une brève présentation sera faite au profit des capteurs adaptés aux mesures de faible densité des courants induits (régime de basse fréquence), ainsi que les types les plus couramment utilisés pour les problèmes de CND-CF.

Dans le troisième chapitre, nous formulerons un modèle magnétodynamique 3D en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique (A-V) par le rappel des lois fondamentales de l'électromagnétisme. Ce modèle, décrira le comportement électromagnétique des matériaux composites anisotropes liés aux problèmes de CND-CF. ensuite, la mise en œuvre de la méthode MVF afin de transformer les équations aux dérivés partielles (EDP's) à un système d'équations algébriques. Alors, le domaine numérique sera discrétisé en un grand nombre d'éléments dont la forme prisme est sollicitée. Par ailleurs, le système d'équations final (Modèle 3D-MVF anisotrope) sera implémenté sous une plateforme de programmation telle que l'environnement « Matlab » afin de développer un code de calcul qui sera peut être utilisé comme un outil pour l'étude des problèmes de CND-CF des composites anisotropes.

Le quatrième chapitre est consacré à la mise en application du code de calcul développé, par conséquent sa validation par des comparaisons expérimentales et numérique, afin de le créditer pour les futurs développements des logiciels multiphysiques basés sur la méthode MVF. De ce fait, nous commencerons par la modélisation du problème de CND-CF de composite stratifié multidirectionnel, dont les différentes orientations des fibres pour chaque pli sont prises en compte. Ensuite, une concurrence entre le maillage prisme et hexaédrique sera investigué, cette application consiste de modéliser du problème de CND-CF lié au composite unidirectionnel anisotrope, dont différents taux d'anisotropie sont prise en compte. Les résultats numériques sont comparés avec ceux obtenus par des expériences expérimentales. Enfin, un problème inverse sera traité par une expérience expérimentale. Ce problème consiste à estimer l'épaisseur de défaut de délaminage développé au sein d'une structure en composite stratifié hybride. Alors, le code de calcul développé sera couplé avec l'algorithme de simplex sous l'environnement « Matlab ».

Chapitre I. Généralité sur les matériaux composites

I.1	Introduction	19
I.2	Matériaux composites	20
I.3	Renfort	20
I.3.1	Composite à particules	21
I.3.2	Composite à fibres	22
I.3.2.1	<i>Les fibres courtes</i>	22
I.3.2.2	<i>Les fibres longues</i>	22
I.4	La matrice	27
I.4.1	Matrices organiques	27
I.4.1.1	<i>Matrice thermoplastique (TP)</i>	28
I.4.1.2	<i>Matrice thermodurcissable (TD)</i>	29
I.4.2	Matrices métalliques	30
I.4.3	Matrices céramiques	30
I.5	Architecture structurelle des matériaux composites	30
I.5.1	Les monocouches	30
I.5.2	Les stratifiés	31
I.5.3	Les sandwichs	33
I.6	Endommagement des composites stratifiés à fibres longues	33
I.6.1	Décohésions fibre-matrice	34
I.6.2	Porosité	35
I.6.3	Rupture de fibres	36
I.6.4	Fissuration matricielle	37
I.6.5	Délaminage	37
I.7	Méthodes de détection de l'endommagement	38
I.7.1	Emission acoustique	40
I.7.2	Ultrasons	41
I.7.3	Séarographie	42
I.7.4	Radiographie et tomographie	43
I.7.5	Thermographie infrarouge	45
I.7.6	Auto-détection par la résistance électrique	47
I.7.7	Courants de Foucault	48
I.8	Applicabilité des méthodes de CND	50
I.9	Conclusion	52

I.1 Introduction

Les matériaux composites sont largement utilisés dans différents secteurs industriels. Grâce aux nombreux avantages offerts par cette famille de matériaux par rapport aux matériaux classiques, tels que la facilité de mise en forme, une faible sensibilité à la corrosion et à la fatigue et une résistance élevée par rapport au poids. Par conséquent, ces matériaux ont montré un grand potentiel dans les secteurs stratégiques d'industrie, à savoir l'aéronautique, l'automobile, etc. [2]. De plus, le principal avantage de l'utilisation de matériaux composites réside dans leur capacité à être adaptés aux exigences de conception. La structure peut être rendue plus rigide dans un sens et plus flexible dans un autre. Cela signifie que la structure peut être conçue pour être exactement aussi solide et rigide qu'elle doit être, ce qui permet d'améliorer le poids structurel, l'aéroélasticité et finalement le rendement énergétique [1]. La FIGURE 1.1. montre la répartition des matériaux sur le Boeing 787.

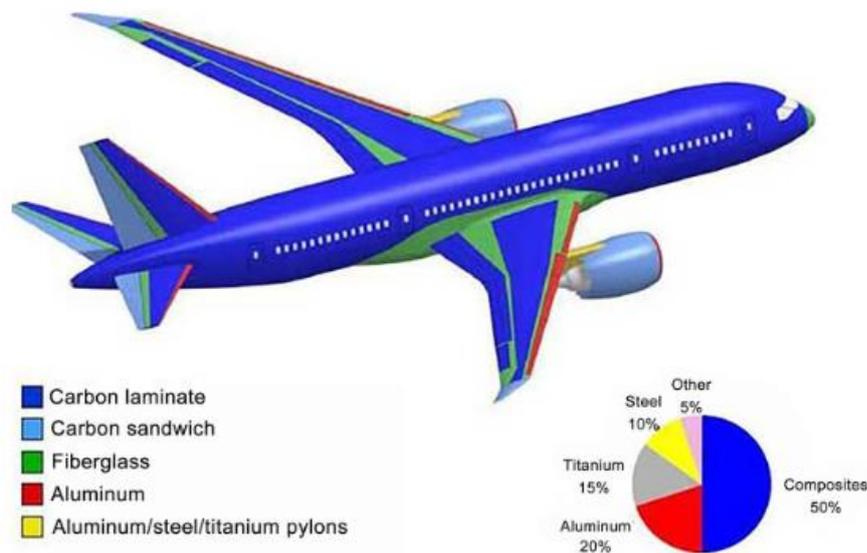


FIGURE 1.1. La répartition des matériaux sur le Boeing 787 [3]

Néanmoins, il y a quelques préoccupations limitent l'utilisation des composites à savoir : coût plus élevé, fabrication et usinage complexe, inspection des dommages, mécanisme de dommage complexe, etc. A cet égard, une brève présentation sur les constituants des matériaux composites et leurs architectures structurelles ainsi que les mécanismes d'endommagement les plus courants sera discutés. Ensuite, les principales méthodes de contrôle non destructif qui peuvent être appliquées aux matériaux composite, ainsi que ses applicabilités pour l'identification des dommages.

I.2 Matériaux composites

Dans la littérature, un matériau composite a pris son nom par leur définition, c.-à-d, il est le résultat de la composition (arrangement) d'au moins deux constituants distincts (immiscibles) ayant des propriétés physiques différentes afin d'obtenir des performances souhaitées [4]. Sinon, il serait impossible de les obtenir séparément pour chacun de ces constituants [5]. Souvent, ce matériau est formé par l'arrangement de renforts qui jouent le rôle d'une armature noyé dans une matrice qui assure la cohésion des fibres ainsi que la protection et la transmission des contraintes à l'armement [6]. Généralement, la classification des matériaux composites est basée sur leurs nature de matrice, tel que, les composites à matrice organique, minérale [7]. Ainsi que s'identifier selon la géométrie de renfort (filament ou particule) [8].

I.3 Renfort

Dans les structures en composite, les sollicitations des efforts mécaniques sont essentiellement soutenues par le renfort qui constituant le squelette de la structure [9]. Par conséquence, le renfort joue un rôle crucial dans les composites pour déterminer les performances finales du matériau synthétisé [10]. Souvent, il est de nature organique (ex. aramide) ou inorganique (ex. carbone), comme le montre la FIGURE 1.2.

Ainsi, de point de vue géométrique, il se trouve sous forme filamentaire (ou fibreuse) ou particulaire [11]. Dans ce contexte, trois types de composites peuvent

être distingués (FIGURE 1.3.), composite à particules, à fibres courtes et à fibres longues.

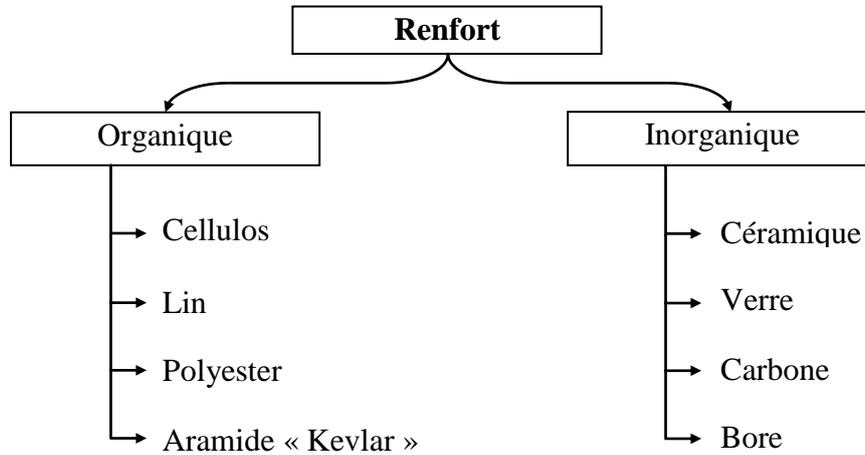


FIGURE 1.2. Différentes natures de renfort.

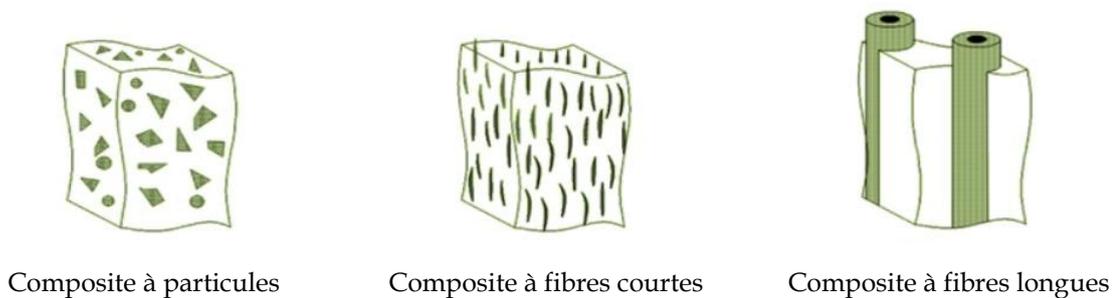


FIGURE 1.3. Les types de composites selon la géométrie du renfort [12]

I.3.1 Composite à particules

Les particules ne possèdent pas de dimension privilégiée, généralement sont employées pour améliorer certaines propriétés des matériaux, telles que la résistance à l'usure, la rigidité et la tenue à la température, etc. Parfois, les particules sont utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau [13-14].

I.3.2 Composite à fibres

Les fibres sont employées pour améliorer les propriétés physiques (rigidité, résistance à la rupture, la tenue en température, caractéristiques électriques, etc.) du matériau [6], généralement, le diamètre de fibre compris entre 5 et 15 μm [15]. Par ailleurs, les fibres se divisent en 2 groupes : les fibres courtes (Coupées) et les fibres longues.

I.3.2.1 Les fibres courtes

Ils se présentent souvent sous forme de fibres coupées qui font de longueur faible devant les dimensions de la pièce. Elles sont mises aléatoirement ou semi orientées dans la pièce.

I.3.2.2 Les fibres longues

Ils peuvent se présenter sous différentes orientation (Unidirectionnels, tissus, etc.) dont les longueurs des fibres sont comparables aux dimensions de la structure [7]. En effet, les fibres longues apportent des meilleures propriétés mécaniques que les fibres courtes [16]. D'autre part, ses orientations affectent fortement les propriétés désirées.

Cependant, la grande importance des composites et les améliorations révolutionnaires apportées aux propriétés comparées aux matériaux conventionnels qu'ils offrent en grande partie grâce au développement de fibres aux propriétés sans précédent. Les fibres principales pour les applications de génie mécanique sont les verres, les charbons (également appelés graphites), plusieurs types de céramique et les produits organiques à haut module. Le TABLEAU 1.1. présente les propriétés des principales fibres couramment utilisées pour la fabrication des structures en composites notamment les stratifiés à fibres longues.

- a. **Fibres de verre** : sont principalement utilisées pour le renfort des polymères, grâce à leurs rapports performance/prix, elles sont les plus motivées pour la construction des composites. Les diamètres de filament varient de 3 à 20 μm .

Les fibres de verre ont des modules d'élasticité relativement bas comparés aux autres renforts. De plus, elles sont sensibles au fluage et à la rupture par fluage. D'autre part, les conductivités thermique et électrique des fibres de verre sont faibles, généralement les composites à fibres de verre sont utilisés comme isolants thermiques et électriques. Cependant, le problème majeur réside dans leurs recyclabilités.

TABLEAU 1.1. Propriétés des fibres clés de renforcement [17]

Fibres	Densité (g/cm ³)	Module axial (GPa)	Résistance de traction (MPa)	Coefficient de dilatation thermique axial (ppm/K)	Conductivité thermique axial (W/m.K)
Verre	2.6	70	2000	5	0.9
Carbone MS (PAN)	1.7	235	3200	-0.5	9
Carbone UHM (PAN)	1.9	590	3800	-1	18
Carbone UHR (PAN)	1.8	290	7000	-1.5	160
Carbone UHM (Pitch)	2.2	895	2200	-1.6	640
Carbone UHK (Pitch)	2.2	830	2200	-1.6	1100
Bore	2.6	400	3600	4.5	-
Aramide	1.4	124	3200	-5.2	0.04
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	3.9	370	1900	7.9	-

PAN : Fibres poly-acrylonitriles
 MS : Module standard.
 UHM : Ultra-Haute Module.
 Pitch : Fibres d'houille ou de pétrole.
 UHR : Ultra-Haute Résistance.
 UHK : Ultra-Haute conductivité thermique.

b. Fibres de carbone : sont souvent appelées fibres de graphite aux États-Unis, sont utilisées comme renforts pour les polymères, les métaux et les céramiques. Il existe des dizaines de fibres de carbone commerciales, avec une large gamme de forces et de modules. Les diamètres des fibres de renforcement courantes, qui se présentent sous la forme de faisceaux multi-filaments, varient de 4 à 10 μm (FIGURE 1.4.). En tant que classe de renforts, les fibres de carbone se caractérisent par une rigidité et une résistance élevées ainsi qu'une faible densité. Les fibres de carbone ont une excellente résistance au fluage, à la rupture sous contrainte, à la fatigue et aux environnements corrosifs, bien qu'elles s'oxydent à haute température.

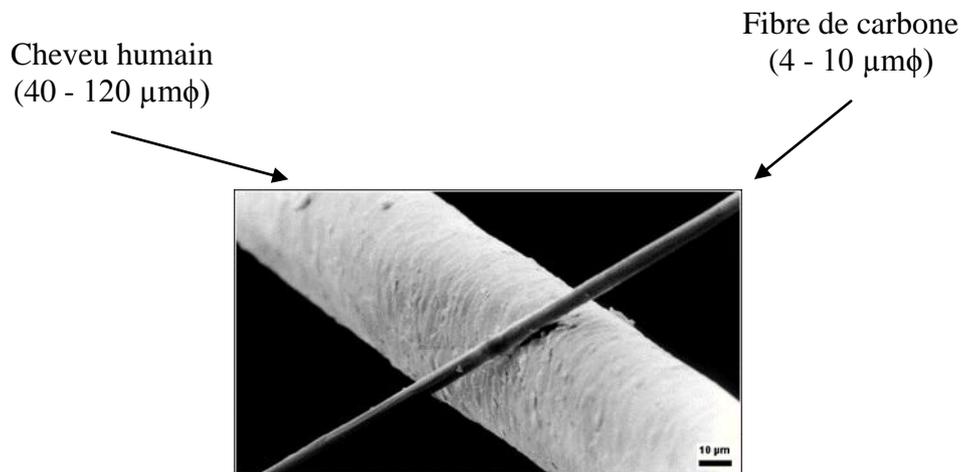


FIGURE 1.4. Diamètre de fibre carbone devant le cheveu humain [18].

Certaines fibres de carbone ont également des conductivités thermiques extrêmement élevées plusieurs fois supérieures à celles du cuivre. Cette caractéristique présente un intérêt considérable pour les emballages électroniques et les autres applications pour lesquelles la dissipation thermique et le contrôle thermique sont importants.

La plupart des fibres de carbone sont fortement anisotropes. La rigidité axiale (longitudinale), la tension, la résistance à la compression et la conductivité thermique et électrique sont généralement beaucoup plus grandes que les

propriétés correspondantes dans la direction radiale (transversale). En plus, les propriétés physiques des fibres dépendent du choix du matériau précurseur, des traitements thermiques et de l'étirage. Le TABLEAU 1.2. présent les propriétés physiques et physico-chimique de deux types de fibre de carbone (PAN-T300 et Pitch-P55) utilisées souvent dans l'industrie aéronautique, ces types de fibres sont fabriqués respectivement par TORAYCA et AMOCO puis conditionnées par APPLY CARBON [19].

TABLEAU 1.2. Propriétés des fibres de carbone PAN-T300 et Pitch-P55 [19].

Type de fibres	PAN-T300	Pitch-P55
Contrainte à rupture (MPa)	3650	1900
Module d'Young (GPa)	231	380
Densité (g/cm ³)	1.76	2
Elongation à la rupture (%)	1.4	0.5
Diamètre du filament (µm)	7	10
Dosage en carbone (%)	92	99+
Aire de surface d'une fibre (m ² /g)	0.45	0.35
Résistivité électrique* (µΩ.m)	18	8.5
Conductivité thermique* (W/m.K)	8.5	120
CTE* à 21°C (ppm/°C)	-0.6	-1.3

* : La direction longitudinale.

CTE : Coefficient de dilatation thermique.

- c. Fibres de bore** : les fibres de bore sont des renforts du type céramique, leurs difficultés de fabrications les rendent plus chères, par conséquent, elles sont préservées à des applications très spécifiques (spatiales et nucléaires) qui travaillent à haute température et sous atmosphères oxydante.

Les fibres de bore sont principalement utilisées pour renforcer les polymères et les métaux. Les fibres de bore sont produites sous forme de mono-filaments (filaments simples) par dépôt chimique en phase vapeur CVD de bore sur un fil de tungstène. Ils ont des diamètres relativement importants, 100-140 μm , bien supérieurs à ceux des fibres de verre et de carbone.

- d. Fibres d'aramide** : L'aramide, ou fibre de polyamide aromatique, est un renfort organique à module élevé, principalement utilisé pour renforcer les polymères, ainsi que pour la protection balistique. Il existe un certain nombre de fibres d'aramide commerciales produites par plusieurs fabricants (Kevlar et Twaron).

Le comportement des fibres aramides est similaires à celui des métaux car sous faible charge elles sont élastiques et deviennent plastiques quand elles sont soumises à de fortes contraintes. Elles constituent un bon compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre. Les fibres aramides ont une bonne tenue au feu. Par contre, lors de leur renforcement des composites, on observe une faible résistance à la compression et à la flexion, du fait d'une mauvaise adhérence avec les résines. C'est pourquoi de nouvelles fibres hybrides, en l'occurrence des fibres verre-kevlar et carbone-kevlar, sont élaborées pour améliorer leur adhérence. Les fibres aramides sont exploitées industriellement en vertu de leur résistance au choc et de leur légèreté. Elles entrent dans la composition des produits de protection (blindages, gilets pare-balle, casques, gants, etc.) mais aussi des articles de sport (raquettes de tennis, les pièces de skis), et dans nombreux autres produits de l'industrie aéronautique [17, 19-20].

I.4 La matrice

La matrice est comme l'enveloppe de forme qui sert à la protection, la cohésion, l'orientation et également la transmission des efforts mécaniques au renfort [7, 21]. D'une manière générale, elle peut être prendre la nature organique (Thermoplastique, thermodurcissable, élastomère) ou minérale (métallique, céramique) [17] comme montre la FIGURE 1.5.

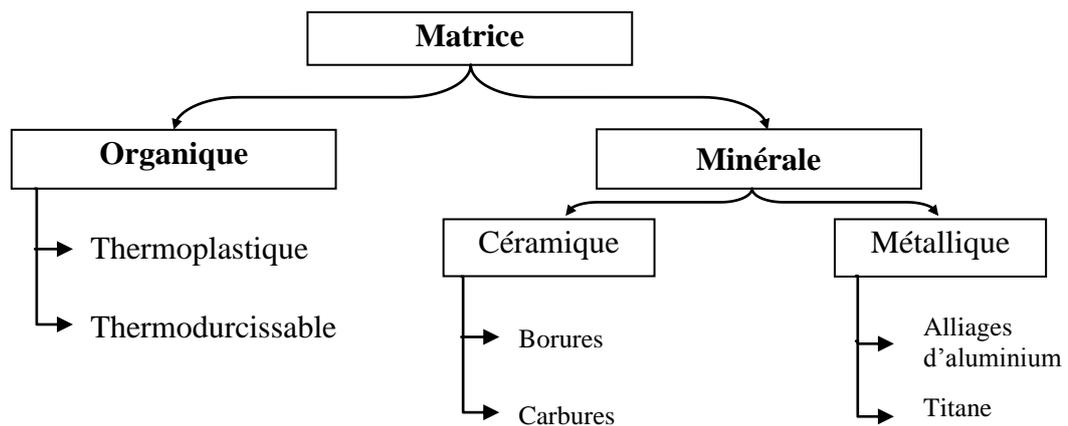


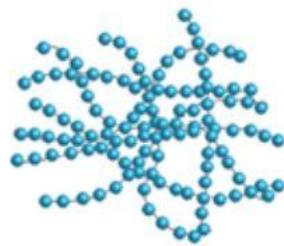
FIGURE 1.5. Différentes familles de matrices [22].

I.4.1 Matrices organiques

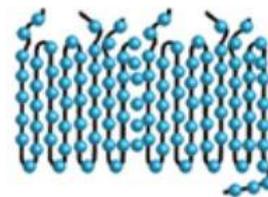
Les matrices organiques sont largement utilisées pour la fabrication des matériaux composites [17], grâce à leurs caractéristiques (Protection contre la corrosion et attaques chimiques, faible coût et facilité de mise en œuvre...) elles peuvent être atteindre à 99% de la quantité de production de ces matériaux dans le monde [23-24]. Par ailleurs, la matière organique désignée un polymère qui peut être défini comme un enchaînement de monomères (Un monomère est une molécule composée principalement de carbone et d'hydrogène). Généralement, les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables, ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés, le plus souvent, ils sont amorphes et parfois cristallisés [25-26]. Pour la fabrication des matériaux composites à matrice organique, il existe deux grandes familles de matière polymère (résine thermoplastique, thermodurcissable).

I.4.1.1 Matrice thermoplastique (TP)

Les matrices thermoplastiques n'ont été utilisées que récemment dans les composites notamment les composites renforcés de fibres longues, en raison de leurs meilleures performances écologiques et mécaniques ainsi qu'économiques dont la recyclabilité et la mise en forme par traitement thermique conduisent à augmenter leurs utilisations dans les processus de fabrication à haute productivité [27-28]. D'une façon structurale, les matières thermoplastiques sont constituées de polymères liés par des interactions intermoléculaires ou des liaisons physiques faibles de type Van der Waals, formant des structures linéaires ou ramifiées [29]. En fonction du degré des interactions intermoléculaires qui se produisent entre les chaînes de polymères, le polymère peut prendre deux types de structures différentes, des structures amorphes ou cristallines (FIGURE 1.6.), il est possible d'exister deux structures dans le même matériau thermoplastique :



Structure amorphe



Structure cristalline

FIGURE 1.6. Schéma structurale des polymères plastiques [30].

- **Structure amorphe** - les chaînes de polymères acquièrent une structure en faisceaux, semblable à une boule de structure désordonnée en fil, qui est directement responsable des propriétés élastiques des matériaux thermoplastiques.
- **Structure cristalline** - les chaînes polymères acquièrent une structure ordonnée et compactée. Cette structure est directement responsable des propriétés mécaniques de la résistance aux contraintes ou aux charges et de la résistance à la température des matériaux thermoplastiques.

Si le matériau thermoplastique présente une concentration élevée de polymères à structures amorphes, le matériau aura une résistance médiocre aux charges mais il aura une excellente élasticité. En revanche, si le matériau thermoplastique présente une forte concentration de polymères à structure cristalline, le matériau sera très résistant et même plus résistant que la matrice thermodurcissable, mais avec un peu d'élasticité qui confère la fragilité caractéristique de ces matériaux [25].

Les résines thermoplastiques couramment utilisées comme matériaux de matrice dans les composites sont le polypropylène (PP), le polyamide (PA) et le polyétheréthercétone (PEEK) [11, 31].

1.4.1.2 Matrice thermodurcissable (TD)

Actuellement, la matrice thermodurcissable est introduite dans la fabrication de la majorité du matériau composite à base de matrice organique, elle présente des propriétés thermomécaniques et chimiques élevées ainsi qu'un coût assez faible [24,27]. L'obtention d'une matrice thermodurcissable se fait à partir d'un traitement physico-chimique (catalyseur, durcisseur) ou thermique de la résine en état liquide visqueux pour la rendre en état solide (Matière infusible et insoluble), cette transformation d'état possède une situation irréversible, c'est-à-dire, elle mise en forme qu'une seule fois, cela engendre le problème de recyclage [11, 21]. D'une manière structurelle, les matrices thermodurcissables sont des matières fabriquées à partir de polymère composé de réseau tridimensionnel de macromolécules assemblées par des liaisons chimiques fortes, acquérant une structure polymère hautement réticulée [25]. Cette forte réticulation offre une bonne résistance au fluage, mais la même réticulation des chaînes moléculaires provoque une fragilité extrême, c'est-à-dire une très faible ténacité à la rupture [31].

Par ailleurs, les matrice thermodurcissables les plus connus dans la conception des composites sont les polyesters insaturés, les phénoliques et les époxydes, ces dernières sont les plus populaires dans le secteur aéronautique [24].

I.4.2 Matrices métalliques

Les composites à matrices métalliques (CMM) sont souvent utilisés dans les secteurs de défense, l'aérospatiale et à la fois le transport. Ces matériaux sont présents d'excellentes propriétés physiques et chimiques telles que, une bonne tenue en température et un rapport résistance/densité élevé [32]. Les matrices les plus utilisées sont l'alliage d'aluminium, titane et le magnésium.

I.4.3 Matrices céramiques

Les composites à matrice céramique (CMC) sont principalement caractérisés par des propriétés thermiques qui les rendent particulièrement intéressants pour des applications où la température élevée est demandée, ainsi que la résistance à l'usure, à la compression et à la corrosion. Généralement, Ils sont préservés à l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire. Malheureusement, ils sont rarement utilisés dans des applications dont des contraintes de traction sont importantes.

Les principales céramiques utilisées entant que matrices, sont le carbure de silicium, l'alumine et le nitrure de silicium [17, 33].

I.5 Architecture structurelle des matériaux composites

Certaines propriétés physiques du matériau composite sont relativement conditionnées par l'architecture structurelle de ledit matériau, de ce fait, dans la littérature, on distingue trois principales classes de structure : monocouche, sandwich et stratifiée [11, 6, 21].

I.5.1 Les monocouches

Les monocouches (couche ou strate) sont également nommées plis, ils représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort (FIGURE 1.7.) : à fibres longues (unidirectionnelles UD, Tissées), à fibres courtes (structure orienté, aléatoire).

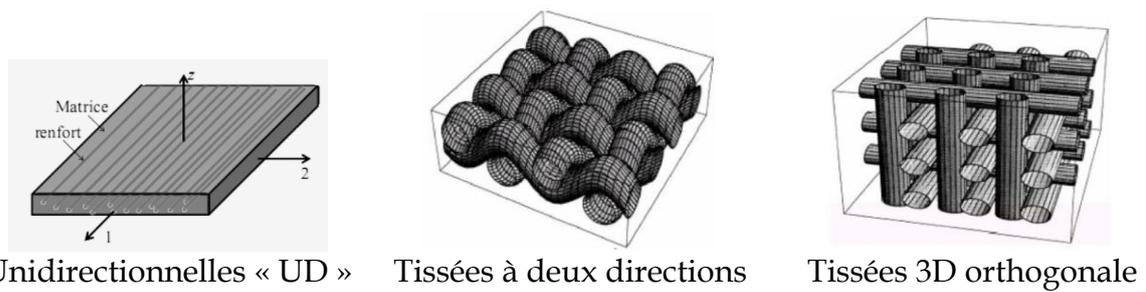


FIGURE 1.7. Matériaux composites monocouches.

I.5.2 Les stratifiés

Les stratifiés sont également nommés multicouches, ils sont constitués d'un empilement successif de plusieurs plis (ou couches), dont le renfort de chaque pli est orienté par rapport à un référentiel donné (FIGURE 1.8.). De ce fait, la séquence d'empilement (le drapage) du stratifié (FIGURE 1.9.) permettra d'avoir des propriétés mécaniques bien défini afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure. De plus, elle définit les propriétés physiques du matériau composite [34, 11].

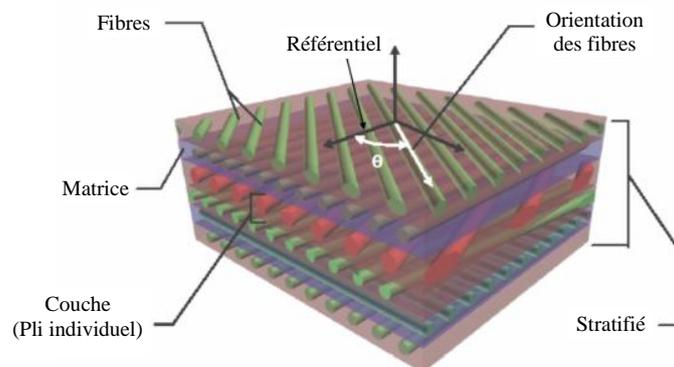


FIGURE 1.8. Matériau composite stratifié [21].

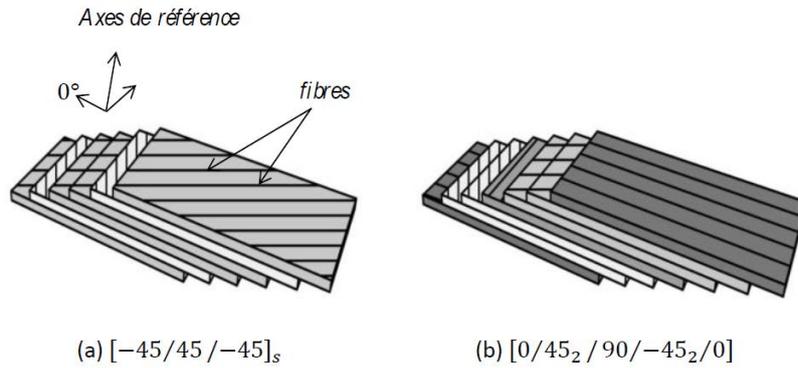


FIGURE 1.9. Exemple de séquence d'empilement d'un stratifié.

Selon la séquence d'empilement et les constituant du stratifié on distingue :

- Les stratifiés équilibrés : contient autant de plis orientés suivant la direction relative à l'angle θ que de plis orientés suivant la direction relative à l'angle $\theta + \pi$.
- Les stratifiés symétriques : les plis sont entreposés symétriquement par rapport à un plan intermédiaire (c.à.d. plan de miroir).
- Les stratifiés orthogonaux : possèdent de plis orientés à θ que de plis orientés à $\theta + \frac{\pi}{2}$.
- Les stratifiés hybrides : constitués d'un empilement successif de plis de différente nature (par exemple la FIGURE 1.10.), et/ou dont des renforts différents (carbone, kevlar, aluminium, etc.).

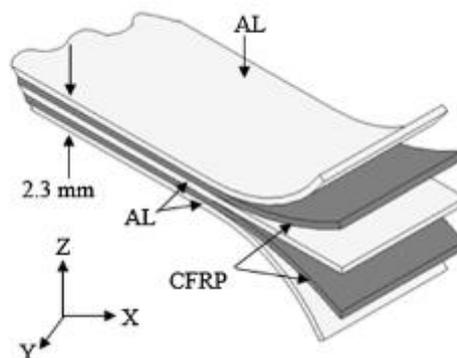


FIGURE 1.10. Exemple d'un stratifié hybride (Aluminium (Al)/Carbone fibre renforcé époxy (CFRP)).

I.5.3 Les sandwichs

La structure sandwich est constituée d'une âme (cœur) de forte épaisseur et de faible poids enveloppée par deux peaux fines possédant une grande rigidité (FIGURE 1.11.). Le matériau résultant présente une excellente isolation thermique. Généralement, ce type de composite est soutenu pour les structures admettant des sollicitations en flexion ou en torsion.

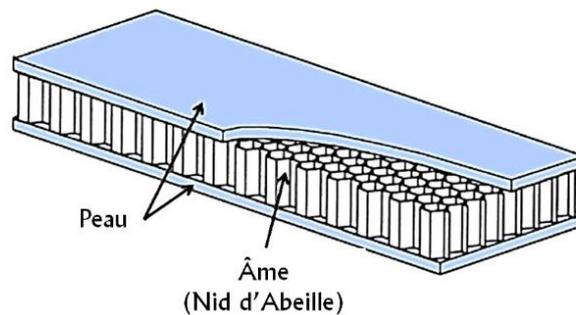


FIGURE 1.11. Matériau composite en structure sandwich [11].

I.6 Endommagement des composites stratifiés à fibres longues

Par définition, l'endommagement d'un matériau est l'apparition de discontinuité de matière, accompagnée d'une augmentation de fraction volumique de vide. Cette apparition est causée par une attaque physique ou chimique. Par conséquent, dans certaines conditions de chargement, une dégradation peut survenir et entraîner une défaillance catastrophique des structures en service (FIGURE 1.12.).



FIGURE 1.12. Dégât de ruine d'une structure composite d'un hélicoptère [35].

Par ailleurs, la nature de composites stratifiés (hétérogénéité et anisotropie) rend leurs mécanismes d'endommagement très complexes. Ces endommagements peuvent être apparus à différentes échelles d'observations, à savoir :

- L'échelle microscopique : Décohésion fibres/matrice (perte d'adhérence entre les fibres et la matrice) et présence de porosité, ...etc.
- L'échelle mésoscopique ou l'échelle du pli élémentaire : Ruptures de fibres, dégradation intra-laminaire (fissuration transversales c.-à-d. perpendiculaire de la direction de la force de sollicitation ou longitudinale c.-à-d. dans le sens de la sollicitation).
- L'échelle macroscopique ou bien l'échelle du stratifié : Dégradation inter-laminaire (phénomène de délaminage c.-à-d. la décohésion entre deux plis adjacents).

Les phénomènes d'endommagements cités ci-dessus sont schématisés sur la FIGURE 1.13. et discutés ci-après.

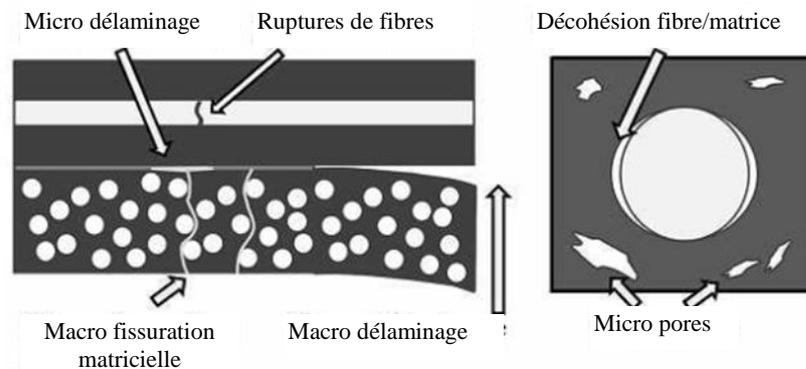


FIGURE 1.13. Schématisation de différents endommagements dans les composites stratifiés [4].

I.6.1 Décohésions fibre-matrice

C'est le détachement des fibres de la matrice (FIGURE 1.14.), généralement ce phénomène est engendré d'une part, par des concentrations de contrainte

apparaissant dans la matrice autour des fibres [36], d'autre part, par des défauts de fabrication tel que l'inhomogénéité de la répartition des fibres dans la matrice, imparfait de l'adhérence inter-faciale entre la fibre et la matrice (Inclusions et bulles d'air) [5]. Ce type de dégradation est le lieu privilégié pour l'amorçage des endommagements à l'échelle supérieure [37], ainsi provoque une chute importante des propriétés mécaniques de la structure, entraînant une ruine lors d'une sollicitation en cisaillement [38].

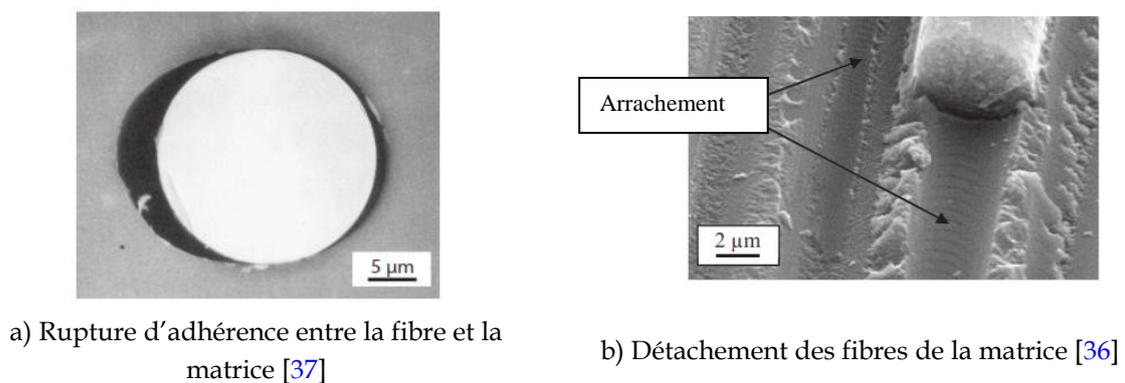


FIGURE 1.14. Décohésion fibre/matrice.

I.6.2 Porosité

Dans les composites stratifiés, la porosité est considérée comme un défaut géométrique (FIGURE 1.15.). Par ailleurs, en raison de l'hétérogénéité de ses constituants elle peut apparaître durant le processus de mise en forme comme une cavité emprisonnant a priori de la matière gazeuse. Les principales causes menant à l'apparition de ce genre de défaut sont : l'air emprisonné lors du drapage, l'humidité, la montée en température trop rapide et le dégazage de la résine pendant la cuisson.

La présence de pores au sein du matériau provoque une baisse significative sur leurs propriétés mécaniques, autrement dit, les pores peuvent agir comme un point d'initiation des fissures [39-40].



FIGURE 1.15. Image tomodensitométrie sur la présence de la porosité (0.9%) [40].

I.6.3 Rupture de fibres

Ces défauts peuvent apparaître en traction ou en compression lorsque les plis sont sollicités dans le sens des fibres [36]. Nous les considérons comme des défauts à l'échelle mésoscopique.

La rupture de fibres (FIGURE 1.16.) est un défaut reconnu lors d'une structure composite stratifié soumis à une sollicitation (traction ou compression) dans le sens des fibres et le chargement atteint le niveau de la résistance de celles-ci. En revanche, l'imperfection lors du processus de fabrication (Ondulation [42], Hétérogénéité de la répartition des fibres [5]) joue un rôle primordial dans l'émergence de cette dégradation, par conséquent, provoque une destruction de la structure [36].

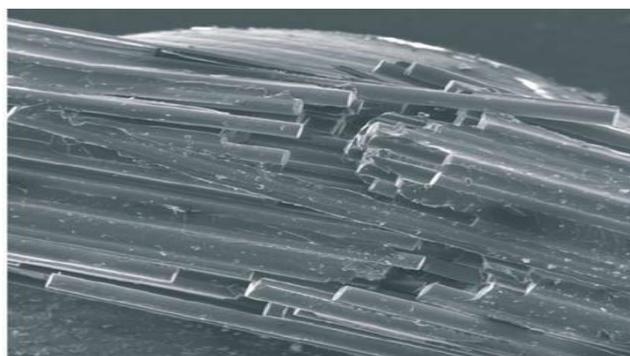


FIGURE 1.16. Rupture de fibres [43]

I.6.4 Fissuration matricielle

La fissuration matricielle est un mécanisme complexe dont l'apparition et le développement de dommage ne dépendent pas seulement du chargement, mais également de la géométrie et de l'architecture du composite [4]. Dans les composites stratifiés notamment les stratifiés à des couches croisées, soumis à des efforts élevés en traction, le premier dommage observé est généralement la fissuration transversale. Ce type de dommage consiste de la rupture de la matrice entre les fibres dont les nappes sont perpendiculaires à la direction de chargement (FIGURE 1.17.a.).

La fissuration longitudinale (FIGURE 1.17.b.) est similaire à la fissuration transversale, cependant ce dommage provoque une rupture de la matrice entre les fibres dont leur orientation est parallèle à la direction de chargement [44].

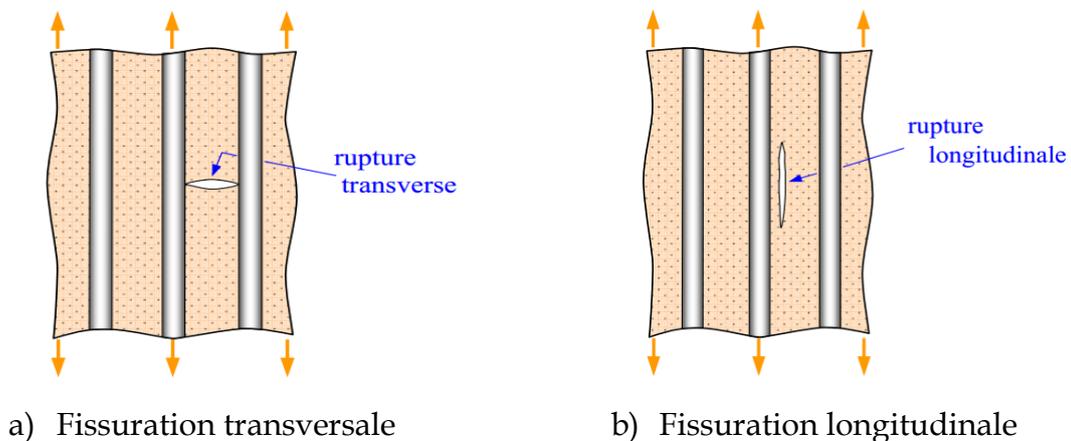


FIGURE 1.17. Fissuration matricielle [45]

I.6.5 Délaminage

Dans les composites stratifiés, le délaminage (La décohésion inter-plis) peut être défini par décollement de l'interface existant entre deux plis adjacents. Ce décollement s'amorce généralement dans les zones de forts gradients de contraintes [4]. Souvent, le délaminage est la conséquence de la fissuration

matricielle (FIGURE 1.18.), ainsi, les porosités induites au sein de la préforme par l'empilement des couches constituent évidemment pour la naissance de ce défaut.

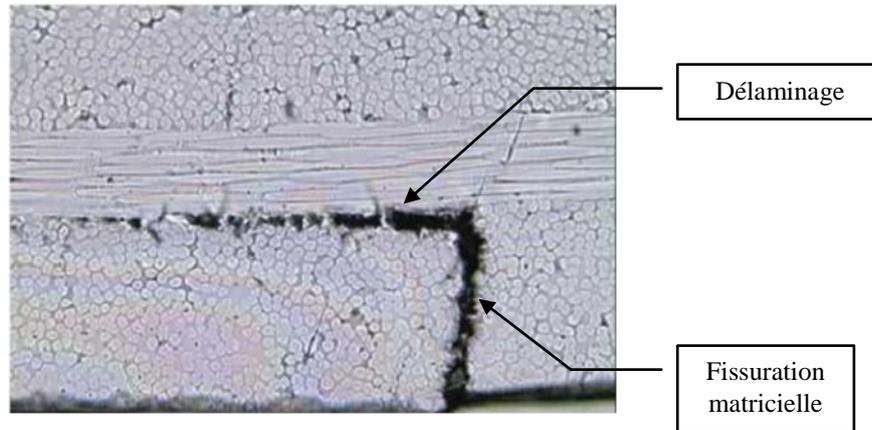


FIGURE 1.18. Délaminage survenu par la fissuration matricielle [46].

Compte tenu de la diversité et la complexité de mécanismes d'endommagement des structures composites, et afin de garantir leurs sécurités accrues, il est évoqué de faire appel à des méthodes de contrôle et/ou évaluation non destructive pour déceler et quantifier ces endommagements et de prévenir ceux se propageant de façon catastrophique.

I.7 Méthodes de détection de l'endommagement

En se basant sur plusieurs phénomènes physiques, il existe nombreuses méthodes envisageables pour déterminer l'état de santé des structures, sans les abimer, soit durant la fabrication soit au cours du cycle de vie. De ce fait, les méthodes de contrôle non destructif (CND) sont largement soutenues dans les secteurs industriels notamment ceux qui exigent un niveau de sécurité très élevé [47-48].

Le principe de la méthode de CND d'une structure consiste habituellement de trois étapes [7] (FIGURE 1.19.) :

- l'excitation physique (de type mécanique, électromagnétique, thermique) de la pièce,
- la perturbation qui est intrinsèque aux défauts et aux endommagements de la pièce et qui interagit avec l'excitation,
- la révélation à l'aide de capteurs adaptés à chaque technique qui traduisent l'interaction entre l'excitation et la perturbation.

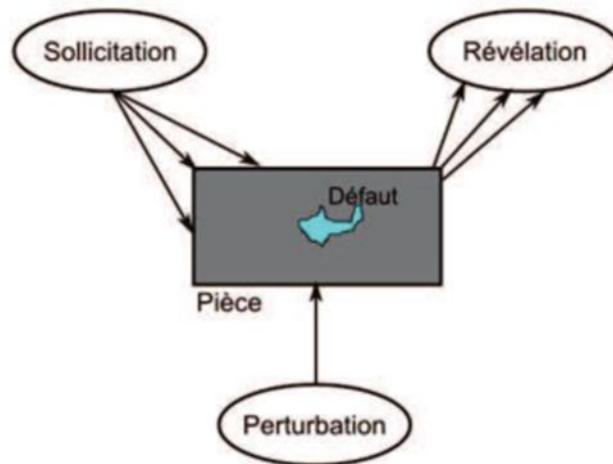


FIGURE 1.19. Principe du CND [39].

Toutefois, les caractéristiques physiques et géométriques de la structure, les types de défaut ainsi que les conditions de mise en œuvre sont des facteurs cruciaux pour le choix entre les méthodes. A cet effet, il existe une grande variété de méthodes les plus couramment appliquées au diagnostic des structures composites, à savoir : Emission acoustique, thermographie et électromagnétique...etc. De plus, les méthodes combinées telles que l'ultrasons et thermographie infrarouge [50].

Dans la suite, On ne vise pas à établir une liste exhaustive des méthodes utilisées dans le domaine du CND de matériaux composites, cependant, de donner une brève présentation sur les méthodes les plus communément utilisées.

I.7.1 Emission acoustique

Le contrôle par l'émission acoustique est une méthode efficace d'analyse des imperfections dans les structures composites telles que la microfissuration de la matrice, la décohésion fibre-matrice, la rupture de fibres et le délaminage [51]. Cette méthode est basée sur la détection des ondes élastiques transitoires générées par l'énergie libérée dans la structure. Les ondes sont générées au sein du matériau lorsque la matière évolue, se déforme ou s'endommage sous l'action d'une ou plusieurs contraintes. Par conséquent, les ondes de stress résultantes se propagent de manière concentrique depuis leur origine et sont captées par des capteurs piézo-électriques très sensibles qui convertissent le signal acoustique en un signal électrique [52] (FIGURE 1.20.), pour réussir des applications de contrôle, la discrimination du signal et la réduction des bruits parasites sont cruciales.

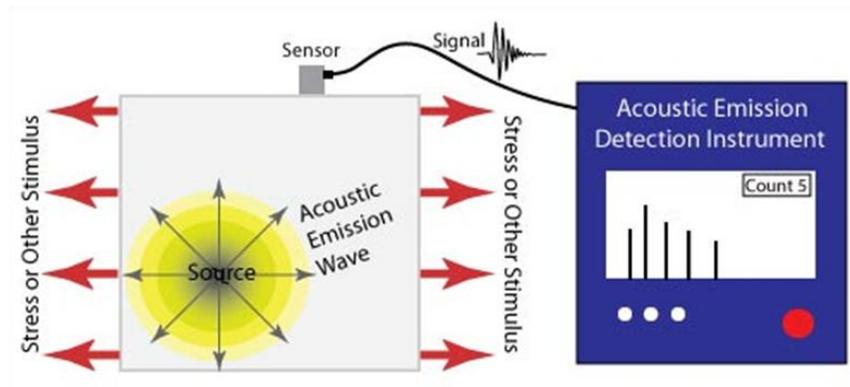


FIGURE 1.20. Principe de la méthode d'émission acoustique [53].

Les avantages offerts par cette méthode sont :

- La capacité de discerner les endommagements en développement,
- Haute sensibilité d'inspection à l'aide des capteurs parfaitement appropriés,
- Rapide et grande zone d'inspection à l'aide de multi-capteurs ;

Les limitations de ce type de contrôle sont :

- La grande habileté requise pour corrélérer les données d'émission acoustique à des types spécifiques de mécanismes d'endommagement,
- Sensible aux bruits parasites de l'environnement de service.

I.7.2 Ultrasons

Le contrôle par ultrasons est une méthode est basé sur la mesure de la réflexion, la transmission ou la rétrodiffusion d'ondes ultrasonores dans le matériau à inspecter, tel que le composite stratifié. Il couvre un large spectre de fréquences allant de 20 kHz à plus de 1 GHz, en fonction de l'application. La plupart des applications industrielles de CND utilisent des fréquences comprises entre 0,5 et 10 MHz [50]. Habituellement, le système de contrôle par Ultrasons comprend un circuit émetteur et récepteur, un outil transducteur et des dispositifs d'affichage (FIGURE 1.21.). Sur la base des informations véhiculées par le signal, l'emplacement de la fissure, la taille du défaut, son orientation et d'autres caractéristiques pourraient être atteints [54]. Les indicateurs de propriétés les plus couramment utilisés pour le traitement de signal sont la vitesse de propagation des ondes et la perte d'amplitude (ou d'énergie) [52].

Le contrôle par ultrasons a pour avantages la rapidité d'inspection, une bonne résolution d'analyse, la capacité de contrôler des structure épaisses. Les limitations comprennent la nécessité de mettre en place un couplant (Gel, graisse) entre les sondes et la pièce afin d'améliorer la propagation des ondes ultrasonores, car l'air est un milieu médiocre pour la propagation de celles-ci, également, une bonne compétence est demandée pour l'analyse des données [42,55].

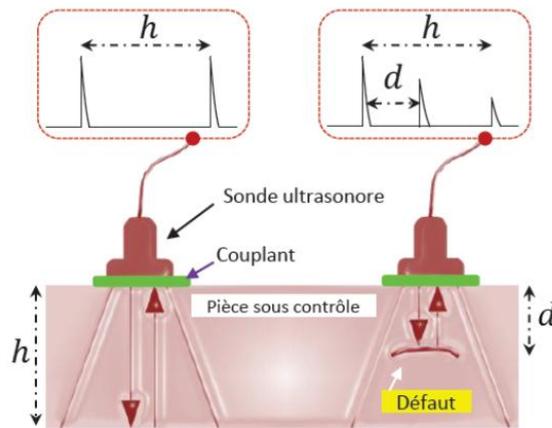


FIGURE 1.21. Principe du contrôle ultrasons [42].

I.7.3 Séarographie

La séarographie, également connue sous le nom « interférométrie de speckle laser » [56]. Le contrôle par séarographie est une méthode optique laser qui basée sur la mesure interférométrique qui utilise un faisceau laser (lumineux) pour détecter des éventuels défauts [47] (Délaminage, porosité, corps étranger [57]) dans la surface ou sous-surface du matériau composite en réponse à l'application d'une sollicitation donnée (Thermique, mécanique). Généralement, Le système de séarographie est composé des modules suivants : capteur de tête, éclairage, module d'excitation externe et logiciel spécialisé (FIGURE 1.22.).

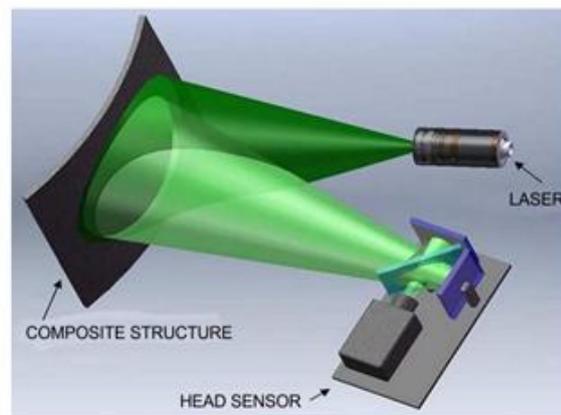


FIGURE 1.22. Système de contrôle par séarographie [56].

Les avantages présentés par cette méthode peuvent être récapitulés comme suit :

- Une bonne précision de la détection et la caractérisation des défauts [58],
- Le procédé de contrôle est moins sensible au bruit que de nombreuses autres méthodes de CND [52].

Les limitations sont :

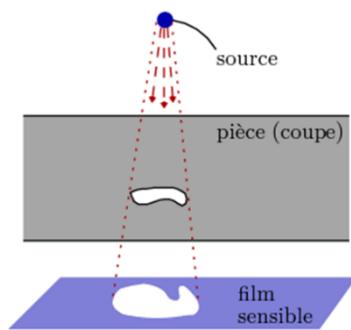
- La méthode est fortement sensible à la rugosité de la surface,
- L'application de la méthode est limitée à la détection des défauts de surface et sous-surface,
- La caractérisation de défaut de type : rupture de fibres, décohésion fibre/matrice et la fissuration matricielle est extrême difficile [50],
- Leur application aux processus industriels reste difficile en raison de sa sensibilité aux perturbations de l'environnement [59],
- La méthode exige un niveau de maîtrise pour permettre d'interpréter les résultats [42].

I.7.4 Radiographie et tomographie

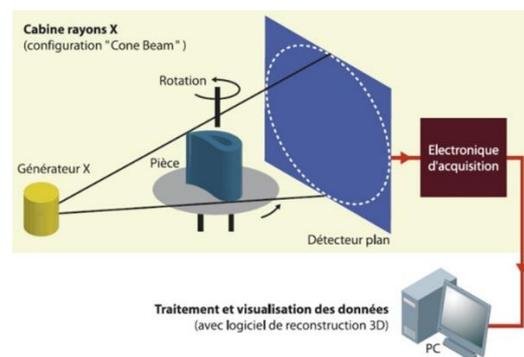
Le contrôle par radiographique consiste à obtenir une image de la densité de matière d'un objet traversé par un rayonnement (X, gamma) comme montre la FIGURE 1.23.a. Les défauts au sein de la structure provoquent une forte densité (niveau de gris plus élevé dans le cas des images numériques). Un défaut (mésoscopiques et macroscopiques) [60] ne peut être détecté par cette méthode que si son orientation n'est pas perpendiculaire au faisceau de rayonnement [52]. Pour les pièces minces dont l'épaisseur est inférieure à 5 mm, la radiographie à basse tension est plus efficace, tandis que la radiographie aux rayons gamma est plus appropriée pour les pièces plus épaisses [50].

Il existe différentes méthodes de contrôle radiographique pour différentes applications telles que la tomographie [61] (FIGURE 1.23.b.). Comparée à la

technique de radiographie conventionnelle, la tomographie repose sur la reconstruction informatisée d'une série de radiographies collectées par rotation de l'échantillon selon une étape angulaire contrôlée. Les données de sortie correspondent à des cartes 3D d'éléments élémentaires caractéristiques (appelés voxels), codés par niveaux de gris. Les contrastes de niveaux de gris dans les images 3D obtenues à partir d'un équipement approprié correspondent aux différences entre les coefficients d'atténuation linéaires des constituants du matériau (matrice, fibre et porosité), les éléments de grand nombre atomique étant les plus absorbants et les éléments de bas nombres atomiques ou faibles densité telle que les cavités d'air sont les moins absorbants. Ainsi, si le contraste entre les coefficients d'absorption linéaires est relativement important, il est possible d'identifier les différents éléments du composite et de détecter les emplacements des dommages [50].



a. Radiographie [62]



b. Tomographie [63]

FIGURE 1.23. Principe de contrôle radiographie et tomographie.

Les avantages de cette méthode sont :

- Possibilité de déterminer la nature et la dimension de défauts,
- Facilité d'interpréter et distinguer les défauts à travers les indications contrastées,
- Contrôle des structures épaisses.

Les limitations sont :

- Diffusion de rayonnements ionisants,

- Exige une réglementation et consignes de sécurités strictes,
- Extrêmement coûteuse du point de vue installation et consommables,
- L'éventualité de détection des défauts est étroitement liée à la direction de projection du faisceau de rayonnement.

I.7.5 Thermographie infrarouge

Le contrôle thermographie infrarouge repose sur l'enregistrement du rayonnement thermique émis par la surface d'une structure au moyen d'une caméra infrarouge [64]. Cette méthode est également appelée imagerie thermique, il existe deux types de méthodes à savoir la thermographie infrarouge passive et l'autre active. La thermographie infrarouge passive est considérée comme une méthode de contrôle en continu, principalement est employée dans le cadre de suivi de l'évolution de mécanismes d'endommagement de la structure sous sollicitations mécaniques [65] (FIGURE 1.24.). De ce fait, les endommagements se caractérisent par un dégagement d'énergie, par conséquent une élévation locale de la température de la pièce à l'endroit où le dommage est généré.

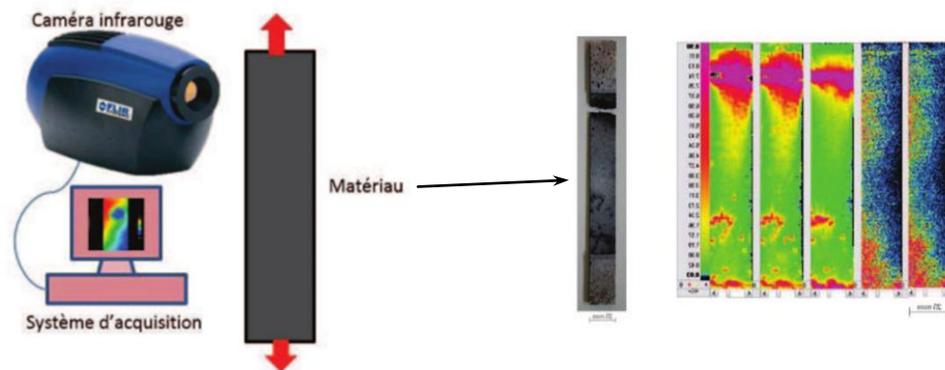


FIGURE 1.24. Principe d'acquisition de la thermographie infrarouge passive [7]

En revanche, la thermographie infrarouge active, permet de remonter l'état d'intégrité de la structure avec une stimulation thermique externe (FIGURE 1.25.) telle que des rayonnements optiques (lampes thermiques halogènes et laser), des ondes ultrasonores [66] et des ondes électromagnétique (Courants de Foucault et

micro-ondes) [42] pour chauffer délicatement la structure sous inspection. Les réponses des gradients de température à la surface sont enregistrées et analysées par une caméra infrarouge. En effet, lorsque les ondes thermiques circulent à l'intérieur de la pièce par diffusion, le taux de diffusion de la chaleur autour d'un dommage est différent de celui de l'environnement et la réponse thermique résultante est utilisée pour détecter et quantifier de celui-ci [67].

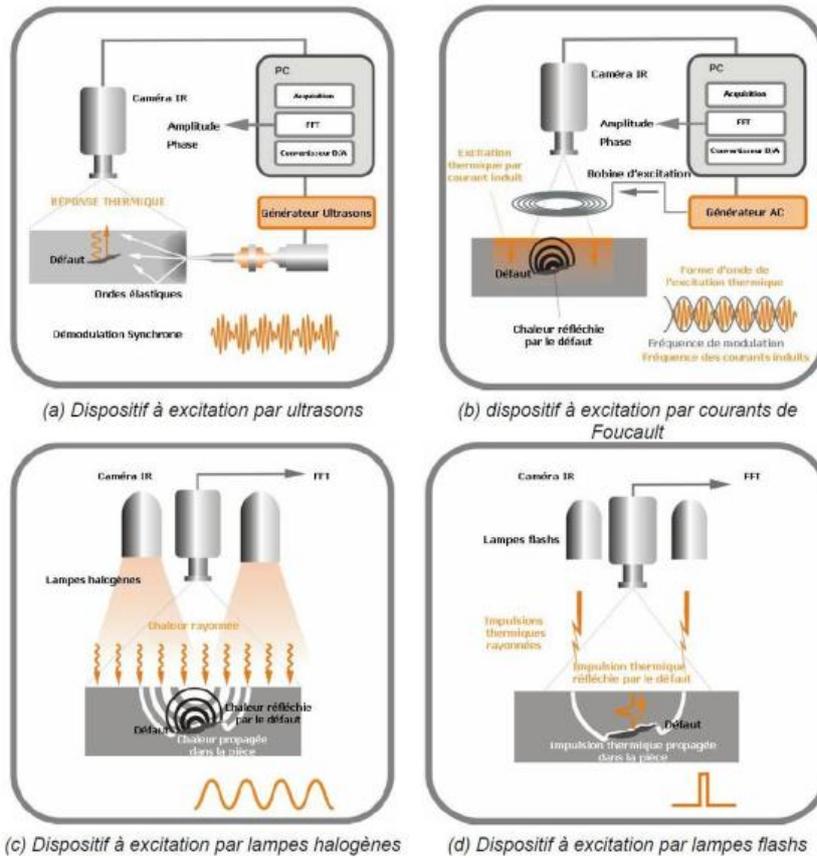


FIGURE 1.25. La thermographie infrarouge active [68].

Les avantages de la méthode résident dans :

- La capacité d'auditer de grandes zones,
- La sensibilité à la détection de dommages de faibles dimensions,
- La facilité d'interpréter les données,
- La possibilité d'inspecter d'une structure lorsqu'un seul côté de celle-ci est accessible.

Les limitations sont :

- Instrumentation coûteuse,

- le recours à des inspecteurs hautement qualifiés pour faire fonctionner les instruments,
- la difficulté pour identifier la nature de défauts, ainsi que leurs profondeurs,
- la profondeur d'inspection est limitée,
- Sensibles aux perturbations environnementales.

I.7.6 Auto-détection par la résistance électrique

La méthode est basée sur la sensation à la variation de la résistance électrique du matériau, à cet effet elle est limitée à l'inspection de matériaux électriquement conducteurs tels que les composites à fibre de carbone, ces derniers ayant une fraction volumique élevée de fibres [50]. En effet, les dommages et le rapport contrainte/déformation possédant des effets sur la résistance électrique de la structure [69] (FIGURE 1.26.). De ce fait, une surveillance en temps réel de l'état des dommages par une simple mesure de la résistance électrique est assurée. Dans ce cas là, l'utilisation de la structure en tant que capteur est connue sous le nom d'auto-détection [70]. La valeur de la résistance électrique dépend de plusieurs paramètres, tels que la fraction volumique de la fibre, la séquence d'empilement et la direction de la mesure [71] ainsi que le type, la qualité, le nombre et la position des électrodes de mesure. Généralement, deux ou quatre électrodes sont couramment utilisées en pratique. La méthode à deux électrodes implique deux contacts électriques servant à la fois aux mesures de courant et de tension, ce qui est simple et praticable; Cependant, la mesure est sensible à la qualité des contacts électriques. Dans la méthode à quatre sondes, les deux contacts extérieurs fournissent le courant électrique, tandis que les deux sondes internes sont utilisées pour la mesure de la tension [72]. La variante à quatre sondes semblait être plus sensible et plus précise que la variante à deux sondes lors du contrôle des dommages par impact dans un composite carbone / époxy [73].

D'autre part, la nature du courant d'attaque est cruciale pour la détection des dommages notamment les composites à fibre de carbone. Il semble que le courant continu (DC) permette une bonne détection de la défaillance de la fibre, alors que

le courant alternatif (AC) est plus approprié pour surveiller les fissures de la matrice, le délaminage, la décohésion fibre/matrice [75].

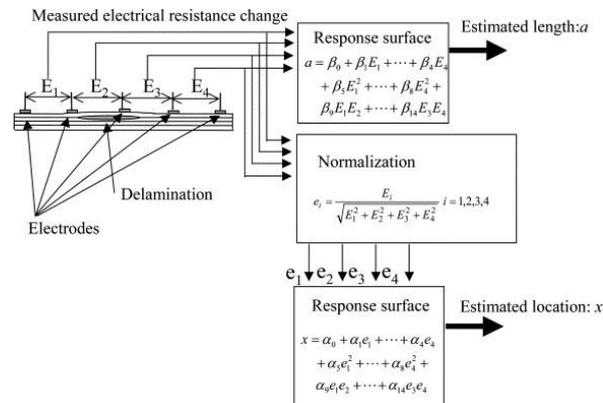


FIGURE 1.26. Estimation dimensionnelle de délaminage du stratifié à fibre de carbone par la méthode de la résistance électrique [74].

Les avantages de la méthode sont :

- Implémentation simple et pas coûteuse,
- L'inspection de la pièce à partir d'une seule face est faisable,
- La méthode est appropriée pour la détection de rupture des fibres.

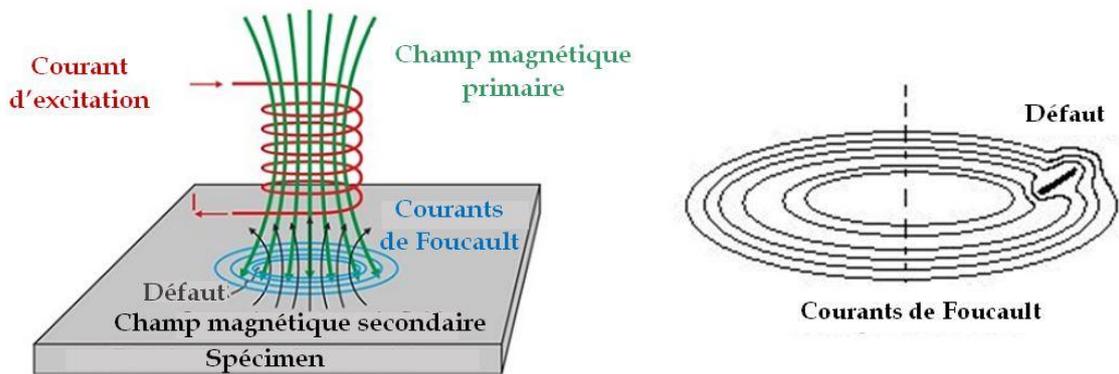
Les limitations sont :

- Limitée aux matériaux conducteurs,
- Sensible aux conditions climatiques,
- Inspection avec contact,
- Pour atteindre à des informations suffisantes, un grand nombre d'expérience est exigé.

I.7.7 Courants de Foucault

La méthode de contrôle par les courants de Foucault est basée sur l'interaction du champ magnétique variable généré par une source externe (Bobine) placé à proximité de la pièce (spécimen) à inspecter et la réaction du champ magnétique

résultant par la circulation des courants induits (Courant de Foucault) au sein de la pièce, donc l'intégrité de celle-ci peut s'identifier par la variation de l'impédance de la bobine (FIGURE 1.27.a.). La présence d'une discontinuité de la matière (endommagement) au sein de la structure, provoque une modification du trajet des courants induits (FIGURE 1.27.b.), par conséquence, une variation de l'impédance de la bobine [76,77]. Cette méthode sera bien détaillée dans le prochain chapitre.



a. Méthode des courants de Foucault [78].

b. Perturbation des courants de Foucault [79].

FIGURE 1.27. Principe du contrôle par courants de Foucault.

Les avantages de la méthode sont :

- Simple à implémenter et pas couteuse,
- Efficace pour la caractérisation des défauts,
- L'inspection de la pièce à partir d'une seule face est faisable,

Les limitations sont :

- Limité au contrôle des structures de nature conductrice de l'électricité,
- La sensibilité de l'inspection est par la profondeur de pénétration du champ,
- L'inspection se fait d'une manière locale,

- Sensible à l'espacement capteur/pièce.

I.8 Applicabilité des méthodes de CND

En raison de la complexité des mécanismes d'endommagement des structures composites, qui sont cachés, multi-échelles et liés à l'hétérogénéité et l'anisotropie de la matière, ainsi que la complexité des pièces industrielles, aucune méthode de CND n'est convenable en terme d'applicabilité (fiabilité et précision) pour caractériser tous les types de défauts à la fois. Le TABLEAU 1.3. récapitule l'applicabilité des méthodes de CND discutées ci-avant pour identifier les défauts types (rupture de fibres, décohésion fibre/matrice, fissuration matricielle et le délaminage) naissants dans les matériaux composites notamment les stratifiés.

Pour survoler les limitations des méthodes de CND, afin d'aboutir aux résultats satisfaisants, il est nécessaire de recourir à la combinaison d'au moins deux méthodes appropriées de CND simultanément. Cette approche de combinaison est connue sous le nom de multi-méthodes (méthode hybride) [42, 50], par exemple : l'ultrason avec la thermographie infrarouge pour évaluer la porosité au sein de composites à fibre de carbone [80], l'émission acoustique avec la thermographie infrarouge pour inspecter la fissuration matricielle, rupture de fibres et le délaminage [81] et la tomographie avec la thermographie infrarouge [82].

TABLEAU 1.3. Applicabilité des méthodes de CND pour la caractérisation d'endommagement [50].

Méthode de CND	Type d'endommagement				Caractérisation de dommage (Localisation, dimensionnement)	Avantages	Limitations
	Rupture de fibres	Décohésion fibre/matrice	Fissuration matricielle	Délaminage			
Emission acoustique	+++	++	+++	+++	Localisation	Inspection en temps réel	Sollicitation mécanique est exigée,
Ultrasons			+ (fréquence > 10 ⁸ Hz)	+++	Localisation et dimensionnement	Méthode de quantification pour tous les matériaux	Difficulté d'interpréter les résultats
Searographie		+		+	Localisation surfacique	Sans contact, Méthode d'imagerie	Sollicitation mécanique est exigée, Résultats de surface seulement
Radiographie et tomographie	+++	+++	++	+++	Localisation et dimensionnement	Fiabilité d'analyse en 3D, Méthode d'imagerie	Danger pour la santé (ionisation de rayonnement)
Thermographie infrarouge		++		++	Localisation surfacique et sous-surfacique	Sans contact, Méthode d'imagerie	Limité à l'inspection surfacique et sous-surfacique
Résistance électrique	+		+	+++	Localisation avec multi-électrodes	Auto-détection en temps réel	Avec contact, Limité au matériau électriquement conducteur
Courants de Foucault	+			++	Localisation surfacique et sous-surfacique	Contrôle rapide et sans contact	Limité au matériau électriquement conducteur, Epaisseur limité

I.9 Conclusion

Ce chapitre a été consacré de fournir une brève étude bibliographique sur les matériaux composites dont leurs constituants, leurs architectures structurelles et les mécanismes d'endommagement les plus connus dans les structures en composite notamment à l'architecture structurelle stratifiant. Compte tenu de la diversité et la complexité de mécanismes d'endommagement des structures composites et afin de garantir leurs sécurités accrues, il est évoqué de faire appel à des méthodes de contrôle et/ou évaluation non destructive pour déceler et quantifier ces endommagements et de prévenir ceux qui se propageant de façon catastrophique. De ce fait, une bref présentation a été faite au profit des méthodes de contrôle non destructif les plus couramment utilisées pour le diagnostic des structures industrielles en composite. Comme étant donné auparavant, parmi la grande variété de méthode de contrôle non destructif, la méthode de contrôle par les courants de Foucault prouve leur succès pour identifier des dommages types naissant au sein de matériaux composites notamment les stratifiés à fibre de carbone. Cette méthode sera bien détaillée dans le prochain chapitre.

Chapitre II. Contrôle & Evaluation par courants de Foucault

II.1	Introduction	54
II.2	Bref Historique de CND-CF	54
II.3	Principe du CND-CF	55
II.4	Densité et profondeur de pénétration de CF	57
II.4.1	Densité de CF	57
II.4.2	Profondeur de pénétration standard	58
II.5	Indicateurs exploitables en CND-CF	59
II.6	Capteurs inductifs	61
II.6.1	Configurations de capteurs	62
II.6.1.1	<i>Capteur à double fonctions</i>	62
II.6.1.2	<i>Capteur à fonctions séparées</i>	63
II.6.1.3	<i>Capteur à fonctions différentielles</i>	64
II.6.2	Types de bobines	65
II.6.2.1	<i>Bobine classique</i>	65
II.6.2.2	<i>Bobine gravée (imprimée)</i>	66
II.6.3	Impédance du capteur	66
II.6.3.1	<i>Impédance normalisée</i>	68
II.6.4	Signaux d'excitation du capteur	70
II.6.4.1	<i>Excitation mono-fréquence</i>	70
II.6.4.2	<i>Excitation multifréquences</i>	70
II.6.4.3	<i>Excitation pulsée</i>	71
II.7	Capteurs magnétiques	72
II.7.1	Dispositif supraconducteur à interférence quantique (SQUID)	73
II.7.2	Le fluxgate	74
II.7.3	Effet Hall	74
II.7.4	Magnétorésistance anisotrope (AMR)	74
II.7.5	Magnétorésistance géante (GMR)	75
II.7.6	Magnéto-impédance géante (GMI)	75
II.8	Conclusion	76

II.1 Introduction

Le contrôle non destructif (CND) et l'évaluation non destructive (END) est un domaine d'étude interdisciplinaire qui met l'accent sur le processus d'inspection, de contrôle et d'évaluation des structures, des matériaux, des composants ou des assemblages pour la détection de la fatigue, le défaut ou les différentes caractéristiques sans compromettre l'utilité future de la pièce ou du système [83]. Il s'agit d'une technique de grande valeur qui est largement utilisée dans la fabrication en tant que système de secours permettant de contrôler ses processus, afin de garantir l'intégrité et la fiabilité des produits et également durant leurs services [84]. Les méthodes de CND comprennent une large gamme de catégories utilisées dans les sciences et l'industrie. Les noms de catégories de méthode font souvent référence au type de milieu de pénétration ou à l'équipement utilisé pour effectuer le contrôle, à savoir les méthodes de CND électromagnétique (CND-E), ces méthodes peuvent être classifiées selon leurs mode d'excitation de spécimen [85], de ce fait elles comprennent généralement plusieurs sous-méthodes basées sur la gamme de fréquence de travail, tel que la méthode : des fuites de flux magnétique, des courants de Foucault, des radiofréquences, des micro-ondes et de radiation Téra-hertz [86]. Dans ce chapitre, nous mettrons en évidence sur la méthode de contrôle par les courants de Foucault, qui est la plus largement utilisée dans différents secteurs économiques et dans la recherche académique.

II.2 Bref Historique de CND-CF

Historiquement, en 1879 Hughes a développé un système de balance à induction [87] pour mesurer la conductivité de divers matériaux basé sur le phénomène des courants de Foucault, leur approche consiste à utiliser le cuivre comme norme de référence, cette norme est connu à l'heure actuelle sous le nom « la norme international de cuivre-type recuit » en anglais « The International Annealed Copper Standard (IACS) » [88].

A la fin des années 1922, des dispositifs de contrôle basés sur les courants de Foucault ont été apparus dans l'industrie notamment la sidérurgie pour de

simples applications de tri. Durant cette période, la rareté significative de ceux-ci est due à l'insuffisance de l'instrumentation électronique appropriée. Par la suite, des développements ont été présentés au début des années 1950 par Förster et Breitfeld qui ont commencé l'époque moderne du CND-CF [89].

En plus, des équipements de mesure performants ont été conçus par Förster et leurs collègues qui reposent sur leurs développements théoriques et les essais expérimentaux [90]. Par la suite, grâce à ces équipements et les approches théoriques de Förster conduisent à agréer la méthode de CND-CF comme une procédure indispensable dans l'industrie, ainsi à une discipline d'ingénierie.

II.3 Principe du CND-CF

Le contrôle par courants de Foucault (CND-CF) repose sur les principes de l'induction électromagnétique. Un flux de courant de Foucault est obtenu en appliquant un courant électrique variable dans le temps (souvent sinusoïdal ou pulsé) à la bobine de contrôle souvent appelée capteur. Le champ magnétique résultant induit un flux de courant électrique lorsqu'il est placé à proximité d'un matériau électriquement conducteur. Les courants électriques circuleront dans le matériau conducteur selon des trajectoires concentriques circulaires (Le cas d'un matériau homogène isotrope), d'où le nom de courants de Foucault. Conformément à la loi de Lenz, les courants de Foucault produisent un champ magnétique secondaire qui interagit avec le champ magnétique primaire (FIGURE 2.1.). Le champ résultant (une addition vectorielle des champs magnétiques primaire et secondaire) induit un courant et une tension à travers les bornes de la bobine.

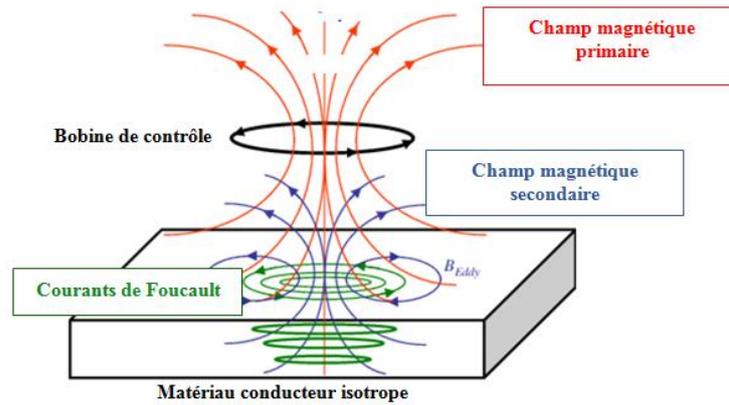


FIGURE 2.1. Principe de base du CND-CF [91].

En conséquence, les courants de Foucault peuvent être utilisés pour examiner d'éventuelles irrégularités (endommagement) ou inhomogénéités de matériaux qui altèrent ou interfèrent avec : la magnitude, la phase ou le trajet d'écoulement des courants de Foucault. De ce fait, une variation de l'amplitude ou du trajet des courants de Foucault entraîneront une perturbation du champ magnétique et une perturbation résultante de la tension de la bobine de contrôle (FIGURE 2.2.).

De plus, l'amplitude et la phase de Foucault induits est très pertinentes pour l'amplitude et de la fréquence du courant d'attaque, de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique, de la géométrie du spécimen, de l'homogénéité du matériau, du positionnement de la bobine et leur géométrie. [92-93].

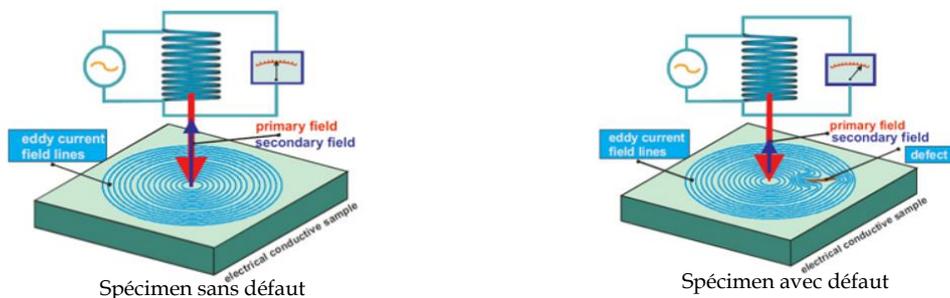


FIGURE 2.2. Distribution et perturbation des courants de Foucault [94].

II.4 Densité et profondeur de pénétration de CF

II.4.1 Densité de CF

Lorsque les courants de Foucault sont produits dans une pièce électriquement conductrice met sous inspection, les courants ne sont pas répartis uniformément dans celle-ci [95]. Au lieu de cela, ils ont tendance à se concentrer près de la surface adjacente à la bobine et à devenir moins intenses à mesure que la distance à la surface augmente. Finalement, l'effet des courants de Foucault devient négligeable et peut être ignoré au-dessus d'une certaine distance de la surface [96].

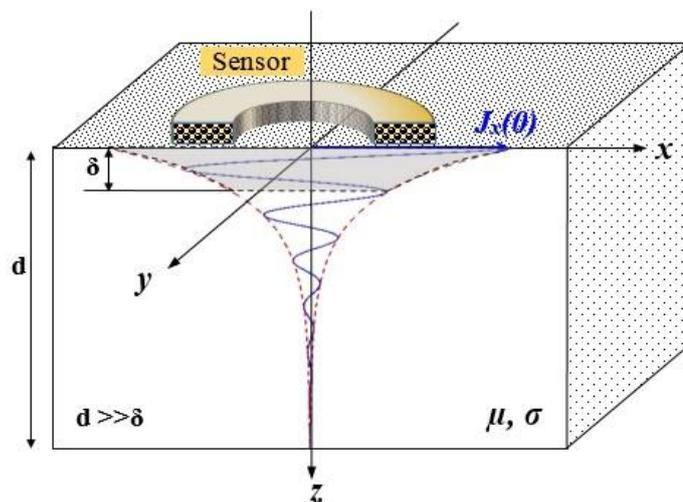


FIGURE 2.3. Répartition des courants de Foucault dans le matériau [97].

Pour mettre en évidence de la densité des courants de Foucault, on considère un champ magnétique uniforme généré par un capteur placé au-dessus d'un matériau conducteur homogène et isotrope (FIGURE 2.3.). Ainsi, le capteur est alimenté par un courant sinusoïdal parfait. De plus, on suppose que l'épaisseur du matériau est supérieure aux autres dimensions [98].

Le courant fourni peut être présenté par les deux composants dans le système de coordonnées cartésiennes (J_{sx} et J_{sy}); À titre d'illustration, nous recommandons la composante x . Par conséquent, à partir des équations de Maxwell, on peut exprimer le courant induit dans le matériau.

$$J_x(z) = J_1 e^{(1+j)kz} + J_2 e^{-(1+j)kz} \quad (2.1)$$

Où k est la constant de propagation au sein de matériau.

$$k = \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}} \quad (2.2)$$

μ , σ et ω sont respectivement la perméabilité magnétique, la conductivité électrique et la fréquence angulaire du courant d'alimentation.

Ainsi, si le z tend vers l'infini ($z \rightarrow \infty$), la densité de courant tend vers zéro ($J_1 = 0$). À la surface où $z = 0$, la densité de courant devient $J_x(0)$. Enfin, la densité de courant peut être présentée comme suit :

$$J_x(z) = J_x(0) e^{kz} e^{-jkz} \quad (2.3)$$

La densité des courants de Foucault ne dépend que la profondeur de pénétration, du temps, de l'épaisseur du spécimen, de l'espacement entre la cible et la bobine [99], ainsi que les dimensions de cette dernière notamment leur rayon [100].

II.4.2 Profondeur de pénétration standard

La sensibilité de CND-CF est extrêmement dépend de la distance de concentration des courants Foucault au sein du matériau, cette distance est La profondeur à laquelle la densité de courant de Foucault a diminué jusqu'à $1/e$, soit environ 37% de la densité de surface, souvent elle appelée la profondeur de pénétration standard (δ ou la peau de pénétration standard) [83].

En reposant sur la relation (2.3), la profondeur de pénétration standard δ est s'exprimer comme suit :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.4)$$

Toutefois la profondeur de pénétration standard ne représente pas la distance effective de circulation des courants de Foucault, néanmoins elle indique la couche la plus importante du point de vue de la sensibilité aux interactions avec les discontinuités [101].

Bien que les courants de Foucault pénètrent plus profondément qu'une profondeur de pénétration standard, ils diminuent rapidement avec la profondeur. À deux profondeurs standard de pénétration (2δ), la densité du courant de Foucault a diminué à $1/e^2$ carré ou 13,5% de la densité de surface. À trois profondeurs (3δ), la densité de courant de Foucault ne représente que 5% de la densité de surface [96].

II.5 Indicateurs exploitables en CND-CF

Eu égard à ce qui précède (Paragraphe II.3), l'indicateur principal de l'état de santé d'un spécimen soumis sous inspection par CND-CF est la variation du champ magnétique qui est transformé en variation de tension. De ce fait, la variation de tension peut se produire par un capteur inductif ou par un capteur magnétique [102]. Historiquement, Les capteurs inductifs sont les premiers éléments utilisés en industrie pour le CND-CF, ils sont appropriés pour la détection des défauts superficiels, près de surface et les structure de faible épaisseur dont la fréquence du courant d'alimentation est élevé (Haute densité des courants induits). La constitution principale du capteur inductif, est la bobine qui peut être employée en excitation et/ou en réception [103]. De plus, l'information de contrôle est d'obtenu par le rapport de tension/courant, ce dernier est appelé souvent l'impédance qui est mesuré aux bornes de la bobine. En revanche, pour détecter les défauts profonds dans les structures épaisses, les basses fréquences d'excitation sont requises pour que les courants de Foucault pénètrent assez profondément. Etant donné que la sensibilité des bobines d'inspection est proportionnelle à la fréquence d'excitation, en conséquence, les capteurs inductifs sont moins avantageux en raison de la diminution de la tension de mesure (Faible densité des courants induits) [104]. De ce fait, les capteurs magnétiques doivent être envisagés, ces capteurs sont basés sur la mesure directe de la densité du flux magnétique. Les capteurs les plus couramment utilisés en CND-CF sont : Dispositif supraconducteur à interférence quantique (SQUID), Fluxgates, capteur à effet Hall, magnétorésistance anisotrope (AMR), magnétorésistance géante (GMR) et magnéto-impédance géante (GMI) [105]. Malheureusement, certain capteurs sont

difficiles à utiliser dans de véritable applications industrielles en raison de la complexité et des couts élevés, de leurs robustesses insuffisantes, leurs faibles résolution latérale et leurs sensivité aux sources de bruit tels que les champs ambiants [102, 104]. Le TABLEAU 2.1 récapitule les spécifications de différents capteurs de CND-CF.

TABLEAU 2.1 Spécification de différents capteurs de CND-CF [105-104]

Capteurs CND-CF	Plage de champs magnétiques (T)						Plage de fréquences (Hz)		
	10 ⁻¹²	10 ⁻⁸	10 ⁻⁴	10 ⁰			DC	10 ³	10 ⁶
Capteur inductif (Bobine)									
SQUID									
Fluxgate									
Effet Hall									
AMR									
GMR									
GMI									

II.6 Capteurs inductifs

Les capteurs inductifs sont en principe constitués de plusieurs spires enroulées autour d'un noyau qui peut être composé d'air (FIGURE 2.4.a) ou de ferrite (FIGURE 2.4.b). L'intérêt de la ferrite est d'améliorer la sensibilité par sa faculté à canaliser le champ. Leurs simple conception et faible coût faites-en un outil indispensable pour des applications de CND-CF [103, 107].



Bobine sans noyau [103].



Bobine à noyau de ferrite [101].

FIGURE 2.4 Capteurs inductifs.

Le principe de fonctionnement de ces capteurs est basé sur le phénomène d'induction électromagnétique (Loi de Lenz-Faraday) [108], autrement dit, une force électromotrice « e » est induite dans un circuit fermé soumis à un flux magnétique « φ » (issu d'une induction magnétique variable) [103].

$$e = - \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (2.5)$$

A propos de cela, les capteurs inductifs ne ressentent pas l'induction magnétique statique. En outre, la tension mesurée aux bornes d'une bobine à noyau d'air est donnée en régime harmonique sous la forme suivante :

$$V(f) = N.A.2\pi f.B(f) \quad (2.6)$$

Ladite bobine, comportant N spires, à une surface moyenne « A », soumise à une induction magnétique « B » variable et supposé parfaitement sinusoïdale à une fréquence « f » donnée.

Par ailleurs, la sensibilité du capteur « S » peut être définie par le rapport de la tension/ le champ magnétique [103], comme montré ci-après.

$$S = \frac{V}{B} = N.A.2\pi f \quad (2.6)$$

Etant donné de l'équation (2.6), la sensibilité du capteur (Bobine de contrôle) est proportionnelle à : la géométrie de la bobine, la fréquence d'excitation et à la quantité de bobinage (Nombre de spires).

II.6.1 Configurations de capteurs

Il existe plusieurs configurations de mettre en place des capteurs afin d'effectuer un CND-CF envisageable pour atteindre aux résultats convenables. De ce fait, les configurations de base qui peuvent être réalisés en CND-CF sont présentées ci-après.

II.6.1.1 Capteur à double fonctions

La plus simple configuration est celui du capteur à double fonctions (capteur à réflexion) [109], ce dernier est constitué d'une seule bobine qui joue le rôle d'une part un émetteur du champ magnétique (champ primaire), d'autre part un récepteur de la réaction du champ magnétique (champ secondaire) généré par la présence de la pièce (FIGURE 2.5). L'exploitation des résultats se fait, par la mesure de l'impédance équivalente du capteur en régime harmonique [110].

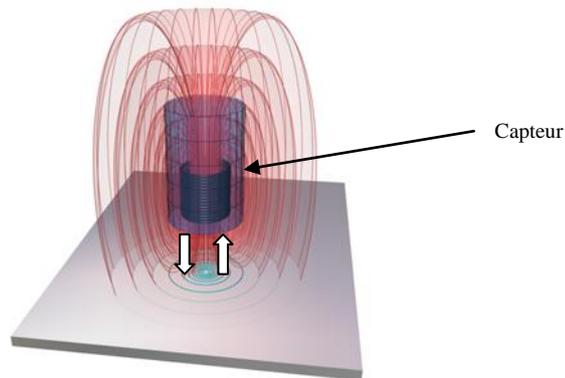


FIGURE 2.5. Capteur à double fonctions (Image issue de [111]).

II.6.1.2 Capteur à fonctions séparées

Au contraire du capteur à double fonctions, le capteur à fonction séparées est constitué d'au moins deux bobines distinctes, l'une peut être conçu pour crée le champ d'excitation de la cible (bobine émettrice) et l'autre pour recevoir le champ secondaire généré par la cible (bobine réceptrice) avec une sensibilité suffisante. L'avantage offert par ce type de capteur est l'optimisation de la conception des bobines pour augmenter la sensibilité du contrôle. L'impédance de la bobine émettrice peut être ajustée pour produire un champ magnétique primaire fort et uniforme en ajustant des paramètres tels que le diamètre de la bobine, le diamètre du fil et le nombre de spires. En autre, la bobine réceptrice peut être conçue pour capter le maximum du champ en minimisant les sources de bruit et en adaptant la taille de la bobine à la taille du défaut [109].

De plus, la bobine réceptrice peut se remplacer par un capteur magnétique tel que le GMR [112].

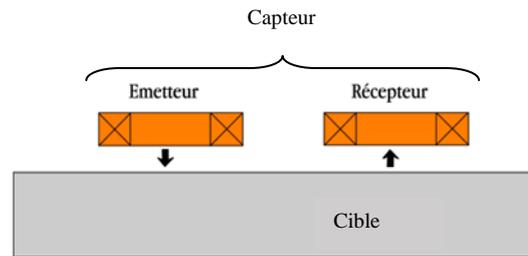


FIGURE 2.6. Présentation schématisée (Image issue de [110]).

II.6.1.3 Capteur à fonctions différentielles

Le capteur à fonctions différentielles est constitué d'au moins deux bobines, cette configuration est mise en œuvre pour affranchir les perturbations produites par le déplacement ou la rotation du capteur à savoir la variation de la distance capteur-cible (Lift-off) [113]. Généralement, les deux bobines constituant le capteur sont identiques [110] et parfois ceux qui assurent la fonction différentielle, sont identiques dans le cas où le capteur est constitué par plus de deux bobine [114].

La FIGURE 2.7.a représente le capteur à fonction différentielle qui constitué par deux bobines identiques, leur fonctionnement est basé sur la mesure simultanément de l'écart de l'impédance relatif aux deux bobines dont leurs fonctionnement est similaire au fonctionnement du capteur à fonction double. Ces bobines sont placées dans des endroits différents. Par ailleurs, une autre configuration de capteur qui peut être réalisée par la combinaison de la fonction séparé et la fonction différentielle. En conséquence, la FIGURE 2.7.b. monte un capteur à fonction différentielle qui constitué par trois bobines dont l'une est émettrice et les autre réceptrices. Ces derniers sont identique et situées dans la quelle qui agit comme émetteur du champ magnétique.

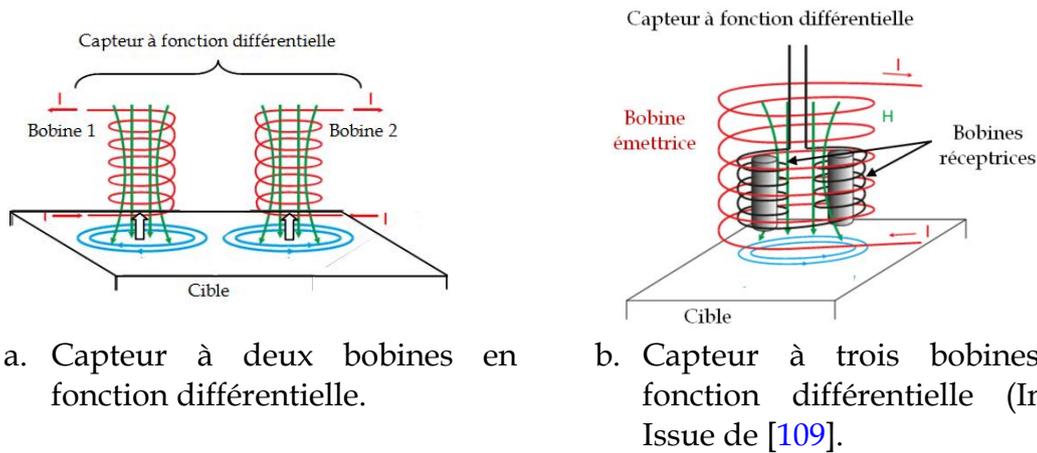


FIGURE 2.7. Capteur à fonction différentielle.

II.6.2 Types de bobines

Comme étant donné auparavant, la bobine est l'élément de base de la constitution du capteur inductif, qui peut agir comme émetteur et/ou récepteur du champ magnétique. Du point de vue fabrication, il existe deux principales classes de bobine.

II.6.2.1 Bobine classique

Généralement, la bobine classique est fabriquée par l'enroulement hélicoïdal d'un fil conducteur souvent en cuivre, émaillé autour d'un noyau (FIGURE 2.8.) qui peut être en matière diélectrique (silicone, air) ou en matière magnétique (ferrite,...) [115]. L'intérêt de cette dernière est de focaliser le champ magnétique dans l'endroit d'inspection, ainsi d'améliorer la sensibilité du capteur [103].

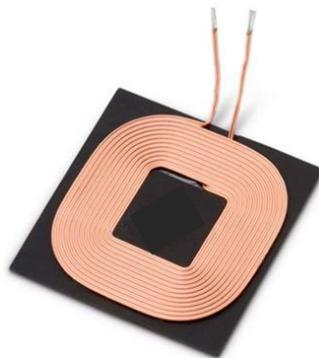


FIGURE 2.8. Bobine classique plate à fil de cuivre (Image issue de [116]).

II.6.2.2 Bobine gravée (imprimée)

Généralement, les bobines gravées sont des micro-bobines usinées par le procédé de micro-moulage de cuivre, ce procédé consiste principalement de la lithographie optique et la galvanoplastie du cuivre à travers des moules en résine photosensible [117]. Habituellement, ce type de bobine est utilisé pour construire un capteur à multi-bobines (capteur matriciel) pour rendre le processus de CND-CF fiable et rapide [118] (FIGURE 2.9.). De plus, les multi-bobines permettent de mettre en œuvre divers configuration de fonctionnement (double, séparée et différentielle) simultanément et permettent ainsi d'augmenter la sensibilité du capteur par sa flexibilité afin d'inspecter les structure de forme complexe [119-120] et réduire l'effort mécanique de rotation pour prédire les angles d'orientation des fibres au sein de matériau le composite stratifié [120-121].

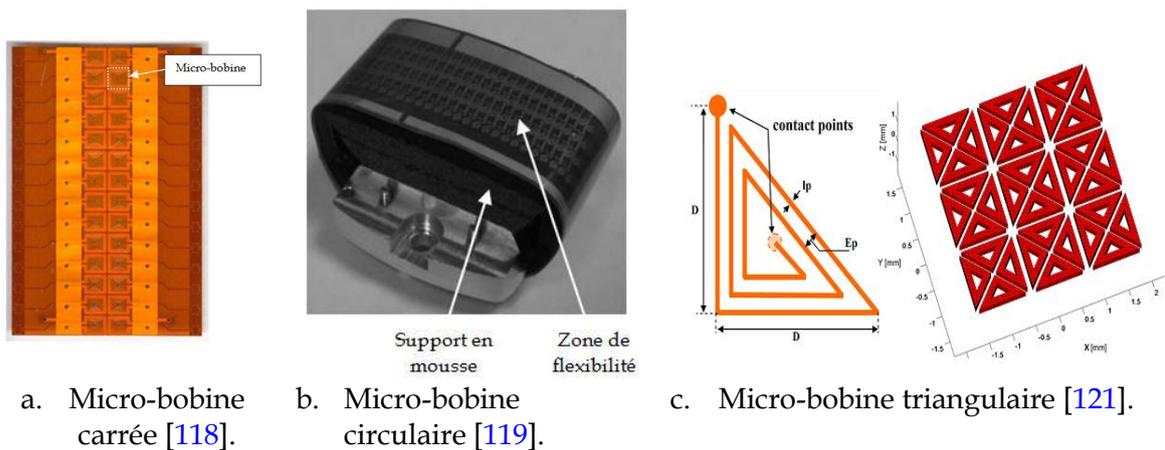


FIGURE 2.9. Multi-bobines gravées.

II.6.3 Impédance du capteur

Compte tenu de ce qui précède (Paragraphe II.5), l'impédance (Z) du capteur est la grandeur mesurable qui exprime les informations sur l'état de santé de la cible [96]. Selon la loi d'Ohm, elle peut se quantifier par le rapport tension/courant mesuré aux bornes de la bobine et caractérisé par deux grandeurs : la composante résistive (R) qui englobe les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans la cible et les pertes internes du bobinage d'excitation, et le

terme inductif (X) qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes du champ magnétique émises par le capteur [101, 123].

$$Z = \frac{V}{I} = R + jX, \quad X = L\omega \quad (2.7)$$

Où L contient à la fois l'inductance propre de la bobine et l'inductance mutuelle, et ω présente la pulsation angulaire du courant d'excitation.

L'angle de déphasage (θ) entre la tension et le courant d'excitation est donné par :

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (2.8)$$

Par ailleurs, l'impédance du capteur peut se déduire à partir d'une représentation simplifiée (FIGURE 2.10.) du système de CND-CF comme suit [83, 97, 124] :

$$Z = R_0 + \frac{RM^2\omega^2}{R^2 + L^2\omega^2} + j\left[L_0\omega - \frac{LM^2\omega^3}{R^2 + L^2\omega^2}\right] \quad (2.9)$$

R_0 , L_0 , R , L et M sont respectivement la résistance, l'inductance propre de la bobine d'excitation, la résistance, l'inductance du circuit équivalent relatif à la cible (bobine virtuelle) et l'inductance mutuelle.

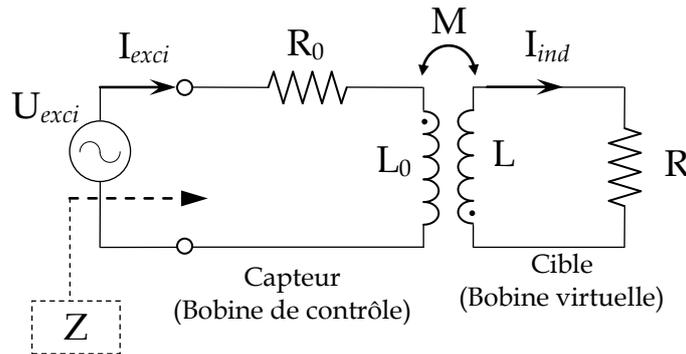


FIGURE 2.10. Circuit équivalent du système de CND-CF.

II.6.3.1 Impédance normalisée

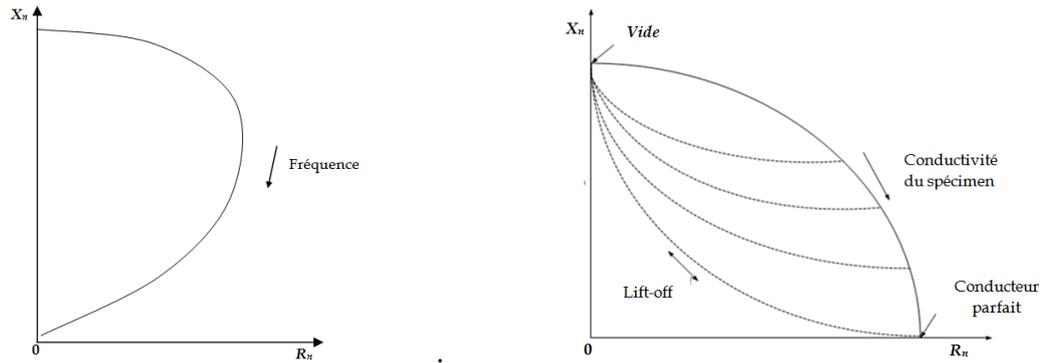
La représentation normalisée de l'impédance est sollicitée afin de corriger les effets capacitifs parasites du capteur en isolant la réactance (X_0) du capteur à vide [125], ainsi pour exposer que les perturbations dues à la présence de spécimens [101]. L'impédance normalisée (Z_n) peut s'exprimer comme suit :

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad (2.10)$$

$$\text{Où} \quad \left. \begin{aligned} Z_0 &= R_0 + jX_0 \\ R_n &= \frac{R - R_0}{X_0} \\ X_n &= \frac{X}{X_0} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Z_0 est l'impédance mesurée aux bornes de la bobine sans la présence du spécimen (à vide).

A titre d'illustration, la FIGURE 2.11.a. montre comment une courbe d'impédance normalisée peut apparaître en réponse au changement de la fréquence d'excitation. Probablement, c'est la réponse en fréquence idéale lorsque les conditions de mesure sont fixes. Cependant, la distorsion se produira s'il y a des changements dans la conductivité de l'échantillon et la configuration de la bobine, ou des dommages dans les spécimens. Il faut des compétences pratiques et de l'expérience pour distinguer ces facteurs en utilisant cette courbe.



a. Réponse en fréquence (spécimen conducteur, non magnétique).

b. Réponse en conductivité et en lift-off.

FIGURE 2.11. Plan d'impédance normalisée [96].

La FIGURE 2.11.b. montre comment l'impédance de la bobine réagit à la conductivité et à l'espacement capteur-cible (Lift-off) lorsqu'elle est placée au-dessus d'un spécimen conducteur. La ligne de conductivité (trait plein) illustre l'influence de la conductivité de l'échantillon sur l'impédance normalisée, où la fréquence et le lift-off sont fixes. Selon cette figure, on peut constater que lorsque la bobine est mise en l'air, la courbe continue va vers le sommet, en supposant une bobine idéale; tandis que lorsque la conductivité de l'échantillon augmente, la courbe va au bas de l'échelle. Les lignes de lift-off (lignes pointillées) de la FIGURE 2.11.b. donnent des informations sur le lift-off de la bobine à quatre valeurs de la conductivité. Lorsque la fréquence d'excitation et la conductivité de spécimen sont fixes, une modification de lift-off peut entraîner la variation de l'impédance de la bobine uniquement sur l'une des lignes pointillées (pas nécessairement celles indiquées dans la FIGURE 2.11.b.) correspondant à une valeur de conductivité spécifique. Les lignes pointillées atteignent finalement la ligne de conductivité lorsque la bobine est mise en contact avec le spécimen, ce qui signifie que le lift-off est nul [96].

II.6.4 Signaux d'excitation du capteur

Pratiquement le type des signaux d'excitation du capteur est essentiel pour atteindre au CNDF-CF fiable et adéquat. A cet effet on distingue trois types d'excitation pour les bobines des capteurs CF.

II.6.4.1 Excitation mono-fréquence

Habituellement, les courants de Foucault sont obtenus par un courant d'excitation sinusoïdal de fréquence donnée. Toutefois, Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. Elle devra cependant se situer dans une gamme raisonnable. En effet, pour une fréquence trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible. Ainsi, une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter-spires de la sonde. Celles-ci provoquent des résonances et tendent à court-circuiter le circuit inductif [110]. Généralement, ce mode d'excitation est employé pour détecter les défauts en déplacement du capteur [126-128] et en rotation pour définir le sens d'orientation des fibres au sein de matériaux composites stratifiés [129-130].

II.6.4.2 Excitation multifréquences

Le CND-CF à l'excitation mono-fréquence offre une excellente sensibilité aux différents types de problèmes dans des conditions normales. Cependant, les conditions sont souvent compliquées par un certain nombre de facteurs et, par conséquent, les besoins d'inspection ne peuvent pas être résolus efficacement par des examens en mono-fréquences. De ce fait, pour surmonter la plupart de ces limitations (Caractérisation des spécimens en termes de propriétés physiques et géométrique, ainsi que les discontinuités en matière), l'excitation en multifréquence est appropriée [131-132]. Ce mode d'excitation consiste à collecter des données simultanément en utilisant plusieurs fréquences d'excitation. De plus, L'utilisation de n fréquences permet d'avoir $2k$ informations réelles et de réduire presque $2k-1$ de grandeurs perturbatrices (l'effet de lift-off, la température, ...) [115]. Cette technique est très utilisée pour les problèmes inverses en vue de

déterminer les paramètres d'une cible [133] malgré la présence de grandeurs perturbatrices [134]. Il existe deux méthodes pour appliquer l'excitation multifréquence aux capteurs, soit en séquence dont les signaux à multiple de fréquences sont appliqués par plusieurs intervalles de temps (FIGURE 2.12.a) avec la technologie de multiplexage; l'inconvénient de cette méthode réside dans le temps important d'acquisition qui ralentit la mesure. Soit simultanément dans laquelle, tous les signaux de fréquences sont injectés en même temps comme illustré la FIGURE 2.12.b. Néanmoins cette méthode nécessite un dispositif de mesure compliqué et coûteux. En pratique, compte tenu de la complexité des appareils multifréquences le nombre de fréquences dépasse rarement quatre.

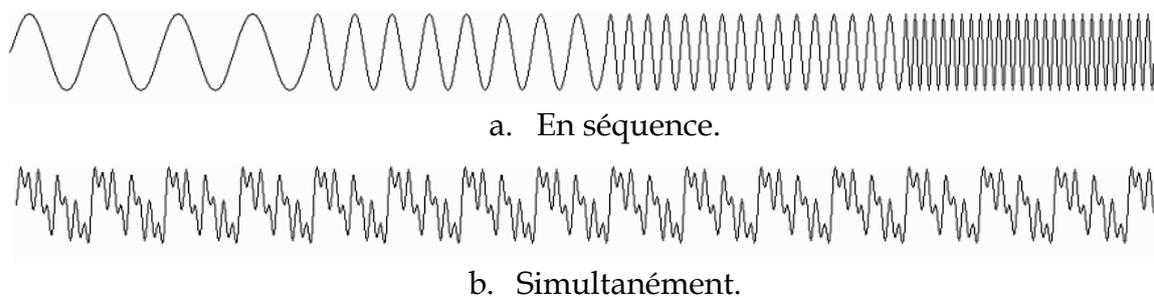


FIGURE 2.12. Excitation multifréquence [124].

II.6.4.3 Excitation pulsée

Le mode d'excitation pulsée représente une alternative à l'excitation multifréquence. Elle consiste à émettre un champ magnétique de large bande fréquentielle en excitant le capteur par un signal impulsionnel (signal à durée finie). L'inspection avec excitation pulsée a été mise en œuvre dans les années cinquante pour une l'évaluation d'épaisseur de revêtement métallique [135], de plus elle a été également appliquée pour la détection de défauts enfouis [136]. Par ailleurs, les signaux impulsionnels peuvent être de forme rectangulaire, triangulaire ou demi-sinusoïdale. Dans ce type de contrôle, c'est la variation temporelle des signaux qui est utilisée [99]. Étant donné le spectre du signal d'excitation, une telle méthode est plus riche en informations qu'un CND-CF

mono-fréquentiel ou multi-fréquentiel. Cependant, la quantité d'informations recueillies dans la pratique dépend fortement du traitement des signaux et du bruit qui est difficilement filtrable car les signaux sont de large bande [115], en conséquence la méthode nécessite une analyse compliquée [98]. En outre, les capteurs inductifs ne conviennent pas à la détection, car ils ne sont pas sensibles aux variations lentes du champ magnétique. Une meilleure solution consiste à utiliser des capteurs magnétiques [137].

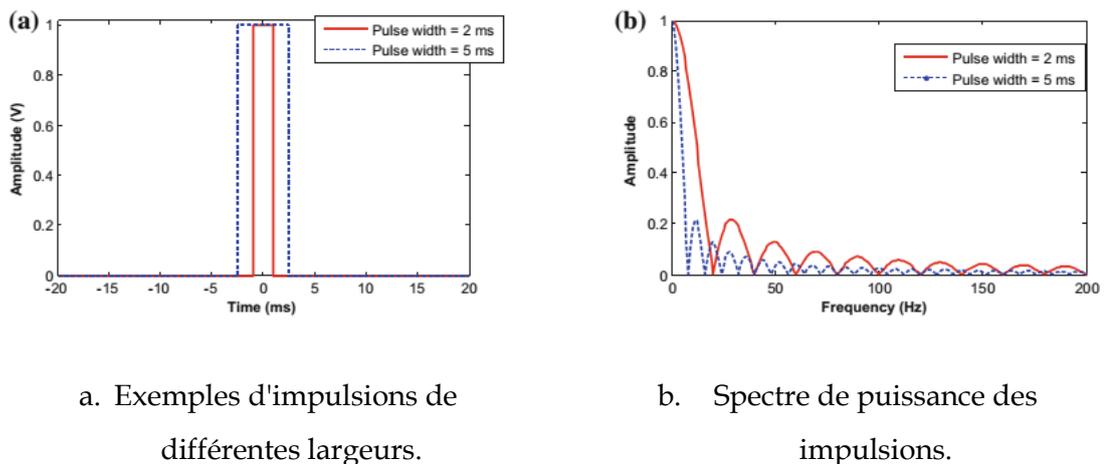


FIGURE 2.13. Excitation pulsée [138].

II.7 Capteurs magnétiques

Pour surmonter les limitations de CND-CF par capteurs inductifs en basse fréquence, les capteurs magnétiques sont appropriés. Il existe une large disponibilité de capteurs magnétiques sur le marché. Toutefois, les applications de ces capteurs sont très variables non seulement en fonction de leur coût mais dépendant aussi de plusieurs facteurs tels que la sensibilité, la résolution et la plage de mesure. Nous ne présentons pas ici une liste exhaustive de capteurs magnétiques, mais quelques exemples afin de comparer entre eux les principales caractéristiques.

II.7.1 Dispositif supraconducteur à interférence quantique (SQUID)

Les dispositifs supraconducteurs d'interférence quantique (SQUID) fonctionnent généralement à des températures cryogéniques, où du liquide de refroidissement est nécessaire. Au-dessous d'une certaine température, les supraconducteurs auront une résistance nulle en conduisant un courant continu, en outre un anneau supraconducteur ne contiendra que des niveaux spécifiques de flux magnétique liés à la théorie quantique. Les SQUID sont devenus disponibles sur le marché il y a environ 40 ans et ont commencé à être utilisés dans les essais non destructifs dans les années 1980, grâce à leur excellente sensibilité. Le SQUID est le détecteur de flux magnétique le plus sensible, l'application de ce capteur est décrite de manière approfondie par Jenks et al [139].

Les SQUID ont une très grande sensibilité au champ magnétique, presque indépendante de la fréquence [140]. Les avantages du SQUID sont particulièrement évidents lorsqu'une faible fréquence d'excitation est requise. Une comparaison entre les systèmes à courants de Foucault conventionnels (à capteur inductif) et le système basé sur SQUID montre une amélioration du rapport signal sur bruit jusqu'à trois ordres de grandeur pour les fissures d'une profondeur supérieure à 13 mm. Il permet de détecter de faibles changements de champ en présence de grands champs de fond, produits par exemple par des effets de bord ou des inhomogénéités de conductivité. Les autres avantages de SQUID comprennent une large plage dynamique (> 80 dB) et leur nature intrinsèquement quantitative [139].

Des SQUID fonctionnant à la température ambiante ont également été développés. Un instrument basé sur le SQUID à température de transition élevée (T_c élevé), capable de contrôler les fissures et la corrosion à travers des couches d'aluminium d'épaisseur combinée de 50 mm, a été construit avec succès [141].

Bien que les CND à courants de Foucault basés sur SQUID aient des capacités prometteuses tels que la haute sensibilité de mesurand dans la gamme de champ jusqu'à 10^{-15} T, ses applications en CND sont encore limitées en raison de son aspect pratique et de son coût est encore très élevé [138].

II.7.2 Le fluxgate

Le capteur de type « fluxgate » a été initialement développés pour la fabrication de compas des systèmes de navigation [142]. Il est constitué d'un noyau ferromagnétique avec deux bobinages montés sur ce noyau [143]. L'idée de base est d'exploiter la saturation du cycle d'hystérésis du noyau [103], de ce fait, le premier bobinage est alimenté par un courant alternatif permettant de saturer périodiquement le matériau. Lorsqu'un champ magnétique externe s'ajoute à ce champ d'excitation, la saturation d'aimantation n'est plus symétrique et la tension induite est déformée et mesurée par le deuxième bobinage [106].

II.7.3 Effet Hall

Les capteurs à effet Hall, basés sur des phénomènes magnétiques, sont l'une des technologies de détection les plus couramment utilisées aujourd'hui [144], l'effet Hall consiste à apparaître d'une différence de potentiel aux bornes d'un matériau conducteur ou semi-conducteur souvent une piste d'épaisseur comprise entre 0.4 et 100 μm , lorsqu'un courant traverse ce matériau et soumis à une induction magnétique appliquée perpendiculairement. En conséquence, due à la force de Lorentz il apparaît une différence de potentiel dans la direction perpendiculaire à celle de l'induction et à celle du courant, cette tension est dite de Hall [103]. A cet effet, le capteur à effet de Hall permet de détecter le champ magnétique en mesurant la tension créée dans le matériau [145]

II.7.4 Magnétorésistance anisotrope (AMR)

Le phénomène de la magnétorésistance anisotrope a été découvert en 1857 par William Thomson. Le capteur à magnétorésistance anisotrope est caractérisé par un film ferromagnétique mono-domaine et anisotropie uni-axiale très mince, déposé sur un matériau conducteur. Cela permet de détecter un champ magnétique orienté dans le plan grâce à la variation de la résistance du matériau avec l'angle entre l'aimantation et le champ appliqué [146].

II.7.5 Magnétorésistance géante (GMR)

À la fin des années 80, le phénomène de la magnétorésistance géante (GMR) a été découvert indépendamment par Albert Fert et Peter Grünberg [147-148] (Fert a travaillé à la température de l'hélium liquide (4,2 K) et Grünberg à température ambiante où l'effet était beaucoup plus faible.). En 2007, ces deux physiciens ont reçu conjointement le prix Nobel de physique pour leur découverte de la GMR et la contribution au développement de l'électronique du spin qui a été apportée.

Couramment, le capteur GMR est constitué par un empilement de couches, une couche conductrice est disposée entre deux couches ferromagnétiques à magnétisation parallèle ou antiparallèle, une couche piégée dont l'aimantation a une direction fixe et une couche libre dont l'aimantation peut fluctuer. Cet effet présente une forte variation de la résistance lorsque la configuration des deux aimantations est modifiée (les aimantations dans les deux couches ferromagnétiques s'alignent) par l'application d'un champ magnétique. Les capteurs à GMR sont largement utilisés dans le domaine de l'enregistrement magnétique (ex. tête de lecture de disque dur) [106].

II.7.6 Magnéto-impédance géante (GMI)

Depuis la découverte de l'effet de magnéto-impédance géant (GMI) dans les fils amorphes à base de FeCoSiB [149], les capteurs GMI ont été largement étudiés en raison de leur sensibilité élevée, réponse rapide et capacité d'intégration électronique. En raison de ces avantages, ils ont été adoptés dans des applications de CND-CF [150].

Le capteur GMI permet de mesurer des champs magnétiques faibles sur une large bande passante. Il a pour origine d'une variation de l'épaisseur de peau dans le matériau avec un champ magnétique appliqué, tandis que le matériau est excité par un courant alternatif à haute fréquence, ce qui entraîne une variation de l'impédance du capteur [106].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, la discussion a été portée principalement sur un bref historique sur le CND-CF, ainsi que leur principe de fonctionnement. Alors, par la génération des courants de Foucault au sein du spécimen conducteur mis sous inspection à l'aide d'un capteur inductif placé à proximité de celui-ci, l'état de santé et les propriétés du spécimen peuvent être distingué à travers de l'interaction du champ magnétique. Par ailleurs, la fiabilité de CND-CF dépend de plusieurs paramètres, tels que la densité et la profondeur de pénétration des courants de Foucault, les indicateurs à exploiter pour l'analyse, les propriétés des capteurs de mesures, les signaux d'excitation et la gamme de fréquence qui permet de choisir les capteurs adéquats. Dans certaines applications industrielles, les capteurs inductifs sont appropriés dont la fréquence d'excitation est élevée. En revanche, dans le régime basse fréquence ou le champ magnétique est faible, les capteurs magnétiques sont plus adaptés.

Dans le Chapitre suivant, nous évoquerons la modélisation de CND-CF des matériaux composites anisotropes par la méthode des volumes finis en 3D.

Chapitre III. Modélisation et formulation mathématique de problème électromagnétique

III.1	Introduction	78
III.2	Description du problème de CND-CF	78
III.2.1	Les équations de Maxwell	79
III.2.2	Conditions de passage	81
III.2.3	Conditions aux limites	82
III.2.4	Simplification des équations	83
III.3	Formulation électromagnétique	83
III.3.1	Formulation A-V	84
III.4	Tenseurs de propriétés électriques d'un stratifié anisotrope	87
III.5	Mise en œuvre de la MVF	90
III.5.1	Modélisation numérique 3D	91
III.5.2	Développement de $-v_0 \oint_s \nabla \mathbf{A} \, ds$	92
III.5.3	Développement de $j\omega \iiint_{PE_p} [\tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] dv^*$	94
III.5.4	Développement du terme de source $\iiint_{PE_p} \mathbf{J}_s dv^*$	95
III.5.5	Développement de $-j\omega \oint_s \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v) \, ds$	95
III.5.5.1	<i>Développement du sous terme ψ_1</i>	95
III.5.5.2	<i>Développement du sous terme ψ_2</i>	97
III.5.6	Système algébrique final	97
III.6	Conclusion	98

III.1 Introduction

En raison de nombreuses applications intéressantes en ingénierie, notamment l'électrique, la solution analytique et/ou numérique des problèmes liés aux courants de Foucault est devenue un domaine de recherche important [151]. Le développement d'un modèle qui réagit par reflète d'une manière similaire au dispositif étudié (problème) permettra de prédire les résultats attendu [115]. De plus, les modèles (analytiques ou numériques) aident à optimiser des dispositifs, de réduire le temps et le coût de leurs conception [152]. Dans ce contexte, des modèles analytiques ont été menés pour l'étude des problèmes de CND-CF des matériaux isotropes [153], ainsi que pour les matériaux anisotropes [125]. En outre, les méthodes de modélisation numérique sont appropriées au traitement des problèmes de forme complexe, telles que la méthode des éléments finis (MEF) [154], la méthode de différences finis (MDF) [155] et la méthode des volumes finis (MVF) [152]. Cette dernière, est plus réponde dans divers problèmes d'ingénierie [156, 157], de plus, elle est adaptée pour les lois de conservation [158]. Egalement, la MVF offre l'intérêt de la simplicité de sa mise en œuvre et encore moins de consommation de mémoire de stockage [159-161], sans oublier sa précision de calcul [162-167].

Dans ce chapitre, nous décrivons le comportement électromagnétique des matériaux composites anisotropes en problèmes de CND-CF par la représentation du modèle magnétodynamique 3D dont la formulation en potentiels A-V est employée. Ensuite, la mise en œuvre de la méthode MVF où le maillage prisme est pris en compte.

III.2 Description du problème de CND-CF

Les problèmes de CND liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du spécimen en matériau composite conducteur et d'une source de courant « J_s », comme illustre la FIGURE 3.1. Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω , ce dernier est délimité par la frontière Γ . En outre, le spécimen est caractérisé par une conductivité électrique

anisotrope représentée sous forme d'un tenseur « $\bar{\sigma}$ » [167-171], une perméabilité relative $\mu_r = 1$ et une permittivité relative $\epsilon_r = 1$.

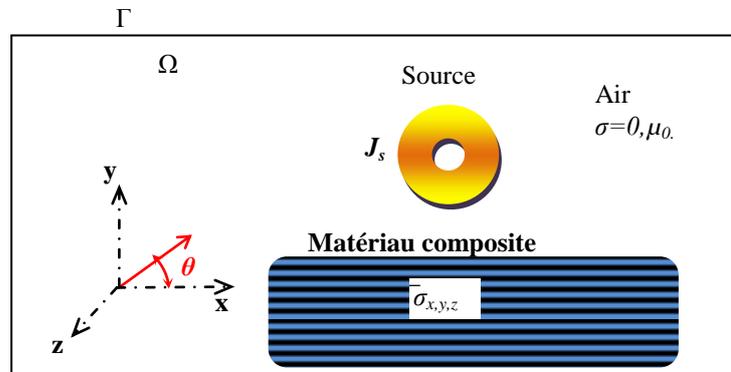


FIGURE 3.1. Représentation schématique du problème étudié.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les courants de Foucault développés au sein d'un spécimen en matériaux composites de nature anisotrope à l'effet de la présence d'un capteur inductif (Bobine) à double fonction, en conséquence l'exploitation de la variation de l'impédance du capteur. Précisément, il s'agit d'étudier le comportement électromagnétique du matériau composite en fonction de leur taux d'anisotropie, de caractériser les propriétés physiques et géométriques de la structure, ainsi que les éventuels défauts qu'elle pourrait contenir. Toutefois, nous ne tenons pas compte des effets de peau et de proximité au niveau de l'inducteur.

III.2.1 Les équations de Maxwell

En 1875, James Clerk Maxwell (1831-1879) a formulé une description complète des phénomènes électromagnétiques par six grandeurs citées ci-après. Généralement, ses grandeurs dépendent, du temps et de l'espace.

Deux grandeurs vectorielles magnétiques

H : Champ magnétique ($A.m^{-1}$)

B : Induction magnétique (T)

Trois grandeurs vectorielles électriques

\mathbf{E} : Champ électrique ($V.m^{-1}$)

\mathbf{D} : Induction électrique ($C.m^{-2}$)

\mathbf{J} : Densité de courant électrique de conduction ($A.m^{-2}$)

Et la densité volumique des charges électriques libres ρ ($C.m^{-3}$).

Les équations de Maxwell lient entre eux les champs électrique et magnétique. Ce sont des équations locales dites souvent les lois fondamentales de l'électromagnétisme, qui s'écrivent comme suit :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B} \quad (\text{Equation de Maxwell-Faraday}) \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_t \quad (\text{Equation de Maxwell-Ampère}) \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Conservation du flux magnétique}) \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{Equation de Maxwell-Gauss}) \quad (3.4)$$

Dans les équations (3.1), ∂_t symbolise la dérivée par rapport au temps.

A ces équations, les lois constitutives qui caractérisent les milieux considérés doivent être associées, dans ce cas la vitesse mécanique de déplacement et illuminée.

$$\mathbf{B} = \bar{\mu} \mathbf{H} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{J} = \bar{\sigma} \mathbf{E} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{D} = \bar{\varepsilon} \mathbf{E} \quad (3.7)$$

Dans ces équations :

$\bar{\mu}$: Tenseur de la perméabilité magnétique ($H.m^{-1}$),

$\bar{\sigma}$: Tenseur de la conductivité électrique ($S.m^{-1}$),

$\bar{\varepsilon}$: Tenseur de la permittivité électrique ($F.m^{-1}$).

Au sujet du problème étudié, les matériaux modélisés sont caractérisés par la perméabilité du vide, alors

$$\bar{\mu} = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad (H.m^{-1}) \quad (3.8)$$

Et les tenseurs de la conductivité et la permittivité électrique des matériaux composites anisotropes peuvent être représenté respectivement comme suit :

$$\bar{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Dans la plupart des travaux de modélisation les sources d'alimentation sont supposées produites par un générateur de courant parfait « \mathbf{J}_s », ainsi on peut décomposer le courant total « \mathbf{J}_t » comme suit :

$$\mathbf{J}_t = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_d \quad (3.11)$$

Où

$$\mathbf{J}_e = \bar{\sigma}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3.12)$$

$$\mathbf{J}_d = \partial_t \mathbf{D} \quad (3.13)$$

\mathbf{J}_s , \mathbf{J}_e , \mathbf{J}_d et \mathbf{v} sont respectivement, la densité du courant imposé dans l'inducteur, la densité des courants induits, la densité des courants de déplacement et le vecteur de vitesse. Le terme $\bar{\sigma}\mathbf{E}$ représente le courant de conduction résultant du champ électrique \mathbf{E} , $\bar{\sigma}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ exprime le courant résultant du mouvement. Ce dernier est considéré nul.

Par la combinaison des équations (3.7), (3.11), (3.12), (3.13) on trouve :

$$\mathbf{J}_t = \mathbf{J}_s + \bar{\sigma}\mathbf{E} + \bar{\varepsilon} \partial_t \mathbf{E} \quad (3.14)$$

III.2.2 Conditions de passage

Les grandeurs de champs subissent des discontinuités lors du passage entre deux milieux de propriétés différentes (FIGURE 3.2.). Les conditions de passage ou de transmission ou s'écrivent alors à l'interface entre deux milieux [21]:

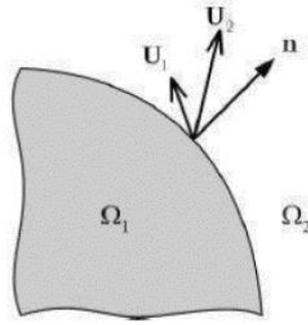


FIGURE 3.2. Interface entre deux milieux.

$$(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) \cdot \mathbf{n} = \rho_s \quad (3.15)$$

$$(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (3.16)$$

$$(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \times \mathbf{n} = \mathbf{K}_s \quad (3.17)$$

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (3.18)$$

Avec ρ_s la densité surfacique des charges, \mathbf{K}_s la densité surfacique de courant. \mathbf{n} est le vecteur unitaire normal dirigé du milieu 1 vers le milieu 2.

III.2.3 Conditions aux limites

La résolution du système composé par les lois fondamentales de l'électromagnétisme (Equations de Maxwell) et les lois de comportement admet une infinité de solutions. Pour assurer l'unicité de la solution, des conditions aux limites sont imposées.

$$(\mathbf{H} \times \mathbf{n})|_{\Gamma} = \mathbf{0} \quad (3.19)$$

$$(\mathbf{E} \times \mathbf{n})|_{\Gamma} = \mathbf{0} \quad (3.20)$$

$$(\mathbf{J} \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma} = 0 \quad (3.21)$$

$$(\mathbf{B} \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma} = 0 \quad (3.22)$$

III.2.4 Simplification des équations

Au sujet du présent travail, quelques simplifications sont possibles, alors :

De l'équation (3.2) et (3.4) on peut déduire que la densité de courant est à flux conservatif :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \partial_t \rho = 0 \quad (3.23)$$

Les charges volumiques sont négligées ($\rho=0$). Donc (3.23) devient :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.24)$$

De plus, si on considère le cas où les sources de courants sont parfaitement de forme sinusoïdale, alors on peut employer la représentation en régime harmonique de pulsation ω .

$$X(t) = X e^{j\omega t} \quad (3.25)$$

Avec $j^2 = -1$.

Donc, la dérivée par rapport au temps sera remplacée par :

$$\partial_t X = -j\omega X \quad (3.26)$$

Alors l'équation (3.14) devient :

$$\mathbf{J}_t = \mathbf{J}_s + (\bar{\sigma} + j\omega\bar{\epsilon})\mathbf{E} \quad (3.27)$$

Pour simplifier l'écriture nous intégrons le terme « $j\omega\bar{\epsilon}$ » dans le terme « $\bar{\sigma}$ » et le résultat sera noté par « $\tilde{\sigma}$ ».

III.3 Formulation électromagnétique

La combinaison entre les équations de Maxwell, les relations constitutives et les relations de passage permet de formuler le problème électromagnétique suivant différentes variables d'états [21]. De ce fait, relatif au type du problème étudié, différentes formulations permettant de calculer la distribution des champs, peuvent être utilisées [152]. De nombreuses formulations ont déjà été développées en deux ou en trois dimensions à savoir, les formulations en potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} ou champ électrique \mathbf{E} et les formulations en champ magnétique

\mathbf{H} ou potentiel vecteur électrique \mathbf{T} . Ainsi les formulations en potentiels sont les plus utilisées. En conséquence, les principales formulations rencontrées peuvent être classées en deux grandes familles : la formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique \mathbf{A} - V [172], et la formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique \mathbf{T} - φ [173].

La formulation \mathbf{A} - V est naturellement tient compte la conservation du flux magnétique, toutefois la conservation du courant électrique n'est pas tien en considération. Par contre, la formulation \mathbf{T} - φ est naturellement tient compte de la conservation du courant électrique, cependant la conservation du flux magnétique n'est pas tien en considération. Par ailleurs, l'introduction des potentiels scalaires nous permet d'imposer explicitement les conditions de conservations du courant électrique et du flux magnétique [155].

De plus, Albertz [174] a proposé la combinaison entre les deux formulations en potentiel dite formulation en potentiels vecteurs \mathbf{A} - \mathbf{T} formulation en Une formulation en potentiels vecteurs \mathbf{A} - \mathbf{T} . Elle permet à la fois de tenir compte la conservation du courant électrique et du flux magnétique. Néanmoins, elle est coûteuse en termes d'espace mémoire et de temps de calcul.

En autre, la formulation qui reste attractive surtout quand il s'agit des problèmes de calcul des courants induits en trois dimensions, est la formulation en potentiels \mathbf{A} - V (V : potentiel scalaire électrique) [152, 175].

III.3.1 Formulation \mathbf{A} - V

Dans le contexte de l'hypothèse relative à la conservation du flux de l'induction magnétique (équation (3.3)), le potentiel vecteur magnétique, noté \mathbf{A} , peut être introduit :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.28)$$

La combinaison de (3.1) et (3.28) nous permet de définir un potentiel scalaire électrique V , tel que :

$$\mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{A} - \nabla V \quad (3.29)$$

Combinant les équations (3.2), (3.5), (3.8), (3.27), (3.28) et (3.29) nous obtenons la 1^{ère} équation du modèle magnétodynamique :

$$\nabla \times (\nu_0 \nabla \times \mathbf{A}) + \tilde{\sigma}(\partial_t \mathbf{A} + \nabla V) = \mathbf{J}_s \quad (3.30)$$

Où ν_0 est la reluctivité magnétique du vide ($\nu_0 = \mu_0^{-1}$).

Pour trouver la 2^{ème} équation relative au modèle magnétodynamique, nous remplaçons (3.6) et (3.29) dans (3.24), alors

$$\nabla \cdot [-\bar{\sigma}(\partial_t \mathbf{A} + \nabla V)] = 0 \quad (3.31)$$

Compte tenu de qui précède relatif à la simplification des équations (voir (3.26)), en adoptant le changement de variable « V » dans le modèle de la magnétodynamique représenté par les deux équations (3.30) et (3.31):

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times (\nu_0 \nabla \times \mathbf{A}) + j\omega \tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v) &= \mathbf{J}_s \\ \nabla \cdot [-j\omega \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Où

$$v = (j\omega)^{-1} V \quad (3.33)$$

La résolution du modèle représenté par (3.32) nécessite la connaissance des conditions aux limites relatives au domaine d'étude. Une condition aux limites usuelle est d'imposer un champ magnétique nul sur la surface extérieure Γ . Dans le calcul, on impose alors :

$$\mathbf{A} \times \mathbf{n} \Big|_{\Gamma} = 0 \quad (3.34)$$

Cette condition est dite condition de type Dirichlet.

En outre, si le domaine d'étude contient un plan de symétrie (Figure 3.3), alors une autre condition dite Newman est nécessaire afin de simplifier et réduire le temps de calcul ainsi que l'espace mémoire.

$$\partial_{\mathbf{n}} \mathbf{A} \Big|_{\Gamma_s} = 0 \quad (3.35)$$

Où Γ_s est le plan de symétrie de vecteur unitaire normal \mathbf{n} .

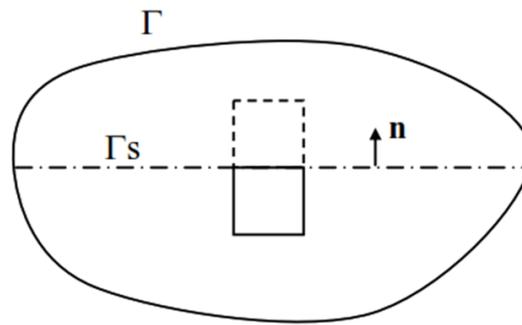


FIGURE 3.3. Représentation schématisée d'un plan de symétrie [152].

En fait connaître les conditions aux limites n'est pas absolument suffisant pour avoir la solution du présent modèle. Si le couple (\mathbf{A}, v) est la solution attendue, alors, il existe une infinité de solutions données par la forme :

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{A} + \nabla \phi \\ v - j\omega \phi \end{array} \right\} \quad (3.36)$$

ϕ est une grandeur scalaire quelconque.

A cet effet, pour assurer l'unicité de la solution de (3.32), il faut imposer une condition de jauge supplémentaire (Coulomb, Lorenz) appelée condition de passage [21]. Dans la pratique, selon la méthode numérique de discrétisation utilisée, forcer la solution d'être unique peut entraîner des instabilités numériques dans le processus de calcul. Dans d'autres cas, des difficultés numériques peuvent avoir lieu si on ne considère pas la jauge [152]. Dans la littérature, on trouve que la jauge de Coulomb est la plus couramment utilisée [176].

$$\nabla(v_0 \nabla \cdot \mathbf{A}) \quad (3.37)$$

Alors, quand le potentiel vecteur magnétique « \mathbf{A} » est fixé par (3.37), par conséquent, le potentiel scalaire électrique modifié « v » [172].

Ainsi, mettant ladite jauge (3.37) dans le modèle représenté par (3.32), précisément, dans l'équation située en haut, on obtient :

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times (v_0 \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (v_0 \nabla \cdot \mathbf{A}) + j\omega \tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v) &= \mathbf{J}_s \\ \nabla \cdot [-j\omega \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

Donc, cet ensemble d'équations représente la formulation \mathbf{A} - v relative au modèle magnétodynamique. De plus, ce modèle peut être employé pour divers problèmes de génie électrique.

III.4 Tenseurs de propriétés électriques d'un stratifié anisotrope

La modélisation des stratifiés anisotropes à l'échelle des fibres conduirait à des systèmes algébriques de dimensions démesurées. D'autre part, les fibres sont disposées de manière aléatoire dans le matériau. Une homogénéisation des propriétés physiques est donc indispensable [155].

Pour chaque pli, dans un référentiel lié aux fibres (l, t, n), les tenseurs homogénéisés des propriétés électrique (conductivité et permittivité) s'expriment comme suit :

$$\bar{\sigma}_{pli} = \begin{pmatrix} \sigma_l & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n \end{pmatrix}_{\langle l,t,n \rangle} \quad (3.39)$$

$$\bar{\varepsilon}_{pli} = \begin{pmatrix} \varepsilon_l & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_t & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_n \end{pmatrix}_{\langle l,t,n \rangle} \quad (3.39)$$

Où l, t et n représentent les directions de grandeurs des propriétés électrique, sont respectivement la direction: longitudinale et transversale aux fibres et suivant l'épaisseur du pli (normale). Dans un référentiel orthonormé (u, v, w), choisi de telle manière à garder la composante suivant l'épaisseur invariante, les tenseurs des propriétés électriques d'un stratifié anisotrope s'expriment en fonction les grandeurs suivant les directions l, t et n , ainsi que de l'orientation (θ) des fibres de chaque pli le constituant par rapport à ce référentiel (FIGURE 3.3.) [177].

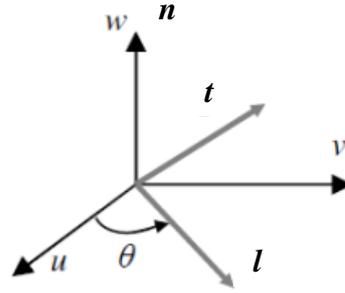


FIGURE 3.4. Référentiels fixe et lié aux fibres.

Dans le référentiel lié aux fibres de chaque pli (l, t, n) , les équations (3.6) et (3.7) s'écrivent respectivement :

$$\mathbf{J}_{pli} = \bar{\sigma}_{pli} \mathbf{E}_{pli} \quad (3.40)$$

$$\mathbf{D}_{pli} = \bar{\varepsilon}_{pli} \mathbf{E}_{pli} \quad (3.41)$$

Avec $\mathbf{J}_{pli} = \begin{pmatrix} J_l \\ J_t \\ J_n \end{pmatrix}$, $\mathbf{E}_{pli} = \begin{pmatrix} E_l \\ E_t \\ E_n \end{pmatrix}$ et $\mathbf{D}_{pli} = \begin{pmatrix} D_l \\ D_t \\ D_n \end{pmatrix}$.

Ramenées dans un référentiel fixe (u, v, w) , alors

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{pli} &= \bar{\mathfrak{R}} \mathbf{J} \\ \mathbf{E}_{pli} &= \bar{\mathfrak{R}} \mathbf{E} \\ \mathbf{D}_{pli} &= \bar{\mathfrak{R}} \mathbf{D} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Où $\mathbf{J} = \begin{pmatrix} J_u \\ J_v \\ J_w \end{pmatrix}$, $\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_u \\ E_v \\ E_w \end{pmatrix}$ et $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_u \\ D_v \\ D_w \end{pmatrix}$.

$\bar{\mathfrak{R}}$ est la matrice de rotation qui garde la composante suivant l'épaisseur (w) invariante et donnée comme suit :

$$\bar{\mathfrak{R}} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

En mettant les termes de (3.42) dans (3.40) et (3.41), on obtient

$$\mathbf{J} = \bar{\mathfrak{R}}^{-1} \bar{\sigma}_{pli} \bar{\mathfrak{R}} \mathbf{E} \quad (3.44)$$

$$\mathbf{D} = \bar{\mathfrak{R}}^{-1} \bar{\varepsilon}_{pli} \bar{\mathfrak{R}} \mathbf{E} \quad (3.45)$$

Alors,

$$\bar{\sigma} = \bar{\mathfrak{R}}^{-1} \bar{\sigma}_{pli} \bar{\mathfrak{R}} \quad (3.44)$$

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\mathfrak{R}}^{-1} \bar{\varepsilon}_{pli} \bar{\mathfrak{R}} \quad (3.45)$$

Donc, les tenseurs des propriétés électriques du stratifié anisotrope s'écrivent dans le référentiel (u, v, w) comme suit :

$$\bar{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_l \cos^2 \theta + \sigma_t \sin^2 \theta & \frac{\sigma_l - \sigma_t}{2} \sin 2\theta & 0 \\ \frac{\sigma_l - \sigma_t}{2} \sin 2\theta & \sigma_l \sin^2 \theta + \sigma_t \cos^2 \theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{ww} \end{pmatrix}_{\langle u,v,w \rangle} \quad (3.46)$$

$$\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_l \cos^2 \theta + \varepsilon_t \sin^2 \theta & \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_t}{2} \sin 2\theta & 0 \\ \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_t}{2} \sin 2\theta & \varepsilon_l \sin^2 \theta + \varepsilon_t \cos^2 \theta & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{ww} \end{pmatrix}_{\langle u,v,w \rangle} \quad (3.47)$$

Compte tenu de la constitution du stratifié anisotrope notamment l'aéronautique, et afin de simplifier le calcul, on peut supposer que la permittivité longitudinale, transversale et la normale sont égales la permittivité électrique du vide.

$$\varepsilon_l = \varepsilon_t = \varepsilon_{ww} = \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \quad (F.m^{-1}) \quad (3.48)$$

L'étape suivante du travail consiste à mise en œuvre de la méthode des volumes fins afin de résoudre la solution du modèle magnétodynamique monté auparavant.

III.5 Mise en œuvre de la MVF

Les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des équations aux dérivées partielles (EDP's). En général, la résolution de ces équations se fait à l'aide des méthodes analytiques ou des méthodes numériques. Pour des géométries plus complexes, on recourt à des méthodes numériques telles que la méthode des volumes finis (MVF), qui font appel à des techniques de discrétisation. En effet, elles transforment les EDP's du champ en un système d'équations algébriques compte tenu des conditions aux limites. La solution fournie une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation.

Le principe de la méthode MVF est basé sur le calcul de la forme intégrale de l'équation EDP, comme dans le cas de la loi de Gauss pour le champ électrostatique et la loi d'Ampère pour la magnétostatique. Donc on note une signification physique de la méthode plus explicite que dans le cas des autres méthodes numériques. La grande simplicité de sa mise en œuvre a fait que la méthode MVF a connu un essor fulgurant depuis les années quatre-vingt [152]. Considérons un domaine Ω dans lequel un champ U , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation EDP suivante :

$$\mathfrak{S}(U) = F \quad (3.49)$$

Où \mathfrak{S} est un opérateur différentiel et F est une fonction connue, appelée terme source. La solution de (3.49) par la méthode des volumes finis, consiste d'abord à découper le domaine Ω en volumes élémentaires (hexagonale, prisme...) D_i ($i = 1, 2, \dots$) et puis, intégration dans chaque volume élémentaire dans lequel le champ U est approximé par une fonction linéaire.

En outre, la méthode MVF peut être vue comme une méthode de résidus pondérés dans laquelle les fonctions de poids sont égales à l'unité [152]. En comparaison par rapport aux éléments finis, la discrétisation par la MVF conduit à un système

linéaire avec une matrice plus creuse. Cette particularité permet une convergence plus rapide des solveurs itératifs [123].

Dans la suite du travail, nous présenterons la mise en œuvre de la méthode MVF afin d'intégrer le modèle magnétodynamique (3.38), où le maillage prisme est pris en considération, en outre, le développement des équations par le maillage hexaédrique sera détaillé en annexe B.

III.5.1 Modélisation numérique 3D

Pour résoudre le modèle (3.38) par la méthode FVM, on peut suivre deux principales étapes. Tout d'abord, un grand nombre d'éléments prisme sont utilisés pour subdiviser le domaine numérique entier, comme illustre la FIGURE 3.5. Chaque élément de prisme principal (PE_p) étant entouré par cinq voisins d'éléments prisme (PE_1, PE_2, E_3, E_B et PE_T).

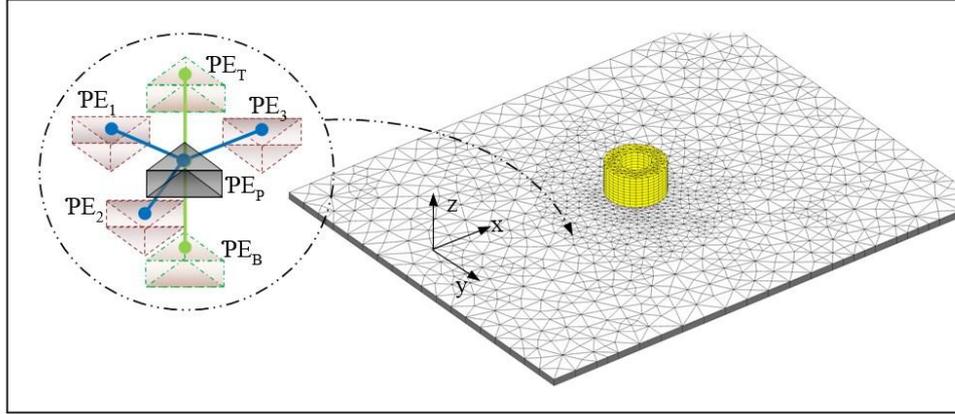


FIGURE 3.5. Maillage non structuré du problème d'étude de CND-CF.

Ensuite, l'intégration de (3.38) dans le volume élémentaire « PE_p » :

$$\left. \begin{aligned} \iint\limits_{PE_p} [\nabla \times (v_0 \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (v_0 \nabla \cdot \mathbf{A})] dv^* + j\omega \iint\limits_{PE_p} [\tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] dv^* = \iint\limits_{PE_p} \mathbf{J}_s dv^* \\ \iint\limits_{PE_p} \{ \nabla \cdot [-j\omega \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] \} dv^* = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.50)$$

Où « dv^* » est le volume élémentaire du prisme principal (PE_p).

Avant de développer l'intégrale de (3.50), on le fait une transformation basée sur le théorème « Green-Ostrogradsky », alors le modèle devient comme suit :

$$\left. \begin{aligned} -\nu_0 \oint\!\!\!\oint_s \nabla \mathbf{A} \, d\mathbf{s} + j\omega \iiint_{PE_p} [\tilde{\sigma}(\mathbf{A} - \nabla v)] \, dv^* = \iiint_{PE_p} \mathbf{J}_s \, dv^* \\ -j\omega \oint\!\!\!\oint_s \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v) \, d\mathbf{s} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

Dans le modèle (3.50), s est la surface qui enveloppe l'élément de prisme PE_P représenté par les cinq surfaces s_1, s_2, s_3, s_t et s_b . Notez que l'élément de prisme PE_P est représenté par son nœud principal P et leurs voisins par P_1, P_2, P_3, P_t et P_b , comme montré la FIGURE 3.6.

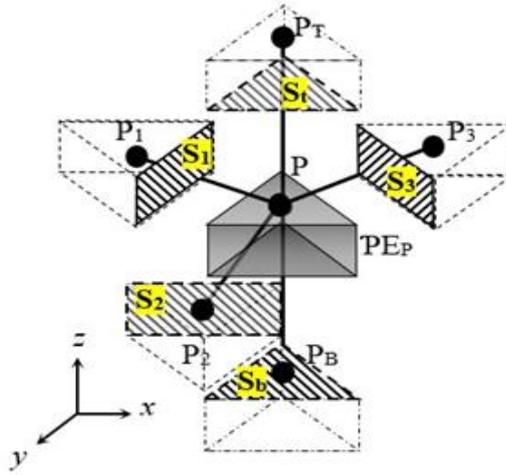


FIGURE 3.6. Description 3D de l'élément de prisme.

III.5.2 Développement de $-\nu_0 \oint\!\!\!\oint_s \nabla \mathbf{A} \, d\mathbf{s}$

Nous montrons le développement du premier terme de l'équation qui se situe en haut du modèle (3.51) comme suit :

$$-\nu_0 \oint\!\!\!\oint_s \nabla \mathbf{A} \, d\mathbf{s} = -\nu_0 \oint\!\!\!\oint_s \nabla \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} ds \cdot \mathbf{n} \times \mathbf{u} \quad (3.52)$$

\mathbf{n} et \mathbf{u} sont respectivement la normale de la surface et le vecteur unitaire, comme montre la FIGURE 3.7.

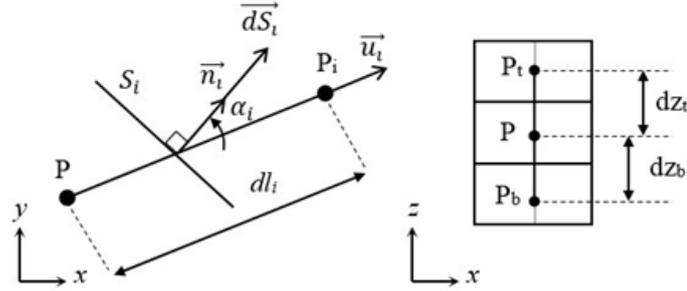


FIGURE 3.6. Projection de deux nœuds adjacents sur les plans xy et xz.

Afin d'alléger de développement de (3.52), nous présenterons que la composante x, et également pour les autres termes de (3.51). Alors, en supposant une variation linéaire du potentiel A_x entre les deux nœuds adjacents. En conséquence, cette composante peut être exprimée sous la forme algébrique suivante :

$$-v_0 \oint\oint_s \langle \nabla \mathbf{A} \rangle_x ds \cdot \mathbf{n} \times \mathbf{u} = -v_0 \sum_{i=1}^t \frac{A_x^{P_i} - A_x^P}{dl_i} s_i \cos(\alpha_i) \quad \text{avec } i = 1, 2, 3, b \text{ et } t. \quad (3.53)$$

$A_x^{P_i}, A_x^P, dl_i, s_i$ et α_i sont respectivement le potentiel vecteur magnétique du nœud de voisin i , le potentiel vecteur magnétique du nœud principal P , la distance entre les deux nœuds adjacents, la surface commune entre les deux éléments de prisme adjacents et l'angle entre le vecteur unitaire « \mathbf{u} » et la normale « \mathbf{n} » vecteur de cette surface. Notez bien que $dl_b = dz_b$ et $dl_t = dz_t$ (FIGURE 3.6.).

Pour simplifier l'expression algébrique on propose

$$C_x^i = \frac{v_0 s_i \cos(\alpha_i)}{dl_i}, \quad i = 1, 2, 3, b \text{ et } t. \quad (3.54)$$

Donc l'équation (3.52) devient :

$$(3.52) \Rightarrow - \sum_{i=1}^t C_x^i (A_x^{P_i} - A_x^P), \quad i = 1, 2, 3, b \text{ et } t. \quad (3.55)$$

III.5.3 Développement de $j\omega \iiint_{PE_p} [\tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] dv^*$

Ici nous montrons le développement du deuxième terme de l'équation qui se situe en haut du modèle (3.51) comme suit :

$$j\omega \iiint_{PE_p} [\tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)] dv^* =$$

$$j\omega \iiint_{PE_p} \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_{xx} & \tilde{\sigma}_{xy} & 0 \\ \tilde{\sigma}_{yx} & \tilde{\sigma}_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\sigma}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} dv^* + j\omega \iiint_{PE_p} \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_{xx} & \tilde{\sigma}_{xy} & 0 \\ \tilde{\sigma}_{yx} & \tilde{\sigma}_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\sigma}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial_x(v) \\ \partial_y(v) \\ \partial_z(v) \end{bmatrix} dv^* \quad (3.56)$$

A titre d'illustration, on prenant la composante x, Alors:

$$j\omega \iiint_{PE_p} [\tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)]_x dv^* = j\omega [(\tilde{\sigma}_{xx} + \tilde{\sigma}_{yx})A_x]_P v_P^* + j\omega [(\tilde{\sigma}_{xx} + \tilde{\sigma}_{yx})\partial_x v]_P v_P^* \quad (3.57)$$

Nous considérons que la variation du potentiel électrique v est linéaire dans le volume élémentaire prisme « PE_P », alors

$$(3.57) \Rightarrow j\omega(\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P)A_x^P v_P^* + j\omega(\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P) \frac{v_2 - v_1}{\Delta x} v_P^* \quad (3.58)$$

$\tilde{\sigma}_{xx}^P$ et $\tilde{\sigma}_{yx}^P$ sont les composantes de la conductivité modifiée dans le volume élémentaire « v_P^{*} », v₁ et v₂ sont les potentiels électrique au niveau des nœuds fictifs (P_{x1} et P_{x2}) comme montre la FIGURE 3.7.

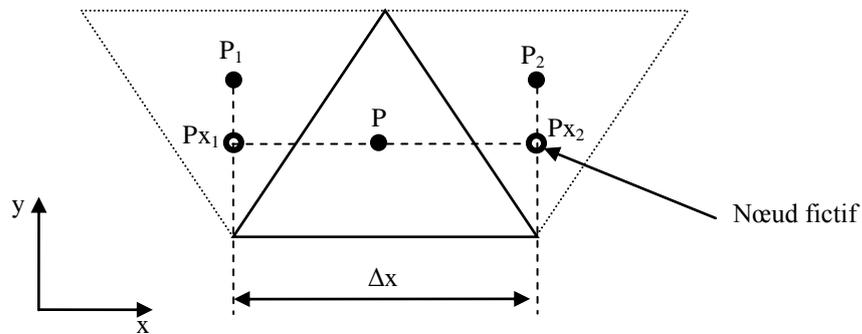


FIGURE 3.7. Schématisation des nœuds fictifs.

Afin de simplifier l'expression algébrique de (3.58) on propose :

$$\left. \begin{aligned} a_x^P &= j\omega(\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P)v_P^* \\ \text{et} \\ b_x^P &= j\omega(\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P)\frac{v_P^*}{\Delta x} \end{aligned} \right\} \quad (3.59)$$

Alors (3.58) devient

$$(3.58) \Rightarrow a_x^P A_x^P + b_x^P (v_2 - v_1) \quad (3.60)$$

III.5.4 Développement du terme de source $\iiint_{PE_p} \mathbf{J}_s dv^*$

Dans cette partie, nous montrons le développement du troisième terme de l'équation qui se situe en haut du modèle (3.51). A titre d'illustration, nous ne considérons que la composante x.

$$\iiint_{PE_p} \mathbf{J}_s dv^* = J_{sx}^P v_P^* \quad (3.61)$$

J_{sx}^P est la composante x du courant de source au niveau du nœud principal « P ».

III.5.5 Développement de $-j\omega \oiint_s \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v) \mathbf{ds}$

Nous montrons le développement de la deuxième équation qui se situe en bas du modèle (3.51).

$$-j\omega \oiint_s \bar{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v) \mathbf{ds} = \underbrace{-j\omega \oiint_s \bar{\sigma} \mathbf{A} ds \cdot \mathbf{n} \times \mathbf{u}}_{\Psi_1} - \underbrace{j\omega \oiint_s \bar{\sigma} \nabla v ds \cdot \mathbf{n} \times \mathbf{u}}_{\Psi_2} \quad (3.62)$$

III.5.5.1 Développement du sous terme Ψ_1

$$\Psi_1 = j\omega \sum_{i=1}^t \bar{\sigma}^i \mathbf{A}^i ds_i \cdot \mathbf{n}_i \times \mathbf{u}_i, \quad i = 1, 2, 3, b \text{ et } t. \quad (3.63)$$

$\bar{\sigma}^{fi}$ et \mathbf{A}^{fi} sont respectivement le tenseur de conductivité électrique et le potentiel vecteur magnétique au niveau de la facette i , cette dernière est la surface entre deux élément adjacents (FIGURE 3.8.).

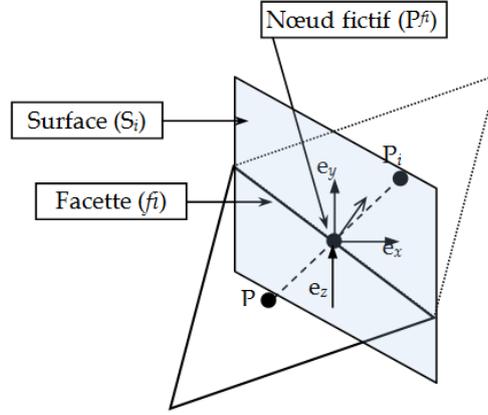


FIGURE 3.8. Schématisation du nœud fictif sur la facette.

On a

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{e}_x + A_y \mathbf{e}_y + A_z \mathbf{e}_z \quad (3.64)$$

Ainsi, l'équation (3.63) est exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \psi_1 = j\omega \sum_{i=1}^t (\sigma_{xx}^{fi} + \sigma_{yx}^{fi}) A_x^{fi} s_i \cos(\beta_i) + \dots \\ \dots (\sigma_{yy}^{fi} + \sigma_{xy}^{fi}) A_y^{fi} s_i \sin(\beta_i) + \sigma_{zz}^{fi} A_z^{fi} s_i \cos(\gamma_i), \quad i = 1, 2, 3, b \text{ et } t. \end{aligned} \quad (3.65)$$

β_i et γ_i sont respectivement les angles entre la normale \mathbf{n} et l'axe Ox (\mathbf{e}_x) et l'axe Oz (\mathbf{e}_z) à une surface donnée « i ». Notez bien que $(O, \mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$ est un repère orthonormé.

De plus, à la surface « i », le potentiel « A^{fi} » et la conductivité électrique « σ^{fi} » peuvent être exprimés par l'approximation suivante [152, 178] :

$$A_k^{fi} = \frac{A_k^P + A_k^i}{2}, \text{ avec } \begin{cases} i = 1, 2, 3, b \text{ et } t. \\ k = x, y \text{ et } z. \end{cases} \quad (3.66)$$

$$\sigma_{k,m}^{fi} = \frac{\sigma_{k,m}^P + \sigma_{k,m}^i}{2}, \text{ avec } \begin{cases} i = 1, 2, 3, b \text{ et } t. \\ k = x, y \text{ et } z. \\ m = x, y \text{ et } z. \end{cases} \quad (3.67)$$

III.5.5.2 Développement du sous terme ψ_2

$$\psi_2 = j\omega \left[\sum_{i=1}^3 \left(\sigma_{xx}^{fi} \cos^2(\beta_i) + \sigma_{yy}^{fi} \sin^2(\beta_i) \right) s_i \cos(\alpha_i) \frac{V_i - V_P}{dl_i} + \sum_{i=b}^t \sigma_{zz}^{fi} s_i \cos(\alpha_i) \frac{V_i - V_P}{dz_i} \right] \quad (3.68)$$

avec $i = 1, 2, 3, b \text{ et } t$.

Où « fi » signifié la facette entre deux éléments adjacents.

III.5.6 Système algébrique final

L'intégration de tous les termes résultant des équations de (3.51) conduit à des équations algébriques linéaires, qui peuvent être réécrites sous la forme matricielle suivante :

$$[K] \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}_s] \quad (3.69)$$

Les coefficients de la matrice K caractérisent les propriétés géométriques et physiques de tous les éléments de prisme dans tout le domaine numérique.

Pour résoudre le système d'équations algébrique final, on utilise la méthode itérative Gauss-Seidel, cette dernière montre leur avantage en terme de consommation d'espace mémoire [152].

Après le calcul de la dernière équation matricielle, on peut calculer directement la résistance et la réactance du capteur comme suit :

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{1}{I^2} \iiint_{PE_p} \frac{J_e^2}{\bar{\sigma}} dv^* \\ X &= \frac{\omega V_0}{I^2} \iiint_{PE_p} B^2 dv^* \end{aligned} \right\} \quad (3.70)$$

B , I sont respectivement la densité de flux magnétique et le courant d'excitation.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons formulé un modèle magnétodynamique 3D anisotrope en potentiel vecteur magnétique et scalaire électrique (A-V) à l'aide des lois fondamentales de l'électromagnétisme, ainsi, il se présente par des équations aux dérivées partielles (EDP's). Ce modèle fait l'objet de décrire le comportement électromagnétique des matériaux composites lié aux problèmes de CND-CF. De plus, les tenseurs des propriétés électriques qui présentent l'anisotropie des composites stratifiés sont exprimés dont les différentes orientations des fibres dans chaque pli sont prises en compte.

La méthode MVF a été mise en œuvre afin de transformer les EDP's à un système d'équations algébriques. Ainsi, le domaine numérique est discrétisé en grand nombre d'éléments dont la forme prisme est prise en compte. Ensuite, les EDP's sont intégrés dans chaque élément, en conséquence le système d'équation final est représenté sous la forme matricielle $A.x=B$.

Par ailleurs, le système d'équation final (Modèle 3D-MVF anisotrope) sera implémenté sous la plateforme de programmation telle que l'environnement "Matlab" afin de développer un code de calcul qui sera peut être utilisé comme un outil de support pour l'étude des problèmes de CND-CF des composites. De ce fait, le prochain chapitre sera consacré à l'implémentation et la validation du code de calcul développé relatif au modèle suscitée.

Chapitre IV. Mise en applications et validations

IV.1	Introduction	100
IV.2	Organigramme du code de calcul	100
IV.3	Modélisation de CFRP stratifié	102
IV.3.1	Description du problème	102
IV.3.2	Résultats et discussions	103
IV.4	Validation expérimentale du code de calcul	105
IV.4.1	Matériau à faible taux d'anisotropie (Al-B)	105
IV.4.1.1	<i>Description du problème</i>	105
IV.4.1.2	<i>Résultats et discussions</i>	106
IV.4.2	Matériau à fort taux d'anisotropie (CFRP)	110
IV.4.2.1	<i>Description du problème</i>	110
IV.4.2.2	<i>Résultats et discussions</i>	112
IV.4.3	Evaluation du défaut de délaminage	116
IV.4.3.1	<i>Description du problème</i>	116
IV.4.3.2	<i>Résultats et discussions</i>	117
IV.5	Conclusion	122

IV.1 Introduction

Dans la littérature, il existe plusieurs logiciels commerciaux dédiés à l'analyse du comportement électromagnétique des matériaux composites en application de CND-CF, tels que ANSOFT (Maxwell 3D), COMSOL, etc. Souvent, ces logiciels utilisent la méthode des éléments finis (MEF) pour résoudre les équations EDP's relatives aux champs électromagnétiques. Néanmoins, la modélisation numérique des problèmes de géométrie complexes par la méthode MEF est pénalisée par la consommation d'espace mémoire et un temps de calcul plus long. En revanche, la méthode MVF a prouvé leurs avantages en matière de consommation d'espace mémoire et temps de calcul. Toutefois, un logiciel commercial pour l'analyse des champs électromagnétiques dont la méthode MVF est sollicitée n'existe pas dans le marché.

A cet effet, au cours de ce chapitre, nous avons implémenté le code de calcul développé sous l'environnement Matlab pour la modélisation des problèmes de CND-CF relatifs aux matériaux composites, à savoir, les composites : en polymère renforcé par des fibres de carbone « CFRP » (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer), en alliage d'aluminium renforcé par des fibres de bore (Al-B : boron fibres reinforced aluminium alloy) et les composites hybrides « CARAAL » (Aluminium/CFRP). L'objectif de ce chapitre est de valider le code de calcul relatif au modèle 3D-MVF anisotrope développé par des comparaisons expérimentales afin de le créditer pour les futurs développements des logiciels multi-physiques basés sur la méthode MVF.

IV.2 Organigramme du code de calcul

L'organigramme du processus de calcul relatif au code de calcul du modèle 3D-MVF anisotrope développé sous Matlab, est présenté dans la FIGURE 4.1. Principalement, l'organigramme est constitué en trois parties : la partie d'entrée (données géométriques et physiques du problème), la partie de résolution (discrétisation du domaine numérique, calcul des coefficients constants relatifs aux propriétés physiques et géométriques, résolution de système des équations

algébriques) et la troisième consiste de calculer l'impédance de capteur et illustration des résultats de calcul tels que la distribution des courants induits au sien du spécimen.

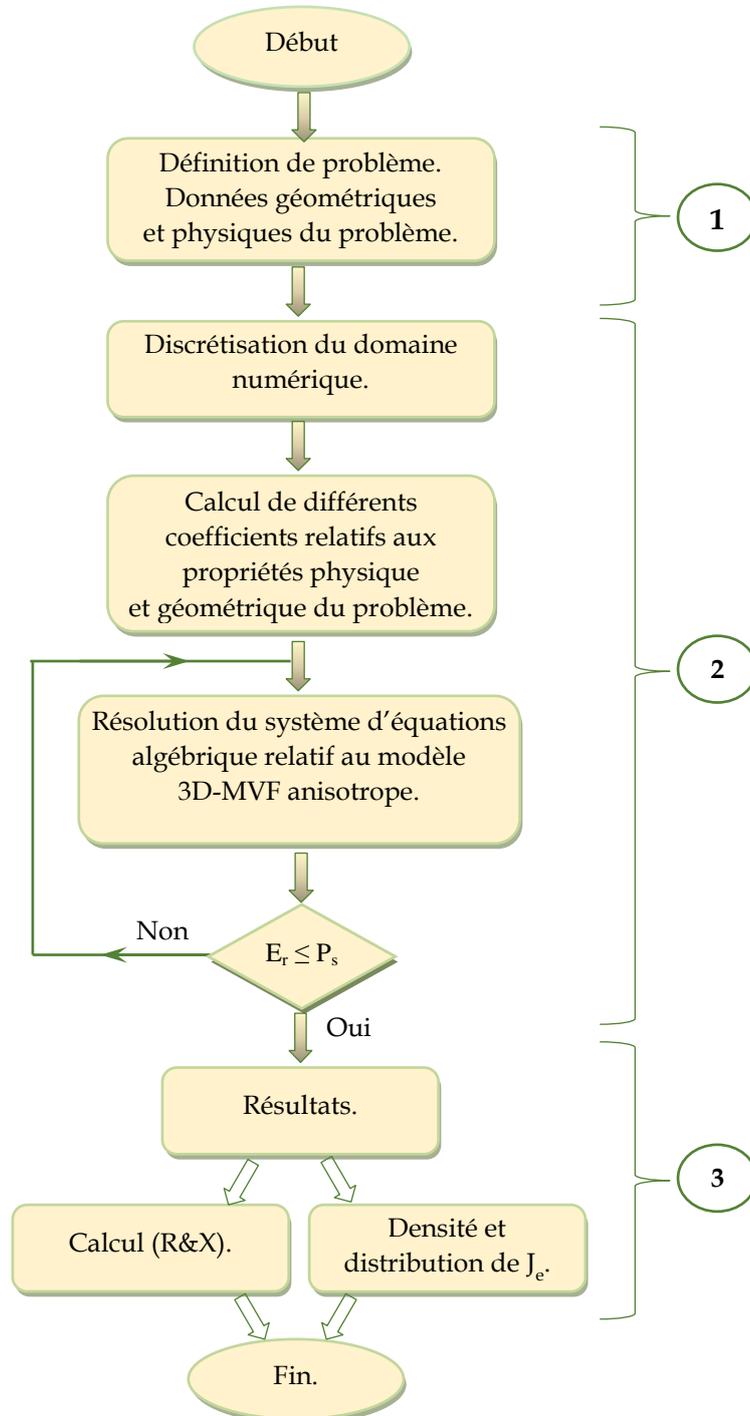


FIGURE 4.1. Organigramme du processus de calcul.

E_r et P_r sont respectivement l'erreur de calcul et la précision de calcul imposé. Notez bien que la précision (P_r) est imposé à 10^{-6} pour tous les application ci-après.

IV.3 Modélisation de CFRP stratifié

Cette partie présente une analyse numérique de la distribution des courants de Foucault développée au sien de stratifié en polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) pour différents rapports anisotropes. Cette investigation vise à orienter les recherches sur les problèmes de CND-CF des matériaux composites. Le modèle développé prend en considération l'influence de différentes orientations des fibres pour chaque pli.

IV.3.1 Description du problème

Le problème de test est constitué d'un capteur (bobine à noyau d'air), placé au-dessus d'un spécimen en CFRP stratifié multidirectionnel (FIGURE 4.2.). La pièce est constituée d'un empilement de huit plis unidirectionnels avec un ordre d'orientation bien défini [179]. La description géométrique et physique du problème est présentée dans le TABLEAU 4.1. La fréquence du courant d'alimentation est fixée à 10^6 Hz.

TABLEAU 4.1. Dimensions du problème.

Spécimen en CFRP stratifié	
<i>Dimensions (mm)</i>	<i>Séquences d'empilement</i> [$\theta^\circ_{\text{pli}}$]
Longueur x largeur x épaisseur 174 x 174 x 0.2	[0 ₂ /-45 ₂ /90 ₂ /45 ₂]
CFRP pli	Conductivité électrique [$\sigma_l \ \sigma_t \ \sigma_z$] (S/m) [10 ⁵ 10 ³ 10 ³]
<i>Lift-off (mm)</i>	0.1
Capteur	
120 Spires	Rayon ext. x Rayon int. x Hauteur 5 x 1 x 1.5

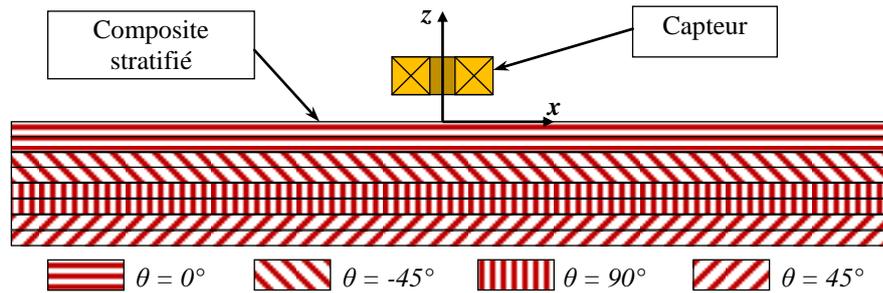


FIGURE 4.2. Présentation schématisée du problème de test.

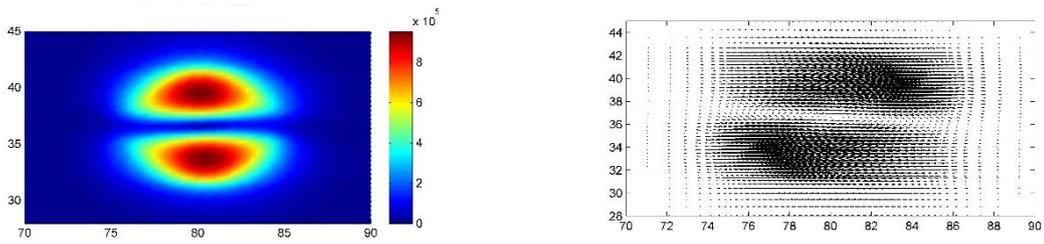
IV.3.2 Résultats et discussions

L'exécution du code de calcul conduite à l'obtention des résultats qui sont illustrés dans la FIGURE 4.3. Cette dernière, montre la densité et la distribution des courants induits au sein de chaque paire de plis. Précisément, le premier, le troisième, le cinquième et le septième pli qui sont figurés. En outre, ces résultats sont obtenus à la fréquence 10^6 Hz.

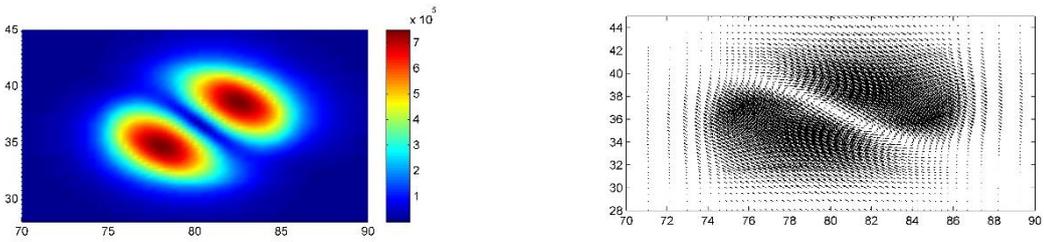
Suite à l'analyse de ces résultats, on constate que les courants induits sont principalement dirigés selon la direction d'orientation des fibres (FIGURE 4.3.b), c.à.d. ils suivent la composante maximale du tenseur de la conductivité électrique, en conséquence ils deviennent denses (FIGURE 4.3.b).

A cet effet, les résultats obtenus montrent l'efficacité du code de calcul développé basé sur le modèle 3D-MVF anisotrope pour la modélisation de CND-CF relatif au CFRP stratifié, dont l'empilement des plis a différentes séquences d'orientations des fibres.

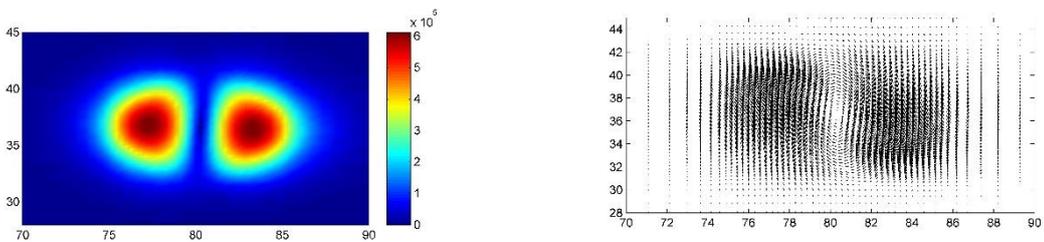
Pli n° :1, ($\theta= 0^\circ$).



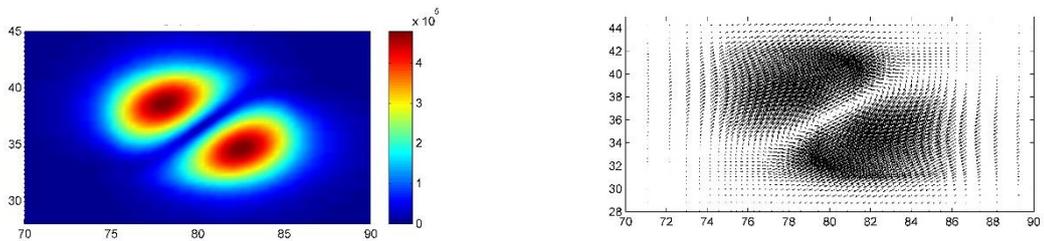
Pli n° :3, ($\theta= -45^\circ$).



Pli n° :5, ($\theta= 90^\circ$).



Pli n° :7, ($\theta= 45^\circ$).



a. Densité des courants induits.

a. Distribution des courants induits.

FIGURE 4.3. Densité et distribution des courants induits dans le CFRP stratifié.

IV.4 Validation expérimentale du code de calcul

Cette application est consacrée pour examiner et valider le modèle développé. De ce fait, deux matériaux composites unidirectionnels sont considérés tels que, le composite en alliage d'aluminium renforcé par des fibres de bore (Al-B), dont leur taux d'anisotropie est faible et le deuxième matériau est le CFRP à forte taux d'anisotropie. En outre, une concurrence entre deux codes de calcul est investiguée, c.à.d. entre le présent modèle et le modèle 3D-MVF-HEXA (voir annexe B) dont le maillage hexaédrique est sollicité. Les résultats expérimentaux et numériques sont comparés et présentés sous une forme normalisée. Les codes de calcul développés sont lancés sur un PC avec le processeur i5 -6400 (2.7 GHz) et 8 GB de RAM.

Le taux d'anisotropie (τ_σ) est exprimé comme suit [125] :

$$\tau_\sigma (\%) = \left(1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_l} \right) 100 \quad (4.1)$$

IV.4.1 Matériau à faible taux d'anisotropie (Al-B)

Afin de valider le modèle développé, nous commençons par le problème CND-CF présenté par Burke [125]. Les résultats obtenus sont comparés par ceux présentés par Burke, ainsi que ceux obtenus par le code de calcul relatif au maillage hexaédrique.

IV.4.1.1 Description du problème

Le problème étudié est schématisé dans la FIGURE 4.4., il est constitué d'un capteur inductif placé au-dessus d'une plaque en matériau composite unidirectionnel. Cette plaque est fabriquée en alliage d'aluminium renforcé par des fibres de bore (AL-B). Le diamètre de la fibre est d'environ 120 μm avec un taux de remplissage de 42%. Ces fibres sont alignées dans le sens de l'axe Ox. De plus, le taux d'anisotropie relatif à la conductivité électrique de ce matériau est d'environ 31%. Par ailleurs, Le capteur est alimenté par un courant alternatif en régime harmonique tel que la fréquence est compris entre 10^2 et 10^4 Hz.

Les paramètres géométriques et physiques du problème étudié sont donnés dans le TABLEAU 4.2.

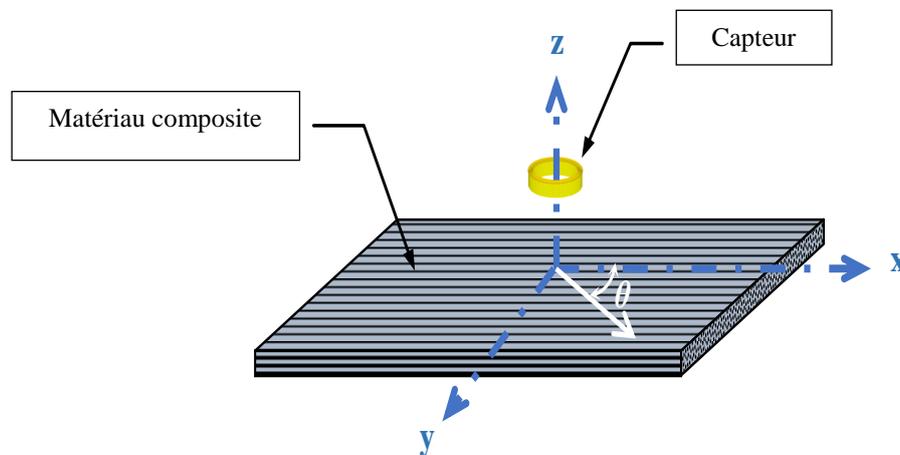


FIGURE 4.4. Schématisation du problème de CND-CF de composite Al-B.

TABLEAU 4.2. Paramètres géométriques et physiques de CND-CF (Al-B).

Paramètres de la plaque	
<i>Dimensions (mm)</i> [Longueur x largeur x épaisseur]	[310 x 250 x 2]
<i>Conductivité électrique (MS/m)</i> [σ_l σ_t σ_z]	[14.7 10.1 10.1]
Paramètres du capteur	
(408 Spires)	
<i>Dimensions (mm)</i>	
[Diamètre ext. Diamètre int. Hauteur Lift-off]	[36.8 18.68 8.8 2.1]

IV.4.1.2 Résultats et discussions

Pour donner une concurrence raisonnable entre les deux code de calcul (élément prisme et hexaédrique), la même densité de maillage est approximativement utilisée. Par conséquent, le domaine numérique est discrétisé en 116508 éléments prismes et en 117306 éléments hexaédriques.

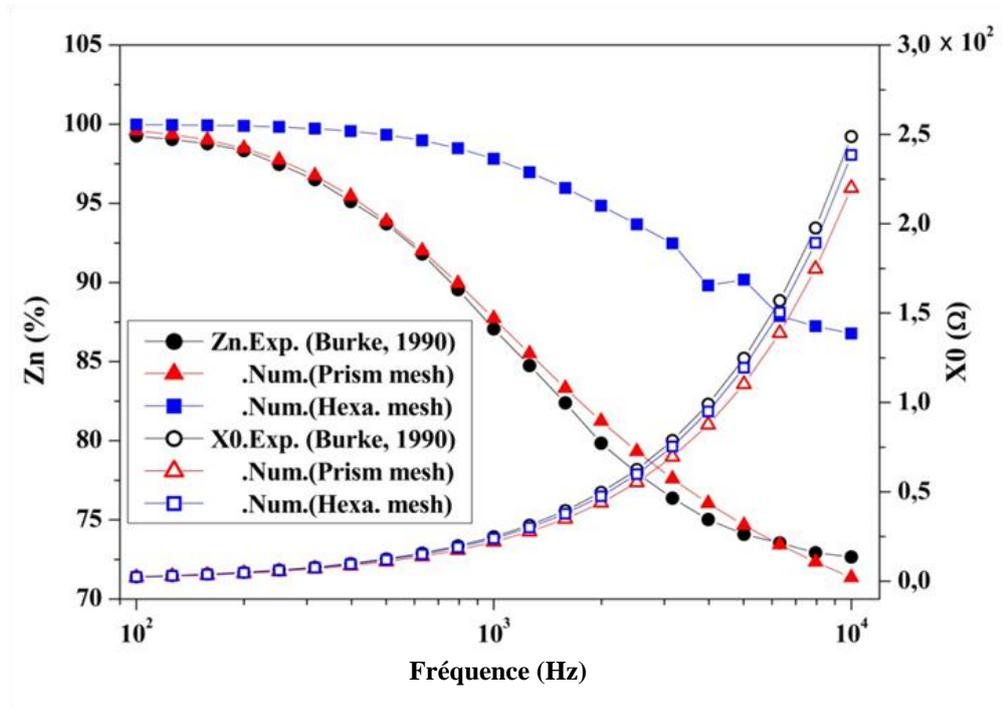


FIGURE 4.5. Variation de la Réactance à vide (X_0) et l'impédance normalisée(Z_n) en fonction de la fréquence (Al-B).

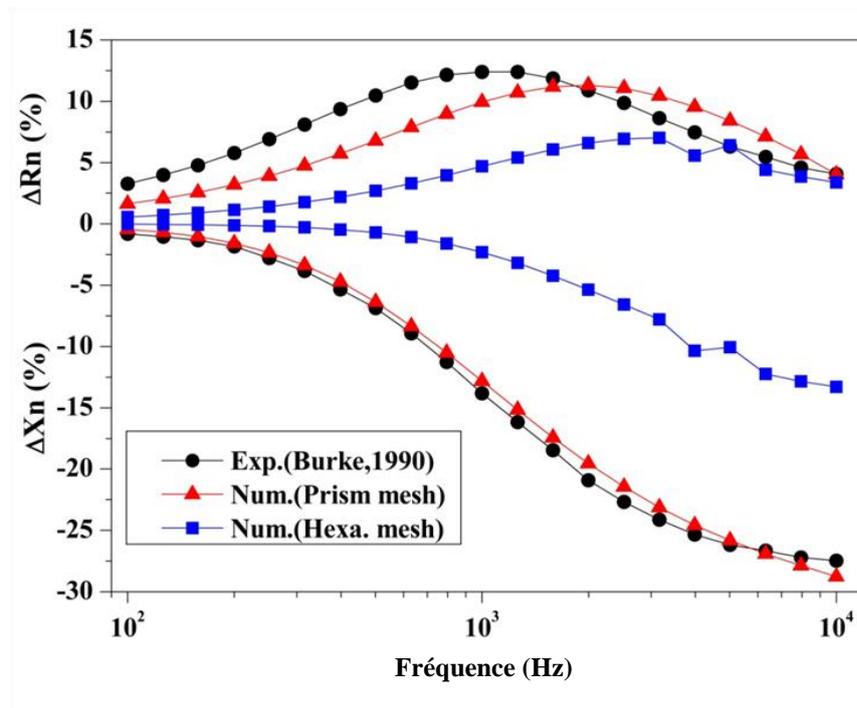


FIGURE 4.6. Variation de la résistance (R_n) et la réactance normalisées (X_n) en fonction de la fréquence (Al-B).

Les résultats numériques obtenus par les deux codes de calculs sont comparés à ceux expérimentales. La variation de la réactance du capteur (X_0) en fonction de la fréquence d'excitation sans la présence de la plaque est représentée sur la FIGURE 4.5. De même, la variation d'impédance normalisée du capteur est également présentée. De plus, la FIGURE 4.6. montre sa partie réelle et imaginaire, à savoir, la variation de la résistance et la réactance.

Par ailleurs, dans le cas du capteur à vide (sans plaque), une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques pour les deux types de maillages est observée. Néanmoins, dans le cas de la présence de la plaque (en charge), une bonne concordance est observée entre les résultats expérimentaux et numériques relatifs au maillage prisme.

Les caractéristiques de calcul relatives aux maillages prisme et hexaédrique en fonction de la fréquence sont illustrées dans la FIGURE 4.7. A savoir, l'erreur relative entre les résultats expérimentaux et numériques de l'impédance normalisée ($Err-Z_n$) et le temps de calcul (CPU). Ainsi, l'erreur relative moyenne de calcul liée au maillage prisme est d'environ 0,73% avec une valeur maximale 1,77%. Néanmoins, l'erreur relative moyenne de calcul liée au maillage hexaédrique est d'environ 11,51% avec une valeur maximale 21,71%. De plus, il est clairement observé que l'augmentation de la fréquence d'excitation conduit à une augmentation de l'erreur de calcul, ainsi que l'instabilité du calcul numérique lors de l'utilisation d'un maillage hexaédrique.

La FIGURE 4.8 montre la convergence de calcul à vide pour la fréquence 10^4 Hz. Nous remarquons que le code de calcul relatif au maillage prisme est rapide par rapport au code de calcul dont le maillage hexaédrique est employé.

En conséquence, on peut noter que le modèle numérique développé relatif au maillage prisme est plus précis, rapide et stable que le modèle par maillage hexaédrique.

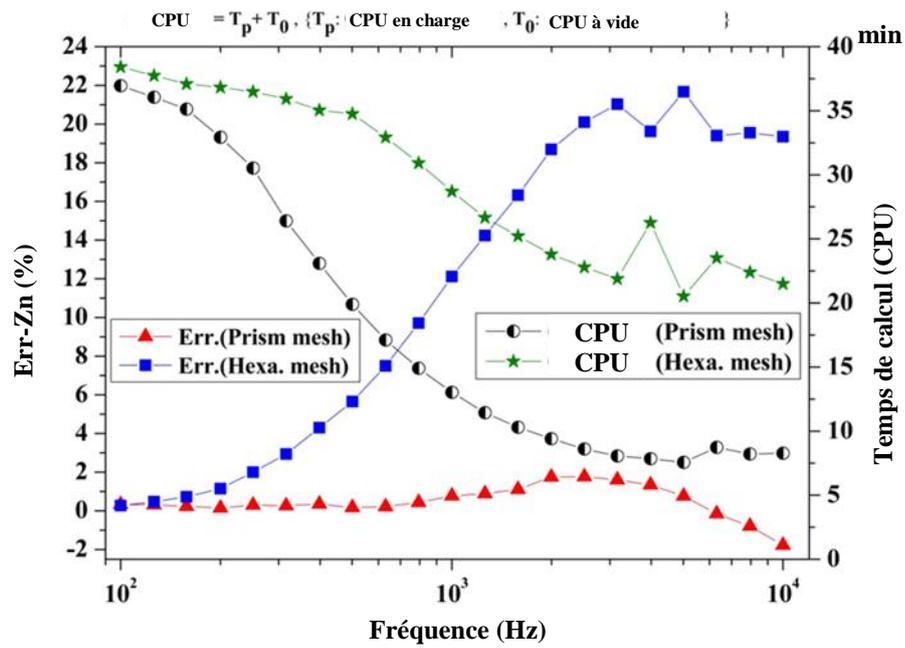


FIGURE 4.7. Erreur et temps de calcul en charge (A1-B).

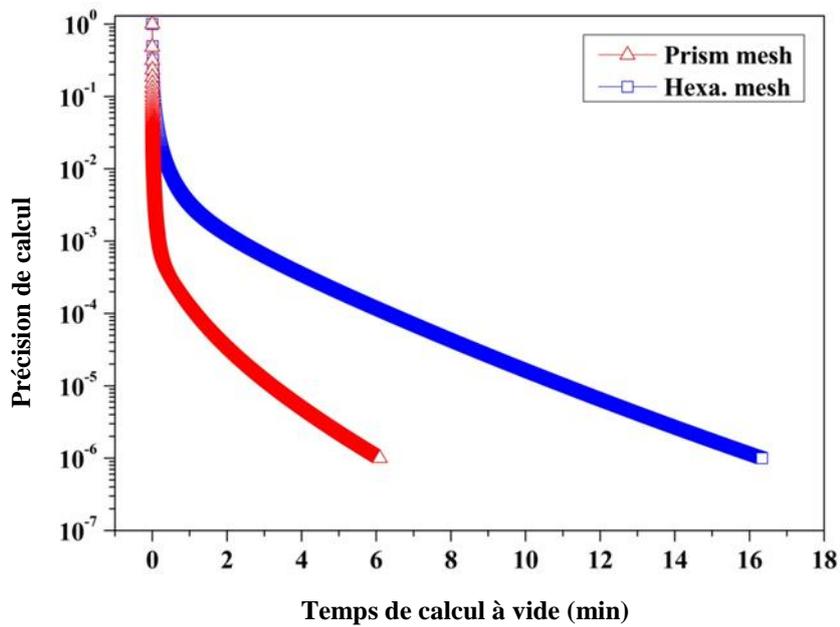


FIGURE 4.8. Convergence du calcul à vide en fréquence 10^4 Hz (A1-B).

La FIGURE 4.9 montre la distribution de la partie réelle des courants induits développés au sein de la plaque Al-B. En conséquence, nous constatons que les courants induits sont dirigés dans les deux directions de référence (xOy), cette apparence est due principalement au faible taux d'anisotropie.

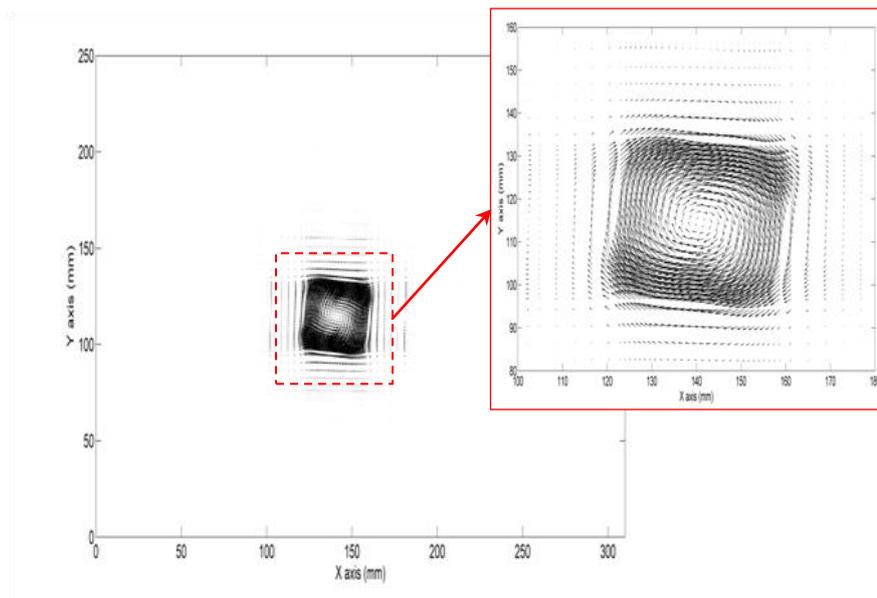


FIGURE 4.9. Distribution de la partie réelle des courants induits à la fréquence 10^4 Hz (Al-B).

IV.4.2 Matériau à fort taux d'anisotropie (CFRP)

Pour cette investigation, une configuration expérimentale relative au problème de CND-CF du matériau composite à fort taux d'anisotropie est réalisée, afin de valider le code de calcul développé. Les résultats obtenus sont comparés par les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le code de calcul dont l'élément hexaédrique est employé.

IV.4.2.1 Description du problème

Comme l'indique la FIGURE 4.10. Le système étudié est constitué d'un analyseur d'impédance (Réf. LCR-8105G), un ordinateur (PC) équipé du logiciel Labview et un capteur inductif à noyau d'aire placé au-dessus d'une plaque conductrice

fabriquée en polymère renforcé par des fibres de carbone unidirectionnelles (CFRP). Ledit capteur est alimenté par un courant alternatif en multifréquence, cette dernière est comprise entre 10^4 et 10^6 Hz. En outre, Les caractéristiques physiques et géométriques de la plaque et le capteur, sont indiquées dans le TABLEAU 4.3.



FIGURE 4.10. Montage réalisé au laboratoire.

TABLEAU 4.3. Caractéristiques géométriques et physiques de CND-CF (CFRP).

Paramètres de la plaque	
<i>Dimensions (mm)</i> [Longueur x largeur x épaisseur]	[174 x 78 x 0.15]
<i>Conductivité électrique</i> [155] (kS/m) [σ_l σ_t σ_z]	[6 0.1 0.1]
Paramètres du capteur (120 Spires)	
<i>Dimensions (mm)</i>	
[Diamètre ext. Diamètre int. Hauteur Lift-off]	[10 2 1.5 0.1]

IV.4.2.2 Résultats et discussions

En tant que deuxième application, la modélisation de ce problème est également réalisée par les deux modèles numériques, c.à.d. avec le maillage prisme et le maillage hexaédrique. Afin de garantir une concurrence raisonnable, le domaine numérique doit être discrétisé en même nombre d'éléments relatifs aux deux types de maillage. Ainsi, le domaine numérique est discrétisé en 194880 éléments prismes et en 195804 éléments hexaédriques.

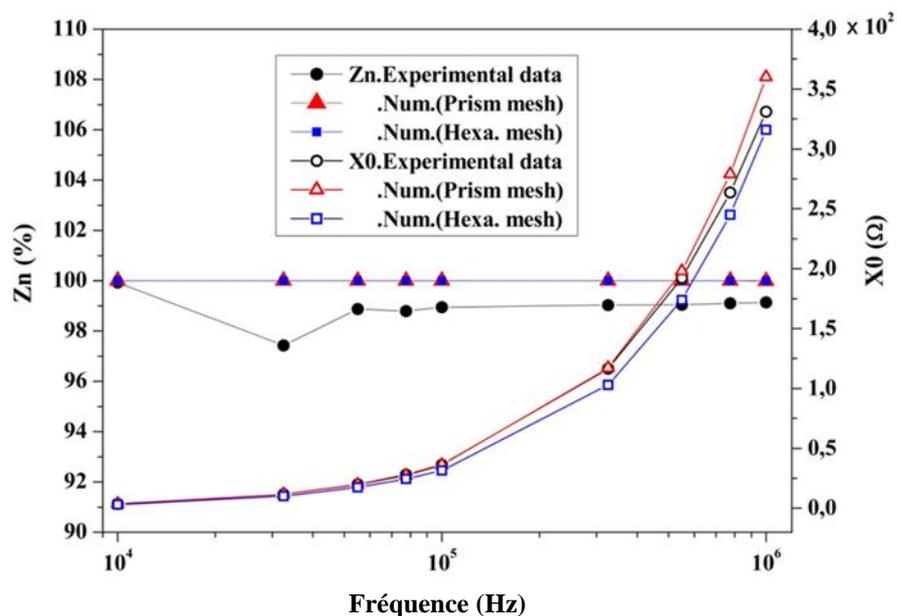


FIGURE 4.11. Variation de la Réactance à vide (X_0) et l'impédance normalisée (Z_n) en fonction de la fréquence (CFRP).

La FIGURE 4.11 montre une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour les différents types de maillage, relative au problème du CND-CF du CFRP. A savoir la variation de la réactance (X_0) du capteur à vide et son impédance normalisée en fonction de la fréquence d'alimentation. En conséquence, une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux

obtenus par les deux codes de calcul est constatée. En outre, une insensibilité relative à l'impédance normalisée du capteur est remarquée.

De plus, la partie réelle et imaginaire de l'impédance normalisée du capteur, sont illustrées sur la FIGURE 4.12. En conséquence, nous constatons une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques, cependant, la variation de la résistance normalisée relative au maillage hexaédrique présente une erreur de calcul importante, qui sera discutée ci-après. En outre, une insensibilité de la partie imaginaire de l'impédance normalisée du capteur est observée. D'autre part, seule la résistance normalisée du capteur est sensible à la variation de la fréquence.

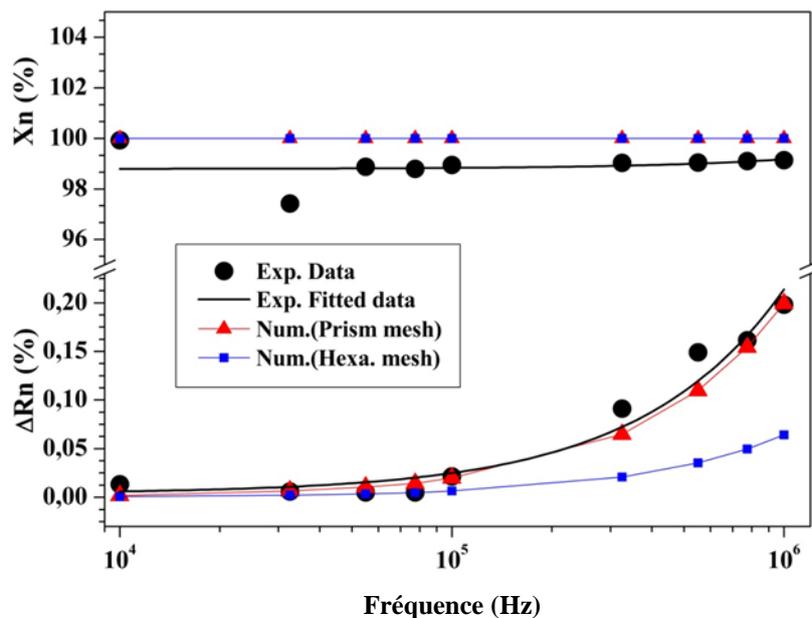


FIGURE 4.12. Variation de la résistance (R_n) et la réactance normalisées (X_n) en fonction de la fréquence (CFRP).

Les caractéristiques de calcul relatif aux deux types de maillage (prisme et hexaédrique) en charge et à vide sont montrées dans les FIGURES 4.13 et 4.14. Précisément, l'erreur relative de l'impédance et la résistance normalisées, ainsi que leurs temps de calcul sont illustrés dans la FIGURE 4.13. Les temps de calcul relatifs

aux maillages prismes et hexaédriques sans la présence de la plaque, sont présentés dans la FIGURE 4.14.

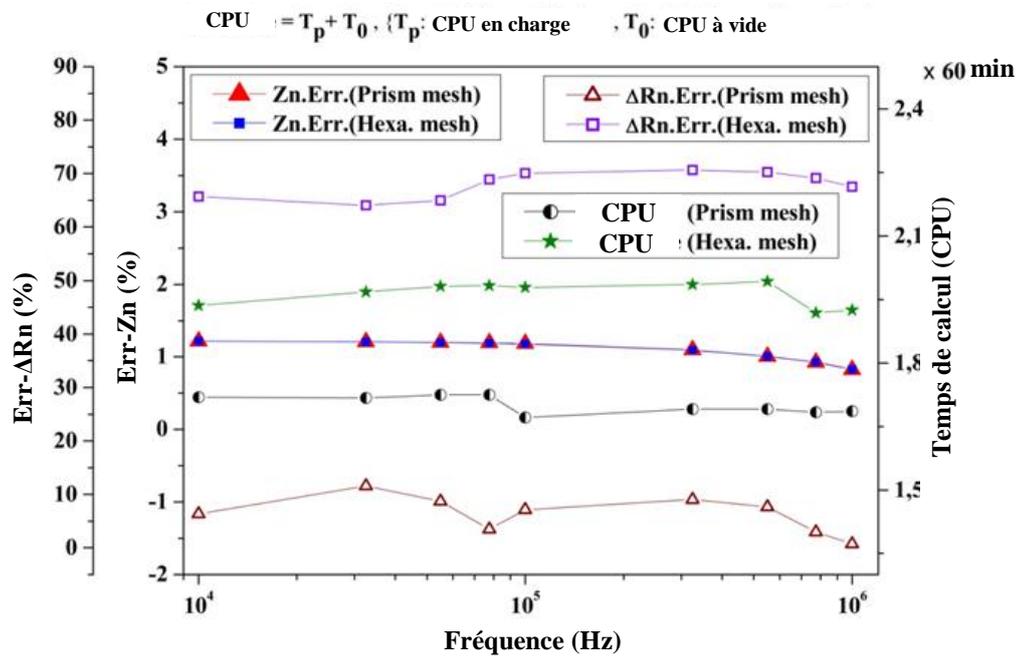


FIGURE 4.13. Erreur et temps de calcul en charge (CFRP).

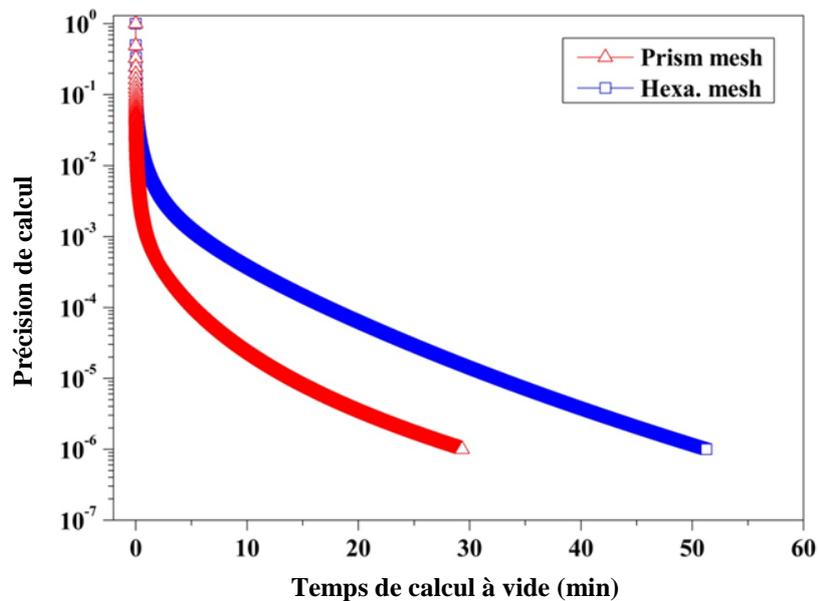


FIGURE 4.14. Convergence du calcul à vide pour une fréquence de 10^4 Hz.

L'erreur relative moyenne de la résistance normalisée pour toute la gamme de fréquences du modèle numérique basé sur le maillage prisme est d'environ 6,4%, avec une erreur maximale 11,6%, alors que l'erreur relative moyenne due du maillage hexaédrique est d'environ 67,9%, avec une erreur maximale de 70,7% (FIGURE 4.13). En conséquence, dans le cas en charge, le modèle basé sur le maillage prisme est plus précis que le modèle hexaédrique. De plus, dans le cas à vide le modèle développé (à la base du maillage prisme) est également rapide, comme le montre la FIGURE 4.14.

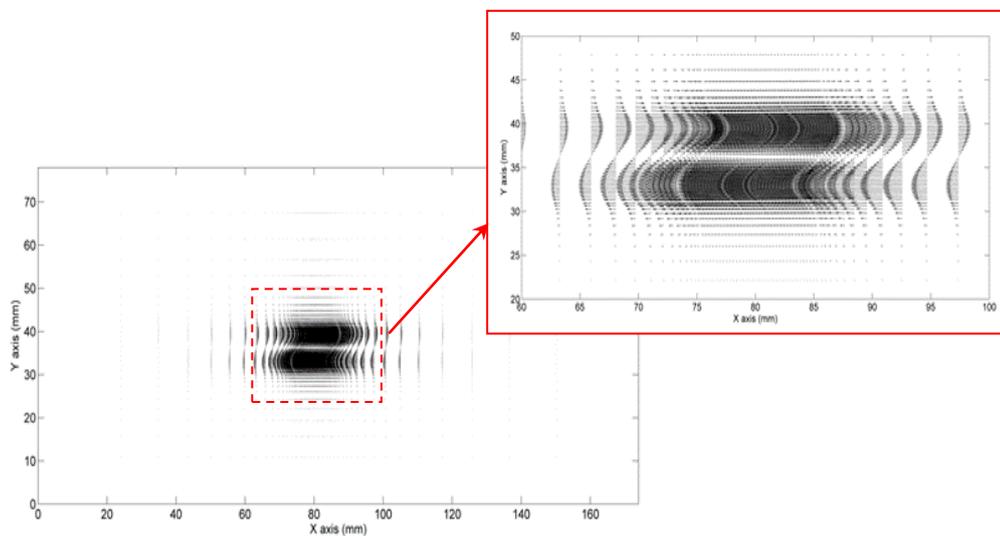


FIGURE 4.15. Distribution de la partie réelle des courants induits à la fréquence 10^4 Hz.

En outre, comme indiqué ci-dessus (FIGURES 4.11 et 4.12) concernant la sensibilité du capteur, plusieurs auteurs (ex. Menana [77], Bensaid [170] et Cheng [180]) exploitent la variation de la résistance du capteur au lieu de la réactance pour caractériser le tenseur de la conductivité électrique des matériaux composites CFRP.

À titre d'illustration, la FIGURE 4.15. montre la distribution de la partie réelle des courants induits développés au sein de la plaque CFRP, où la fréquence d'excitation du capteur est 104Hz. En conséquence, les courants induits sont

dirigés suivant la direction d'orientation des fibres, cette apparence est provoquée par le fort taux d'anisotropie ($\approx 99\%$).

En conclusion, suivant ces deux investigations (CND-CF du matériau Al-B et CFRP), le code de calcul développé montre leur crédibilité pour la modélisation et l'analyse des problèmes de CND-CF liées aux matériaux composites.

IV.4.3 Evaluation du défaut de délaminage

Cette investigation consiste à évaluer l'épaisseur du défaut de délaminage, qui est apparu au sein d'une structure en composite stratifié hybride (CARALL) par la méthode d'évaluation non destructive par les courants de Foucault (END-CF). Afin de procéder à l'investigation du problème, le code de calcul développé est couplé à l'algorithme de simplex Nelder-Mead [181]. De plus, le modèle 3D-MVF anisotrope développé est prise en compte de l'hétérogénéité du composite stratifié hybride.

IV.4.3.1 Description du problème

Le problème étudié est constitué d'une structure de composite stratifié hybride (CARAAL) conçue par l'empilement d'un pli de CFRP unidirectionnel et feuille en alliage d'aluminium. Ce matériau possède un défaut de délaminage entre les deux couches, comme le montre la FIGURE 4.16. Cette structure est placée au-dessous du capteur inductif avec un espacement de 0,1 mm. Le capteur est alimenté par une source de courant alternatif en multifréquence allant de 1 kHz à 22 kHz.

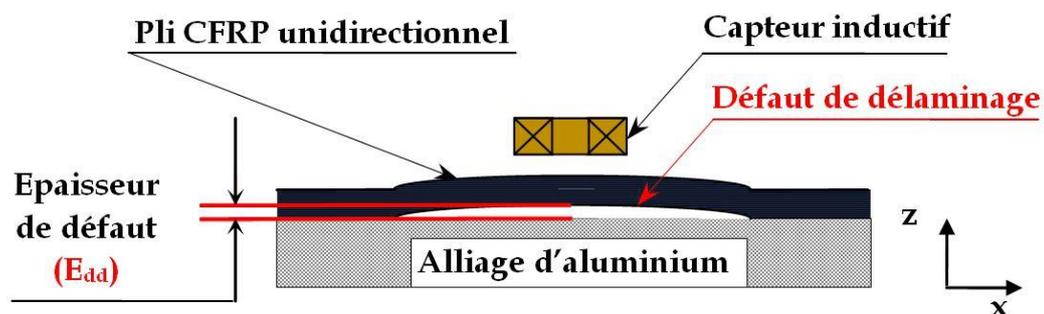


FIGURE 4.16. Description du problème traité.

Les mesures expérimentales sont effectuées par l'analyseur d'impédance (Réf. LCR-8105G) avec une erreur de mesure $\approx 0,1\%$. Les paramètres physiques et géométriques relatifs au problème de test, sont exposés dans le TABLEAU 4.4.

TABLEAU 4.4. Caractéristiques géométriques et physiques de CND-CF (CARAAL).

Paramètres de la structure CARALL	
Pli CFRP	
<i>Dimensions (mm)</i> [Longueur x largeur x épaisseur]	[174 x 78 x 0.15]
<i>Conductivité électrique</i> [155] (kS/m) [σ_l σ_t σ_z]	[6 0.1 0.1]
Feuille Al	
<i>Dimensions (mm)</i> [Longueur x largeur x épaisseur]	[174 x 78 x 5.1]
<i>Conductivité électrique (MS/m)</i> [σ]	[22]
Défaut de délaminage	
<i>Dimensions (mm)</i> [Longueur x largeur x épaisseur]	[40 x 40 x 0.13]
Paramètres du capteur (120 Spires)	
<i>Dimensions (mm)</i>	
[Rayon ext. Rayon int. Hauteur Lift-off]	[5 1 1.5 0.1]

IV.4.3.2 Résultats et discussions

Afin de modéliser le problème de test par la méthode MVF dont le modèle développé est sollicité, le domaine numérique doit être subdivisé en un grand nombre d'éléments prisme, comme l'illustre la FIGURE 4.17.

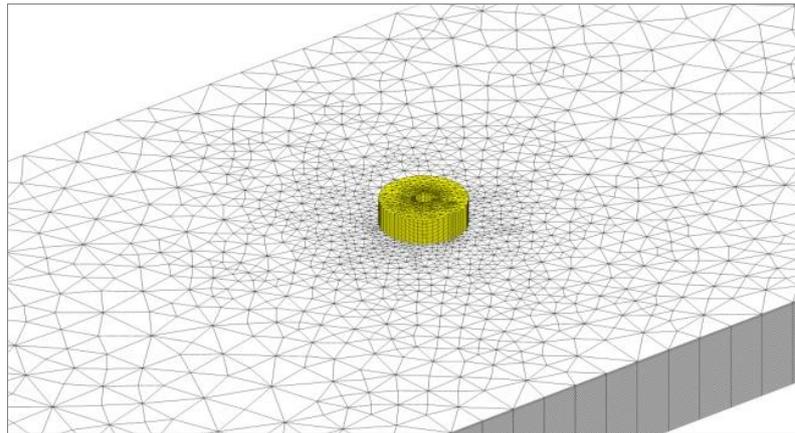


FIGURE 4.17. Maillage du domaine numérique.

a. Validation du code de calcul

Cette sous-section consiste de valider le code de calcul par comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le modèle développé. En conséquence, la FIGURE 4.18. montre les résultats expérimentaux et numériques, à savoir, la variation de la résistance et la réactance normalisées en fonction de la fréquence d'excitation pour les différents cas (Le cas sans défaut est désigné par le symbole " β " et le cas avec défaut par le symbole " α ").

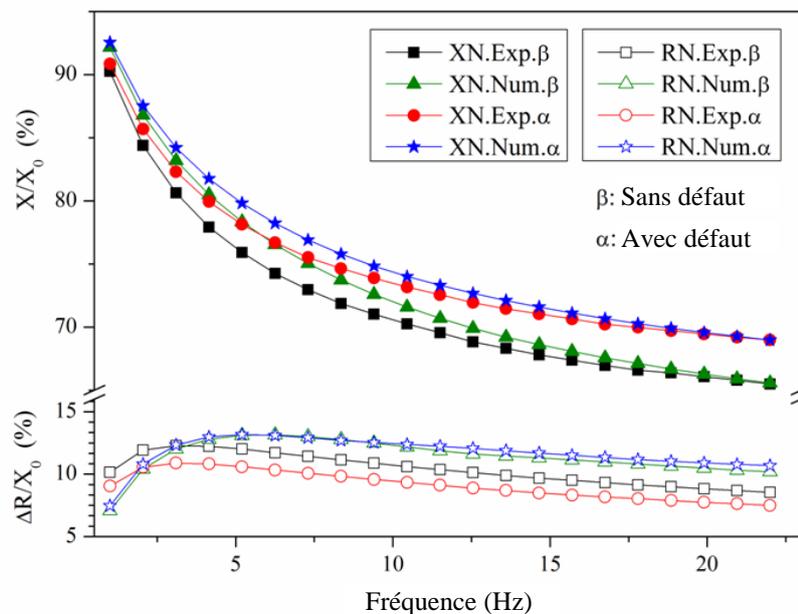


FIGURE 4.18. Variation de la résistance (Rn) et la réactance normalisées (Xn) en fonction de la fréquence (CARAAL).

Alors, on peut observer une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques. Cependant, l'erreur moyenne survenue sur la variation d'impédance normalisée est d'environ 1,8%, avec une erreur maximale de 3%.

Par ailleurs, avant de commencer la procédure d'estimation, il est nécessaire de sélectionner les paramètres sensibles à la détection de défaut, qui peuvent ensuite être exploités pour la procédure de l'estimation.

b. Détermination de paramètres sensibles à la détection

Le but de cette sous-section est de sélectionner les meilleurs paramètres sensibles à la détection du défaut, c.à.d. le choix fait entre la résistance et la réactance du capteur. De ce fait, la FIGURE 4.19. présente la variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du capteur en fonction de la fréquence. Le symbole étoile "*" est désigné la différence entre les valeurs normalisées pour les deux cas respectivement avec et sans défaut.

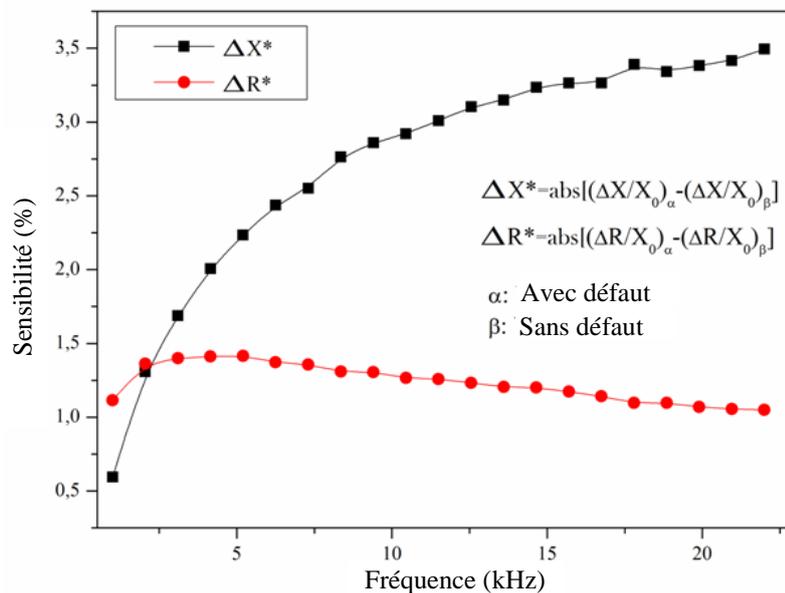


FIGURE 4.19. Résultats expérimentaux : Partie réelle (ΔR*) et imaginaire (ΔX*) de la variation de l'impédance du capteur en fonction de la fréquence (CARAAL).

Selon les résultats obtenus (FIGURE 4.19.), on peut constater que la partie imaginaire (ΔX^*) de la variation d'impédance du capteur est plus sensible à la présence de défaut que la partie réelle (ΔR^*). De plus, l'écart type standard (Std. Dev) lié à la partie imaginaire pour l'intervalle total des fréquences est égal à 0,778% et pour les trois dernières fréquences est égal à 0,0567%. A cet effet, nous pouvons sélectionner la partie imaginaire de la variation d'impédance comme paramètre sensible afin de procéder à l'estimation de l'épaisseur de défaut.

c. Procédure d'estimation de l'épaisseur

L'épaisseur du défaut de délaminage est estimée par la minimisation de la fonction objective (F_c) exprimée par l'équation 4.2. leur objectif est de minimiser la différence entre les résultats numériques et expérimentaux du paramètre sensible à une valeur donné (ξ : Erreur de calcul imposée), à savoir la partie imaginaire de l'impédance normalisée du capteur. Alors, l'organigramme correspondant à ce problème inverse, est présenté dans la FIGURE 4.20.

$$F_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\left| \left(\frac{\Delta X}{X_0} \right)_{Num} - \left(\frac{\Delta X}{X_0} \right)_{Exp} \right|}{\left(\frac{\Delta X}{X_0} \right)_{Exp}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Notez bien que la mise à jour de l'épaisseur « E_{dd} » initiale est assurée par l'algorithme de simplex Nelder-Mead pour chaque itération du code de calcul.

Les résultats liés à l'estimation de l'épaisseur « E_{dd} » relatifs aux fréquences sélectionnées sont récapitulés dans le TABLEAU 4.5. A titre d'illustration, La FIGURE 4.21. montre également la convergence progressive de la fonction « F_c » à la fréquence 22 kHz.

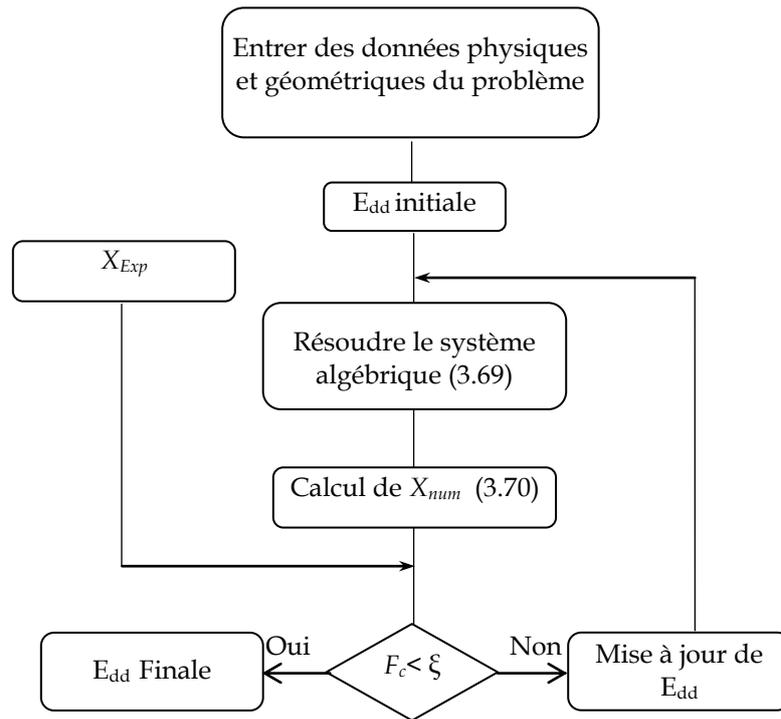


FIGURE 4.20. Organigramme du problème inverse.

TABLEAU 4.5. Récapitulatif des résultats.

Fréquence (kHz)	E_{dd} réelle (μm)	E_{dd} estimée (μm)	Erreur (%)
19.90	130 \pm 1%	124.22	4.44
20.95		127.11	2.22
22.00		130.23	0.18
Valeur moyenne		127.19	2.28

En conséquence, une bonne précision est observée, à savoir, l'erreur moyenne de l'épaisseur « E_{dd} » est d'environ 2,28%, avec une erreur maximale de 4,44%.

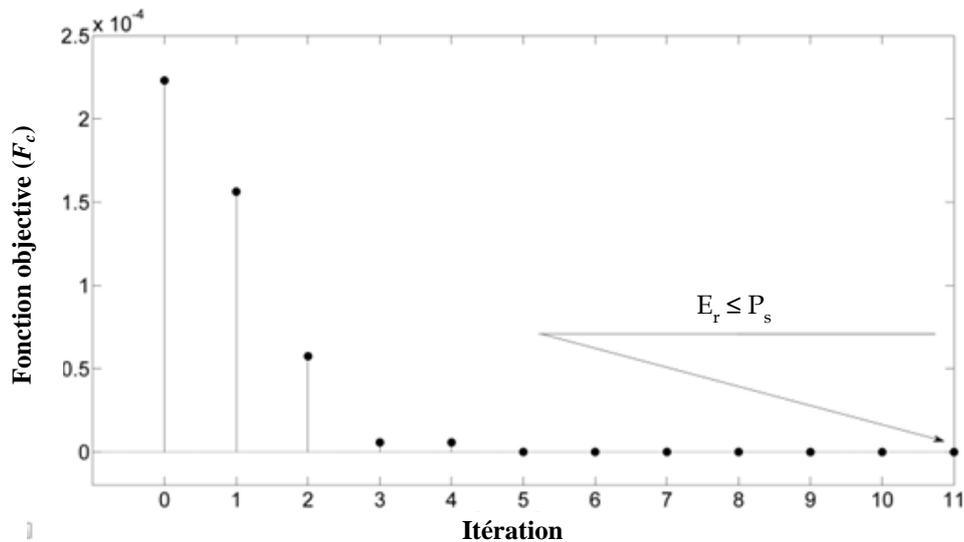


FIGURE 4.21. Convergence de la fonction objective (F_c) à la fréquence 22 kHz.

En conséquence, les résultats obtenus (TABLEAU 4.5.) montrent la fiabilité du code de calcul développé en application du problème inverse relatif à l'estimation de l'épaisseur de défaut de délaminage apparaît au sein d'une structure en composite hybride stratifié (CARAAL). Ainsi que, prouvent que l'END-CF est une efficace pour la caractérisation des matériaux composite.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une discussion détaillée a été portée au profit de la validation du code de calcul développé pour la modélisation, l'analyse et l'évaluation des problèmes de CND-CF des matériaux composites. Le code de calcul est basé sur le modèle 3D-MVF anisotrope développé dont le maillage prisme a été sollicité. Plusieurs investigations ont été exposées dans ce chapitre, dont certaines ont été publiées dans [166, 167].

D'abord, on a commencé par la modélisation des composites CFRP stratifiés multidirectionnels (L'empilement des plis est à différentes séquences d'orientation des fibres), les résultats obtenus, à savoir la densité et la distribution des courants induits au sein du spécimen, prouvent l'efficacité du code de calcul développé. Par la suite, deux investigations expérimentales ont été consacrées pour valider ledit code de calcul, à savoir le CND-CF du matériau composite à faible taux

d'anisotropie tel que l'alliage d'aluminium renforcé de fibres de bore (Al-B) dont le taux d'anisotropie est d'environ 31% et le polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) dont le taux d'anisotropie est fort ($\approx 99\%$). De plus, une concurrence a été menée entre le présent modèle et celui dont le maillage hexaédrique est employé. En conséquence, le code en question, montre leur précision de calcul, tel que l'erreur relative moyenne a atteint à 0.73% avec une erreur maximale d'environ 1.77% dans le cas du CND-CF du Al-B, de plus, dans le cas de CND-CF du CFRP, l'erreur relative moyenne a atteint à 6.40% avec une erreur maximale d'environ 11.60%. Cependant, le code de calcul dont le maillage hexaédrique est employé, il a fourni moins de précision comparativement au précédent, à savoir, dans le cas du CND-CF du Al-B, l'erreur relative moyenne a atteint à 11.51% avec une erreur maximale d'environ 21.71%, de plus, dans le cas de CND-CF du CFRP, l'erreur relative moyenne a atteint à 67.90% avec une erreur maximale d'environ 70.70%. Par ailleurs, nous n'avons constaté que la partie réelle de l'impédance normalisée du capteur en CND-CF du CFRP, est sensible à la variation de la fréquence. De ce fait, elle est la composante préférable pour la caractérisation du tenseur de la conductivité électrique par la méthode de CND-CF [77, 170, 180].

Finalement, un problème d'évaluation (problème inverse) de l'épaisseur de délaminage ($\approx 130\mu\text{m}$) apparu au sein d'une structure en composite stratifié hybride (CARAAL) a été traité. Ainsi, le code de calcul développé a été couplé à l'algorithme simplex afin de procéder à l'estimation de l'épaisseur en question. En conséquence, nous avons constaté que l'erreur moyenne de l'estimation de ladite épaisseur est d'environ 2.28%, avec une erreur maximale 4.43%. Alors, le code de calcul montre leur fiabilité pour le traitement des problèmes inverses relatifs à l'END-CF des matériaux composite.

En conclusion, les investigations citées ci-dessus prouvent l'efficacité du code de calcul développé basé sur le modèle 3D-MVF anisotrope, pour la modélisation, l'analyse et l'évaluation des problèmes liés aux matériaux composites par la méthode des courants de Foucault.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La contribution principale de cette thèse a concerné le développement d'un code de calcul magnétodynamique 3D basé sur la méthode MVF dont le maillage prisme est sollicité. Ce code testé et validé, est dédié principalement pour la modélisation des problèmes de CND-CF des matériaux composites. Trois différentes investigations ont été effectuées relatives aux problèmes de CND-CF liés aux matériaux composites, dont certaines ont été publiées dans [166, 167]. En premier lieu, on a commencé par la modélisation du composite CFRP stratifié multidirectionnel dont l'empilement des plis est à différentes séquences d'orientation. Les résultats obtenus relatifs à la distribution des courants induits dans la structure ont montré l'efficacité du code développé, montrant que les courants induits sont dirigés suivant l'orientation des fibres dans chaque pli. Une confrontation a été menée entre le présent code de calcul et celui dans lequel le maillage hexaédrique est adopté. Cette confrontation est réalisée autour de deux investigations expérimentales ; à savoir le CND-CF du matériau composite (Al-B) à faible taux d'anisotropie ($\approx 31\%$) et le CND-CF du matériau composite (CFRP) à fort taux d'anisotropie ($\approx 99\%$). En conséquence, le code de calcul relatif au maillage prisme a prouvé son efficacité en termes de précision de calcul, où l'erreur relative moyenne atteinte est 0.73% pour le cas de CND-CF du Al-B et 6.40% pour le cas de CND-CF du CFRP. Cependant, le code de calcul relatif au maillage hexaédrique a fourni moins de précision, pour le cas du CND-CF du Al-B, l'erreur relative moyenne atteinte est de l'ordre de 11.51% , tandis que 67.90% pour le cas de CND-CF du CFRP. De plus, le temps de calcul lié au maillage prisme est approximativement deux fois moins de celui du maillage hexaédrique. Pour les problèmes présentant un défaut, un problème d'évaluation de l'épaisseur d'un défaut de délaminage, de l'ordre de $130\mu\text{m}$, a été traité. Ce défaut est apparait au sein d'une structure en composite stratifié hybride (CARAAL). La procédure de l'évaluation consiste à associer au code de calcul développé un

algorithme de type simplex. Nous avons constaté que l'erreur moyenne de l'épaisseur de défaut estimé est d'environ de 2.28%, avec une erreur maximale de l'ordre de 4.43%.

En termes de perspectives, on s'intéresse à :

- L'utilisation de la technique de maillage non-conforme afin de développer un mailleur plus adapté aux régions minces anisotropes,
- La sollicitation de la formulation T- Ω pour les domaines multiples connexes,
- L'emploi des volumes finis tétraédriques afin de développer un modèle adapté aux problèmes de géométrie complexe.
- Pour le traitement des problèmes inverses, il pourrait être intéressant d'utiliser d'autres méthodes d'inversion telle que l'algorithme PSO.

ANNEXES

A. La méthode MVF-Hexaédrique liée aux milieux anisotropes

Dans cette partie, nous présenterons la solution numérique du système d'équations EDP's (3.38) présenté en formulation A-V, cette solution consiste à employer la méthode MVF dont le maillage hexaédrique est pris en compte.

Par conséquent, le domaine numérique doit être subdivisé en un nombre étendu de volumes élémentaires hexaédrique. Alors, chaque élément principal (D_p) est caractérisé par le nœud principale « P », six facettes (e, w, n, s, t et b) et entouré par six éléments voisins dont ses nœuds sont : E, W, N, S, T et B, comme le montre la FIGURE A.1.

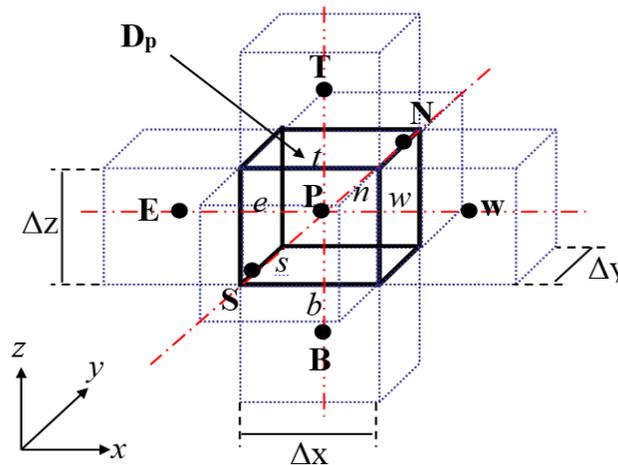


FIGURE A.1. Volume élémentaire hexaédrique (D_p).

Après cela, l'intégration de (3.38) peut être présentée comme suit :

$$\left. \begin{aligned} \iiint_{D_p} \left(\underbrace{\nabla \times (v_0 \nabla \times \mathbf{A})}_{\textcircled{1}} \right)_{x,y,z} - \underbrace{\nabla (v_0 \nabla \cdot \mathbf{A})}_{\textcircled{2}} \Big|_{x,y,z} + j\omega \underbrace{\tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)}_{\textcircled{3}} \Big|_{x,y,z} \Big) dx dy dz = \underbrace{\iiint_{D_p} \mathbf{J}_s}_{\textcircled{4}} \Big|_{x,y,z} dx dy dz \\ \underbrace{\iiint_{D_p} \nabla \cdot [-j\omega \tilde{\sigma}(\mathbf{A} + \nabla v)]}_{\textcircled{5}} \Big|_{x,y,z} dx dy dz = 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.1})$$

Le développement des termes ①, ② et ④ est bien détaillé par Cheriet [152] et Lakhdari [113], alors, nous intéresserons par le développement des termes ③ et ⑤ dont le milieu anisotrope est introduit.

$$\textcircled{3} \Rightarrow j\omega \int \int \int_{w s b}^{e n t} \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_{xx} & \tilde{\sigma}_{xy} & 0 \\ \tilde{\sigma}_{yx} & \tilde{\sigma}_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\sigma}_{zz} \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial_x v \\ \partial_y v \\ \partial_z v \end{bmatrix} \right] dx dy dz \quad (\text{A.2})$$

Afin d'illustrer la procédure du développement de l'intégration, on ne considère que la composante x.

$$\textcircled{3}_x \Rightarrow j\omega (\tilde{\sigma}_{xx} + \tilde{\sigma}_{yx}) A_x \Big|_p D_p + j\omega (\tilde{\sigma}_{xx} + \tilde{\sigma}_{yx}) \partial_x v \Big|_p D_p \quad (\text{A.3})$$

D'autre, supposons que le potentiel électrique « v » subit à une variation linéaire dans l'élément D_p . Donc, la dérivée du potentiel v au nœud P doit être exprimée par une différence de potentiels aux facettes w et e . Alors, chaque facette est située sur le plan entre deux éléments adjacent. Comme montre la FIGURE A.2, Alors $\textcircled{3}_x$ devient :

$$j\omega (\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P) A_x^P D_p + j\omega (\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P) \frac{v^E - v^W}{\Delta x_e + \Delta x_w} D_p \quad (\text{A.4})$$

Afin d'alléger la représentation de (A.4), nous proposons

$$\left. \begin{aligned} a_x^3 &= j\omega (\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P) D_p \\ b_x^3 &= j\omega \frac{(\tilde{\sigma}_{xx}^P + \tilde{\sigma}_{yx}^P)}{\Delta x_e + \Delta x_w} D_p \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.5})$$

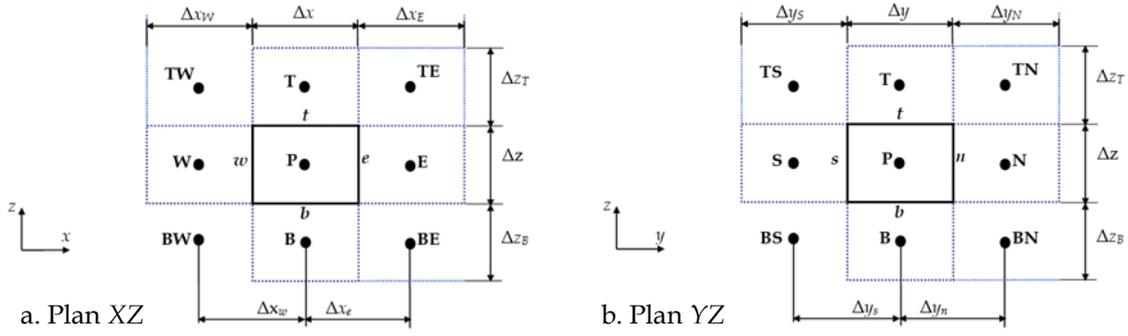


FIGURE A.2. Projection de l'élément D_p sur les plans.

En outre, le développement du terme $\textcircled{5}$ de (A.1), conduira à :

$$\left. \begin{aligned}
 & \underbrace{\int\int\int_{w s b}^{e n t} \partial_x \left((\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yx}) (A_x + \partial_x v) \right) dx dy dz + \dots}_{\textcircled{5}_1} \\
 -j\omega & \underbrace{\int\int\int_{w s b}^{e n t} \partial_y \left((\bar{\sigma}_{yy} + \bar{\sigma}_{xy}) (A_y + \partial_y v) \right) dx dy dz + \dots}_{\textcircled{5}_2} \\
 & \underbrace{\int\int\int_{w s b}^{e n t} \partial_z \left(\bar{\sigma}_{zz} (A_z + \partial_z v) \right) dx dy dz}_{\textcircled{5}_3}
 \end{aligned} \right) \quad (\text{A.6})$$

A titre d'illustration, nous prenons le premier terme ($\textcircled{5}_1$) de (A.6).

$$\textcircled{5}_1 \Rightarrow \left(\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yx} \right) (A_x + \partial_x v) \Big|_w^e \Delta y \Delta z \quad (\text{A.7})$$

Alors, le développement de (A.7) conduit :

$$\textcircled{5}_1 \Rightarrow \left((\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yx}) A_x \Big|_e - (\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yx}) A_x \Big|_w \right) \Delta y \Delta z + \left((\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yx}) \partial_x v \Big|_e - (\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yx}) \partial_x v \Big|_w \right) \Delta y \Delta z \quad (\text{A.8})$$

Nous supposons que le potentiel vecteur magnétique (A_x) à la facette w est approximé par la moyenne des potentiels aux nœuds W et P , également pour la facette e , par la moyenne aux nœuds E et P . De plus, en considérant une variation linéaire du potentiel v à travers les facettes w et e , donc l'équation (A.8) devient :

$$\begin{aligned} & \left((\bar{\sigma}_{xx}^e + \bar{\sigma}_{yx}^e) \frac{A_x^E + A_x^P}{2} - (\bar{\sigma}_{xx}^w + \bar{\sigma}_{yx}^w) \frac{A_x^W + A_x^P}{2} \right) \Delta y \Delta z + \dots \\ & \left((\bar{\sigma}_{xx}^e + \bar{\sigma}_{yx}^e) \frac{v^E - v^P}{\Delta x_e} - (\bar{\sigma}_{xx}^w + \bar{\sigma}_{yx}^w) \frac{v^P - v^W}{\Delta x_w} \right) \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Afin d'alléger la représentation de (A.9), nous proposons :

$$\left. \begin{aligned} c^e &= (\bar{\sigma}_{xx}^e + \bar{\sigma}_{yx}^e) \frac{\Delta y \Delta z}{2}, & c^w &= (\bar{\sigma}_{xx}^w + \bar{\sigma}_{yx}^w) \frac{\Delta y \Delta z}{2}. \\ u^e &= (\bar{\sigma}_{xx}^e + \bar{\sigma}_{yx}^e) \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x_e}, & u^w &= (\bar{\sigma}_{xx}^w + \bar{\sigma}_{yx}^w) \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x_w}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.9})$$

De la même manière, les deux autres termes de (A.6) sont calculés.

Alors, le développement de tous les termes de (A.1), aboutit à un système d'équations algébrique (Modèle 3D-MVF-HEXA), qui peut se présenter sous la forme matricielle (A.x=B).

$$[\mathbf{M}] \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}_s] \quad (\text{A.10})$$

La matrice « \mathbf{M} » caractérise les coefficients des propriétés géométriques et physiques de tous les éléments hexaédriques qui constituent tout le domaine numérique.

B. Application du modèle 3D-MVF-HEXA

L'objectif de cette investigation est de vérifier l'efficacité du code de calcul développé basé sur le modèle 3D-MVF-HEXA en application de CND-CF lié au composite anisotrope. Alors, cette investigation consiste à analyser l'influence des orientations des fibres et le taux d'anisotropie (différentes valeurs du tenseur de la conductivité électrique) sur la distribution des courants de Foucault au sein d'une structure en composite stratifié multidirectionnel.

A cet effet, le problème de test est constitué d'une bobine à noyau d'air, placée au-dessus d'une plaque en CFRP stratifié multidirectionnel, comme le montre la FIGURE 4.2. de la section IV.3. Alors, La plaque est constituée d'un empilement de huit plis unidirectionnels avec un ordre d'orientation bien défini [179]. La description géométrique et physique du problème est présentée dans le TABLEAU 4.1. La fréquence du courant d'alimentation est fixée à 1 MHz.

Suite à l'exécution du code de calcul, les résultats obtenus sont exposés dans les FIGURES B.1, B.2, B.3 et B.4. Donc, les FIGURES B.1 et B.2 illustrent respectivement, la densité et la distribution des courant de Foucault au sein de chaque paire de plis, dans le cas où le matériau est quasi-anisotrope (Faible taux d'anisotropie $\approx 10\%$) dont le tenseur de la conductivité électrique $[\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 9 \cdot 10^4]$ (S/m) . Egalement, les FIGURES B.3 et B.4 montrent respectivement, la densité et la distribution des courant de Foucault au sein de chaque paire de plis, dans le cas de fort taux d'anisotropie ($\approx 99.9\%$) dont le tenseur de la conductivité électrique $[\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 10^2]$ (S/m).

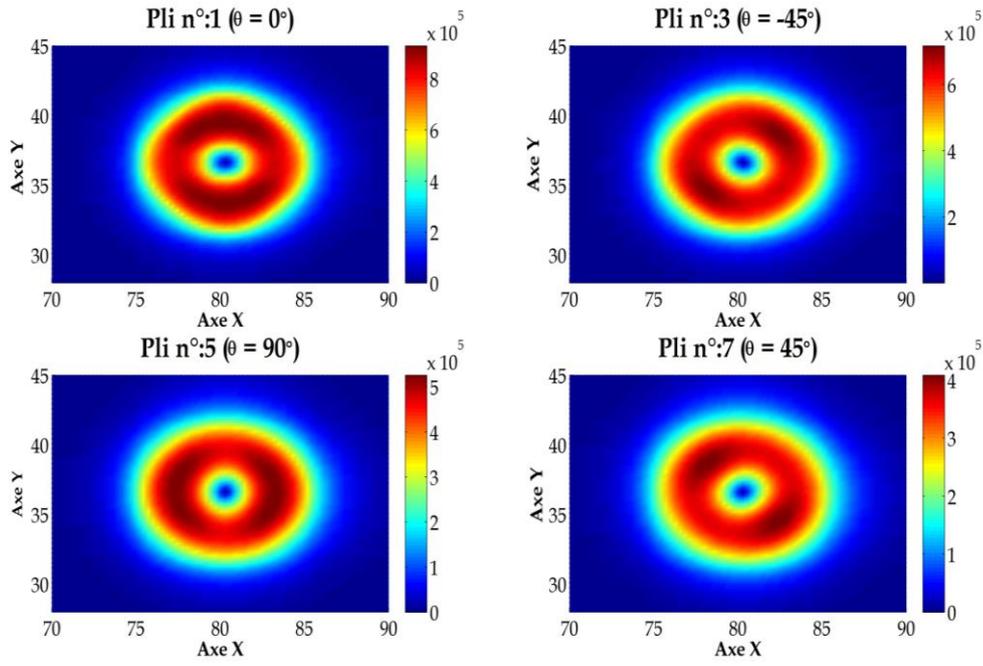


FIGURE B.1. Densité de la partie réelle des courants de Foucault à la fréquence

$$1\text{MHz}, \bar{\sigma} = \left[\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 9 \cdot 10^4 \right] \text{ (S/m)}.$$

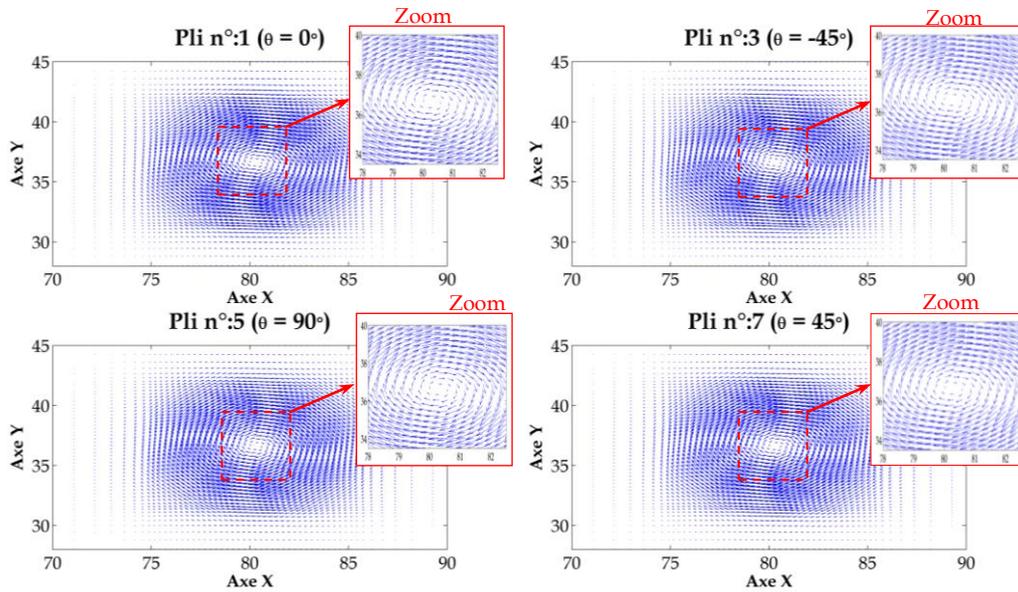


FIGURE B.2. Distribution des courants de Foucault à la fréquence 1 MHz,

$$\bar{\sigma} = \left[\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 9 \cdot 10^4 \right] \text{ (S/m)}.$$

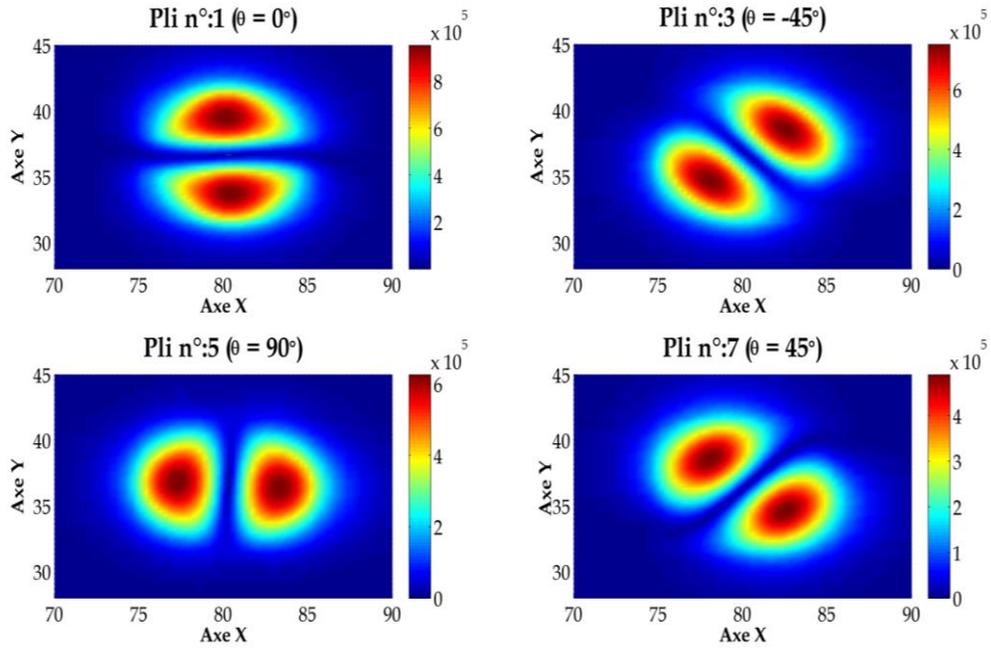


FIGURE B.3. Densité de la partie réelle des courants de Foucault à la fréquence

$$1\text{MHz}, \bar{\sigma} = \left[\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 10^2 \right] \text{ (S/m)}.$$

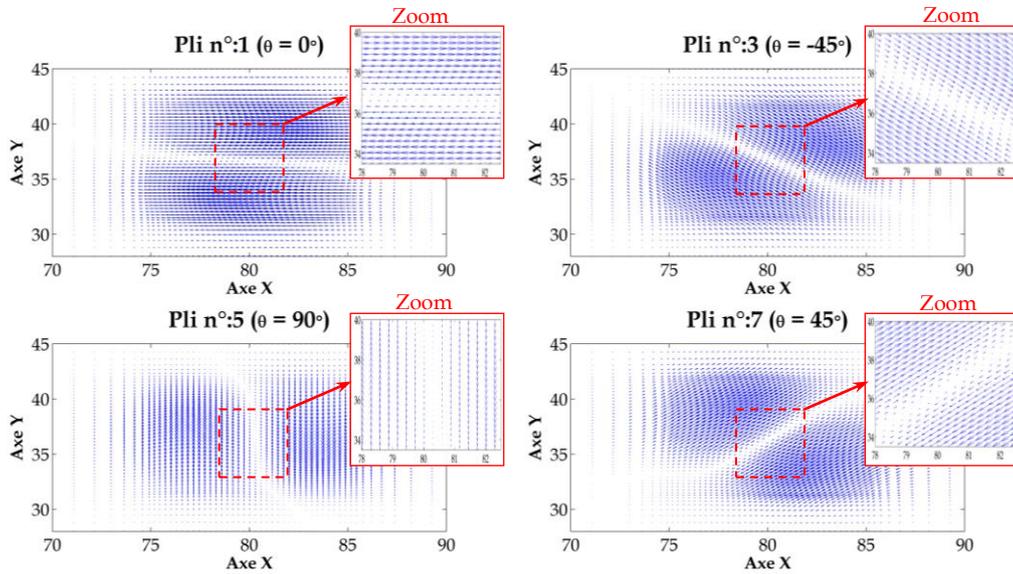


FIGURE B.4. Densité des courants de Foucault à la fréquence 1 MHz,

$$\bar{\sigma} = \left[\sigma_l = 10^5 \text{ et } \sigma_t = \sigma_z = 10^2 \right] \text{ (S/m)}.$$

Dans le premier cas, où le taux d'anisotropie est faible ($\approx 10\%$), nous constatons que la partie réelle des courants de Foucault est relativement dense suivant la direction des orientations des fibres (FIGURE B.1), ainsi que, ces courants sont dirigés dans les deux directions (x et y) dans chacun de pli (FIGURE B.2), ça nous semble le cas du matériau quasi-isotrope.

Dans le cas du matériau fortement anisotrope (Taux d'anisotropie $\approx 99.9\%$), nous remarquons que la partie réelle des courants de Foucault est fortement dense suivant la direction des orientations des fibres (FIGURE B.3), les courants de Foucault sont dirigés également suivant ses orientations dans chacun de pli (FIGURE B.4).

Par conséquent, les résultats obtenus montrent l'efficacité du code de calcul développé basé sur le modèle 3D-MVF-HEXA pour la modélisation du problème de CND-CF lié au composite stratifié, dont l'empilement des plis a différentes séquences d'orientations des fibres.

Bibliographie

- [1] Pozegic, T. R., Anguita, J. V., Hamerton, I., Jayawardena, K. D. G. I., Chen, J. S., Stolojan, V., Balocchi, P., Walsh, R. & Silva, S. R. P. (2016). Multi-functional carbon fibre composites using carbon nanotubes as an alternative to polymer sizing. *Scientific reports*, 6, 37334.
- [2] Ghobadi, A. (2017). Common type of damages in composites and their inspections. *World Journal of Mechanics*, 7(02), 24.
- [3] Freissinet, S. 1001 Crash. <http://www.1001crash.com/index-Page-Composite-Lg-2.html>, 2019.
- [4] Ramírez, J. P. B. (2013). *Caractérisation et modélisation de l'endommagement des composites bobinés. Application à la prédiction de l'éclatement des réservoirs bobinés hyperbares* (Thèse de doctorat, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, France).
- [5] Zenia, S. (2017). *Modélisation numérique de l'usinage des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues de carbone* (Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France).
- [6] Gornet, L. (2011). *Généralités sur les Matériaux Composites*. École Centrale de Nantes.
- [7] Muñoz Cuartas, V. A. (2015). *Identification de mécanismes d'endommagement de stratifiés carbone-époxyde par couplage de l'émission acoustique et de la thermographie infrarouge* (Thèse de doctorat, École Doctorale Mécanique, Énergétique, Toulouse, France).
- [8] Al-Maghribi, A. (2008). *Comportement des matériaux composites à fibres courtes: applications à l'impact basse vitesse* (Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, France).
- [9] Nechad, H. (2004). *Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante* (Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France).
- [10] Mittal, G., Rhee, K. Y., Mišković-Stanković, V., & Hui, D. (2018). Reinforcements in multi-scale polymer composites: processing, properties, and applications. *Composites Part B : Engineering*, 138, 122-139.
- [11] Senghor, F. D. (2017). *Identification des propriétés anisotropes des matériaux complexes: application aux matériaux composites stratifiés* (Thèse de doctorat, Université de Nantes, France).
- [12] Matériaux composites : <http://www.mechscience.com/composite-materials>, 2018.

- [13] Lemaitre, J., Chaboche, J. L., & Germain, P. (1985). *Mécanique des matériaux solides* (Vol. 2), Dunod, Paris, France.
- [14] Hentati, N. (2014). *Matériaux composites à matrice organique pour garnitures de frein : analyse des liens entre le procédé d'élaboration, la microstructure, les propriétés et le comportement tribologique : analyse des liens entre le procédé d'élaboration, la microstructure, les propriétés et le comportement tribologique*, (Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, France).
- [15] Gay, D. (2005), *Matériaux composites*, 5^{ème} édition, Lavoisier.
- [16] Zhang, D., He, M., Qin, S., & Yu, J. (2017). Effect of fiber length and dispersion on properties of long glass fiber reinforced thermoplastic composites based on poly (butylene terephthalate). *RSC advances*, 7(25), 15439-15454.
- [17] Zweben, C. (2006). Composite Materials. In *Mechanical Engineers' Handbook*, M. Kutz (Ed.). doi:10.1002/0471777447.ch10
- [18] Fibre de carbone : https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_fibers., 2018.
- [19] Bour, Y. (1999). *Matériaux composites à fibres courtes : Relation entre facteur d'orientation et propriétés mécaniques et thermiques* (Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine-Metz, France).
- [20] Achour, T. (2011). *Étude des techniques de réparation des structures composites endommagées* (Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, Algérie).
- [21] Bensaid, S. (2006). *Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes* (Thèse de doctorat, Université de Nantes, France).
- [22] Kaouche, N. (2016). *Étude des techniques de réparation des structures composites endommagées* (Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie).
- [23] Bathias, C. (2009) : *Matériaux composites*. Dunod.
- [24] Boulanghien, M. (2014). *Formulations de composites thermoplastiques à partir de fibres de carbone recyclées par vapo-thermolyse* (Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).
- [25] Aucher, J. (2009). *Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable* (Thèse de doctorat, INSA Institut national des sciences appliquées de Rouen, France).
- [26] Wiess, P., La chimie des polymères. Société Francophone de Biomatériaux Dentaires. <http://campus.cerimes.fr>., 2011.
- [27] Bigg, D. M., Hiscock, D. F., Preston, J. R., & Bradbury, E. J. (1988). Thermoplastic matrix sheet composites. *Polymer composites*, 9(3), 222-228.
- [28] Novo, P. J., Nunes, J. P., Silva, J. F., Tinoco, V., & Marques, A. T. (2013). Production of thermoplastics matrix preimpregnated materials to manufacture composite pultruded profiles. *Ciência & Tecnologia dos*

- Materials*, 25(2), 85-91.
- [29] Butaud, P. (2015). *Contribution à l'utilisation des polymères à mémoire de forme pour les structures à amortissement contrôlé* (Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France).
- [30] Polymère thermoplastique & thermodurcissable : <https://www.adhesiveandglue.com>, 2019.
- [31] Akca, E., & Gursel, A. (2015). A review on the matrix toughness of thermoplastic materials. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 3(2).
- [32] Yu, M. (2013). *Elaboration de composites à matrice métallique d'alliages d'aluminium par projection à froid* (Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France).
- [33] Boudjema, H. L.. (2016). *Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables* (Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, Algérie).
- [34] Bensaid, S., Trichet, D., & Fouladgar, J. (2006). Electromagnetic and thermal behaviors of multilayer anisotropic composite materials. *IEEE transactions on magnetics*, 42(4), 995-998.
- [35] Jollivet, T., Peyrac, C., & Lefebvre, F. (2013). Damage of composite materials. *Procedia Engineering*, 66, 746-758.
- [36] Trovalet, M. (2010). *Sur un modèle micro pour le calcul des structures en composites stratifiés* (Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, France).
- [37] Gamstedt, E. K., & Sjögren, B. A. (1999). Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies. *Composites Science and Technology*, 59(2), 167-178.
- [38] Lagattu, F., & Lafarie-Frenot, M. C. (2000). Variation of PEEK matrix crystallinity in APC-2 composite subjected to large shearing deformations. *Composites science and technology*, 60(4), 605-612.
- [39] Gauthier, E., & Laurent, G. (Juin, 2017). Caractérisation probabiliste du défaut de porosité pour un composite stratifié. *Journées Nationales sur les Composites (JNC20), Paris, France*.
- [40] Ledru, Y. (2009). *Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques* (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France).
- [41] KASTNER, J., PLANK, B., SALABERGER, D. et SEKELJA, J. (2010). Defect and Porosity Determination of Fibre Reinforced Polymers by X-ray Computed Tomography. International Symposium on NDT in Aerospace, We.1.A.2.
- [42] Bui, H. K. (2014). *Contribution à la modélisation multiphysique des matériaux composites stratifié : application au CND thermo-inductifs* (Thèse de

- doctorat, Université de Nantes, France).
- [43] Brauer, D. S., Rüssel, C., Vogt, S., Weisser, J., & Schnabelrauch, M. (2008). Degradable phosphate glass fiber reinforced polymer matrices: mechanical properties and cell response. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19(1), 121.
- [44] Rebière, J. L. (2014). Matrix cracking and delamination evolution in composite cross-ply laminates. *Cogent Engineering*, 1(1), 943547.
- [45] Matériaux composite, ch.12 : www.compomecagrimp.com, 2019.
- [46] Okabe, T., Nishikawa, M., & Takeda, N. (2008). Numerical modeling of progressive damage in fiber reinforced plastic cross-ply laminates. *Composites Science and Technology*, 68(10-11), 2282-2289.
- [47] Garnier, C., Pastor, M. L., Eyma, F., & Lorrain, B. (2011). The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using Non Destructive Testing. *Composite structures*, 93(5), 1328-1336.
- [48] Cung, T. L. (2012). *Évaluation non-destructive quantitative de structures aéronautiques par la méthode des courants de Foucault* (Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, France).
- [49] Cherfaoui, M. (2006), *Essais non destructifs*. BM6450. Techniques de l'Ingénieur.
- [50] Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P. (2018). A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites. *Journal of materials science*, 1-24.
- [51] Arumugam, V., Kumar, C. S., Santulli, C., Sarasini, F., & Stanley, A. J. (2011). A Global Method for the Identification of Failure Modes in Fiber glass Using Acoustic Emission. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5).
- [52] Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50-57.
- [53] Introduction au contrôle par émission acoustique (<http://www.nde-ed.org>), 2019.
- [54] Lu, Y. (2010). *Non-destructive Evaluation on Concrete Materials and Structures using Cement-based Piezoelectric Sensor*. (Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Hong Kong, Chine).
- [55] Zaidi, H. (2012). *Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples* (Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI, France).
- [56] Ferreira, J. P., Lopez, F., Nicolau, V., Albertazzi, A., & Willemann, D. (2011, October). Comparison of infrared thermography and shearography for non-destructive evaluation of composites materials by pulsed-heating excitation. In *5th Pan American Conference for NDT*,

- Cancun, Mexico, October (pp. 2-6).
- [57] Hung, Y. Y. (1999). Applications of digital shearography for testing of composite structures. *Composites Part B: Engineering*, 30(7), 765-773.
- [58] De Angelis, G., Meo, M., Almond, D. P., Pickering, S. G., & Angioni, S. L. (2012). A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization. *Ndt & E International*, 45(1), 91-96.
- [59] Hung, Y. Y., Yang, L. X., & Huang, Y. H. (2013). Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography. In *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites* (pp. 84-115). Woodhead Publishing.
- [60] Rolland, H., Saintier, N., Wilson, P., Merzeau, J., & Robert, G. (2017). In situ X-ray tomography investigation on damage mechanisms in short glass fibre reinforced thermoplastics: Effects of fibre orientation and relative humidity. *Composites Part B: Engineering*, 109, 170-186.
- [61] Katunin, A., Danczak, M., & Kostka, P. (2015). Automated identification and classification of internal defects in composite structures using computed tomography and 3D wavelet analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(2), 436-448.
- [62] Le contrôle non destructif : <https://www.cyril-ravat.fr>, 2019
- [63] Principe de la thermographie : <https://metalblog.ctif.com>, 2019.
- [64] Mulaveesala, R., & Tuli, S. (2008, April). Applications of Frequency Modulated Thermal Wave Imaging For Non-destructive Characterization. In *AIP Conference Proceedings*(Vol. 1004, No. 1, pp. 15-22). Kollam, Kerala.
- [65] Toubal, L., Karama, M., & Lorrain, B. (2006). Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading. *International journal of Fatigue*, 28(12), 1867-1872.
- [66] Ciampa, F., Mahmoodi, P., Pinto, F., & Meo, M. (2018). Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components. *Sensors*, 18(2), 609.
- [67] Pickering, S., & Almond, D. (2008). Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques. *Ndt & E International*, 41(7), 501-509.
- [68] Maillard, S., Cadith, J., Walaszek, H., Dillenz, A., & Bodnar, J. L. (2008, May). La thermographie infrarouge stimulée, une nouvelle technique de contrôle sur les lignes de production. In *COFREND congress proceedings, Toulouse, France*.
- [69] Wang, S., & Chung, D. D. L. (2006). Self-sensing of flexural strain and damage in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement. *Carbon*, 44(13), 2739-2751.

- [70] Wen, S., & Chung, D. D. L. (2007). Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement. *Carbon*, 45(4), 710-716.
- [71] Todoroki, A., Tanaka, M., & Shimamura, Y. (2002). Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method. *Composites Science and Technology*, 62(5), 619-628.
- [72] Wen, J., Xia, Z., & Choy, F. (2011). Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement. *Composites Part B: Engineering*, 42(1), 77-86.
- [73] Wang, S., Wang, D., Chung, D. D. L., & Chung, J. H. (2006). Method of sensing impact damage in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement. *Journal of materials science*, 41(8), 2281-2289.
- [74] Todoroki, A., Tanaka, M., & Shimamura, Y. (2005). Electrical resistance change method for monitoring delaminations of CFRP laminates: effect of spacing between electrodes. *Composites Science and Technology*, 65(1), 37-46.
- [75] Abry, J. C., Choi, Y. K., Chateauminois, A., Dalloz, B., Giraud, G., & Salvia, M. (2001). In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements. *Composites Science and Technology*, 61(6), 855-864.
- [76] Mook, G., Lange, R., & Koeser, O. (2001). Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents. *Composites science and technology*, 61(6), 865-873.
- [77] Menana, H., & Féliachi, M. (2009). 3-D eddy current computation in carbon-fiber reinforced composites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1008-1011.
- [78] Eddy current testing : <http://ndtechnologies.ie>, 2019.
- [79] Eddy Current Non Destructive Testing : <http://www.geocities.ws>, 2019.
- [80] Mayr, G., Plank, B., Sekelja, J., & Hendorfer, G. (2011). Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers. *NDT & E International*, 44(7), 537-543.
- [81] Munoz, V., Vales, B., Perrin, M., Pastor, M. L., Weleman, H., Cantarel, A., & Karama, M. (2016). Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography. *Composites Part B: Engineering*, 85, 68-75.
- [82] Goidescu, C., Weleman, H., Garnier, C., Fazzini, M., Brault, R., Péronnet, E., & Mistou, S. (2013). Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray

- tomography. *Composites Part B: Engineering*, 48, 95-105.
- [83] Libby, H.L.: 'Introduction to electromagnetic nondestructive test methods' (Wiley-Interscience, New York, USA, 1971).
- [84] Wu, T. (2016). *The theory of eddy current nondestructive evaluation by using the volume integral equation method*. Thèse de doctorat, Université d'Iowa, USA.
- [85] Lord, W. (1980). A survey of electromagnetic methods of nondestructive testing. In *Mechanics of nondestructive testing*(pp. 77-100). Springer, Boston, MA.
- [86] Udpa, S. S., & Moore, P. O. (2004). Nondestructive testing handbook. In *Electromagnetic testing* (Vol. 5). American Nondestructive Testing Society.
- [87] Hughes, D.E. (1879). Induction-balance and experimental researches therewith , *Philosophical Magazine Series 5*, 8(46), 50-56.
- [88] Grimberg, R. (2011). Electromagnetic nondestructive evaluation: present and future. *Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 57(3), 204-217.
- [89] Förster, F., Breiffeld, H. (1952). Theoretische und experimentelle Grundlagen der Zerstorungsfreien, *Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren (Parts I and II)*, *Z Metallkunde*, 43(5), 163-180
- [90] Förster, F., Breiffeld, H., Stombke, K. (1954). Theoretische und experimentelle Grundlagen der Zerstorungsfreien, *Werkstoffprüfung mit. Wirbelstromverfahren parts III and IV*, *Z Metallkunde*, 48(5), 166-199 and 221-226
- [91] Adamo, M., Nappi, C., & Sarnelli, E. (2010). Low-frequency nondestructive analysis of cracks in multilayer structures using a scanning magnetic microscope. *Superconductor Science and Technology*, 23(9), 095010.
- [92] Blitz J. (1997) Eddy current principles. In: *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Non-Destructive Evaluation Series*, vol 3. Springer, Dordrecht, Pays-Bas.
- [93] Biddle, C. C. (1976). *Theory of eddy currents for nondestructive testing* (Thèse de magister, Université de Florida, USA).
- [94] Eddy Current Principle: <http://www.kontrolltechnik.de>, 2019.
- [95] Barry Hull and Vernon John, "Non-destructive Testing", Basingstoke: Macmillan Education, 1988, ISBN-0333357884.
- [96] Li, X. (2012), *Eddy Current Techniques for Non-destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP)* (Thèse de doctorat, Université de Manchester, UK).
- [97] Lakhdari, A. E., Cheriet, A., & El-Ghoul, I. N. (2019). Skin effect based

- technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. *IET Science, Measurement & Technology*, 13(2), 255-259.
- [98] Popovic, Z., Popovic, B.D. (2000), 'Introductory electromagnetics', Prentice hall Upper Saddle River, NJ, USA.
- [99] Thollon, F. (1995). *Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques*. (Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France).
- [100] Dodd, C. V., Deeds, W. E., & Luquire, J. W. (1969). Integral solutions to some eddy current problems. *International Journal of Nondestructive Testing*, 1, 29-90.
- [101] Helifa, B. (2012). *Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes* (Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France).
- [102] Li, Y., Theodoulidis, T., & Tian, G. Y. (2007). Magnetic field-based eddy-current modeling for multilayered specimens. *IEEE Transactions on magnetics*, 43(11), 4010-4015.
- [103] Zorni, C. (2012). *Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques: de l'expérience au modèle d'interaction* (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- [104] Mook, G., Hesse, O., & Uchanin, V. (2007). Deep penetrating eddy currents and probes. *Materials Testing*, 49(5), 258-264.
- [105] Ramos, H. G., & Ribeiro, A. L. (2014). Present and future impact of magnetic sensors in NDE. *Procedia Engineering*, 86, 406-419.
- [106] Peng, T. (2014). *Conception et réalisation de micro-capteurs à magnéto-impédance pour le contrôle non destructif* (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI, France).
- [107] Oukhellou, L. (1997). *Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de rails par courants de Foucault* (Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, France).
- [108] Pérez, J. P., Carles, R., & Fleckinger, R. (2001). *Electromagnétisme: Fondements et applications- 4ème édition*, Dunod, France.
- [109] García-Martín, J., Gómez-Gil, J., & Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11(3), 2525-2565.
- [110] Choua, Y. (2009). *Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault* (Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI, France).
- [111] The eddy current measurement principle is an inductive measuring method: Micro epsilon UK explains non-contact displacement measurement: <http://www.machinery.co.uk>, 2019.

- [112] Lopes Ribeiro, A., Pasadas, D., Ramos, H. G., & Rocha, T. (2015, March). Determination of crack depth in aluminum using eddy currents and GMR sensors. In *AIP Conference Proceedings*, 1650(1), 361-367.
- [113] Lakhdari, A. E. (2011). *Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : Application à la détection des fissures* (Thèse de magister, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie).
- [114] Mook, G., Lange, R., & Koeser, O. (2001). Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents. *Composites science and technology*, 61(6), 865-873.
- [115] Zaidi, H. (2012). *Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault: application aux capteurs souples*. (Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI, France).
- [116] Receiver coil : <https://mt.rsdelivers.com>, 2019.
- [117] Ravat, C. (2008). *Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI, France.
- [118] Sun, Z., Cai, D., Zou, C., Zhang, W., & Chen, Q. (2016). A flexible arrayed eddy current sensor for inspection of hollow axle inner surfaces. *Sensors*, 16(7), 952.
- [119] Marchand, B., Decitre, J. M., & Casula, O. (2010, February). Flexible and array eddy current probes for fast inspection of complex parts. In *AIP Conference Proceedings*, 1211(1), 385-392.
- [120] Chen, D., Li, Y., Pan, M., & Tian, W. (2018). Flexible planar electromagnetic sensor array fabricated with printing electronic technology. *Measurement*, 129, 499-503.
- [121] Naidjate, M., Helifa, B., Feliachi, M., Lefkaier, I. K., Heuer, H., & Schulze, M. (2017). A Smart Eddy Current Sensor Dedicated to the Nondestructive Evaluation of Carbon Fibers Reinforced Polymers. *Sensors*, 17(9), 1996.
- [122] Bouloudenine, A., Feliachi, M., & Latreche, M. E. H. (2017). Development of circular arrayed eddy current sensor for detecting fibers orientation and in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP. *NDT & E International*, 92, 30-37.
- [123] El Ghoul, I. N. (2016). *Réalisation D'un Banc D'essais Pour L'inversion Des Signaux En Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault* (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie).
- [124] Xin, J. (2014). *Design and analysis of rotating field eddy current probe for tube inspection* (Thèse de doctorat, Université d'État du Michigan. USA).
- [125] Burke, S. K. (1990). Eddy-current induction in a uniaxially anisotropic plate. *Journal of applied physics*, 68(7), 3080-3090.

- [126] Cheriet, A., Feliachi, M., & Mohamed Mimoune, S. (2009). 3D movement simulation technique in FVM method application to eddy current non destructive testing. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 28(1), 77-84.
- [127] Li, Y., Berthiau, G., Feliachi, M., & Cheriet, A. (2012). 3D finite volume modeling of ende using electromagnetic T-formulation. *Journal of Sensors*.
- [128] Grosso, M., Pacheco, C. J., Arenas, M. P., Lima, A. H. M., Margarit-Mattos, I. C., Soares, S. D., & Pereira, G. R. (2018). Eddy current and inspection of coatings for storage tanks. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), 356-360.
- [129] Menana, H., Douine, B., Berger, K., Lévêque, J., & Hinaje, M. (2016, June). Caractérisation électromagnétique de matériaux conducteurs non conventionnels. In *Symposium de Génie Electrique (SGE 2016): Electrotechnique du Futur (EF), Electronique de Puissance du Futur (EPF) et Matériaux pour le Génie Electrique (MGE)* (pp. p-44).
- [130] Li, X., Yin, W., Liu, Z., Withers, P. J., & Peyton, A. J. (2008). Characterization of carbon fibre reinforced composite by means of non-destructive eddy current testing and fem modeling. In *17th world conference on nondestructive testing*, Shanghai, China.
- [131] Yin, W., & Peyton, A. J. (2007). Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors. *Ndt & E International*, 40(1), 43-48.
- [132] El Ghouli, I. N., Cheriet, A., Bensaid, S., & Lakhdari, A. E. (2016, October). Accurate measurement of Aluminum layer thickness in a multilayer material using eddy current sensor. In *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)* (pp. 1-4). IEEE.
- [133] Moulder, J. C., Uzal, E., & Rose, J. H. (1992). Thickness and conductivity of metallic layers from eddy current measurements. *Review of scientific instruments*, 63(6), 3455-3465.
- [134] Lê, M. Q., & Placko, D. (1995). Nouvelle structure de capteur à courants de Foucault et algorithme associé pour la mesure des propriétés électrique et magnétique d'un métal. *Journal de Physique III*, 5(6), 807-824.
- [135] Waidelich, D. L. (1957). *Measurement of coating thickness by use of pulsed eddy currents*. University of Missouri bulletin. Engineering reprint séries ; no. 31.
- [136] Bour, J. C., Zubiri, E., Vasseur, P., & Billat, A. (1996). Étude de la répartition des courants de Foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructif. *Journal de Physique III*, 6(1), 7-22.
- [137] Sophian, A., Tian, G. Y., Taylor, D., & Rudlin, J. (2001). Electromagnetic and eddy current NDT: a review. *Insight*, 43(5), 302-306.

- [138] Sophian, A., Tian, G., & Fan, M. (2017). Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(3), 500.
- [139] Jenks, W. G., Sadeghi, S. S. H., & Wikswo Jr, J. P. (1997). SQUIDs for nondestructive evaluation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30(3), 293.
- [140] Kreutzbruck, M. V., Mück, M., & Heiden, C. (2000). Nondestructive testing of aircraft parts by SQUID based eddy current systems. *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, 18, 257-260.
- [141] Tralshawala, N., Claycomb, J. R., & Miller Jr, J. H. (1997). Practical SQUID instrument for nondestructive testing. *Applied physics letters*, 71(11), 1573-1575.
- [142] Gordon, D., & Brown, R. E. (1972). Recent advances in fluxgate magnetometry. *IEEE Transactions on Magnetics*, 8(1), 76-82.
- [143] Ripka, P. (2003). Advances in fluxgate sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 106(1-3), 8-14.
- [144] Popovic, R. E., Randjelovic, Z., & Manic, D. (2001). Integrated Hall-effect magnetic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 91(1-2), 46-50.
- [145] Popovic, R.S. (2004). Hall Effect Devices. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.
- [146] Tumanski, S. (2001). Thin Film Magnetoresistive Sensors. CRC Press, Boca Raton, USA
- [147] Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Van Dau, F. N., Petroff, F., Etienne, P., & Chazelas, J. (1988). Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices. *Physical review letters*, 61(21), 2472.
- [148] Grünberg, P., Schreiber, R., Pang, Y., Brodsky, M. B., & Sowers, H. (1986). Layered magnetic structures: Evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers. *Physical review letters*, 57(19), 2442.
- [149] Panina, L. V., & Mohri, K. (1994). Magneto-impedance effect in amorphous wires. *Applied Physics Letters*, 65(9), 1189-1191.
- [150] Vacher, F., Alves, F., & Gilles-Pascaud, C. (2007). Eddy current nondestructive testing with giant magneto-impedance sensor. *NDT & E International*, 40(6), 439-442.
- [151] Bermúdez, A., Rodríguez, R., & Salgado, P. (2005). Numerical solution of eddy current problems in bounded domains using realistic boundary conditions. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(2-5), 411-426.
- [152] Cheriet, A. (2007). *Contribution a la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques*. (Thèse de

- Doctorat, Université de Biskra, Algérie).
- [153] Dodd, C. V., & Deeds, W. E. (1968). Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems. *Journal of applied physics*, 39(6), 2829-2838.
- [154] Bossavit, A., & Verite, J. C. (1982). A mixed FEM-BIEM method to solve 3-D eddy-current problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 18(2), 431-435.
- [155] Menana, H. (2009). *Modélisation 3D simplifiée pour l'évaluation non destructive des matériaux composites anisotropes*. (Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.
- [156] Patankar, S.V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, series in computational methods in mechanics and thermal sciences. USA: Mc Graw Hill.
- [157] Zhang, W., Zhuang, Y., & Chung, E. T. (2016). A new spectral finite volume method for elastic wave modelling on unstructured meshes. *Geophysical Journal International*, 206(1), 292-307.
- [158] Eymard, R., Gallouët, T., & Herbin, R. (2000). Finite volume methods. *Handbook of numerical analysis*, 7, 713-1018.
- [159] Dong, G., Zou, J., Bayford, R. H., Ma, X., Gao, S., Yan, W., & Ge, M. (2005). The comparison between FVM and FEM for EIT forward problem. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(5), 1468-1471.
- [160] Cheriet, A., Zaoui, A., Feliachi, M., & Mimoune, S. M. (2006). Computational performance comparison between FVM and FEM for 3-D magnetostatic problems. In *Proceedings of the 5eme Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme (NUMELEC'06)*, France.
- [161] Mabrouk, A. E., Cheriet, A., & Feliachi, M. (2013). Fuzzy logic control of electrodynamic levitation devices coupled to dynamic finite volume method analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 37(8), 5951-5961.
- [162] Lakhdari, A. E., Cheriet, A., Feliachi, M., & Li, Y. (2011, September). Estimation of a hidden crack position using the FVM skin effect analysis. In *15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM'2011)*, Napoli, Italy.
- [163] El Ghoul, I. N., Cheriet, A., Bensaid, S., & Lakhdari, A. E. (2016). FVM model and virtual instrument based system for electromagnetic characterization of steel material. *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 2(2), 87-90.
- [164] Yaoqin, X., Feng, L., & Xinshan, M. (2001, August). Computation of eddy current problems by the finite volume method. In *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No. 01EX501)*(2, 1117-1120). IEEE.
- [165] Li, Y. (2012). *Modélisation des phénomènes électromagnétiques caractérisant des structures composites complexes: application à l'évaluation non destructive*.

- (Thèse de doctorat, Université de Nantes, France)
- [166] Lakhdari, A., Cheriet, A., & Feliachi, M. (2018). 3D-FVM anisotropic model for eddy current problems related to composite materials. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 33(4), 438-450.
- [167] Lakhdari, A. E., Cheriet, A., Lamamra, B., Bellouti, B., Bensaid, S., & El Ghou, I. N. (2018, October). Gap Estimation of Disbanding Failure Appears in Hybrid Laminate Material by Means of an Eddy Current Evaluation. In *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)* (pp. 1-5). IEEE.
- [168] Trichet, D. (2000). *Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites*. (Thèse de doctorat, Université de Nantes, France).
- [169] Doirat, V., Bensaid, S., Fouladgar, J., Berthiau, G., & Lefevre, A. (2007). Magnetic response of anisotropic metal fiber material using homogeneous technique in ECNDT. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(4), 1777-1780.
- [170] Bensaid, S., Trichet, D., & Fouladgar, J. (2009). Electrical conductivity identification of composite materials using a 3-D anisotropic shell element model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1859-1862.
- [171] Wasselynck, G., Trichet, D., Ramdane, B., & Fouladgar, J. (2011). Microscopic and macroscopic electromagnetic and thermal modeling of carbon fiber reinforced polymer composites. *IEEE transactions on magnetics*, 47(5), 1114-1117.
- [172] Biro, O., & Preis, K. (1989). On the use of the magnetic vector potential in the finite-element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEEE Transactions on magnetics*, 25(4), 3145-3159.
- [173] Bouillault, F., Ren, Z., & Razek, A. (1990). Calculation of 3D eddy current problems by an hybrid T-Omega method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(2), 478-481.
- [174] Albertz, D., & Henneberger, G. (1998). Calculation of 3D eddy current fields using both electric and magnetic vector potential in conducting regions. *IEEE transactions on magnetics*, 34(5), 2644-2647.
- [175] Biro, O., Preis, K., Renhart, W., Richter, K. R., & Vrisk, G. (1990). Performance of different vector potential formulations in solving multiply connected 3-D eddy current problems. *IEEE Transactions on magnetics*, 26(2), 438-441.
- [176] Nath, S., Lord, W., & Rudolphi, T. J. (1993). Three dimensional hybrid finite-boundary element model for eddy current NDE. *IEEE transactions on magnetics*, 29(2), 1853-1856.
- [177] Pratap, B., & Weldon, W. F. (1996). Eddy currents in anisotropic composites applied to pulsed machinery. *IEEE Transactions on*

- Magnetics*, 32(2), 437-444.
- [178] Chung, E. T., Du, Q., & Zou, J. (2003). Convergence analysis of a finite volume method for Maxwell's equations in nonhomogeneous media. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 41(1), 37-63.
- [179] Jiao, S., Li, J., Du, F., Sun, L., & Zeng, Z. (2016). Characteristics of eddy current distribution in carbon fiber reinforced polymer. *Journal of Sensors*, 2016.
- [180] Cheng, J., Qiu, J., Xu, X., Ji, H., Takagi, T., & Uchimoto, T. (2016). Research advances in eddy current testing for maintenance of carbon fiber reinforced plastic composites. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 51(3), 261-284.
- [181] Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*, 9(1), 112-147.

نظراً للطلب الكبير على المواد المركبة في مختلف قطاعات الصناعة ، بما في ذلك صناعة الطائرات والسيارات ، فإن أساليب اختبارها و تقييمها غير المتلفة أصبحت لا غنى عنها ، لا سيما تلك التي تتم بواسطة التيارات الدوامة. بالإضافة إلى ذلك، فإن بعض مشكلات المربوطة بالاختبارات غير المتلفة بواسطة تيارات الدوامة، خاصة تلك المتعلقة بتوصيف العيوب وكذلك بنية المواد المركبة، تستحضر أدوات المحاكاة العددية. تحقيقاً لهذه الغاية ، يكرس عمل هذه الأطروحة لتطوير نموذج للنمذجة ثلاثية الأبعاد من خلال طريقة الأحجام الجزئية ، المتكيفة مع مشكلات الاختبارات غير المتلفة بواسطة تيارات الدوامة للمواد المركبة. يؤخذ هذا النموذج في الاعتبار تباين المادة ، وكذلك استعمال الأحجام الموشورية وصياغة الجهد المغناطيسي الموجه والجهد العددي الكهربائي. بالإضافة إلى ذلك، من أجل التحقق من صحة رمز الحساب الذي تم تطويره استناداً إلى النموذج المذكور سابقاً، يتم النظر في تطبيقات مختلفة، بعضها تطبيقي.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة متباينة الخواص ، الفحص غير المتلف بواسطة التيارات الدوامة متعدد التردد ، النمذجة ثلاثية الأبعاد بواسطة طريقة الأحجام الجزئية ، الشبكات الموشورية ، المشكلة العكسية.

Résumé

Compte tenu de la grande demande des matériaux composites dans différents secteurs de l'industrie, notamment l'aéronautique et l'automobile, les méthodes de son contrôle non destructif et l'évaluation (CND et E) deviennent indispensables, surtout celles qui sont par les courants de Foucault. Par ailleurs, certains problèmes de CND-CF notamment ceux qui liés à la caractérisation des défauts et également la structure en matériaux composites, évoquent des outils de simulations numériques. A cet effet, le travail de cette thèse est consacré au développement d'un modèle de modélisation 3D par la méthode des volumes fins, adapté aux problèmes de CND-CF des matériaux composites. Ce modèle est pris en compte de l'anisotropie du matériau, ainsi que la sollicitation des éléments prismes et la formulation potentiel vecteur magnétique A-V. En outre, afin de valider le code de calcul développé en se basant sur ledit modèle, différentes applications sont considérées, certaines d'entre sont expérimentales.

Mots clés : Matériaux composites anisotrope, CND-CF multifréquences, modélisation 3D-MVF, maillage prisme, problème inverse.

Abstract

Given the great demand for composite materials in various industry sectors, especially aeronautics and automotive, the methods of its non-destructive testing and evaluation (NDT & E) become indispensable, mainly those that are by eddy currents. In addition, certain CND-CF problems, particularly those related to the characterization of defects and also the structure of composite materials, evoke tools of numerical simulations. For this purpose, the work of this thesis is devoted to the development of a model of 3D modeling by the finite volume method (FVM), adapted to the EC-NDT problems of composite materials. The model is taken into account the anisotropy of the material, as well as the prism elements solicitation and the A-V formulation. In addition, in order to validate the developed computer code based on the said model, different applications are considered, and some of them are experimental.

Keywords: Composite anisotropic materials, multi-frequency EC-NDT, 3D-MVF modeling, prism mesh, inverse problem.