



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université des Frères Mentouri de Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département d'Electrotechnique

N° de série :

N° d'ordre :

Thèse

Pour l'Obtention du diplôme de
DOCTORAT 3^{ème} CYCLE

Spécialité: ELECTROTECHNIQUE

Option : ELECTROTECHNIQUE

Présentée par :

BOULAUDENINE Abderraouf

Master en Electrotechnique

Thème

**Etude de dispositifs de CND-CF (Contrôle non destructif par
Courants de Foucault) appliqués à la caractérisation de
matériaux composites à fibres de carbone**

Soutenue le, 26 / 06 / 2018

Devant le Jury :

<i>Président :</i>	Aissa Bouzid	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine 1
<i>Encadreur :</i>	M. El Hadi Latreche	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine 1
<i>Co-encadreur :</i>	Mouloud Feliachi	Professeur	Université de Nantes, France
<i>Examineur 1 :</i>	Ramdane Bouzerara	MCA	Université des Frères Mentouri Constantine 1
<i>Examineur 2 :</i>	Abdelhalim Taieb Brahimi	Professeur	Université S.T. Mohammed Boudiaf Oran
<i>Examineur 3 :</i>	Ibn khaldoun Lefkaier	Professeur	Université Amar Telidji Laghouat

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse de doctorat ont été réalisés sous une co-direction effectuée au sien des deux laboratoires, Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine (LEC), université des frères Mentouri Constantine, Algérie, et le Laboratoire de Recherche (IREENA), université de Nantes, France.

*Je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, professeur **Mohamed El Hadi LATRECHE** au département d'électrotechnique de l'université des frères Mentouri Constantine pour m'avoir guidé et conseillé tout au long de la réalisation de mes travaux de recherche. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son art de la multi compétence, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines. Je tiens également à remercier mon co-directeur de thèse professeur **Mouloud FELIACHI** pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire IREENA. Je lui resterai toujours reconnaissant pour les précieux conseils qu'il m'a prodigué. Sa patience et la confiance qu'il m'a accordées m'ont été très utiles pour mener à bien ce travail. L'aspect scientifique et l'expertise qu'il m'a apportés, n'ont d'égale que ses hautes qualités humaines. Je ne pourrais jamais le remercier assez, lui et sa famille qui ont été une véritable seconde famille, pour moi durant mon séjour à Saint-Nazaire.*

Mes sincères remerciements aux membres du jury chacun à son nom :

*Monsieur Aissa **BOUZID**, professeur au département d'électrotechnique à l'université des frères Mentouri Constantine, pour l'honneur qui nous a fait par l'acceptation de présider le jury de soutenance.*

*Monsieur **Ibn khaldoun LEFKAIER**, professeur à l'université de Laghouat, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Monsieur **Abdelhalim Taieb BRAHIMI**, professeur à l'université des sciences et de la technologie d'Oran, pour son acceptation d'être membre de ce jury et d'examiner mes travaux de thèse.*

*Monsieur **Ramdane BOUZRARA**, maître de conférence 'A' au département de génie du transport à l'université des frères Mentouri Constantine, pour l'acceptation d'être membre dans le jury de soutenance et d'examiner ce mémoire de thèse.*

Tous mes remerciements les plus distinguées à mes enseignants de l'université des frères Mentouri Constantine, pour leurs contributions inestimable à ma formation et pour le savoir qu'ils m'ont inculqué.

Grand merci et respect à mes très chers parents, à mes frères et sœurs, pour leur soutien et encouragement, à Abdelmoumin et Abdelouadoud.

*À tous ceux, que je n'ai pas cités ici, je dirai **MERCI** !*

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	xi
Nomenclature des symboles.....	xii
Introduction générale	1

CHAPITRE I :

Contrôle non destructif et matériaux composites à fibre de carbone

I.1. Introduction	6
I.2. Différentes méthodes de CND.....	6
I.2.1. Examen visuel	7
I.2.2. Ressuage	7
I.2.3. Radiographie	7
I.2.4. Thermographie inductive.....	8
I.2.5. Ultrasons	9
I.2.6. Magnétoscopie	9
I.2.7. Contrôle par courants de Foucault.....	10
I.2.7.1. Types de capteurs CND	12
I.2.7.2. Modes d'excitation	13
I.2.7.3. Capteurs à base matrices de bobines.....	14
I.2.7.4. Avantages du CND par courants de Foucault	17
I.2.7.5. Limites du CND par courants de Foucault.....	17
I.3. Domaines d'applications d'ECND	17
I.4. Matériaux composites à fibres de carbone (CFRP)	18
I.4.1. Structures de CFRP	20
I.4.1.1. Structures tissées.....	21

I.4.1.2. Structure unidirectionnelle	21
I.4.1.3. Structure multidirectionnelle	22
I.4.2. Défauts dans les CFRP	22
I.4.2.1. Rupture de fibres	22
I.4.2.2. Ondulation des fibres	23
I.4.2.3. Porosité	23
I.4.2.4. Délaminage	24
I.4.3. Procédés de création de défauts dans les CFRP, en Laboratoire, dans le cadre de la recherche scientifique	24
I.4.3.1. Délaminage et ruptures de fibres	24
I.4.3.2. Ondulation de fibres	25
I.5. Capteurs CF destinés au CND et END des CFRP	26
I.5.1. Capteurs absolus	26
I.5.1.1. Bobines circulaires	27
I.5.1.2. Bobines rectangulaires	27
I.5.2. Capteurs émission-réception	28
I.5.2.1. Bobines circulaires	28
I.5.2.2. Bobines rectangulaires	28
I.5.3. Exemples d'appareils de CND-CF pour les CFRP	29
I.6. Conclusion	30

Chapitre II :

Modélisation

II.1. Introduction	33
II.2. Modélisation électromagnétique d'un problème de CND-CF	33
II.2.1. Équations de Maxwell	34
II.2.2. Formulations électromagnétiques	35
II.2.3. Modélisation électromagnétique d'un matériau de type CFRP	37
II.2.3.1. Modèle par réseau de résistances	38
II.2.3.2. Modélisation par barres conductrices	39
II.2.3.3. Tenseur de conductivité	39
II.2.4. Réponses d'un capteur par CF	40
II.2.4.1. A partir l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes Joule	40
II.2.4.2. A partir l'énergie électromagnétique de la bobine	42

II.2.4.3. A partir la tension aux bornes du récepteur	42
II.2.5. Résolution numérique des modèles	42
II.3. Validation de la méthode de calcul utilisée.....	43
II.4. Capteurs rotatifs	48
II.4.1. Capteur rectangulaire tournant utilisé en mode absolu.....	50
II.4.2. Capteur circulaire tournant utilisé en émetteur-récepteur.....	54
II.5. Conclusion	56

Chapitre III :

Caractérisation des CFRP par des configurations de matrices des bobines

III.1. Introduction.....	58
III.2. Structure flexible en vue de l'amélioration des capteurs absolus à CF	58
III.2.1. Résultats numériques	59
III.2.2. Validation du modèle.....	61
III.3. Caractérisation par la matrice ' interactive '	64
III.3.1. Conception de la matrice interactive	64
III.3.2. Paramètres physiques et géométriques	66
III.3.3. Caractérisation des structures monodirectionnelles.....	67
III.3.3.1. Distribution des courants induits.....	68
III.3.3.2. Représentation de la variation d'impédance	71
III.3.4. Caractérisation des structures multidirectionnelles	73
III.4. Caractérisation par la matrice réceptrice	75
III.4.1. Conception d'un capteur émetteur-matrice réceptrice.....	75
III.4.2. Application à la caractérisation de CFRP	76
III.4.2.1. Distribution des courants induits.....	76
III.4.2.2. Détermination de l'orientation de fibres.....	78
III.4.2.2.1. Structures monodirectionnelles	78
III.4.2.2.2. Structures multidirectionnelles	79
III.5. Conclusion	81

Chapitre IV :

Application au contrôle de défauts dans les CFRP

IV.1. Introduction	83
IV.2. Défaut d'ondulation de fibres et robustesse des CFRP	83
IV.3. Approche pour simuler le défaut d'ondulation de fibres	84
IV.4. Inspection de défauts par la matrice interactive	85
IV.4.1. Effet d'ondulation de fibres sur la distribution des courants induits	87
IV.4.2. Effet de l'ondulation de fibres sur la variation d'impédance	88
IV.4.3. Etude de l'impact de l'angle d'ondulation sur la sensibilité de la matrice interactive	90
IV.5. Inspection de défauts par capteur à matrice réceptrice.....	91
IV.6. Synthèse entre les deux modèles de capteurs	93
IV.7. Conclusion.....	96
Conclusion générale.....	97
Bibliographie.....	99
Production personnelle.....	105

Liste des figures

Figure I.1. Principe de contrôle par ressuage	7
1-Application du pénétrant	7
2-Lavage du pénétrant	7
3-Détection de défaut.....	7
Figure I.2. Principe de contrôle par radiographie	8
Figure I.3. Principe de la thermographie inductive	8
Figure I.4. Principe de CND par ultrasons.....	9
(a) Transducteur au-dessous d'une zone saine	9
(b) Transducteur au dessous d'une zone défectueuse	9
Figure I.5. Principe de la magnétoscopie	10
Figure I.6. Principe du CND par CF	11
Figure I.7. Évolution des CF en fonction de la profondeur dans une pièce conductrice	11
Figure I.8. Capteur à double fonction.....	12
Figure I.9. Capteur émetteur récepteur	12
Figure I.10. Capteur différentiel	13
Figure I.11. Principe d'une matrice de bobines	14
(a) capteur mono bobine	14
(b) capteur multi bobine à un rang	14
(c) capteur multi bobine à une matrice	14
Figure I.12. Matrice de bobines à double colonnes	15
(a) visualisation des défauts débouchant et sous cutanés	15
(b) reconnaissance des formes	15
Figure I.13. Influence de défauts sur la répartition des courants induits détectés par une matrice de réception collée sur un support rigide	16
Figure I.14. Capteur CF composé d'une matrice de bobines collée sur un support souple	16
Figure I.15. Exemples d'application du CND	18

Figure I.16. Composites dans le Boeing-787	19
Figure I.17. Exemple d'arrangement de fibres dans d'un CFRP	20
(a) Coupe transversal de CFRP	20
(b) zoom	20
Figure I.18. Différentes structures de CFRP en fonction du rapport (longueur fibre/pièce)	20
(a) composites à particules	20
(b) composites à fibres courtes	20
(c) composites à fibres longues	20
Figure I.19. Structure tissées	21
(a) Matériaux avec deux directions de renfort	21
(b) Matériaux avec trois directions de renfort	21
Figure I.20. Structure unidirectionnelle de CFRP	21
(a) Structure plate	21
(b) structure cylindrique	21
Figure I.21. Exemples des structures multidirectionnelles de CFRP	22
(a) CFRP à quatre direction	22
(b) CFRP à fibres orthogonaux	22
Figure I.22. Défaut de rupture de fibre de carbone	23
Figure I.23. Défaut d'ondulation de fibre de carbone	23
Figure I.24. Coupe montre la porosité dans un matériau de CFRP unidirectionnel	24
(a) Macro-pore	24
(b) Micro-pore	24
Figure I.25. Défaut de délaminage dans un composite de CFRP	24
Figure I.26. Méthode pour créer le défaut de délaminage et la rupture de fibre	25
Figure I.27. Méthode pour créer l'ondulation interne dans un CFRP	25
Figure I.28. Plaque de CFRP avec ondulation interne de fibre	26
Figure I.29. Bobine circulaire sur une plaque de CFRP	27
Figure I.30. Exemple de capteurs rectangulaires absolus	27
(a) bobine rectangulaire tournant	27
(b) Sonde de fer à cheval de CF	27

Figure I.31. Principe de fonctionnement d'une sonde à récepteur tournant	28
Figure I.32. Capteur rectangulaire à émetteur et récepteur tournants	29
Figure I.33. Capteur d'ondulation de fibres	29
Figure I.34. Système cartésien de CND CF « <i>Eddycus MPECS</i> »	30
Figure I.35. Robot à CF « <i>Fraunhofer IKTS-MD</i> » pour scanner les CFRP	30

Figure II.1. Domaine d'étude d'un problème de CND-CF	33
Figure II.2. Schéma représente la répartition réelle des fibres dans un CFRP	37
Figure II.3. Réseaux de résistances en 2D	38
Figure II.4. Modèle de réseau de résistances en 3D	38
Figure II.5. Plaque de CFRP modélisée par la méthode des barres conductrices	39
Figure II.6. Relation entre la référence principale et la référence relative de l'orientation de fibres ...	39
Figure II.7. Géométrie 3D de la bobine au-dessus d'une plaque avec défaut	44
Figure II.8. Maillage 3D de la bobine et la plaque testée	46
Figure II.9. Distribution surfacique des courants induits dans une plaque conductrice isotrope	47
Figure II.10. Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats obtenus dans benchmark Team workshop N°15-1	48
Figure II.11. Schéma algorithmique de la détermination de l'orientation des fibres dans les CFRP en utilisant les capteurs rotatifs	49
Figure II.12. Géométrie 3D de la bobine rectangulaire sous une plaque de CFRP	51
Figure II.13. Influence de direction du capteur sur la distribution des CF dans une plaque de CFRP unidirectionnelle (0°)	53
(a) Plaque de CFRP, capteur selon (0°)	52
(a) Plaque de CFRP, capteur selon (45°)	52
(b) Plaque de CFRP, capteur selon (90°)	53
Figure II.14. Variation de la partie réelle de l'impédance normalisée en fonction de l'angle de rotation du capteur rectangulaire	54
Figure II.15. Capteur E-R au-dessus d'une plaque stratifiée de CFRP unidirectionnelle de 14 plis	55

Figure II.16. Diagramme polaire de partie réelle de la variation de l'impédance du récepteur pour une pièce de CFRP ($0^\circ_{/14}$)	56
<hr/>	
Figure III.1. Transformation du capteur rectangulaire à une structure flexible	59
Figure III.2. Modèle de simulation du capteur rotatif flexible	60
Figure III.3. Principe du capteur flexible à deux bobines	60
(a) Présentation du champ résultant nul	60
(b) Courants induits créés dans une plaque isotrope	60
Figure III.4. Partie réelle de la variation d'impédance normalisée en fonction des positions angulaire du capteur	61
(a) capteur flexible	61
(b) superposition avec le résultat obtenu par le capteur rectangulaire	61
Figure III.5. Banc d'essai expérimental du capteur flexible proposé	62
Figure III.6. Phase de l'impédance de la bobine pour un balayage en fréquence allant de 40 Hz à 30 MHz	63
Figure III.7. Comparaison entre les résultats de simulation et les mesures détectés par le capteur flexible à deux bobines	63
Figure III.8. Principe de la matrice interactive par courant de Foucault	66
Figure III.9. Matrice interactive proposée au-dessus d'une plaque en CFRP	67
Figure III.10. Distribution de courants induits créée par la matrice interactive	69
(a) plaque isotrope	69
(b) plaque anisotrope de CFRP (0°)	69
Figure III.11. Comparaison entre la distribution vectorielle des courants induits dans les quatre échantillons de CFRP par rapport à un échantillon isotrope	70
Figure III.12. Diagrammes polaires de la variation d'impédance détectés par la matrice interactive pour les 04 échantillons de CFRP	72
Figure III.13. Plaques à deux directions utilisées	74
(a) Fibres orthogonales ($0^\circ, 90^\circ$)	74
(b) Fibres séparées par un angle de 45° ($0^\circ, 45^\circ$)	74

Figure III.14. Diagrammes polaires de la variation d'impédance détectés par la matrice interactive ..	74
(a) 0°, 90°	74
(b) 0°, 45°	74
Figure III.15. Modèle géométrique du capteur émetteur-matrice réceptrice sous une plaque en CFRP	76
Figure III.16. Distribution des courants induits dans les échantillons de CFRP	78
(a) (0°)	77
(b) (45°)	77
(c) (90°)	78
(d) (135°)	78
Figure III.17. Diagrammes polaires de la partie réelle de la variation d'impédance en fonction des angles élémentaires de la matrice réceptrice pour des structures monodirectionnelles.	79
Figure III.18. Diagrammes polaires de la partie réelle de la variation d'impédance en fonction des angles élémentaire de la matrice réceptrice pour des structures multidirectionnelles ...	80

Figure VI. 1. Différents plans d'ondulation de fibres	84
Figure IV. 2. Représentation d'ondulations de fibres par ondes triangulaires	85
Figure IV.3. Différents cas de défaut d'ondulation interne	86
Figure IV.4. Matrice interactive au-dessus d'une plaque de CFRP comporte une ondulation de fibres	87
Figure IV.5. Influence de l'ondulation de fibres sur la distribution vectorielles des courants induits ..	88
Figure IV.6. Diagrammes polaires détectés par la matrice interactive pour différents cas d'ondulations	89
Figure IV.7. Sensibilité de la matrice interactive aux angles de défaut d'ondulation interne de fibres	91
Figure IV.8. Capteur à matrice réceptrice au-dessus d'une plaque de CFRP comporte une ondulation de fibres	92
Figure IV.9. Diagrammes polaires détectés par la matrice réceptrice pour différents types d'ondulations de fibres	93
Figure IV.10. Synthèse entre les deux modèles de capteurs.....	95

Liste des tableaux

Tableau I.1. Comparaison entre trois composites fibreux	19
Tableau II.1. Paramètres physique et géométrique expérimentaux de <i>TEAM Workshop N°15-1</i>	43
Tableau III.1. Paramètres physiques et géométrique de la matrice interactive et des échantillons testés	67
Tableau III.2. Relation entre les orientations des fibres et les réponses du capteur proposé	71
Tableau III.3. Comparaison entre le capteur de la matrice interactive et certains capteurs rotatifs	73

Nomenclature des symboles

\vec{H}	vecteur champ magnétique
\vec{B}	vecteur induction magnétique
\vec{E}	vecteur champ électrique
\vec{D}	vecteur induction électrique
$\overrightarrow{J_{ind}}$	densité de courants de Foucault
\vec{J}_s	densité de courantes sources
J_{sur}	module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$)
\vec{n}	vecteur normal à une surface
j	nombre imaginaire ($j^2 = -1$)
\vec{A}	potentiel vecteur magnétique
V	potentiel scalaire électrique
\vec{T}	potentiel vecteur électrique
ϕ	potentiel scalaire magnétique
R	résistance électrique
X	réactance
L	Inductance propre
f	fréquence des signaux
t	temps
ω	pulsation du courant d'excitation
ϵ_0	permittivité électrique absolue du vide
ϵ_r	permittivité électrique relative
σ	conductivité électrique
ρ	densité de charge volumique
δ	épaisseur de peau
μ_0	perméabilité magnétique absolue du vide
μ_r	perméabilité magnétique relative
Γ	frontière du milieu
$\vec{\nabla}$	opérateur gradient
$\vec{\nabla} \cdot$	opérateur divergence
$\vec{\nabla} \wedge$	opérateur rotationnel

N	nombre de spires de la bobine
I_s	courant d'excitation instantané
I_0	valeur maximale du courant d'excitation
J_0	valeur maximale de la densité du courant d'excitation
r_e	rayon externe de la bobine
r_i	rayon interne de la bobine
h	hauteur de la bobine
e	épaisseur de la plaque
z	profondeur considérée à l'intérieur de la pièce
Z	impédance du capteur
Z_0	impédance du capteur à vide
ΔZ	variation de l'impédance
λ	longueur d'onde
Ω	domaine d'étude
Ω_s	région source
Ω_c	région conductrice
$\bar{\sigma}$	tenseur de conductivité électrique
σ_L	conductivité longitudinal
σ_T	conductivité transversale aux fibres
σ_{zz}	conductivité selon l'épaisseur du pli
\vec{J}_{ind}^*	conjugué du vecteur \vec{J}_{ind}
\vec{B}^*	conjugué du vecteur \vec{B}
P_j	puissance active dissipée dans la charge
$\bar{\rho}$	tenseur de résistivité de la charge en CFRP
δ	déterminant de la matrice de résistivité
W_m	énergie magnétique dans tout le domaine d'étude
ΔR	partie réelle de la variation de l'impédance
ΔL	variation de l'inductance
ΔX	partie imaginaire de la variation de l'impédance
ΔZ	variation de l'impédance
θ	angle d'orientation des fibres

Introduction générale

L'amélioration des dispositifs industriels passe, actuellement, par l'amélioration des performances des matériaux et le développement de matériaux nouveaux et non conventionnels. Ceci peut se réaliser notamment par l'assemblage de différents matériaux aux caractéristiques physiques différentes, visant l'atteinte de performances particulières.

Parmi cette catégorie, les matériaux Composites à Fibre de Carbone, appelés aussi **polymère à renfort de fibres de carbone** ou CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymere*) sont des matériaux constitués d'un arrangement de fibres de carbone noyée dans un matériau appelé matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible que celle des fibres. Ces types de matériaux ont des propriétés physiques et électromagnétiques très différentes. La légèreté et la grande résistance mécanique et chimique des CFRP sont des caractéristiques recherchées et très importantes qui expliquent que la demande sur ce type de matériaux est de plus en plus importante dans divers secteurs de l'industrie.

Toutefois, et malgré les avantages multiples qui caractérisent les CFRP, les risques de défaillances peuvent provoquer des modifications importantes de leurs caractéristiques et entraîner des défaillances et des perturbations dans les dispositifs industriels. Ainsi, l'étude du cycle de vie de ces pièces constitue un axe de recherche intéressant et important, et les techniques d'évaluation et du contrôle non destructif (ECND) pour les examiner sont utilisées sans les endommager et sans perturber les dispositifs complexes et fonctionnels. Ces techniques utilisent plusieurs méthodes physico-chimiques, telles que la radiographie, les ultrasons et les méthodes électromagnétiques, et permettent de détecter les défauts dans les structures solides ou d'évaluer leurs propriétés physiques et géométriques.

L'ECND-CF consiste à utiliser les courants induits, ou courants de Foucault pour l'évaluation et le diagnostic des pièces examinées. C'est une approche classée parmi les techniques électromagnétiques, et bien que son utilisation reste confinée aux matériaux conducteurs pour les courants de Foucault, son utilisation augmente de plus en plus grâce à sa facilité de mise en œuvre, l'avantage de son volume réduit qui permet de fabriquer des appareils portables et sa grande précision. Malgré ces avantages, cette technique reste probablement un peu limitée surtout dans les matériaux composites.

Du fait que les opérations de contrôle sont souvent menées in situ, et en temps réel, l'efficacité des procédés de CND est liée à la rapidité du traitement et la grande sensibilité aux différents défauts qui peuvent affecter la matière inspectée. Ces deux facteurs essentiels sont bien pris en charge par les méthodes électromagnétiques dont les constantes de temps et l'adaptation de traitement en temps réel par les différents processeurs numériques, ou analogiques, sont importantes.

La présence de fibres et faisceaux conducteurs dans les matériaux composites permettent l'utilisation des méthodes électromagnétiques dans les processus d'évaluation et de contrôle non destructifs, et les méthodes d'ECND-CF connaissent des développements importants dans ce secteur, aussi bien dans les secteurs de la Recherche que dans les applications industrielles, notamment dans les secteurs du nucléaire, de l'aéronautique ou de l'aérospatial.

Nous nous intéressons, dans le cadre de cette thèse, au ECND-CF appliqué aux matériaux composites de type CFRP, en visant particulièrement à apporter des améliorations aux dispositifs de capteurs utilisés. Pour cela, nous consacrons une première partie de notre travail à une étude exhaustive de l'état de l'art pour faire la synthèse des procédés existants et des voies de développement en cours d'élaboration dans différents Laboratoires de Recherche.

Nous introduisons ensuite les bases de notre étude par la présentation des dispositifs rotatifs utilisant un capteur 'émetteur – récepteur' et à géométrie rectangulaire, pour l'identification des caractéristiques électromagnétiques d'un matériau CFRP. La bonne compréhension des principes de fonctionnement des capteurs conventionnels étudiés est, en effet, un préalable important pour permettre le développement de nouveaux capteurs plus performants.

Notre objectif vise particulièrement à proposer des nouvelles architectures de dispositifs d'ECND-CF utilisant des capteurs statiques à la place des capteurs rotatifs. Ceci pour éviter la rotation mécanique du système, réduisant ainsi d'une part les coûts de fabrication et améliorant la fiabilité et la maintenabilité du système, et d'autre part minimisant le temps d'inspection et les bruits de mesures. Deux configurations matricielles seront développées et proposées dans ce cadre, et permettent la détermination de l'orientation des fibres dans les CFRP et la détection de certains types de défauts.

Pour illustrer les travaux que nous avons menés dans le cadre de cette thèse, nous organisons notre mémoire autour des chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré à la définition et la présentation du contexte de l'étude. Il consiste en la présentation des principes et méthodes d'ECND (évaluation & Contrôle Non Destructif), ainsi que les matériaux CFRP et les différents modèles de capteurs CF appliqués pour évaluer et inspecter les CFRP. La première partie de ce chapitre, elle fait l'objet d'une présentation de différentes techniques de CND les plus utilisées en exposant en détail la technique de CND-CF ainsi que ses applications sur les CFRP. Ensuite, nous présentons un préambule sur les CFRP, son domaine d'utilisation et les défauts qui peuvent apparaître au niveau de ce type de matériaux.

Le second chapitre fait l'objet d'une présentation de deux parties essentielles, Dans la première partie, nous présentons les modèles mathématiques et les différentes formules utilisées dans la modélisation du problème d'ECND-CF dans le cas des CFRP. Ensuite, nous étudions deux types de capteurs conventionnels. La première étude s'intéresse par la caractérisation de CFRP par un capteur rectangulaire tournant et la deuxième se fait par un capteur émetteur-récepteur.

Dans le troisième chapitre, et en tenant compte des principes des capteurs conventionnels étudiés, nous avons proposé un capteur à deux bobines pour déterminer la direction des fibres dans les CFRP. Cette partie accompagnée par une réalisation expérimentale de quelques bobines circulaires pour valider l'approche de simulation adoptée en présence de CFRP. Ensuite, nous proposons des nouvelles configurations matricielles au niveau des capteurs par CF. Dans la première configuration, à partir d'une analyse du capteur à deux bobines, nous proposons une matrice interactive basée sur l'interaction des courants induits créés par les bobines adjacentes. La deuxième configuration est un arrangement des bobines sous forme d'une matrice circulaire utilisée comme un récepteur au lieu d'une bobine réceptrice unique mobile utilisée dans le cas d'un capteur émetteur-récepteur. Les deux dispositifs proposés permettent de faire une caractérisation des matériaux CFRP en conformité avec les objectifs que nous nous sommes fixés, notamment pour la simplicité de fabrication en évitant les dispositifs rotatifs, et donc des coûts réduits, tout en réalisant une procédure beaucoup plus rapide et plus performante et minimisant les bruits de mesures.

Dans le dernier chapitre, nous utilisons les modèles développés pour la détection de défauts dans les matériaux CFRP. Une application de contrôle de défauts montre la capacité et la sensibilité des capteurs proposés dans la détection de défauts d'ondulation de fibres dans les CFRP. D'autre part, la matrice interactive prouve son efficacité même dans le classement de

ces types de défauts selon leurs natures. Puis, nous assemblons les deux configurations de matrice de bobines proposées dans un seul capteur qui fonctionne à la fois comme une matrice interactive et comme un capteur à matrice réceptrice, où on peut bénéficier des avantages des deux capteurs statique proposés.

Tout le long de cette thèse, les réponses des capteurs sont calculées par la mise en œuvre des modèles électromagnétiques basés sur les formulations en termes de potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire électrique en régime quasi-stationnaire. La méthode des éléments finis a été utilisée dans la résolution numérique des modèles mathématiques et l'exploitation des grandeurs électromagnétiques, et l'implémentation a été faite dans l'environnement de calcul 'COMSOL'.

Pour valider les résultats de simulation, un banc expérimental a été réalisé dans le laboratoire IREENA de Saint-Nazaire. Le prototype contient une plaque de CFRP, un analyseur d'impédance AGILENT 4294 A et quelques bobines.

Chapitre I :

Contrôle non destructif et matériaux composites à fibre de carbone

I.1. Introduction

L'évaluation et le contrôle des équipements jouent un rôle important pour assurer la fiabilité et la sécurité des systèmes industriels, et cela aussi bien au cours de leur fabrication, qu'en cours de service ou durant la procédure de maintenance. Dans ce cadre, des méthodes de caractérisation et d'inspection sont développées. Parmi celles-ci, les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) permettent l'examen des propriétés physiques et géométriques des pièces ou d'étudier le cycle de vie des matériaux et des structures sans les endommager. L'utilisation des méthodes de CND augmente de plus en plus au plan industriel, en particulier dans les domaines critiques et sensible où la fiabilité et la continuité de services sont des paramètres fondamentaux, à l'image des secteurs de la pétrochimie, le nucléaire, l'aéronautique et l'aérospatiale [1, 2].

Grâce aux efforts fournis par les chercheurs du domaine, actuellement le CND s'applique presque sur tous les matériaux, qu'ils soient homogènes comme l'aluminium ou composites comme les CFRP et les GFRP (matériaux composites à fibre de verre). Ce développement a contribué fortement à éviter l'arrêt des chaînes de production, les accidents divers tels que les crashes d'avions, la détérioration voire l'explosion des sites nucléaire et pétroliers, Les gains ainsi réalisés, sans interruption des processus, sont considérables aussi bien sur le plan économique qu'en terme de sauvegarde des vies humaines.

Ce chapitre présente les différentes techniques de CND et ses domaines d'application ainsi qu'une présentation des matériaux composites notamment les CFRP. Nous particulieriserons notre présentation sur l'approche ECND-CF appliquée aux matériaux de type CFRP.

I.2. Différentes méthodes de CND

A partir de la deuxième guerre mondiale, la fabrication des dispositifs et composants industriels a connu une évolution en constante augmentation. Ceci a motivé le développement de technique et d'outils de contrôle, et notamment de contrôle non destructif spécialisé. Ces techniques et approches ont une interdépendance avec la nature physique des matériaux utilisés pour la pièce contrôlée, le type d'information recherchée, ainsi qu'avec les conditions de mise en œuvre du processus.

La diversité des matériaux utilisés et des phénomènes manipulés par les instruments a motivé le développement d'une grande variété de technique de CND parmi lesquelles nous pouvons citer le ressuage, la radiographie, la thermographie, les ultrasons, le bruit Barkhausen et les méthodes électromagnétique. De même que l'on peut distinguer plusieurs configurations de

capteurs pour la même technique CND et adaptés à différentes configurations géométriques ou de procédures de fonctionnement et traitement.

I.2.1. Examen visuel

Le contrôle visuel est un contrôle très simple lié à l'œil humain, il s'applique pour détecter les défauts visibles. Ce contrôle CND est le plus ancien pratiqué depuis les temps les plus reculés et ne nécessite aucun coût particulier. Sa fiabilité reste très faible.

I.2.2. Ressuage

Le ressuage est une technique permet de détecter les défauts débouchant à travers l'utilisation d'un liquide 'pénétrant' le long de surface de la pièce testée. Le liquide s'infiltré à l'intérieur des défauts tandis que le reste est éliminé de la surface de la pièce par un lavage. Ensuite la surface recouverte par une fine couche de "révélateur" qui absorbe le liquide pénétrant contenu dans les fissures et qui donne des taches colorées au niveau des zones de défauts. Ce type de contrôle peut être pratiqué à condition que la matière de la pièce ne réagisse pas chimiquement avec le pénétrant. Le ressuage est la technique de CND la plus ancienne après l'examen visuel, ses premières utilisations datent des années 1880 [3]. Malgré la simplicité du ressuage, cette technique reste très limitée pour les raisons suivantes : La technique est relativement lente, et l'utilisation des produits chimiques augmente le coût du contrôle tout en induisant de possibles nuisances à l'environnement. Aussi, elle n'est pas automatisée et limitée à l'inspection de pièces de géométrie simple.

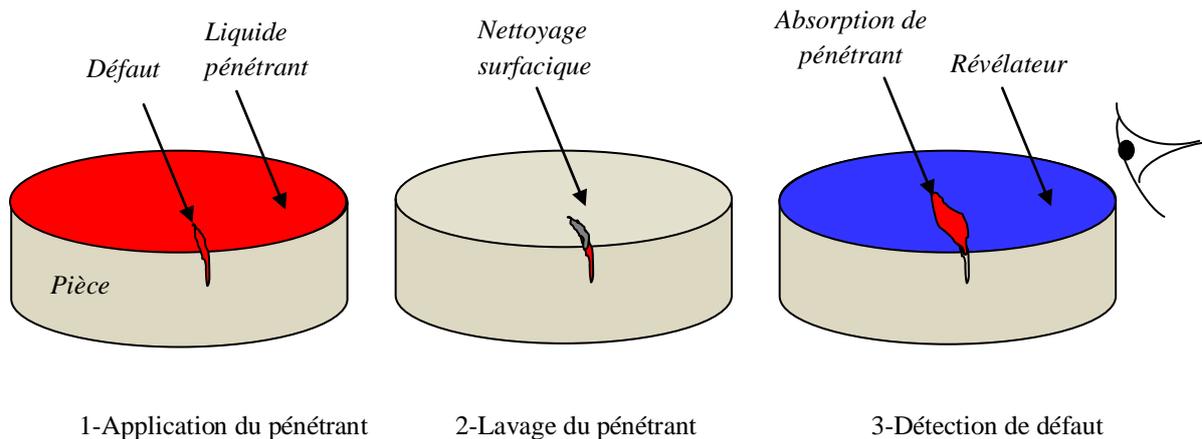


Figure I.1. Principe de contrôle par ressuage.

I.2.3. Radiographie

La radiographie est un examen de l'état interne d'une structure. Elle consiste à parcourir la structure par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon x , ou

γ), suivi de la capture de rayonnement résiduel non absorbé par un récepteur qui est, généralement, un film sensible à la nature des rayons utilisés. La radiographie peut être utilisée pour contrôler tous les types de matériaux, quel qu'en soit la complexité géométrique. Elle peut arriver à contrôler des pièces jusqu'à 20 mm d'épaisseur avec les rayons x et jusqu'à 150 mm avec les rayons γ . Les limites fondamentales de cette technique sont le volume important du dispositif qui pose un problème de transport et d'installation. D'autre part, elle a besoin d'accéder aux deux côtés de la structure pour faire un scan 3D. De plus, les rayonnements ionisants sont dangereux pour le corps humain, ce qui nécessite des procédures de sécurité strictes pour l'opérateur.

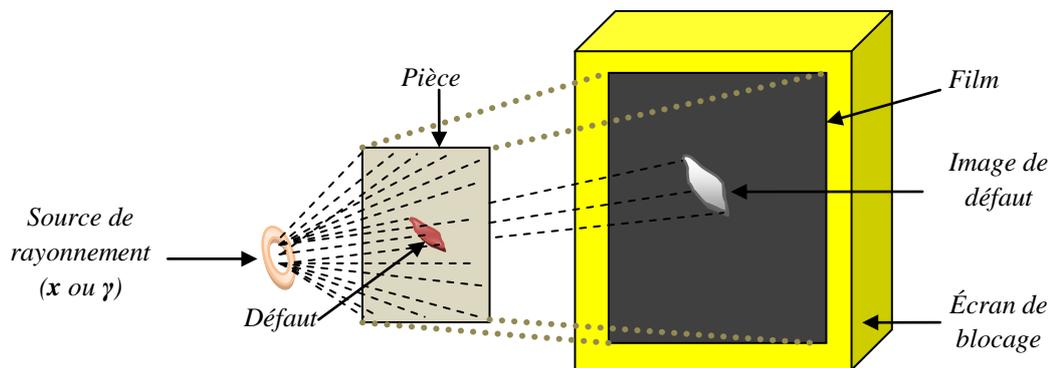


Figure I.2. Principe de contrôle par radiographie.

I.2.4. Thermographie inductive

La thermographie inductive consiste à placer une pièce conductrice dans un champ magnétique généré par un inducteur alimenté par une source alternative. À l'intérieur de la pièce, l'inducteur crée des courants de Foucault qui chauffent celle-ci. En conséquence, l'existence d'un défaut présente un obstacle à la propagation de la chaleur. La distribution de la température dans la pièce à contrôler est fonction de ses propriétés thermiques et de sa géométrie. L'acquisition des résultats s'obtient par l'utilisation d'une caméra infrarouge. Les résultats sont, ensuite, interprétés à partir des différences de température pour détecter et caractériser les défauts [4].

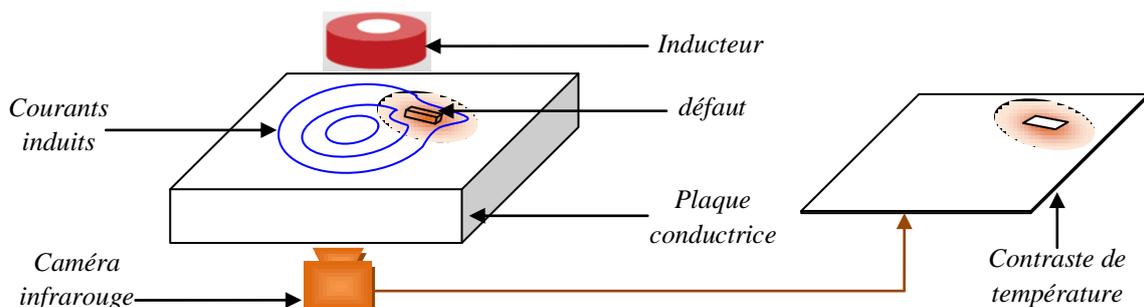
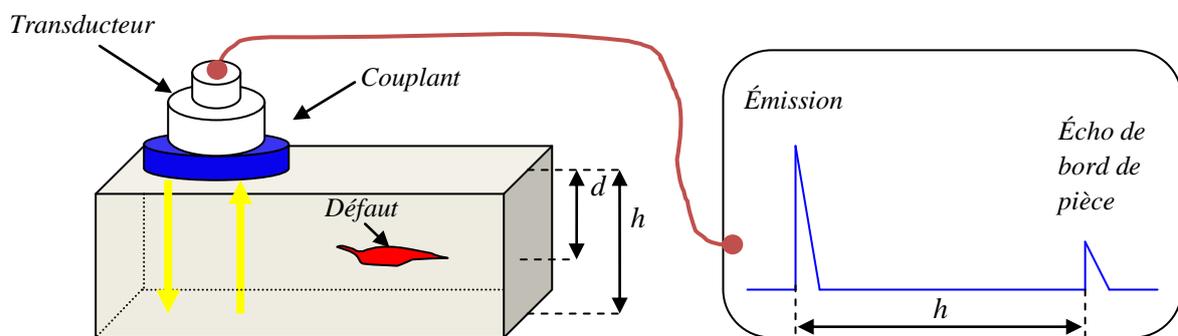


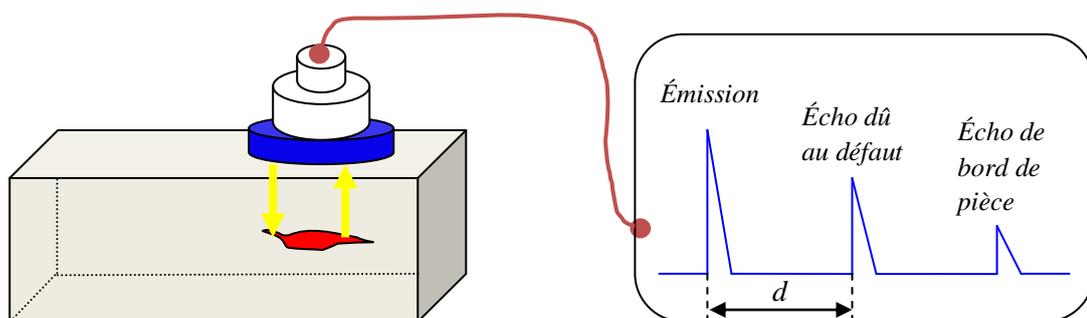
Figure I.3. Principe de la thermographie inductive.

I.2.5. Ultrasons

La méthode de CND par ultrasons est basée sur la propagation d'ondes ultrasonores dans les matériaux. Il s'agit de générer une onde dans la pièce à contrôler et de déduire la présence éventuelle de défaut à partir de l'étude de l'écho en retour. L'instrument se compose d'un ou plusieurs capteurs–transducteurs qui permettent la génération, la capture et le traitement des signaux sonores utilisés. Le CND par ultrasons a une profondeur de pénétration importante et il a la capacité de réaliser une bonne caractérisation des défauts. Cependant cette technique est complexe à mettre en œuvre. De plus son application nécessite un matériau couplant qui peut être une graisse, eau, huile ou un gel entre le transducteur et la cible inspectée. Les pièces fines sont difficiles à inspectées par cette technique.



(a) Transducteur au-dessous d'une zone saine.



(b) Transducteur au dessous d'une zone défectueuse.

Figure I.4. Principe de CND par ultrasons.

I.2.6. Magnétoscopie

La magnétoscopie est une technique appliquée pour détecter les défauts débouchant ou sous-cutanés dans les pièces ferromagnétiques. Il s'agit de créer un champ magnétique dans la pièce où une poudre magnétique est uniformément répartie sur la surface de la pièce. L'existence d'un défaut provoque des modifications des lignes de l'induction magnétique

avec une augmentation de l'intensité de l'induction magnétique. D'une façon automatique des signatures de défaut vont apparaître au niveau de la poudre magnétique. La magnétoscopie peut inspecter facilement et rapidement de grandes surfaces mais elle reste limitée parce qu'elle ne s'applique que pour les matériaux ferromagnétiques et pour une faible profondeur. Ainsi, elle nécessite un courant d'alimentation important.

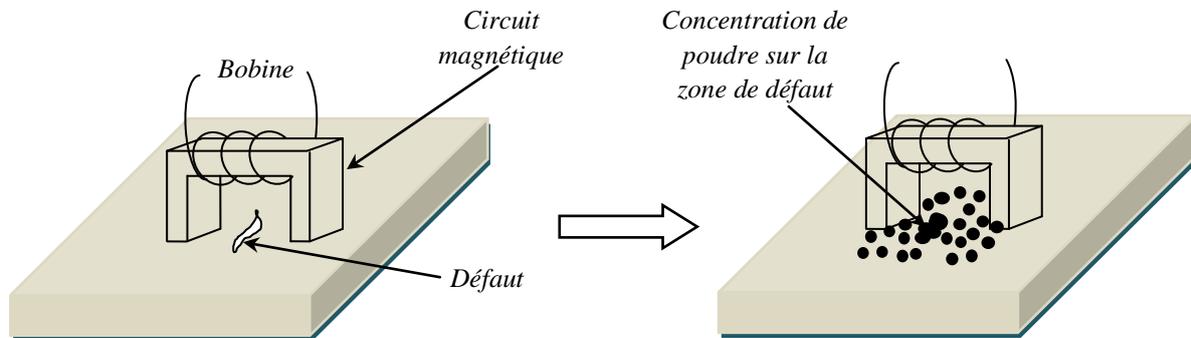


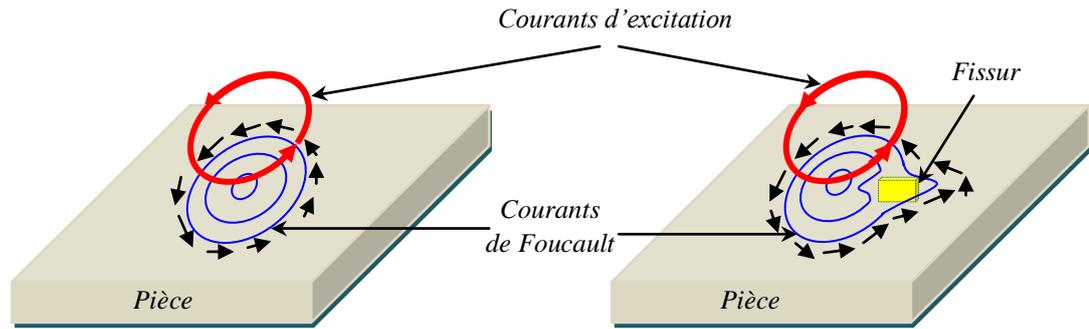
Figure I.5. Principe de la magnétoscopie.

I.2.7. Contrôle par courants de Foucault

Le CND par CF est une technique d'inspection basée sur l'analyse de la répartition des courants induits dans une pièce conductrice placée dans un champ inducteur créé par une bobine. Ces courants induits créent eux-mêmes un champ magnétique induit qui s'oppose au champ d'excitation. L'interaction du champ d'excitation avec le champ induit génère une variation de l'impédance vue par la bobine inductrice, par rapport à celle du système inducteur seul, sans la pièce à inspecter (figure I.6). L'analyse de cette variation d'impédance permet de procéder, aussi bien à la caractérisation de la pièce conductrice qu'à la détection des défauts qui peuvent s'y produire.

Le premier chercheur à avoir fait des essais de CND par CF a été le physicien britannique « David Hughes » en 1879. Au niveau des instruments de CND, le premier appareil fabriqué à base de cette technologie a été un appareil de mesure d'épaisseur en 1926.

Le contrôle par courant de Foucault joue un rôle essentiel pour protéger les systèmes industriels, en particuliers les systèmes qui doivent être inspectés sans prélèvement de matière, tels que l'avionique, les pipe-lines ou des structures de centrales électriques ou nucléaires. Il est utilisé, par exemple pour détecter les fissures dans les tubes et les soudures du générateur de vapeur. Dans les structures d'aéronautique, ce type de contrôle est utilisé pour les éléments de fixation, des trous de fixation et des pièces des moteurs d'avion [5].



La présence d'un défaut génère une déformation des lignes de courants induits

Figure I.6. Principe du CND par CF

Dans une pièce conductrice plane, les lignes du champ magnétique traversent la pièce orthogonalement ce qui crée des lignes de courants induits dans des plans parallèles à la surface de la pièce. Si la pièce est suffisamment épaisse, cette densité est donnée par :

$$J_{ind}(z) = J_{sur} \exp(-z\sqrt{\pi f \sigma \mu}) = J_{sur} \exp(-\frac{z}{\delta}) \quad (I.1)$$

Avec :

z : La profondeur considérée à l'intérieur de la pièce

$J_{ind}(z)$: Le module de la densité de courant à la profondeur z

J_{sur} : Le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$)

δ : La profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

La profondeur de pénétration est donc donnée par la relation suivante :

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

Dans la figure I.7, nous pouvons remarquer que la densité du courant décroît de manière exponentielle avec la profondeur.

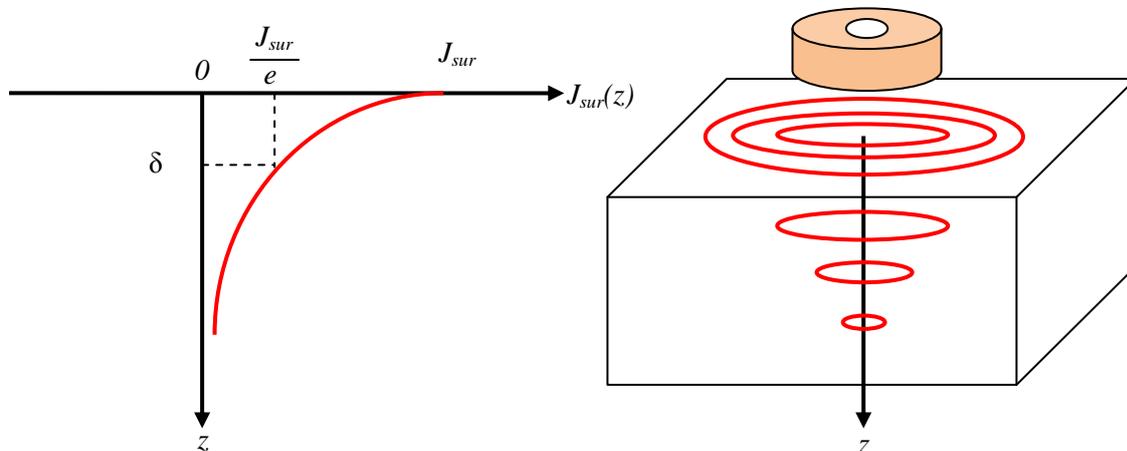


Figure I.7. Évolution des CF en fonction de la profondeur dans une pièce conductrice.

I.2.7.1. Types de capteurs CND

Les techniques de CND-CF nécessitent la mise en place de systèmes permettant l'émission et la réception d'un champ magnétique. Différentes techniques sont utilisées, et le capteur peut être élaboré par une ou de plusieurs bobines. Selon la technique émission-réception utilisée nous distinguons plusieurs types de capteurs.

- Capteurs à double fonction

Ce type de capteurs utilise une seule bobine qui assure en même temps le rôle de l'émetteur et du récepteur. La réponse du capteur est représentative de la variation d'impédance où chaque modification est significative d'une présence d'altération dans le matériau ou dans la géométrie.

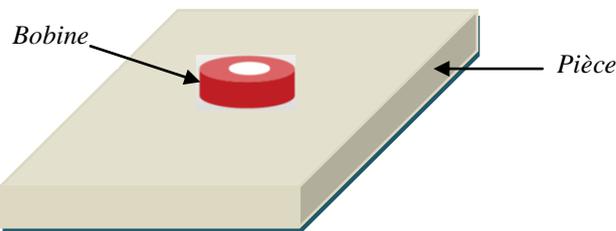


Figure I.8. Capteur à double fonction.

- Capteurs émetteur-récepteur

Dans ce type de dispositifs de contrôle, les deux fonctions d'émission et de réception se réalisent séparément. Il s'agit d'utiliser une bobine émettrice pour générer le champ d'excitation qui interagit dans la pièce inspectée et une autre bobine, appelée bobine réceptrice, pour mesurer le champ induit (figure I.9).

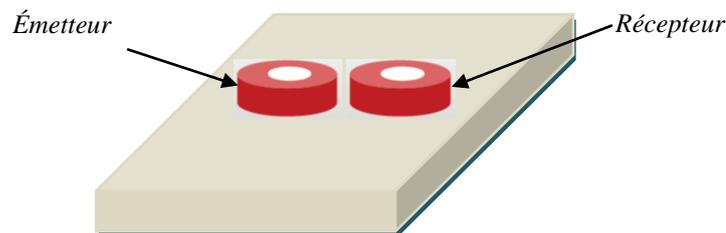


Figure I.9. Capteur émetteur récepteur.

- Capteurs différentiels

Dans ce type de capteurs, deux bobines similaires sont placées dans deux zones différentes sur la pièce inspectée. La différence entre les deux impédances mesurées par les deux bobines donne des informations sur l'état de la pièce et toute différence de mesure n'est pas nulle indique une présence de défaut (fig. I.10).

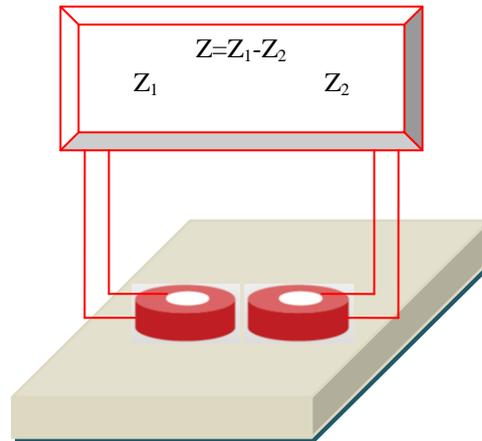


Figure I.10. Capteur différentiel.

I.2.7.2. Modes d'excitation

Pour alimenter les capteurs CF, on distingue trois types de modes d'excitation: mono-fréquentiel, multi-fréquentiel et pulsé.

- Le mode mono-fréquentiel

Le mode mono-fréquentiel consiste à exciter le capteur de courant de Foucault par un signal sinusoïdal d'une fréquence fixe. Afin d'éviter les résultats non précis, le choix de la fréquence est important et doit être adapté aux données de la pièce à inspecter et au type de défauts recherchés (taille, profondeur). Par exemple, une fréquence très basse n'est pas capable à donner des résultats bien précis à cause la faible amplitude des courants de Foucault qui peuvent être noyés dans les bruits. De même qu'une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites.

- Le mode multi-fréquentiel

Cette stratégie basée sur l'utilisation de plusieurs fréquences d'excitation permet d'avoir un grand nombre d'informations d'une part et d'éliminer fortement l'effet des grandeurs perturbatrices, comme le lift off, d'autre part. L'alimentation du capteur peut être réalisée simultanément ou en séquence.

- Le mode pulsé

Ce mode a été appliqué la première fois dans les années 50 pour mesurer l'épaisseur des revêtements métalliques. Il constitue une alternance au mode multi-fréquentiel, et utilise un signal de large bande fréquentielle pour exciter la sonde avec des signaux impulsionnels contenant un spectre riche en fréquences. La forme du signal d'excitation utilisée peut être

une forme rectangulaire, triangulaire ou semi-sinusoïdale. Cette dernière est l'un des cas les plus utilisés à cause sa simplicité de mise en œuvre. L'avantage principal de mode pulsé est de contrôler la pièce testée à différentes profondeurs de pénétration simultanément. Ce qui permet de fournir beaucoup d'informations sur la pièce testée dans un temps réduit.

I.2.7.3. Capteurs à base matrices de bobines

L'utilisation d'un grand nombre de bobines, assemblées sous forme d'une matrice, permet de détecter les réponses locales des éléments de la matrice en même temps. En conséquence, une surface importante peut inspectée dans une seule position du capteur. La figure I.11 présente le principe d'une matrice de bobine carrée. Pour un capteur mono bobine (figure I.11. (a)), nous sommes obligés de faire un déplacement mécanique suivant les deux directions de la pièce. Cependant dans le cas d'un rang de bobines comme illustré dans la figure I.11. (b), le déplacement mécanique suivant une direction est remplacé par un déplacement électrique. L'utilisation d'une matrice de bobine (figure I.11. (c)) permet de faire un scan électrique dans les deux directions pour une surface importante ce qui donne vitesse d'inspection importante.

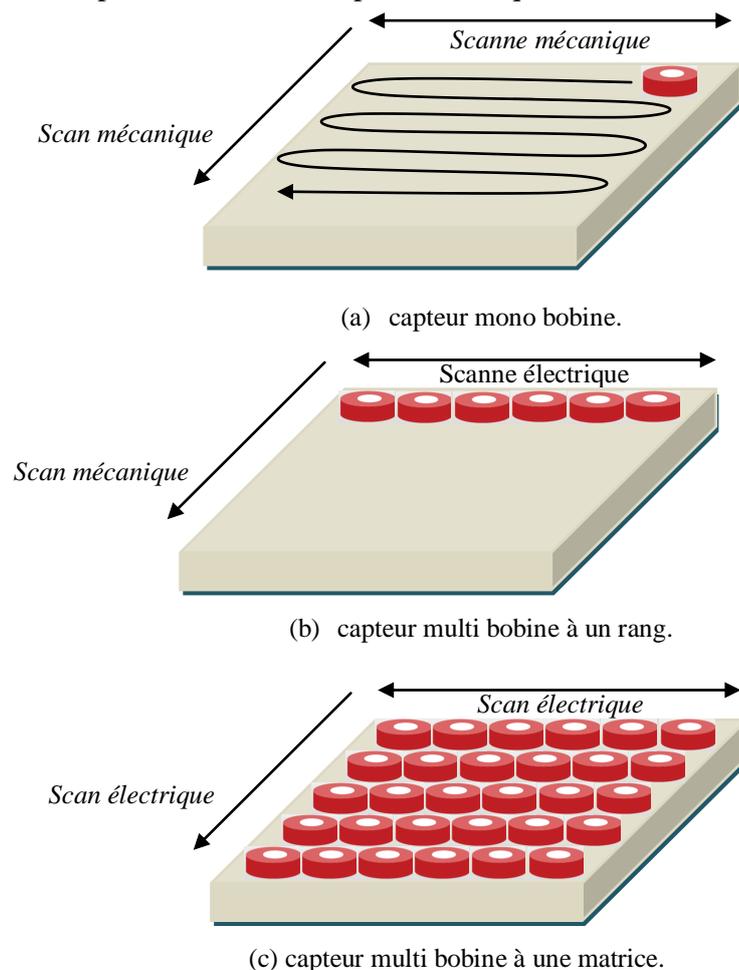
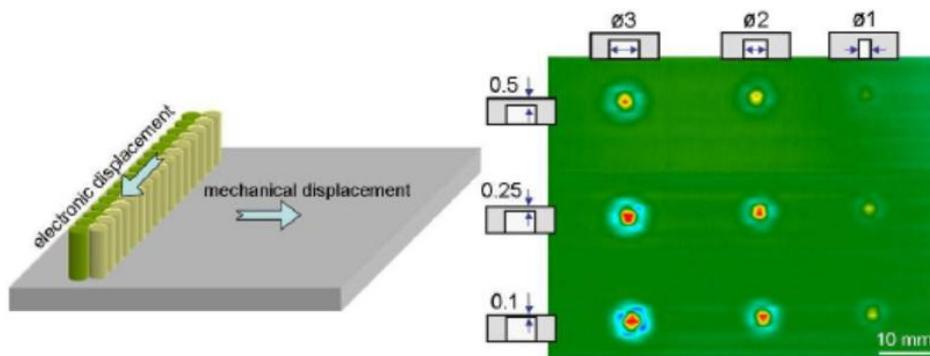


Figure I.11. Principe d'une matrice de bobines.

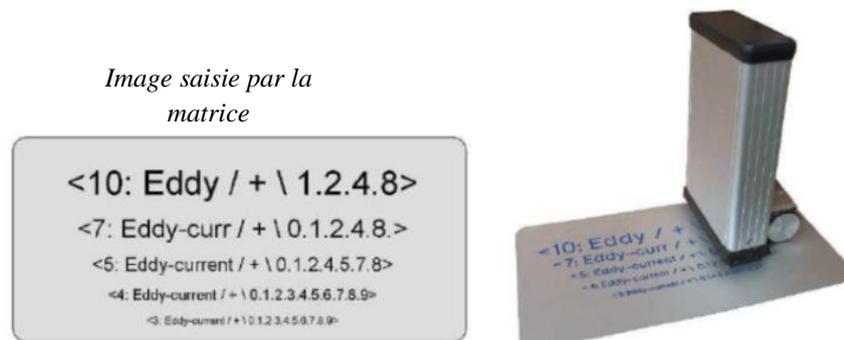
En plus de la rapidité d'inspection par les matrices de bobines, elles présentent beaucoup d'avantages par rapport aux capteurs simples. Nous citons :

- la possibilité d'acquisition en temps réel d'une zone importante ;
- la flexibilité de ces systèmes qui permet de contrôler les géométries déformées en minimisant l'instabilité de lift_off pendant le scan ;
- pour une position donnée de la matrice, nous pouvons également utiliser la différence entre les réponses élémentaires pour exprimer l'état de la zone testée sous forme d'image cartographique.

Dans ce cadre, des architectures de matrices sont proposées selon l'application voulue. A titre d'exemple l'équipe de Mook et celle du Heuer,[6-8] ont remplacé le déplacement mécanique longitudinal par un déplacement électrique à l'aide d'une matrice linéaire à deux colonnes (fig. 1.12 a). L'une des deux assure la fonction d'émission et la deuxième assure la fonction de réception. Cette proposition a prouvé sa capacité pour visualiser les défauts débouchant et les défauts sous cutanés d'une part et pour la reconnaissance des formes des pièces d'autre part. Le principe de fonctionnement est basé sur le déplacement automatisé du champ électromagnétique suivant le sens longitudinal de la matrice suivi par un déplacement mécanique dans le sens transversal de la matrice ainsi de suite.



(a) visualisation des défauts débouchant et sous cutanés.



(b) reconnaissance des formes.

Figure I.12. Matrice de bobines à double colonnes.

Dans la référence [9], les auteurs ont utilisé une bobine rectangulaire comme émetteur, et une matrice de 23 éléments arrangés dans trois colonnes comme récepteur. À travers cette configuration ils ont pu de suivre l'évolution de la surface endommagée d'une plaque d'acier en procédant à la résolution du problème inverse.

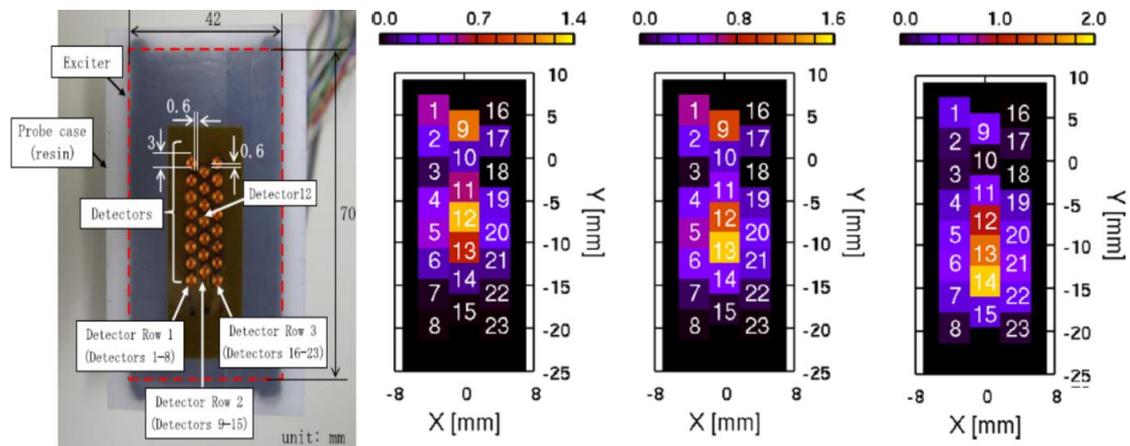


Figure I.13. Influence de défauts sur la répartition des courants induits détectés par une matrice de réception collée sur un support rigide [9].

Durant la conception d'une matrice de bobine, il y a une certaine liberté pour choisir l'emplacement des éléments, ce qui donne la possibilité d'avoir une forme bien adaptée à l'application demandée. Ces dispositifs peuvent être élaborés par la technique des circuits imprimés ou bien par association de petites bobines sur un support donné. Selon la nature du support qui rassemble les différents éléments de la matrice nous distinguons deux types de capteurs de matrice par CF qui sont les matrices à support rigide et les matrices à support souple (Figures (I.13 & I.14)). Le premier type est destiné à l'inspection des surfaces planes tandis que le deuxième est utilisé pour inspecter les surfaces irrégulières.

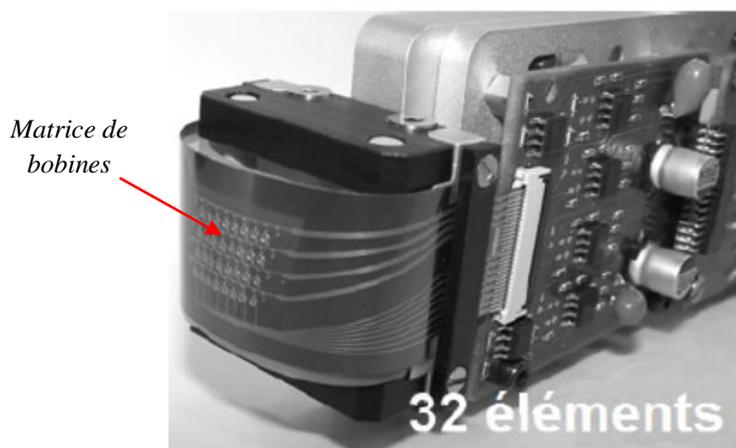


Figure I.14. Capteur CF composé d'une matrice de bobines collée sur un support souple [10].

I.2.7.4. Avantages du CND par courants de Foucault

Le CND par CF est un contrôle simple à mettre en œuvre grâce à la miniaturisation et l'automatisation et la contrôlabilité du dispositif. Ce qui facilite la transportabilité et aussi le contrôle dans les endroits difficilement accessibles. Le niveau faible des puissances des signaux d'alimentation et celui mesuré, permet d'utiliser directement des composants électronique qui permettent la rapidité d'acquisition et de traitement. L'absence du couplant permet d'effectuer un contrôle sans contact. De plus, cette technique a une grande sensibilité à la détection des défauts même pour environnements hostiles et des températures élevées. En terme écologique, la technique de CF est une technique qui ne laisse aucune trace de pollution dans l'environnement.

I.2.7.5. Limites du CND par courants de Foucault

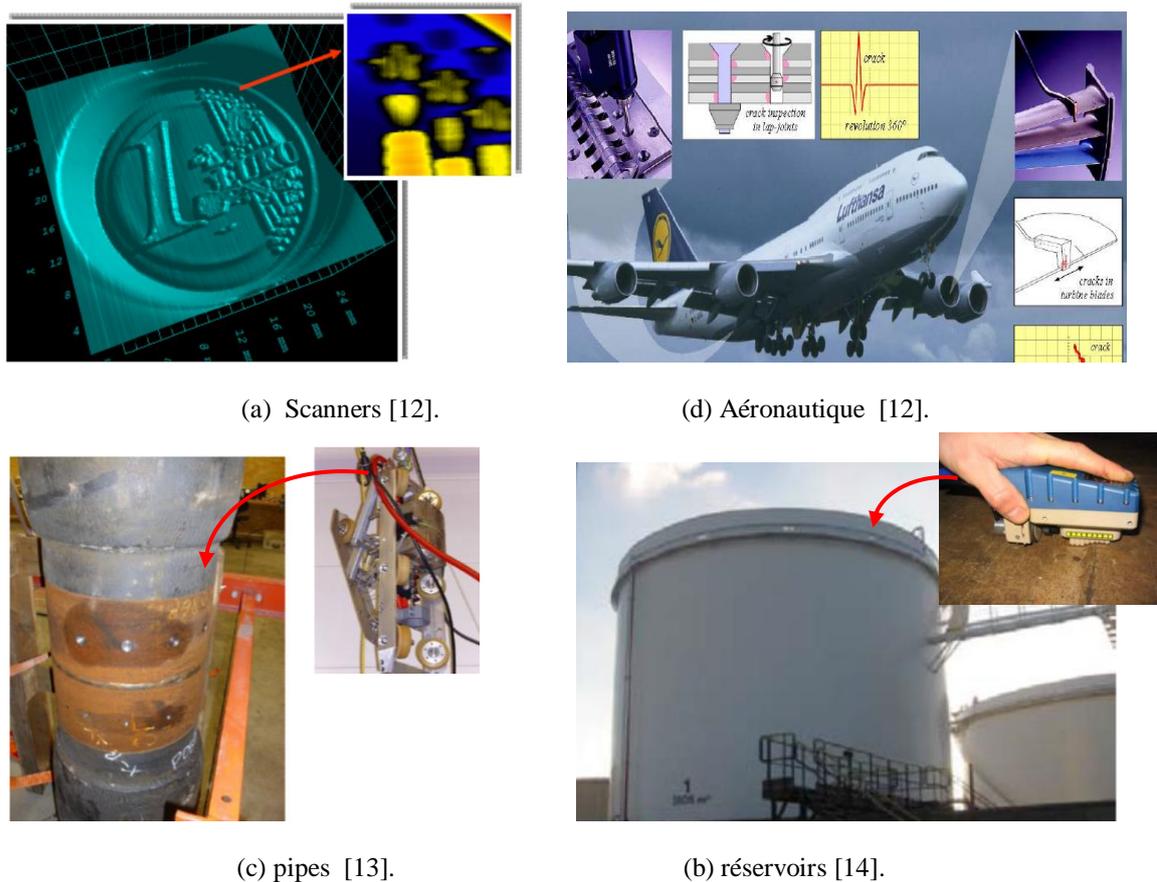
Malgré tous les avantages de la méthode de CND-CF par rapport aux autres techniques, elle reste limitée par des inconvénients et des limitations :

- ne s'applique que pour contrôler les matériaux électriquement conducteurs ;
- n'a pas la capacité à détecter des défauts à profondeur importante ;
- probabilité d'instabilité de lift-off du capteur CF durant la procédure du scan qui peut conduire à des perturbations au niveau de la détection de la variation d'impédance,
- analyse des signaux, habituellement complexe.

I.3. Domaines d'applications d'ECND

L'ECND a longtemps été utilisé dans le domaine de l'industrie, notamment pour l'estimation et l'allongement de la durée de vie des systèmes et équipements coûteux, ou ceux dont l'obligation de continuité de fonctionnement ne tolère pas les interruptions nécessaires aux interventions de l'évaluation et le diagnostic.

Les techniques de l'ECND (Evaluation et Contrôle Non Destructifs) étaient limitées, pour les gros dispositifs industriels, aux contrôles des aciers et des soudures, avant de connaître des développements rapides et importants dans une grande variété de secteurs industriels. Actuellement, les utilisations majeures de l'ECND portent sur les domaines des transports (avions, transports sur rails, navires), les infrastructures énergétiques et de génie civil (plates-formes pétrolières et gazières, pipelines, centrales électriques, installations nucléaires, ponts, routes, barrages, ...), ainsi que dans le domaine de la fabrication mécanique et la métallurgie [11, 12].



(a) Scanners [12].

(d) Aéronautique [12].

(c) pipes [13].

(b) réservoirs [14].

Figure I.15. Exemples d'application du CND.

De plus, de vastes applications de caractérisation non destructive existent pour des matériaux d'intérêt pour des secteurs industriels, notamment pour les métaux, les céramiques et les composites. Parmi les avantages de la caractérisation nous pouvons citer le perfectionnement des performances à atteindre des objectifs fixés, ou pour prédéterminer les propriétés de ces matériaux pour en faciliter l'utilisation dès la production et jusqu'au traitement de leurs déchets.

I.4. Matériaux composites à fibres de carbone (CFRP)

Des associations et compositions sont élaborées pour améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et électromagnétiques de certains matériaux. Ces matériaux ont réussi à dominer le marché des secteurs importants tels que l'industrie automobile, l'aéronautique et l'aérospatial. L'introduction des composites dans le secteur de l'aéronautique, par exemple, a contribué de manière importante à l'amélioration des performances, et la référence [15] montre que l'évolution de l'utilisation des composites dans l'industrie aéronautique dans les deux grands pôles Boeing et Airbus, augmente de plus en plus, passant de 5% de matériaux composite utilisés dans l'A300, durant les années 70, à plus de 50% dans l'A350 XWB en

2012. Parallèlement, chez Boeing, ce taux était de 2% en 1980 dans le Boeing B737, et il est passé à plus de 50% dans le B787 en 2010.



50% composites, 20% aluminium, 15% Titane, 10% acier et 5% autres.

Figure I.16. Composites dans le Boeing-787 [16, 4].

Le tableau (I.1.) présente une comparaison entre les propriétés mécaniques des trois matériaux composites CFRP, BFRP et le GFRP.

Tableau I.1. Comparaison entre trois composites fibreux [17].

Matériau	Résistance longitudinale (MPa)	Résistance transversale (MPa)	Densité (kg/m ³)	Coût
Glass-Epoxy	1250	20	2200	peu coûteuses
Born-Epoxy	1500	90	2100	Coûteuses
Carbon-Epoxy	2400	15	1600	peu coûteuses

Ce tableau montre que l'on peut distinguer des domaines d'application adaptés à chaque type :

Fibres de verre Peu coûteuses et s'adaptent bien aux applications nécessitant une faible résistance mécanique

Fibres de bore Fibres coûteuses mais elles sont bien adaptées pour les applications nécessitant une résistance transversale importante.

Fibres de carbone Beaucoup de domaines d'application. Ces matériaux sont très utilisés pour leurs avantages tels que la robustesse mécanique, la légèreté, la résistance thermique, la résistance à la corrosion, etc.

Pour les applications industrielles, nous avons trouvé que les CFRP sont très utilisés. Par exemple le pourcentage des composites de type CFRP représente 22% dans l'avion A380. De plus, ce pourcentage de CFRP va certainement augmenter du fait des recherches intensives en

cours en vue du remplacement de l'aluminium dans les ailes des avions par les CFRP. De plus, les fibres de carbone peuvent être associées avec les fibres de verre, ces matériaux sont bien appréciés dans les pales des turbines éoliennes [18].

I.4.1. Structures de CFRP

La structure joue un rôle important pour atteindre les performances voulues dans un matériau composite composé de deux ou plusieurs matériaux. A titre d'exemple, nous citons les CFRP qui sont constitués d'un arrangement de fibres de carbone (renforts) noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. Le renfort représente le squelette de la pièce et la matrice assure la connexion et l'orientation des fibres. Ces matériaux sont fortement hétérogènes et anisotropes. Les diamètres des fibres varient de 7 à 15 μm , donc une dizaine de fibres sont disposées suivant l'épaisseur d'un pli de 125 μm [19].

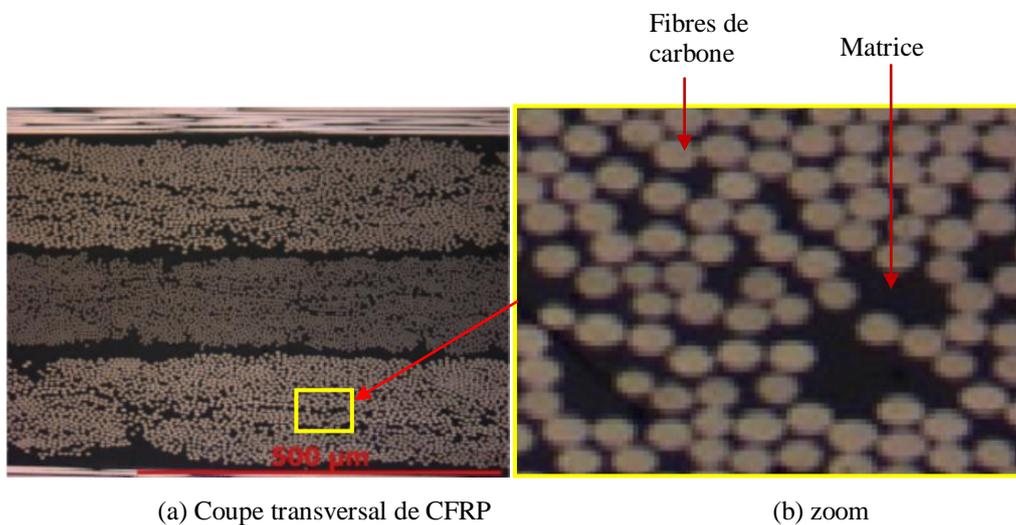


Figure I.17. Exemple d'arrangement de fibres dans un CFRP [20].

Dans un matériau CFRP, en comparant la longueur des fibres par rapport aux dimensions de la pièce fabriquée nous distinguons trois structures : les composites à particules, les composites à fibres courtes et les composites à fibres longues.

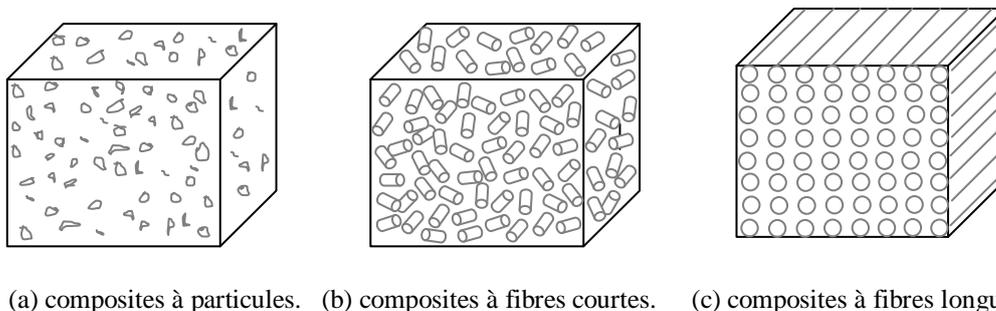
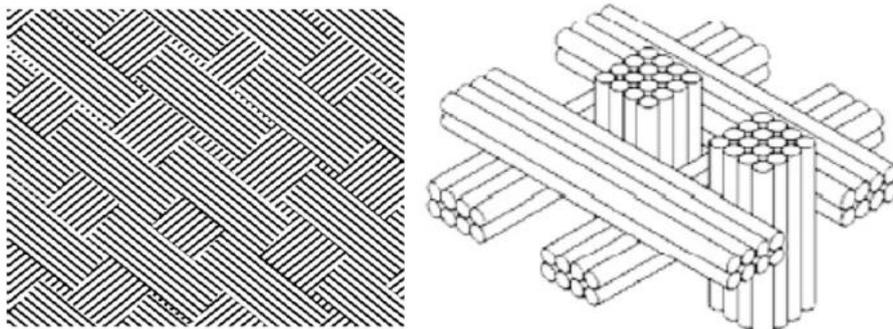


Figure I.18. Différentes structures de CFRP en fonction du rapport (longueur fibre/pièce)

Dans les structures présentées, la structure la plus résistante aux forces importantes est la structure à fibres longues où les fibres sont placées sous forme tissée, unidirectionnelle ou multidirectionnelle.

I.4.1.1. Structures tissées

Dans les CFRP tissés, les fibres sont tressées l'une autour de l'autre. Cette structure améliore la résistance des composites dans lequel les fibres sont placées dans deux ou trois directions orthogonales les unes par rapport aux autres tel que le montre dans la Figure. I.19.



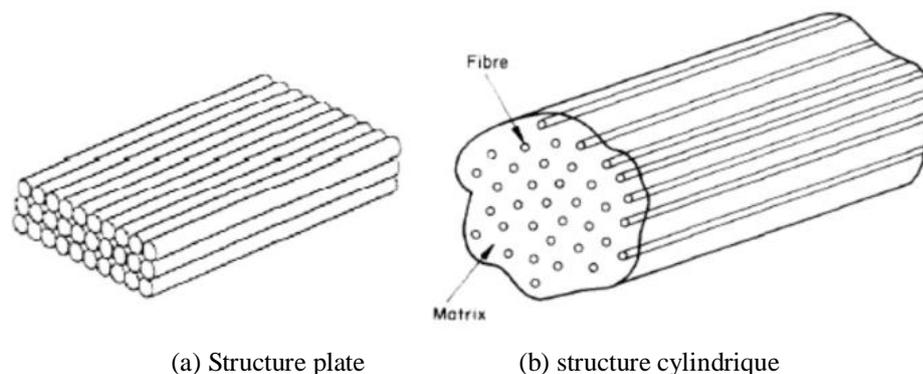
(a) Matériaux avec deux directions de renfort (b) Matériaux avec trois directions de renfort

Figure I.19. Structure tissées [21].

Malgré les performances des CFRP tissés, leur pourcentage d'utilisation reste très limité dans le marché en raison de leur coût de production très élevé.

I.4.1.2. Structure unidirectionnelle

La structure unidirectionnelle est la structure la plus simple des CFRP dans lesquels toutes les fibres se trouvent dans la même direction comme le montre la figure I.20. Ces matériaux sont constitués d'un ou plusieurs plis stratifiés. Notons que le pli est la structure élémentaire de base de CFRP avec une épaisseur faible d'environ de $125 \mu\text{m}$, composé de fibres noyées dans une matrice.



(a) Structure plate

(b) structure cylindrique

Figure I.20. Structure unidirectionnelle de CFRP [21, 22].

I.4.1.3. Structure multidirectionnelle

Cette structure englobe un ensemble de plis comme le montre la figure I.21. Les plis sont empilés et orientés suivant un ordre défini, permettant d'obtenir une structure plus résistante aux forces mécaniques. L'orientation des fibres dans chaque pli fait un angle donné par rapport à un référentiel donné. Les différents angles d'orientations des plis décrivent les paramètres mécaniques, thermiques et électromagnétiques du CFRP.

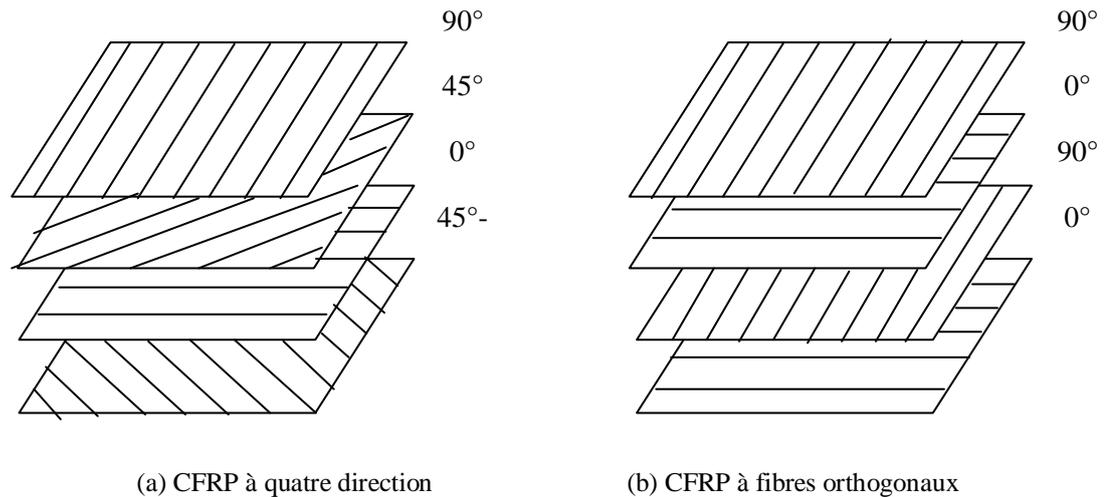


Figure I.21. Exemples des structures multidirectionnelles de CFRP.

I.4.2. Défauts dans les CFRP

Les CFRP ont beaucoup d'avantages par rapport aux structures métalliques, ce qui en fait un bon concurrent dans beaucoup d'applications industrielles. Cependant, certaines contraintes peuvent s'imposer à ces matériaux pouvant en minimiser les performances, voire les détruire. Les corps étrangers, la porosité, la surconcentration de fibres, la surconcentration de la résine, l'ondulation des fibres et le plan de drapage incorrect sont des défauts apparaissent durant la procédure de fabrication. Les autres types qui peuvent apparaître en service relèvent du délaminage, de la rupture de fibres, de la pénétration d'humidité ou de la décohésion de l'interface entre les fibres et la matrice. Nous présenterons ci-dessous quelques défauts qui peuvent s'apparaître dans les CFRP.

I.4.2.1. Rupture de fibres

Dans l'ensemble des défauts possibles, la rupture de fibres (figure I.22) intervient juste après la fissuration de la matrice et le délaminage du fait d'une importante contrainte ou un cisaillement de la pièce de CFRP [23].

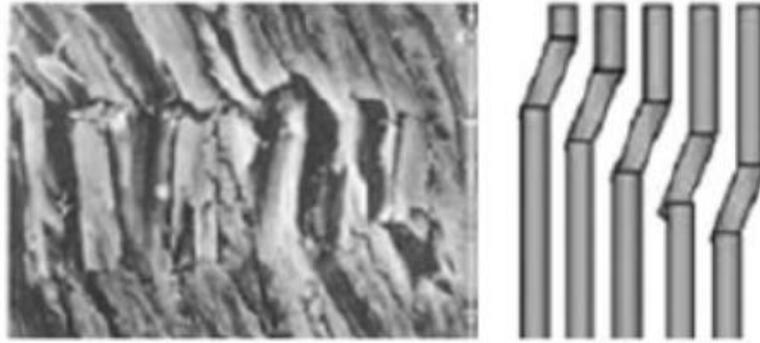


Figure I.22. Défaut de rupture de fibre de carbone [24].

I.4.2.2. Ondulation des fibres

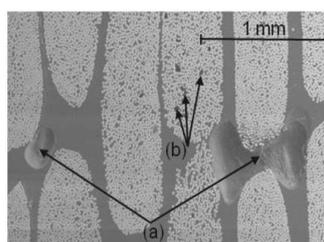
L'ondulation des fibres carbone dans les CFRP, comme illustré dans la figure (I.23), est un défaut induit durant le procédé de moulage par la charge axiale des fibres en présence des contraintes thermiques [25]. Les paramètres des processus qui affectent le développement de l'ondulation des fibres ont été étudiés par Kugler et Moon [26, 27]. Ils ont montré expérimentalement que la grande différence entre les deux coefficients de dilatation thermique de moule et de CFRP d'une part et un grand gradient de température causé pendant le refroidissement sont des paramètres importants pour l'évolution de l'ondulation de fibres. Il est également rapporté que dans l'enroulement de filaments des CFRP, une tension de remorquage insuffisante peut induire une ondulation des fibres.



Figure I.23. Défaut d'ondulation de fibre de carbone [28].

I.4.2.3. Porosité

Durant la fabrication des composite de CFRP, la partie fibreuse contient souvent des pores à différents échelles. Le macro-pore qui se trouve entre deux faisceaux successifs (Figure I.24 (a)) et le micro-pore qui se trouve à l'intérieur du faisceau de fibres (Figure I.24 (b)) [29].



(a) Macro-pore (b) Micro-pore.

Figure I.24. Coupe montre la porosité dans un matériau de CFRP unidirectionnel [29].

I.4.2.4. Délaminage

Le délaminage est l'un des défauts induits dans les CFRP par la désunion entre les fibres et la matrice ou aussi une fissuration de la matrice. Il s'apparaît généralement dans une région riche en résine.

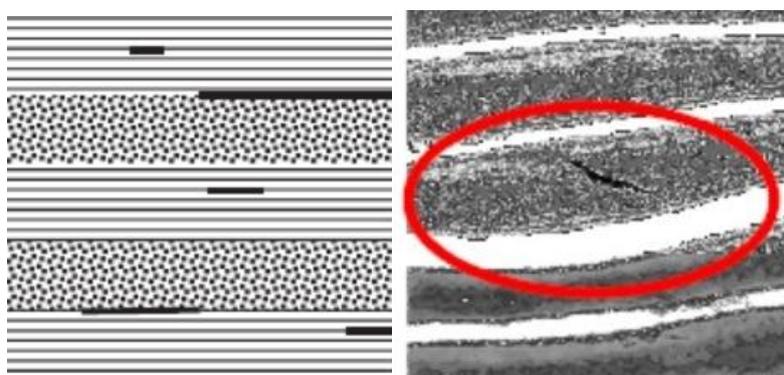


Figure I.25. Défaut de délaminage dans un composite de CFRP [21, 30].

I.4.3. Procédés de création de défauts dans les CFRP, en Laboratoire, dans le cadre de la recherche scientifique

Afin d'étudier les défauts dans les structures de CFRP, les laboratoires spécialisés suivent des méthodes pour créer le défaut voulu. Nous présenterons ci-dessous deux méthodes pour créer le délaminage, la rupture de fibre et le défaut d'ondulation.

I.4.3.1. Délaminage et ruptures de fibres

Dans la référence [31], pour créer les défauts de délaminage et de rupture de fibres dans une pièce de CFRP, les auteurs ont utilisé le test illustré dans la figure I.26. L'échantillon est placé

sur 02 supports et une charge mécanique est appliquée au point milieu de la face opposée. Le poids de la charge est augmenté graduellement jusqu'à l'apparition des défauts de délaminage et de rupture de fibres. Dans la figure I.26, il y a deux zones de délaminage entre le pli de 90° et les deux plis adjacentes de 0° et d'autre part une rupture de fibre dans le pli 90°. Le défaut provoque une modification de la résistance électrique mesurée entre les deux électrodes. Les emplacements et les tailles (longueur) des défauts peuvent être évalués à l'aide d'un scan ultrasonique.

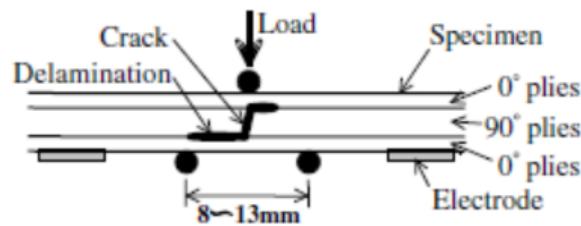


Figure I.26. Méthode pour créer le défaut de délaminage et la rupture de fibre [31].

I.4.3.2. Ondulation de fibres

Nous citons dans ce cadre, l'expérience de Koichi Mizukami et al [32], qui ont montré la difficulté d'induire l'ondulation dans un CFRP, et pour y arriver ils ont utilisé une méthode décrite dans la figure I.27.

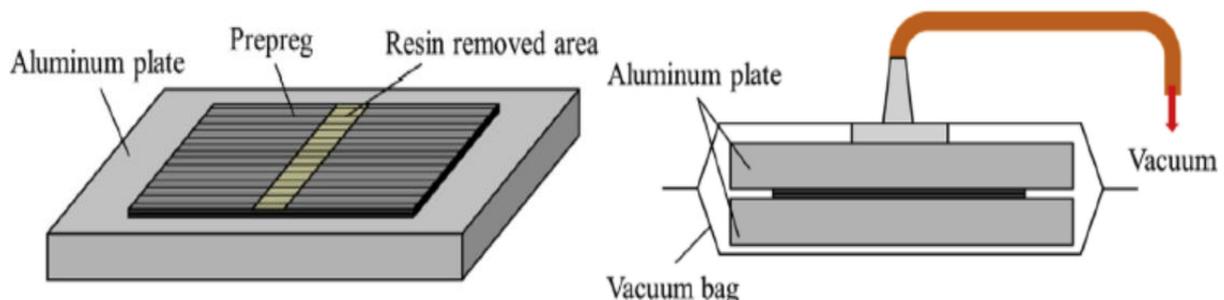


Figure I.27. Méthode pour créer l'ondulation interne dans un CFRP [32].

Les fibres de carbone et la résine sont empilées entre deux plaques en aluminium. La résine au centre du CFRP est ensuite enlevée par une serviette en papier trempée par l'acétone jusqu'à ce que les fibres puissent se déformer dans la zone de la résine enlevée. Enfin, une pression est appliquée par une évacuation sous vide. La figure I.28 montre l'échantillon de CFRP dans lequel on a provoqué une ondulation interne de fibres.

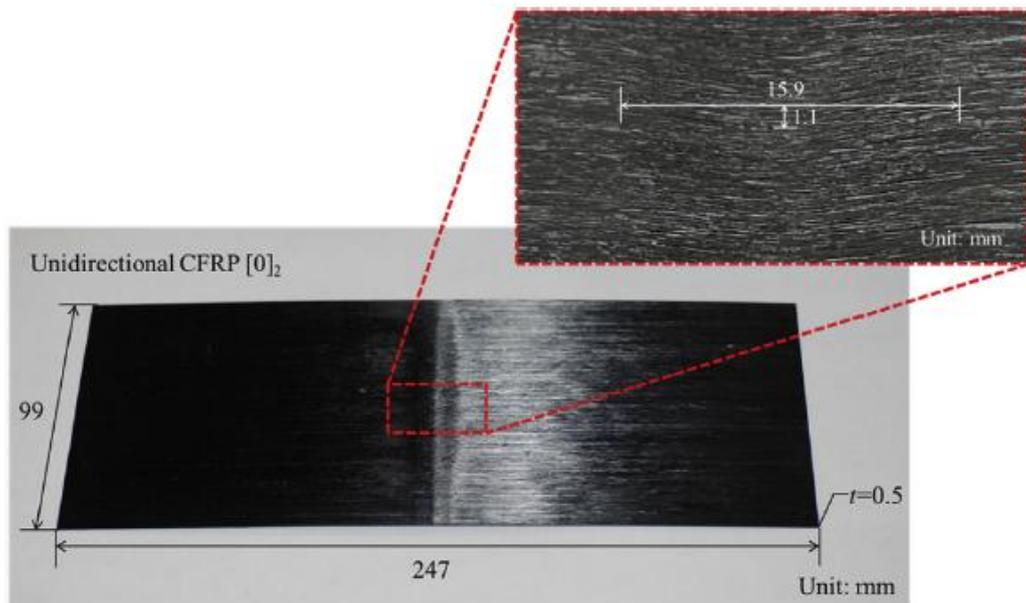


Figure I.28. Plaque de CFRP avec ondulation interne de fibre [32].

I.5. Capteurs CF destinés au CND et END des CFRP

A l'apparition des procédés de CND-CF, les capteurs étaient conçus et destinés au contrôle de matériaux purement conducteurs. L'adaptation de la technique aux matériaux composites, ajoutée aux exigences des contraintes économiques, environnementales, et les exigences de qualité, ont poussé les constructeurs à rechercher plus de précision et d'efficacité dans les procédés. Dans ce contexte, quelques chercheurs ont réfléchi à la sensibilité des courants induits par rapport à la modification de fibres de carbone dans les CFRP. Cela a donné une opportunité pour appliquer le CND par CF à la caractérisation et l'inspection de ces matériaux. Cependant, il était nécessaire d'adapter les capteurs CF aux caractéristiques des CFRP et à la nature des défauts induits dans ces matériaux. Les approches utilisés sont basées sur le type d'alimentation du capteur, sa conception et configuration, ... etc. Nous exposerons ci-dessous deux types de capteurs : les capteurs absolus et les capteurs émetteur-récepteur appliqués aux CFRP.

I.5.1. Capteurs absolus

L'utilisation de fréquences plus élevées que celles utilisées lors le du contrôle des matériaux purement conducteurs permet de générer des courants appréciables dans les fibres de carbone. Des chercheurs ont utilisé les capteurs absolus pour caractériser et inspecter les CFRP et enregistrer des signatures exprimant l'état de la pièce testée.

La nature structurelle des CFRP exige des configurations particulières de capteurs à Courants de Foucault. Nous distinguons deux types de géométries de capteurs, qui sont les bobines circulaires et les bobines rectangulaires.

I.5.1.1. Bobines circulaires

Le capteur dans ce cas est très simple, il se compose d'une bobine circulaire qui se déplace au-dessus de la pièce de CFRP testée (Figure I.29). Les signatures sont extraites à partir des variations d'impédance des différentes positions du capteur.

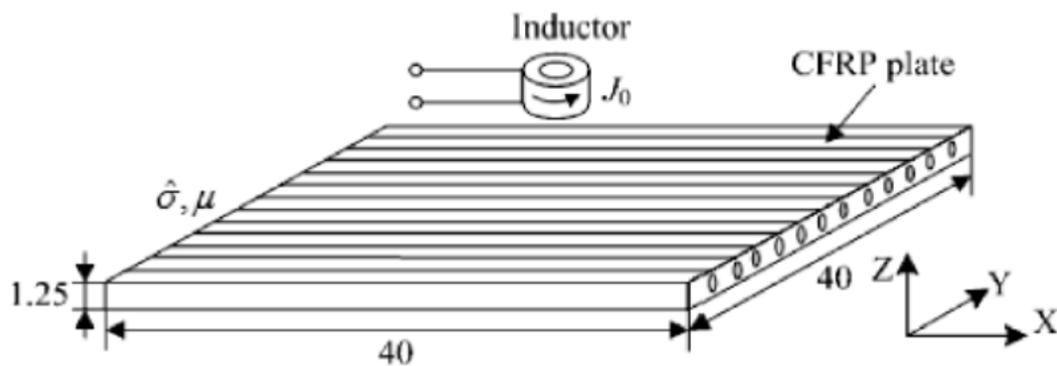
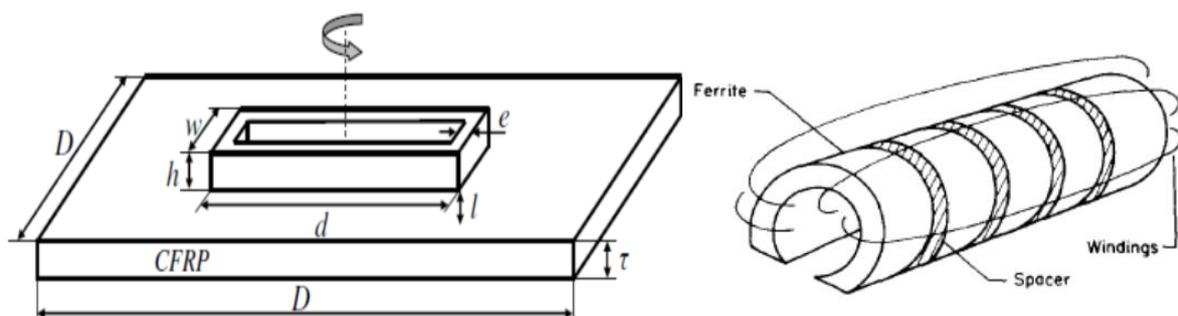


Figure I.29. Bobine circulaire sur une plaque de CFRP [33].

I.5.1.2. Bobines rectangulaires

Quelques travaux ont utilisé des bobines de forme rectangulaire (ou des sonde à section rectangulaire) tournantes. Ils ont pu déterminer l'orientation des fibres dans chaque pli à partir de l'analyse de la variation d'impédance en fonction de l'angle de rotation du capteur. La représentation des résultats sous forme de diagramme polaire a montré aussi que l'amplitude de chaque lobe donne la profondeur du pli. De plus, ce type de capteurs a prouvé qu'il est capable à déterminer le tenseur de conductivité des plaques de CFRP [34, 35]. La figure I.30 présente deux exemples des capteurs rectangulaires absolus.



(a) bobine rectangulaire tournant

(b) Sonde de fer à cheval de CF

Figure I.30. Exemple de capteurs rectangulaires absolus [34, 35].

I.5.2. Capteurs émission-réception

Ce genre de dispositifs utilise aussi des bobines circulaires ou rectangulaires. Mais chaque capteur besoin à deux bobines. La première assure l'émission du signal et la deuxième assure la réception.

I.5.2.1. Bobines circulaires

Ce type de capteurs consiste à exciter la bobine émettrice qui se trouve dans une position fixe sur une plaque de CFRP. On fait tourner la bobine réceptrice autour de l'émetteur pour mesurer le signal de réception correspondant à plusieurs positions angulaires. La représentation des résultats sous forme d'un diagramme polaire peut caractériser l'anisotropie de la conductivité électrique de CFRP. La figure I.31 illustre le principe de fonctionnement de ce capteur.

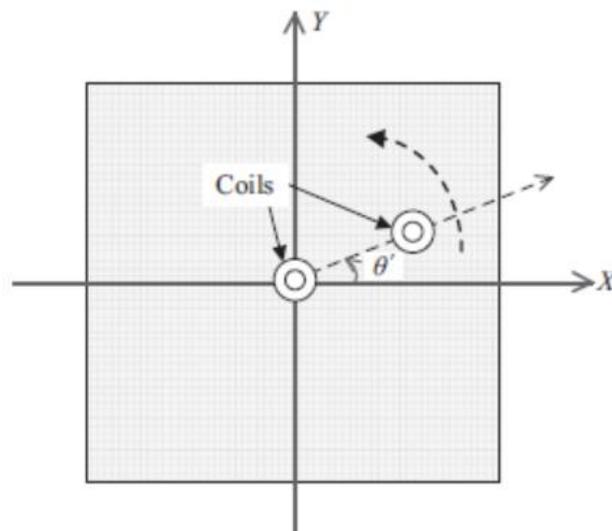


Figure I.31. Principe de fonctionnement d'une sonde à récepteur tournant [36].

I.5.2.2. Bobines rectangulaires

Des travaux ont utilisé deux bobines de forme rectangulaire, l'une assure l'émission et l'autre la réception des signaux. Les deux éléments sont collés à une base rigide plane, ce qui fixe la distance entre le récepteur et l'émetteur et donne un lift off stable. Cette conception a été choisie pour sa haute sensibilité à la direction de fibres. Au cours des mesures, les échantillons sont fixés, tandis que le capteur monté sur un rotor mécanique, tourne de 0 à 360° par pas choisi. Dans [37], les auteurs sont arrivés à caractériser la pièce hybride (aluminium/CFRP) montrée dans la figure I.32.

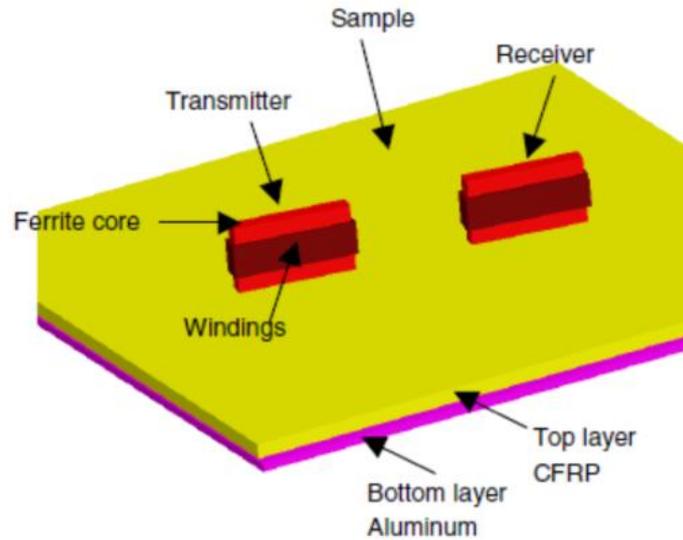


Figure I.32. Capteur rectangulaire à émetteur et récepteur tournants [37].

D'autres travaux, utilisent les capteurs rectangulaires (émetteur-récepteur) pour détecter les défauts dans les CFRP. Dans [38], ils ont proposé une méthode qui a une sensibilité élevée à la présence d'ondulation de fibres et peut aussi sélectionner les couches à inspecter.

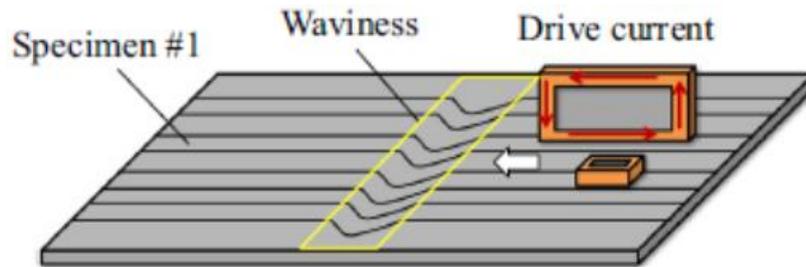


Figure I.33. Capteur d'ondulation de fibres [38].

I.5.3. Exemples d'appareils de CND-CF pour les CFRP

Dans une démarche de capitalisation et de valorisation des résultats de la Recherche d'une part, et de transfert technologique d'autre part, des gammes d'appareils et instruments de mesure robustes avec une précision très élevée ont été fabriqués. A titre d'exemple, le scanner de CF « *Eddycus MPECS* » monté sur un robot cartésien à trois axes (voir figure I.34). Les deux axes horizontaux (x,y) peuvent être contrôlés pendant le test, tandis que l'axe z vertical est utilisé pour assurer une distance constante entre la sonde de balayage et l'échantillon.

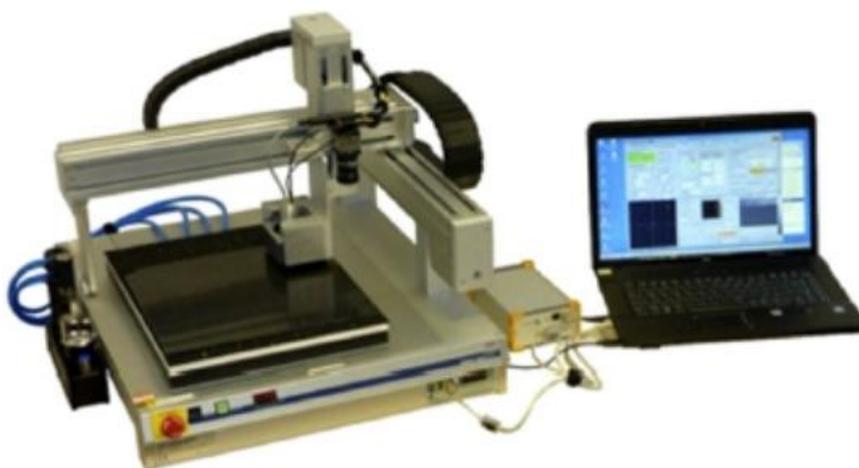


Figure I.34. Système cartésien de CND CF « Eddycus MPECS » [39].

Un deuxième exemple est le robot automatisé de CND-CF « Fraunhofer IKTS-MD », dédié à l'évaluation des tissus de CFRP multicouches. Ce dispositif est capable de détecter les petites déviations de l'angle de la fibre. De plus, il peut détecter l'orientation des fibres dans les couches inférieures qui sont non visibles optiquement.



Figure I.35. Robot à CF « Fraunhofer IKTS-MD » pour scanner les CFRP [40].

I.6. Conclusion

Le CND présente des avantages considérables en termes de sécurité, d'économie et d'écologie. Ce premier chapitre a permis d'exposer un état de l'art sur les techniques du CND, particulièrement le CND par CF. Nous avons, ensuite, présenté les matériaux composites CFRP et finalement quelques configurations de capteurs appliqués aux CND CF de CFRP. Ces présentations ont été accompagnées par un rappel de l'état de l'art et les grands travaux réalisés dans ces domaines. Cela a montré que la qualité d'inspection et la précision de

l'information recherchée par les méthodes de CND-CF sont directement liées aux caractéristiques du matériau inspecté et à la conception du capteur utilisé. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation mathématique des systèmes (plaque - capteurs de CND-CF) et des tests par simulation des ensembles étudiés.

Chapitre II :

Modélisation

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation mathématique destinée à l'étude d'ECND-CF des matériaux conducteurs et matériaux composites conducteurs. Le processus repose sur une utilisation pertinente du phénomène de l'induction électromagnétique, et nous commencerons ainsi, par la présentation des équations de Maxwell et la formulation électromagnétique utilisée, passant par les différents modèles électromagnétiques qui représentent les matériaux de type CFRP. Ensuite, nous présenterons quelques expressions adoptées pour calculer les réponses d'un capteur d'ECND-CF, et nous terminerons cette première partie par la présentation de la méthode numérique et le logiciel utilisé pour les travaux de simulation. La deuxième étape consistera à valider expérimentalement un modèle simple de CND-CF simulé sous COMSOL Multiphysics en utilisant les données d'un problème de benchmark de TEAM (Testing Electro-magnetic Analysis Methods) [41,42].

Afin de prospecter dans le domaine de caractérisation des CFRP par la méthode de CND-CF, il est nécessaire de comprendre les phénomènes électromagnétiques dans la pièce testée et au niveau du capteur lui-même. Au début, nous relierons la démarche de caractérisation des CFRP par les dispositifs rotatifs de CND-CF dans un schéma algorithmique. Ensuite, nous allons simuler deux dispositifs conventionnels destinés à ce type d'applications. Nous nous intéresserons dans un premier cas à un capteur rectangulaire tournant, et dans un deuxième cas à un capteur émetteur récepteur en utilisant deux bobines circulaires.

II.2. Modélisation électromagnétique d'un problème de CND-CF

Un modèle de CND-CF peut être représenté par un système qui se compose de plusieurs parties avec des propriétés physiques différentes. Ce système contient une source où nous imposons une densité de courant, une région conductrice qui représente la pièce contrôlée ou caractérisée, et une troisième région non conductrice qui représente l'air environnant. La figure (II.1) illustre une représentation de l'ensemble du domaine d'étude.

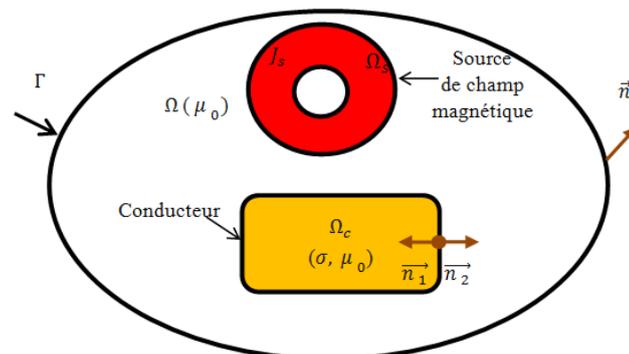


Figure II.1. Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.

Avec :

Ω : Domaine d'étude.

Ω_c : Région conductrice.

Ω_s : Région source.

J_s : Densité de courant électrique dans la source.

Γ : Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.

σ : Conductivité électrique.

μ : Perméabilité magnétique.

μ_0 : Perméabilité magnétique absolue du vide.

\vec{n}, \vec{n}_1 et \vec{n}_2 : Vecteurs normaux.

La modélisation d'un problème de CND-CF est une partie de la modélisation de l'électromagnétisme.

II.2.1. Équations de Maxwell

En électromagnétisme, les systèmes d'équations qui régissent les phénomènes électromagnétiques se développent à partir des équations de Maxwell. Dans les travaux de cette thèse, la fréquence maximale utilisée ne dépasse pas 1MHz, ce qui correspond à une longueur d'onde λ qui est égale à 300 m. En conséquence, on peut travailler dans le régime quasi stationnaire parce que toutes les épaisseurs des pièces utilisées sont inférieures à 1.5 cm.

Donc, dans ce travail, on néglige les courants de déplacement introduits par le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$. Si on considère la densité volumique de charge est comme nulle, en utilisant la notation complexe, les équations de Maxwell s'écrivent comme suit :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_s \quad \text{Équation de Maxwell-Ampère} \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad \text{Équation de Maxwell-Faraday} \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du flux magnétique} \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad \text{Équation de Maxwell-Gauss} \quad (\text{II.4})$$

On note que :

\vec{H} : Champ magnétique (A/m).

\vec{D} : Induction électrique (C/m²).

\vec{E} : Champ électrique (V/m).

\vec{B} : Induction magnétique (T).

\vec{J}_{ind} : Densité des courants induits (A/m²).

ω : est la pulsation du signal d'excitation (rad/s).

Physiquement, la conductivité électrique, la perméabilité magnétique et la permittivité électrique sont des paramètres physiques qui attachent les équations de Maxwell à travers des relations appelées « lois de comportement des matériaux ». Ces relations sont décrites comme suit :

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

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

Où :

ε : est la permittivité électrique en (F/m).

Les paramètres σ , μ et ε sont constants pour des matériaux linéaires et variables, en fonction de l'intensité des champs, pour des matériaux non linéaires. Ce sont des grandeurs scalaires pour les matériaux isotropes et tensorielles pour les matériaux anisotropes.

Le système d'équations de Maxwell, qui fait intervenir dans notre cas plusieurs équations, de type EDP, non linéaires, tensorielles et couplées, est très difficile à résoudre. Pour y remédier, nous utiliserons des grandeurs intermédiaires pour simplifier le système et en faciliter la résolution. Plusieurs formulations sont décrites dans la littérature dans ce sens.

II.2.2. Formulations électromagnétiques

Selon les termes utilisés pour élaborer les systèmes électromagnétiques, nous distinguons plusieurs formulations. En effet, la formulation en termes du champ, du potentiel ou de la densité des courants. Le choix d'une formulation liée à sa capacité à la résolution du problème posé en réduisant au maximum le nombre d'inconnues, ce qui va réduire le temps de calcul et l'espace mémoire utilisé.

Parmi les formulations les plus utilisées pour traiter les problèmes de CND-CF, nous citons la formulation $\vec{AV} - \vec{A}$ [43] et la formulation $\vec{T} - \phi$ [44].

Où :

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique en (Wb/m).

V : Potentiel scalaire électrique en (V).

\vec{T} : Potentiel vecteur électrique en (A/m).

ϕ : Potentiel scalaire magnétique

La formulation $\vec{A}V - \vec{A}$ repose sur l'association du potentiel magnétique vecteur \vec{A} et le potentiel scalaire électrique V , pour la réécriture du système d'équations de Maxwell.

D'après l'équation de conservation du flux magnétique (II.3), il existe un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.8})$$

Et d'après les relations (II.2) et (II.8), on déduit qu'il existe une grandeur électrique scalaire V telle que:

$$\vec{E} + j\omega\vec{A} = -\vec{\nabla}V \quad (\text{II.9})$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma(j\omega\vec{A} + \vec{\nabla}V) = \vec{J}_s \\ \vec{\nabla} \cdot (\sigma(j\omega\vec{A} + \vec{\nabla}V)) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Le système (II.10) synthétise le système de Maxwell en 02 équations couplant le potentiel magnétique vecteur \vec{A} et le potentiel scalaire électrique V .

Afin d'assurer l'unicité de la solution du potentiel vecteur magnétique \vec{A} , il faut imposer une jauge [43].

Nous utiliserons, dans la suite, la jauge de Coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II.11})$$

Et nous ajouterons le terme de pénalité $-\vec{\nabla} \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right)$ dans le système (II.10) qui devient :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) - \vec{\nabla} \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right) + \sigma(j\omega\vec{A} + \vec{\nabla}V) = \vec{J}_s \\ \vec{\nabla} \cdot (\sigma(j\omega\vec{A} + \vec{\nabla}V)) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

On mentionne dans la littérature que les formulations exprimées en potentiel vecteur magnétique sont des formulations générales et robustes [45, 46]. D'autre part, cette formulation est très efficace pour résoudre les problèmes à géométries complexes [47]. Pour ces avantages nous choisissons la formulation $\vec{A}V - \vec{A}$.

II.2.3. Modélisation électromagnétique d'un matériau de type CFRP

En pratique, il est important de connaître les propriétés des matériaux utilisés, en l'occurrence les CFRP, notamment du point de vue de la conductivité. Dans ces matériaux les fibres ne sont pas disposées d'une manière parfaitement rectiligne et ils ne sont pas complètement recouverts par la matrice isolante. Ce qui peut créer des contacts électriques au niveau des fibres adjacentes (Figure II.2) [35, 48]. De ce fait, les points de contact permettent le passage du courant dans la direction transversale aux fibres et selon l'épaisseur. En conséquence des problèmes apparaissent lors de la modélisation électromagnétique d'un CFRP, et relatifs à la géométrie complexe et la forte anisotropie.

La conductivité électrique du CFRP n'est pas constante dans le CFRP et dépend du taux de remplissage et de l'orientation des fibres. Ainsi, les valeurs de la conductivité varient selon la technologie et les procédés de fabrication. Dans la référence [49], les auteurs ont mentionné que la conductivité varie entre $5 \cdot 10^3$ S/m et $5 \cdot 10^4$ S/m le long des fibres et entre 10 S/m et 100 S/m pour la conductivité transversale.

Cependant, nous trouvons dans la littérature des intervalles différents, comme les conductivités dans les deux cas suivants :

- Dans la référence [50] les auteurs ont caractérisé des échantillons de CFRP de type (Q-1112) fabriqué par Tohotenax Inc. Par une méthode voltampère-métrique, ils ont obtenu une conductivité longitudinale de 14860 S/m, une conductivité transversale de 3.8 S/m et une conductivité selon l'épaisseur de 0.63 S/m.
- Une autre méthode, de thermographie inductive a été utilisée pour caractériser des échantillons de CFRP (PYROFIL #380, Mitsubishi Rayon Co. Ltd.) [51], ce qui a abouti à une conductivité de 34120 S/m le long des fibres, une conductivité transversale de 24 S/m et la conductivité selon l'épaisseur est égale à 20 S/m.

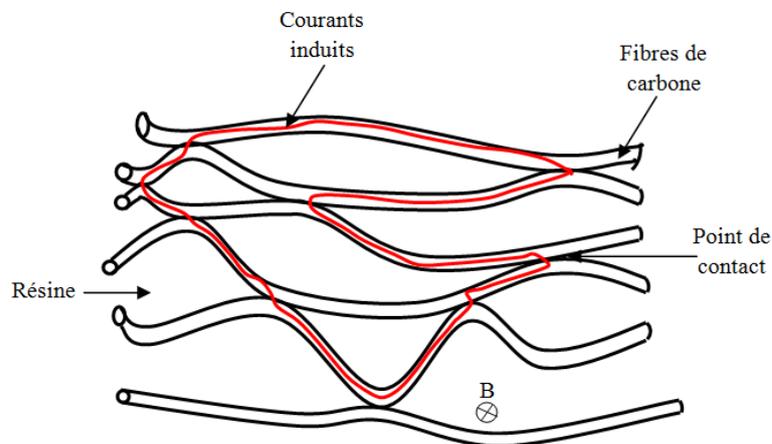


Figure II.2. Schéma représente la répartition réelle des fibres dans un CFRP.

Afin d'éviter la modélisation à l'échelle des fibres, des modèles de conductivité globale sont développés. Parmi ces modèles, nous allons présenter trois modèles.

II.2.3.1. Modèle par réseau de résistances

Un matériau composite multicouche de CFRP peut être modélisé par un ensemble de résistances (Figure II.3). Chaque partie de fibre est limitée par deux nœuds, elle est modélisée par une résistance R_f et chaque contact inter-fibres peut être représenté par une résistance R_c [36, 52, 53]. Par conséquent, l'ensemble des fibres de carbone dans les différents plis forment des réseaux électriques parallèles (2D).

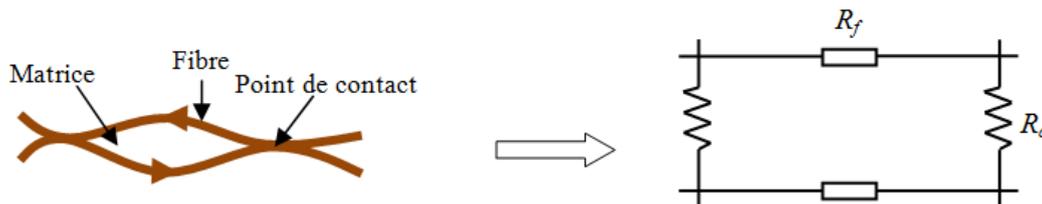


Figure II.3. Réseaux de résistances en 2D.

D'autre part, et comme mentionné précédemment, il y a des contacts inter-plis dans le sens de l'épaisseur. Ces contacts peuvent être représentés par des résistances (R_p) liant les réseaux parallèles des plis qui constituent le matériau. Cela permettra d'obtenir un réseau 3D comme illustré dans la figure II.4. Une application d'une différence de potentiel électrique sur deux faces parallèles de la plaque donne un potentiel uniforme à l'échelle macroscopique pour tous les plans parallèles [36, 52, 53].

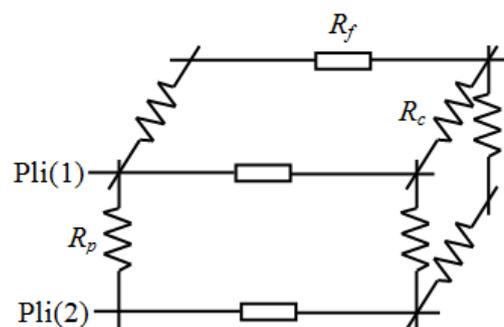


Figure II.4. Modèle de réseau de résistances en 3D.

II.2.3.2. Modélisation par barres conductrices

Dans la résolution numérique d'un modèle de CFRP, il n'est pas possible de modéliser le nombre exact de fibres, la forme de la fibre et les contacts inter-fibres en raison de la

limitation de la capacité informatique disponible et d'autre part l'absence de l'information sur la structure interne exacte de l'échantillon. Dans ce contexte, une solution globale qualitative est utilisée en simulant des faisceaux de fibres à l'aide de barres conductrices. Par exemple dans le travail de [54], les fibres sont conçues idéalement comme des barres non connectées car les fibres dans les CFRP sont souvent réalisées en faisceau. La figure. II.5 montre la représentation d'un modèle EF en se basant sur la méthode des barres conductrices. Les résultats obtenus dans la référence [54] ont confirmé l'efficacité de cette méthode à travers des validations expérimentales.

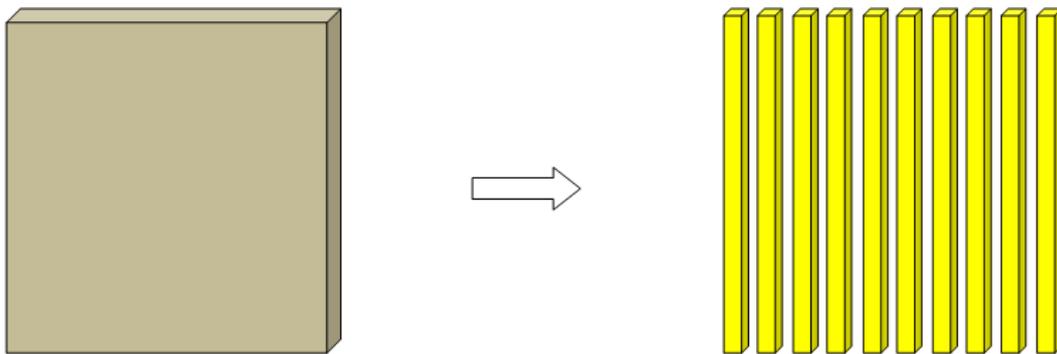


Figure II.5. Plaque de CFRP modélisée par la méthode des barres conductrices.

II.2.3.3. Tenseur de conductivité

De point de vue électromagnétique, la conductivité électrique d'un CFRP est anisotrope parce qu'il se compose de régions conductrices occupées par les fibres de carbone et de régions non conductrices qui représentent la matrice. Afin d'éviter le problème multi-échelle qui découle du rapport important entre les dimensions du pli et des fibres, il est nécessaire de bien décrire l'anisotropie de la conductivité électrique. Dans ce cadre, des travaux [17] utilisent la matrice de rotation pour relier les angles d'orientations des fibres à un repère fixe comme le montre la figure II.6.

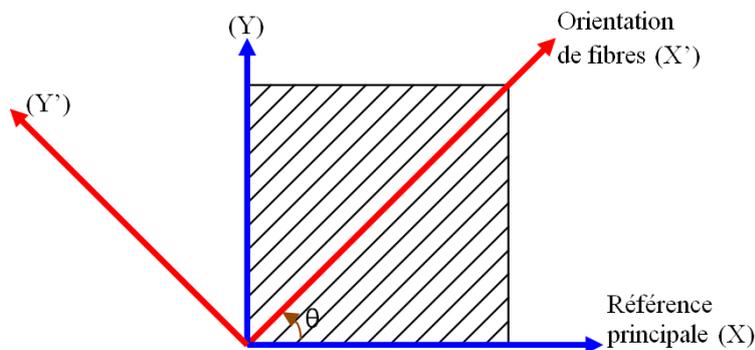


Figure II.6. Relation entre la référence principale et la référence relative de l'orientation de fibres.

Cette démarche about à une représentation tensorielle de la conductivité électrique d'un pli dans un plan 3D par la relation suivante :

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_L \cos^2(\theta) + \sigma_T \sin^2(\theta) & \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & 0 \\ \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & \sigma_L \sin^2(\theta) + \sigma_T \cos^2(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- $\bar{\sigma}$: Tenseur de conductivité électrique.
- σ_L : Conductivité longitudinal.
- σ_T : Conductivité transversale aux fibres.
- σ_{zz} : Conductivité selon l'épaisseur du pli.
- θ : Angle d'orientation de fibres.

II.2.4. Réponses d'un capteur par CF

Les réponses d'un capteur de CND-CF peuvent être un champ magnétique [55], une tension [36] ou bien une variation d'impédance [56]. Nous allons présenter quelques formules utilisées pour calculer ces réponses.

II.2.4.1. A partir l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes Joule

Pour obtenir les réponses d'un capteur CF, on peut utiliser l'énergie magnétique emmagasinée dans tout le domaine d'étude et les pertes par effet Joule au niveau de la charge. Dans un modèle de CND-CF, l'échange de puissances entre l'inducteur alimenté par un courant d'une valeur efficace I et une charge en CFRP, s'exprime comme suit [57] :

$$P_j + j\omega 2W_m = (R + j\omega L)I^2 \quad (\text{II.14})$$

P_j est la puissance active dissipée dans la charge, elle s'exprime comme suit :

$$P_j = \int_{\Omega_c} \vec{J}_{ind}^* \bar{\rho} \vec{J}_{ind} dv \quad (\text{II.15})$$

Dans un repère 3D (x, y, z), le tenseur de résistivité de la charge en CFRP est une matrice de (3x3) :

$$\bar{\rho} = \frac{1}{\sigma} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} & \rho_{xz} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} & \rho_{yz} \\ \rho_{zx} & \rho_{zy} & \rho_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Pour un matériau de CFRP et dans un repère cartésien (x, y, z), la relation de P_j se développe comme suit [58] :

$$P_j = \int_{\Omega_c} J_x^* (\rho_{xx} J_x + \rho_{xy} J_y + \rho_{xz} J_z) + J_y^* (\rho_{yx} J_x + \rho_{yy} J_y + \rho_{yz} J_z) + J_z^* (\rho_{zx} J_x + \rho_{zy} J_y + \rho_{zz} J_z) dv \quad (\text{II.17})$$

La matrice du tenseur de résistivité est égale à l'inverse de la matrice de conductivité. Par conséquent, les éléments de $\bar{\rho}$ donnés par les relations suivantes :

$$\rho_{xx} = (\sigma_{yy} \sigma_{zz} - \sigma_{zy} \sigma_{yz}) / \delta, \quad \rho_{xy} = (\sigma_{zy} \sigma_{xz} - \sigma_{xy} \sigma_{zz}) / \delta, \quad \rho_{xz} = (\sigma_{xy} \sigma_{yz} - \sigma_{yy} \sigma_{xz}) / \delta \quad (\text{II.18})$$

$$\rho_{yx} = (\sigma_{zx} \sigma_{yz} - \sigma_{yx} \sigma_{zz}) / \delta, \quad \rho_{yy} = (\sigma_{xx} \sigma_{zz} - \sigma_{zx} \sigma_{xz}) / \delta, \quad \rho_{yz} = (\sigma_{yx} \sigma_{xz} - \sigma_{xx} \sigma_{yz}) / \delta \quad (\text{II.19})$$

$$\rho_{zx} = (\sigma_{yx} \sigma_{zy} - \sigma_{zx} \sigma_{yy}) / \delta, \quad \rho_{zy} = (\sigma_{zx} \sigma_{xy} - \sigma_{xx} \sigma_{zy}) / \delta, \quad \rho_{zz} = (\sigma_{xx} \sigma_{yy} - \sigma_{yx} \sigma_{xy}) / \delta \quad (\text{II.20})$$

Le déterminant δ est calculé par la formule suivante :

$$\delta = \sigma_{xx} (\sigma_{yy} \sigma_{zz} - \sigma_{zy} \sigma_{yz}) + \sigma_{xy} (\sigma_{zx} \sigma_{yz} - \sigma_{yx} \sigma_{zz}) + \sigma_{xz} (\sigma_{yx} \sigma_{zy} - \sigma_{zx} \sigma_{yy}) \quad (\text{II.21})$$

Finalement, nous pouvons calculer la partie réelle et imaginaire de l'impédance, en présence du défaut, en utilisant la relation suivante :

$$R = \frac{1}{l^2} \int_{\Omega_c} \vec{J}_{ind}^* \bar{\rho} \vec{J}_{ind} dv \quad (\text{II.22})$$

L'énergie magnétique W_m dans tout le domaine d'étude, elle s'exprime comme suit :

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_{espace} \frac{1}{\mu_0} \vec{B}^* \vec{B} dv \quad (\text{II.23})$$

Donc :

$$L = \frac{1}{l^2} \iiint_{espace} \frac{1}{\mu_0} \vec{B}^* \vec{B} dv \quad (\text{II.24})$$

Dans les équations (II.15) et (II.23), \vec{J}_{ind}^* et \vec{B}^* désignent les conjugués des vecteurs \vec{J}_{ind} et \vec{B} .

II.2.4.2. A partir l'énergie électromagnétique de la bobine

La réponse d'un capteur par Courants de Foucault peut également être déterminée à travers l'énergie électromagnétique emmagasinée. Elle s'exprime par la relation suivante [59, 60] :

$$I_s^2 \cdot \Delta Z = - \int_{\Omega_s} (\vec{E} - \vec{E}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad (\text{II.25})$$

Avec :

\vec{E} et \vec{E}_0 : Les champs électriques respectivement en présence et en absence de défaut pour une application CND, ou avec et sans charge dans le cas d'une application de caractérisation.

Le champ électrique dans la bobine est évalué par :

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} \quad (\text{II.26})$$

Donc, l'expression de la variation d'impédance s'écrit :

$$\Delta Z = \frac{j\omega}{I_s^2} \int_{\Omega_c} (\vec{A}^s - \vec{A}^s_0) \cdot \vec{J}_s \, d\Omega_c \quad (\text{II.27})$$

\vec{A} et \vec{A}_0 : Les potentiels vecteurs magnétiques respectivement en présence et en absence de défaut pour une application CND, ou avec et sans charge dans le cas d'une application de caractérisation.

II.2.4.3. A partir la tension aux bornes du récepteur

Pour un capteur CF, selon la loi de Faraday, la force électromotrice ΔV de la bobine de détection liée au vecteur de la densité du flux magnétique \vec{B} , s'exprime par l'équation suivant :

$$\Delta V = - \int_s j\omega \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad (\text{II.28})$$

La variation de l'impédance transmis au récepteur est calculée en divisant sa variation de la force électromotrice par le courant d'excitation I_s

$$\Delta Z = \frac{-j\omega}{I_s} \int_s \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad (\text{II.29})$$

I_s : La densité de courant dans la bobine de réception

II.2.5. Résolution numérique des modèles

La compréhension des phénomènes physiques qui interviennent dans les approches de l'inspection et l'évaluation nécessite des outils de simulation avant leur application dans des approches de mesure réelles. Cela permet de réduire le nombre de maquettes et d'essais expérimentaux. Dans notre travail, nous avons choisi la MEF comme méthode de simulation. Malgré son coût d'occupation mémoire et le temps de simulation élevé, cette méthode a des avantages intéressants tels que sa robustesse et sa précision dans la résolution des géométries complexes. D'autre part, nous avons choisi le logiciel COMSOL Multiphysics comme outil de simulation. Ce logiciel est utilisé pour résoudre les problèmes mono et multi physiques pour une très grande variété d'applications d'ingénierie : électrique, mécanique, hydraulique, thermique, chimique, médical, etc.

II.3. Validation de la méthode de calcul utilisée

Avant d'utiliser l'outil de simulation « COMSOL Multiphysics », il est nécessaire de tester sa fiabilité. Dans une première étape, nous validons notre modèle en référence avec un problème publié dans le benchmark « *Team workshop problem N°15-1* » [41] et pourtant sur une plaque en Aluminium présentant un défaut rectangulaire. Ce choix est fait pour effectuer une première validation de notre modèle mathématique sur un cas simple isotrope. Dans ce cas les conductivités selon les trois directions sont égales.

Nous considérons le système du *Team workshop problem N°15-1* décrit par la figure II.7. Le modèle contient une bobine circulaire qui fonctionne en mode absolu pour contrôler une pièce conductrice en aluminium qui comporte un défaut débouchant d'une forme rectangulaire. La bobine est alimentée par un courant alternatif et se déplace au-dessus de la plaque selon un pas de déplacement de 0.5mm . Les dimensions de la bobine et de défaut sont présentées dans le tableau II.1.

Tableau. II.1 : Paramètres physique et géométrique expérimentaux de *TEAM Workshop N°15-1*[41].

Paramètre	Valeur numérique
Bobine	
Rayon intérieur (r_i)	6.15 mm
Rayon extérieur (r_e)	12.4 mm
Epaisseur (h)	6.15 mm
Nombre de spires (N)	3790
Lift-off	0.88 mm
Plaque testée	
Conductivité (σ)	$(3.06) \cdot 10^7 \text{ S/m}$
Epaisseur (e)	12.22mm
Défaut	
Longueur	12.60 mm
Profondeur	5 mm
Largeur	0.28 mm
Excitation	
Fréquence	900Hz
Épaisseur de peau	3,04mm

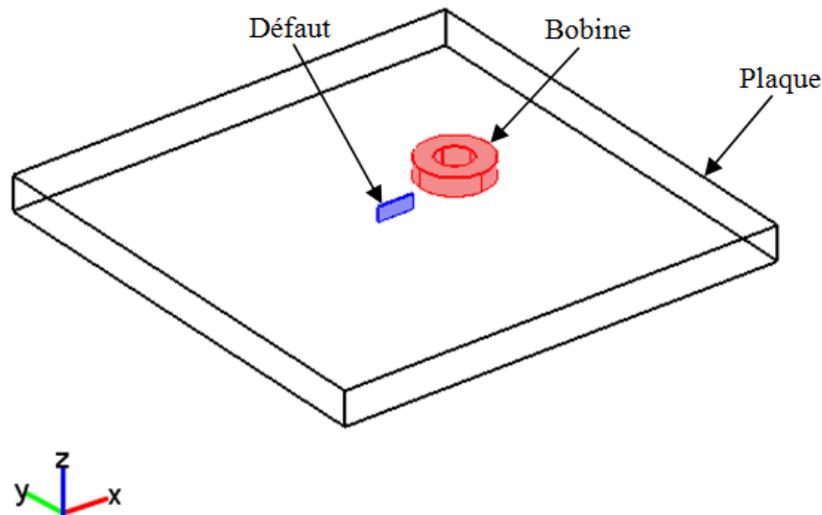


Figure II.7. Géométrie 3D de la bobine au-dessus d'une plaque avec défaut.

D'après, les références [41, 61] ce Benchmark offre l'avantage de produire des signaux de réponse avec des amplitudes importantes. Le système est représenté par le modèle magnétodynamique. Dans ce cadre, nous avons choisi la formulation $\vec{AV} - \vec{A}$ (équations II.12). Dans le modèle de simulation, le courant d'excitation circule dans le plan (x, y) et s'exprime en fonction des composantes x et y. Et du fait du nombre élevé des tours de la bobine jointives, celle-ci est supposée être un milieu compact traversé par un vecteur d'intensité de courant I et de densité de courant \vec{J}_s . Le vecteur \vec{J}_s a une amplitude constante dans le volume de la bobine et sa formule s'écrit comme suit :

$$|\vec{J}_s| = \frac{N J_s}{h.(r_e - r_i)} \quad (\text{II.30})$$

$$I_s = I_0 \cos(\omega.t) \quad (\text{II.31})$$

Avec :

- I_s : Courant d'excitation.
- I_0 : Valeur maximale du courant d'excitation.
- r_e : Rayon externe de la bobine.
- r_i : Rayon interne de la bobine.
- h : hauteur de la bobine.

En 3D, le vecteur \vec{J}_s s'exprime dans les coordonnées cartésiennes (x, y, z) par la formule suivante:

$$\vec{J}_s = [\vec{J}_x, \vec{J}_y, \vec{J}_z] \quad (\text{II.32})$$

Où :

$$J_x = \frac{J_0 \cdot y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (\text{II.33})$$

$$J_y = \frac{-J_0 \cdot x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (\text{II.34})$$

$$J_z = 0 \quad (\text{II.35})$$

J_0 : Valeur maximale de la densité du courant d'excitation.

Le long de cette thèse, nous allons utiliser des éléments tétraédriques dans les simulations 3D par COMSOL. Pour créer le maillage, nous avons le choix d'utiliser un maillage automatique, cependant ce choix ne donne pas une bonne précision de la solution dans le cas d'une géométrie complexe, où il y a un problème multi-échelle ou bien une concentration de certaines grandeurs dans des régions définies dans le domaine d'étude. Ceci est justement le cas dans les problèmes de CND-CF des CFRP. Pour éviter ces problèmes en optimisant le temps de calcul, nous choisissons les tailles des éléments de maillage selon les dimensions de la partie maillée d'une part et selon l'importance de chaque région dans le modèle étudié d'autre part. Dans le logiciel COMSOL, il existe neuf niveaux de maillage, depuis l'extrêmement fin jusqu'à l'extrêmement grossier. Pour éviter la mauvaise connexion entre les éléments voisins qui se trouvent entre les parties qui ont des volumes importants et d'autres parties qui ont des volumes nettement plus petits, nous commençons par le maillage de la partie la plus petite. La figure II.8 illustre le maillage de l'ensemble défaut, plaque et bobine.

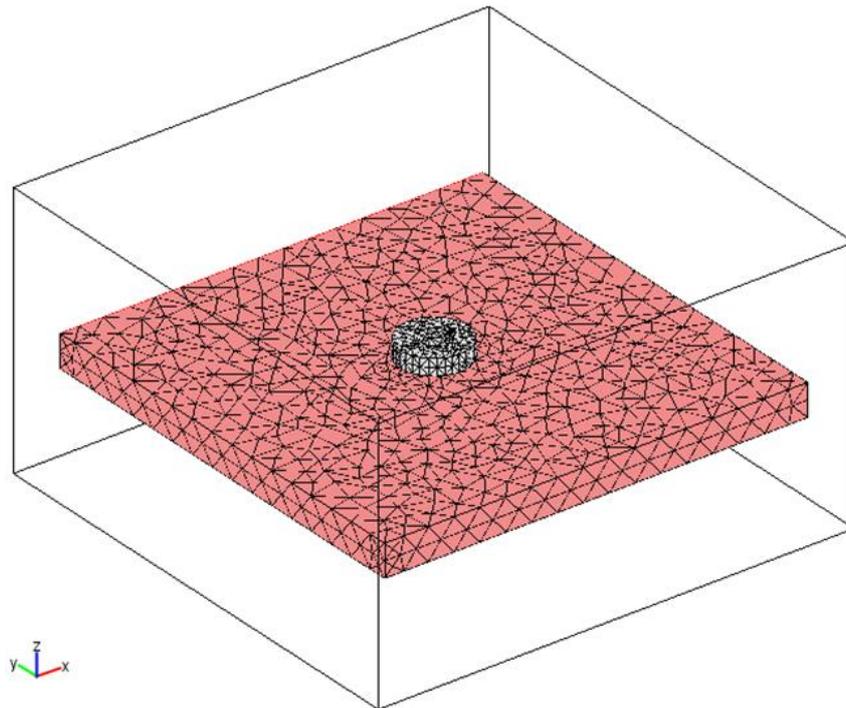


Figure II.8. Maillage 3D de la bobine et la plaque testée.

Des conditions aux limites de type Dirichlet sont ajoutées à ce modèle géométrique. Et afin d'éviter l'influence de l'effet des bords sur le système étudié nous avons élargi les deux dimensions (x, y) de la pièce, où nous avons utilisé un rapport d'environ 6.5 entre les deux directions de la pièce (x, y) et le diamètre de la source.

Discretisation du domaine :

Afin d'adapter le maillage aux gradients de variation des grandeurs physiques, et à la position de la bobine, nous procédons à un remaillage du dispositif à chaque pas de mouvement, et nous avons adopté les finesses de maillage suivantes :

- Pour la position initiale de la bobine (0 - 0), la géométrie a été discrétisée en 63190 volumes élémentaires.
- 1730 pour la fissure,
- 2077 pour la bobine,
- 37774 pour la plaque,
- et 21609 pour l'espace occupé par l'air.

Le temps d'exécution du modèle est de (1minute et 9 secondes) sur un processeur de 4 GHz et 32,0 Go de RAM.

L'excitation de la bobine génère un champ magnétique qui traverse la plaque, ce qui y induit des courants de Foucault. La figure II.9 montre la distribution des courants induits au niveau de la plaque, sans défaut et avec défaut pour la position (0 - 6 mm) de la bobine.

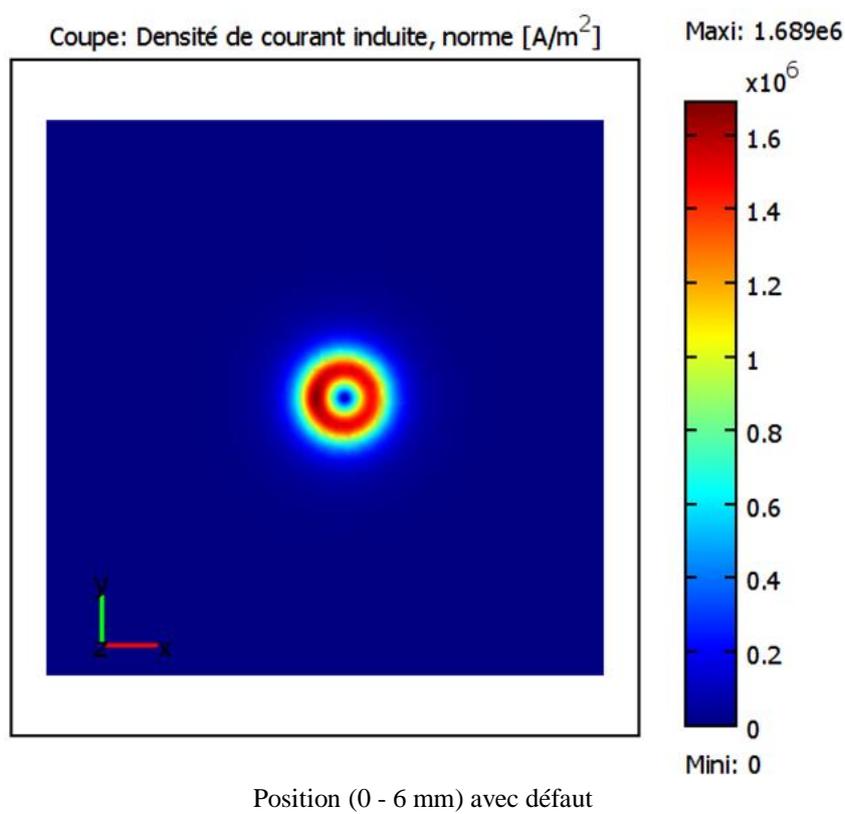
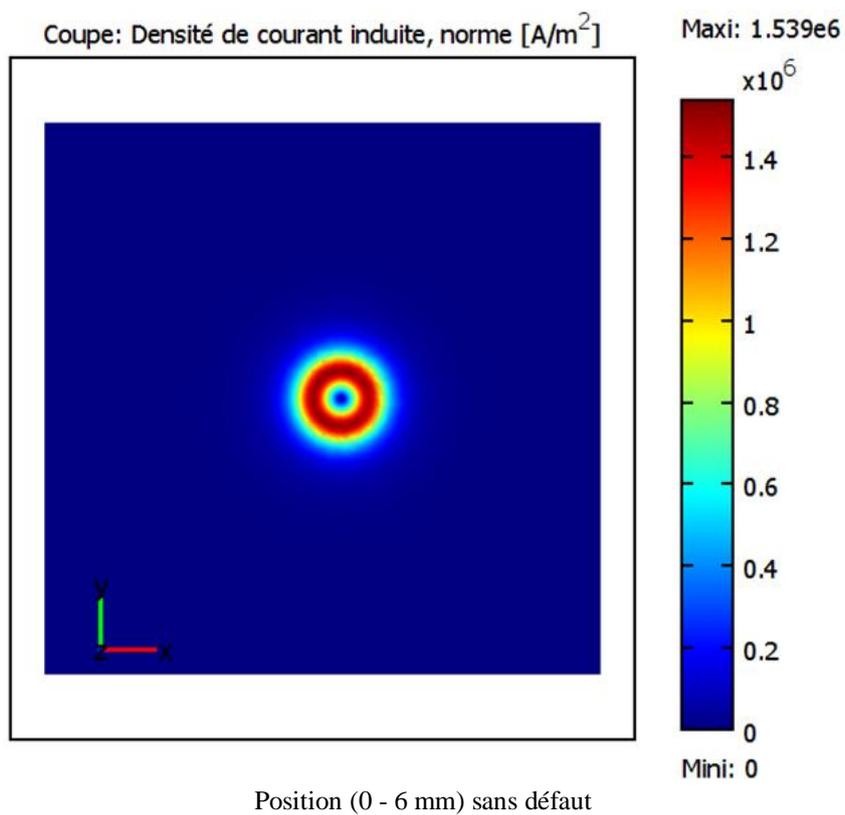


Figure II.9. Distribution surfacique des courants induits dans une plaque conductrice isotrope.

La figure II.10 représente la comparaison entre le résultat de simulation obtenu par COMSOL et celles-ci des mesures données par le benchmark « *TEAM Workshop N°15-1* ». La réponse du capteur simulée est obtenue par le calcul de la variation de l'impédance dans les différentes positions occupées lors du déplacement. Cette variation est une différence entre les impédances mesurées en présence et en absence de défaut dans la plaque.

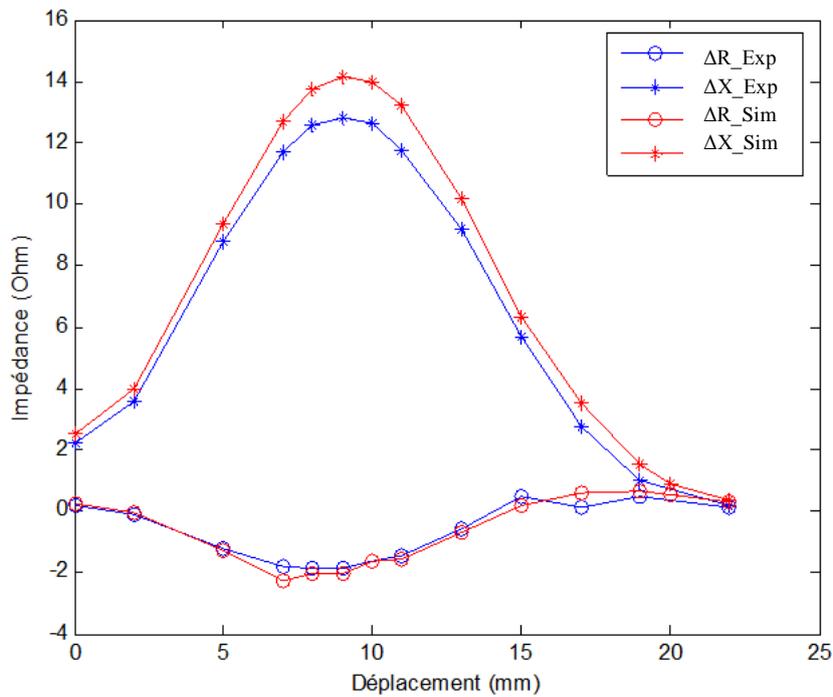


Figure II.10. Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats obtenus dans benchmark Team workshop N°15-1.

Les résultats obtenus par simulation sont en cohérence avec ceux donnés par les mesures expérimentales du benchmark [41]. Cependant, on note un petit décalage des résultats qui peut être dû à l'effet de bord qui n'a pas été pris en considération pendant la phase expérimentale du *Team workshop N°15-1*. Nous pouvons ainsi juger que ces résultats sont satisfaisants et que notre approche de simulation est efficace pour étudier des applications de CND-CF.

II.4. Capteurs rotatifs

Dans le domaine de la caractérisation et du diagnostic, nous distinguons des familles de capteurs appliqués à la caractérisation d'orientation des fibres et à la détection des défauts. Dans ce cadre nous citons par exemple les capteurs rotatifs qui permettent de caractériser l'orientation des fibres et d'assurer en même temps, le diagnostic CND. Nous distinguons

dans cette famille les capteurs à section rectangulaire et les capteurs à section circulaire. Pour prospecter dans le domaine d'ECND-CF des CFRP, nous nécessitons connaître les principes de fonctionnement de quelques capteurs destinés à cette application. Et nous allons résumer les étapes de simulations de caractérisation des CFRP par les dispositifs rotatifs de CF dans le schéma algorithmique présenté ci-après.

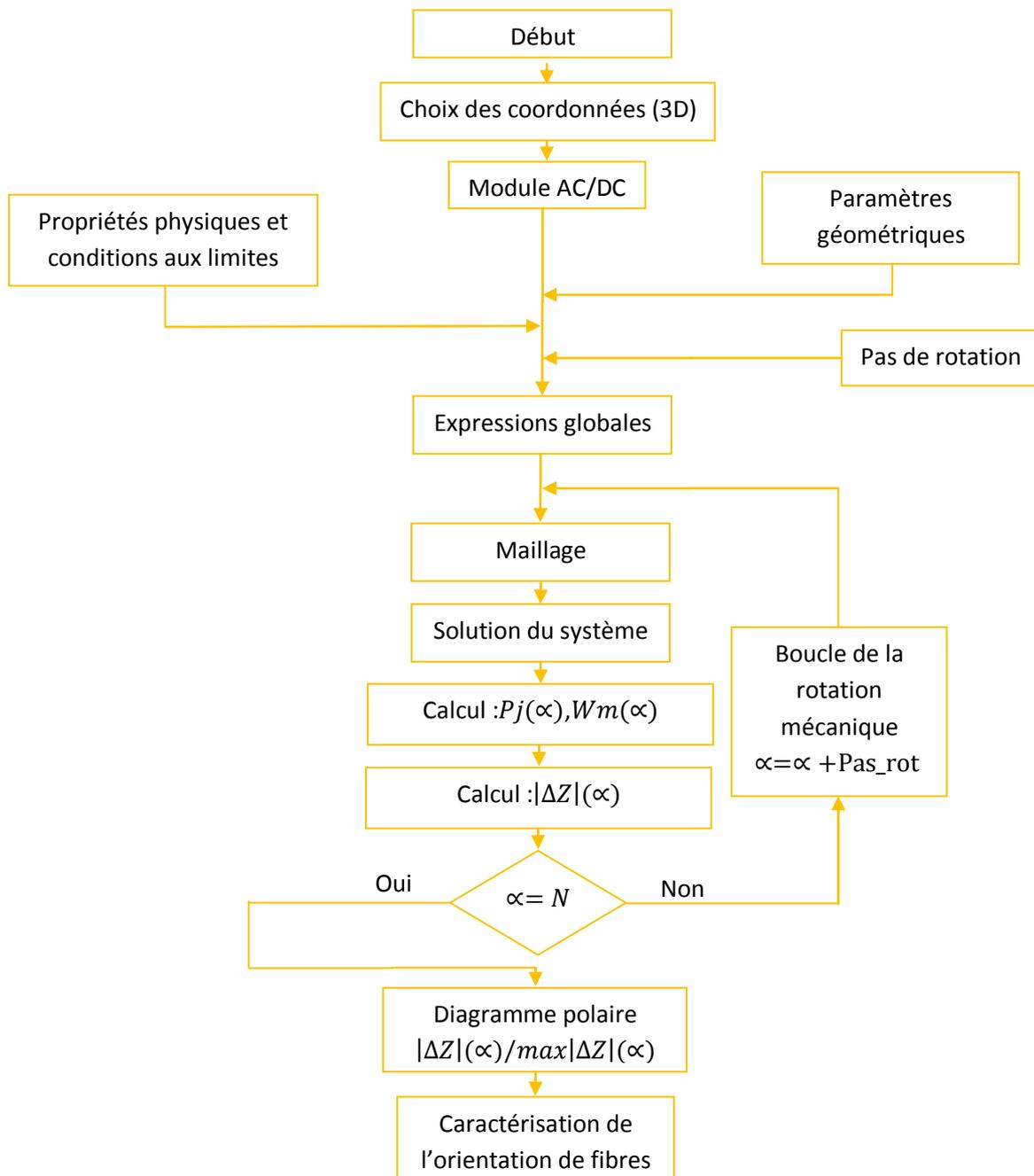


Figure II.11. Schéma algorithmique de la détermination de l'orientation des fibres dans les CFRP en utilisant les capteurs rotatifs.

A partir ce schéma algorithmique nous pouvons conclure que les capteurs rotatifs utilisés pour caractériser l'orientation des fibres dans les CFRP ont besoin d'une rotation mécanique soit manuelle ou bien par un dispositif électromécanique.

II.4.1. Capteur rectangulaire tournant utilisé en mode absolu

L'utilisation des CFRP exige la connaissance de certaines informations, notamment la conductivité électrique équivalente et les angles d'orientation de fibres. Ces derniers ont une grande influence sur les paramètres mécaniques des CFRP. Par exemple, deux échantillons de CFRP de mêmes dimensions, fabriqués avec le même nombre de plis mais avec des angles d'orientation différents, n'ont pas la même résistance mécanique et chaque échantillon sera destiné à une application particulière.

La caractérisation de ces matériaux par la méthode de CF se fait par des bobines circulaires comme dans les cas des conducteurs. Cependant, pour cette application, des formes particulières sont recherchées pour atteindre certaine précision. La forme rectangulaire est l'une des formes préférées à cause de la nature de la distribution du champ magnétique produit par cette configuration. Cette forme a prouvé son efficacité dans la caractérisation des CFRP soit en utilisant le mode Emission-Réception [37, 38] ou bien le mode absolu [34,35]. Dans le cas du mode absolu, et afin de comprendre le principe de fonctionnement du capteur rectangulaire tournant, nous allons considérer une bobine de ce type. Le système modélisé est décrit par la figure II.12. Il se compose :

Bobine rectangulaire de :

- longueur $L = 11$ mm,
- largeur $W = 2.1$ mm,
- une hauteur $h = 1.8$ mm,
- lift-off = 0.5 mm.

Plaque de CFRP unidirectionnelle (0°) d'une forme circulaire de 14 plis :

- Conductivité longitudinale de 39000 S/m,
- Conductivité transversale de 7.7 S/m,
- Conductivité selon l'épaisseur est égale à 7.7 S/m.

La bobine tourne autour d'un axe perpendiculaire à la surface de la plaque et est alimentée par une source de courant sinusoïdale sa valeur est fixée à $I_s = 20$ mA avec une fréquence $f = 1$ MHz.

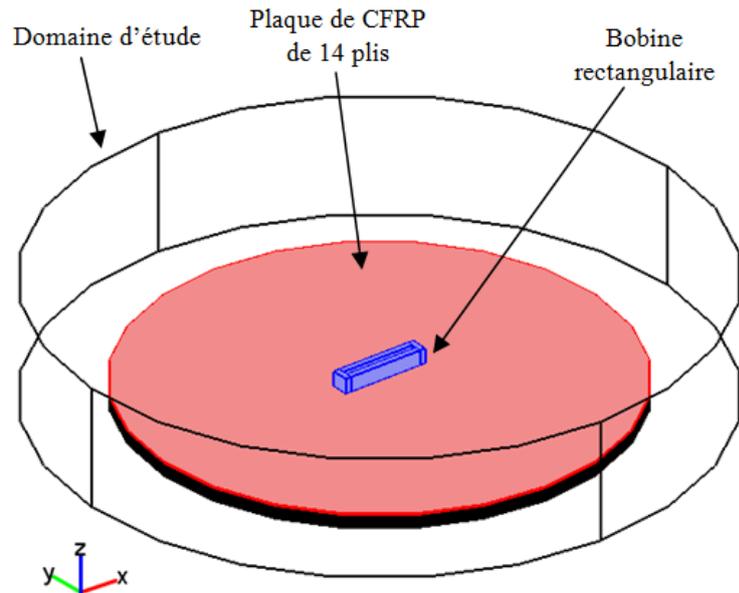
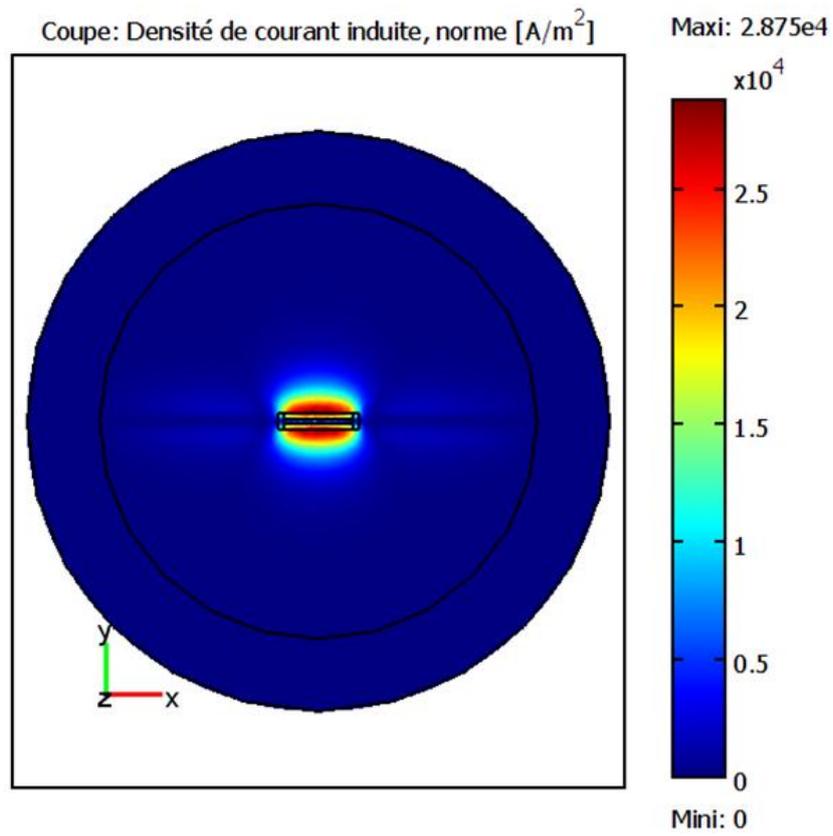
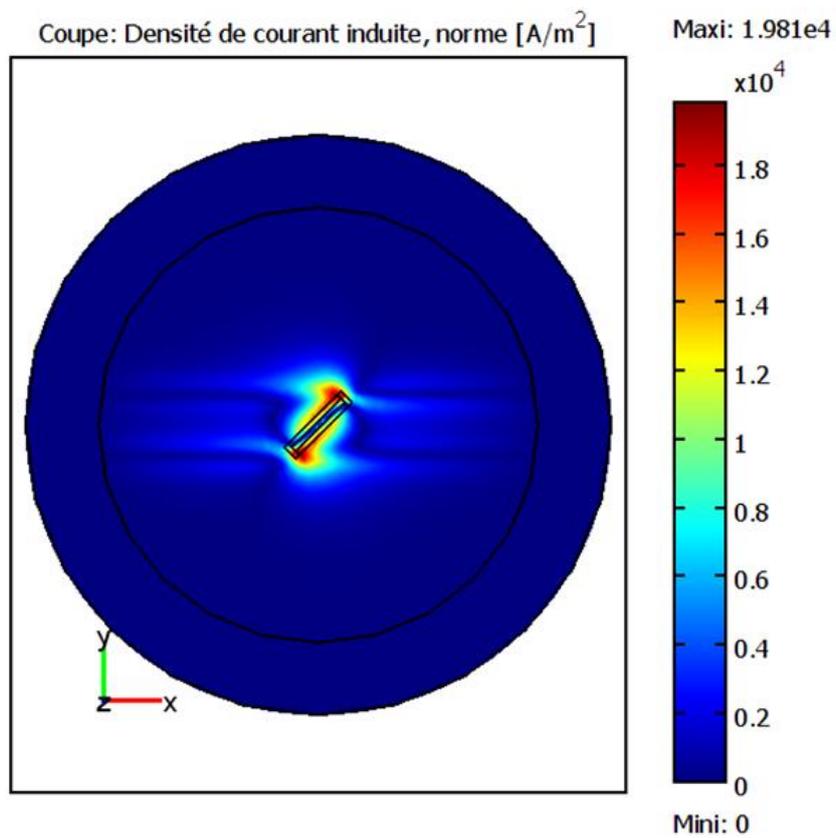


Figure II.12. Géométrie 3D de la bobine rectangulaire sous une plaque de CFRP.

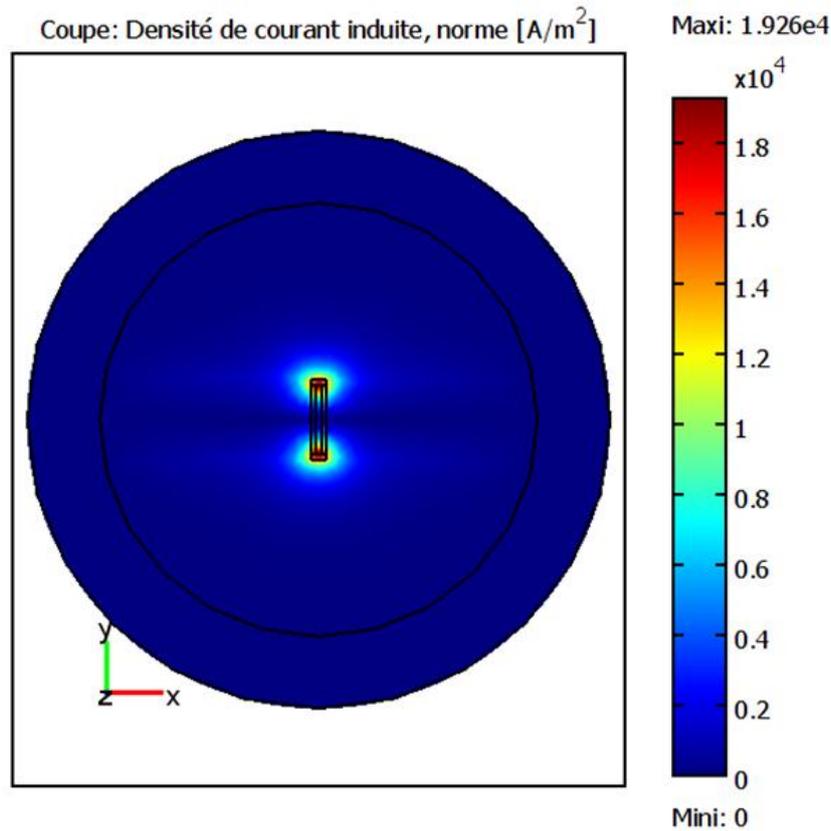
Le problème est traité par la formulation AV-A avec le modèle mathématique que nous avons construit, et en utilisant le logiciel COMSOL. La figure II.13 ci-dessous montre que la distribution des courants de Foucault dans les CFRPs unidirectionnel dépend la direction du capteur par rapport à l'orientation des fibres. Lorsque le capteur est dirigé selon la direction des fibres, les courants de Foucault occupent une surface importante. Et à chaque augmentation de l'angle d'inclinaison du capteur par rapport à la direction de fibres, la surface occupée par les courants de Foucault diminue jusqu'à ce qu'on arrive à une surface minimale pour une position du capteur orthogonale aux fibres.



(a) Plaque de CFRP, capteur selon (0°)



(a) Plaque de CFRP, capteur selon (45°)



(b) Plaque de CFRP, capteur selon (90°)

Figure II.13. Influence de direction du capteur sur la distribution des CF dans une plaque de CFRP unidirectionnelle (0°).

En conséquence, pour les différentes positions du capteur, la différence de la distribution des courants induits influe sur la variation d'impédance du capteur. Cette variation sera maximale si le capteur est parallèle aux fibres, et minimale pour une position orthogonale.

L'étude est effectuée pour 05 positions (0°, 22.5°, 45°, 67.5° et 90°) du premier quadrant, et nous reproduisons les résultats sur les 03 autres quadrants par la symétrie du problème.

Nous exploitons la relation (II.17) pour calculer les pertes par effet Joule au niveau de la charge. Ce qui permet de calculer la partie réelle de la variation de l'impédance. La figure II.14 représente la variation de la partie réelle de l'impédance normalisée en fonction de l'angle de rotation du capteur. Nous remarquons que la partie réelle de la variation de l'impédance a une forme de lobe orienté dans la direction de l'orientation de fibres. Ce qui confirme l'interprétation de la distribution des courants induits.

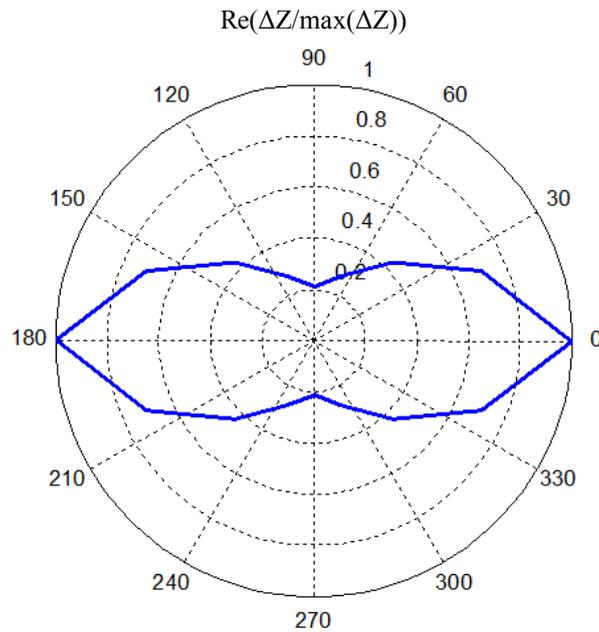


Figure II.14 Variation de la partie réelle de l'impédance normalisée en fonction de l'angle de rotation du capteur rectangulaire.

II.4.2. Capteur circulaire tournant utilisé en émetteur-récepteur

Dans le domaine de la caractérisation des CFRP, certains chercheurs ont utilisé des bobines de forme circulaire, utilisées en mode émetteur-récepteur, pour la détection des angles d'orientation des fibres [36]. Dans le cadre de la référence citée, les auteurs ont utilisé les diagrammes polaires de la tension d'un capteur rotatif E-R pour détecter l'orientation de fibres dans les CFRP stratifié.

Dans cette partie, et à travers un modèle de simulation d'un capteur E-R nous allons déterminer l'angle d'orientation de fibres dans une plaque de CFRP unidirectionnelle (0°). Pour cela, nous considérons le système décrit par la figure II.15. Le domaine d'étude comporte :

Deux bobines circulaires de :

- rayon externe $r_e = 1.6$ mm,
- rayon interne $r_i = 0.6$ mm,
- une hauteur $h = 0.8$ mm,
- lift-off = 0.5 mm,
- $N = 110$ tours.

Une plaque de CFRP a une surface cylindrique de 14plis de :

- Diamètre $R = 60$ mm,
- épaisseur $e = 1.75$ mm (0.125mm x 14),
- Conductivité longitudinale de 39000 S/m,

- Conductivité transversale de 7.7 S/m,
- Conductivité selon l'épaisseur est égale à 7.7 S/m.

L'une des deux bobines représente le récepteur et l'autre est l'émetteur qui est alimenté par un courant alternatif sinusoïdal d'intensité $I = 20$ mA avec une fréquence $f = 1$ MHz.

Le principe de ce capteur est de fixer la bobine émettrice au milieu de la surface de la plaque et de faire tourner la bobine réceptrice autour de la bobine émettrice de 0° à 360° selon un pas régulier. Pour chaque position du récepteur on mesure la réponse.

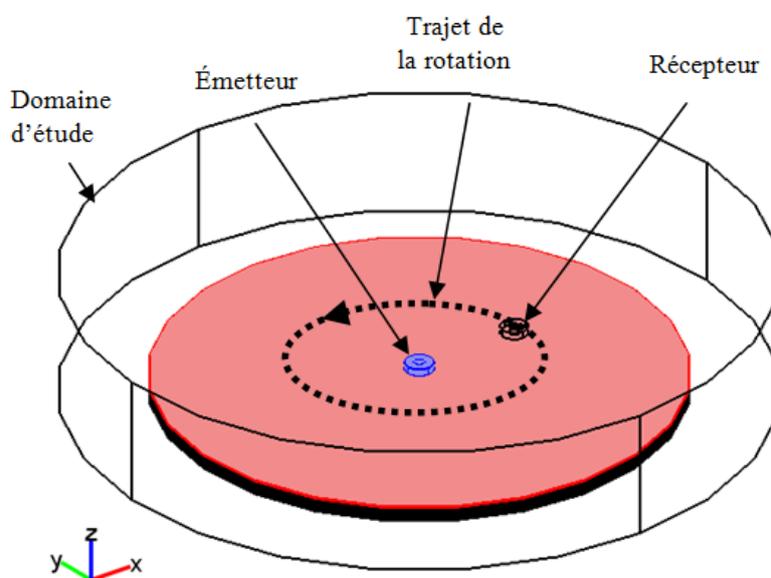


Figure II.15. Capteur E-R au-dessus d'une plaque stratifiée de CFRP unidirectionnelle de 14 plis.

En exploitant l'équation (II.29), nous pouvons calculer la réponse du récepteur à chaque position angulaire. Selon les propriétés électriques de la plaque utilisée, les courants de Foucault vont se développer dans les directions le long des fibres et ils vont se localiser dans la direction orthogonale aux fibres. La figure II.16 montre le diagramme polaire de la partie réelle de la variation de l'impédance transmis au récepteur en fonction de son angle de rotation. L'axe horizontal indique la position initiale du récepteur (0°) et l'axe vertical indique une rotation de 90° autour le récepteur par rapport à la position initiale. Le diagramme forme un lobe dirigé vers un angle (0°) qui est en accord avec l'orientation des fibres dans la plaque caractérisée. Donc, le capteur E-R est capable à déterminer l'orientation des fibres dans les CFRP.

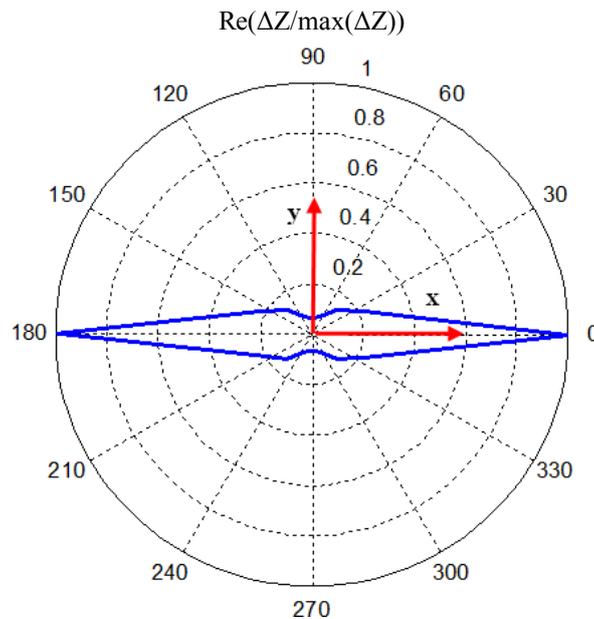


Figure II.16. Diagramme polaire de partie réelle de la variation de l'impédance du récepteur pour une pièce de CFRP ($0^{\circ}_{/14}$).

Les deux capteurs utilisés fournissent des signaux qui indiquent l'orientation de fibres dans les CFRP unidirectionnels. La différence entre les signaux de ces capteurs vient de la forme du capteur utilisée et de la nature de couplage entre le capteur et la pièce testée.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, après une modélisation mathématique de la technique d'ECND-CF et des CFRP, nous avons vérifié notre démarche de calcul. La vérification a été effectuée à travers une comparaison entre des résultats obtenus par COMSOL et les résultats expérimentaux donnés dans un problème de benchmark. Nous avons ensuite effectué des simulations pour deux configurations de caractérisation de CFRP utilisant deux types de capteurs de formes différentes et fonctionnant selon des modes différents.

En résumé, nous notons que les capteurs présentés nécessitent une rotation mécanique. Au point de vue des applications industrielles, ces capteurs connaissent un large spectre d'utilisation. Cependant, en raison de la réalisation de la rotation mécanique. Ce procédé peut être manuel, et le processus de caractérisation peut prendre beaucoup de temps pour analyser la réponse du capteur pour plusieurs positions, et dans le cas d'une rotation électromécanique, même si le temps d'inspection est réduit, ce système nécessite un dispositif mécanique rotatif supplémentaire. Dans le chapitre suivant nous introduirons des propositions d'améliorations pour ces dispositifs, en supprimant notamment l'obligation de rotation des capteurs.

Chapitre III :

Caractérisation des CFRP par des configurations de matrices des bobines

III.1. Introduction

Afin d'améliorer les dispositifs destinés à la caractérisation des CFRP, nous viserons, dans ce chapitre, quelques points essentiels dans le domaine de l'ECND-CF, tels que l'augmentation de la rapidité d'inspection, la minimisation des bruits de mesures et la miniaturisation des capteurs. Dans ce cadre, nous nous intéresserons particulièrement à l'élimination de la rotation mécanique des capteurs, en visant l'optimisation des performances des dispositifs et des capteurs.

En effet, nous proposerons une nouvelle conception de capteur statique qui permet de caractériser les CFRP sans recourir à la rotation mécanique du capteur, ce qui implique un saut qualitatif et économique important dans le développement des capteurs d'ECND-CF appliqués aux matériaux de type CFRP.

Dans une première étape, nous allons remplacer le capteur rectangulaire tournant par une structure flexible. Ensuite nous allons exploiter cette flexibilité dans le développement d'un capteur absolu non rotatif qui peut donner les mêmes résultats qu'un capteur rectangulaire tournant. La deuxième contribution portera également à l'élimination de la rotation mécanique, appliquée aux capteurs fonctionnant en mode émission-réception.

Nous validerons nos modèles et nos simulations sur un banc expérimental dont les principaux éléments sont : une plaque en CFRP, un analyseur d'impédance AGILENT 4294A et des bobines-capteurs cylindriques.

III.2. Structure flexible en vue de l'amélioration des capteurs absolus à CF

Dans cette partie, notre objectif consiste à transformer le capteur rectangulaire en une structure flexible (Figure III.1) que nous utiliserons pour la conception d'un nouveau capteur, que nous présenterons plus loin.

Le capteur flexible est composé d'un assemblage de plusieurs bobines et vise à remplacer le capteur rectangulaire classique. Nous proposerons une structure d'assemblage circulaire afin de pouvoir la décomposer en plusieurs sous matrices 'rectangulaires'.

L'étude de cette proposition contient deux étapes principales :

- La première étape est la simulation numérique d'un capteur absolu à deux bobines qui remplace le capteur rectangulaire tournant, ce qui permet de déterminer l'orientation des fibres dans une plaque en CFRP unidirectionnelle.
- La deuxième étape consiste en une validation expérimentale des résultats obtenus en simulation.

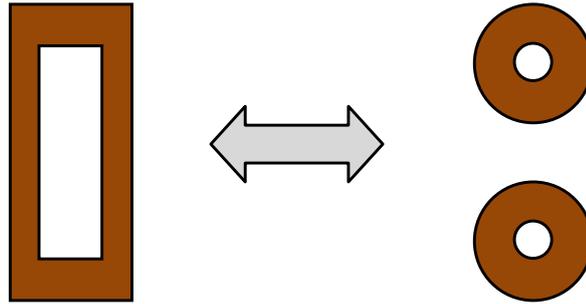


Figure III.1. Transformation du capteur rectangulaire à une structure flexible.

III.2.1. Résultats numériques

On utilise une paire de bobines raccordée en série pour caractériser l'orientation des fibres dans une plaque en CFRP unidirectionnelle (figure III.2). Chaque bobine possède les paramètres suivants :

- rayon extérieur $r_e = 1,6$ mm ;
- rayon intérieur $r_i = 0,6$ mm ;
- hauteur $h = 0,8$ mm ;
- Nombre de spires $N = 110$ tours.

Deux plaques sont successivement utilisées, l'une isotrope et l'autre en CFRP, et ayant chacune une forme circulaire avec un diamètre de 60 mm et une épaisseur de 1,75 mm. La première plaque est isotrope et utilisée pour montrer l'équivalence entre le capteur à deux bobines proposé et la bobine rectangulaire utilisée conventionnellement. La deuxième plaque, sur laquelle nous validerons notre équivalence se compose de 14 plis minces de CFRP, et présente les caractéristiques :

- Toutes les fibres sont orientées dans la même direction avec un angle de 0° ;
- Conductivité longitudinale égale à 39000 S/m ;
- Conductivité transversale égale à 7.7 S/m ;
- Conductivité selon la direction de l'épaisseur égale à 7.7 S/m ;
- Lift-off égal, dans les deux cas à 0,5 mm ;
- Les bobines sont alimentées en série par une source de courant alternatif d'amplitude de 20 mA avec une fréquence de 1 MHz.

Pour étudier le couplage électromagnétique entre le capteur et les plaques testées, nous construisons un modèle 3D en éléments finis sous l'environnement COMSOL. La figure III.2 montre le modèle simulé où les deux bobines sont placées au-dessus de la plaque testée.

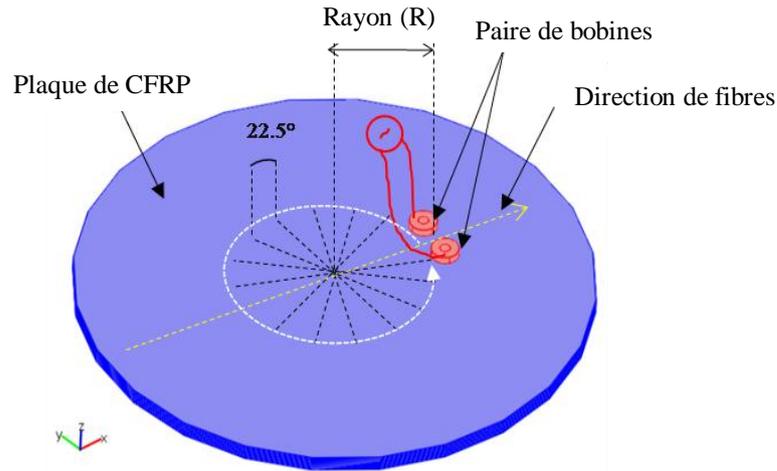
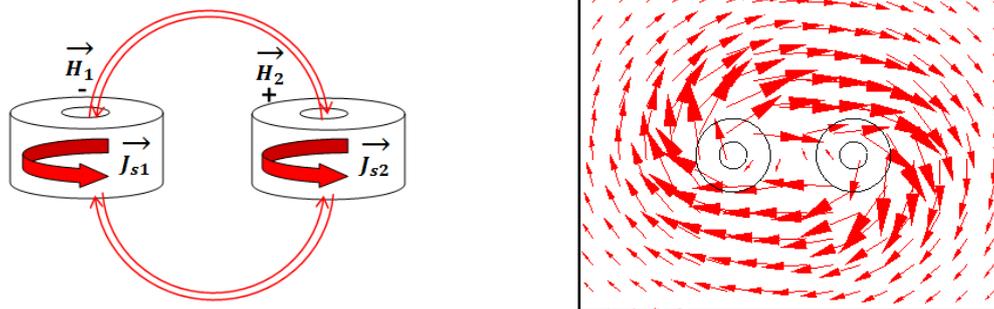


Figure III.2. Modèle de simulation du capteur rotatif flexible.

La figure III.3.a illustre la particularité d'une paire de bobines raccordée en série et alimentée dans le même sens. Au niveau de l'espace situé entre les deux bobines, le champ magnétique résultant est nul parce qu'il est la résultante de deux champs qui ont deux sens opposés et de mêmes amplitudes.

La figure III.3.b montre la distribution des courants induits dans la plaque isotrope. Nous remarquons que les flèches des courants induits prennent des trajectoires ovales. Ces trajectoires sont orientées dans le sens d'orientation des deux bobines. Ce qui se rapproche de la configuration les courants induits créés par une bobine rectangulaire conventionnelle. La forme des trajectoires est due à la nature du champ magnétique résultant créé par la paire de bobines.



(a) Présentation du champ résultant nul.

(b) Courants induits créés dans une plaque isotrope.

Figure III.3. Principe du capteur flexible à deux bobines.

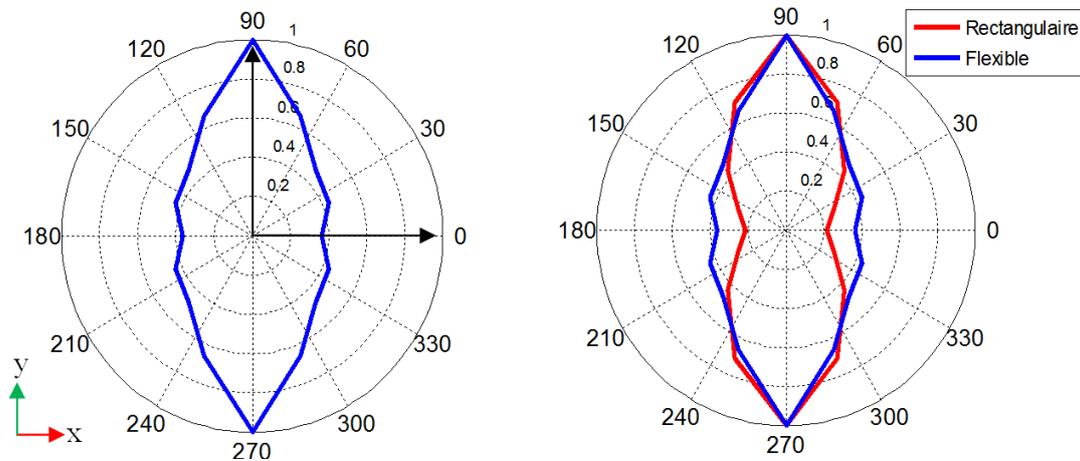
Nous utiliserons, dans cette partie, un capteur composé de deux bobines circulaires solidaire sur un même socle rectangulaire et alimentées en série dans le même sens, pour la caractérisation de la plaque que nous avons caractérisé par un capteur rectangulaire classique et que nous avons présenté dans le paragraphe II.4.1. Nous validerons ainsi cette proposition

pour la détection du sens d'orientation de la plaque CFRP, par superposition des résultats donnés par les deux capteurs.

La paire de bobines est entraînée en rotation entre 0° et 360° selon une trajectoire circulaire de rayon 13,2 mm et selon un pas de rotation de $22,5^\circ$. Pour l'objectif d'utiliser ce capteur flexible pour la conception d'un nouveau capteur, que nous présenterons plus loin, nous commençons par une position initiale de la paire de bobines qui fait un angle de 90° par rapport à l'angle d'orientation des fibres.

La partie réelle de la variation de l'impédance pour chaque position du capteur est calculée en utilisant l'équation (II.29). Ensuite, à partir des résultats obtenus nous déduisons la variation de l'impédance normalisée en fonction des positions angulaires du capteur par utilisation du diagramme polaire (figures III.4). Nous remarquons que :

- le diagramme polaire est un lobe orienté orthogonalement à la direction de fibres ;
- la valeur maximale de la variation de l'impédance normalisée est obtenue lorsque la direction du capteur est dans la même direction des fibres.
- la minimale est obtenue lorsque la direction du capteur est dans la direction orthogonale aux fibres.



(a) capteur flexible. (b) superposition avec le résultat obtenu par le capteur rectangulaire.

Figure III.4. Partie réelle de la variation d'impédance normalisée en fonction des positions angulaire du capteur.

On remarque que la signature détectée par le capteur flexible à deux bobines forme un lobe orienté selon la même direction du lobe détecté par le capteur rectangulaire tournant.

III.2.2. Validation du modèle

L'objectif de cette partie est la validation des résultats de simulation du capteur flexible proposé d'une part et de la méthode de simulation adoptée en présence de CFRP d'autre part.

Le système expérimental contient :

- un capteur à deux bobines ;
- un analyseur d'impédance "Agilent 4294A" ;
- une plaque de CFRP unidirectionnelle tel que le montre dans la figure III.5 ;
- Les dimensions des bobines, ainsi que les courants d'alimentations et le tenseur de conductivité sont identiques à celles utilisées dans la simulation ;
- La longueur et la largeur de la plaque de CFRP utilisée sont respectivement 400 mm et 300 mm. Cette plaque est composée de 14 plis de CFRP unidirectionnel ;
- l'épaisseur de chaque pli est de 0,125 mm ;
- Toutes les fibres sont orientées dans la même direction avec un angle de 0° .

L'analyseur d'impédance est utilisé pour exciter le capteur, observer et mesurer la variation d'impédance. Pendant les mesures, la plaque de CFRP est fixée, tandis que le capteur est entraîné manuellement en rotation selon une trajectoire d'une forme circulaire.

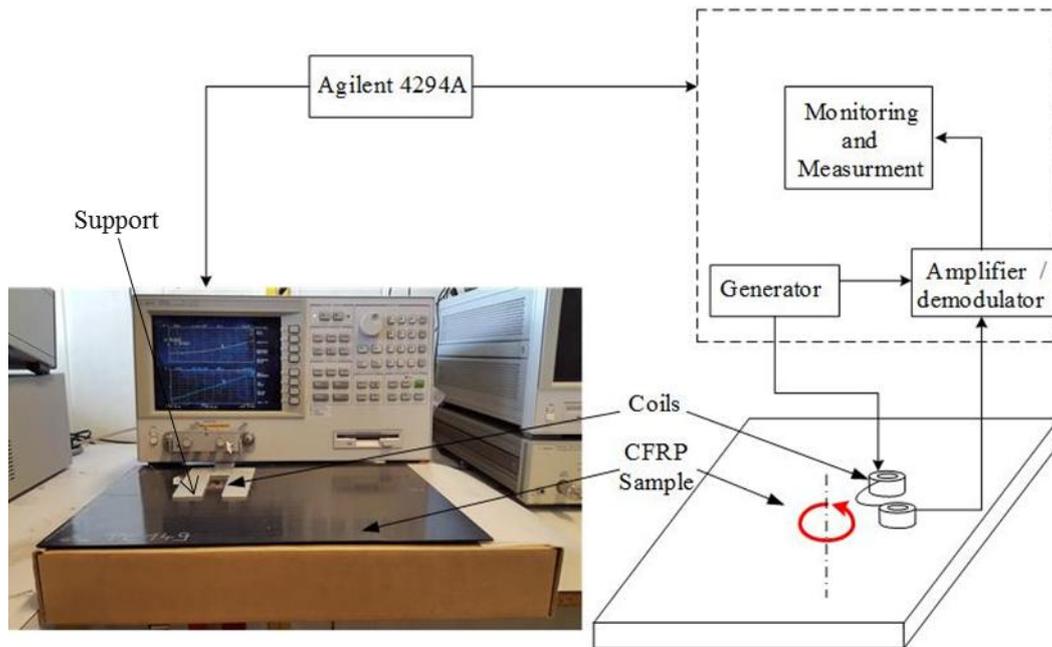


Figure III.5. Banc d'essai expérimental du capteur flexible proposé.

La figure III.6 montre le déphasage mesuré de l'impédance d'une bobine parmi les deux bobines utilisées en fonction de la fréquence, allant de 40 Hz à 30 MHz. La figure III.6 fait apparaître 04 zones de comportement de l'inductance de la bobine :

- Un déphasage voisin de 0° significatif d'un comportement résistif pour les basses fréquences inférieures à 84 kHz.
- Un déphasage voisin de 90° significatif du comportement inductif pour des fréquences entre 84 kHz et 16,65 MHz.

- Une résonance pour des fréquences entre 16,65 MHz et 18,87 MHz.
- Un déphasage voisin de -90° significatif du comportement capacitif pour des fréquences supérieures à 18,87 MHz.

La fréquence utilisée dans ce travail est égale à 1 MHz, ce qui correspond à la phase du signal d'alimentation de $86,84^\circ$, et un comportement inductif de la bobine.

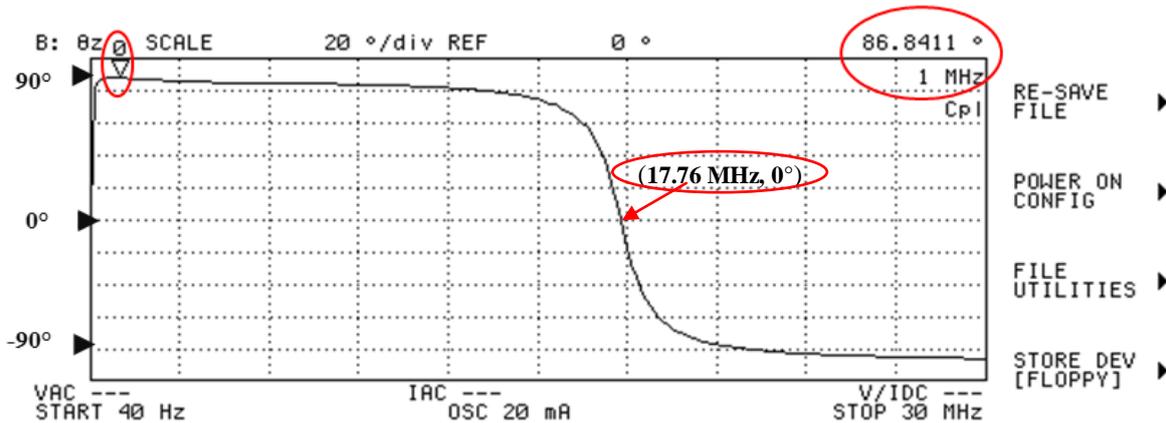


Figure III.6. Phase de l'impédance de la bobine pour un balayage en fréquence allant de 40 Hz à 30 MHz.

La figure III.7 montre une superposition des résultats de simulation et ceux obtenus expérimentalement à partir le capteur flexible à deux bobines. Les deux diagrammes polaires ont des formes allongées et sont orientés selon la même direction. On remarque une petite différence qui peut être dû aux bruits de mesures qui peuvent perturber les réponses angulaires du capteur.

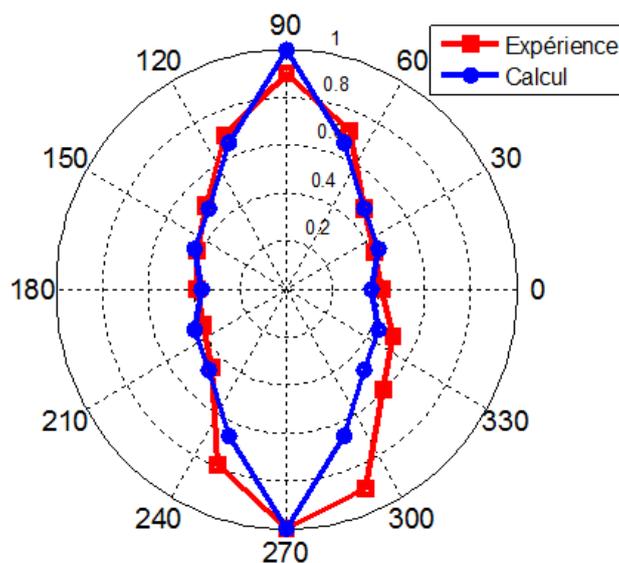


Figure III.7 Comparaison entre les résultats de simulation et les mesures détectés par le capteur flexible à deux bobines.

Cette comparaison est, à la fois, une validation du comportement du capteur rotatif à deux bobines, et également une validation de l'approche de simulation adoptée en présence de CFRP. Dans le reste de cette thèse, la même démarche sera adoptée pour simuler les problèmes d'ECND-CF des CFRP.

Dans la partie suivante, nous allons exploiter l'avantage de la souplesse du capteur flexible à deux bobines pour développer un capteur non rotatif capable de caractériser les CFRP à partir d'une position unique.

III.3. Caractérisation par la matrice ' interactive '

Les évolutions des technologies et des domaines d'application ont entraîné, ces dernières années, des améliorations considérables des techniques de l'E-CND. Cependant des exigences encore plus contraignantes sont de plus en plus exigées dans ce domaine. Dans la proposition de capteur que nous développons, on se basera sur la forme résultante du capteur flexible à deux bobines pour développer un capteur non rotatif à base d'une matrice, de forme circulaire, de bobines en exploitant *l'interaction* des courants induits générés par la matrice des bobines au niveau de la pièce caractérisée.

III.3.1. Conception de la matrice interactive

Considérons une succession de 'paires de bobines' telles que définies dans les paragraphes précédents, et mise dans un arrangement circulaire (figure III.8). La direction de chaque paire fait un angle compris dans l'intervalle $[0^\circ - 360^\circ]$ par rapport à une direction référentielle donnée.

Nous pouvons donc dire que chaque paire de bobines dans la matrice circulaire peut être utilisée pour remplacer une position angulaire parmi les positions occupées par le capteur flexible à deux bobines durant la caractérisation d'une plaque en CFRP tel que présenté dans le paragraphe III-2.

Cela à condition de faire coïncider le nombre d'éléments de la matrice avec le nombre de positions angulaires occupées par le capteur flexible à deux bobines. Dans ce sens, et pour obtenir un appareil miniaturisé, il est nécessaire de minimiser le nombre de bobines sans perdre sur l'efficacité du capteur.

Vu que, la structure interne de CFRP n'est pas connue avant la procédure de caractérisation, et comme cette configuration de matrice de bobines est dédiée à la caractérisation non destructive du CFRP, l'utilisation de 4 bobines séparées de 90° laisse une incertitude importante de l'existence d'autres angles d'orientation des fibres. Pour éliminer cette

incertitude, on doit prendre en compte les différentes possibilités des structures de CFRP (0° , 45° , 90° et 135°) dans la conception de la matrice de bobines. Pour cette raison, il faut utiliser 8 bobines pour couvrir les quatre directions possibles des fibres et 8 bobines pour mesurer les points entre les plis qui ont une différence d'orientation de 45° . En conséquence, la caractérisation d'une plaque de CFRP dans une seule position nécessite au minimum 16 bobines comme le montre la figure III.8. Si les éléments de la matrice sont excités en série avec un signal alternatif, l'interaction électromagnétique globale entre la pièce de CFRP et les éléments de la matrice de bobines crée une distribution particulière des courants induits au niveau de la pièce. Cette distribution dépend des paramètres du dispositif d'excitation d'une part et de la nature de conductivité de l'échantillon testé d'autre part.

Il est connu que la nature de la conductivité électrique a une grande influence sur la distribution des courants induits dans un matériau conducteur. A titre d'exemple, dans un CFRP unidirectionnel, la distribution des courants de Foucault créée par une seule bobine circulaire est importante dans la direction longitudinale des fibres par rapport à la direction transversale.

Nous supposons que nous avons une plaque composite constitué d'un pli de CFRP orientée selon la direction de référence, et caractérisé donc par un angle égal à 0° . En tenant compte l'interaction des courants induits créés par chaque paire de bobines de la matrice au niveau de la plaque, nous pouvons constater que les densités des courants induits générés par les paires qui sont quasi parallèles à la direction des fibres embrassent des surfaces de parcours larges. Cependant dans le cas où les paires des bobines sont quasi perpendiculaires aux fibres, les densités des courants induits se ferment sur des parcours à surfaces plus étroites. En conséquence, la position relative des bobines adjacentes par rapport au sens d'orientation des fibres a une influence sur la distribution des courants induits. Donc, cette particularité de la matrice interactive peut fournir des informations sur le matériau testé. La figure III.8 montre le principe physique du capteur proposé au-dessus d'une plaque de CFRP (0°).

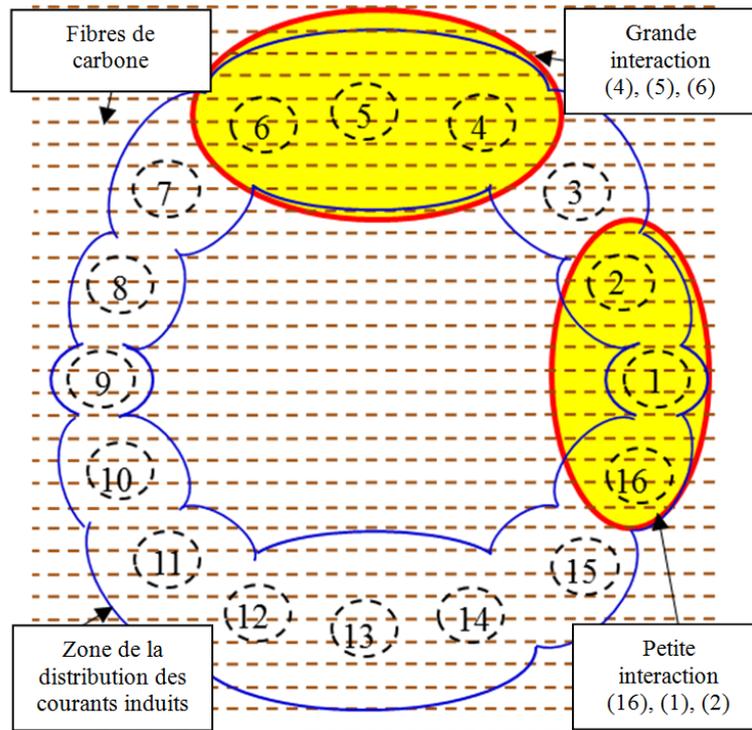


Figure III.8. Principe de la matrice interactive par courant de Foucault [62].

A titre d'exemple, au niveau de la zone du CFRP située sous les bobines 16, 1 et 2, il ya une petite surface des courants induits créés par ces bobines, alors que, les courants induits créés par les bobines 4, 5 et 6 ont une grande surface. Cette différence de distribution des courants induits donne des valeurs différentes au niveau du champ magnétique induit. En conséquence, le niveau de la variation d'impédance de chaque bobine est dû à sa position relative avec ses éléments adjacents par rapport aux directions des fibres dans la plaque de CFRP. De ce fait, le comportement électromagnétique global entre la pièce de CFRP et la matrice de bobines qui est basée essentiellement sur l'interaction des courants induits peut être utilisée pour caractériser une pièce de CFRP.

III.3.2. Paramètres physiques et géométriques

Le dispositif proposé pour la validation de notre approche se compose de 16 bobines comme le montre dans la figure III.9. L'arrangement des bobines fait un cercle de rayon R_a . Ce rayon dépend du diamètre extérieur de la bobine élémentaire et de la distance entre les bobines adjacentes. Les dimensions des bobines sont celles utilisées dans le chapitre 2, et sont caractérisées par un rayon intérieur r_i , un rayon extérieur r_e et une hauteur h [36]. Les bobines sont connectées en série et alimentées par un courant alternatif avec une amplitude I_s et une

fréquence f . Les paramètres physiques et géométriques de la matrice de bobines sont présentés dans le tableau III.1.

Table III.1 : Paramètres physiques et géométrique de la matrice interactive.

Paramètres	Values
Bobines :	
Rayon interne (r_i)	0.6 mm
Rayon externe (r_e)	1.6 mm
Hauteur (h)	0.8mm
Rayon de la matrice (R_a)	13.2 mm
Lift_off	0.5mm
Fréquence (f)	1 MHz
Intensité du courant (I_s)	20mA
Nombre de conducteur (N)	110

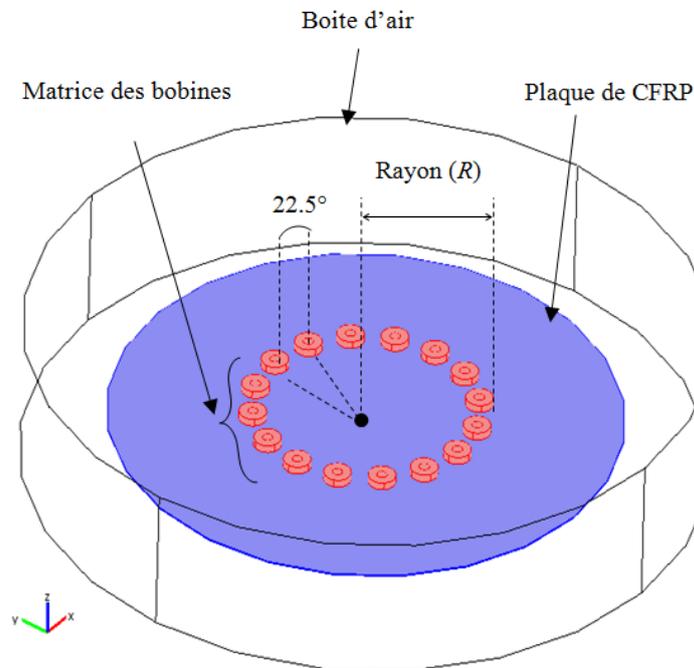


Figure III.9. Matrice interactive proposée au-dessus d'une plaque en CFRP.

III.3.3. Caractérisation des structures monodirectionnelles

Quatre échantillons sont utilisés. Chaque échantillon a une épaisseur $e = 0.125 \text{ mm}$, avec une forme circulaire de rayon $R = 30 \text{ mm}$. Les fibres dans les échantillons sont orientées respectivement selon les angles : 0° , 45° , 90° et 135° .

Le modèle présenté dans la figure III.9 est utilisé pour étudier la capacité de la matrice interactive pour la caractérisation des plaques de CFRP. Ce modèle est basé sur la mise en œuvre de la MEF en utilisant la formulation électromagnétique $\vec{A}V - \vec{A}$.

L'étude de notre dispositif à Courants de Foucault proposé nécessite une compréhension de sa méthode de fonctionnement. Nous allons résumer les différentes étapes à suivre lors d'une caractérisation par ce système dans les points suivants :

- Un raccordement en série des éléments de la matrice ;
Ce qui implique une excitation de toutes les bobines de la matrice par le même courant alternatif ;
- La variation de l'impédance est mesurée, pour tous les éléments et en même temps, aux bornes de chaque élément ;
- Affectation de la valeur de la variation de l'impédance de chaque élément en rapport à sa position angulaire ;
- Représentation des variations d'impédance des bobines en fonction des positions angulaires par diagramme polaire ;
- Estimation de l'orientation des fibres à travers le diagramme polaire construit.

Nous nous intéresserons, dans ce qui suit, à la répartition et l'évaluation des courants induits générés par la matrice interactive dans la pièce testée, ce qui nous permettra de déduire, ensuite, les réponses du capteur proposé sous formes de diagrammes polaires.

III.3.3.1. Distribution des courants induits

Dans cette partie, nous allons essayer de confirmer le principe physique de la matrice interactive proposée, en analysant la distribution des courants induits créés par ce système. La figure. III.10 montre bien la différence entre la distribution surfacique des courants induits créée par le système complet de la matrice de bobine dans une structure isotrope (Figure III.10.a) et dans une autre structure anisotrope (Figure III.10.b).

Au niveau de l'échantillon isotrope, nous remarquons une petite zone qui se répète 16 fois, ce qui correspond au nombre des éléments de la matrice. En conséquence, chaque zone représente les courants induits créés par un seul élément de la matrice. La forme de chaque zone est déformée et n'est pas parfaitement circulaire. Cette déformation est due à l'interaction du champ magnétique créé par chaque bobine avec les deux éléments adjacents. De plus, on remarque que chaque zone a une orientation par rapport aux autres zones.

Dans le cas d'une pièce anisotrope (CFRP (0°)) nous remarquons qu'il y a un changement au niveau de la cartographie des courants induits par rapport au cas d'une plaque isotrope.

Localement, les surfaces des courants induits créés par les éléments de la matrices sont différentes. Globalement, nous remarquons qu'il y a une symétrie de la distribution des

courants induits par rapport au diamètre de la matrice qui est parallèle à l'orientation de fibres (0°). D'autre part nous voyons aussi que la concentration des courants induits est faible sous les deux bobines situés sur les deux extrémités du diamètre de la matrice qui est parallèle aux fibres. Et chaque fois nous passons vers un élément voisin nous trouvons que la concentration augmente jusqu'à ce qu'on atteigne le quart du parcours (90° et 270°).

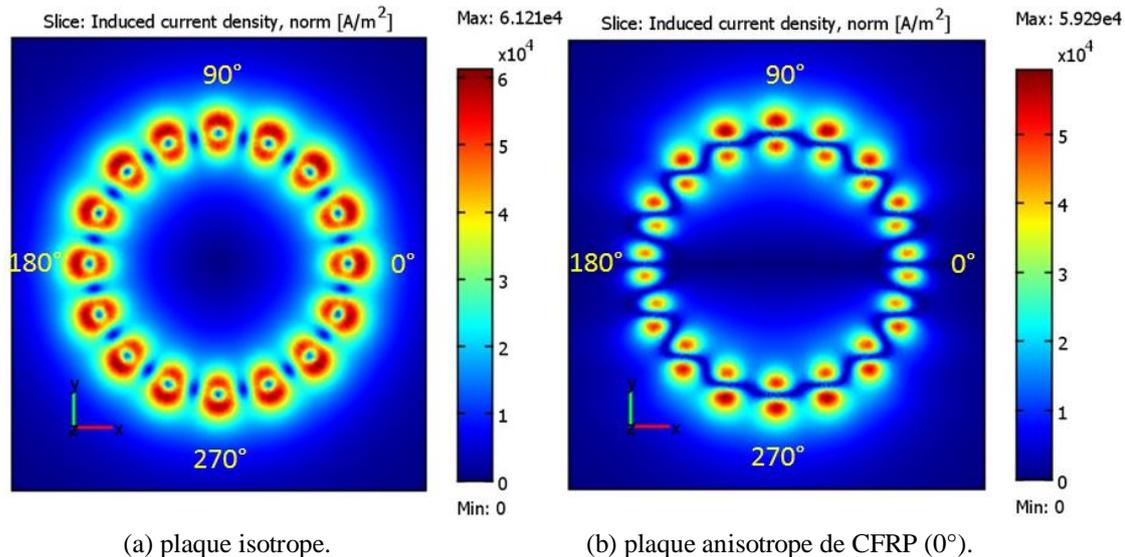


Figure III.10. Distribution de courants induits créée par la matrice interactive.

Pour bien comprendre le fonctionnement de la matrice interactive nous allons présenter la distribution vectorielle des courants induits. Les fibres de carbone jouent le rôle d'un porteur des courants induits. Ces courants sont le principal responsable de la variation d'impédance du capteur. La figure III.11 représente une comparaison de la distribution vectorielle des courants induits dans une pièce isotrope avec les mêmes quatre échantillons de CFRP en utilisant le dispositif proposé. Dans la plaque isotrope, la majorité des flèches des courants induits prennent des trajectoires circulaires par rapport au centre de la matrice des bobines. Par contre au niveau des échantillons de CFRP les flèches suivent la direction des fibres. De plus, dans les quatre échantillons de CFRP, nous voyons que les amplitudes des flèches sous les bobines sont différentes d'un élément à l'autre. Les amplitudes maximales correspondant aux bobines adjacentes arrangées dans la direction des fibres. Ce qui confirme bien le principe physique de la matrice interactive.

En plus, on remarque sur la figure III.11.a, que les trajectoires des courants induits sous chaque élément ne sont pas circulaires. Nous distinguons quatre cotés. Deux contiennent des vecteurs parallèles, cependant les deux autres cotés ont un nombre de vecteurs presque nul.

En conséquence, nous déduisons bien que chaque élément de la matrice peut remplacer une position angulaire du capteur flexible.

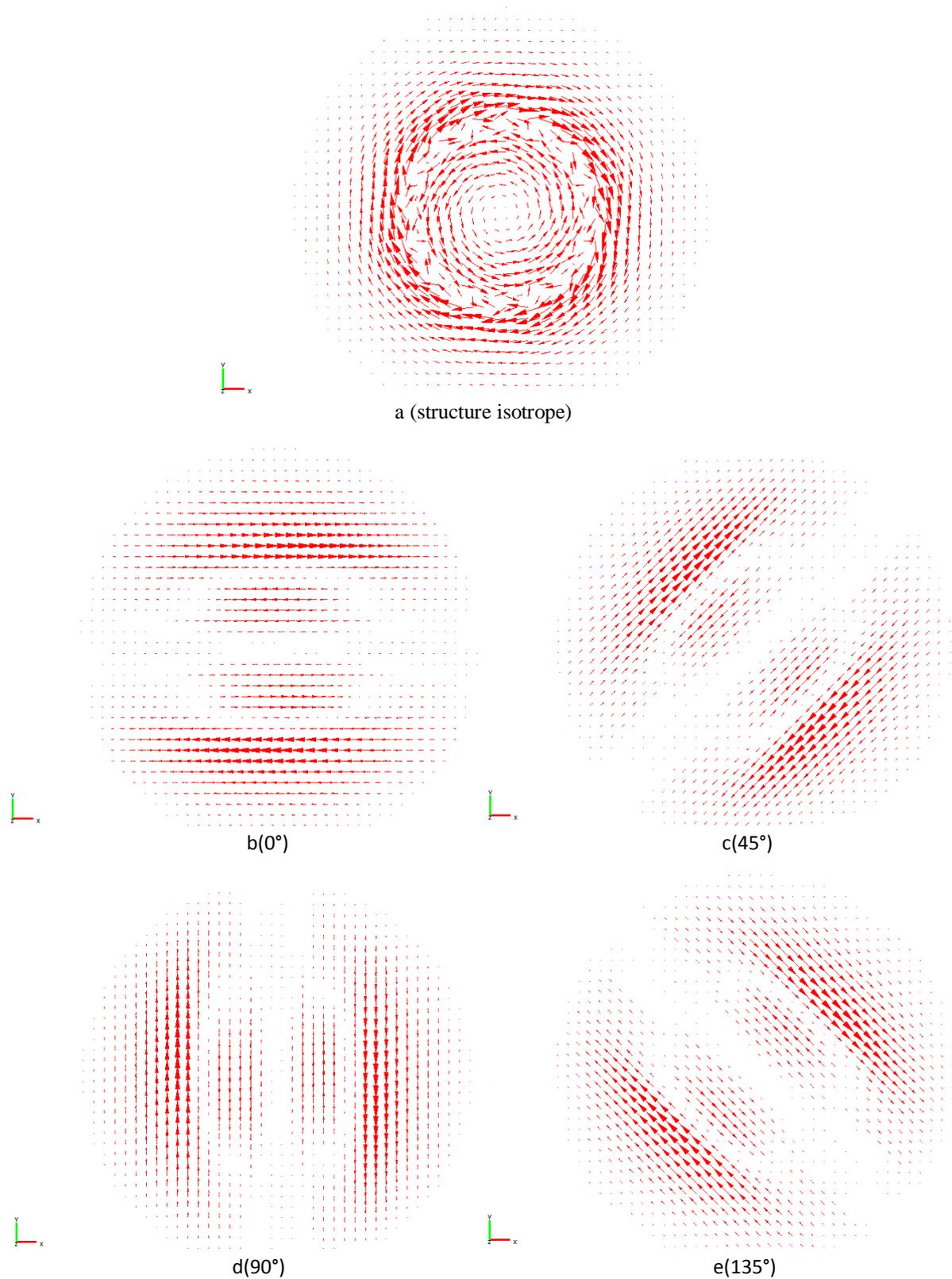


Figure III.11. Comparaison entre la distribution vectorielle des courants induits dans les quatre échantillons de CFRP par rapport à un échantillon isotrope.

III.3.3.2. Représentation de la variation d'impédance

Pour étudier les réponses du capteur proposé et sa sensibilité à l'orientation des fibres, nous considérons la partie réelle de la variation de l'impédance. Pour cela, la variation d'impédance de chaque élément de la matrice est calculée et indiquée en rapport à sa position angulaire, dans laquelle toutes les valeurs élémentaires sont extraites en même temps. Ensuite nous représentons les résultats trouvés par les diagrammes polaires. La figure III.12 montre la partie réelle de la variation d'impédance des éléments du capteur en fonction de leurs positions angulaires. Nous voyons que les diagrammes polaires sont orientés respectivement selon les angles 90° , 135° , 180° et 225° . Cependant, les fibres dans des échantillons sont orientées selon les angles 0° , 45° , 90° et 135° respectivement. Pour chercher la relation entre les orientations des fibres et les réponses de la matrice interactive, nous résumons ces résultats dans le tableau III.2.

Table III.2. Relation entre les orientations des fibres et les réponses du capteur proposé.

Échantillon	Angle d'orientation de fibres (θ)	Angle d'orientation de la réponse (α)	Différence $\beta = (\alpha - \theta)$
1	0°	90°	90°
2	45°	135°	90°
3	90°	180°	90°
4	135°	225°	90°

A partir la différence angulaire β qui est constant et est égale à 90° nous constatons que les orientations des diagrammes polaires sont orthogonales aux directions de fibres pour tous les échantillons de CFRP étudiés. Ces directions orthogonales des diagrammes polaires aux sens de fibres à cause des positions relatives de chaque groupe des bobines adjacentes par rapport au sens de fibres comme nous l'avons expliqué précédemment concernant le capteur flexible rotatif. Pour chaque échantillon, nous pouvons remarquer que la valeur maximale de la variation d'impédance est obtenue si les bobines adjacentes sont rangées dans la même direction des fibres. Alors que, la valeur minimale est obtenue lorsque les bobines adjacentes sont rangées dans la direction orthogonale aux fibres. En conséquence, cette nouvelle architecture regroupe, pour une seule position statique de la matrice, les positions successives du capteur rotatif, ce qui permet d'éviter la rotation mécanique. Nous pouvons ainsi conclure que les signatures de la matrice interactive par CF peuvent être exploitées pour caractériser les orientations des fibres dans les matériaux de CFRP unidirectionnel.

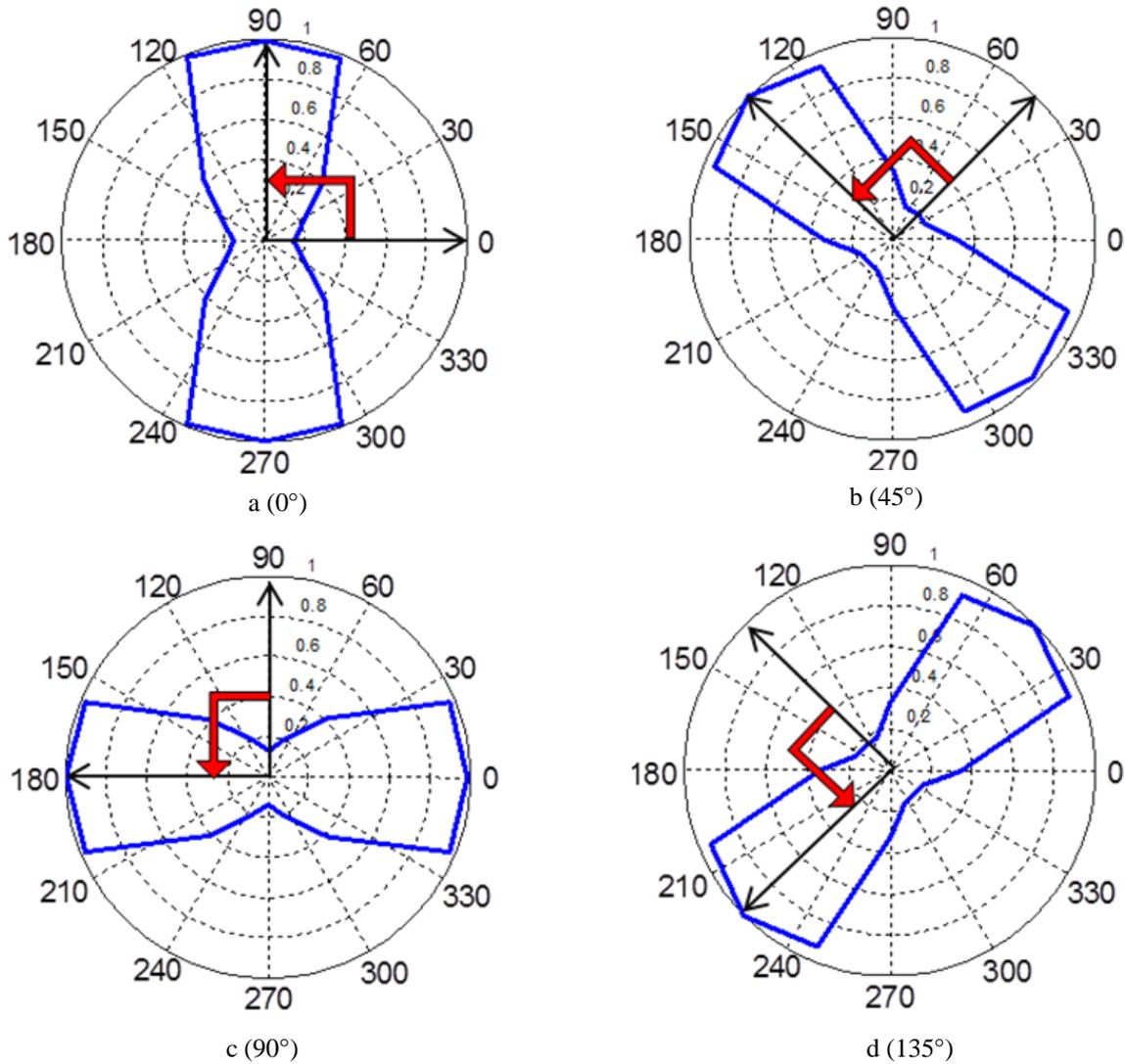


Figure III.12. Diagrammes polaires de la partie réelle de la variation d'impédance détectés par la matrice interactive pour les 04 échantillons de CFRP.

Les deux diagrammes polaires présentés dans les figures (III.3) et (III.12. a) indiquent tous les deux, la partie réelle de la variation d'impédance normalisée, ce qui donne des informations sur l'orientation des fibres dans une plaque en CFRP (0°). Cependant, nous trouvons une différence entre les formes de ces réponses. La raison principale de ce phénomène est dû au nombre total de bobines qui contribuent à la génération des courants de Foucault en même temps. Dans le cas du capteur flexible à deux bobines, il existe une interaction des courants induits générés uniquement par deux bobines. De plus la variation de l'impédance pour une position est égale à la somme des variations d'impédance des deux bobines. Cependant, dans le cas de la matrice interactive, il y a une interaction des courants induits générés par 16

bobines en même temps. Et la variation de l'impédance de chaque position est calculée à partir d'une seule bobine.

Du point de vue de la rotation mécanique, la différence entre le capteur de la matrice interactive proposé et certains capteurs rotatifs est résumée dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Comparaison entre le capteur de la matrice interactive et certains capteurs rotatifs.

Capteur	Méthode de la rotation mécanique	Nombre de positions de mesures	Bruits de la rotation mécanique sur la mesure
Réf [36]	Manuel	24	Bruit
Réf [34]	Manuel	120	Bruit
Réf [63]	Scanner	Plusieurs positions	Bruit
Réf [54]	Rotor mécanique	72	Bruit
Matrice interactive	Sans rotation (manuel ou mécanique)	1 (très rapide)	Pas de bruit

La matrice interactive proposée permet d'éliminer la rotation mécanique, de minimiser le bruit de mesure et elle est très rapide par rapport aux capteurs rotatifs. De plus, cette matrice est un dispositif miniaturisé et nécessite moins d'interventions de maintenances grâce à l'absence de dispositif électromécanique de rotation.

III.3.4. Caractérisation des structures multidirectionnelles

Dans les structures de CFRP multidirectionnelles, la différence entre les orientations des fibres est de 90° ou 45° . Pour tester la capacité de la matrice interactive à la détermination de l'orientation des fibres dans ce type de structures, nous allons utiliser la matrice interactive pour détecter l'orientation des fibres dans deux plaques de CFRP à deux directions. La première plaque composée de deux plis dont les fibres du pli supérieur sont orientées selon 0° et celles du pli inférieur de 90° (structure orthogonale).

Cependant, dans la deuxième plaque les fibres sont orientées selon un angle 0° dans le pli supérieur et 45° dans le pli inférieur. Les deux plaques sont montrées dans la figure III.13.

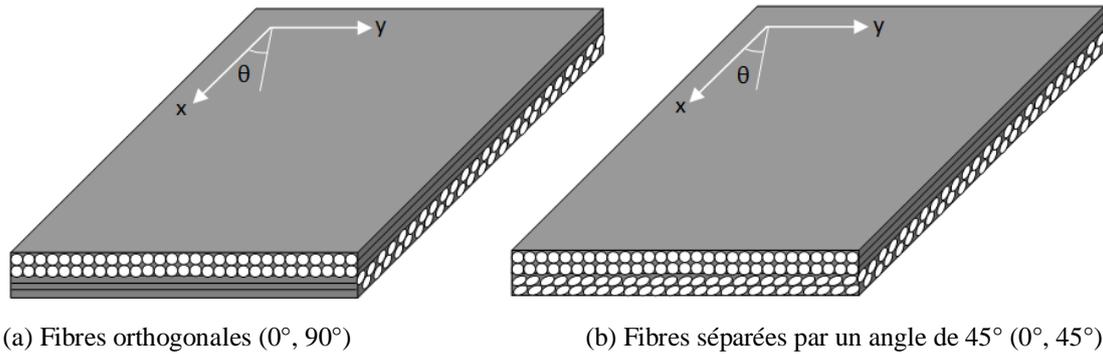


Figure III.13. Plaques à deux directions utilisées.

La figure III.13 présente les réponses détectées par le capteur dans les deux cas.

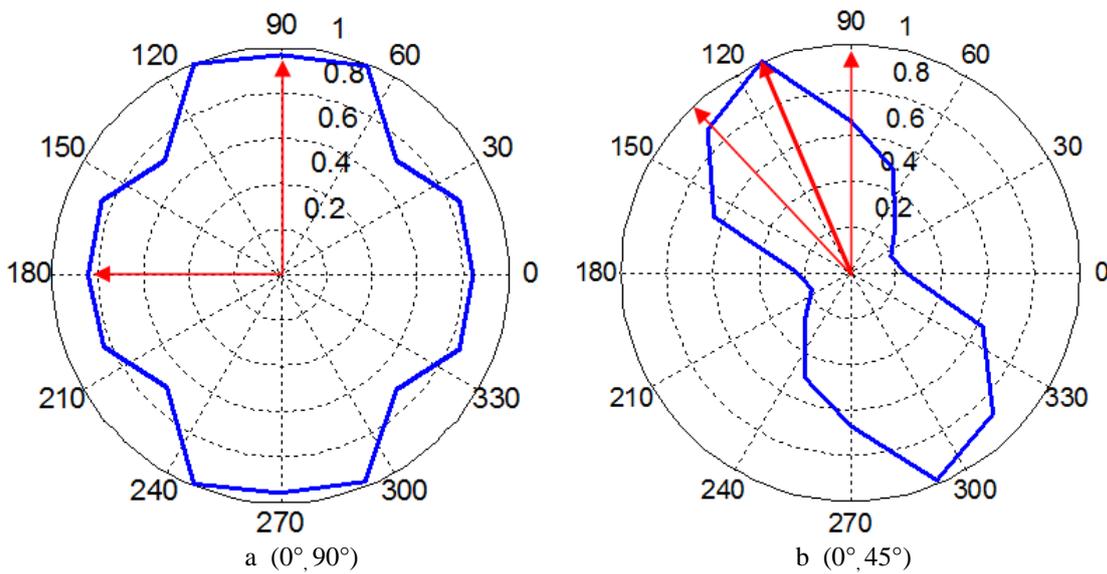


Figure III.14. Diagrammes polaires de la variation d'impédance détectés par la matrice interactive.

Dans le premier cas, le diagramme polaire détecté par la matrice interactive est une superposition de deux lobes orthogonaux de différentes amplitudes. Cette différence s'explique par la distance entre le capteur et les différents plis. Selon le principe du capteur utilisé, le lobe orienté selon l'angle 90° correspond au pli qui possède des fibres orientées selon 0° (pli supérieur), tandis que le lobe orienté selon l'angle 0° correspond au pli qui possède des fibres orientées selon 90° (pli inférieur).

Dans le cas de la deuxième plaque (0° et 45°), la matrice interactive fournit seulement un lobe orienté selon un angle de $112,5^\circ$ qui est orthogonal à la bissectrice des deux angles (0° , 45°).

En résumé, lors la détermination des orientations des fibres dans les CFRP par la matrice interactive, on obtient des lobes orientés selon la direction orthogonale à la direction de fibres dans les cas des structures orthogonales.

Cependant pour le cas d'une structure multidirectionnelle séparée par un angle de 45° , les lobes s'intègrent dans un seul lobe orienté selon la direction orthogonale à la bissectrice des deux angles d'orientation des fibres. Donc, le capteur à matrice interactive reste limité dans le cas de la détection des structures multidirectionnelles séparées par un angle de 45° . Cela nous oblige de chercher des solutions de traitement de signal, d'optimisation ou bien de conception.

III.4. Caractérisation par la matrice réceptrice

Des dispositifs d'ECND-CF basés sur le principe de l'émission-réception sont utilisés pour caractériser et contrôler les matériaux. Nous nous intéressons, dans cette partie, à l'intégration de cette technique pour la caractérisation des matériaux composites de type CFRP. Ce genre de dispositifs nécessite une rotation mécanique de l'ensemble émetteur-récepteur [32, 54] ou bien seulement la rotation du récepteur [36]. Et durant la rotation, les mesures sont effectuées pour chaque position angulaire.

Notre approche vise à éliminer les inconvénients de la rotation mécanique et augmenter la rapidité et les performances de la mesure par ce type de capteurs. Pour cela nous proposons une nouvelle structure en utilisant le même principe du capteur émetteur-récepteur, mais au lieu de changer la position de la bobine réceptrice plusieurs fois, nous utilisons un ensemble de bobines réceptrices disposées selon une matrice de forme circulaire. En effet l'utilisation d'une matrice des bobines réceptrices disposées en cercle permet de recevoir le signal afin de caractériser les CFRP en une seule position.

III.4.1. Conception d'un capteur émetteur-matrice réceptrice

Nous considérons un ensemble de bobines de réception disposées en cercle autour d'une bobine émettrice comme illustré dans la figure III.15. La bobine émettrice et les éléments de la matrice réceptrice sont placés au-dessus d'une plaque de composite en CFRP. Le principe utilisé pour ce dispositif consiste en l'utilisation des courants induits par la bobine émettrice dans les fibres de carbone. Ces courants se propagent fortement dans la direction de fibres par rapport à la direction transversale. Nous déduisons de ce fait que l'intensité des courants induits est différente sous les différents éléments de la matrice réceptrice. En conséquence, la variation de l'impédance au niveau de chaque élément est dépendante de l'orientation de

fibres. Ce qui permet de caractériser la pièce CFRP à partir des informations recueillies dans les bobines réceptrices.

Pour voir l'efficacité de cette proposition, et afin d'étudier les phénomènes électromagnétiques locaux induits en chaque point, nous construisons un modèle 3D en éléments finis sous l'environnement COMSOL. Ce modèle permet d'étudier le comportement des phénomènes électromagnétiques (figure III.15).

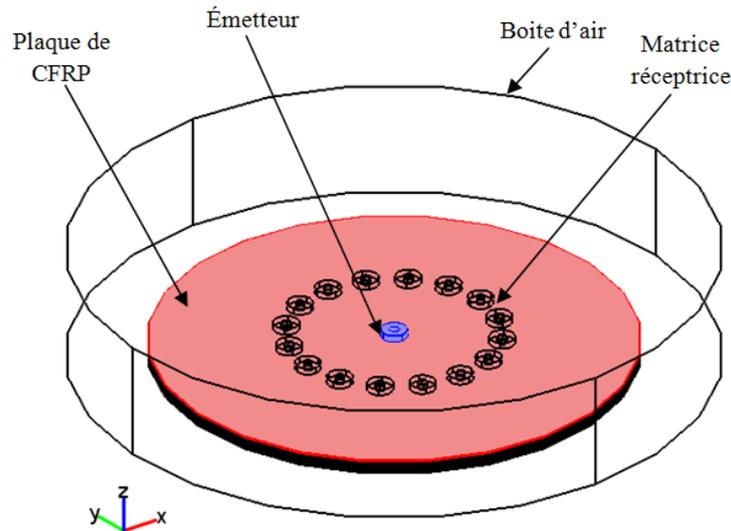


Figure III.15. Modèle géométrique du capteur émetteur-matrice réceptrice sous une plaque en CFRP.

Les dimensions des bobines et de la plaque de CFRP sont les mêmes que celles utilisées précédemment pour l'étude de la matrice interactive (paragraphe III.3).

III.4.2. Application à la caractérisation de CFRP

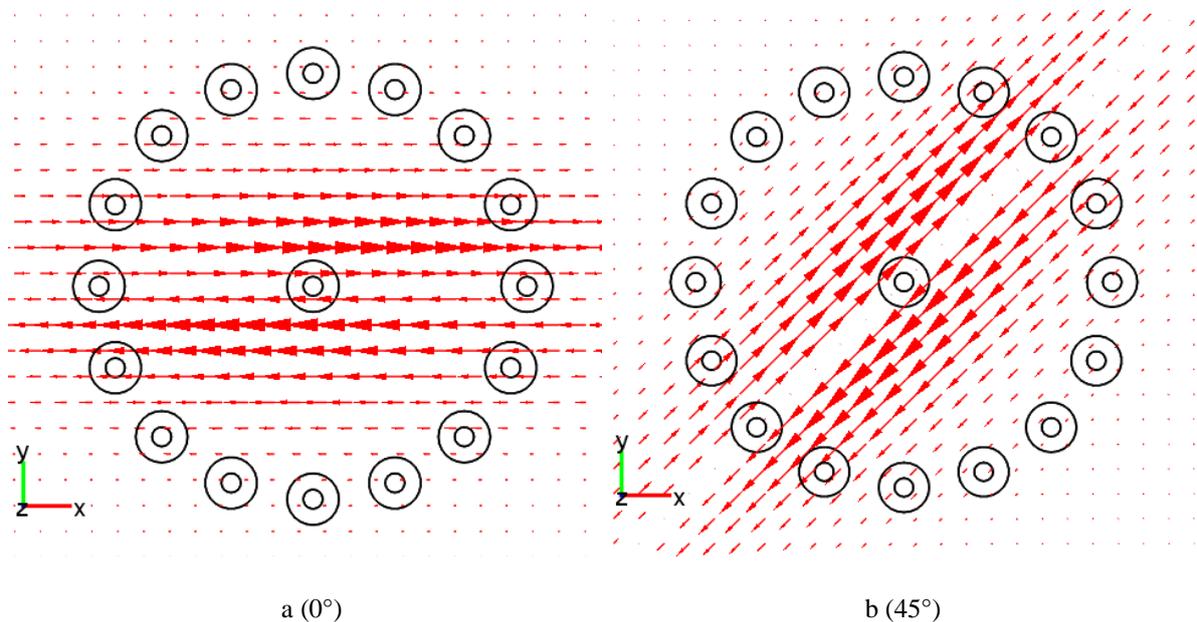
Nous utilisons, dans ce qui suit, le système ' bobine émettrice-matrice réceptrice ' pour caractériser l'orientation des fibres de carbone. Dans un premier temps nous allons caractériser une structure monodirectionnelle, et dans un deuxième temps nous allons caractériser des structures multidirectionnelles.

III.4.2.1. Distribution des courants induits

Comme dans tous les capteurs émetteur-récepteur, le choix de la distance entre l'émetteur et le point de réception joue un rôle fondamental en termes d'exactitude de l'information recueillie. Pour le système proposé, si les éléments de la matrice réceptrice sont placés près de l'émetteur, l'influence du champ magnétique créé par ce dernier va être dominant sur la variation d'impédance, ce qui peut perturber la réponse du capteur. Si, par contre, nous

augmentons la distance entre la bobine émettrice et la matrice réceptrice, l'influence du champ magnétique de l'émetteur peut diminuer fortement, dans les éléments de réception, devant l'influence des courants induits. Dans ce cas, la variation d'impédance aux niveaux des éléments de réception serait due aux courants induits distribués dans les fibres de carbone. Si on augmente un peu plus la distance entre l'émetteur et le récepteur, les courants induits deviennent très faible dans les éléments récepteurs, et nous risquons de ne plus pouvoir obtenir des signatures au niveau de la matrice réceptrice. Jun Cheng et son équipe de recherche, dans la référence [36], après quelques tests, ont abouti au choix d'une distance de 10mm entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice. Comme les bobines utilisées dans notre proposition ont les mêmes dimensions que celles utilisées dans cette référence, nous adoptons cette distance de 10mm entre la bobine émettrice et les éléments de la matrice réceptrice.

La figure III.16 représente la distribution vectorielle des courants induis au niveau de quatre échantillons en CFRP (0° , 45° , 90° et 135°). Nous remarquons que les courants induits prennent des trajectoires rectilignes et leurs densités sont plus grande dans les directions des fibres à cause la conductivité électrique qui est beaucoup plus élevée le long des fibres.



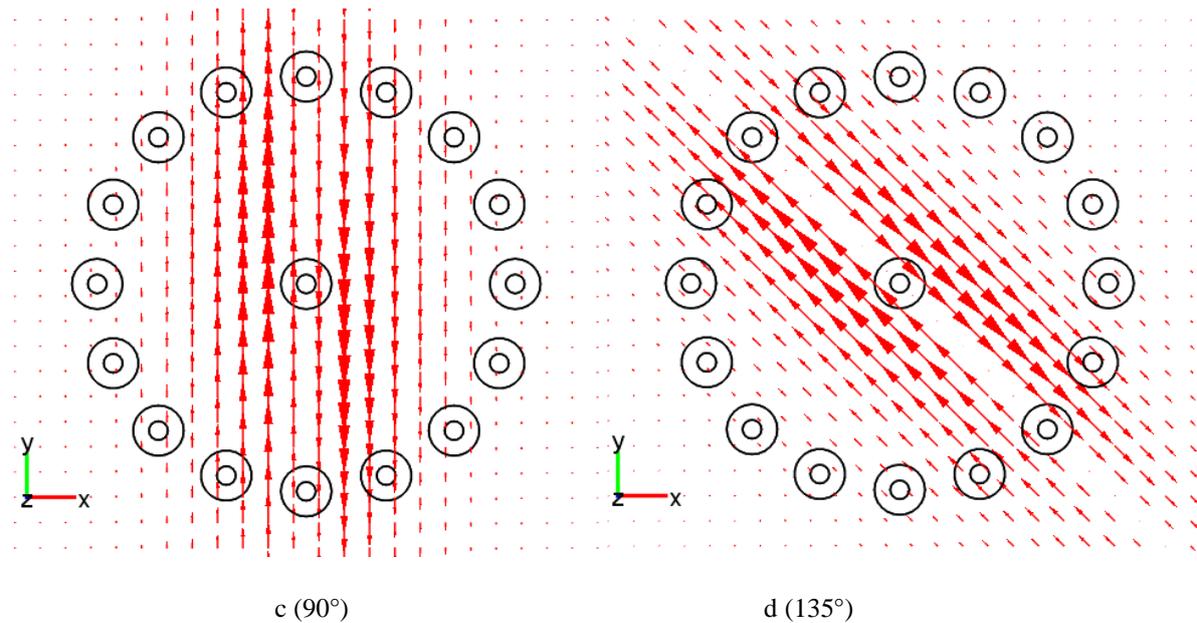


Figure III.16. Distribution des courants induits dans les échantillons de CFRP.

III.4.2.2. Détermination de l'orientation de fibres

Afin de tester les performances de la matrice de réception proposée sur la caractérisation des CFRP, nous allons vérifier ses réponses dans les deux cas de structures, monodirectionnelle puis multidirectionnelle.

Nous exploitons l'équation (II.29) pour calculer les réponses élémentaires de la matrice. Cette équation permet de calculer la tension de chaque élément de la matrice réceptrice. Ces tensions sont dues aux courants induits qui traversent les fibres et génèrent un flux magnétique dans lequel baignent les bobines de réception. La tension aux bornes est différente d'un élément à un autre de la matrice de bobines. Le rapport entre les tensions élémentaires et le courant d'excitation donne les impédances élémentaires (trans-impédances).

III.4.2.2.1. Structures monodirectionnelles

Pour les quatre cas d'orientation de fibres (0° , 45° , 90° et 135°), nous présentons dans la figure III.17 les diagrammes polaires de la variation d'impédance normalisée en fonction des positions des éléments de la matrice réceptrice. On remarque que les diagrammes détectés ont une grande sensibilité aux orientations des fibres où les deux extrémités de chaque diagramme polaire indiquent le vrai angle d'orientation de fibres.

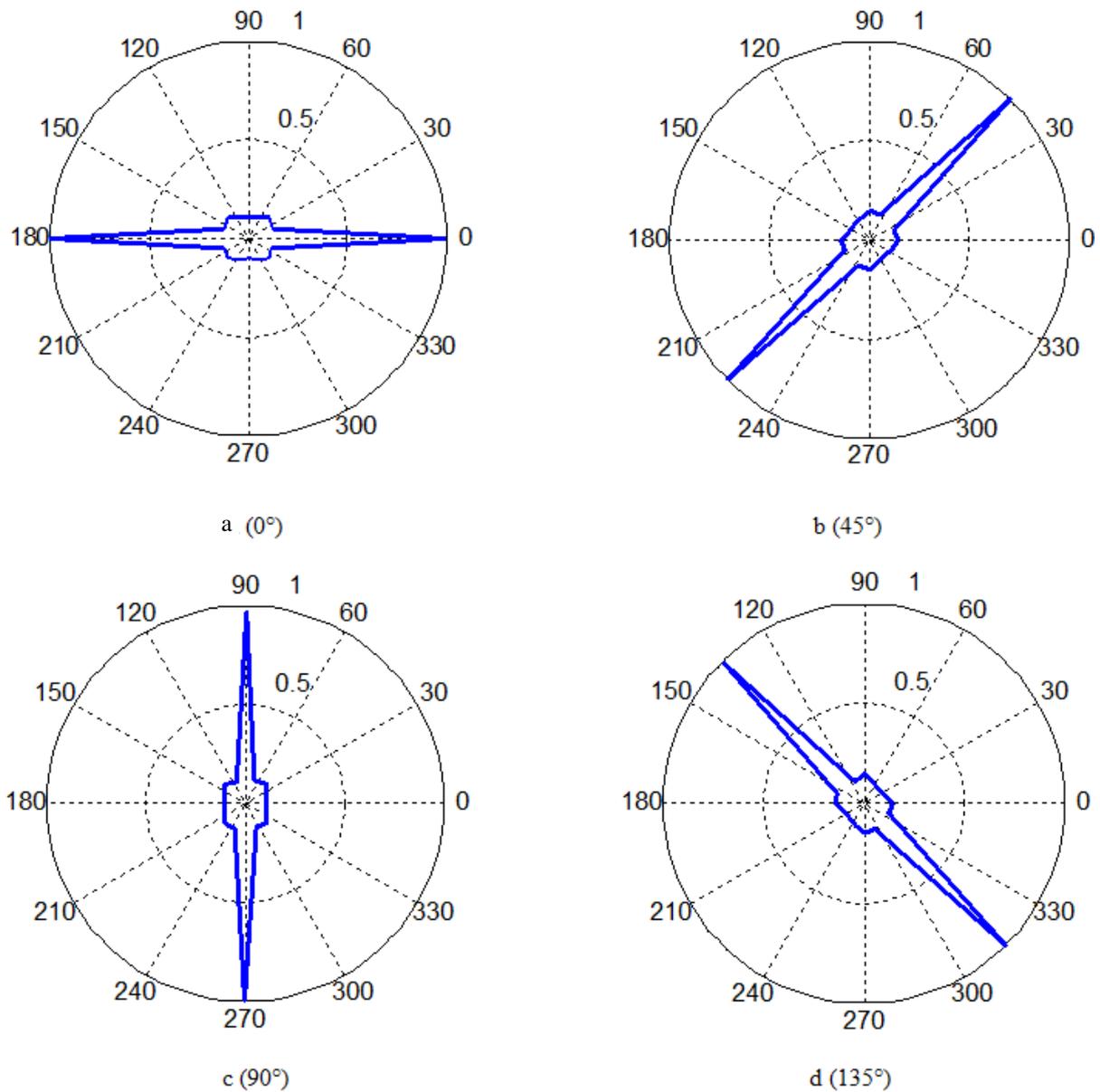


Figure III.17. Diagrammes polaires de la partie réelle de la variation d'impédance en fonction des angles élémentaires de la matrice réceptrice pour des structures monodirectionnelles.

III.4.2.2.2. Structures multidirectionnelles

Nous allons vérifier la capacité de la matrice réceptrice pour la caractérisation des structures multidirectionnelles en utilisant les deux structures de CFRP à deux plis précédemment utilisées : les deux plis de la première sont orthogonaux, tandis que ceux de la deuxième sont décalés de 45° .

La base de données obtenue à partir du modèle éléments finis permet de traiter les réponses du capteur proposé par les diagrammes polaires présentés dans la figure III.18.

Dans la figure III.18.a, le diagramme polaire composé d'une superposition de deux lobes orthogonaux orientés suivant les angles 0° et 90° respectivement. Ces lobes indiquent l'orientation des fibres dans la plaque testée. D'autre part, nous pouvons observer que les deux amplitudes des lobes orthogonaux sont différentes, ce qui s'interprète par la différence de la densité de courant dans les deux plis. En effet, le lobe le plus long indique le pli supérieur et le lobe le plus petit indique le pli inférieur.

Pour la deuxième plaque ($0^\circ, 45^\circ$), on trouve également une superposition de deux lobes, qui sont orientés selon 0° et 45° , ce qui correspond aux orientations des fibres dans la plaque testée. Le lobe qui a une amplitude plus grande indique le pli supérieur et l'autre lobe indique les pli inférieur.

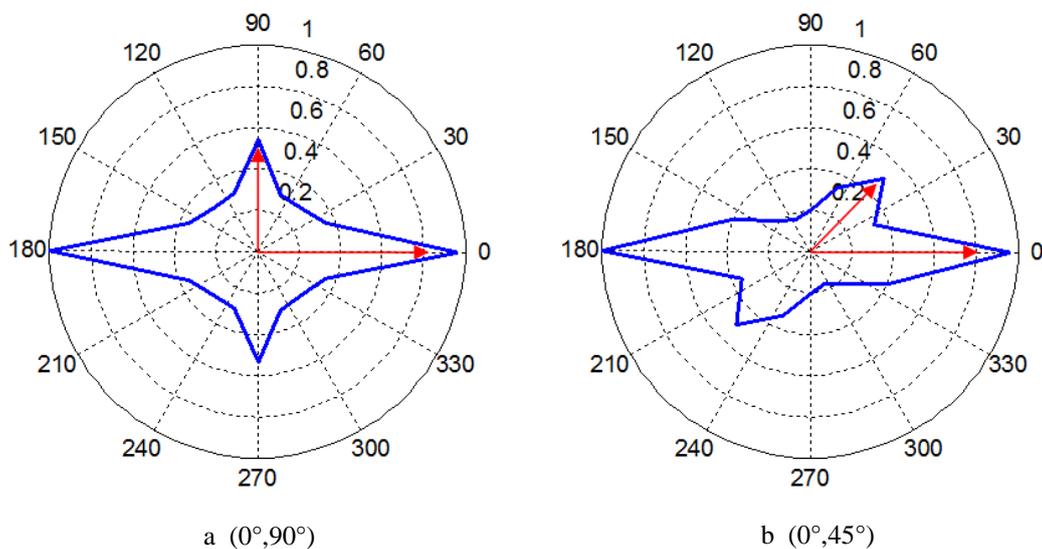


Figure III.18. Diagrammes polaires de la partie réelle de la variation d'impédance en fonction des angles élémentaire de la matrice réceptrice pour des structures multidirectionnelles.

En résumé, la matrice réceptrice possède une grande sensibilité aux orientations des fibres dans les CFRP, et cela dans les deux cas mono et multidirectionnelle, et quelle que soit le décalage des orientations des fibres. Cela constitue une amélioration importante de la structure de capteur 'matrice interactive' que nous avons décrit plus haut.

L'utilisation de la matrice réceptrice proposée pour caractériser les CFRP permet de bénéficier des avantages suivants:

- Caractérisation rapide ;
- Elimination de bruits produits par la rotation mécanique ;
- Excitation de la seule matrice émettrice. Ce qui minimise la consommation de l'énergie électrique, et augmente la durée de vie du système.

De plus, l'absence de dispositif de rotation mécanique réduit le coût du capteur, et permet sa miniaturisation et la minimisation des besoins en interventions de maintenance.

III.5. Conclusion

Afin d'améliorer les dispositifs de caractérisation des CFRP, et notamment la détection de l'orientation des fibres de carbone, par la méthode de CF, nous avons visé l'élimination de la rotation mécanique dans les capteurs rotatifs. Dans ce cadre, nous avons proposé un dispositif à base de matrices de bobines. De ce fait, nous avons proposé deux nouvelles configurations de capteurs CF, la première fonctionne sous mode absolu et la deuxième sous mode émission-réception.

L'élimination complète de l'action de la rotation mécanique a permis d'aboutir à la minimisation et la miniaturisation possible du volume du capteur, à augmenter la rapidité de la procédure de caractérisation et à éliminer les bruits de mesures générés par le dispositif de la rotation mécanique. De plus, nous sommes également arrivés à minimiser la consommation de l'énergie électrique, ce qui permet d'augmenter la durée de vie du dispositif, et notamment celle des batteries pour les capteurs portables. Ces propositions ont prouvées leurs efficacités lors la caractérisation des angles d'orientation des fibres dans les plaques de CFRP. Le mode de fonctionnement (absolu ou E-R) influe sur la précision de l'information détectée par les dispositifs de CND-CF, et nous avons montré, à travers cette étude, que la matrice réceptrice a une plus grande sensibilité que la matrice interactive, notamment pour la détection de l'orientation des fibres des structures multidirectionnelles.

Un banc de validation expérimentale utilisant un analyseur d'impédance AGILENT 4294 A, a été utilisé pour le cas du capteur flexible à deux bobines, sur une plaque CFRP à 14 plis.

Dans le chapitre quatre, nous allons appliquer les dispositifs proposés pour la détection de défauts dans les matériaux composites de type CFRP.

Chapitre IV :
Application au contrôle de défauts dans
les CFRP

IV.1. Introduction

Des défauts physiques peuvent modifier les propriétés des matériaux et altérer leurs performances pour des applications données. Dans les matériaux composites, nous avons montré dans le Chapitre 1, les principaux types de défauts qui peuvent se produire sous l'effet du vieillissement, des défauts de fabrication ou de chocs et autres événements de fonctionnement. Ces défauts relèvent principalement de :

- Délaminage;
- Ondulation des fibres;
- Ruptures de fibres;
- Porosité de la matrice;
- ...

Pour distinguer chacun de ces types de défauts, il est nécessaire d'adopter des méthodes particulières. Ces méthodes sont généralement basées sur l'utilisation de capteurs spéciaux.

Dans ce chapitre, et au titre de l'application, nous nous intéressons particulièrement à la détection et la caractérisation de défauts d'ondulation interne de fibres dans les matériaux composites de CFRP en utilisant les capteurs que nous avons conçus à base des matrices de bobines et proposées précédemment.

IV.2. Défaut d'ondulation de fibres et robustesse des CFRP

Le moulage est une étape essentielle pendant la fabrication des CFRP. Durant cette étape, des défauts peuvent être engendré à l'intérieur du produit. L'ondulation de fibres est l'un des défauts induits par ce procédé. Il s'agit d'une déformation des fibres qui se produit lorsque la force de traction de fibres est insuffisante pendant la fabrication ou bien de la grande différence de température entre le moule et le CFRP pendant le refroidissement [32]. Nous distinguons deux types d'ondulation de fibres qui sont : l'ondulation externe et l'ondulation interne. Le premier est une ondulation selon l'épaisseur du pli, cependant la deuxième est une ondulation selon le plan du pli comme le montre dans la figure IV.1.

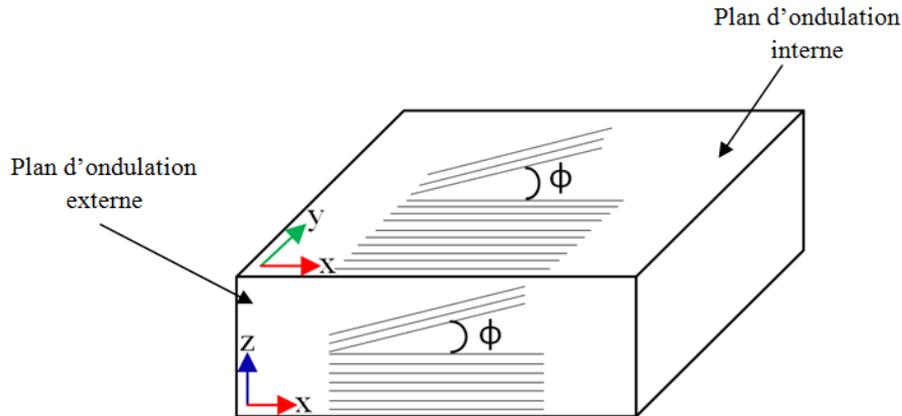


Figure VI. 1. Différents plans d'ondulation de fibres [64].

Dans la littérature, il est rapporté que la fausse localisation des fibres dans les CFRP a un effet considérable sur les propriétés mécaniques du composite. Ainsi, les auteurs de la référence [65], ont étudié l'influence de l'ondulation de fibres sur la résistance à la compression du CFRP unidirectionnel. Ils ont trouvé que l'augmentation de l'inclinaison d'ondulation de 1° à 6° a réduit la résistance à la compression selon un rapport de 21% (de 1.9 à 1.5GPa). Dans les références [40, 66] il est mentionné qu'un angle de 15° d'ondulation interne de fibres peut réduire de 50% la résistance à la compression du matériau. Il est montré aussi que le désalignement des fibres de 10° entraîne une perte de résistance à la compression de 30% pour les matériaux composites renforcés unidirectionnels. Pour cela, la détection des défauts d'ondulation prend un aspect primordial dans les processus de fabrication, et les méthodes de CND peuvent être très concurrentielles dans ce cadre du fait de leur souplesse et de leur précision. Dans ce cadre, plusieurs travaux utilisant les courants induits examinent les pièces en CFRP. Heuer et al dans la référence [67], ont pu à visualiser l'ondulation interne des fibres dans les CFRP tissus en utilisant le CND CF à haute fréquence. L'équipe de Mizukami a proposé un capteur à CF spécialisé dans la détection des ondulations [32, 38]. Dans ce travail, nous nous intéressons à la détection de défaut d'ondulation, notamment l'ondulation interne de fibres dans les CFRP unidirectionnels.

IV.3. Approche pour simuler le défaut d'ondulation de fibres

Dans notre étude, et au titre de la validation, nous allons utiliser les dimensions expérimentales de défaut d'ondulations données par la référence [32]. Dans cette étude, l'ondulation est représentée approximativement comme une onde triangulaire avec une amplitude de 1,1 mm et une longueur de 15,9 mm (figure I.28). L'ondulation de fibres

s'introduit dans le modèle de simulation en variant l'angle (θ) dans le tenseur de conductivité. La figure IV.2 illustre comment ces défauts sont modélisés.

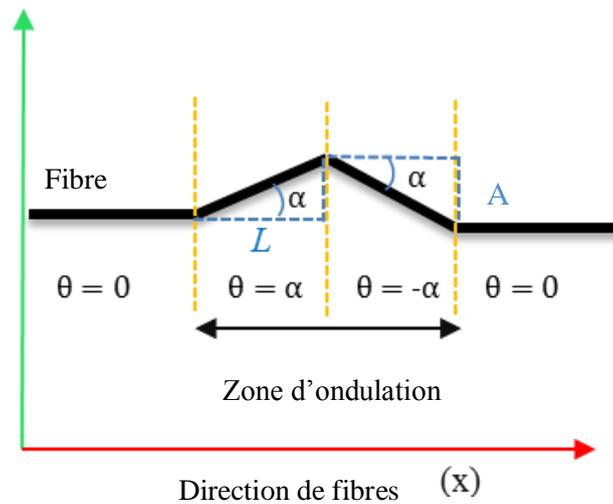


Figure IV. 2. Représentation d'ondulations de fibres par ondes triangulaires.

θ : Angle d'orientation des fibres dans le cas sain.

A et L représentent l'amplitude de l'ondulation et la moitié de la longueur de l'ondulation respectivement.

L'angle d'ondulation est donné par la formule suivante :

$$\alpha = \tan^{-1} (A/L) \quad (\text{IV. 1})$$

Donc, et selon les dimensions utilisés, l'angle de défaut d'ondulation utilisé est égale à $\alpha = 7,88^\circ$.

IV.4. Inspection de défauts par la matrice interactive

Dans une plaque en CFRP unidirectionnelle, selon la direction d'ondulation interne, on distingue quatre cas de défauts d'ondulation tels que montrés par la IV.3. Dans le premier cas, les fibres au niveau de la zone d'ondulation sont ondulées dans la direction positive de l'axe y, cependant, dans le deuxième cas, cette ondulation est dans le sens inverse. Dans le troisième et le quatrième cas, on distingue deux directions d'ondulation opposées, vers les bords de la plaque et vers le centre de l'ondulation respectivement.

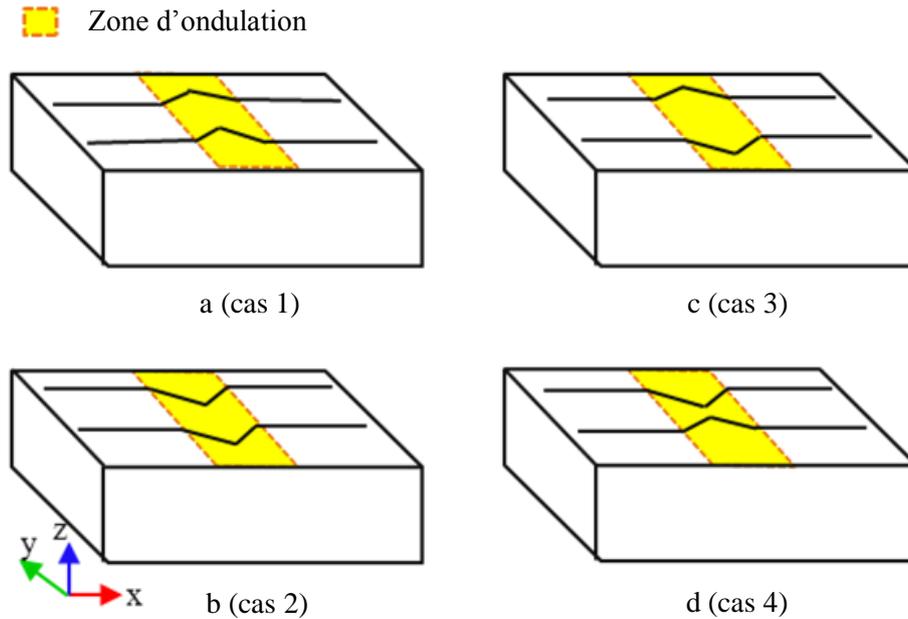


Figure IV.3. Différents cas de défaut d'ondulation interne.

Dans les approches classiques, et pour détecter l'ondulation en un seul point, les capteurs à CF ont besoin d'effectuer des déplacements et prendre un nombre de mesures. L'exploitation des mesures prises permet de conclure à l'existence ou non du défaut d'ondulation. La matrice interactive utilisée dans le chapitre III peut fournir plusieurs valeurs de la variation de l'impédance pour une seule position du capteur et en effectuant une mesure unique. Dans cette partie de notre thèse, nous allons tester l'efficacité de notre capteur pour la détection de défaut d'ondulation interne de fibres à travers l'étude des réponses fournies pour les quatre cas d'ondulation interne.

Pour cela, nous menons une étude par la méthode des Eléments Finis 3D, dont le modèle géométrique est montré sur la figure IV.4. La matrice de bobines placée au-dessus d'une plaque en CFRP à un lift-off de 0.5 mm. Le défaut d'ondulation de fibres est créé au centre de la plaque en divisant la zone du défaut en quatre parties. Ce qui donne une possibilité pour créer facilement les quatre types d'ondulation interne des fibres. Les propriétés physiques et géométriques du CFRP et de la matrices interactive sont les mêmes que celles utilisées dans le chapitre III, cependant ici, nous ajoutons le défaut d'ondulation interne de fibres.

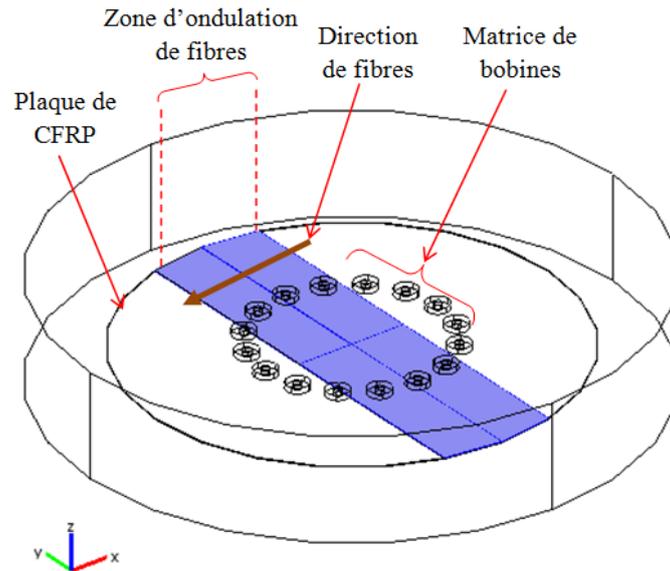
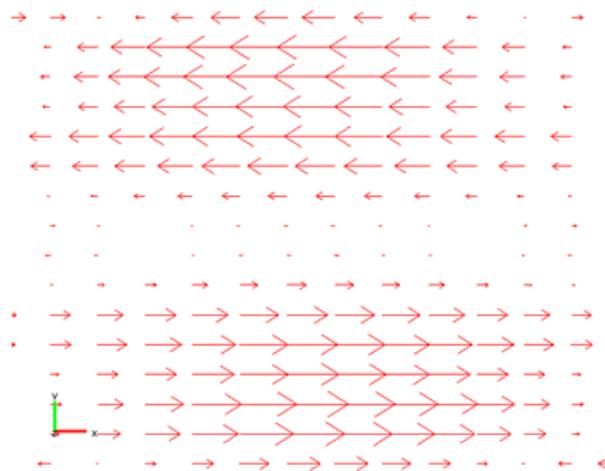


Figure IV.4. Matrice interactive au-dessus d'une plaque de CFRP comporte une ondulation de fibres.

IV.4.1. Effet d'ondulation de fibres sur la distribution des courants induits

La figure IV.5 représente l'influence de l'ondulation de fibres sur la distribution vectorielle des courants de Foucault générée par la matrice interactive. Comme le montre la figure, on voit que les distributions des courants sont différentes pour les quatre cas. Les courants induits s'alignent le long de la direction des fibres dans la zone saine, puis changent leur direction dans la zone d'ondulation de sorte qu'ils présentent une courbure similaire à l'ondulation et enfin ils suivent la direction des fibres dans la zone saine. Chaque zone de courbure prend la même forme que le type d'ondulation correspondant.



Cas sain

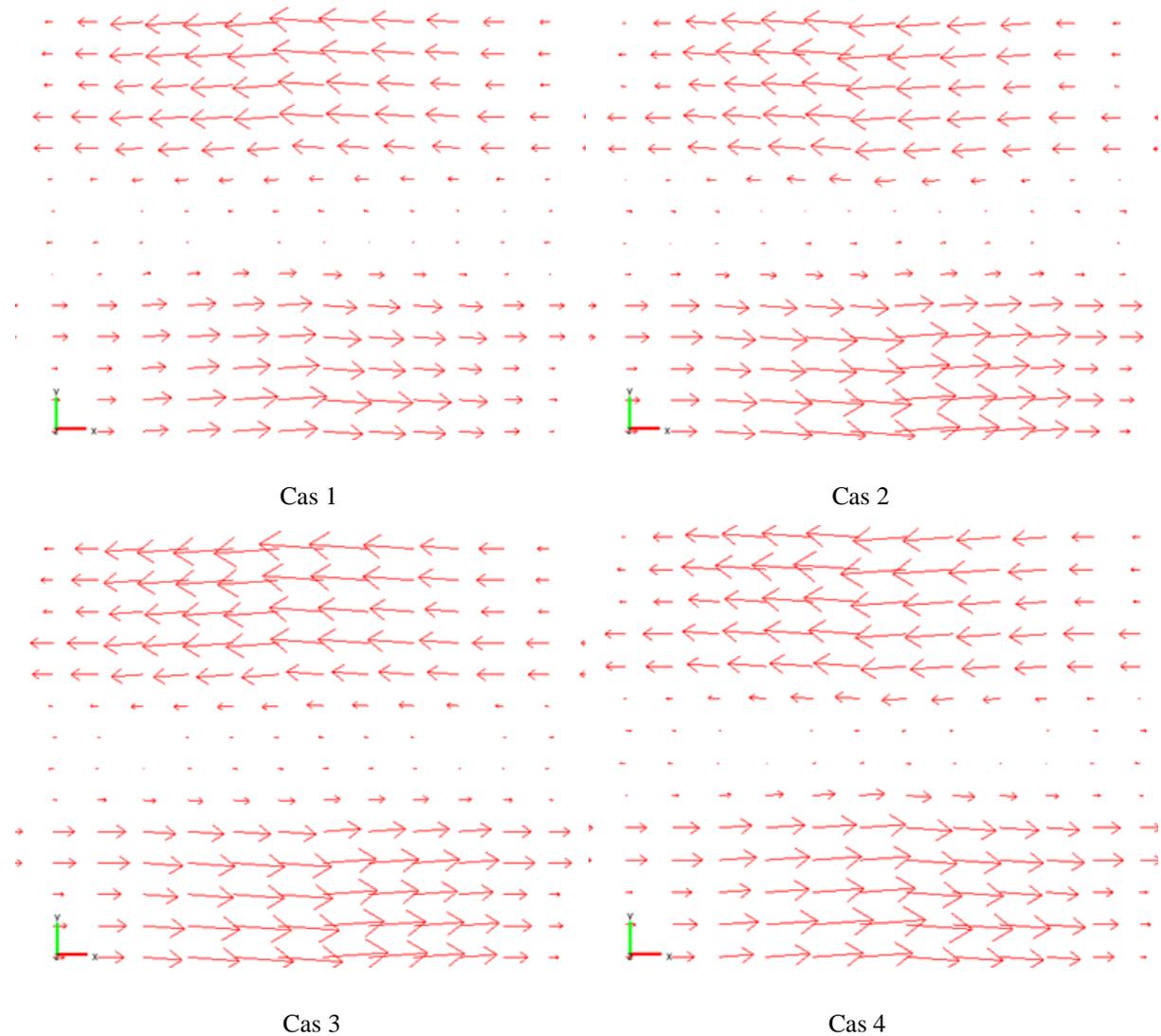


Figure IV.5. Influence de l'ondulation de fibres sur la distribution vectorielle des courants induits.

IV.4.2. Effet de l'ondulation de fibres sur la variation d'impédance

Durant la caractérisation des CFRP unidirectionnel par la matrice interactive, nous avons remarqué une orthogonalité des diagrammes polaires aux directions de fibres. Ce qui est en accord avec le sens de défaut d'ondulation interne de fibres. Cette particularité donne une opportunité pour utiliser ce capteur dans la détection des défauts d'ondulation internes.

Pour détecter les défauts d'ondulation par la matrice interactive, nous suivons les mêmes étapes utilisées pendant la caractérisation par la matrice interactive. Ensuite, nous comparons les résultats obtenus avec ceux donné dans le cas sain.

Les résultats de la figure IV.6 montrent les effets d'ondulation de fibres sur les réponses du capteur. Dans les quatre cas étudiés, il y a une superposition de deux diagrammes polaires détectés par le système de CND-CF. Les signaux en bleu sont des diagrammes polaires de la

variation d'impédance sans défaut, tandis que les signaux rouges représentent les cas des défauts d'ondulation interne. Dans le premier cas, on voit que les deux extrémités du diagramme polaire sont alignés sur la direction de l'axe « y », par contre, les extrémités du diagramme polaire du deuxième cas sont alignés dans la direction opposée au sens positif de l'axe « y ». Dans le troisième cas, les extrémités du diagramme polaire sont étendues et dans le quatrième cas, les deux extrémités du diagramme polaire sont rétractées. En conséquence, tous les changements au niveau des diagrammes polaires sont en accord avec les formes d'ondulation de fibres étudiées. Donc, le capteur de la matrice interactive a une sensibilité élevée à l'existence d'ondulations internes de fibres. Il peut donc être utilisé pour la détection et la caractérisation des ondulations interne des fibres dans les CFRP (cas 1, cas 2, cas 3 où cas 4).

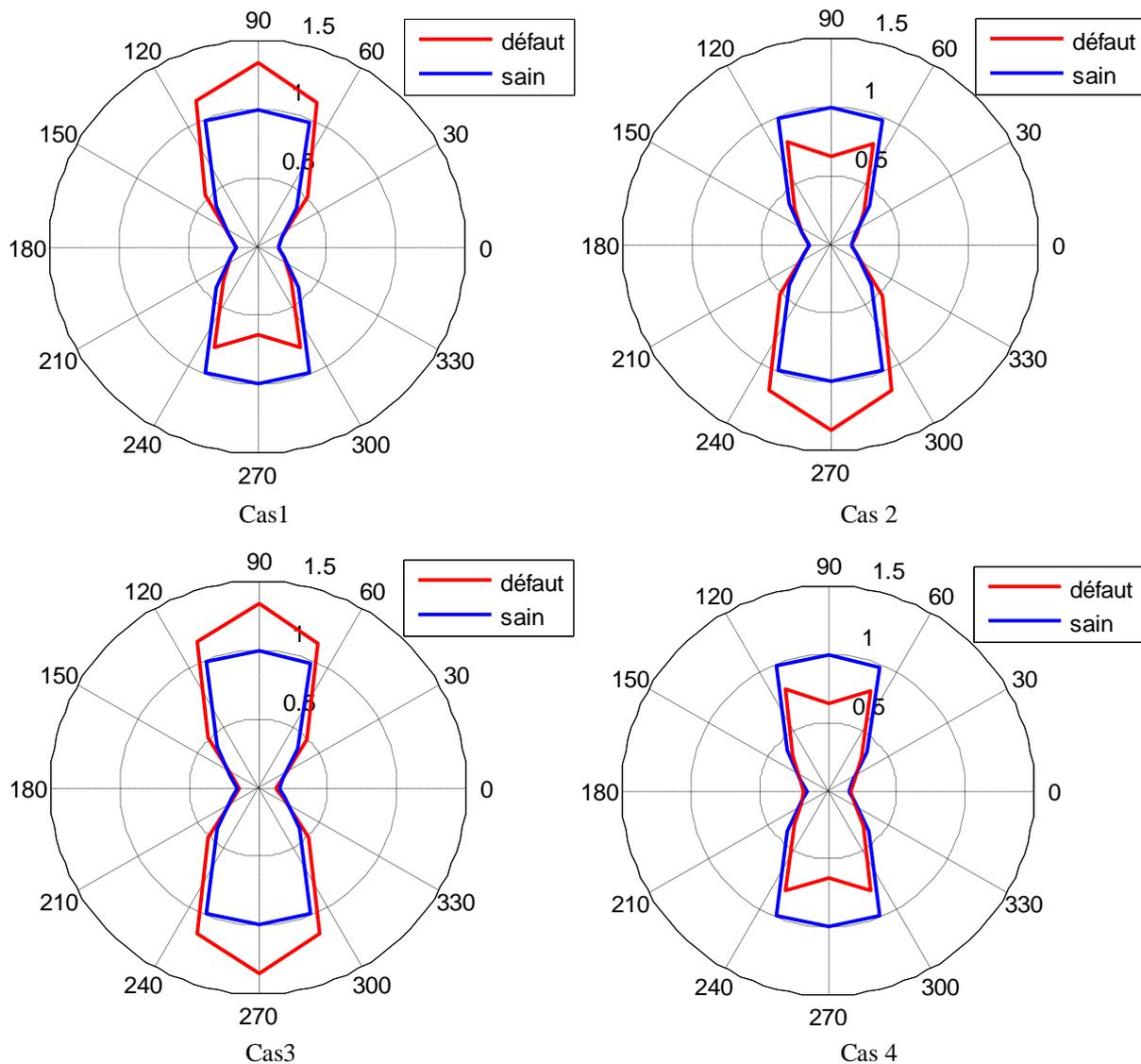
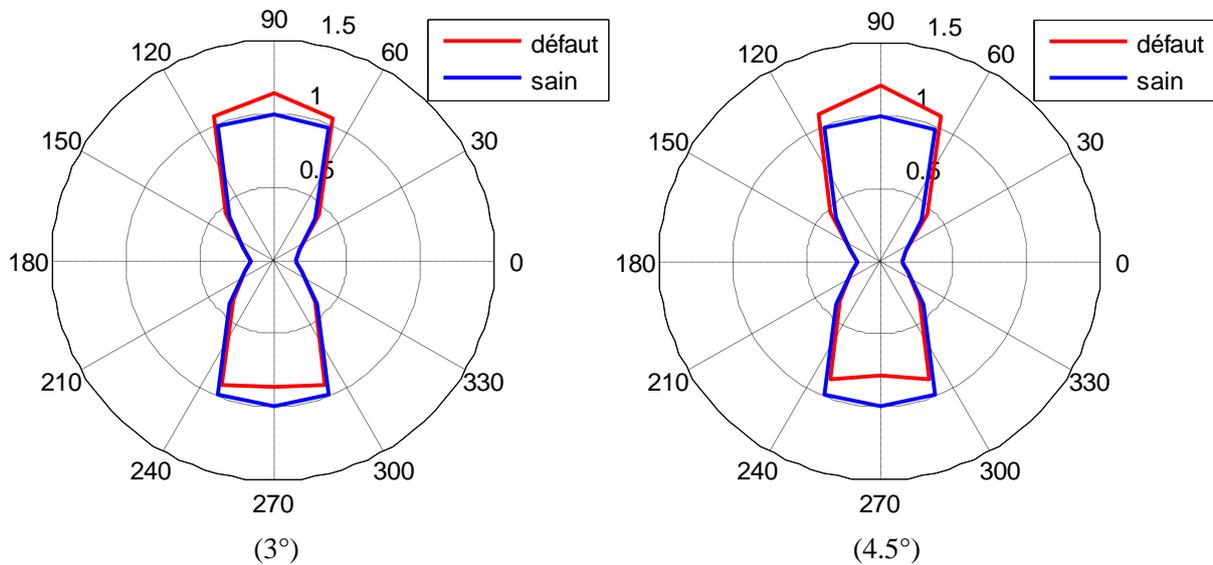


Figure IV.6. Diagrammes polaires détectés par la matrice interactive pour différents cas d'ondulations.

IV.4.3. Etude de l'impact de l'angle d'ondulation sur la sensibilité de la matrice interactive

Pendant la fabrication des CFRP, une petite déformation de l'angle d'orientation des fibres pendant le processus de moulage peut produire un effet considérable sur les propriétés mécaniques du composite [66, 40]. Pour assurer la qualité des produits fabriqués à base de matériaux CFRP, les spécialistes jugent que l'orientation correcte des fibres de carbone est l'un des défis actuels dans le domaine de la fabrication de CFRP. Dans ce contexte, certains chercheurs s'intéressent au développement de l'équipement ECND par CF pour l'inspection de tels défauts [67, 32]. Dans notre étude, pour un angle de 7.88° utilisé dans la référence [68], nous avons trouvé que le capteur à matrice interactive a pu fournir des signaux très clairs et utilisables, qui permettent de conclure à l'efficacité de notre approche pour la détection et la caractérisation de défaut d'ondulation interne de fibres.

Dans cette partie, nous allons étudier la sensibilité de ce capteur à l'angle d'ondulation des fibres. Pour cela nous proposons de détecter quatre cas de défaut d'ondulation de fibres, dans lequel, les défauts présentent des angles d'inclinaison inférieurs à $7,88^\circ$. Les signaux détectés sont présentés par des diagrammes polaires (voir Figure. IV.7).



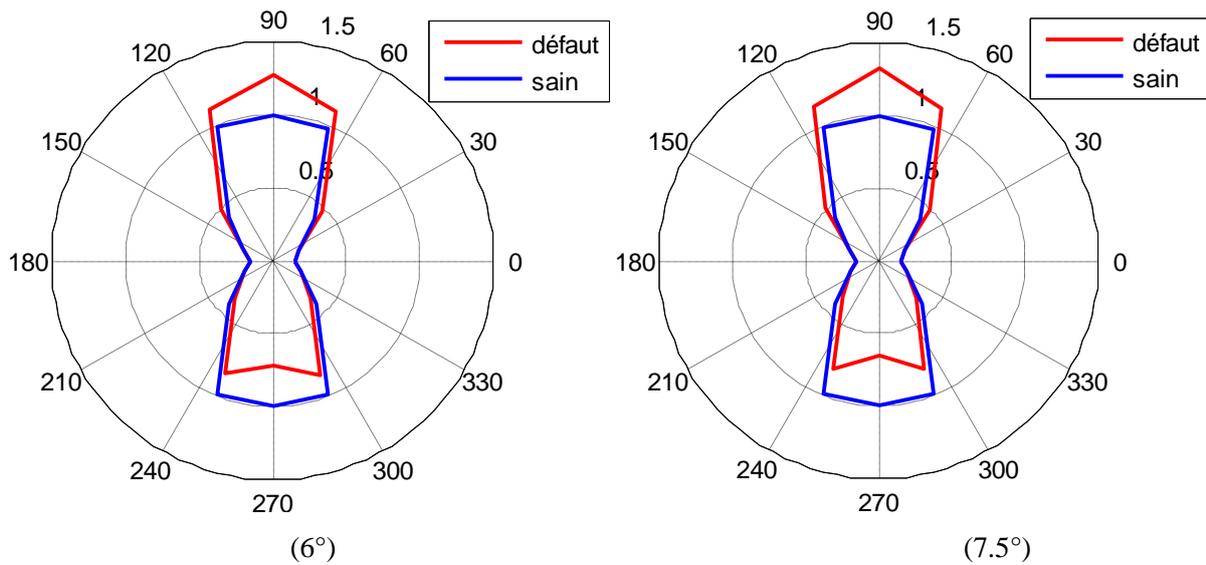


Figure IV.7. Sensibilité de la matrice interactive aux angles de défaut d'ondulation interne de fibres.

Les angles d'ondulation utilisés sont: 3° , 4.5° , 6° et 7.5° qui correspondent aux amplitudes d'ondulations de : 0.42, 0.63, 0.84 et 1.05mm. Les diagrammes polaires représentés sur la figure IV.7 illustrent les réponses obtenues pour les quatre possibilités étudiées. Dans toutes les possibilités, il existe une superposition des deux diagrammes polaires détectés par le système de la matrice interactive avec et sans défaut. Pour chaque cas de défaut, les deux extrémités du diagramme polaire sont déplacées dans le sens de l'ondulation interne des fibres. On note aussi que ce déplacement est proportionnel à l'angle d'ondulation des fibres. De plus, on remarque que la largeur de la première moitié de chaque diagramme polaire (de 0° à 180°) augmente en fonction de l'angle d'ondulation, mais la largeur de la seconde moitié (de 180° à 360°) diminue. En conséquence, le capteur peut être utilisé pour vérifier les différentes amplitudes des dommages d'ondulation interne des fibres avec une bonne précision. Nous avons également fait des tests où nous avons trouvé que ce capteur peut détecter des ondulations qui avec des angles de moins de 3° .

IV.5. Inspection de défauts par capteur à matrice réceptrice

Cette section s'intéresse à la détection de défaut d'ondulation interne de fibres dans les CFRP en utilisant le capteur à matrice réceptrice. Le modèle EF étudié est représenté sur la figure IV.8. On suit la même méthode utilisée durant la caractérisation par le capteur à matrice réceptrice.

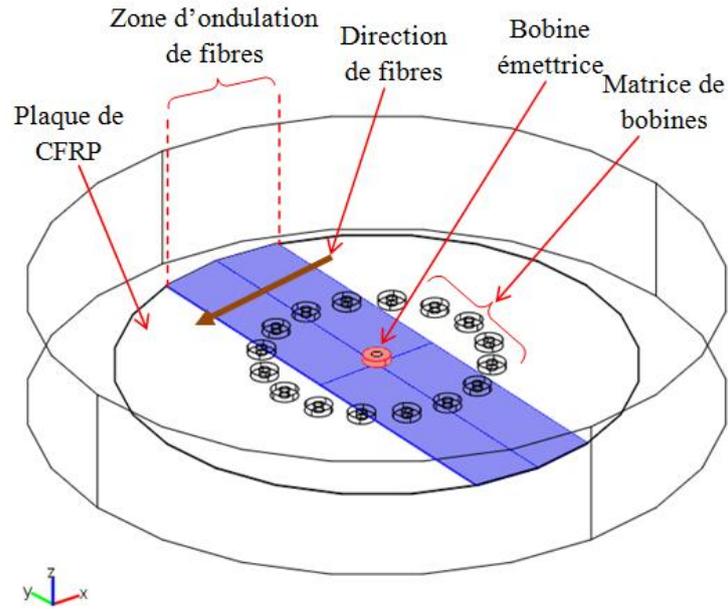
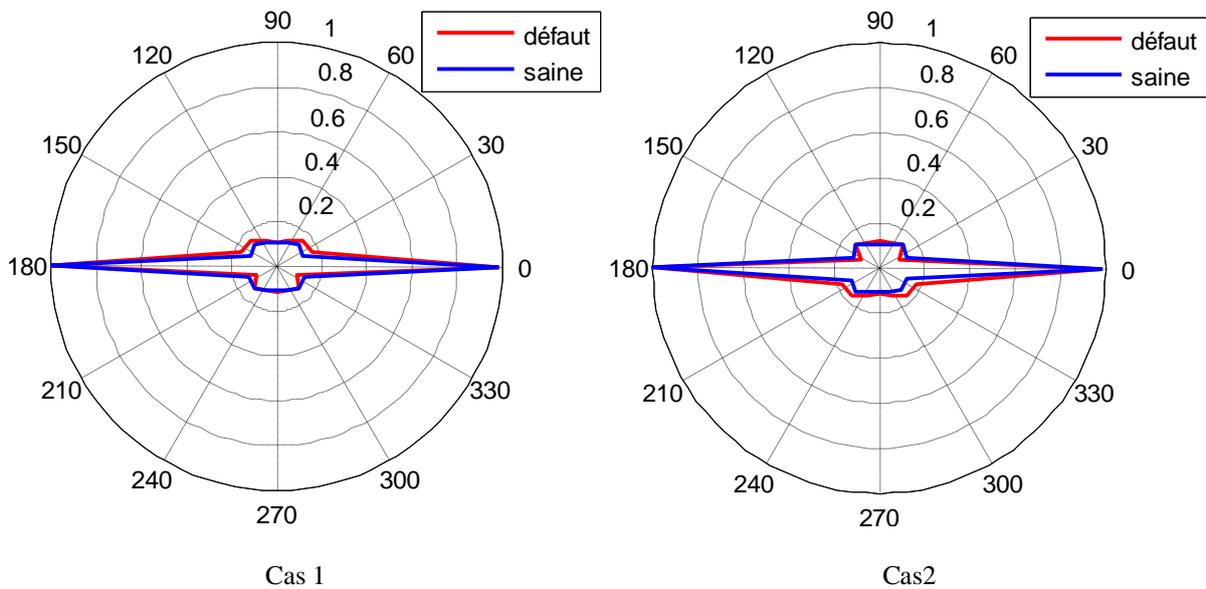


Figure IV.8 capteur à matrice réceptrice au-dessus d'une plaque de CFRP comporte une ondulation de fibres

Pour les quatre cas de défaut d'ondulation interne, les parties réelles de la variation d'impédance obtenues par le capteur sont représentées dans la figure IV.9, en les comparant à ceux obtenus dans le cas sain.



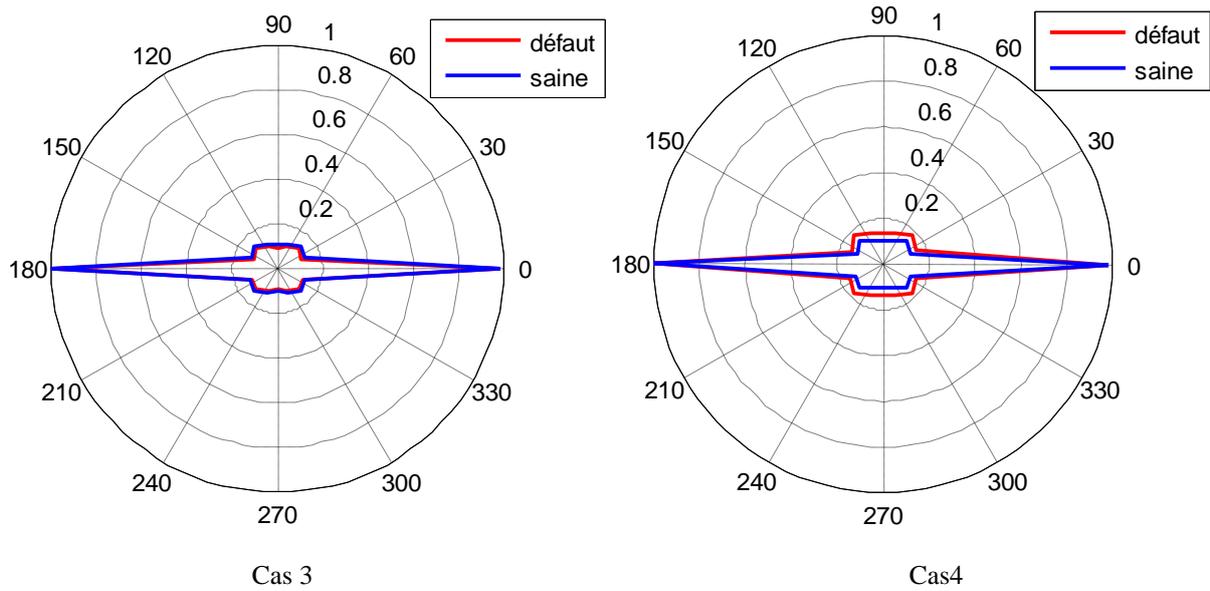


Figure IV.9. Diagrammes polaires détectés par la matrice réceptrice pour différents types d'ondulations de fibres

Les résultats montrent des petites modifications aux niveaux des signatures correspondant aux ondulations des fibres par rapport au cas sain. Ces modifications sont modestes et non significatives, et permettent difficilement d'affirmer l'existence de défaut d'ondulation. En conséquence, les résultats trouvés montrent que l'utilisation de la matrice interactive est plus efficace que la matrice réceptrice lorsque la détection et la caractérisation de défauts d'ondulation de fibres dans les CFRP unidirectionnels. Et l'efficacité de la matrice interactive grâce à sa propriété spéciale d'orthogonalité des signatures aux fibres qui suit la direction de l'ondulation.

IV.6. Synthèse entre les deux modèles de capteurs

Nous avons proposé deux capteurs basés l'utilisation des matrices de bobines pour caractériser les orientations de fibres et pour détecter les défauts, notamment l'ondulation interne de fibres dans les CFRP. Et à travers cette étude, nous avons vu que les deux capteurs peuvent caractériser l'orientation de fibres dans les CFRP unidirectionnels. Cependant, dans le cas des structures multidirectionnelles, le capteur à matrice réceptrice présente de meilleures performances que le capteur à matrice interactive. Par contre, lors la détection de défaut d'ondulation interne de fibre, nous avons trouvé que la matrice interactive à une grande sensibilité par rapport au capteur à matrice réceptrice.

Pour bénéficier en même temps des avantages du capteur à matrice interactive et celui à matrice réceptrice, on propose une synthèse de ces deux capteurs dans un seul dispositif. Ce qui donne une possibilité d'utiliser un seul capteur qui fonctionne à la fois comme matrice interactive et comme capteur à matrice réceptrice. Le schéma illustré dans la figure IV.10 montre l'assemblage des capteurs.

La forme circulaire des deux matrices de bobines aide à les intégrer dans un seul dispositif qui peut jouer les deux rôles de matrice interactive et de matrice réceptrice en même temps. De plus, aucune modification structurelle n'est nécessaire pour réaliser cette synthèse des deux capteurs, et l'intervention se fait uniquement sur le raccordement des bobines. Cette proposition permet d'améliorer les performances et garantir la qualité des informations recueillies sur les CFRP, soit en termes de caractérisation ou de détection de défauts d'ondulation interne de fibres.

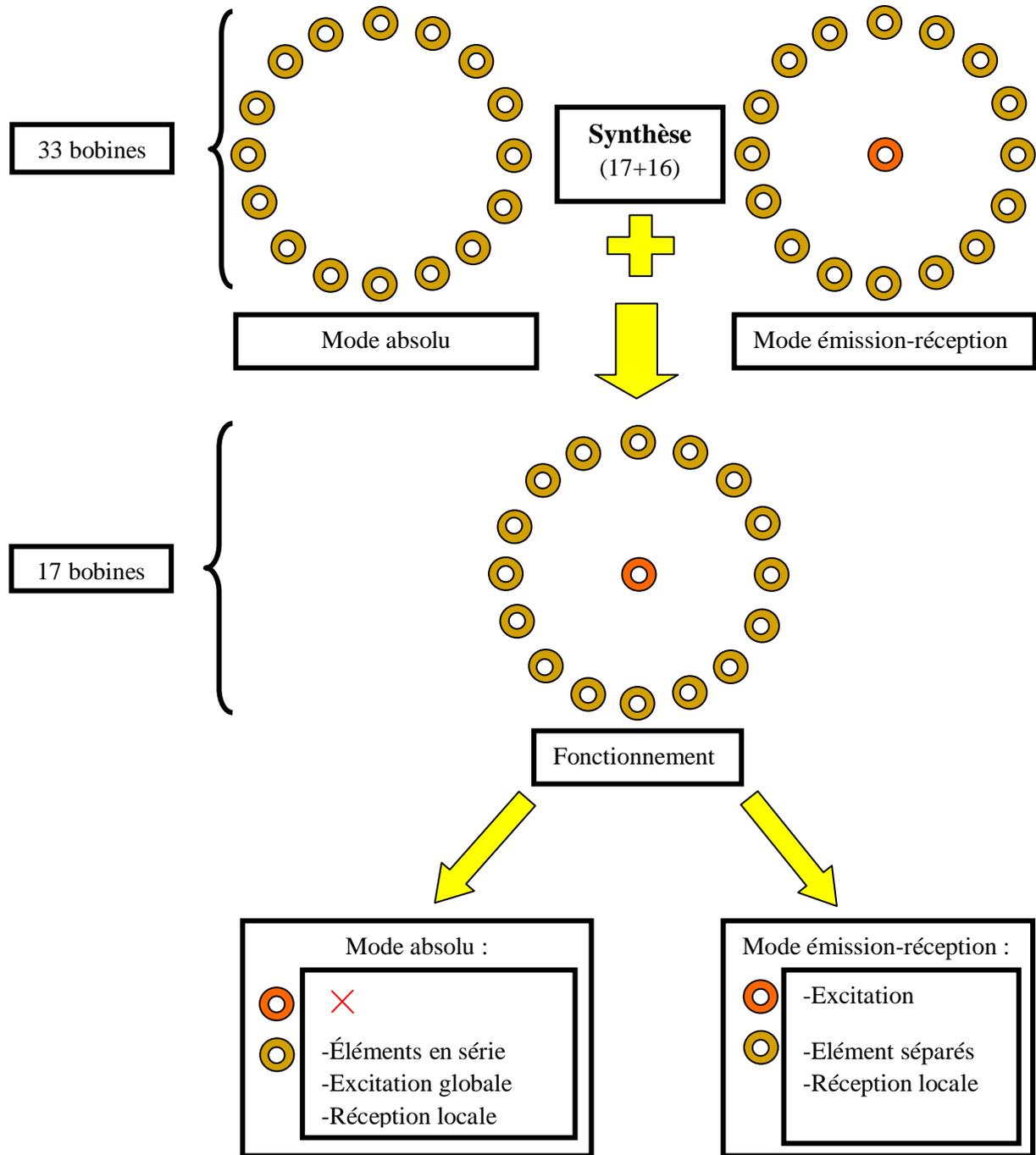


Figure IV.10. Synthèse entre les deux modèles de capteurs.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre a étudié la possibilité d'utiliser les capteurs des matrices de bobines proposés pour la détection de défauts d'ondulation interne de fibres dans les CFRP. Les simulations 3D par MEF ont montré que ces configurations ont la possibilité de détecter le type de défaut étudié en procédant à une mesure unique. En terme de sensibilité, nous avons vu que le capteur à matrice réceptrice fournit des signatures qui ne sont pas suffisamment claires pour indiquer l'existence de défaut d'ondulation, cependant, la matrice interactive présente une meilleure sensibilité à la détection des signatures de défauts.

A la fin du chapitre, et pour bénéficier des avantages jumelés des deux configurations, nous avons proposé un dispositif faisant la synthèse des deux configurations en mode absolu ou bien en mode émission-réception.

Conclusion Générale

Afin de garantir la fiabilité et le bon fonctionnement des équipements industriels, une partie importante de l'industrie consiste à assurer la caractérisation, l'évaluation des performances, le contrôle et la fiabilité de ces équipements. Plusieurs techniques sont utilisées dans ce cadre, et l'ECND-CF (Evaluation et Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault) y occupe une place de plus en plus importante à cause de ses avantages en termes de simplicité de mise en œuvre, d'écologie, de rapidité, de fiabilité et de précision. L'amélioration des dispositifs d'ECND destinés au contrôle et à la caractérisation des matériaux composites à fibres de carbone (CFRP) est l'une des préoccupations majeures des chercheurs et des industriels du domaine.

Nous avons développé, dans cette thèse, une étude sur quelques dispositifs d'ECND-CF destinés à la caractérisation et au contrôle de défauts des CFRP. Notre étude de l'état de l'art et notre recherche bibliographique nous ont orientés sur les capteurs inductifs rotatifs utilisés pour la détermination de l'orientation des fibres de carbone dans les CFRP. Nous avons alors noté les inconvénients introduits par la rotation mécanique des capteurs mécanique du capteur, qui nécessite, d'une part l'utilisation d'équipements supplémentaires pour créer l'entraînement en rotation, et d'autre part introduit des bruits de mesures supplémentaire, une instabilité du lift-off, des temps de mesures importants, Nous avons alors consacré notre travail au développement d'un capteur innovant pouvant assurer les tâches de caractérisation et de contrôle recherchés tout en palliant aux inconvénients que nous venons de citer.

Dans notre approche de simulation des dispositifs développés et étudiés, nous avons utilisé la méthode des éléments finis 3D dans l'environnement de calcul multi-physique ' Comsol multiphysics ' pour étudier les phénomènes électromagnétiques en jeu. Et pour valider les résultats obtenus par simulation, des mesures expérimentales ont été réalisées avec un capteur rotatif à deux bobines utilisé pour la caractérisation de l'orientation de fibres dans une plaque en CFRP.

Notre apport pour le remplacement des capteurs rotatifs est la proposition d'une matrice de bobines circulaire que nous avons développée selon deux technologies :

- Matrice interactive fonctionnant en mode absolu
- Matrice émettrice-réceptrice

Les deux dispositifs éliminent totalement la rotation mécanique, et nous les avons testés, tous les deux pour la caractérisation des CFRP d'une part, et pour l'inspection de défauts d'ondulation de fibres d'autre part.

En ce qui concerne la caractérisation de l'orientation de fibres des CFRP unidirectionnels, les deux capteurs proposés ont fourni des bons résultats. Cependant, pour les échantillons de CFRP multidirectionnels, le capteur à matrice émettrice-réceptrice fournit des signatures faiblement significative à l'inverse de la matrice interactive. Par contre, dans le cas de la détection de défauts d'ondulation, nous avons enregistré que le capteur à matrice interactive a une plus grande sensibilité à la détection et à la caractérisation de défauts par rapport au capteur à matrice réceptrice. Nous avons ainsi testé la sensibilité de la matrice interactive à des défauts où l'angle d'ondulation est inférieur à 3° .

Nous avons enfin émis l'idée de la synthèse des deux configurations de capteurs 'interactive' et 'émettrice-réceptrice' qui ne nécessite qu'une action sur la commande de l'alimentation des bobines, et qui permet de réunir les avantages présentés par ces deux configurations.

En perspective à cette thèse, nous nous proposons de :

- Monter le dispositif capteur de synthèse proposé ;
- étendre le travail pour l'adaptation et l'utilisation de ces nouveaux dispositifs de capteur à matrice circulaire pour la caractérisation des matériaux CFRP du point de vue de la conductivité, ainsi que pour la détection des autres types de défauts qui peuvent affecter ces matériaux

Bibliographies

- [1] Site : « <http://www.mistrasgroup.com/> »
- [2] Site : « <https://www.cinde.ca/ndt.phtml> »
- [3] J Rivenez, A Lambert, “Les contrôles non destructifs. Généralités”, 3ème édition revue et corrigée, CETIM, 1994.
- [4] H. K. BUI, “Contribution à la modélisation multiphysique des matériaux composites stratifiés, Application au CND thermo-inductif ”, Thèse de Doctorat. Université de Nantes 2014.
- [5] Site : « <https://www.cnde.iastate.edu/research/eddy-current-nde/> »
- [6] G.MOOK, F. MICHEL, J.SIMONIN, “ Electromagnetic imaging using probe arrays” 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- [7] G.MOOK, F.MICHEL, J.SIMONIN, “LOW FREQUENCY EDDY CURRENT ARRAYS WITH VIDEO CLOCK”, Peter ROST, BASF SE Ludwigshafen, Germany, Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany.
- [8] H.HEUER, M.H. SCHULZE, N. MEYENDORF, “High Resolution Inspection of Carbon Fiber Materials by Eddy Current Techniques”, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010.
- [9] Yusa N, Hashizume H, Urayama R, Uchimoto T. “an arrayed uniform eddy current probe design for crack monitoring and sizing of surface breaking cracks with the aid of a computational inversion technique”. NDT & E International, Vol 61:29–34; 2014.
- [10] MARCHAND, B., J.-M. DECITRE et O . CASULA, “Flexible and array eddy current probes for fast inspection of complex parts”, AIP Conference Proceedings, 1211(1), 385–392. (2010).
- [11] Site : « <http://www.icndt.org/> »
- [12] Site : « <https://www.cnde.iastate.edu/category/monthly-highlight/> »
- [13] K. Reber, A. Bönisch “INSPECTION OF UNUSUAL PIPE TYPES WITH EDDY CURRENT TECHNOLOGIES”, Innospection Germany GmbH, Stutensee, Germany and Innospection Ltd., Aberdeen, UK.
- [14] C. Laenen - Apave Nord-Ouest – France, M. Lugg - TSC Inspection Systems – UK “INSPECTION DES SOUDURES DE FOND DES RÉSERVOIRS AU MOYEN DE LA

TECHNIQUE ACFM AVEC SONDES MULTIÉLÉMENTS APPLICATION OF THE ACFM TECHNIQUE FOR THE INSPECTION OF STORAGE TANK FLOOR WELDS”

[15] B. Laine, “Inuence des déformations d'un renfort fibreux sur sa perméabilité : modélisations et expériences”, thèse de doctorat, Arts et Metiers ParisTech, 2008.

[16] Site : « <http://www.planebusiness.com/buzz/airbus2.pdf> »

[17] S. B. Pratap and W.F.Weldon, “Eddy Currents in Anisotropic Composites Applied to Pulsed Machinery”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 32, NO. 2, MARCH 1996.

[18] Y. Li, “Modélisation des phénomènes électromagnétiques caractérisant des structures composites complexes: Application à l'évaluation non destructive”, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2012.

[19] A. Briggs, “Review: Carbon fibre-reinforced cement”, Journal of Materials Science, Vol. 12, 384-404, 1977.

[20] Y. Hirano, T. Yamane , A. Todoroki , “Through-thickness electric conductivity of toughened carbon-fibre reinforced polymer laminates with resin-rich layers”, Composites Science and Technology vol.122 (2016) 67-72.

[21] J. Wen, Z. Xia, F. Choy, “Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement” Composites: Part B, vol 42, 77–86, (2011).

[22] R.D. Adams and P. Cawley, “A review of defect types and non-destructive testing techniques for composites and bonded joints”, NDT International, Vol 21, August 1988.

[23] E. ABDULLAH “Développement d'un élément fini pour la modélisation du délaminage dans les structures composites”, thèse de doctorat, 'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace de Toulouse, 2005.

[24] M Sayyar, P Soroushian and RR Weerasiri, “Evaluation of the prestressing effects on the fatigue life of composite box sections”, Journal of Composite Materials, Vol 48, 71-79, 2014.

[25] P. Patricia, B. Harald, B. Adriaan, “Residual stresses in thermoplastic composites e a study of the literature. Part III: effects of thermal residual stresses”, Composites: Part A;38:1581-96, 2007.

[26] K Danielle, M Tess J, “Identification of the most significant processing parameters on the development of fiber waviness in thin laminates”, J Compos Mater; 36(12):1451-79, 2002.

[27] K. Danielle, M. Tess J, “The effect of Mandrel material and tow tension on defects and compressive strength of hoop-wound, on-line consolidated, composite rings”, Composites: Part A; 33:861-76, 2002.

- [28] H. K. Bui , G. Wasselynck , D. Trichet , B. Ramdane , G. Berthiau , and J. Fouladgar, “3-D Modeling of Thermo Inductive Non Destructive Testing Method Applied to Multilayer Composite”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 49, NO. 5, 1949-1952, MAY 2013.
- [29] M. A. Ben Abdelwahed, Y. Wielhorski, L. Bizet and J. Bréard, “Bubble formation and transport in T-junction for application to Liquid Composite Molding: Wetting effect”, Journal of Composite Materials, Vol 48(1) 37–48, 2014.
- [30] Robert A. SMITH, S. MUKHOPADHYAY, A. LAWRIE and Stephen R. HALLETT, “Applications of ultrasonic NDT to aerospace composites”, 5th International Symposium on NDT in Aerospace, 13-15th November 2013, Singapore.
- [31] A. Todoroki and M. Ueda, “Low-cost delamination monitoring of CFRP beams using electrical resistance changes with neural networks”, Smart Mater. Struct. 15 (2006) N75–N84
- [32] K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki, Y. Suzuki, “Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing”, Composites Part B vol 86 (2016) 84-94.
- [33] J. Cheng, J. Qiu, T. Takagi, T. Uchimoto and Ning Hu, “Numerical analysis of correlation between fibre orientation and eddy current testing signals of carbon-fibre reinforced polymer composites”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 39 (2012) 251–259.
- [34] H. Menana and M. Féliachi, “Modeling the response of a rotating eddy current sensor for the characterization of carbon fiber reinforced composites”, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 52, 23304 (2010).
- [35] R. PRAKASH and C. N. OVVSTON, “Eddy-current method for the determination of lay-up order in cross-ply crfp laminates”, COMPOSITES. APRIL 1976.
- [36] J. Cheng, H. Ji, J. Qiu, T. Takagi , T. Uchimoto , N. Hu, “Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method”, NDT&E International vol 68(2014)1–12
- [37] W Yin, X Li, P J Withers and A J Peyton, “Non-contact characterization of hybrid aluminium/carbon-fibre-reinforced plastic sheets using multi-frequency eddy-current sensors”, Meas. Sci. Technol. 21 (2010) 105708 (7pp).
- [38] K. Mizukami, Y. Mizutani, K. Kimura, A. Sato, A. Todoroki, Y. Suzuki, “Detection of in-plane fiber waviness in cross-ply CFRP laminates using layer selectable eddy current method”, Composites: Part A vol 82 (2016) 108–118.

- [39] C. Schmidt, C. Schultz, P. Weber, B. Denkena, “Evaluation of eddy current testing for quality assurance and process monitoring of automated fiber placement”, *Composites: Part B* 56 (2014) 109–116.
- [40] G. Bardl, A. Nocke, C. Cherif, M. Pooch, M. Schulze, H. Heuer, M. Schiller, R. Kupke, M. Klein, “Automated detection of yarn orientation in 3D-draped carbon fiber fabrics and preforms from eddy current data”, *Composites Part B* vol 96 (2016) 312-324.
- [41] Team Workshop Pb 15, Rectangular Slot in a Thick Plate : a Problem In Nondestructive Evaluation, www.compumag.co.uk/problems/problem15.pdf
- [42] E. Cardelli, A. Faba, R. Specogna, A. Tamburrino, F. Trevisan, S. Ventre, “Analysis Methodologies and Experimental Benchmarks for Eddy Current Testing”, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 41, No. 5, May 2005, pp. 1380-1383.
- [43] O. BIRO AND K. PREIS, “On the Use of the Magnetic Vector Potential in the Finite Element Analysis of Three-Dimensional Eddy Currents”, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL 25. NO 4. JULY 1984, 3145-3159.
- [44] F. Bouillault, Z. Ren, and A. Razek, “Calculation of 3D eddy current problems by an hybrid (T-phi) method”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, no. 2, pp. 478–481, Mar. 1990.
- [45] M. FELIACHI, “Contribution au calcul du champ électromagnétique par la méthode des éléments finis en vue d’une modélisation dynamique de machines électriques”, Thèse de docteur d’ingénieur, Conservatoire des arts et métiers Paris, 1981.
- [46] W. Cheng, S. Kanemoto, I. Komura, “Numerical Evaluation of the Depth of Branched-Off Cracks Using Eddy Current Testing Signals”, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 44, No. 6, June 2008.
- [47] Y. L. BIHAN, “Conception et caractérisation d’un dispositif à courants de Foucault pour l’évaluation non destructive de l’épaisseur de paroi d’aubes de turbines creuses”, Thèse de doctorat, Ecole Normale supérieure de Cachan, 2000.
- [48] Summer scales J, “Non-destructive testing of fibre-reinforced plastics composites”. Vol. 2, Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [49] R. Grimberg, A. Savin, R. Steigmann, and A. Bruma, “Eddy current examination of carbon fibres in carbon-epoxy composites and kevlar,” 8th Int. Conf. Slovenian Soc. Non-Destructive Testing, Portoroz, Slovenia, Sep. 1–3, 2005, pp. 223–228.
- [50] J. Cheng, H. Ji, J. Qiu, T. Takagi, T. Uchimoto and N. Hu, “Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals”, *Journal of Composite Materials*, 1–15 (2014)

- [51] M Lu, S. Manuchehr, “Hidden defect identification in carbon fibre reinforced polymer plates using magnetic induction tomography”. *Meas Sci Technol* 2014;25.
- [52] A. Gillet, P. Olivier, A. Al Maghribi et I. El Sawi, “Prédiction des propriétés électrique d'un composite aéronautique Prediction of electrical properties of an aeronautic composite”, JNC16, Toulouse : France (2009).
- [53] A. Piche, I. Revel and G. Peres, “Experimental and Numerical Methods to Characterize Electrical Behaviour of Carbon Fiber Composites Used in Aeronautic Industry”, EADS Innovation Works France.
- [54] Wuliang Yin, Philip J. Withers, Umesh Sharma, and Anthony J. Peyton, “Noncontact Characterization of Carbon-Fiber-Reinforced Plastics Using Multifrequency Eddy Current Sensors”, *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, VOL. 58, NO. 3, MARCH 2009.
- [55] T. Griesbach, M. C. Wurz, and L. Rissing, “Modular Eddy Current Micro Sensor”, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, pp 3760-3763 VOL. 47, NO. 10, OCTOBER 2011.
- [56] B. Helifa, M. Féliachi, I. K. Lefkaier, F. Boubenider, A. Zaoui, and N. Lagraa, “Characterization of Surface Cracks Using Eddy Current NDT Simulation by 3D-FEM and Inversion by Neural Network”, *APPLIED COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS SOCIETY JOURNAL*, February 2016, Vol. 31 No. 2
- [57] N. IDA and W. LORD, “A Finite Element Model for Three-Dimensional Eddy Current NDT Phenomena”, *IEEE Trans. on Magnetics*, MAG-21(6), pp. 2635-2643, 1985
- [58] H. MENANA, “MODÉLISATION 3D SIMPLIFIÉE POUR L'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DES MATÉRIAUX COMPOSITES ANISOTROPES”, Thèse de Doctorat, université de Nantes, 2009.
- [59] J. R. Bowler, L. D. Sabbagh, H. A. Sabbagh, “A theoretical and computational model of eddy-current probes incorporating volume integral and conjugate gradient methods”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, no 3, pp. 2650-2664, May 1989.
- [60] A. Trillon, “Reconstruction de défauts à partir de données issues de capteurs à courants de Foucault avec modèle direct différentiel”, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2010.
- [61] Y. CHOUA, “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 XI, 2009.
- [62] Bouloudenine A, Feliachi M and Latreche M, “Development of circular arrayed eddy current sensor for detecting fibers orientation and in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP”. *NDT and E International* 2017;92: 30–37.

- [63] G. Mook, R. Lange and O. Koeser, “Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents”, *Composites Science and Technology* Vol 61 (2001) 865-873.
- [64] M.P.F. Sutcliffe, S.L. Lemanski, A.E. Scott, “Measurement of fibre waviness in industrial composite components”, *Compos Sci Technol*, 72 (2012) 2016-2023.
- [65] Mrse AM, Piggott MR, “Compressive properties of unidirectional carbon fibre laminates: II. The effects of unintentional and intentional fibre misalignments”, *Compos Sci Technol* 1993;46:219-27.
- [66] K. Mizukami, Y. Mizutani, K. Kimura, A. Sato, A. Todoroki, Y. Suzuki , Y.Nakamura, “Visualization and size estimation of fiber waviness in multidirectional CFRP laminates using eddy current imaging”, *Composites: Part A* 90 (2016) 261–270.
- [67] H. Heuer, M. Schulze, M. Pooch, S. Gabler, A. Nocke, G. Bardl, Ch. Cherif, M. Klein, R. Kupke , R. Vetter, F. Lenz, M. Kliem, C. Bülow, J. Goyvaerts, T.Mayer, S. Petrenz, “Review on quality assurance along the CFRP value chain e Non destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques”, *Composites Part B* 77 (2015) 494-501.
- [68] A. Bouloudenine, M. E. H. Latreche, and M. Féliachi, “Study of the impact of the CFRPs fibers waviness angle on the response of an arrayed EC-NDT sensor”, *Ci5, 5^{ème} Colloque inductique*, Oran, Algérie, pp 62-63, 13-14 Décembre, 2017.

Production personale

- 1- Abderraouf Bouloudenine, Mohamed El Hadi Latreche Abdallah Belounis and Nacir Boutra. "An Optimal Design of the Eddy Current Non-Destructive Testing Sensor for Special Geometries of Conducting Materials". International Journal of Engineering Research and Applications 2104, Vol 04, Issue 06 (version 5), pp101-105, June 2014.
<http://www.ijera.com/>
- 2- Bouloudenine A, Feliachi M and Latreche M. "Development of circular arrayed eddy current sensor for detecting fibers orientation and in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP". NDT & E International 2017, Vol. 92, pp. 30–37, July 2017.
DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.07.011
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869516301839>
- 3- A.Bouloudenine, M.E.Latreche and A.Belounis, "Localization of eddy current distribution in CFRP by EC-NDT ferrite core probe", ISEF 2013, XVI International symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Ohrid, Macedonia, 12-14 September 2013.
- 4- A.Bouloudenine, M.E.Latreche and A.Belounis, "Study of 3D Eddy Currents distribution of carbon fiber reinforced polymers", CGE08, le 8^{ème} Conférence sur le Génie électrique, EMP, Algérie, pp 67. 16-17 Avril, 2013.
- 5- A.Bouloudenine and M.E.Latreche, "Contribution In Eddy Current Non destructive Testing of carbon fiber reinforced polymers", Ci3, 3^{ème} Colloque inductique, Tizi-Ouzou, Algérie, pp 31-32, 24-25 Avril, 2013.
- 6- A.Bouloudenine, M.E.Latreche and M.Feliachi, "Fast detection of the fibers orientation in the composites materials by using an eddy current non-destructive testing sensor ", Ci4, 4^{ème} Colloque inductique, Jijel, Algérie, 10-11 Juin, 2015.
- 7- A.Bouloudenine, M.E.Latreche and M.Feliachi, "Study of the impact of the CFRPs fibers waviness angle on the response of an arrayed EC-NDT sensor", Ci5, 5^{ème} Colloque inductique, Oran, Algérie, pp 62-63, 13-14 Décembre, 2017.

ملخص

يلعب الإختبار دوراً أساسياً في سلامة ونوعية وموثوقية الأنظمة الصناعية . في هذه الأطروحة، تم تصميم جهازي إستشعار و اللذان يعتمدان على تقنية التيارات المستحثة لوصف اتجاه ألياف الكربون، و الكشف عن تموجها في المواد المركبة .
تعتمد مبادئ أجهزة الإستشعار المقترحة على تطوير أجهزة الإستشعار الدوارة التقليدية وهذا من خلال إستعمال عدد من الوشائع في شكل مصفوفات دائرية. هذه الفكرة تسمح بالقضاء على الدوران الميكانيكي و الذي بدوره يوفر عدة مزايا، نذكر منها على سبيل المثال : سرعة الفحص والدقة والحصول على أجهزة ذات أحجام صغيرة . جهاز الإستشعار الأول عبارة عن مصفوفة تفاعلية، والتي تعتمد على تحليل صورة التيارات الحثية المتفاعلة فيما بينها على مستوى القطعة . إلا أن الجهاز الثاني يستخدم طريقة الإرسال والإستقبال . و للإستفادة من مزايا الجهازين في نفس الوقت، إقترحنا دمج الإثنين في جهاز واحد . خلال المحاكاة إستخدمنا طريقة العناصر المنتهية في المعلم ثلاثي الأبعاد « كومسول ميلتيفيزيكس » لدراسة الظواهر الكهرومغناطيسية . و للتحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة، أجرينا عملية تجريبية أكدت صحة الطريقة المتبعة.

الكلمات المفاتيح : إختبار غير مدمر بالتيارات الدوامة ، توصيف ، المواد المركبة المقواة بالألياف الكربونية ،العناصر المنتهية، تباين، تموج الألياف.

Résumé

Le contrôle non destructif joue un rôle essentiel de sécurité, de qualité et de la fiabilité des systèmes industriels. Dans cette thèse, deux capteurs de courants de Foucault sous forme des matrices de bobines ont été conçus pour caractériser l'orientation des fibres, détectant ainsi les défauts d'ondulation interne de fibres dans les CFRP. Les principes des capteurs proposés sont basés sur ceux des capteurs conventionnels tournants. Nos propositions permettent l'élimination de la rotation mécanique, ce qui offre des avantages en termes de rapidité d'inspection, de précision et de la miniaturisation. La fonctionnalisation du premier capteur est basée sur le mode absolu, cependant le deuxième utilise le mode émission-réception. Pour bénéficier en même temps des avantages du capteur à matrice interactive et celui à matrice réceptrice, nous avons proposé une synthèse de ces deux capteurs dans un seul dispositif. Ce qui donne une possibilité d'utiliser un seul capteur qui fonctionne à la fois comme matrice interactive et comme capteur à matrice réceptrice. Nous avons utilisé la méthode des éléments finis 3D dans l'environnement de calcul multi-physique 'Comsol multiphysics' pour étudier les phénomènes électromagnétiques en jeu. Et pour valider les résultats obtenus par simulation, des mesures expérimentales ont été réalisées avec un capteur rotatif à deux bobines utilisé.

Mots clés: Contrôle non destructif par courants de Foucault, caractérisation, matériaux composites à fibre de carbone, éléments finis 3D, anisotropie, ondulation des fibres.

Abstract

Non Destructive Testing plays an essential role in safety, quality and the reliability of industrial systems. In this thesis, two eddy current sensors designed form several coils that are placed in array form to characterize fiber orientation and for detecting in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP. The principles of the proposed sensors are based on those of conventional rotating sensors. Our proposals allow the elimination of mechanical rotation, which offers advantages of speed of inspection, precision and miniaturization. The first sensor is based on the absolute mode; however the second uses the transmission-reception mode. To benefit at the same time from the advantages of the interactive arrayed sensor and the receiving arrayed sensor, we have proposed a synthesis of these two sensors in a single device. This gives a possibility to use a single sensor that functions both as an interactive arrayed sensor and as a receiving arrayed sensor. We are used the 3D finite elements method in 'Comsol multiphysics' environment to study the electromagnetic phenomena. To validate the results obtained by simulation, experimental measurements were carried-out in the case of two coils sensor.

Key words: Eddy currents non-destructive testing, characterization, carbon fiber reinforced polymer, 3D finite element, anisotropy, fiber waviness.

ملخص:

يلعب الإختبار دوراً أساسياً في سلامة ونوعية وموثوقية الأنظمة الصناعية في هذه الأطروحة، تم تصميم جهازي إستشعار و اللذان يعتمدان على تقنية التيارات المستحثة لوصف اتجاه ألياف الكربون ، و الكشف عن تموجها في المواد المركبة . تعتمد مبادئ أجهزة الإستشعار المقترحة على تطوير أجهزة الإستشعار الدوارة التقليدية وهذا من خلال إستعمال عدد من الوشائع في شكل مصفوفات دائرية. هذه الفكرة تسمح بالقضاء على الدوران الميكانيكي و الذي بدوره يوفر عدة مزايا، نذكر منها على سبيل المثال : سرعة الفحص والدقة والحصول على أجهزة ذات أحجام صغيرة. جهاز الإستشعار الأول عبارة عن مصفوفة تفاعلية، والتي تعتمد على تحليل صورة التيارات الحثية المتفاعلة فيما بينها على مستوى القطعة . إلا أن الجهاز الثاني يستخدم طريقة الإرسال والإستقبال . و للإستفادة من مزايا الجهازين في نفس الوقت، إقترحنا دمج الإثنين في جهاز واحد . خلال المحاكاة إستخدمنا طريقة العناصر المنتهية في المعلم ثلاثي الأبعاد في « كومسول ميليتيفيزيكس » لدراسة الظواهر الكهرومغناطيسية. و للتحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة، أجرينا عملية تجريبية أكدت صحة الطريقة المتبعة.

الكلمات المفاتيح : إختبار غير مدمر بالتيارات الدوامة ، توصيف ، المواد المركبة المقواة بالألياف الكربونية ، العناصر المنتهية، تباين، تموج الألياف.

Résumé:

Le contrôle non destructif joue un rôle essentiel de sécurité, de qualité et de la fiabilité des systèmes industriels. Dans cette thèse, deux capteurs de courants de Foucault sous forme des matrices de bobines ont été conçus pour caractériser l'orientation des fibres, détectant ainsi les défauts d'ondulation interne de fibres dans les CFRP. Les principes des capteurs proposés sont basés sur ceux des capteurs conventionnels tournants. Nos propositions permettent l'élimination de la rotation mécanique, ce qui offre des avantages en termes de rapidité d'inspection, de précision et de la miniaturisation. La fonctionnalisation du premier capteur est basée sur le mode absolu, cependant le deuxième utilise le mode émission-réception. Pour bénéficier en même temps des avantages du capteur à matrice interactive et celui à matrice réceptrice, nous avons proposé une synthèse de ces deux capteurs dans un seul dispositif. Ce qui donne une possibilité d'utiliser un seul capteur qui fonctionne à la fois comme matrice interactive et comme capteur à matrice réceptrice. Nous avons utilisé la méthode des éléments finis 3D dans l'environnement de calcul multi-physique ' Comsol multiphysics ' pour étudier les phénomènes électromagnétiques en jeu. Et pour valider les résultats obtenus par simulation, des mesures expérimentales ont été réalisées avec un capteur rotatif à deux bobines utilisé.

Mots clés: Contrôle non destructif par courants de Foucault, caractérisation, matériaux composites à fibre de carbone, éléments finis 3D, anisotropie, ondulation des fibres.

Abstract:

Non Destructive Testing plays an essential role in safety, quality and the reliability of industrial systems. In this thesis, two eddy current sensors designed form several coils that are placed in array form to characterize fiber orientation and for detecting in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP. The principles of the proposed sensors are based on those of conventional rotating sensors. Our proposals allow the elimination of mechanical rotation, which offers advantages of speed of inspection, precision and miniaturization. The first sensor is based on the absolute mode; however the second uses the transmission-reception mode. To benefit at the same time from the advantages of the interactive arrayed sensor and the receiving arrayed sensor, we have proposed a synthesis of these two sensors in a single device. This gives a possibility to use a single sensor that functions both as an interactive arrayed sensor and as a receiving arrayed sensor. We are used the 3D finite elements method in 'Comsol multiphysics' environment to study the electromagnetic phenomena. To validate the results obtained by simulation, experimental measurements were carried-out in the case of two coils sensor.

Key words: Eddy currents non-destructive testing, characterization, carbon fiber reinforced polymer, 3D finite element, anisotropy, fiber waviness.