

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI, TIZI-OUZOU



FACULTÉ DU GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Filière : **Génie Electrique**

Spécialité : **Modélisation et conception des systèmes électromagnétiques**

Présentée par :

MAHMOUDI Thinhinane

Sujet :

**CARACTERISATION DES MATERIAUX COMPOSITES PAR LA TECHNIQUE
NON DESTRUCTIVE DES COURANTS DE FOUCAULT**

Devant le jury d'examen composé de :

Mr. RACHEK M'Hemed	Professeur	UMMTO	Président
Mme. MOHELLEBI Zehor Epse OUDNI	MCA	UMMTO	Rapporteur
Mr. AOUZELLAG Djamel	Professeur	Université de Bejaia	Examineur
Mr. BOUHERAOUA Mustapha	Professeur	UMMTO	Examineur
Mr. HEDIR Abdallah	MCA	UMMTO	Examineur
Mme. GABI Yasmine	Dr. Eng	Fraunhofer Institut, IZFP Allemagne	Invitée

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Le présent travail est réalisé au sein du département d'Électrotechnique relevant de la faculté du génie électrique et informatique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et profonde gratitude à Madame MOHELLEBI épouse OUDNI Zehor, ma directrice de thèse, pour toute son aide, disponibilité, conseils, partage de connaissances, soutiens et détermination pour la réussite de ce projet d'étude.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Jinyi Lee, professeur à l'université de Chosun, pour toute son aide.

J'exprime ma gratitude envers Messieurs les membres du jury :

M. RACHEK M'Hemed, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ;

M. AOUZELLAG Djamel, Professeur à l'université de Bejaia ;

M. BOUHERAOUA Mustapha, Professeur l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ;

M. HEDIR Abdallah, Maitre de Conférences classe A, à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Pour l'intérêt manifesté en acceptant de faire partie du jury.

J'adresse ma reconnaissance à madame Yasmine GABI, invitée, Docteur au Fraunhofer Institute, IZFP Allemagne d'avoir accepté notre invitation.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Hassane MOHELLEBI, Professeur à l'UMMTO, responsable de la formation doctorale en modélisation et conception des systèmes électromagnétiques, de nous avoir formé de l'entraînement électrique jusqu'à la modélisation, d'avoir partagé tant de savoir et connaissances.

Mes remerciements vont également pour le docteur TOUAT, chirurgien à l'établissement hospitalier spécialisé en cancérologie, celui sans qui je n'aurai continué cette thèse, merci de m'avoir soigné et remise sur pied pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont encore aux responsables et ensemble du personnel du rectorat, du département d'électrotechnique de la faculté du génie électrique, et au personnel de la bibliothèque en particulier.

Je remercie ma maman, mon frère Mani et sa famille, ainsi que mon mari pour m'avoir apporté confort et soutien tout au long de ces années d'études.

Résumé

Titre de la thèse :

“Caractérisation des matériaux composites par la technique non-destructive des courants de Foucault”

La méthode du Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault (CND-CF) s’applique sur les matériaux électriquement conducteurs et est basée sur l’interaction entre une source de champ magnétique (bobine) et un matériau conducteur.

Les matériaux composites, en particulier à fibres de carbone CFRP, électriquement conducteur font l’objet principal de notre étude. Ils se caractérisent non seulement par leurs légèretés, mais aussi leurs robustesses et coût de revient, chose particulièrement intéressante lorsque le gain en masse tout en ayant de bonnes caractéristiques est recherché.

Toutefois, ces matériaux présentent des défauts introduits soit lors du processus de fabrication (porosités, délaminage...) ou lors de la mise en service, il est donc impératif de mesurer ces défauts dans le but d’en garantir la fiabilité et la sûreté. Le présent travail s’inscrit dans cette optique et dont le principal objectif est de caractériser les matériaux composites par la technique non-destructive des courants de Foucault.

La méthode de résolution à laquelle on a eu recours se trouve être la méthode des éléments finis stochastique intrusive permettant le traitement et post-traitement du problème en une seule étape, comparaison de la variation d’impédance obtenue avec les valeurs expérimentales.

Mots-clés : matériaux composites, CFRP, CND-CF, stochastique, éléments finis, méthodes numériques, contrôle non-destructif, MEFSI, fiabilité, impédance

Abstract:

Thesis title:

“Characterization of composite materials by the non-destructive eddy current technique.”

Non-Destructive Testing by Eddy Current (NDT-EC) is applied to electrically conductive materials and is based on the interaction between a magnetic field source (coil) and a conductive material.

Composite materials, in particular carbon fiber CFRP, electrically conductive are the main subject of our study. They are characterized not only by their lightness but also their robustness and cost, something particularly interesting when the gain in mass while having good characteristics is sought. However, these materials present defects introduced either during the manufacturing process (porosities, delamination...) or during the commissioning, it is thus imperative to measure these defects in order to guarantee their reliability and safety. The present work is part of this perspective, and its main objective is to characterize composite materials by the non-destructive technique of eddy currents.

The method of resolution to which we have resorted is the method of intrusive stochastic finite elements allowing the treatment and post-processing of the problem in a single step, comparison of the variation of impedance obtained with the experimental values.

Key words: Composite materials, CFRP, CND-CF, stochastic, finite elements, numerical methods, non-destructive testing, MEFSI, reliability, impedance.

Table des matières

Table des matières	4
Introduction générale	8
Chapitre I Matériaux composites	11
I. Introduction	12
II. Matériaux composites	13
II.1 Définition.....	13
II.2 Constituants des matériaux composites.....	14
II.2.1 Les renforts.....	14
II.2.2 Les matrices.....	16
III. Classification des matériaux composites	19
III.1 Classification basée sur le type de matrice.....	19
III.2 Classification basée sur le type de renfort.....	20
III.3 Classification basée selon l'échelle	20
IV. Architecture des matériaux composites	20
IV.1 Composites monocouches	21
IV.2 Composites sandwiches.....	21
IV.3 Composites stratifiés	22
IV.3.1 Identification des stratifiés	23
V. Processus de fabrication d'un matériau composite	25
V.1 Les constituants élémentaires et semi-produits du matériau composite.....	25
V.2 Matière première et composés des matrices	25
V.3 Matière première et composés des renforts	26
V.4 Mise en forme des composites	27
V.4.1 Mise en forme des composites à matrice organique.....	27
V.4.2 Mise en forme des composites à matrices céramique et métalliques	29
VI. Propriétés physiques des matériaux composites	30
VII. Défauts des matériaux composites	31
VIII. Conclusion	32
Chapitre II Méthodes CND	34
I. Introduction.....	35
II. Contrôle non-destructif. Historique et définition ..	36
III. Objectif du CND (Non Destructive Testing "NDT").....	38
IV. Principe général de détection de défauts	39
V. Les procédés CND et choix de la méthode	39
V.1. Procédés optiques	40
V.1.1 Examens visuels (Visual Testing "VT")	40
V.1.2 Interférométrie holographique (Holographic Interferometry "HI").....	40
V.1.3 Contrôle laser, shearographie (Shearography Testing "ST").....	41

V.1.4	Thermographie infrarouge (Infrared thermography testing “IRT”).....	42
V.2.	Ressuage (Liquid penetrant testing “PT”).....	43
V.3.	Procédés magnétiques	44
V.3.1	Analyse du bruit de Barkhausen (Barkhausen Noise Analysis “BNA”).....	44
V.3.2	Magnétoscopie (Magnetic particle inspection “MT”).....	45
V.4.	Procédé par rayonnements ionisants	45
V.4.1	Radiographie par rayons X, (Radiographic Testing “RT”).....	45
V.4.2	Tomographie X (X Computed tomographie “XCT” Scan).....	46
V.5.	Procédés vibrations mécaniques : ultrason (Ultrasonic Testing “UT”).....	48
V.6.	Procédés Électromagnétiques	50
V.6.1	Courants de Foucault (Eddy Current testing “ECT”).....	50
V.6.1.1	Principe du contrôle non-destructif par courants de Foucaults conventionnels.....	52
V.6.1.2	Courants de Foucault pulsés (Pulsed Eddy Current “P.E.C”).....	55
V.6.1.3.	Courants de Foucault multiéléments (Eddy Current Array, “E.C. A”).....	56
V.6.1.4.	Courants de Foucault tangentiels (Tangential Eddy Current “T.E.C”).....	56
V.6.1.5	Différents types de capteurs	57
V.6.1.6	Plan d’impédance normalisée	58
V.6.1.7	Modes d’excitations	60
V.6.2	Imagerie par courants de Foucault	61
VI.	Conclusion :	61
Chapitre III Modélisation numérique		63
I.	Introduction.....	64
II.	Méthodes numériques.....	65
II-1.	Méthode des différences finies	65
II-2.	Méthode des éléments de frontière.....	66
II-3.	Méthode des volumes finis.....	66
II-4.	Méthode des éléments finis	66
II.4.1.1	Approximation par éléments finis	67
II.4.1.2	Formulation éléments finis des équations électromagnétiques	68
II.4.1.3	Conditions aux limites	69
III.	Méthode des éléments finis stochastiques.....	70
III-1.	Théorie probabiliste.....	70
III.1.1.	Généralités.....	71
III.1.2.	Variable aléatoire.....	71
III.1.3.	Quelques lois de probabilité	72
III.1.4.	Polynômes d’Hermite	73

IV.	Formulation élément finis stochastiques	75
IV.1.	Chaos polynomial	75
IV.2.	Approximation par des polynômes de variables aléatoires gaussiennes.....	76
IV.3.	Méthodes éléments finis stochastiques non-intrusives.....	77
IV.4.	Méthodes éléments finis stochastiques intrusives	78
IV.5.	Eléments finis stochastique en électromagnétisme	79
IV.5.1.	Formulation du problème déterministe (cas magnétostatique)	79
IV.5.1.	Formulation du problème stochastique.....	80
IV.5.2.1.	Distribution dans la base des polynômes d’Hermite	80
IV.5.2.2.	Construction du modèle électromagnétique stochastique	80
IV.5.2.3.	Le modèle électromagnétique associé au chaos polynomial.....	81
V.	Conclusion.....	83
Chapitre IV Application et résultats.....		84
I.	Introduction.....	85
II.	Equation électromagnétique déterministe.....	86
II.1.	Formulation du tenseur de conductivité	87
II.2.	Expression de la conductivité électrique aléatoire	88
II.3.	Poste traitement	90
II.4.	La variation d’impédance	90
II.5.	L’indice de fiabilité β	90
III.	Organigramme de la résolution du problème stochastique sous Matlab.....	91
IV.	Application 1 : caractérisation et évaluation de défauts sur l’Inconel 600	92
IV.1.	Description du problème, matériau et matériel utilisé :	92
IV.1.1.	Description du problème :	92
IV.1.2.	Description du matériau utilisé	92
IV.1.3.	Description du matériel utilisé	93
IV.2.	Résolution du problème	93
IV.2.1.	Description du dispositif	93
IV.2.2.	Propriétés physiques et paramètres du dispositif d’étude	93
IV.2.3.	Maillage du domaine.....	94
IV.2.4.	Le potentiel vecteur magnétique A	95
IV.2.5.	Variation de l’impédance Z pour les trois solutions stochastiques.....	95
IV.2.6.	Comparaison du delta Z issu de la MEFSI et de l’expérimentale.....	96
IV.2.7.	Variation d’impédance pour différents écart-types.....	96

V.	Application 2 : caractérisation et évaluation de défauts sur un composite à fibre de carbone CFRP	97
V.1.	Description du matériau utilisé.....	97
V.1.1.	Description du dispositif	97
V.1.2.	Paramètres liés au problème étudié	98
V.1.3.	Conductivité électrique et orientation de fibres pour le CFRP	98
V.1.4.	Mesures expérimentales de référence.....	99
V.2.	Résultats issus des simulations pour 150 KHZ	99
V.2.1.	Comparaison entre l'impédance résultant du calcul stochastique et des données expérimentales	99
V.2.2.	Comparaison de la variation de l'impédance pour différents écart-types.....	99
V.2.3.	Représentation de partie réelle de la variation d'impédance.....	100
V.2.4.	Indice de fiabilité.....	100
V.3.	Résultats pour une fréquence de 300 KHZ	101
V.3.1.	Variation des trois impédances.....	101
V.3.2.	Variation des impédances lors du déplacement du capteur.....	101
V.3.3.	Variation de l'impédance pour différents écart-types	102
V.4.	Evaluation de la variation de l'impédance en fonction du lift-off.....	102
V.5.	Représentation de la conductivité selon les axes lors du déplacement	103
VI.	Conclusion	104
	Conclusion Générale	106
	Travaux de recherches réalisés	108
	Références	109

INTRODUCTION GENERALE

La diversification des besoins industriels, l'évolution en continu du monde de l'ingénierie et de la recherche scientifique en quête de nouveautés et de progrès dans des domaines aussi variés que l'aérospatial, l'aéronautique, l'automobile, ou encore le génie médical a ouvert la voie au développement. De nouveaux matériaux à la fois robustes et légers, parfois même nés d'un recyclage ou combinés, et dont les performances seraient plus grandes que le matériau original prit seul. Ainsi, depuis leurs avènements jusqu'à ce jour, ils ne cessent d'attiser curiosité et intérêt grandissant de la part de la communauté scientifique et des industries devenant en seulement quelques années une classe majeure d'éléments avancés, surpassant tous leurs prédécesseurs. Ils sont considérés comme substituts de métaux et matériaux traditionnels grâce à leurs caractéristiques spécifiques, robustesses, légèretés et bien d'autres avantages, ce sont les « matériaux composites ».

Obtenu à partir de la combinaison de plusieurs matériaux de nature différente, et constitués de matrices et de renforts, les matériaux composites peuvent être retrouvés selon une multitude de variétés [XQin21].

Pour des performances aussi élevées et des domaines d'applications aussi critiques que l'aérospatial, dont la sûreté et fiabilité sont primordiales, il est nécessaire de contrôler l'état de ces matériaux, et d'en détecter au plus tôt les défauts qui peuvent survenir lors du processus de fabrication, ou durant leurs cycles de vie. Une place importante sera donc donnée à de nombreuses études visant la caractérisation [Win13], détection et prévision des défauts par des techniques dites non-destructives permettant l'investigation de l'état de santé d'un matériau, pièce, sans les altérer. Pour ce faire, il existe de multiples techniques et procédés de contrôle non-destructif (CND) (adaptés au type de composites à étudier), pouvant fournir des informations liées à l'état de santé de pièces, matériaux ou structures sans les altérer pour en assurer l'intégrité allant de la conception jusqu'à la maintenance. Il s'agit de l'examen d'un objet avec une technologie qui n'affecte pas son utilisation future [Shu01]. Parmi ces techniques, on peut citer les procédés optiques, les ultrasons, les courants de Foucault (CND-CF). Cette dernière reste un outil puissant pour contrôler la qualité et la fiabilité d'un composite, son fonctionnement en temps réel constitue un élément nécessaire dans un environnement industriel [MLK].

Le matériau composite étudié dans cette thèse est un polymère renforcé de fibres de carbone (carbon fiber reinforced polymer ou CFRP), pour la caractérisation de défauts par la technique

de contrôle non-destructif par courants de Foucault. L'utilisation de la méthode des éléments finis stochastiques intrusifs permettent de répondre aux questions liées à la sécurité et la fiabilité des systèmes, et ce, en évaluant la probabilité de défaillance.

Dans le présent travail, l'objectif visé est de prendre en compte l'aléa sur les paramètres physiques d'entrée afin d'en assurer la fiabilité et la sûreté des pièces CFRP à utiliser. En effet, la fiabilité étant à la fois impliquée dans la sécurité humaine et matériels, les couplages entre le code éléments finis et un code probabiliste sont utilisés avec des méthodes de simulations adaptées telles que les méthodes stochastiques non-intrusives d'une part (simulation de Monte Carlo, méthodes d'approximation du premier et du second ordre FORM/SORM (pour *First/Second Order Reliability Method*), hypercube lation) et d'autre part la méthode de simulations stochastique intrusive (ISFEM). La méthode de simulation Monte Carlo, basée sur la *loi des grands nombres*, permet d'aborder les deux classes de problèmes, mais à des coûts de calcul souvent prohibitifs, ce qui n'est pas envisageable en contexte industriel. C'est pourquoi les méthodes d'approximation ont été développées pour l'analyse de fiabilité [Ber08].

Le principe général des méthodes FORM/SORM est une approximation du domaine de défaillance par un domaine adapté et simplifié sur lequel des techniques numériques sont utilisées. Ces méthodes d'approximation permettent de diminuer les coûts de calculs, mais engendrent une perte de précision dans certains cas en comparaison à la méthode Monte Carlo [Oud14].

La méthode des éléments finis stochastiques développée par *Ghanem* [GS91] en 1991, dans le domaine mécanique, permet de calculer les moments statistiques de la réponse et de faire des analyses de fiabilité en une seule étape.

La méthode des éléments finis stochastiques (MEFS) développée par *Ghanem* [GS91] sera adaptée et exploitée dans le contexte électromagnétique pour être appliquée à un CFRP, dont la propriété physique étant la conductivité électrique ; celle-ci sera considérée comme variable aléatoire. La validation du modèle stochastique intrusif ainsi élaboré sera réalisée en exploitant des données issues de la littérature, travaux scientifiques et des résultats expérimentaux.

L'intérêt majeur de ce modèle stochastique intrusif est que la fiabilité d'un système, d'une pièce composée d'un CFRP, pourra être estimée directement ainsi que la probabilité de défaillance sans avoir recours à l'étude du problème inverse.

Cette thèse comprend quatre chapitres :

Le chapitre I porte sur des généralités liées aux matériaux composites à savoir leurs définitions, composition, classifications, processus de fabrication et se termine par l'expression de la problématique leurs étant liée.

Le chapitre II présente les différentes techniques de contrôle non-destructif, en particulier celle utilisée dans notre étude : le CND par courants de Foucault.

Le chapitre III se focalise sur les méthodes numériques en mettant l'accent sur la méthode des éléments finis stochastiques intrusives auquel on a eu recours.

Le dernier chapitre regroupe l'ensemble des résultats obtenus pour deux types de composites, l'Inconel 600, alliage à prédominance de Nickel, et un matériau composite de type CFRP, caractérisé par une conductivité électrique longitudinale, transversale et selon l'épaisseur, malgré la nature tensorielle de la conductivité électrique du CFRP, il a été démontré dans la littérature que la conductivité longitudinale prédomine sur la conductivité transversale, nous avons opté pour une approche 2D, en prenant la conductivité électrique longitudinale comme variable aléatoire, de type Gaussienne. Une distribution de la variable aléatoire dans les polynômes d'Hermite est établie sur la base du chaos polynomiale. La simulation du problème CND-CF est obtenue sur la base de la résolution de l'équation magnétodynamique en termes du potentiel vecteur magnétique A pour les deux types de composites. Les résultats obtenus ont validé le modèle ISFEM par la confrontation aux essais expérimentaux et Benchmark JSAEM#Problem1.

Chapitre I

Matériaux composites

Sommaire

- I. Introduction
- II. Matériaux composites
- III. Classification des matériaux composites
- IV. Architecture des matériaux composites
- V. Processus de fabrication d'un matériau composite
- VI. Propriétés physiques des matériaux composites
- VII. Défauts des matériaux composites
- VIII. Conclusion

I. Introduction

Les matériaux composites trouvent de plus en plus de place dans divers domaines tel l'aérospatial, l'aviation [Bak86], l'automobile, la construction ou encore le sport et équipements, mais aussi dans la vie quotidienne, illustré en figure I.1, et ce grâce à une multitude de variétés. Ils sont classés selon leurs composants allant de composites naturels comme le bois, aux composites artificiels, synthétique à l'instar du carbone/époxy [XQin21]. Cette diversification d'applications offerte par ces derniers a permis d'augmenter leurs utilisations auprès des industriels et il y a de fortes indications que cette place importante qu'ils occupent déjà augmente à l'avenir [GHT03][Was11]. Cela est dû en partie aux récents progrès et développements dans la conception des structures modernes, appelant à l'utilisation de nouveaux matériaux avec des caractéristiques supérieures que leurs prédécesseurs [Khe16], et aux propriétés particulières, répondant en général à des besoins spécifiques permettant notamment la conception d'un matériau présentant de bonnes performances tout en offrant un gain de masse et de légèreté [Led09].

Les matériaux composites, présents depuis l'antiquité ayant été utilisé pour la construction en faisant usage du torchis, à titre d'exemple monté en figure I.1 ou encore à l'optimisation de certaines armes comme les sabres japonais dont la lame est en acier stratifié et en fer doux [GHT03] n'ont cessé depuis de se développer et se définissent comme étant un assemblage d'au moins deux constituants distincts, non-miscibles, liés entre eux, se complétant, et permettant d'obtenir des performances supérieures à celles d'un élément constitutif pris individuellement [Led09], l'union fait la force ! .



Figure I.1: quelques exemples d'utilisation des matériaux composites [CW22][BGFV2]

Les composites sont répandus à la fois dans la nature que l'ingénierie, comme se trouve être le cas de certaines roches poreuses dont les pores sont remplis avec un liquide ou d'huile. Ou encore l'os qu'en est un aussi en vue de ses constituants, les nuages, le brouillard et la brume composés d'air et d'eau en sont des exemples aussi [Mil02]. Ce qui donne aux composites attractivités et utilités. La possibilité de combiner les attributs de ces éléments constitutifs, entre autres, supposons que l'on dispose de deux matériaux, un métal à haute conductivité et un

plastique électriquement isolant, qu'on les place en couches alternées dans un stratifié, on obtient un composite anisotrope avec des propriétés conductrices [Mil02]. Par ailleurs, les matériaux composites sont dotés d'atouts importants telle la légèreté, forte tenue au feu, aux chocs, attaques chimiques [Was11]. Ils offrent également un rapport rigidité poids plus élevé que la plupart des métaux, une bonne isolation thermique ou phonique [Li12][Men09][Ben09].

Cependant pour des performances aussi élevées et des domaines d'applications aussi multiples les matériaux composites ne sont pas exempts de défauts. Ces derniers surviennent en général lors du processus de fabrication ou durant leurs cycles de vie. Dans ce chapitre, une présentation générale des matériaux composites, de leurs processus de fabrication, classification, propriétés, et principaux défauts seront établis pour une familiarisation et approche globale de ces matériaux novateurs.

II. Matériaux composites

II.1. Définition

D'une manière générale, un matériau composite consiste en l'assemblage d'au moins deux constituants de nature différente se complétant, disposés selon une organisation géométrique spécifique, permettant d'obtenir un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celles des composants pris séparément [Bert99] [Nij15].

Les matériaux composites sont constitués d'une manière globale de deux ensembles, illustrés dans la figure I.2 : les **renforts** (arrangements de fibres ou particules assurant les propriétés mécaniques et considérés comme étant l'ossature) et **la matrice** (structure dans laquelle les renforts sont noyés, elle assure la cohésion de l'ensemble et le transfert des efforts) [Was11][GHT03]. On peut aussi leur ajouter selon le cas, ou le besoin, des additifs (Exemple : pigments colorants).

Il en résulte de cette combinaison des matériaux dont les performances sont améliorées, répondant à des besoins spécifiques.

Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes, dont le degré d'anisotropie est déterminé par la structure du renfort [Carma14][Lah20].

Les matériaux composites peuvent être classés selon différentes catégories partant de la nature des renforts (particules, fibres longues...) à la nature des matrices (organiques, métalliques...) [Mar10].

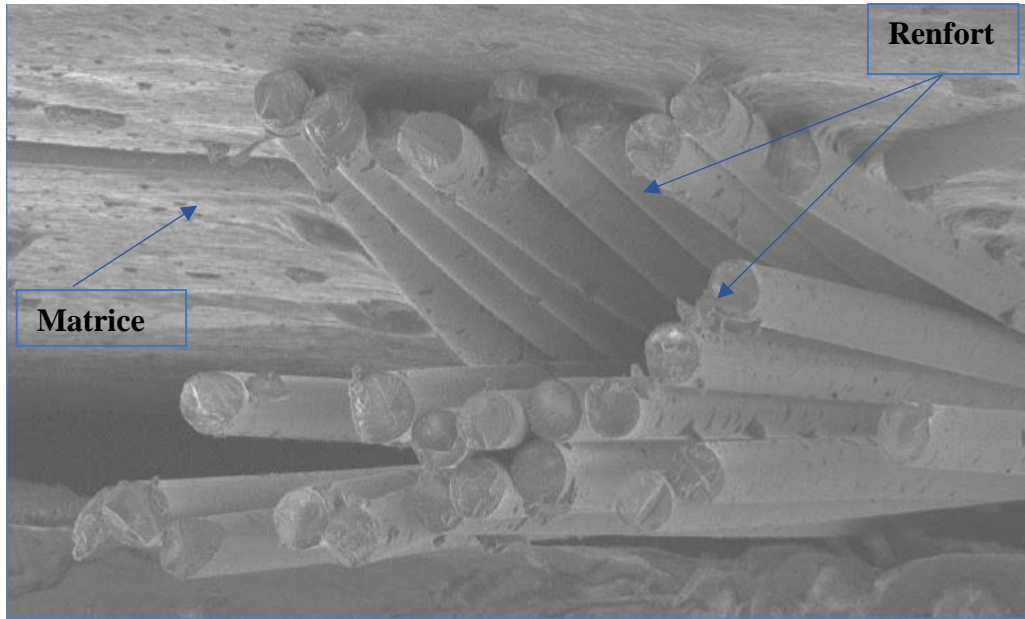


Figure I.2 : matrice et renfort de fibres dont le diamètre est d'environ 17 micromètres [Nij15]

II.2. Constituants des matériaux composites

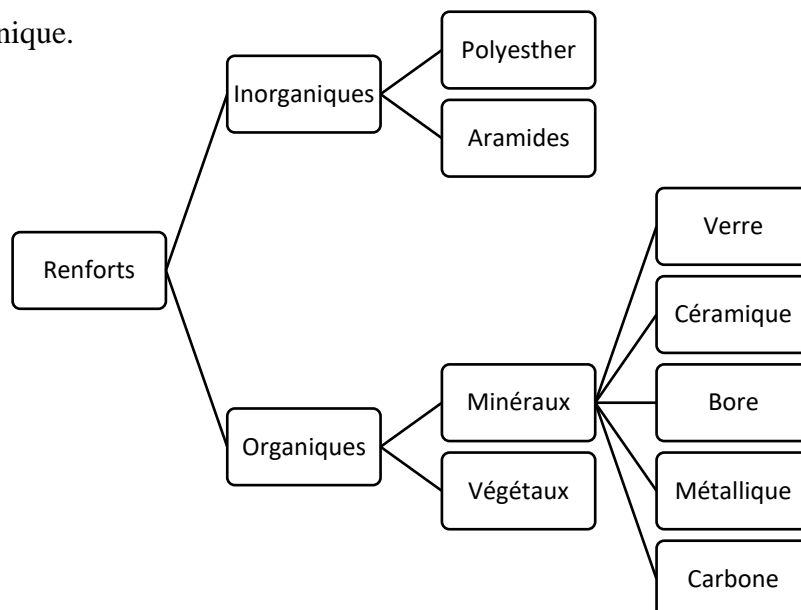
Les constituants de base du matériau composite à savoir le renfort et la matrice jouent un rôle déterminant dans la nature de celui-ci [Sen17] et contribuent dans la modification et amélioration de ses propriétés électriques, mécaniques [KWLB21] et thermiques [KJLKK18].

II.2.1. Les renforts

De différentes formes et natures, les renforts apportent l'essentiel des propriétés mécaniques au matériau composite [Ben09].

Selon leurs natures, les renforts sont généralement répertoriés en deux catégories [Gra18] :

- Organique.
- Inorganique.



Selon leurs formes et structures, on les retrouve classés sous deux principaux groupes [Sen17][Pai12] [Was11] :

- Renforts à fibres courtes ou particules, dont la structure est aléatoire.
- Renforts à fibres longues, dont la structure est orientée.

II.2.1.1. Renforts à fibres courtes, particules

Dispersés aléatoirement dans la matrice en ne privilégiant aucune direction, illustrés en figure I.3, on a recours à ce type de renforts quand une bonne résistance à la compression est recherchée, en effet, l'ajout de fibres courtes améliore le comportement en compression [BBGM19]. Ils permettent aussi par leurs différentes natures (métaux, fibre de verre...) d'améliorer certaines propriétés des matériaux composites (rigidité, résistance à la température...). Ils sont globalement utilisés comme charges dans le but de réduire les coûts de production [Sen17][Was11][Bert99], d'améliorer l'aspect de surface, de modifier les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques et peuvent être de nature organique (farine de bois, cellulose, amidons...) ou minérale (silices, argiles, verre, carbone ...) [Carma14].

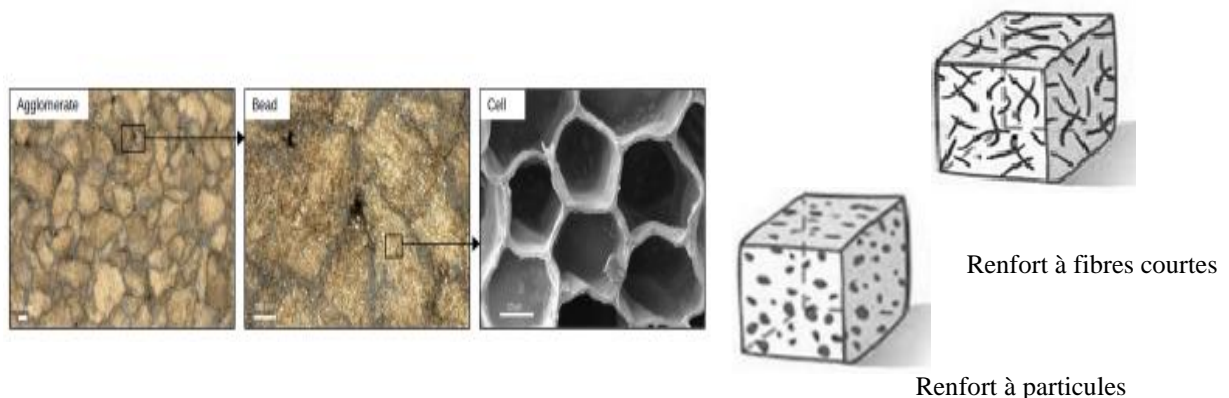


Figure I.3 : renfort à fibres courtes, particules [BBGM19][Sen17]

II.2.1.2. Renforts à fibres longues

Formés d'un ensemble de fibres longues de structures orientées possédant un diamètre compris entre 3 à 15 μm , et constituées de kevlar, carbone, verre... [Was11], les renforts à fibres longues peuvent être retrouvés en deux groupes :

- Structures tissées.
- Structures unidirectionnelles (UD).

II.2.1.2.1 Les structures tissées

Obtenues par tissage de fibres selon deux ou trois directions dont la disposition permet d'avoir des éléments tissés différents [Was11][Ben09]. On obtient alors ceux tissés en taffetas, sergé, satin, triaxial comme représenté dans la figure I.4.

L'un des avantages des composites tissés, en particulier à renfort tridimensionnel est de pouvoir réaliser des architectures complexes en un nombre limité d'opérations, et offrant une meilleure tolérance aux défauts type entrailles et trous [Mar10].

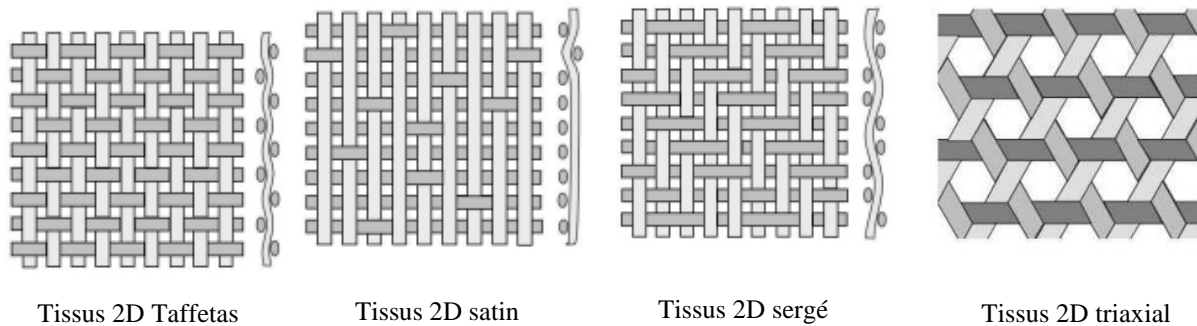


Figure I.4 : différentes structures tissées [Sen17]

II.2.1.2.2 Les structures unidirectionnelles

Ici, toutes les fibres sont orientées en une seule direction comme le montre la figure I.5.(a) cependant, leurs placements dans la section restent aléatoires tout en assurant un taux de remplissage (défini en étant le rapport volume ou masse des renforts par rapport au composite complet) comme indiqué dans la figure I.5.(b), ayant selon les différents axes une forte anisotropie.

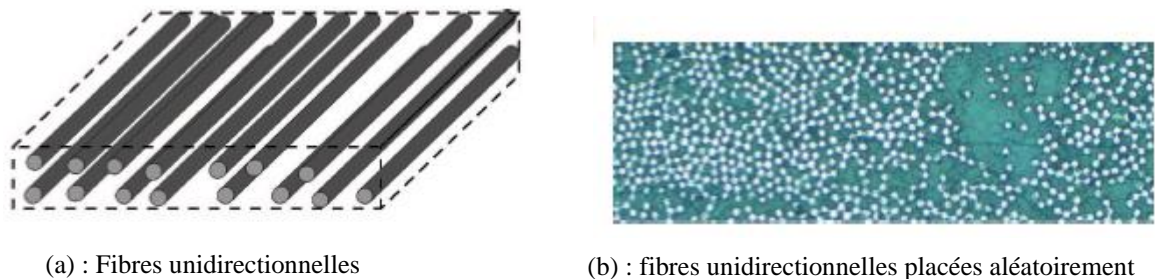


Figure I.5: structure des fibres unidirectionnelles [Was11]

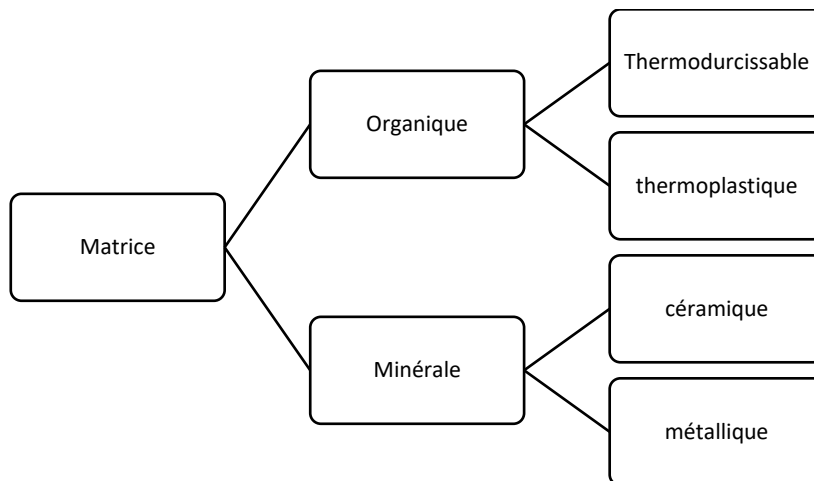
II.2.2 Les matrices

La matrice sert d'emballage pour les renforts, c'est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle assure la protection des fibres de l'environnement extérieur, apporte une tenue mécanique à la structure et lui confère sa forme [Sen17][Led09].

II.2.2.1 Classification des matrices

La matrice est globalement répertoriée selon sa nature en deux groupes :

- Matrice organique
- Matrice minérale



II.2.2.1.1 Matrice organique

Constituée essentiellement de polymères agissant d'adhésif et liant les fibres entre elles, ils déterminent en grande partie la sensibilité du composite face à l'humidité, lumière ultraviolette, ils donnent aussi sa couleur, et peuvent contribuer à la sécurité [Nij15] ils permettent également une diversification de matériaux composites et ce grâce aux différents types de polymères utilisés qui peuvent être répertoriés en :

- Polymères thermoplastiques.
- Polymères thermodurcissables.
- Elastomères.

➤ Polymère thermoplastique

En terme moléculaire, les résines thermoplastiques sont constituées de longues chaînes enchevêtrées, facilement fusibles et solubles, qui fondent une fois chauffées et durcissent en refroidissant donnant ainsi un avantage considérable en termes de moulage et recyclage. Ils sont de structure unidirectionnelle [Auc11][Led09] [Nij15]. On les utilise dans certaines applications dont l'objectif visé est la légèreté, telle l'aéronautique, l'automobile comme le montre la figure I.6 [AB23].

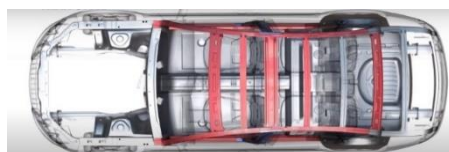


Figure I.6 : application de composites à matrice polymère thermoplastique [AB23]

➤ Polymères thermodurcissables

En termes moléculaires, la plupart des résines thermodurcissables sont constituées de chaînes relativement courtes, présentant des structures tridimensionnelles, elles ne fondent pas au chauffage, se solidifient définitivement lors du traitement thermique ; permettant ainsi de réaliser une forme souhaitée de façon irréversible (leurs mises en forme ne peuvent être faites qu'une seule fois.) [Auc11][Nij15]. On les utilise lorsqu'une bonne tenue mécanique (à la fois légère et solide) à haute température est recherchée, on les retrouve dans plusieurs domaines comme la structure de certaines éoliennes, ski, aéronautique, illustré en figure I.7, en faisant appel aux résines Epoxyde, polystère, vinylester, Polymides.



Figure I.7 : applications de composites à matrice polymère thermodurcissable

➤ Les élastomères

Ce sont des polymères naturels ou synthétiques dont la structure favorise l'élasticité, on en cite le silicone à titre d'exemple [Led09]. Leurs tenues à la déformation sans rupture et leurs résiliences élevées impliquant une capacité importante à absorber les chocs [Zem19], offrent à la fois une plus grande durabilité et efficacité (en réduisant le coût de production). On peut les trouver dans la composition de pneus de camion de transport à titre d'exemple [E. MJ22].

II.2.2.1.2 Matrice minérale

➤ Matrice métallique

Composée de métal léger comme l'aluminium, magnésium, titane, zinc, elle possède de bonnes caractéristiques mécaniques. Elle permet la réalisation de structures conciliant la qualité des métaux en termes de ductilité, bonne tenue au vieillissement tout en gardant une légèreté et de bonnes performances [Gen11]. On peut les retrouver dans les tambours et disques de frein de poids lourd comme le montre la figure I.8.



Figure I.8 : tambour et disque de freins en composite à matrice métallique [FTC1]

➤ Matrice céramique

Constituée le plus souvent de Carbure de silicium (SiC) ou d'aluminium (Al_2O_3), ce type de structures offre une bonne ténacité et ductilité, les matrices sont disposées en fines couches les unes sur les autres [Gen11].

Il existe une large variété de domaines d'application du composite à matrice céramique tels les composants de turbines à gaz [GB23] illustré ci-après en figure I.9.

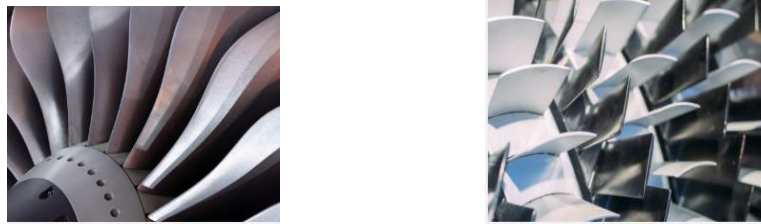


Figure I.9 : exemple d'application de composites à matrice céramique [GB23]

III. Classification des matériaux composites

Les matériaux composites sont classés selon leurs constituants et échelles, on trouve alors une classification basée sur le type de matrice et renfort [RPKP19], regroupée selon les données de littératures dans la figure I.10 [Zem19].

III.1 Classification basée sur le type de matrice

- Matériaux composites à matrice polymère (PMC) : composés de matrices thermodurcissables ou thermoplastiques avec un renforcement de fibres de carbone, verre, Kevlar et de métal. En raison de leurs grandes résistances aux températures élevées, les thermodurcissables sont les plus utilisées, ils sont réalisés à base de résines avec un durcisseur dont la structure laminaire est la plus répandue [RPKP19][BenH19].
- Matériaux composites à matrice céramique (CMC) : composés de fibres de carbone, carbone de silicium (SiC), d'oxyde d'aluminium, incorporées dans une structure de matrice céramique [RPKP19] [BenH19].
- Matériaux composites à matrice métallique (MMC) : composés généralement d'aluminium (Al), magnésium (Mg) ; titane (Ti) et d'un renforcement céramique ou métaux (tungstène, molybdène) [RPKP19][BenH19].

III.2 Classification basée sur le type de renfort

- Matériaux composites à Fibres : carbone, verre, kevlar.
- Matériaux composites à particules.
- Matériaux composites de moulage de feuilles (SMC) : moulage thermodurcissable renforcé de verre.

III.3 Classification basée selon l'échelle

- Nano-composites
- Bio-composites

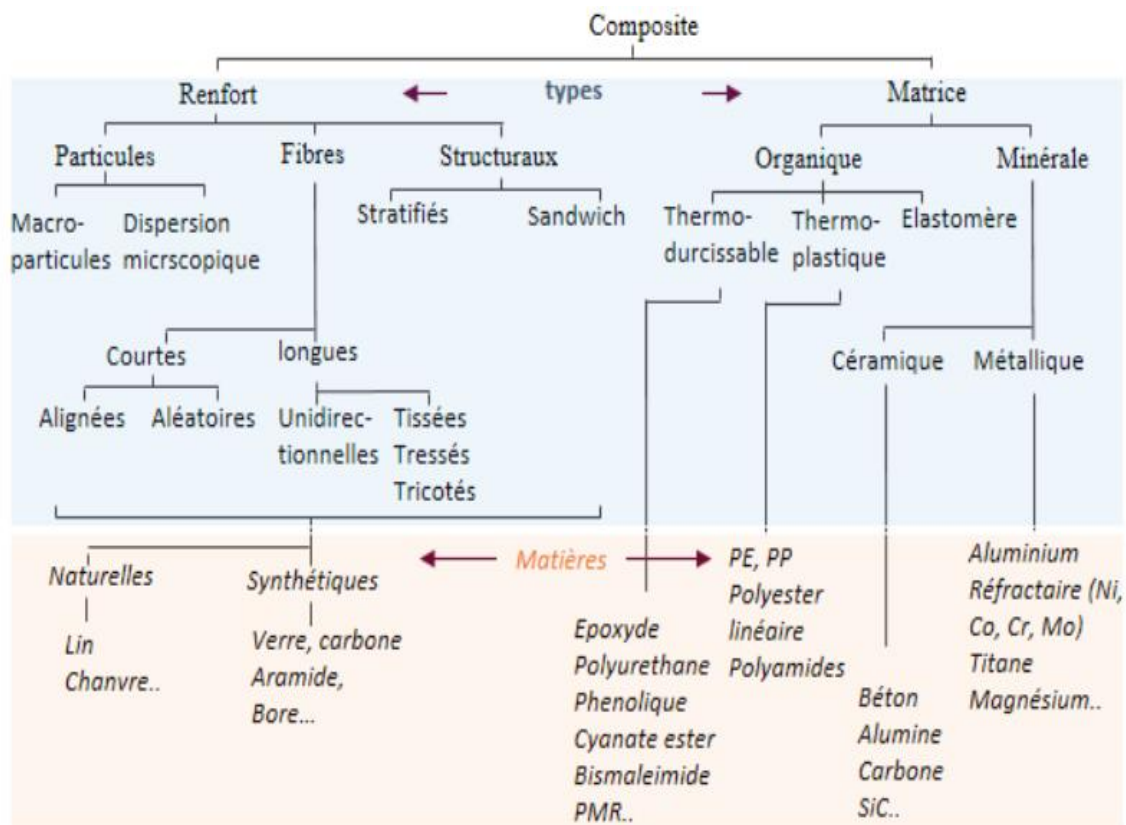


Figure I.10 : classification des matériaux composites [Zem19]

IV. Architecture des matériaux composites

Les matériaux composites sont répertoriés par leurs constituants (fibres et matrices) mais aussi selon leurs architectures. On les retrouve classés sous trois principales catégories citées dans la littérature :

- Monocouches.
- Sandwiches.
- Stratifiés.

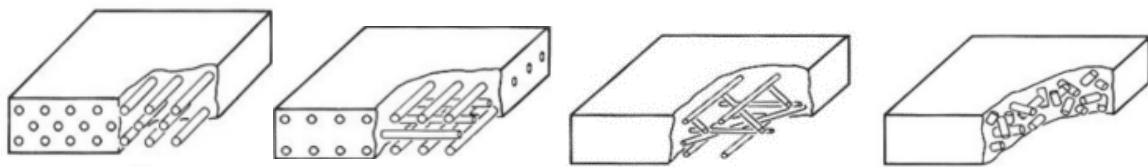
IV.1 Composites monocouches

Constitués de résines ou matrices dans lesquelles sont noyés des renforts en forme de :

- Fibres courtes, particules (Ex : poudre métallique, graphène) dispersées de façon aléatoire (Voir la figure I.3) pour la réalisation de plaques de composites en plastiques renforcés [Sen17].
- De fibres longues tissées multidirectionnelles (voir figure I.4) pour la conception de plaques de composites volumiques donnant des caractéristiques mécaniques élevées avec un comportement quasi-isotrope en volume [Khe16].

En d'autres termes, les composites monocouches correspondent à l'unité élémentaire d'épaisseur, ils sont formés d'un ou plusieurs plis (c'est un semi-produit composé de renfort et matrice.) de faible épaisseur, identiques, dont la structure de fibres nous permet d'en distinguer :

- Des plis unidirectionnels : les fibres sont toutes orientées dans la même direction comme le montre la figure I.11.(a).
- Des plis tissés : les fibres sont orientées sur deux directions comme le montre la figure I.11. (b), ou sous plusieurs directions selon la figure I.11. (c).
- Des plis à structure aléatoire (mâts) : couches de fibres non tissées, disposées de façon aléatoire comme montré en la figure I.11. (d).



(a) : pli unidirectionnel (b) : pli tissé (c) : pli tissé (d) : pli à fibres aléatoire

Figure I.11 : composites monocouches [Sto20]

IV.2 Composites sandwichs

Les composites sandwichs illustrés en figure I.12, sont constitués de deux peaux constituées de fibres (type verre, kevlar, carbone à titre d'exemple et à structure en mâts ou tissus), enrobées d'une matrice à base de résine, de faible épaisseur, à bonnes caractéristiques mécaniques, collés sur une âme plus épaisse. Elle est constituée d'un matériau très léger à faibles caractéristiques mécaniques dont le constituant permet de classer les différentes structures en matériaux sandwich [Idr13][Nij15], parmi les âmes les plus utilisées, on cite :

- Les mousses : fabriquées à partir de polymères synthétiques, elles sont thermoformables et permettent la réalisation de pièces à formes complexes.
- Le bois
- Le nid d'abeille (nida) indiqué sur la figure I.12. (b) : constitué de mailles hexagonales formant des alvéoles et réalisé avec différents matériaux (exemple : le Nomex et Korex fabriqués à partir de Kevlar), de structure anisotrope dont les propriétés varient selon le sens transversal et longitudinal des alvéoles.

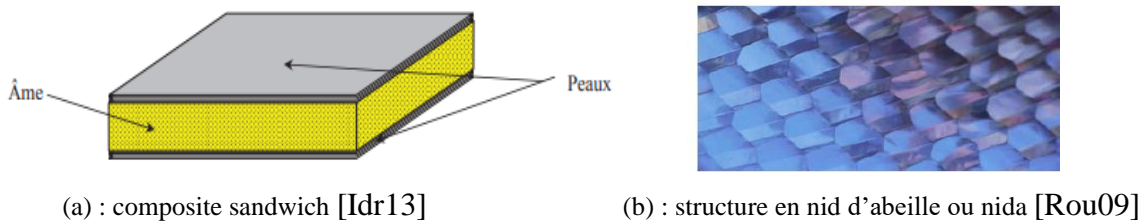


Figure I.12 : composites sandwiches et structure

IV.3 Composites stratifiés

Les stratifiés appelés aussi laminés sont constitués de couches successives (plis) comme le montre la figure I.13, de renforts imprégnés de résines, empilées et orientées selon un drapage définit comme étant l'orientation des couches selon un référentiel donné [Bert99] [Ben09].

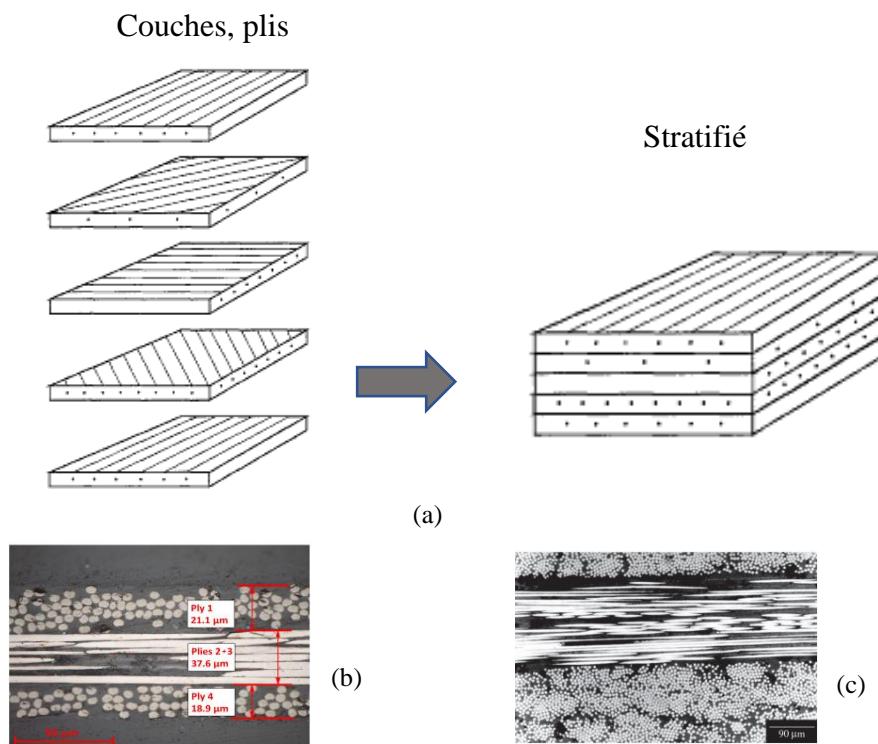


Figure I.13: (a) constituant d'un stratifié [Bert99] ; (b), (c) Coupe longitudinale d'un stratifié [SP17] [TMSB06]

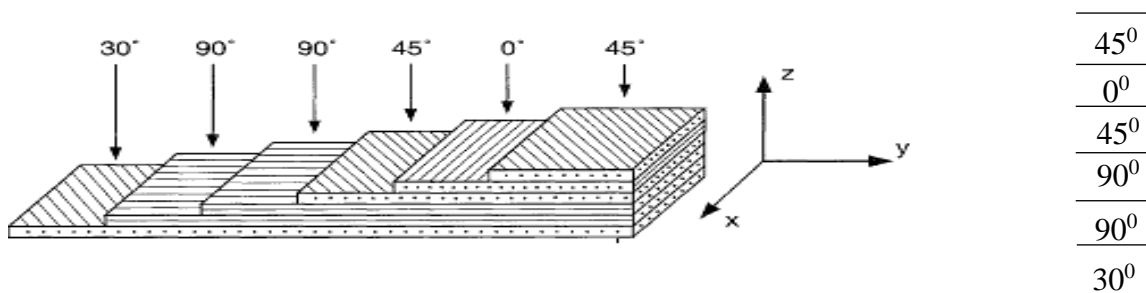
Les composites stratifiés à plis unidirectionnels sont considérés comme étant la base de tout stratifiés auxquels, théoriquement, tout autre type peut être réduit ; ces couches unidirectionnelles, constituées de fibres parallèles noyées dans la matrice et empilées selon des séquences spécifiques de différentes orientations (voir la figure I.14) permettent d'obtenir un composite aux propriétés requises [Bert99].

IV.3.1 Identification des stratifiés

Les stratifiés peuvent être identifiés en utilisant l'une des configurations suivantes :

IV.3.1.1 Code d'orientation des plis

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur de son angle d'orientation (en degrés) entre la direction de sa fibre et l'axe de référence x.
- Les plis successifs sont séparés d'un « / » si leurs angles sont différents.
- Les plis successifs avec la même orientation sont notés par un index.
- Les couches sont désignées (selon l'axe choisi) en alternance d'une face à l'autre, les crochets indiquent le début et fin du code.



Designation: [30/90_s/45/0/45]

Figure I.14 : séquence d'empilement des stratifiés [Bert99]

IV.3.1.2 Notation positive ou négative de l'angle

L'orientation des fibres dans chaque pli fait un angle donné par rapport à un référentiel donné [Ham07], comme le montre la figure I.15, lorsque les couches sont orientées selon des angles égaux en amplitude, mais de signes opposés, le signe + ou - est utilisé [Bert99] un exemple est donné dans le tableau numéro 1.

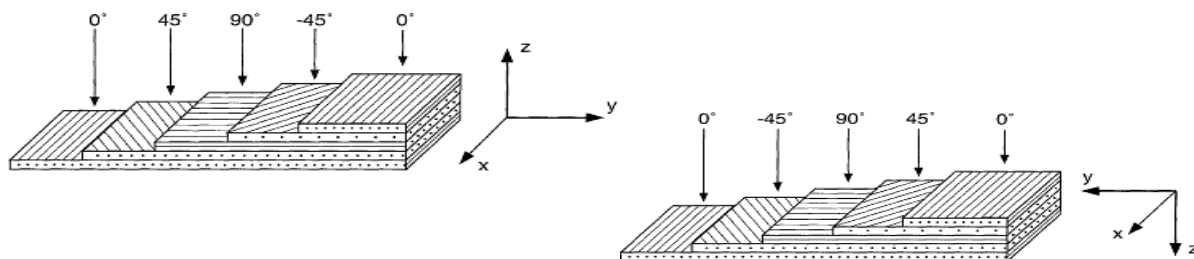


Figure I.15 : signes conventionnels pour une séquence de plis [Bert99]

Stratifié	$\overline{0^0}$ $\overline{30^0}$ $\overline{-30^0}$ $\overline{-45^0}$ $\overline{45^0}$	$\overline{0^0}$ $\overline{-45^0}$ $\overline{-45^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{45^0}$	$\overline{0^0}$ $\overline{-45^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{-45^0}$ $\overline{-45^0}$ $\overline{45^0}$
Designation	$[\pm 45/\mp 30/0]$	$[45_2/-45_2/0]$	$[\pm \mp \pm 45/0]$ Ou $[45 / -45_2/45_2 / -45/0]$

Tableau I.1 : stratifiés avec leurs désignations [Bert99]

IV.3.1.3 La symétrie du stratifié

Un stratifié est symétrique si sa géométrie médiane est prise comme plan de symétrie, on a alors juste besoin de sa moitié pour sa désignation accompagnée d'un indice « s », exemple [Bert99] :

$\overline{90^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{45}$	[90/45 ₂ /0] _s	$\overline{90^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{0^0}$	[90/45 ₂ /0] _s
$\overline{0^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{90^0}$	[90/45 ₂ /0] _s	$\overline{0^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{90^0}$	[90/45 ₂ /0] _s

IV.3.1.4 Les séquences

La répartition des séquences peut être indiquée par un index montrant le nombre de fois que cette dernière est répétée [Bert99] exemple :

$\overline{0^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{90^0}$ $\overline{0^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{90^0}$ $\overline{90^0}$ $\overline{45^0}$ $\overline{0^0}$ $\overline{90}$ $\overline{45^0}$ $\overline{0^0}$	[(0/45/90) ₂] _s ou bien [0/45/90] _{2s}
--	---

IV.3.1.5 Une indication pour les stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont une succession continue de plis à fibres de natures différentes, il est donc nécessaire de les indiquer dans la désignation du stratifié, exemple [Bert99]:

0 ⁰ G		0 ⁰ K	
45 ⁰ C		0 ⁰ K	
-45 ⁰ C		45 ⁰ G	
90 ⁰ C		90 ⁰ G	
90 ⁰ C	[0 _G /±45 _C /90 _C] _s	45 ⁰ G	[0 _{2C} /(45/90) _{SG} /0 _{2K}]
-45 ⁰ C		0 ⁰ C	
45 ⁰ C		0 ⁰ C	
0 ⁰ G			

Avec : G= Glass (fibre de verre), C= Carbonne, K= Kevlar

V. Processus de fabrication d'un matériau composite

Le procédé consiste en général à disposer les fibres en fonction des sollicitations et du besoin de l'utilisation ou de la pièce à fabriquer, et à mouler la matrice autour des fibres [DG11].

V.1 Les constituants élémentaires et semi-produits du matériau composite

Au cours de la mise en forme, les pièces composites sont usinées directement à partir de leurs composants de base, à savoir les renforts et matrices pouvant être fournis soit séparément ou bien sous forme préimprégnés. Ces constituants, qu'ils soient préimprégnés ou non peuvent être de différents types et formes [DG11].

V.2 Matière première et composés des matrices

Répertoriées selon trois principales familles, chacune d'entre elles à ses propres constituants.

La première famille se trouve être les matrices organiques, résines polymères, on y trouvera deux principales formes qui sont :

- Thermoplastiques : il s'agit là de granulés solides qu'on ramollit par chauffage avant de les mettre en forme [DG11] illustrée en figure I.16.(a).
- Thermodurcissables : ce sont les plus utilisées, il s'agit ici de précurseurs liquides qui, après l'ajout d'un catalyseur, réagissent pour la formation de la matrice (c'est la polymérisation.) ce qui entraîne une solidification, le polymère durcit lors du processus et n'est plus déformable [DG11][Nij15] illustrée en figure I.16.(b).

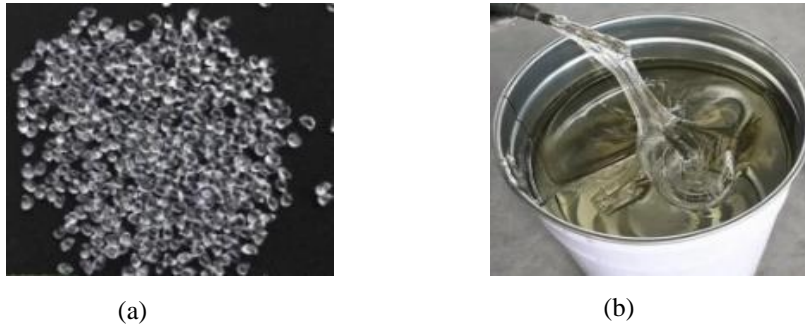


Figure I.16: (a) quelques matrices avant la mise en forme [FTC] (b)

La mise en forme de la seconde famille répertoriée en matrices céramiques fait appel à des précurseurs gazeux ou liquides qui réagissent pour former la matrice.

La troisième famille nommée matrices métalliques est sous forme de métal fondu ou poudre métallique qu'on met en forme par frittage.

V.3 Matière première et composés des renforts

Les renforts à particules ou fibres courtes comme le montre la figure I.17. (a) sont directement incorporés à la matrice avant la mise en forme, dans le cas de fibres longues illustré en figure 17.(b) de diamètre microscopique, il est naturellement inenvisageable de les disposer une à une, elles sont donc fournies sous forme de semi-produits pouvant être de plusieurs types (plis unidirectionnels, mâts, fibres tissées) [DG11].

Concernant les préimprégnés, certains procédés de mise en forme ne font pas appel aux fibres et matrices séparées, mais à des semi-produits nommés préimprégnés ou prepeg, dont les plis ou tissus déjà enduit de matrice semi-solide sous forme de feuilles ou rouleaux montré en la figure I.17. (c) essentiellement utilisés pour les composites à matrice organique thermodurcissable (mais peuvent aussi être utilisés avec des matrices thermoplastiques et métalliques) [DG11].

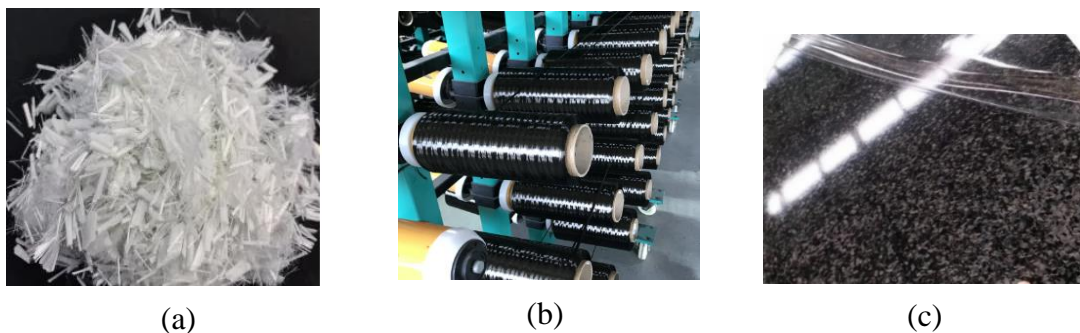


Figure I.17 :(a) fibres de verre courtes, (b) fibres longues en carbone tissé, (c) prepeg fibre de carbone + époxy [FTC2]

V.4 Mise en forme des composites

V.4.1 Mise en forme des composites à matrice organique

Le processus de fabrication des matériaux composites à matrice organique ici présenté est porté sur ceux à matrices thermodurcissables (étant les plus répandus et majoritairement employés) enveloppant des fibres, par moulage en deux étapes [DG11] :

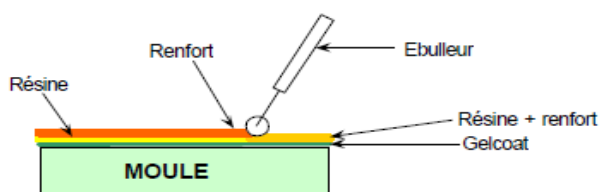
- Disposer les fibres et la matrice liquide dans un moule.
- Solidifier la matrice.

Le matériau et la structure sont le plus souvent réalisés en un seul processus, ceci est lié à l'utilisation du polymère qui durcit pendant ce dernier et n'est alors plus déformable [DG11][Nij15]. Pour ce faire, il existe de nombreux procédés de mise en œuvre dans la littérature qui diffèrent par la nature du moule utilisé (ouvert ou fermé), le principe utilisé pour le remplissage, les étapes d'opérations effectuées ; d'un autre côté, les méthodes de production peuvent être choisies en fonction de divers critères (pièce unique ou série, température, pression à titre d'exemple.) [DG11][Nij15].

V.4.1.1 Procédés manuels

La mise en œuvre se fait manuellement (parfois accompagné de machines) en utilisant un moule ouvert dans lequel l'ouvrier vient placer les fibres et matrices, et ce, par :

- Moulage au contact réalisé dans un moule (simple coque) en faisant usage d'outillages à main (ciseaux, pinceaux, rouleaux...) à partir de résine thermodurcissable à température ambiante et sans pression et de renforts (mâts, tissus de fibre de verre, carbone ou aramide) ces derniers sont disposés sur le moule (sur lequel un gel facilitant le démoulage peut être appliqué) et imprégnés de résine liquide (polyesters, époxy...) accélérée et catalysée pour être mise en forme progressivement au moyen de pinceaux et rouleaux, après solidification la pièce est démoulée comme le montre la figure I.18. Ce procédé est idéal pour la réalisation de petites séries de pièces lourdes et volumineuses (coque de bateau, piscine...) destinée à un large domaine d'applications (nautisme, transport...) [DG11][Carma14] [Bert12].



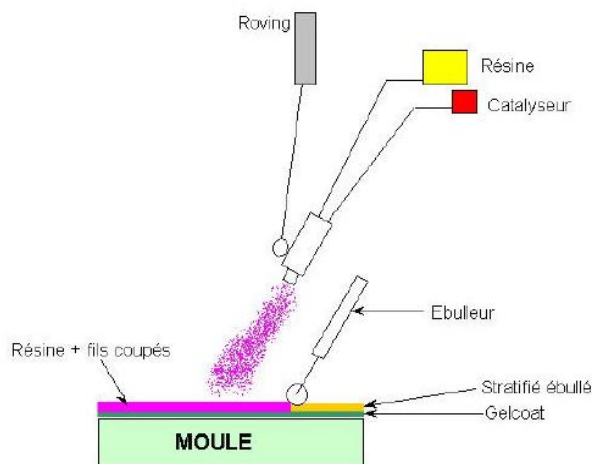
(a) [Carma14]



(b) [Bert12]

Figure I.18 : moulage au contact

- Moulage par projection simultanée : réalisé dans un moule simple en faisant usage d'outillages à main (rouleaux...), d'une machine de projection et d'un dispositif de ventilation, à partir de résines thermodurcissables (principalement polyester) à température ambiante et sans pression, et de renforts (fibre de verre tissée), qui sont projetés simultanément sur la surface du moule puis compactés et ébullés à l'aide de rouleaux et ébulateurs (la résine réaccélérée est catalysée en continu lors de la projection.) cette méthode est illustré en figure I.19 [Afsset10]. Ce procédé est utilisé pour la production de pièces moyennes à grandes dimensions pour de petites et moyennes séries destinées pour la production de bateaux, coffrages, bâtiment [Carma14] [Afsset10].



(a) [Carma14]



(b) [Bert12]

Figure I.19 : moulage par projection simultanée

- Moulage par infusion sous vide : réalisé dans un moule ouvert et d'une bâche sous vide, la résine (polyester, vinylester, époxy) catalysée, est versée sur le renfort (mâts, tissu) placé à l'intérieur du moule. La pression exercée sur le moule lors de la mise sous vide est utilisée pour répartir la résine et imprégner le renfort [DG11][Carma14][Bert12]. Ce procédé est utilisé pour la production de petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses qu'on retrouve dans les éoliennes, le transport.

V.4.1.2 Procédés mécanisés

La mise en œuvre se fait par des machines ou des systèmes complètement automatisés en utilisant des moules fermés idéale pour la production de pièces de moyenne à grandes séries. Il existe divers moulages retrouvés dans la littérature, parmi eux :

- Moulage par injection basse pression de résine (RTM : Résine Transfert Modeling) : s'effectue entre moule et contre-moule rigide, où le renfort (mât, tissus) est disposé dans l'entrefer du moule, une fois celui-ci bien fermé, la résine accélérée et catalysée est injectée sous faible pression à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte illustré en figure I.20.
- Après durcissement vient le démoulage [DG11][Carma14][Afsset10].
Souvent utilisé dans la conception d'objets pour véhicules, les articles sanitaires, pièces industrielles diverses.

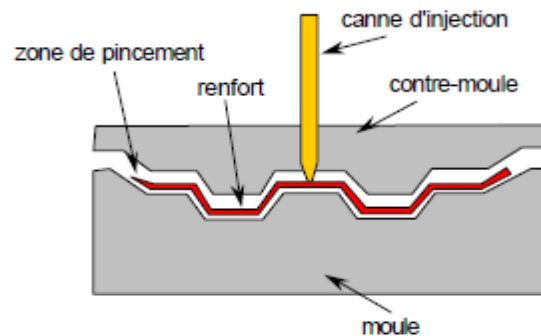


Figure I.20: moulage par injection basse pression de résine [Carma14]

- Moulage automatisé par enroulement filamentaire : il consiste à enrouler les fibres (mâts de fils coupés, tissus uni/bidirectionnels) imprégnées de résines (polyester, époxy, vinyle) autour d'un mandrin jouant le rôle d'un moule intérieur selon un angle déterminé, et ce, en faisant usage de machines d'enroulements (diverses et adaptés selon le cas d'application) donnant des pièces de bonne qualité, et est adapté aux productions de grandes séries [DG11][Carma14] comme le montre la figure I.21.
Essentiellement destiné à l'industrie électrique, armement, automobile, mais aussi au sport : canne à pêche, bouteille de plongée.

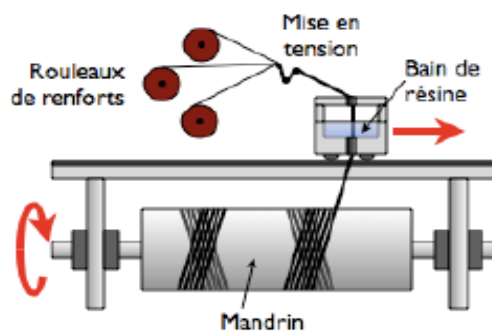


Figure I.21 : schéma de procédé automatisé [DG11]

V.4.2 Mise en forme des composites à matrices céramique et métalliques

Contrairement aux composites à matrice organiques, les composites à matrices céramiques ne sont pas formés par moulage, mais plutôt par dépôt de matière. La méthode utilisée consiste en deux étapes :

- Réalisation de la préforme (tissus de mèches de fibres ayant la forme de la pièce).
- Densification de la préforme (déposer la matrice dans les "vides" du tissu entre les fibres).

Afin de déposer la matrice céramique dans le tissu, il est nécessaire d'infiltrer des substances (liquides ou gazeuses) qui vont réagir chimiquement pour former la matrice directement sur place dans ce dernier [DG11].

Les composites à matrice métalliques sont le plus souvent mis en forme par moulage sous pression : les fibres sont déposées dans un moule fermé et préchauffé où on injecte ensuite la matrice, en l'occurrence en métal fondu, le tout est alors compacté sous une presse jusqu'à solidification [DG11].

VI. Propriétés physiques des matériaux composites

Les propriétés physiques des matériaux composites résultent des propriétés de ces constituants (fibres et matrices), de leurs distributions, natures...[Sen17].

Les propriétés électromagnétiques sont définies par la perméabilité magnétique μ , la conductivité électrique σ et la permittivité électrique ϵ . Si la matrice polymère et les renforts sont amagnétiques, la perméabilité magnétique est dans ce cas-là égale à celle du vide [Sen17]. Par ailleurs, les propriétés thermiques sont définies par la conductivité thermique λ , la masse volumique ρ , la chaleur spécifique C_p [Sen17].

La conductivité électrique dépend essentiellement de la disposition et orientation des renforts (fibres), ce qui conduit à des propriétés différentes dans chaque direction, on dit alors que le matériau est anisotrope, d'un autre côté, un composite étant constitué d'au moins deux éléments distincts ne possédant pas les mêmes propriétés physiques le rend hétérogène, il est donc nécessaire de prendre en compte la nature tensorielle des propriétés physiques du composite [Sen17][Was11].

La conductivité électrique peut être mesurée à partir de méthodes d'homogénéisation qui permettent de déterminer les propriétés effectives d'un milieu hétérogène à partir de celles de ses constituants [Lin13] et dont a été fait l'objet de recherche de nombreux chercheurs dans la littérature.

La conductivité électrique des composites (ex : composite à fibre de carbone (CFRP)) dépend fortement de l'orientation des fibres comme la montre figure I.22, il en résulte ainsi, une conductivité électrique dans le sens des fibres, dite longitudinale σ_L , une conductivité électrique transverse aux fibres essentiellement due aux contacts existants entre fibres est nommée transversale σ_T , et une conductivité électrique selon l'épaisseur σ_E .

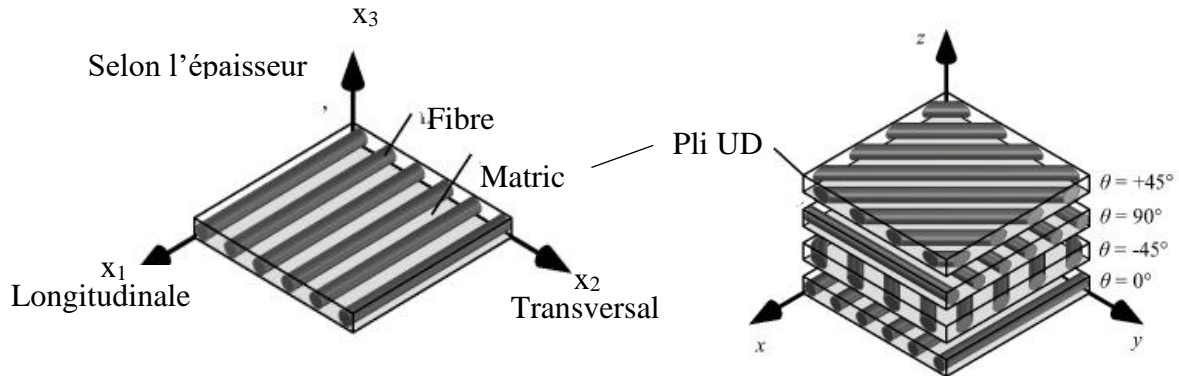


Figure I.22 : orientation des fibres sur un pli UD d'un CFRP laminé [Lau20]

VII. Défauts des matériaux composites

La présence des matériaux composites dans divers domaines tant par leurs indéniables performances que par leurs caractéristiques apportant légèreté, résistance, rigidité et bien d'autres avantages, ne sont pas immunisés contre les défauts. Quelques-uns sont représentés dans la figure I.23.

L'utilisation des composites dans des pièces relevant de certaines applications (aéronautique, aérospatial, automobile...) exige sécurité et fiabilité ; il est donc plus que nécessaire d'évaluer ces défauts, qui peuvent survenir lors du processus de fabrication ou en cours d'utilisation, et fin de vie.

Les défauts les plus fréquemment observés sont [Rou09][Ba21][Khe16] :

- Rupture de fibres : survient lors d'un impact, ou lors de la fabrication.
- Impureté : introduction d'un corps étranger.
- Mauvais taux de remplissage : excès ou insuffisance de résine.
- Porosité : lors de la fabrication (mise sous vide).
- Mauvais alignement des plis : dans l'empilement du stratifié
- Ondulation des fibres.
- Infiltration de liquides.

- Fatigue : phénomène progressif d'endommagement, causé par des microfissures qui grandissent au fur et à mesure entraînant une fissure.

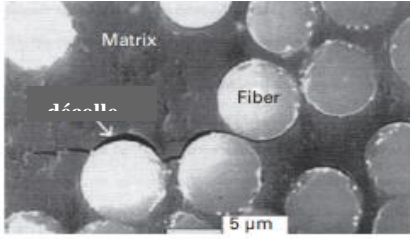
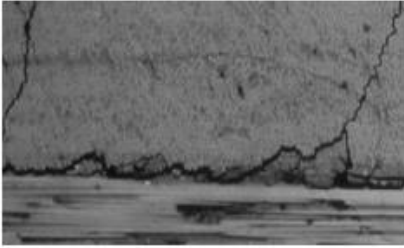
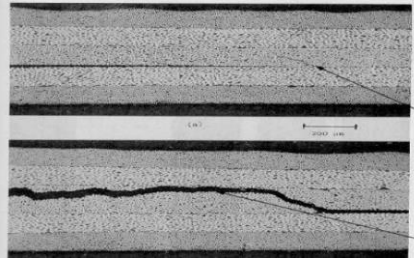
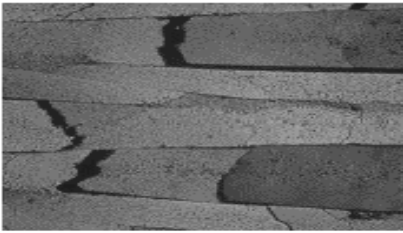
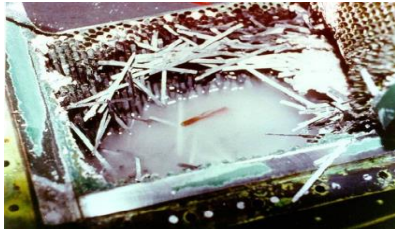
<p>Rupture de fibres</p>	
<p>Délaminage</p>	
<p>Matrice fissurée</p>	
<p>Rupture due à la fatigue</p>	
<p>Infiltration d'eau</p>	

Figure I.23 : défauts survenus aux matériaux composites [TVS12][Rou09] [Pai12]

VIII. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux innovants utilisés pour leurs excellentes propriétés, le polymère renforcé de fibre de carbone (CFRP) est un type de composite composé de fibres de carbone fournissant la force et la rigidité et d'un polymère agissant comme une matrice cohésive permettant la protection et le maintien des fibres.

Ce chapitre a permis de présenter globalement les matériaux composites, leurs classifications, processus de fabrication ainsi qu'une représentation de quelques défauts leurs étant liés, notre problématique repose sur la détection de défauts sur un CFRP au moyen d'un contrôle non-destructif par courants de Foucault, le chapitre suivant traitera du CND en général et sur cette méthode de contrôle en particulier.

Chapitre II

Méthodes CND

Sommaire

- I. Introduction
- II. Contrôle non-destructif. Historique et définition
- III. Objectif du CND (Non Destructive Testing “NDT”)
- IV. Principe général de détection de défauts
- V. Les procédés CND et choix de la méthode
- VI. Conclusion

I. Introduction

Au cœur des thématiques relevant des matériaux composites se trouve la problématique liée à la fiabilité et sécurité, étant primordiales lorsqu'il s'agit de leurs utilisations, surtout qu'ils gagnent de plus en plus de terrain en s'infiltrant dans une variété de domaines qui exigent une garantie de sûreté. En effet, l'industrie actuelle et futuriste à la recherche constante d'innovations tenant compte de l'environnement, vise la diminution du poids des produits destinés par exemple à l'automobile ou encore l'aéronautique, car le gain en masse se traduit par une diminution de consommation en carburant et de ce fait moins d'émissions de polluants dans l'atmosphère [Por00] chose qu'a poussée nombreux chercheurs et ingénieurs à travailler sur les structures et matériaux destinés à ces secteurs pour parvenir à réduire considérablement le poids de ces appareils, et ce, en utilisant les matériaux composites (comme ceux à fibre de carbone CFRP caractérisés par la légèreté). Tout en s'aidant de la modélisation numérique, à l'instar de la compagnie aérienne Airbus qui a fait appel au leader mondial dans le domaine de fibre de carbone pour fournir les composites qui composent près de 53 % de la structure primaire de l'avion A350XWB notamment le caisson de voilure, fuselage, les ailes entières [PP13] ... Etc. Illustré en figure II.1.



Figure II.1 : matériaux utilisés dans l'Airbus [PP13]

Cependant le risque zéro n'existe pas, tout comme tout autre produit, les matériaux composites sont sujet aux défauts, entraînant de nombreuses craintes quant à leurs utilisations dans des domaines aussi sensibles que l'aérospatiale, aéronautique, transport automobile et ferroviaire. Pouvant survenir dès leurs élaborations telle la porosité, manque de matière fissure matricielle, ou bien pendant la mise en service, notamment dans les aéronefs qui sont soumis aux impacts, foudroiement. Il en résulte des dommages sur le composite telle l'infiltration d'eau, la décohésion fibre-matrice, rupture de fibres, pouvant entraîner des accidents mortels comme ce fut le cas lors du crash de l'avion A300 en novembre 2001 en Amérique, en raison du détachement de la gouverne et stabilisateur vertical dont la pièce en composite ayant le trou permettant de fixer celui-ci au fuselage eut une rupture comme le montre la figure II.2 [Rou09].

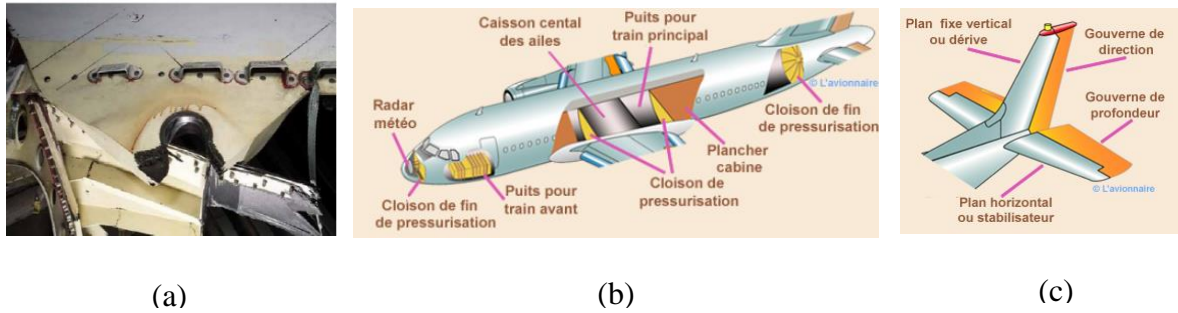


Figure II.2 : zone de rupture du stabilisateur avion A300 (a), fuselage (b), gouverne et stabilisateur (d) [VD10]

C'est pourquoi plusieurs études se font dans le but de la sûreté via des moyens permettant la détection de défauts des composites survenus soit lors du processus de fabrication ou au cours de leurs cycles de vie, et ce, par des techniques dites non-destructives CND.

Dans ce chapitre, une présentation des techniques de contrôle non-destructif (CND) les plus couramment utilisées sera exposée en mettant l'accent sur la technique CND utilisée dans notre thématique à savoir par courants de Foucault : CND-CF.

II. Contrôle non-destructif. Historique et définition

Entre 1816 et 1848, on estime qu'environ 1443 personnes ont perdu la vie par suite de l'éclatement de chaudière sur les bateaux à vapeur en Amérique, aussi en Avril 1865, une seule explosion suffit pour rentrer dans la plus pire catastrophe maritime de l'histoire en prenant l'âme de 1547 personnes brisant ainsi le silence de cette nuit régnant sur le fleuve du Mississippi, un chiffre qui n'a malheureusement cessé d'accroître au nombre de jours suivant ce terrible accident allant de 1700 à 1800 personnes, tous passagers du bateau *SS Sultana* (figure II.3) dont la capacité légalement autorisée était de 376 personnes, mais qui ce jour-là en transportait 2300 passagers [G.Peix80][LCL98].

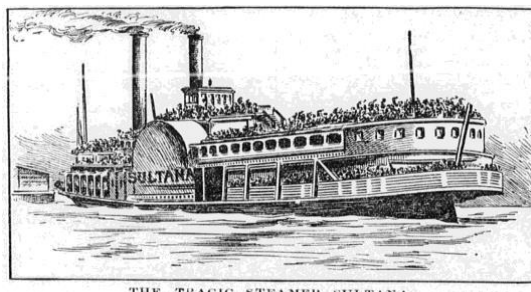


Figure II.3 : bateau *SS Sultana* [LCL98]

De nos jours, la probabilité d'éclat de chaudières reste infinitésimale, cette différence s'explique par l'immense progrès technologique résultant des ères d'études, recherches, développements, élaborations de matériaux, menés par les scientifiques qu'ont développé au

fil des années les techniques de contrôles non-destructifs dans le but de réduire les craintes liées à la sécurité. « *Dans la vie rien n'est à craindre, tout est à comprendre.* » Marie Curie.

Le CND regroupe l'ensemble des techniques et procédés, pouvant fournir des informations liées à l'état de santé de pièces, matériaux ou structures sans les altérer pour en assurer l'intégrité allant de la conception jusqu'à la maintenance.

C'est l'examen d'un objet avec une technologie qui n'affecte pas son utilisation future [Shu01].

Les termes contrôles non-destructifs (CND), essais non-destructifs, évaluations non-destructives (END), caractérisation non-destructive (NDC) ou encore inspections non-destructives (IND) sont aussi couramment utilisés pour décrire cet ensemble de méthodes de contrôles ayant l'avantage d'être rapides, simples et non onéreuses [PLT21] [Shu01]. Donnant la possibilité à la caractérisation de défauts, de propriétés géométriques, propriétés physiques (telle la conductivité, perméabilité), évaluation des dommages, dans le but de la prévention d'accidents pouvant porter atteinte à l'utilisateur, et ainsi en assurer la fiabilité et sécurité.

Sur une échelle temporelle, les méthodes CND sont apparues avec l'avènement des activités reliée au contrôle de pièces métalliques dès 1926 [Zao08] et radiologiques à partir des années 1930, ce n'est toutefois qu'à partir de la Seconde Guerre mondiale qu'elles ont pris leurs essors dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie (contrôle des aciers, soudures) [DF96] et des activités nucléaires entre les années (1950 – 1980), gagnant le terrain de l'aéronautique. Avec l'intérêt porté aux composites ainsi qu'aux développements liés à l'électronique, l'outil informatique et des méthodes de calculs numériques depuis 1980 [GC16], aujourd'hui elles sont omniprésentes et indispensables en tout domaine.

La complexité des matériaux composites, constitués d'éléments distincts les rendant hétérogènes et anisotropes, constitue un challenge aux scientifiques quant à l'application des CND. Si certains défauts sont visibles à l'œil nu étant surfaciques comme les fissures, rayures, d'autres exigent une plus grande investigation étant internes, multi-échelles tel que les fractures de matrices, le délaminage, rupture de fibres. La figure II.4 regroupe les défauts qui peuvent survenir lors de la fabrication et mise en service des matériaux, structures composites répertoriées sous différentes échelles [WZLFM20].

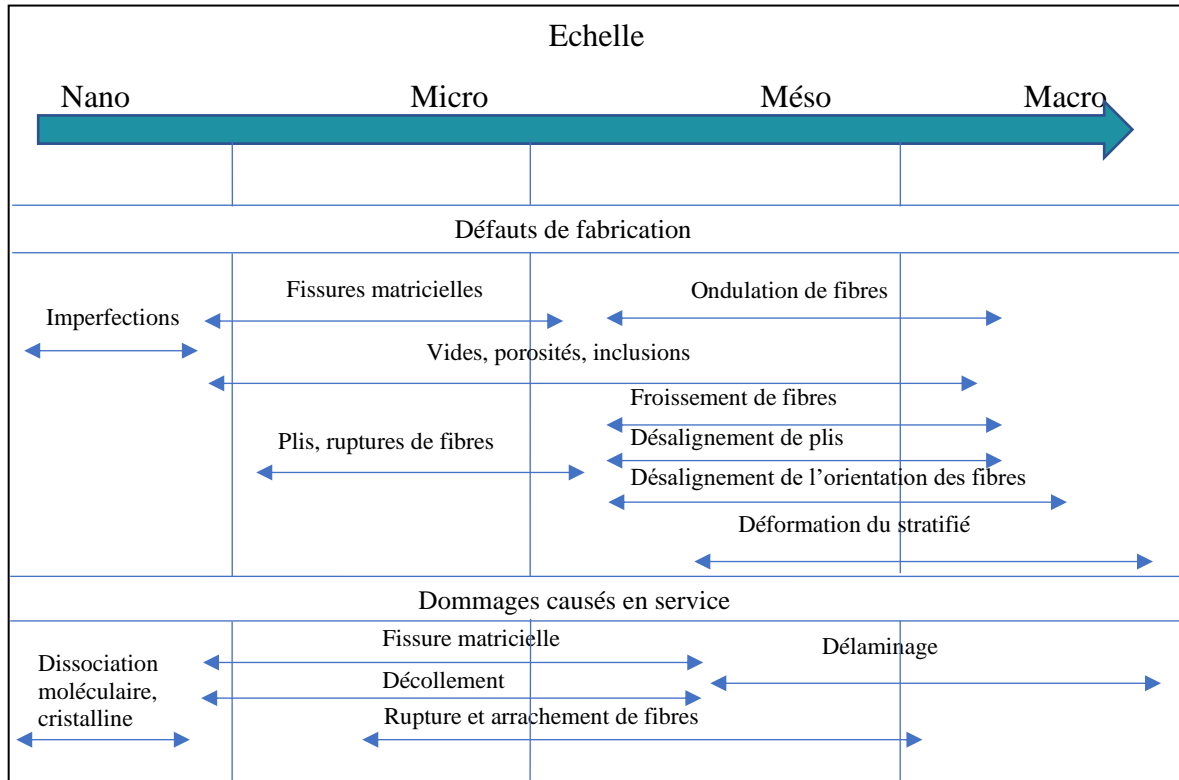


Figure II.4 : Echelle et type de défauts survenant lors de la fabrication et mise en service [WZLFM20].

III. Objectif du CND (Non Destructive Testing “NDT”)

Le CND a pour objectif le contrôle d'état de pièces, matériaux ou structures, et la détection de défauts en mettant en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physiques, chimiques préjudiciable à leurs bons fonctionnements, sans que ces examens ne puissent nuire à leurs utilisations ultérieures [Rav08] [DF96].

Ceci peut correspondre à deux types de contrôles :

- L'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce : épaisseur, propriétés électromagnétiques constitutives du matériau, recherche d'une rupture de ces paramètres [Rav08].
- Recherche de défauts : généralement répertoriés en deux catégories :
 - Défauts surfaciques : accessible à l'observation directe, mais pas toujours à l'œil nu, ils peuvent être ponctuels, il s'agit là des fissures, craquelures, ruptures, qui peuvent entraîner des dommages dès que leurs profondeurs dépassent quelques μm , impliquant l'emploi de méthodes de détection très sensibles illustré en figure II.5. (a).

Comme ils peuvent être des défauts d'aspect, telle la surépaisseur comme le montre la figure II.5.(c) tâches, attirant le regard et rendant ainsi le produit inutilisable [Rav08] [DF96].

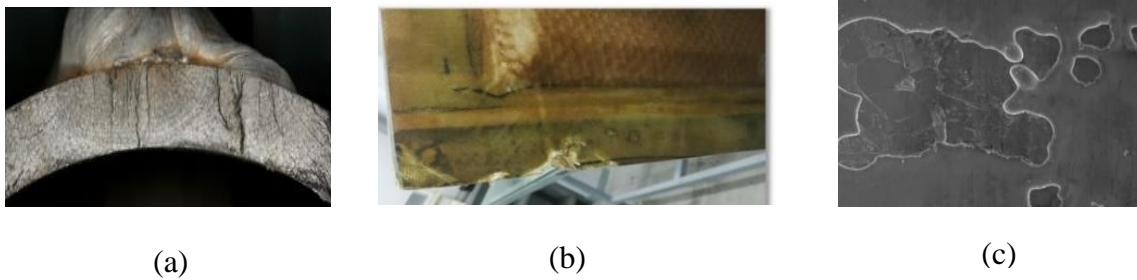


Figure II.5 : défaut surfacique type fissure (a) [CGE], défaut sur pièce composite aéronautique (b) [GRJ], défaut d'aspect type surépaisseur (c) [CGE]

➤ Défauts internes : ce sont des hétérogénéités, de natures, formes, et dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler [DF96], comme ils peuvent être un délaminage, rupture de fibre, cisaillement, rupture longitudinale dans un matériau composite [Car19] illustré en figure II.6.

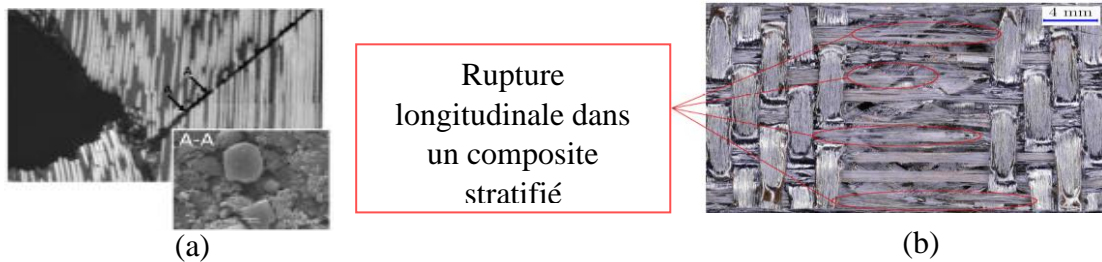


Figure II.6 : défaut interne, rupture de fibre par cisaillement (a) et rupture longitudinale (b) [Car19]

IV. Principe général de détection de défauts

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée [DF96] :

- Excitation : mise en œuvre d'un processus physique énergétique.
- Perturbation : modulation ou altération de ce processus par les défauts.
- Révélation : détection de ces modifications par un capteur approprié.
- Interprétation : traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

V. Les procédés CND et choix de la méthode

La diversité des pièces à inspecter, leurs géométries, les matériaux utilisés fait qu'il n'y est de méthode CND universelle. Il existe une multitude de contrôles non-destructifs utilisés dans différents domaines de l'industrie, et chacune d'entre elles présente ses avantages et

inconvenients. Ces procédures de contrôle peuvent se produire souvent au cours de la vie de l'objet à contrôler et doivent satisfaire certains critères et objectifs : la rapidité d'exécution, le coût, la fiabilité de l'examen, la sensibilité, la reproductibilité (une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.) tout en maximisant la probabilité de détection [Rav08][Shu01] [Meo20]. Voici une liste non-exhaustive des procédés et techniques couramment employées pour la détection de défauts retrouvées dans la littérature, en donnant un aperçu global de chacune d'entre elles et en détaillant celle à laquelle on a fait recours dans notre thématique à savoir CND par courant de Foucault (CND-CF).

V.1. Procédés optiques

V.1.1 Examens visuels (Visual Testing "VT")

L'inspection visuelle est la principale méthode d'inspection de routine pour différents secteurs à structure composites comme les avions, les lames éoliennes, les pièces automobiles. Elle est considérée comme étant le moyen basique, rapide, moins cher [WZLFM20], et commun de la plupart des méthodes CND. Quand il s'agit de défauts surfaciques (voir figure II.7), telles les fissures, bosses de surface, impacts... Elle fait appel à des outils comme les lampes, miroir, verre grossissant [Baa09], voir figure II.7. Principalement effectuée par des opérateurs qualifiés, elle dépend d'un certain nombre de facteurs tels que l'éclairage, le temps d'inspection, l'expérience de l'inspecteur [FPBF21] [LK22].



Figure II.7 : exemples de dégâts surfaciques dans les structures composites laminés détectables en VT [FPBF21] [LK22]

V.1.2 Interférométrie holographique (Holographic Interferometry "HI")

L'holographie a été inventée en 1949 par le physicien Dennis Gabor, et fut développée ensuite au début des années 1960 pour être pratiquée en CND aux alentours de 1965 [Shu01] [Geo20].

L'interférométrie holographique permet la restitution d'un objet en trois dimensions (3D), en utilisant les interférences produites par une onde laser de référence envoyée directement sur le support d'enregistrement et une onde du même laser diffractée (réfléchi) par l'objet testé [Kar13], comme le montre la figure II.8 ; cette technique a été utilisée à titre d'exemple dans

les travaux du chercheur *Howard Fein* en 1998, dans l'analyse dynamique et structurelle d'un composite graphite-époxy.

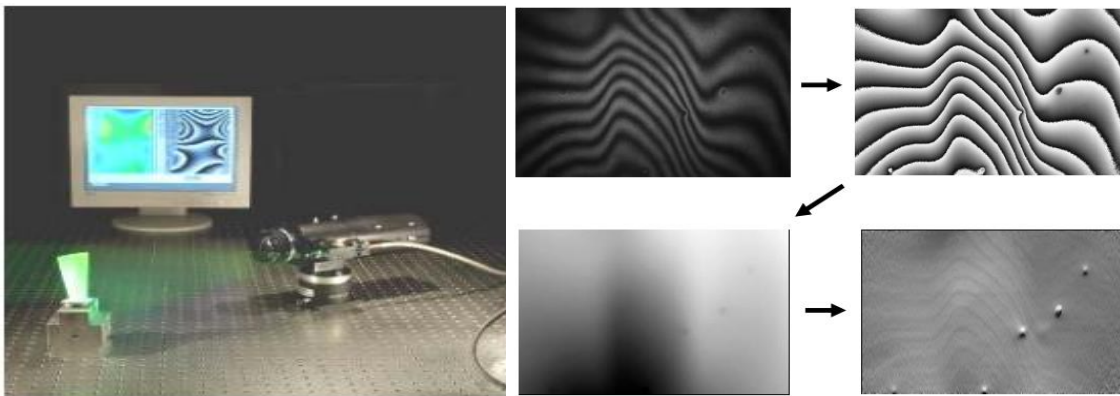


Figure II.8 : holographie interférométrique et détection de défauts [Geor17]

V.1.3 Contrôle laser, shearographie (Shearography Testing “ST”)

Développée vers la fin des années 1970, cette technique a été utilisée pour la première fois dans les années 1980 pour l'inspection des structures composites du *bombardier furtif B2* lors de sa production [Gg17]. Le concept de base de la ST illustré en figure II. 9 (a) repose sur un faisceau laser illuminant la surface, l'objet à inspecter. Une caméra enregistre alors la lumière réfléchiée par cette surface. Caméra devant laquelle est placé un dispositif permettant de séparer l'image en deux parties (séparateur de faisceau) et de les recombiner après que chacune d'elles se soit réfléchiée sur un miroir. On incline un des deux miroirs à l'aide d'un élément piézoélectrique de manière à introduire un décalage latéral entre deux images (cisaillement optique ou shear en anglais) [Gg17] [GTLSMDVJLD13].

La superposition des deux images donne lieu à une figure d'interférence (shearogramme) qui est numérisée et stockée sur ordinateur. Cette opération s'effectue pendant que l'objet se déforme sous l'effet d'une contrainte extérieure, par exemple une lampe comme le montre la figure II. 9 (a) [GTLSMDVJLD13].

Les zones non-homogènes de la pièce se présenteront sous la forme de déformations non-uniformes à la surface, une sorte de topographie de défaut [Gg17] [GTLSMDVJLD13]. La shearographie laser robotisée, automatique permet l'inspection des structures composites complexes comme le montre la figure II. 9 (b) [Gg17].

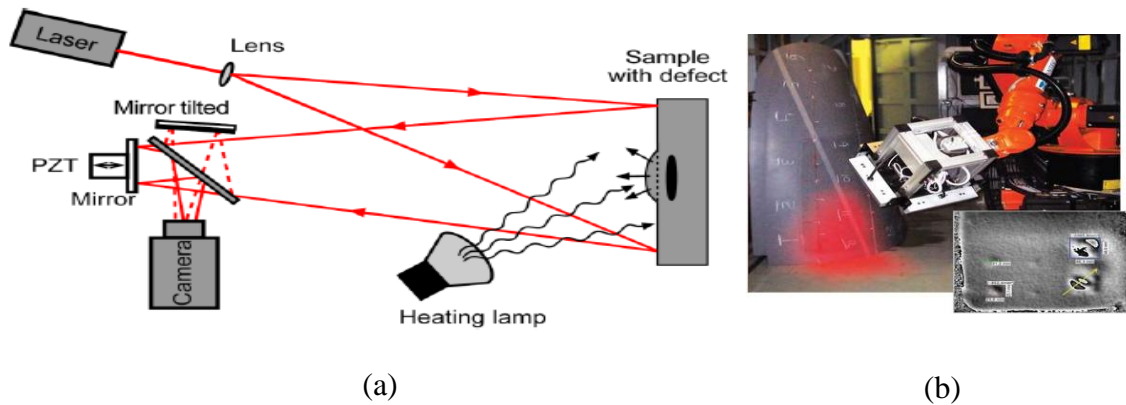


Figure II.9 : principe de fonctionnement de la shearographie (a) [GTLSMDVJLD13] et shearographie robotisée (b) [Gg17]

Cette méthode peut être employée à titre d'exemple dans le cadre de la détection de défauts en épaisseur des composites GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) laminés [TAG21].

V.1.4 Thermographie infrarouge (Infrared thermography testing "IRT")

Elle permet d'obtenir, au moyen d'une caméra thermique, une carte de luminance de la scène thermique observée dans le domaine spectral de l'infrarouge. Elle repose sur l'utilisation d'une ou plusieurs lampes infrarouges qui illuminent la surface de l'objet, générant une onde de chaleur qui se propage dans le matériau. La caméra infrarouge observe la température en surface de l'objet lorsque cette onde de chaleur pénètre dans le matériau (voir figure II.10 (a)). La présence d'un défaut va altérer la propagation de la chaleur, ce qui se verra en surface par une température différente [BBC] [GTLSMDVJLD13].

Deux techniques de CND-IRT pour la détection de défauts des matériaux composites sont répandues dans la littérature, à savoir la thermographie infrarouge active illustrée en figure II. 10 (b) : le composite est soumis à une stimulation artificielle (flash ou lampe par exemple) on mesure ensuite les contrastes de température par des méthodes comme la thermographie pulsée, Lock-In, laser infrarouge... Et la thermographie infrarouge passive [Mou18] montrée en figure II. 10 (c) : pour la mesure des contrastes de température dans le composite on utilise les stimulations naturelles (soleil par exemple), afin de détecter des défauts superficiels ou de quelques millimètres de profondeur.

On retrouve dans la littérature [YH16], une étude complète et approfondie par CND-IRT, pour l'inspection des composites.

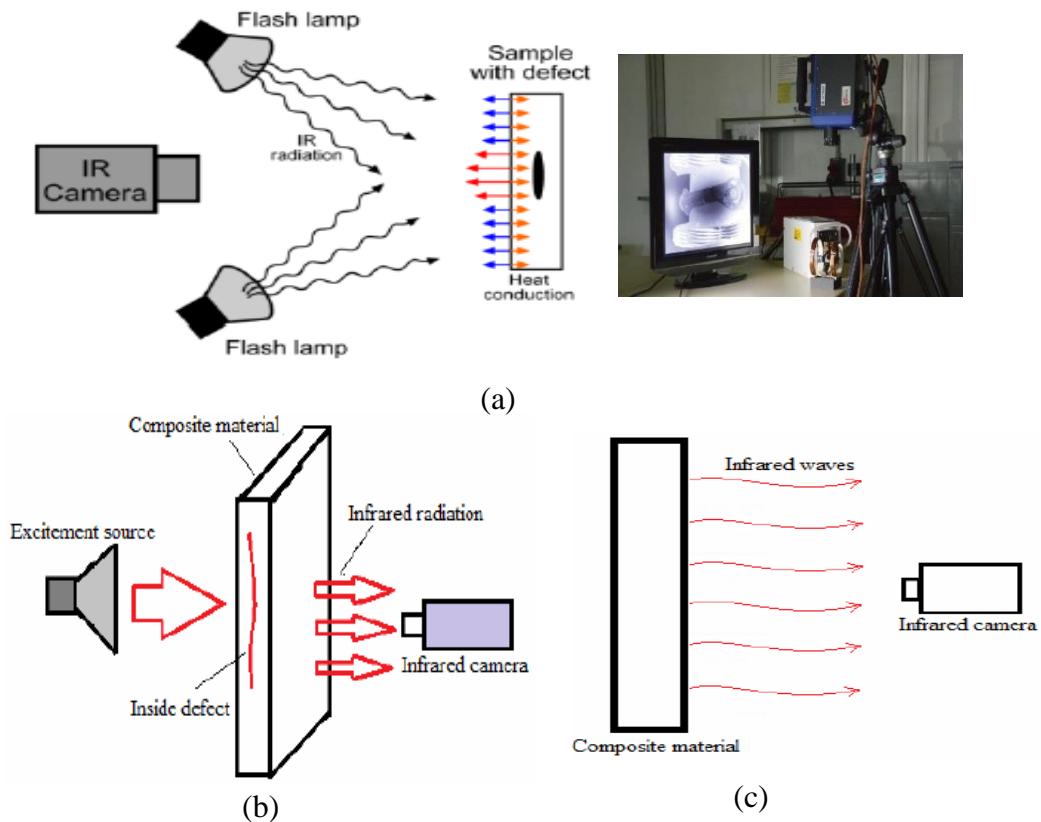


Figure II.10 : principe thermographie infrarouge (a) [GTLsMDVJLD13] [BBC], IRT active (b), IRT passive (c) [Mou18]

V.2. Ressuage (Liquid penetrant testing “PT”)

Il s’agit d’un contrôle par pénétration de liquide (ou d’un gaz) qui met en évidence les défauts débouchant (fissures, porosités...) [Peix80] [BBC] cette technique a été relancée et améliorée durant les années 1940 avec l’ajout des colorants fluorescents au pénétrant la rendant plus efficace [Peix80] [Mix05] [Atos14].

C’est une méthode d’inspection peu coûteuse permettant la détection des discontinuités à la surface, elle s’applique à presque tous les matériaux (quelques problèmes avec les plastiques et les matériaux poreux) [Peix80] [Atos14] et dont le principe comporte quatre phases (voir figure II.11) [Peix80] [Mix05] [BBC] :

- Nettoyer la pièce à contrôler pour éliminer tout corps étrangers, peintures, vernis, rouille, tartre, saletés.
- Appliquer un liquide coloré ou fluorescent sur la surface à contrôler et laisser pendant un certain temps, ce dernier s’infiltré dans les défauts (illustré en figure II. 11 (b)).

- Vient ensuite l'éliminateur pénétrant, qu'est un liquide solvant, pour nettoyer l'excès de produit (une opération très délicate car si trop poussée, elle élimine le produit jusqu'au fond des défauts, et si elle est trop rapide, laisse subsister du produit à la surface de la pièce).
- Enfin arrive le révélateur, en poudre (révélateur sec), ou en suspension dans un solvant (révélateur humide), appliqué par trempage ou au pistolet afin d'absorber le pénétrant contenu dans les discontinuités, il fait "ressuer" le pénétrant, à la suite de quoi les indications de discontinuités apparaissent en surface (montré en figure II. 11 (c)).

On vient par suite observer visuellement la surface enduite de révélateur à l'aide d'une lampe classique ou ultra-violetes (cas de produits pénétrants fluorescent), le liquide qui s'est introduit dans les fissures, remonte petit à petit dans le révélateur. Le défaut est ainsi élargi et devient nettement visible [Peix80]. La surface de la tâche indique le volume du défaut, tandis que le temps mis par le liquide pour remonter indique la profondeur de celui-ci [Peix80].

Le ressuage est un procédé de contrôle non-destructif (NDT) principalement utilisé dans l'industrie aéronautique. Cette technologie révèle la présence de fissures sur tout type de pièces métalliques, céramiques ou composites.

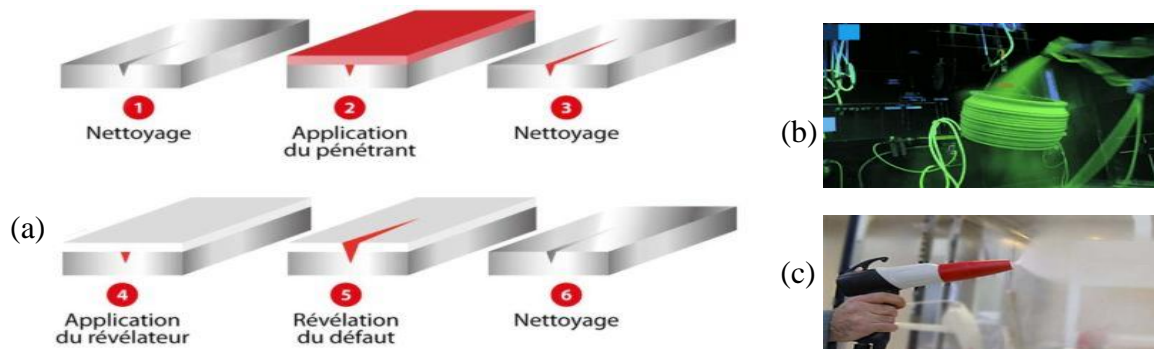


Figure II.11 : principe du ressuage (a)[GN], application du pénétrant (b) [SK], et du révélateur (c) [SK]

V.3. Procédés magnétiques

V.3.1 Analyse du bruit de Barkhausen (Barkhausen Noise Analysis "BNA")

L'effet Barkhausen a été découvert par le physicien allemand *Heinrich Georg Barkhausen* (présenté sur la photo de la figure II.12) en travaillant sur l'acoustique et le magnétisme, il trouva que lorsque le champ magnétique traverse un matériau ferromagnétique, l'aimantation de celui-ci change en une série de minuscules sauts discontinus, qui peuvent être entendus comme une série de clics dans un haut-parleur attaché à une bobine de fil autour du matériau.

Il a été déterminé par la suite que ces sauts étaient causés par le mouvement des domaines magnétiques (domaines de *Weiss* entourés de parois de *Bloch*) dans le matériau [MBHL20].

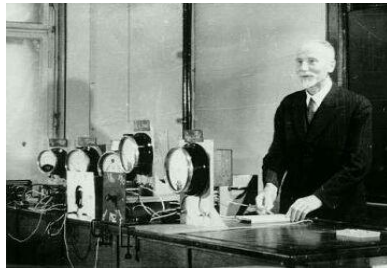


Figure II.12: *Heinrich Georg Barkhausen* [EL10]

Sous l'action d'un champ magnétique appliqué, les parois de Bloch se déplacent de façon continue, mais lorsqu'elles rencontrent des défauts elles s'y trouvent ancrées, le désencrage de ces parois nécessite alors un champ appliqué légèrement supérieur, cette dernière avance alors brusquement jusqu'au défaut suivant, ce qui induit la génération d'une onde électromagnétique et une variation de flux [Ama07].

Cette technique a donné des résultats concluants et présente une bonne sensibilité pour la caractérisation de composites magnétiques doux à base de poudres ferromagnétiques et de revêtement de résine [NFZKMS20].

V.3.2 Magnétoscopie (Magnetic particle inspection “MT”)

Il s'agit d'une méthode CND simple pour la détection des fissures surfaciques ou juste sous la surface de matériaux ferromagnétiques [Iaea00] [IAM12] [Peix80], la magnétoscopie est apparue pour la première fois dans les années 1920 [GAO20], la première avancée majeure de cette méthode fut à partir de 1940 [Shu01] s'ensuit de nombreux perfectionnements très importants depuis 1985[BBC].

La MT consiste à :

- Soumettre un matériau à l'action d'un champ magnétique d'une intensité suffisante pour dépasser légèrement le coude de début de saturation de la courbe induction-champ [Peix80].
- Recouvrir ensuite de petites particules magnétiques, qui sont généralement une suspension sèche ou humide de limaille de fer [IAM12].
- Les fissures de surface créent un champ de fuite de flux magnétique dans le composant magnétisé comme le montre la figure II.13, les particules magnétiques sont attirées et se regroupent ainsi au niveau de la fissure [IAM12] [Mix05].

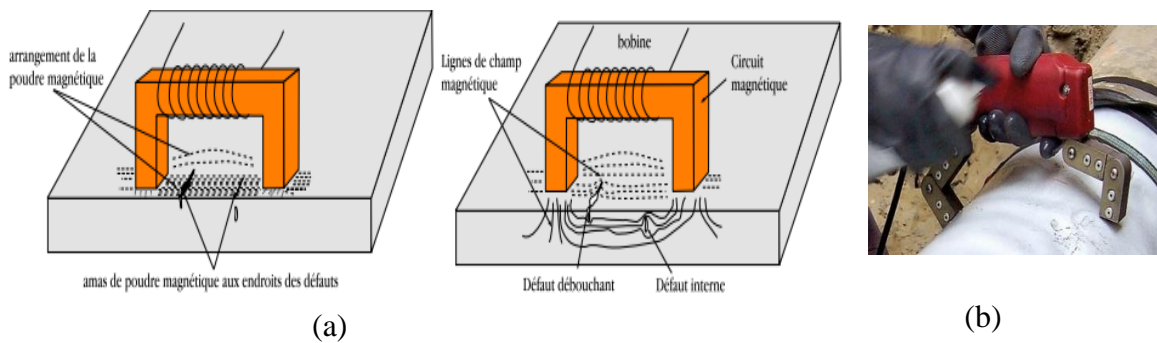


Figure II.13 : Principe de la magnétoscopie (a) [Cho09], procédure MT (b) [BBC]

V.4. Procédé par rayonnements ionisants

V.4.1 Radiographie par rayons X, (Radiographic Testing “RT”)

Le 8 Novembre 1895, *Wilhelm Conrad Röntgen*, sur la figure II.14, physicien Allemand, remarqua en étudiant les tubes à rayons cathodiques la luminescence d'un écran de baryum sur une table loin de lui, des rayons qui lui étaient inconnus et qui nomma Rayons X (en allusion à la variable mathématique de l'inconnu “x”), pouvant pénétrer le papier, bois métal mais aussi la main de sa femme *Bertha*, comme le montre la figure II.14, et permettant d'obtenir la première radiographie à rayon X. Cette découverte lui a valu en 1901 le premier prix Nobel de physique. [BIWM02] [Shu01].



Figure II.14: *Röntgen* [BIWM02], main de *Bertha* [Deutsches Museum, Munich, Federal Republic of Germany]

Ce n'est qu'aux alentours de la première guerre mondiale que le CND par rayon X connaît une expansion rapide et une grande avancée, la radiographie met en œuvre des sources émettrices de rayonnement ionisants (tel un tube à rayons X) dirigées vers le composant, pièce à tester, et dont le taux d'absorption change lorsque ces derniers traversent une région ayant un défaut, cette différence d'absorptions peut être visualisée sur un écran fluorescent ou enregistrée sur un film spécial comme le montre la figure II.15.

La taille et la forme du défaut sont mesurés à partir de l'image [IAM12] [KM13] cependant elle ne donne pas d'informations sur la localisation du défaut en profondeur. Il faut pour cela réaliser plusieurs clichés sous des angles différents, ce qui n'est pas toujours possible [Cho09]. Cette technique peut être appliquée dans la détection des défauts tels que les dommages de corrosions et fissures supérieures à $\sim 0,5-1,25$ mm dans les composites. Les fissures longues alignées parallèlement à la direction du rayonnement sont plus faciles à détecter que les fissures perpendiculaires au rayonnements incidents, par conséquent, il est nécessaire d'inspecter un composant avec différents angles de rayonnements [IAM12].

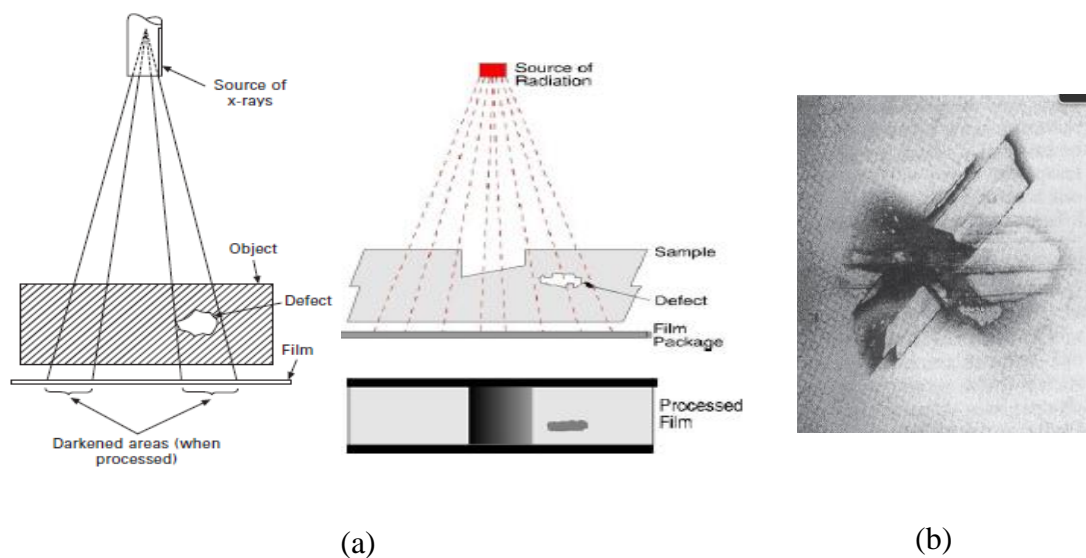


Figure II.15 : principe de la radiographie à rayon X (a) [IAM12] [KM13], radiographie d'un dommage impact composite carbone époxy (b) [IAM12]

V.4.2 Tomographie X (X Computed tomographie "XCT" Scan)

La tomographie à rayon X ou encore la tomodensitométrie (XCT Scan) est utilisée pour inspecter la structure interne d'un objet, elle est basée sur l'absorption des rayons X, et réalisation d'une série d'images suivant différents angles par rotation de l'objet et suivant plusieurs positions en hauteur. Les différentes vues permettent de déterminer l'absorption de chaque élément de volume appelé "voxels" (volumetric pixels) et ainsi reconstituer l'objet en trois dimensions [PB21] [Bal14].

La XCT permet de visualiser et d'obtenir des informations sur l'objet testé et d'en rapporter l'image en 3D pour être lu de façon simple, rapide et fiable [GHO16].

Dans les matériaux composites, cette technique est excellente pour détecter les défauts volumiques tels que la porosité, les inclusions, à échelle micrométrique, idéal pour l'inspection de l'épaisseur totale de la plupart des structures composites, comme le démontre

les travaux de *Jefri Semuel BALE* rapportés dans sa thèse portant sur l'observation des dommages sur les matériaux composites en utilisant le CND.

Par ailleurs les travaux de *A.T. Zehnder, V. Patel et T.J. Rose* parus en 2020 donnent des résultats concluants quant à la possibilité de cartographier la structure d'un composite laminé avant, pendant et après une déformation à laquelle il a été soumis (une torsion) [ZPR20] (voir la figure II.16).

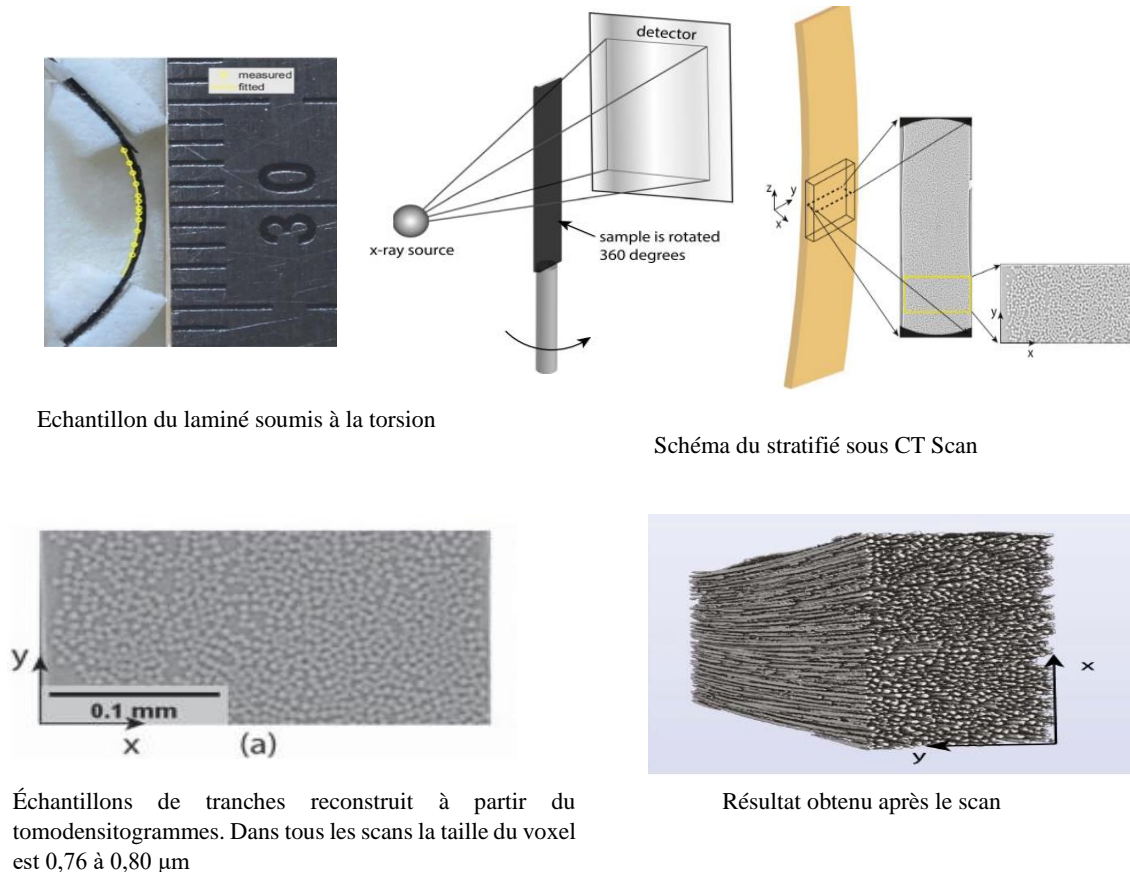


Figure II.16 : laminé tordu et soumis à la XCT [ZPR20]

V.5. Procédés vibrations mécaniques : ultrason (Ultrasonic Testing “UT”)

En 1880, les frères *Curie* ont découvert des cristaux capables de convertir l'énergie ultrasonique en énergie électrique mettant ainsi en évidence l'effet piézoélectrique (sur un échantillon de Quartz qui se charge électriquement lorsqu'il est soumis à une contrainte de compression). Un an plus tard en 1881, *Lippmann* découvrit l'effet inverse dans les mêmes cristaux, ce après quoi, l'une des premières applications des NDE par ultrasons a été appliquée pour la détection d'icebergs en mer, développée en 1912 en réponse directe au naufrage du *Titanic*.

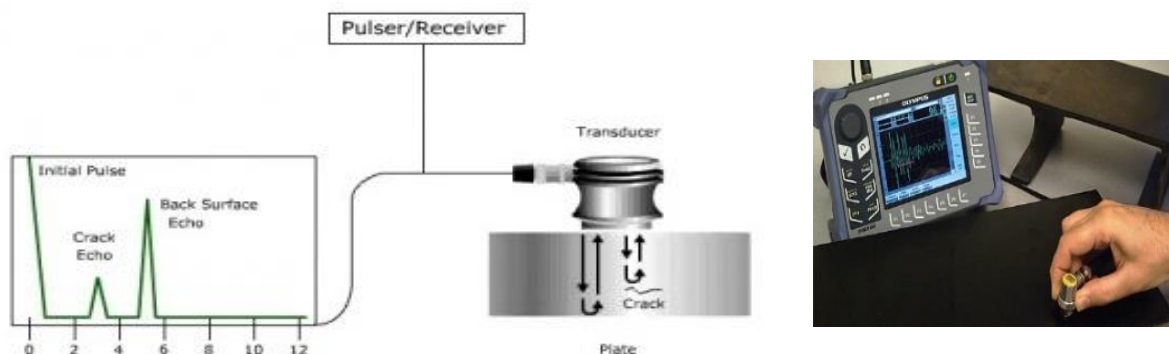
Le succès de cette application a conduit à d'autres applications sous-marines, notamment la détection de sous-marins pendant la Première Guerre mondiale [Shu01]. Après la guerre, les applications ultrasonores se sont développées rapidement.

Vers 1930, *Sokolov* a présenté des travaux utilisant des ultrasons pour tester des matériaux, puis (à peu près au même moment), *Mulhauser* a breveté un dispositif de détection de défauts par ultrasons, le CND par ultrasons n'a cessé depuis de se développer au fil du temps par les inventions et créations de multiples chercheurs pour être appliqué ces dernières décennies à l'inspection des matériaux composites [Shu01].

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore (de volume, de surface ou guidée) se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts ou limites de la pièce puis revient vers le transducteur (mono ou multiélément, qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions.

Dans le cas des ondes de volume, fortement employées dans l'industrie, la sensibilité des mesures dépend principalement de la nature du défaut (par exemple plus sensible aux fissures qu'aux porosités) et peu de son orientation. Les ultrasons sont employés pour la détection en temps réel de défauts en surface et au cœur de nombreux matériaux (métaux, composites, bois...) [Lel12].

Des ondes ultrasonores sont émises sous forme d'impulsions de quelques microsecondes par un élément piézo-électrique et se propagent dans l'échantillon comme le montre la figure II.17. Une inhomogénéité engendre une réflexion partielle (écho), transformée en tension électrique par un capteur piézoélectrique. La pratique la plus répandue pour la recherche de défauts consiste à identifier les échos de défauts pour les localiser [Gab12].



Appareil UT Olympus

Figure II.17 : principe du NDT-UT

Les résultats d’inspection par cette technique sont représentés généralement dans la littérature en trois configurations :

- **A-scan** : représente l’amplitude du signal d’écho ultrasonore reçu par un capteur fixe, en fonction du temps (voir figure II.18(a)) [Sato15] [Tho10].
- **B-scan** : consiste à mesurer le signal pour différentes positions du capteur déplacé le long d’une ligne, le maximum du signal pour chaque position est représenté en fonction de l’abscisse correspondante, on peut ainsi obtenir, selon la méthode utilisée, une représentation en coupe de la pièce inspectée, (voir la figure II.18 (b)) [Sato15] [Tho10].
- **C-scan** : représente le maximum du signal mesuré pour une position donnée mais cette fois ci le capteur est déplacé sur un espace en deux dimensions (\vec{x}, \vec{y}) correspondant à la surface de la pièce, cette dernière représentation offre une image à part entière de la pièce, en d’autres termes c’est une représentation de l’ensemble des amplitudes maximales correspondant au A-scan mesuré selon deux axes d’inspections : axe de balayage et axe d’incrément, les données sont présentées sous forme d’une image (voir la figure II.18 (c)) [Sato15] [Tho10].

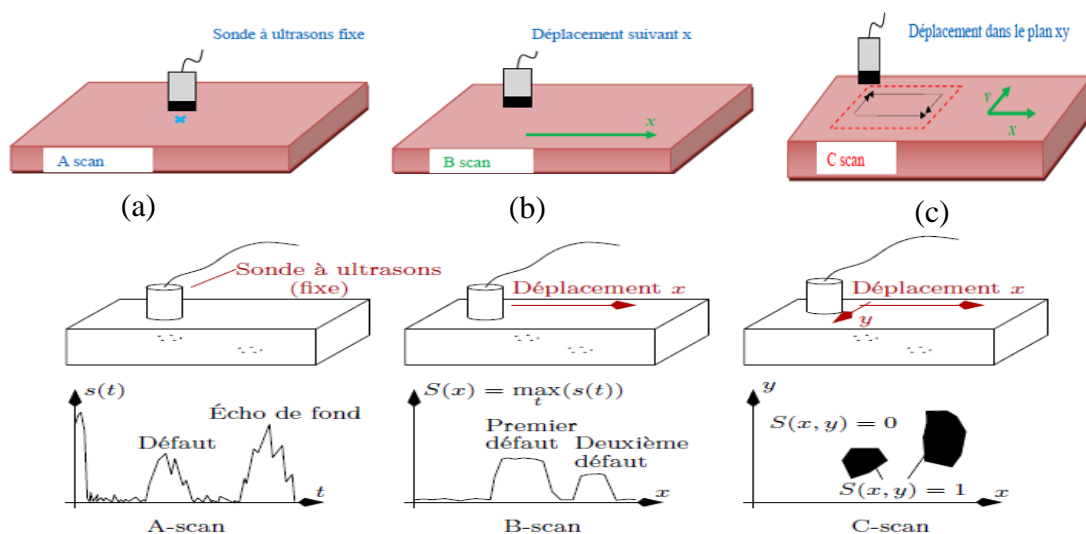


Figure II.18 : Echographie ultrasonore [Sato15]

On retrouve dans les travaux de *Satour Abida* une étude détaillée à cet effet et des travaux effectués dans le cadre du contrôle non destructif par la technique ultrasonore des matériaux composites par deux techniques : ondes guidées pour composites complexes type sandwich, et technique d’émission acoustique pour composites verre-époxy.

V.6. Procédés Électromagnétiques

V.6.1 Courants de Foucault (Eddy Current testing “ECT”)

L’histoire du CND par courant de Foucault est inextricablement liée aux développements de l’électromagnétisme, en effet jusqu’au début du 19^{ème} siècle, le magnétisme et l’électricité étaient deux disciplines distinctes, c’est en 1820 que le professeur de physique Danois *Hans Ørsted* a démontré que l’aiguille d’une boussole placée parallèlement à un fil transportant un courant électrique est déviée, il en déduisit que le courant électrique a créé un champ magnétique qui a engendré la déviation de la boussole ; le premier lien entre l’électricité et le magnétisme se fait, l’électromagnétisme est né ! [Shu01] [Mik14].

Durant la même année les physiciens *Jean-Baptiste Biot* et *Félix Savart* reprirent l’expérience d’*Ørsted* et firent l’étude quantitative des interactions entre aimants et courants, ils mesurèrent la durée des oscillations d’une aiguille aimantée en fonction de sa distance à un courant rectiligne, ils trouvèrent que la force agissant sur un pôle est dirigée perpendiculairement à la direction reliant ce dernier au conducteur et elle varie en raison inverse de la distance.

De ces expériences, l’astronome, mathématicien, physicien français *Pierre Simon Laplace* déduisit ce qu’on appelle aujourd’hui la loi de *Biot et Savart* [Fer02].



Ørsted [Mik14]



Pierre-Simon Laplace [Rac15]

En 1824, Arago a constaté expérimentalement que la vibration d’une aiguille magnétique était rapidement amortie à proximité d’un conducteur. Cette curiosité n’a été expliquée qu’en 1831, lorsque *Joseph Henry* aux États-Unis et *Michael Faraday* en Angleterre ont découvert l’induction électromagnétique, en effet *Faraday* s’est lancé dans le problème inverse à la découverte d’*Ørsted* : comment produire un courant à partir d’un champ magnétique ? et finalement au fil de multiples expériences d’en résulter à la loi, qui de nos jours porte son nom, loi de *Faraday* : “ la variation temporelle du flux magnétique à travers un circuit fermé y engendre une fém. induite”, en effet lorsqu’on place un aimant dans un solénoïde relié à un ampèremètre pour détecter un courant, l’appareil réagit lorsqu’on bouge celui-ci de telle sorte que, plus on le fait bouger, plus le courant produit est important (car la variation du flux magnétique est plus grande) [Shu01] [Fer02].

*Michael Faraday* [Mik14]*Joseph Henry* [Mik14]

Par ailleurs on sait, grâce à *Ørsted*, qu'un courant électrique crée un champ magnétique, donc le courant induit par le mouvement de l'aimant va aussi créer un champ magnétique dont le sens est donné par la loi de *Lenz* : “*l'induction produit des effets qui s'opposent aux causes qui lui ont donné naissance.*” [Shu01] [Fer02].

L'existence des courants induits, a été démontrée pour la première fois par le physicien, ingénieur, inventeur et astronome français *Jean Bernard Léon Foucault* en 1851, des courants qui, dans la littérature francophone portent son nom, et qui se disent Eddy Curent en anglais.

*Emily C. Lenz* [Mik14]*Jean Bernard Léon Foucault* [Tob16]

Les premiers documents traitant l'utilisation du CND-CF remontent aux travaux de *David Edward Hughes*, ce scientifique Gallois qui distinguait les différents métaux et alliages les uns des autres au moyens de courants de Foucault et ce en 1879, année de la mort de *Maxwell*, une époque où beaucoup doutaient encore de ses théories et huit ans avant que *Hertz* ne démontre l'existence des ondes électromagnétiques [PTL21][Shu01], ensuite dès 1926, les premiers appareils de mesure d'épaisseur sont apparus, et le CND-CF s'est développée essentiellement de manière expérimentale, il faut attendre jusqu'aux années 1950-1960 pour que cette technique connaisse une expansion grâce à l'évolution de la science [Zao08] [Shu01].

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs et repose sur le phénomène d'induction électromagnétique dont la particularité essentielle est de pouvoir injecter de l'énergie électromagnétique dans un dispositif sans qu'il n'y ait contact avec l'inducteur, l'évaluation de celle-ci permettra via les mesures adaptées d'accéder à des informations concernant la pièce à inspecter [Zao08].

Au niveau du contrôle non destructif, les courants de Foucault sont traités de manières différentes, la méthode la plus utilisée est celle des courants de foucault sinusoïdaux, (le champ électromagnétique est généré par un courant alternatif, cette méthode est applicable pour des défauts surfaciques ou très proche de la surface [BZVB96]). Il existe d'autres méthodes dérivées de celle-ci et ayant fait l'objet d'étude d'autres chercheurs tel que celle des courants de Foucault pulsé (P.E.C), courants de Foucault multiéléments (E.C.A), courants de Foucault tangentiels (T.E.C) dont est expliqué le principe ci-après.

V.6.1.1 Principe du contrôle non destructif par courants de Foucaults conventionnels

1. Principe

La méthode du CND par courant de Foucault s'applique sur les matériaux électriquement conducteurs [Cho09], elle est basée sur l'interaction entre une source de champ magnétique (bobine) et un matériau conducteur.

Une bobine parcourue par un courant variable, alternatif, placée à proximité d'une pièce conductrice, génère un champ magnétique d'excitation \vec{H}_e qui va induire une circulation de courants dans la pièce conductrice (courants de Foucault : CF) [LeDi08].

Ces courant induits (CF) créent à leurs tour un champ magnétique de réaction \vec{H}_r (champ magnétique induit) qui selon la loi de *Lenz* s'oppose au champ d'excitation qui lui a donné naissance, et modifient par là-même la f.e.m de la bobine [Cho09] [LeDi08] illustré en figure II.19.

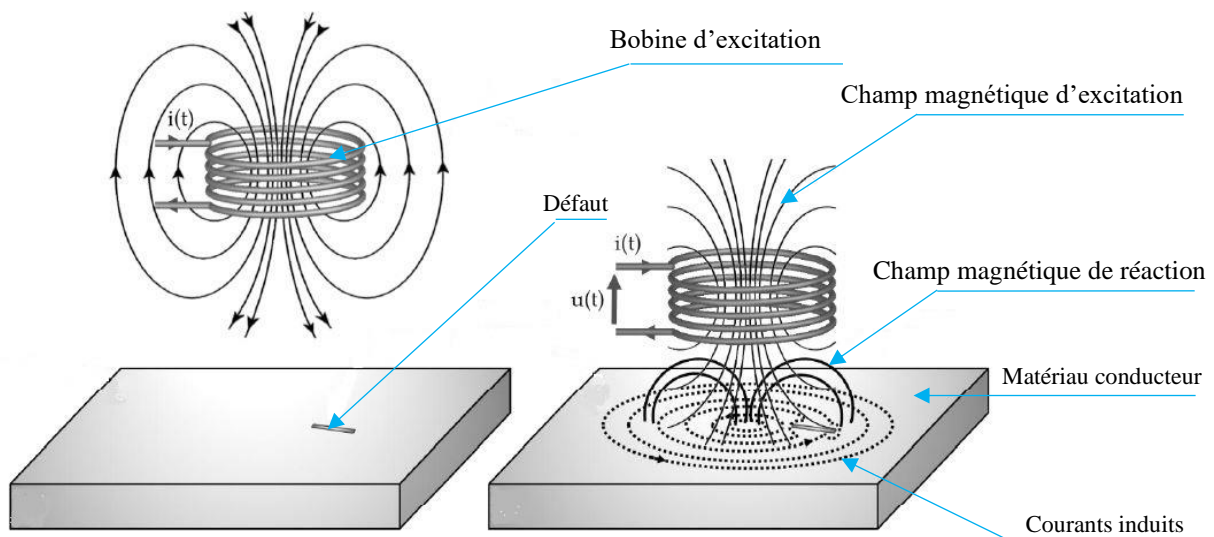


Figure II.19 : principe CND-CF [Del16]

L'analyse de la variation de la f.e.m fournira par suite les informations exploitables pour un contrôle, (en présence de défaut, une discontinuité électrique vient perturber la circulation des courants de Foucault et engendre une variation de la f.e.m induite dans la bobine) [Cho09].

Le champ magnétique de réaction donnera des renseignements sur la présence de défauts (car il dépend de l'état de la structure inspectée en particulier sous présence d'une rupture de conductivité (défaut) : les lignes de courants induits sont déviées par conséquent : le champ \vec{H}_r est modifié. La réponse du capteur à courant de Foucault à un défaut est obtenue en mesurant les variations du champ magnétique résultant :

$$\vec{H}_{res} \text{ (avec } \vec{H}_{res} = \vec{H}_e + \vec{H}_r \text{) [Cho09] [LeDi08]}$$

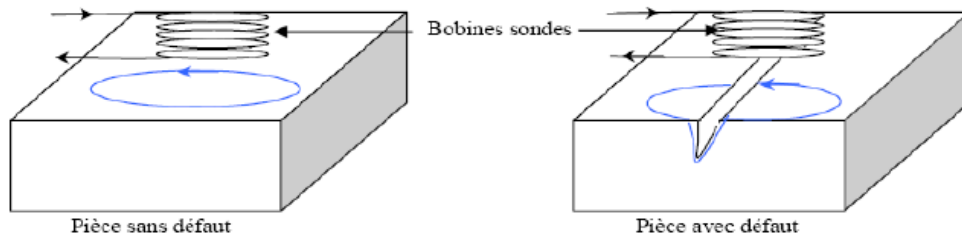


Figure II.20 : principe de la détection de défaut CND-CF.

De manière équivalente, la mesure de la variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation permet la caractérisation du défaut.

Le CND-CF est une technique simple et est surtout utilisée pour la détection de défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement sur la surface des corps conducteurs (effet de peau) [Cho09] en faisant recours à une bobine parcourue par un courant d'excitation ce qui produit un champ électromagnétique régi par les équations de *Maxwell* :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \tag{II.1}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{II.2}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{II.3}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{II.4}$$

Avec :

\vec{D} [C.m⁻²] : Induction électrique.

\vec{E} [V.m⁻¹] : Champ électrique.

\vec{B} [T] : Induction magnétique.

\vec{H} [A.m⁻¹] : Champ magnétique.

\vec{J} [A.m⁻²] : Densité de courants de conduction.

ρ [C.m⁻³] : Densité volumique de charge du matériau.

On considère qu'en régime harmonique basse fréquence, les courants de déplacement $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ sont négligeables, de plus si le matériau est linéaire, homogène et isotrope, de conductivité électrique σ , les différents champs et inductions s'écrivent :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

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

Avec :

μ [H.m⁻¹] : Perméabilité magnétique : $\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m (cas d'un matériau non magnétique, μ_0 étant la perméabilité dans le vide) et $\mu = \mu_0 \mu_r$ (cas d'un matériau magnétique, μ_r étant la perméabilité relative).

ε [F.m⁻¹] : permittivité électrique : $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ (où ε_0 : permittivité électrique du vide $\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$ (C étant la vitesse de la lumière) et ε_r : permittivité électrique du milieu).

σ [Ω .m⁻¹] : Conductivité électrique.

2. Epaisseur de peau

Dans la configuration la plus simple, l'onde plane électromagnétique générée par un dispositif d'excitation (bobine), se propage orthogonalement à une surface plane du matériau [Tho10]. Il a été montré [Lib71] [LeDi08] [Tho10] que la résolution des équations de *Maxwell* conduit alors à exprimer la densité des courants de Foucault induits dans la cible en fonction de la profondeur z comme suit :

$$J(z, t) = J_0 \cdot e^{-z\sqrt{\pi\mu f\sigma}} \cos(2\pi f t - z\sqrt{\pi\mu f\sigma}) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

J_0 [Am⁻²] : Densité des CF à la surface du matériau.

$\pi = 3.1416\dots$

f [Hz] : Fréquence.

μ [Hm⁻¹] : Perméabilité magnétique

σ [Ω m⁻¹] : Conductivité électrique.

Cette relation montre que le module et la phase de la densité des courants induits (CF) dépendent des paramètres électriques du matériau, de la fréquence f d'excitation et de la profondeur z , de telle sorte que plus on pénètre en profondeur dans la cible, plus le module de la densité de courant est faible [Tho10].

Plus la fréquence est élevée, plus la densité de CF est importante et limitée en surface : c'est l'effet de peau, cet effet est caractérisé par l'épaisseur de peau δ qui correspond à une atténuation des courants de Foucault [LeDi08] [Tho10] s'écrivant comme suit :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu f\sigma}} \quad (\text{II.9})$$

Cette valeur permet d'apprécier la profondeur de la zone dans laquelle circule les CF, elle est généralement utilisée pour estimer grossièrement la profondeur de pénétration des CF quel que soit le type d'inducteur utilisé et donc la profondeur d'investigation d'un capteur CF à une fréquence donnée, pour un matériau donné.

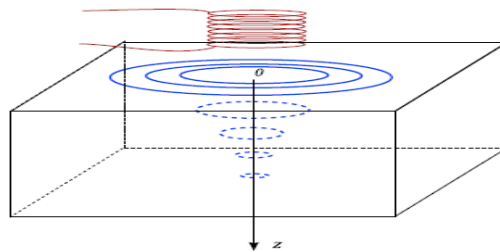


Figure II.21 : répartition des CF dans une pièce [Cho09]

3. Application du CND CF

La technique CND par CF est employée dans de nombreuses applications [Del16], on en cite :

- Mesure de la variation de conductivité électrique ou détection d'une variation de la perméabilité magnétique.
- Mesure de l'épaisseur d'un matériau.
- Détection de défauts surfaciques type fissures à titre d'exemple.

V.6.1.2 Courants de Foucault pulsés (Pulsed Eddy Current "P.E.C")

L'inspection par courants de Foucault pulsés (P.E.C) est une méthode avancée qui se base sur la pénétration du champ magnétique généré par une impulsion de courant, d'amplitude et de durée variable à travers des couches de revêtements pour atteindre la paroi du matériau à inspecter, cette technique est généralement utilisée pour évaluer l'épaisseur et déceler la corrosion sur des matériaux ferreux recouverts d'un isolant ou de revêtements [Nuc23] [BZVB96], mesure d'épaisseurs de matériaux et inspection des assemblages rivetés, détection de défauts profonds même dans les structures en multicouches [MB11].



Figure II.22: inspection P.E.C [Nuc23], [Andt]

Cette technique a fait l'objet de récentes études portant sur la caractérisation des défauts dans les composites stratifiés [KMCSK20].

V.6.1.3. Courants de Foucault multiéléments (Eddy Current Array, "E.C. A")

L'inspection par courants de Foucault multiéléments (E.C. A) représente une évolution de la technique des courants de Foucault conventionnels. Il s'agit de générer un champ magnétique dans un conducteur induisant des courants qui permettent d'avoir des informations sur la santé de la pièce à inspecter. Elle offre une couverture de surface large grâce à l'utilisation de plusieurs bobines composant le capteur, augmentant ainsi la sensibilité aux défauts. Une sonde CF multiéléments peut être personnalisée selon l'application et la couverture désirée, le nombre de bobines et la flexibilité peuvent être ajustés pour inspecter des géométries complexes, elle est efficace dans diverses applications [Nuc23] [RLS17].

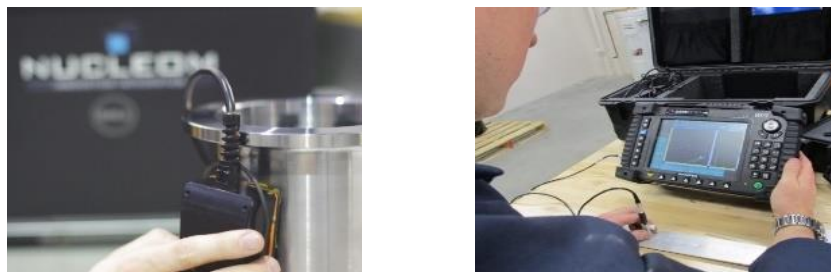


Figure II.23 : inspection E.C.A [Nuc23], [Omx]

V.6.1.4 Courants de Foucault tangentiels (Tangential Eddy Current "T.E.C")

L'inspection par courants de Foucault tangentiels (T.E.C) est une technique basée sur l'induction électromagnétique. La principale différence avec les CF conventionnels réside dans l'orientation des bobines qui est tangentielle à la surface, considérant les CF créés de manière perpendiculaire à la surface. Cela facilite la détermination de la profondeur des défauts [Nuc23].

Les courants de Foucault tangentiels détectent et caractérisent des fissures débouchant à la surface, cette technique est principalement utilisée sur les soudures, ils peuvent également être employés en multiéléments afin d'augmenter la couverture d'inspection [Nuc23].

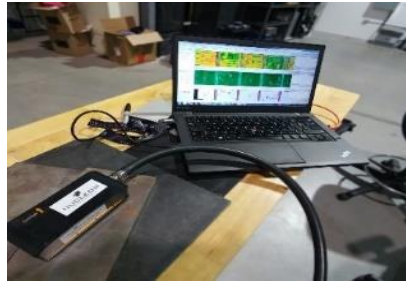


Figure II.24: Inspection T.E.C [Nuc23]

V.6.1.5 Différents types de capteurs

La mise en œuvre de bobinages pour la réalisation d'un contrôle par courants de Foucault peut être effectuée par un grand nombre de façons. Ci-après est indiqué les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés.

V.6.1.5.1 Capteurs à double fonction

Dispositif simple, constitué d'une seule bobine, les fonctions d'excitations et d'observations (émission et réception) sont assurées par la même bobine ; l'exploitation s'effectue en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine (illustré en figure II.25).

Le calcul de cette dernière est basé sur le modèle du transformateur dont le primaire est la bobine d'excitation et le secondaire en court-circuit constitué par la pièce inspectée [Cho09] [Zao08].

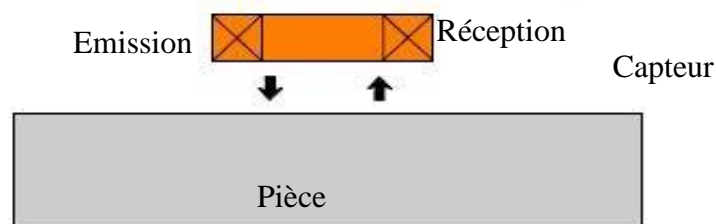


Figure II.25 : capteur à double fonction [Cho09]

V.6.1.5.2 Capteurs à fonction séparée

Dispositif constitué d'au moins deux éléments, les fonctions d'émissions et réceptions sont assurées par des éléments distincts ; l'élément de mesure peut être une bobine aux bornes de laquelle on mesure la d.d.p induite ou un capteur de champ [Cho09] (illustré en figure II.26).

Il est possible d'utiliser des composants mesurant directement l'induction magnétique tels que les magnétorésistances ou les sondes à effet Hall [Zao08].

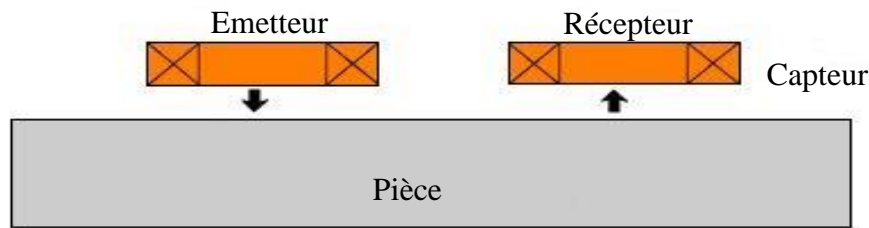


Figure II.26 : capteur à fonction séparée [Cho09]

V.6.1.5.3 Les capteurs différentiels

Dispositif constitué de deux enroulements identiques dont on mesure l'écart de l'impédance. La mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins [Cho09] [Zao08].

Une sonde en mode différentielle est un système destiné à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines [Cho09]. Ce type de sondes est particulièrement utilisé pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce en s'affranchissant de perturbations induites telles que les variations de la distance sonde-pièce (lift-off) ou de la conductivité [Cho09].

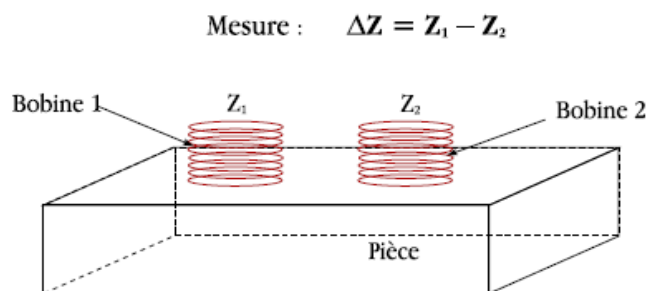


Figure II.27 : capteur à fonction séparée [Cho09]

V.6.1.6 Plan d'impédance normalisée

Les CF exercent, selon leurs intensités ou répartitions dans un matériau, une influence sur la bobine inductrice en modifiant son impédance, ainsi pour un bobinage à N spires parcouru par un courant alternatif d'excitation I_{exc} , la tension aux bornes de cette bobine s'exprime comme suit :

$$\underline{V}_{exc} = \underline{Z} \cdot \underline{I}_{exc} \quad (\text{II.10})$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{V}_{exc}}{\underline{I}_{exc}} = R + jX \quad (\text{II.11})$$

Avec :

\underline{V}_{exc} : Grandeur complexe associée à la tension d'excitation.

\underline{Z} : Grandeur complexe associée à l'impédance en charge.

\underline{I}_{exc} : Grandeur complexe associée au courant d'excitation.

R : Composante résistive qui englobe les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans le matériau ainsi que les pertes internes du bobinage d'excitation.

X : Composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation exprimée par la relation :

$$X = 2\pi fL = \omega L \quad (\text{II.12})$$

Avec :

f : Représente la fréquence appliquée.

L : Représente l'inductance de la bobine.

Le plan d'impédance permet de représenter les mesures de l'impédance d'une bobine dans le plan complexe, l'axe des abscisses représentant la partie résistive, et celui des ordonnées pour la partie réactive de l'impédance, ce plan est couramment employé lorsqu'on effectue des mesures avec une bobine en mode double fonction [Del16].

Pour ne conserver dans l'expression de l'impédance que la variation dues à la présence du matériau, on introduit la notion d'impédance normalisée \underline{Z}_n . La première étape de normalisation est de soustraire la résistance sous vide R_0 , de la bobine [Shu01] ensuite on divise la formule (II.11) sur la réactance sous vide X_0 , [Shu01].

$$\underline{Z} = R - R_0 + jX_0 \quad (\text{II.13})$$

$$\underline{Z}_n = R_n + jX_n = \frac{R - R_0 + jX}{X_0} = \frac{R + jX - R_0}{X_0} = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad (\text{II.14})$$

En procédant à cette normalisation, la mesure devient indépendante de certaines caractéristiques propres de la bobine excitatrice (nombre de spires, pertes à vide) et de la croissance de la réactance en fonction de la fréquence. Elle dépend uniquement des paramètres de la structure (fréquence d'excitation et géométrie de la sonde), et des paramètres de la cible (sa géométrie, sa conductivité électrique σ , sa perméabilité magnétique μ et la distance sonde/cible (lift-off)) [Cho09][Del16].

L'étude des variations de l'impédance normalisée s'effectue dans le plan d'impédance normalisé en traçant la réactance normalisée X_n en fonction de la résistance normalisée R_n .

V.6.1.7 Modes d'excitations

L'extraction des informations sur la pièce à contrôler est liée au mode d'excitation de la sonde on en distingue :

1. Excitation monofréquence

Les courants de Foucault sont obtenus par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe, le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés [Zao08] [Cho09] :

- Pour une fréquence trop basse, l'amplitude des CF sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits et pour une fréquence.
- Pour une fréquence trop élevée il y'a apparition de phénomènes capacitifs parasites engendrés par les capacités inter-spires de la sonde, celles-ci provoquent des résonances et tendent à court-circuiter le circuit inductif.

2. Excitation multifréquence

La méthode d'excitation multifréquence consiste à choisir judicieusement les fréquences d'excitations de la sonde de manière à recueillir des informations sur le matériau à contrôler [Cho09], elle est largement utilisée dans le domaine CND-CF, en réalisant des mesures à plusieurs fréquences d'excitations [Zao08].

3. Excitation pulsée

Cette technique considérée comme une alternative à l'alimentation sinusoïdale multifréquence et consiste à émettre un champ magnétique large bande en excitant la sonde avec un signal impulsionnel, la forme des signaux d'alimentation peut être rectangulaire triangulaire ou semi-

sinusoïdale, dans ce type de contrôle c'est l'évolution temporelle des signaux qui est utilisée [Cho09].

V.6.2 Imagerie par courants de Foucault

La technique de l'imagerie par CF consiste à produire des images de cartographies de champ à la surface des pièces à contrôler, le principe repose généralement sur un large inducteur visant à exciter la structure à inspecter et l'utilisation conjointe d'un système d'acquisition destiné à mesurer le champ de réaction en surface [Tho10].

Parmi les systèmes d'acquisitions on retrouve les techniques d'imageries électromagnétiques comme les méthodes magnéto-optiques décrites dans les travaux de *Yohan Le Diraison* [LeDi08] ayant travaillé sur le développement d'un appareil d'imagerie CF destiné à l'évaluation non-destructive hautes performances des joints rivetés aéronautiques, tout comme les travaux de Tho [Tho10] qui s'inscrivent dans le cadre de la conception d'une sonde multiéléments à courants de Foucault dédiée à l'imagerie de pièces aéronautiques.

Par ailleurs une nouvelle méthode d'imagerie par courants de Foucault a été proposée pour estimer la forme et la taille des ondulations de fibres dans un composite CFRP stratifié [MMKSTSN16].

VI. Conclusion :

Le contrôle non-destructif, discipline regroupant des techniques et procédés permettant l'investigation de l'état de santé d'un matériau, pièce, sans les altérer offre un large domaine d'applications autant dans l'industrie que la communauté scientifique ouvrant aux chercheurs un portail à l'innovation dans ce domaine qui ne cesse de se développer [LRS23].

Avec le contrôle non-destructif, il est possible en cas de doute ou d'accident, d'effectuer des contrôles à l'intérieur d'une pièce sans l'altérer afin d'identifier, mieux connaître le phénomène destructeur. Pour cela, il existe plusieurs techniques comme il a été présenté dans ce chapitre où chaque méthode reste spécifique et utilisable à un problème donné. Le procédé optique à titre d'exemple reste utilisable uniquement pour un personnel expérimenté et pour des défauts superficiels, il a donc ses limites. Aussi les prélèvements d'échantillons sur des pièces composites pour contrôle microscopique, optique, et ou, technique laser, peuvent donner des analyses fines sur l'état des fibres ou résines, néanmoins, ce type de méthodes restent coûteuses, à la fois au vu de leurs technicités mais surtout à cause du sacrifice de la pièce à contrôler. Ces méthodes ne sont donc utilisées qu'en dernier ressort, bien que ne nécessitant pas de contact, destruction de la pièce, elles ne permettent pas un contrôle efficace.

La détection des défauts dans les pièces composites à fibre de carbone est une thématique de recherche ancienne et toujours d'actualité qui revêt une grande importance tant les effets dramatiques que peut avoir une rupture de fibre, à titre d'exemple dans une pièce composite, tant en coût humain que financier. Les techniques habituelles comme les ultrasons, thermographie, radiographie, sont limitées et ne permettent pas la détection de certains types de défauts pouvant s'avérer critiques. Il est nécessaire de porter des recherches sur de nouvelles méthodes de CND spécifiques aux pièces en composites à étudier, ce qu'est le cas dans cette thèse, où le composite à étudier est un CFRP en utilisant les courants de Foucault.

Cependant la problématique d'un système CND par CF passe d'une manière générale par la résolution des difficultés suivantes : d'abord, on retrouve le problème lié aux instruments de mesure des signaux contenant les informations sur les paramètres de la cible à contrôler (la sensibilité du capteur par exemple) vient ensuite la résolution du problème direct qui consiste à déterminer les phénomènes électromagnétiques liés à la source des CF, à la géométrie du capteur et celle de la cible à inspecter, puis vient l'étude du problème inverse consistant à estimer la conductivité du matériau étudié à partir des mesures du champ magnétique engendré par la source et enfin la dernière étape consistant à faire le diagnostic.

Les phénomènes électromagnétiques liés aux capteurs sont complexes, et peuvent être modélisés selon le cas étudié par des méthodes numériques ou analytiques où certaines d'entre elles feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Modélisation Numérique

Sommaire

- I. Introduction
- II. Méthodes numériques
- III. Méthode des éléments finis stochastiques
- IV. Formulation élément finis stochastiques
- V. Conclusion

I. Introduction

Dans le domaine du contrôle non-destructif, la compréhension des phénomènes physiques permet d'élaborer un modèle mathématique permettant de prédire la réponse du capteur en fonction des paramètres de la pièce à contrôler qui doivent être connus [Cho09].

La modélisation vise à établir un modèle d'interactions entre le dispositif de contrôle et de la pièce à inspecter. On distingue plusieurs méthodes de modélisation, dont celles permettant la reconstitution de la forme du défaut, avec des modèles qui ne nécessitent pas la connaissance de la nature des interactions physiques internes de la pièce, on parle dans ce cas-là de traitement du problème inverse. Pour ce faire, on considère le problème dont les entrées sont inconnues puis on fait souvent appel par exemple à la méthode des réseaux de neurones afin d'identifier les grandeurs d'entrées en fonction des grandeurs de sorties ou à des modèles polynomiaux pour le traiter, viennent ensuite les modèles reposant sur les lois physiques de l'électromagnétisme [Tho10].

En CND-CF, les phénomènes électromagnétiques mis en jeu dans les capteurs à courants de Foucault sont complexes à modéliser [LeDi08], ces derniers étant basés sur la résolution des équations de *Maxwell*, qui selon la complexité de la configuration peuvent être résolu par :

- Les méthodes analytiques, avec lesquelles il est possible de déterminer analytiquement, le comportement des phénomènes physiques grâce à un ensemble d'équations mathématiques, telle que la répartition des champs électriques, magnétiques dans les différents domaines du système étudié en résolvant analytiquement des problèmes électromagnétiques régis par les équations de *Maxwell*. Ceci permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, seulement, elle se limite aux configurations simples, dans ce cas, seuls les modèles linéaires peuvent être considérés. Les matériaux à étudier doivent être isotropes. Ces méthodes sont présentes en CND-CF, comme le décrivent les travaux de *Dodd. C.V et Deeds. W.E (1968)*, où il a été élaboré une technique analytique offrant un moyen rapide et facile de calculer les effets observés des essais réels par CF avec un bon degré de précision [DD68]. Cependant elle s'avère difficile et limitée dès qu'il y'a présence de défauts ou encore des matériaux fortement anisotropes et hétérogènes lors de leurs traitements.

- Les méthodes semi analytiques constituent un modèle hybride entre les modèles analytiques et numériques. La modélisation par les dyades de *Green* en est un exemple, ça permet de décrire complètement le champ électromagnétique créé par une source ponctuelle dans un milieu, mais qui se limite à des géométries simples [Tho10][Cho09]. On peut citer

encore les travaux menés dans la thèse de *Menana* dans le cadre de la modélisation 3D simplifiée pour l'END des composites anisotropes [Men09]. Parmi ces méthodes on cite la méthode des circuits couplés.

- Les méthodes numériques très répandues dans la littérature permettent de pallier aux limites des deux méthodes citées précédemment en admettant le traitement des configurations complexes.

II. Méthodes numériques

La modélisation numérique a pour objectif de simuler numériquement le comportement des systèmes physiques. L'utilisation de l'outil informatique donne une description du système physique à étudier (géométrie, lois de la physique qui régissent le comportement...) et du problème posé à son sujet. La traduction de ce dernier en un modèle mathématique obtenu en explicitant sous forme d'équations aux dérivées partielles, les lois de conservations et les lois de comportement. La construction du modèle numérique associé au problème posé est obtenue, en utilisant une méthode de discrétisation (telle que la méthode des différences finies, méthode des éléments finis), pouvant se résoudre sur ordinateur avec les logiciels adéquats [DTL12].

Parmi les méthodes numériques permettant la résolution des équations aux dérivées partielles assorties de conditions aux limites, posées par l'électromagnétisme, mécanique du solide, la thermique..., on cite : la méthode des différences finies, méthode des éléments finis, méthode des éléments de frontières et la méthode des volumes finis.

II-1. Méthode des différences finies

Lorsque les fonctions ne peuvent être représentées par les formules analytiques, il est impossible de calculer leurs dérivées, la méthode des différences finies propose un moyen de calculer une approximation numérique des valeurs des dérivées d'une fonction [TP21].

Les équations aux dérivées partielles peuvent être résolues avec cette méthode dont la formulation est basée sur l'approximation local au voisinage d'un point des fonctions dérivées apparaissant dans les équations différentielles. Elle est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences où chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue aux nœuds du domaine de résolution. Les fonctions dérivées sont approximées par les développements de *Taylor* [TP21].

C'est une méthode simple mais limitée à des géométries non complexes et ne s'étale pas aux conditions aux limites quelconques.

II-2. Méthode des éléments de frontière

La formulation d'équations intégrales de frontière est intimement liée à la présence d'un opérateur différentiel linéaire dans les équations locales, les méthodes d'éléments de frontières permettent principalement la résolution numérique des problèmes régis par les équations aux dérivées partielles linéaires : équation de Laplace ou de Poisson (problèmes de potentiel scalaire, d'origines physiques très nombreuses), équation des ondes en régime fréquentiel ou temporel (propagation acoustique ou électromagnétique) [Bon95].

Cette méthode ne s'applique que si les courants de Foucault se développent sur une profondeur qui peut être considérée comme négligeable devant les autres dimensions (excitation à haute fréquence, profondeur de pénétration nulle) [Ham18].

II-3. Méthode des volumes finis

Le principe de la méthode des volumes finis est basé sur le calcul de la forme intégrale de l'équation aux dérivées partielles, simple à mettre en œuvre, elle peut être considérée comme une méthode de résidus pondérés dans laquelle les fonctions de poids sont égales à l'unité dans des volumes finis donnés [Cher07]. La méthode des volumes finis consiste à découper le domaine d'étude en volumes élémentaires, la discrétisation commence par la construction du maillage. Pour ce faire, le domaine d'étude est découpé en volumes élémentaires de tailles réduites, qui, pour chaque élément de volume est associé un nœud principal et six facettes ; les volumes élémentaires voisins sont représentés par leurs nœuds principaux [Cher07].

II-4. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Elle est utilisée lors de l'excitation en moyenne à basse fréquence [DTL12] et s'applique aussi bien aux problèmes linéaires qu'aux problèmes non linéaires, définis dans un domaine à une, deux ou trois dimensions. On retrouve dans la littérature, de nombreux travaux traitant la modélisation numérique des phénomènes électromagnétiques parmi eux on cite les travaux menés par *Guillaume Wasselynck* pour l'étude des interactions entre les ondes électromagnétiques moyenne fréquence et les matériaux composites [Was11], les travaux de *Huu Kien BUI* [Bui14], les travaux de *Thomas Henneron* dans le cadre d'une contribution à la prise en compte des grandeurs globales dans les problèmes d'électromagnétisme résolu par la méthode des éléments finis [Hen04], les travaux de *Zehor Oudni* dans l'étude de fiabilité de

fonctionnement de structures électromagnétiques liée à la dégradation des propriétés physiques [Oud14].

II.4.1.1 Approximation par éléments finis

La résolution des problèmes physiques par éléments finis est basée sur une double discrétisation, une première sur la géométrie de l'étude, et la seconde sur les inconnues du système d'équations différentielles décrivant le problème [Was11].

➤ Discrétisation du domaine (maillage)

Le domaine d'étude est décomposé en petits éléments de formes simples (triangles, quadrilatères, tétraèdre, hexaèdres...) et l'ensemble de ces entités dont chaque élément est formé de n nœuds, n arêtes et n facettes constituent le maillage global et auxquelles est associé une fonction d'approximation (fonction de forme) [Was11] [DTL12].

Dans un problème électromagnétique chaque grandeur le régissant est associée à une entité suivant sa nature. Sa valeur numérique est calculée sur ces entités, ainsi, aux nœuds sont associés les potentiels scalaires électrique et magnétique (V , Φ), aux arêtes sont associés le potentiel vecteur magnétique (\vec{A}) et les champ électriques, magnétiques (\vec{E} , \vec{H}), aux facettes sont associés l'induction (\vec{B}) et la densité de courant électrique (\vec{J}), et enfin aux volumes est associée la densité de charge [Was11].

➤ Discrétisation du système d'équations différentielles

Le comportement d'un système physique est caractérisé par un ensemble de variables qui peuvent dépendre des coordonnées d'espace et du temps, certaines variables du système sont connues (d) (propriétés physiques, dimensions, conditions aux limites...), d'autres variables inconnues (u) (déplacement, vitesse...). La relation entre (d) et (u) est écrite au moyen d'un modèle mathématique en faisant appel aux lois physiques, le nombre de degrés de liberté du système et le nombre de paramètres nécessaires pour définir les variables inconnues à un instant t [DTL12].

Un système est discret s'il possède un nombre de degrés de liberté fini, un système est continu s'il possède un nombre de degrés de liberté infini. Le système continu ne peut être résolu directement, il est nécessaire de le discrétiser au moyen des méthodes éléments finis [DTL12]. Les problèmes électromagnétiques peuvent être définis par un système d'équations différentielles auquel des conditions aux frontières ont été ajoutées [Was11]. Ils peuvent se formuler comme suit [Was11] [DTL12] :

$$L(u) = f \quad \text{dans } \Omega \quad (\text{III.1})$$

$$B(u) = g \quad \text{dans } \Gamma \quad (\text{III.2})$$

Avec :

L et B : opérateurs différentiels.

(u) : fonction inconnue.

f et g : fonctions connues (termes sources).

Ω : domaine d'étude.

Γ : frontières du domaine d'étude.

La résolution numérique du système d'équations précédent par éléments finis nécessite de le réécrire sous sa forme intégrale obtenue par la méthode des résidus pondérés [Was11] :

$$\int_{\Omega} u' (L(u) - f) d\Omega = 0 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

u' : fonction test.

Cette équation nous informe que si (u) est la solution du problème $(L(u) - f)$ alors sa projection sur l'espace des fonctions qui la décrivent u' est globalement nulle sur le domaine de résolution [Ham18].

Le problème physique est continu dans la formulation intégrale, le principe du calcul par éléments finis est de trouver une solution à approcher de (u) dans un espace discret. La résolution de cette forme intégrale fait appel à la méthode de Galerkin [Was11].

II.4.1.2 Formulation éléments finis des équations électromagnétiques

L'équation électromagnétique harmonique en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} est obtenue à partir des équations de *Maxwell* associées aux relations du milieu et loi d'*Ohm* pour obtenir [OFM14] :

$$\vec{\nabla} \wedge (v \vec{\nabla} \wedge \vec{A}) + j\sigma\omega\vec{A} = \vec{J}_s \quad (\text{III.4})$$

Avec :

v : Reluctivité magnétique $[\text{H/m}]^{-1}$.

\vec{J}_s : densité de courant source [A/m²].

La formulation éléments finis de l'équation (III.4) en utilisant la méthode des résidus pondérés, avec les fonctions de pondération α_i , permet d'écrire l'équation suivante [OFM14] :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i (\vec{\nabla} \wedge \nu (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) + j\sigma\omega\vec{A}) d\Omega = \iint_{\Omega} \alpha_i \vec{J}_s d\Omega \quad (\text{III.5})$$

Avec :

Ω : domaine de résolution.

II.4.1.3 Conditions aux limites

➤ Conditions de Dirichlet

Cette condition nous renseigne sur la valeur exacte de l'inconnue sur la frontière extérieure du domaine de résolution (limite) [Berk19] :

$$\phi(s) = \phi_0 \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$\phi(s)$: inconnue du problème.

ϕ_0 : valeur de l'inconnue sur la frontière (constante).

➤ Condition aux limites de Neumann

Cette condition nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine étudié, elle nous renseigne sur l'existence d'un plan de symétrie dans le domaine d'étude lorsque la valeur de cette dernière est nulle [Berk19].

$$\frac{\partial \phi(s)}{\partial n} = \phi_0 \quad (\text{III.7})$$

n : la normale.

III. Méthode des éléments finis stochastiques

Dans le domaine électrotechnique, la question de sûreté de fonctionnement et de sécurité est primordiale et besoin d'être vérifiée, pour ce faire on se réfère aux méthodes de fiabilités ayant pour objectif la détermination de la probabilité de défaillance d'une structure.

L'analyse de sécurité nécessite de se fixer un critère qui permet de séparer deux domaines : ruines et sécurité, parmi les méthodes de simulations on retrouve : la méthode de simulation Monte Carlo qui évalue une expression mathématique à partir d'expériences avec des nombres

aléatoires générés par variables aléatoires corrélées et non corrélées ; la méthode de simulation stratifiée: variation du nombre de tirages en fonction des zones de l'espace et division du domaine d'intégration en plusieurs sous domaine disjoints, estimation du paramètre sur chacun d'eux ; la méthode hypercube latin qui sélectionne des valeurs d'hypothèses de manière aléatoire et les répartit équitablement sur la loi de probabilité de celui-ci ; l'ensemble de valeurs obtenues forme un échantillon latin hypercube ; et enfin la méthode de fiabilité FORM /SORM : calcul de la probabilité de défaillance par approximation déterminant le point de conception de la structure en transformant l'espace d'origine des variables en un espace gaussien (U-espace) [Oud14].

La méthode des éléments finis est simplement utilisée dans un cadre déterministe afin de déterminer la réponse du système pour certaines réalisations des variables aléatoires d'entrée [Cle08].

La méthode des éléments finis stochastiques (MEFS) est apparue vers le début des années quatre-vingt-dix [GS91] et constitue un mélange entre la méthode éléments finis et le modèle stochastique, la version la plus utilisée de cette méthode s'appuie sur une représentation de la réponse du système sur une base spécifique, appelée *chaos polynomial*.

Cette méthode est couramment nommée *méthode des éléments finis stochastiques spectraux*, ou *méthode spectrale stochastique* et permet d'obtenir une solution précise explicite en fonction des variables aléatoires de base [Cle08].

III.1. Théorie probabiliste

Un ensemble de termes et notions de base sur la théorie des probabilités sera présenté, utiles pour la suite du chapitre III, issus de la littérature [Oud14] [Ber08] [Berk19] [BL07] [Suq03].

III.1.1. Généralités

Classiquement l'observation d'un phénomène aléatoire est appelée *épreuve*. Toutes les *réalisations* possibles d'une épreuve forment l'ensemble de tous les résultats d'une expérience aléatoire. Une expérience aléatoire est toute expérience dont le résultat est régi par le hasard. Chaque résultat possible et prévisible d'une expérience aléatoire est appelé *éventualité* liée à l'expérience aléatoire. L'ensemble formé par les éventualités est nommé *univers* et est noté Ω . Un *événement* E d'une expérience aléatoire est une partie quelconque de Ω .

Soit Ω un ensemble et \mathcal{F} une famille d'événements observables sur Ω . On appelle probabilité sur (Ω, \mathcal{F}) toute application P de \mathcal{F} dans $[0,1]$ vérifiant :

- $P(\Omega)=1$.
- L'ensemble de tous les événements possibles ayant une probabilité ainsi définie est appelé une σ – additivité.

Le triplet (Ω, \mathcal{F}, P) se nomme *espace probabilisé*.

III.1.2. Variable aléatoire

Soit (Ω, \mathcal{F}, P) un espace probabilisé, on appelle variable aléatoire réelle X une fonction $X : (\Omega, \mathcal{F}, P) \rightarrow \mathbb{R}$. Il existe deux types de variables aléatoires : discrètes et continues.

Toute variable aléatoire X est associée à la probabilité d'obtention d'un tirage inférieur ou égal à x défini par sa fonction de répartition noté par : $F_X(x)$ donnée par :

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (\text{III.8})$$

Si la variable aléatoire réelle X est discrète, la fonction $F_X(x)$ est continue par morceau, si la variable aléatoire réelle X est continue, dérivable, la densité de probabilité de la variable aléatoire continue notée $f_X(x)$ et définie par :

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (\text{III.9})$$

Cette loi décrit la répartition des valeurs de cette variable contenant toutes les informations nécessaires pour calculer son espérance et ses moments.

Pour les variables aléatoires continues, la densité de probabilité et la fonction de répartition sont notées : $f_X(x)$ et $F_X(x)$, respectivement, et l'indice X pourra être omis lorsqu'il n'y a pas de risque de confusion. Pour souligner le caractère aléatoire de X on utilise la notation $X(\Omega)$.

L'espérance mathématique d'une variable aléatoire notée ($E[X]$) correspond à la mesure de la valeur moyenne que l'on s'attend à trouver d'une variable aléatoire. Pour une variable aléatoire réelle X discrète, $E[X]$ sera calculée en multipliant toute valeur possible de X par sa probabilité respective puis on additionne les produits. Pour une variable aléatoire réelle continue X , l'espérance est calculée en intégrant le produit de la variable par sa fonction de densité de probabilité sur l'intervalle de valeurs possibles.

L'espérance, la moyenne, la variance et les moments d'ordre n de la variable aléatoire réelle continue X sont :

$$\mu \equiv E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx \quad (\text{III.10})$$

$$\sigma^2 = E[(X - \mu)^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f_X(x) dx \quad (\text{III.11})$$

$$E[X^n] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n f_X(x) dx \quad (\text{III.12})$$

Un vecteur aléatoire \underline{X} est un vecteur dont les composantes sont des variables aléatoires.

La covariance de deux variables aléatoires X et Y est la mesure qui exprime la relation linéaire entre deux variables aléatoires, elle est notée $Cov[X, Y]$ et est définie par :

$$Cov[X, Y] = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)] \quad (\text{III.13})$$

Quand on introduit la densité de probabilité conjointe $f_{X,Y}(x, y)$ de ces variables la covariance devient :

$$Cov[X, Y] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)(y - \mu_Y) f_{X,Y}(x, y) dx dy \quad (\text{III.14})$$

En mettant σ_X l'écart type de la variable X et σ_Y l'écart type de la variable Y, le coefficient de corrélation entre deux variables aléatoires X et Y sera défini par :

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov[X,Y]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (\text{III.15})$$

III.1.3. Quelques lois de probabilité

Parmi les lois de probabilité usuelles qu'on retrouve dans le domaine de fiabilité dans la littérature [Bir97] [Ber08][Berk19][Oud14] :

➤ Loi Log normale

Une variable aléatoire continue et positive x suit une loi Log normale si son logarithme népérien distribué selon une loi normale tel que $Y = \ln(x)$. La fonction de densité d'une loi Log normale de moyenne μ et d'écart type σ admet pour densité :

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.16})$$

Avec : $x > 0$

➤ Loi Weibull

La variable aléatoire x de paramètre de forme β , d'échelle η , de position γ a pour densité de probabilité :

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{III.17})$$

Avec : $\beta > 0$ et $\eta > 0$

➤ **Loi Normale (ou Gaussienne)**

Une variable aléatoire x suivant une loi normale de moyenne μ et d'écart type σ strictement positive admet pour densité de probabilité :

$$f(x) = \varphi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.18})$$

Avec : φ : fonction de densité de la loi normale centrée réduite (loi normale standard, $\mu = 0$, $\sigma = 1$).

Une variable aléatoire Gaussienne, suit la loi normale, et est une variable aléatoire dont la distribution de probabilité suit la distribution normale. La variable aléatoire centrée réduite Gaussienne de moyenne nulle et d'écart type 1 sera notée $\xi = \mathcal{N}(0,1)$ et de densité de probabilité :

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (\text{III.19})$$

De fonction de répartition :

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}s^2} ds \quad (\text{III.20})$$

III.1.4 Polynômes d'Hermite

Les polynômes d'Hermite, portant le nom du mathématicien *Charles Hermite* sont une famille de polynômes, ils forment une suite infinie de fonctions orthogonales par rapport à la densité de probabilité Gaussienne, c'est une suite fonctionnelle s'obtenant par dérivations successives :

$$H_n(x) = (-1)^n e^{\frac{x^2}{2}} \frac{d^n}{dx^n} \left(e^{-\frac{x^2}{2}} \right) = (-1)^n \frac{1}{\varphi(x)} \frac{d^n \varphi(x)}{dx^n} \quad (\text{III.21})$$

Pour $n=0,1,2,\dots$, où $\frac{d^n}{dx^n}$ représente la n -ième dérivée par rapport à x .

Ces polynômes vérifient la relation d'orthogonalité :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} H_n(x) H_m(x) \varphi(x) dx = \delta_{nm} n! \quad (\text{III.22})$$

Avec : δ_{nm} est le symbole de Kronecker. $H_m(x)$ fait référence à un autre polynôme d'Hermite.

Les polynômes d'Hermite vérifient la relation de récurrence qui suit :

$$\begin{cases} H_0(x) = 1 \\ H_n(x) = xH_{n-1}(x) - \frac{dH_{n-1}(x)}{dx} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Le terme le plus haut degré de H_n est x^n . Les premiers polynômes d'Hermite sont :

$$H_0(x) = 1$$

$$H_1(x) = x$$

$$H_2(x) = x^2 - 1$$

$$H_3(x) = x^3 - 3x$$

$$H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3$$

$$H_5(x) = x^5 - 10x^3 + 15x$$

Les polynômes d'Hermite possèdent les propriétés suivantes :

$$\frac{dH_n(x)}{dx} = nH_{n-1}(x) \quad (\text{III.24})$$

Et :

$$H_i(x)H_j(x) = \sum_{k=|i-j|}^{i+j} C_{ijk}H_k(x) \quad (\text{III.25})$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{ijk} = 0 & \text{si } \frac{i+j+k}{2} \notin \mathbb{N} & \text{sinon} \\ C_{ijk} = \frac{i!j!}{\left(\frac{i+j-k}{2}\right)!\left(\frac{i+k-j}{2}\right)!\left(\frac{j+k-i}{2}\right)!} & \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

C_{ijk} étant les coefficients utilisés dans le développement tridimensionnel de produits de polynômes d'Hermite, et i, j, k sont les indices des polynômes d'Hermite (ils se réfèrent aux degrés de ces polynômes, caractérisés pour chacun par un degré n indiquant le plus haut degré du polynôme).

Ainsi l'espérance d'un produit de trois polynômes, d'une variable aléatoire centrée réduite Gaussienne, $D_{ijk} = E[H_i(\xi)H_j(\xi)H_k(\xi)]$ vaut :

$$\begin{cases} C_{ijk} = \frac{i!j!k!}{\left(\frac{i+j-k}{2}\right)!\left(\frac{j+k-i}{2}\right)!\left(\frac{k+i-j}{2}\right)!} & \text{si } i+j+k \text{ paire et } k \in [|i-j|, i+j] \\ & \text{sinon } 0 \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

IV. Formulation élément finis stochastiques

La méthode des éléments finis stochastiques est une méthode éléments finis permettant l'analyse de problèmes ayant comme paramètres d'entrée des variables aléatoires, elle consiste à modéliser les incertitudes en identifiant les variables aléatoires du problème (propriétés physiques du système, étant la conductivité électrique dans cette thèse), un ensemble de valeurs paramètres est alors considéré en fonction des distributions de probabilités définies, pour lequel une analyse élément finis sera effectuée afin d'obtenir la solution du problème. Les résultats obtenus donneront ainsi des propriétés probabilistes des réponses du système. La sortie du modèle est le développement de la réponse sur le chaos polynomial. Une technique

d'approximation est ensuite utilisée pour réduire la complexité de l'analyse car les évaluations exhaustives de toutes les combinaisons possibles de paramètres peuvent être coûteuse et prendre beaucoup de temps de calcul.

La méthode éléments finis stochastiques peut être intrusive ou non-intrusive, elles visent toute les deux à prendre en compte l'aléa et la variabilité dans les paramètres du système, la différence majeure entre ces deux techniques réside dans la manière dont elles traitent l'incertitude et la variabilité.

IV .1. Chaos polynomial

Le chaos polynomial de dimension M et d'ordre p [GS91] est défini comme l'ensemble des polynômes d'Hermite multidimensionnel en M variables aléatoires gaussiennes centrées réduites $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M\}$, dont le degré ne dépasse pas p [Ber08]. Chacun de ces polynômes est complètement défini par une liste de M entiers non négatifs $\{\alpha_1, \dots, \alpha_M\}$ comme suit :

$$\Psi_\alpha = \prod_{i=1}^M H_{\alpha_i}(\xi_i) , \alpha_i \geq 0 \tag{III.28}$$

Le nombre de polynômes P de M variables de degré inférieur ou égal à p est :

$$P = \sum_{k=0}^p C_{M+k-1}^k = \frac{(M+p)!}{M!p!} \tag{III.29}$$

Pour obtenir le chaos polynomial, il faut déterminer le nombre de termes dans le chaos polynomial en fonction de l'ordre du chaos p et du nombre de variables M , ainsi que le nombre de polynômes P .

IV.2. Approximation par des polynômes de variables aléatoires gaussiennes

Méthode d'approximation utilisée dans l'analyse stochastique pour réduire la complexité de l'évaluation des réponses du système à étudier. Elle consiste à approximer des distributions de probabilités de variables aléatoires de n'importe quel type par polynômes d'Hermite associés aux variables aléatoires gaussiennes centrée réduite. Pour cela on peut utiliser la méthode de projection de la variable sur la base des polynômes considérée, ou alors recourir à la méthode de régression.

➤ **Méthode de projection**

La méthode projection permet de ramener le calcul des coefficients du développement de la réponse à celui d'une intégrale. Après avoir défini le modèle déterministe (modèle dans lequel les résultats sont déterminés par les conditions initiales et les paramètres du système) et les

M variables aléatoires intervenant dans le problème et choisi l'ordre p , il faut construire ce dernier à l'aide de la méthode d'implémentation du chaos polynomial.

Cette méthode, utilise l'orthogonalité des polynômes d'*Hermite* par rapport à la mesure de probabilité gaussienne [Ber08]. Dans l'espace de probabilités $\mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{F}, P)$, toute variable aléatoire peut s'écrire sous la forme :

$$X = \sum_{i=0}^{\infty} a_i H_i(\xi) \tag{III.30}$$

Avec :

ξ : variable Gaussienne centrée réduite.

$\{a_i, i = 0, \dots, \infty\}$: coefficients à déterminer.

En multipliant (III.30) par $H_i(\xi)$ et en prenant l'espérance mathématique, on obtient :

$$E[X H_i(\xi)] = a_i E[H_i^2(\xi)] \tag{III.31}$$

Où on a $E[H_i^2(\xi)] = i!$

➤ **Méthode de régression**

La méthode de régression [MHR03], ne nécessite pas l'évaluation d'une intégrale, néanmoins elle y présente des étapes similaires.

Dans la méthode de régression, on veut minimiser l'écart quadratique entre la solution exacte (obtenue par évaluation de la réponse (calcul aux éléments finis ou autre)) avec la solution approchée par le chaos polynomial et ce pour un ensemble de points d'un plan d'expériences. On se place donc dans l'espace des variables gaussiennes et on génère le plan d'expériences [Ber08][Oud14].

On souhaite approximer une variable aléatoire X de loi connue par la variable \tilde{X} définie par :

$$\tilde{X}(\xi) = \sum_{j=0}^p a_j H_j(\xi) \tag{III.32}$$

Avec :

P : ordre d'approximation voulu.

ξ : variable aléatoire Gaussienne centrée réduite.

IV.3. Méthodes éléments finis stochastiques non intrusives

Les méthodes basées sur un ensemble de résolutions du modèle déterministe sont nommées méthodes non-intrusives [Try11]. Lorsqu'on applique une méthode stochastique sur un modèle déterministe on prend en compte l'incertitude dans les paramètres du modèle. Ce sont des

méthodes qui traitent l'incertitude en dehors des équations du modèle, les équations différentielles ne sont pas modifiées directement et l'incertitude est traitée en dehors des équations du modèle.

Les méthodes non-intrusives présentent une complexité et un coût de calcul prohibitif proportionnel au nombre de résolution du modèle déterministe nécessaire pour la construction de l'approximation [Try11]. Parmi les méthodes stochastiques non-intrusives retrouvées dans la littérature on peut citer :

➤ **La projection spectrale non-intrusive**

La projection spectrale non-intrusive consiste à discrétiser le domaine des variables aléatoires en utilisant des méthodes de décompositions spectrales telles que les expansions en série de polynômes orthogonaux sur un espace d'approximation stochastique et à calculer les modes stochastiques par intégrations numériques, il existe différentes techniques pour estimer numériquement cette intégrale dans la littérature, basées sur des stratégies d'échantillonnages pseudo-aléatoires ou des méthodes de cubatures [Try11].

- La technique de simulation la plus simple est la méthode Monte Carlo (MC) : basée sur le calcul d'une grandeur, définie comme étant l'espérance d'une variable aléatoire issue d'un processus aléatoire [Berk19]. Elle génère de façon aléatoire et à plusieurs reprises des valeurs pour variables incertaines afin de simuler un modèle. Les valeurs de la loi de probabilité de chaque hypothèse sont aléatoires et complètement indépendantes. En d'autres termes, la valeur aléatoire sélectionnée pour un tirage n'a aucune incidence sur la prochaine valeur aléatoire générée. La simulation MC est un outil fiable pour la détermination de la probabilité de défaillance. Elle reste cependant très coûteuse en termes de calcul surtout pour les systèmes complexes comportant des modèles éléments finis de grandes tailles et ayant de nombreux paramètres de conception incertains.

Des erreurs d'échantillonnages moindre peuvent être atteintes en utilisant des stratégies plus efficaces, comme l'échantillonnage Hypercube Latin, qui consiste à sélectionner des valeurs de manière aléatoire et les répartir équitablement sur la loi définie pour chaque hypothèse. Lors de l'exécution d'une simulation, l'échantillonnage Hypercube Latin sélectionne une valeur d'hypothèse aléatoire pour chaque segment en fonction de la loi de probabilité de celui-ci. L'ensemble de valeurs obtenues forme un échantillon Hypercube Latin. Lorsque chaque segment a été échantillonné une fois, le processus se répète jusqu'à ce que la simulation s'arrête. Elle nécessite moins de tirage qu'un échantillonnage Monte Carlo pour atteindre le même niveau de précision en contrepartie elle nécessite plus de mémoire afin de suivre les segments

qui ont été échantillonnés lors de la simulation. A utiliser si la précision des statistiques de simulations est la priorité [Try11] [Oud14].

- Les méthodes de cubatures restent une alternative aux méthodes MC, hypercube latin. C'est une approximation de l'intégrale multidimensionnelle en une somme discrète.

➤ **Moindres carrés**

La méthode des moindres carrés est une technique fréquemment utilisée en statistique pour estimer les paramètres d'un modèle mathématique en minimisant la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle. En réduisant les carrés des écarts, elle permet de déterminer les valeurs des paramètres du modèle qui minimisent l'erreur globale entre les données réelles et les prédictions du modèle

IV.4. Méthodes éléments finis stochastiques intrusives

Ce type de méthodes, prend en compte la résolution des équations aux dérivées partielles et l'incertitude associée aux variables d'entrées du modèle. La variable stochastique est directement introduite dans le processus de résolution des équations aux dérivées partielles.

➤ **Méthode de Galerkin (intrusive)**

Ces méthodes sont dites intrusives car elles nécessitent la réécriture du code de calcul déterministe. La projection de Galerkin est un outil classique pour la résolution des problèmes spectraux et dans la formulation des méthodes éléments finis.

- La méthode des éléments finis stochastiques spectraux (MEFSS) fut proposée et développée par *Ghanem* et *Spanos* [GS91], elle permet de prendre en compte l'aléa sur une propriété du matériau sous la forme d'un champ aléatoire. La réponse stochastique du système, la sortie du modèle, est le développement de la réponse sur la base du chaos polynomial.

L'objectif est d'étendre la représentation sur le chaos polynomial au cas de paramètres matériau et de la source représentés par des variables aléatoires de type quelconque et en nombre quelconque.

IV.5. Eléments finis stochastiques en électromagnétisme

IV.5.1. Formulation du problème déterministe (cas magnétostatique)

Dans un problème électromagnétique dont l'inconnue est le potentiel vecteur magnétique A , l'illustration de l'application de la méthode des éléments finis stochastiques (MEFS) dans le calcul électromagnétique, dans un problème magnétostatique traduit par une équation aux dérivées partielles de la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\vec{J}_{sz} \quad (\text{III.33})$$

Avec :

\vec{J}_{sz} : densité de courant source dirigée selon la direction z. [A.m⁻²]

La formulation éléments finis conduit, en considérant des conditions aux limites de type Dirichlet homogènes, à un système matriciel de la forme :

$$[M][A] = [F] \quad (\text{III.34})$$

Où :

[A] : vecteurs inconnus du problème.

Les éléments associés à la matrice et aux vecteurs du système d'équation sont donnés par :

$$M_{ij} = \iint_{\Omega} v \vec{\nabla} \alpha_i \vec{\nabla} \alpha_j d \Omega \quad (\text{III.35})$$

$$F_i = \iint_{\Omega} \alpha_i J_s d \Omega \quad (\text{III.36})$$

$$[A] = [A_1, A_2, \dots, A_n] \quad (\text{III.37})$$

L'application de la méthode des éléments finis déterministe conduit à La résolution du système algébrique représenté par l'équation (III.34).

IV.5.2. Formulation du problème stochastique

IV.5.2.1. Distribution dans la base des polynômes d'Hermite

La projection de l'inconnue A dans la base des polynômes d'Hermite permet d'écrire de la manière suivante :

$$A^i = \sum_{j=0}^{n_A} A_j^i \Psi_j(\xi_1, \dots, \xi_M) \quad (\text{III.38})$$

$$A = \sum_{j=0}^{n_A} A_j \Psi_j(\xi_1, \dots, \xi_M) \quad (\text{III.39})$$

Avec :

{ ξ_1, \dots, ξ_M } sont les variables Gaussiennes centrées réduites.

n_A : Ordre du chaos polynomial.

La projection de la conductivité et de la densité de courant dans la base des polynômes d'Hermite permet d'écrire de la manière suivante :

$$\sigma = \sum_{i=0}^{n_\nu} \sigma_i \Psi_i(\xi_1) \quad (\text{III.40})$$

$$J = \sum_{i=0}^{n_J} J_i \Psi_i(\xi_2) \quad (\text{III.41})$$

$$M = \sum_{e=1}^{N_e} \iint_{\Omega_e} M^e(\nu(\xi_1)) d\Omega_e \quad (\text{III.42})$$

$$M = \sum_{e=1}^{N_e} \iint_{\Omega_e} M^e(\sigma(\xi_1)) d\Omega_e \quad (\text{III.43})$$

IV.5.2.2. Construction du modèle électromagnétique stochastique

En utilisant le chaos polynomial, on introduit le développement (III.39) et (III.40) dans le système (III.34), on aura :

$$M = \sum_{j=0}^{p-1} M_j \Psi_j(\xi_1, \xi_2) \quad (\text{III.44})$$

On prend $n_A = p-1$

$$F = \left(\sum_{j=0}^{p-1} J_j \Psi_j(\xi_1, \xi_2) \right) J_0 = \sum_{j=0}^{p-1} F_j \Psi_j(\xi_1, \xi_2) \quad (\text{III.45})$$

J_0 : vecteur unitaire

On minimise le résidu :

$$\varepsilon_p = \left(\sum_{i=0}^{p-1} M_i \Psi_i(\xi_1, \xi_2) \right) \left(\sum_{j=0}^{p-1} A_j \Psi_j(\xi_1, \xi_2) \right) - \sum_{j=0}^{p-1} F_j \Psi_j(\xi_1, \xi_2) \quad (\text{III.46})$$

Cette minimisation au sens de Galerkin revient à exiger l'orthogonalité du résidu avec la base de projection $\{\Psi_j, j=0, \dots, p\}$.

Soit $E[\varepsilon_p \cdot \Psi_k] = 0$,

Ce qui s'écrit :

$$\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{p-1} M_i A_j E[\Psi_i \Psi_j \Psi_k] = F_k \quad (\text{III.47})$$

Avec : $k=0, \dots, p-1$,

IV.5.2.3. Le modèle électromagnétique associé au chaos polynomial

Le système (III.47), dont la taille est le produit du nombre de degrés de liberté N_{ddl} du modèle aux éléments finis déterministes (c'est-à-dire la taille de chaque A_j) par l'ordre du développement P , donne les vecteurs $\{A_0, \dots, A_{p-1}\}$. Il va être résolu à l'aide des méthodes de projections ou de régressions. Les blocs diagonaux de la matrice M représentent la contribution due à la valeur moyenne. Plus les fluctuations des propriétés matérielles sont faibles, plus cette matrice M est diagonale par blocs. Chaque bloc étant une matrice carrée de taille N_{ddl} à structure bande.

En résolvant le système (III.47), on obtient la meilleure approximation de $A(\theta)$ sur le sous-espace H_P engendré par $\{\Psi\}_{k=0}^{p-1}$, soit :

$$A(\theta) = \sum_{j=0}^{p-1} A_j \Psi_j(\theta) \quad (\text{III.48})$$

D'où :

$$\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{p-1} M_i A_j E[\psi_i \psi_j \psi_k] = \sum_{j=0}^{p-1} \sum_{i=0}^{p-1} E[\psi_i \psi_j \psi_k] M_i A_j = \sum_{j=0}^{p-1} M_{jk} A_j \quad (\text{III.49})$$

La forme finale du système stochastique est donnée par :

$$\sum_{j=0}^{p-1} M_{jk} A_j = F_k \quad (\text{III.50})$$

Pour $i=1$ à $p-1$ ($p-1=2$), nous obtenons :

$$M_{jk} = C_{0jk} M_0 + C_{1jk} M_1 + C_{2jk} M_2 \quad (\text{III.51})$$

Calcul des M_{jk} pour $k=0, 1, 2$

$$\text{- pour } k=0 ; \sum_{j=0}^{p-1} M_{j0} A_j = F_0 \quad (\text{III.52})$$

$$\text{- pour } k=1 ; \sum_{j=0}^{p-1} M_{j1} A_j = F_1 \quad (\text{III.53})$$

$$\text{- pour } k=2 ; \sum_{j=0}^{p-1} M_{j2} A_j = F_2 \quad (\text{III.54})$$

En fixant $p=3$, dans ce cas : $j = 0, 1, 2$ et $k = 0, 1, 2$

On obtient les 3 équations représentant le système à résoudre suivant :

$$\begin{aligned} M_{00}A_0 + M_{10}A_1 + M_{20}A_2 &= F_0 \\ M_{01}A_0 + M_{11}A_1 + M_{21}A_2 &= F_1 \\ M_{02}A_0 + M_{12}A_1 + M_{22}A_2 &= F_2 \end{aligned} \tag{III.55}$$

Le système d'équation (III.55) peut se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} M_{00} & M_{10} & M_{20} \\ M_{01} & M_{11} & M_{21} \\ M_{02} & M_{12} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \tag{II.56}$$

Le système (III.56) se réduit à :

$$[M^S][A^S] = [F^S] \tag{III.57}$$

M^S , N^S , F^S sont respectivement les matrices linéaires aléatoires et le vecteur source liés à la résolution du problème.

On trouve dans la littérature [OFM14] un développement de calcul basé sur la méthode des éléments finis stochastiques spectraux intrusive permettant l'écriture sous la forme d'un développement sur le chaos polynomial en tout point x la perméabilité magnétique, conductivité électrique, potentiel vecteur magnétique ou la densité de courant quelque soient les paramètres considérés comme aléatoires.

Cette technique particulièrement intéressante permettant l'étude des incertitudes sera utilisée dans le prochain chapitre dans le cadre de la caractérisation des composites par CND-CF.

V. Conclusion

Ce chapitre a permis une présentation de la méthode éléments finis stochastiques intrusive et non-intrusive ; nous avons opté pour le choix de l'utilisation de la méthode éléments finis stochastiques intrusive car la méthode de simulation non-intrusive même dans sa formulation la plus simple : MC devient rapidement irréalisable pour des simulations numériques et problèmes à grandes échelles. Le nombre d'évaluations de fonction augmente exponentiellement avec la taille du vecteur d'entrée par contre la méthode des éléments finis

stochastiques intrusive MEFSI a la capacité d'étudier et d'analyser la sensibilité du système en une seule étape.

En effet, la méthode des éléments finis stochastiques spectraux, depuis la parution du livre de *Ghanem et Spanos* [GS91], a intéressé beaucoup de chercheurs qui se sont vu participer à son développement dans divers domaines. Développée à l'origine dans le cadre de la mécanique linéaire [GS91] [BSADK00], la méthode a par suite été étendue à d'autres disciplines traitant d'autres problèmes comme les problèmes thermiques, mécanique des fluides, l'électrotechnique [XK02] [NZ02] [Oud14]. Des améliorations ont aussi été apportées à la méthode retrouvée à titre d'exemple dans les travaux effectués par *Roger Ghanem* [RG99] [RG99b] où il a utilisé les champs aléatoires lognormaux (à la place des champs gaussiens) et de plusieurs champs aléatoires on retrouve également dans les travaux de *Lucas Traverso* et *Timothy Nigel Phillips* [TP19] l'utilisation de la méthode éléments finis stochastiques pour l'écoulement en milieu poreux hétérogènes.

La méthode éléments finis stochastiques présentée dans ce chapitre permet la résolution du problème traité dans lequel l'aléa porte sur un paramètre matériau et est représenté par un champ aléatoire gaussien décomposé sur la base du chaos polynomial. La fiabilité de la structure est évaluée par le calcul de la probabilité de défaillance d'une structure en tenant compte de la variabilité des paramètres (géométrie, matériau). Les paramètres sont représentés par des variables aléatoires.

Chapitre IV

Application et résultats

Sommaire

- I. Introduction
- II. Equation électromagnétique déterministe
- III. Organigramme de la résolution du problème stochastique sous Matlab
- IV. Application 1 : caractérisation et évaluation de défauts sur l'Inconel 600
- V. Application 2 : caractérisation et évaluation de défauts sur un composite à fibre de carbone CFRP
- VI. Conclusion

I. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous proposons une étude basée sur le modèle éléments finis stochastiques intrusif présenté dans le chapitre précédent. Celui-ci est appliqué sur deux applications, pour la caractérisation et la détection de défauts surfaciques Inconel 600 et CFRP. L'étude a été entreprise en considérant un modèle électromagnétique 2D, un modèle géométrique 2D en exploitant l'équation magnétodynamique 2D dont l'inconnue est le potentiel vecteur A , qui se justifie par :

- Le défaut est une fissure fine, défaut surfacique caractérisé par l'hypothèse d'une épaisseur supposée nulle.
- Dans la littérature et travaux réalisés dans le contexte de défauts surfaciques, il a été démontré que l'effet de la longueur de fissure sur le signal courant de Foucault (CF) est clairement apparent contrairement à l'épaisseur de la fissure. Par conséquent, nous pouvons conclure que pour les fissures fines (défauts surfaciques), le signal CF est fortement dépendant de la longueur de la fissure, l'épaisseur dans ce type de défaut est quasiment nulle, aucune incidence sur le signal CF [Ben09] [Hel16] [OFM14] [OBJ22].

Les travaux réalisés par Bensaid [Ben09], Khebab [Kh16], montrent des modèles électromagnétiques 2D pour le CFRP exploités et qui ont donné satisfaction par rapport aux résultats attendus.

Dans le contexte de notre étude le CFRP, qui a fait l'objet de caractérisation de défaut surfacique ; présente les caractéristiques suivantes :

- Le spécimen présenté par le Benchmark JSAEM#problem1, est un composite de type CFRP monocouche, unidirectionnel, suivant le sens longitudinal (axe suivant x).

La conductivité électrique longitudinale est dominante par rapport à celles transverse et orthogonale ; $\sigma_{cp} \ll \sigma_T \ll \sigma_L$

- Cela, a permis de considérer uniquement σ_L dans notre modèle stochastique, ce qui rend le composite homogène, ceci correspond à une seule couche représentée par une seule fibre équivalente.
- Du point de vue électromagnétique, les différentes fibres ont la même propriété physique, conductivité électrique σ_L et la perméabilité magnétique est μ_0 , ce qui permet de résoudre une seule équation électromagnétique (obtenue à partir des équations de Maxwell qui ont la caractéristique d'être locales).

$$\vec{\nabla} \wedge (\nu \vec{\nabla} \wedge \vec{A}) + j\sigma_L \omega \vec{A} = \vec{J}_s \quad (IV.1)$$

- La figure IV.1, illustre la représentation du CFRP monocouche, unidirectionnel, qui nous ramène à un domaine homogène, au niveau duquel, on simule un défaut surfacique.

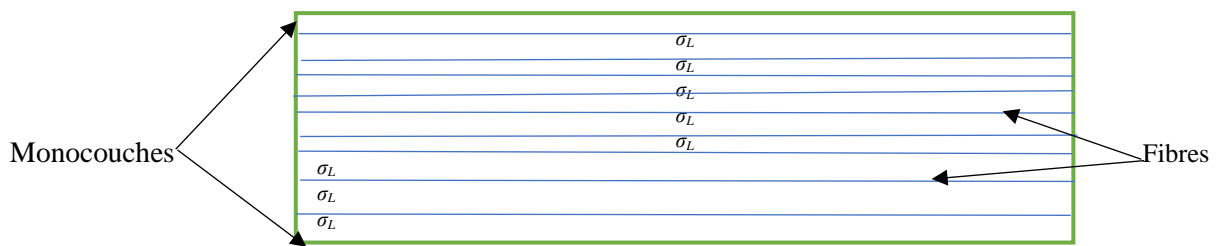


Figure 7. CFRP en monocouche et unidirectionnel

Le maillage est réalisé par le logiciel EF Matlab 2D.

Les deux applications proposées pour intégrer le modèle stochastique construit afin d'une part, de le valider et d'autre part, évaluer l'impact de ce dernier sur l'évaluation de la fiabilité par rapport aux autres méthodes de résolution et d'en déduire l'apport en matière de gain de temps dans la résolution et l'originalité de la méthode qui propose l'analyse de sensibilité et de fiabilité en une seule étape.

Il a été démontré que la conductivité électrique longitudinale est prédominante sur la conductivité transversale et selon l'épaisseur [PLCB15] [PD92] [Ben09] [Hel16]. Elle sera considérée comme variable aléatoire de type Gaussienne orientée suivant l'axe des x, distribuée en polynômes d'Hermite en fonction du degré du chaos polynomial p.

La première application est réalisée sur une pièce d'Inconel 600 selon les données fournies par l'expérimentation réalisée au centre de recherche NDT, en Corée du sud.

La seconde application est réalisée en référence au Benchmark JSAEM#Problème1 [THFM TTTSHOM94], les résultats obtenus lors des simulations y sont confrontés.

II. Equation électromagnétique déterministe

Afin de simuler un problème électromagnétique en contrôle non-destructif par courants de Foucault, il est nécessaire d'utiliser un modèle mathématique obtenu à partir des équations de Maxwell, loi des milieux et conditions aux limites (fournies aux chapitres 2 et 3)

On retrouve dans la littérature plusieurs formulations développées pour la représentation du modèle magnétodynamique décrivant les problèmes où les courants sont induits par des champs magnétiques variables [EKU22] [PG92] [Ben09] [Hel16] [OFM14] [OBJ22].

On considère un problème électromagnétique dont l'inconnue est le potentiel vecteur magnétique A . L'équation électromagnétique est obtenue en hypothèses selon lesquels les courants de déplacement sont négligés et la densité de charge volumique est considérée nulle [LBWHH21] [BLWP22].

La formulation magnétodynamique 2D en termes de potentiel vecteur magnétique A , en hypothèse harmonique est donnée par [OFM14] [OBJ22] :

$$\vec{\nabla} \wedge (\nu \vec{\nabla} \wedge \vec{A}) + j\sigma\omega\vec{A} = \vec{J}_s \quad (IV.2)$$

Avec :

ν : Reluctivité magnétique [H/m]⁻¹.

\vec{J}_s : densité de courant source [A/m²].

ω : fréquence angulaire.

II.1. Formulation du tenseur de conductivité

Les CFRP sont électriquement conducteurs, et peuvent être inspectés par CND-CF [XH09] [MLK01]. La conductivité électrique des composites à fibre de carbone (CFRP) dépend fortement de l'orientation des fibres, il en résulte ainsi, une conductivité électrique dans le sens des fibres, dite longitudinale σ_L ; une conductivité électrique transverse aux fibres essentiellement due aux contacts existants entre fibres et est nommée transversale σ_T , et une conductivité électrique selon l'épaisseur σ_E . [PW13][PLCB15][PD92].

Les valeurs des conductivités électriques mesurées varient entre $5 \cdot 10^3$ et $5 \cdot 10^4$ S/m dans le sens des fibres, et entre 10 et $10 \cdot 10^2$ S/m dans le sens transversal quant à la conductivité des plis transversaux σ_{cp} , il se trouve qu'elle est plus faible, et est généralement inférieure de moitié à la valeur de σ_T , ce qui est attribué à l'existence de régions inter laminaires riches en résine dans le sens de l'épaisseur.

La conductivité électrique du matériau composite à fibre de carbone (CFRP) est un tenseur, si on considère que les fibres sont orientées selon un angle θ par rapport à l'axe des abscisses on aura l'expression de la conductivité comme suit [Men09] [TMOUDZ23] :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_L \cos^2 \theta + \sigma_T \sin^2 \theta & \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin^2 \theta & 0 \\ \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin^2 \theta & \sigma_L \sin^2 \theta + \sigma_T \cos^2 \theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{bmatrix} \quad (IV.3)$$

Avec :

σ_L : conductivité électrique longitudinale.

σ_T : conductivité électrique transversale.

σ_{cp} : conductivité électrique inter pli.

Dans notre étude les fibres sont orientées le long de l'axe des x, et $\theta=0^\circ$ d'où l'expression de la conductivité électrique :

$$[\sigma] \begin{bmatrix} \sigma_L & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_T & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

Avec : $\sigma_{cp} \ll \sigma_T \ll \sigma_L$

Dans le cadre de notre étude, toutes les simulations sont réalisées en respectant les hypothèses émises en introduction et en référence au Benchmark JSEAM#Problem1 [THFM TTTSHOM94], CFR représente la conductivité longitudinale, qui est très importante par rapport à la transverse et l'orthogonale, nous pouvons effectuer notre scan en considérant uniquement la conductivité dans le sens de la longueur.

$$[\sigma_{CFRP}] = \begin{bmatrix} \sigma_L & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_T & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

$\sigma_L = 5 \times 10^4 [S/m]$, $\sigma_T = 100 [S/m]$ et $\sigma_{cp} = 50 [S/m]$.

L'équation (IV.5) devient dans ces conditions :

$$[\sigma_{CFRP}] = \begin{bmatrix} \sigma_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

II.2. Expression de la conductivité électrique aléatoire

La conductivité électrique σ_L , constitue la variable d'entrée, celle-ci est distribuée sur le chaos polynomial comme une variable aléatoire de type Gaussienne, caractérisée par une valeur moyenne et un écart-type. Son expression dans la base des polynômes d'Hermite est comme suit :

$$\sigma_L = \sum_{i=1}^{p-1} \sigma_{Li} H_i(\xi_1, \dots, \xi_M) \quad (\text{IV.7})$$

Après développement, en considérant une variable aléatoire de type Gaussienne caractérisée par une valeur moyenne σ_{L0} et un écart-type E_c (représente un pourcentage de σ_{L0}).

On obtient la matrice stochastique σ_{LS} à partir des coefficients x_{ijk} , donnés dans l'expression suivante :

$$x_{ijk} = \begin{cases} \frac{i!j!k!}{\left(\frac{i+j-k}{2}\right)!\left(\frac{j+k-i}{2}\right)!\left(\frac{k+i-j}{2}\right)!} & \text{si } \left\{ \begin{array}{l} (i+j+k) \\ k \in [|i-j|, i+j] \end{array} \right. \quad \text{sinon)} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{IV. 8})$$

Après développement en associant la valeur moyenne et l'écart type de la variable aléatoire, on aboutit à la formulation de la matrice stochastique relative à la conductivité σ_{LS} suivante :

$$\sigma_{LS} = \begin{bmatrix} \sigma_{L0} & E_c & 0 \\ E_c & \sigma_{L0} & 2 * E_c \\ 0 & 2 * E_c & 2 * \sigma_{L0} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

σ_{L0} : Valeur moyenne de la conductivité électrique σ_L le long de l'axe x.

E_c : Ecart-Type de la variable aléatoire.

La forme du modèle éléments finis stochastiques intrusif et du système linéaire harmonique est :

$$F_k^{st} = \sum_{j=0}^{p-1} (M_{jk}^{st} + j\omega N_{jk}^{st}) A_j \quad (\text{IV.10})$$

$$M_{jk}^{st} = x_{0jk} M_0 \quad (\text{IV.11})$$

$$N_{jk}^{st} = \sum_{i=0}^{p-1} x_{ijk} N_i^{st} \quad (\text{IV.12})$$

Où : $M_{jk}^{st}, N_{jk}^{st}, F_k^{st}$ sont respectivement les matrices linéaires aléatoires et le vecteur source liés à la résolution du problème.

Le système stochastique obtenu à partir de l'équation (IV.10) est :

$$\begin{bmatrix} E_{00}^{st} & E_{10}^{st} & E_{20}^{st} \\ E_{01}^{st} & E_{11}^{st} & E_{21}^{st} \\ E_{02}^{st} & E_{12}^{st} & E_{22}^{st} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

L'expression des résultats de la matrice E_{jk}^{st} est obtenue en exploitant les équations (IV.11) et (IV.12), elle est représentée comme suite :

$$E_{jk}^{st} = M_{jk}^{st} + j\omega N_{jk}^{st} \quad (\text{IV.14})$$

Les solutions obtenues après résolution du système algébrique stochastique complexe sont A_0, A_1, A_2 en considérant les composantes du vecteur source F_0, F_1, F_2

II.3. Post - traitement

Le calcul de l'impédance est obtenu à partir de l'énergie électromagnétique de la bobine, d'où l'exploitation des solutions stochastiques du potentiel vectoriel A.

Le nombre de solutions pour A et l'impédance Z est égal à p, qui représente le degré de chaos polynomial.

Les formulations de la partie réelle et imaginaire de l'impédance Z, lors de la caractérisation et dans la zone de défaut suspectée, sont données comme suit :

$$Re(Z) = -\frac{N_c^2}{J_{sz} \cdot S_c^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot Im(A) \cdot dS_c \quad (IV.15)$$

$$Im(Z) = \frac{N_c^2}{J_{sz} \cdot S_c^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot Re(A) \cdot dS_c \quad (IV.16)$$

Avec :

N_c : nombre de spires.

S_c : surface de la bobine inductrice.

r : rayon de l'inducteur.

$Re(A)$ et $Im(A)$ respectivement : partie réelle et imaginaire du potentiel vecteur magnétique A.

II.4. La variation d'impédance

La variation de l'impédance Z dans la fissure est calculée comme suit :

$$\Delta Z = \|Z_{pl} - Z_0\| \quad (IV.17)$$

Avec : Z_{pl} et Z_0 sont respectivement l'impédance de la plaque avec défaut et sans défaut.

II.5. L'indice de fiabilité β

La MEFSI permet d'évaluer directement la fiabilité du système étudié en déterminant la fonction d'état limite : G_{ISFEM} et l'indice de fiabilité β [OFM14] [Loe77] [DSBDR09]. Il suffit d'exploiter les trois impédances issues du calcul stochastique et l'impédance de référence Z_0 .

$$G_{ISFEM} = Z_0 - \sum_{p=0}^{p=2} Z_p ; \sum_{p=0}^{p=2} Z_p = Z_{p=0} + Z_{p=1} Z_{p=2} \quad (IV.18)$$

$$\beta = Min \sqrt{G_{ISFEM}} \quad (IV.19)$$

III. Organigramme de la résolution du problème stochastique sous Matlab

La figure IV. 2 représente l'organigramme sous Matlab des différentes étapes de construction du modèle stochastique intrusif, de sa résolution ainsi que de l'exploitation des résultats.

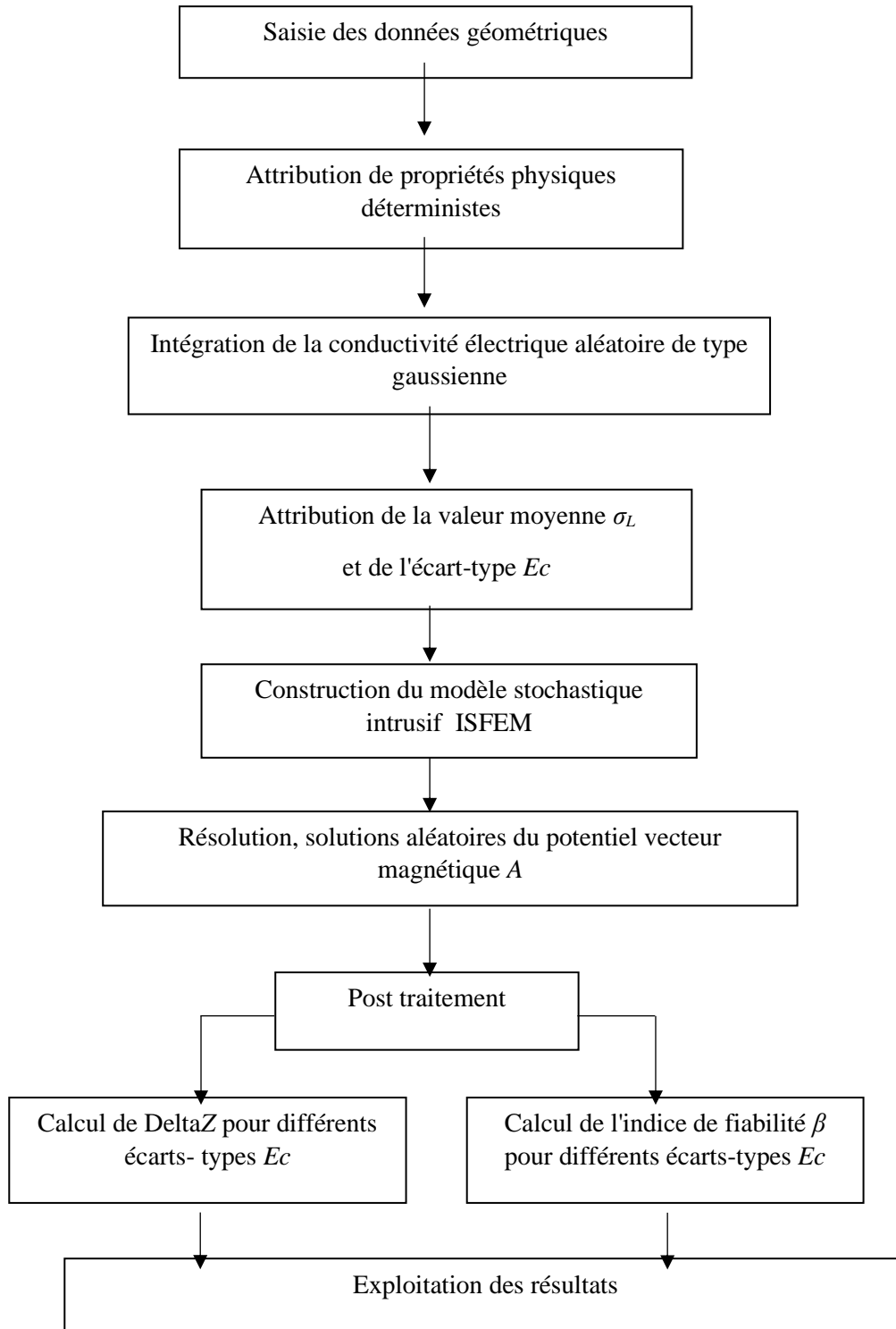


Figure IV.2 : Organigramme de résolution sous Matlab

IV. Application 1 : caractérisation et évaluation de défauts sur l’Inconel 600

IV.1. Description du problème, matériau et matériel utilisé :

IV.1.1. Description du problème :

La présente étude consiste à représenter sous forme probabiliste la réponse d’un système CND-CF dont la propriété du matériau constitutif est une variable aléatoire, cette dernière est développée en série de polynômes d’Hermite d’une variable de type Gaussienne dont la réponse obtenue est étendue en série sur le chaos polynomial.

Un code de calcul éléments fins a été élaboré sous environnement Matlab, en considérant une application dont la variable aléatoire est la conductivité électrique σ du spécimen à caractériser et évaluer en termes de défauts surfaciques.

Les coefficients du développement sont déterminés par la méthode de projection où la variable aléatoire suit la loi de comportement de type Gaussienne. Grâce au code de calcul éléments finis stochastiques intrusif 2D (MEFSI) élaboré, l’analyse de sensibilité et de fiabilité peuvent être abordées en une seule étape.

La réponse du système liée à l’application est l’Impédance de la plaque en absence et en présence de défaut.

Le coefficient de fiabilité β lié à l’aléa représenté par la conductivité électrique σ est calculé et l’état de fiabilité de notre système mis en évidence.

IV.1.2. Description du matériau utilisé

Le matériau utilisé est un alliage à base de Nickel commercialement connu sous le nom Inconel 600 réputé pour sa grande résistance à la corrosion en milieu haute température (jusqu’à 2000° F) pouvant être utilisé comme composé d’un composite. Il offre de bonnes propriétés mécaniques et présente une résistance élevée, c’est un matériau couramment utilisé dans l’aérospatial, turbine, aéronautique, thermocouples, pipes pour n’en citer que quelques domaines et présente les caractéristiques représentées dans le tableau IV.1:

Nom du matériau	Conductivité électrique σ	Perméabilité magnétique	Température max
Inconel 600	$\sigma = 1 \times 10^6$ S/m	1	Jusqu’à 2000° F

Tableau IV.1 : Caractéristiques de l’inconel 600

IV.1.3. Description du matériel utilisé

La partie expérimentale est réalisée à l'aide d'un appareil de détection de défauts par courants de Foucault de la série NORTEK 500. Cet appareil mesure la conductivité électrique d'un matériau et permet de travailler en double fréquence. Il offre une large bande passante allant de 50H à 12 MHz rendant possible le scan de défauts à différentes profondeurs. Ce dernier est connecté à un ordinateur portable contenant le logiciel LABVIEW et est utilisé pour caractériser et évaluer les défauts sur la pièce Inconel 600.

IV.2. Résolution du problème

Afin de valider le modèle stochastique 2D, des simulations en référence à une expérience concernant la caractérisation de l'inconel 600 (cette dernière permet de récupérer à la fois l'amplitude et l'angle avec le dispositif Nortek 500), Une sonde de fréquence de 100kHz-500kHz avec LABVIEW. Ces deux grandeurs ont été exploitées afin d'estimer les dimensions de la fissure (la taille et la profondeur).

La plaque d'Inconel 600 contient un défaut artificiel de forme rectangulaire ayant une longueur et une largeur constantes. Dans la simulation, plusieurs écarts-types de la variable aléatoire σ sont testés. La fréquence est de 150 KHz.

IV.2.1. Description du dispositif

La géométrie du dispositif d'étude est représentée en hypothèse 2D compte tenue de l'épaisseur de la fonte qui est de 22 μm suivant la direction z. Cela permet de supposer que le défaut est une couche mince (défaut surfacique) et décrite en figure IV.3.

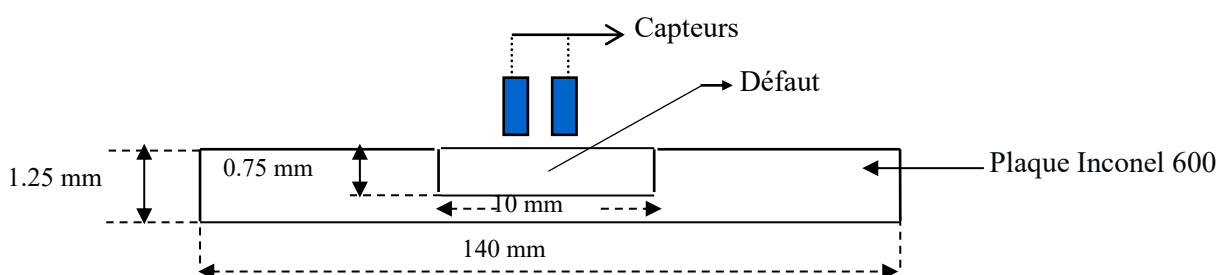


Figure IV.3. Géométrie du dispositif d'étude

IV.2.2. Propriétés physique et paramètres du dispositif d'étude

- Inducteur :
 - Diamètre intérieur : 10 mm
 - Diamètre extérieur : 12 mm
 - Hauteur : 0.8 mm

Nombre de spires : 200

- Plaque Inconel 600 :

Epaisseur : 2mm

Conductivité : $\sigma_{LO}=1 \times 10^6$ S/m

Perméabilité relative : 1

Lift-off : 1mm

- Défaut :

Longueur : 10mm

Largeur : 0.75 mm

Profondeur : 1mm

Ecart Type $Ec_1=0.1$, $Ec_2 = 0.5$, $Ec_3=0.9$

Fréquence 150 kHz

IV.2.3. Maillage du domaine

La figure IV.4 montre le maillage du domaine d'étude pour la pièce avec défaut. La résolution permet d'obtenir trois solutions : A_0 , A_1 et A_2 de dimension np correspondant à l'ordre du polynôme d'Hermite considéré.

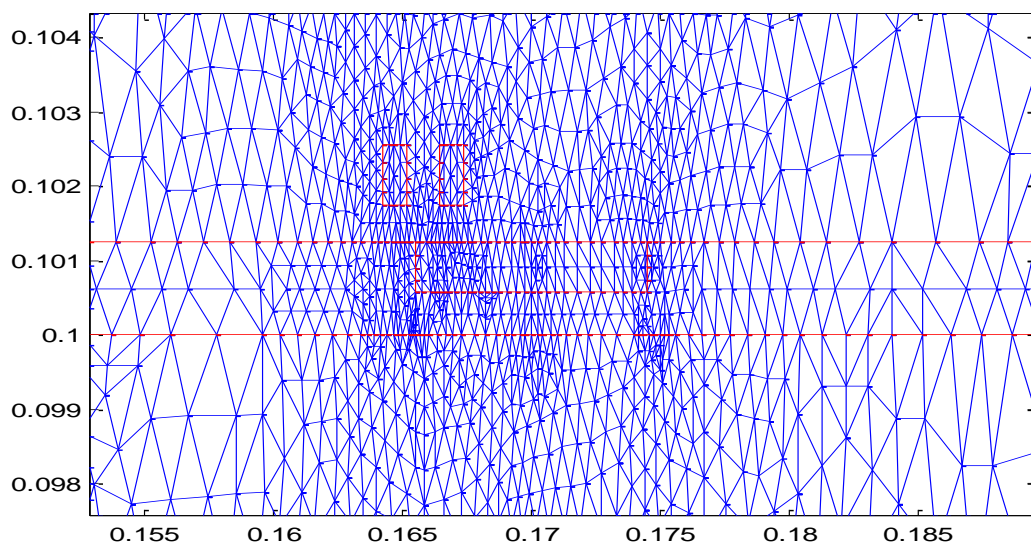


Figure IV.4 : maillage du domaine d'étude

IV.2.4. Le potentiel vecteur magnétique A

La figure IV.5 représente la distribution du potentiel vecteur magnétique A pour $p=0$, une des trois solutions stochastiques.

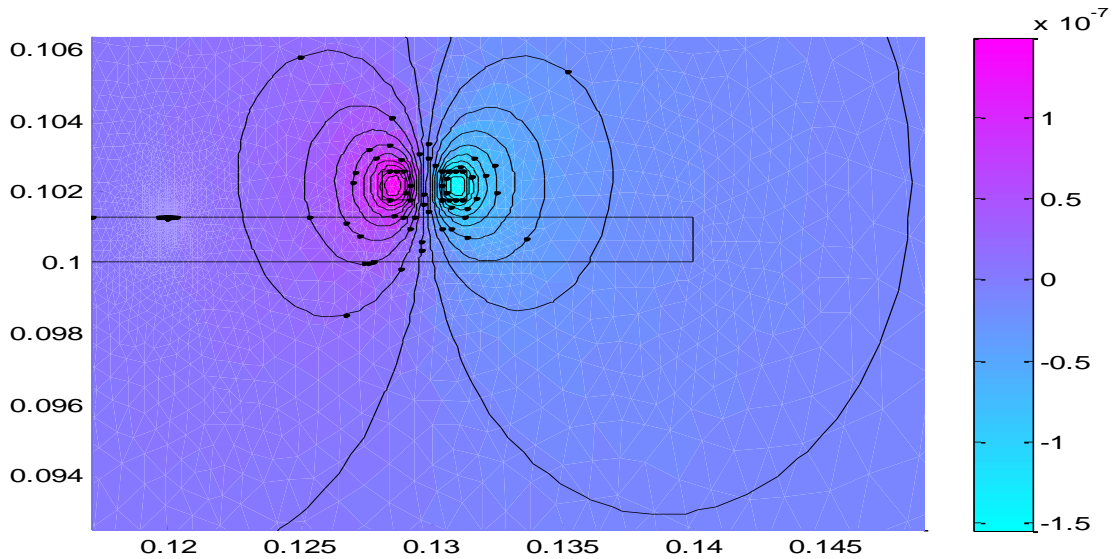


Figure IV.5 : potentiel vecteur magnétique stochastique A_0

IV.2.5. Variation de l'impédance Z pour les trois solutions stochastiques

La figure IV.6 nous montre les trois solutions stochastiques de la variation d'impédance pour $p=0, p=1, p=2$

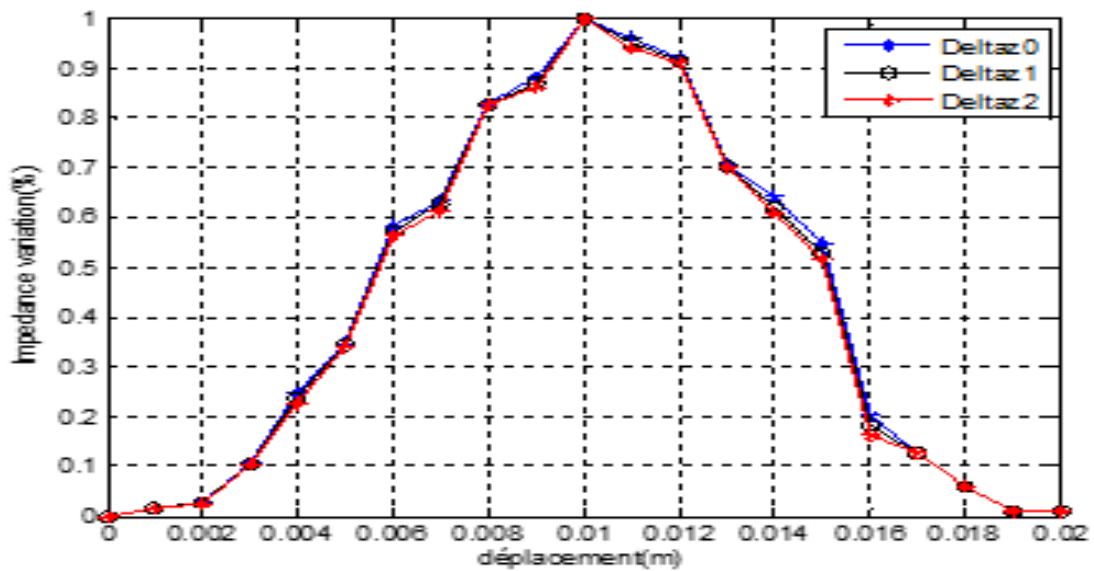


Figure IV.6 : trois solutions aléatoires de la variation d'impédance

On remarque que les trois solutions sont quasi identiques, raison pour laquelle les résultats suivants seront donné pour une seule solution $p=0$.

IV.2.6. Comparaison du delta Z issu de la MEFSI et de l'expérimental

La figure IV.7 donne la comparaison entre la variation d'impédance en valeur réduite résultant du calcul par la méthode élément fini stochastique et ceux obtenus par l'expérimentale.

Lorsque la conductivité électrique $\sigma_{L0}=0$ et l'écart type $E_c=0$ nous avons une pénétration de 100%. Nous avons trouvé un accord entre l'expérimentale et le calcul stochastique.

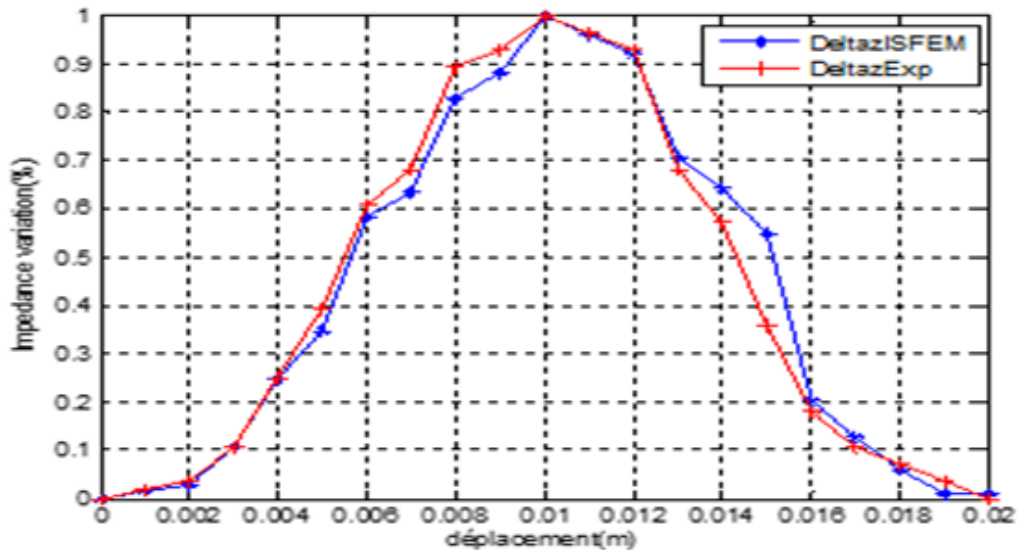


Figure IV.7 : delta Z obtenu par la MEFSI et l'expérimental.

IV.2.7. Variation d'impédance pour différents écarts types

Pour différents écarts-types, la variation d'impédance a été relevée et tracée dans la figure IV.8 ci-dessous. Il en résulte une influence de l'écart-type sur la variation d'impédance.

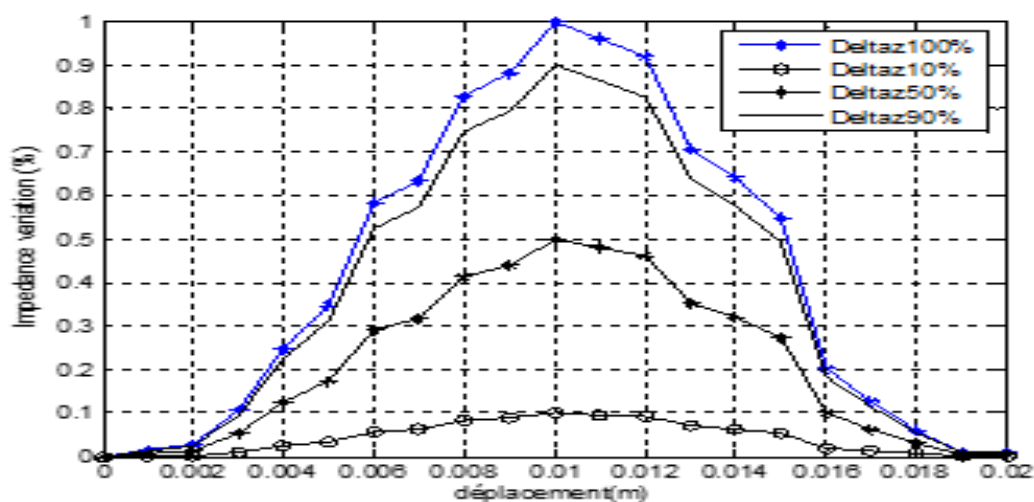


Figure IV.8 : comparaison de la variation d'impédance pour différents écarts-types.

V. Application 2 : Caractérisation et évaluation de défauts sur un composite à fibre de carbone CFRP

V.1. Description du matériau utilisé

Plaque en composite à fibre de carbone CFRP avec présence et absence de défaut, dont les dimensions de l'échantillon, la sonde et la plaque CFRP sont prises en compte sur la base du benchmark JSAEM#Problem1[THFM TTTSHOM94]. Les simulations obtenues pour la variation de l'impédance de la bobine sont comparées à celles obtenues par les mesures expérimentales de la référence, qui sont indiquées dans le tableau IV.3.

V1.1. Description du dispositif

La géométrie du dispositif d'étude se compose d'une bobine sur une plaque composite CFRP sans défaut et en présence de défaut type fissure fine représentée sur les figures IV.8 et IV.9 respectivement.

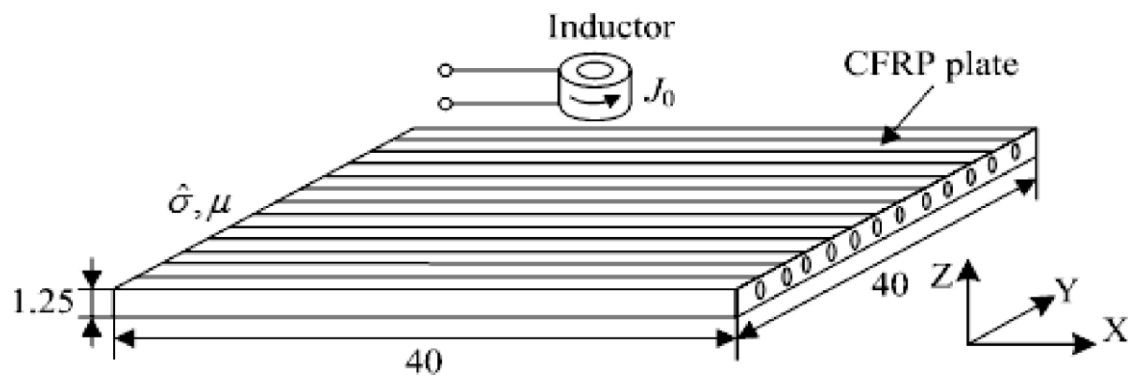


Figure 8 : plaque CFRP saine.

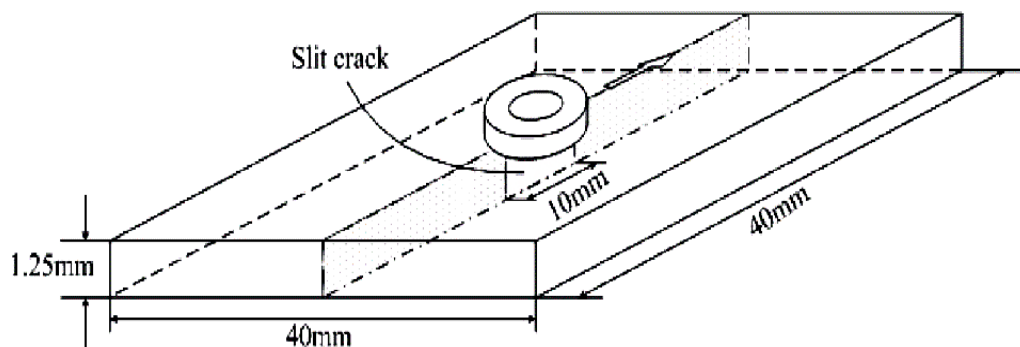


Figure 9 : plaque CFRP présentant un défaut.

V1.2. Paramètres liés au problème étudié

- Bobine :

Diamètre interne : 1.2mm

Diamètre externe : 3.2 mm

Hauteur : 0.8 mm

Largeur 1 mm

Courant : 1/ 140 A

Nombre de tours : 140

- Plaque CFRP :

Hauteur : 40mm

Largeur : 40mm

Epaisseur : 1.25 mm

Perméabilité relative : 1

Lift-off : 0.5 mm

- Défaut :

Longueur : 10mm

Largeur : 0.2 mm

Profondeur : 1.25mm

V1.3. Conductivité électrique et orientation de fibres pour le CFRP

Dans le cas d'un matériau composite à fibres de carbone laminé, le tenseur de conductivité électrique exprimé dans l'équation (IV.3) peut être utilisé pour l'indication de l'orientation des fibres, en effet, lorsque tous les plis sont empilés le long de l'axe des x, l'angle $\theta = 0^\circ$, et le long de l'axe y, l'angle $\theta = 90^\circ$, le tenseur de conductivité s'exprime alors par:

$$[\sigma_{CFRP}] = \begin{bmatrix} \sigma_L & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_T & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{bmatrix} \quad (IV.20)$$

$\sigma_L = 5 \times 10^4$ [S/m], $\sigma_T = 100$ [S/m] and $\sigma_{cp} = 50$ [S/m].

Les simulations qui suivent ont été réalisées selon les orientations et hypothèses émises précédemment [THFMTTSHOM94] [TMOUDZ23].

V1.4. Mesures expérimentales de référence

Fréquence	Simulation ISFEM	$Z_{ISFEM} = -0.89 + 0.76i \text{ } [\Omega]$
150 KHz	Expérimentale	$Z_{Exp} = -0.99 + 0.79i \text{ } [\Omega]$

Tableau IV.3: prévision de la variation d'impédance de la bobine.

Les deux impédances sont formulées sous forme exponentielle comme suit :

$$Z_{ISFEM} = \|Z_{ISFEM}\| e^{i\varphi}$$

$$Z_{Exp} = \|Z_{Exp}\| e^{i\alpha}$$

Avec :

$\|Z_{ISFEM}\|$ and $\|Z_{Exp}\|$: modules d'impédance

φ, α : Argument de l' impédance

V.2. Résultats issus des simulations pour 150 kHz

V.2.1. Comparaison entre l'impédance résultant du calcul stochastique et des données expérimentales

La figure (IV.11) représente l'évolution des deux impédances (Z_{ISFEM} et Z_{Exp}) en fonction de leurs arguments respectifs, elle montre une bonne concordance entre l'expérimental et les données issues de la MEFSI.

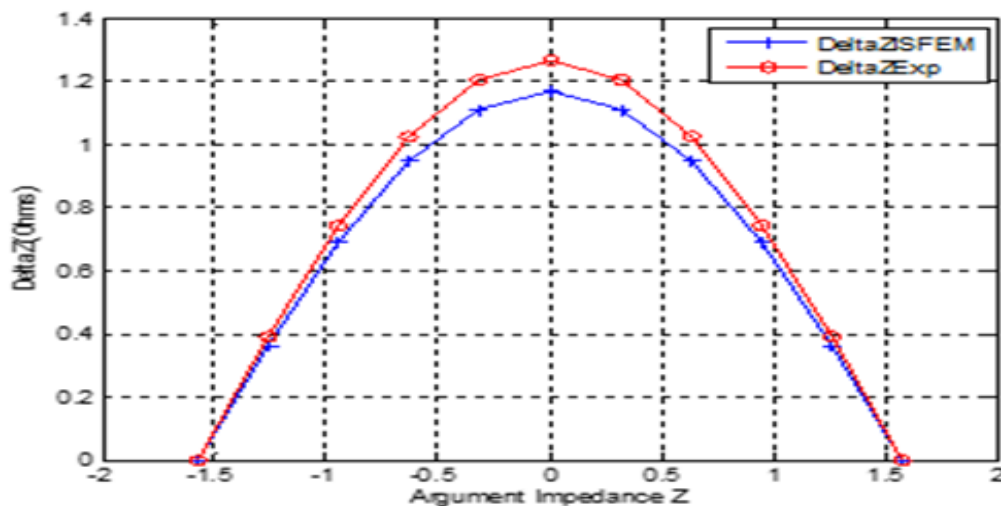


Figure IV.11 : delta Z en fonction de l'argument pour les données MEFSI et expérimentale

V.2.2. Comparaison de la variation de l'impédance pour différents écarts-types

La figure (IV.12) est obtenue en variant l'impédance Z en fonction du déplacement pour différentes valeurs d'écarts-types.

Elle nous renseigne sur la présence du défaut, en effet, on voit bien la présence de la fissure pour une pénétration de 10% et 90%, ce qui correspond respectivement à l'écart-type E_c de 0,9 et 0,1.

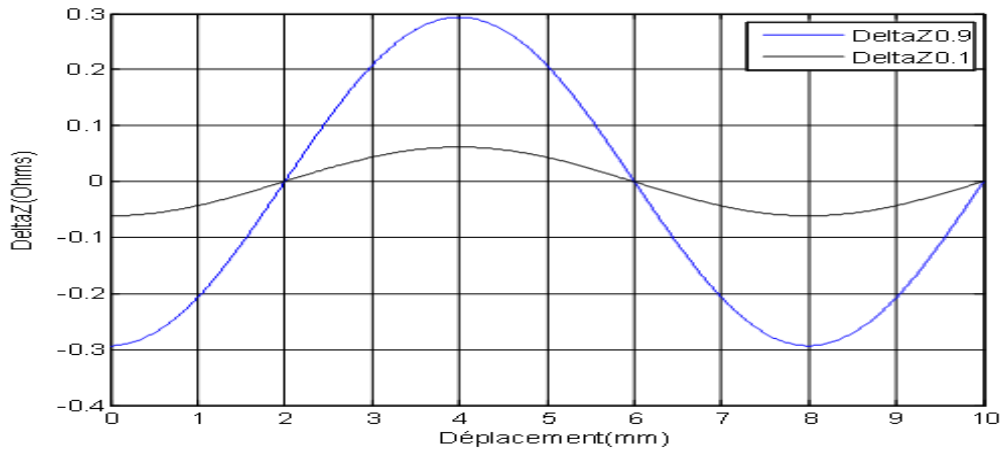


Figure IV.12 : variation de l'impédance en fonction du déplacement pour différents écarts-types.

V.2.3. Représentation de la partie réelle de la variation d'impédance

La variation de la partie réelle de l'impédance pour les deux orientations de fibres, longitudinale et transversale est représentée dans la figure IV.13. On constate que la variation de l'impédance est plus importante pour $\theta = 0^\circ$ (axe x) par rapport à l'orientation selon l'axe y, où $\theta = 90^\circ$. Ceci s'explique par le fait que l'axe des courants de Foucault induits est dans la direction de la fibre, ce qui suggère que ces derniers sont étirés dans la direction de haute conductivité (longitudinale) et restreints dans la direction de basse conductivité (transversale).

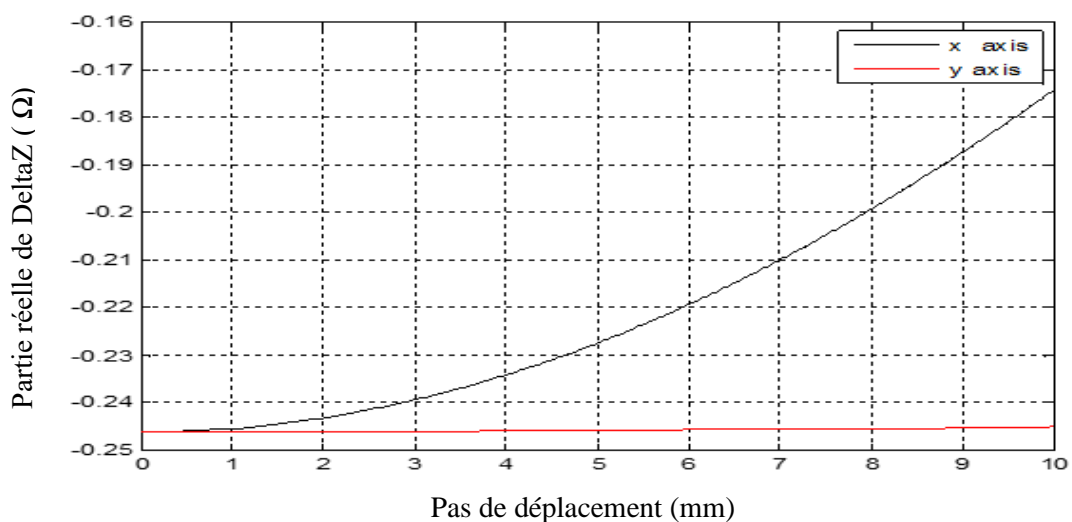


Figure IV.13 : partie réelle de la variation d'impédances dans les directions 0° et 90° .

V.2.4. Indice de fiabilité

L'évolution de l'indice de fiabilité beta dans la fissure, pour deux écarts-types de 0,5 et 0,9 est représentée sur la figure IV.14. La théorie recommande un indice de fiabilité supérieur à 3.

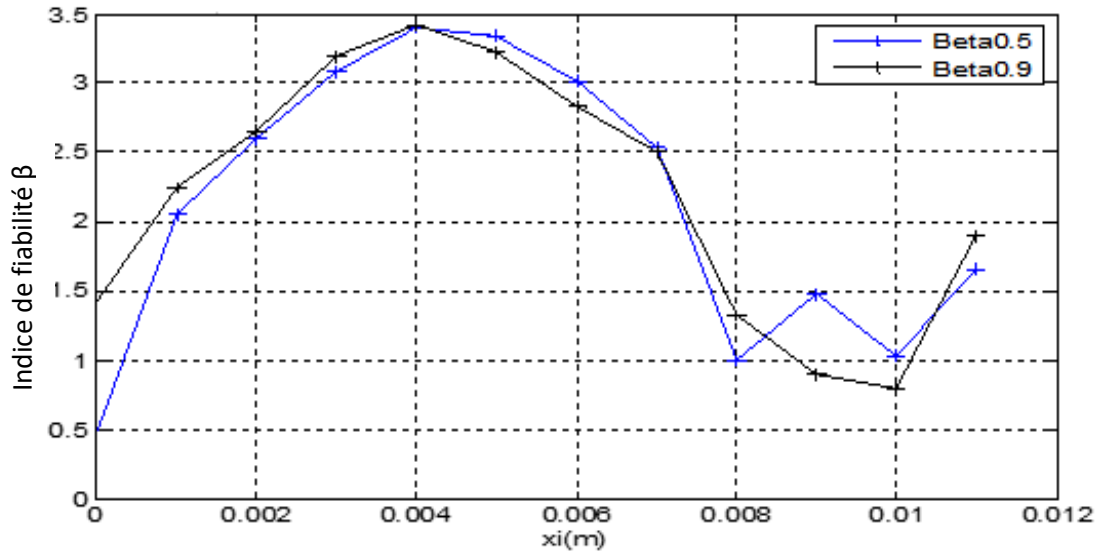


Figure IV.14 : l'indice de fiabilité Beta dans la fissure pour différents écarts types.

V.3. Résultats pour une fréquence de 300 kHz

V.3.1. Variation des trois impédances

Après avoir validé notre modèle stochastique pour une fréquence de 150 kHz, nous avons entamé des simulations dans le but de vérifier que les résultats restent toujours concluants à une fréquence de 300 kHz pour un modèle stochastique 2D.

Les différents résultats ont concerné les variations des trois impédances aléatoires δz_0 , δz_1 et δz_2 , obtenues à partir du potentiel vecteur A, résultant de l'analyse stochastique suite au déplacement du capteur le long de la zone suspectée (avec fissure).

La conductivité électrique est répartie de manière aléatoire sur le matériau pour les écarts-types allant de 20%, 60% et 90% de la valeur moyenne de la conductivité électrique, le but est de mettre en évidence la variation de l'impédance dans la zone suspectée de présence de défaut. L'impédance Z est ensuite calculée.

V.3.2. Variation des impédances lors du déplacement du capteur

La figure IV.15 représente les variations des impédances aléatoires δz_0 , δz_1 et δz_2 , pour $p=0,1,2$; lorsque le capteur se déplace sur une distance de 12mm.

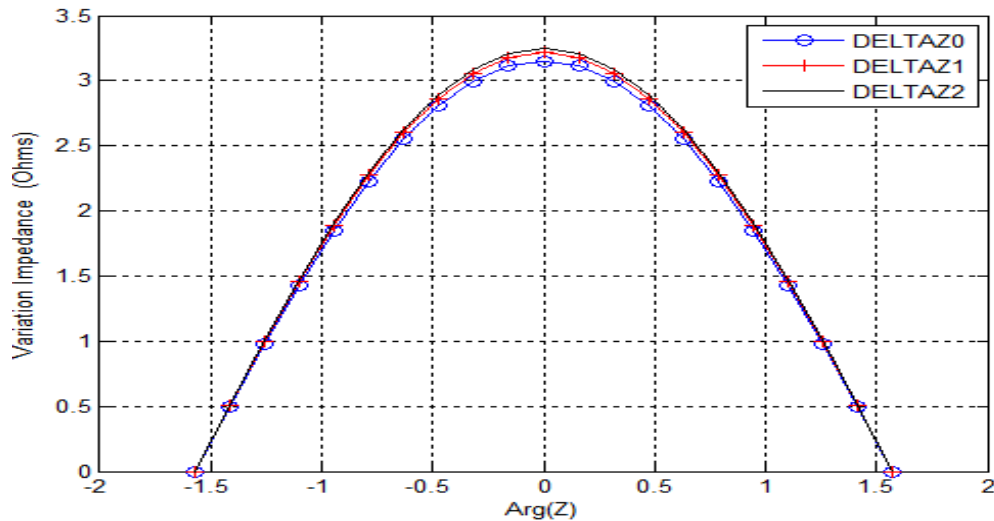


Figure IV.15 : représentation des différentes impédances stochastiques

V.3.3. Variation de l'impédance pour différents écart-types

La figure IV.16 illustre l'impédance résultant du calcul du modèle stochastique 2D, en fonction de son argument et du déplacement du capteur différentiel, pour trois valeurs d'écart-types, 20 %, 60 % et 100 %. Les résultats montrent que le défaut dépend directement de la valeur de l'écart-type, plus l'écart-type est grand, la conductivité diminue ce qui se caractérise par une grande variation d'impédance donc présence de défaut.

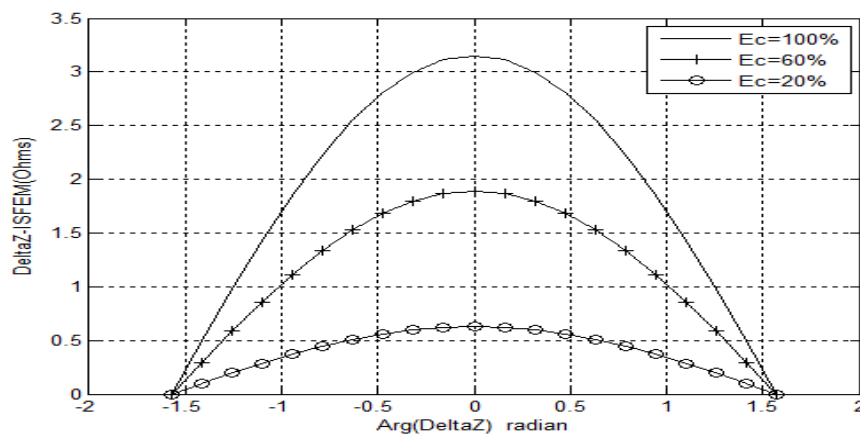


Figure IV.16 : variation de l'impédance lors du déplacement pour différent écarts-types.

V.4. Evaluation de la variation de l'impédance en fonction du lift-off

L'objectif de cette simulation est de démontrer l'influence de la distance qui sépare la charge du capteur (lift-off) lors du scan de la zone de défaut. Le choix du lift-off est primordial, il a été démontré [Zao09], que plus on s'éloigne de la cible et plus l'information sur la variation de l'impédance devient difficile à obtenir. Pour ces raisons, nous avons testé deux valeurs de lift-off (Fig.IV.17) et nous constatons que DeltaZ a diminué de moitié en augmentant du double le

lift-off ; ceci nous renseigne effectivement que si le lift-off est important, on ne verra pas de variations d'impédance, ceci peut entraîner une évaluation erronée sur la présence de défaut.

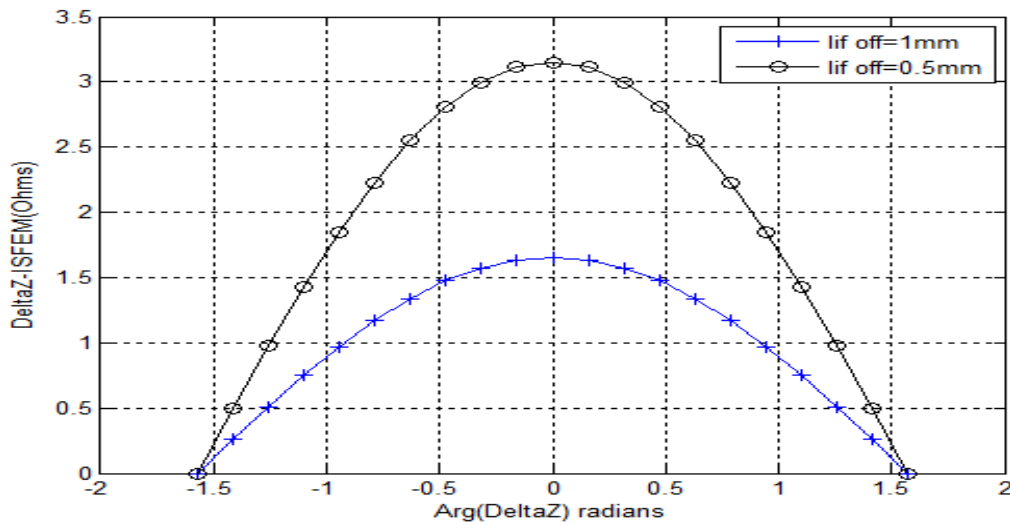


Figure IV.17 : représentation de DeltaZ pour différents lift-off

V.5. Représentation de la conductivité selon les axes lors du déplacement

La figure IV.18 illustre la prédominance de la conductivité électrique selon les axes x et y, correspondant respectivement à l'angle $\theta=0^\circ$ et $\theta=90^\circ$ à 300 kHz. Les résultats montrent une dominance de l'orientation le long de l'axe des x ($\theta=0^\circ$), ce qui confirme la particularité du CFRP ayant une conductivité longitudinale dominante comparativement à la direction transversale. Ce constat a été démontré lors des simulations pour une fréquence de 150 kHz. Au terme de ces résultats, le modèle éléments finis stochastiques intrusif 2D (MEFSI), montre sa capacité à traiter la caractérisation du CFRP pour deux fréquences assez élevées en hypothèse 2D.

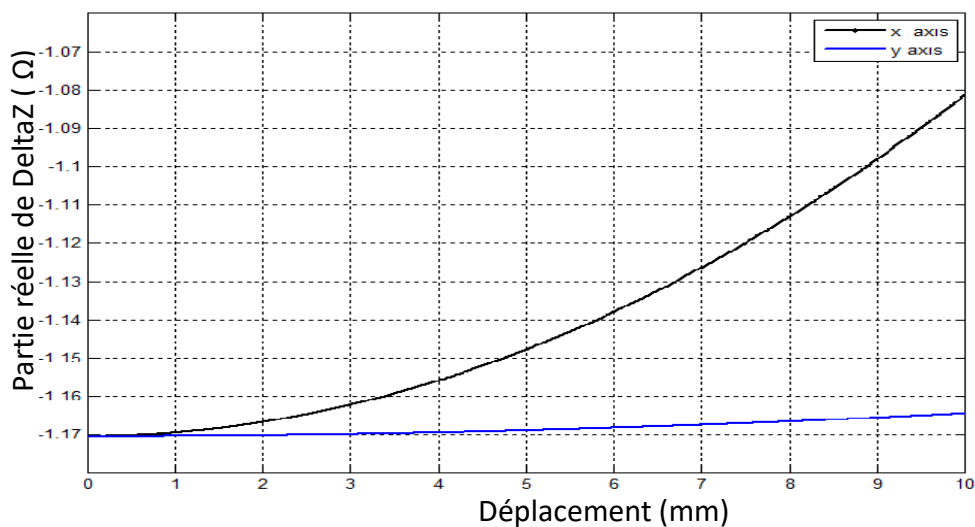


Figure IV.18 : partie réelle de la variation d'impédance dans les directions 0° et 90°

VI. Conclusion

Dans ce travail, une approche pour la caractérisation d'une plaque composite de type CFRP et l'évaluation des défauts par la méthode des éléments finis stochastiques intrusive 2D (ISFEM) consistant à considérer la conductivité électrique comme variable aléatoire a été réalisée.

La méthode des éléments finis stochastiques intrusive mise en œuvre a été appliquée à l'étude d'un dispositif CND. Le modèle utilisé est basé sur la considération de la conductivité électrique comme variable aléatoire de type Gaussienne développée sur le chaos polynomial d'ordre 2.

Les réponses aléatoires du problème stochastique obtenues aux ordres 0, 1 et 2 permettent de nous renseigner sur l'état du système par rapport à la présence de défauts surfaciques à travers son impédance comparée à l'impédance de référence.

La conductivité électrique prend des valeurs aléatoires dont l'écart-type est considéré comme le paramètre du taux de pénétration des fissures. Dans un premier temps, le modèle est appliqué à une éprouvette en matériau isotrope Inconel 600, afin d'évaluer la variation de l'impédance pour trois écarts-types respectivement de 0,1 ; 0,5 et 0,9, dans la zone de défaut.

La variation de l'impédance est comparée aux données expérimentales réalisées au centre de recherche NDT «*Research Center for Real Time NDT, Chosun University Korea*» [TMOUDZ23].

La deuxième application qui concerne le CFRP, les résultats obtenus ont été confrontés aux données expérimentales fournies par le Benchmark JSAEM#Problem1 [THFM TTTSHOM94], pour une pénétration qui avoisine les 100%, suite à cette validation qui conforte la première application ; deux écarts-types 0,1 et 0,9 ont été considérés pour mettre en évidence le défaut surfacique.

L'influence de l'orientation des fibres selon l'axe x ($\theta=0^\circ$) et l'axe y ($\theta=90^\circ$) a été étudiée pour les deux fréquences 150 kHz et 300 kHz, les résultats obtenus sont très satisfaisants. Les résultats obtenus sur l'analyse de fiabilité sont en accord avec les résultats théoriques attendus. Ceux-ci concluent à la validation du code source Matlab développé sur la base de l'ISFEM.

L'inspection a été réalisée par le procédé du contrôle non-destructif par courants de Foucault. Les résultats obtenus pour deux applications sont en concordance avec les données expérimentales et celle du Benchmark JSAEM#Problem1 auxquels ils ont été comparés. Un dernier test a été réalisé en doublant la fréquence (300 kHz), les résultats obtenus sont plus que satisfaisants.

Conclusion Générale

Les matériaux composites présentent divers avantages telle la légèreté comparée aux métaux, cela les rend très attrayants dans les applications visant un gain de poids comme étant le cas dans l'industrie automobile. À titre d'exemple, ils se caractérisent aussi par une bonne résistance à la corrosion, sont flexibles et durables, en raison de ces avantages, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans une variété d'industries, contribuant à l'innovation et amélioration des performances dans de multiples domaines.

Cependant, bien que les matériaux composites offrent de nombreux avantages, il existe des risques quant à leurs utilisations, car ils sont sujets à des défauts telle la porosité, absence de matière, rupture de fibre, qui peuvent engendrer des dégâts considérables, tant ils sont utilisés dans des domaines très sensibles comme l'aérospatial, l'automobile...C'est pourquoi leur utilisation doit être accompagnée d'une évaluation attentive des risques potentiels et de la mise en place de mesures de prévention et de contrôles. À cet effet il existe plusieurs techniques et procédés pour l'évaluation de leur état de santé nommés CND.

Parmi les techniques existantes pour le contrôle non-destructif, nous avons opté dans cette thèse au CND par courants de Foucault pour l'inspection d'une plaque en Inconel 600 et en composite de type CFRP. Le choix a été porté pour cette technique, car elle est particulièrement intéressante et offre une combinaison unique entre sensibilité élevée (possibilité de détection d'anomalies comme les délaminations, vide (manque de matière) défauts type fissure, défauts surfaciques, sensibilité aux variations de la conductivité électrique) et rapidité. Cela permet un gain de temps et maintien de productivité dans un milieu industriel. Ajouté à cela le CND-CF peut en plus de la détection des défauts, fournir des informations sur la taille, profondeur et forme du défaut.

Dans un second lieu, nous nous sommes intéressés à la méthode éléments finis stochastique 2D, méthode particulièrement utile pour la modélisation des matériaux dont les propriétés varient de manière aléatoire, elle permet une évaluation plus réaliste des risques et de la fiabilité de structures en prenant en compte l'incertitude.

Dans notre cas, cette méthode permet la prise en compte de la variable spéciale d'une propriété physique qui se trouve être la conductivité, celle-ci est répartie sur la zone suspectée composée de coefficients calculés à partir du chaos polynomial.

Nous avons développé un modèle SFEM intrusif 2D sous l'environnement Matlab. Le modèle utilise le potentiel vecteur magnétique comme variable d'état et fournit l'impédance Z du capteur différentiel pour l'analyse de fiabilité des systèmes de contrôle non-destructif.

Grâce à la méthode des éléments finis stochastiques 2D, on peut déduire la fonction d'état limite ainsi que l'indice de fiabilité correspondant à l'impédance du dispositif saint. La validation du modèle a été réalisée par comparaison des résultats fournis par le modèle stochastique 2D à ceux fournis par l'expérimental et le benchmark JSAEM#Problem1.

Ce qui constitue l'originalité de ce travail est le développement d'un modèle adapté à la détection de défaut surfacique sur un composite CFRP sans avoir recours au traitement du problème inverse et l'utilisation d'un modèle électromagnétique 3D, ce qui peut engendrer dans ce cas précis une grande taille du système à résoudre et des temps de simulations très longs. En revanche le modèle MEFSI 2D, a suffi pour caractériser le défaut surfacique que ce soit pour l'inconel 600 ou le CFRP, avec des temps d'exécution relativement courts. Ajouté à cela, le modèle MEFSI proposé a la capacité d'effectuer la caractérisation des défauts surfaciques, ainsi que l'analyse de fiabilité, en une seule étape et aucune itération supplémentaire n'est nécessaire, contrairement aux codes stochastiques non-intrusifs basés sur les éléments finis.

En perspectives à ces travaux nous pouvons estimer une :

- Etendue de l'étude en 3D pour d'autres types de défauts.
- Considération d'autres types de matériaux composites.
- La prise en compte de la non linéarité.
- Considération d'autres types de variables aléatoires.

Travaux de recherches réalisés :**- Publication :**

Thinhinane MAHMOUDI, Zehor OUDNI, Azouaou BERKACHE, Jinyi LEE, “*Characterization of defects in composite materials by the intrusive stochastic method using the Gaussian type random variable*”doi:10.15199/48.2023.03.44. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 99 NR 3/2023.

- Communications nationales :

Thinhinane MAHMOUDI, Hassane MOHELLEBI, “*Optimisation des performances dynamiques d’une machine linéaire à aimants permanents*”, 5^{ème} colloque sur l’inductique, Oran, 13 et 14 Décembre 2017.

Thinhinane MAHMOUDI, Zehor OUDNI née MOHELLEBI, “*Caractérisation des matériaux composites par la technique non destructive des courants de Foucault*”, école d’été sur les systèmes embarqués de la faculté du génie électrique et informatique 26 juin au 7 juillet 2022

MAHMOUDI Thinhinane, OUDNI Zehor., GABI Yasmine, SZIELASKO Klaus, “*Inspection of defects on a carbon fiber composite material via eddycurrents non-destructive technique*”, The 2th National Conference on Electrical Engineering and its Applications (NCEEA'02) Guelma, Algeria 15 November 2023.

Références

[AB23] Alexis Chézière, Bruno Mazodier, Thinkstock, Terre de Sienne, “lightweight materials and design thermoplastic composites”, Janvier **2023**, <https://www.arkema.com>.

[Afsset10] Agence française de sécurité sanitaire de l’environnement et du travail, “Fabrication et usinage des matériaux composites à base de fibres de carbone- éléments pour l’évaluation des risques sanitaires des travailleurs en France”, 28 mai, **(2010)**.

[Ama07] Aurélie Hug Amalric, “ Etude par mesure de bruit Berkhausen de la microstructure et de l’état de contrainte d’aciers biphasés : application aux aciers pour tôle automobile”, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, **(2007)**.

[Auc11] Jérémie Aucher, “ Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable ”, thèse de doctorat, école doctorale SPMII institut national des sciences appliquées de Rouen, **(2011)**.

[Ba21] Abdoulaye Ba, “Développement d’une plateforme de modélisation multi-physique et multi-échelle des techniques de CND des matériaux composites stratifiés par les techniques des courants de Foucault et de thermographie inductive”, thèse de doctorat, université de Nantes, **(2021)**.

[Baa09] Jens Baaran, EASA-Research Project/2007/3 Final Report,” Visual Inspection of Composite Structures”, Institute of Composite Structures and Adaptive Systems DLR Braunschweig Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Germany. 09 July, **(2009)**.

[Bak86] Baker A., Composite Materials for Aircraft Structure. Virginia : American Institute of Aeronautics and Astronautics **(1986)** .

[BBC] Patrick Bouteille, Bruno Bruez, COFREND, CETIM, “Les essais non destructifs, méthode thermographie ”, COFREND 2017 dernière consultation : **2023**, <https://www.cofrend.com> .

[BBGM19] Louise Le Barbenchon, Jean-Benoît Kopp, Jérémie Girardot, Agnès de Montbrun, Romain Quinton, Philippe Viot, “Influence de fibres courtes sur la microstructure et comportement mécanique d’un liège aggloméré”, Comptes Rendus des JNC 21 – Bordeaux INP – 1 - 3 juillet, **(2019)**.

[Ben09] Samir Bensaid, “Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes”, thèse de doctorat université de Nantes, **(2009)**.

[BIWM02] Richard H. Bossi Frank A. Iddings George C. Wheeler Patrick O. Moore “*Nondestructive Testing Handbook, third edition: Volume 4, Radiographic Testing*”. American society for nondestructive testing, INC. All rights reserved, **(2002)**.

[BGFV21] Agnès Bergeret, Guergana Guionova, Richard Donati, Vivien Vassal, Isabel Figueiral, Vianney Forest, Laurent Bruxelles, Frédéric Chandevau, Yves Manniez, Isabelle Commandré, Bernard Gratuzet Frédéric Raynaud, “ l’habitat et les sépultures du haut moyens

âge (VI^e -IX^e siècle) de soulages (Saint-Maurice-Navacelles, Hérault). Article en Archéologie Médiévale, January, **(2021)**.

[Bal14] Jefri Samuel BALE, “The damage observation of composite using non-destructive testing (NDT) method”, thèse de doctorat Université Paris Ouest Nanterre La Défense. **(2014)**

[BenH19] Mohamed Amine Ben Henni, “ Contribution à l’étude de la vibration des plaques en matériaux composites sous chargements mécanique et thermomécanique”, thèse de doctorat université Ibn Khaldoun de Tiaret, université de Reims champagne Ardenne, **(2019)**.

[Ber08] Marc Berveiller, “Eléments finis stochastiques : approches intrusive et non intrusive pour des analyses de fiabilité”, thèse de doctorat université BLAISE PASCAL - Clermont II, **(2005)**.

[Berk19] Azouaou Berkache « Développement de méthodes de réduction de systèmes et application au calcul électromagnétique stochastique » thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, **(2019)**.

[Bert99] Jean-Marie Berthelot, “*Composite materials mechanical behavior and structural analysis*” translated by J.Michael Cole, mechanical engineering series Frederick.F Ling serie editor. 1999 Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Originally published by Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, **(1999)**.

[Bert12] Jean-Marie Berthelot, “*Matériaux composites 5eme édition : Mécanique et analyse des Structures Composites*” ISMANS.Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés.5^e édition 2012 Lavoisier Paris, ISBN : 978-2-7430-1450-6 **(2012)**.

[Bir97] A.

Birolini, “*Quality and reliability of technical systems: theory, practice, management*”, second edition , Springer, ISBN-13: 978-3-1>42-97985-9, DOI: 10.1007/978-3-64"-97983-5 **(1997)**.

[BL07] Philippe Barbé, Michel Ledoux, “*Probabilité*” collection dirigée par Daniel Guin. EDP SCIENCES, **(2007)**.

[BLWP22] Development of an Eddy Current Test Configuration for Welded Carbon Steel Pipes under the Change in Physical Properties, Appl.Sci. 12, 93, **(2022)**, doi.org/10.3390 /app12010093

[Bon95] Marc Bonnet, “*Equations intégrales et éléments de frontière Applications en mécanique des solides et des fluides*” CNRS Editions / Eyrolles Octobre, **(1995)**.

[BSADK00] Bruno Sudret, Armen Der Kiureghian, “Stochastic finite element methods and reliability, a state-of-the-art report ” a report on research supported by électricité de France under Award Number D56395-T6L29-RNE861, report No.UCB/SEMM-2000/08, structural engineering, mechanics and materials department of civil & environmental engineering , university of California, Berkeley, **(2000)**.

[Bui14] Huu Kien Bui, “Contribution à la modélisation multiphysique des matériaux composites stratifiés Application au CND thermo-inductif”, thèse de doctorat, Université de Nantes Angers Le Mans, (2014).

[BZVB96] J.-C. Bour, E. Zubiri, P. Vasseur, A. Billat, “Étude de la répartition des courants de Foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructif ” Journal de Physique III, 1996, 6 (1), pp.7-22. ff10.1051/jp3:1996112ff. Ffjpa-00249448f, (1996).

[Car19] Yann Carpier, “Contribution à l’analyse multi-échelles et multi-physiques du comportement mécanique de matériaux composites à matrice thermoplastique sous températures critiques” thèse de doctorat à l’INSA Rouen, (2019).

[Carma14] C.A.R.M.A, Centre d’animation régional en matériaux avancés “glossaire des matériaux composites”, Décembre (2004).

[Cher07] Ahmed Cheriet, “contribution à la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques ”, Thèse de doctorat université Mohamed Kheider Biskra, (2007).

[Cho09] Yahya 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 11, (2009).

[Cle08] Alexandre Clement, “Éléments finis stochastiques étendus pour le calcul de structures à géométrie aléatoire : application à la prise en compte de la corrosion de structures en région littorale”, thèse de doctorat université de Nantes France, (2008).

[CW22] CW Composite Word; December 2022 / Vol 8 N° 12, (2022).

[CW22] Da Silva JRC R. A., BeckA. T., Da RosaE., Solution of the stochastic beam bending problem by Galerkin Method and the Askey-Wiener scheme, Latin American Journal of Solids and Structures, 6, pp 51 - 72 (2009).

[DD68] C. V. Dodd, W. E. Deeds, “Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems” journal of applied physics volume 39, number 6 MAY, (1968).

[Del16] Benjamin Delabre, “Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique ” thèse de doctorat PARIS-SACLAY, (2016).

[DF96] J. Dumont- Fillon, “*Contrôle non destructif (CND)*” Techniques de l’Ingénieur, Traité Mesure et Contrôle, (1996).

[DG11] Federica Daghia, Lionel Gendre, “quelques procédés de mise en forme des composites”, support de cours, université Paris-Saclay, (2011).

[DTL12] Gouri Dhatt, Gilbert Touzot, Emmanuel Lefrançois, “Finite Element Method” *Series Editor Piotr Breitkopf*. First published in Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. ISTE Ltd, (2012).

[E. MJ22] E&MJ, engineering and mining journal June 2022 vol 223 number 6. (2022).

[EKU22] Efremov A., Karpenko O., and Udpa L. “Generalized multifrequency fusion algorithm for defect detection in eddy current inspection data”, *NDT and E International* PII:S0963-8695(22)00053-6,JNDT102654 doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102654, (2022) .

[Fer02] Jonathan Ferreira, “Cours de Magnétostatique”, Université Joseph Fourier DEUG Sma – SP2-2 Année universitaire, (2001-2002).

[FPBF21] Sakineh Fotouhi, Farzad Pashmforoush, Mahdi Bodaghi, Mohamad Fotouhi, “Autonomous damage recognition in visual inspection of laminated composite structures using deep learning”. Elsevier Ltd, (2021).

[FTC23] Focus Technology Co.Ltd, Made-in-China.com, “(a): Lucobit 1400hn Ethylene Butyl Acrylate Copolymer Eba Plastic Raw Material Resin” , “(b) Liquid Epoxy Vinyl Ester Resin for Chemical Anti-Corrosion Equipment”, <https://www.made-in-china.com/> (2023).

[FTC123] Focus Technology Co.Ltd, Made-in-China.com, “Disque de frein léger pour camion composite en acier Wg4005443003”, <https://www.made-in-china.com/> (2023).

[FTC223] Focus Technology Co.Ltd, Made-in-China.com, “(a): Fiberglass Products Fiberglass Chopped Strands/Glass Fiber”, “(b): 200g Drone Carbon Fiber Unidirectional Carbon Fiber Fabric-for-Uav-Unmanned-Aerial-Vehicle”, “(c):Prepreg-carbon-fiber-fabric” <https://www.made-in-china.com/>, (dernière consultation:(2023).

[Gab12] Yasmine Gabi, “Modélisation FEM du système de contrôle non destructif 3MA en ligne de production des aciers dual phase” Thèse de doctorat université de Grenoble, (2012).

[GAO20] Fiche B3-4 Guide Auscultation Ouvrage Art Cahier Interactif Ifsttar, “Méthodes d’auscultation du matériau en place acier contrôle par magnétoscopie”. Les collections de l’Ifsttar : institut français des sciences et technologies des transports, de l’aménagement et des réseaux Mai, (2020).

[GB23] Gilles Bertrand, utopikphoto, Baikowski, “cmc ceramic matrix composite”. www.baikowski.com Janvier (2023).

[GC16] Gilles Corneloup, Cécile Gueudré, “le contrôle non destructif et la contrôlabilité des matériaux et des structures”, 978-2-88915-002-1. fihal-01430272f, (2016).

[Gen11] Lionel Gendre, “ les grandes familles de matériaux composites ”, support de cours, université Paris-Saclay, (2011).

[Geo20] Dr. Marc GEORGES, “Holographic Interferometry: From History to Modern Applications” *Optical Holography-Materials, Theory and Applications*. doi.or/10.1016/B978-0-12-815467-0.00006-2 Elsevier Inc, (2020).

[Geor17] Dr. Marc Georges, “cours contrôle non destructif champ complet Techniques et Applications”. Centre Spatial de Liège – Université de Liège CMOI-FLUVISU 2017, Le Mans, 20 Mars, (2017).

[GHO16] S. Gholizadeh “A review of non-destructive testing methods of composite materials”. XV Portuguese Conference on Fracture, PCF, Paço de Arcos, Portugal, (2016).

[GHT03] Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai, “*Composite Materials design and application*”, Translation of: Matériaux composites. 4th ed. by CRC Press LLC (2003).

[Gg17] Ginger Gardiner “Automating NDT for CFRP aerostructures”. <https://www.compositesworld.com/>. 1/23/2017. (2023).

[G. Peix80] Gilles Peix, “*contrôles non destructifs, mise en place d’un accélérateur linéaire pour le contrôle d’un fond moulé*” INSA de Lyon, (1980).

[Gra18] Nathan Grange, “*Étude du comportement au feu de matériaux composites destinés à des applications aéronautiques : expériences et Modélisations*”, thèse de doctorat institut national des sciences appliquées centre Val De Loire, (2018).

[GS91] Roger G.Ghanem, Pol D.Spano, “*Stochastic finite elements a spectral approach*” revised edition, springer verlag New York INC, (1991).

[GTLsMDVJLD13] M. Georges, C. Thizy, J. Lewandowski, L. Scheed, L. Mouret, R. Dubé, P. Venegas, I. Jorge, I. Lopez, Ph. Demy, “*Comparaison de techniques CND émergentes sur des pièces aéronautiques en matériaux composites*”, Mesures et Techniques Optiques pour l’Industrie – Orléans. Session 15 : Caractérisation des Matériaux et Applications 1, (2013).

[Ham18] HAMEL Meziane, “*Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive*”. Thèse de doctorat LMD. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, (2018).

[NHam07] Nahiène Hamila “*Simulation de la mise en forme des renforts composites mono et multi plis*”, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, (2007).

[HFL16] 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*” ACES JOURNAL, Vol. 31, No. 2, February 2016, <https://www.researchgate.net/publication/301224946>.

[Hen04] Thomas Henneron, “*Contribution à la prise en compte des Grandeurs Globales dans les Problèmes d’Electromagnétisme résolu avec la Méthode des Eléments Finis.*”, thèse de doctorat. Université de Lille 1, (2004).

[Iaea00] IAEA-TECDOC-628 ,“*Liquid Penetrant and Magnetic Particle Testing at Level 2*”, Manual for the Syllabi Contained, "Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques". International atomic energy agency, (2000).

[IAM12] Non-destructive inspection and structural health monitoring of aerospace materials. *Introduction to Aerospace Materials*, 534–557. doi:10.1533/9780857095152.534, (2012).

[Idr13] Moustapha Idriss, “Analyse expérimentale et par éléments finis du comportement statique et vibratoires des matériaux composites sandwichs sains et endommagés”, thèse de doctorat université du Maine, (2013).

[Kar13] Mayssa Karray, “Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques des matériaux composites par méthode holographique numérique 3D et analyse diélectrique”, thèse de doctorat université Maine-Académie de Nantes (2013).

[KFEL18] Khebbab M. ,Feliachi M.,El Hadi Latreche M., “Application of finite elements heterogeneous multi-scale method to eddy currents non-destructive testing of carbon composites material”, Eur. Phys. J. Appl. Phys.80, (2018).

[Khe16] Mohamed Khebbab, “Contribution à l’étude du CND par Courants de Foucault de matériaux hétérogènes faiblement conducteurs à base d’éléments finis”, thèse de doctorat université de Constantine, (2016).

[KJLKK18] Hyun Su Kim, Ji-un-Jang, Hyeseong Lee, Seong Yun Kim, * Seong Hun Kim, * Jaewoo Kim, Yong Chae Jung, and Beom Joo Yang, “Thermal management in polymer composites: a review of physical and structural parameters”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2018).

[KM13] Sanjay Kumar & Dalgobind Mahto, “Recent Trends in Industrial and Other Engineering Applications of Non-Destructive Testing: A Review”, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 9, September. ISSN 2229-5518 (2013)

[KMCSK20] A. M. Kokurov, D. S. Malushin, B. A. Chichigin, D. E. Subbotin A. O. Kusnetsov, “Defect Characterization in Layered Composites using a Pulsed Eddy-Current Technique”, ISSN 1063-7850, Technical Physics Letters, 2020, Vol. 46, No. 11, pp. 1116–1119, published in Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, 2020, Vol. 46 (2020).

[KWL21] Pratik Koirala, Nekoda van de Werken, Hongbing Lu c, Ray H. Baughman, Raquel Ovalle-Robles, Mehran Tehrani, “Using ultra-thin interlaminar carbon nanotube sheets to enhance the mechanical and electrical properties of carbon fiber reinforced polymer composites”, 1359-8368/2021 Elsevier Ltd, (2021).

[Lah20] Ahmed Chaouki Lahrech, “Contribution à l’étude de l’E-CND par courants de Foucault de matériaux composites à fibres de carbone”, thèse de doctorat université de Batna 2, (2020).

[Lau20] Tobias Laux, “Experimental and computational characterisation of composite laminates subjected to multiaxial loading”, thèse de doctorat université de Southampton, (2020).

[LCL98] *Lincoln County Leader* (Toledo, OR), Image 6 “The tragic steamer Sultana March 25, 1898. Chronicling America: Historic American Newspapers. <https://guides.loc.gov/chronicling-america-sinking-sultana>. (2023)

[Led09] Yohann Ledru, “Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques”, thèse de doctorat université de Toulouse, (2009).

[LeDi08] Yohan Le Diraison, “Imagerie à courants de Foucault pour l'évaluation non-destructive de structures rivetées aéronautiques“, thèse de doctorat de l'école Normale supérieure de Cachan, (2008).

[LBWHH21] LeeJ., BerkacheA., WangD. and Hwang Y-Ha., Three-Dimensional Imaging of Metallic Grain by Stacking the Microscopic Images, Appl. Sci.,11,7787. doi.org/10.3390/app11177787 (2021).

[Lel12] Alban LELEUX, “ Contrôle non destructif de composites par ondes ultrasonores guidées, générées et détectées par multiélément ”, thèse de doctorat université de Bordeaux 1, (2012).

[Li12] Yue LI, “Modélisation des phénomènes électromagnétiques caractérisant des structures composites complexes”, thèse de doctorat université de Nantes Angers Le Mans, (2012).

[Lib71] Hugo L. Libby, “Introduction to Electromagnetic non-destructive test methods” library of Congress , by John Wiley & sons , inc, (1971).

[Lin13] Yueguo Lin, “Comportement thermoélectrique de matériaux composites pour applications aéronautiques ”, thèse de doctorat de l'école nationale supérieure de mécanique et aéronautique France, (2013).

[Loe77] Loeve M., “ Probability Theory I”, forth edition, Springer-Verlag Inc, 45 DOI 10.1007/978-1-4684-9464-8, (1977).

[LRS23] Elena Lysenko, Alexander Rogachev, Oldrich Starý, “Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science”. Springer Nature Switzerland AG, (2023).

[Mar10] Lionel Marcin, “Modélisation du comportement, de l'endommagement, et de la rupture de matériaux composites à renforts tissés pour le dimensionnement robuste de structures ”, (thèse de doctorat université de Bordeaux, (2010).

[MB11] Hassane Mohellebi, Ferroudja Bouali, “Etude de la variation des paramètres géométriques d'un dispositif CND en régime pulsé”, Colloque National sur l'Inductique : Application de l'Induction Electromagnétique, CNI'2-2011, Université A. MIRA – Béjaïa, le 03 et le 04 Mai, (2011).

[MBHL20] Tu Le Manh, Jose Alberto Perez Benitez, Jose Hiram Espina Hernandez, Jose Manuel Hallen Lopez, “Barkhausen Noise for Nondestructive Testing and Materials Characterization in Low-Carbon Steels” Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials Elsevier Ltd, (2020).

[Men09] Hocine Menana, “Modélisation 3D simplifiée pour l'évaluation non destructive des matériaux composites anisotropes”, thèse de doctorat université de Nantes, (2009).

[Meo20] Carosena Meola, “Nondestructive Testing in Composite Materials”, Appl. Sci, 10, 5123; doi:10.3390/app10155123, (2020).

[Mil02] Graeme W. Milton, “*The theory of composites*”, Cambridge monographs on applied and computational mathematics, published by the press syndicate of the university of Cambridge, the pit building, Trumpington street, Cambridge, United Kingdom, (2002).

[Mik14] Alexander G. Mikerov, “From history of Electrical Engineering III: Electromagnetism Discovery and its Fundamental Laws in the First Half of 19-th Century”, Conference Paper · DOI: 10.1109/EIConRusNW.2014.6839186 February, (2014).

[Mix05] Paul E. Mix, “*Introduction to non-destructive testing a Training Guide Second Edition*”. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. Printed in the United States of America, (2005).

[MTSM16] Mizutani Y., Todoroki A., Suzuki Y., Mizukami K., "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, no. 1359-8368, pp. 84-94 (2016).

[MMKSTSN16] Mizukami, K., Mizutani, Y., Kimura, K., Sato, A., Todoroki, A., Suzuki, Y., & Nakamura, Y. “Visualization and size estimation of fiber waviness in multidirectional CFRP laminates using eddy current imaging”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 261–270. doi:10.1016/j.compositesa. 2016.07.008, (2016).

[Mou18] Abdelaziz Mouahid , “Infrared thermography used for composite materials”, published by EDP Sciences. MATEC Web of Conferences 191,00011mateconf /201819100011, (2018).

[MLK01] Mook G., Lange R. and Koeser O., ‘Non-destructive characterization of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy currents’, *Composites Science and Technology* 61, 865–873, (2001).

[NFZKMS20] M. Neslusan, J. Füzér, O. Zivotský, P. Kollar, P. Minarik, M. Streckova, R. Bures, M. Faberova, “Barkhausen noise emission in Fe-resin soft magnetic composites”. Elsevier B.V. All rights reserved, (2020).

[Nij15] R.P.L.Nijssen, “*Composite materials an introduction*”, 1st English edition, based on 3rd Dutch edition , in halland university of applied sciences (2015).

[Nuc23] “*Solution END Courants de Foucault* ”, Nucleom entreprise spécialiste en inspection par essais non-destructifs (END)/ Contrôle non destructif (CND) et l’intégration des systèmes, (s.d), <https://nucleom.ca/solutions-end/courant-de-foucault/> dernière consultation : (2023)

[NZ02] V.A.B. Narayanan, N. Zabarar, “Uncertainty propagation in analysis and inverse-design of heat conduction process using a spectral stochastic finite element approach”, *Int. J. Num. Meth. Engng*, (2002).

[OFM14] Zehor Oudni, Mouloud Feliachi, Hassane Mohellebi, “Assessment of the probability of failure for EC nondestructive testing based on intrusive spectral stochastic finite element method”. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* (2014) 66: 30904 DOI: 10.1051/epjap/2014130494 (2014).

[Omx] “Courant de Foucault-Foucault multiéléments (Array-eta) Omniscan MX avec module ECA/ECT”, Centre de métallurgie du Québec <https://cmqtr.qc.ca/equipments/courant-de-foucault-foucault-multielements-array-eta/> dernière consultation: **(2023)**

[Oud14] Oudni Zehor, “L’étude de la Fiabilité de Fonctionnement de Structures Electromagnétiques liée à la Dégradation des Propriétés Physiques”. Thèse de doctorat en science. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, **(2014)**.

[OBJ22] Zehor OUDNI, Azouaou BERKACHE, Jinyi LEE, Dehbia OUAMARA, “Characterisation of defects in conductive materials by the intrusive stochastic method using the random variable Lognormal” *Przeegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R.98 NR 3/2022. doi :10.15199/48.2022.03.16

[Pai12] Alkis Paipetis, “Composite materials: mechanical behaviour & testing”, Summer school in advanced composite materials IIMEC, technological education institute of serres, Greece, July 2-6, **(2012)**.

[PB21] Patrick Bouvet, “Le contrôle des pièces par tomographie aux rayons X ”. <https://metalblog.ctif.com>. 3 mai 2021. **(2021)**

[PD92] Placko D., Dufour I., “Eddy Current Sensors for Nondestructive Inspection of Graphite Composite Materials”, In the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Texas, USA, **(1992)**.

[PG92] PraneshS., Ghosh D, “A *FETI-DP* based parallel hybrid stochastic finite element method for large stochastic systems , *Computers and Structures*”, Vol. 195, No. CA, **(2018)**.

[PLCB15] Pantelides Chris P., Lawrence D., Clayton R., Burningham A., "Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods," *Composite Structures*, Vol.1, pp. 256–265, **(2015)**.

[PLT21] Prabhu-TL, “*Non-destructive testing a comprehensive guide to NDT*”, Copyright Prabhu TL. All rights reserved. Publisher - Nestfame Creations Pvt. Ltd, **(2021)**.

[Por00] Jérôme Pora, “Composite Materials in the Airbus A380- From History to Future –”, Society of Manufacturing Engineers, Airbus, Large Aircraft Division 1 Rond Point Maurice Bellonte 31707 Blagnac Cedex, France, **(2000)**.

[PP13] Philippe Passebon, “L’A350 XWB, premier Airbus avec plus de 50% de composites”. <https://www.usinenouvelle.com>. 15 mars 2013. Janvier **(2023)**

[PW13] Pratap S. B., and. Weldon W. F, “Eddy Current in Anisotropic Composites Applied to Pulsed Machinery”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 2, pp. 437-444T, **(1996)**.

[Rac15] Grzegorz Racki, “Catastrophism and neocatastrophism versus cosmic hazard: Ager versus Alvarez; Cuvier versus Laplace”, DOI:10.2110/palo.2015.003, **(2015)**.

- [Rav08] Cyril Ravat, “Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif” thèse doctorat en sciences université Paris Sud, (2008).
- [RG99] Roger Ghanem, “Ingredients for a general purpose stochastic finite elements implementation”, *Comput, method appl, mech engrg.*198 (1999) 19-34, the Johns Hopkins university, Baltimore, MD 21218 USA, 0045-7825/99/ Elsevier science S.A, PII: S0045-7825 (98) 00106-6, (1999).
- [RG99b] Roger Ghanem, “Stochastic finite elements with multiple random non-gaussian properties”, *journal of engineering mechanics/* January 1999, (1999).
- [RLS17] Angélique Raude, Hugo Lemieux, Michael Sirois, “Courants de Foucault Multiéléments : Une alternative aux méthodes conventionnelles de contrôle non destructif de surface” Journées COFREND, (2017).
- [Rou09] Bastien Roucaries, “Contributions au contrôle non destructif des composites carbonés”, thèse doctorat en sciences université de Toulouse, (2009).
- [RPKP19] Dipen Kumar Rajaka, Durgesh D. Pagarb, Ravinder Kumarc, Catalin I. Pruncu, “Recent progress of reinforcement materials: a Comprehensive overview of composite materials”, *jmaterrestech.*;8(6):6354–6374, (2019).
- [Sato15] Satoru Abida, “Contrôle non-destructif, par la technique ultrasonore, des matériaux composites”, thèse de doctorat université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, (2015).
- [Sen17] Fiacre Djonkone Senghor, “Identification des propriétés anisotrope des matériaux complexes : application aux matériaux composites stratifiés”, thèse de doctorat université de Bretagne Loire, (2017).
- [Shu01] Peter J. Shull, “*Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Applications*” Marcel Dekker, Inc, New York. Basel by Marcel Dekker, Inc. All Rights Reserved, (2001).
- [SP17] John Steeves, Sergio Pellegrino, “Post-cure shape errors of ultra-thin symmetric CFRP laminates: Effect of ply-level imperfections”, Elsevier Ltd, (2017).
- [Sto20] Constantin M. Stochioiu, “ Contribution à l’étude du comportement visco-élastoplastique d’un composite structural lin/époxy”, thèse de doctorat université de Bourgogne Franche-Comté, (2020).
- [Suq03] Charles Suquet, support de cours “Introduction au Calcul des Probabilités”, Université des Sciences et Technologies de Lille, (2003).
- [TAG21] Nan Tao, Andrei G. Anisimov, Roger M. Groves, “Shearography non-destructive testing of thick GFRP laminates: Numerical and experimental study on defect detection with thermal loading” The Author(s). Published by Elsevier Ltd, (2021).
- [Tho10] Vincent Thomas, “Système multi-capteurs et traitement des signaux associés pour l’imagerie par courants de Foucault de Pièces aéronautiques” thèse doctorat université de Cachan, (2010).

- [THFM TTTSHOM94] Takagi T., Hashimoto M., Fukutomi H., Miya K., Tsuboi H., Tanaka M., Tani J., Serizawa T., Harada Y., Okano E. and Murakami R., Benchmark models of eddy current testing for steam generator tube: Experiment and numerical analysis, *Intern. J. Applied Electromagn. Mater.* 5, (1994).
- [TMOUDZ23] Thinhinane MAHMOUDI, Zehor OUDNI, Azouaou BERKACHE, Jinyi LEE, ‘‘Characterization of defects in composite materials by the intrusive stochastic method using the Gaussian type random Variable’’ testing’’ *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 99 NR 3/2023.doi:10.15199/48.2023.03.44. (2023)
- [Tob16] William Tobin, ‘‘EVOLUTION OF THE FOUCAULT-SECRETAN REFLECTING TELESCOPE’’, *Journal of Astronomical History and Heritage*, 19(2), 106–184, (2016).
- [TMSB06] José Ricardo Tarpani, Marcelo Tadeu Milan, Dirceu Spinelli, Waldek Wladimir ‘‘, Mechanical performance of Carbon-epoxy laminates part I: Quasi-static and impact bending properties’’, *Materials Research*, Vol. 9, No. 2, 115-120, (2006).
- [TP21] Sébastien Tordeux et Victor Péron, cours ‘‘Analyse numérique La méthode des différences finies’’, université DE PAU France, (2020/2021).
- [TVS12] Ramesh Talreja, Chandra Veer Singh, ‘‘Damage and Failure of Composite Materials’’, First published Printed in the United Kingdom at the University Press, Cambridge, (2012).
- [VD10] Vioux Daniel, <https://www.lavionnaire.fr/>, copyright 2010-2023. Janvier (2023)
- [Was11] Guillaume Wasselynck, ‘‘Etude des interactions entre les ondes électromagnétiques de fréquences moyennes et les matériaux composites. Application à l’assemblage par induction de ces matériaux’’ thèse de doctorat université de Nantes, (2011).
- [Win23] Windels M., Carbon fiber reinforced composites (Sirris), Retrieved from www.pluscomposites.eu (2023).
- [WZLFM20] Bing Wang, Shuncong Zhong, Tung-Lik Lee, Kevin S Fancey and Jiawei Mi, ‘‘Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review’’. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12(4) 1–28, (2020).
- [XH09] Xiaosong Huang., ‘‘Fabrication and Properties of Carbon Fibers,’’ *Materials*, Vol. 2, pp. 2369-2403, (2009).
- [XK02] D.Xin , G.E.Karniadakis, ‘‘The Wiener-Askey polynomial chaos for stochastic differential equations’’. *J. Sci. Comput.*, 24(2) :619–644, (2002).
- [XQin21] Xiaowen Qin, ‘‘Modeling study of pyrolysis of composite materials: Application to wood and carbone/Epoxy composite’’, these de doctorat de l’école nationale supérieure de mécanique et d’aéronautique, France, (2021).
- [YH16] Ruizhen Yang, Yunze He, ‘‘Optically and Non-optically Excited Thermography for Composites: A Review’’. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2015.12.026>: INFPHY 1934 To appear in: *Infrared Physics & Technology*, (2016).

[Zao08] Abdelhalim Zaoui, “ Contribution à la modélisation du CND par matrice de capteurs à courants de Foucault”, thèse de doctorat université de Nantes (France), Ecole militaire polytechnique Alger (Algérie), (2008)

[Zem19] Lilia Zemni, “ Étude de la mise en œuvre de composites thermostables cyanate-ester pour pièces structurales aéronautiques tièdes ”, thèse de doctorat université de Toulouse, (2019).

[ZPR20] T. Zehnder, V. Patel et T.J. Rose, “Micro-CT Imaging of Fibers in Composite Laminates under High Strain Bending” The Society for Experimental Mechanics, Inc (2020).