

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Numéro de série:

Numéro d'inscription: D.ELT/3C/04/14

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3^{ème} Cycle en Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

THEME

CONTRIBUTIONS A LA MODELISATION ET A LA CONCEPTION
D'UN BANC D'ESSAI D'EVALUATION NON DESTRUCTIVE PAR
COURANTS DE FOUCAULT DES MATERIAUX COMPOSITES
ANISOTROPES

Présenté Par

Omar Adib SAFER

Soutenue le :

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BARKAT Said	Professeur	Univ. de M'sila	Président
BENSAID Samir	Professeur	Univ. de Bouira	Encadreur
CHERIET Ahmed	Professeur	Univ. de M'sila	Examineur
GHEMARI Zine	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
ABDOU Abdelhak	MCB	Univ. de M'sila	Invité

Année Universitaire : 2019/2020

*A mes parents,
et à toute ma famille*

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire des Matériaux et du Développement Durable (LM2D) de l'Université Akli Mohand Oulhadj de BOUIRA et du Laboratoire de Génie Electrique (LGE) de l'Université Mohamed BOUDIAF de M'SILA.

Tout d'abord j'exprime ma sincère gratitude à mon directeur de thèse Le Professeur BENSAID Samir pour tous les moments qu'il m'a consacré afin de réaliser les travaux présentés dans cette thèse, je le remercie vivement pour ses hautes qualités scientifiques et humaines, pour sa patience et pour ses conseils constructifs.

Je tiens également à adresser mes remerciements au Professeur BARKAT Said, pour avoir accepté de siéger dans mon jury et de l'avoir présidé.

Je remercie très vivement le Professeur CHERIET Ahmed de l'université Mohamed Khider de Biskra, et le Docteur GHEMARI Zine de l'université de M'sila pour l'honneur qu'ils m'ont fait de juger ce modeste travail. Je remercie également le Docteur ABDYOU Abdelhak d'avoir accepté l'invitation à participer dans le jury de cette thèse.

Je remercie très vivement le Professeur DIDIER Trichet et le professeur GUILLAUM Wasselynck de l'institut de recherche en énergie électrique de Nantes Atlantique (IREENA) pour leurs conseils et aides durant les travaux de thèse.

Je remercie vivement Mr. DERRI Massoud pour qui m'a accueilli dans son atelier de bobinage dans le cadre de ma thèse.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans mentionner, tous mes amis et collègues qui m'ont aidé de près ou de loin à achever ce travail de thèse, de l'Université de M'sila, l'Agence Spatial Algérienne, le Centre de Développement des Satellites et les Centres d'Exploitation des Systèmes de Télécommunications de Boughazoul et Bouchaoui.

TABLE DES MATIERES

Listes des Figures	4
Liste des Tableaux.....	7
Liste des abréviations	7
Liste des symboles	7
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Matériaux Composites et Evaluation Electrique Non Destructive	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 Classement des matériaux composites.....	6
I.3 Constitution d'un matériau composite.....	7
I.3.1 La matrice.....	7
I.3.2 Le renfort.....	8
I.3.2.1 Fibres à structure aléatoire	9
I.3.2.2 Fibres à structure Orientées:.....	10
I.4 Architectures des composites à structure plan	12
I.4.1 Les monocouches ou mono-pli	13
I.4.2 Les stratifiées.....	13
I.5 Composites Renforcés en Fibres (CRF) en forme cylindrique.....	14
I.5.1 Applications en génie civil.....	14
I.5.2 Comparaison entre les barres en CRF et les barres en acier	15
I.6 Cycle de vie des matériaux composites	16
I.6.1 Fabrication des matériaux composites	17
I.6.2 Le recyclage	19
I.7. Défaillances dans les structures en matériaux CRFC	20
I.8 Contrôle et évaluation des matériaux composites :.....	22
I.8.1 Paramètres influents sur la résistivité électrique des matériaux CRFC	22
I.8.1.1 Les constituants de base :	22
I.8.1.2 Type et architecture du renfort :	23
I.8.2 Méthodes d'évaluation de la résistivité électrique:.....	24
I.8.2.1 Méthodes multi-échelles :	25
I.8.2.2 Méthodes expérimentales	25
I.9 Conclusion	30
Chapitre II : Modélisation et Formulation Mathématiques d'END-CF.....	32
II.1 Introduction :	33
II.2 Modélisation électromagnétique.....	33
II.2.1 Equations de Maxwell.....	34
II.2.2 Lois constitutives des matériaux	34
II.2.3 Conditions de passage.....	35
II.2.3 Hypothèses simplificatrices	35
II.3 Formulation magnétodynamique (régime variable)	37
II.3.1 Formulation en champ magnétique H	37
II.3.2 Formulation en champ électrique E [10]	37

II.3.3 Formulation en potentiel vecteur électrique ($T-\phi$).....	38
II.3.4 Formulation en potentiel scalaire magnétique $H-\varphi$ et $H-\varphi_r$	38
II.3.5 Formulation en potentiel vecteur magnétique $A-V$	39
II.4 Résolution numérique des EDPs	43
II.4.1 Formulation éléments finis 2D [50].....	43
II.4.1.1 Discrétisation du domaine 2D.....	43
II.4.1.2 Fonction d'interpolation.....	44
II.4.1.3 Fonction d'approximation sur l'élément.....	44
II.4.1.4 Fonction d'interpolation sur le domaine	44
II.5 Problème inverse et optimisation:	45
II.6 Conclusion	48
Chapitre III: Conception des sondes d'END-CF dédiées à l'évaluation de la résistivité électrique des CRFC.....	49
III.1 Introduction:	50
III.2 Modèle de la bobine à air:	50
III.2 Fréquence de résonance:	51
III.3 Comportements électromagnétique des conducteurs	52
III.3.1 Effet de peau	52
III.3.2 Effet de proximité.....	54
III.4 Formules de calcul des capacités parasites dans les bobines	55
III.4.1 Formule de Medhurst [94].....	55
III.4.2 Formule de Palermo [70].....	56
III.4.3 Formule GMRK [66].....	56
III.5 Modèle des bobines à air sans et avec effet capacitif.....	57
III.5.1 Modèle d'une bobine à air sans effet capacitif.....	57
III.5.2 Modèle d'une bobine à air avec effet capacitif.....	58
III.5.2.1 Bobine monocouche	58
III.5.2.2 Bobine multicouche	60
III.6 Influence de la géométrie de la bobine sur l'effet capacitif:.....	61
III.6 Approche d'évaluation des condensateurs entre spires	66
III.7 Modèle simplifié d'une bobine à air avec effet capacitif.....	67
III.8 Conclusion.....	69
Chapitre IV : Banc Expérimental - Résultats et confrontation.....	70
IV.1 Introduction.....	71
IV.2 Identification de la résistivité d'une tige CFRC:	71
IV.2.1 Présentation de la méthode:.....	72
IV.2.2 Application de la méthode du problème inverse:.....	72
IV.3 Calcul de la résistance: résolution du système direct.....	73
IV.3.1 Comportement électromagnétique 3D des tiges CFRC-UD	73
IV.3.1.1 Analyse qualitative	74
IV.3.1.2 Analyse quantitative	76
IV.3.2 Validation numérique de modèle 2D axisymétrique-EF par le modèle 3D-EF:	77
IV.5.3 Mesure de la résistance.....	80
IV.4 Résultats d'évaluation de la résistivité ortho-radiale.....	81
IV.5 Conclusion	83

Table des Matières

Conclusion générale	86
Perspectives:	88
Annexes	89
Références bibliographiques	109
Résumé	116
Listes des Travaux	117

Listes des Figures

Figure 1 Evolution du marché mondial en matériaux composites à base de fibres de carbone (11/2018) [1].	1
Figure 2 Demande mondiale en matériaux composites à base de fibres de carbone en 2018 [1].	1
Figure I. 1 Matériau composite (a) coupure transversale, (b) coupure longitudinale.	7
Figure I. 2 Classification des matrices dans les matériaux composites.	8
Figure I. 3 Renfort des matériaux composites.	8
Figure I. 4 Composites à fibres aléatoire : à gauche : structure plate - à droite : structure cylindrique.	9
Figure I. 5 Différents structure des fibres dans les composites tissés [10].	10
Figure I. 6 Composite plate à fibres unidirectionnel [5].	10
Figure I. 7 Classification des fibres dans les matériaux composites	11
Figure I. 8 Architecture d'un composite stratifié [10].	13
Figure I. 9 Drapage d'un composite stratifié selon l'orientation des fibres (a) quasi-isotrope, (b) groupe unidirectionnel [28].	13
Figure I. 10 a) barres d'armature CRFC --- b) tendons en CRFC --- c) tiges en CRFC.	14
Figure I. 11 Renforcement des structures par barres en CRF : a) Tablier de pont, Canada; b) pisciculture entrée en mer, Portugal	14
Figure I. 12 Câbles de suspension : Pont de Stork, Winterthur, Suisse [5].	15
Figure I. 13 Tige composite à renfort unidirectionnelle en fibres de carbone [5].	15
Figure I. 14 Les étapes de fabrication des composites [12].	18
Figure I. 15. Schéma du procédé de moulage par pultrusion	19
Figure I. 16. Défaillances des structures au niveau des matériaux CRFC [10].	20
Figure I. 17. Matériau composite monocouche à fibre de carbone unidirectionnel.	23
Figure I. 18. Stratifié quasi-isotrope.	24
Figure I. 19 Tige à fibres de carbone unidirectionnel avec des propriétés électriques orthotrope.	24
Figure I. 20 Méthode volt-ampérométrie avec deux électrodes.	25
Figure I. 21 Méthode volt-ampérométrie avec quatre électrodes.	26
Figure I. 22 Influence des fibres déchirées et les fibres non connecté sur le passage de courant.	27

Figure I. 23 Principe de la méthode des courants induits.....	28
Figure I. 24 Capteur CF à air encerclant, a) Circulaire [44], b) Rectangulaire [10].	29
Figure I. 25 Capteur CF, a) Ferrite en U [45], b) bobine pancake plate [19], c) bobine circulaire[41].	29
Figure II. 1 réduction de domaine 3D vers le domaine 2D axisymétrique	40
Figure II. 2 Modèle magnétodynamique en coordonnées cartésien.....	41
Figure II. 3 Géométrie du modèle bidimensionnel magnétodynamique en coordonnées cylindriques	42
Figure II. 4 éléments de discrétisation.	43
Figure II. 5 Organigramme de résolution par éléments finis.	45
Figure II. 6 Problème inverse et problème directe [10].	46
Figure II. 7 Comment les fourmis trouvent le chemin le plus court [85].....	48
Figure III. 1 Circuit équivalent d'une bobine dans les fréquences élevées.	50
Figure III. 2 La partie réelle de l'impédance calculée et mesurée en fonction de la fréquence	51
Figure III. 3 Topologies en série et en parallèle d'un circuit RLC.	52
Figure III. 4 Densité du courant J (A/m ²) pour (a) 50kHz, (b) 500kHz et (c) 5MHz.....	53
Figure III. 5 Densité de courant en fonction de la fréquence.	53
Figure III. 6 L'effet de proximité, densité du courant J (A/m ²).	54
Figure III. 7 L'effet de proximité direct, densité du courant J (A/m ²)	55
Figure III. 8 L'effet de proximité inverse, densité du courant J (A/m ²).	55
Figure III. 9 Dimensionnements de la bobine selon le model de Medhurst.....	56
Figure III. 10 Dimensionnements de la bobine selon le model de Palermo.....	56
Figure III. 11 Modèle Magnétodynamique.	57
Figure III. 12 Circuit équivalent de la bobine monocouche dans les fréquences (a) basse et, (b) hautes.....	58
Figure III. 13 Transformation triangle-étoile	59
Figure III. 14 Distribution de la densité de courant dans la bobine (a) pour la fréquence=1kHz, (b) pour la fréquence=1kHz 600kHz.....	59
Figure III. 15 Représentation de la bobine multicouche dans les fréquences, (a) basses fréquences, (b) hautes fréquences.	60
Figure III. 16 La distribution de la densité de courant dans la bobine multicouche, (a) pour une fréquence de 1kHz, (b) pour une fréquence de 600kHz.....	61

Figure III. 17 Bobines réalisées.....	62
Figure III. 18 Géométrie de la bobine.	62
Figure III. 19 Première série (a) La résistance (b) La réactance.	63
Figure III. 20 Deuxième série (a) résistance, (b) réactance.....	63
Figure III. 21 Troisième série (a) résistance, (b) réactance.....	63
Figure III. 22 Capacités parasite entre spires et entre couches	64
Figure III. 23 Influence du diamètre de fil de bobinage sur le phénomène d'auto-résonance .	65
Figure III. 24 Influence du nombre de spires sur le phénomène d'auto résonance	65
Figure III. 25 Identification des condensateurs entre spires par la méthode du problème inverse.	66
Figure III. 26 Circuit équivalent d'une bobine à 3 couches.....	67
Figure III. 27 Résultats de mesure et de calcul d'impédance pour une bobine à 3 couches : (a) Résistance, (b) Réactance.....	68
Figure IV. 1 Composantes de la résistivité électrique des tiges CFRC-UD.	71
Figure IV. 2 Evaluation de la résistance transversale par la bobine.	72
Figure IV. 3 Méthode du problème inverse appliquée à l'évaluation de la résistivité.	73
Figure IV. 4 Schéma synoptique du dispositif d'évaluation non destructif de la résistivité électrique	74
Figure IV. 5 Directions des courants induits dans la tige pour une fréquence de 2 MHz (a) et (b).	75
Figure IV. 6 Puissance induite dans la tige composite en fonction de la résistivité longitudinale.....	76
Figure IV. 7 Variation de la résistance dans la bobine en fonction de la résistivité longitudinale.....	76
Figure IV. 8 Model électromagnétique en régime variable.....	77
Figure IV. 9 Maillage élément fini triangulaire du domaine d'étude.	78
Figure IV. 10 Maillage d'une spire.....	78
Figure IV. 11 Lignes équipotentiel du potentiel vecteur magnétique.	79
Figure IV. 12 Variations de résistance calculées 2D et 3D de la bobine en fonction de la fréquence.	79
Figure IV. 13 Variations de résistance calculées en 2D et en 3D de la bobine de en fonction de la résistivité ortho-radial (0,02-0,1 Ω .m) à une fréquence égale à 2 MHz et $\rho_L = 50 \mu\Omega$.m....	80
Figure IV. 14 LCR-Mètre de précision	81

Figure IV. 15 Interface graphique de LCR-mètre. 81
Figure IV. 16 La variation de la résistance de la sonde CF à vide et en charge en fonction de la fréquence. 82
Figure IV. 18 Variation de résistance calculée en 2D de la bobine de solénoïde et de celle mesurée en fonction de la fréquence pour la résistivité identifiée de la tige composite. 83

Listes des Tableaux

Table I. 1 Comparaison des caractéristiques mécaniques des barres en CRF et des barres en acier [31]. 16

Table III. 1 Paramètres géométrique d'une bobine à une seule couche. 58
Table III. 2 Paramètres géométrique d'une bobine à 4 couches. 60
Table III. 3 Paramètres géométrique des bobines. 62

Table IV. 1 Dimensionnements du problème..... 74

Liste des abréviations

END-CF	Evaluation Non Destructive par Courants de Foucault.
CND-CF	Contrôle Non Destructive par Courants de Foucault.
CRFC	Composite Renforcé en Fibre de Carbone.
CRF	Composite Renforcé en Fibres.
PRF	Polymère Renforcé en Fibres
UD	Unidirectionnel.
EDP	Equation aux Dérivé Partielle.
PI	Problème Inverse.
RTM	Resin Transfer Moulding
GMRK	Grandi, Kazimierczuk, Massarini et Reggiani

Liste des symboles

\vec{E} :	Champ électrique en $[V/m]$;
\vec{H} :	Champ magnétique en $[A/m]$;
\vec{D} :	Induction électrique en $[A. s/m]$;

\vec{B} :	Induction magnétique en $[T]$;
\vec{j} :	Densité du courant en $[A/m^2]$
γ :	Charge volumique en $[C/m^3]$
μ_r :	Perméabilité magnétique relative du matériau ;
μ_0 :	Perméabilité magnétique du vide telle que : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m];
ϵ_r :	Permittivité électrique relative du matériau ;
ϵ_0 :	Permittivité électrique du vide, tel que : $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ [F/m]
ρ :	Résistivité électrique du matériau $[\Omega.m]$;
σ :	Conductivité du matériau conducteur [S/m];
\vec{v} :	Vitesse m/s;
\vec{n} :	Vecteur unité normale.
γ_s :	Densité surfacique de la charge $[C/m^2]$;
J_{surf} :	Densité surfacique de courant $[A/m^2]$;
\vec{A} :	Potentiel vecteur magnétique.
A_φ :	Potentiel vecteur magnétique dans la direction φ .
A' :	Potentiel vecteur modifié
\vec{T} :	Potentiel vecteur électrique
ϕ :	Potentiel scalaire magnétique.
Δ :	Opérateur Laplacien
Ω :	Domaine d'étude.
$\partial \omega$:	Bord du domaine d'étude.
Z_{eqs}	Impédance équivalente en topologie série $[\Omega]$;
Z_{eqp}	Impédance équivalente en topologie parallèle $[\Omega]$;
L :	Inductance propre de la bobine[H];
R :	Résistance de la bobine $[\Omega]$;
C :	Capacité [F];
H_b :	Hauteur de la bobine; [mm];
R_{cu} :	Rayon du cuivre [mm];
N_{couche} :	Nombre de couches [mm];
N_{spire} :	Nombre de spires;
R_{bext} :	Rayon extérieur de la bobine [mm];

R_{bint} :	Rayon interne de la bobine [mm];
Dis_V :	Distance inter spires [mm].
costC :	Fonction adjective pour identifie les capacités parasites;
costR :	Fonction adjective pour identifie la résistivité rotho-radial;
R_{mes_k} :	Résistance mesurée dans le point k [$\Omega.m$];
R_{cal_k} :	Résistance calculée dans le point k. [Ω];
X_{mes_k} :	Réactance mesurée dans le point k. [Ω];
X_{cal_k} :	Réactance calculé dans le point k [Ω];
u_r, u_φ, u_z :	Vecteurs unitaires dans les cordonnées cylindrique;
ρ_u, ρ_v, ρ_w :	Résistivité électrique d'une composite monocouche dans le repère cartésien orthonormé [$\Omega.m$];
$\rho_{xx}, \rho_{xy}, \rho_{xz}, \rho_{yx}, \rho_{yy}, \rho_{yz}, \rho_{zx}, \rho_{zy}, \rho_{zz}$:	Résistivité électrique d'un stratifié quasi-isotrope anisotropes dans le repère cartésien [$\Omega.m$];
$\rho_r, \rho_\varphi, \rho_z$:	Résistivité électrique d'un composite en forme cylindrique dans le repère cylindrique [$\Omega.m$];
ρ_L :	Résistivité longitudinale de la tige composite [$\Omega.m$];
ρ_T :	Résistivité Ortho-radial de la tige composite [$\Omega.m$];
S :	Section du passage du courant [m^2]
V :	Tension d'alimentation [V]
l :	Longueur de passage de courant [mm]
I :	Intensité du courant qui traverse l'échantillon [A]
L' :	Longueur entre les deux contacts de mesure de la tension [mm].
s :	Surface parcouru par une densité du courant [m^2]
D :	Diamètre de la bobine [mm].
δ :	Epaisseur de peau [mm]
f :	Fréquence d'alimentation
ω :	Pulsation.
C_M :	Capacité parasite équivalente de Medhurst [F];
C_P :	Capacité parasite équivalente de Palérmo [F];
C_{GKMR} :	Capacité parasite équivalente de Grandi, Kazimierczuk, Massarini et Reggiani [F];
p :	Pas de bobinage [mm];
d :	Diamètre de fil de bobinage [mm]

Introduction générale

Introduction générale

La production mondiale des matériaux composites est en évolution permanente et à vitesse élevée, environ + 10 % par an, en quantité [1] (Figure 1). Ces matériaux associent une matière plastique et renfort en fibres, généralement de verre ou de carbone. Bien que leur coût soit plus élevé que celui des matériaux traditionnels, ils apportent à leurs utilisateurs des avantages importants grâce à leurs propriétés, notamment de légèreté et de résistance. Ces avantages leur ont ouvert des marchés importants dans la construction automobile, l'aéronautique, ou encore en génie civil (Figure 2).

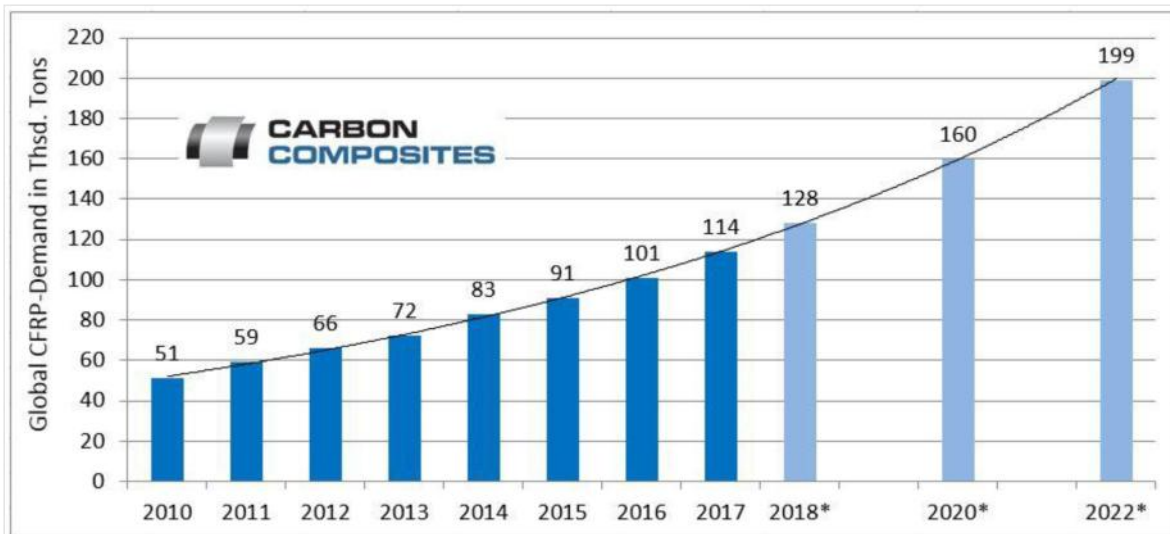


Figure 1 Evolution du marché mondial en matériaux composites à base de fibres de carbone (11/2018) [1].

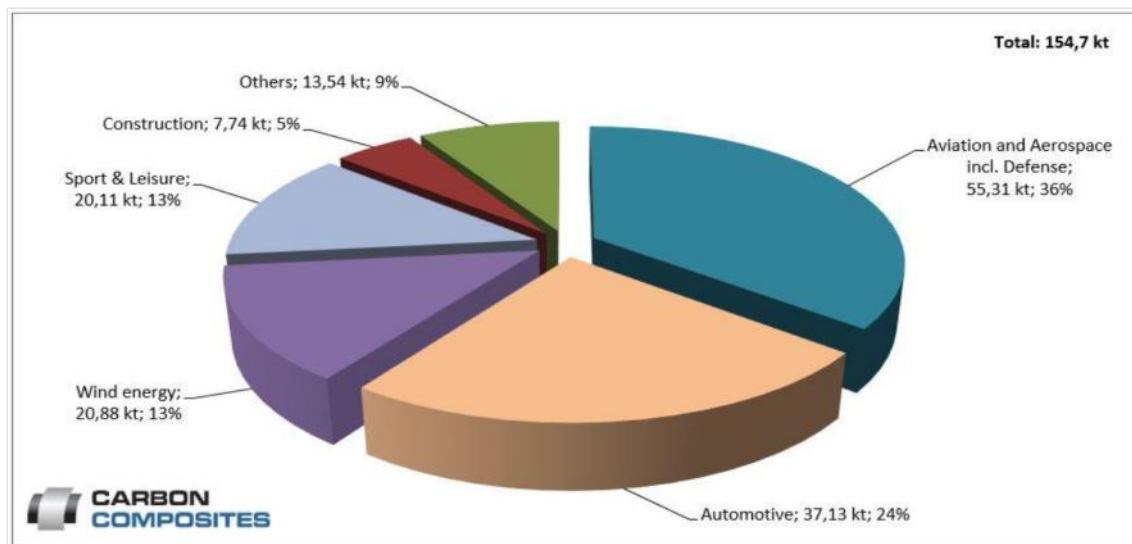


Figure 2 Demande mondiale en matériaux composites à base de fibres de carbone en 2018 [1].

Le renforcement par les fibres donne au matériau composite sa force et sa rigidité exprimées respectivement par la contrainte et le module élastique. Contrairement aux matériaux traditionnels tels que l'acier ou l'aluminium, le matériau composite renforcé en fibres possède des propriétés

mécaniques meilleures avec un faible poids. Les fibres utilisées sont de plusieurs types, on trouve les fibres aramide, verre ou végétale, les fibres métalliques ou bien encore les fibres de carbone. Vue leur résistance mécanique élevée, les fibres de carbone trouvent leur utilisation dans plusieurs applications de haute technologie [2] [3].

Les propriétés des composites renforcés en fibres de carbone dépendent de la structure des fibres et de leur proportion par rapport à la matrice. La technologie de production de ces matériaux est coûteuse, malgré cela ils sont couramment utilisés dans les secteurs très sensibles où un rapport résistance/poids et une rigidité élevés sont requis, tels que l'aérospatiale, la superstructure des navires, l'automobile, le génie civil ou encore les équipements sportifs et médicaux.

L'idée d'utiliser les matériaux composites à fibres de carbone dans les structures de génie civil est récente. A l'heure actuelle, des méthodes de renforcement des structures avec des fibres s'appliquent à différentes structures. Les bétons renforcés en barres composites (tiges) à fibres de carbone sont actuellement utilisés dans la construction des ponts à la place du béton à armature en acier [4] [5] [6]. Les tiges composites en fibres de carbone sont aussi utilisées dans les systèmes d'ancrage des ponts [5] [7] [8].

Plusieurs facteurs extérieurs fragilisent l'ensemble des constructions du génie civil à bases de matériaux composites ou autres, comme les catastrophes naturelles tels que les ondes sismiques, les vents violents, en plus des facteurs d'érosion comme le froid intense, la température élevée et la pluie, sans oublier les facteurs humains tels que le dépassement du poids supporté par ces constructions. La prédiction des défaillances nécessite souvent des méthodes de détection non destructive durant l'exploitation de ces constructions. Pour la modélisation en vue de la conception des systèmes de détection non destructifs, il est nécessaire de connaître les propriétés physiques (conductivité électrique, perméabilité magnétique, conductivité thermique,) de ces matériaux. Dans cette thèse nous nous intéressons plus particulièrement aux tiges composites renforcées en fibres de carbone sujet de défaillance comme la rupture des fibres, le délaminage, les impuretés,...

Pour la détection utilisant le contrôle non destructif par les courants de Foucault, on cherche à connaître les propriétés électromagnétiques et thermiques des matériaux constituant ces constructions. Les tiges composites en fibres de carbone qui sont des éléments essentiels constituant les constructions de génie civil, sont de nature amagnétiques mais électriquement conductrices du fait que le renfort en carbone est lui même conducteur. Ces matériaux possèdent une résistivité électrique qui dépend étroitement de l'architecture et du pourcentage du renfort en carbone, elle peut varier de $0.02 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$ à $12.5 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$ [9]. Les courants de Foucault peuvent aussi servir pour apporter de la chaleur dans les étapes de fabrication ou de transformation de ces matériaux [10].

La résistivité électrique est une propriété physique du matériau, très déterminante dans la conception des systèmes de détection des défauts, se basant sur la méthode non destructive à courants de Foucault. La mesure directe de la résistivité électrique des matériaux composites, basée sur les courants de conduction parcourant l'ensemble des fibres se trouvant entre deux électrodes (méthode Volt-Ampérométrie), est pratiquement impossible du fait que la difficulté de connections entre les électrodes et les fibres qui sont imprégnées dans la résine (matrice). C'est pour cela que nous proposons dans cette thèse, pour mesurer la résistivité électrique, l'utilisation de la méthode sans contact basée sur les courants induits appelés aussi courants de Foucault, qui permet d'éviter tout contact électrique externe avec le matériau composite.

La technique consiste à remonter à la résistivité électrique de la tige composite en comparant les mesures d'impédance électrique d'une sonde à courant de Foucault CF (bobine à air) prélevées d'un banc d'essai que nous avons mis en œuvre, avec l'impédance calculée issue d'un modèle numérique. Cette comparaison se fait de manière automatique à l'aide d'un code de calcul, développé par nos soins, exprimant la technique du problème inverse.

Le renfort dans les tiges composites en fibres de carbone est à orientation unidirectionnel. Les fibres sont imprégnées dans une résine thermoplastique ou thermodurcissable, d'où le caractère hétérogène des tiges composites. Au cours de la modélisation de ces tiges, elles sont remplacées par des tiges homogènes équivalentes [10] [11]. Leur résistivité électrique équivalente dans la direction longitudinale (direction des fibres) est très faible devant la résistivité ortho-radial (direction perpendiculaire aux fibres). Cette forte anisotropie doit être prise en compte par une modélisation tridimensionnelle. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel CEDRAT/FLUX 3D, ceci nous permet d'étudier le comportement électrique des tiges composites et découvrir le parcours des courants induits dans les tiges composites.

Du fait que la résistivité ortho-radiale (chemin des courants sources parcourant la sonde CF) est très importante, l'épaisseur de peau sera très élevée aux fréquences inférieures à 1MHz. Il faut alors monter en fréquence pour ramener l'épaisseur de peau à une valeur inférieure ou égale au rayon des tiges. Aux fréquences élevées, des effets indésirables (dus aux capacités parasites dans la sonde CF) apparaissent. Il est alors important d'étudier ces effets au cours de la conception des sondes CF pour une meilleure adaptation des sondes et pour améliorer la précision de mesure de la résistivité électrique des matériaux composites.

Ce mémoire de thèse de doctorat sera réparti en quatre chapitres. Le premier chapitre présentera une vue panoramique sur les matériaux composites, leur constitutions, leur caractéristiques principales et leur cycle de vie. Ensuite, l'utilisation des matériaux composites dans les structures de génie civil

sera abordée ainsi que les différentes techniques d'évaluation ou de caractérisation électriques. On terminera ce chapitre par une présentation de la caractérisation non destructive par la méthode électromagnétique.

Le deuxième chapitre sera consacré aux rappels des lois principales qui gouvernent les phénomènes électromagnétiques pour formuler l'équation aux dérivées partielles (EDP) exprimant le modèle en régime variable sinusoïdal du dispositif de caractérisation non destructive par méthode CF. Cette équation étant une EDP dont la solution dépend entièrement des conditions aux limites. Vue les difficultés de résoudre analytiquement cette EDP, nous utiliserons une méthode numérique basée sur les éléments finis. Pour remonter à la conductivité électrique de la tige composite nous opterons pour l'utilisation de la technique du problème inverse (PI) et les méthodes d'optimisation utilisées pour minimiser la fonction coût de PI, ceci sera abordé dans la dernière partie de ce chapitre.

Au troisième chapitre, on commencera par présenter un état de l'art sur les sondes CF et inducteurs et leurs propres capacités parasites, ensuite, on nottera en évidence l'influence des capacités parasite sur le comportement électromagnétique des sondes CF dans les fréquences élevées. On terminera par élaboration d'un modèle numérique avec un couplage circuit qui tient compte de ces capacités est présenté.

Le dernier chapitre sera dédié, en premier lieu, d'une part à l'influence de la résistivité longitudinale sur l'orientation des courants induits en utilisant un modèle 3D sous Cedrat/Flux 3D, et d'autre part, à la présentation du modèle 2D axisymétrique. Ensuite, on passera à la description du banc de caractérisation des tiges composites à renfort UD en fibres de carbone, par la méthode d'évaluation non destructive CF. Une confrontation des résultats issus du modèle numérique et des résultats expérimentaux sera présentée à la fin de ce chapitre.

Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives éventuelles de ce travail.

Chapitre I : Matériaux Composites et Evaluation Electrique Non Destructive

I.1 Introduction

Ces dernières décennies ont vu défiler plusieurs travaux de recherches qui concernent l'augmentation du rendement des structures en génie civil tel que les ponts et les gratte-ciel... Les matériaux composites possèdent une bonne résistance mécanique avec un faible poids par rapport à l'acier, pour cette raison ces matériaux commencent à prendre place dans le domaine du génie civil. Dans la construction des ponts les matériaux composites renforcés en fibres (CRF) sont récemment très utilisés particulièrement sous leurs formes cylindriques telles que les tiges, barres et les tendons.

Dans ce chapitre on va exposer les différentes structures des matériaux composites et leurs caractéristiques, ainsi que leurs utilisations dans les structures du génie civil notamment dans les ponts. On va ensuite, présenter les différentes dégradations et défaillances des structures en composite à fibres de carbone durant leur utilisation. On terminera par une présentation des différentes techniques d'évaluation électrique appliquées à ces matériaux.

I.2 Classement des matériaux composites

Les matériaux utilisés dans les structures peuvent être classifiés en quatre catégories [11]:

- Les métaux,
- Les polymères,
- Les céramiques,
- Les composites.

Les matériaux composites présentent plusieurs avantages comparés aux autres types des matériaux [12] [13]. Ceux-ci sont dus à leurs nombreuses caractéristiques attrayantes telles que le poids léger, la haute résistance, la rigidité élevée, une bonne résistance à la fatigue et une bonne résistance à la corrosion [14] [15]. De plus, la possibilité de fabriquer des pièces avec des géométries complexes en utilisant moins de composants permet aux fabricants d'économiser le coût par rapport aux mêmes pièces en matériaux métalliques conventionnels [16] [12].

Un matériau composite est fabriqué en combinant deux ou plusieurs matériaux - souvent ceux qui ont des propriétés très différentes [15]. Les deux matériaux travaillent ensemble pour donner au composite des propriétés uniques. Cependant, à l'intérieur du composite, on peut distinguer facilement les différents matériaux, car ils ne se dissolvent pas et ne se mélangent pas les uns aux autres.

I.3 Constitution d'un matériau composite

Un matériau composite c'est la combinaison entre deux matériaux ou plus, ces deux combinaison donnent au matériau composite leur caractéristiques unique par rapport les matériaux traditionnelles, la figure I.1 montre les constituant d'un matériau composite à fibre de carbone.

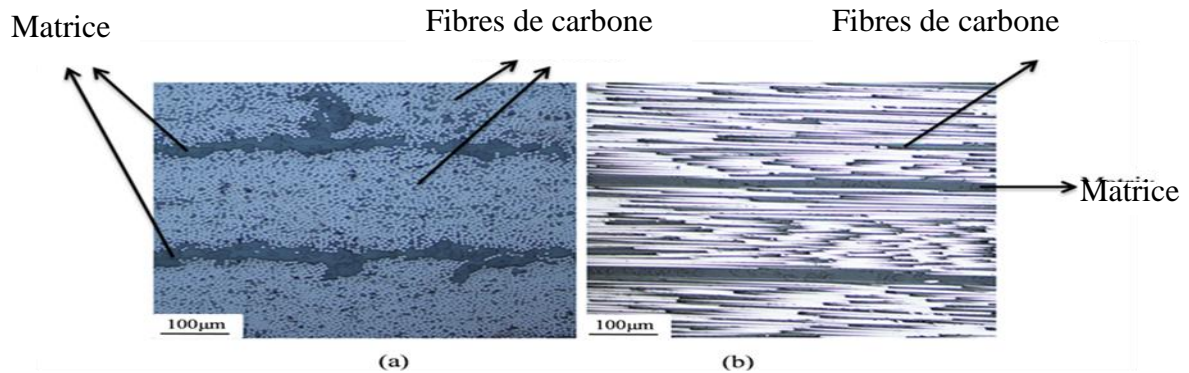


Figure I. 1 Matériau composite (a) coupure transversale, (b) coupure longitudinale.

Les matériaux composites sont constitués de deux composants distincts [16]:

- d'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains cas, des charges et adjuvants;
- d'un renfort.

Les propriétés physiques d'un matériau composites dépendent de ses composants, l'orientation des fibres a une influence prépondérante sur ces propriétés [17] [9].

I.3.1 La matrice

La matrice dans un composite à renfort en fibres permet de [13] [18] [19]:

- 1) maintenir les fibres en place,
- 2) transférer les contraintes entre les fibres
- 3) fournir une barrière contre un environnement défavorable, comme les produits chimiques et l'humidité.
- 4) protéger la surface des fibres de la dégradation mécanique (par exemple, par abrasion). La matrice joue un rôle mineur dans la capacité de charge de traction d'une structure composite.

On distingue plusieurs familles des matrices (figure I.2) [11] [13].

Les propriétés du composite qui sont significativement affectées par les propriétés de la matrice (propriétés dominées par la matrice) comprennent [13] [14]:

- 1) la température et la résistance environnementale,
- 2) la résistance longitudinale à la compression,

3) la résistance transversale à la traction

4) la résistance au cisaillement.

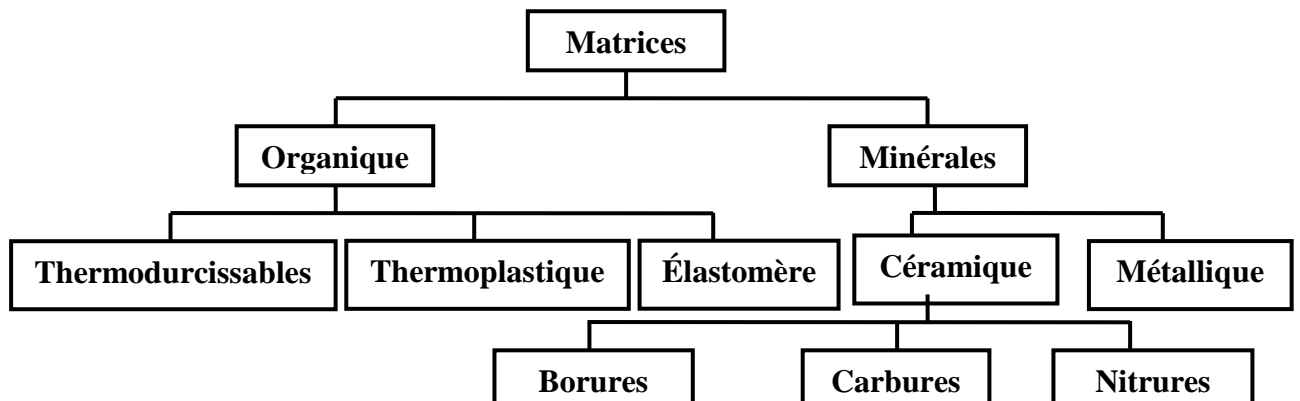


Figure I. 2 Classification des matrices dans les matériaux composites.

I.3.2 Le renfort

Le renfort est l'armature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques. Les renforts peuvent être classés selon (figure I.3) :

- leur forme :
 - fibres : courtes (0,1 - 1 mm), longues (1 - 50 mm) ou continues (> 50 mm).
 - charges renforçantes : gravier (additionné au ciment pour fabriquer le béton), sable, billes de verre, etc. ;
- leur disposition : mat (nappe de fibres en vrac non tissées) ou tissé.

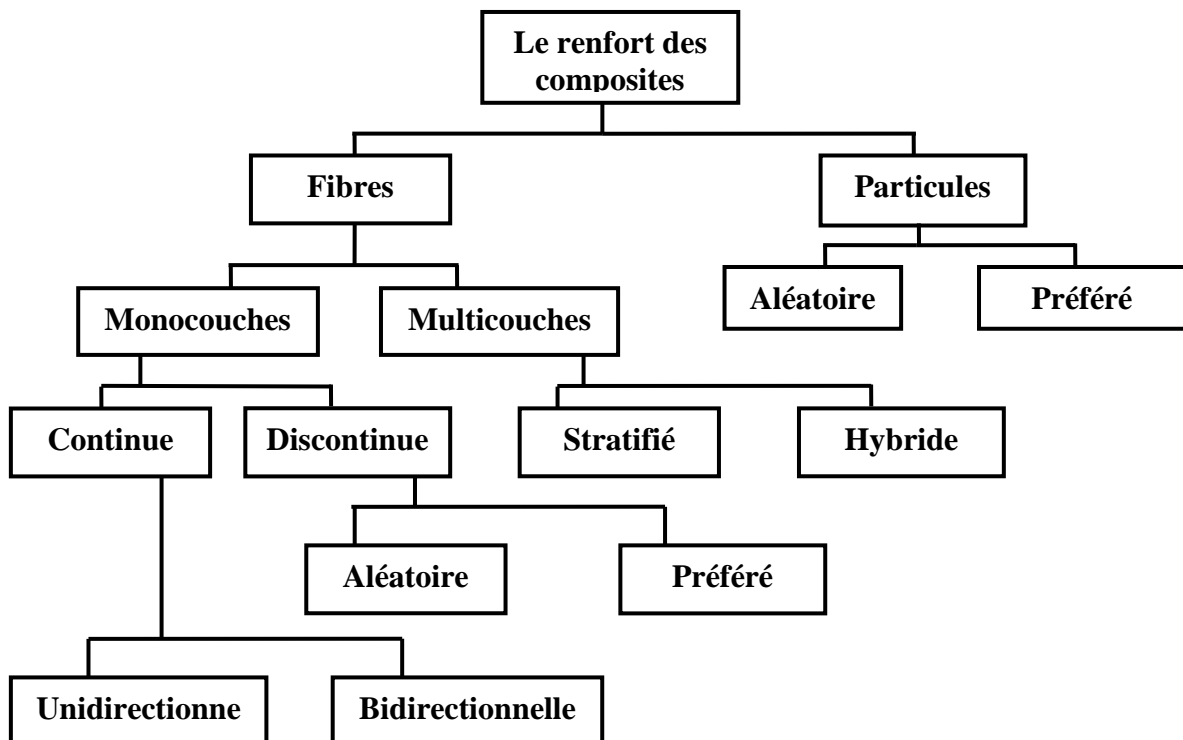


Figure I. 3 Renfort des matériaux composites.

Les fibres sont les plus utilisées comme renfort dans les matériaux composites. Ils occupent la plus grande fraction de volume dans un matériau composite et partagent la majeure partie de la charge agissant sur une structure composite [10] [20], les diamètres des fibres sont généralement entre 5 et 15 μm [10].

L'orientation des fibres influe considérablement sur le degré d'anisotropie dans les matériaux composite, On peut distinguer deux présentations des fibres [10] [21]:

- fibres avec une structure aléatoire;
- fibres à une structure orientée.

Le choix approprié du type des fibres, leur fraction dans le volume, leur longueur, et leur orientation sont très important, puisqu'ils influent considérablement sur les caractéristiques suivantes du matériau composite [13] [14]:

1. La densité
2. La résistance mécanique à la traction
3. La résistance mécanique à la compression
4. La force de fatigue
5. Les conductivités électrique et thermique
6. Coût

I.3.2.1 Fibres à structure aléatoire

Le composite à fibre discontinu aléatoire a des propriétés uniformes dans toutes les directions [16] [13]. Les composites à structure aléatoires sont fabriqués avec des fibres à petite longueur. Ces fibres sont distribuées d'une manière aléatoire et maintenues par un liant soluble afin d'obtenir un mat à fibres courtes comme l'illustre dans la figure I. 4.

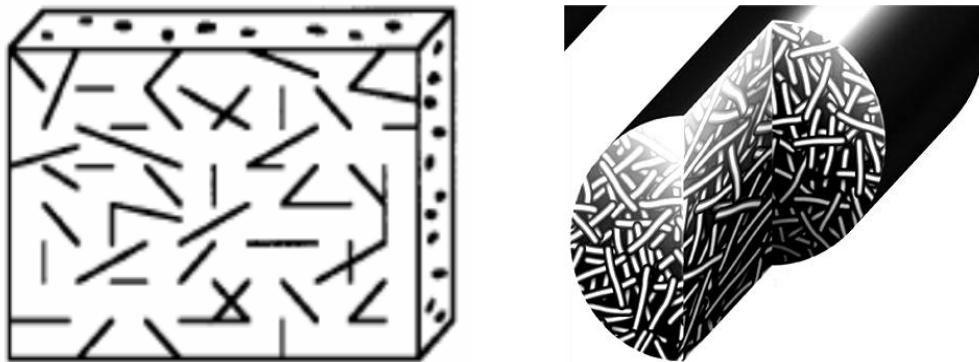


Figure I. 4 Composites à fibres aléatoire : à gauche : structure plate - à droite : structure cylindrique.

Cette structure a une bonne résistance mécanique dans la compression on distingue deux types des structures : cylindrique et rectangulaire comme illustré dans la figure I.4 [22].

I.3.2.2 Fibres à structure Orientées:

Les structures orientées se divisent selon la direction des fibres dans les composites:

a) Composites à fibres tissées

Cette Structure est produite à partir d'un tissage des fibres entre elles selon des directions spécifique bi ou tridimensionnelle [10]. Des différentes formes des tissages dépendent du mode de l'entrecroisement entre les fibres comme le satin, la serge et le taffetas (figure I.5). Généralement les composites à fibres tissées ont une bonne résistance mécanique [13] [23].

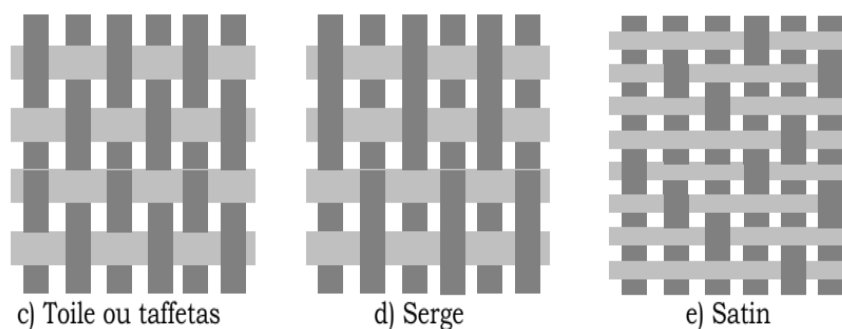


Figure I. 5 Différents structure des fibres dans les composites tissés [10].

b) Composites à renfort Unidirectionnel (UD)

✓ *les plis UD:*

Dans ces types de composites, les fibres sont orientées dans la même direction, selon la direction principale des contraintes mécaniques, figure I. 6 (la résistance mécanique dans la direction des fibres est plus grand que les autres axes), les propriétés physiques dans ce type de composites sont fortement anisotropes [24] [25].

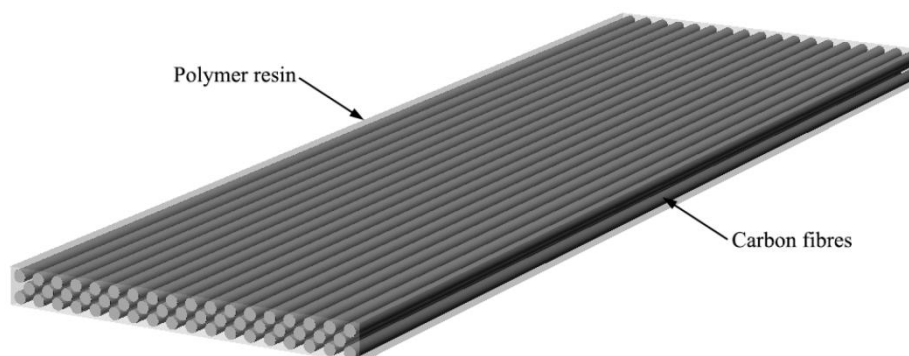


Figure I. 6 Composite plate à fibres unidirectionnel [5].

La classification des matériaux généralement employés dans la réalisation des fibres sont illustrés par la figure I.7, [20] [22].

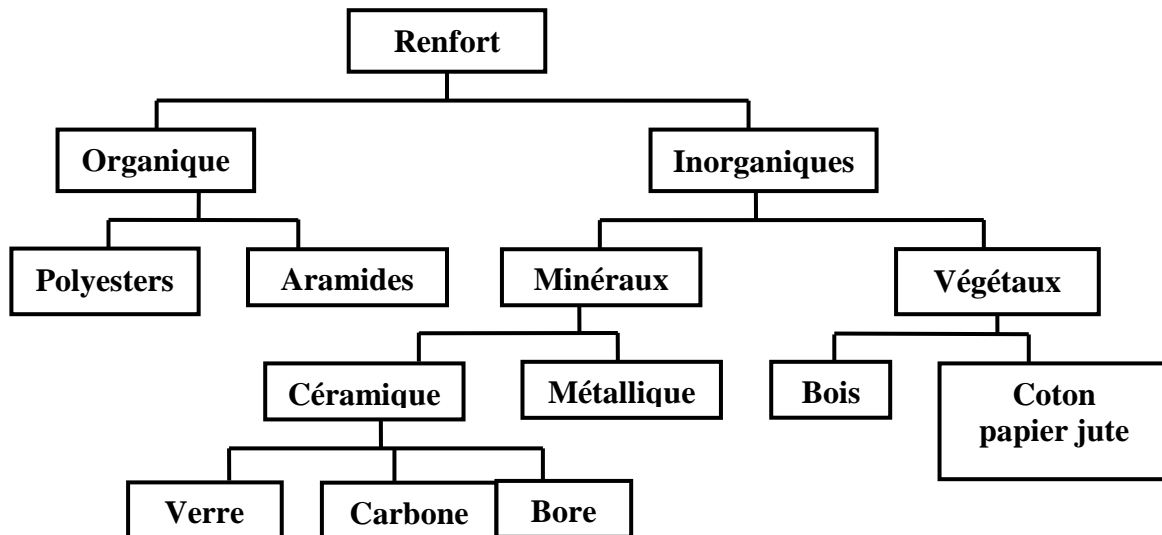


Figure I. 7 Classification des fibres dans les matériaux composites

- Fibres d'aramide

Les fibres d'aramide sont connues encore par polyamide aromatique. Kevlar est la marque la plus connue, aussi, il existe d'autres marques telles que «SVM» et «Twaron». Ces fibres possèdent des modules d'élasticité de 70 à 200GP, et un allongement ultime entre 1.5 à 5 %, et tout cela selon la qualité des fibres. Le renfort d'aramide est sensible à l'humidité, aux températures élevées, et aux radiations «ultra-violet» et par suite, en génie civil ces fibres ne sont pas largement utilisées. En plus, les fibres d'aramide possèdent une bonne résistance à la fatigue et au choc, mais des problèmes avec la corrosion.

- Fibres de verre

Les verres sous forme massive possèdent une fragilité qui est due à sa sensibilité à la fissuration, tandis que ce caractère n'a plus d'effet sur le verre qui est sous forme des fibres. Elles sont caractérisées par leur module d'élasticité, leur masse volumique et leur résistance. Les fibres de verre sont sensibles à l'humidité, mais ils peuvent être bien protégés par l'utilisation d'une matrice adéquate. Les fibres sont ,et au cours du temps ,exposées à une perte de leurs résistances² . Ces renforts sont moins cher que les fibres d'aramide et de carbone, pour cela les polymères renforcées en fibre de verre sont les fibres les plus répondues.

Plusieurs types de fibre en verre existent, elles ont des épaisseurs différentes qui varient entre 3 à 24 μm . Les types sont :

- ✓ Les fibres de verre E : plus utilisées en génie civil, et cela grâce à ses propriétés de non conductivité électrique.
- ✓ Les fibres de verre C : utilisées en raison de la caractéristique de résistance à la corrosion.
- ✓ Les fibres de verre S : possède une haute résistance et elles sont appliquées initialement dans l'aérospatial.
- Fibres de carbone

La production de la fibre de carbone est faite par un processus nommé la pyrolyse commandée, ou elle consiste à soumettre un des trois précurseurs (polyacrylonitrille «PAN») des fibres à une série de traitements thermiques (oxydation, carbonisation, graphitisation, et traitement de surface) afin de produire des diamètres variant de 5 à 8 μm des filaments de carbone.

Les fibres de carbonées peuvent avoir des propriétés très différentes et ainsi ces renforts possèdent plusieurs catégories qui sont classées selon leurs modules d'élasticité (régulier 200-300 GPa, intermédiaire 300-350 GPa, grand 350-550 GPa, très grand 550-1000 GPa), et l'allongement ultime varie de 0.3 à 2.5 %.

Le renfort à fibres de carbone possède une résistance excellente à la fatigue avec une faible relaxation. De plus, il résiste bien à plusieurs solutions chimiques et il n'absorbe pas l'eau. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone moins ou plus élevé ce qui conduit à une modification dans les contraintes à la rupture, les allongements et les modules d'élasticité.

Bien que les fibres de carbonées sont plus chères que les fibres de verre, ces fibres commencent à être plus utilisées dans les structures comme les enveloppes composites pour le renforcement ou et la réparation des colonnes, poutres, et dalles en béton armé. L'utilisation croissante des fibres de carbone grâce à leur résistance et hauts modules élastiques, leur résistance aux effets chimiques, thermiques et environnementaux, encore leurs masse volumique (faible poids) pour cela dans les cas où la flèche et le poids ajouté sont des conditions critiques, les fibres de carbone sont le choix idéal.

I.4 Architectures des composites à structure plan

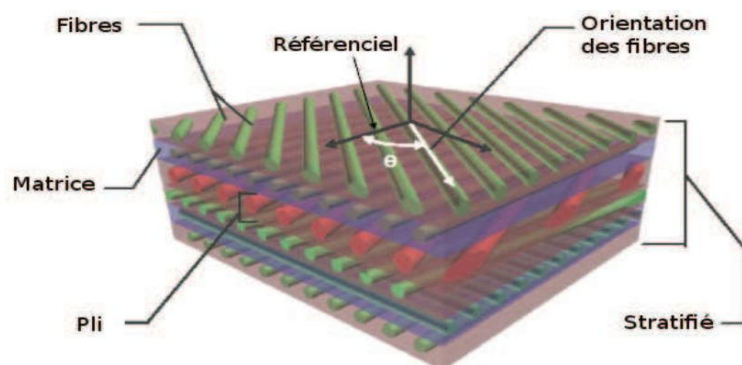
Les matériaux composites peuvent se présenter en trois types d'architectures : monocouche, les stratifiés ou sandwich [13] [15].

I.4.1 Les monocouches ou mono-pli

Les composites monocouches sont des structures à pli unique UD ou tissé d'épaisseur environ 140um [10].

I.4.2 Les stratifiées

Le stratifié est constitué d'un certain nombre de couches ou plis, collés ensemble par la résine dans le sens de l'épaisseur comme illustre dans la figure I. 8. Une couche peut être constituée d'un renfort UD ou tissé en fibres noyées dans une matrice. Les propriétés mécaniques, électromagnétiques ou thermiques du stratifié peuvent être modifiées en contrôlant l'angle d'orientation des fibres θ dans chaque couche dans le cas du renfort UD, figure I. 9, [16] [26].



I. 8 Architecture d'un composite stratifié [10].

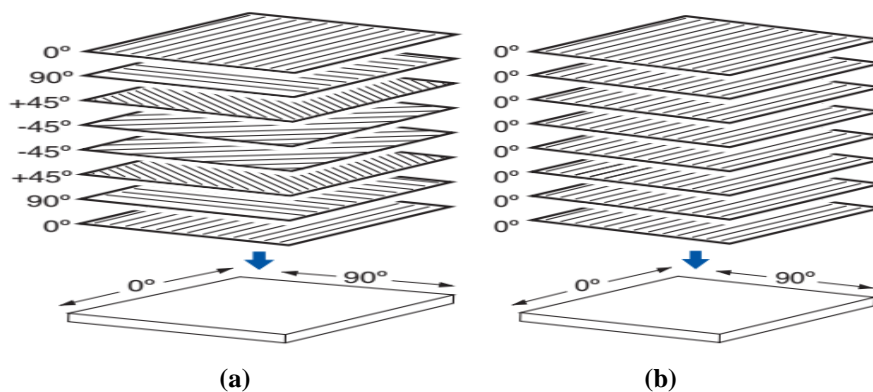


Figure I. 9 Drapage d'un composite stratifié selon l'orientation des fibres (a) quasi-isotrope, (b) groupe unidirectionnel [27].

Il y a plusieurs types des stratifiés en fonction du drapage [13] [11] [27] :

a) *Equilibrés* : Dans un stratifié équilibré, pour chaque couche, avec l'angle d'orientation ' θ ', il existe une autre couche avec l'orientation ' $-\theta$ ' n'importe où dans la direction de l'épaisseur. Le drapage [30° / -30° / 60° / -60°] est un stratifié équilibré.

b) *symétriques* : Dans un stratifié symétrique, l'orientation de la nappe est symétrique par rapport au plan médian du stratifié; c'est-à-dire que pour chaque couche au-dessus du plan

médian, il y a une épaisseur identique (en matériau, épaisseur et angle d'orientation des fibres) à une distance égale au-dessous du plan médian.

c) *orthogonaux* : Les angles d'orientation des fibres dans les couches alternées sont 0° et 90° . Par exemple, $/ 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ$ est un stratifié orthogonal.

I.5 Composites Renforcés en Fibres (CRF) en forme cylindrique

I.5.1 Applications en génie civil

Aujourd'hui, il y a un gros potentiel d'utilisation des CRF en forme cylindrique dans le secteur du génie civil, un exemple de types de CRF est illustré par la figure I.10.

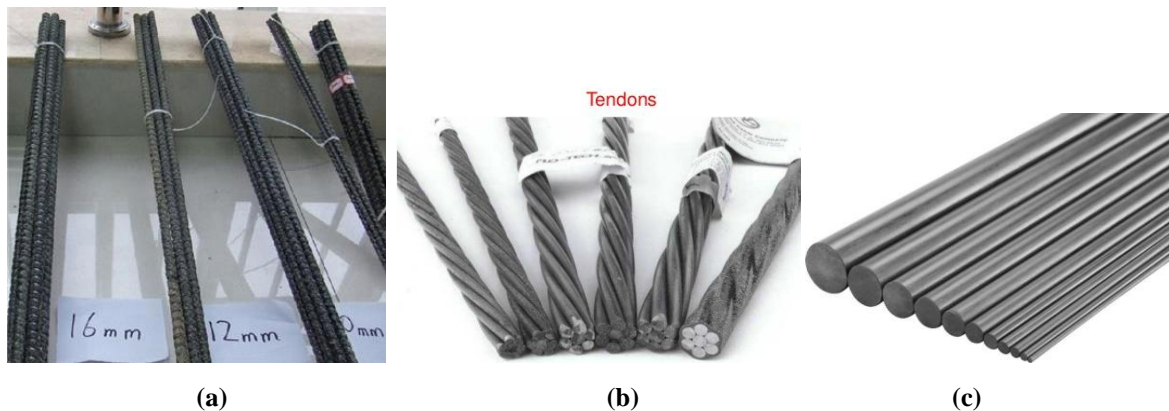


Figure I. 10 a) barres d'armature CRFC --- b) tendons en CRFC --- c) tiges en CRFC [5] [4]

On va retrouver classiquement ces matériaux pour les utilisations suivantes :

- armature du béton : barre ou tige de renforcement du béton armé, figure I.10,
- câbles ou tendons de suspension pour les structures (pont, passerelle, assesseurs, levage, ...), figure I.11 et la figure I. 12.



Figure I. 11 Renforcement des structures par barres en CRF : a) Tablier de pont, Canada; b) pisciculture entrée en mer, Portugal [28].

Ainsi, les CRF peuvent aussi bien être utilisés pour la conception de nouveaux ouvrages que pour la rénovation d'anciennes structures nécessitant le renforcement ou le remplacement

d'anciennes armatures. Les PRF peuvent aussi intégrer des capteurs à fibre au cœur de leur structure ce qui est très intéressant pour le monitoring des ouvrages.



Figure I. 12 Câbles de suspension : Pont de Stork, Winterthur, Suisse [5]

Les tiges et barres en CRF sont orthotropes, la force et le module dans la direction transversale à la direction des fibres sont beaucoup plus faibles que ceux dans la direction longitudinale comme il est illustré dans la figure I. 13. Ce qui n'est pas le cas pour la résistivité électrique qui est très importante dans la direction transversale.



Figure I. 13 Tige composite à renfort unidirectionnelle en fibres de carbone [5]

I.5.2 Comparaison entre les barres en CRF et les barres en acier

Au cours des 30 dernières années, le secteur de l'ingénierie des ponts a subi de plus en plus de dommages sur les haubans et les câbles de suspension qui sont en acier [5] [6]. Or que ces derniers souffrent de la corrosion et de la fatigue [2] [29] [30]. La plupart des ingénieurs en ponts semblent être d'accord pour dire que la résistance à la corrosion et à la fatigue des câbles pour structures suspendues doit être améliorée. Les matériaux composites permettent de remédier aux incohérences retrouvés dans les structures à armature en acier. Ces matériaux offrent un rapport résistance-poids meilleur comparé à l'acier.

Les CRF possèdent un comportement élastique linéaire et leur rupture est fragile. Cela signifie qu'il existe des relations linéaires entre les tenseurs de contraintes et les déformations des matériaux. Les aciers quant à eux possèdent un comportement élastique et plastique. Les

CRF sont des matériaux anisotropes contrairement aux aciers qui sont isotropes. Alors qu'un seul module d'élasticité E permet de caractériser un matériau isotrope tel que l'acier, plusieurs coefficients de rigidité sont requis pour définir un comportement anisotrope. Les propriétés mécaniques des CRF varient en fonction du renfort, Tableau I.1. La différence de comportement des deux matériaux (CRF et acier) a amené à une modification des critères de conception dans les différents codes en vigueur. L'acier est généralement contrôlé par les critères de résistance alors que les CRF sont contrôlés par les critères de comportement en service : flèche et fissuration.

	Acier	CRF Verre	CRF Carbone	CRF Aramide
Limite Elastique (MPa)	276-414	SO	SO	SO
Résistance en traction (MPa)	483-690	483-1035	600-2900	1000-1400
Module d'élasticité (MPa)	200	35-45	120-300	60-87
Déformation (%)	>10	1.2-2.7	0.5-0.7	1.4-1.9

Tableau I. 1 Comparaison des caractéristiques mécaniques des barres en CRF et des barres en acier [31].

Les principaux avantages des armatures en CRF sur les armatures en acier sont :

- Un rapport Résistance/Poids élevé.
- La facilité et la rapidité de son installation qui permettent de réduire les coûts de main-d'œuvre et les coûts de transport.
- La neutralité électromagnétique. Cette caractéristique peut être recherchée dans certains ouvrages tels que les hôpitaux par exemple.
- La possibilité d'adapter les propriétés mécaniques aux besoins (par le choix des fibres et de leur orientation) et ainsi cibler l'effet des renforts en CRF.
- Les armatures de CRF ne sont pas sujettes au phénomène de corrosion qui est à l'origine de la dégradation de nombreux ouvrages.

Les principaux inconvénients des armatures en CRF sur les armatures en acier sont:

- Des facteurs environnementaux tels que l'humidité, l'alcalinité du béton ou encore la température et le chargement peuvent induire une dégradation des armatures de CRF, plus ou moins importante selon le type de fibres et de résines employées.
- Leurs coûts premiers sont à l'heure actuelle plus élevés que ceux des armatures en acier.
- La courbure des armatures ne peut pas être effectuée sur place (au chantier), mais doit être faite à l'usine et incluse dans le procédé de fabrication de la barre.
- Les pertes de résistance sous charges retenues (fluage) des armatures en CRF sont plus importantes que celles des armatures d'acier.

I.6 Cycle de vie des matériaux composites

Le cycle de vie d'un matériau composite comprend trois étapes [10] [15] [21].

- la phase de production;

- la phase d'utilisation;
- la phase de l'élimination et le recyclage.

La phase de production comprend l'épuisement des matières premières (exploitation minière) et la production (usinage) des produits [11] [27].

La phase d'utilisation comprend l'utilisation de l'énergie, la maintenance et le nettoyage [16].

La phase d'élimination comprend enfin la mise en décharge, l'incinération, le recyclage [10].

I.6.1 Fabrication des matériaux composites

Il existe de nombreux procédés de fabrication utilisés pour concevoir des éléments en PRF, on peut citer :

- Tissus de fibres imbibés manuellement (Hand lay-up) ;
- Projection de fibres et résine (Spray-up) ;
- Pultrusion ;
- Enroulement filamentaire ;
- Injection de résine sur les renforts (RTM: Resin Transfer Moulding) ;
- Moulage (ou infusion) sous vide (RTM Light) ;
- Moulage par compression;
- Moulage par centrifugation.

Le choix du procédé de fabrication va dépendre de nombreux critères tels que la grandeur du produit, la complexité de la surface, les exigences de performance, le taux de production, le fini de surface, le volume total de production, ou encore des considérations économiques telles que le coût du produit.

a- Fabrication de pièces composites planes par moulage :

La figure 1.14 montre les différentes étapes de fabrication des pièces composites [13] [32].

1^{ère} Étape : les matériaux apparaissent sous forme primaire:

- ✓ Le renfort : fibres sous la forme de filaments ou de faisceaux de fibres. Les fibres peuvent également être tissées dans des tissus ou tressées dans des tresses [13] [12].
- ✓ La matrice : le matériau apparaît habituellement sous forme liquide pour la résine thermodurcissable ou sous forme granulaire pour les thermoplastiques [13] [12].

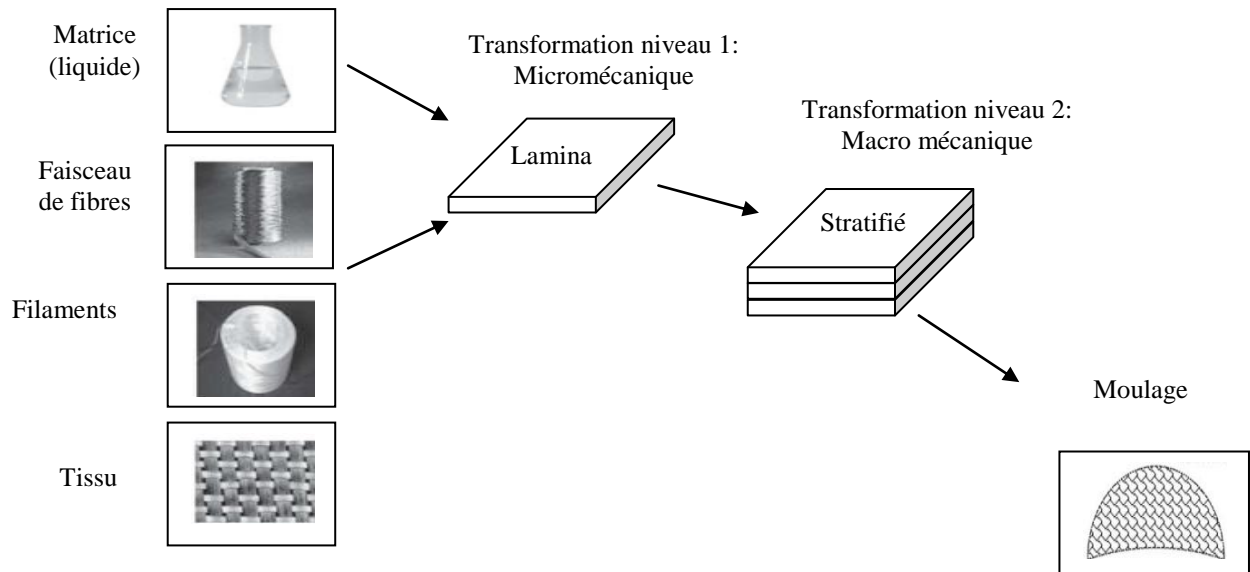


Figure I. 14 Les étapes de fabrication des composites [11].

2^{ème} Étape: les fibres et la matrice peuvent être combinées en une seule couche [13] [12].

✓ Pour les composites thermodurcissables, la résine peut apparaître sous une forme semi-liquide semi-solide afin que la feuille puisse conserver sa forme, elle est appelée pré-imprégné.

✓ Pour les composites thermoplastiques, la matrice est solidifiée, elle s'appelle towpreg.

3^{ème} Étape : A cette partie, les couches de l'étape 2 sont empilées les unes sur les autres pour former des stratifiés plats [27] [14].

4^{ème} Étape: C'est la dernière étape où la configuration finale du produit est formée par l'opération de moulage [13] [11].

Les méthodes de moulages sont nombreuses selon la complexité de la structure à construire, on peut citer :

- *Moulage par la projection simultané :* C'est la méthode de moulage la plus ancienne pour fabriquer des produits composites. Elle ne nécessite aucune compétence technique et aucune machine [10] [16]. Une moitié mâle et femelle de la moisissure est couramment utilisée dans le processus de la projection simultané [23].

- *Moulage par transfert de résine :* C'est un procédé de moulage fermé à basse pression pour des quantités de production modérées.

- *Moulage par compression:* Il est considéré comme la principale méthode de fabrication pour de nombreux composants automobiles structurels, y compris les roues, les pare-chocs et les ressorts à lames. Cela se fait en transformant les composés de moulage en feuille en produits finis dans des moules adaptés [13]. Il a la capacité de produire des parties de géométrie complexe dans de courtes périodes de temps. Cela permet d'éliminer un certain nombre

d'opérations de finition secondaires, telles que le perçage, le formage et le soudage. De plus, l'ensemble du processus de moulage peut être automatisé [16] [11].

- *Moulage sous vide* : L'imprégnation sous vide est un processus dans lequel le mouillage de la résine à la fibre est assisté par un vide [13]. L'imprégnation sous vide est utilisée pour la fabrication de produits nécessitant des propriétés mécaniques contrôlées avec précision, une stabilité thermique et électrique et un bon contrôle dimensionnel [16]. La surface du moule est traitée avec un agent de démoulage. Les renforts sont ensuite placés à l'intérieur du moule. Lors de la fermeture du moule, il faut veiller à ce qu'il soit complètement étanche. Sinon, lorsqu'un vide est appliqué au moule, le vide total ne peut pas être généré dans les cavités du moule [23].

b- Fabrication de pièces composites cylindrique (tiges ou barres) par pultrusion :

La pultrusion est un procédé de fabrication en continu des profilés en matériaux composites ayant des sections constantes (circulaire, rectangulaire,...). Le principe du procédé comme l'indique la figure I.15, consiste à tirer un renfort longitudinal sous forme d'amas de fibres pour passer à travers un bain de résine liquide préalablement mélangée à un catalyseur et à un durcisseur si nécessaire et d'autres additifs. Les fibres imprégnées sont alors guidées à travers une filière d'extrusion qui va permettre de donner la forme voulue au profilé ainsi que de durcir de ce dernier.

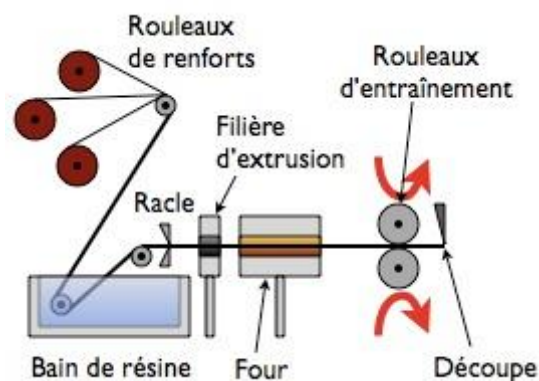


Figure I. 15. Schéma du procédé de moulage par pultrusion.

C'est un procédé qui est très utilisé pour produire les barres ou les tiges pour les armatures des structures en génie civil.

I.6.2 Le recyclage

Les matériaux composites sont préférés pour de nombreuses applications d'ingénierie en raison de leur durabilité et de leur résistance supérieure, Avec une consommation annuelle mondiale de trente mille tonnes de fibres de carbone, la plupart des déchets vont à la décharge. Une élimination et un recyclage appropriés des déchets à la fin de la vie utile des

matériaux composites sont nécessaires [32] [16]. De nombreuses lois actuelles et futures sur la gestion des déchets et l'environnement exigeront que les matériaux d'ingénierie soient correctement récupérés et recyclés, à partir de produits tels que les automobiles, les éoliennes et les avions qui ont vécu leur vie utile.

Le recyclage et l'élimination des matériaux composites est un problème de plus en plus abordé, comme cela devrait être le cas pour tout matériau largement utilisé.

Auparavant, il y avait très peu d'activités de recyclage commercial pour les matériaux composites en raison de contraintes technologiques et économiques [32], bien que de nombreuses technologies ont vu le jour telles que le recyclage mécanique, le recyclage thermique et le recyclage chimique.

Des travaux de recherche et développement approfondis sont en cours pour développer de meilleurs composites recyclables et des technologies de recyclage pour les matériaux composites comme le chauffage par induction [33,25]. Cela contribuera au développement durable de l'industrie des composites.

I.7. Défaillances dans les structures en matériaux CRFC

La figure 1.16 montre les différents types de défauts qui peuvent affectés les CRFC au cours du processus de fabrication ou durant leurs exploitations.

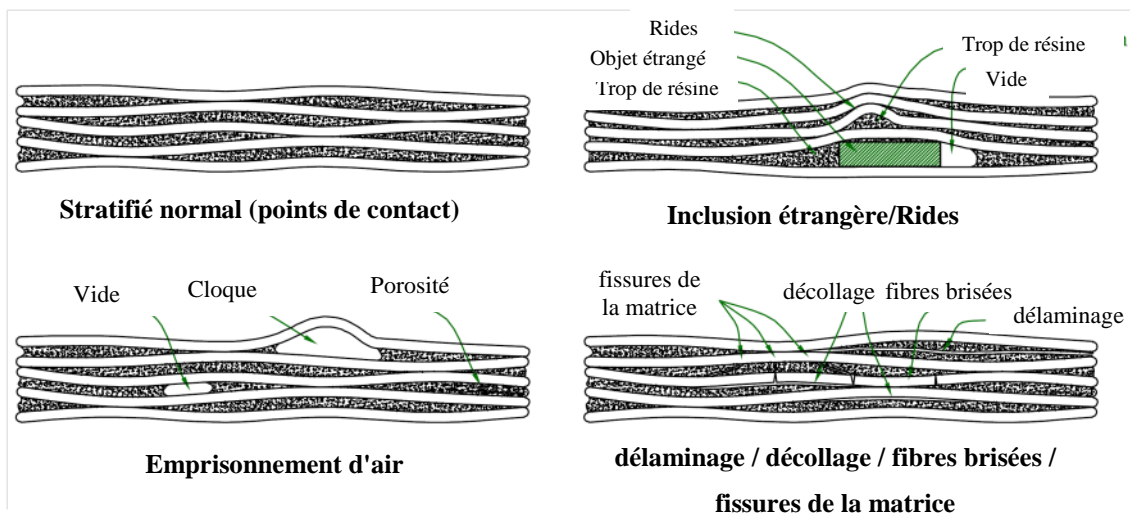


Figure I. 16. Défaillances des structures au niveau des matériaux CRFC [10].

Dans les matériaux classiques (Acier, cuivre, aluminium, ...) les microfissures locales se propagent et deviennent des macro-fissures dans le temps, par contre les matériaux CRFC ont la particularité d'être moins sensibles à ce type de phénomène, du fait de la présence de la matrice. La rupture de certaines fibres ne se propage pas à l'ensemble de la structure, cependant les défauts qui endommagent les CRFC ne se situent pas seulement à l'échelle microscopique, ils sont répartis sur différentes échelles [34].

Durant la phase de fabrication, des défauts peuvent apparaître, qu'on peut citer par ordre d'importance :

Porosités : c'est des poches d'air qui s'introduisent dans la matrice, dues principalement à la nature volatile de certains composants de la résine ou bien un mauvais contrôle de l'air (mise sous vide) lors de la phase de durcissement de la résine.

Impureté : présence de corps étranger en dehors des constituants de base du matériau composite ;

Mauvais taux de remplissage : dus à un excès ou manque de fibres dans certains endroits du matériau composite. Même si en pratique le taux de remplissage est différent d'un endroit à un autre de la pièce, une grande telle disparité peut facilement rendre fragile la pièce en composite et la structure entière ;

Mauvais alignement de fibres : Due au fait que les fibres sont flexibles et moues avant qu'elles soient imprégnées dans la résine. Ce défaut augmente le taux d'ondulation des fibres qui a pour conséquence la diminution de la résistance mécanique longitudinale. Ce défaut dépend du procédé utilisé pour introduire les fibres dans la résine.

Défauts sur les fibres : c'est un défaut qui vient de la phase de mise en œuvre des fibres. Les fibres défectueuses dans ce cas peuvent être à l'origine d'autres défauts tels que la rupture des fibres qui conduit à l'apparition de fissure.

Défaut de liaison entre plis : c'est un défaut spécifique au matériau stratifié, il se produit lors de l'assemblage des plis.

Mauvais alignement des plis : c'est un défaut spécifique au matériau stratifié, du à une mauvaise séquence lors de l'empilement du stratifié, ce qui va modifier la rigidité globale;

Délaminage : c'est un défaut spécifique au matériau stratifié; c'est un décollement entre plis. Ce défaut apparait rarement dans la phase de fabrication.

Les défauts qui apparaissent durant la phase d'utilisation des matériaux CRFC dépendent fortement de l'environnement et des conditions où ces structures sont utilisées. Même si les mécanismes qui les provoquent diffèrent (surcharge statique, impact, effet hygrothermique, foudre, surchauffe, etc...) les défauts résultants sur les CRFC restent les mêmes :

- Délaminage ;
- Fissures de la résine ;
- Infiltration de liquides ;
- Rupture de fibres ;
- Décohésion fibres/matrice.

I.8 Contrôle et évaluation des matériaux composites :

En raison d'une mauvaise qualité de collage ou d'un manque de matière entre les fibres voisines lors de la fabrication du matériau CRFC, des défauts de type décohésion fibres/matrice peuvent se produire. Par conséquent, les régions non collées dans les tiges en CRFC sont très sensibles aux charges mécaniques, aux forces externes et aux déformations. D'autres défauts tels que la rupture des fibres ou la réduction de la densité peuvent également survenir dans le CRFC. Comme la rigidité et la sécurité de la structure entière (bâtiment, pont,...) renforcée par des barres CRFC dépendent de la qualité de chacune des barres séparément, des techniques de contrôle non destructives (CND) appropriées des tiges en CRFC doivent être appliquées avant de les mettre dans la structure, car le processus de réparation devient très compliqué une fois la structure assemblée ou réalisée.

Il existe plusieurs techniques de CND, allant du contrôle visuel jusqu'à l'utilisation des ondes invisibles. La technique utilisant les courants de Foucault destinée pour la vérification ou le contrôle des matériaux conducteurs électriques trouve une large application sur les matériaux CRFC [35] [36] [37] [38].

La connaissance exacte des valeurs des propriétés électriques telles que la résistivité électrique, la perméabilité magnétique et la permittivité diélectrique des matériaux CRFC est indispensable pour la conception et le dimensionnement des systèmes de CND par courants de Foucault ou de chauffage par induction.

Avant d'aborder les méthodes d'évaluation de la résistivité électrique appliquées aux matériaux CRFC, il est nécessaire d'exposer les différents paramètres influant sur leurs valeurs à l'échelle macroscopique.

I.8.1 Paramètres influents sur la résistivité électrique des matériaux CRFC

Plusieurs paramètres influents sur la valeur de la résistivité électrique des CRFC, on peut citer :

I.8.1.1 Les constituants de base :

La résistivité électrique globale ou à l'échelle macroscopique du matériau CRFC dépend directement des propriétés électriques de ses différents constituants. Pour une matrice

isolante, l'augmentation du taux des fibres de carbone par rapport aux autres constituants permet de diminuer la valeur de la résistivité électrique globale du matériau composite.

I.8.1.2 Type et architecture du renfort :

Dans le cas du renfort à fibres courtes (renfort aléatoire), le matériau composite est généralement considéré isotrope, la résistivité électrique dépend uniquement du taux de fibres de carbone dans le matériau.

Dans le cas du renfort à fibres longues, le matériau devient anisotrope. L'architecture du renfort (tissé ou unidirectionnel) influe considérablement sur les valeurs des composantes du tenseur de la résistivité électrique du matériau composite.

- Pour les monocouches à renfort tissé, toutes les composantes du tenseur de résistivité sont identiques.
- Pour les monocouches à renfort unidirectionnel, toutes les composantes du tenseur de résistivité sont différentes.
- Pour les stratifiés ou multicouche à renfort tissé, les composantes du tenseur de résistivité dans le plan des plis (couches) sont identiques et différente de la composante dans la direction perpendiculaire au plan des plis.
- Pour les stratifiés ou multicouche à renfort unidirectionnel, toutes les composantes du tenseur de résistivité sont différentes
- Dans le cas des composites à forme cylindrique (tige, barre) à renfort unidirectionnel les composantes radiale et ortho-radiale sont identiques mais différentes de la composante longitudinale. On dit que le matériau composite est orthotrope.

Le tenseur équivalent de la résistivité électrique d'une composite monocouche est donné par l'équation (I.1).

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_u & 0 & 0 \\ 0 & \rho_v & 0 \\ 0 & 0 & \rho_w \end{bmatrix} \quad (\text{I.1})$$

u, v, w sont les directions dans le repère cartésien orthonormé données par la figure I.17.

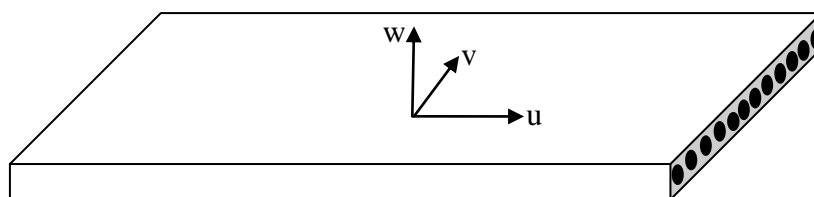


Figure I. 17. Matériau composite monocouche à fibre de carbone unidirectionnel.

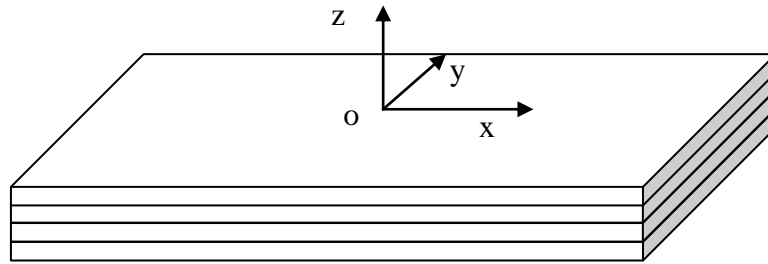


Figure I. 18. Stratifié quasi-isotrope

La figure I.18 illustre un stratifié quasi-isotrope avec des propriétés électriques anisotropes tel que la résistivité équivalente donnée par l'équation (I.2).

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} & \rho_{xz} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} & \rho_{yz} \\ \rho_{zx} & \rho_{zy} & \rho_{zz} \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

Les composantes du tenseur de résistivité (I.2) du stratifié peuvent être exprimées en fonction des composantes du tenseur (I.1) du mono-ply [10] [20].

La figure I.19 illustre une tige à fibres de carbone unidirectionnel avec des propriétés électriques orthotrope.

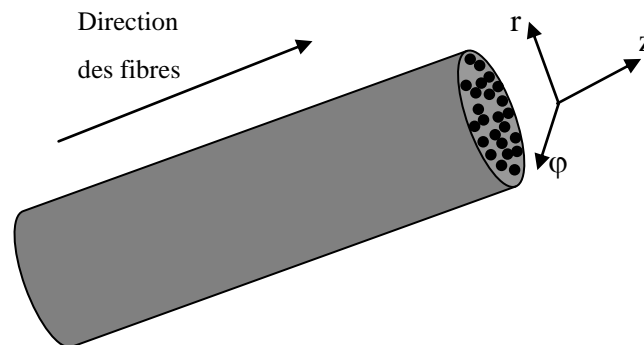


Figure I. 19 Tige à fibres de carbone unidirectionnel avec des propriétés électriques orthotrope.

Le tenseur de résistivité équivalente d'un composite en forme cylindrique est donné par l'équation (I.3) tel que r, phi et z sont les directions principale d'un repère cylindrique orthonormé donnée par la figure I.19.

$$\rho_{tige} = \begin{bmatrix} \rho_r & 0 & 0 \\ 0 & \rho_\phi & 0 \\ 0 & 0 & \rho_z \end{bmatrix} \quad (I.3)$$

I.8.2 Méthodes d'évaluation de la résistivité électrique:

Les méthodes d'évaluation des propriétés électriques des matériaux composites, appliquées particulièrement pour la résistivité électrique, peuvent être classées en deux grandes catégories: les méthodes multi-échelles et les méthodes expérimentales.

I.8.2.1 Méthodes multi-échelles :

Elles permettent l'évaluation des propriétés électriques au niveau macroscopique en partant de l'échelle microscopique à partir des constituants de bases du matériau composite.

Ces méthodes sont aussi appelés méthodes d'homogénéisation multi-échelles, parmi ces méthodes on peut citer, la méthode d'homogénéisation asymptotique, la méthode d'homogénéisation dynamique ou encore la méthode du problème inverse [10]-[11].

L'application de ces méthodes exige la connaissance précise :

- des propriétés électriques des constituants de base du matériau composite,
- de la géométrie exacte et le type du renfort,
- du pourcentage de chaque constituant de base dans le matériau composite.

Avoir toutes ces informations sur le matériau composite n'est pas toujours évident, il serait alors plus commode d'utiliser des méthodes qui ne nécessitent pas la connaissance au antérieure de ces données.

I.8.2.2 Méthodes expérimentales

Elles permettent l'évaluation des propriétés électriques au niveau macroscopique, sans avoir nécessairement des connaissances préalables sur les caractéristiques électriques intrinsèques ou géométriques du matériau composite. Ces méthodes sont réparties selon l'existence ou pas d'un contact avec l'échantillon en composite, en deux familles : méthodes avec contact, méthodes sans contact

a. Méthodes expérimentales avec contact - Méthode Voltampèremétrique

➤ Principe de la méthode

Cette méthode est basée sur la mesure de la résistance électrique en courant continu ou en courant alternatif, [39] [40]. L'injection est réalisée au moyen d'électrodes en contact avec l'échantillon comme illustré sur la figure I. 20.

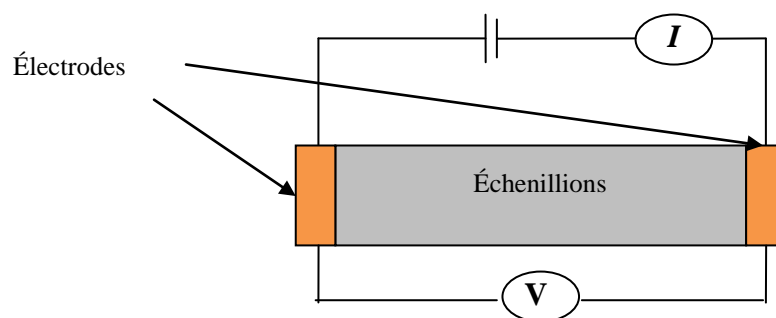


Figure I. 20 Méthode volt-ampérométrique avec deux électrodes.

L'identification de la résistivité électrique par la loi d'ohm tel :

$$\rho = \frac{S.V}{l.I} \quad (I.4)$$

Respectivement S , V , l , et I sont la section du passage du courant, la tension d'alimentation, la longueur de passage de courant et l'intensité du courant qui traverse l'échantillon.

De nombreuses erreurs existent pour cette approche, tel que les résistances non négligeables des contacts électriques. Généralement la surface de contact est non uniforme et cela fait le calcul de résistance plus délicat, les erreurs au niveau des pareils de mesure (voltmètre, ampèremètre..), ainsi que la mesure des dimensions du matériau à caractériser.

Des solutions ont été proposées pour minimiser les erreurs de mesure telle : prendre un échantillon avec une longueur très grande possible avec une section de passage très petite possible ce qu'il fait une très grande résistance possible, ainsi que les contacts soit réalisées par des matériaux de conductivité très élevée.

Pour minimiser l'erreur du non uniformité des surfaces de contacts durant la mesure, il faut exercer une pression pour maintenir ces surfaces le plus uniforme possible.

On peut obtenir la résistivité d'un matériau à partir de la mesure de la résistance électrique et les dimensions géométriques de ce matériau en utilisant avec la méthode des quatre électrodes comme le montre la figure I. 21 [39][58] [40].

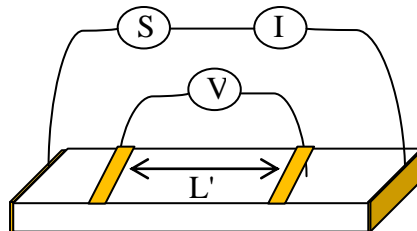


Figure I. 21 Méthode volt-ampérométrique avec quatre électrodes.

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{L'} \quad (I.5)$$

Tel que L' est la longueur entre les deux contacts de mesure de la tension.

Ces méthodes sont utilisées conviennent plus pour les matériaux homogènes isotrope avec des formes plates. Elles peuvent être également utilisées, sous certaines conditions, pour mesurer la résistivité électrique des matériaux CRFC [41] [40].

➤ Applications de la méthode voltampèremétrique sur les CRFC - Contraintes

L'application de la méthode voltampèremétrique sur les CRFC est très délicate à cause de leur complexité telle que :

- ❖ l'hétérogénéité : accès électrique, contact électrode-fibre, non évident du fait que :
 - ✓ les fibres conductrices en carbone sont imprégnées dans une résine isolante solide.
 - ✓ les fibres sont à orientation différente d'un pli à un autre.
- ❖ l'anisotropie : caractère tensorielle de la résistivité électrique dans le cas des renforts unidirectionnel. La résistivité est différente d'une direction à une autre.
- ❖ phénomène de conduction électrique dans le CFRC non élucidé.

Malgré ces différentes contraintes plusieurs travaux ont été réalisés pour la mesure de la résistivité électrique en appliquant la méthode voltampèremétrique mais en avec une préparation spéciales des échantillons en composites [42]:

- dénuder en fusionnant la résine sur les bords du composite, en faisant apparaitre uniquement les fibres de carbone.

- plaquer (revêtement) les fibres dénudées avec de l'or, ce qui constitue l'électrode.

Même si on tiens compte de ces conditions expérimentales la méthode volt-ampémetrique n'est pas précise car à l'intérieur du composite il y a des fibres déchirées et non connectées avec les électrodes, figure I.22, à cette effet le courant ne passe pas dans toutes les fibres du composite, il passe juste dans les fibres liées avec les électrodes, et par conséquent la mesure devient moins précise.

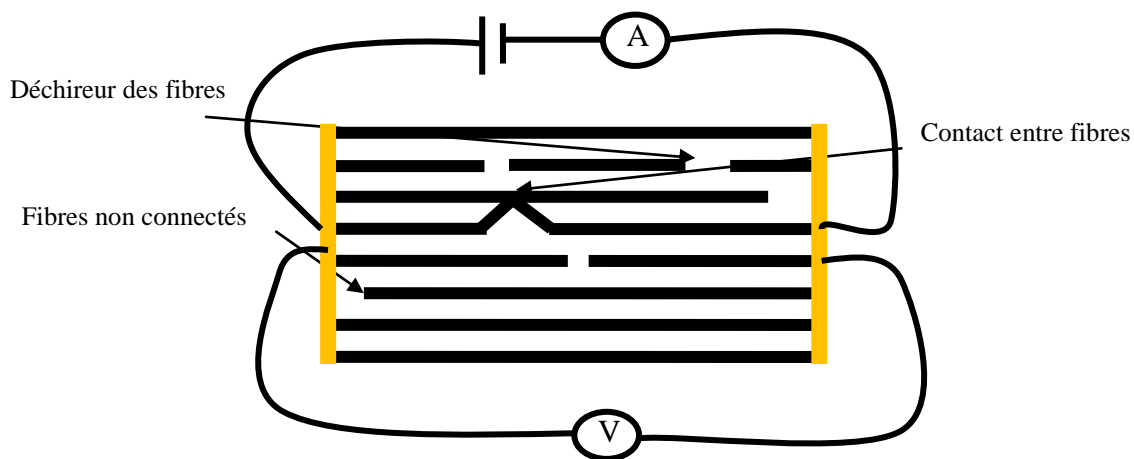


Figure I. 22 Influence des fibres déchirées et les fibres non connecté sur le passage de courant.

b. Méthode expérimentale sans contact - Méthode des courants induits

➤ Principe de la méthode

De même que le CND à courant de Foucault, la méthode de caractérisation sans contact se base sur le phénomène de l'induction électromagnétique, découvert par Faraday vers 1831, qui stipule que tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une force électromotrice (f.é.m.) d'induction. Cette f.é.m. donne naissance à des courants

électriques appelés courants de Foucault, ou encore désignés dans le monde anglo-saxon courants induit comme illustre dans la figure I. 23(Eddy Currents) [10] [35].

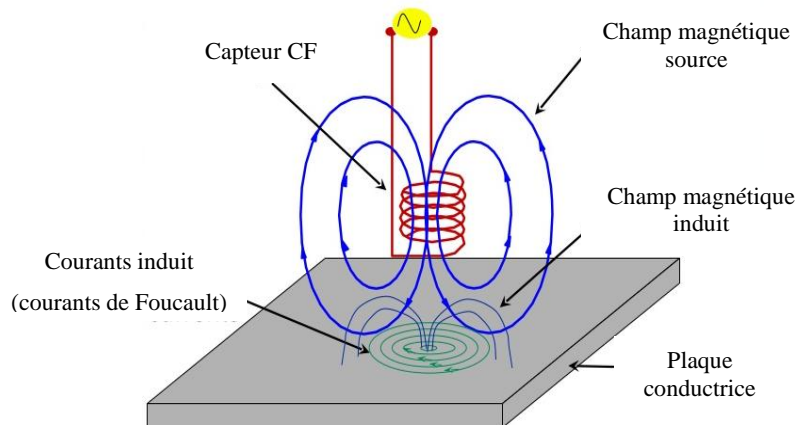


Figure I. 23 Principe de la méthode des courants induits

Le champ magnétique variable est généralement créé par une bobine alimentée par une tension variable, mais il peut aussi être créé par des aimants permanents en mouvement. La bobine est placée au voisinage immédiat de la pièce conductrice à caractériser. Des courants induits (de Foucault) sont créés dans la pièce conductrice, qui donnent naissance à leur tour un champ magnétique de réaction (réaction magnétique de l'induit) dont l'intensité et la phase (dans le plan complexe) dépendent du type de matériau (bon ou mauvais conducteur, magnétiquement perméable ou non), de la géométrie du matériau, de la distance entre la bobine et la pièce, de la fréquence et de l'intensité du courant dans la bobine.

La variation du champ de réaction magnétique dû aux courants induits se traduit par une variation de l'impédance de la bobine excitatrice appelée aussi capteur ou sonde à courant de Foucault (CF).

Les capteurs ou les sondes CF sont utilisées à des fréquences variant de quelques kHz à quelques MHz, tout dépend du type de matériau à caractériser. La fréquence d'utilisation des capteurs est généralement choisie en fonction de la pénétration dans la pièce des champs créés par la bobine excitatrice (capteur). Dans le cas de la caractérisation des pièces de très faible épaisseur ou de grande résistivité comme le carbone par exemple, il est souvent recommandé de travailler à des fréquences élevées (quelques MHz). L'effet de résonance de la bobine apparaît pour ces fréquences. Il faut alors soit concevoir des capteurs non résonants à ces fréquences ou prendre en compte l'effet capacitif dans les calculs de l'impédance.

➤ Effet de peau

L'intensité des courants de Foucault dans une pièce constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une résistivité électrique ρ ($\Omega.m$) et une perméabilité magnétique μ (Hm^{-1}),

diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration δ (en m), souvent nommée épaisseur de peau.

Si on considère une pièce plane infinie (grande épaisseur) et en (r, z) , excitée par une nappe de courants extérieure, de fréquence f , parallèle au plan. Il est montré que 63% du courant circule dans l'épaisseur de peau donnée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (I.6)$$

Cette expression permet de constater que :

- Pour un matériau donné (μ et ρ constantes), la valeur de δ augmente lorsque la fréquence f diminue et réciproquement (effet de peau),
- Pour une fréquence f donnée, les matériaux caractérisés par une perméabilité magnétique élevée (matériaux ferromagnétiques) ou une conductivité électrique importante (cuivre, aluminium) présentent une faible profondeur de pénétration.

➤ **Forme des capteurs**

En fonction de la géométrie de l'échantillon à caractériser, les capteurs CF peuvent prendre plusieurs formes différentes.

- Encerclant la pièce [9]: solénoïdal à air circulaire ou rectangulaire. La pièce rentre à l'intérieur du solénoïde, figure I. 24.

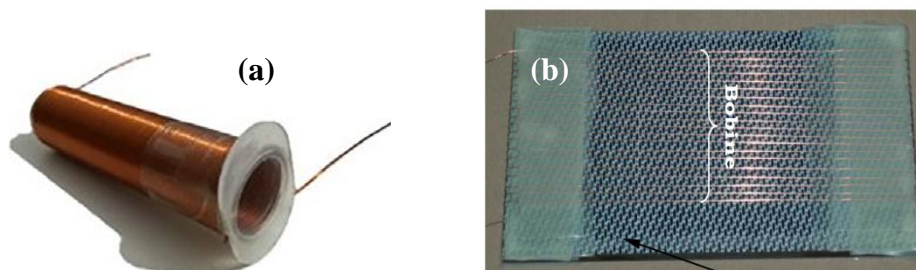


Figure I. 24 Capteur CF à air encerclant, a) Circulaire [43], b) Rectangulaire [10].

- Au-dessus de la pièce : Bobine à air plate pancake ou solénoïdale circulaire/rectangulaire. Le capteur peut être aussi mis en œuvre sur une ferrite (circuit magnétique) avec différente géométrie (U, E, I, ...) comme il est illustré sur la figure I. 25.

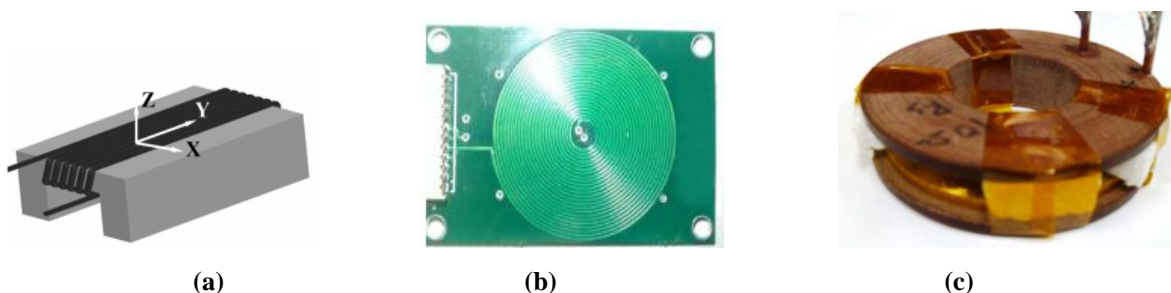


Figure I. 25 Capteur CF, a) Ferrite en U [44], b) bobine pancake plate [17], c) bobine circulaire [41].

➤ **Application de la méthode des courants induits sur les matériaux CRFC**

La méthode de mesure de la résistivité électrique des matériaux composites par les courants induits basée sur le même principe de contrôle non destructive par les courants de Foucault ce qui est la création des courants induits par un champ magnétique variable généré par un inducteur (bobine) appelée capteur, la variation de l'impédance dépend des caractéristiques de la résistivité électrique du matériau à contrôler.

Cette méthode est classée avec les méthodes de mesure de la résistivité sans contact avec le matériau à tester.

➤ **Grandeurs exploitables ou grandeurs d'influences [45]**

Pour quantifier les courants de Foucault, il est nécessaire de passer par des grandeurs mesurables (exploitables) exprimant leur effet telles que :

- Le champ d'induction magnétique : mesuré par effet Hall.
- L'impédance électrique : mesure de courant, tension et déphasage.

La mesure de ces grandeurs doit être effectuée comme suite :

- Pour l'Evaluation Non Destructif (END) ou Caractérisation par Courants de Foucault (CF) : on mesure la variation de la grandeur, définie par la différence entre la grandeur mesurée en présence de la cible à évaluer et la grandeur en l'absence de cette cible (mesure à vide).
- Pour le Contrôle Non Destructif par CF : variation de la grandeur en présence de la cible saine (matériau étalon) et en présence de la cible avec défaut et de même type de matériau.

Dans notre cas nous allons exploiter le calcul de l'impédance, étant donné que nous avons un moyen précis nous permettant de mesurer l'impédance de la bobine.

➤ **Limites de l'END par courants de Foucault**

- Ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- N'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- Interprétation des signaux souvent délicate.

I.9 Conclusion

Nous avons rappelé les différentes structures des matériaux composites, leurs caractéristiques et leurs utilisations dans les structures du génie civil. Nous avons aussi, présenté les différentes dégradations et défaillances des structures en composite à fibres de carbone durant

leurs utilisations et leurs fabrications. A la fin de ce chapitre nous avons mis l'accent sur les différentes techniques de caractérisations électriques appliquées aux matériaux CRFC.

Pour voir l'interaction et le comportement électromagnétique entre la sonde à courants de Foucault et le matériau CRFC, il est nécessaire de mettre en équation mathématique ou tout simplement modéliser le système de caractérisation, ça sera l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre II : Modélisation et Formulation Mathématiques d'END-CF

II.1 Introduction :

Le principe de fonctionnement de l'évaluation non destructif par courants de Foucault (END-CF) est basé sur les phénomènes d'électromagnétisme qui sont complètement exprimés par les équations de Maxwell associées aux lois constitutives de la matière [10].

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter les différentes lois mathématiques qui permettent la mise en équation du système d'END-CF. Ce dernier est complètement décrit par une équation aux dérivées partielles (EDP) associée à une représentation géométrique et à des conditions aux limites et/ou initiales. L'EDP est exprimée en fonction d'une grandeur physique d'état qui pourrait être un champ vectoriel (magnétique ou électrique, induction ou excitation) et/ou un potentiel vecteur (magnétique ou électrique) et/ou encore un potentiel scalaire (magnétique ou électrique) [17] [10].

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons voir comment obtenir cette EDP à partir de la combinaison des équations de Maxwell ou des équations qui en découlent, associées aux lois constitutives.

Comme la géométrie du problème de l'END-CF est généralement complexe et le domaine d'étude qui est de nature tridimensionnel ne peut être réduit à une dimension, il n'est donc pas évident de résoudre l'EDP qui en découle par des méthodes analytiques, on doit alors faire appel aux méthodes numériques. La méthode des éléments finis est la plus répandue pour la résolution des problèmes d'END-CF. Cette méthode sera abordée dans la troisième partie de ce chapitre.

Pour évaluer la résistivité électrique du matériau composite par la méthode expérimentale sans contact, la valeur de la grandeur mesurée est comparée plusieurs fois avec la valeur calculée pour différentes valeurs de la conductivité électrique. C'est un problème itératif, qui consiste à minimiser une fonction qui exprime la différence entre la valeur mesurée et la valeur calculée de la grandeur accessible. Cela est effectué de façon automatique par le biais de la technique du problème inverse associée à une méthode d'optimisation. Nous présenterons ces techniques dans la dernière partie de ce chapitre.

II.2 Modélisation électromagnétique

Les phénomènes électromagnétiques dans l'END-CF sont gouvernés par les équations de l'électromagnétisme comprenant les équations de Maxwell, les lois constitutives qui décrivent la nature du matériau et les conditions de passage des vecteurs champs électriques et magnétiques.

II.2.1 Equations de Maxwell

Tous les phénomènes d'électromagnétismes variables dans le temps et dans l'espace sont régis par les quatre équations de Maxwell suivantes :

La loi d'Ampère avec la correction apportée par Maxwell, exprime le fait que le champ magnétique peut être généré par un courant électrique (Un champ électrique variable crée un champ magnétique), elle est donnée par :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 1})$$

La loi de Faraday met en évidence comment la variation d'un champ magnétique peut induire un champ électrique, elle est donnée par :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 2})$$

La loi de Gauss en électricité décrit l'effet de la présence de charges électriques sur le champ de déplacement, elle est donnée par :

$$div(\vec{D}) = \gamma \quad (\text{II. 3})$$

La loi de Gauss en magnétisme exprime qu'il n'existe pas de charges magnétiques, elle est donnée par :

$$div(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II. 4})$$

Avec,

\vec{E} : Champ électrique en $[V/m]$

\vec{H} : Champ magnétique en $[A/m]$

\vec{D} : Induction électrique en $[A \cdot s/m]$

\vec{B} : Induction magnétique en $[T]$

\vec{j} : Densité du courant en $[A/m^2]$

γ : La charge volumique en $[C/m^3]$

II.2.2 Lois constitutives des matériaux

La nature de chaque milieu est décrite par une équation de comportement :

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

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

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \vec{v} \cdot \overrightarrow{rot} \vec{B} \quad (\text{II. 7})$$

Tell que :

μ_r : est la perméabilité magnétique relative du matériau et μ_0 la perméabilité magnétique du vide telle que : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m]

ε_r : est la permittivité électrique relative du matériau et ε_0 la permittivité électrique du vide, tel que : $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ [F/m]

ρ : est la résistivité électrique du matériau en [m·S⁻¹] ou [Ω ·m].

\vec{v} : Vitesse en [m/s].

II.2.3 Conditions de passage

Lors du passage d'un milieu à un autre, les grandeurs subissent des discontinuités et ne sont par conséquent pas différentiables. En intégrant les relations (II.1 à II.4) sur des volumes incluant les interfaces et en appliquant le théorème d'Ostrogradsky ou le théorème de Stokes, on obtient les conditions dites de passage.

Saut de la composante normale de l'induction électrique \vec{D} :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \gamma_s \quad (\text{II. 8})$$

Continuité de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B} :

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II. 9})$$

Saut de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{J}_{surf} \quad (\text{II. 10})$$

Continuité de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E} :

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{II. 11})$$

Avec \vec{n} vecteur unité normale dirigé du milieu (1) vers le milieu (2), γ_s représente la densité surfacique de la charge et J_{surf} la densité surfacique de courant.

II.2.3 Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux accomplis dans le domaine de calcul des champs et des courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, les hypothèses simplificatrices suivantes sont considérées :

- Les systèmes d'évaluation non destructif à courants de Foucault que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de du régime variable (magnétodynamique) à ybbasse fréquence. Pour les fréquences utilisées ici, le courant de déplacement est négligeable $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$ (Approximation des Régimes Quasi Stationnaires ARQS).

- Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité J de l'équation (II.1) peut être décomposée en deux parties : une partie imposée J_s (densité de courant source uniforme) et une partie induite J_{ind} due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation $\frac{1}{\rho}\vec{E}$ qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault.

- En outre, dans cette étude nous nous intéresserons, en particulier, qu'aux systèmes électromagnétiques lent ou sans mouvement ($\vec{v} = \vec{0}$) ce qui permet d'éliminer le terme $\frac{1}{\rho}\vec{v} \cdot \overrightarrow{rot}\vec{B}$ dans l'équation (II.7).

- La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\gamma = 0$) (régions conducteurs). Généralement, le courant n'existe qu'en volume ($\overrightarrow{J}_{surf} = \vec{0}$), c'est-à-dire que la conductivité électrique est finie et que la fréquence d'excitation n'excède pas quelques MHz (basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée.

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{0}$$

- Dans un milieu conducteur $\omega \cdot \epsilon_0 \ll \frac{1}{\rho}$ pour les fréquences inférieures à quelques MHz ce qui nous permet d'avoir avec $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$.

Tel que :

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$: est la pulsation électrique

f : La fréquence d'alimentation et $j^2 = -1$

Compte tenu de ces hypothèses les équations de Maxwell deviennent:

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -j\omega\vec{B} \quad (\text{II. 12})$$

$$div(\vec{D}) = 0 \quad (\text{II. 13})$$

$$\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \vec{J}_s + \frac{1}{\rho}\vec{E} \quad (\text{II. 14})$$

$$div(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II. 15})$$

L'équation (II.15) implique l'existence d'un potentiel vecteur \vec{A} à partir duquel dérive l'induction magnétique \vec{B} telle que :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{A}) = \vec{B} \quad (\text{II. 16})$$

Pour assurer l'unicité de la solution d'un système écrit avec les potentiels, il est nécessaire d'ajouter une condition dite "condition de Jauge". Les champs, dans les équations de Maxwell, s'expriment souvent soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel

près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution.

Soient \vec{A} le champ de vecteurs potentiels, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par :

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{II. 17})$$

$$\operatorname{div} \vec{A} + k \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{0} \quad \text{Jauge de Lorenz} \quad (\text{II. 18})$$

II.3 Formulation magnétodynamique (régime variable)

Pour simuler d'un problème d'END-CF il est nécessaire de mettre en place un modèle mathématique. Ce modèle est décrit par les équations de Maxwell, des lois de comportement et des conditions aux limites. Il faut définir les domaines de définition des variables électriques et magnétiques et des opérateurs différentiels.

Dans la littérature plusieurs formulations sont développées pour représenter le modèle de la magnétodynamique qui décrit les problèmes où des courants sont induits par des champs magnétiques variables. Les principales formulations rencontrées peuvent être classées en deux grandes familles :

Les formulations utilisant des variables de type champ : \vec{E} ou \vec{H}

Les formulations utilisant des variables de type potentiel : \vec{A} -V, \vec{T} - ϕ ou \vec{A}^*

II.3.1 Formulation en champ magnétique \vec{H}

On combinant les expressions II.5, II.12 et II.14, et en considérant le courant source uniforme (pas de variation spatiale) on obtient :

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}}(\rho \overrightarrow{\operatorname{rot}}(\vec{H})) + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II. 19})$$

Pour que l'avantage de cette formulation (avoir une solution unique si les conditions aux limites sont adéquate) [10] [46], alors que cette formulation ne nécessite aucune condition de jauge, généralement la résolution de la formulation en H utilisent la méthode des éléments finis et la méthode des éléments finis, [46] [47].

II.3.2 Formulation en champ électrique \vec{E} [10]

Cette formulation est déduite en appliquant le rotationnel à l'équation II.12 (courant source uniforme) et en remplaçant II.14 dans l'équation obtenue. L'EDP finale est :

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}}(\rho \overrightarrow{\operatorname{rot}}(\vec{E})) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II. 20})$$

II.3.3 Formulation en potentiel vecteur électrique (\vec{T} - ϕ)

Basée sur la formule qui stipule que la divergence de la densité du courant électrique est nulle ($div \vec{J} = 0$), ce qui permet de dire que la densité de courant électrique est une circulation d'un vecteur potentiel électrique [48] [10]:

$$\vec{J} = \overrightarrow{rot} \vec{T} \quad (\text{II. 21})$$

L'équation II.11 peut s'écrire sous la forme suivante:

$$\vec{H} = \vec{T} - \overrightarrow{grad} \phi \quad (\text{II. 22})$$

Tel que ϕ le potentiel scalaire magnétique.

La formulation finale à résoudre en \vec{T} - ϕ est:

$$\overrightarrow{rot}(\rho \overrightarrow{rot} \vec{T}) + \mu \frac{\partial(\vec{T} - \overrightarrow{grad} \phi)}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II. 23})$$

II.3.4 Formulation en potentiel scalaire magnétique \vec{H} - ϕ et \vec{H} - ϕ_r

Cette formulation à été développée pour la modélisation électromagnétique des régions minces [17] [24] [25] [49], dans le cadre des applications des courants induits.

Dans les régions dépourvues de courant, l'équation peut s'écrire :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{0} \quad (\text{II. 24})$$

D'où \vec{H} dérive d'un potentiel :

$$\vec{H} = -\overrightarrow{grad} \phi \quad (\text{II. 25})$$

On utilise l'équation II.24 on obtient

$$div(\mu(-\overrightarrow{grad} \phi)) = 0 \quad (\text{II. 26})$$

La continuité du potentiel scalaire magnétique ϕ dépend de la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique, la vérification de la continuité de la composante normale du champ magnétique à l'interface entre deux régions de perméabilités magnétiques différentes est donnée par:

$$(-\mu_1 \overrightarrow{grad} \phi_1) \cdot \vec{n} = (-\mu_2 \overrightarrow{grad} \phi_2) \cdot \vec{n} \quad (\text{II. 27})$$

Tel que \vec{n} est le vecteur normal à l'interface.

La décomposition de champ magnétique en deux composantes donne une formulation réduite qui permet de tenir compte des régions conductrices, tel que:

$$\vec{H} = \vec{H}_j + \vec{H}_r \quad (\text{II. 28})$$

\vec{H}_j : Champ source créé par l'inducteur et donné par la formule de Biot-Savart, en tout point L,

$$\vec{H}_j = \iiint_{\Omega} \frac{1}{4\pi} J_s \frac{LL'}{|LL'|^3} d\Omega \quad (\text{II. 29})$$

\vec{H}_r : Champ crée par la réaction des parties magnétiques et conductrices

La formule du théorème d'Ampère s'écrit:

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}_j + \vec{H}_r) = \vec{J}_s \quad (\text{II. 30})$$

Le champ \vec{H}_j est un champ source crée par le courant de source \vec{J}_s mais le champ \vec{H}_r ne vérifie pas le théorème d'ampère car son rotationnel est nul alors, donc les rotationnels de \vec{H}_j et \vec{H}_r s'écrivent comme suit:

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}_j) = \vec{J}_s \quad (\text{II. 31})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}_r) = \vec{0} \quad (\text{II. 32})$$

Alors la relation II.34 implique que \vec{H}_r est une dérivée d'un potentiel scalaire magnétique φ_r :

$$\vec{H}_r = -\overrightarrow{\text{grad}}\varphi_r \quad (\text{II. 33})$$

L'équation du champ magnétique total devient:

$$\vec{H} = \vec{H}_j - \overrightarrow{\text{grad}}\varphi_r \quad (\text{II. 34})$$

Dans la condition d'interface, il faut assurer la continuité de la composante normale de l'induction magnétique alors:

$$(\vec{H}_j - \mu_1 \overrightarrow{\text{grad}}\varphi_{r1}) \cdot \vec{n} = (\vec{H}_j - \mu_2 \overrightarrow{\text{grad}}\varphi_{r2}) \cdot \vec{n} \quad (\text{II. 35})$$

II.3.5 Formulation en potentiel vecteur magnétique \vec{A} -V

En remplaçant (II.16) dans (II.12), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II. 36})$$

Le rotationnel étant associatif on aura :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = \vec{0} \quad (\text{II. 37})$$

On remarque que la quantité $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$ est conservée, donc c'est une dérivée d'un potentiel V

alors : $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V)$

D'où:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}}(V)\right) \quad (\text{II. 38})$$

En considérant que \vec{E} est uniquement issu de la variation temporelle de \vec{A} , (pas de variation spatiale de V) on obtient $\overrightarrow{\text{grad}}(V) = \vec{0}$ et :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II. 39})$$

On remplace (II.39) dans (II.11) on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J}_s - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II. 40})$$

La combinaison entre les équations (II.16) et (II.5) donnent:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{II. 41})$$

En remplaçant (II.41) dans (II.40) :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + \frac{j\omega}{\rho} \vec{A} = \vec{J}_s \quad (\text{II. 42})$$

Dans le cadre de notre travail nous utiliserons la formulation en vecteur potentiel magnétique \vec{A} . Pour assurer l'unicité de la solution nous allons imposer une condition de jauge donnée par l'équation (II.17).

II.3.6 Domaine d'étude

Le domaine spatial naturel des problème physique est en trois dimensions. Dans la modélisation on peut avoir deux types de domaine d'étude selon la géométrie et les propriétés physiques du problème à étudier:

II.3.6.1 Domaine d'étude tridimensionnel 3D

Le domaine d'étude naturel est en trois dimensions. Ce domaine est appliqué lorsque il n'y a aucune symétrie géométrique par rapport un axe d'un point de vu géométrique, ni invariance des grandeurs d'états avec lequelles sont exprimées l'EDP.

Aussi, lorsque les propriétés physiques ne sont pas isotropes, il n'est possible de réduire le domaine que si la composante du tenseur de la propriété physique est négligeable devant les autres ou dans le cas ou le vecteur d'état (comme la densité de courant) évite le passage suivant une les directions principales comme illustre dans la figure II. 1.

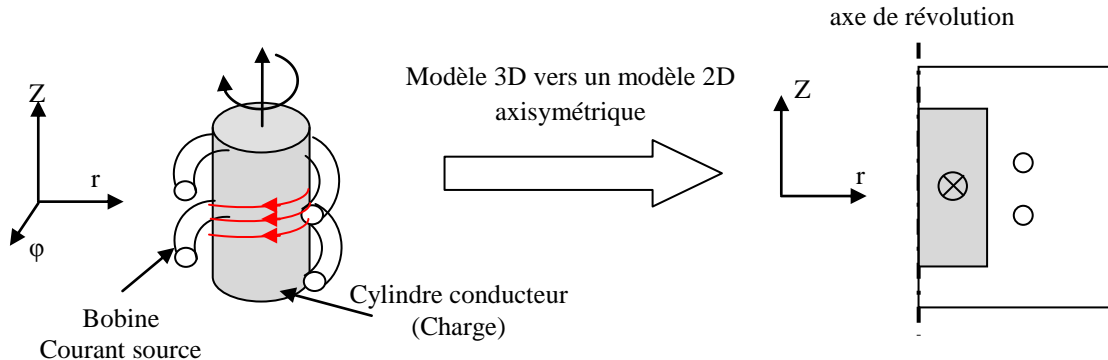


Figure II. 1 réduction de domaine 3D vers le domaine 2D axisymétrique.

II.3.6.2 Modèle 2D

a. 2D Cartésien

La modélisation de l'équation du potentiel vecteur magnétique A dans le système de coordonnées cartésien bidimensionnel (x,y) appliqué dans les problème infini dans une direction [10](voir la figure II. 2), le vecteur potentiel magnétique a une seul composant suivant l'axe z $A(0, 0, A_z)$, l'équation magnétodynamique en coordonnées cartésienne s'écrit come suit:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial t} = -J \quad (\text{II. 43})$$

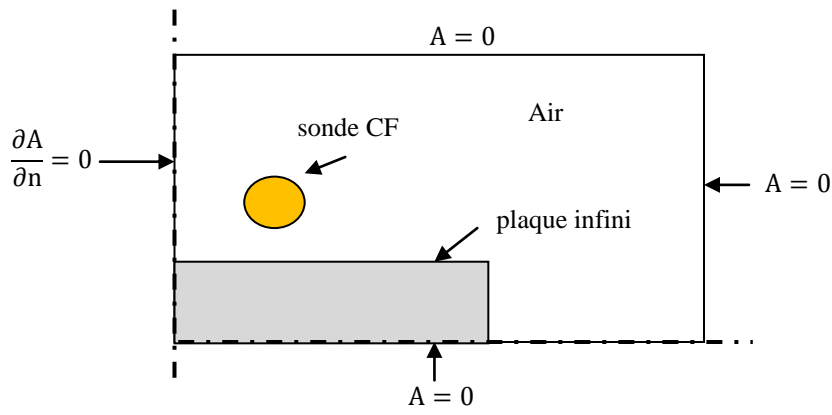


Figure II. 2 Modèle magnétodynamique en coordonnées cartésien

b. 2D cylindrique

En coordonnée cylindrique le potentiel vecteur magnétique ne présente que la composante Ortho-radiale, d'où $\vec{A}(0, A_\varphi, 0)$ et $\vec{j}(0, J_\varphi, 0)$ comme la montre dans la figure II. 3.

Dans les coordonnées cylindriques nous avons:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_r & r\mathbf{u}_\varphi & \mathbf{u}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \mathbf{0} & rA_\varphi & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 44})$$

alors le rotationnel de A_φ devient:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_r & r\mathbf{u}_\varphi & \mathbf{u}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} & \mathbf{0} & \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

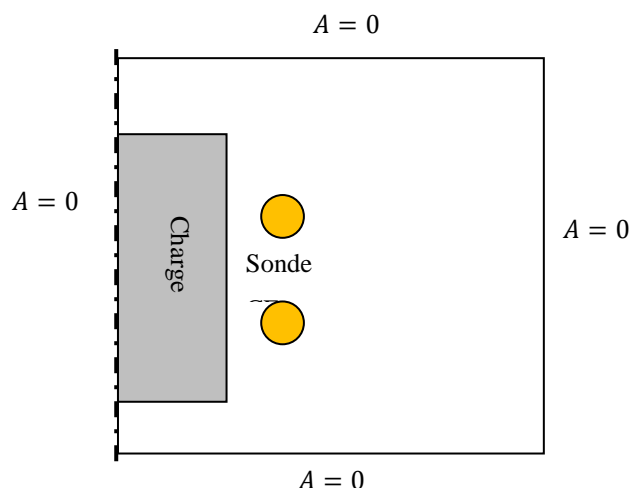


Figure II. 3 Géométrie du modèle bidimensionnel magnétodynamique en coordonnées cylindriques.

II.3.7 Conditions aux limites

Cette équation étant posée, leur solution dépend entièrement des conditions aux limites qui sont associées. On distingue trois types de conditions aux limites :

a. Condition de Dirichlet (ou condition du premier problème aux limites) : on cherche une solution de l'EDP dont la valeur de la grandeur d'état prend des valeurs données sur le bord du domaine, on cherche donc à résoudre le système d'équation [50]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & \mathbf{x} \in \Omega \\ A = A_0 & \mathbf{x} \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II. 46})$$

b. Condition de Neumann (ou condition du deuxième problème aux limites) : on cherche la solution de l'EDP dont la valeur du gradient de la grandeur d'état est connue sur le bord du domaine de résolution, notant que \mathbf{n} la normal unitaire dirigée vers l'extérieur de Ω , on cherche donc à résoudre le problème [50]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & \mathbf{x} \in \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial \mathbf{n}} = A_n & \mathbf{x} \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II. 47})$$

c. Conditions mixtes (ou condition de Dirichlet Neumann) [50]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & \mathbf{x} \in \Omega \\ a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial \mathbf{n}} = c & \mathbf{x} \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II. 48})$$

Où : a, b sont des constantes et A et l'inconnus du problème.

On note que :

Δ : L'opérateur Laplacien

f : Terme source.

Ω : le domaine d'étude.

$\partial\Omega$: le bord du domaine d'étude.

Le choix de la formulation dépend du problème à résoudre. Comme dans le cas des régions mince la formulation en potentiel scalaire magnétique réduite $H\text{-}\phi_r$ est choisie par rapport aux autres formulations [10].

II.4 Résolution numérique des EDPs

Dans cette partie nous allons présenter les différentes méthodes de modélisation numérique utilisées pour la résolution des EDPs exprimées par les différentes formulations vues précédemment [24] [17] [25] [49].

Pour les EDPs des problèmes dont la géométrie, les matériaux et la grandeur d'état permettent de réduire l'étude en deux dimensions, la méthode de résolution la plus utilisée est la méthode des éléments finis nodaux.

Pour les problèmes tridimensionnels à grandeur d'état vectoriel, l'EDP peut être résolue par la méthode des éléments finis nodaux ou d'arrêtes [51] [52] ou par la méthode des volumes finis [53] [54].

Dans notre cas nous utiliserons la méthode des éléments finis implémentée en 2D sous Matlab PDETool et en 3D sous Cedrat/Flux 3D.

II.4.1 Formulation éléments finis 2D [50]

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser plus précisément à la méthode des éléments finis ainsi qu'à la formulation éléments finis des EDPs en régime variable.

II.4.1.1 Discrétisation du domaine 2D

Le domaine d'étude est discrétisé en petits sous domaines souvent triangulaires appelés éléments finis. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément, grâce aux fonctions d'interpolation. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue (grandeur d'état) aux nœuds de cet élément. On parle alors d'interpolation nodale. Des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques, figure II. 4.

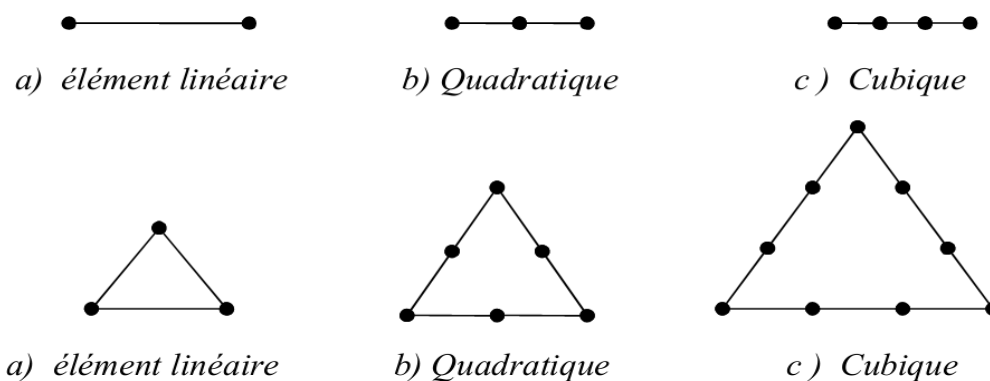


Figure II. 4 éléments de discrétisation.

II.4.1.2 Fonction d'interpolation

Ces fonctions sont construites de telle sorte à obéir à trois principes :

- Le nombre de termes de la fonction doit être égal au nombre de nœuds de l'élément;
- La fonction doit contenir un terme constant;
- La continuité.

Dans le cas d'un élément triangulaire linéaire, la fonction d'interpolation est donnée par:

$$u(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \quad (\text{II. 49})$$

II.4.1.3 Fonction d'approximation sur l'élément

Dans le cas d'élément triangulaire linéaire, approximation d'une fonction $a(x, y)$ de valeurs a_1, a_2 et a_3 respectivement aux sommets 1, 2 et 3, est de la forme suivante :

$$a(x, y) = [N_1(x, y) \quad N_2(x, y) \quad N_3(x, y)] \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 50})$$

Avec :

$$N_1(x, y) = \frac{1}{2\Delta} \cdot [(y_3 - y_2) \cdot (x_2 - x) - (x_3 - x_2) \cdot (y_2 - y)] \quad (\text{II. 51})$$

$$N_2(x, y) = \frac{1}{2\Delta} \cdot [(y_1 - y_3) \cdot (x_3 - x) - (x_1 - x_3) \cdot (y_3 - y)] \quad (\text{II. 52})$$

$$N_3(x, y) = \frac{1}{2\Delta} \cdot [(y_2 - y_1) \cdot (x_1 - x) - (x_2 - x_1) \cdot (y_1 - y)] \quad (\text{II. 53})$$

Où Δ est la surface du triangle décrit par les sommets.

$N(x, y)$: fonction d'interpolation.

II.4.1.4 Fonction d'interpolation sur le domaine

Dans le domaine global contenant N nœuds, l'inconnue s'exprime alors :

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \quad (\text{II. 54})$$

N , α_j et A_j respectivement le nombre de nœuds, Fonction d'interpolation au nœud j et Inconnue au nœud j , alors le modèle élément finis est donnée comme suite:

$$- \iint_{\Omega} \alpha_i \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A'_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A'_\varphi}{\partial z} \right) \right) drdz + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \rho_t A'_\varphi drdz = \iint_{\Omega} \alpha_i J_\varphi drdz \quad (\text{II. 55})$$

En remplace A'_φ par la formule discrétisé

$$A'_\varphi = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \quad (\text{II. 56})$$

On aura :

$$\sum_{j=1}^N \iint_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu_0 r} \vec{\nabla} \alpha_i \cdot \vec{\nabla} \alpha_j drdz \right) A_j + j\omega \sum_{j=1}^N \iint_{\Omega} \left(\alpha_i \rho_t \alpha_j \frac{drdz}{r} \right) A_j = - \iint_{\Omega} \alpha_i J_\varphi drdz \quad (\text{II. 57})$$

Pour l'implémentation du modèle on procédera à plusieurs étapes pour définir la solution de l'équation décrite précédemment citées peuvent se résumer sous la forme de l'organigramme suivant (voir la figure II. 5) [50] :

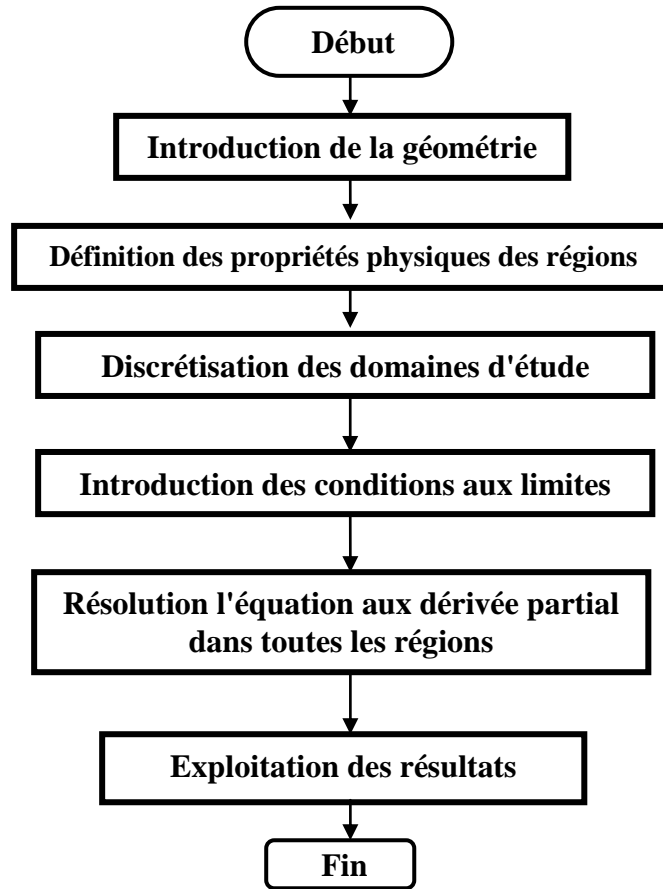


Figure II. 5 Organigramme de résolution par éléments finis.

La composante transversale de la résistivité électrique est obtenue par le biais de la méthode du problème inverse. La fonction but objectif est minimisée par la méthode des colonies de fourmis qui sera présentER dans la section suivante.

II.5 Problème inverse et optimisation

II.5.1 Problème inverse

Le problème inverse consiste à déterminer les paramètres d'entrées à partir des paramètres de sorties en se basant sur un algorithme d'optimisation de type déterministe ou stochastique. Généralement les grandeurs de sortie sont des valeurs mesurables. Le problème inverse est exprimé sous forme d'un algorithme itératif pour identifier les paramètres d'entrées. Plusieurs travaux ont utilisé la méthode de problème inverse par une approche déterministe dans l'identification des composantes du tenseur de résistivité ou de conductivité électrique d'un

matériau composite [24] [25], figure II. 6, ou le dimensionnement optimal d'un capteur à courants de Foucault à champ rotatif [17].

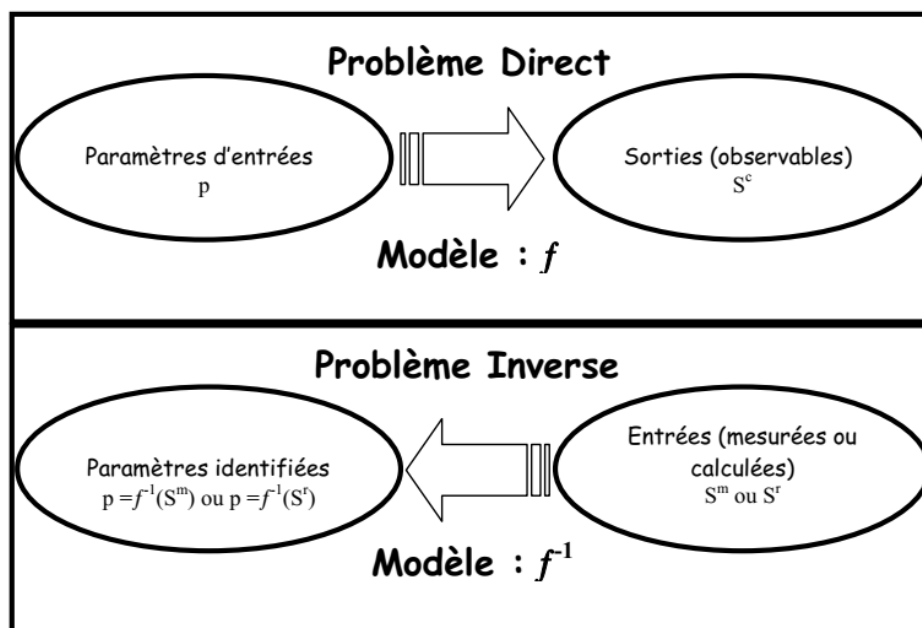


Figure II. 6 Problème inverse et problème directe [10].

Dans notre cas d'étude, pour remonter aux grandeurs d'entrées, on va utiliser l'algorithme des colonies de fourmis pour minimiser la fonction but, construite en faisant la différence au sens des moindres carrés de la grandeur de sortie issue du problème direct (modèle numérique par élément finis) et celle issue de la mesure expérimentale .

II.5.2 Méthodes d'optimisation

Plusieurs méthodes d'optimisation peuvent être utilisées pour minimiser la fonction objectif. Tout dépend du nombre de paramètres d'entrée à identifier. On cite ci-dessous trois méthodes que nous avons pu implémenté.

II.5.2.1 Algorithme des simplexes de Nelder-Mead

La technique de Nelder – Mead a été proposée par John Nelder et Roger Mead en 1965 [55]. C'est une méthode numérique couramment utilisée pour trouver le minimum ou le maximum d'une fonction dans un espace multidimensionnel. C'est une approche de recherche directe (basée sur la comparaison de fonctions) qui est souvent appliquée aux problèmes d'optimisation non linéaire [56].

II.5.2.2 Algorithme du recuit simulé

Le recuit simulé (Simulated Annealing SA) est une technique probabiliste métaheuristique permettant d'approcher l'optimum global d'une fonction donnée. C'est une méthode

l'optimisation globale dans un grand espace de recherche. Elle est souvent utilisée lorsque l'espace de recherche est discret [57] [58].

Le nom et l'inspiration viennent du recuit en métallurgie, une technique impliquant le chauffage et le refroidissement contrôlés d'un matériau pour augmenter la taille de ses cristaux et réduire leurs défauts, cette opération suit les étapes suivantes:

La température d'un métal solide augmente jusqu'à ce qu'il fonde dans un bain chauffant;

Le métal est ensuite refroidi avec soin jusqu'à ce que les particules soient disposées à l'état fondamental du solide.

Après cette opération les propriétés physiques du métal vont changer car sa structure interne change, cela se produira si la température maximale est suffisante et diminue lentement [57] [58].

II.5.2.3 Algorithme de colonie de fourmis

L'algorithme des colonies de fourmis (Ant Colony Optimization (ACO)) est une méthode méta-heuristique pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire [59] [60]. La source d'inspiration de l'ACO est la traînée de phéromone qui pose et suit le comportement des vraies fourmis, qui utilisent des phéromones comme moyen de communication. Par analogie avec l'exemple biologique, l'ACO est basé sur une communication indirecte au sein d'une colonie d'agents simples, appelés fourmis (artificielles), méditée par des traces de phéromones (artificielles) [86][62]. Les traces de phéromones dans ACO servent d'informations numériques réparties, que les fourmis utilisent pour construire de façon probabiliste des solutions au problème à résoudre et que les fourmis adaptent pendant l'exécution de l'algorithme pour refléter leur expérience de recherche [61][85].

Les étapes pour que les fourmis trouvent le chemin le plus court sont présentés comme suit, figure II. 7, [85]:

Les fourmis arrivent à un point de décision.

Certaines fourmis choisissent le chemin supérieur et d'autres le chemin inférieur. Le choix est aléatoire.

Comme les fourmis se déplacent approximativement à une vitesse constante, les fourmis qui choisissent la trajectoire inférieure la plus courte atteignent le point de décision opposé plus rapidement que celles qui choisissent la trajectoire supérieure, plus longue.

La phéromone s'accumule à un rythme plus élevé sur le trajet le plus court. Le nombre de lignes pointillées est approximativement proportionnel à la quantité de phéromone déposée par les fourmis.

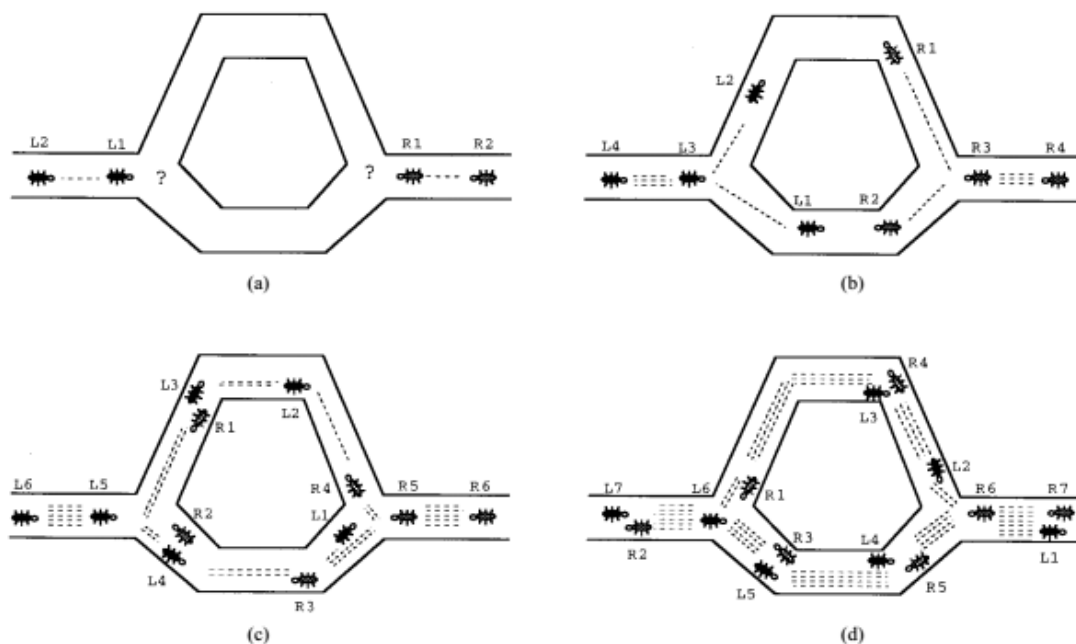


Figure II. 7 Comment les fourmis trouvent le chemin le plus court [85].

II.6 Conclusion

Les équations étant formulées, pour la résolution nous avons utilisé la méthode des éléments finis par le biais du logiciel CEDRAT-Flux 2D/3D. Ce dernier est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques (électromagnétique, thermique ou mécanique) caractérisant un problème réel. C'est pour ces raisons qu'on a jugé utile d'utiliser ce logiciel comme outil de résolutions pour les différents cas à étudier.

Chapitre III: Conception des sondes d'END-CF dédiées à l'évaluation de la résistivité électrique des CRFC

III.1 Introduction:

Un des intérêts de l'END par CF porte sur sa sensibilité à l'évaluation d'une large gamme de valeurs de la résistivité électrique des matériaux conducteurs. Les tiges composites en fibres de carbone, éléments essentiels dans les constructions du génie civil, sont des matériaux conducteurs qui présentent un caractère hétérogène et anisotrope. Les matériaux CRFC possèdent une résistivité élevée et souvent tensorielle, elle dépend directement de la géométrie et du pourcentage du renfort en carbone, elle peut varier de $0.02 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$ à $12.5 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$ [9]. Les tiges CRFC-UD, possèdent une composante ortho-radiale du tenseur de résistivité très importante, souvent inférieure à $0.01 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$. L'utilisation des sondes CF pour la mesure de résistivité, aux fréquences inférieures à 1MHz, induit une épaisseur de peau très élevée dans la tige par rapport à son rayon ($\leq 8\text{mm}$). Il faut alors augmenter la fréquence au delà de 1MHz pour ramener l'épaisseur de peau à une valeur inférieure ou égale au rayon des tiges (zone d'efficacité de la sonde CF). Aux fréquences élevées, un effet indésirable, dû aux capacités parasites dans la sonde CF, apparait. Cet effet dépend à la fois du nombre de spires et du nombre de couches de spires des sondes CF, elle dépend également de la permittivité diélectrique de la vernie utilisée pour isoler les conducteurs en cuivre. Il est alors nécessaire de considérer cet effet pour une meilleure conception des sondes CF.

Cet effet et les effets de peau et de proximité seront discutés dans ce chapitre.

III.2 Modèle de la bobine à air:

Les bobines peuvent être représentées par des circuits équivalents qui permettent la prise en compte approximative de leur comportement électromagnétique comme le montre dans la figure III.1.

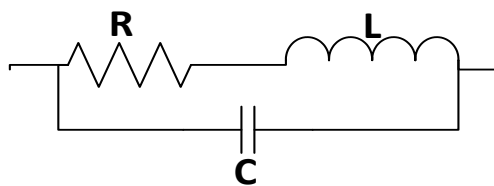


Figure III. 1 Circuit équivalent d'une bobine dans les fréquences élevées.

Aux hautes fréquences, les bobines ont un comportement très différent de celui des faibles fréquences. Les effets de peau et de proximité entraînent une augmentation des résistances parasites de l'enroulement avec la fréquence de fonctionnement, et les capacités parasites de connexion ne peuvent pas non plus être négligées, [62] [63] [64].

Par conséquent, les parties réelle et imaginaire de l'impédance globale de la bobine peut être significativement affectée par ces phénomènes. Les capacités parasites sont des paramètres distribués qui sont négligeables aux basses fréquences mais jouent un rôle de plus en plus

important à mesure que la fréquence de fonctionnement augmente. L'inductance elle-même n'est pas constante lorsque la fréquence change. Ainsi, la prédiction théorique de la réponse en fréquence d'une bobine est une tâche difficile.

Des nombreux travaux sur la fréquence auto-résonante des bobines sont utilisés des approches géométriques avec la définition des auto-condensateurs qui dépendent de la distance et de la surface effective des spires de la bobine, [65] [66] [67].

Nous montrons ci-dessous (figure III.2) le comportement d'une sonde CF dans les fréquences 20Hz à 0.6MHz. Cette sonde se présentant sous forme d'une bobine à air avec un nombre de 4 couches et 51 spires dans chaque couche, les diamètres extérieurs et intérieurs respectivement sont de 32.28 mm et 26.26 mm.

L'évolution de la partie réelle de l'impédance globale de la bobine issue de la simulation par Flux 2D/3D qui ne tient pas compte de l'effet capacitif est très différente des résultats issus des mesures expérimentales. Ce qui nécessite alors la prise en compte de l'effet capacitif dans le modèle.

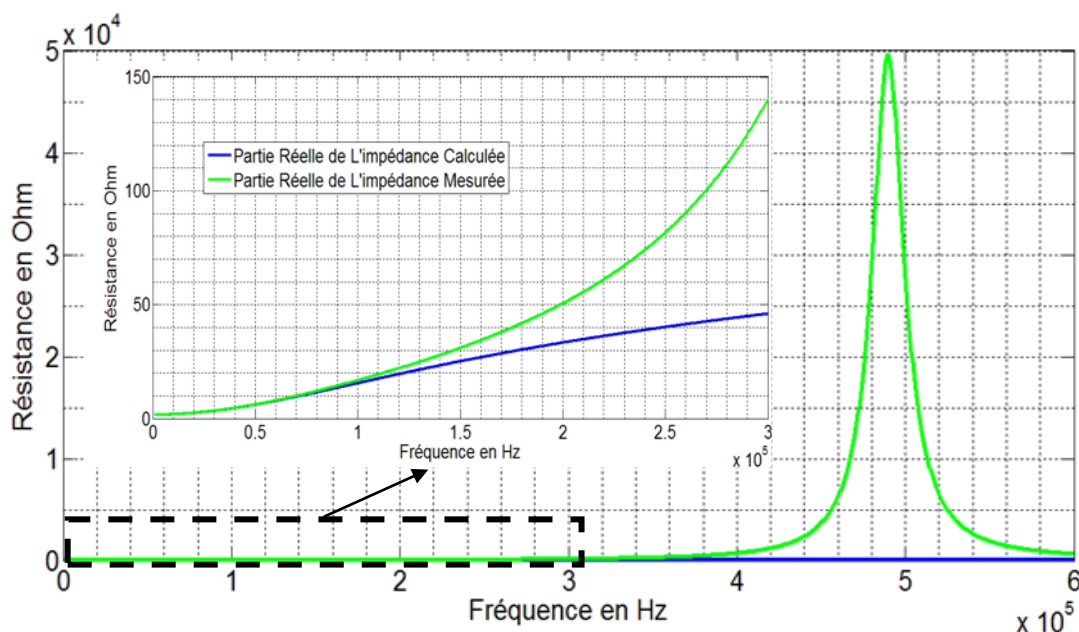


Figure III. 2 La partie réelle de l'impédance calculée et mesurée en fonction de la fréquence.

III.2 Fréquence de résonance:

Dans un circuit électrique, la condition qui existe lorsque la réactance inductive et la réactance capacitive sont de magnitude égale, provoquant l'oscillation de l'énergie électrique entre le champ magnétique de la bobine et le champ électrique du condensateur. Dans le cas des bobines la résonance se produit parce que le champ magnétique génère un courant électrique dans ses enroulements qui charge le condensateur et que le condensateur de décharge fournit un courant électrique qui crée le champ magnétique dans la bobine et le processus est répété.

La résonance d'un circuit RLC série se produit lorsque les réactances inductives et capacitives ont une amplitude égale mais s'annulent mutuellement parce qu'elles sont espacées de 180 degrés, figure III. 3. Le minimum d'impédance qui se produit est utile dans les applications de réglage.

Avec l'impédance totale du circuit RLC respectivement en topologie série Z_{eqs} et en topologie parallèle Z_{eqp} sont donné par:

$$Z_{eqs} = R + j \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \quad (\text{III. 1})$$

$$Z_{eqp} = \frac{R + j\omega [L(1 - \omega^2 LC) - CR^2]}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2} \quad (\text{III. 2})$$

La fréquence de résonance est donné par:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{III. 3})$$

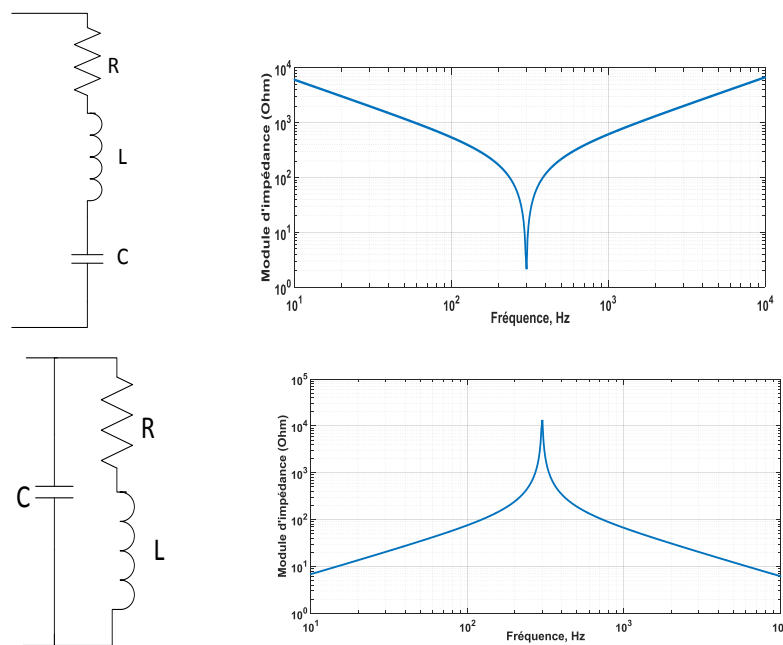


Figure III. 3 Topologies en série et en parallèle d'un circuit RLC.

III.3 Comportements électromagnétique des conducteurs

III.3.1 Effet de peau

L'effet de peau ou l'effet pelliculaire est un phénomène électromagnétique, qui a tendance à localiser la densité de courant dans les couches périphériques du conducteur et cela de manière de plus en plus marquée et à mesure que la fréquence augmente. Par conséquent, plus la fréquence augmente, plus la section réelle du conducteur est faible et la résistance du câble croit en fonction de la fréquence [68] [62] [63].

La figure III.4 montre la distribution de la densité de courant dans un conducteur cylindrique en cuivre avec un diamètre de 1 mm et 1MHz de fréquence simulé sous Flux 2D.

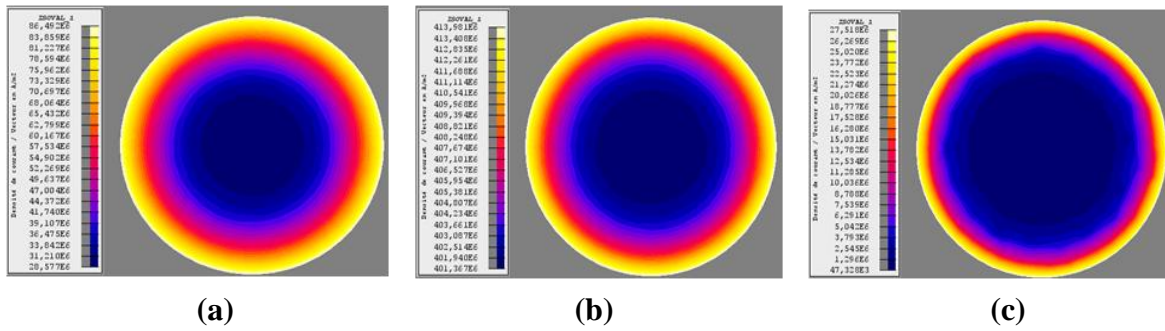


Figure III. 4 Densité du courant J (A/m²) pour (a) 50kHz, (b) 500kHz et (c) 5MHz.

On remarque que la distribution de la densité de courant décroît dans le conducteur à partir de la surface de façon hyperbolique suivant le rayon. L'épaisseur de peau dans un matériau conducteur de rayon r , est inversement proportionnelle à la fréquence. Elle est donnée par l'expression :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad \text{(III. 4)}$$

μ : la perméabilité du matériau conducteur,

σ : La conductivité du matériau conducteur,

f : la fréquence d'excitation du conducteur

La densité de courant peut s'exprimer par la relation:

$$J = \frac{I}{S} \quad \text{(III. 5)}$$

J : la densité du courant dans le conducteur

I : valeur efficace du courant de fréquence f qui parcourt le conducteur.

S : la surface parcouru par la densité du courant J tel que:

$$S = \pi (r^2 - (r - \delta)^2) \quad \text{(III. 6)}$$

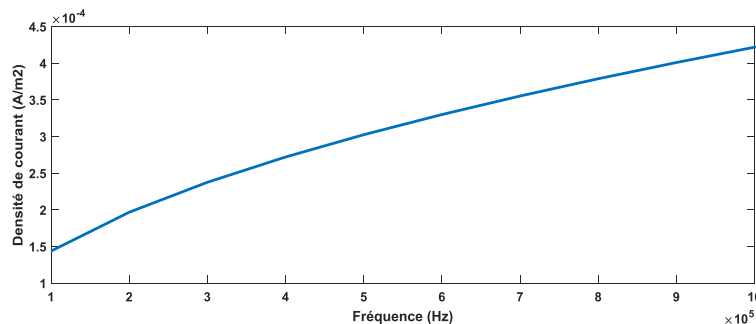


Figure III. 5 Densité de courant en fonction de la fréquence.

L'évolution de la densité de courant dans un conducteur en cuivre de diamètre de 1mm, alimenté par un courant alternatif aux fréquences de 100kHz à 1MHz est représentée par la figure III. 5, on peut constater qu'il y a une croissance de la densité de courant, cela est due à la diminution de l'épaisseur de peau lorsque la fréquence augmente.

III.3.2 Effet de proximité

Lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant variable, il crée un champ magnétique variable dans lequel se trouvent plongés les conducteurs voisins. Les variations de champs engendrant un flux variable à travers les sections du conducteur qui induit des courants de Foucault dans les conducteurs voisins, figure III.6. Ces courants induits augmentent avec la fréquence ce qui engendre des pertes par effets Joule dans les conducteurs voisins [68]. On traduit généralement cette augmentation des pertes par une augmentation de la résistance des conducteurs. L'effet de proximité est donc lié à l'apparition des courants de Foucault entre conducteurs voisins. Trois types d'effet de proximité peuvent être distingués: les effets de proximité induit, direct et inverse.

a) Effet de proximité induit

C'est un phénomène de couplage mutuel qui apparaît lorsque des conducteurs situés à proximité et parcourus par un courant alternatif.

Afin d'illustrer ce phénomène nous présentons sur la figure III.6 le résultat d'une simulation numérique qui met en évidence cet effet. Sur cette dernière, le conducteur 1 (à gauche) est traversé par le courant source. Dans le conducteur 2 (à droite), il existe une densité du courant induite ayant une direction opposée dans la partie proche du conducteur 1 empêchant le champ créé par ce dernier de pénétrer. Le courant dans le conducteur 2 se referme alors dans sa partie droite.

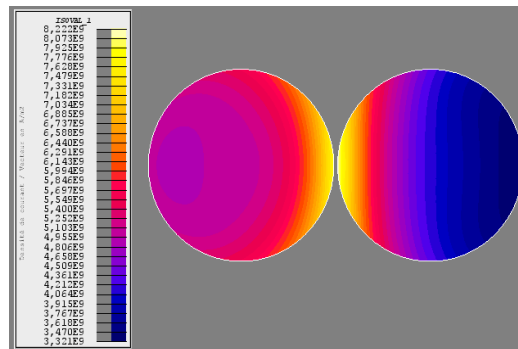


Figure III. 6 L'effet de proximité, densité du courant J (A/m²).

b) Effet de proximité direct

Ce cas concerne l'influence mutuelle de courants dans des conducteurs proches parcourus dans le même sens. La densité de courant se concentre alors aussi sur les faces opposées. Sur la figure III.7 nous avons repris le cas présenté précédemment en appliquant deux courants identiques dans le même sens dans les deux conducteurs [62] [63].

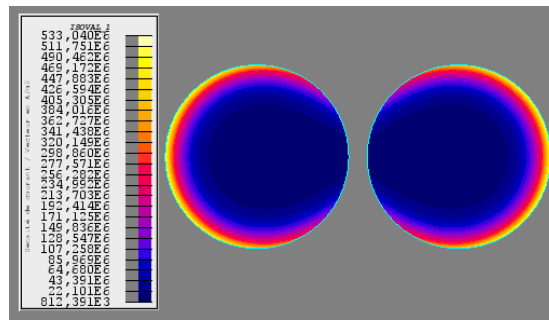


Figure III. 7 L'effet de proximité direct, densité du courant J (A/m²)

c) Effet de proximité inverse

Ce cas est proche du cas précédent mais les conducteurs sont parcourus par des courants en sens inverse.

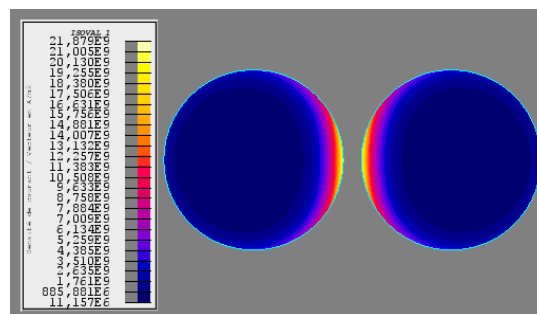


Figure III. 8 L'effet de proximité inverse, densité du courant J (A/m²).

Un exemple du phénomène de proximité inverse est présenté sur la figure III.8. Dans ce cas, la densité de courant sur les faces en regard augmente contrairement au cas précédent où les conducteurs sont alimentés dans le même sens.

III.4 Formules de calcul des capacités parasites dans les bobines

Plusieurs études ont été faites pour l'identification des capacités parasites dans les bobines. La plupart de ces études sont basées sur des formules empiriques comme la formule de Medhurst et Palermo. D'autres études ont utilisé des approches analytiques basées sur l'analyse géométrique des bobines comme présenté par la suite.

III.4.1 Formule de Medhurst [94]

La solution au manque de la théorie crédible était de faire de l'auto-capacité mesurée sur un grand nombre de bobines d'essai, toutes enroulées sur des barres de polystyrène solide [69]. Medhurst a ensuite corrigé les données pour les souches et les a adaptées à la formule de régression, dans son meilleur état d'optimisation, figure III. 9, [69]:

$$C_M = \frac{4\epsilon_0}{\pi} \cdot l \left[1 + 0.8249 \left(\frac{D}{l} \right) + 2.329 \left(\frac{D}{l} \right)^{3/2} \right] \quad (\text{III. 4})$$

Tel que : l la longueur de la bobine, D le diamètre de la bobine.

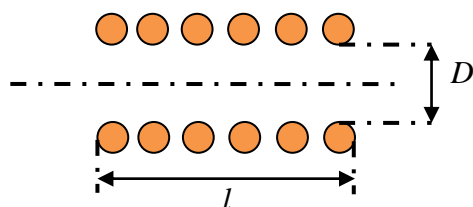


Figure III. 9 Dimensionnements de la bobine selon le model de Medhurst.

III.4.2 Formule de Palermo [70]

Le papier de 1934 de Palermo a été mentionné plus tôt comme la source de frustrations de Medhurst. Le modèle de Palermo, en utilisant un argument quelque peu douteux impliquant la charge, affirme que, puisque la tension entre les spires adjacentes est de $1/N$ fois la tension dans toute la bobine, nous devrions prendre l'auto-capacité de la bobine $1/N$ fois alors la capacité parasite est donnée par [70]:

$$C_P = \frac{\varepsilon_0 \pi^2 D}{\text{Arccosh}\left(\frac{p}{d}\right)} \quad (\text{III. 5})$$

Tel que p le pas de bobinage, d le diamètre de fil de bobinage, figure III. 10.

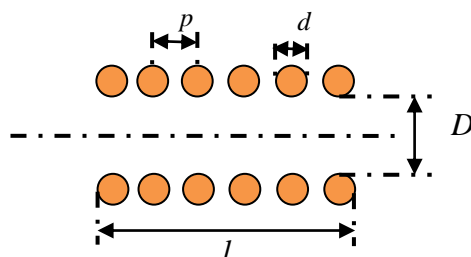


Figure III. 10 Dimensionnements de la bobine selon le model de Palermo.

III.4.3 Formule GMRK [66]

L'hypothèse de la «capacité entre les spires adjacentes» a refait surface en 1999, dans un article de Grandi, Kazimierczuk, Massarini et Reggiani (GKMR). Ces auteurs citent Medhurst, seulement pour écarter son travail d'être empirique. Dans l'approche GKMR, la bobine est considérée comme équivalente à un ensemble d'anneaux de connexion. Dans ce cas, comme il existe $N-1$ intervalles entre N tours, la capacité d'une bobine isolée est donnée par la capacité entre toute paire d'anneaux divisée par $N-1$. La longueur d'un anneau est $\pi \cdot D$, cette formule peut appliquer sur le bobine monocouche et les bobine multicouches [65] [71].

$$C_{GKMR} = \frac{\varepsilon_0 \pi^2 D}{(N-1) \cdot \ln \left[\frac{p}{d} + \sqrt{\left(\left(\frac{p}{d}\right)^2 - 1\right)} \right]} \quad (\text{III. 6})$$

Toutes les formules précédentes telles que Palermo et Mudhurst sont empiriques, mais la formule de GMRK est issue d'un modèle analytique basé sur l'analyse géométrique des bobines et l'équation générale de la capacité électrique [65] [71].

Dans ce travail nous allons présenter une étude de comportement électromagnétique des bobines avec et sans prise en compte des capacités parasites entre les spires et entre les couches en utilisant une approche numérique avec un couplage circuit.

III.5 Modèle des bobines à air sans et avec effet capacitif

Cette étude a été effectuée pour voir le comportement électromagnétique dans deux types de bobines (bobine monocouche et bobine multicouche) tel que l'influence de la distribution de la densité de courant dans chaque spire et chaque couche des bobine (effet de proximité), en plus l'influence de l'augmentation de la fréquence sur le comportement résistif et le comportement inductif des bobines, les capacités parasites sont intégrées dans le couplage circuit avec le modèle numérique.

III.5.1 Modèle d'une bobine à air sans effet capacitif

Le modèle numérique peut être exprimé dans un domaine axisymétrique 2D en utilisant la formulation en potentiel vecteur magnétique A (Eq II.56). Pour calculer la résistance et la réactance de la bobine, il faut résoudre l'équation électromagnétique (Eq II.58) par le modèle éléments finis, figure III. 11.

Le potentiel vecteur magnétique A est calculé dans les parties conductrices (bobine). La résistance de la bobine R_{bcal} et la réactance X_{bcal} varient successivement en fonction de la fréquence et sont calculées en utilisant les expressions suivantes :

$$R_{bcal} = -2\pi \omega N_{spir}^2 Imag(A) \quad (III. 7)$$

$$X_{bcal} = 2\pi \omega N_{spir}^2 Real(A) \quad (III. 8)$$

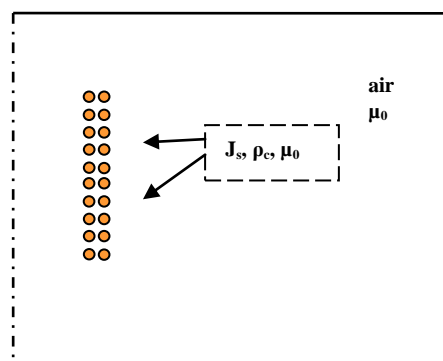


Figure III. 11 Modèle Magnétodynamique.

σ_c : La conductivité électrique de cuivre 58MS/m.

Nous avons utilisé le logiciel Flux 2D à partir duquel nous avons déterminé les résistances et les réactances des spires constituant la bobine en fonction de la fréquence.

Les valeurs des résistances et des réactances globales de la bobine sont également prélevées expérimentalement.

III.5.2 Modèle d'une bobine à air avec effet capacitif

Dans le cadre de l'étude du comportement électromagnétique des sondes CF en fonction de la fréquence on a réalisé deux types de bobines, le premier type concerne les bobines monocouches et le deuxième concerne les bobines multicouches pour voir l'influence de la conception des bobines sur le phénomène d'auto-résonance.

III.5.2.1 Bobine monocouche

La bobine monocouche est plus simple à réaliser. Son modèle électrique équivalent est simple à développer. Les paramètres géométriques de la bobine sont présentés dans le tableau III. 1:

H_b	R_{cu}	N_{couche}	$N_{section}$	R_{bext}	R_{bint}	Dis_V
101mm	0.25mm	1	208	9mm	8mm	$\frac{(H_b - 2 \cdot R_{cu})}{(N_{spire} - 1)}$

Tableau III. 1 Paramètres géométrique d'une bobine à une seule couche.

H_b : hauteur de la bobine; R_{cu} : Rayon du cuivre; N_{couche} : Nombre de couches; N_{spire} : Nombre de spires; R_{bext} : Rayon extérieur de la bobine; R_{bint} : Rayon interne de la bobine; Dis_V : Distance inter spires.

Le schéma électrique équivalent d'une bobine monocouche dans les basses fréquences est représenté sur la figure III.12a, tel que chaque spire est représentée par une résistance en série avec une réactance, mais pour les hautes fréquences on ajoute un condensateur représentant l'effet capacitif entre chaque les spires voisines tel que tout les condensateurs sont égaux comme il est illustré sur la figure III.12b.

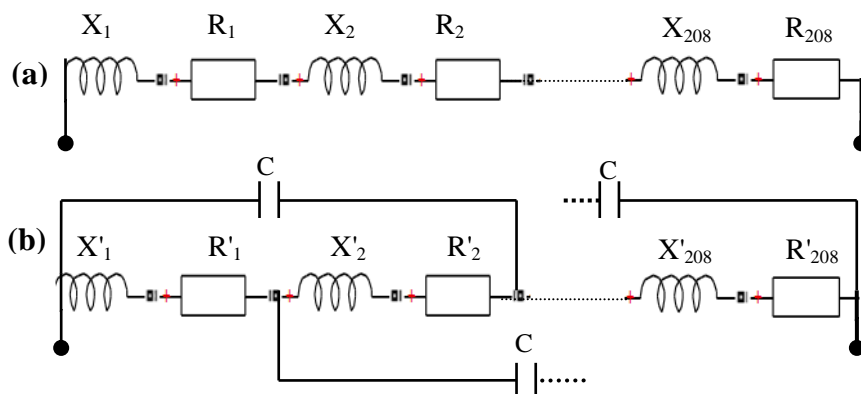


Figure III. 12 Circuit équivalent de la bobine monocouche dans les fréquences (a) basse et, (b) hautes.

L'impédance totale équivalente de la bobine est calculée en utilisant la transformation de Kennelly, figure III.13.

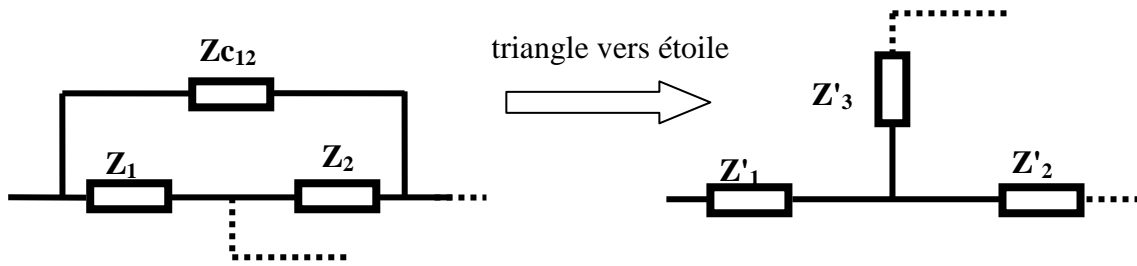


Figure III. 13 Transformation triangle-étoile

Où:

Z_1 et Z_2 L'impédance de la première et la deuxième spire.

$$Z_1=R_1+jX_1 \text{ et } Z_2=R_2+jX_2$$

Z_{C12} : L'impédance de la capacité parasite entre la première et la deuxième spire

$$Z_{C12}=1/jC\omega$$

C: capacité parasite

L'application du théorème de Kennelly donne

$$Z'_1 = \frac{Z_{c12}Z_1}{Z_1+Z_2+Z_{c12}} \quad (\text{III. 9})$$

$$Z'_2 = \frac{Z_2Z_{c12}}{Z_1+Z_2+Z_{c12}} \quad (\text{III. 10})$$

$$Z'_3 = \frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2+Z_{c12}} \quad (\text{III. 11})$$

Tel que Z'_1 , Z'_2 et Z'_3 sont respectivement les impédances équivalentes en montage étoile.

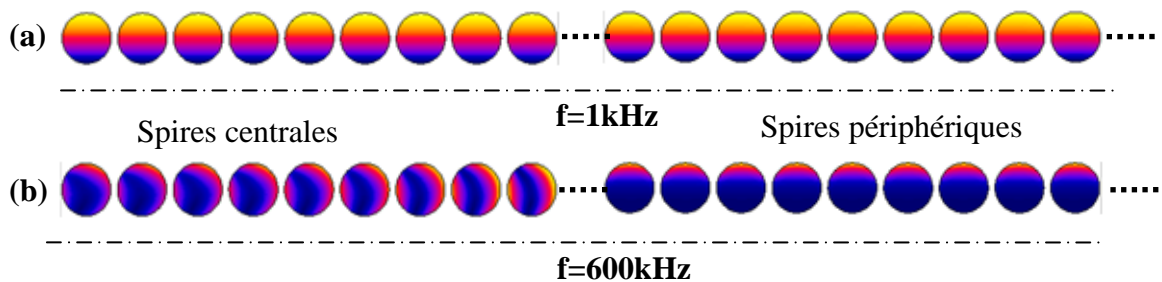


Figure III. 14 Distribution de la densité de courant dans la bobine (a) pour la fréquence=1kHz, (b) pour la fréquence=1kHz 600kHz.

La figure III.14 montre la distribution de la densité de courant dans les sections des conducteurs constituant les spires périphériques et centrales d'une bobine monocouche de 208 spires pour les fréquences (a) 1kHz, et (b) 600kHz.

Pour 1kHz, l'effet de peau est faible dans tous les conducteurs de la bobine. L'effet de proximité est remarquable, il est attractif entre les conducteurs allés et les conducteurs retours

de l'ensemble des spires, la distribution de la densité de courant est uniforme dans tout les conducteurs (la figure III.14a). Les valeurs des résistances de toutes les spires de la bobine sont égales à cause de l'influence.

La distribution de la densité de courant pour la fréquence 600 kHz est non uniforme dans l'ensemble des spires périphériques à cause de l'effet de peau marqué combiné à l'effet de proximité (la figure III.14b). La valeur des résistances dans les spires périphériques sont très différentes.

III.5.2.2 Bobine multicouche

Le tableau III. 2 représente les paramètres géométriques de l'inducteur:

H_{bm}	$R_{m_{cu}}$	$N_{m_{couche}}$	$N_{m_{spires}}$	$R_{b_{m_{ext}}}$	$R_{b_{m_{int}}}$	Dis_{vm}	Dis_{hm}
29.03mm	0.25mm	4	51	16.14mm	13.13mm	$\frac{(H_b - 2 \cdot R_{cu})}{(N_{section} - 1)}$	$\frac{(R_{b-ext} - R_{b-int} - 2 \cdot R_{cu})}{(N_{couche} - 1)}$

Tableau III. 2 Paramètres géométrique d'une bobine à 4 couches.

H_{bm} : Hauteur de la bobine; $R_{m_{cu}}$: Rayon de cuivre; $N_{m_{couche}}$: Nombre de couche.
 $N_{m_{spires}}$: Nombre de spire; $R_{b_{m_{ext}}}$: Rayon extérieure de la bobine; $R_{b_{m_{int}}}$: Rayon interne d la bobine. e : épaisseur de la bobine; D_{bm} : Diamètre de la bobine multicouche;
 Dis_{vh} : distance inter spires; Dis_{hm} : distance inter couches.

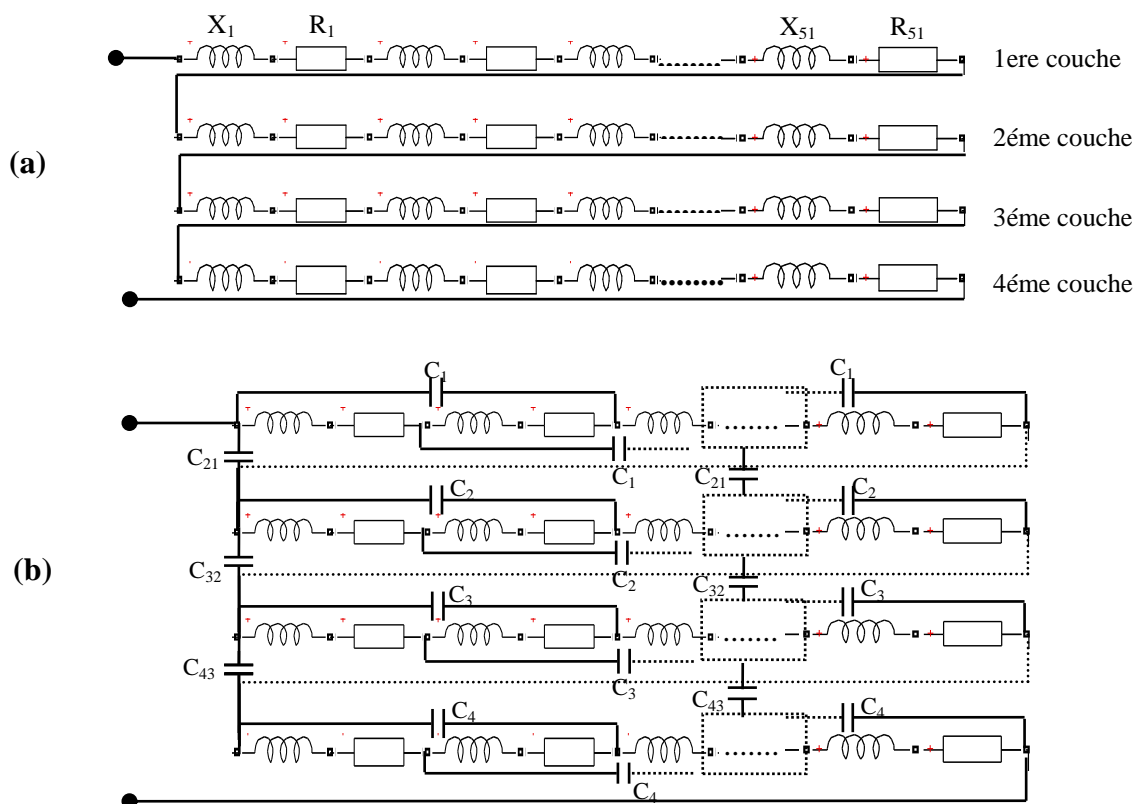


Figure III. 15 Représentation de la bobine multicouche dans les fréquences, (a) basses fréquences, (b) hautes fréquences.

L'impédance équivalente est trouvée par le biais d'un algorithme simple à partir des impédances des spires dans les quatre couches. Dans le couplage circuit on suppose que les condensateurs sont égaux dans chaque couche et entre deux couches voisines, figure III.15.

La figure III.16 montre, la distribution de la densité de courant dans les sections des conducteurs constituant les spires de la bobine multicouche pour les fréquences 1kHz et 600kHz.

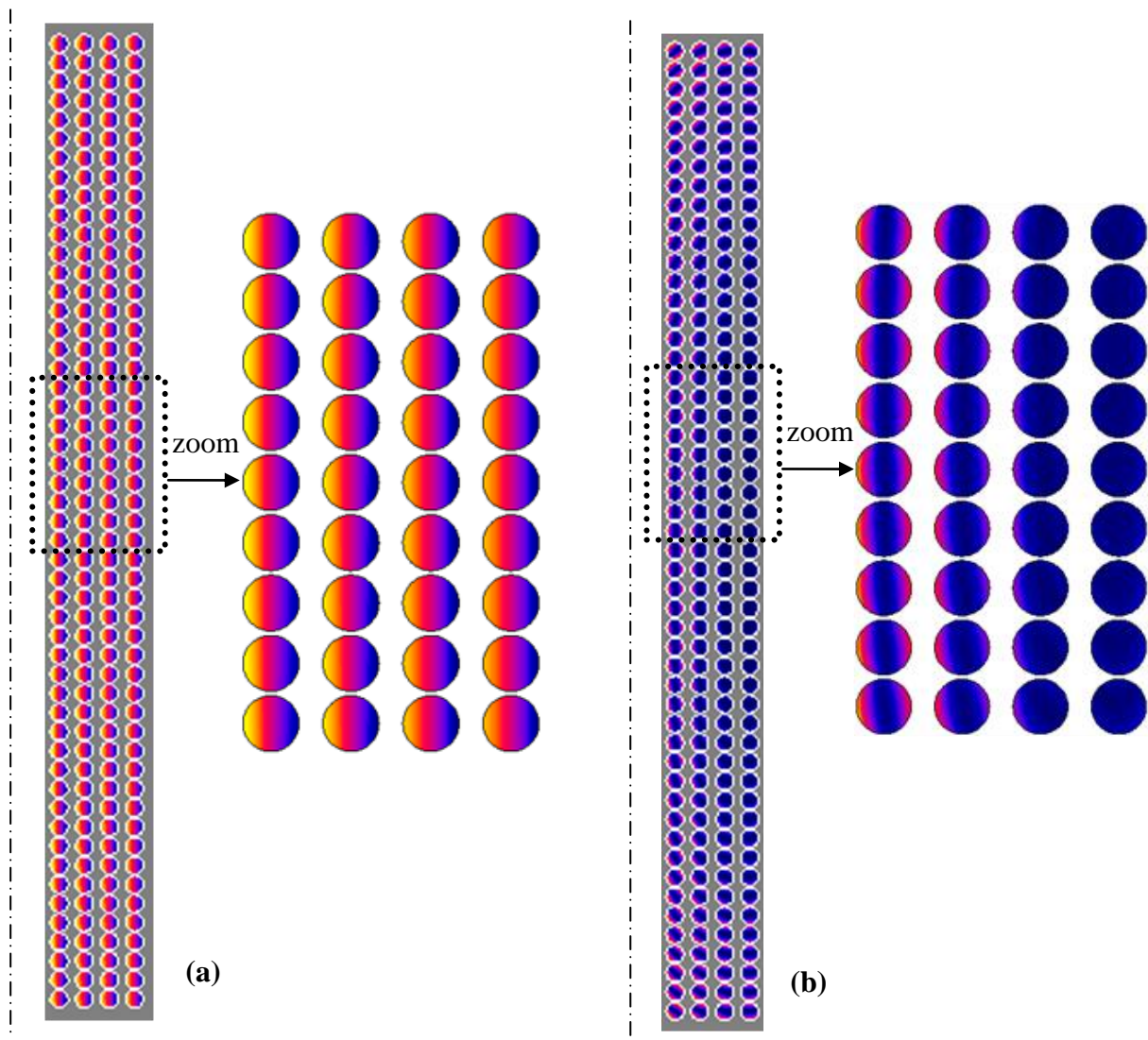


Figure III. 16 La distribution de la densité de courant dans la bobine multicouche, (a) pour une fréquence de 1kHz, (b) pour une fréquence de 600kHz

A la fréquence de 1kHz, les résistances dans l'ensemble des spires de la même couche de la bobine multicouche sont égales, figure III.16a.

Par contre, la distribution de la densité de courant pour la fréquence 600 kHz est non uniforme dans les spires périphériques à cause de l'effet de peau combiné à l'effet de proximité, figure III.16b.

III.6 Influence de la géométrie de la bobine sur l'effet capacitif:

Pour comprendre l'influence de la structure géométrique des bobines sur l'effet capacitif nous avons entamé une étude purement expérimentale dans laquelle nous avons tout d'abord réalisé plusieurs bobines solénoïdales avec différents nombre de spires et différentes configurations , figure III. 17. Puis nous avons mesuré l'impédance de l'ensemble de ces bobines dans la plage de fréquences de 20Hz à 5MHz.



Figure III. 17 Bobines réalisées

Les dimensions de chaque bobines sont mentionnées dans le tableau suivant, sachant que nous symbolisons les bobines sous la forme "AxB" tel que "A" est le nombre de couches et "B" le nombre de spires par couche.

D_{extb} , L_{bob} et N_s sont respectivement le diamètre extérieur de bobine, la longueur de la bobine et le nombre des spires, figure III. 18.

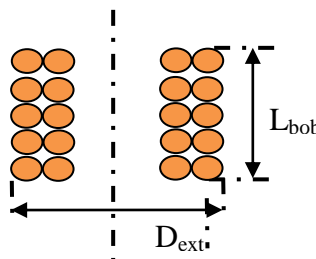


Figure III. 18 Géométrie de la bobine.

Le tableau III. 3 montre les dimensions des bobines tel que D_{extb} , L_{bob} , et N_s , mais cependant le diamètre intérieur des bobines est le même, $D_{int}=15.44$ mm et de même pour le diamètre des conducteurs de bobine est constant et il vaut $D_c=0.25$ mm.

	1x48	2x24	4x12	1x96	4x24	2x48	6x24	3x48	3x24	5x24 $D_c=0.5$	5x24	2x12
D_{extb}	17.16	18.38	19.10	17.23	20.24	18.08	21.53	19.11	18.96	22.69	20.73	17.67
L_{bob}	13.72	8.90	5.10	26.06	9.90	14.9	9.35	13.79	8.03	14.84	10.57	5.02
N_s	48	48	48	96	96	96	144	144	72	120	120	24

Tableau III. 3 Paramètres géométrique des bobines.

Pour montrer l'influence de la configuration de la bobine sur le phénomène d'auto-résonance, nous avons réalisé trois séries de bobines de même nombre total de spires pour chaque série.

La première série à nombre total de nombre de spire égale à 48 est : 1x48; 2x24; 4x12

La deuxième série à nombre total de nombre de spire égale à 96 est : 1x96; 2x48; 4x24

La troisième série à nombre total de nombre de spire égale à 144 est : 3x48; 6x24

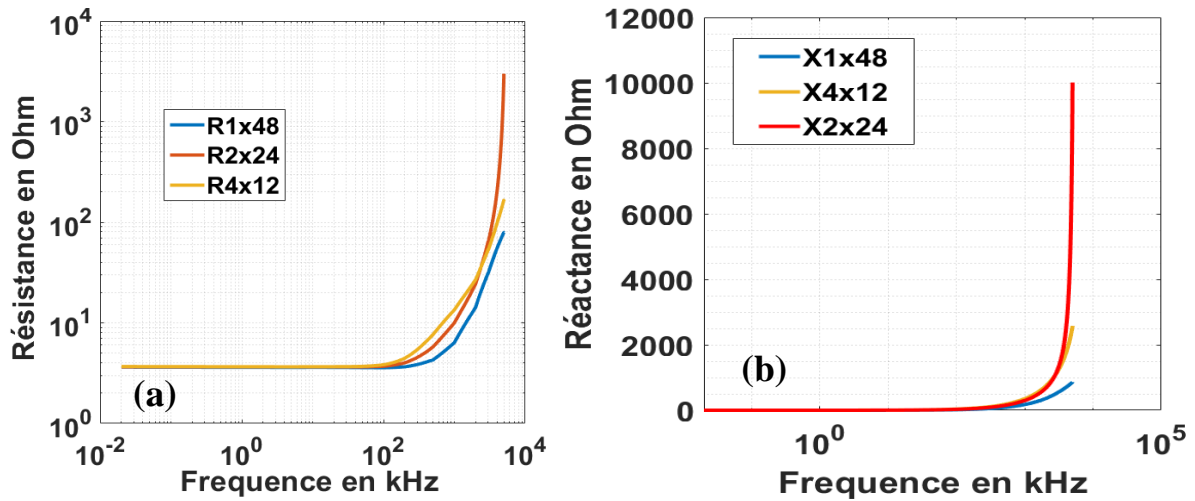


Figure III. 19 Première série (a) La résistance (b) La réactance.

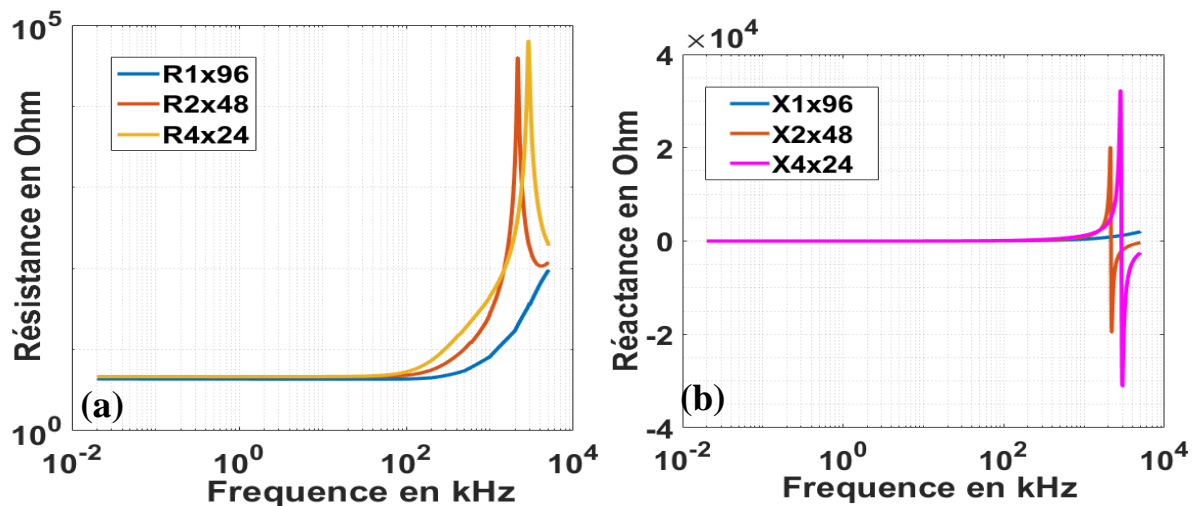


Figure III. 20 Deuxième série (a) résistance, (b) réactance.

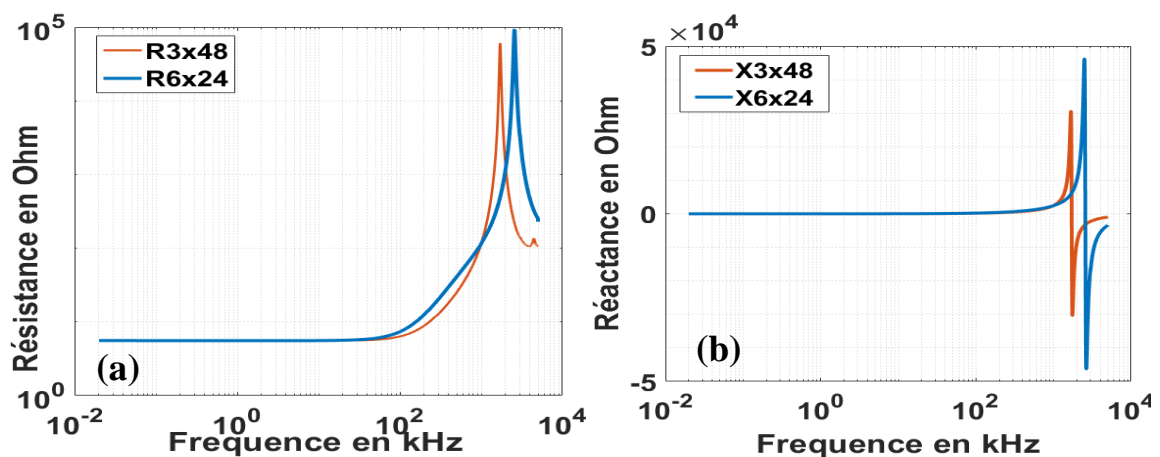


Figure III. 21 Troisième série (a) résistance, (b) réactance.

Pour les fréquences inférieures à 5Mhz, nous remarquons que dans chacune des séries de bobines réalisées, la fréquence de résonance pour la configuration à deux couches est la plus petite et elle est plus grande dans le cas de la configuration à une couche. Pour les autres configurations, cette fréquence se trouve entre les deux précédents extremums, figure III.19, III.20 et III.21.

Plusieurs facteurs influent sur le phénomène d'auto-résonance ou plus simplement le point de résonance. Parmi ces facteurs on peut citer :

- Les capacités entre spires qui dépendent directement de la surface entre les spires voisines , figure III.21: dans le cas des monocouches (par exemple 1x96, figure III.20) la fréquence de résonance est la plus élevée (au-delà de 5MHz), elle diminue rapidement des qu'on réalise la bobine à même nombre de spires que le monocouche sur un nombre de couche supérieur ou égale à 2 (2x48 ou 4x24). Pour la monocouche, chaque spire possède soit une ou deux spires voisines. Pour la bicouche, chaque spire possède deux ou trois spires voisines. Pour un nombre de couche supérieur à 2, chaque spire possède deux ou trois ou encore quatre spires voisines comme on peut l'observé sur la figure III. 22.
- Les mutuelles entre spires qui dépend fortement de la configuration choisie : le flux magnétique total crée dans chaque spire dépend fortement du flux crée dans les spires voisines. Cette influence dépend fortement de la distance géométrique où se trouve cette spire par rapport aux autres spires voisine.
- L'effet de peau aux fréquences élevées : on sait que dans chaque conducteur parcouru par un courant variable se crée un champ magnétique variable. Ce champ magnétique induit des courants qui circulent à l'intérieur de ce conducteur qui crée à leur tour un champ induit qui se combine avec le champ source. Aux fréquences élevées, le champ résultant repousse les courants sur la périphérie des conducteurs, c'est ce qu'on appelle l'effet de peau.

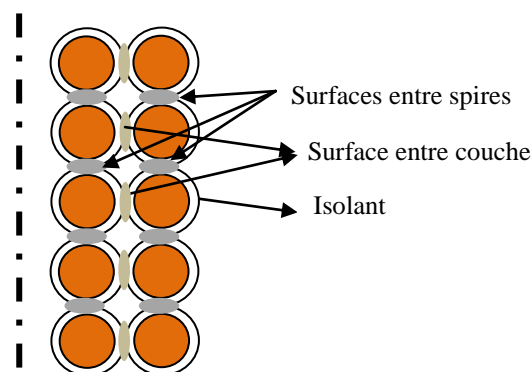


Figure III. 22 Capacités parasite entre spires et entre couches

Les courbes de la figure III.23 montrent l'influence du diamètre de fil de bobinage sur l'effet capacitif.

Pour voir l'effet du diamètre de fil de bobinage sur le phénomène d'auto-résonance on a réalisé deux bobines de même configuration (5x24) mais de diamètre de fil différents. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure III. 21.

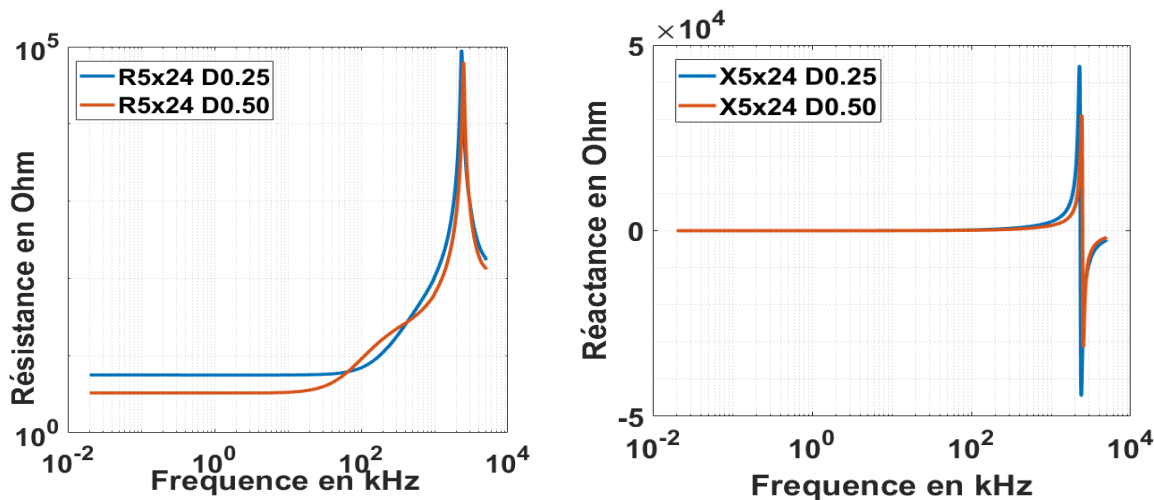


Figure III. 23 Influence du diamètre de fil de bobinage sur le phénomène d'auto-résonance

On remarque que l'amplitude de l'impédance de la bobine, au pique de résonance de la variante 5x24d0.25 est supérieure à celle la bobine 5x24d0.5 du fait que le diamètre de fil de bobinage est différent dans les deux variantes.

La figure III.24 montre l'influence du nombre de spires sur les phénomènes d'auto-résonance. Elle montre bien la diminution de la fréquence et l'augmentation de l'amplitude du pique de résonance avec l'augmentation du nombre de spires de la bobine.

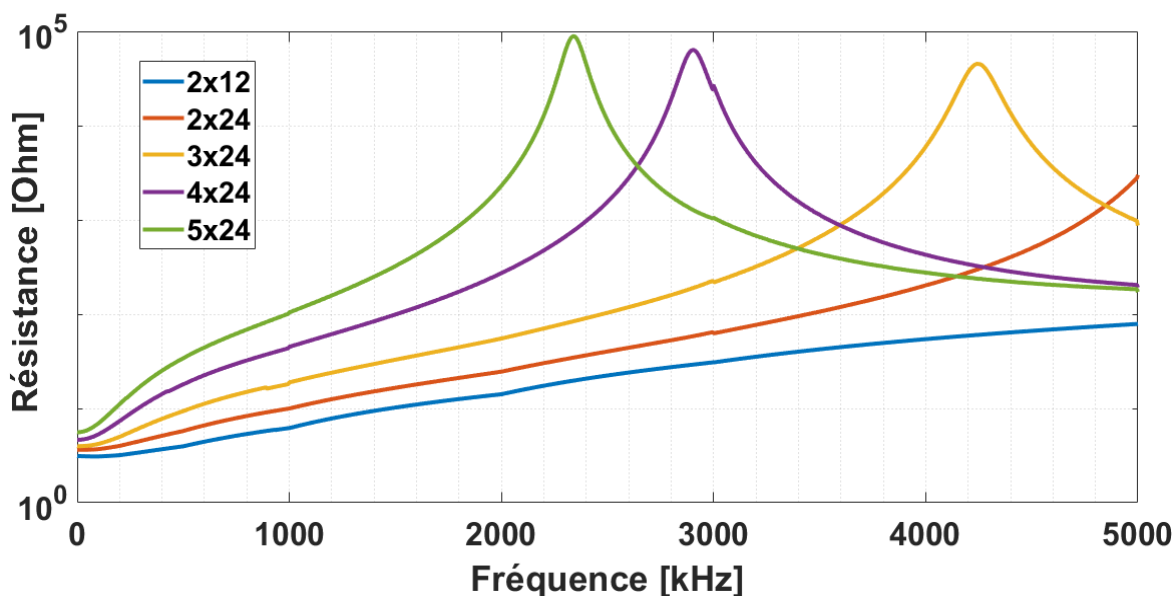


Figure III. 24 Influence du nombre de spires sur le phénomène d'auto-résonance

Vue que le nombre de spires de la bobine multicouche est le facteur le plus influent sur le phénomène d'auto-résonance nous avons proposé de classer ces bobines par rapport à notre application en deux catégories:

- bobines à faible nombre de spires : ne nécessite pas de modèle avec effet capacitif.
- bobines à nombre de spires élevées : nécessite un modèle qui tient compte de l'effet capacitif.

III.6 Approche d'évaluation des condensateurs entre spires

Nous avons adopté les modèles circuits présentés sur la figure III.10b et la figure III.11b dans lesquels les capacités parasites sont intégrées.

Pour une bobine monocouche, les condensateurs sont identifiés en suivant les étapes de l'organigramme illustrant la technique du problème inverse présenté sur la figure III.24.

La résistance et la réactance de la bobine sont mesurées à l'aide d'un LCR-mètre de précision. Les résistances des bobines sont calculées à l'aide d'un modèle FEM axisymétrique 2D puis comparées à celles mesurées jusqu'au critère de convergence de la fonction objectif $costC$ donnée par :

$$costC = \frac{1}{N_f} \sqrt{\sum_{k=1}^{N_f} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{R_{mes_k} - R_{cal_k}}{R_{mes_k}} \right)^2 + \left(\frac{X_{mes_k} - X_{cal_k}}{X_{mes_k}} \right)^2 \right]} \quad (III. 12)$$

Tel que $R_{mes,k}$ la valeur de la résistance mesurée pour la fréquence f_i et N_f est nombre de point de mesures.

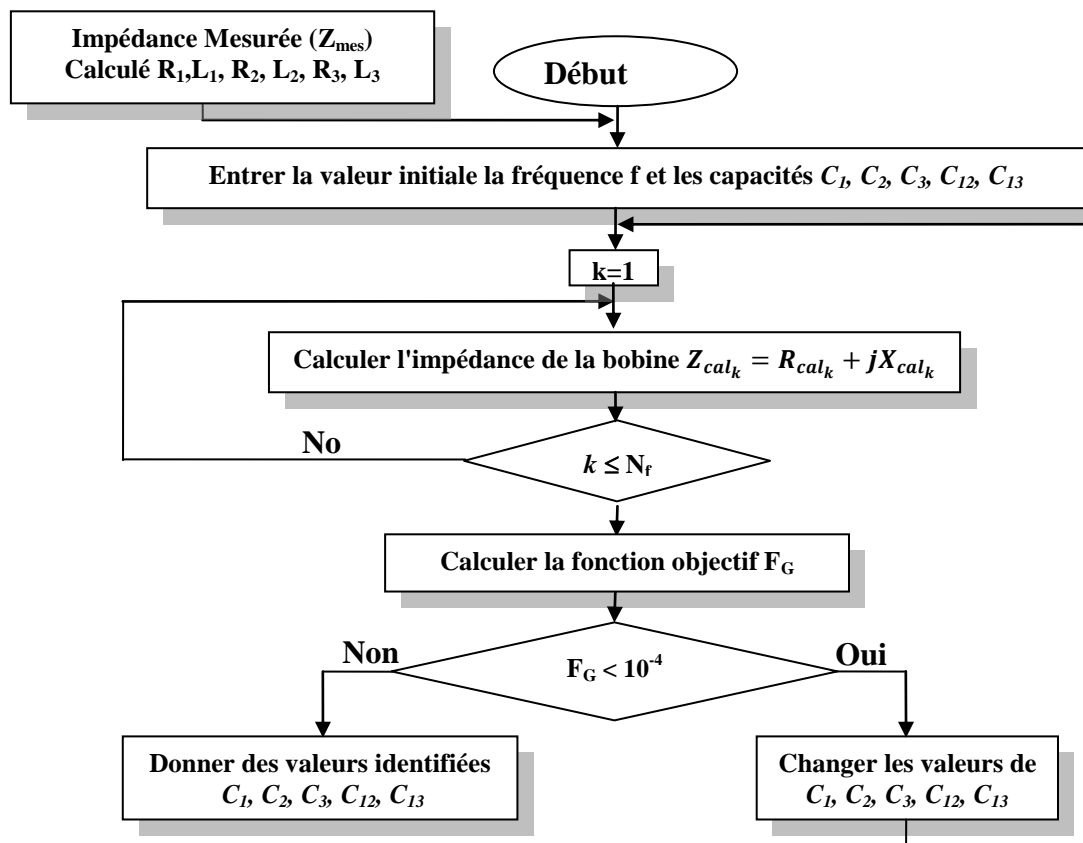


Figure III. 25 Identification des condensateurs entre spires par la méthode du problème inverse.

L'algorithme de recuit simulé est appliqué pour minimiser la fonction d'objectif.

III.7 Modèle simplifié d'une bobine à air avec effet capacitif

Pour les bobines multicouche à nombre de spires élevées l'effet capacitif ne peut être négligé [72]. Ce phénomène est illustré sur la figure III.24. Pour les fréquences inférieures à 5 MHz, aucun point de résonance n'apparaît pour les bobines 2x12 et 2x24, mais pour les autres bobines 3x24, 4x24 et 5x24, les premiers points de résonance apparaissent aux fréquences successives de 4.25MHz, 2.9MHz et 2.57 MHz.

Pour simplifier la modélisation de la bobine multicouche aux hautes fréquences nous avons proposé la procédure suivante appliquée sur une bobine à 3 couches (figure III.26) :

- Seules les couches sont représentées.
- Les condensateurs entres spires dans chaque couche sont représentés par un condensateur équivalent (C_1 , C_2 , C_3).
- Les couches sont liées par un fil électrique et un condensateur (C_{12} et C_{23}).
- Chaque couche est modélisée par une résistance en série avec une inductance. Ces deux paramètres sont obtenus par un calcul numérique sous le logiciel Flux 2D.

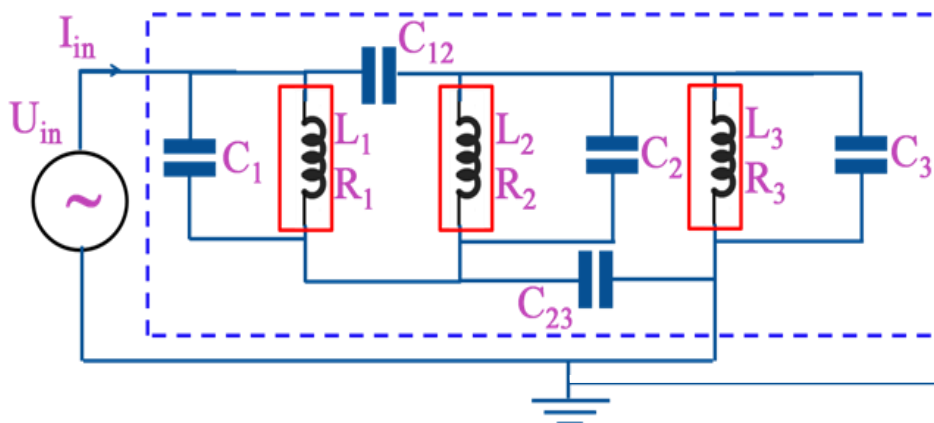


Figure III. 26 Circuit équivalent d'une bobine à 3 couches.

La procédure d'identification des condensateurs reste la même que celle présentée par l'algorithme de la figure III.25.

Pour tester le modèle proposé nous avons pris un exemple d'une bobine à 3 couches avec un nombre total de spires égale à 138, de diamètre intérieur de 16.5mm, de diamètre extérieur de 21.7mm et de hauteur égale à 31.7mm. La conductivité du cuivre est prise égale à 58MS/m.

Les valeurs identifiées des condensateurs sont données sur le tableau III. 4 ci-dessous :

C1	C2	C3	C12	C23
55pF	65pF	75pF	100pF	120pF

Tableau III. 4 Les capacités parasite identifié.

La comparaison entre les résultats mesurés et les résultats simulés en appliquant l'approche proposée sont représentés sur la figure III.27.

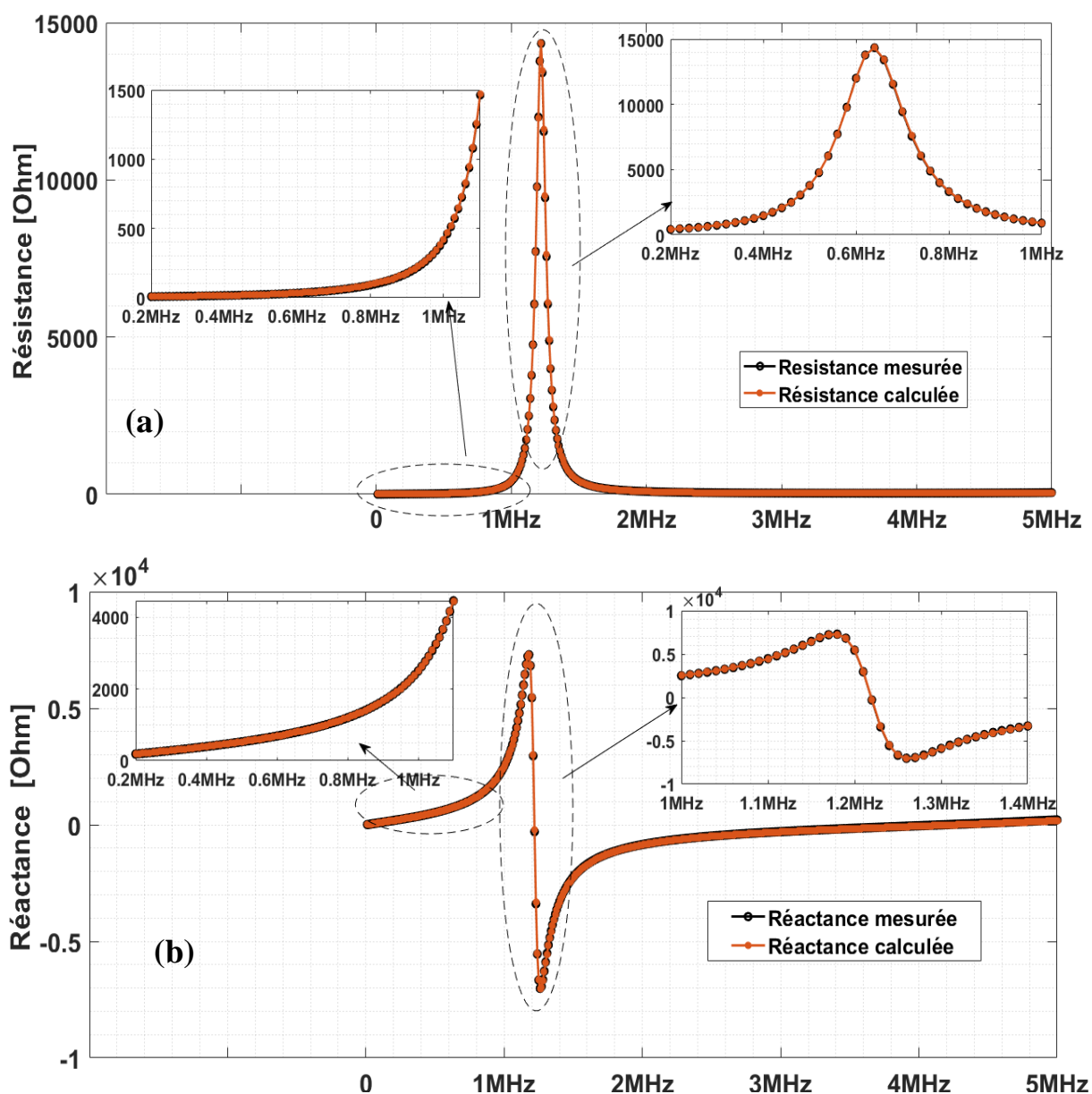


Figure III. 27 Résultats de mesure et de calcul d'impédance pour une bobine à 3 couches : (a) Résistance, (b) Réactance.

Les résultats sont concluants, le modèle simplifié proposé est efficace pour la prise en compte de l'effet capacitif dans les bobines multicouches.

Après l'application du problème inverse pour identifier les capacités parasites, puis ces dernières sont introduites dans le modèle direct pour que le modèle tienne compte l'effet capacitif, la figure III. 27 montre une bonne concordance entre les valeurs mesurées de résistance et de réactance avec celles calculées.

III.8 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie une étude complète et une proposition de modèles électriques qui décrivent exactement le comportement électromagnétique de différentes configurations de bobine dans les basses et les hautes fréquences.

Nous avons vu que le comportement électromagnétique de la bobine change en fonction de plusieurs facteurs tels que le nombre de spires, le nombre de couches, le diamètre du fil de bobinage, et les diamètres intérieur et extérieur de la bobine.

Nous avons proposé plusieurs modèles tenant compte de l'effet capacitif dans les bobines multicouches, le premier modèle chaque inter spires se représente par une capacité parasite, l'autre modèle on a remplacées toutes les capacités parasite inter spires par une seul capacité parasite équivalente pour chaque couches de bobine.

Les parties imaginaires et les parties réelles des impédances sont calculées en utilisant la méthode des éléments finis sous le logiciel FLUX 2D, les parties réelles et imaginaires des impédances sont mesurées à l'aide d'un LCR-mètre de précision.

La technique du problème inverse est appliquée pour identifier les condensateurs. Le recuit simulé est utilisé pour minimiser la fonction objective.

La fréquence auto-résonant de la bobine solénoïdale monocouche et multicouche est différente, la valeur de la fréquence auto-résonant étant influencée par les dimensions des bobines, ce qui signifie que chaque bobine a sa propre fréquence de résonance. Les résultats obtenus sont très concluants.

Chapitre IV : Banc Expérimental - Résultats et confrontation

IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié le comportement électromagnétique de différentes configurations de bobines, ce qui nous a permis de classer ces bobines en deux catégories. La première catégorie est la catégorie à grand nombre de spires qui nécessite un modèle avec effet capacitif, la deuxième catégorie est la catégorie à faible nombre de spires qui ne nécessite pas de modèle avec effet capacitif, c'est cette catégorie que nous avons adopté comme première alternative à l'évaluation de la résistivité électrique des tiges CFRC.

Dans ce chapitre en premier lieu, on présentera, le banc d'essai mis en œuvre pour l'identification de la composante transversale de la résistivité électrique dans les tiges à fibre de carbone unidirectionnel ainsi que les résultats expérimentaux obtenus. On terminera par une interprétation de ces résultats.

IV.2 Identification de la résistivité d'une tige CFRC:

La tige CFRC-UD présente une forte anisotropie due à l'orientation unidirectionnelle des fibres. Cependant, le nombre important de fibres de carbone imprégnées dans la tige et leur taille par rapport aux dimensions globales rendent difficile leur prise en compte dans le modèle. La résistivité électrique microscopique des matériaux composites est ensuite remplacée par un tenseur anisotrope homogénéisé avec les principaux composants respectivement la résistivité longitudinal ρ_L et la résistivité ortho-radiale ρ_T (voir la figure IV. 1). L'anisotropie des propriétés électrique dépend de la fraction volumique et de l'orientation des fibres dans le matériau composite ; par conséquent, la résistivité longitudinale (ρ_L) varie entre $2 \times 10^{-5} \Omega.m$ et $10^{-3} \Omega.m$, tandis que la résistivité ortho-radiale (ρ_T) entre $5 \times 10^{-3} \Omega.m$ et $10^{-1} \Omega.m$ [40] [9].

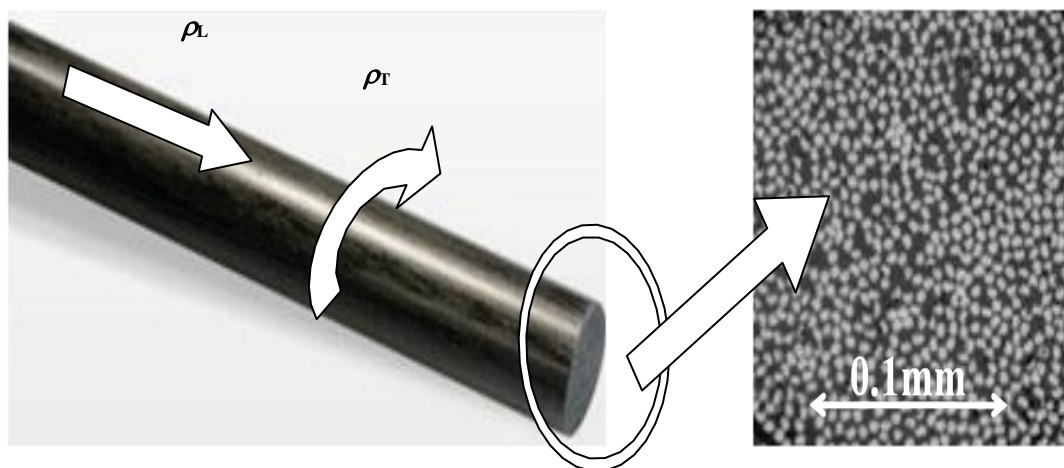


Figure IV. 1 Composantes de la résistivité électrique des tiges CFRC-UD.

IV.2.1 Présentation de la méthode:

Une approche est proposée pour évaluer la résistivité ortho-radiale de la tige CRFC-UD, en utilisant une méthode sans contact basée sur les courants de Foucault.

Tout d'abord, une bobine solénoïdale multicouche sans noyau est réalisée sur un tube creux en PVC, figure IV. 2.

L'ensemble bobine/tige est modélisé par le circuit électrique équivalent avec une résistance R et inductance L en série. La mesure et le calcul par le modèle numérique de R et L permettent de remonter à la résistivité ortho-radiale de la tige composite.

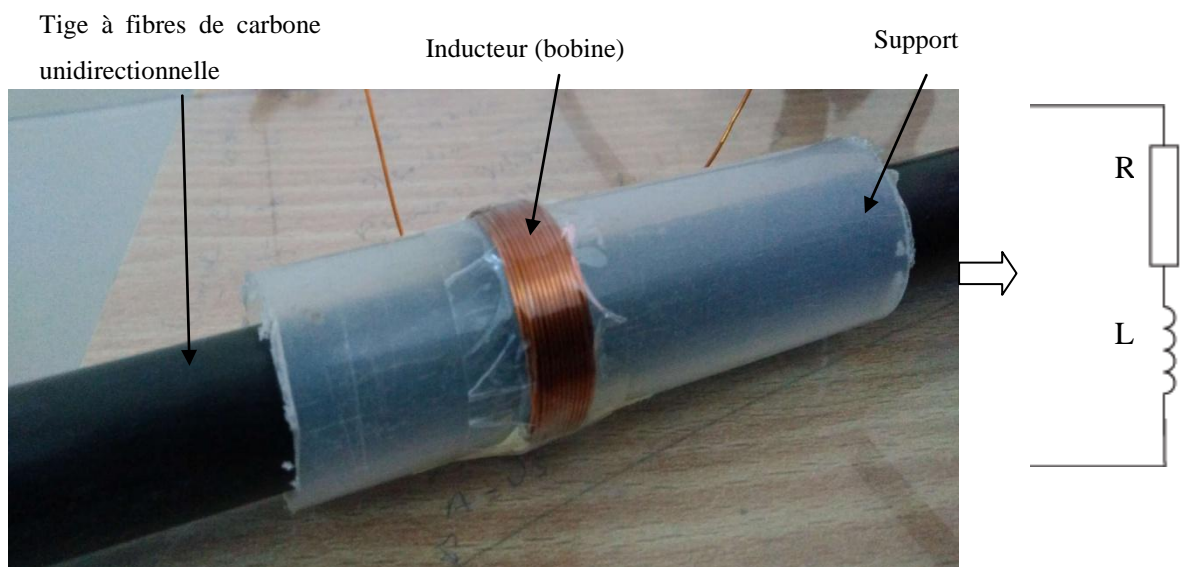


Figure IV. 2 Evaluation de la résistance transversale par la bobine.

IV.2.2 Application de la méthode du problème inverse:

L'algorithme de la méthode du problème inverse est illustré par la figure IV. 3. On impose une valeur initial de la résistivité ortho-radiale dans le model direct et on calcul la résistance de l'ensemble bobine/tige à l'aide du modèle éléments finis 2D-axisymétrique puis elle est comparée à celle mesurée, si la valeur de l'erreur (fonction objectif) est supérieure à la valeur de tolérance imposée alors la valeur de la résistivité est modifié. Ce calcul itératif sera effectué autant de fois, jusqu'au ce la tolérance soit atteinte. La résistivité ortho-radial sera alors identifiée. L'algorithme des colonies de fourmis est utilisé pour minimiser l'erreur.

La fonction coût (costR) est donnée par l'équation suivante :

$$costR = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\delta R_{mes} - \delta R_{cal}}{\delta R_{mes}} \right)^2} \quad (IV. 1)$$

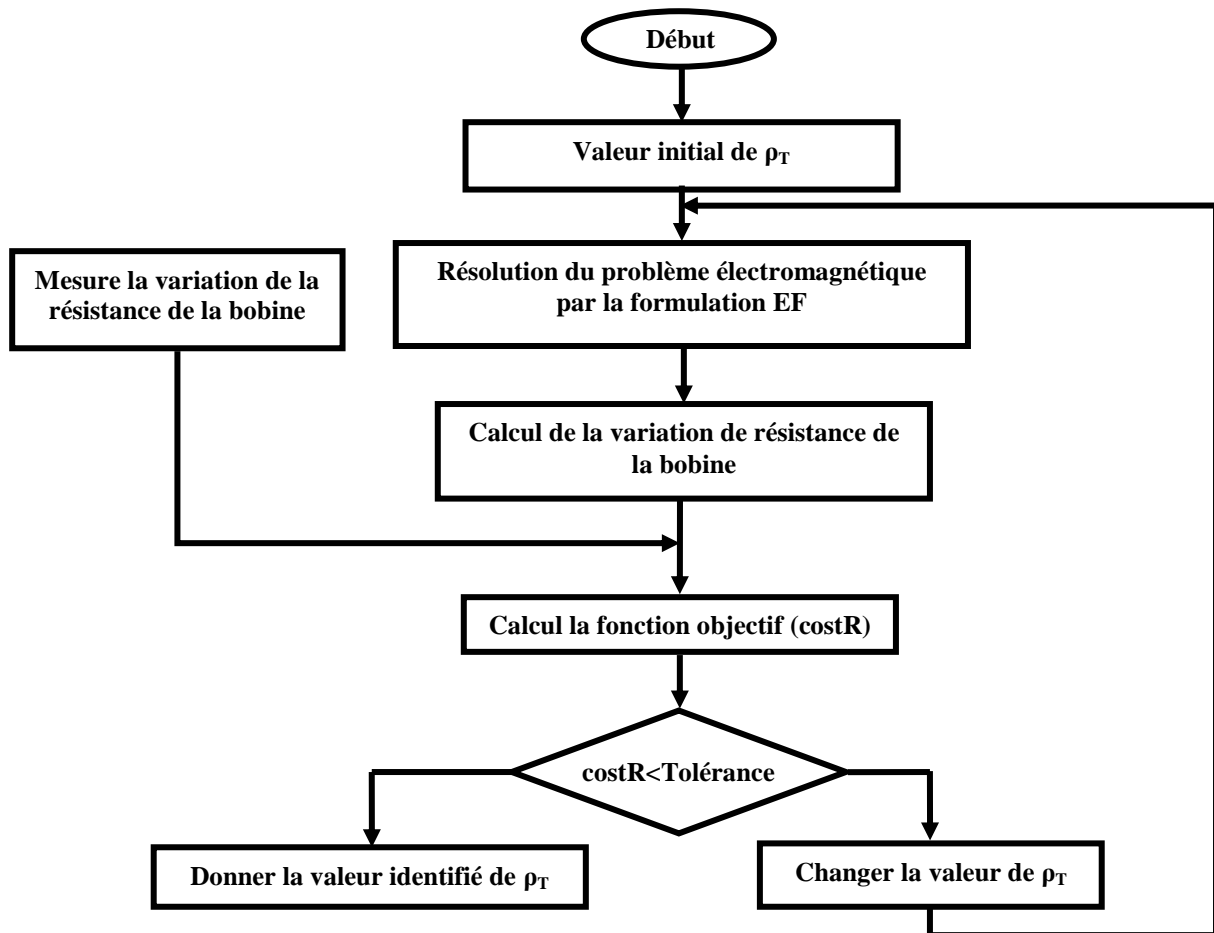


Figure IV. 3 Méthode du problème inverse appliquée à l'évaluation de la résistivité.

La variation de résistance δR_{mes} est évaluée à partir de la différence entre la résistance mesurée de la bobine en présence de la tige (en charge) et celle mesurée en absence de toute charge (à vide).

La variation de résistance δR_{cal} est évaluée à partir de la différence entre la résistance calculée de la bobine en présence de la tige (en charge) et celle calculée en absence de toute charge (à vide).

IV.3 Calcul de la résistance: résolution du système direct

IV.3.1 Comportement électromagnétique 3D des tiges CFRC-UD

Pour justifier l'utilisation du modèle 2D on a réalisé une étude du comportement électromagnétique tridimensionnel des tiges CFRC-UD en fonction de la variation de la résistivité longitudinale de ces tiges.

Dans ce contexte, le logiciel Flux 3D permet de calculer la valeur de la puissance induite et d'étudier la direction des courants induits dans la tige conductrice anisotrope en fonction de la résistivité longitudinale.

Le schéma de la figure IV.4 montre une coupe 2D axisymétrique de la géométrie simulé du dispositif d'évaluation non destructif de la tige conductrice anisotrope.

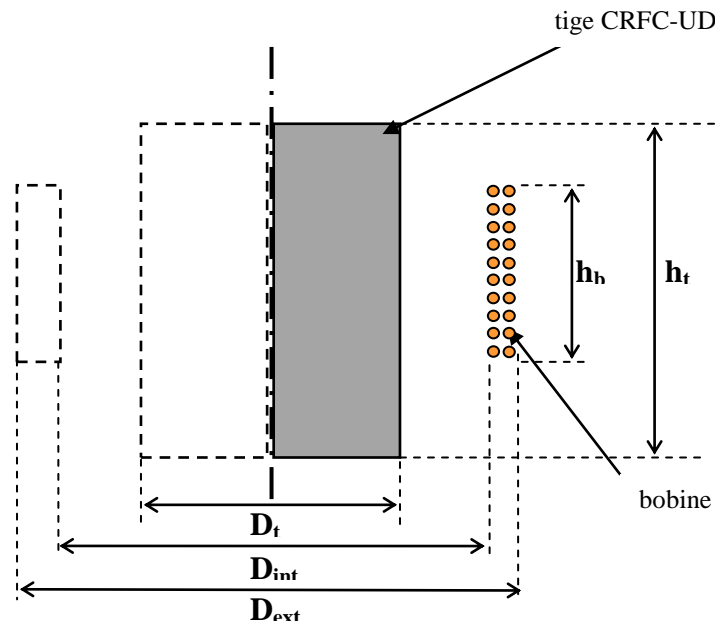


Figure IV. 4 Schéma synoptique du dispositif d'évaluation non destructif de la résistivité électrique.

La simulation a été faite en utilisant les dimensions réelles du système (tige, bobine) donnée sur le tableau IV.1, telles que :

- D_t : diamètre de la tige;
- D_{int} : diamètre intérieur de la bobine;
- D_{ext} : diamètre extérieur de la bobine;
- h_b : hauteur de la bobine;
- h_t : hauteur de la tige composite;
- D_c : diamètre du fils de bobinage;
- N_{spire} : nombre de spires dans la bobine;
- N_{couche} : nombre de couches dans la bobine.

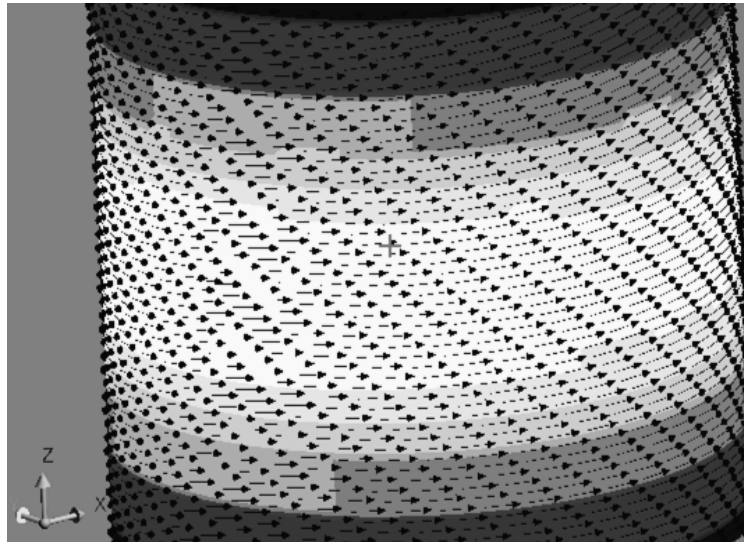
<i>tige</i>		<i>Bobine</i>					
$D_t (mm)$	$h_t (mm)$	$D_{int} (mm)$	$D_{ext} (mm)$	$D_c (mm)$	$h_b (mm)$	N_{spire}	N_{couche}
16	150	22.23	24.40	0.2	6.75	24	2

Tableau IV. 1 Dimensionnements du problème.

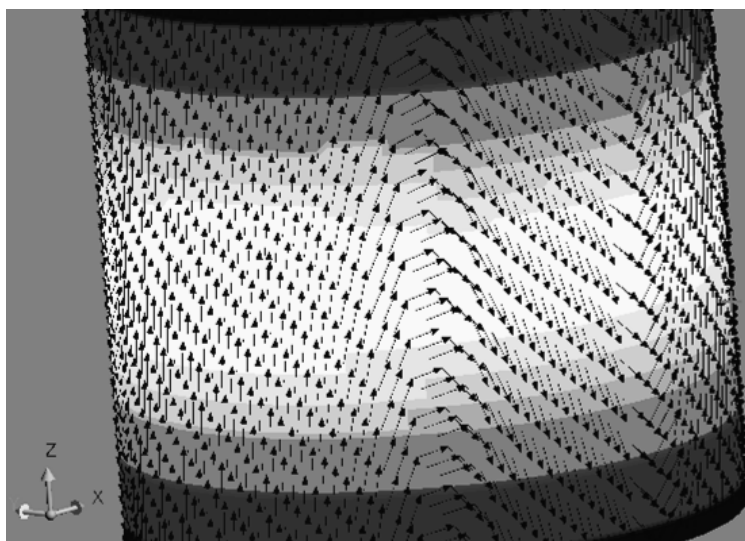
IV.3.1.1 Analyse qualitative

Dans la simulation en 3D on a étudié deux cas différents pour voir l'influence de la résistivité longitudinale de la tige sur son comportement électromagnétique. Dans le premier cas comme

il est illustré sur la figure IV. 5(a) pour un tenseur de résistivité isotrope avec $\rho_T = \rho_L = \rho_x = \rho_y = \rho_z = 0.013 \Omega.m$, les courants induits possèdent une seule composante suivant la direction ortho-radiale, c'est la direction des courants sources.



(a) Cas isotrope ($\rho_T = \rho_L = \rho_x = \rho_y = \rho_z = 0.013 \Omega.m$)



(b) Cas anisotrope ($\rho_L = \rho_z = 10^{-5} \Omega.m$; $\rho_T = \rho_x = \rho_y = 0.013 \Omega.m$)

Figure IV. 5 Directions des courants induits dans la tige pour une fréquence de 2 MHz (a) et (b).

Le deuxième cas, figure IV. 5(b), pour un tenseur de résistivité anisotrope avec $\rho_L = \rho_z = 10^{-5} \Omega.m$; $\rho_T = \rho_x = \rho_y = 0.013 \Omega.m$, le chemin emprunté par les courants induits est curviligne, comparé au courant source. Ce phénomène est dû au fait que les courants induits, par principe, retrace le chemin des courants qui leur ont donné naissance (courants sources). D'autre part, comme le chemin dans la direction ortho-radiale est plus court que celui de la direction longitudinal, pour que les lignes de courants induits se referment, ils cherchent à

passer par le chemin avec moins de résistance. D'où l'explication de la forme du chemin parcouru par les courants induits.

IV.3.1.2 Analyse quantitative

Cette fois ci cas pour voir l'influence de la résistivité longitudinal sur la résistance globale de la bobine, nous avons varié ρ_L de 10^{-5} à $0.7 \times 10^{-2} \Omega.m$, en maintenant la résistivité ortho-radiale constante ($\rho_T = \rho_x = \rho_y = 0.013 \Omega.m$). Nous avons constaté que la puissance induite reste pratiquement inchangée, 0.04% de variation atteinte à $10^{-5} \Omega.m$ (la figure IV. 6) et la résistance de la sonde CF reste également pratiquement constante (figure IV. 7).

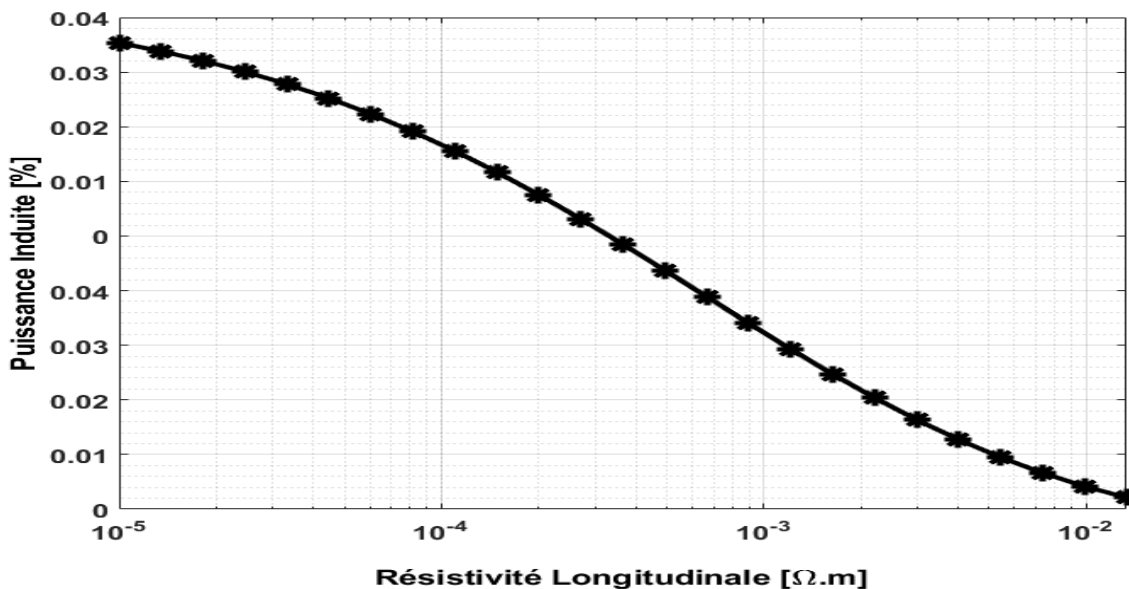


Figure IV. 6 Puissance induite dans la tige composite en fonction de la résistivité longitudinale.

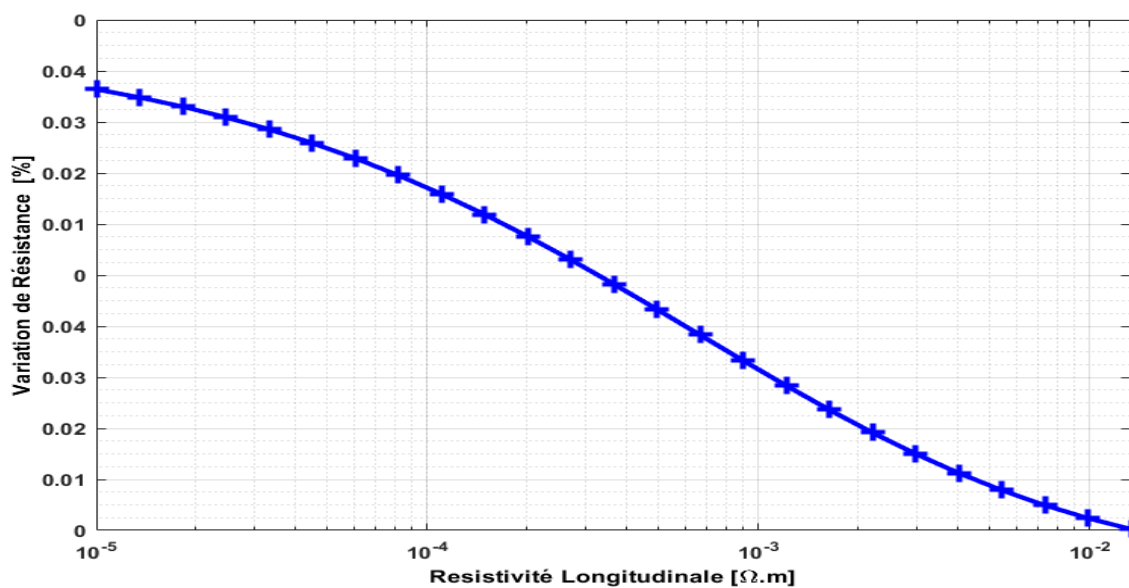


Figure IV. 7 Variation de la résistance dans la bobine en fonction de la résistivité longitudinale.

Par conséquent, on peut conclure que dans le cas des tiges considérées dans ce travail de thèse, la composante longitudinale des courants induits n'a aucune influence sur la puissance induite totale ou la résistance de la sonde CF et ceux quel que soit la valeur de la résistivité longitudinale de la tige CFRC-UD. Par conséquent, les courants induits influents sont uniquement les courants ortho-radiale (chemin de courantes sources). D'où, le modèle 2D axisymétrique peut être utilisé pour calculer la résistance de la sonde CF (bobine solénoïdale). De plus, la résistivité électrique n'est pas affectée par les phénomènes thermiques dus à la faible intensité des courants sources.

IV.3.2 Validation numérique de modèle 2D axisymétrique-EF par le modèle 3D-EF:

La justification de l'utilisation du modèle 2D pour s'affranchir des difficultés d'utilisation du modèle 3D étant donnée par la partie précédente. Un problème 2D pour le calcul des courants induits peut être facilement formulé en utilisant le potentiel vecteur magnétique et résolu avec la méthode des éléments finis (FEM) implémentée dans MATLAB, la figure IV 8 montre le modèle magnétodynamique à étudier.

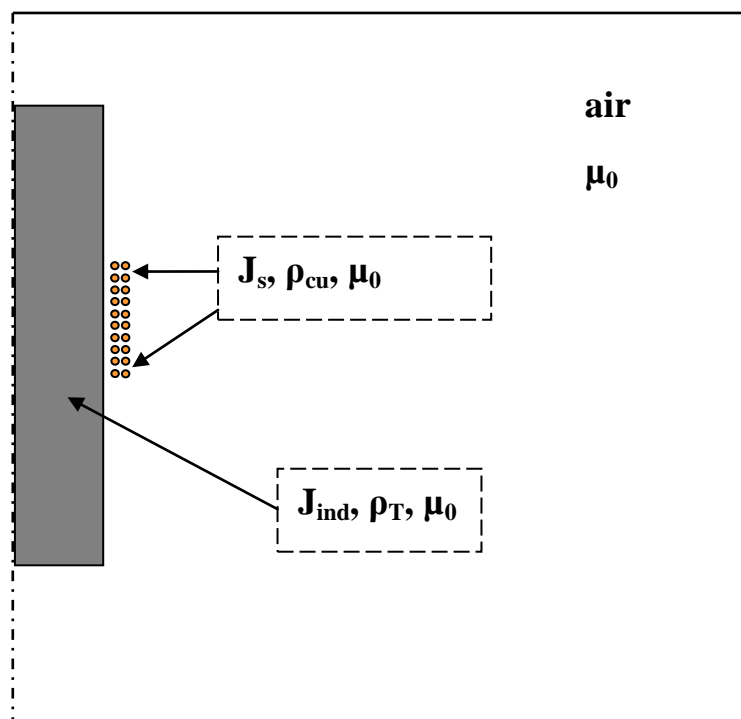


Figure IV. 8 Model électromagnétique en régime variable

ρ_T est la résistivité ortho-radiale qui dépend de l'effet de l'épaisseur de peau δ qui est donnée par:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\omega \rho_T \mu_0}} \quad (\text{IV. 2})$$

Les figures IV. 9 et la figure IV. 10 montrent le maillage effectué sous MATLAB Pdetool, pour obtenir des résultats avec une grande précision, le maillage dans la sonde CF doit être raffiné (les éléments triangulaires doivent être les plus petits possibles).

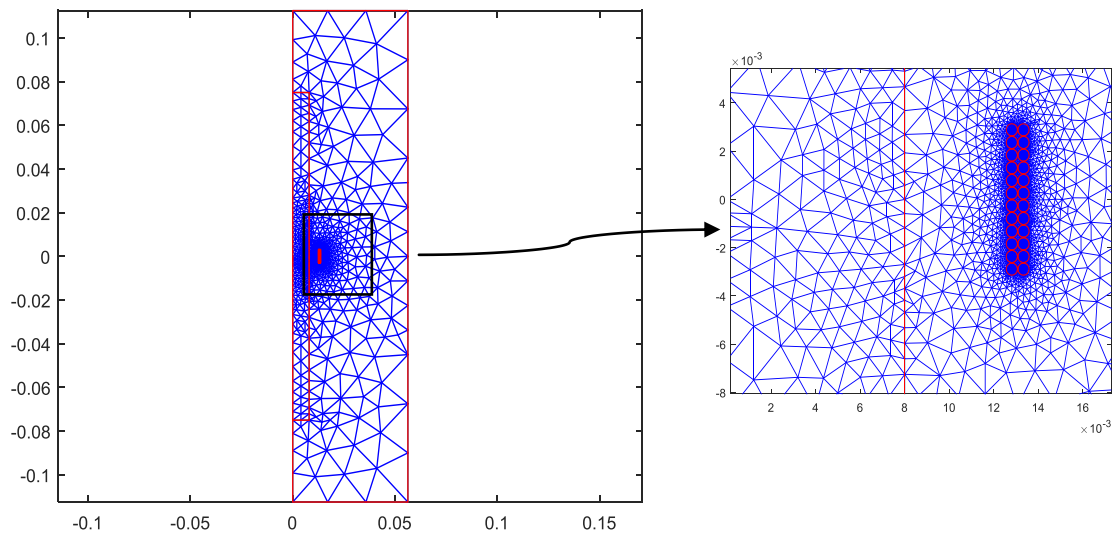


Figure IV. 9 Maillage élément fini triangulaire du domaine d'étude.

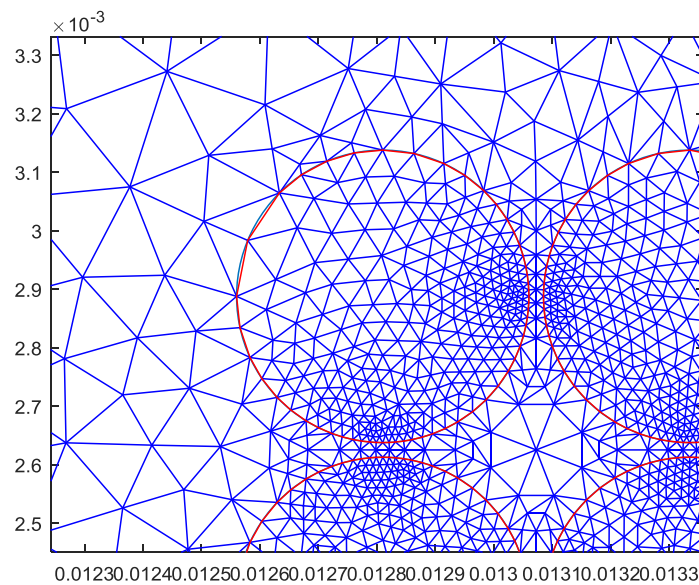


Figure IV. 10 Maillage d'une spire.

La résolution de l'équation aux dérivées partielles nous donne la valeur de potentiel vecteur magnétique A en tout point de l'espace du maillage comme l'illustre sur la figure II.11. Alors on peut calculer la variation de la résistance de la sonde CF par l'expression :

$$\delta R_{cal} = -2\pi \omega N_{spir}^2 Imag(A) \quad (IV. 3)$$

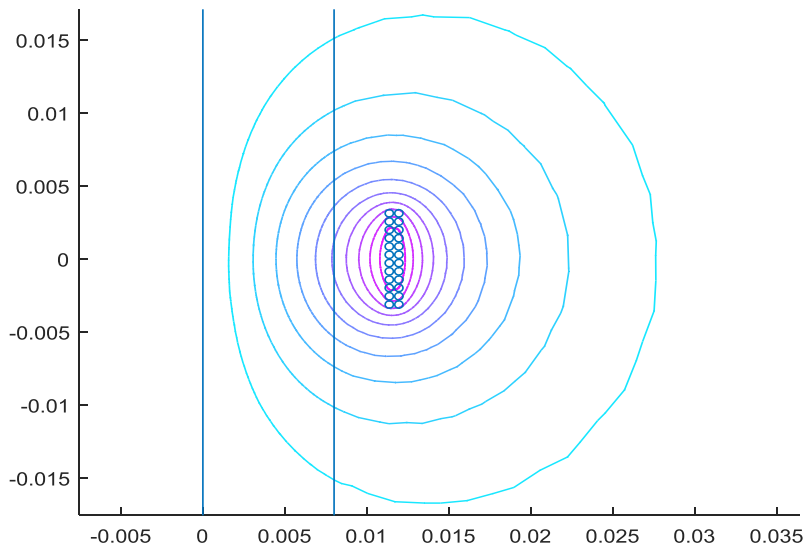


Figure IV. 11 Lignes équipotentiel du potentiel vecteur magnétique.

La figure IV.12 représente la comparaison entre les variations de résistance 2-D et 3-D calculées pour les fréquences allant de 0.1MHz à 2MHz et dans le cas des composantes du tenseur de résistivité données par $\rho_L = 10^{-5} \Omega.m$ et $\rho_T = 0.013 \Omega.m$. Le maximum d'erreur observée est inférieur à 1%.

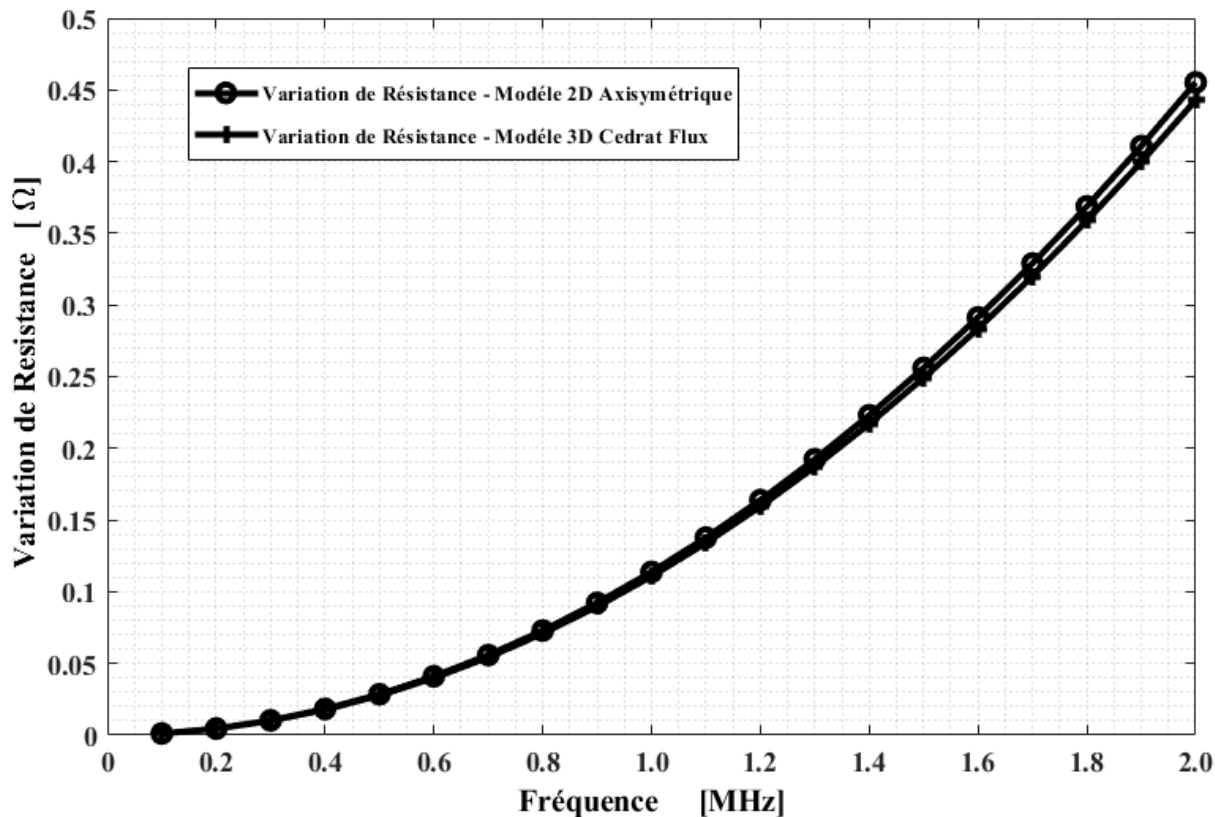


Figure IV. 12 Variations de résistance calculées 2D et 3D de la bobine en fonction de la fréquence.

La figure IV.13 montre la comparaison entre les variations de résistances calculées de la sonde CF en 2D et en 3D en fonction de la résistivité ortho-radiale ρ_T dans la plage de 0.02 à 0.1 $\Omega.m$ à une fréquence égale à 2MHz et une résistivité longitudinale ρ_L fixée à 50 $\mu\Omega.m$. On peut constater que l'erreur maximale est inférieure à 2%.

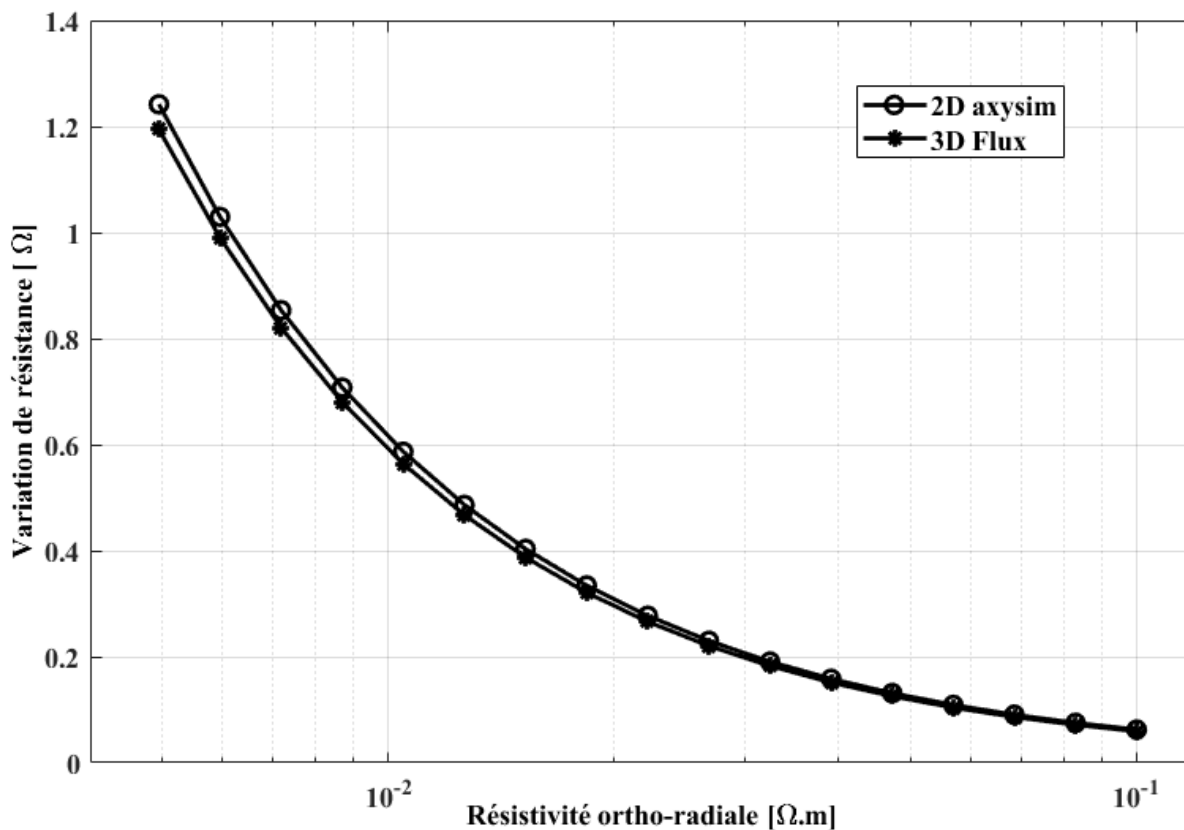


Figure IV. 13 Variations de résistance calculées en 2D et en 3D de la bobine de en fonction de la résistivité ortho-radial (0,02-0,1 $\Omega.m$) à une fréquence égale à 2 MHz et $\rho_L = 50 \mu\Omega.m$.

Ces résultats obtenus permettent de confirmer la validité de l'utilisation du modèle 2-D axisymétrique pour l'identification de la résistivité ortho-radial de la tige CFRC-UD.

IV.5.3 Mesure de la résistance

L'impédance mètre utilisé (figure IV.14 et figure IV. 15) est un appareil précis qui nous permet de balayer une large gamme de fréquences allant de 20Hz à 5MHz. La gamme de fréquence et la précision de l'appareil répondent à nos attentes par rapport à la mesure de l'impédance du système étudié.

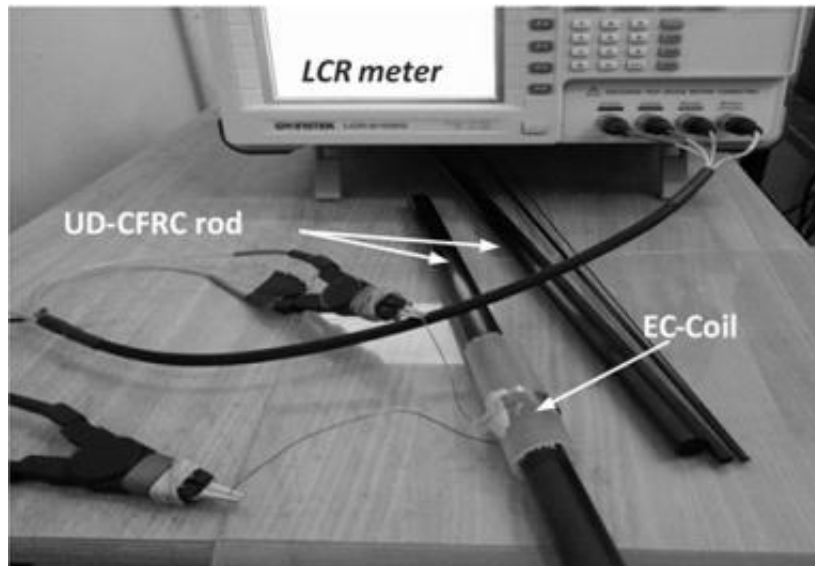


Figure IV. 14 LCR-Mètre de précision.

Cet impédance mètre est connecté sur un pc par le biais d'une liaison RS232 et complètement contrôlé à l'aide d'une application commerciale pour manipulé et faire la gestion des essais. Cette application permet d'analyser plusieurs paramètres à la fois avec une large gamme de fréquences et renforcée par un système d'affichage (courbes de variation).

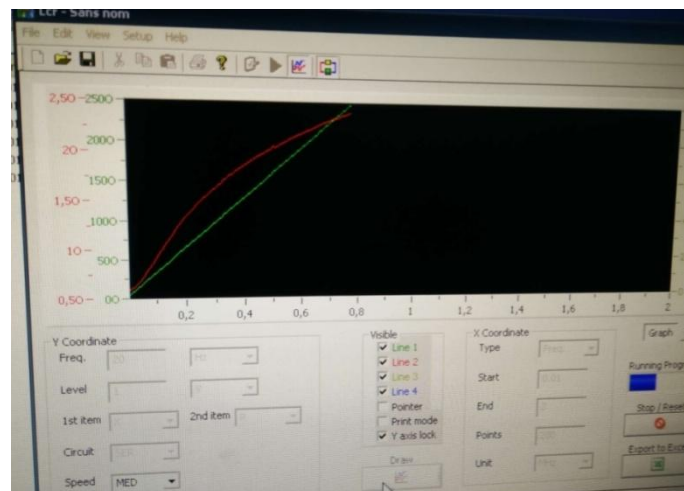


Figure IV. 15 Interface graphique de LCR-mètre.

La figure IV.15 montre un exemple de mesure de l'inductance et de la résistance d'une bobine, pour un balayage en fréquence allant de 20Hz à 2MHz, la courbe de la résistance en rouge et la courbe de l'inductance en verte.

IV.4 Résultats d'évaluation de la résistivité ortho-radiale

La Sonde CF est placée autour de la tige CFRC-UD pour évaluer la résistivité ortho-radiale. La mesure de la variation de la résistance de la bobine a été faite par le LCR-mètre.

Après application de technique du problème inverse, à la fréquence de 2MHz, la résistivité ortho-radial obtenue de la tige CFRC-UD vaut $0.0125 \Omega.m$.

Cette résistivité est ensuite introduite dans le modèle axisymétrique et nous avons obtenu les résultats donnés sur la figure IV.16 avec une comparaison aux résultats obtenus par des mesures expérimentales.

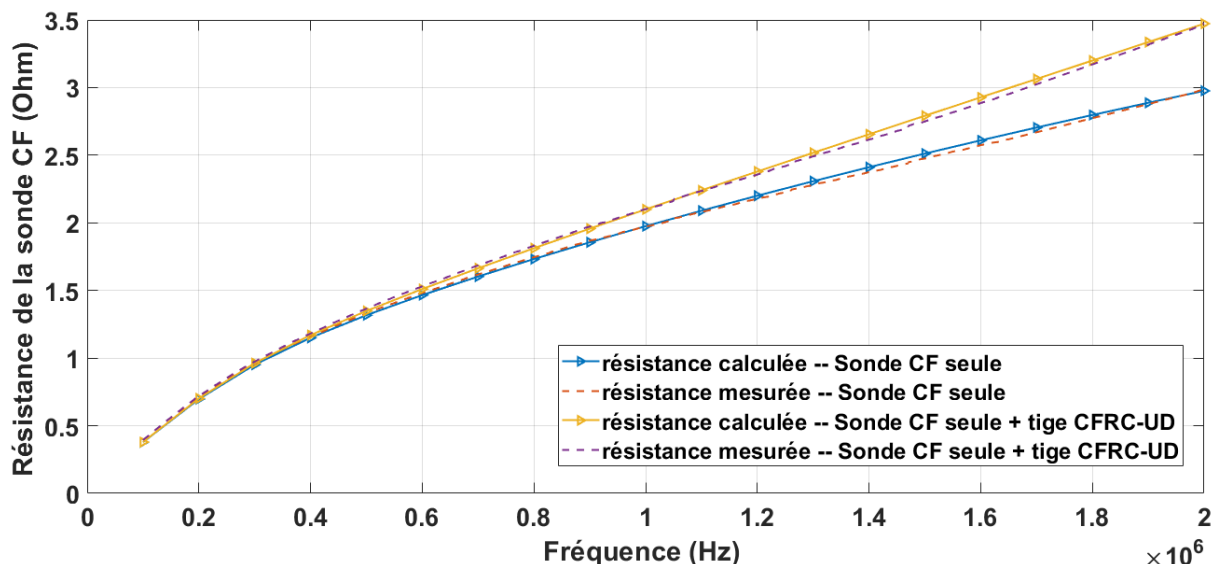


Figure IV. 16 La variation de la résistance de la sonde CF à vide et en charge en fonction de la fréquence.

La figure IV. 16 représente la variation de la résistance de la sonde CF en fonction de la fréquence à vide et en charge. La montre clairement l'influence de la résistivité ortho-radiale de la tige sur les valeurs de la résistance de la sonde CF tel que dans les basses fréquences entre 100kHz jusqu'à 500kHz, la différence entre les valeurs de la résistance de la bobine en charge et à vide sont les mêmes comme si la tige n'existe pas en charge à cause de la plus grande résistivité ortho-radial qui implique que les valeurs des courants induits sont très faible, de plus l'épaisseur de peau est plus grande que le diamètre de la tige.

Pour les fréquences élevées entre 600kHz jusqu'à 2MHz la différence entre les valeurs de la résistance de la bobine en charge et à vide sont très remarquable, du fait que l'épaisseur de peau dans la tige est plus en plus petite, cette réaction électromagnétique entre tige-bobine, donne une variation sur la résistance de la bobine.

Les valeurs numériques sont validées expérimentalement avec une bonne concordance, figure IV.17.

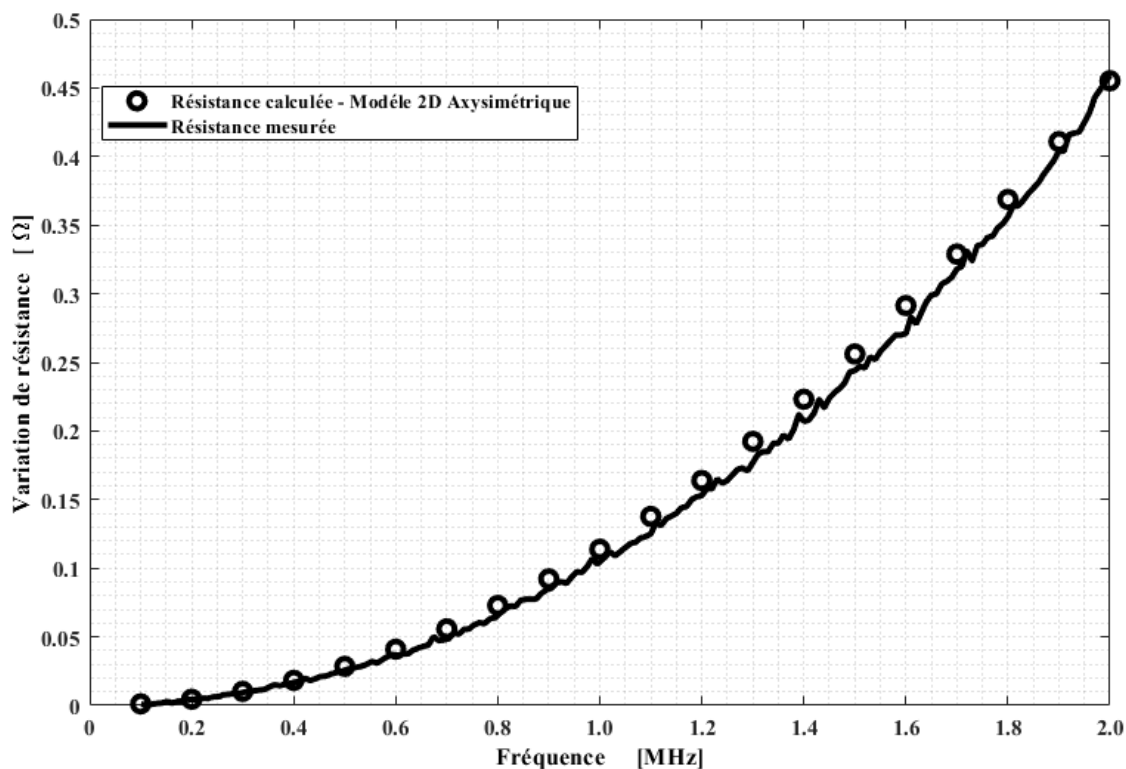


Figure IV. 17 Variation de résistance calculée en 2D de la bobine de solénoïde et de celle mesurée en fonction de la fréquence pour la résistivité identifiée de la tige composite.

La comparaison entre la variation de résistance calculée en 2D de la bobine et celle mesurée est donnée par la figure IV.17. L'erreur maximale entre les deux résultats est inférieure à 2%. On remarque que l'augmentation de la variation entre la résistance calculée et mesurée est proportionnelle à l'augmentation de la fréquence. Avec de faibles fréquences, la variation de la résistance calculée et la variation de la résistance mesurée sont négligeables mais dans les fréquences élevées ces variations deviennent remarquables. Cette augmentation de fréquence diminue l'effet de peau pour être inférieur au rayon de la tige-UD.

IV.5 Conclusion

La technique d'évaluation non destructive par courants de Foucault associée à la méthode du problème inverse est utilisée pour évaluer la résistivité électrique transversale de la tige composite à fibres de carbone unidirectionnel (CFRC-UD).

Une simulation 3D de Cedrat / Flux montre clairement que la résistivité électrique longitudinale n'a aucune influence sur la trajectoire des courants de Foucault influents créés dans la tige composite à fibres de carbone unidirectionnel et leur valeur pour une configuration solénoïdale de la sonde CF.

Par conséquent, la résistance peut être calculée à l'aide d'un modèle 2D axisymétrique. Le problème inverse est appliqué pour identifier la résistivité électrique ortho-radiale.

L'algorithme de colonie de fourmi est utilisé pour minimiser la fonction objectif du problème inverse.

La résistivité identifiée est introduite dans le modèle direct (modèle axisymétrique à deux dimensions) pour calculer la résistance. La confrontation entre la résistance calculée et celle mesurée montre une très bonne concordance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Tous les indices économiques et technologiques prouvent l'importance des matériaux composites renforcés en fibres de carbone (CRFC) comparés aux matériaux traditionnels. Ces matériaux voient leur utilisation hausser dans pratiquement tous les domaines de haute technologie. L'implication de ces matériaux dans le domaine du Génie Civil est récente et très prometteur.

La forme des matériaux CRFC utilisée pour renforcer les structures du génie civil est souvent cylindrique sous formes de tige ou de barre. Au cours de l'utilisation de ces matériaux, ils sont souvent sujet de défaillances (fracture des fibres, délaminage,...) dues aux contraintes mécaniques ou thermiques excessives ou aussi à des facteurs environnementaux. Pour détecter ces défaillances il est nécessaire d'utiliser des techniques non destructives. L'utilisation de la méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault nécessite la connaissance précise de la résistivité électrique de ces matériaux. Dans le cas des matériaux CRFC, la mesure de la résistivité est être très délicat et même complexes du fait de leur caractère hétérogène et anisotrope.

Dans ce contexte, nous avons entamé un travail de recherche dont l'objectif principal est la mise en place d'un banc expérimental pour l'évaluation non destructif des matériaux CRFC.

Pour cela il a été nécessaire de bien connaître ces matériaux et les techniques d'évaluation non destructive de la résistivité électrique utilisées, c'est ce que nous avons présenté au chapitre I. Nous avons vu que la méthode d'évaluation multi-échelle de la résistivité électrique n'est pas toujours applicable du fait qu'il faut avoir toute les données de fabrication de ces matériaux. La méthode d'évaluation expérimentale avec contact est également écartée du fait des difficultés de mise en contact des électrodes avec les fibres de carbone. De ce fait nous avons proposé d'utiliser la méthode d'évaluation non destructive sans contact basée sur les courants de Foucault (END-CF). La méthode consiste à calculer l'impédance de la bobine CF via un modèle mathématique dans notre cas numérique dédié aux courants de Foucault, et la comparer à celle obtenue par des mesures expérimentales. Le calcul de l'impédance est refait en changeant la valeur de la résistivité jusqu'à avoir la différence désirée entre l'impédance calculée et celle mesurée. Cette approche utilise exclusivement la méthode du problème inverse associée à un algorithme d'optimisation tel que les simplexes, les colonies de Fourmis ou le recuit simulé.

Nous avons simulé en 3D dans Cedrat Flux 2D/3D, le dispositif END-CF du matériau CRFC représenté par une bobine solénoïdale enroulée au tour de la tige composite anisotrope, nous avons constaté que les courants induits possèdent deux composantes, l'une ortho-radial et l'autre longitudinal. Nous avons aussi remarqué que, quel que soit la valeur de la résistivité longitudinale de la tige et pour la même résistivité ortho-radial, la résistance de la sonde CF reste inchangée, ce qui conduit à considérer uniquement la composante ortho-radiale des courants induits et négliger la composante longitudinale. De ce fait le

modèle tridimensionnel du dispositif END-CF peut être réduit à deux dimensions avec un axe de symétrie.

Un modèle mathématique basé sur la méthode des éléments finis 2D axisymétrique est mis en place pour calculer l'impédance de la bobine CF du dispositif d'évaluation de la résistivité électrique. Nous avons implémenté la méthode du problème inverse et quelques méthodes de minimisation de la fonction objectif sous environnement Matlab.

Nous avons également mis en place une approche de conception des sondes CF appliquées à l'END-CF des matériaux CRFC avec prise en compte du phénomène d'auto-résonance. En effet, du fait que la composante ortho-radiale du tenseur de résistivité électrique est très importante, l'épaisseur de peau sera très élevée aux fréquences inférieures à 1MHz comparée aux rayons des tiges CRFC étudiées (<8mm). Il faut alors augmenter la fréquence au-delà de 1MHz pour ramener l'épaisseur de peau à une valeur inférieure ou égale au rayon des tiges. Aux fréquences élevées, un effet indésirable (dus aux capacités parasites dans la sonde CF) apparait. Cet effet dépend du nombre de spires et du nombre de couches des sondes CF, il dépend également de la permittivité diélectrique de la vernie utilisée pour isoler les conducteurs en cuivre de la sonde. Pour tenir compte de l'effet capacitif un modèle numérique avec couplage EF-circuits est proposé. La technique du problème inverse est utilisée pour identifier les capacités entre spires et entre couches.

L'étude menée sur le phénomène de l'auto-résonance dû aux capacités internes de la bobine, nous a permis de classer les sondes CF en deux catégories. La première catégorie concerne, les sondes à faible nombre de spires qui possèdent une faible sensibilité et une fréquence de résonance très élevée pouvant atteindre les 10MHz ou plus. La deuxième catégorie concerne les sondes à nombre de spires élevé avec plusieurs couches qui possèdent une sensibilité élevée et une fréquence de résonance faible, inférieur à 1MHz. Par conséquent, l'utilisation de la première catégorie de sondes CF ne nécessitent en aucun cas de faire appel au modèle qui tient en compte l'effet capacitif.

Nous avons utilisé avec succès la première catégorie de sondes, à la fréquence de 2MHz, pour évaluer la résistivité électrique ortho-radiale d'une tige composite à renfort unidirectionnel en fibres de carbone avec un diamètre de 16mm. La valeur de la résistivité électrique obtenue concorde avec l'ordre des valeurs retrouvées dans les littératures. Cette dernière est ensuite introduite dans le modèle numérique 2D pour calculer l'impédance à différentes fréquences et a été confronté à celle mesurée. Les résultats obtenus sont très concluant.

Quant à la deuxième catégorie, nous l'avons utilisé pour déterminer les capacités internes entre les spires et entre les couches de la sonde en l'absence de la tige composite en utilisant la technique du problème inverse. En présence de la tige dont la résistivité est déterminée par la première catégorie de sondes, nous avons évalué la valeur du condensateur interne équivalent du matériau composite.

Perspectives:

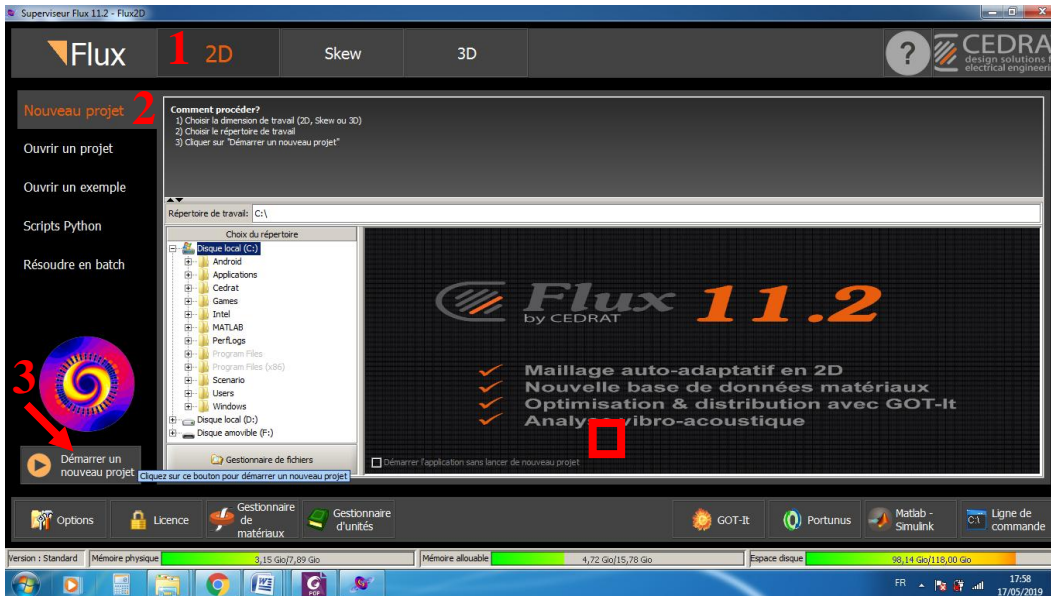
- Il serait intéressant de s'intéresser aux modèles mathématiques permettant la prise en compte des contacts entre fibres comme la méthode PEEC.
- Elargir l'application de l'approche d'END-CF développée sur les matériaux de formes différentes de la forme cylindrique (plaque, ...).
- Modélisation de comportement électromagnétique des matériaux composites sous des micro-ondes à haute fréquence.
- Evaluation non destructive par des micro-ondes des matériaux composites à fibre de carbone avec l'utilisation des guides d'onde à haute fréquence (GHz) pour les applications de télécommunication par satellite (antenne à réflecteur en composite) et radar en composite.

Annexes

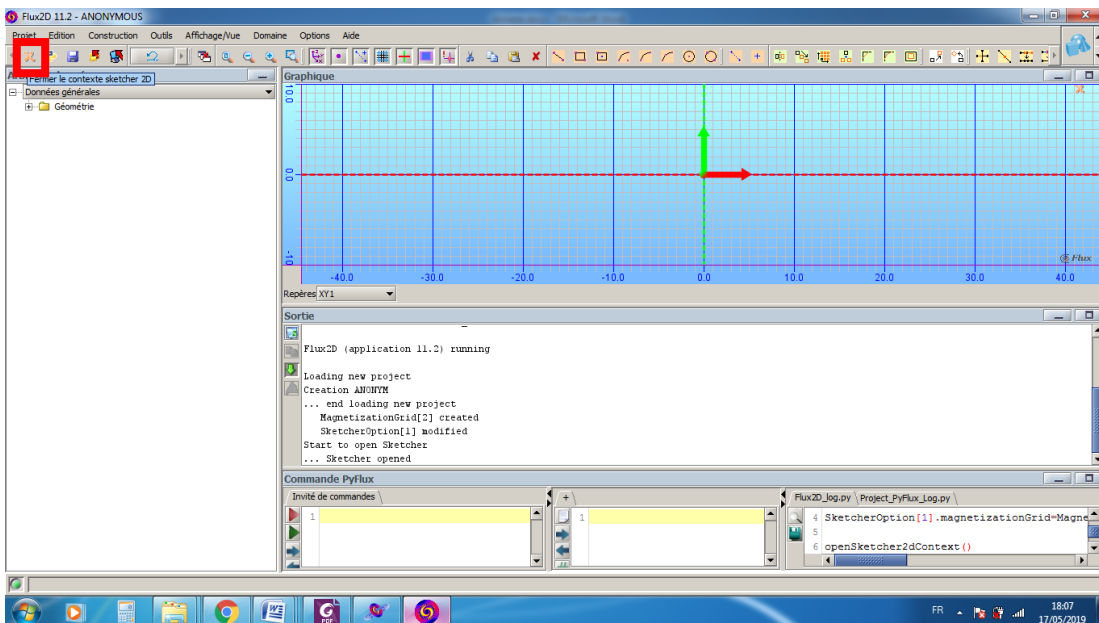
Annexe1

Guide pour simuler une bobine à conducteur massif en 2D axisymétrique sous Flux11.2

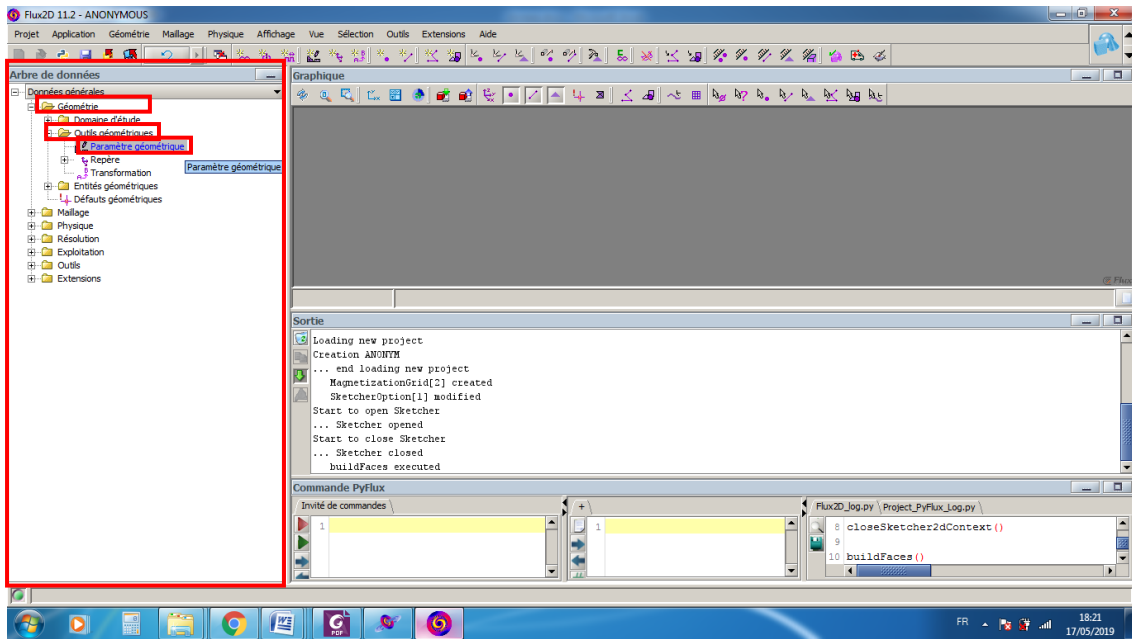
Dans notre exemple on va choisir le model 2D.



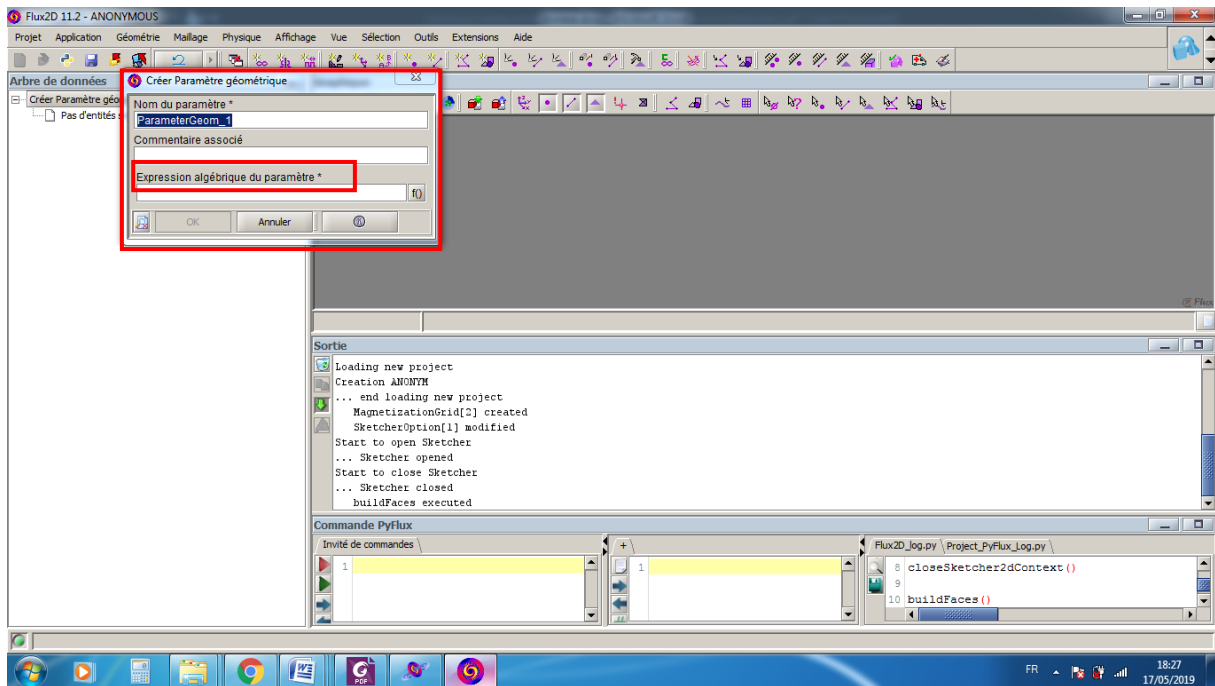
Puis pour être alize dans la conception géométrique il faut fermer le contexte skecher 2D.



Dans l'arbre de données aller vers **Géométrie**) cliqué sur (+ **Outil géométriques**), puis double clic sur (**paramètre géométrique**) pour entrées les données géométriques de la bobine.



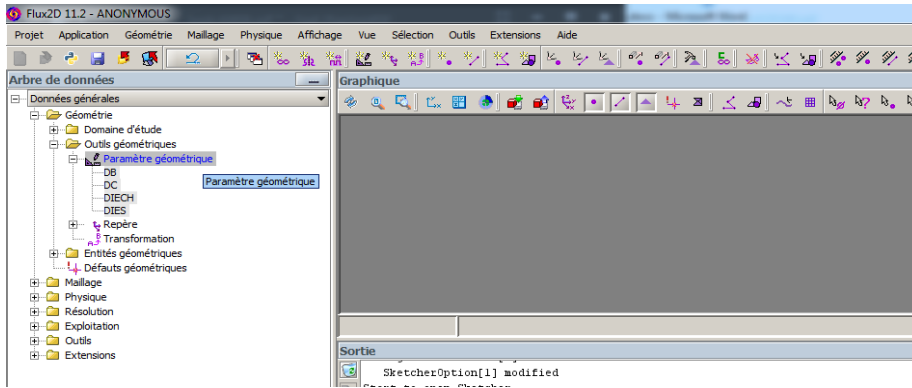
Dans la fenêtre suivante entré un des paramètres de la bobine.



Expression algébrique du paramètre peut prendre une fonction ou une valeur fixe

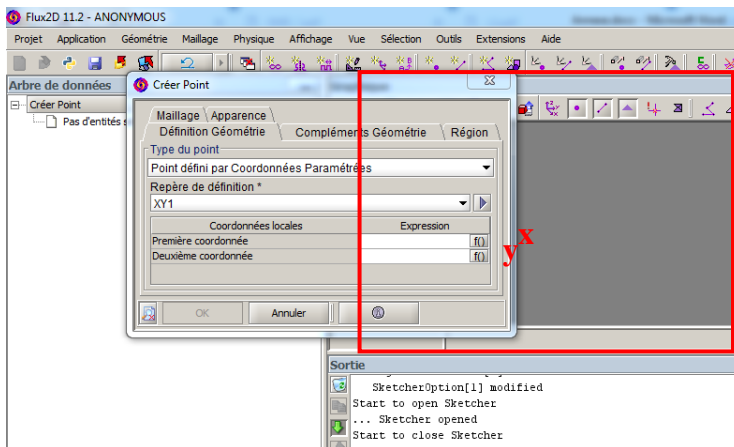
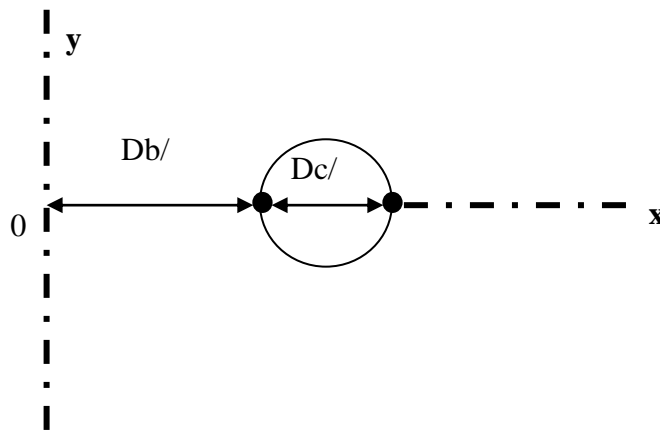
Conception et géométrie

Nous allons citer les paramètres géométriques de la bobine dans l'arbre des données comme illustre dans figure suivante :



Pour désigner les points allés vers l'arbre des **Entité géométriques** puis double clique sur **Point**.

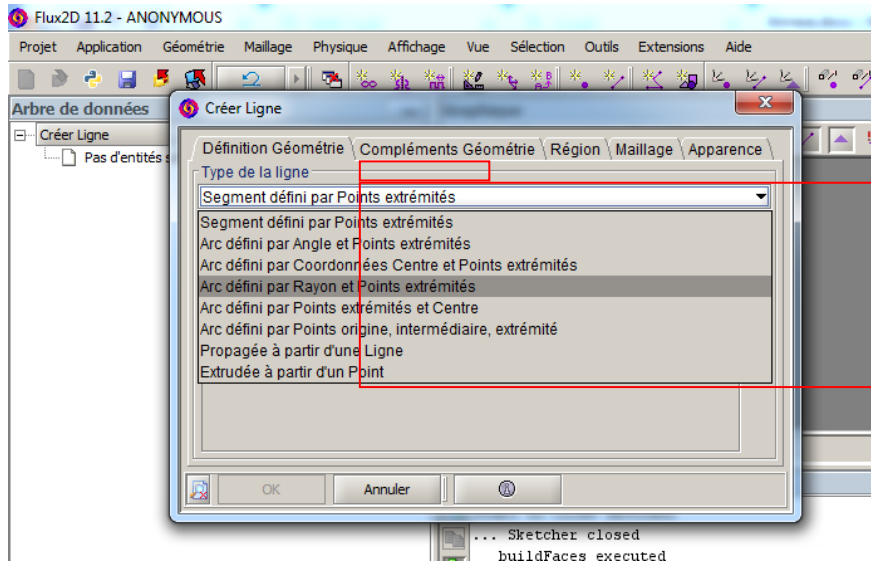
Pour désigner une circule il nécessite deux point comme illustre dans la suivante



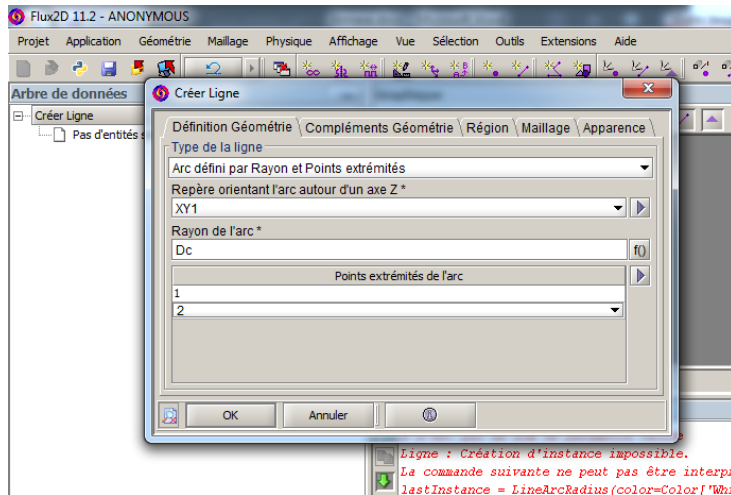
Dans la fenêtre **Créer Point**, dans la case **Première coordonnée** (abscisse) écrire $Db/2$, dans la **Deuxième coordonnée** écrire 0, puis cliquer sur **OK**.

Après de cliquer sur **OK** la même fenêtre sera Apparaître encore fois, dans la case **Première coordonnée** (abscisse) écrire $Dc+Db/2$, dans la **Deuxième coordonnée** écrire 0, puis cliquer sur **OK**.

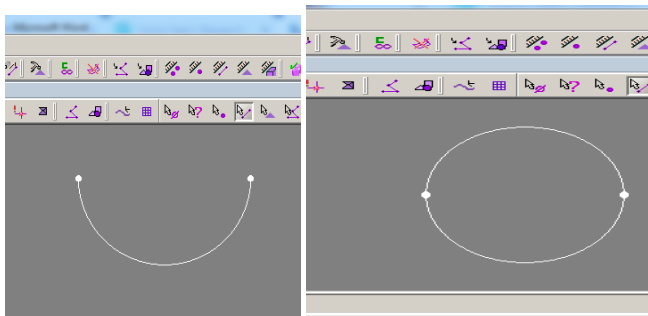
Dans l'arbre **Entité géométriques** double clic sur **Ligne**, dans la fenêtre **Créer Ligne**, aller vers **Type de la ligne**, et choisi **Arc défini par Rayon et Points extrémités**.



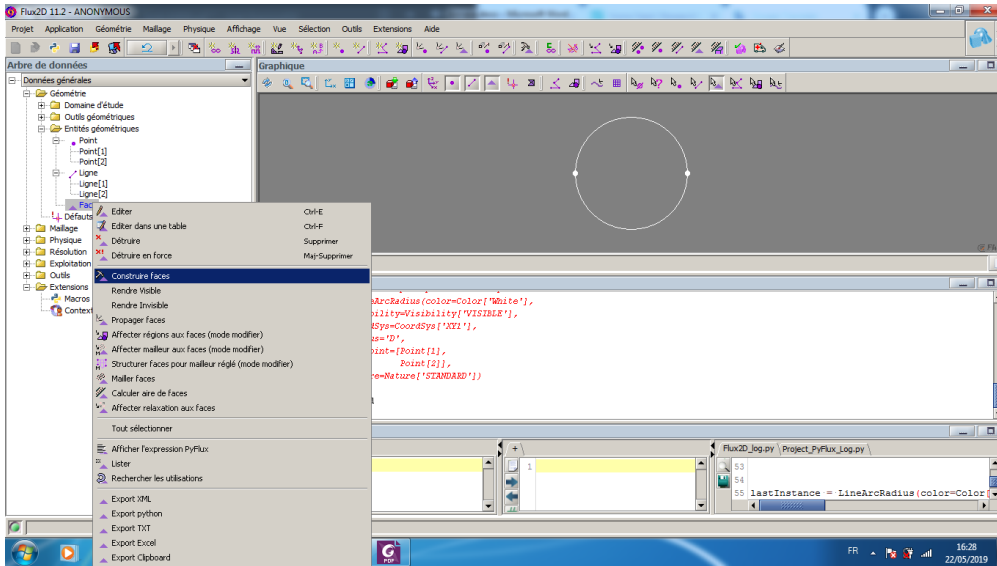
Dans la case **Rayon de l'arc** écrire $Dc/2$, dans la case **Points extrémités de l'arc** (point de départ 1 (la première point), point d'arriver 2 (la deuxième point)) puis cliquer **OK**.



Un arc sera Apparâître dans la fenêtre **Graphique**, faire la même opération pour le deuxième arc mais changer juste **Points extrémités de l'arc** (point de départ 2 (la deuxième point), point d'arriver 1 (la première point)) puis cliquer **OK**.

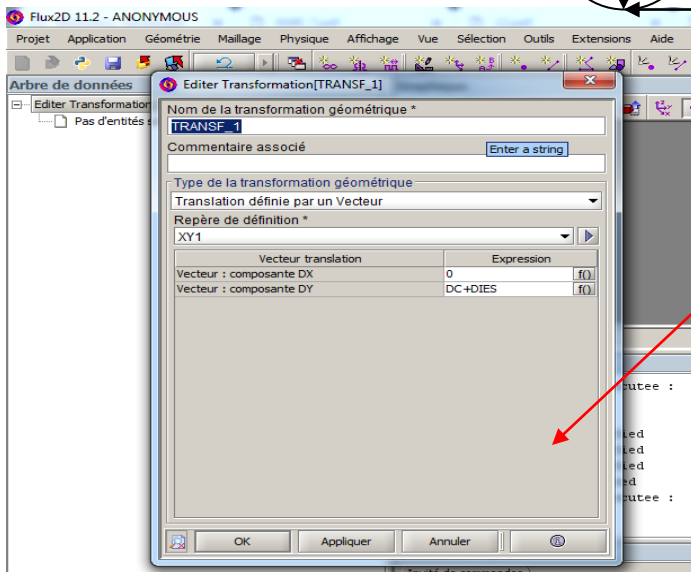
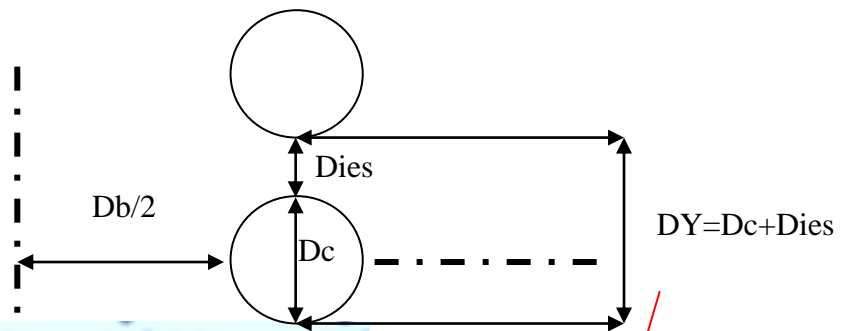


Pour construire les faces aller vers **Entité géométriques** cliquer sur la droite sur **Face** dans la liste choisi **Construire Face**.

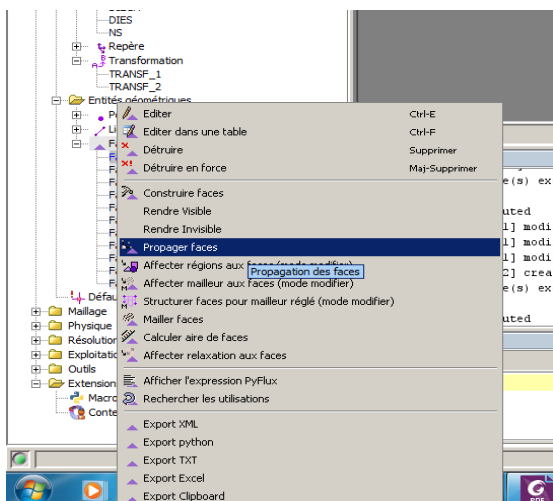


Après la création de la face d'une spire, il n'est pas nécessaire de faire cette opération pour tous les spires alors on va faire des translations de cette face pour faciliter la conception.

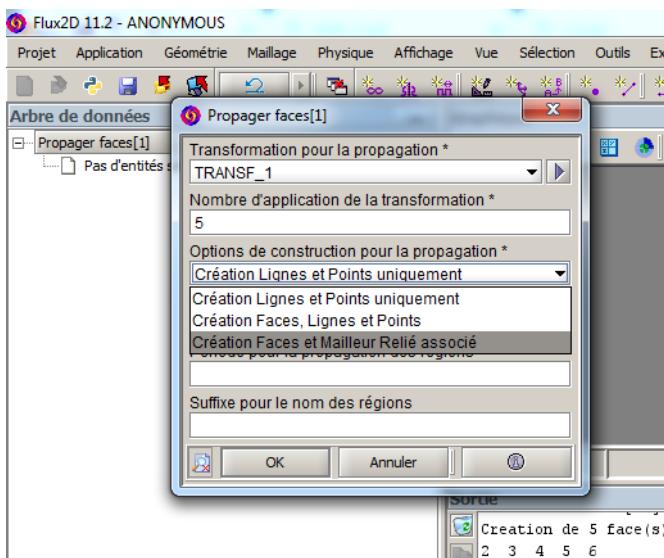
Aller vers **Géométrie** → **Outils géométrique** → double clique sur **Transformation**



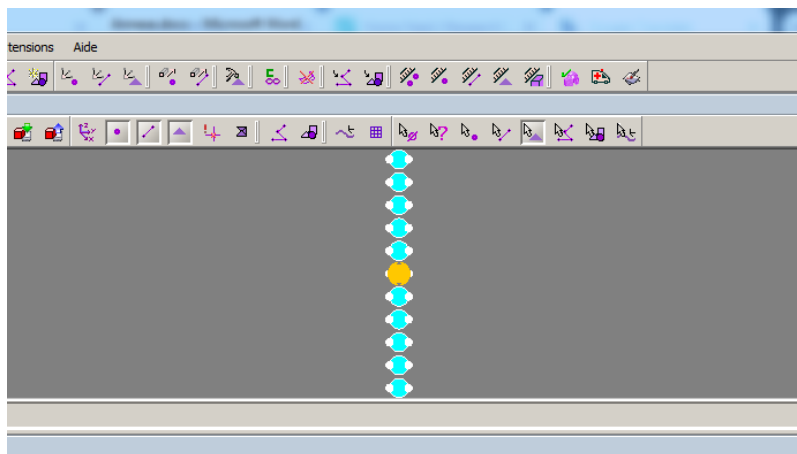
Cette translation est pour le côté positif du plan, aller vers **Entité géométriques** puis cliquer sur la droite dans **Face** puis choisi **Propager Faces**.



Dans la fenêtre **Propager faces** → écrire 5 pour faire 5 copies de la cercle principale dans **Nombre d'application de la transformation**, dans **Option de construction pour la propagation** choisi **Création Faces et Manilleur relié associé** pour le maillage soit le même dans toutes les spires puis **OK**.

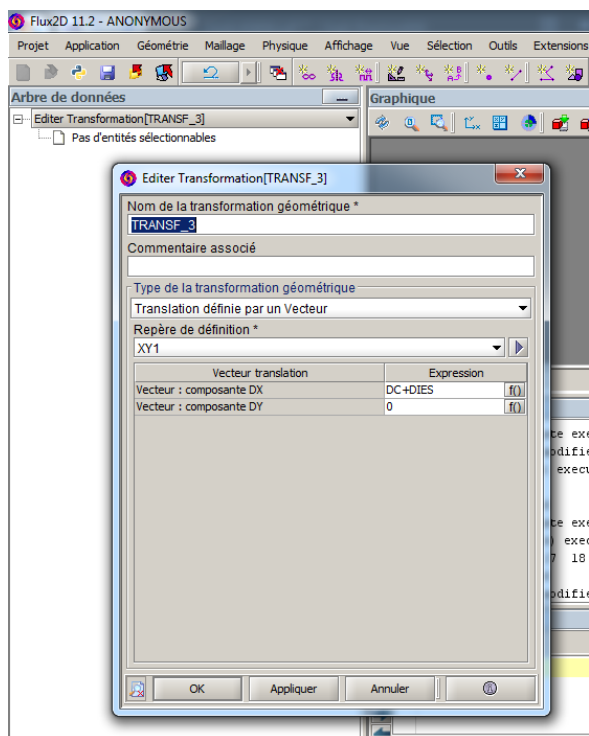


Dans la deuxième transformation juste changer le $DY = -Dc - Dies$ et faire la même opération pour créer les spires dans le plan négatif, vous allez avoir 11 spires comme illustre dans suivante (première couche de la bobine).

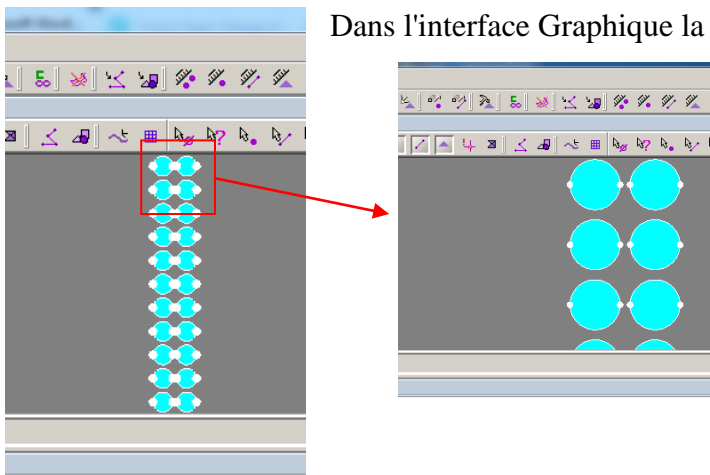
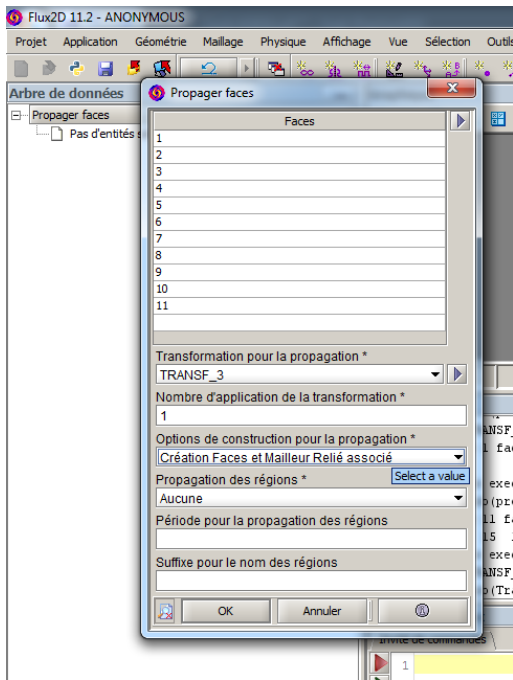


executée :

Pour construire la deuxième couche de la bobine créez une nouvelle transformation avec $DX=Dc+Dies$ et $DY=0$



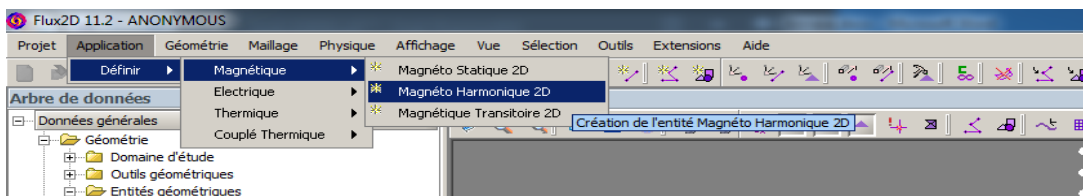
Aller vers **Face** cliquer sur la droite et choisi **Propager faces** puis cliquer sur **OK**.



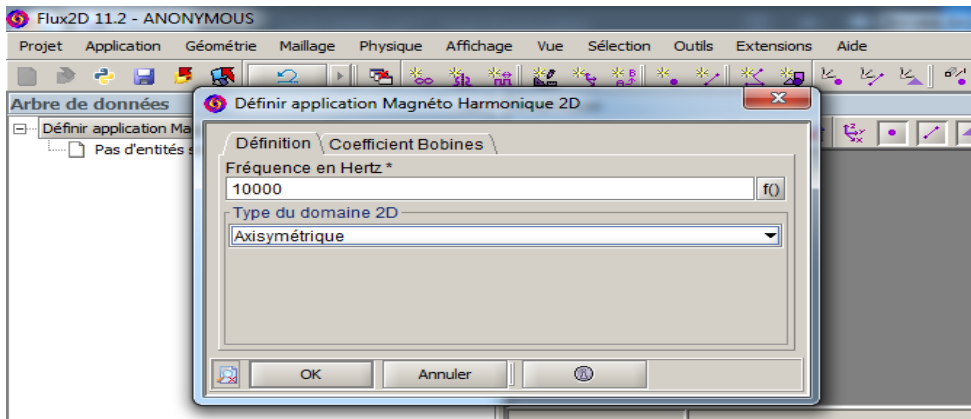
Dans l'interface Graphique la bobine sera comme sui

Définition de l'application

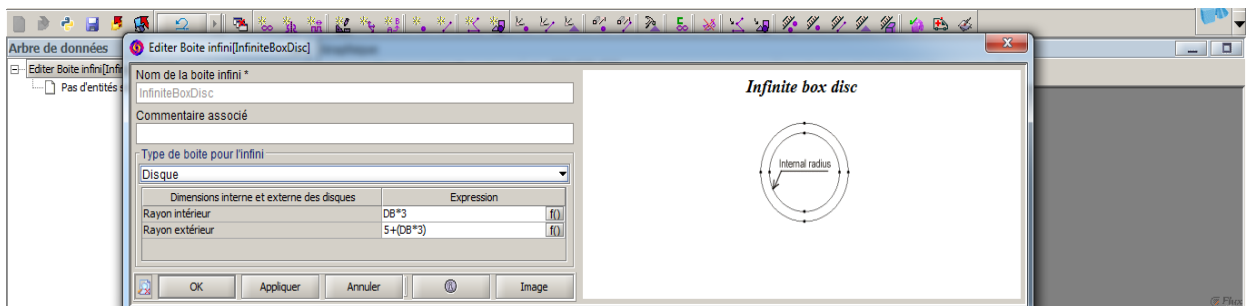
Pour que la bobine soit alimentée par une source sinusoïdale il faut choisir une application magnéto harmonique 2D par les étapes suivant (**Application** → **Définir** → **Magnétique** → **Magnéto Harmonique 2D**) comme illustre dans la suivante.



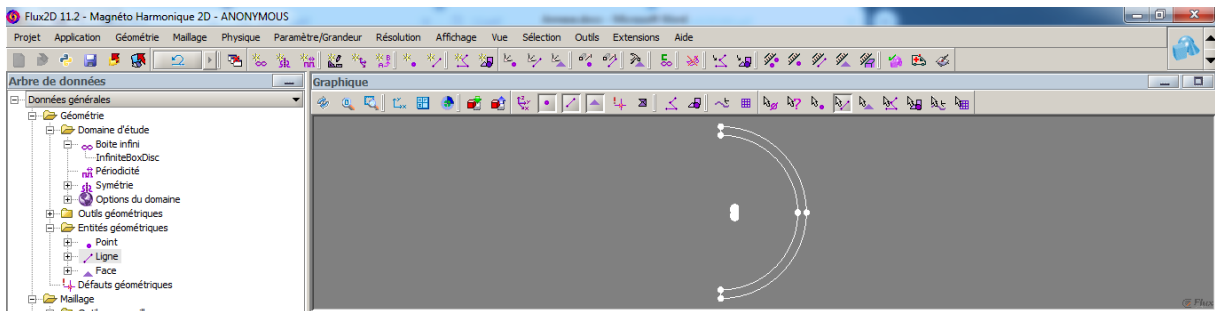
Dans la fenêtre Définir application Magnéto Harmonique 2D (**Fréquence en Hertz =10000Hz, type de domaine 2D Axisymétrique**) puis OK.



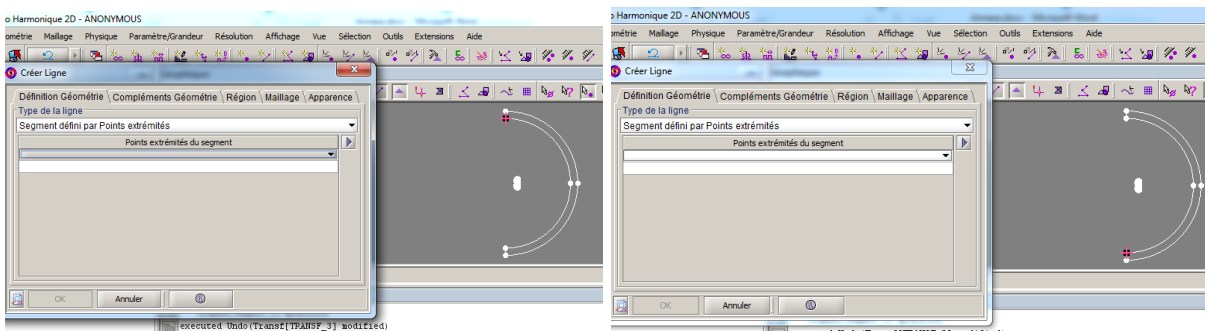
Pour créer le domaine d'étude aller vers **Géométrie**→ **Domaine d'étude** → double cliques sur **Boite infini**, entrées les données comme illustre dans la suivante puis **OK**.



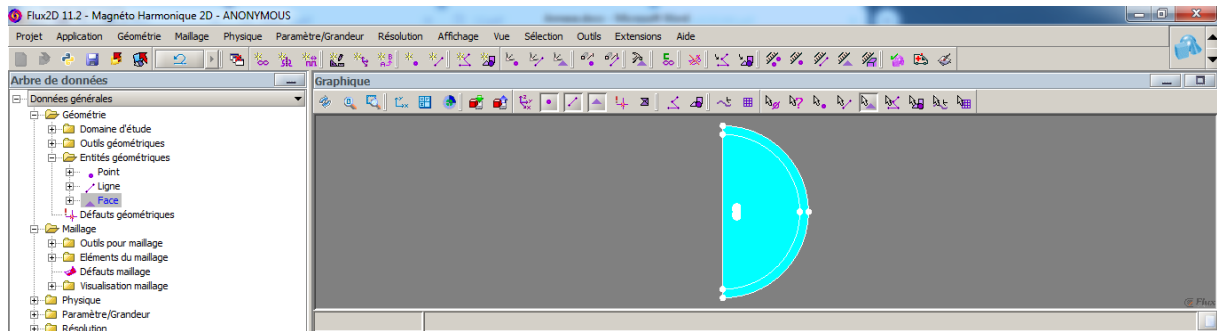
L'interface graphique sera comme sui.



Pour fermer le domaine d'étude aller vers **Entités géométrique**→ double cliques sur ligne **Ligne**, puis choisi **segment défini par Points d'extrémité**, dans la liste choisi les deux points dans l'interface graphique comme illustre dans la suivante.



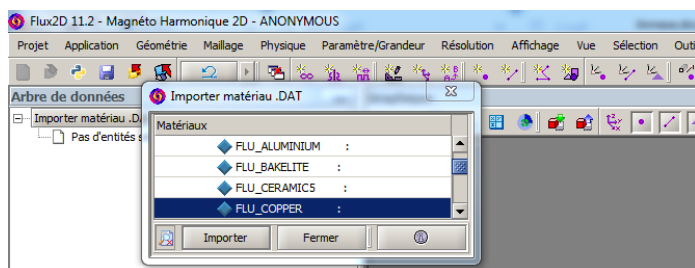
Pour compléter la géométrie aller vers **Face** et cliquer sur la droit et choisi **construire face**.



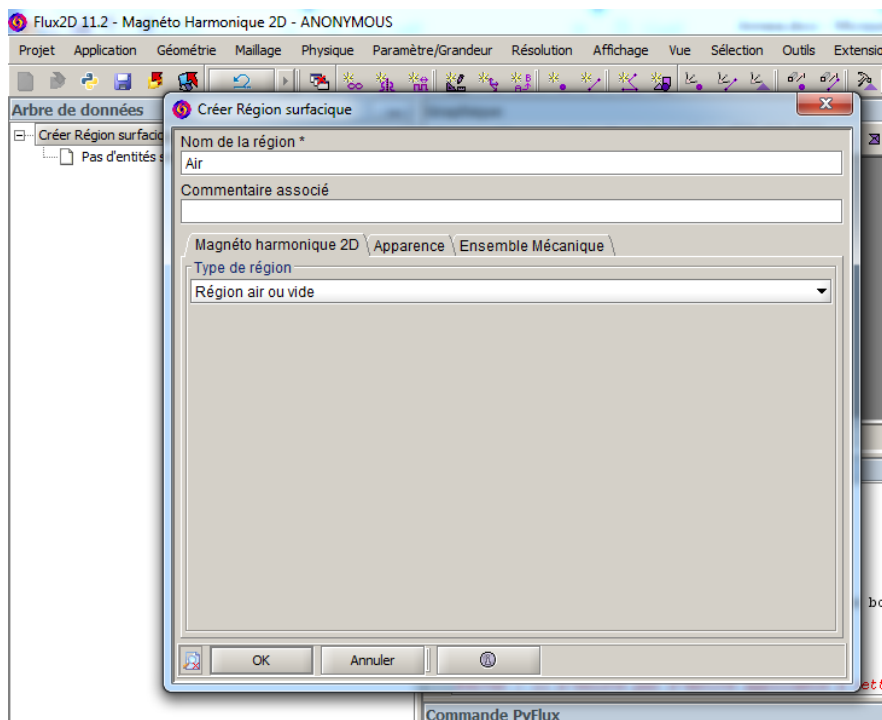
Physique

Cette partie contient la définition des régions (conducteur, air, ..) par des matériaux puis le couplage circuit par des conducteurs massif.

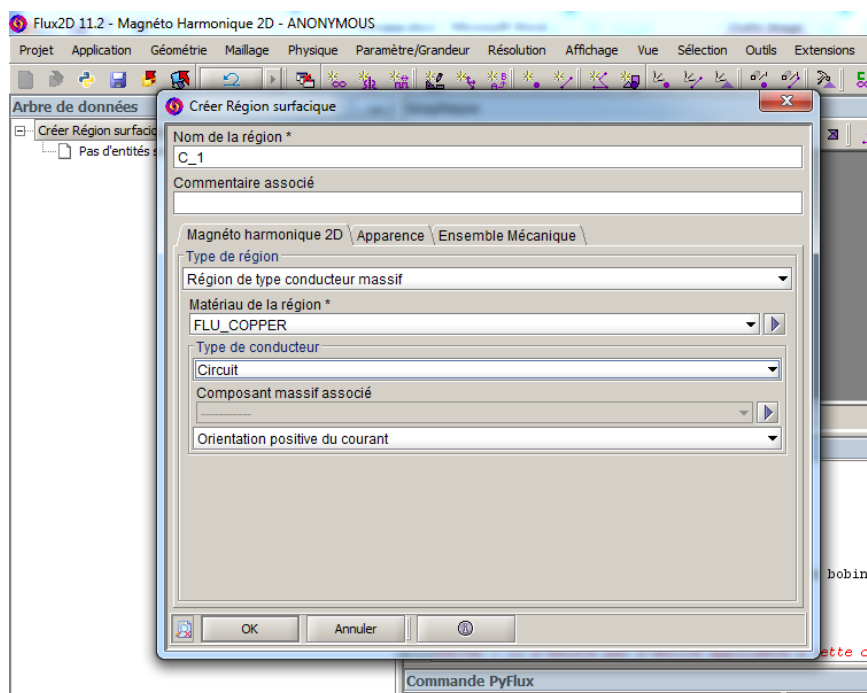
Dans l'arbre de données aller vers **Physique** → cliquer sur la droite sur **Matériau** puis choisi **importer matériau .DAT**, dans la fenêtre **importer matériau .DAT** cliquer sur l'arbre **FLUX_111_MATRI.DAT** et choisi **FLU_COPPER** (cuivre) puis cliquer **Importer**.



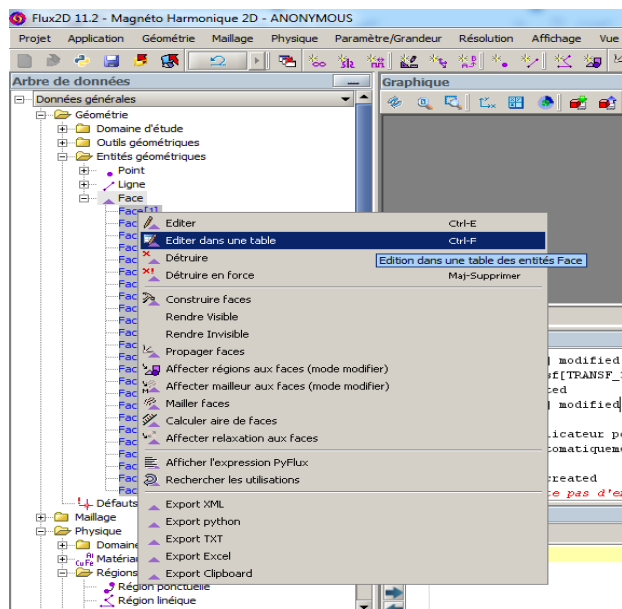
Pour créer les régions, Dans l'arbre de données aller vers **Physique** → **Région** → double cliquer sur **Région Surfactive**, la première région c'est l'air type de région air,

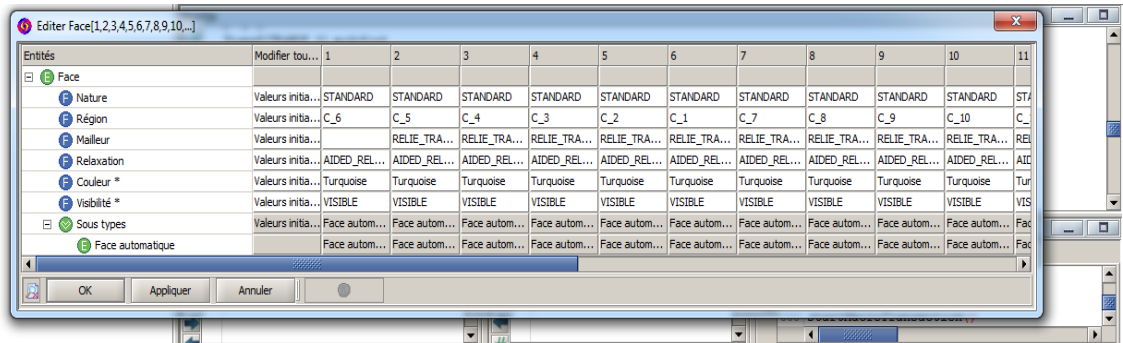


Pour les spires on va choisi **région de type conducteur massif**, chaque région de conducteur massif présente une spire alors il faut créés 22 région de type conducteur massif comme illustre dans la suivante.

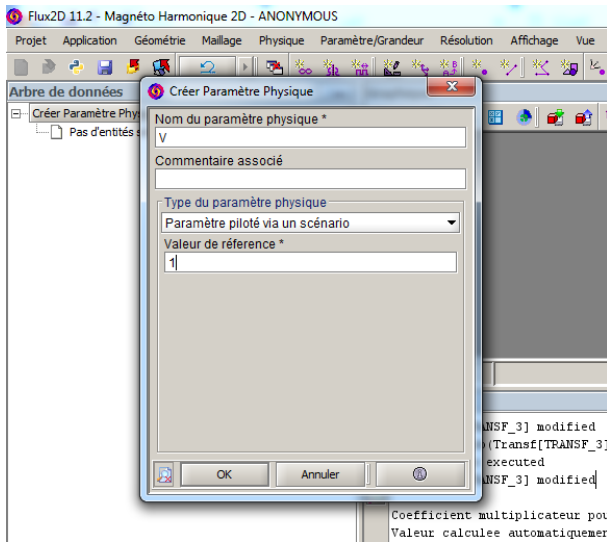


Pour affecter les régions aux faces aller vers **Face** et sélectionner toutes les face puis cliquer a droit choisi **Editer dans une table**.

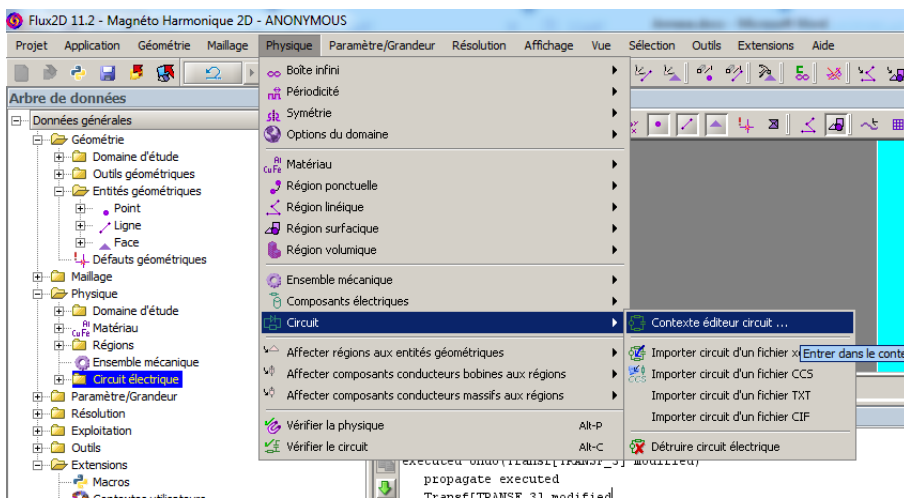




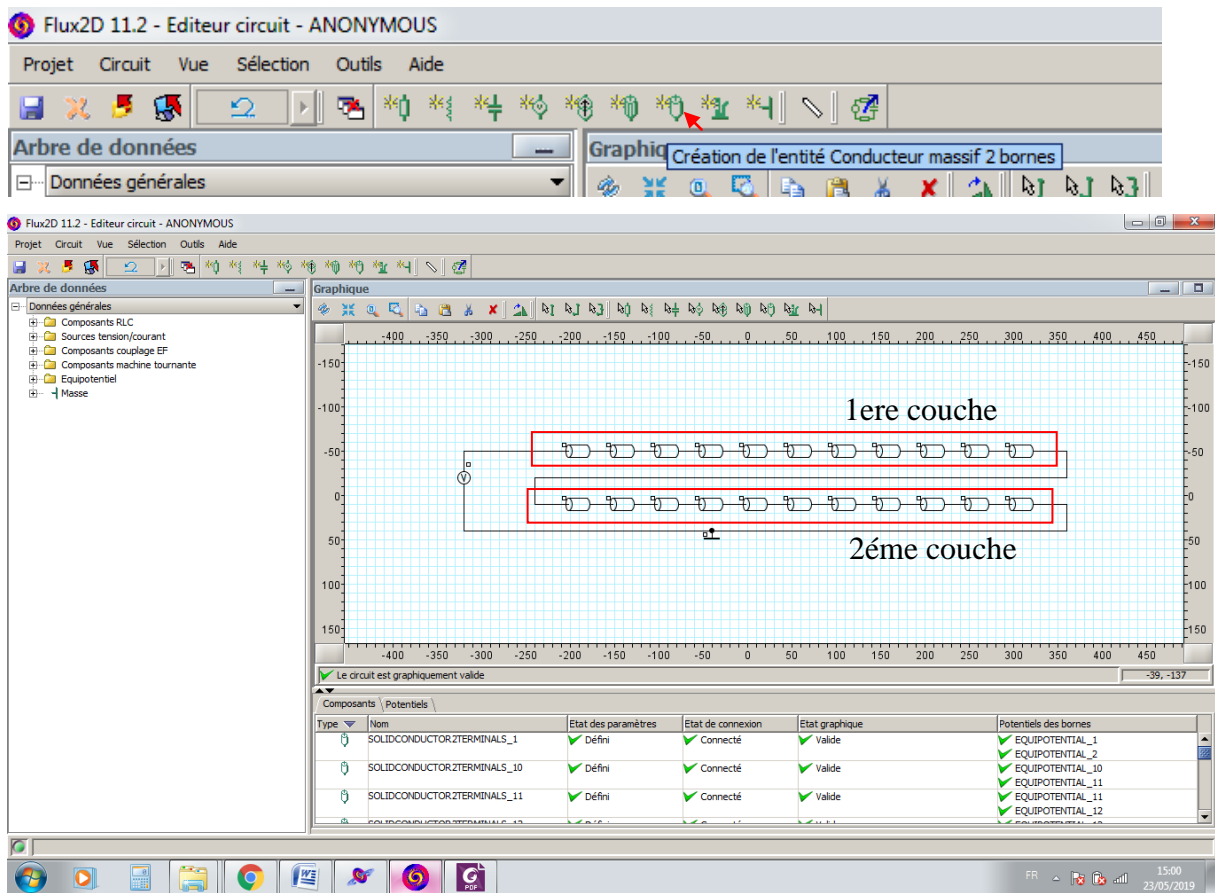
Chaque conducteur massif représente une région de type conducteur massif,
 Pour créer des paramètres entrées et sorties aller vers **Paramètre/Grandeur** dans l'arbre de données puis double cliquer sur **Paramètre E/S**, on va créer un paramètre pour la tension d'alimentation $V = 1V$ et un autre pour la fréquence $F = 10000Hz$.



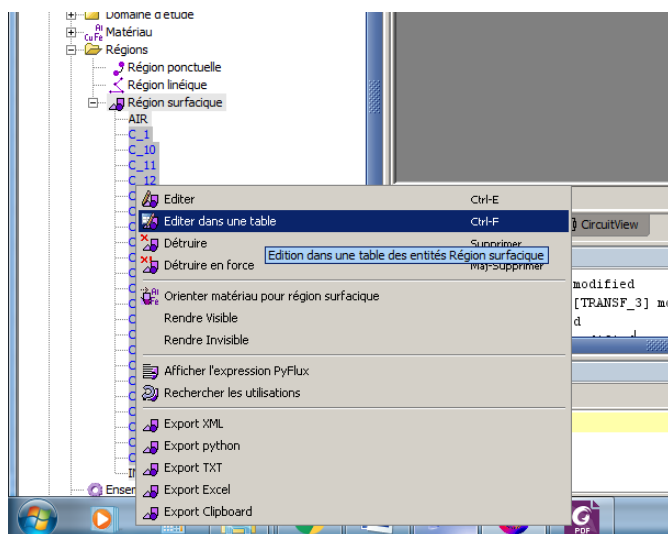
Pour faire le couplage circuit aller vers la barre des outils puis **Physique** → **Circuit** → **Contexte éditeur circuit**.



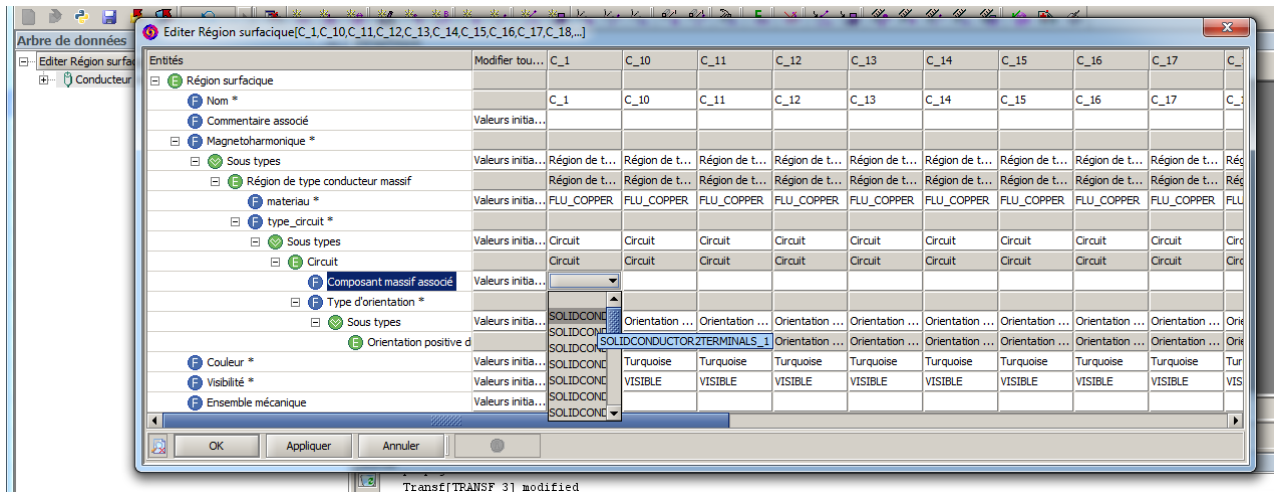
Après cette action une page apparaitre on construit des conducteur massif en série pour la première et la deuxième couche.



Pour affecter les conducteurs massifs dans les région aller vers **Région surfacique** puis sélectionner toutes les régions de type conducteur massif, puis cliquer sur la droite et choisi **Editer dans une table**.



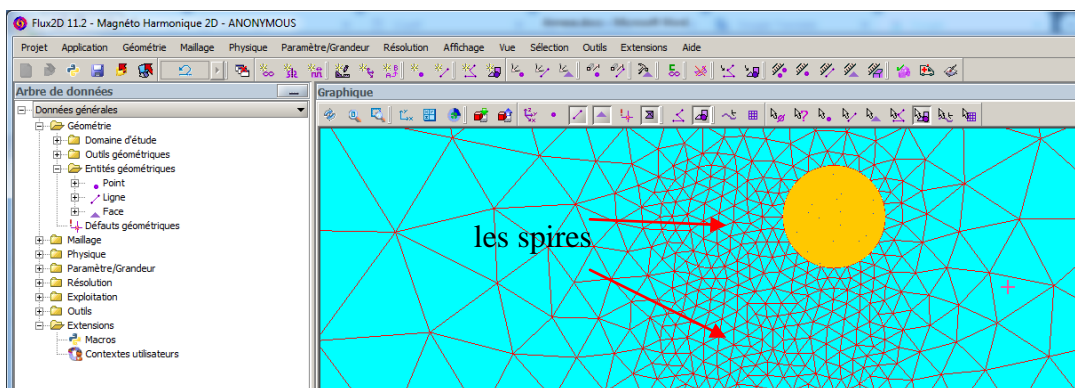
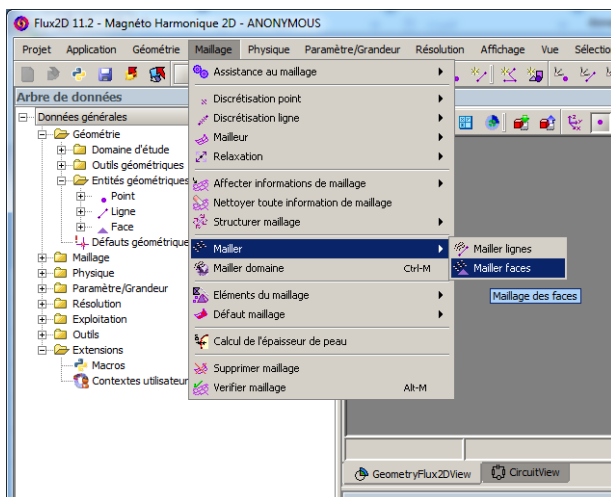
Dans l'arbre des régions surfacique aller vers **Composant massif associe** puis choisi la composant massif qui correspond la région surfacique comme illustre dans la suivante.



Après l'affectation on va aller vers le maillage de la région.

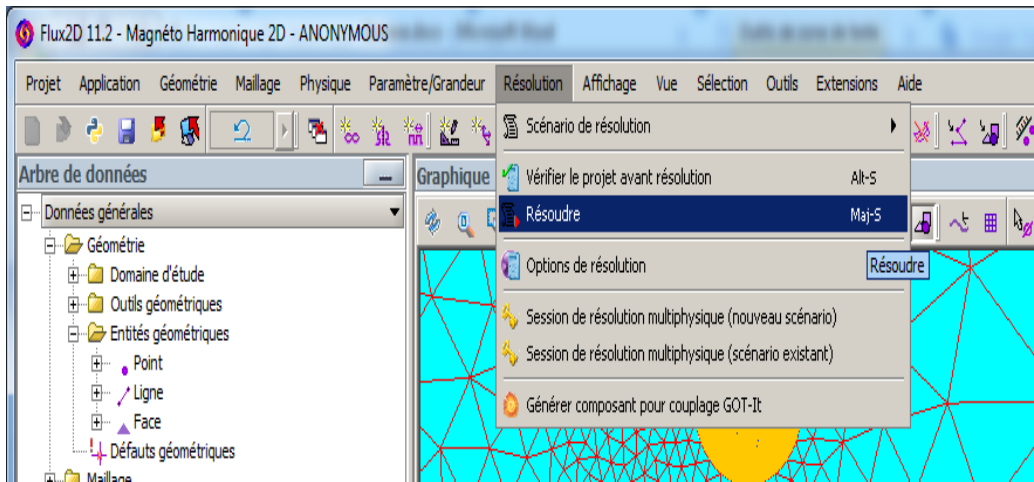
Maillage

Pour faire le maillage standard voire la suivante.

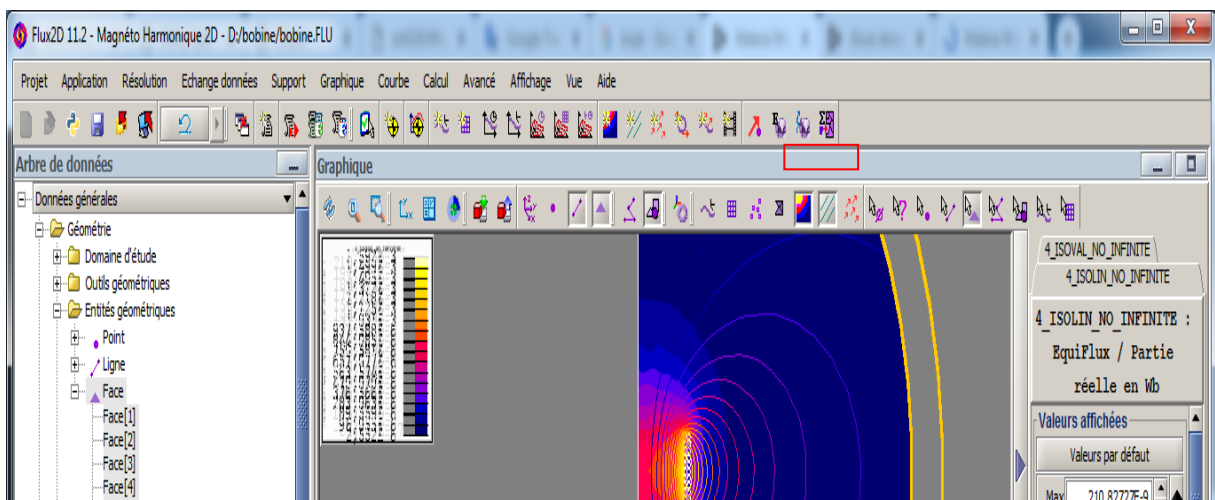


Post traitement et analyse des résultats

Pour faire la résolution du problème voire la suivante.

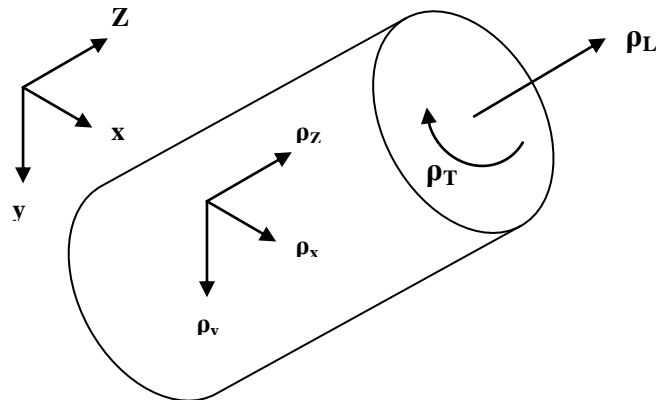


Pour voir les lignes du champ magnétique suivi la suivante.



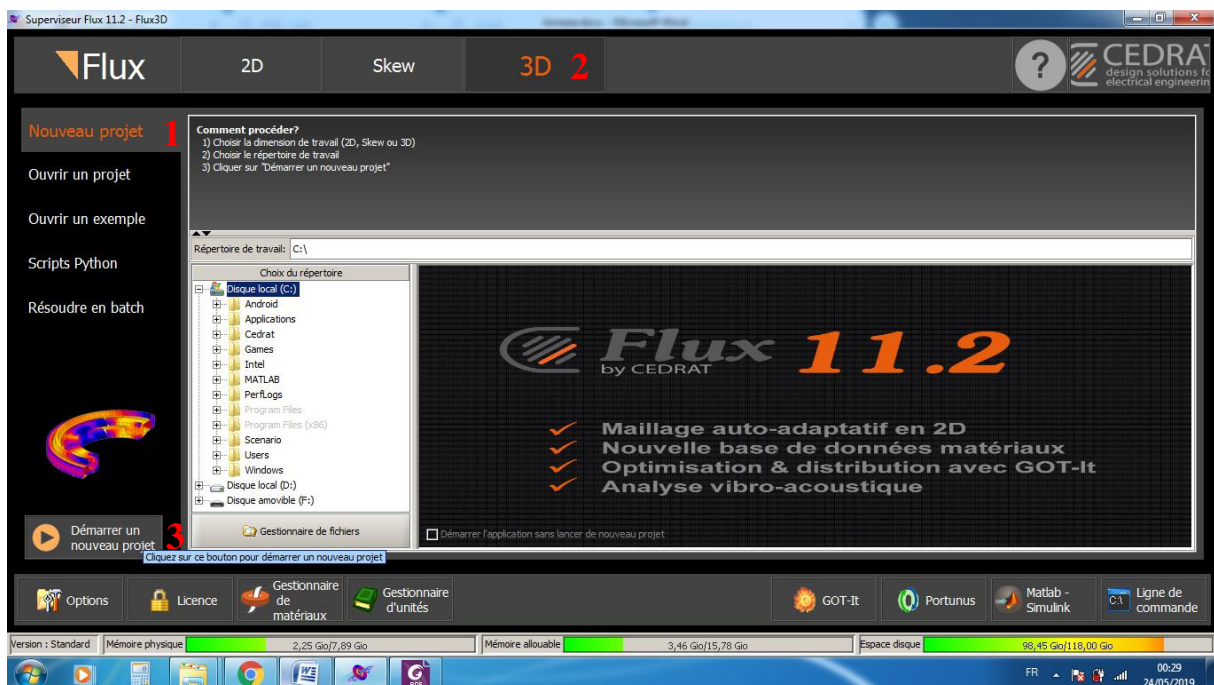
Annexe 2

Déclaration les propriétés électriques anisotrope d'une tige composite sous Flux11.2.

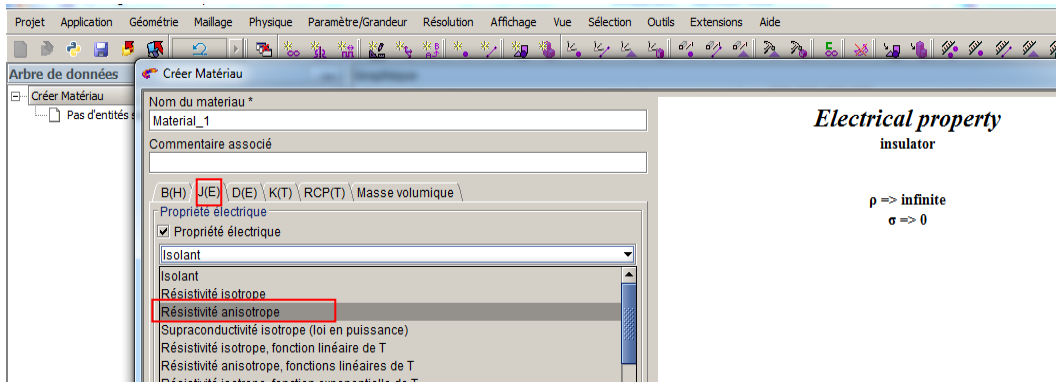


ρ_x , ρ_y et ρ_z sont les composants du tenseur de la résistivité électrique de la tige composite à fibres de carbone unidirectionnelle tel que : $\rho_x = \rho_y = \rho_T$ avec ρ_T la résistivité ortho-radial et $\rho_z = \rho_L$ avec ρ_L la résistivité longitudinale, la tige est de diamètre de 16mm et une longueur de 100mm.

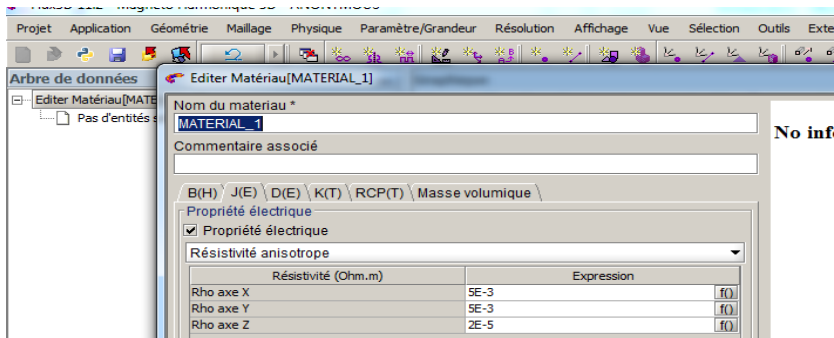
Pour que la structure ait une résistivité électrique anisotrope la résolution doit être dans le domaine 3D comme illustre dans la suivante



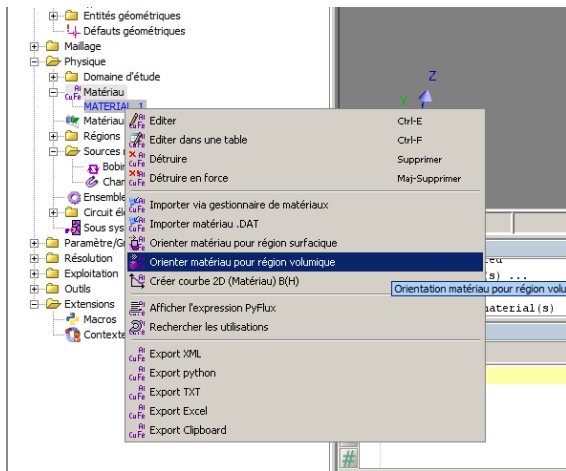
Après la construction de la tige et la définition de l'application Magnéto Harmonique 3D dans l'arbre **Physique** → double clique sur **Matériau** et suivi les étapes comme illustre dans la suivante.



Après la sélection sur **Résistivité anisotrope** entrées les donne du tenseur de la résistivité électrique de la tige composite puis cliquer **OK**.



Pour orienter le matériau cliquer sur la droite dans MATERIAL_1 et cliquer sur **Orienter matériau pour région volumique**.



Cette étape nous permet de créer une tige composite avec des propriétés électriques anisotrope dans le logiciel Flux 11.2.

Annexe 3

La code source en matlab de l'Algorithme de colonies de fourmis

```
cost=1;           %initialize with any random values
prev_cost=200000; %such that prev_error>>error
times=1;         %pour souvrgader sigma
startsigma = 100; %sigma initial
total_ants = 5; %nombre des fourmi
max_it = 50;% iteration maximal
it = 1;
while ((cost-prev_cost)~=0 && it < max_it)
%for it=1:max_it

    if (times > 1)
        % SavDiff(times-1) = prev_error - error;
        prev_cost = cost;
    end

    for i=1:1:total_ants
        sigma(i)=startsigma+(rand)*(-1); %each ant randomly
takes any
    end

    for i=1:1:total_ants
        costs(i)=CostModel(sigma(i));
    end

    for i=1:1:total_ants
        pheromone(i) = 1/costs(i);
    end

    bestsigma=find(pheromone==max(pheromone));

    if costs(bestsigma)<prev_cost
        startsigma=sigma(bestsigma);
        savesigma(times)=startsigma;
        cost=costs(bestsigma);
        times = times + 1;
    end
    it=it+1;

end

sigmafina1 = savesigma(times-1)
```

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Anthony Vicari. (2015, 20 April) <http://www.machinedesign.com>. [Online]. <http://www.machinedesign.com/contributing-technical-experts/will-carbon-fiber-find-widespread-use-automotive-industry>
- [2] Yasir Matloob Saeed, "Behavior of Prestressed Concrete Beams with CFRP Strands," Portland State University, Portland, Thèse de doctorat 2722, 2016.
- [3] K. Genel S. Ekşi, "Comparison of Mechanical Properties of Unidirectional and Woven Carbon, Glass and Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composites," *Acta Physica Polonica A*, vol. 132, no. 3, pp. 879-882, 2017.
- [4] Abdeldjelil Belarbi, Mina Dawood, Bora Gencturk, Bora Acun Prakash Poudel, "Prestressing bridge girders with carbon fiber–reinforced polymer: State of knowledge and research needs," *Advances in Structural Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 1-15, December 2017.
- [5] Bernd Zwingmann and Mike Schlaich Yue Liu, "Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures— A Review," *Polymers*, pp. 2078-2099, 2015, 7(10).
- [6] Urs Meier, "Carbon Fiber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering," *Structural Engineering International*, vol. 2, no. 1, pp. 7-12 , 1992.
- [7] Chris P. Pantelides, and Lawrence D. Reaveley Clayton A. Burningham, "New Unibody Clamp Anchors for Posttensioning Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Rods," *PCI Journal*, vol. 59, no. 1, pp. 103-113, Mar 2014.
- [8] Chris P. Pantelides, Lawrence D. Reaveley Clayton A. Burningham, "Repair of Reinforced Concrete Deep Beams Using Post-Tensioned CFRP Rods," *Composite Structures*, vol. 125, no. 0263-8223, pp. 256–265, February 2015.
- [9] S. Bensaid, D. Trichet, G. Wasselynck, and O. A. Safer, "Transverse Electrical Resistivity Evaluation of Rod Unidirectional," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, March 2018.
- [10] Bensaid Samir, "Contribution a la Caractérisation et à la Modélisation Electromagnétique et Thermique des Matériaux Composites Anisotropies," Thèse de doctorat, IREENA Saint-Nazaire, 2006.
- [11] Alan Baker, *Composite Materials for Aircraft Structures*. Virginia: American Institute of

- Aeronautics and Astronautics, 1986.
- [12] Suong V. Hoa, Principles of the Manufacturing of Composite Materials. Pennsylvania : DEStech Publications, Inc., 2009.
- [13] Deborah D.L. Chung, Composite Materials: Science and Applications. New York: Springer London Dordrecht Heidelberg New York, 2010.
- [14] HEXCEL, "Reinforcements for Composites," Seguin, Texas, Technical report 2013.
- [15] Xiaosong Huang, "Fabrication and Properties of Carbon Fibers," Materials, pp. 2369-2403, Vol. 2, 2009.
- [16] P.K. Mallick, Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [17] Didier Trichet, and Javad Fouladgar Samir Bensaid, "Optimal Design of a Rotating Eddy-Current Probe—Application to Characterization of Anisotropic Conductive Materials," IEEE Transactions On Magnetics, pp. 1-4, Vol. 51, No. 3, MARCH 2015.
- [18] Suong V. Hoa, Principles Of The Manufacturing Of Composite Materials. Quebec, Canada: DEStech Publications, Inc., 2009.
- [19] Luke O. Dandy, Gary A. Leeke Géraldine Oliveux, "Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and polymers: Review of technologies, reuse and," Progress in Materials Science, pp. 61–99, Vol. 72, 2015.
- [20] Didier Trichet, "Contributions à la modélisation de l'interaction entre une onde électromagnétique et les matériaux à structures complexes : approche multi-physique et multi-échelle," Thèse de doctorat, Nantes, 2012.
- [21] Guillaume Wasselynck, "Etudes des interactions entre les ondes électromagnétiques de fréquences moyennes et les matériaux composites. Application à l'assemblage par induction de ces matériaux," Nantes, Thèse de doctorat 2011.
- [22] Chris P. Pantelides, Lawrence D. Reaveley Clayton A. Burningham, "Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods," Composite Structures , pp. 256–265, Vol. , 2015.
- [23] Carbon.ee Blog. (2015, 30 Apr.) Carbon fiber all patterns explained. [Online]. <http://www.carbon.ee/en/n/carbon-fiber-all-patterns-explained>
- [24] D. Trichet, and J. Fouladgar, and S. Bensaid, "Electrical Conductivity Identification of Composite Materials Using a 3-D Anisotropic Shell Element Model," IEEE Transactions

- on Magnetics, pp. 1-4, Vol. 45, No. 3, March 2009.
- [25] Didier Trichet, and Javad Fouladgar Samir Bensaïd, "Electromagnetic and Thermal Behaviors of Multilayer Anisotropic Composite Materials," IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1-4, Vol. 42, No. 4, April 2006.
- [26] Guillaume Wasselynck, Didier Trichet, Brahim Ramdane, Gérard Berthiau, and Javad Fouladgar Huu Kien Bui, "3-D Modeling of Thermo Inductive Non Destructive Testing Method Applied to Multilayer Composite," IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1-4, Vol. 49, No. 5, May 2013.
- [27] Hexcel, "HexPly® Prepreg Technology," Technical Report 2013.
- [28] L.C. Hollaway, Pultrusion of advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites, 1st ed., Japing Bai, Ed. swaston, UK: Woodhead Publishing, 2013.
- [29] Urs Meier, "Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If?," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 37, no. 1319-8025, pp. 399–411, March 2012.
- [30] Xiong Yang, "Use of Fiber Reinforced Polymer Composite Cable for Post-tensioning Application," Florida International University, Florida, Thèse de doctorat 2259, 2015.
- [31] Ronggui Liu IfeOlorun Olofin, "The Application of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Cables in Civil Engineering Structures," SSRG International Journal of Civil Engineering , vol. 7, no. 2348 – 8352, pp. 1-5, July 2015.
- [32] Ginger Gardiner. (2014, Nov.) Recycled carbon fiber update: Closing the CFRP lifecycle loop : CompositesWorld. [Online].
<https://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-fiber-update-closing-the-cfrp-lifecycle-loop>
- [33] Guillaume Wasselynck, Didier Trichet, and Gérard Berthiau Huu Kien Bui, "Performance Assessment of Induction Thermography Technique Applied to Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Material," IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1-4, Vol. 51, No. 3, March 2015.
- [34] 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 1, Constantine, 2016.
- [35] Xin Li, "Eddy Current Techniques for Non-destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP)," University of Manchester, Manchester, Thèse de doctorat

2012.

- [36] Yoshihiro Mizutani, Akira Todoroki, Yoshiro Suzuki Koichi Mizukami, "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, October 2016.
- [37] Yoshihiro Mizutani, Akira Todoroki, Yoshiro Suzuki Koichi Mizukami, "Detection of Delamination in Thermoplastic CFRP Welded Zones Using Induction Heating Assisted Eddy Current Testing," *NDT&E International*, vol. 74, no. 0963-8695, pp. 106–111, June 2015.
- [38] Yoshihiro Mizutani, Kenshi Kimura, Akiyoshi Sato, Akira Todoroki, Yoshiro Suzuki, Yoshiaki Nakamura Koichi Mizukami, "Visualization and size estimation of fiber waviness in multidirectional CFRP Laminates Using Eddy Current Imaging," *Composites: Part A*, vol. 90, no. 1359-835X, pp. 261–270, July 2016.
- [39] Rabia Abid, "Electrical Characterisation of Aerospace Grade Carbon-Fibre Reinforced Polymers," Cardiff School Of Engineering, Cardiff, Thèse de doctorat <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/91269>, 2016.
- [40] Ivan Revel and Gilles Peres Alexandre Piche, "Experimental and Numerical Methods to Characterize Electrical Behaviour of Carbon Fiber Composites Used in Aeronautic Industry," *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*, pp. 1-16, 2011.
- [41] Wenhui Zhong, Wu Yao Jing Xu, "Modeling of conductivity in carbon fiber-reinforced cement-based composite," *Journal of Materials Science*, vol. 45, no. 0022-2461, pp. 3538–3546, July 2010.
- [42] Fiacre D. Senghor et al., "Electrical Conductivity Tensor Modeling of Stratified Woven-Fabric Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017.
- [43] Abdelghani Ayad, Samir Bensaid Nafia Dahmane, "Eddy Current Evaluation of Recovered Conductive Waste Purity," *Waste Management*, vol. 77, pp. 43-49, July 2018.
- [44] Shu Hong Wang, Song Wang, Shuang Wang, Jian Fu Cao Na Ming Zhang, "Design and Calculation of Planar Eddy Current Coil in Coin Identification," in *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Shanghai, China, 2015, pp. 366-367.

- [45] Bachir HELIFA, "Contribution A la Simulation du CND par Courants de Foucault en Vue de la Caractérisation des Fissures Debouchantes," Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, 2012.
- [46] K. R. Shao, K.D. Zhou H.T. Yu, "H Method for Solving 3D Eddy Current Problems," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, no. 6, pp. 3518-3520, November 1995.
- [47] A. Foggia, A.Nicolas, J.C. SabonnadiGre N. Burais, "Electromagnetic Field Formulationf for Eddy Current Calculations in Nondestructive Testing Systems," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 18, no. 6, pp. 1058-1060, November 1982.
- [48] C.J. Carpenter, "Comparison of alternative formulations of 3-dimensional magnetic - field and eddy-current problems at power frequencies," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 124, no. 11, pp. 1026 - 1034, November 1977.
- [49] Didier Trichet, and Javad Fouladgar Samir Bensaid, "3-D Simulation of Induction Heating of Anisotropic Composite Materials," IEEE Transactions On Magnetics, pp. 1-4, Vol. 41, No. 5, May 2005.
- [50] Jian-Ming Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics. New York: Wiley, 2002.
- [51] G. Wasselynck, D. Trichet, and G. Berthiau H. K. Bui, "Degenerated Hexahedral Whitney Elements for Electromagnetic Fields Computation in Multi-Layer Anisotropic Thin Regions," IEEE Transactions On Magnetics, vol. 52, no. 3, pp. 1-4, March 2016.
- [52] Gerard Berthiau, Mouloud Feliachi, and Ahmed Cheriet Yue Li, "3D Finite Volume Modeling of ENDE Using Electromagnetic T-Formulation," Journal of Sensors, vol. 2012, no. 785271, pp. 1-6, April 2012.
- [53] El Ghoul Islam Nacereddine, "Réalisation D'un Banc D'essais Pour L'inversion Des Signaux En Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault," Université Mohamed Khider – Biskra, Biskra, Algeria, Thèse de doctorat, 2016.
- [54] F. D. Senghor, G. Wasselynck, D. Trichet, J. Fouladgar, K. Lee, and G. Berthiau H. K. Bui, "Characterization of Electrical Conductivity of Anisotropic CFRP Materials by means of Induction Thermography Technique," IEEE Transactions On Magnetics, vol. 52, no. 3, pp. 1-4, March 2016.
- [55] J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization," *The Computer Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 308–313, January 1965.
- [56] James A. Reeds, Margaret H. Wright, And Paul E. Wright Jeffrey C. Lagarias, "Convergence Properties Of The Nelder–Mead Simplex Method In Low Dimensions,"

- Siam J. Optim, Vol. 9, No. 1, pp. 112–147, December 1998.
- [57] Khachatryan. A, Semenovskaya. S, and Vainshtein. B, "Statistical-Thermodynamic Approach to Determination of Structure Amplitude Phases," *Sov.Phys. Crystallography*, vol. 24, no. 5, pp. 519–524, 1979.
- [58] Khachatryan. A, Semenovskaya. S, and Vainshtein. B, "The Thermodynamic Approach to the Structure Analysis of Crystals," *Acta Crystallographica*, vol. 37, no. A37, pp. 742–754, 1981.
- [59] Luca Maria Gambardella, Marco Dorigo, "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem," *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, APRIL 1997.
- [60] Mauro Birattari, and Thomas Stutzle Marco Dorigo, "Ant Colony Optimization: Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique," *Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Technical Report 23*, 2006.
- [61] Rafael S. Parpinelli and Heitor S. Lopes, "An Ant Colony Algorithm for Classification Rule Discovery," in *Data Mining: A Heuristic Approach*, Ruhul A. Sarker, Charles S. Newton Hussein A. Abbass, Ed. New South Wales, Australia: Idea Group Publishing, 2002, ch. 10, pp. 191-208.
- [62] S. Butterworth, "Eddy-Current Losses in Cylindrical Conductors, with Special Applications to the Alternating Current Resistance of Short Coils," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 222, pp. 57-100, 1922.
- [63] S. Butterworth, "Effective Resistance of Inductance Coils at Radio Frequencies," *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*, vol. 3, pp. 203-483, January 1926.
- [64] Anthony David Wilson Gibson, *Channel Characterisation and System Design for Sub-Surface*, 1st ed., David Gibson, Ed. Leeds, Uk: Lulu entreprises, 2010.
- [65] Agasthya Ayachit and Marian K. Kazimierczuk, "Self-Capacitance of Single-Layer Inductors With Separation Between Conductor Turns," *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, vol. 4, no. 33, pp. 1-4, Dec. 2017.
- [66] Antonio Massarini and Marian K. Kazimierczuk, "Self-Capacitance of Inductors," *IEEE Transactions On Power Electronics*, pp. 1-6, Vol. 12, No. 4, 1997.
- [67] Sérgio Francisco Caio Marcelo de Miranda, "Self-resonant frequencies of air-core single-layer solenoid coils calculated by a simple method," *Electrical Engineering*, vol. 97, no. 1, pp. 57–64, September 2015.

- [68] Xiaohua Liu, and Zhiwei Zeng, Shaoni Jiao, "Intensive Study of Skin Effect in Eddy Current Testing with Pancake Coil," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 7, pp. 1-9, February 2017.
- [69] R G Medhurst, "H. F. Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids," *Wireless Engineer*, pp. 80-92, 1947.
- [70] A J Palermo, "Distributed Capacity of Single-Layer Coils," *IRE*, pp. 897-905, 1934.
- [71] Marian K. Kazimierczuk, Antonio Massarini, and Ugo Reggiani, Gabriele Grandi, "Stray Capacitances of Single-Layer Solenoid Air-Core Inductors," *IEEE Transactions On Industry Applications*, pp. 1-7, Vol. 35, No. 5, 1999.
- [72] L. Satish P. Mukherjee, "Construction of equivalent circuit of a transformer winding from driving-point impedance function analytical approach," *IET electric power applications*, vol. 6, no. 3, pp. 172-180, 2012.

Résumé

Le taux d'utilisation des matériaux composites de forme cylindrique tels que les tiges et les câbles dans les constructions de génie civil est en croissance continue, ceci est due à la bonne résistance mécanique et au faible poids de ces matériaux comparés aux matériaux traditionnels. Durant l'exploitation des tiges et des câbles à fibre de carbone des défaillances telles que le délaminage ou la fracture des fibres peuvent apparaître. La qualité de détection de ces défauts dépend de la précision des dispositifs de CND utilisés. La connaissance des propriétés physiques des matériaux composites est un des facteurs de la conception optimale de ces dispositifs. L'objectif principal de cette thèse est la mise en œuvre d'un banc d'évaluation de la résistivité électrique basé sur les courants de Foucault. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux tiges composites à renfort unidirectionnel en fibres de carbone. La simulation tridimensionnelle de l'ensemble sonde/tige nous a permis de démontrer que, quel que soit la valeur de la résistivité longitudinale de la tige et pour la même résistivité ortho-radiale, la résistance de la sonde CF reste inchangée, ce qui conduit à considérer uniquement la composante ortho-radiale des courants induits et négliger la composante longitudinale. Ceci nous a permis de réduire le modèle 3D en un modèle 2D axisymétrique. Ce dernier a été implémenté sous Flux 2D. D'autre part, nous avons utilisé un algorithme d'inversion pour évaluer la valeur de la composante transversale (radiale) et ortho-radiale du tenseur de résistivité. Un autre volet auquel nous nous sommes intéressés dans cette thèse, c'est la prise en compte de l'effet capacitif dans la conception des sonde CF. Dans ce cadre un modèle éléments finis 2D couplé aux équations circuits associé à la technique du problème inverse ont été utilisés pour évaluer les condensateurs internes de la sonde CF. Les différentes comparaisons des résultats simulés aux résultats expérimentaux montrent une bonne concordance.

Mot clés: *Matériaux composites, Anisotropie, Hétérogénéité, Courants de Foucault, Résistivité Electrique, Evaluation Non destructif, Eléments Finis, Problème Inverse, Effet Capacitif.*

ملخص

معدل استخدام المواد المركبة الأسطوانية مثل القضبان والكابلات في إنشاءات الهندسة المدنية ينمو بشكل مطرد ، وذلك بسبب القوة الميكانيكية الجيدة وانخفاض وزن هذه المواد مقارنة بالمواد التقليدية. أثناء تشغيل قضبان وألياف ألياف الكربون ، قد تحدث حالات عيوب مثل التشققات أو كسر الألياف. تعتمد جودة اكتشاف هذه العيوب على دقة أجهزة المراقبة الغير المدمرة CND المستخدمة. معرفة الخصائص الفيزيائية للمواد المركبة هي واحدة من العوامل في التصميم الأمثل لهذه الأجهزة. الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تنفيذ منضدة اختبار للمقاومة الكهربائية على أساس التيارات الدوامية. نحن مهتمون بشكل خاص بالقضبان المركبة من ألياف الكربون أحادية الاتجاه. أظهرت المحاكاة ثلاثية الأبعاد لمجموعة مسبار / قضيب أنه مهما كانت قيمة المقاومة الطولية للقضيب ، فإن التيارات المستحثة فيه تأخذ نفس مسار خطوط مصدر التيار. هذا سمح لنا بتخفيض النموذج ثلاثي الأبعاد إلى نموذج ثنائي الأبعاد محوري. تم تنفيذ هذا الأخير تحت ماتلاب. من ناحية أخرى ، استخدمنا خوارزمية انعكاس لتقييم قيمة المستعرض (شعاعي) والمكون الشعاعي لشدة المقاومة. جانب آخر يهمننا في هذه الأطروحة هو مراعاة التأثير السعوي في تصميم مسبار تيارات فوكو. في هذا الإطار ، تم استخدام نموذج العناصر المحدودة ثنائي الأبعاد إلى جانب معادلات الدوائر المرتبطة بتقنية المشكلة العكسية لتقييم المكتفات الداخلية لمسبار تيارات فوكو CF. نتائج محاكاة مختلفة مقارنة مع النتائج التجريبية تظهر اتفاق جيد.

الكلمات المفتاحية: *المواد المركبة ، تباين ، عدم التجانس ، تيارات فوكو ، المقاومة الكهربائية ، المراقبة الغير المدمرة ، العناصر المحدودة ، مشكلة عكسية ، التأثير بالسعة.*

Abstract

The utilization rate of cylindrical composite materials such as rods and cables in civil engineering constructions is growing steadily, due to the good mechanical strength and low weight of these materials compared to traditional materials. During the operation of carbon fiber rods and cables, failures such as delamination or fracture of the fibers may occur. The quality of detection of these defects depends on the accuracy of the NDT (Non-Destructive Testing) devices used. Knowledge of the physical properties of composite materials is one of the factors in the optimal design of these devices. The main objective of this thesis is the implementation of a test bench for electrical resistivity based on eddy currents. We are particularly interested in composite rods with unidirectional carbon fiber reinforcement. The three-dimensional simulation of the probe / rod assembly has demonstrated that, whatever the value of the longitudinal resistivity of the rod, the currents induced therein describe the same path as the lines of the source current. This allowed us to reduce the 3D model to a 2D axisymmetric model. The latter was implemented under Matlab. On the other hand, we used an inversion algorithm to evaluate the value of the transverse (radial) and ortho-radial component of the resistivity tensor. Another aspect to which we are interested in this thesis is the taking into account of the capacitive effect in the design of EC (Eddy Current) probes. In this framework a 2D finite element model coupled to the circuit equations associated with the inverse problem technique was used to evaluate the internal capacitors of the EC probe. The different simulated results compared to the experimental results show good agreement.

Key words: *Composite Materials, Anisotropy, Heterogeneity, Eddy Current, Electrical Resistivity, Non Destructive Evaluation, Finite Elements, Inverse Problem, Capacitive Effect.*

Listes Des Travaux

Publication internationale

- O.A. Safer, S. Bensaid, D. Trichet, G. Wasselynck, "Transversal Electrical Resistivity Evaluation of Rod Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Composite Using Eddy Current Method", IEEE Transaction on Magnetics, Volume.54 N.3 ,2017.

Conférences internationales

- Samir BENSaid, Omar Adib SAFER "Etude et Modélisation du Comportement Electromagnétique d'une Bobine Solénoïdale à Air - Alimentée par une Tension Sinusoïdale à Fréquence Variable ", Colloque sur L'inductique, 13-14 Décembre 2017, Oran, Algeria.

- Samir Bensaid, Omar Adib Safer, Didier Trichet, Guillaum Wasselynck "Modeling of Eddy Current Characterization of Composite Materials With Taking Into Account of Capacitive Effect", IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation- CEFC / Hangzhou, China, 28-31 October 2018.