



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أكلي محمد أولحاج - البويرة

Université Akli Mohand Oulhadj Bouira

كلية العلوم التطبيقية

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

Laboratoire des Matériaux et du Développement Durable

# THESE DE DOCTORAT

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur

En : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : Commande Electrique

Par :

**GHERDAOUI Loukmane**

Intitulée :

## Contribution à la caractérisation électromagnétique des matériaux composites en fibres d'acier

Soutenue publiquement le 23-06-2024 devant le Jury composé de :

Mr. BOUZIDA Ahcene	Prof	Président	Université de Bouira
Mr. BENSaid Samir	Prof	Directeur de Thèse	Université de Bouira
Mr. TRICHET Didier	Prof	Codirecteur de Thèse	Université de Nantes - France
Mr. MEHASNI Rabia	Prof	Examineur	Université de Constantine 1
Mr. ZAOUI Abdelhalim	Prof	Examineur	ENST Alger
Mr. KENNOUCHE Salim	MCA	Examineur	Université de Bouira
Mme. SAOUDI Nacira	MCA	Invité	Université de Bouira

2024/2025

*A mes parents,  
et à toute ma famille*

## Remerciement

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire des Matériaux et du Développement Durable (LM2D) de l'Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, que je remercie pour le cadre scientifique et les moyens mis à ma disposition.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, le Professeur **Samir BENSAID**, pour son encadrement attentif, son écoute, et la qualité de ses orientations scientifiques. Son accompagnement constant, mêlant rigueur et bienveillance, a été décisif pour la réussite de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner cette thèse et de la présider. Leur implication et l'intérêt porté à mes recherches constituent pour moi une véritable marque d'estime.

Je tiens à adresser mes remerciements à Professeur **Ahcene BOUZIDA**, pour avoir accepté de siéger dans mon jury et de l'avoir présidé. Je remercie très vivement le Professeur **Rabia MEHASNI** de l'Université de Constantine<sup>1</sup>, et le Professeur **Abdelhalim ZAOUI** de l'ENST Alger, ainsi que Monsieur **Salim KENNOUCHE** de l'Université de Bouira, pour l'honneur qu'ils m'ont fait de juger ce modeste travail. Je remercie également Madame **Nacira SAOUDI** d'avoir accepté l'invitation à participer dans le jury de cette thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements à mon co-directeur, le Professeur **Didier TRICHET**, de l'IREENA – Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes Atlantique (France), pour ses orientations scientifiques et conseils précieux, qui ont fortement enrichi les travaux de cette thèse.

je souhaite remercier chaleureusement Madame **Nacira SAOUDI**, maitre de conférence classe A au département de Génie Civil, faculté des sciences appliquées université de Bouira, son aide précieuse dans la mise en œuvre des échantillons en béton et son assistance dans les essais mécaniques. Son engagement a été d'un grand réconfort et d'une aide précieuse dans la réalisation des travaux de cette thèse.

Enfin, je tiens à remercier le Professeur **Hamza HOUASSINE** pour ses précieux conseils et son soutien inestimable tout au long de mon travail de thèse. Ses

remarques constructives, son expertise approfondie et sa disponibilité m'ont permis de surmonter les défis intellectuels et de faire avancer mes recherches de manière significative

## **Résumé.**

Cette thèse s'intéresse à la caractérisation et à l'évaluation non destructif des matériaux composites en fibres d'acier par les méthodes électromagnétiques. L'objectif est de mettre en œuvre une technique non destructive permettant d'évaluer la répartition localisée des fibres à l'aide d'un capteur à courants de Foucault. Le travail débute par l'identification des propriétés électromagnétiques des fibres d'acier, réalisée à partir d'une méthode inverse. Cette étape vise à comprendre l'interaction des fibres d'acier avec le champ électromagnétique généré par le capteur. Une étude paramétrique expérimentale est ensuite menée afin d'analyser l'impact de la position, de l'orientation et de la teneur en fibres sur la variation de l'impédance mesurée. Elle permet de mieux comprendre l'évolution des réponses du capteur et d'évaluation de la répartition des fibres dans le béton. Pour une évaluation localisée de la distribution des fibres dans le béton, un système de balayage automatique à courants de Foucault est mis en œuvre. Plusieurs groupes d'échantillons en béton fibré ont été réalisés. L'impédance, réponse du capteur, est mesurée tout au long de chaque échantillon pour avoir le profil suivant la longueur. La méthode est tout d'abord vérifiée à l'aide des échantillons à répartition connue des fibres, puis appliquée sur des échantillons à répartition aléatoire. Ces derniers ont été testés par l'essai de traction par fendage, qui a permis de corrélérer la signature en impédance des échantillons, confirmant ainsi la fiabilité et la robustesse de l'approche proposée.

## **Mots clés :**

Béton Renforcé de Fibres d'Acier (BRFA). Évaluation Non Destructive par Courants de Foucault . Système de Balayage Linéaire. Perméabilité Magnétique Complexe. Méthode Inverse. Essai Brésilien

## **Abstract.**

This thesis focuses on the electromagnetic characterization of steel fiber-reinforced composite materials. The objective is to develop a non-destructive method for evaluating the local distribution of fibers using an eddy current sensor. The work begins with the identification of the electromagnetic properties of steel fibers, performed through an inverse method. This step aims to understand the interaction between the fibers and the electromagnetic field generated by the sensor. A parametric study is then conducted to analyse the influence of fiber position, orientation, and content on the variation of the measured impedance. This helps improve the interpretation of the sensor's response and refine the evaluation of fiber distribution within the cement matrix. Based on these findings, an eddy current scanning system is developed to locally measure impedance along steel fiber-reinforced concrete samples. The method enables a precise, repeatable, and non-destructive mapping of fiber distribution. The validity of the results is confirmed through destructive testing, demonstrating the reliability and robustness of the proposed approach.

## **Keywords:**

Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC). Non-Destructive Evaluation by Eddy Current . Linear Scanning System. Complex Magnetic Permeability. Inverse Method. Brazilian Test

## الملخص.

تتناول هذه الرسالة البحثية تحليل وتقييم المواد المركبة المصنوعة من الألياف الفولاذية باستخدام طرق غير تدميرية تعتمد على تقنيات الكهرومغناطيسية. الهدف من هذا العمل هو تطبيق تقنية غير تدميرية تسمح بتقييم التوزيع المحلي للألياف باستخدام جهاز استشعار يعمل بتقنية التيارات الدوامية. يبدأ العمل بتحديد الخصائص الكهرومغناطيسية للألياف الفولاذية باستخدام طريقة عكسية. تهدف هذه المرحلة إلى فهم التفاعل الحاصل بين الألياف الفولاذية والمجال الكهرومغناطيسي الناتج عن جهاز الاستشعار. بعد ذلك، تم إجراء دراسة تجريبية تعتمد على المتغيرات لتحليل تأثير الموقع، التوجه، وكمية الألياف على التغير في الممانعة المقاسة. تساعد هذه الدراسة على فهم أفضل لتطور التوزيع داخل المصفوفة (الخرسانة). ولإجراء تقييم موضعي لتوزيع الألياف داخل الخرسانة، تم تنفيذ نظام مسح ثلقائي باستخدام التيارات الدوامية. تم تحضير العديد من المجموعات من عينات الخرسانة المسلحة بالألياف، وتم قياس الممانعة على طول كل عينة للحصول على البيانات الخاصة بالتوزيع. تم أولاً التحقق من الطريقة باستخدام عينات ذات توزيع معروف للألياف، ثم تم تطبيقها على عينات تحتوي على توزيع عشوائي للألياف. تم تدمير هذه العينات من خلال اختبار الشد بواسطة الفحص الانقسامي، والذي سمح بربط التوقع المقاومي لهذه العينات، مما أكد صحة ومثانة الطريقة المعتمدة .

## لكلمات المفتاحية:

الخرسانة المسلحة بالألياف الفولاذية. التقييم غير التدميري باستخدام التيارات الدوامية. نظام المسح الخطي. النفاذية المغناطيسية المعقدة. الطريقة العكسية. اختبار برازيلي

## Table de matière

<b>Résumé. ....</b>	<b>I</b>
<b>Table de matière. ....</b>	<b>III</b>
<b>Liste de figures.....</b>	<b>VI</b>
<b>Liste des tableaux. ....</b>	<b>X</b>
<b>Listes des symboles et abréviations. ....</b>	<b>XI</b>
<b>Introduction générale. ....</b>	<b>1</b>
 <b>Chapitre 1 Généralités, performances et applications des matériaux composites en fibres d'acier et Etat de l'art de l'évaluation de la répartition des fibre.....</b>	 <b>6</b>
<b>1.1 Introduction. ....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Généralités sur les matériaux composites. ....</b>	<b>7</b>
1.2.1 Définition et caractéristiques. ....	7
1.2.2 Constitution d'un matériau composite. ....	7
<b>1.3 Béton fibré. ....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Principaux types de fibres utilisées dans le renforcement du béton. ....</b>	<b>11</b>
1.4.1. Fibres de polypropylène. ....	12
1.4.2 Fibres de verre. ....	12
1.4.3 Fibres d'amiante. ....	12
1.4.4 Fibres d'aramide. ....	12
1.4.5 Fibres de Carbon. ....	12
1.4.6 Fibres de cellulose. ....	13
1.4.7 Fibres métalliques. ....	13
<b>1.5 Performances mécaniques du béton renforcé en fibres d'acier (BRFA). ....</b>	<b>16</b>
1.5.1 Comportement en traction du BRFA. ....	16
1.5.2 Comportement en Flexion du BRFA. ....	16
1.5.3 Comportement en Compression du BRFA. ....	17
<b>1.6 Les applications du BRFA. ....</b>	<b>18</b>
1.6.1 dalles sur sol. ....	18
1.6.2 Revêtements de mines et de tunnels. ....	19
1.6.3 Structures hydrauliques et béton sous-marin. ....	19
<b>1.7 Influence de la distribution des fibres sur les performances du BRFA. ....</b>	<b>20</b>
<b>1.8 Méthodes d'évaluation de la distribution des fibres. ....</b>	<b>21</b>
1.8.1 Méthodes destructives. ....	21
1.8.1.1 méthodes d'évaluation directe. ....	22
1.8.1.1.1 Méthode de comptage manuel.....	22

1.8.1.1.2 Approche par analyse d'image pour l'évaluation de la distribution des fibres. ....	22
1.8.1.2 méthodes d'évaluation indirecte. ....	23
1.8.2 Méthodes non-destructives. ....	24
1.8.2.1 Méthode de tomographie par ordinateur (CT scan). ....	24
1.8.2.2 Méthodes électriques. ....	25
1.8.2.3 Méthodes électromagnétiques. ....	27
1.9 Conclusion. ....	31
<b>Chapitre 2 : Identification des propriétés électromagnétiques des fibres d'acier. ....</b>	<b>32</b>
2.1. Introduction. ....	33
2.2. Méthodes d'évaluation des propriétés électromagnétiques. ....	33
2.3. Méthode proposée pour l'évaluation des propriétés électromagnétiques. ....	34
2.4. Dispositifs de mesures expérimentales. ....	35
2.4.1 Mesure de la conductivité électrique. ....	35
2.4.2 Mesure de l'impédance. ....	37
2.5. Méthode du problème inverse pour l'identification de la perméabilité magnétique. ....	45
2.6. Résultats et discussion. ....	49
2.7. Conclusion. ....	53
<b>Chapitre 3 : Impact spatial des fibres d'acier sur la réponse du capteur à courants de Foucault.....</b>	<b>54</b>
3.1. Introduction. ....	55
3.2. Influence de la Dispersion des Fibres d'Acier sur la Réponse Électromagnétique des Capteurs Inductifs. ....	56
3.3. approche expérimentale proposées. ....	57
3.3.1 description du dispositif de mesure. ....	58
3.4. choix de la fréquence des courants induit de travail et du paramètre indicateur de la distribution des fibres. ....	59
3.5. Protocole de mesure et différentes configurations étudiées. ....	63
3.5.1 Influence de la position des fibres.....	63
3.5.2 Influence du dosage en fibres.....	64
3.5.3 Influence de l'Orientation des Fibres.....	66
4 Conclusion. ....	71
<b>Chapitre 4: Système d'évaluation localisée de la distribution des fibres dans le BRFA basé sur les courants de Foucault.....</b>	<b>72</b>



---

<b>4.1 Introduction.</b>	<b>73</b>
<b>4.2 Évaluation de la distribution des fibres à l'aide de la méthode basée sur les courants de Foucault.</b>	<b>74</b>
<b>4.2.1 Présentation de la méthode proposée.</b>	<b>74</b>
<b>4.2.2 Description du système de balayage a courant de Foucault.</b>	<b>75</b>
<b>4.2.3 Algorithme de contrôle du system de balayage a CF.</b>	<b>77</b>
<b>4.3 Applications de la méthode proposée.</b>	<b>80</b>
<b>4.3.1 échantillons de BRFA avec distribution de fibres connue.</b>	<b>80</b>
4.3.1.1. préparations des échantillons.	80
4.4.1.2. Mesure d'impédance par le system de balayage à CF.	82
4.4.1.3 Résultats et discussions.	83
<b>4.3.2 Échantillons de BRFA avec distribution de fibres aléatoire.</b>	<b>85</b>
4.3.2.1 préparations des échantillons.	85
4.3.2.2 Mesure d'impédance par le system de balayage a CF.	87
4.3.2.3 Les essais destructifs.	88
<b>4.6. Conclusion.</b>	<b>96</b>
<b>Conclusion générale.</b>	<b>98</b>
<b>Références.</b>	<b>102</b>

## Listes des figures

Figure 1.1 Constitutions du matériau composite.....	8
Figure 1.2 Classification des matrices dans les matériaux composites.....	8
Figure 1.3 Classification du renfort dans les matériaux composites. ....	9
Figure 1.4 Structure d'un béton fibré.....	11
Figure 1.5 Principales fibres utilisées dans le renforcement du béton.....	12
Figure 1.6 Fibres d'acier droites. ....	14
Figure 1.7 Fibres d'acier Ondulées. ....	14
Figure 1.8 Fibres d'acier Embouties.....	15
Figure 1.9 Fibres d'acier Crochets aux extrémités [39]. ....	15
Figure 1.10 Tesco Livingston, la plus grande dalle en BRFA du Royaume-Uni.....	18
Figure 1.11 Métro de Stockholm avec revêtements permanents en béton projeté renforcé en fibres d'acier. ....	19
Figure 1.12 Béton sous-marin renforcé d'acier.....	20
Figure 1.13 Analyse d'image de la répartition des fibres d'acier dans le BRFA. ....	23
Figure 1.14 Segmentation et reconstruction d'images CT des fibres d'acier dans le BRFA.....	25
Figure 1.15 Dispositif de mesure de résistivité électrique par la méthode des quatre pointes. ....	26
Figure 1.16 Schéma des directions de mesure et des trajectoires approximatives du courant pour les directions X et Z. ....	27
Figure 1.17 Sonde magnétique avec noyau en ferrite utilisée pour l'évaluation des propriétés magnétiques d'une dalle de BRFA. ....	28
Figure 1.18: Configuration expérimentale pour la réflectométrie par sonde coaxiale utilisée dans l'évaluation non destructive de la répartition des fibres dans le BRFA. ....	29
Figure 1.19 Dispositif expérimental de la méthode inductive. ....	30
Figure 2.1 Résistance électrique en courant continu et dimensions géométriques de la fibre d'acier. ....	36
Figure 2.2 Mesure de l'impédance — Dispositif expérimental.....	38
Figure 2.3 Redressement de la fibre d'acier. ....	39

Figure 2.4 Résistance mesurée avec et sans fibre d'acier en fonction de la fréquence.....	40
Figure 2.5 Réactance mesurée avec et sans fibre d'acier en fonction de la fréquence. ...	40
Figure 2.6 Variation de la résistance mesurée en fonction de la fréquence. ....	41
Figure 2.7 Variation de la réactance mesurée en fonction de la fréquence. ....	42
Figure 2.8 Géométrie du problème résolu. ....	44
Figure 2.9 Organigramme de l'algorithme d'inversion. ....	46
Figure 2.10 Évolution de la partie réelle de la perméabilité magnétique complexe ( $\mu_r$ ) au cours des itérations à une fréquence de 10 kHz. ....	47
Figure 2.11 Évolution de la partie imaginaire de la perméabilité magnétique complexe ( $\mu_i$ ) au cours des itérations à une fréquence de 10 kHz. ....	48
Figure 2.12 Évolution de la fonction objectif au cours des itérations. ....	49
Figure 2.13 Perméabilité magnétique relative en fonction de la fréquence. ....	49
Figure 2.14 Résistance mesurée et calculée du SCF en fonction de la fréquence. ....	50
Figure 2.15 Réactance mesurée et calculée du SCF en fonction de la fréquence. ....	51
Figure 2.16 Erreur relative de la résistance en fonction de la fréquence. ....	52
Figure 2.17 Erreur relative de la réactance en fonction de la fréquence. ....	52
Figure 3.1 Dispositif expérimental utilisé pour l'étude paramétrique basée sur les courants de Foucault, dédié à la mesure de l'impédance.....	58
Figure 3.2 Dimensions du capteur à courants de Foucault (CCF). ....	59
Figure 3.3 Rapport de l'épaisseur de peau sur le rayon de la fibre en fonction de la fréquence. ....	61
Figure 3.4 Variation relative des composantes de l'impédance en fonction de la fréquence. ....	62
Figure 3.5 Schéma illustratif des configurations utilisées pour étudier l'influence de la position radiale d'une fibre par rapport au centre du capteur à courants de Foucault sur l'impédance mesurée. ....	64
Figure 3.6 Variation relative de la résistance en fonction de la distance des fibres au centre du capteur à courants de Foucault. ....	65
Figure 3.7 Variation relative de la réactance en fonction de la distance des fibres au centre du capteur à courants de Foucault. ....	66
Figure 3.8 Schéma illustratif des configurations utilisées pour étudier l'influence de la teneur en fibres sur l'impédance mesurée du capteur à courants de Foucault.....	66

Figure 3. 9 Variation relative de la résistance en fonction du nombre de fibres mesurée par le capteur à courants de Foucault. ....	67
Figure 3. 10 Variation relative de la réactance en fonction du nombre de fibres mesurée par le capteur à courants de Foucault. ....	68
Figure 3. 11 Schéma illustratif des configurations utilisées pour étudier l'influence de l'orientation des fibres sur l'impédance mesurée du capteur à courants de Foucault. ...	69
Figure 3. 12 Variation relative de la résistance en fonction de l'orientation des fibres mesurées par le capteur à courants de Foucault. ....	69
Figure 3. 13 Variation relative de la réactance en fonction de l'orientation des fibres mesurées par le capteur à courants de Foucault. ....	70
Figure 4.1. Système de mesure basé sur les courants de Foucault, intégré à un dispositif de balayage. ....	75
Figure 4.2 types de fibre d'acier utilisé. ....	75
Figure 4.3 Dimensions du capteur à courants de Foucault (CCF). ....	76
Figure 4.4 Algorithme de fonctionnement du système de balayage par courants de Foucault. ....	78
Figure 4.5 Diagramme complet en blocs LabVIEW du système de balayage à courants de Foucault. ....	79
Figure 4.6 Distribution zonale des fibres d'acier dans l'échantillon_1 et l'échantillon_2. ....	81
Figure 4.7 Variation relative de la partie réelle de l'impédance des échantillons de BRFA 1 et 2 en fonction de la position du capteur. ....	82
Figure 4.8 Variation relative de la partie réelle de l'impédance de l'échantillon BRFA 1 en fonction de la position du capteur, avec identification des zones 1 à 5. ....	83
Figure 4.9 Variation relative de la partie réelle de l'impédance de l'échantillon de BRFA 2 en fonction de la position du capteur, avec identification des zones 1 à 5. ....	85
Figure 4.10 Ensemble d'échantillons de BRFA avec une distribution aléatoire des fibres d'acier. ....	86
Figure 4.11 Variation relative de la partie réelle de l'impédance des échantillons de BRFA A1, F1(7), F2(4) et A5 en fonction de la position du capteur. ....	88
Figure 4.12 Échantillon de BRFA au moment de l'essai de traction brésilien destructif. ....	89
Figure 4.13 Échantillon de BRFA A1 après l'essai destructif. ....	90
Figure 4.14 Trajet et longueur de la fissure dans l'échantillon de BRFA A1. ....	90

<b>Figure 4.15 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA A1. ....</b>	<b>91</b>
<b>Figure 4.16 Échantillon de BRFA F1(7) après l'essai destructif. ....</b>	<b>..91</b>
<b>Figure 4.17 Trajet et longueur de la fissure dans l'échantillon de BRFA F1(7). ....</b>	<b>92</b>
<b>Figure 4.18 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA F1.....</b>	<b>93</b>
<b>Figure 4.19 Échantillon de BRFA F2(4) après l'essai destructif. ....</b>	<b>93</b>
<b>Figure 4.20 Trajet et longueur de la fissure dans l'échantillon de BRFA F2(4). ....</b>	<b>94</b>
<b>Figure 4.21 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA F2(4)....</b>	<b>..... 94</b>
<b>Figure 4.22 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA A5. ....</b>	<b>95</b>

## **Listes des tableaux**

<b>Tableau 2.1 Mesure de la conductivité électrique. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tableau 2.2 Dimensions de la sonde à courants de Foucault. ....</b>	<b>38</b>
<b>Tableau 4.1 Composition du mélange des échantillons de BRFA 1 et 2. ....</b>	<b>81</b>
<b>Tableau 4.2 Composition du mélange des 33 échantillons de BRFA. ....</b>	<b>86</b>

# Listes des symboles et abréviations

## Liste des abréviations

BRFA : Béton Renforcé en Fibres d'Acier  
SFRC: Steel Fiber Reinforced Concrete  
CF : Courants de Foucault.  
ACI : American Concrete Institute  
PRFC: Polymère renforcés par des fibres de carbone  
CT scan : La tomographie par ordinateur  
DC : Courant continu  
SCF: Sonde à courants de Foucault  
 $D_{cu}$  :Diamètre du cuivre  
 $D_{in}$  : Diamètre intérieur de la sonde  
 $L_s$  : Longueur de la sonde  
 $D_{ex}$ : Diamètre extérieure de la sonde  
 $N_t$ : Nombre de spires de la sonde  
FEM : Méthode des éléments finis  
EDP : Equation aux dérivées partielles  
EF : Modèle Elément Finis  
CCF : Capteur à courants de Foucault  
OF :Fonction objectif

## Liste des symboles

$R_{fib}$ : Résistance de la fibre d'acier Ohm  
 $A_{fib}$ : Aire de la section transversale de la fibre d'acier  $M^2$   
 $D_{fib}$  : Diamètre de la fibre d'acier M  
 $L_{fib}$  : La longueur totale de fibre d'acier M  
 $L_{fibA}$ : Distance entre les deux points de contact M  
 $\sigma_{fib}$  : Conductivité électrique S/m  
 $D_{cu}$  :Diamètre du cuivre M  
 $D_{in}$  : Diamètre intérieur de la sonde M  
 $L_s$  : Longueur de la sonde M  
 $D_{ex}$ : Diamètre extérieure de la sonde M  
 $N_t$ : Nombre de spires de la sonde  
 $A'$  : Le potentiel vecteur magnétique modifié Wb  
 $\bar{\mu}$  : La perméabilité magnétique complexe  
 $J_s$  : La densité de courant source A/m<sup>2</sup>  
 $A_\varphi$ : La coordonnée azimutale cylindrique du potentiel vecteur magnétique.  
 $I_s$ : Courant d'excitation injecté.  
 $\delta R_{cal}$  : La variation de résistance calculée  $\Omega$   
 $X_{cal}$  : La réactance calculée de la fibre  $\Omega$   
 $\delta X_{cal}$  : La variation de réactance calculée  $\Omega$   
 $\omega$  : Pulsation électrique Rad/s  
 $Re(\text{moyenne}(A'))$ : Le moyenne de la Partie réelle du potentiel magnétique  $A'$ .  
 $Im(\text{moyenne}(A'))$ : Le moyenne de la Partie imaginaire du potentiel magnétique  $A'$ .  
 $\delta R_{mes}$  : Variation de résistance mesurées  $\Omega$   
 $\delta R_{cal}$  : Variation de résistance calculées  $\Omega$

$\delta X_{mes}$ : Variation de réactance mesurées  $\Omega$   
 $\delta X_{cal}$  : Variation de réactance calculées  $\Omega$   
 $\mu_r$  : La partie réelle de la perméabilité magnétique relative  
 $\mu_i$  : La partie imaginaire de la perméabilité magnétique relative  
 $Z_{fibres}$  : Impédance mesurée en présence de fibres dans l'échantillon  $\Omega$   
 $Z_{sans\ fibres}$  : Impédance mesurée en l'absence de fibres  $\Omega$   
 $\Delta Z_{\%}$  : Variation relative de l'impédance %  
 $\delta$ : La résistivité électrique  $\Omega.m$   
 $f$  : La fréquence Hz  
 $\Delta G$  : Variation relative de la grandeur mesurée %  
 $G_{fibres}$  : : Grandeur mesurée du capteur en présence d'un échantillon des fibres  $\Omega$   
 $G_{VIDE}$  : Grandeur mesurée du capteur en absence d'un échantillon des fibres  $\Omega$   
 $\Delta Z$  : Variation relative de l'impédance d'un échantillon BRFA  $\Omega$   
 $Z_{BRFA}$  : : Impédance mesurée d'un échantillon BRFA  $\Omega$   
 $Z_{VIDE}$  : Impédance de capteur CCF sans échantillon  $\Omega$   
 $\delta$  : Epaisseur de peau M



# Introduction générale

### Introduction générale

Les matériaux composites occupent aujourd'hui une place essentielle dans plusieurs domaines industriels en raison de leurs propriétés remarquables, combinant résistance mécanique, légèreté et durabilité. Contrairement aux matériaux conventionnels tels que les métaux et les céramiques, les composites permettent d'optimiser leurs performances structurelles en combinant les avantages de plusieurs matériaux. Ces caractéristiques en font des choix privilégiés dans l'aéronautique, l'automobile, l'énergie et le génie civil, où les exigences de résistance et de durabilité sont cruciales. Grâce à leur capacité à s'adapter à des applications spécifiques, ces matériaux offrent des solutions innovantes pour l'amélioration des infrastructures modernes.

Dans le domaine du génie civil, le béton renforcé en fibres s'est imposé comme une solution innovante pour améliorer les performances structurelles des ouvrages. En combinant une matrice cimentaire classique avec des fibres comme renfort, ce matériau permet de surmonter les limitations du béton conventionnel, notamment sa faible résistance à la traction et sa tendance à la fissuration.

Le béton fibré est largement utilisé dans les dalles industrielles, les tunnels, les ponts et les revêtements de façades, où il offre une résistance accrue, une meilleure absorption de l'énergie, et une réduction de la propagation des fissures sous contrainte. Par exemple, l'incorporation de fibres permet au béton de dissiper efficacement l'énergie lors de l'apparition de microfissures, retardant ainsi leur progression et améliorant la durabilité globale des structures.

Cependant, il est important de noter que la distribution des fibres dans le béton fibré n'est pas toujours uniforme. Plusieurs facteurs influencent cette répartition, notamment les techniques de malaxage, de mise en œuvre et les contraintes exercées par les parois du moule. Une distribution mal contrôlée peut engendrer des zones de faiblesse dans la structure, réduisant son efficacité mécanique et augmentant le risque de fissuration localisée. Une distribution homogène des fibres permet d'améliorer la résistance à la traction, de limiter la propagation des fissures et d'optimiser le comportement post-fissuration du béton. Il est donc crucial de mettre en place des méthodes d'évaluation précises et reproductibles pour caractériser la distribution des fibres afin de garantir des performances optimales aux structures en béton fibré.

Les méthodes d'évaluation de la répartition des fibres existantes se divisent en deux grandes catégories : les méthodes destructives et les méthodes non destructives.

## Introduction générale

---

Les techniques destructives, telles que le comptage manuel des fibres après rupture, l'analyse d'images et les essais mécaniques post-fissuration, permettent une observation directe et précise de la distribution des fibres mais nécessitent la destruction de l'échantillon. Malgré leur efficacité en laboratoire, ces méthodes sont chronophages, limitées aux petits échantillons et inadaptées aux contrôles in situ. En revanche, les méthodes non destructives, telles que la tomographie aux rayons X, la résistivité électrique et les techniques magnétiques, permettent d'analyser la structure interne du béton renforcé en fibres d'acier (BRFA) sans altérer l'échantillon. Ces techniques offrent une alternative prometteuse pour le contrôle en temps réel des structures, mais présentent également des limites, notamment en termes de coût, de complexité et de sensibilité aux conditions environnementales.

Parmi ces dernières, la méthode inductive basée sur les courants de Foucault s'impose comme une alternative efficace et non destructive pour l'évaluation de la répartition et de l'orientation des fibres d'acier dans le BRFA. Elle est basée sur l'interaction entre un champ magnétique variable généré par une bobine et les fibres métalliques contenues dans la matrice cimentaire. Lorsque ces fibres sont présentes, elles modifient la perméabilité magnétique locale et génèrent des courants de Foucault, ce qui influence directement l'impédance mesurée du capteur inductif. L'analyse de ces variations permet ainsi d'obtenir des informations sur la concentration, l'orientation et la position des fibres dans le matériau.

Toutefois, il est important de souligner que ces approches, bien qu'efficaces pour fournir une estimation globale de la répartition des fibres, ne permettent pas une caractérisation détaillée sur toutes les zones de l'échantillon testé. Cette limitation peut entraîner une sous-estimation des variations locales, qui sont pourtant essentielles pour une évaluation précise des performances du matériau.

Pour surmonter cette limitation, cette thèse a pour objectif principal de développer une méthode d'évaluation non destructive améliorée, basée sur la technique inductive, permettant une analyse plus fine et plus précise de la distribution des fibres dans le BRFA. L'approche proposée repose sur l'intégration d'un système de balayage motorisé couplé à une mesure inductive, offrant ainsi une cartographie détaillée de la répartition des fibres d'acier dans le béton. Grâce à cette approche, il sera possible d'analyser les variations locales de la fraction volumique des fibres, d'identifier les zones de concentration inhomogène, et d'établir un lien direct entre la répartition des fibres et les propriétés mécaniques du matériau.

## Introduction générale

---

Cette thèse contribue aussi à l'amélioration des techniques de contrôle non destructif des BRFA à travers deux axes majeurs :

- Caractérisation électromagnétique des fibres d'acier : La caractérisation précise de la perméabilité magnétique complexe et de la conductivité électrique des fibres d'acier a permis d'affiner la compréhension de leur comportement électromagnétique dans le BRFA. Ces résultats sont essentiels pour modéliser les interactions entre les fibres et le système de mesure et améliorer la conception des capteurs inductifs en optimisant leur sensibilité et leur précision pour une meilleure détection et caractérisation de la répartition des fibres dans le BRFA.
- Optimisation de l'évaluation des fibres d'acier dans le BRFA par la méthode inductive : une analyse paramétrique détaillée est effectuée afin de quantifier l'impact du dosage, de l'orientation et de la position des fibres d'acier sur la réponse électromagnétique du capteur inductif. En identifiant précisément l'influence de ces paramètres sur les variations d'impédance mesurées, cette approche permet d'améliorer l'interprétation des signaux inductifs, de développer des modèles prédictifs pour une meilleure sensibilité et fiabilité des mesures.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente un aperçu général des matériaux composites, en mettant particulièrement l'accent sur ceux renforcés de fibres, notamment le BRFA, largement utilisé en génie civil. Ses applications dans le domaine de construction sont décrites, en soulignant son rôle dans l'amélioration des performances structurelles et de la durabilité. Ensuite, ses performances mécaniques, notamment en traction, flexion et compression sont mises en exergue, ainsi que son efficacité dans la réduction de la fissuration et l'optimisation de la ténacité et l'influence de la répartition et de l'orientation des fibres d'acier qui sont des facteurs clés pour assurer un renforcement homogène et performant. Enfin, nous explorerons les méthodes d'évaluation de la distribution des fibres, En mettant en avant les techniques non destructives, notamment les approches électromagnétiques, permettant une analyse précise et optimisée du BRFA.

Le deuxième chapitre aborde la caractérisation électromagnétique des fibres d'acier utilisées dans les matériaux composites, en identifiant leur perméabilité magnétique complexe et leur conductivité électrique. Ces propriétés influencent directement l'interaction du matériau avec les champs électromagnétiques, ce qui impacte les méthodes de surveillance et de contrôle non

destructif des structures en génie civil. Pour mieux comprendre et exploiter ces effets, deux approches, expérimentale et numérique sont adoptées. Ces approches sont basées sur la mesure de l'impédance via un capteur à courants de Foucault et la résolution numérique d'un problème inverse à l'aide d'outils open source. Cette méthodologie permet de préciser la modélisation des matériaux composites, d'optimiser les techniques de contrôle non destructif et de concevoir des capteurs électromagnétiques plus performants pour l'évaluation des structures en béton renforcé de fibres d'acier.

Le troisième chapitre porte sur une étude paramétrique expérimentale visant à étudier l'influence de la distribution des fibres d'acier sur la signature électromagnétique des BRFA à sous l'effet des courants de Foucault (CF). L'objectif est d'analyser l'effet du positionnement, de l'orientation et du dosage des fibres sur l'impédance du capteur inductif afin de mieux comprendre leur impact sur la réponse électromagnétique du matériau. L'approche expérimentale est menée d'une manière systématique et approfondie. Les résultats obtenus vont aider à interpréter de manière précise les résultats de mesures de la technique de contrôle non destructif par balayage à CF et d'optimiser la conception des capteurs électromagnétiques dédiés à la caractérisation des structures en béton renforcé de fibres d'acier.

L'amélioration de l'évaluation de la répartition des fibres BRFA à l'aide d'une méthode inductive combinée à un système de balayage motorisé fait l'objet du quatrième chapitre. L'approche développée vise à surmonter les limites des techniques d'évaluations inductive qui fournissent des informations globales sur la répartition des fibres dans BRFA. La technique permet de fournir une cartographie détaillée et zonale de la distribution des fibres. Cette approche est validée à l'aide des essais destructifs, permettant d'établir un lien entre la répartition des fibres et les performances mécaniques du BRFA sous contrainte. Les résultats obtenus contribuent à l'optimisation des techniques de contrôle non destructif, améliorant ainsi la fiabilité de l'évaluation des matériaux composites et ouvrant des perspectives pour une meilleure conception et surveillance des structures en BRFA.

Nous terminons par une conclusion qui met exergue les approches et méthodes développées et met en évidence les principaux résultats obtenus tout au long de cette recherche et les perspectives de ce travail.

# **Chapitre 1**

**Généralités, performances et applications des  
matériaux composites en fibres d'acier**

**&**

***Etat de l'art de l'évaluation de la répartition des fibres***

## **1.1 Introduction**

Les matériaux composites jouent aujourd'hui un rôle essentiel dans divers secteurs industriels. Grâce à leurs propriétés remarquables, telles que leur rigidité, leur durabilité et leur aptitude à répondre à des exigences spécifiques [1], ils sont devenus des choix de prédilection dans des domaines comme l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et l'électronique [1-4].

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu général des matériaux composites, en mettant particulièrement l'accent sur les composites renforcés en fibres d'acier utilisées dans le domaine du génie civil. Nous soulignons leur rôle fondamental dans l'amélioration des performances mécaniques des structures, notamment en renforçant la résistance à la traction, la flexion et la dissipation d'énergie. Cette amélioration est directement liée aux propriétés des fibres d'acier intégrées dans la matrice cimentaire, dont la répartition et l'orientation influencent de manière significative le comportement mécanique du matériau. L'impact de la répartition et de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique du béton en fibres d'acier sera abordé. A la fin de ce chapitre, les différentes méthodes d'évaluation de la distribution et de l'orientation des fibres seront mises en relief. Ces méthodes sont essentielles pour évaluer la qualité de béton fibré et contribuent à l'amélioration des performances des structures basés sur ces matériaux.

## **1.2 Généralités sur les matériaux composites**

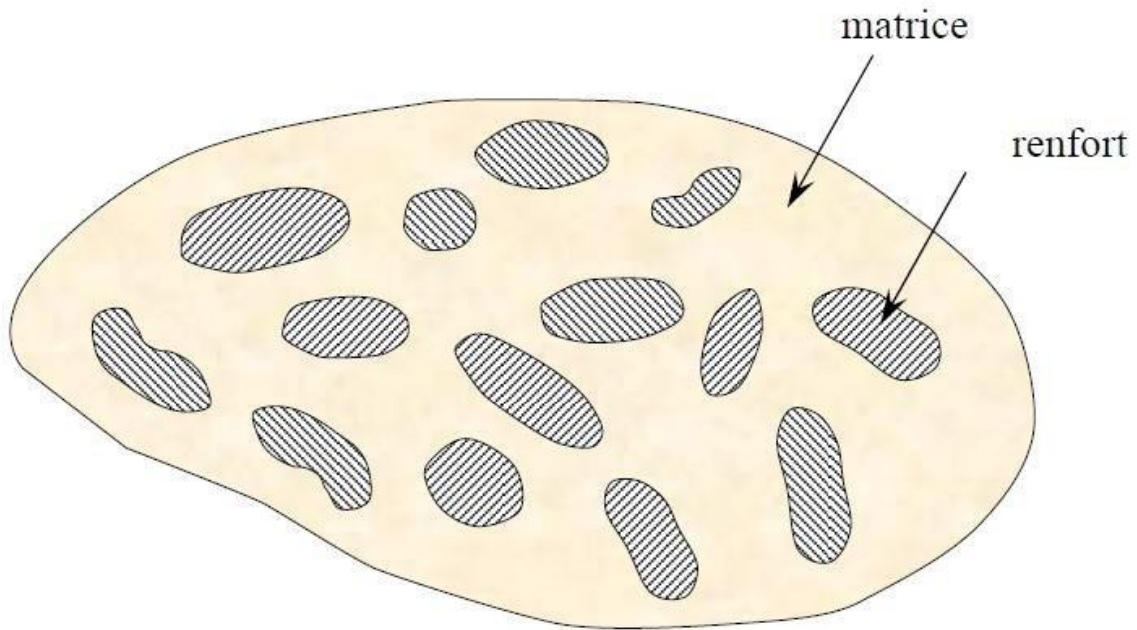
### **1.2.1 Définition et caractéristiques**

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles, chacun apporte des caractéristiques distinctes qui se combinent pour créer un matériau aux propriétés mécaniques, thermiques et/ou physico-chimiques améliorées [5].

Les matériaux composites peuvent être conçus avec des propriétés imposés par le client et/ou le fabricant, ce qui en fait une option intéressante pour une variété d'applications dans divers secteurs, y compris la construction, l'aérospatiale, l'automobile, le médical et l'électronique [6].

### **1.2.2 Constitution d'un matériau composite**

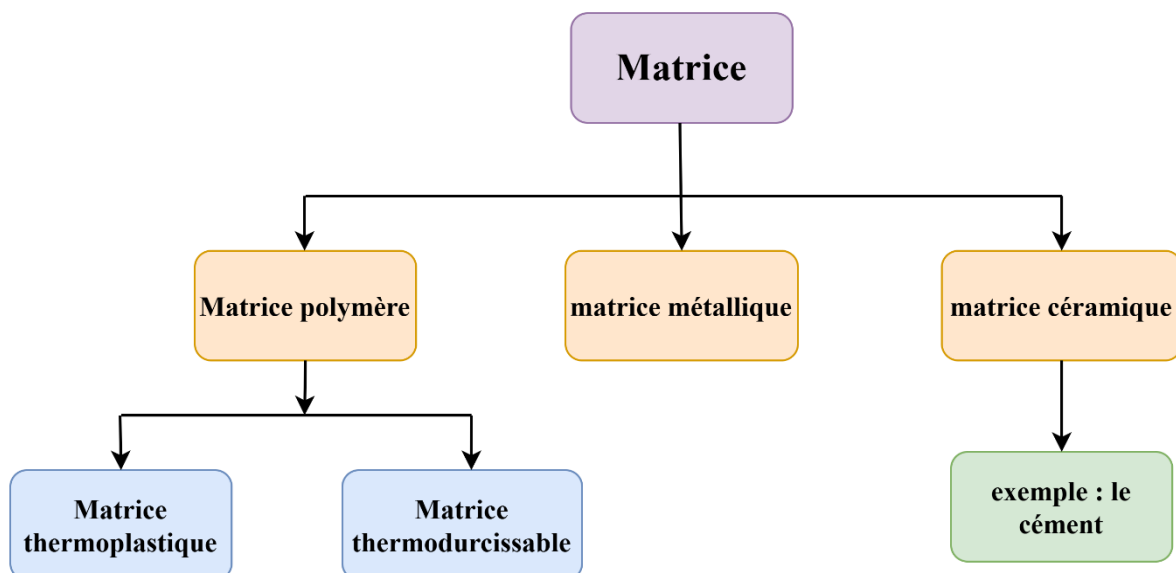
Les matériaux composites sont constitués principalement d'une matrice et d'un renfort [1].



**Figure 1. 1** constitutions du matériau composite [7].

Matrice : C'est un composant principal du matériau composite qui agit comme un liant pour maintenir ensemble les autres composants. Elle assure la cohésion de la structure composite.

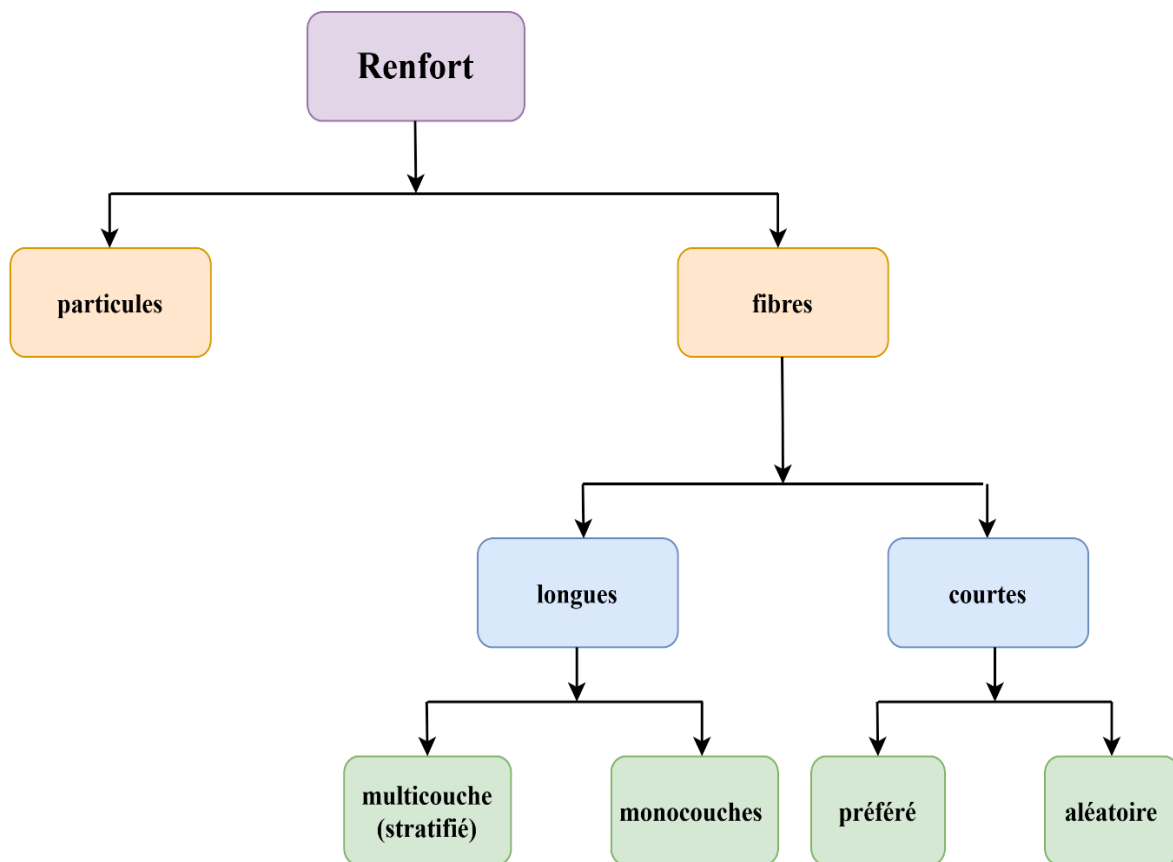
Il existe plusieurs catégories de matrices qui sont utilisées dans les matériaux composites, comme illustré dans la figure 1 .2.



**Figure 1. 2** Classification des matrices dans les matériaux composites [8].



Renfort : Le renfort est le composant qui confère au matériau composite ses propriétés mécaniques. Il peut prendre la forme de fibres ou de particules.



**Figure 1. 3** Classification du renfort dans les matériaux composites.

La figure 1.3 illustre la classification des renforts des composites, répartis en deux grandes catégories : les fibres et les particules. Les fibres peuvent être longues, se présentant sous forme de multicouches (stratifiées) ou de monocouches, ou bien courtes, avec une disposition soit aléatoire, soit orientée. Cette classification permet de distinguer les différentes structures de renforcement et leur organisation au sein des matériaux composites de manière générale.

Les fibres jouent un rôle prépondérant en tant que renforts dans les matériaux composites, absorbant la majeure partie de la charge appliquée sur une structure composite [9].

Grâce à leur polyvalence, les matériaux composites renforcés de fibres trouvent des applications variées en aéronautique [10], automobile [11] et médical [12].

En aéronautique, la légèreté et la résistance mécanique sont essentielles pour améliorer l'efficacité énergétique, d'où l'utilisation des fibres de carbone dans les fuselages, ailes et

empennages d'avions. Dans l'industrie automobile, les fibres de carbone sont également employées pour alléger les véhicules, améliorant ainsi la consommation de carburant tout en renforçant la sécurité des conducteurs. Dans le domaine médical, la biocompatibilité et la solidité sont primordiales, expliquant l'utilisation des fibres de carbone dans la fabrication d'implants [13].

Les composites à fibres longues offrent une grande résistance mécanique et sont utilisés dans des applications exigeantes. Par exemple, les composites à matrice polymère renforcés par des fibres de carbone (PRFC) sont employés en aéronautique pour la fabrication de structures légères et robustes, telles que les fuselages et les ailes d'avions. Dans le domaine de la construction, les PRFC sont également utilisés pour renforcer les structures, notamment les ponts. Leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leur haute résistance mécanique en font des matériaux idéaux pour améliorer la capacité portante et prolonger la durée de vie des infrastructures [14].

Les composites renforcés par des particules sont utilisés dans des applications nécessitant une résistance élevée à l'usure, comme les revêtements routiers. Leur principal avantage réside dans leur faible coût et leur facilité de production et de mise en forme. Un exemple pertinent est le béton, où les granulats de roche ou de gravier sont intégrés dans une matrice de ciment. Les granulats apportent rigidité et résistance, tandis que le ciment agit comme liant pour maintenir l'ensemble de la structure [15].

Les composites en fibres courtes sont largement utilisés pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité des matériaux, tout en réduisant la fissuration. Par exemple, dans le secteur de la construction, le béton est souvent renforcé avec des fibres courtes, telles que des fibres de verre ou d'acier, pour augmenter sa robustesse [16]. Dans l'industrie automobile, les fibres courtes, notamment en carbone, sont également employées. Par exemple, la construction des capots de voiture. [17]

Dans cette thèse, nous étudions particulièrement les composites renforcés en fibres courtes.

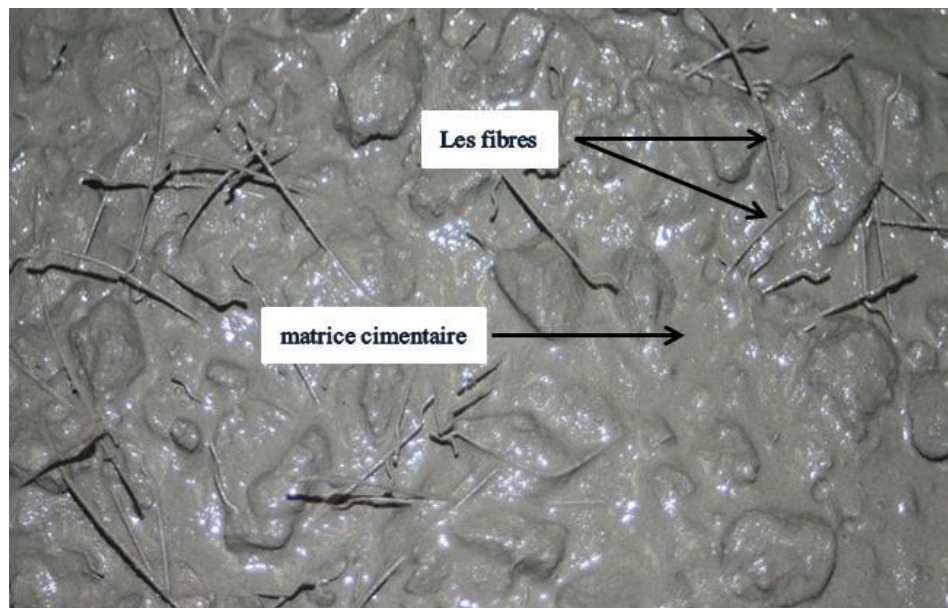
Le type des fibres, leur proportion volumique, leur longueur et leur orientation sont des paramètres essentiels, car ils ont une influence directe sur les propriétés mécaniques, thermiques et électriques du matériau composite [18,19]

Dans le domaine du génie civil, les composites renforcés en fibres courtes occupent une place importante grâce à leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, leur durabilité, leur rigidité et

leur facilité de mise en œuvre. Parmi ces matériaux, le béton fibré joue un rôle clé, en raison de sa capacité à répondre aux exigences structurelles variées [20].

### 1.3 Béton fibré

Selon le comité 544 de l'American Concrete Institute (ACI), le béton fibré est constitué d'un ciment hydraulique, d'un granulat fin ou gros, et de fibres discontinues (Figure 1. 4). En d'autres termes, c'est un béton conventionnel auquel des longueurs discontinues de fibres sont ajoutées durant la préparation du mélange [21].

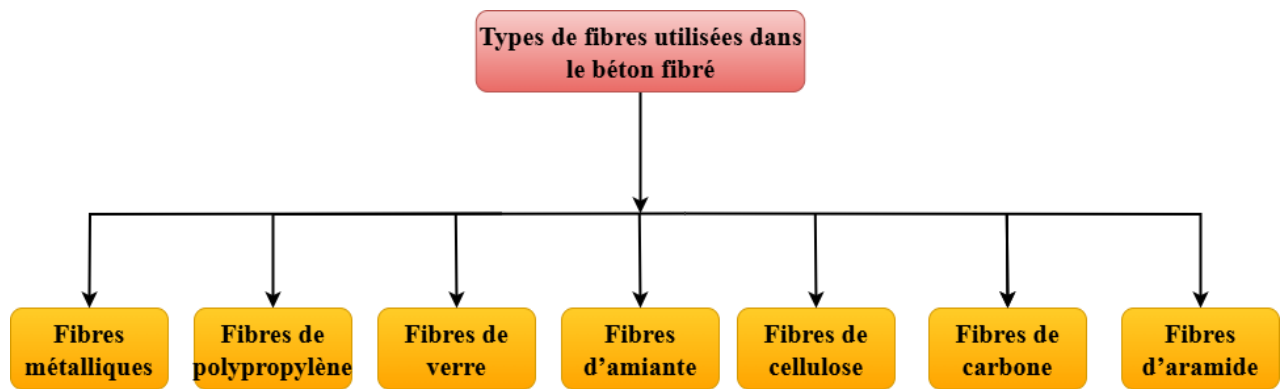


**Figure 1. 4** Structure d'un béton fibré.

Les fibres présentes dans le béton fibré sont essentielles pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Grâce à ces fibres, il est possible de contrôler et de réduire la fissuration, d'augmenter la résistance à la traction et à la flexion, et d'améliorer la ductilité [22,23]. En fonction de l'application visée, différents types de fibres sont employés pour répondre aux besoins spécifiques de l'application.

### 1.4 Principaux types de fibres utilisées dans le renforcement du béton

La figure 1. 5 illustre les principaux types de fibres utilisées dans le béton fibré, chacune offrant des propriétés spécifiques en fonction des besoins et des applications. Ces fibres, intégrées dans la matrice cimentaire, contribuent à améliorer les performances mécaniques et la durabilité du béton. Elles se distinguent par leur origine et leurs caractéristiques physiques.



**Figure 1. 5** Principales fibres utilisées dans le renforcement du béton.

#### **1.4.1 Fibres de polypropylène**

Les fibres de polypropylène, obtenues par polymérisation du propylène à partir de fibres synthétiques polymères linéaires, se distinguent par leur légèreté, leur haute résistance et leur résistance à la corrosion [24]. Ces fibres sont couramment utilisées dans les constructions pour la fabrication de panneaux décoratifs, le revêtement de façades, les pieux de fondation et les canalisations [25].

#### **1.4.2 Fibres de verre**

Les fibres de verre sont parmi les fibres les plus utilisées dans le béton fibré en raison de leur combinaison unique de propriétés mécaniques et chimiques. Elles apportent une amélioration notable à la résistance mécanique du béton [26].

#### **1.4.3 Fibres d'amiante**

Les fibres d'amiante, connues pour leurs excellentes propriétés d'isolation thermique, ont été largement utilisées dans l'asphalte [27].

#### **1.4.4 Fibres d'aramide**

Les fibres d'aramides se distinguent par leur faible densité et leur remarquable rapport résistance/poids [28], elles sont largement utilisées dans les équipements de protection [29].

#### **1.4.5 Fibres de Carbon**

Les fibres de carbone suscitent un intérêt croissant grâce à leurs propriétés uniques, telles que leur résistance à la fatigue, thermique et mécanique, ce qui en fait un matériau de choix dans des applications exigeantes telles que l'aéronautique, où elles sont utilisées pour alléger les structures tout en garantissant une résistance élevée [30,31].

#### 1.4.6 Fibres de cellulose

Les fibres de cellulose, issues du bois par des procédés chimiques et mécaniques [26], elles sont appréciées pour leurs propriétés mécaniques et leur aptitude à renforcer les matrices cimentaires dans des applications respectueuses de l'environnement [32].

#### 1.4.7 Fibres métalliques

Les fibres métalliques, incluant les fibres d'acier et de fonte amorphe, font l'objet de recherches intensives et continues à l'échelle mondiale. Les fibres d'acier, en particulier, figurent parmi les plus employées en génie civil en raison de leur capacité à améliorer significativement les propriétés mécaniques du béton [33]. Lorsqu'elles sont incorporées dans la matrice cimentaire, elles permettent de concevoir un matériau composite spécifique, désigné sous le terme de béton renforcé en fibres d'acier (BRFA), qui se caractérise par une résistance accrue à la traction, à la flexion et aux impacts [27].

Les fibres d'acier présentent un diamètre compris entre 5 et 500  $\mu\text{m}$  et une longueur variant de 20 à 80 mm. Leur densité élevée, de 7,8  $\text{g/cm}^3$ , associée à une résistance à la traction allant de 1000 à 3000 MPa, garantit une excellente performance structurelle. Avec un module d'Young de 200 GPa [14]. De plus, les fibres d'acier sont conductrices et possèdent des propriétés magnétiques [34], ce qui permet d'utiliser les méthodes électromagnétiques pour l'élaboration, la caractérisation et le diagnostic des matériaux renforcés avec ce type de fibre.

Les fibres d'acier se distinguent par une grande variété de formes et de caractéristiques visant à optimiser les performances globales du béton. Les fabricants ont exploré différents moyens pour améliorer l'adhérence, notamment en introduisant des irrégularités à la surface des fibres, ce qui a permis de créer de nombreuses variantes. Ces fibres varient ainsi en diamètre, en longueur, et en forme de section (ronde, carrée, rectangulaire) [35]

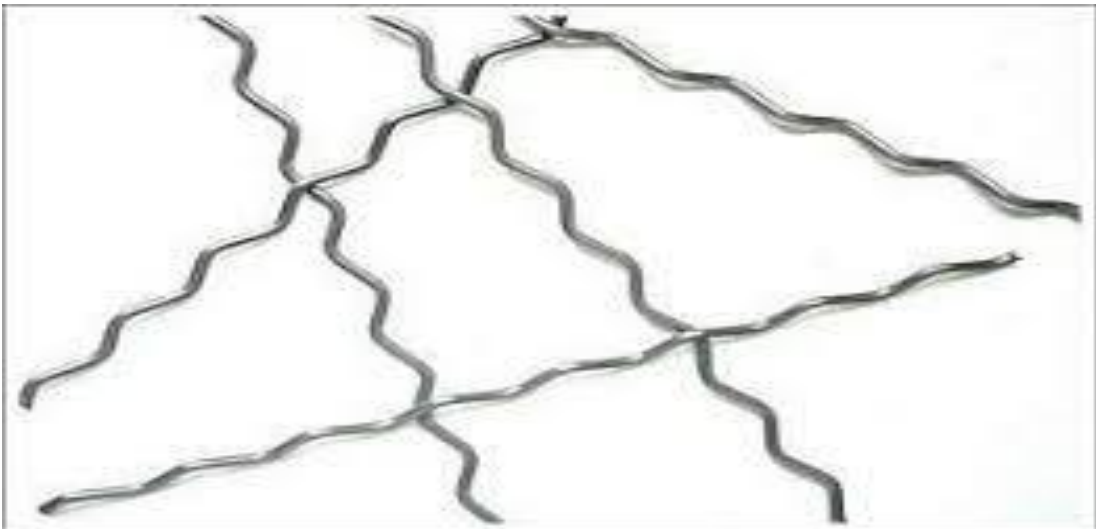
Les fibres d'acier utilisées dans le renforcement du béton peuvent prendre plusieurs formes spécifiques pour optimiser leur adhérence et leur résistance :

- **Droites** : Ces fibres n'ont pas de forme particulière pour améliorer l'adhérence. Elles sont simples et généralement utilisées dans des applications où une adhérence minimale est acceptable (figure 1. 6).



**Figure 1. 6** Fibres d'acier droites [36].

- **Ondulées** : Dotées d'ondulations le long de leur longueur, ces fibres améliorent l'adhérence au béton (figure 1. 7).



**Figure 1. 7** Fibres d'acier Ondulées [37].

- **Embouties** : Ces fibres comportent des indentations ou des motifs en surface, créant un effet d'ancrage supplémentaire dans le béton (figure 1. 8).





**Figure 1. 8** Fibres d'acier Embouties [38].

- **Crochets aux extrémités** : Ce type de fibres, muni de crochets à chaque extrémité, présente une géométrie spécifique favorisant une intégration adéquate dans la matrice cimentaire (figure 1. 9).



**Figure 1. 9** Fibres d'acier Crochets aux extrémités [39].

## **1.5 Performances mécanique du béton renforcé en fibres d'acier (BRFA)**

Le BRFA se distingue par ses performances mécaniques améliorées grâce à l'incorporation de fibres d'acier dans sa matrice. Ces fibres jouent un rôle primordial dans la distribution et la gestion des contraintes, offrant au matériau une résistance exceptionnelle et une meilleure durabilité. Les effets de ces améliorations se manifestent de manière spécifique selon les types d'efforts auxquels le BRFA est soumis, particulièrement en compression, en traction et en flexion. Une analyse détaillée de ces propriétés permet de mieux comprendre les avantages du BRFA dans diverses applications structurales.

### **1.5.1 Comportement en traction du BRFA**

Le béton renforcé en fibres d'acier se distingue par son comportement en traction, les fibres intégrées jouant un rôle essentiel dans le renforcement de la matrice. Elles absorbent les contraintes et retardent la propagation des fissures, en particulier après l'apparition des microfissures. En phase post-fissuration, les fibres d'acier agissent comme des ponts reliant les faces de la fissure, ce qui contribue à maintenir la cohésion du matériau et à accroître sa capacité à supporter des charges supplémentaires [40].

Dans une étude portant sur le comportement en traction uniaxiale du BRFA, Renaud de Montaignac et al. (2012) ont analysé l'effet de différentes fractions volumiques de fibres d'acier à crochets sur la résistance post-fissuration. Trois dosages (0,75 %, 1,0 % et 1,25 %) ont été étudiés. Les résultats ont montré que l'augmentation de la fraction volumique améliore significativement la résistance post-fissuration, atteignant une valeur maximale de 3,3 MPa pour une ouverture de fissure de 1 mm avec un dosage de 1,25 %. Un dosage plus élevé en fibres s'est révélé plus efficace pour limiter l'élargissement des fissures, mettant en évidence l'importance des fibres d'acier dans l'amélioration des performances mécaniques en traction du béton fibré [41].

### **1.5.2 Comportement en Flexion du BRFA**

L'ajout de fibres d'acier dans le béton est largement reconnu pour améliorer sa résistance en flexion, augmenter sa résistance aux impacts et sa ténacité, tout en réduisant sa tendance à une rupture fragile. Les fibres d'acier limitent la propagation des fissures dans la matrice du béton,



empêchant la formation de macro-fissures à partir de micro-fissures, ce qui confère au matériau un comportement plus ductile [42].

Par ailleurs, Balendran et al [43], ont étudié l'efficacité des fibres d'acier sur les performances mécaniques du béton, en particulier sur sa résistance et sa ductilité, selon les types de béton et les tailles d'éprouvettes. Les tests de flexion sur des poutres entaillées ont révélé que l'ajout de 1 % en volume de fibres d'acier augmentait la résistance en flexion jusqu'à 43 % pour le béton normal et jusqu'à 260 % pour le béton léger. Ces résultats montrent que l'effet des fibres d'acier est plus marqué dans le béton léger, plus fragile que le béton normal.

Dans une autre étude, qui confirme également l'impact des fibres d'acier sur la résistance en flexion, Yazıcı et al [44], ont analysé l'influence de la géométrie des fibres, du rapport d'aspect ( $l/d$ ) et de la fraction volumique. Des fibres d'acier à extrémités crochues, avec trois rapports d'aspect (45, 60 et 80) et trois fractions volumiques (0,5 %, 1 % et 1,5 %), ont été utilisées. Les résultats ont montré que les résistances en flexion du béton fibré étaient supérieures de 3 % à 81 % par rapport au béton ordinaire, mettant en évidence l'importance de l'incorporation des fibres d'aciers sur la résistance en flexion.

### **1.5.3 Comportement en Compression du BRFA**

La résistance à la compression du béton ordinaire est généralement bien supérieure à sa résistance à la traction, et l'ajout de fibres d'acier vise principalement à améliorer les propriétés en traction plutôt qu'en compression [45]. Plusieurs chercheurs concluent que l'effet des fibres d'acier sur la résistance à la compression du matériau composite reste limité [46,47,48].

En effet, Soutsos et al [49], ont mené une étude sur la résistance à la compression du BRFA, en utilisant éprouvettes cubiques. Les résultats ont montré que la résistance moyenne à la compression du béton ordinaire était de 32,5 MPa. L'ajout de fibres d'acier a permis d'augmenter cette résistance d'environ 4 MPa et 5 MPa pour des dosages en fibres respectifs de 30 kg/m<sup>3</sup> et 50 kg/m<sup>3</sup>. Toutefois, cette amélioration est faible, confirmant que les fibres d'acier ont un impact limité sur la compression et agissent surtout en traction et en flexion.

Une autre étude, menée par Gao et al [18], confirme ces résultats en rapportant que l'ajout de fibres d'acier dans le béton a peu d'effet sur sa résistance à la compression, pour des fractions volumiques comprises entre 0,5 % et 2,0 %.

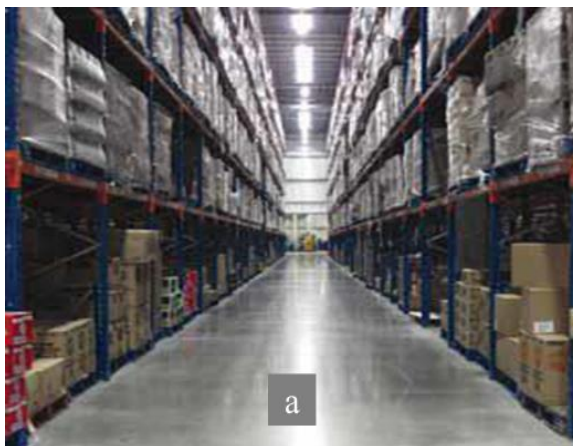
Les performances mécaniques du BRFA, notamment en traction, et en flexion, en font un matériau particulièrement adapté à de nombreuses applications structurales. Ces propriétés améliorées permettent son utilisation dans des domaines variés, répondant aux exigences des structures modernes et des environnements complexes.

## 1.6 Les applications du BRFA

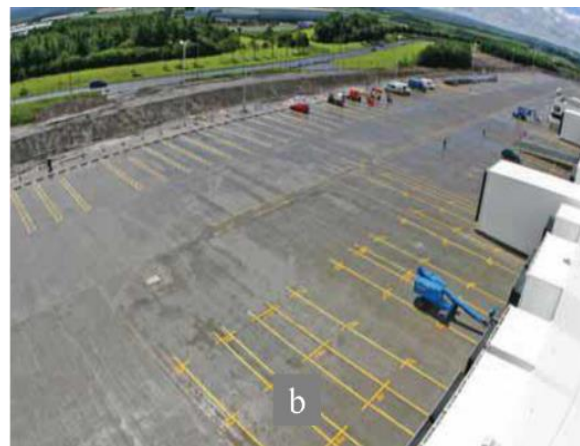
Le béton renforcé de fibres d'acier est aujourd'hui employé à l'échelle mondiale dans de nombreuses applications [50], qu'il s'agisse de travaux de construction ou de rénovation. Il est utilisé pour des ouvrages structuraux et non structuraux, aussi bien dans les bâtiments que dans les infrastructures de génie civil, ainsi que pour les dalles industrielles reposant directement sur le sol.

### 1.6.1 dalles sur sol

La dalle sur sol parmi les applications les plus répandues du BRFA, notamment dans les projets nécessitant une résistance accrue aux charges et au trafic intense. Par exemple, le dallage réalisé par Twintec Industrial Flooring en Écosse pour les entrepôts Tesco (figure 1. 10), couvrant 250 000 m<sup>2</sup>, illustre l'efficacité du béton renforcé de fibres d'acier pour des surfaces continues et sans joints, adaptées aux environnements industriels exigeants [51].



(a) dalle intérieure



(b) dalle extérieure

**Figure 1. 10** Tesco Livingston, la plus grande dalle en BRFA du Royaume-Uni [51].

### 1. 6. 2 Revêtements de mines et de tunnels

Les fibres d'acier sont couramment utilisées pour renforcer les revêtements de mines et de tunnels (figure 1. 11). Elles servent également à stabiliser les pentes rocheuses, à construire des barrages, à réparer des surfaces endommagées et à réaliser des dômes à parois minces [52].



**Figure 1. 11** Métro de Stockholm avec revêtements permanents en béton projeté renforcé en fibres d'acier [53].

### 1. 6. 3 Structures hydrauliques et béton sous-marin

BRFA est également utilisé pour les réservoirs de stockage préfabriqués, fosses septiques, structures étanches, et éléments tels que tuyaux et regards. Dans les structures hydrauliques (figure 1. 12), il offre une meilleure résistance à la cavitation et à l'érosion causées par des écoulements rapides. Il est également employé pour la construction et la réparation de déversoirs, vannes et bassins d'amortissement, avec une durabilité environ trois fois supérieure à celle du béton ordinaire dans ces conditions [54].



**Figure 1. 12** Béton sous-marin renforcé d'acier [55].

La rigidité et les excellentes performances du BRFA en font un choix privilégié pour de nombreuses applications, grâce aux fibres d'acier intégrées dans la matrice cimentaire. Toutefois, pour une efficacité optimale, ces fibres ne doivent pas seulement être incorporées, mais aussi positionnées et orientées de manière à mieux absorber les contraintes. Une répartition et une orientation inadéquates peuvent ainsi réduire considérablement leurs performances [56, 57].

Il est donc essentiel de s'intéresser à un facteur clé qui influence directement ses performances : la distribution des fibres au sein de la matrice [58]. Ce paramètre est déterminant pour la tenue mécanique et la durabilité du matériau, car il impacte sa capacité à résister aux contraintes et à limiter les fissurations.

### **1.7 Influence de la distribution des fibres sur les performances du BRFA**

La préparation du BRFA repose sur un dosage précis et une incorporation contrôlée des fibres dans la matrice de béton. Cette étape, bien que fondamentale, ne garantit pas à elle seule une distribution homogène des fibres dans le matériau final. La distribution finale des fibres est affectée par divers facteurs, notamment les contraintes imposées par les parois du moule, la teneur en fibres, la méthode de préparation du mélange (mélange, vibration, mise en moule) ainsi que la composition de la matrice composite (remplissage)[59]. La répartition et l'orientation des fibres au sein du BRFA sont des facteurs déterminants pour les propriétés mécaniques du béton, en particulier sa rigidité et sa résistance aux fissurations sous contraintes [56, 57].

La rigidité du BRFA, en grande partie influencée par la capacité des fibres à ancrer les forces de traction et à stabiliser la propagation des fissures, dépend non seulement de la quantité et du type de fibres, mais aussi de leur répartition et leur orientation dans la matrice [60,61]. Une distribution uniforme avec une orientation adéquate assure un renforcement équilibré dans tout le volume de béton, optimisant ainsi la capacité du BRFA à absorber les contraintes sans défaillance prématurée [62]. Cependant, une répartition inégale des fibres et/ou une mauvaise orientation, due à des facteurs de malaxage ou de placement, peut créer des zones vulnérables, réduisant ainsi la rigidité globale du matériau et augmentant le risque de fissuration localisée [63].

Une distribution uniforme et une orientation adéquate des fibres améliorent significativement les propriétés mécaniques du BRFA, notamment la résistance à la traction, une meilleure capacité à dissiper l'énergie sous charge, et une résistance renforcée à la fissuration [64]. Les fibres orientées perpendiculairement à la surface de fissuration augmentent la résistance et la capacité de pontage des fissures, optimisant ainsi les performances mécaniques du matériau [65]. Une telle orientation permet d'augmenter la contrainte maximale jusqu'à 194 % en traction et 280 % en flexion, comparé à des orientations moins favorables. [66].

## **1.8 Méthodes d'évaluation de la distribution des fibres**

Étant donné que les propriétés mécaniques du BRFA dépendent étroitement de la répartition des fibres, il est essentiel d'évaluer cette distribution afin d'analyser sa réponse mécanique. Une évaluation précise de la répartition et de l'orientation des fibres permet d'identifier les zones où elles pourraient ne pas assurer pleinement leur rôle de renforcement. Ce contrôle est donc indispensable pour évaluer la tenue mécanique du BRFA.

Il existe plusieurs méthodes permettant d'évaluer la répartition et l'orientation des fibres d'acier dans les BRFA. Elles se divisent en deux grandes catégories : les méthodes destructives et les méthodes non destructives.

### **1. 8. 1 Méthodes destructives**

Les méthodes destructives d'évaluation de la distribution des fibres dans BRFA impliquent la modification ou la destruction de l'échantillon afin de révéler la structure interne et la disposition des fibres. On peut regrouper ces méthodes dans deux catégories, les méthodes d'évaluation directe, et les méthodes d'évaluation indirecte.

### **1. 8. 1. 1 Méthodes d'évaluation directe**

Ces techniques permettent une observation directe de la répartition, de la densité et de l'orientation des fibres.

#### **1. 8. 1. 1. 1 Méthode de comptage manuel**

La méthode de comptage manuel des fibres consiste à découper l'échantillon pour exposer la section transversale, permettant de compter directement les fibres présentes dans cette dernière [67].

Cependant, cette méthode présente des inconvénients. Elle est chronophage, car chaque fibre doit être comptée manuellement, ce qui limite son application aux petits échantillons et aux environnements de laboratoire. De plus, elle présente une limite de précision, car l'évaluation du nombre des fibres peut être affectée par des erreurs humaines et des incertitudes liées à l'observation.

#### **1. 8. 1. 1. 2 Approche par analyse d'image pour l'évaluation de la distribution des fibres**

L'analyse d'image est une approche basée sur le même principe que le comptage manuel, nécessitant une découpe de l'échantillon, mais elle automatise le processus afin d'améliorer la précision et la reproductibilité des mesures.

Le processus comprend plusieurs étapes :

- Préparation de l'échantillon : La surface de l'échantillon est polie ou traitée afin de révéler clairement les fibres incluses dans la matrice cimentaire.
- Capture d'images : Des images haute résolution sont prises, souvent avec un contraste amélioré, obtenu grâce à des techniques de coloration, d'éclairage spécifique ou de filtrage d'image.
- Traitement et analyse des images : À l'aide de logiciels spécialisés, les fibres sont détectées, comptées et analysées en fonction de leur position, densité et orientation dans le matériau.

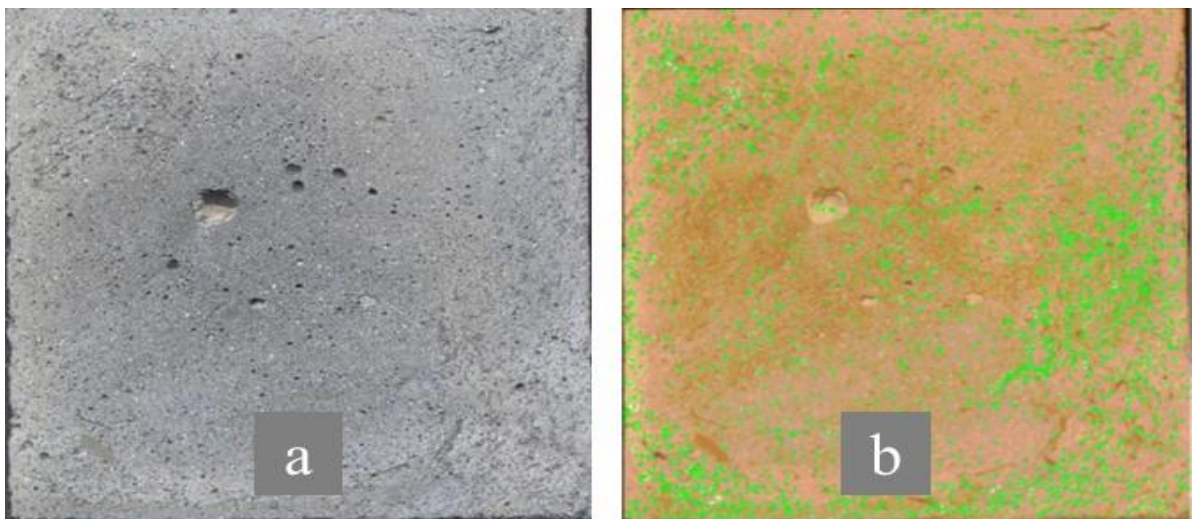
Cette approche permet une quantification plus fiable et objective. Cependant, cette évaluation ne permet d'analyser que la section transversale découpée, ce qui représente une limite de



précision pour la caractérisation de la distribution des fibres dans l'ensemble du volume du matériau.

Dans une étude basée sur cette méthode, Fladr et al [68] ont analysé la répartition des fibres dans le BRFA. Les auteurs ont sectionné des échantillons de BRFA et utilisé un système d'éclairage spécifique pour accentuer la réflectance des fibres d'acier, facilitant leur identification par rapport à la matrice cimentaire. Les images obtenues ont ensuite été traitées à l'aide d'un logiciel spécialisé pour déterminer l'orientation moyenne et la densité des fibres.

Figure 1. 13 illustre le processus d'analyse d'image appliqué à la répartition des fibres d'acier dans le BRFA. Le contraste et la saturation de l'image ont été ajustés pour faciliter la détection et l'analyse des fibres, permettant ainsi d'obtenir des informations détaillées sur leur répartition et leur orientation.



(a) Photo originale de la section d'un échantillon de béton renforcé de fibres d'acier

(b) Positions des fibres d'acier détectées et traitées par un logiciel spécialisé

**Figure 1. 13** Analyse d'image de la répartition des fibres d'acier dans le BRFA [68].

### 1. 8. 1. 2 Méthodes d'évaluation indirecte

Il est bien établi que la présence des fibres influence les propriétés mécaniques du BRFA. Une répartition homogène des fibres permet d'améliorer significativement les performances mécaniques, tandis qu'une distribution hétérogène peut engendrer des points de faiblesse et diminuant la rigidité globale du matériau. L'évaluation indirecte de la distribution des fibres

repose sur l'analyse des propriétés mécaniques du matériau, notamment à travers des essais de flexion et de traction, où les fibres contribuent à l'augmentation de la résistance.

L'évaluation de la distribution des fibres par essais mécaniques consiste à analyser le comportement du BRFA soumis à des charges pour déduire les informations sur la répartition et l'orientation des fibres dans le matériau. Cette méthode repose sur l'observation des réponses mécaniques, telles que la phase post-fissuration, pour estimer la distribution. Pendant cette phase, les fibres agissent pour maintenir la cohésion entre les surfaces fissurées, transférer les charges, et ralentir la propagation des fissures. Une analyse précise des réponses mécaniques obtenues lors des essais permet ainsi d'identifier comment la répartition et l'orientation des fibres influencent la capacité du matériau à résister aux contraintes.

Dans une étude basée sur cette méthode, Kooiman, Van der Veen et Walraven [69] ont utilisé des essais de flexion en trois points sur des poutres entaillées pour modéliser le comportement post-fissuration du BRFA. En appliquant une analyse inverse des réponses mécaniques obtenues, ils ont estimé l'effet de l'orientation et de la répartition des fibres sur la capacité de résistance post-fissuration. Leur travail a démontré que des fibres bien orientées dans les zones de contraintes maximales optimisent la résistance.

Bien que les méthodes de comptage manuel, l'analyse d'image et l'essais mécaniques fournissent des informations sur la répartition des fibres, elles restent destructrices, empêchant toute analyse supplémentaire après la rupture de l'échantillon.

## **1. 8. 2 Méthodes non-destructives**

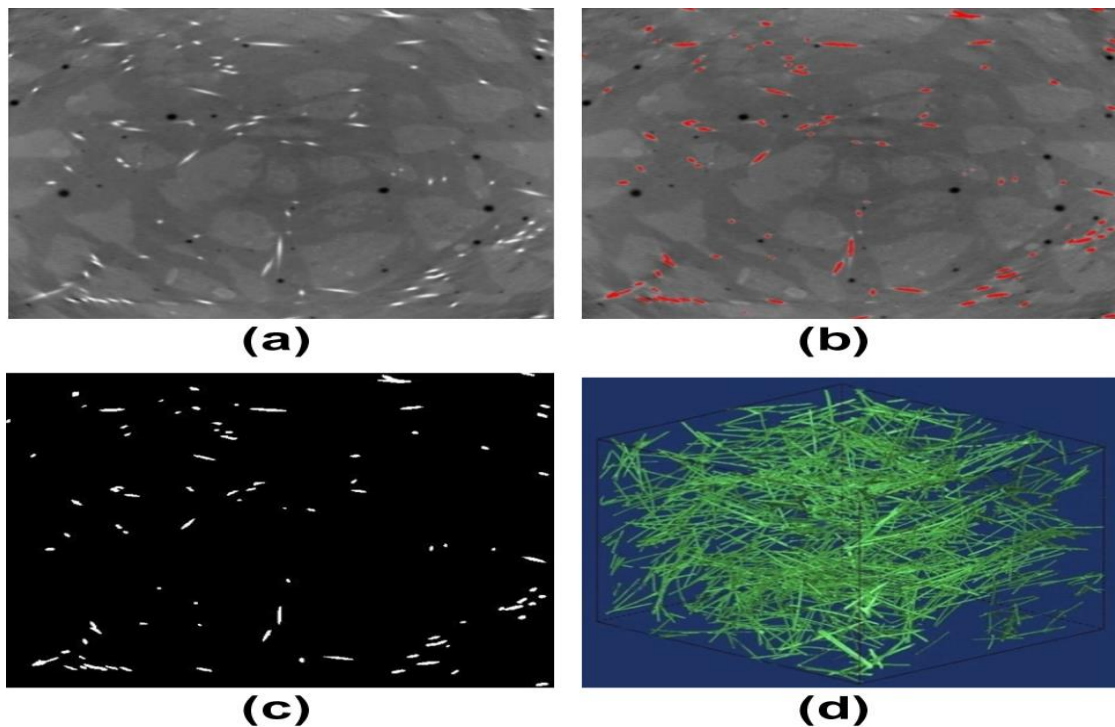
Les méthodes non destructives pour évaluer la distribution des fibres dans le BRFA permettent d'analyser la structure interne du matériau sans endommager l'échantillon. Elles fournissent des informations sur la répartition et l'orientation des fibres sans recours à la découpe ou à la rupture de l'échantillon.

### **1. 8. 2. 1 Méthode de tomographie par ordinateur (CT scan)**

La tomographie par ordinateur (CT scan) est une technique d'imagerie non destructive basée sur les rayons X. elle permet de capturer des images en 3D de la structure interne des matériaux, comme le BRFA.



Jiaping Liu et al [70], ont utilisé le CT scan pour analyser en 3D la distribution des fibres d'acier dans le BRFA de manière non destructive (figure 1. 14). Cette technique permet d'obtenir une image détaillée de la structure interne des échantillons sans les endommager, en évaluant la répartition, la densité et l'orientation des fibres à l'intérieur du matériau. Dans cette étude, des échantillons ont été soumis à une analyse par CT scan, permettant l'acquisition d'images en haute résolution. Ces images ont ensuite été traitées numériquement afin de quantifier avec précision la position et l'orientation des fibres dans la matrice cimentaire.



**Figure 1. 14** Segmentation et reconstruction d'images CT des fibres d'acier dans le BRFA.

(a) Image CT originale montrant la distribution des fibres dans la matrice.

(b) Segmentation de l'image mettant en évidence les fibres détectées.

(c) Image filtrée contenant uniquement les fibres d'acier après traitement.

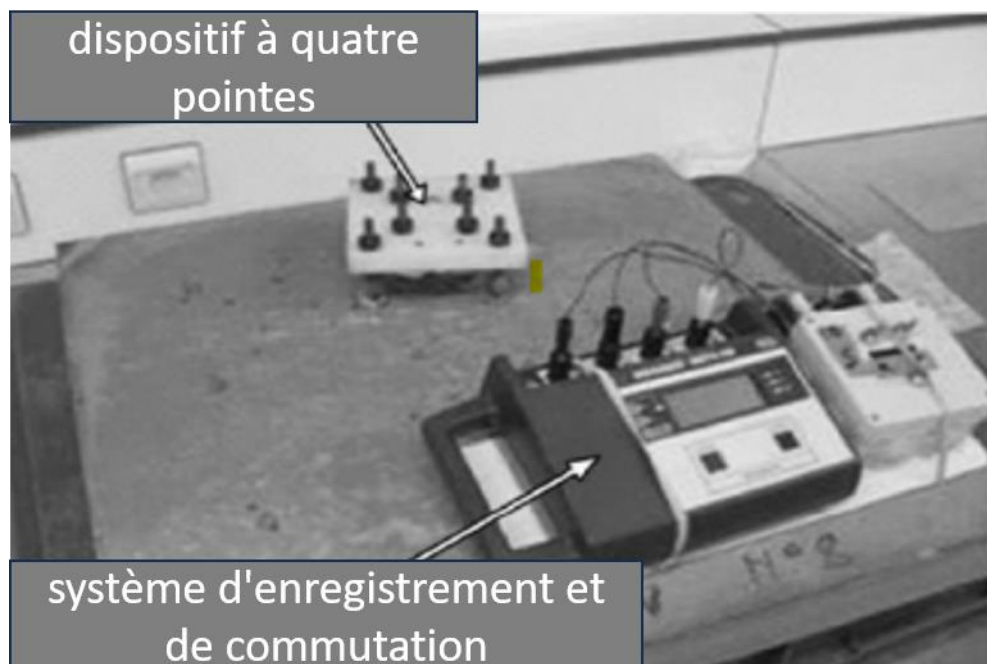
(d) Reconstruction 3D de la distribution des fibres à l'aide du logiciel XCT VG Studio MAX [70].

### 1. 8. 2. 2 Méthodes électriques

Ces méthodes reposent sur la mesure des grandeurs électriques du BRFA. Grâce à leur nature conductrice, les fibres d'acier modifient les trajectoires du courant électrique à travers le matériau, ce qui influence directement la résistivité électrique, laquelle dépend de la concentration et de l'orientation des fibres. Lorsque celles-ci sont uniformément réparties et alignées parallèlement au courant appliqué, elles facilitent la conduction électrique, réduisant ainsi la résistivité. En revanche, une orientation perpendiculaire ou une distribution non

uniforme augmente la résistivité, permettant d'évaluer de manière non destructive leur répartition et leur alignement dans le béton.

Lataste et al [71], ont appliqué cette méthode pour analyser la répartition et l'orientation des fibres dans le BRFA. En utilisant un dispositif à quatre pointes (figure 1. 15), ils ont mesuré la résistivité électrique qui est sensible à la densité des fibres et à leur l'alignement. Leurs essais sur des dalles ont révélé une anisotropie caractéristique, avec une résistivité plus élevée lorsque les fibres sont orientées perpendiculairement au courant électrique, indiquant une distribution non uniforme et directionnelle des fibres.

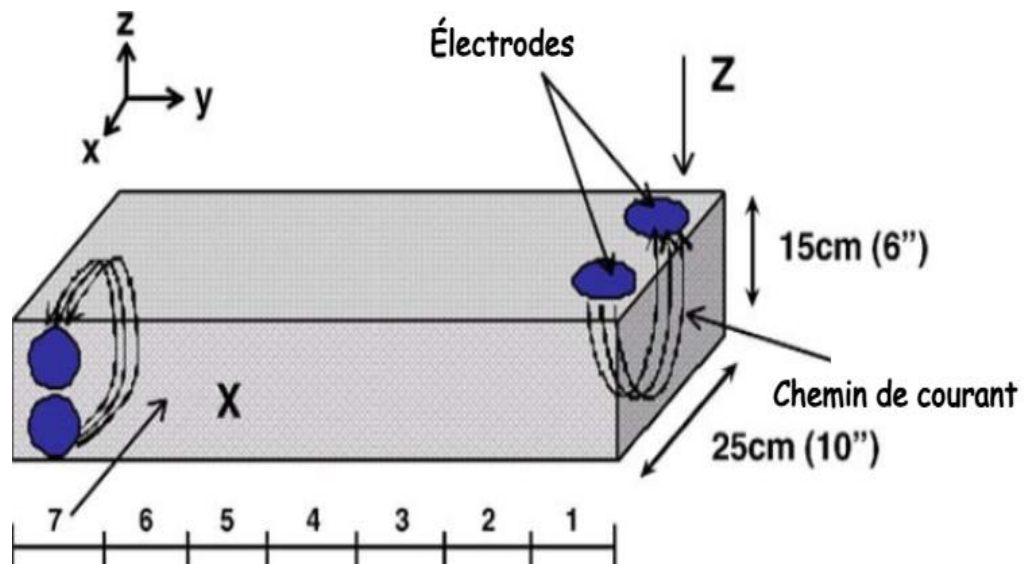


**Figure 1. 15** Dispositif de mesure de résistivité électrique par la méthode des quatre pointes [71].

Les auteurs [72] ont proposé une méthode appelée spectroscopie AC qui consiste à appliquer un signal électrique alternatif à travers des électrodes au matériau test et à analyser sa réponse en fonction de la fréquence. En mesurant l'impédance complexe, cette technique permet d'obtenir des informations détaillées sur la microstructure du matériau, notamment l'orientation et la distribution des fibres métalliques. Les variations de l'impédance sont impactées par la résistivité électrique des fibres et leur interaction avec la matrice cimentaire. La méthode a été appliquée sur une poutre préfabriquée en BRFA. Comme illustré sur la figure 1. 16, des électrodes en acier inoxydable ont été positionnées à des points précis de l'échantillon, et il est nécessaire de modifier la position des électrodes pour obtenir des mesures dans différentes directions.

Les auteurs ont démontré que la résistivité est significativement plus faible dans la direction parallèle à l'alignement des fibres d'acier, révélant ainsi une orientation préférentielle des fibres. Cette anisotropie a été initialement mise en évidence par des mesures de spectroscopie d'impédance AC-IS, qui ont révélé une conductivité accrue dans l'axe des fibres.

Pour valider ces observations, des tests mécaniques, notamment des essais de traction par fendage et de flexion trois points, ont été réalisés. Les résultats ont montré que la résistance en traction était plus élevée dans la direction où les fibres étaient alignées, tandis que les essais de flexion ont mis en évidence une plus grande ductilité dans cette même direction.



**Figure 1. 16** Schéma des directions de mesure et des trajectoires approximatives du courant pour les directions X et Z [72].

Ces méthodes présentent des inconvénients :

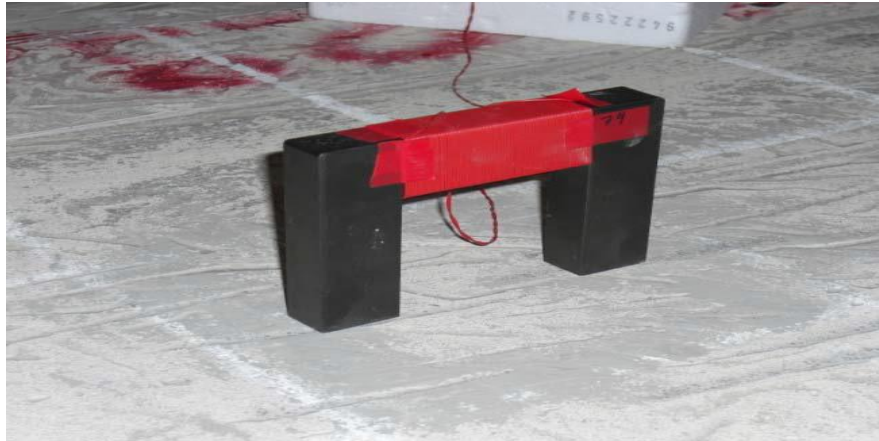
Elles nécessitent un contact direct avec le béton, ce qui limite leur application dans certaines configurations, et elles sont fortement influencées par les conditions de test, comme l'humidité et la température.

### 1. 8. 2. 3 Méthodes électromagnétiques

Ces méthodes sont basées sur l'exploitation de la variation de la réponse électrique ou magnétique du BRFA soumis à un champ magnétique variable. Cette réponse est très sensible à la teneur en fibres et à leur orientation.

Faifer et al [73], ont utilisé une bobine montée sur un noyau en ferrite en forme de C (figure 1. 17). La bobine est alimentée par un courant alternatif à fréquence de 1kHz à 5kHz, elle génère

un champ électromagnétique variable. La méthode est basée sur la mesure de l'inductance de la bobine en présence de l'échantillon (une dalle) en BRFA. La densité et l'alignement des fibres métalliques ont été évalués par les auteurs. Leurs résultats ont montré que l'inductance augmente avec la concentration des fibres et atteint un maximum lorsque le champ magnétique est aligné avec leur orientation moyenne, permettant ainsi une caractérisation non invasive et précise de leur distribution.



**Figure 1. 17** Sonde magnétique avec noyau en ferrite utilisée pour l'évaluation des propriétés magnétiques d'une dalle de BRFA [73].

Les auteurs [74] ont appliqué la méthode de réflectométrie par sonde coaxiale pour analyser la réponse électromagnétique du BRFA soumis à un champ magnétique variable. Cette technique repose sur la mesure des variations de la permittivité du matériau, influencées par la présence des fibres d'acier. Ils ont appliqué cette méthode sur des dalles de BRFA de dimensions  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  et ont réalisé les mesures dans une gamme de fréquences comprise entre 600 MHz et 2 GHz.

La sonde coaxiale à extrémité ouverte est placée avec la surface du béton (figure 1. 18), émettant un signal électromagnétique dont une partie est réfléchi en fonction des propriétés du matériau. L'analyse de cette réflexion permet d'estimer la teneur en fibres et leur répartition dans la matrice cimentaire.

La permittivité effective du BRFA varie en fonction de la quantité de fibres d'acier présentes. Une augmentation de la concentration en fibres entraîne une élévation de la permittivité effective, en raison des propriétés conductrices des fibres d'acier dans la matrice cimentaire.

Malgré les avantages de cette méthode et les bons résultats qu'elle a montrés, l'inconvénient majeur reste le coût élevé de l'appareil de mesure, en particulier l'analyseur de réseau vectoriel (VNA), ce qui limite son accessibilité pour l'évaluation du BRFA.



**Figure 1. 18:** Configuration expérimentale pour la réflectométrie par sonde coaxiale utilisée dans l'évaluation non destructive de la répartition des fibres dans le BRFA [74].

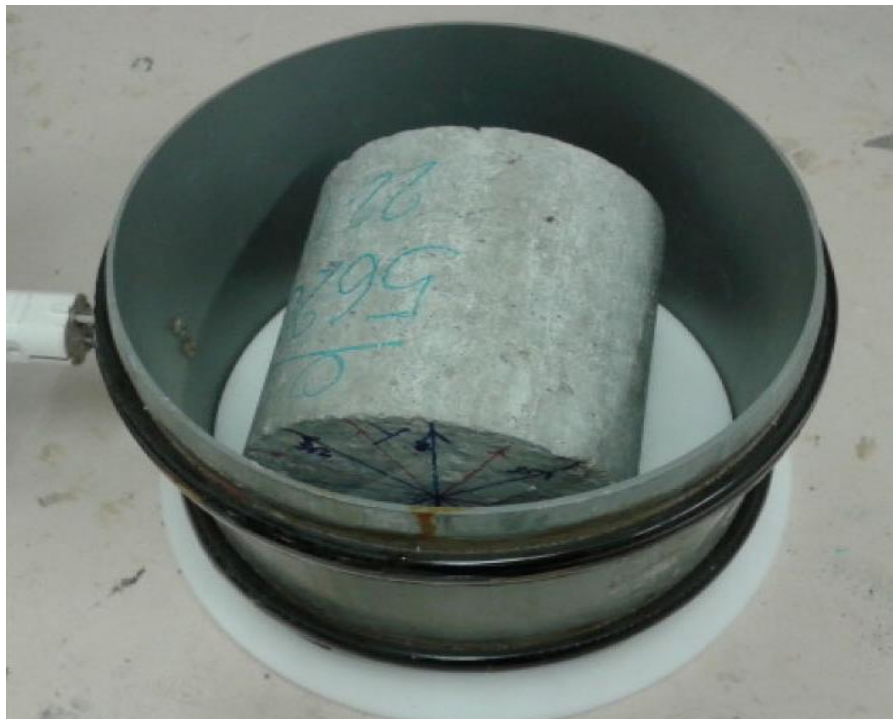
Les auteurs [75] ont appliqué une méthode inductive pour analyser la teneur et l'orientation des fibres dans le BRFA. Cette technique repose sur l'induction électromagnétique à l'aide d'une bobine circulaire (figure 1. 19) générant un champ magnétique alternatif. Lorsqu'un échantillon cylindrique est placé à l'intérieur de la bobine, la présence des fibres d'acier modifie la perméabilité magnétique du matériau, entraînant une variation mesurable de l'inductance.

Les mesures ont été réalisées dans une fréquence de 1 kHz, permettant de capturer les effets électromagnétiques des fibres conductrices sur le champ généré. Pour affiner l'évaluation, les mesures ont été effectuées en orientant différemment l'échantillon à l'intérieur de la bobine. Cette approche a permis d'enregistrer les variations d'inductance en fonction de l'angle d'orientation des fibres, révélant ainsi leur répartition et leur alignement préférentiel dans la matrice cimentaire.

L'estimation de la teneur en fibres a été réalisée en mesurant la variation d'inductance de la bobine, directement corrélée à la concentration des fibres d'acier dans le béton.

Les résultats montrent une augmentation quasi linéaire de l'inductance avec la teneur volumique en fibres : par exemple, l'inductance passe d'environ 0,730 mH pour un béton sans fibres à 0,805 mH pour un taux de 2 % en volume de fibres d'acier, soit une augmentation relative d'environ +10 %.

De plus, cette méthode a permis d'évaluer l'orientation dominante des fibres. Une augmentation plus marquée de l'inductance a été observée lorsque les fibres étaient alignées parallèlement au champ magnétique, indiquant leur direction préférentielle dans la matrice cimentaire.



**Figure 1. 19** Dispositif expérimental de la méthode inductive [75].

La méthode inductive présente plusieurs avantages par rapport aux autres techniques d'évaluation de la distribution et de l'orientation des fibres dans le BRFA. Contrairement aux méthodes destructives, elle ne nécessite pas la découpe de l'échantillon, ce qui permet de préserver son intégrité pour d'autres analyses. De plus, elle n'implique pas de contact direct, contrairement aux méthodes électriques, ce qui simplifie son application en conditions industrielles. Comparée aux méthodes d'analyse d'image, l'approche inductive est plus rapide et moins coûteuse, car elle ne dépend pas d'un équipement très onéreux.



Cependant, il est essentiel de noter que cette approche fournit une caractérisation globale du BRFA et de la distribution des fibres, sans apporter de détails locaux sur l'échantillon. Pour pallier cette limite, nous proposons dans ce travail de thèse une méthode de mesure qui permet une caractérisation locale le long de l'échantillon en BRFA. Cette méthode sera présentée dans le chapitre 4.

Pour connaître le comportement électromagnétique du BRFA en fonction de la distribution spatiale des fibres, il est essentiel d'étudier sa réponse en impédance ainsi les propriétés électromagnétiques des fibres utilisées (perméabilité magnétique et la conductivité électrique). Ces propriétés doivent être mesurées et estimées avec précision. Dans ce contexte, le chapitre suivant sera dédié à l'estimation de ces propriétés, en mettant en place une méthodologie rigoureuse pour caractériser.

## **1. 9 Conclusion**

Ce chapitre a présenté un aperçu des matériaux composites, avec un focus sur le BRFA, en soulignant l'impact des fibres d'acier sur ses propriétés mécaniques, notamment l'amélioration de la résistance, la durabilité et la dissipation d'énergie. Grâce à ces caractéristiques, le BRFA est utilisé dans diverses applications structurelles où la maîtrise de la fissuration et la longévité du matériau sont essentielles.

Cependant, la distribution des fibres joue un rôle déterminant dans les performances du BRFA. Une répartition inadéquate peut créer des zones de faiblesse et compromettre la résistance du matériau, d'où la nécessité d'une évaluation rigoureuse de leur agencement.

Nous avons ainsi exploré les méthodes d'évaluation destructives et non destructives. Les premières, bien que précises, nécessitent la découpe des échantillons et ne permettent pas d'analyses complémentaires. À l'inverse, les méthodes non destructives offrent une alternative permettant d'analyser la distribution des fibres sans altérer l'échantillon, ce qui les rend plus adaptées aux applications industrielles.

L'approfondissement des techniques électromagnétiques, et en particulier de la méthode inductive, apparaît comme une voie prometteuse. Cette approche permet une évaluation rapide, sans contact, de la teneur et de l'orientation des fibres. Cependant, cette méthode fournit une caractérisation globale sans détails locaux, ce qui nécessite le développement d'une approche complémentaire permettant une analyse locale plus précise le long de l'échantillon en BRFA.

# **Chapitre 2**

**Identification des propriétés électromagnétiques  
des fibres d'acier**



## 2. 1 Introduction

L'incorporation des fibres d'acier dans les matériaux composites améliore les performances mécaniques globales du matériau. Cependant, au-delà de leurs avantages mécaniques, les fibres d'acier se distinguent par leurs propriétés électromagnétiques spécifiques [34], qui influencent directement le comportement du composite en interaction avec un champ électromagnétique. Leur conductivité électrique et leur perméabilité magnétique modifient la manière dont le matériau réagit aux champs électromagnétiques, ce qui peut impacter les mesures de contrôle et de surveillance des structures en BRFA. Ces effets doivent être pris en compte pour garantir l'efficacité des techniques d'évaluation non destructive, notamment celles basées sur la réponse électromagnétique, qui permettent d'obtenir une caractérisation spatiale plus précise de renfort dans le BRFA.

Dans ce contexte, l'évaluation de la perméabilité magnétique et de la conductivité électrique de ces fibres est essentielle pour comprendre la réponse électromagnétique du BRFA.

Dans ce chapitre nous allons présenter une méthode d'évaluation des propriétés électromagnétique d'une fibre en acier, basée sur la technique du problème inverse.

## 2. 2 Méthodes d'évaluation des propriétés électromagnétiques

Dans le domaine de la caractérisation des matériaux magnétiques, plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la perméabilité magnétique complexe. Ces techniques, bien qu'efficaces pour certaines applications spécifiques, présentent souvent des limitations lorsqu'il s'agit de matériaux comme les fibres d'acier.

Bowler [76] a utilisé une méthode de contact pour calculer la perméabilité magnétique complexe d'une plaque en acier, en mesurant la chute de potentiel en courant alternatif à 4 points (ACPD) dans une gamme de fréquences de 10 Hz à 100 kHz. Les données mesurées sont ensuite utilisées pour obtenir la perméabilité magnétique complexe à l'aide d'un modèle analytique. Cependant, cette méthode nécessite un contact avec l'échantillon et est appliquée uniquement à des plaques de taille spécifique, ce qui la rend inapplicable aux fibres.

Okumura et al [77], ont proposé une méthode sans contact pour mesurer la perméabilité magnétique des feuilles ferromagnétiques minces en plaçant l'échantillon près d'une bobine d'excitation. Un signal alternatif basse fréquence (10 kHz – 200 kHz) est appliqué, et

l'inductance ainsi que la résistance sont mesurées. La perméabilité complexe est ensuite calculée à l'aide d'un logiciel commercial. Bien que précise pour les feuilles minces, cette approche est limitée pour des échantillons de tailles variées, notamment les fibres.

Fouladgar et al. [78] ont développé une méthode basée sur le problème inverse pour mesurer la perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques via un capteur inductif. L'échantillon est placé près d'un noyau magnétique, soumis à un champ alternatif, et l'impédance est simultanément mesurée expérimentalement et calculée à partir des équations de Maxwell. La méthode de Nelder-Mead, est ensuite appliquée pour ajuster la perméabilité magnétique. Elle fonctionne en modifiant progressivement les paramètres jusqu'à minimiser l'écart entre les valeurs mesurées et calculées.

Plusieurs chercheurs [79–81] ont étudié l'estimation de la perméabilité magnétique complexe dans les domaines de fréquences ultra-hautes. Ces fréquences élevées sont cruciales pour des applications avancées, telles que les communications et les technologies de détection. Les méthodes utilisées pour ces estimations nécessitent des dispositifs sophistiqués, capables de mesurer avec précision les variations à ces fréquences. Cependant, ces techniques restent coûteuses et complexes à mettre en œuvre.

### **2. 3 Méthode proposée pour l'évaluation des propriété électromagnétiques**

Nous proposons une méthode d'évaluation non destructive par courants de Foucault pour évaluer la perméabilité magnétique complexe des fibres d'acier utilisées dans le BRFA, en appliquant une approche basée sur le problème inverse.

Cette méthode repose sur une procédure expérimental adaptée pour les fibres d'aciers de forme cylindrique associée à un modèle mathématique. Cette procédure est basée sur un dispositif expérimental constitué d'une bobine excitée par une tension sinusoïdale à fréquence variable. D'une part l'impédance est mesurée grâce à un impédancemètre de précision, d'autre part l'impédance est calculée l'aide d'un modèle aux éléments finis dont l'un des paramètres d'entrées est la perméabilité complexe.

L'application de la technique de problème inverse dans lequel la différence entre les impédances calculées et mesurées est minimisée, permet d'évaluer la perméabilité complexe.

Pour éliminer l'effet capacitif entre les spires de la bobine, nous utilisons la variation d'impédance dans la technique de problème inverse, issue de la différence entre l'impédance mesurée avec et sans présence de la fibre.

Dans un premier temps, la conductivité électrique des fibres d'acier est déterminée à l'aide de la méthode classique à deux contacts en courant continu (DC). De ce fait il restera uniquement à déterminer la perméabilité magnétique complexe.

La procédure expérimentale consiste à placer la fibre d'acier dans une bobine solénoïdale alimentée par une tension alternative de faible amplitude, dans une gamme de fréquences de 1 kHz à 100 kHz. Les variations des parties réelle et imaginaire de l'impédance de la bobine, permettent d'identifier la perméabilité magnétique complexe.

La technique de problème inverse consiste à minimiser une fonction cout, via une méthode d'optimisation, donnée par la différence entre la variation d'impédance mesurée et celle calculée. Pour ce faire, les valeurs réelle et imaginaire de la perméabilité sont modifiées jusqu'à atteindre une tolérance prédéfinie de la fonction cout.

Les variations d'impédance de la bobine sont calculées pour chaque fréquence, en utilisant un modèle magnéto-harmonique 2D axisymétrique éléments finis sous le logiciel open source FEMM [82]. Le modèle est résolu sous python à l'aide de la bibliothèque Py-FEMM [83]. L'optimisation est réalisée à l'aide d'un algorithme simplex fourni par les bibliothèques SCIPY de python.

## **2. 4 Dispositifs de mesures expérimentales**

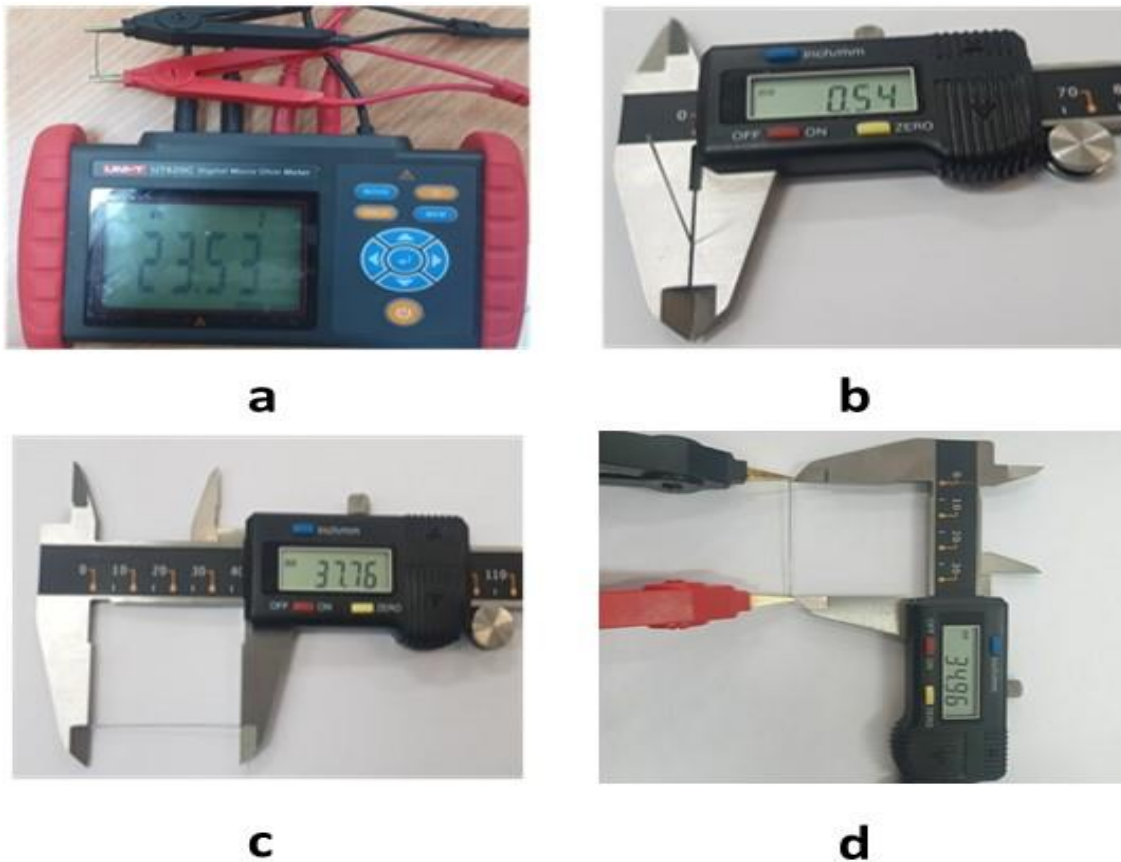
Le dispositif de mesure permet de quantifier l'effet des propriétés électromagnétiques des fibres d'acier (résistance et impédance) afin de les identifier de manière expérimentale en deux phases distinctes. La première consiste à déterminer la conductivité électrique des fibres à l'aide d'une méthode directe, basée sur la mesure de leur résistance. La seconde phase est dédiée à l'évaluation de leur perméabilité magnétique, en analysant la variation d'impédance de la bobine avec et sans la présence de la fibre.

### 2. 4. 1 Mesure de la conductivité électrique

La conductivité électrique de la fibre d'acier, notée  $\sigma_{fib}$  [S/m] est déterminée à partir de la mesure de la résistance électrique à l'aide d'un microohm-mètre de précision et des dimensions géométriques de la fibre à l'aide d'un pied à coulis en appliquant la relation ci-dessous :

$$\sigma_{fib} = \frac{L_{fib} A}{R_{fib} * A_{fib}}$$

Avec :



**Figure 2. 1** Résistance électrique en courant continu et dimensions géométriques de la fibre d'acier.

(a) Résistance de la fibre d'acier. (b) Diamètre de la fibre d'acier.

(c) Longueur totale de la fibre d'acier. (d) Longueur active de la fibre d'acier.

- $R_{fib}$ : Résistance de la fibre d'acier [Ohm], mesurée à l'aide d'un micro-ohmmètre numérique de précision (figure 2. 1(a)).

- $A_{fib}$ : Aire de la section transversale de la fibre d'acier [ $m^2$ ], calculée comme suit :

$$A_{fib} = \pi \left( \frac{D_{fib}}{2} \right)^2$$

- $D_{fib}$  : Diamètre de la fibre d'acier [m], mesuré avec un pied à coulisse numérique de précision (figure 2. 1(b)).
- $L_{fib}$  : la longueur totale de fibre d'acier [m], mesuré avec un pied à coulisse (figure 2. 1(c)). Représente la longueur réelle de la fibre que l'on souhaite caractériser.
- $L_{fibA}$ : Distance entre les deux points de contact [m], représentant la longueur active de la fibre d'acier (figure 2. 1(d)). Cette longueur représente la portion précise de la fibre où le courant circule pendant l'expérience. Elle est essentielle pour le calcul de la conductivité électrique  $\sigma_{fib}$ , car elle détermine la distance sur laquelle la résistance est mesurée.

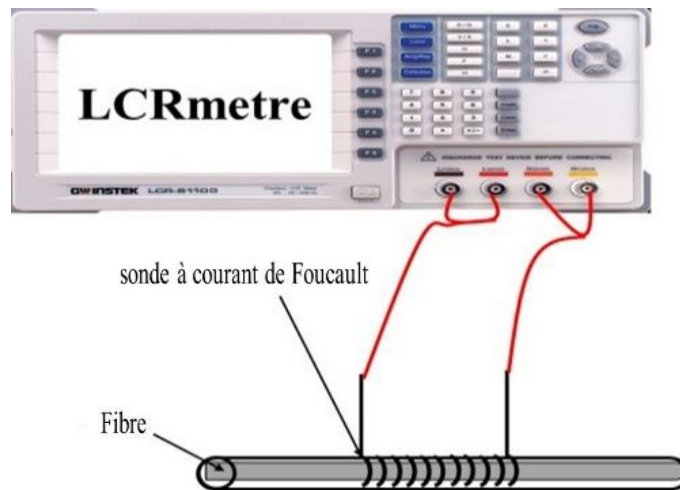
Les résultats des mesures sont présentés dans le Tableau 2. 1, qui regroupe les valeurs de la résistance, du diamètre, de la longueur et de la conductivité électrique de fibre d'acier.

**Tableau 2. 1** Mesure de la conductivité électrique.

$R_{fib} (m\Omega)$	$A_{fib}(mm)$	$L_{fib}(mm)$	$L_{Afib}(mm)$	$\sigma_{fib} (MS/m)$
23.53	0.54	37.76	34.96	6.487

### 2. 4. 2 Mesure de l'impédance

Le dispositif expérimental réalisé pour la mesure de l'impédance des fibres (figure 2. 2) est composé de :



**Figure 2. 2** Mesure de l'impédance — Dispositif expérimental.

- **Sonde à courants de Foucault (SCF)** : Adaptée aux dimensions de la fibre d'acier, elle est constituée d'un gabarit cylindrique en PVC autour duquel est bobinée avec  $N_t$  spires, permettant une insertion facile de la fibre. La sonde peut être modifiée pour s'adapter à différentes tailles de fibres, ses caractéristiques sont données dans le Tableau 2. 2.

**Tableau 2. 2** Dimensions de la sonde à courants de Foucault.

Diamètre du cuivre ( $D_{cu}$ )	0.25mm
Diamètre intérieur de la sonde ( $D_{in}$ )	3mm
Longueur de la sonde ( $L_s$ )	15.4mm
Diamètre extérieure de la sonde ( $D_{ex}$ )	3.5mm
Nombre de spires de la sonde ( $N_t$ )	50

- **Fibre d'acier utilisée dans le béton** : la fibre présente initialement une forme ondulée (figure 2. 3(a)). Elle est transformée en une forme droite (figure 2. 3(b)) pour faciliter son insertion dans la sonde et assurer des mesures précises.



(a) Fibre d'acier avec extrémité crochetée.

(b) Fibre d'acier avec extrémité droite.

**Figure 2. 3** Redressement de la fibre d'acier.

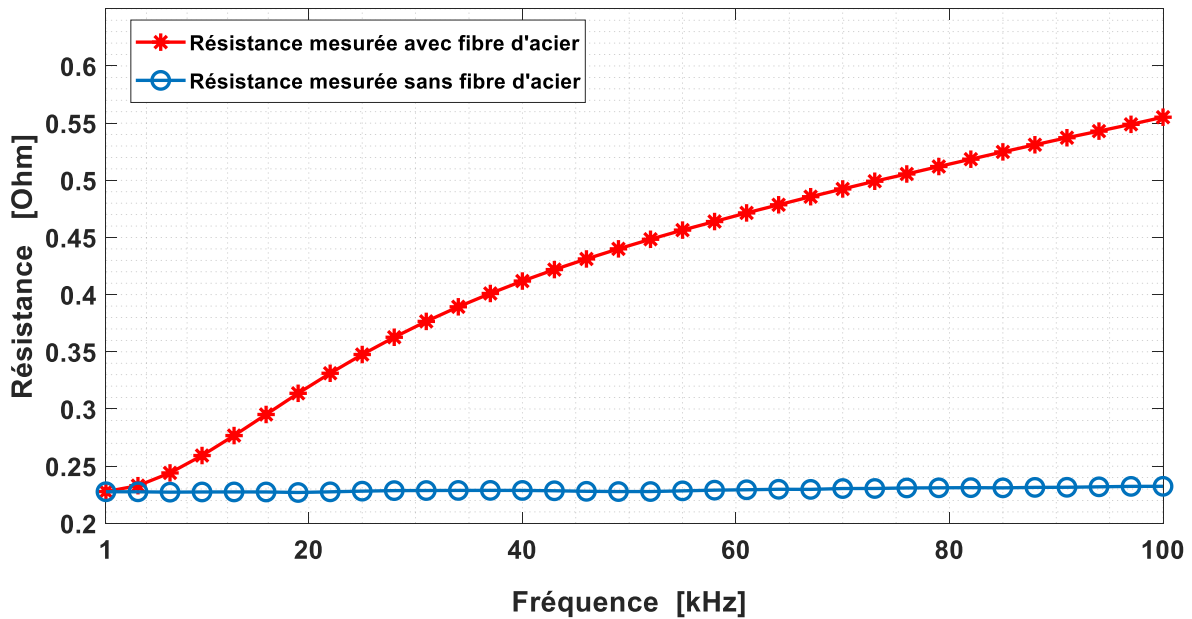
- **LCR-mètre** : de type GW INSTEK LCR-8105G utilisé pour mesurer de haute précision, l'impédance complexe d'échantillon test sur une plage de fréquences allant de 20 Hz à 5 MHz sous une tension alternative contrôlée, réglable de 0,01 V à 2 V pour les fréquences inférieures de 3MHz. Cet instrument peut être piloté par un logiciel dédié sur ordinateur, permettant l'acquisition et l'enregistrement des données.

Le processus de mesure est réalisé en deux étapes principales : le calibrage et la mesure. Le calibrage est effectué avant chaque mesures afin de compenser les erreurs systématiques liées aux câbles, connecteurs et à la sonde. Ce calibrage s'effectue en utilisant des références standards : court-circuit, circuit ouvert. Une fois le calibrage réalisée, l'échantillon est placé aux bornes du LCR-mètre et la mesure de l'impédance est effectuée à chaque fréquence pour une gamme de fréquence donnée.

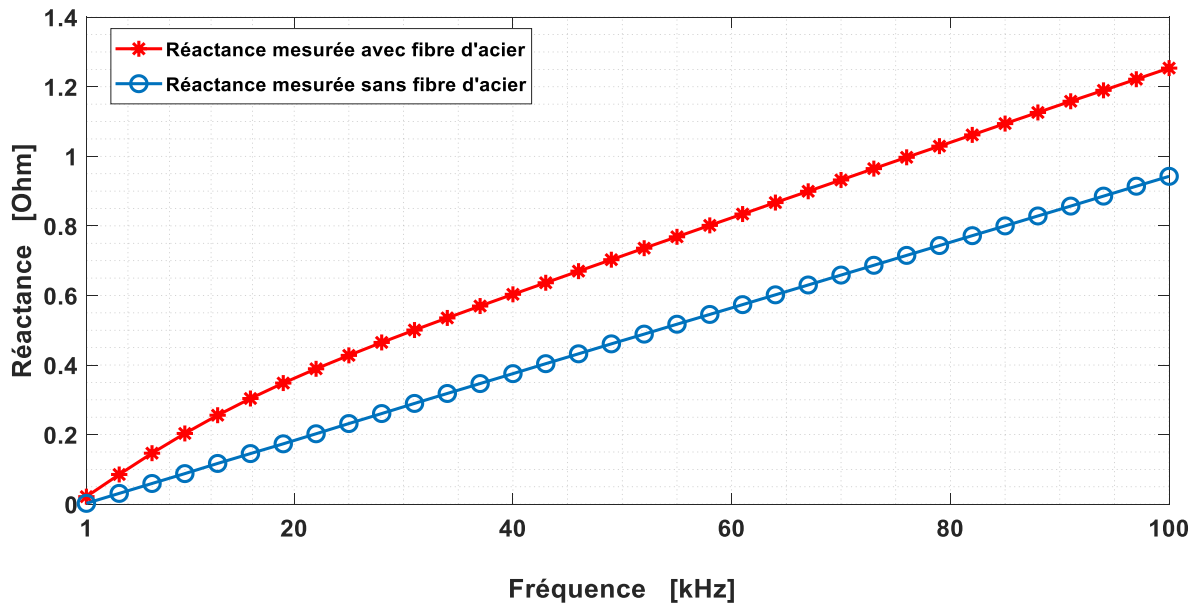
La mesure de l'impédance de l'échantillon de test, placé dans la sonde à courants de Foucault (figure 2. 2), est réalisée à l'aide du LCR-mètre. Ce dernier alimente la bobine avec une tension sinusoïdale de faible amplitude, fixée à 1V, pour chaque fréquence allant de 1kHz à 100kHz. Cette mesure est effectuée successivement avec et sans la fibre d'acier, afin de déterminer la variation d'impédance induite par la présence de la fibre.

La Figure 2. 4 présente l'évolution de la résistance mesurée en fonction de la fréquence, comparant les cas avec et sans fibre d'acier. On observe que la résistance mesurée augmente avec la fréquence lorsque la fibre est présente, indiquant une influence significative des fibres d'acier sur la réponse électrique du matériau composite. En revanche, sans la fibre, la résistance reste relativement constante. Cette augmentation de la résistance mesurée avec la fréquence, en présence de fibres d'acier, s'explique par le fait que les courants induits deviennent

progressivement plus significatifs. Cela accentue les pertes magnétiques dans les fibres conductrices, ce qui se traduit par une élévation de la résistance.



**Figure 2. 4** Résistance mesurée avec et sans fibre d'acier en fonction de la fréquence.

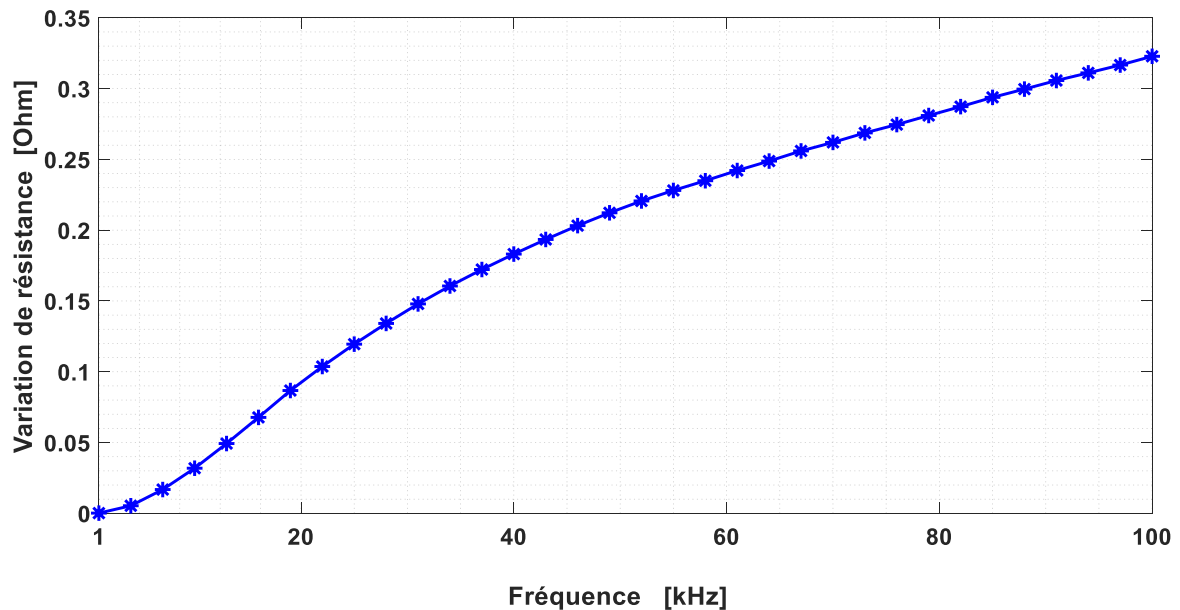


**Figure 2. 5** Réactance mesurée avec et sans fibre d'acier en fonction de la fréquence.

La Figure 2. 5 présente l'évolution de la réactance mesurée en fonction de la fréquence, comparant les cas avec et sans fibre d'acier. On observe que la réactance augmente avec la fréquence en présence de fibres d'acier. En revanche, sans fibre d'acier, la réactance suit



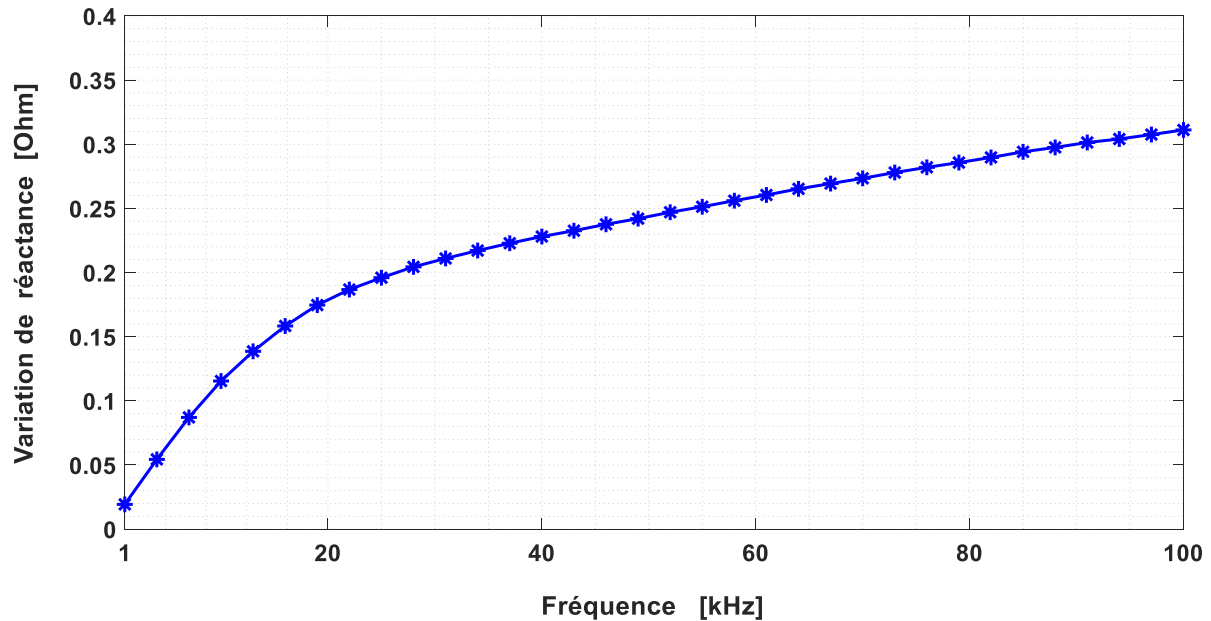
également une tendance croissante, contrairement à la résistance qui reste relativement constante à des valeurs faibles.



**Figure 2. 6** Variation de la résistance mesurée en fonction de la fréquence.

La Figure 2. 6 présente la variation de la résistance en fonction de la fréquence. Cette variation correspond à la différence entre la résistance mesurée du SCF avec fibre d'acier et celle sans fibre d'acier. On observe que cette différence augmente progressivement avec la fréquence. Ces valeurs mesurées seront utilisées pour l'identification de la perméabilité magnétique complexe.

La Figure 2. 7 présente la variation de la réactance en fonction de la fréquence. Cette variation correspond à la différence entre la réactance mesurée du SCF avec fibre d'acier et celle sans fibre d'acier. On observe que cette différence augmente également progressivement avec la fréquence. Ces valeurs mesurées seront utilisées par la suite pour l'identification de la perméabilité magnétique complexe.



**Figure 2. 7** Variation de la réactance mesurée en fonction de la fréquence.

## 2. 5 calcul de l'impédance

La fibre d'acier cylindrique est placée dans l'axe de symétrie de la sonde à courants de Foucault. Cette configuration permet d'étudier l'interaction électromagnétique entre la fibre et le champ généré par la bobine.

Pour calculer la variation de l'impédance de la SCF, il est nécessaire d'utiliser un modèle mathématique qui prend en charge le système à courants de Foucault, incluant une fibre d'acier. Cette modélisation repose sur les équations fondamentales de Maxwell qui décrivent les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur et l'extérieur des matériaux conducteurs [5].

Dans notre cas les courants dans la bobine solénoïdale et dans la fibre cylindrique décrivent un parcours circulaire, de même pour le potentiel vecteur magnétique. Comme nous avons une symétrie géométrique accompagnée des grandeurs, le système bobine-fibre est considéré axisymétrique. Le modèle est formulé avec les équations de la magnétodynamique en régime quasi-stationnaire ou les courants de déplacement sont négligés [84].

La figure 2. 8 illustre la représentation 2D axisymétrique adoptée pour la modélisation du système bobine -fibre. Les conditions aux limites imposées sont de type Dirichlet  $A'=0$  sur la frontière externe du domaine.

Cette approche permet de réduire la complexité du problème tout en conservant les phénomènes physiques essentiels en 3D. L'analyse est effectuée en régime harmonique, où les champs électromagnétiques varient selon une fréquence imposée.

La formulation mathématique du problème étudié est décrite par une équation aux dérivées partielles, exprimée en coordonnées cylindriques, et formulée en fonction du potentiel vecteur magnétique modifié  $A'$ .

L'équation magnétodynamique régissant le comportement électromagnétique du système est donnée par la formule suivante :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\bar{\mu}} \frac{\partial A'}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r\bar{\mu}} \frac{\partial A'}{\partial z} \right) + j \frac{\sigma_{fib}\omega}{r} A' = J_s$$

Avec :

- $A'$  : le potentiel vecteur magnétique modifié, exprimé en coordonnées cylindriques  $A'(0, A_\varphi, 0)$ . Avec  $A' = rA_\varphi$ . Cette forme modifiée permet de simplifier l'équation différentielle en tenant compte de la symétrie axiale du problème et facilite la résolution numérique dans les systèmes axisymétriques.
- $\bar{\mu}$  : la perméabilité magnétique complexe de la fibre d'acier.
- $J_s$  : la densité de courant source.
- $\sigma_{fib}$  : la conductivité électrique de la fibre.
- $A_\varphi$  : la coordonnée azimutale cylindrique du potentiel vecteur magnétique.

La résolution du potentiel vecteur magnétique modifié  $A'$  est effectuée numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM), via le logiciel FEMM. Cette approche permet de calculer la distribution de  $A'$  dans un domaine axisymétrique

L'objectif de cette modélisation est d'estimer, à partir de  $A'$ , les variations de réactance et de résistance induites par la présence de la fibre

En régime harmonique, la tension induite  $E$  dans un enroulement de  $N$  spires est donnée par :

$$E = -j\omega N_t \Phi$$

où  $\Phi$  est le flux magnétique traversant la bobine.

$$\Phi = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = A_\varphi \cdot 2\pi r \Rightarrow E = -j\omega N_t \cdot 2\pi r A_\varphi = -j\omega N_t \cdot 2\pi A'$$

On généralise à la moyenne spatiale sur la zone de mesure :

$$E = -j\omega N_t \cdot 2\pi (\text{moyenne } A')$$

En régime harmonique :

$$Z = (\delta R + jX) \cdot I$$

On identifie :

$$Z = \frac{E}{I_s} = -j\omega N_t \cdot \frac{2\pi (\text{moyenne } (A'))}{I_s}$$

Donc les composantes sont :

$$\delta R_{\text{cal}} = \text{Re}(Z) = -2\pi\omega N_t \cdot \frac{\text{Im} (\text{moyenne } (A'))}{I_s}$$

$$X_{\text{cal}} = \text{Im}(Z) = 2\pi\omega N_t \cdot \frac{\text{Re} (\text{moyenne } (A'))}{I_s}$$

Avec :

$\delta R_{\text{cal}}$  : la variation de résistance calculée.

$X_{\text{cal}}$  : la réactance calculée.

$N_t$  : Nombre de spires de la sonde à courants de Foucault.

$\omega$  : Pulsation électrique.

$\text{Re}(\text{moyenne}(A'))$ : le moyenne de la partie réelle du potentiel magnétique  $A'$ .

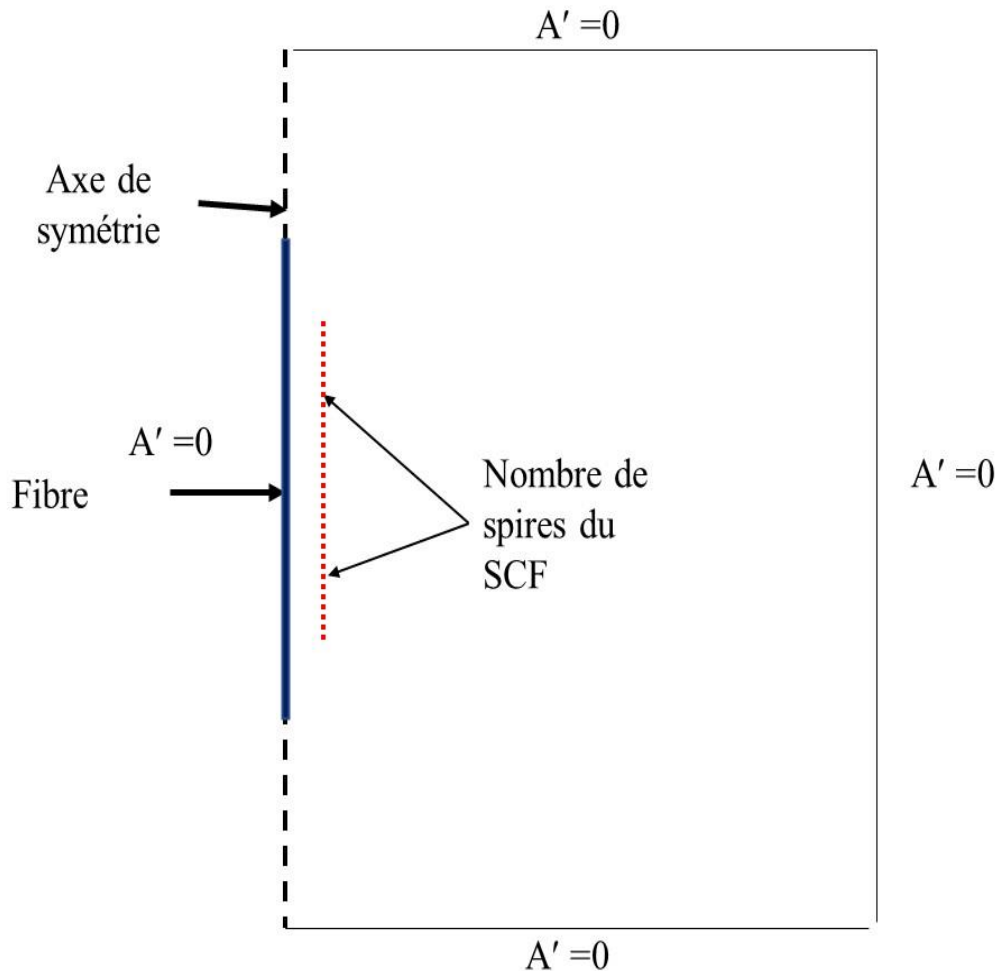
$\text{Im}(\text{moyenne } (A'))$ : le moyenne de la partie imaginaire du potentiel magnétique  $A'$ .

$I_s$  : courant d'excitation injecté.

Afin d'obtenir la variation de réactance induite par la fibre  $\delta X_{\text{cal}}$ , deux calculs distincts sont réalisés :

Dans un premier temps, on calcule la réactance du capteur avec la fibre insérée, puis, on calcule

la réactance de la bobine seule, La variation de réactance induite par la fibre est alors obtenue par la différence.



**Figure 2. 8** Géométrie du problème résolu.

## 2. 6 Méthode du problème inverse pour l'identification de la perméabilité magnétique

Contrairement au modèle direct, où les sorties (telles que l'impédance) sont calculées à partir des entrées connues, le modèle inverse repose sur une approche opposée : il vise à identifier les paramètres du système en minimisant l'écart entre les valeurs mesurées expérimentalement et celles obtenues par le modèle direct. Dans notre cas, le modèle direct permet de calculer les variations de résistance et de réactance à partir des propriétés électromagnétiques du matériau.

Les entrées du modèle sont la perméabilité magnétique complexe et la conductivité électrique, cette dernière étant déjà identifiée.

Pour déterminer la perméabilité magnétique complexe des fibres d'acier à partir des données expérimentales, une méthode de résolution de problème inverse [78,85,86] utilisant l'algorithme d'optimisation du simplexe est appliquée (Figure 2. 9) [87].

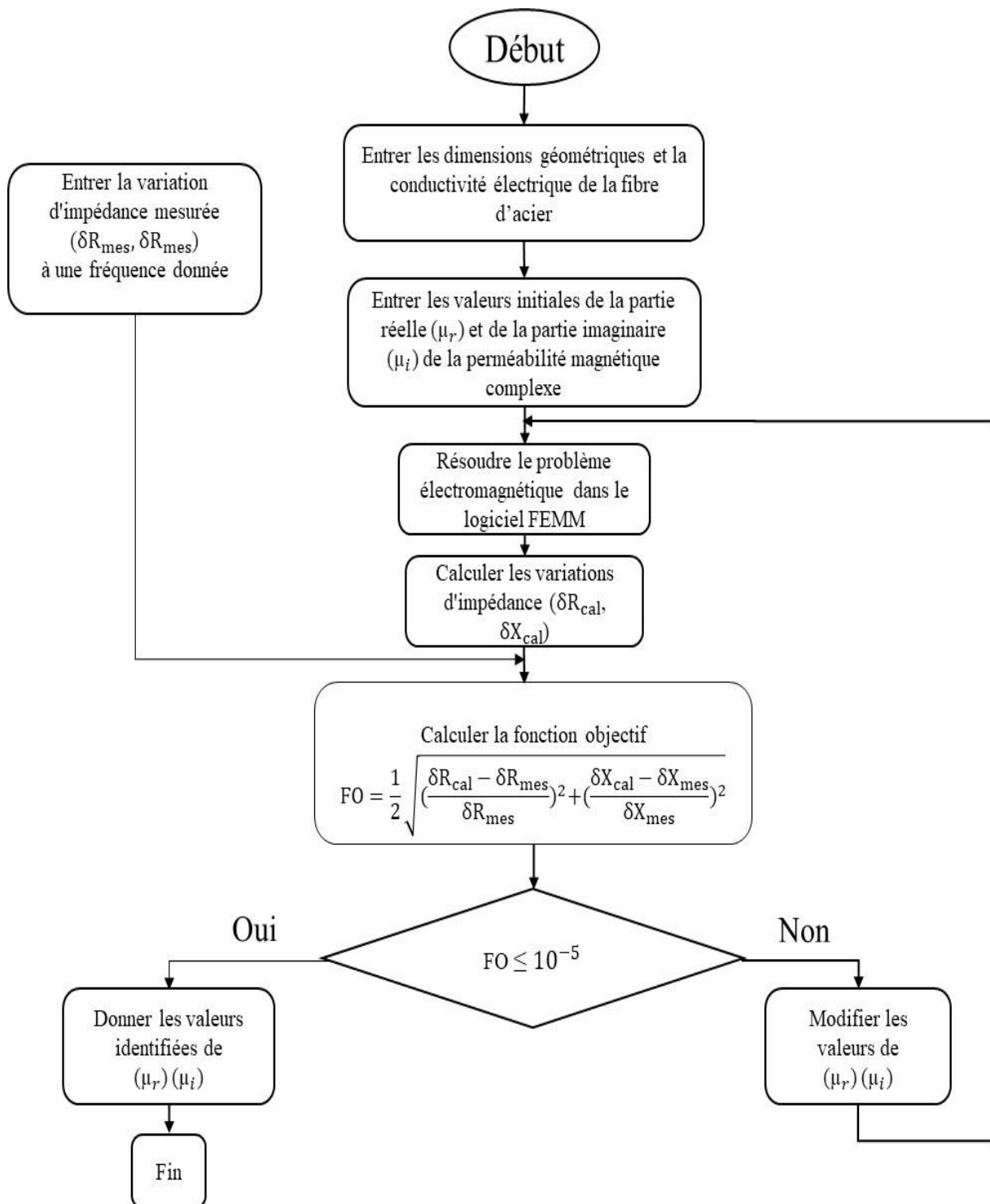
Dans un premier temps, la résistance et la réactance de l'échantillon sont mesurées à une fréquence donnée, ensuite, le modèle élément Finis (EF) est résolu après l'introduction des dimensions géométriques de l'échantillon, de sa conductivité électrique et des valeurs initiales de sa perméabilité magnétique complexe (parties réelle et imaginaire). La solution obtenue est exploitée pour calculer les variations de résistance et de réactance de l'échantillon.

La fonction objectif qui représente la différence entre les variations de la résistance et la réactance calculées et mesurées est évaluée. Si cette différence dépasse la tolérance imposée ( $10^{-5}$ ) les valeurs des parties réelle et imaginaire de la perméabilité magnétique complexe sont modifiées, puis la résistance et la réactance sont recalculées par le modèle EF. Ce processus est répété de manière itérative jusqu'à ce que la différence devienne inférieure à la tolérance grâce à la méthode d'optimisation du simplexe.

Pour la première fréquence de 1 kHz, les valeurs initiales des parties réelle et imaginaire de la perméabilité relative sont respectivement fixées à 1 et 0.1. Après le processus d'identification, les valeurs de la perméabilité magnétique complexe obtenues à 1 kHz sont utilisées comme valeurs initiales pour la fréquence suivante (2 kHz), ainsi de suite pour les fréquences suivantes jusqu'à 100 kHz.

La fonction objectif (OF) est donnée par :

$$OF = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\delta R_{mes} - \delta R_{cal}}{\delta R_{mes}}\right)^2 + \left(\frac{\delta X_{mes} - \delta X_{cal}}{\delta X_{cal}}\right)^2}$$



**Figure 2. 9** Organigramme de l'algorithme d'inversion.

Où :

$\delta R_{mes}$  : variation de résistance du capteur à courants de Foucault (CCF) obtenue à partir de la différence entre les résistances mesurées (LCR-mètre) avec et sans la présence de la fibre d'acier.

$\delta R_{cal}$  : variation de résistance du capteur obtenue à partir de la différence entre les résistances calculées (modèle FEMM) avec et sans la présence de la fibre d'acier.

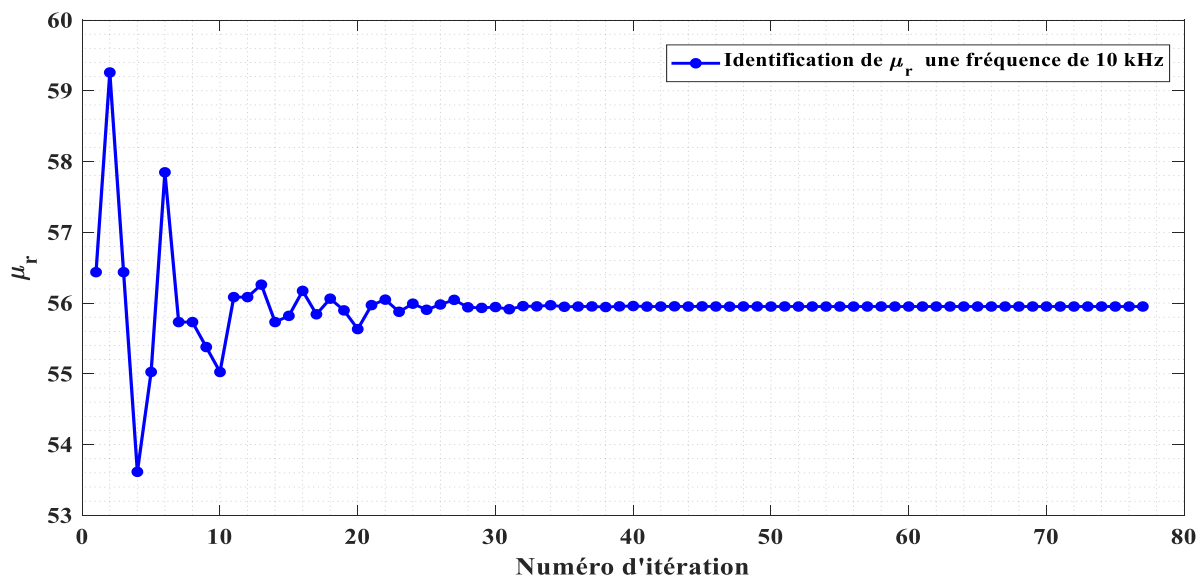
$\delta X_{mes}$  : variation de réactance obtenue à partir de la différence entre les réactances mesurées (LCR-mètre) avec et sans la présence de la fibre d'acier.

$\delta X_{cal}$  : variation de réactance obtenue à partir de la différence entre les réactances calculées (modèle FEMM) avec et sans la présence de la fibre d'acier.

La méthode d'inversion est implémentée sous Python, en utilisant :

- Le modèle éléments finis 2D axisymétrique sous FEMM pour calculer la variation de résistance et de réactance en résolvant l'équation magnétodynamique.
- Les fonctions d'optimisation de la bibliothèque SciPy de PYTHON pour utiliser la méthode du Simplexe pour minimiser l'écart entre l'impédance mesurée et celle estimée.

Les Figures 2. 10, 2. 11 et 2. 12 illustrent le processus de convergence de la méthode d'optimisation du simplexe pour l'identification des valeurs de perméabilité magnétique complexe à 10 kHz



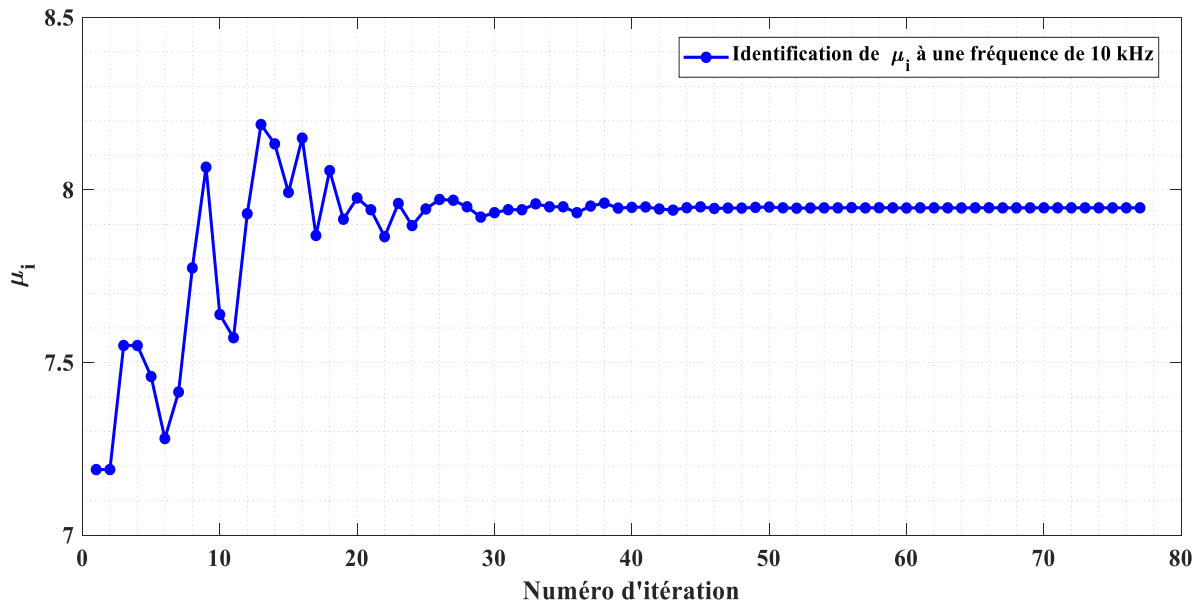
**Figure 2. 10** Évolution de la partie réelle de la perméabilité magnétique complexe ( $\mu_r$ ) au cours des itérations à une fréquence de 10 kHz.

Comme illustré dans la Figure 2. 10, l'évolution de la partie réelle de la perméabilité magnétique complexe ( $\mu_r$ ) met en évidence le processus d'identification basé sur la méthode du problème inverse. Au départ, la valeur de  $\mu_r$  subit d'importantes fluctuations en raison des itérations



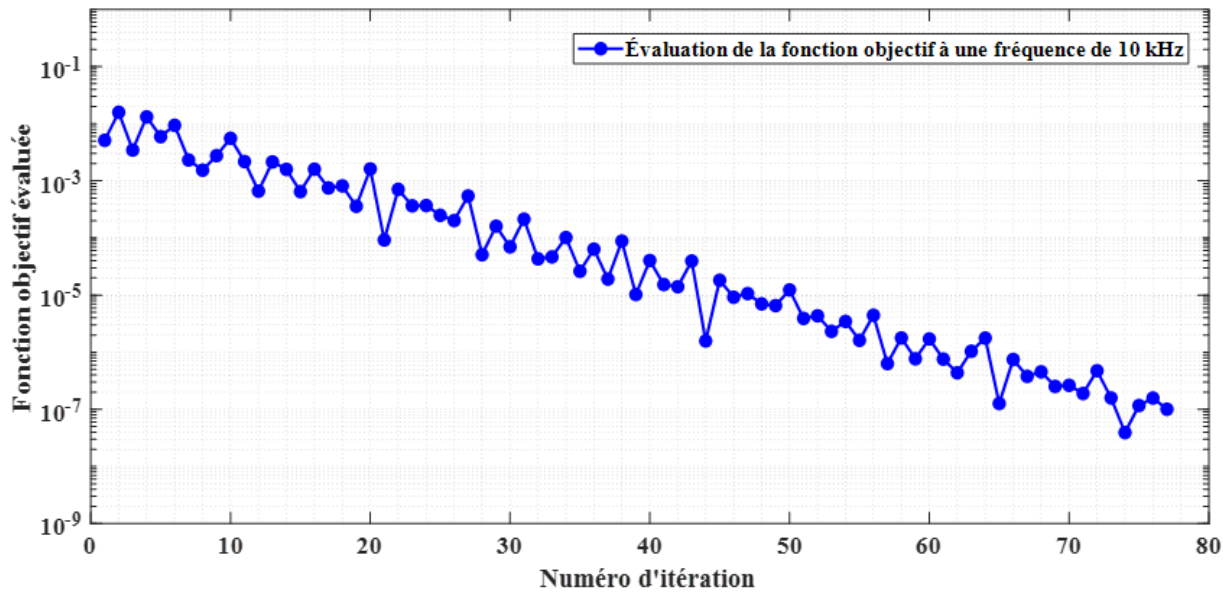
successives de l'algorithme d'optimisation. Progressivement, la fonction objectif guide la convergence vers une valeur stable d'environ 56.

La Figure 2. 11 montre l'évolution de la partie imaginaire de la perméabilité magnétique complexe ( $\mu_i$ ), qui suit un schéma similaire à celui de la partie réelle. Les premières itérations sont marquées par des fluctuations importantes, reflétant les ajustements progressifs effectués par l'algorithme d'optimisation. La valeur de  $\mu_i$  converge progressivement vers une stabilité autour de 7.9.



**Figure 2. 11** Évolution de la partie imaginaire de la perméabilité magnétique complexe ( $\mu_i$ ) au cours des itérations à une fréquence de 10 kHz.

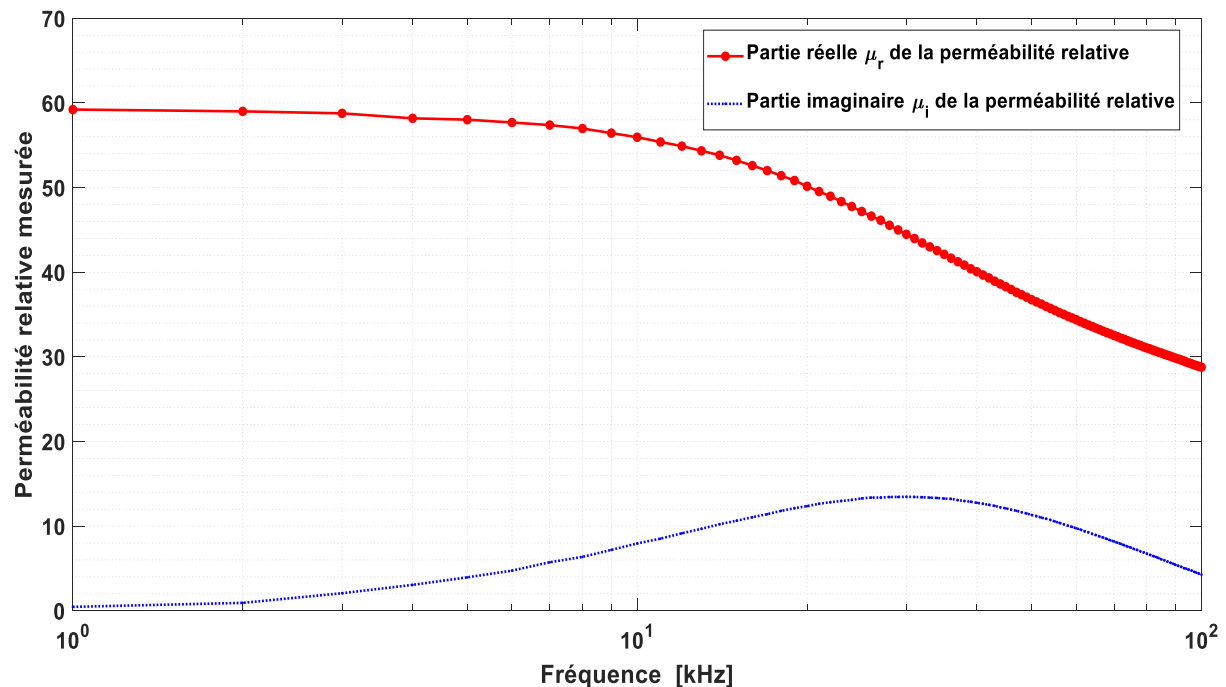
La Figure 2. 12 illustre l'évolution de la fonction objectif au cours des itérations. On observe une diminution progressive de cette fonction, témoignant de l'amélioration des paramètres identifiés par l'algorithme d'optimisation. Après environ 50 itérations, la fonction objectif atteint une valeur inférieure au seuil de tolérance fixé de  $10^{-5}$ .



**Figure 2. 12** Évolution de la fonction objectif au cours des itérations

## 2. 7 Résultats et discussion

La Figure 2. 13 présente la perméabilité magnétique complexe identifiée de la fibre d'acier en fonction de la fréquence. Cette courbe met en évidence l'évolution des parties réelle et imaginaire de la perméabilité relative sur la plage de fréquences étudiée.



**Figure 2. 13** Perméabilité magnétique relative en fonction de la fréquence.

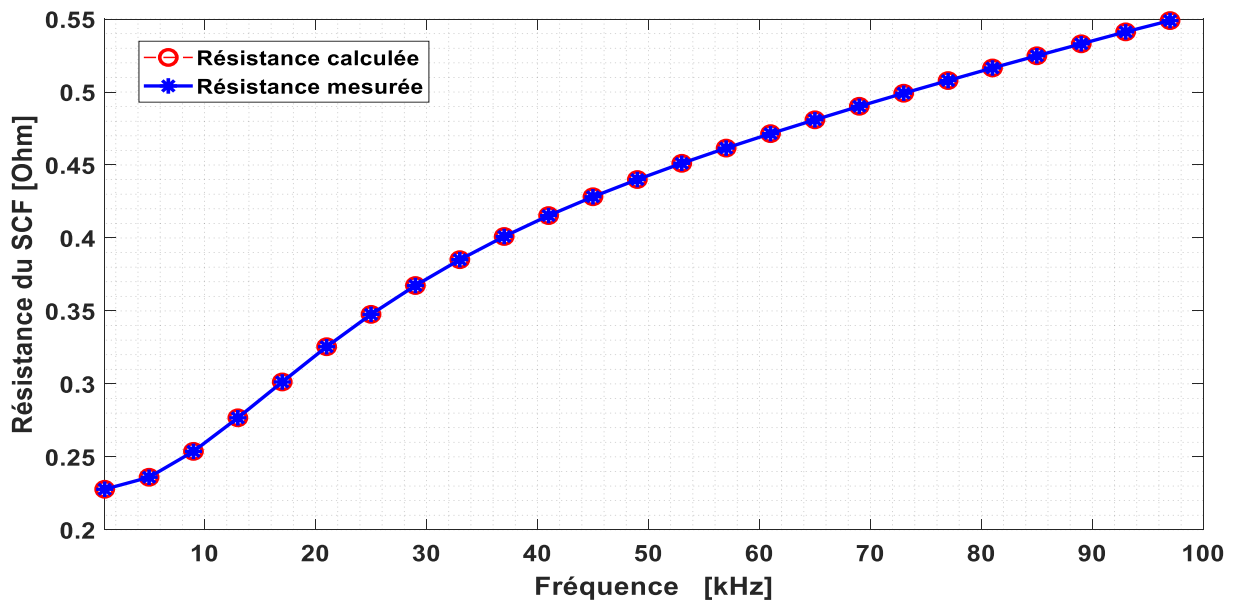
On observe que la partie réelle de la perméabilité magnétique relative ( $\mu_r$ ) reste initialement stable autour de 60 aux basses fréquences, puis diminue progressivement pour atteindre environ

29 à 100 kHz. Parallèlement, la partie imaginaire ( $\mu_i$ ) suit une évolution en forme de cloche : 0.46 à 1 kHz, elle augmente jusqu'à un maximum d'environ 12 vers 30 kHz avant de redescendre à environ 5 à 100 kHz. Cette tendance en cloche traduit l'évolution des pertes magnétiques : faibles aux basses fréquences elles augmentent jusqu'à un certain seuil avant de diminuer lorsque les moments magnétiques ne peuvent plus suivre le champ appliqué.

Les allures obtenues de perméabilité complexe obtenue montrent une bonne cohérence avec les études antérieures ayant travaillé sur différents types d'acier [77, 88, 89].

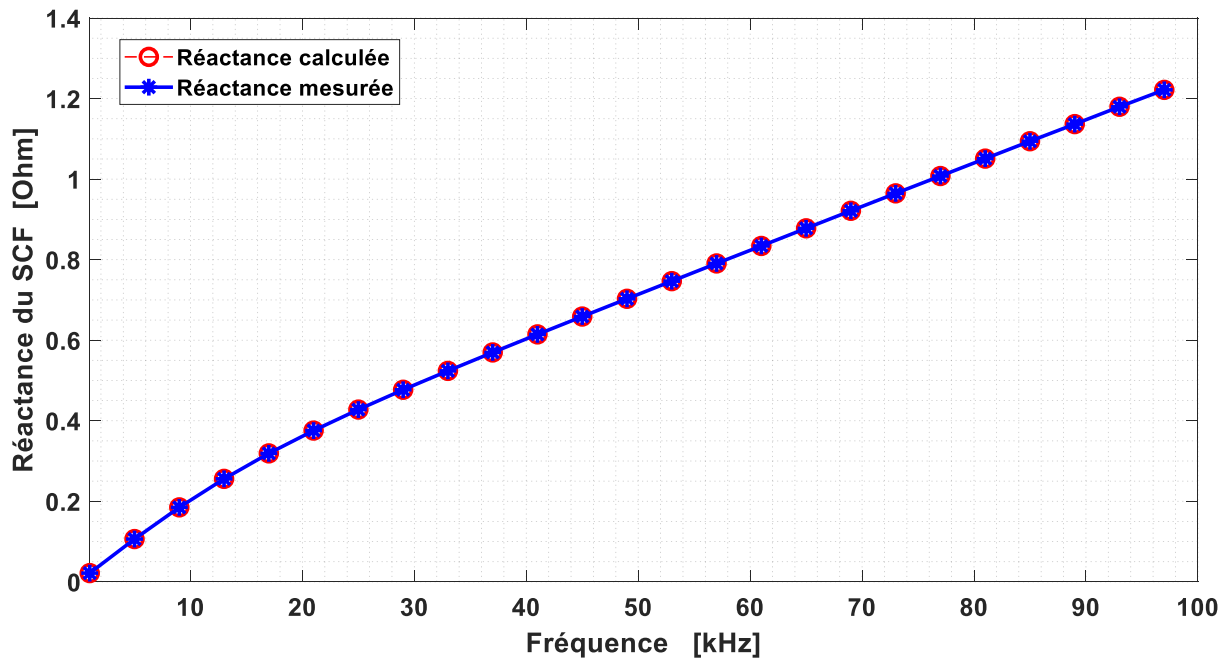
Pour valider la méthode proposée, les valeurs identifiées de la perméabilité magnétique complexe sont réintroduites dans le modèle direct afin de recalculer l'impédance pour les fréquences 1KHz-100kHz.

Comme illustré par la Figure 2. 14, les valeurs de la résistance calculée sont en excellent accord avec les mesures expérimentales sur toute la plage de fréquences, de 1 kHz à 100 kHz.



**Figure 2. 14** Résistance mesurée et calculée du SCF en fonction de la fréquence.

Les valeurs de la réactance obtenues par calcul coïncident également parfaitement avec les mesures expérimentales sur toute la plage de fréquences, de 1 kHz à 100 kHz, comme illustré par la Figure 2. 15.

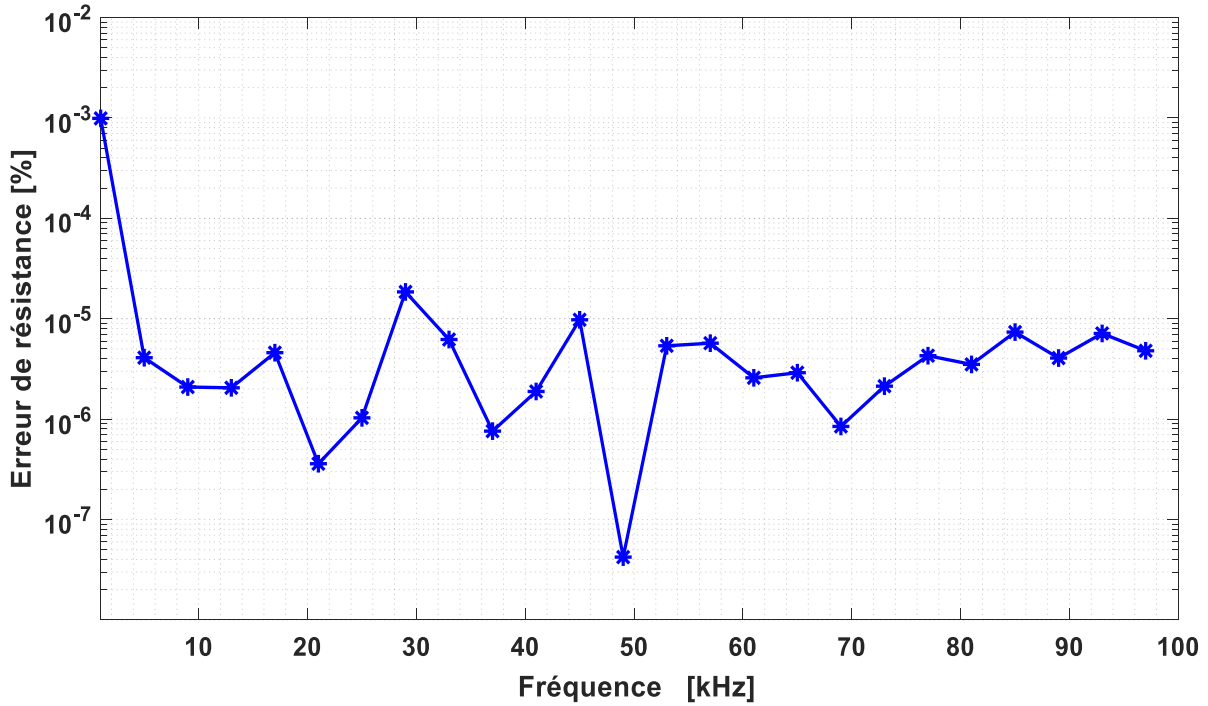


**Figure 2. 15** Réactance mesurée et calculée du SCF en fonction de la fréquence.

L'erreur moyenne sur la résistance et la réactance reste inférieure à  $10^{-3}\%$ , avec une précision atteignant  $10^{-5}\%$  en moyenne, confirmant ainsi la fiabilité de la méthode d'identification employée.

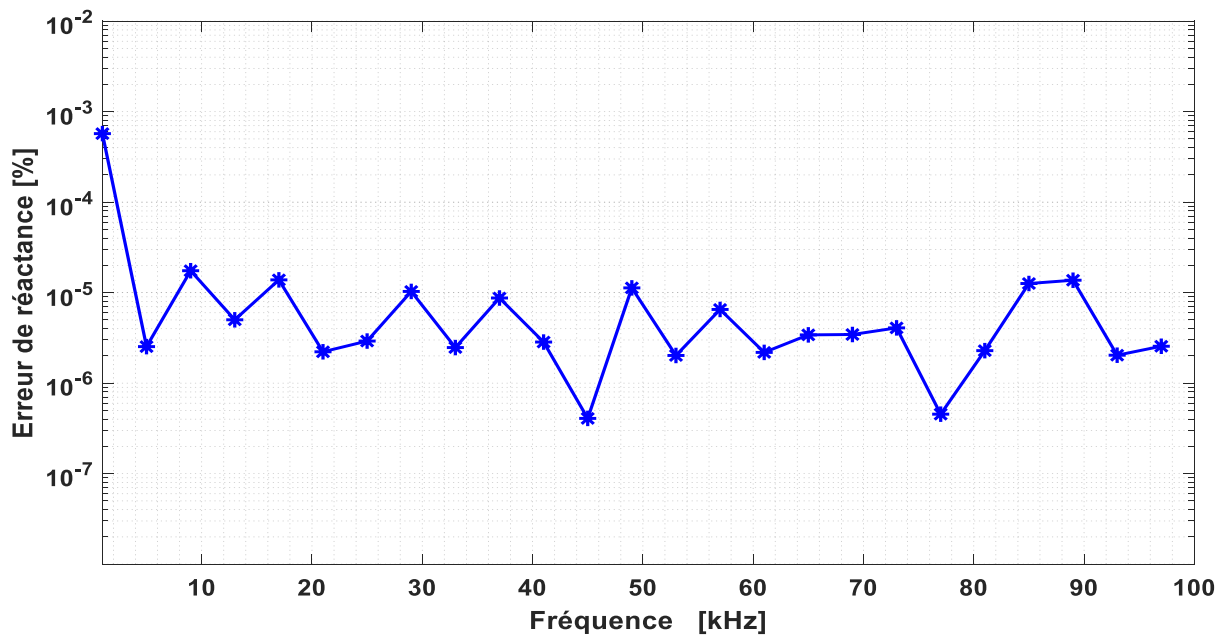
Afin de quantifier plus précisément l'écart entre les valeurs mesurées et calculées, l'erreur relative a été calculée et tracée en fonction de la fréquence, comme le montre la Figure 2. 14 pour la résistance et la Figure 2. 15 pour la réactance.

Comme illustré par la Figure 2. 16, l'erreur relative de la résistance demeure très faible sur toute la plage de fréquences, de 1 kHz à 100 kHz, confirmant la fiabilité des valeurs calculées. Cela met en évidence la précision de la méthode proposée, où les valeurs identifiées de la perméabilité magnétique complexe sont réintroduites dans le modèle direct pour recalculer l'impédance sur l'intervalle de fréquences considéré



**Figure 2. 16** Erreur relative de la résistance en fonction de la fréquence.

L'erreur relative de la réactance demeure également très faible sur toute la plage de fréquences, de 1 kHz à 100 kHz, comme illustré par la Figure 2. 17, mettant ainsi en évidence la précision de la méthode proposée.



**Figure 2. 17** Erreur relative de la réactance en fonction de la fréquence.

Les valeurs des propriétés électromagnétiques des fibres d'acier identifiées permettront d'améliorer la modélisation des matériaux composites et d'optimiser les méthodes de caractérisation électromagnétique. Ces résultats contribueront également au développement de techniques avancées de contrôle non destructif, en facilitant l'adaptation des capteurs inductifs et des modèles numériques pour l'évaluation des structures en béton renforcées en fibres d'acier.

## **2. 8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une approche expérimentale et numérique pour l'identification de la perméabilité magnétique complexe et de la conductivité électrique des fibres d'acier utilisées dans les matériaux composites. Cette méthodologie repose sur la mesure de l'impédance d'un capteur à courants de Foucault et la résolution d'un problème inverse en utilisant un logiciel open source Python, garantissant une accessibilité à l'ensemble des chercheurs.

Les résultats obtenus montrent une excellente correspondance entre les impédances mesurées et simulées, confirmant ainsi la fiabilité et la précision des valeurs identifiées. Ces propriétés électromagnétiques des fibres d'acier constituent une base essentielle pour affiner la modélisation des matériaux composites renforcés d'acier, améliorer les méthodes de contrôle non destructif, et optimiser la conception des capteurs électromagnétiques dédiés à leur caractérisation et à l'évaluation des structures en béton fibre d'acier.

# Chapitre 3

## **Impact spatial des fibres d'acier sur la réponse du capteur à courants de Foucault**

### 3.1 Introduction

L'évaluation de la distribution des fibres d'acier dans les matériaux composites est un facteur important pour optimiser leurs propriétés mécaniques. Parmi les méthodes non destructives, les techniques inductives basées sur les courants de Foucault se sont révélées particulièrement efficaces pour évaluer et analyser la répartition des fibres dans un espace ou échantillon donné.

De nombreux chercheurs ont démontré [72-73] que la distribution, le dosage et l'orientation des fibres influencent directement les propriétés électromagnétiques des composites. En particulier :

- L'augmentation du dosage des fibres modifie la conductivité électrique et la perméabilité magnétique globale, entraînant une variation mesurable de l'impédance du capteur CF.
- L'orientation des fibres par rapport à la direction principale du champ magnétique appliqué impacte la réponse en impédance, en raison des variations dans la génération des courants induits.

Cependant, ces études se concentrent souvent sur une analyse globale, sans détailler l'impact individuel et combiné de ces paramètres sur la réponse électromagnétique du capteur. De plus, aucune étude n'a spécifiquement analysé l'influence de la position des fibres par rapport au capteur, alors qu'elle pourrait jouer un rôle déterminant dans la variation du signal mesuré. La proximité des fibres avec la bobine d'excitation pourrait modifier l'intensité du champ électromagnétique perçu par le capteur, affectant ainsi l'amplitude de l'impédance mesurée.

Dans ce contexte, nous proposons une étude paramétrique expérimentale détaillée, visant à analyser l'effet du positionnement, de l'orientation et du dosage des fibres d'acier sur la réponse électromagnétique d'un capteur à courants de Foucault. Contrairement aux travaux existants, cette approche apporte une analyse systématique et approfondie, permettant de mieux comprendre les mécanismes électromagnétiques mis en jeu, qui pourrait constituer une plateforme de référence pour le développement de bases de données exploitables dans les recherches futures, contribuant ainsi à l'amélioration des techniques d'évaluation non destructif et à l'optimisation des capteurs électromagnétiques dédiés à ces matériaux.



### 3.2 Influence de la dispersion des Fibres d'Acier sur la Réponse du Capteur CF.

L'étude de la relation entre la distribution des fibres d'acier et la réponse électromagnétique des capteurs CFs est un enjeu majeur pour la caractérisation des BRFA, ceci a fait l'objet de plusieurs recherches. Ces recherches sont basées sur des approches expérimentales et ou par des approches de modélisation électromagnétique.

Les méthodes expérimentales consistent généralement à mesurer l'impédance d'un capteur CF placé autour d'un échantillon de béton et à analyser les variations d'impédance en fonction du dosage, de l'orientation et de la répartition des fibres. En parallèle, les approches numériques s'appuient sur des modèles analytiques ou des simulations par éléments finis pour prédire la réponse électromagnétique du composite en fonction de ses propriétés internes.

Dans cette optique, Torrents et al [90], dans leur article *"Inductive Method for Assessing the Amount and Orientation of Steel Fibers in Concrete"*, proposent une approche exclusivement expérimentale pour quantifier la teneur en fibres et leur orientation dans des échantillons de béton en utilisant une méthode inductive non destructive. Les chercheurs ont développé un capteur constitué d'une bobine inductive, dans laquelle les échantillons de BRFA sont insérés. Le principe repose sur le fait que les fibres d'acier, en tant que matériaux ferromagnétiques, modifient le champ magnétique généré par la bobine, influençant ainsi l'inductance mesurée.

Afin d'établir une relation entre la teneur en fibres et l'inductance mesurée, plusieurs échantillons de béton avec différentes concentrations de fibres (variant de 10 à 60 kg/m<sup>3</sup>) ont été testés. L'inductance a été mesurée en plaçant chaque échantillon dans la bobine et en enregistrant la variation du champ électromagnétique. Les résultats ont montré une relation linéaire directe entre la teneur en fibres et l'augmentation de l'inductance, confirmant ainsi que plus la concentration en fibres est élevée, plus l'inductance augmente.

L'orientation des fibres a également été étudiée aussi par Torrents et al. Afin d'analyser son effet sur la réponse inductive. Pour cela, ils ont mené une expérience spécifique, dans laquelle des fibres étaient suspendues dans un cube en méthacrylate, alignées soit parallèlement, soit perpendiculairement au champ magnétique. Les mesures ont montré que lorsque les fibres étaient parallèles, l'inductance augmentait de 87-89 %, tandis que pour des fibres perpendiculaires, l'augmentation n'était que de 11-13 %. Ces résultats confirment que l'alignement des fibres avec le champ magnétique amplifie significativement la variation de la

composante inductive, tandis que les fibres perpendiculaires n'affectent que faiblement la réponse du capteur.

Dans une étude visant à améliorer la méthode inductive développée par Torrents et al, Cavalaro et al [91] ont approfondi l'évaluation de la teneur en fibres d'acier et leur orientation en intégrant une modélisation par éléments finis (FEM). Leur investigation a permis de quantifier plus précisément l'influence des fibres sur l'inductance mesurée et de proposer une approche plus fiable pour l'évaluation du BRFA.

L'étude confirme que l'augmentation de la teneur en fibres entraîne une augmentation linéaire de l'inductance, validant ainsi que la présence de fibres d'acier modifie la perméabilité magnétique du matériau et intensifie l'effet inductif. Grâce à la modélisation FEM, ils ont pu établir une relation plus précise entre la quantité de fibres et l'inductance, réduisant l'erreur d'estimation à moins de 2,6 %.

Concernant l'orientation des fibres, l'étude démontre que l'inductance mesurée suit une loi proportionnelle au carré du cosinus de l'angle d'orientation des fibres. En testant différents scénarios d'anisotropie via des simulations numériques, ils ont confirmé que les fibres alignées avec le champ magnétique génèrent une augmentation significative de l'inductance, tandis que les fibres perpendiculaires produisent une variation beaucoup plus faible.

L'absence de prise en compte de cet effet dans les modèles analytiques actuels constitue une limite importante pour la compréhension et l'optimisation des techniques de contrôle non destructif basées sur l'induction électromagnétique. Une fibre placée à proximité immédiate du capteur pourrait avoir un impact bien plus significatif sur l'impédance que plusieurs fibres éloignées, créant ainsi des variations spatiales et anisotropes dans la réponse électromagnétique du matériau.

Ainsi, une approche expérimentale détaillée est nécessaire pour isoler et quantifier l'influence propre de chaque paramètre sur la réponse du capteur CF. Cette compréhension approfondie est essentielle pour améliorer la précision des techniques de contrôle non destructif

### **3.3 Approche expérimentale proposée**

La méthode proposée consiste à analyser l'impact des fibres d'acier sur la réponse électromagnétique d'un capteur CF en fonction de trois paramètres : le dosage, l'orientation et

la position des fibres. Pour cela, un capteur à courants de Foucault est conçu pour mesurer la variation d'impédance induite par la présence des fibres dans un échantillon test.

La variation relative d'impédance induite donnée par l'équation (1) qui représente la différence entre l'impédance en présence et en absence de fibre.

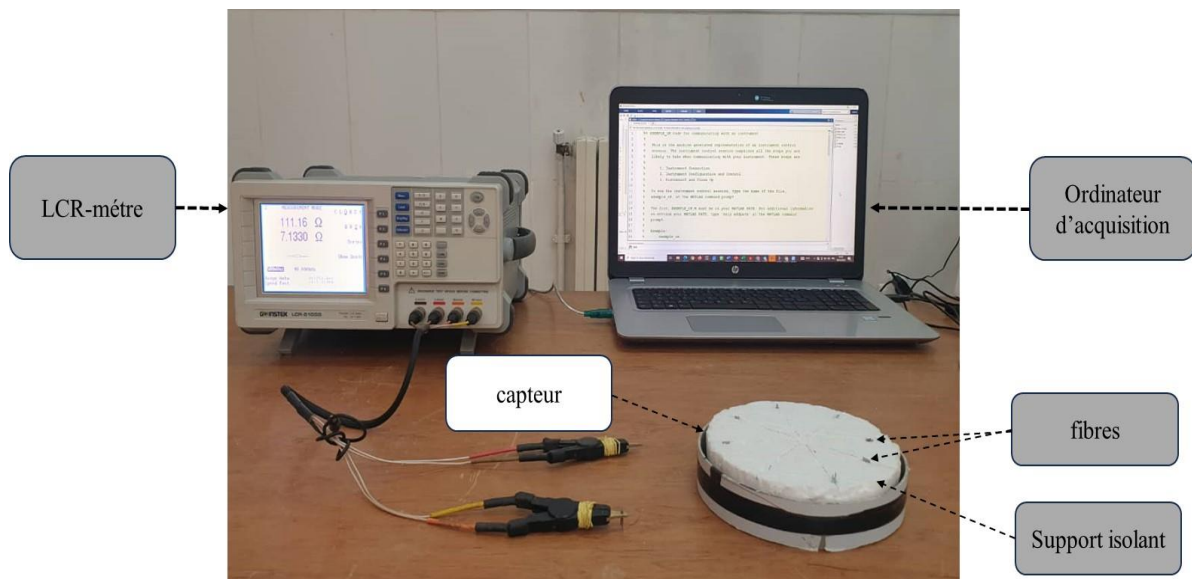
$$\Delta Z_{\%} = \frac{Z_{\text{fibres}} - Z_{\text{sans fibres}}}{Z_{\text{sans fibres}}} \times 100 \quad (1)$$

où :

- $Z_{\text{fibres}}$  est l'impédance mesurée lorsque les fibres sont présentes dans l'échantillon.
- $Z_{\text{sans fibres}}$  est l'impédance mesurée en l'absence de fibres.
- $\Delta Z_{\%}$  est la variation relative de l'impédance, exprimée en pourcentage.

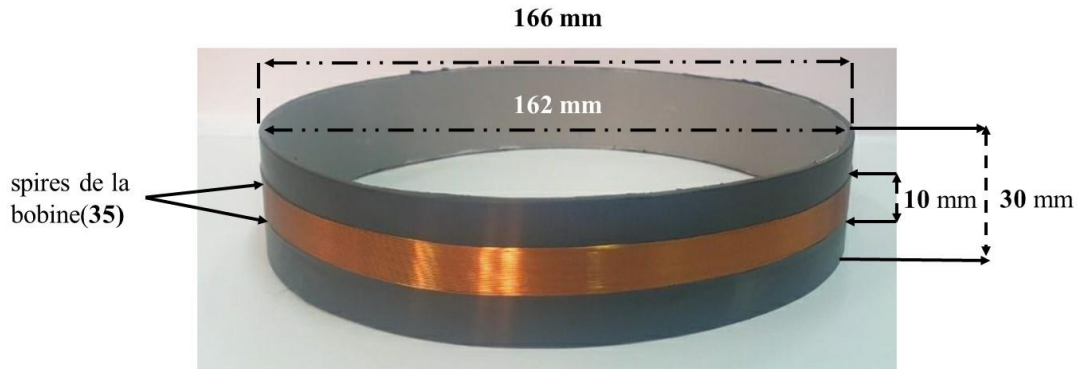
### 3.3.1 description du dispositif de mesure

Le système de mesure illustré par figure 3. 1 comprend les éléments suivants :



**Figure 3. 1** Dispositif expérimental utilisé pour l'étude paramétrique basée sur les courants de Foucault, dédié à la mesure de l'impédance.

- **Capteur a courant de Foucault :** constitué d'une bobine en cuivre avec un diamètre du 0.25 mm avec une seule couche de 35 spires, supportée par un conteneur cylindrique en PVC. Les dimensions du capteur sont représentées dans la figure 3.



**Figure 3. 2** Dimensions du capteur à courants de Foucault (CCF).

- **Un LCR-mètre (GW INSTEK/LCR-8105G)** : utilisé pour mesurer les variations de l'impédance aux fréquences adaptées à l'analyse électromagnétique des échantillons tests. Cet instrument est connecté à un ordinateur permettant l'enregistrement et l'analyse des données d'acquisition.
- **Ordinateur d'acquisition** : utilisé pour l'acquisition et l'analyse des données, il est connecté au LCR-mètre afin d'enregistrer en temps réel les variations d'impédance mesurées par le capteur CF.
- **Un support isolant en polyester** : conçu pour positionner les échantillons de manière stable et garantir la répétabilité des mesures. Ce dispositif permet également de tester différentes configurations d'orientation et de positionnement des fibres.
- **Fibre d'Acier** : La fibre d'acier caractérisée dans cette étude possède les mêmes propriétés électromagnétiques et dimensions physiques que celles décrites dans le Chapitre 2.

La fréquence d'opération de cette étude expérimentale est fixée à 40 kHz, car elle correspond à la fréquence où l'on observe la plus grande variation de l'impédance. Ce choix sera détaillé dans le Chapitre 4.

### 3. 4 Choix de la fréquence et de la grandeur indicatrice

Le choix de la fréquence de travail et de la grandeur indicatrice (partie sensible de l'impédance) est un aspect fondamental dans le système d'évaluation non destructif développé utilisant les courants de Foucault. Une fréquence optimale permet une détection précise et efficace des

variations de répartition des fibres métalliques au sein de la matrice cimentaire, en amplifiant les effets des courants induits.

La fréquence affecte directement les phénomènes d'induction électromagnétique, notamment la profondeur de peau  $\delta$ , qui détermine l'intensité des courants induits dans les fibres métalliques. Une fréquence inadéquate peut réduire significativement la sensibilité du système, entraînant ainsi des mesures imprécises, voir une absence de détection des variations de distribution des fibres.

De plus, l'analyse des parties réelle et imaginaire de l'impédance permet d'identifier la grandeur indicatrice et le plus sensible aux changements dans le comportement électromagnétique des fibres et leur distribution au sein de la matrice cimentaire. Une sélection judicieuse de la fréquence et de la composante d'impédance à analyser garantit une sensibilité maximale du système, optimisant ainsi la fiabilité et la précision des mesures.

Les effets des courants induits dans les fibres d'acier deviennent significatifs lorsque  $\delta$  est inférieure au rayon de la fibre. La profondeur de peau est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

Où :

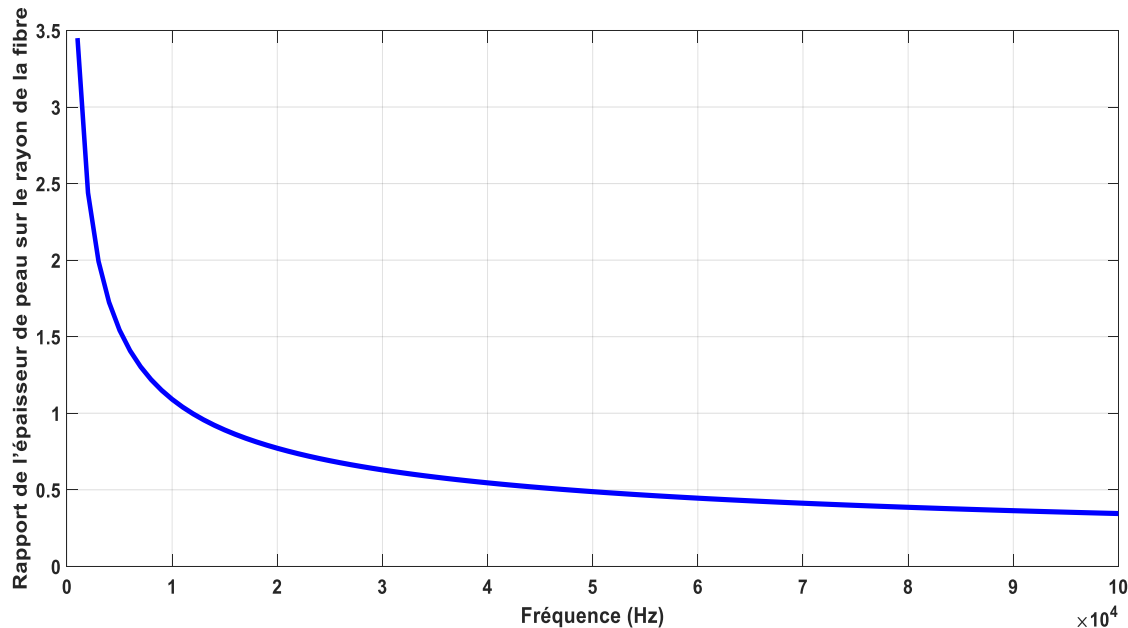
- $\delta$  : épaisseur de peau dans la fibre d'acier.
- $\rho$  : La résistivité électrique de la fibre d'acier.
- $\mu$  : La perméabilité magnétique de la fibre d'acier.
- $f$  : La fréquence du courant de la source.

Les valeurs identifiées de la perméabilité magnétique des fibres d'acier, présentées dans le chapitre 2, sont utilisées dans le calcul de la profondeur de peau afin d'évaluer avec précision l'effet des courants de Foucault en fonction de la fréquence.

Comme illustré dans la Figure 3. 3, le ratio entre la profondeur de peau et le rayon de la fibre ( $r=0,27\text{mm}$ ) devient inférieur à 1 à partir d'une fréquence d'environ 12 kHz. En dessous de cette fréquence, les courants induits sont trop faibles pour produire des variations significatives

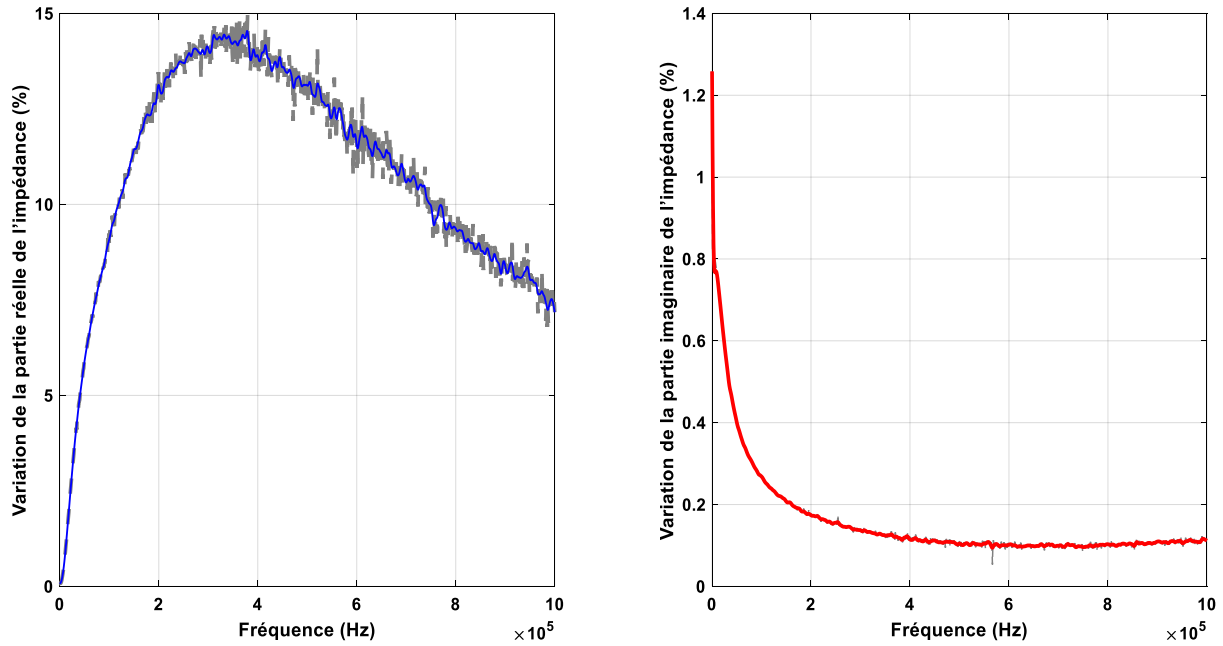
de l'impédance. Au-delà de 12 kHz, les courants induits commencent à affecter fortement l'impédance mesurée.

Ces résultats, comme indiqué dans la Figure 3. 3, montrent que l'utilisation d'une fréquence supérieure à 12 kHz est impérative pour optimiser la sensibilité des mesures et assurer une détection efficace de la répartition des fibres dans la matrice cimentaire. Ce choix garantit une évaluation précise du comportement électromagnétique des fibres.



**Figure 3. 3** Rapport de l'épaisseur de peau sur le rayon de la fibre en fonction de la fréquence.

Afin d'identifier la fréquence de travail optimale ainsi que la composante de l'impédance la plus sensible à la présence des fibres d'acier, une mesure expérimentale a été réalisée en soumettant une configuration à teneur en fibres donnée, placée au centre du capteur à courants de Foucault, à un balayage fréquentiel compris entre 100 Hz et 1 MHz.



**Figure 3. 4** Variation relative des composantes de l'impédance en fonction de la fréquence.

La variation relative des grandeurs, parties réelle et imaginaire de l'impédance, est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta G = \frac{G_{\text{fibres}} - G_{\text{VIDE}}}{G_{\text{VIDE}}} \times 100$$

$G_{\text{fibres}}$  : Grandeur mesurée du capteur en présence d'un échantillon des fibres à une fréquence donnée  $f$ .

$G_{\text{VIDE}}$  : Grandeur mesurée du capteur en absence d'un échantillon des fibres à même fréquence.

La Figure 3. 4 illustre l'évolution des deux composantes de l'impédance en fonction de la fréquence. L'analyse met en évidence que la composante réelle présente une variation nettement plus importante que la composante imaginaire (réactance), dont la variation reste relativement faible sur l'ensemble de la plage de fréquences explorée.

La fréquence de 40 kHz a été retenue comme fréquence de travail, car elle permet d'atteindre une variation significative d'environ 5 %, tout en évitant les perturbations apparaître à plus haute fréquence. Ce choix constitue un compromis optimal entre sensibilité, fiabilité et stabilité de la mesure.

Dans ce chapitre, les mesures ont été effectuées sur les deux composantes de l'impédance – la résistance et la réactance. Afin de confirmer le choix du paramètre indicateur le plus sensible à la présence des fibres d'acier. Cette approche comparative permet de valider, par l'analyse expérimentale, que la composante réelle de l'impédance constitue la meilleure grandeur indicatrice pour évaluer la distribution des fibres dans la matrice cimentaire.

### **3. 5 Protocole de mesure et différentes configurations étudiées**

Afin d'analyser l'influence des fibres d'acier sur la réponse électromagnétique du capteur CF, un protocole expérimental a été élaboré. Cette étude vise à quantifier l'effet de trois paramètres fondamentaux : le dosage ou la teneur en fibres, leur orientation et leur position par rapport à la direction principale du champ magnétique.

Les mesures ont été effectuées dans des conditions environnementales ambiantes, garantissant la répétabilité des expériences et la fiabilité des données obtenues. Chaque test a été réalisé 10 fois afin d'assurer la stabilité des mesures et de minimiser les incertitudes liées aux conditions expérimentales.

#### **3. 5. 1 Influence de la Position des Fibres**

Cette configuration expérimentale vise à analyser l'effet de la distance des fibres par rapport au capteur CF.

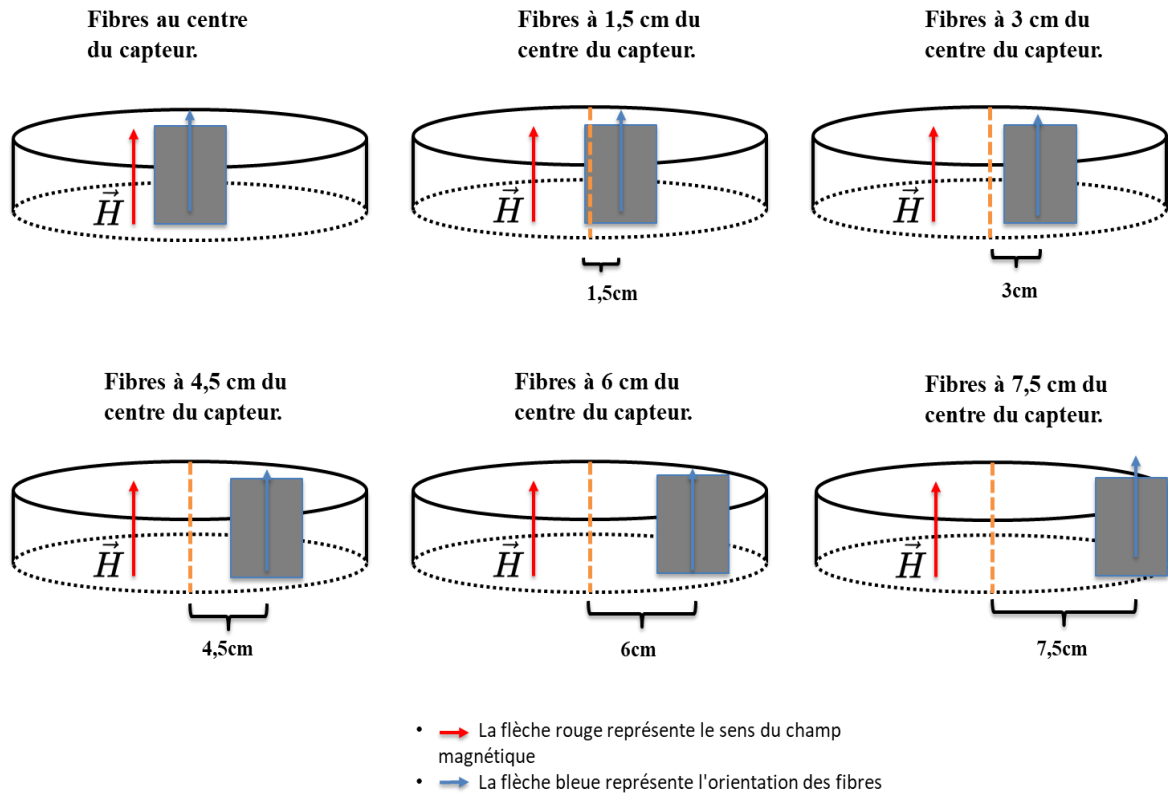
- Quarante fibres groupées positionnées à l'intérieur du capteur CF avec différentes positions radiales allant de 0 cm à 7.5 cm par rapport à l'axe du capteur solénoïdal tel qu'illustré sur la Figure 3. 5.

Les distances choisies pour placer les fibres par rapport au centre du capteur (de 0 à 7,5 cm, par pas de 1,5 cm) ont été définies de manière à balayer progressivement l'ensemble de la zone active du champ magnétique généré par la bobine. Ce balayage radial permet d'évaluer la sensibilité spatiale du capteur inductif et de quantifier l'influence de la position des fibres sur la variation de l'impédance mesurée.

À chaque position, une mesure d'impédance complexe est effectuée avec et sans présence de fibres, afin d'évaluer l'impact de la position radiale des fibres sur l'impédance.

.

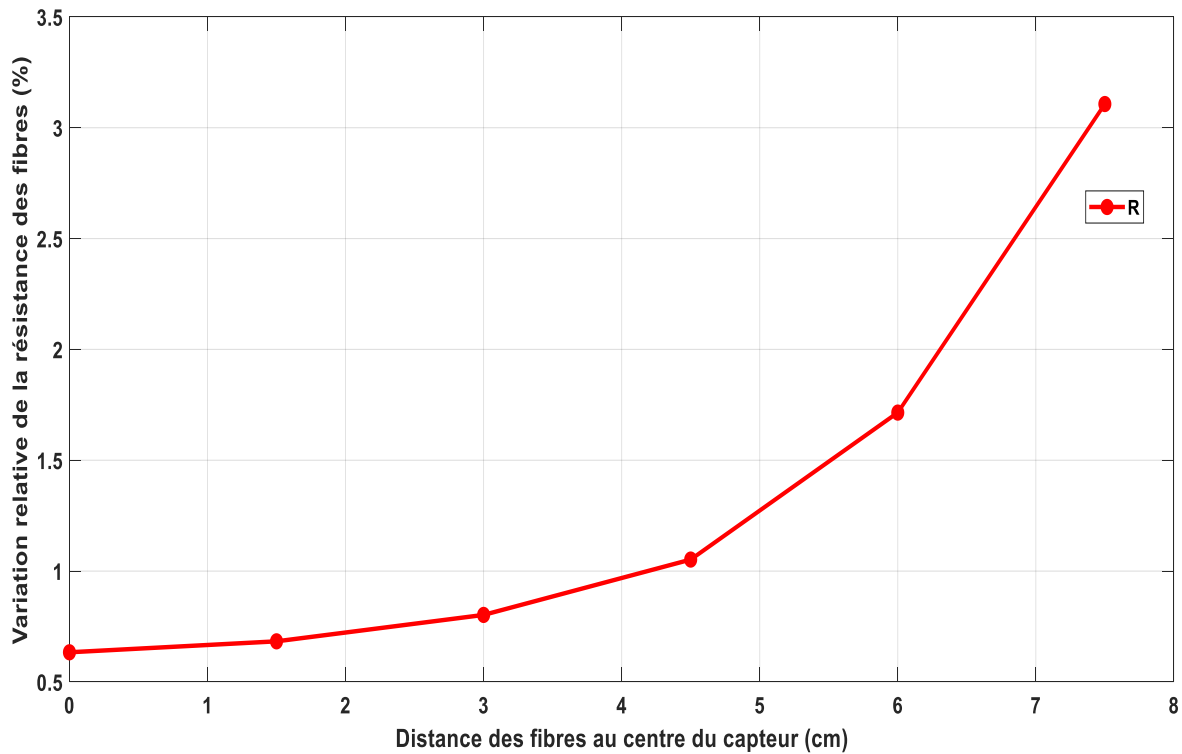




**Figure 3. 5** Schéma illustratif des configurations utilisées pour étudier l'influence de la position radiale d'une fibre par rapport l'axe du capteur solénoïdal à courants de Foucault

La figure 3. 6 présente l'évolution de la variation relative de la résistance mesurée en fonction de la position radiale des fibres.

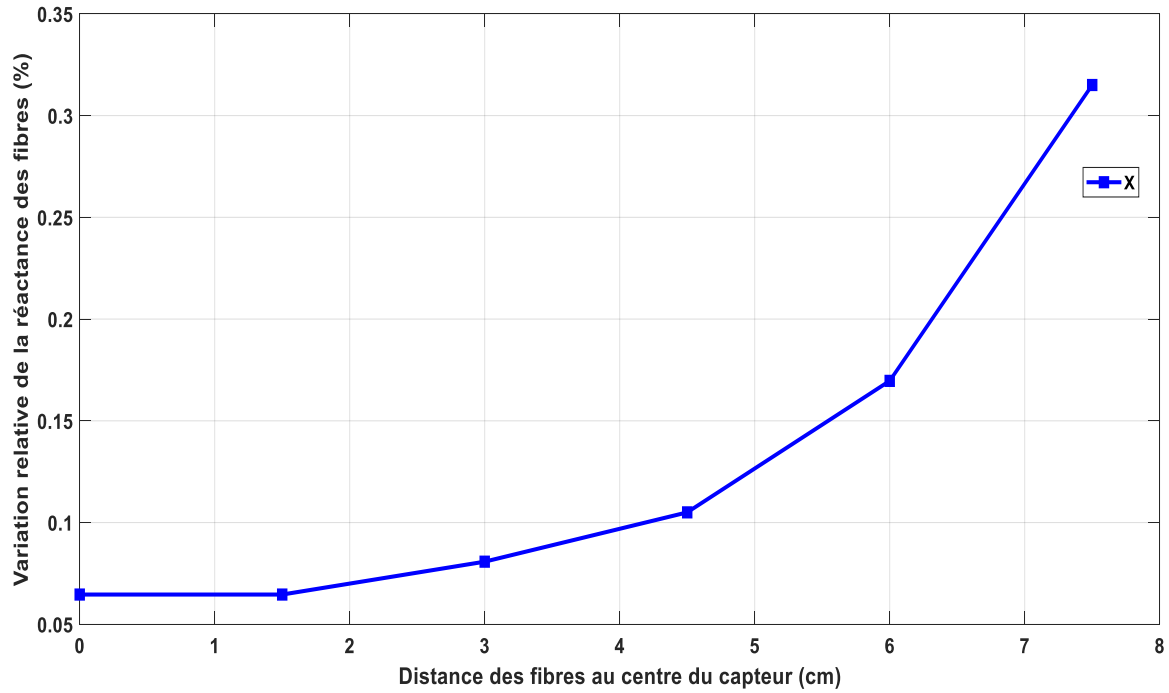
Cette figure montre que la variation relative de la résistance augmente de manière quasi proportionnelle à l'éloignement radial de la fibre par rapport au centre du capteur. Plus précisément, la variation passe d'environ 0,6 % lorsque les fibres sont positionnées au centre, à près de 3,2 % à une distance de 7,5 cm, soit une augmentation de plus de 5 fois. Cette évolution traduit l'effet du champ magnétique généré par le capteur, dont l'intensité est plus marquée en périphérie.



**Figure 3. 6** Variation relative de la résistance en fonction de la distance des fibres au centre du capteur à courants de Foucault.

La figure 3. 7 montre l'évolution de la variation relative de la réactance mesurée à différentes positions radiales de la fibre. Comme pour la résistance, la variation augmente avec l'éloignement de la fibre par rapport au centre du capteur, atteignant une valeur maximale d'environ 0,32 % à 7,5 cm, contre seulement 0,06 % au centre.

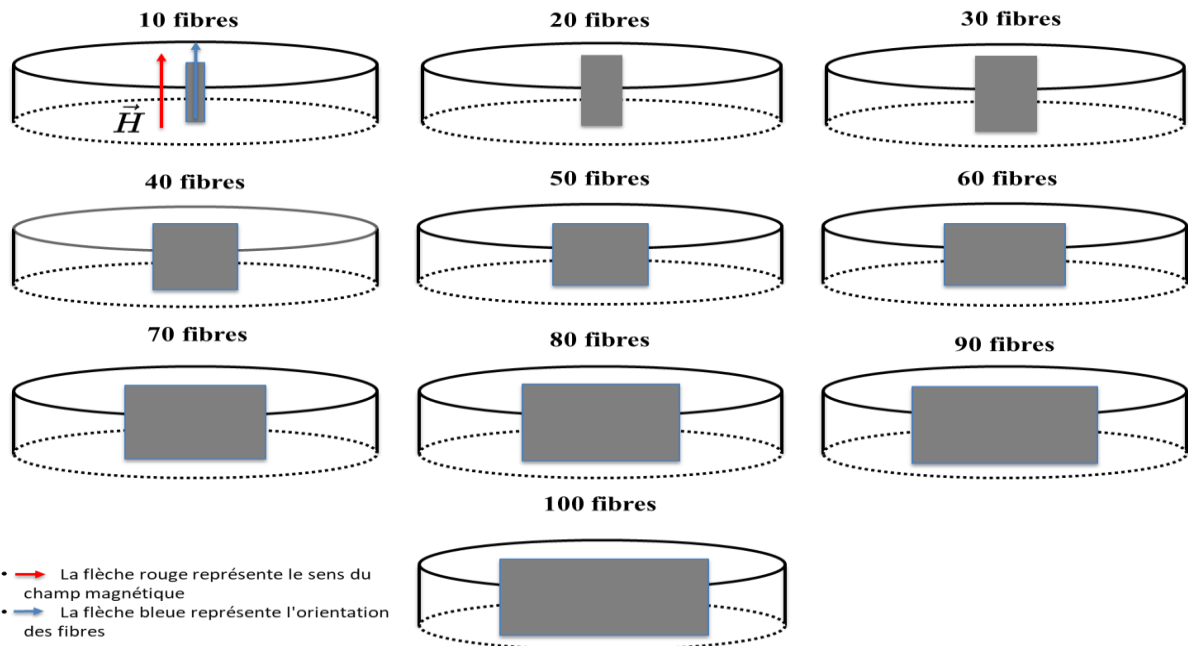
Cependant, on observe que l'amplitude de variation relative de la réactance reste nettement inférieure à celle de la résistance (voir Figure 3.4). Par exemple, à position équivalente (7,5 cm), la variation relative de la résistance atteint 3,2 %, soit dix fois plus élevée que celle de la réactance. Ce résultat confirme que la composante réelle de l'impédance (résistance) est plus sensible à la présence des fibres, et donc mieux adaptée pour évaluer leur distribution.



**Figure 3. 7** Variation relative de la réactance en fonction de la distance des fibres au centre du capteur à courants de Foucault.

### 3. 5. 2 Influence du dosage en fibres

Cette première analyse est consacrée à l'évaluation de l'impact de la concentration en fibres d'acier sur l'impédance mesurée par le capteur CF.

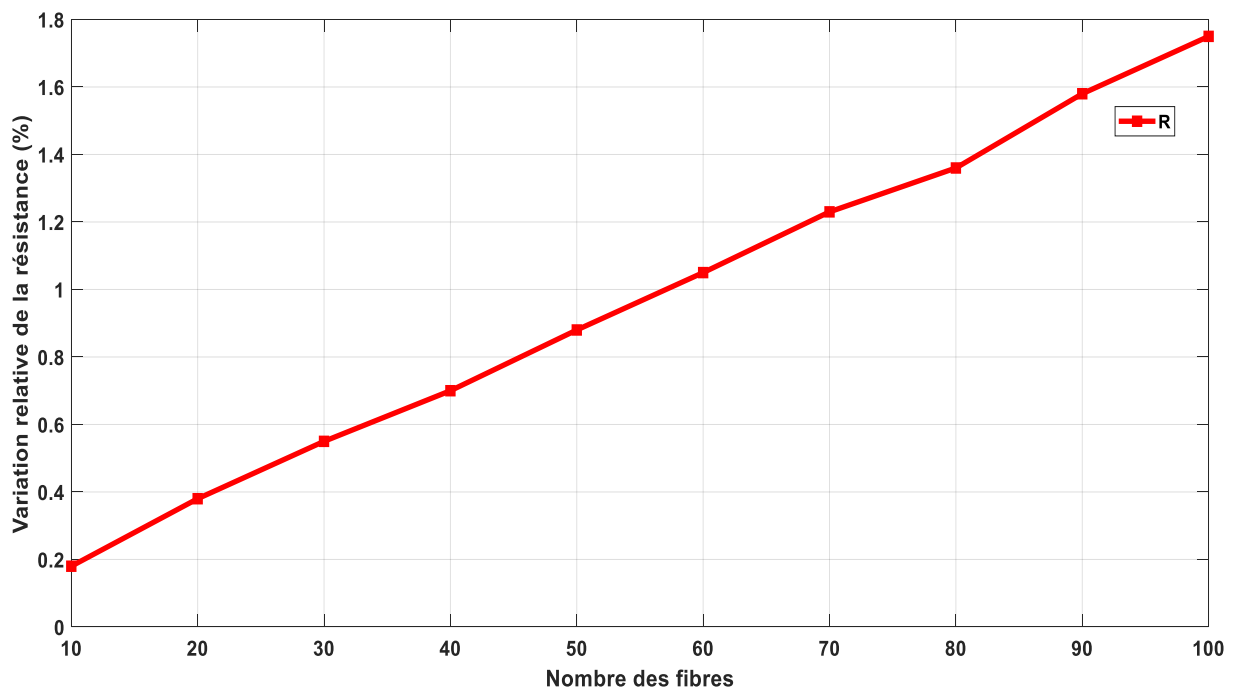


**Figure 3. 8** Schéma illustratif des configurations utilisées pour étudier l'influence de la teneur en fibres sur l'impédance mesurée du capteur à courants de Foucault.

- Les fibres d'acier sont ajoutées progressivement en quantités contrôlées, allant de 10 jusqu'à 100 fibres positionnées verticalement au centre de la bobine comme indique la figure 3. 8.
- Chaque ajout de fibres est suivi d'une mesure des parties réelle et imaginaire de l'impédance afin d'observer l'évolution de l'impédance en fonction du nombre de fibres présentes.

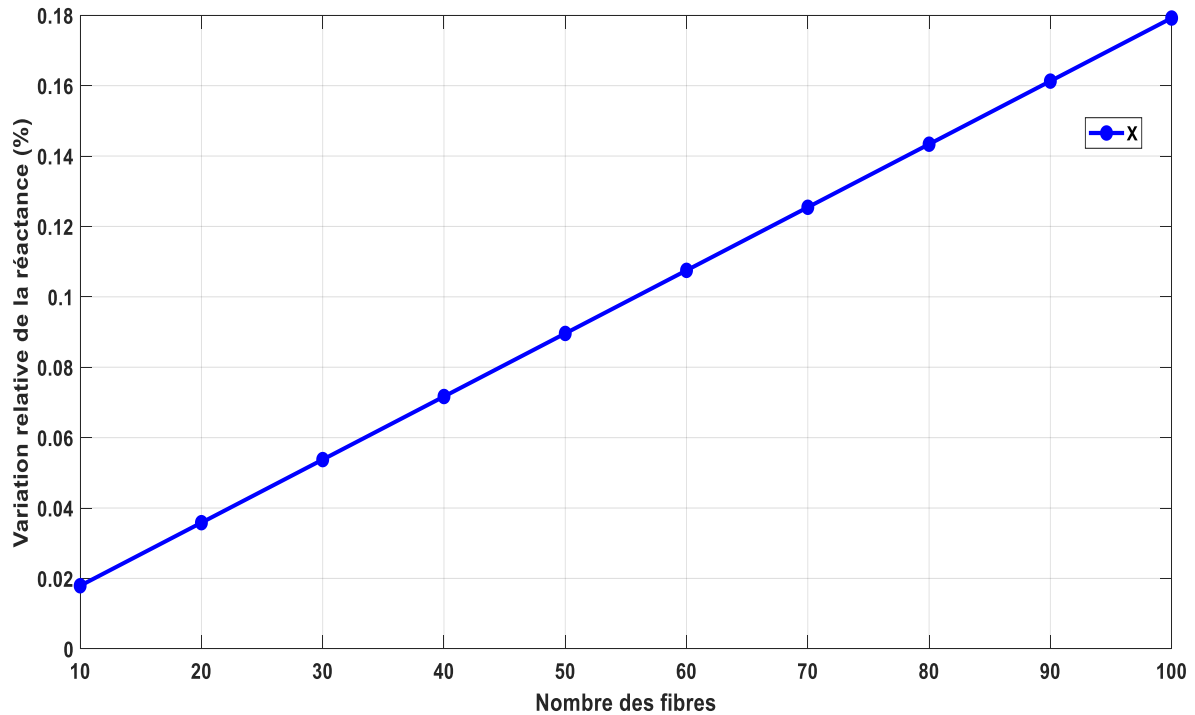
La figure 3. 9 montre l'évolution de la variation relative de la résistance en fonction du nombre de fibres insérées dans le champ du capteur à courants de Foucault. On observe une augmentation quasi-linéaire de la variation de résistance avec la teneur en fibres, passant d'environ 0,2 % pour 10 fibres à près de 1,75 % pour 100 fibres. Cette tendance met en évidence une relation proportionnelle entre la concentration en fibres et la réponse électromagnétique du système.

Ces résultats confirment que l'augmentation du nombre de fibres accroît l'intensité des courants de Foucault perturbés dans la matrice, ce qui se traduit par une augmentation mesurable de la partie réelle de l'impédance



**Figure 3. 9** Variation relative de la résistance en fonction du nombre de fibres mesurée par le capteur à courants de Foucault.

La figure 3. 10 illustre l'évolution de la variation relative de la réactance en fonction du nombre de fibres insérées dans le champ du capteur. Contrairement à la résistance, l'amplitude de variation reste très faible, allant de 0,02 % pour 10 fibres à environ 0,18 % pour 100 fibres. On remarque toutefois une tendance linéaire, ce qui indique que la réactance est également influencée par la teneur en fibres, bien que dans une moindre mesure.



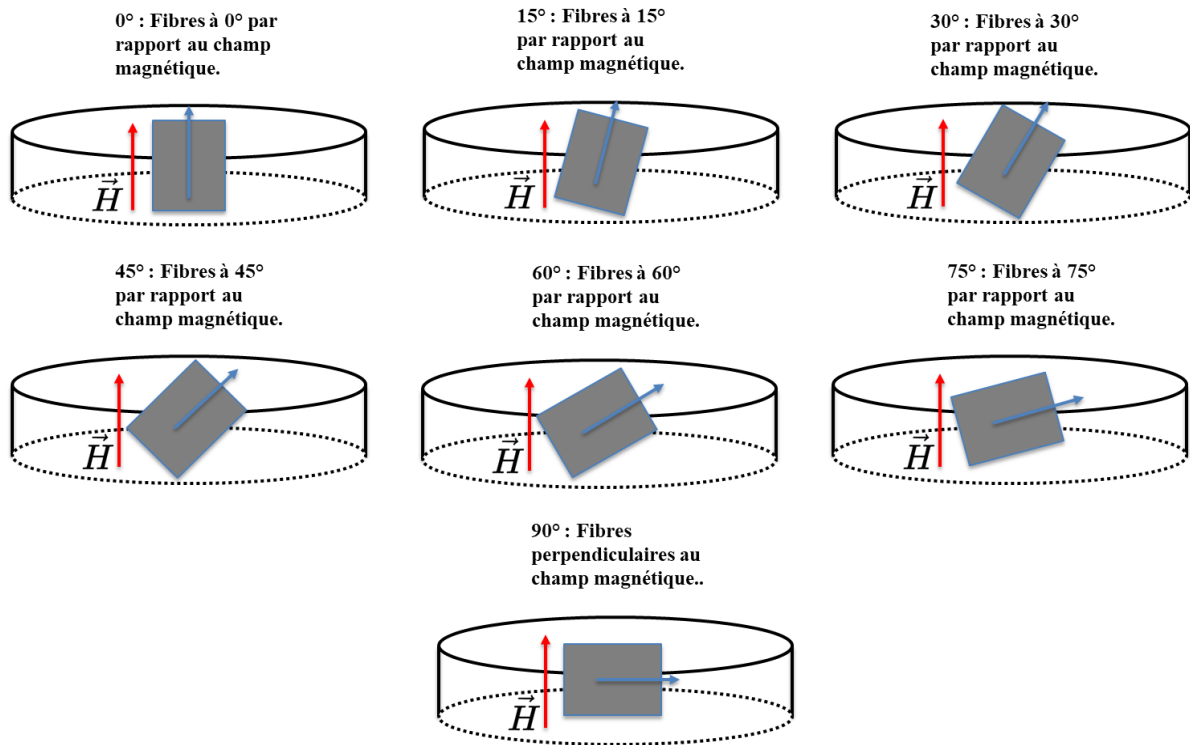
**Figure 3. 10** Variation relative de la réactance en fonction du nombre de fibres mesurée par le capteur à courants de Foucault.

### 3. 5. 3 Influence de l'Orientatation des Fibres

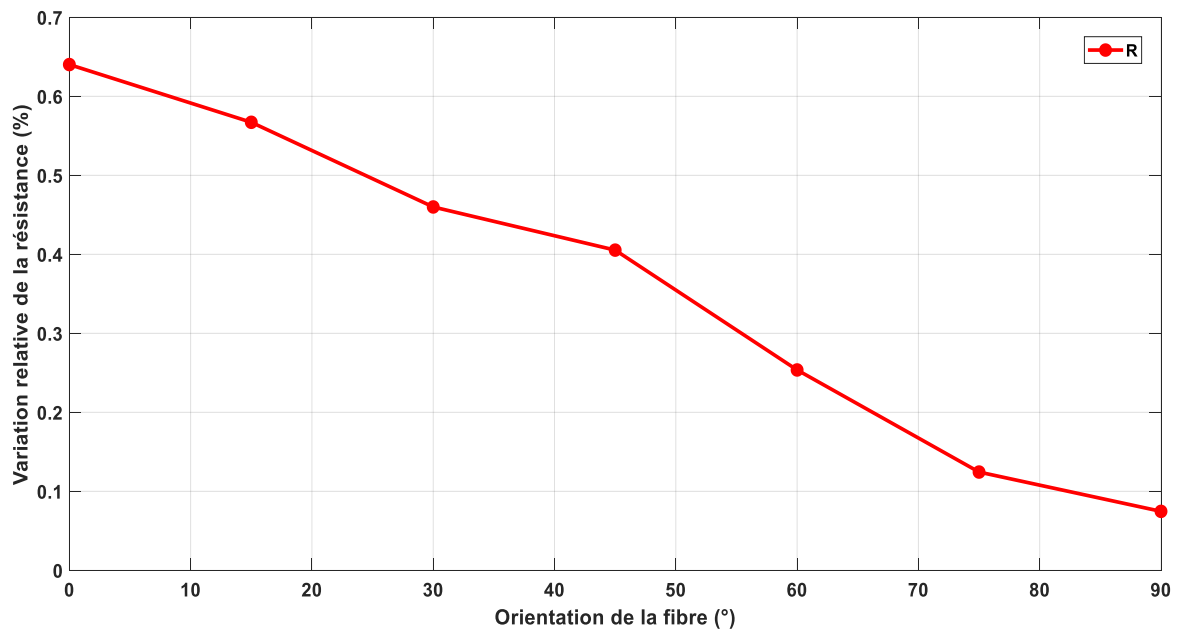
Cette analyse permet d'évaluer l'impact de l'orientation des fibres sur la réponse du capteur.

- Quarante fibres sont positionnées sous différents angles par rapport au champ magnétique du capteur : 0° (parallèle au champ magnétique), 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° (perpendiculaire au champ magnétique) comme indique la Figure 3. 11.
- L'impédance est mesurée pour chaque orientation afin d'identifier les variations d'impédance induites par la modification de l'alignement des fibres.

La figure 3. 12 présente l'évolution de la variation relative de la résistance en fonction de l'orientation angulaire de la fibre dans le champ du capteur. L'angle varie de 0° (fibre alignée avec le champ magnétique) à 90° (fibre perpendiculaire au champ).



**Figure 3. 11** Schéma illustratif des configurations utilisées pour étudier l'influence de l'orientation des fibres sur l'impédance mesurée du capteur à courants de Foucault.

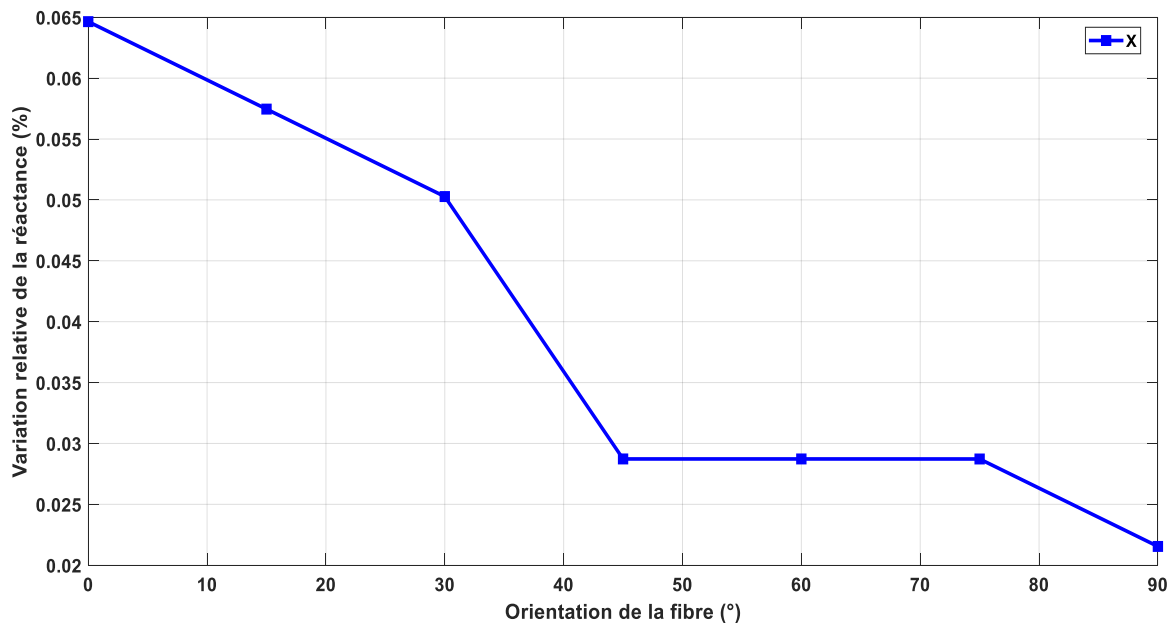


**Figure 3. 12** Variation relative de la résistance en fonction de l'orientation des fibres mesurées par le capteur à courants de Foucault.

La figure 3. 12 montre que la variation diminue de manière régulière avec l'augmentation de l'angle. À 0°, la variation atteint environ 0,65 %, tandis qu'à 90°, elle chute à environ 0,08 %. Cette tendance s'explique par la réduction de l'interaction électromagnétique entre la fibre et le

champ généré, la composante efficace de la fibre dans la direction du champ diminuant avec l'angle.

L'orientation des fibres est un facteur très important, car elle influence directement l'amplitude de la variation de l'impédance. À orientation  $0^\circ$ , la réponse électromagnétique est environ 8 fois plus élevée qu'à  $90^\circ$ .



**Figure 3. 13** Variation relative de la réactance en fonction de l'orientation des fibres mesurées par le capteur à courants de Foucault.

La figure 3. 13 présente la variation relative de la réactance mesurée pour différentes orientations angulaires de la fibre dans le champ du capteur. L'angle varie de  $0^\circ$  (fibre alignée avec le champ) à  $90^\circ$  (fibre perpendiculaire au champ), permettant ainsi d'analyser l'impact de l'orientation sur la composante imaginaire de l'impédance.

On observe que la variation décroît avec l'augmentation de l'angle. À  $0^\circ$ , elle atteint environ 0,065 %, contre 0,023 % à  $90^\circ$ , soit une réduction d'un facteur environ 3. Bien que l'effet soit similaire à celui observé pour la résistance, l'amplitude de variation reste très faible

À orientation  $0^\circ$ , la réponse mesurée est environ 8 fois supérieure à celle à  $90^\circ$  pour la résistance, contre seulement 3 fois pour la réactance. Cette différence s'explique par la plus grande sensibilité de la composante réelle de l'impédance aux variations d'orientation des fibres.

### 3. 6 Conclusion

Ce chapitre est une analyse expérimentale de l'influence du dosage, de la position et de l'orientation des fibres d'acier sur la réponse électromagnétique du capteur à courants de Foucault. L'étude a mis en évidence plusieurs facteurs qui contribuent à une meilleure compréhension des mécanismes électromagnétiques associés aux BRFA.

Les résultats obtenus ont montré que :

- L'augmentation du nombre de fibres insérées dans le capteur induit une augmentation linéaire de la résistance, tandis que la réactance reste peu affectée. Cette tendance est cohérente avec la perméabilité magnétique complexe des fibres d'acier présentée dans le chapitre 2, où la partie imaginaire de la perméabilité complexe  $\mu_i$  dominante à 40kHz, amplifie les pertes résistives, alors que la partie réelle  $\mu_r$  plus faible limite la variation de la réactance.
- La position des fibres influence fortement la variation relative de la résistance mesurée. Lorsque les fibres sont placées à la périphérie du capteur, la variation observée est environ 10 fois supérieure à celle obtenue lorsqu'elles sont positionnées au centre, ce qui reflète l'intensité plus élevée du champ magnétique en zone périphérique
- L'orientation des fibres par rapport au champ magnétique a un impact significatif sur la résistance mesurée. Des fibres parallèles au champ ( $0^\circ$ ) génèrent une variation maximale, tandis que des fibres perpendiculaires ( $90^\circ$ ) induisent une variation minimale, avec un écart d'un facteur d'environ 8, mettant en évidence la sensibilité directionnelle du capteur à l'alignement des fibres.
- La composante réelle de l'impédance (résistance) s'est révélée la plus sensible à la présence et à l'orientation des fibres, affichant des variations nettement supérieures à celles observées pour la réactance. Cela confirme son rôle optimal en tant que paramètre indicateur pour l'évaluation de la distribution des fibres, et justifie son choix comme paramètre de référence dans le cadre de l'analyse développée au chapitre 4

Ces observations montrent que l'interprétation des mesures inductives ne peut se limiter à une simple analyse du dosage des fibres et orientation, mais doit également prendre en compte leur position pour une caractérisation plus précise des BRFA.



# **Chapitre 4**

## **Système d'évaluation localisée de la distribution des fibres dans le BRFA basé sur les courants de Foucault**

## 4. 1 Introduction

L'évaluation précise de la répartition des fibres dans le béton renforcé de fibres d'acier (BRFA) est une étape essentielle pour garantir ses performances mécaniques optimales. La distribution des fibres influence directement les propriétés structurelles du matériau, notamment sa résistance à la traction, sa ductilité et sa capacité à limiter la propagation des fissures. Cependant, les méthodes traditionnelles d'évaluation de cette répartition sont souvent destructives, coûteuses et peu adaptées aux applications industrielles à grande échelle.

Dans ce contexte, les recherches récentes ont démontré l'efficacité des méthodes basées sur les courants de Foucault pour évaluer la répartition des fibres métalliques dans le BRFA. Ces méthodes offrent une solution non destructive, basée sur la mesure des variations d'impédance générées par les fibres d'acier dans le béton. Cependant, il est important de souligner que ces approches, bien qu'efficaces pour fournir une estimation globale de la répartition des fibres, ne permettent pas une caractérisation détaillée sur toutes les zones de l'échantillon testé. Cette limitation peut entraîner une sous-estimation des variations locales, qui sont pourtant essentielles pour une évaluation précise des performances du matériau.

Pour surmonter cette limitation, une méthode basée sur les courants de Foucault combinée à un système de déplacement motorisé de la bobine est proposée. Ce système permet de réaliser un balayage continu le long de l'échantillon, offrant ainsi une cartographie zonale précise de la répartition des fibres d'acier. Grâce à cette approche, il est possible d'analyser les variations locales de la fraction volumique des fibres, d'identifier des zones de concentration inhomogène, et d'établir un lien direct entre la répartition des fibres et les propriétés mécaniques du béton fibré.

Dans ce chapitre, une méthode basée sur l'utilisation des courants de Foucault est appliquée à deux séries d'échantillons de BRFA. La première série comprend des échantillons préparés avec une distribution de fibres volontairement contrôlée et zonale, permettant de valider la capacité de la méthode à détecter les variations locales de fraction volumique. La seconde série est composée d'échantillons avec une répartition aléatoire des fibres, simulant les conditions réelles de mise en œuvre du béton fibré. Pour cette dernière, les mesures d'impédance le long des échantillons seront corrélées aux résultats des essais destructifs brésiliens, évaluant les performances mécaniques post-fissuration du matériau.

## **4. 2 Évaluation de la distribution des fibres à l'aide de la méthode basée sur les courants de Foucault**

### **4. 2. 1 Présentation de la méthode proposée**

La méthode proposée repose sur une approche basée sur les courants de Foucault pour évaluer la répartition des fibres d'acier dans le béton renforcé de fibres. Cette méthode électromagnétique est basée sur la mesure des variations d'impédance générées par les fibres métalliques dans le matériau. Lorsqu'une bobine est parcourue par un courant alternatif, elle génère un champ magnétique variable qui induit des courants de Foucault dans les fibres d'acier conductrices présentes dans le béton. Ces courants créent à leur tour un champ magnétique opposé, modifiant l'impédance de la bobine.

La variation d'impédance dépend de la densité et de l'orientation des fibres d'acier, ainsi que leurs propriétés électromagnétiques, notamment leur conductivité électrique et leur perméabilité magnétique.

Les études antérieures ont démontré que la méthode basée sur les courants de Foucault permet d'obtenir une estimation globale de la répartition des fibres dans le béton fibré. Cependant, ces méthodes présentent des limitations importantes, car elles ne fournissent pas une caractérisation détaillée et localisée de l'échantillon. En effet, les mesures obtenues sont moyennées sur l'ensemble de l'échantillon, ce qui peut négliger les variations locales de la concentration en fibres. Cette limitation est particulièrement critique, car les zones de concentration inégale peuvent avoir un impact significatif sur les performances mécaniques du béton, notamment en termes de résistance post-fissuration.

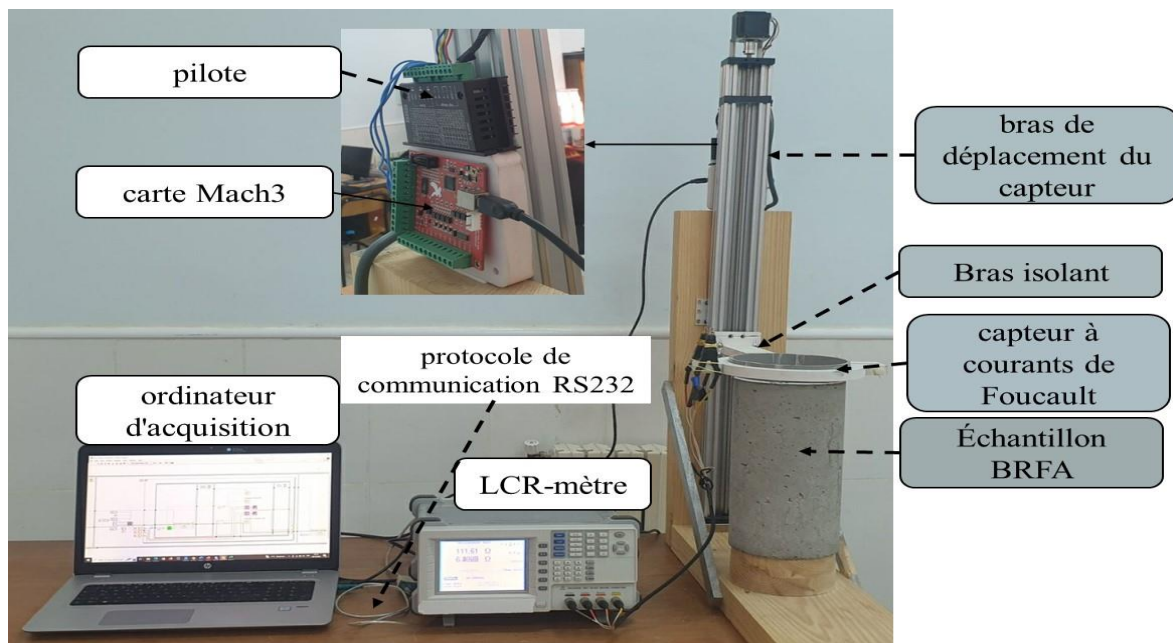
Pour remédier à cette limitation, la méthode proposée dans ce chapitre combine l'approche basée sur les courants de Foucault avec un système de déplacement motorisé de la bobine. Ce dispositif permet de réaliser un balayage continu le long de l'échantillon, afin d'obtenir une cartographie zonale précise de la répartition des fibres d'acier. En déplaçant la bobine selon un axe défini, les variations d'impédance sont mesurées à différents points de l'échantillon, permettant d'identifier les zones à haute et basse concentration de fibres.

Le système de balayage à courant de Foucault est entièrement contrôlé à l'aide d'un programme informatique dédié. Ce programme permet de définir les paramètres de balayage, notamment la vitesse de déplacement, la précision du positionnement de la bobine, et le pas de déplacement de la bobine. Le programme contrôle également l'appareil de mesure de l'impédance

(configuration et acquisition) qui facilite la récupération des données en temps réel et l'enregistrement automatique des résultats.

#### 4. 2. 2 Description du système de balayage à courant de Foucault

Pour évaluer la répartition zonale des fibres dans les échantillons de BRFA, un système de balayage par courants de Foucault a été conçu. Ce système permet de détecter les variations d'impédance due à la distribution des fibres Dacier, en offrant une cartographie précise et localisée. Les composants principaux du système sont décrits ci-dessous (Figure 4. 1)



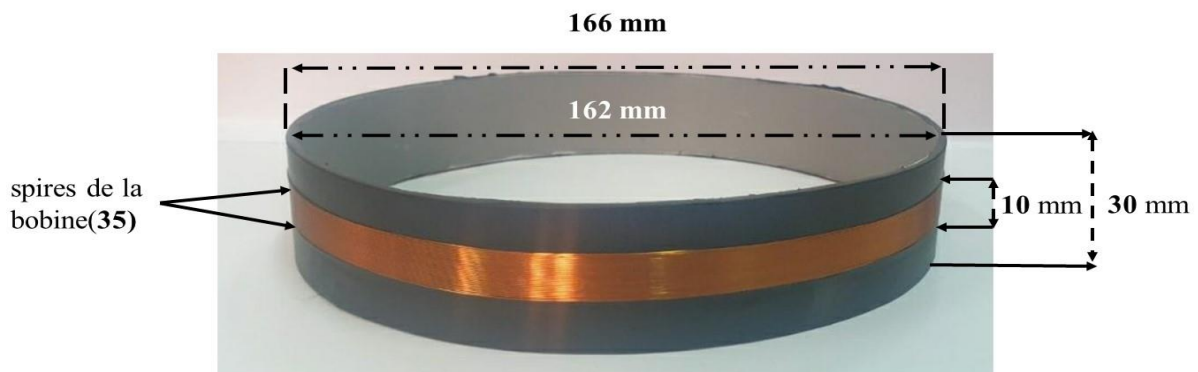
**Figure 4. 1** Système de mesure basé sur les courants de Foucault, intégré à un dispositif de balayage.

**Échantillon de BRFA :** L'échantillon utilisé pour les mesures est de forme cylindrique, avec des dimensions normalisées, un diamètre de 160 mm et une hauteur de 320 mm. Il contient des fibres d'acier de type crochets aux extrémités (figure 4. 2), de diamètre 0.54 mm et de longueur 37.7 mm. Les propriétés électromagnétiques spécifiques de ces fibres sont données dans le chapitre 2.



**Figure 4. 2** types de fibre d'acier utilisé.

**Capteur de courants de Foucault (CCF) :** Le Capteur de courants de Foucault est une bobine encerclant monocouche composée de 35 spires, enroulée autour d'un conteneur cylindrique en PVC adapté aux dimensions de l'échantillon BRFA comme illustré dans la figure 4. 3. Lorsqu'il est soumis à une tension alternative, le capteur génère un champ magnétique variable. Ce champ interagit avec les fibres métalliques, provoquant des variations d'impédance mesurables, directement liées à la densité et à la répartition des fibres.



**Figure 4. 3** Dimensions du capteur à courants de Foucault (CCF).

**LCR-mètre :** Un LCR-mètre (modèle GW INSTEK/ LCR-8105G) est utilisé pour mesurer les variations d'impédance générées en fonction de fréquence par le capteur CCF lors du balayage. Ce dispositif, piloté par un programme sous LabVIEW, assure des mesures précises et automatisées tout au long du processus.

**Système de déplacement :** Pour garantir un balayage précis de l'échantillon, le capteur CCF est monté sur un axe de déplacement linéaire qui permet un mouvement contrôlé le long de l'axe de l'échantillon. Ce système comprend :

- **Axe de déplacement linéaire :** équipé d'un moteur pas à pas précis, contrôlé via une vis-sans fin de guidage linéaire convertissant le mouvement rotatif en mouvement linéaire.
- **Bras isolant :** nous avons conçu un bras du matière isolante (FOREX), de longueur suffisamment enlevée (240 mm) pour empêcher toute interférence électromagnétique entre le capteur et l'axe de déplacement (en Aluminium).
- **Driver moteur pas à pas :** le pilote agit comme un alimentation du moteur pas à pas, en traduisant les signaux de la carte de commande en une série d'impulsions spécifiques pour le moteur pas à pas.

- **Carte de commande** : La carte de commande assure le contrôle du driver. Elle est constituée d'une carte Mach3 dotée d'une connexion USB, permettant une gestion fluide et précise du moteur pas à pas. Les instructions et les commandes sont transmises à Mach3 via un programme développé sous LABVIEW, en utilisant le logiciel Mach3 pour l'interface de contrôle.
- **Alimentation électrique** : une source de 12V fournit une énergie stable au moteur et aux composants électroniques.

Le fonctionnement global du système de balayage à courants de Foucault est entièrement automatisé via le logiciel LabVIEW, qui permet :

- Le contrôle du déplacement du capteur CCF le long de l'échantillon.
- La communication avec le LCR-mètre pour collecter les données d'impédance.
- Le traitement et l'enregistrement des résultats en temps réel

Cette configuration automatisée garantit une évaluation fiable de la répartition zonale des fibres dans les échantillons de BRFA, tout en limitant les interventions manuelles et les erreurs potentielles.

#### 4. 2. 3 Algorithme de contrôle du system de balayage a CF

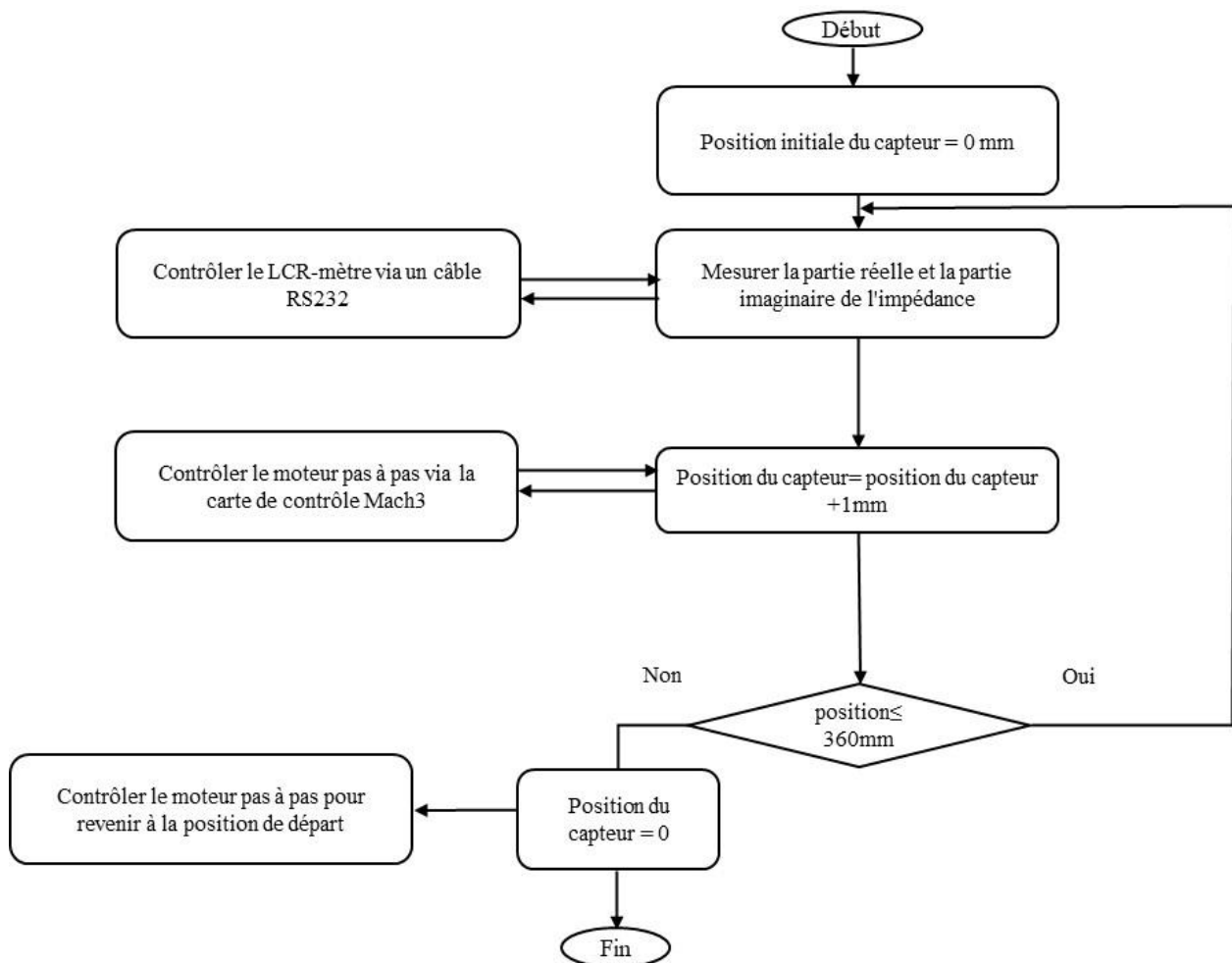
Pour évaluer la dispersion des fibres d'acier le long de l'échantillon de BRFA, une méthodologie utilisant un système de balayage par courants de Foucault a été développée. Ce processus repose sur un algorithme qui coordonne le déplacement du capteur CCF et les mesures variations d'impédance.

L'algorithme du protocole de mesure est illustré par la Figure 4. 4 , Chaque étape est réalisée de manière automatisée grâce à un système de contrôle intégré. L'algorithme commence par positionner le capteur CCF à 0 mm sur l'échantillon. À ce point, le système de contrôle commande le LCR-mètre pour mesurer les composantes réelle et imaginaire de l'impédance. Ensuite, le moteur pas à pas, contrôlé via une carte Mach3, déplace le capteur CCF d'un pas de 1 mm. Une nouvelle mesure d'impédance est réalisée après chaque déplacement.

Ce processus est répété de manière incrémentale jusqu'à atteindre la position finale de 360 mm, couvrant ainsi toute la longueur de l'échantillon. Une fois cette position atteinte, le système

commande le moteur de revenir à sa position initiale (0 mm), pour effectuer éventuellement un nouvel ensemble de mesures ou pour la préparation d'un autre échantillon.

Cette procédure garantit une analyse localisée et précise de la répartition des fibres d'acier le long de l'échantillon, fournissant des informations essentielles pour l'évaluation des propriétés électromagnétiques et mécaniques du BRFA.



**Figure 4. 4** Algorithme de fonctionnement du système de balayage par courants de Foucault.

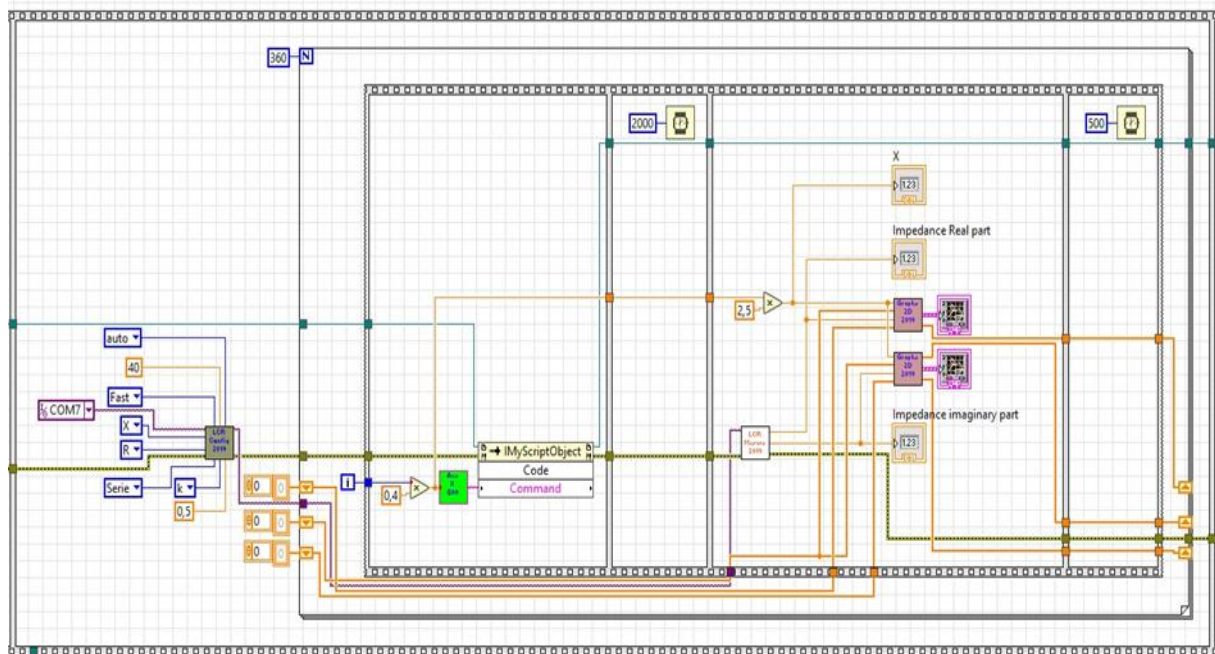
L'implémentation de l'algorithme décrit dans la Figure 4.4 repose sur la traduction des différentes étapes de cet algorithme et de leur enchaînement logique en un système fonctionnel et automatisé développé sous LabVIEW

La Figure 4. 5 illustre le schéma de bloc LabVIEW, Ce programme est conçu pour gérer à la fois les mesures d'impédances par courants de Foucault et le déplacement automatisé du capteur le long de l'échantillon de BRFA. Il permet d'assurer une coordination parfaite entre les

différentes étapes du processus, tout en garantissant la précision des mesures et des déplacements.

Le schéma intègre plusieurs modules principaux et des boucles de contrôle itératif, permettant une exécution séquentielle des tâches. Ces tâches incluent :

1. Mesure d'impédance : À chaque position, le système envoie une commande au LCR-mètre, via une interface série (COM7), pour mesurer les parties réelle et imaginaire de l'impédance. Ces données sont ensuite affichées en temps réel sur des graphiques pour le suivi continu.
2. Déplacement du capteur CCF : Une fois la mesure effectuée, une commande est envoyée au moteur pas à pas, via une carte Mach3, pour déplacer le capteur d'un pas de 1 mm. Ce déplacement est assuré avec précision grâce à une vis-mère et un bras isolant.
3. Enregistrement des données : Les valeurs mesurées à chaque position sont automatiquement enregistrées pour générer une cartographie complète de la répartition des fibres.



**Figure 4. 5** Diagramme complet en blocs LabVIEW du système de balayage à courants de Foucault.



Le processus itératif commence à la position initiale de 0 mm et se répète jusqu'à la position finale de 360 mm. Une fois les mesures terminées, le système commande le retour du capteur à sa position initiale pour effectuer une nouvelle série de mesures

Les mesures de l'impédance sont réalisées en se basant sur les résultats de l'étude paramétrique présentée dans le chapitre 3. Cette dernière a permis d'identifier la fréquence de travail optimale à 40 kHz, ainsi que la composante réelle de l'impédance comme paramètre le plus sensible à la présence et à la distribution des fibres d'acier dans la matrice cimentaire. Par conséquent, dans cette partie, l'analyse se focalise sur la variation de la composante réelle de l'impédance, afin d'évaluer localement la répartition des fibres métalliques dans les échantillons de BRFA.

Le système de balayage par courants de Foucault mesure l'impédance du capteur dans deux configurations : avec échantillon et sans échantillon. Cette double mesure permet de déterminer la variation relative de l'impédance, en isolant l'effet électromagnétique dû à la présence des fibres métalliques dans la matrice cimentaire.

La variation relative de l'impédance est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta Z = \frac{Z_{\text{BRFA}} - Z_{\text{VIDE}}}{Z_{\text{VIDE}}} \times 100$$

$\Delta Z$  : variation relative de l'impédance d'un échantillon BRFA

$Z_{\text{BRFA}}$  : Impédance mesurée d'un échantillon BRFA

$Z_{\text{VIDE}}$  : impédance de capteur CCF sans échantillon.

## 4. 3 Applications de la méthode proposée

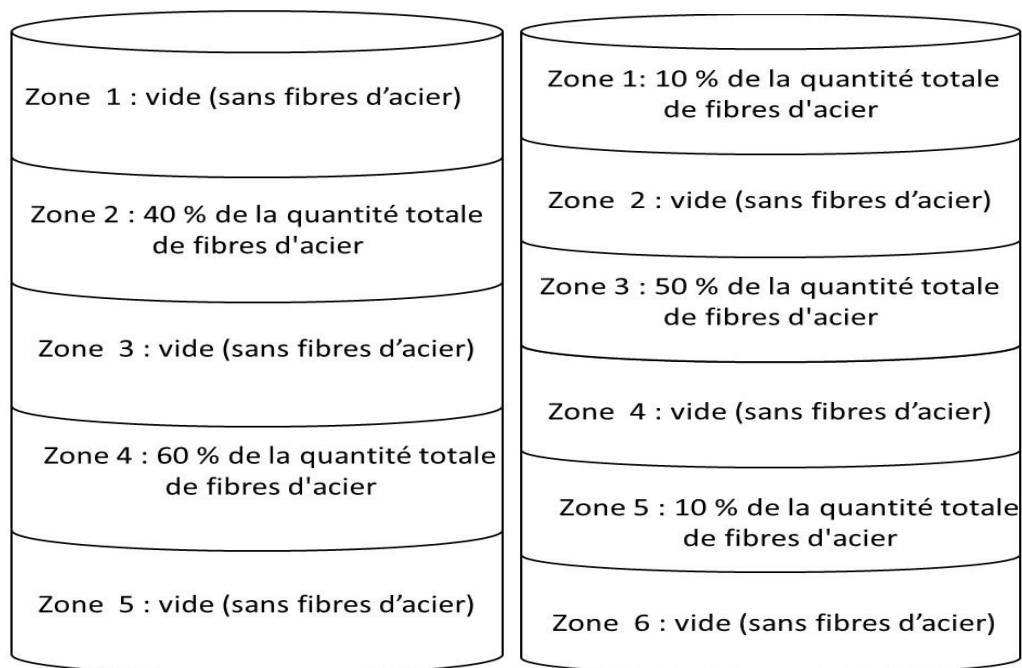
### 4. 3. 1 échantillons de BRFA avec distribution de fibres connue

#### 4. 3. 1. 1 préparation des échantillons

Dans un premier temps nous avons appliqué la méthode d'évaluation non destructive proposée sur des échantillons de BRFA préparés avec une distribution zonale de fibres que nous avons imposée (figure 4. 6).

L'objectif de ces tests est d'évaluer l'efficacité de la méthode pour détecter précisément la distribution volumique des fibres le long de l'échantillon. Les variations de la partie réelle de l'impédance CCF (Eq. 2) sont utilisées comme indicateur de la fraction volumique de fibres,

permettant de différencier distinctement les zones présentant des concentrations en fibres différentes. Ces tests préliminaires visent à établir une base de référence pour comprendre la relation entre les variations d'impédance et les fractions volumiques de fibres. Ces échantillons ont été conçus avec soin pour présenter des fractions volumiques de fibres bien déterminées dans des zones spécifiques. Deux échantillons ont été préparés, chacun comportant plusieurs zones avec des fractions volumiques de fibres d'acier différentes. Cependant, la fraction volumique totale de fibres d'acier dans chaque échantillon a été maintenue à un niveau constant de 1 % comme illustré dans les Figures 7a et 7b.



**Figure 4. 6** Distribution zonale des fibres d'acier dans l'échantillon 1 et l'échantillon 2

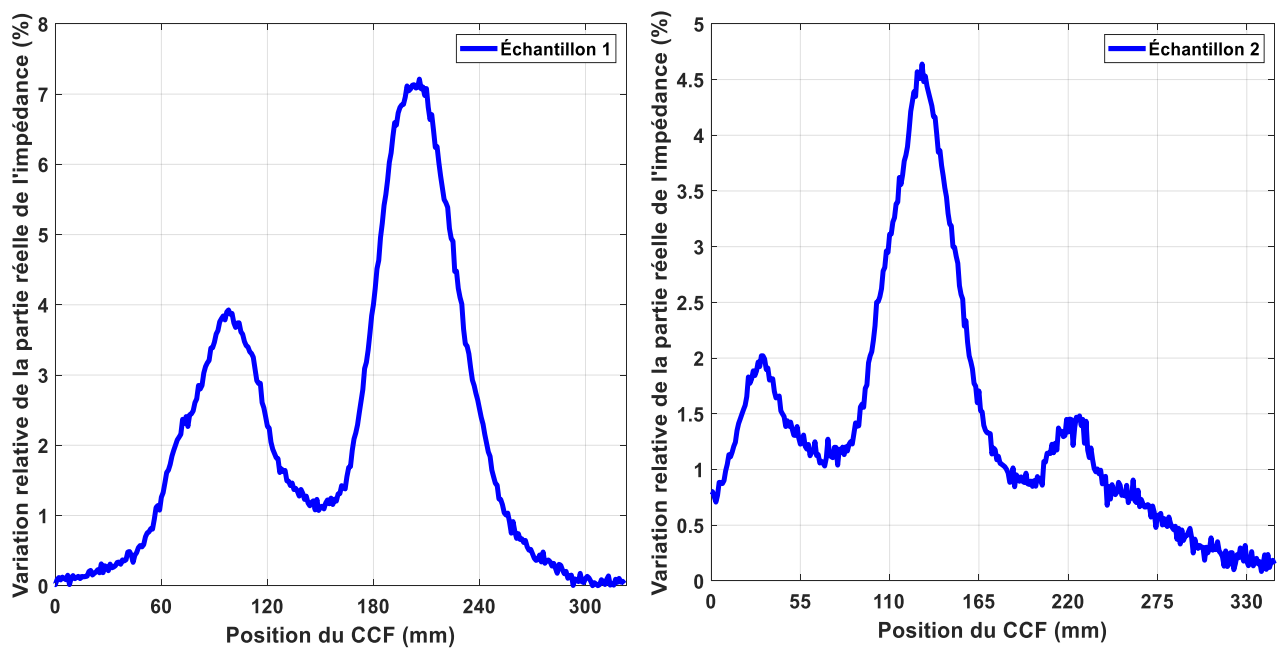
Après la préparation, les échantillons ont été démoulés après 36 heures, puis placés dans une chambre de cure pendant 28 jours pour préparer les échantillons pour expérimentation. À l'issue de la période de cure, l'impédance de chaque échantillon a été mesurée pour analyser les variations en fonction des zones de fibres.

La composition du mélange des deux échantillons de BRFA est détaillée dans le Tableau 1.

**Tableau 4.1 Composition du mélange des échantillons de BRFA 1 et 2.**

Échantillon	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (litre/m <sup>3</sup> )	Sable 0/3 (kg/m <sup>3</sup> )	Superplastifiant (litre) ADVA	Fraction volumique de fibres d'acier
Échantillon 1	350	160	1350	3	1 %
Échantillon 2	350	160	1350	3	1 %

#### 4. 3. 1. 2 Mesure d'impédance par le system de balayage a CF



**Figure 4. 7** Variation relative de la partie réelle de l'impédance des échantillons de BRFA 1 et 2 en fonction de la position du capteur.

Les échantillons BRFA 1 et 2 ont été analysés à l'aide du système de balayage par courants de Foucault, permettant de mesurer localement la variation de l'impédance le long de chaque échantillon. À chaque position, l'impédance est mesurée avec et sans l'échantillon, afin de calculer la variation relative de la partie réelle de l'impédance. Les résultats de ces mesures sont présentés sur la figure 4. 8, illustrant les variations de la réponse électromagnétique locale en fonction de la position du capteur pour les deux échantillons.

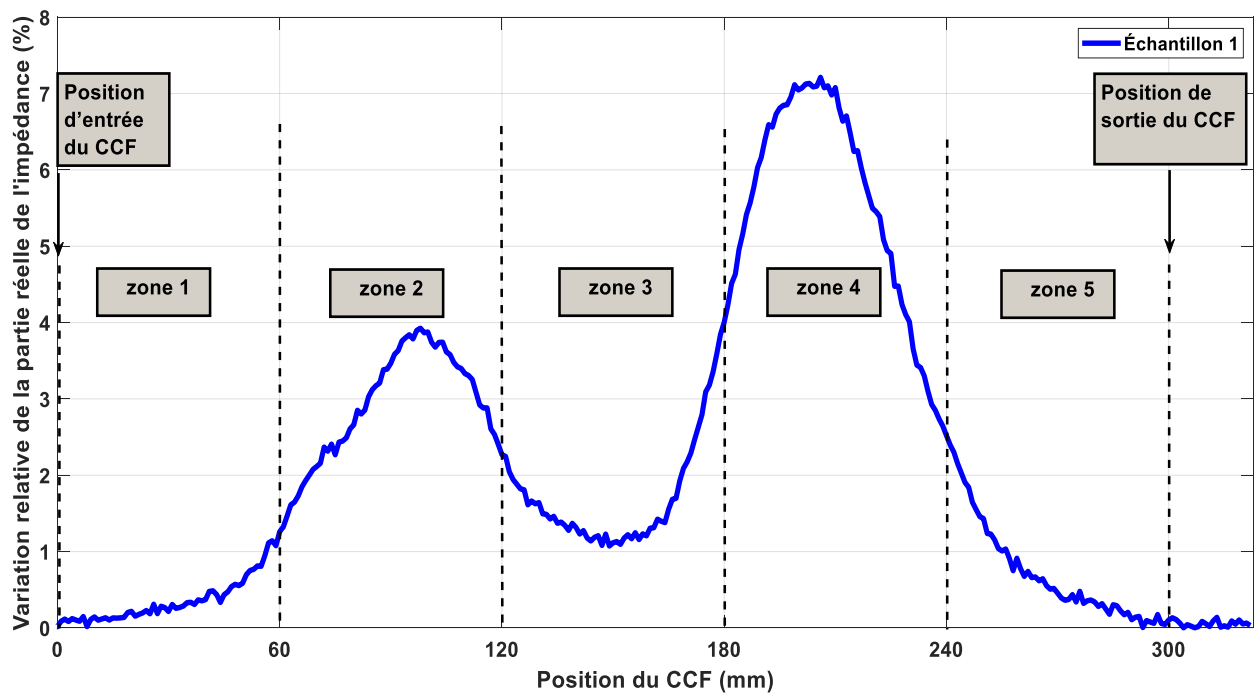
### 4. 3. 1. 3 Résultats et discussions

La Figure 4. 8 illustre la variation relative de la partie réelle de l'impédance de l'échantillon 1 en fonction de la position du capteur CCF.

La position d'entrée du capteur CCF dans la figure correspond à l'endroit où le capteur pénètre dans l'échantillon, tandis que la position de sortie du capteur CCF désigne l'endroit où le capteur quitte l'échantillon.

Les lignes en pointillés indiquent les positions des limites de chaque zone au sein de l'échantillon.

Les zones présentant une faible impédance de la bobine résultent de l'une des deux conditions suivantes : une carence de fibres dans la zone ou une mauvaise orientation des fibres, qui sont perpendiculaires au vecteur du champ magnétique.



**Figure 4. 8 Variation relative de la partie réelle de l'impédance de l'échantillon BRFA 1 en fonction de la position du capteur, avec identification des zones 1 à 5.**

Le CCF entre dans la Zone 1 à la position de 0 mm. La variation relative de la partie réelle de l'impédance dans la Zone 1 révèle des valeurs nulles, correspondant à l'absence de fibres dans cette zone. En passant à la Zone 2 (de 60 à 120 mm), on observe une augmentation de la

variation de la partie réel de l'impédance attribuée à la présence de fibres d'acier (40 % de la quantité totale), atteignant des valeurs de 4 %.

En entrant dans la Zone 3 à 120 mm, une diminution notable de l'impédance est constatée en raison de l'absence de fibres, atteignant des valeurs de 1 %. Lorsque le système CCF progresse jusqu'à 180 mm, entrant dans la Zone 4, une augmentation de l'impédance est observée, atteignant des valeurs de 7 %, reflétant la présence de fibres d'acier (60 % de la quantité totale). Il est important de noter que les valeurs maximales d'impédance dans la Zone 4 dépassent celles de la Zone 2, comme attendu, en raison d'une plus grande présence de fibres dans la Zone 4 par rapport à la zone 2.

À l'entrée du capteur CCF dans la Zone 5 à 240 mm, une diminution de l'impédance est observée, en accord avec l'absence de fibres, atteignant des valeurs approximatives de 0.

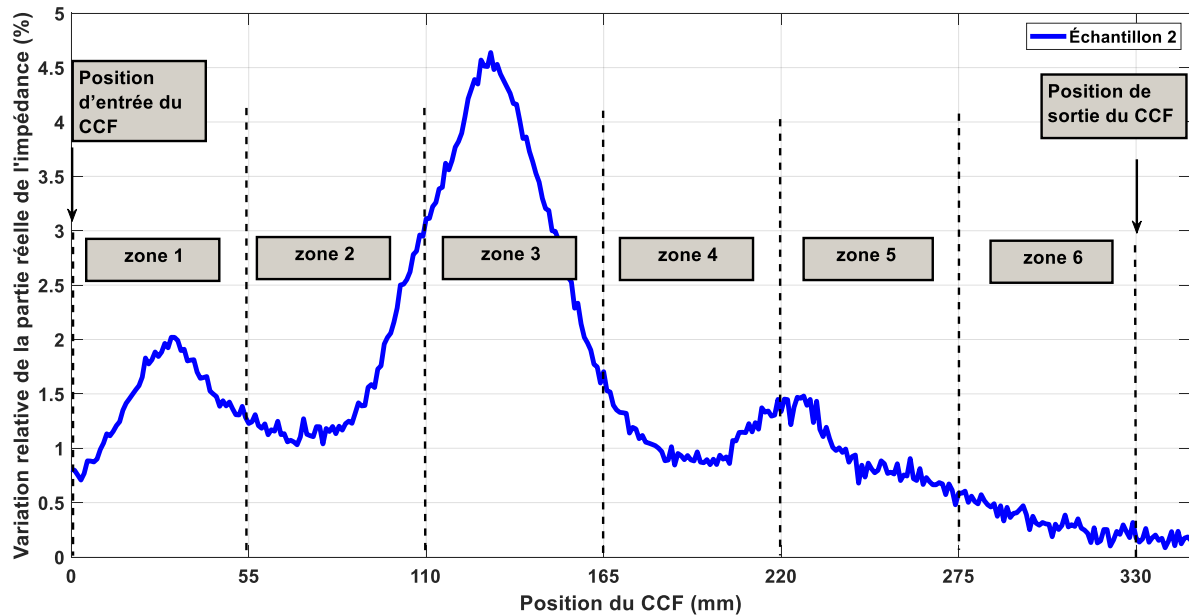
Il est essentiel de souligner que les résultats des mesures d'impédance correspondent bien à la distribution connue des fibres. Les faibles valeurs d'impédance s'alignent systématiquement avec les zones dépourvues de fibres d'acier.

La Figure 4. 9 illustre la variation relative de la partie réelle de l'impédance de l'échantillon 2. Comme le montre la figure, le système CCF entre dans la Zone 1 à une position de 0 mm. La partie réelle de l'impédance relative dans cette zone atteint une valeur de 2 %, ce taux est attribué à la présence de fibres d'acier (40 % de la quantité totale de fibres). En passant à la deuxième zone (55 mm), on observe une diminution de l'impédance due à l'absence de fibres d'acier, atteignant des valeurs de 1 %.

En pénétrant dans la Zone 3 à 110 mm, une augmentation notable de l'impédance se produit, ceci est attribué à la présence de fibres (60 % de la quantité totale), avoisinant 4,7 %. Lorsque le capteur progresse jusqu'à 165 m, entrant dans la Zone 4, une diminution significative, de l'ordre de 0,8 % , de l'impédance est constatée, en raison de l'absence de fibres d'acier dans cette zone.

Une légère augmentation de 1,5 % de l'impédance est observée à l'entrée de capteur dans la zone correspondant à 220 mm, due à la présence de fibres (10 % de la quantité totale de fibres d'acier). Enfin, lorsque le système CCF entre dans la Zone 6 à une position de 275 mm, on observe une diminution de l'impédance à 0,2 %, correspondant à l'absence de fibres dans cette zone. On remarque clairement que les faibles valeurs d'impédance s'alignent systématiquement avec les zones dépourvues de fibres d'acier.

En conclusion, la réponse en impédance met clairement en évidence les fractions volumiques de fibres les plus élevées et les plus faibles le long des échantillons, rendant ainsi possible la corrélation entre la distribution des fibres et la valeur de l'impédance.



**Figure 4. 9** Variation relative de la partie réelle de l'impédance de l'échantillon de BRFA 2 en fonction de la position du capteur, avec identification des zones 1 à 5.

#### 4. 3. 2 Échantillons de BRFA avec distribution de fibres aléatoire

##### 4. 3. 2. 1 préparation des échantillons

Dans cette partie la méthode proposée est appliquée à un ensemble d'échantillons présentant une distribution de fibres aléatoire et inconnue.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité de l'approche proposée dans des situations où la distribution des fibres n'est pas préalablement connue afin d'identifier les zones potentiellement vulnérables susceptibles d'être sujet de fissure à cause de l'absence ou la mauvaise orientation des fibres.

Afin de corréler la réponse électromagnétique des échantillons en BRFA et la réponse mécanique des échantillons, les résultats obtenus à l'aide de cette approche sont confrontés à ceux obtenus par une méthode destructive issus de la traction par fendage (essai brésilien).



**Figure 4. 10** Ensemble d'échantillons de BRFA avec une distribution aléatoire des fibres d'acier.

Un ensemble de 33 échantillons de BRFA (Figure 4. 10) a été méticuleusement préparé et organisé en cinq groupes distincts (Tableau 4. 2). Les fibres ont été soigneusement incorporées dans un mélange unique avec une fraction volumique de 1 % pour chaque groupe. La composition du mélange des échantillons est détaillée dans le Tableau 2.

**Tableau 4. 2** Composition du mélange des 33 échantillons de BRFA.

Group	A	F1	F2	F3	F4
Nombre d'échantillons	5	7	7	7	7
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	400	400	400	400	400
Eau (litre/m <sup>3</sup> )	160	160	160	160	160
Sable 0/3 (kg/m <sup>3</sup> )	623	623	623	623	623
Granulat 3/8 (kg/m <sup>3</sup> )	243	243	243	243	243
Granulat 8/15 (kg/m <sup>3</sup> )	881	881	881	881	881
Superplastifiant ADVA flow (litre)	4	4	4	4	4
Fraction volumique des fibres d'acier	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %

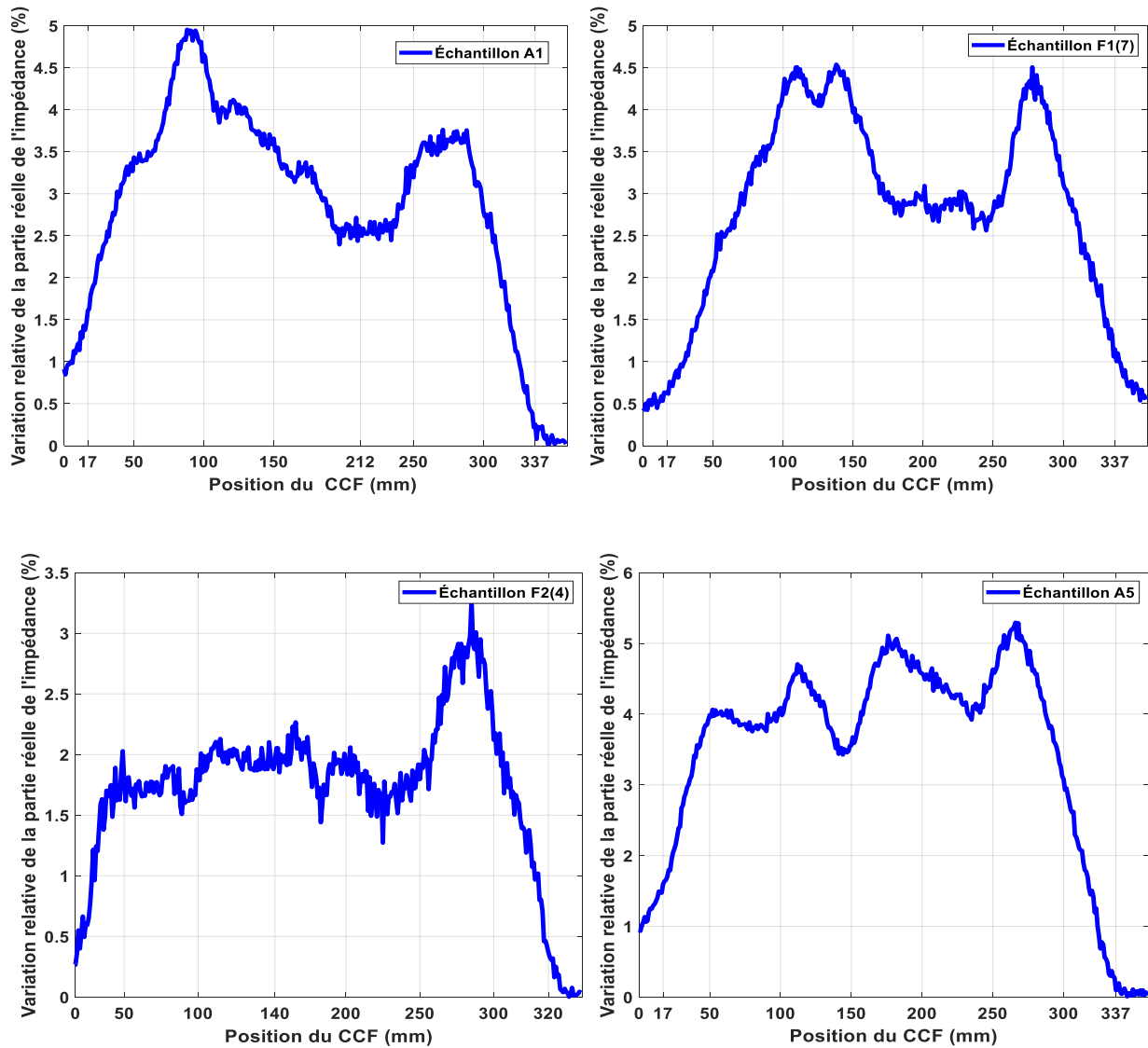
Les groupes d'échantillons F1, F2, F3 et F4 sont identiques en termes de composition, comme indiqué dans le tableau 4. 2. Les échantillons de BRFA de chaque groupe sont préparés séparément. Ainsi, la différence entre les échantillons de chaque groupe réside dans la distribution naturellement aléatoire des fibres.

Les échantillons ont été démoulés après 36 heures, puis placés dans une chambre de cure dépourvue d'humidité pendant 28 jours. Après la période de cure, le système de balayage non destructif par courants de Foucault est appliqué à chaque échantillon pour mesurer la partie réelle de l'impédance. Ensuite, afin de corréler ces mesures non destructives, des essais destructifs brésiliens sont réalisées sur l'ensemble des échantillons (Figure 4. 12). Cette technique est couramment utilisée pour mesurer indirectement la résistance à la traction de BRFA, fournit des informations sur la manière dont les fibres sont réparties à l'intérieur de l'échantillon, les essais brésiliens visent à évaluer les propriétés post-fissuration du BRFA, offrant ainsi des informations précieuses sur le comportement du matériau.

#### **4. 3. 2. 2 Mesure d'impédance par le system de balayage à CF**

Les échantillons BRFA A1, F1(7), F2 (4) et A5 ont été analysés à l'aide du système de balayage par courants de Foucault, permettant de mesurer localement la variation de l'impédance le long de chaque échantillon. À chaque position, l'impédance est mesurée avec et sans l'échantillon, afin de calculer la variation relative de la partie réelle de l'impédance. Les résultats de ces mesures sont présentés sur la figure 4. 11, illustrant les variations de la réponse électromagnétique locale en fonction de la position du capteur pour les deux échantillons.





**Figure 4. 11** Variation relative de la partie réelle de l'impédance des échantillons de BRFA A1, F1(7), F2(4) et A5 en fonction de la position du capteur.

#### 4. 3. 2. 3 les essais destructifs

Les essais destructifs brésiliens consistent à soumettre un échantillon cylindrique de BRFA à un chargement longitudinal (figure 4. 12), provoquant des ruptures approximativement dans le plan de la corde et générant des contraintes de traction perpendiculaires à la direction du chargement. De petites fissures peuvent ainsi se développer autour de l'axe des échantillons cylindriques, perpendiculairement à celui-ci.



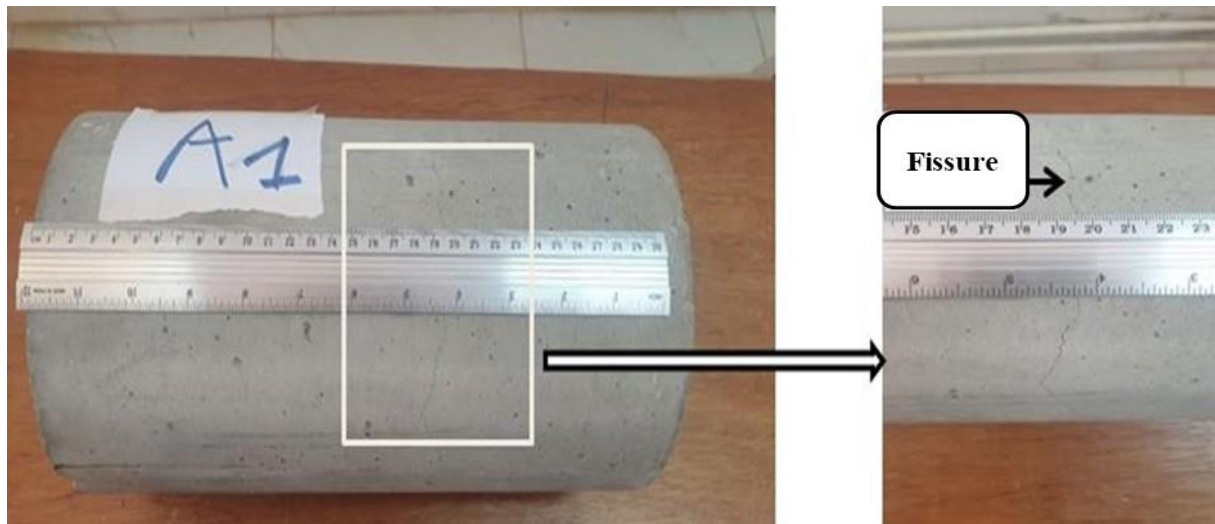
**Figure 4. 12** Échantillon de BRFA au moment de l'essai de traction brésilien destructif.

Après avoir effectué des essais destructifs brésiliens sur les 33 échantillons, des fissures se sont développées et sont apparues uniquement sur 3 échantillons, à savoir A1, F1(7) (et F2(4)). Ces fissures, qui apparaissent approximativement perpendiculaires à l'axe des échantillons cylindriques, révèlent des informations importantes sur la distribution interne des fibres.

Sachant que les fibres d'acier renforcent la résistance à la traction, agissant comme un pont pour absorber les forces de contrainte. Cette action de pontage permet de transférer les contraintes à travers les fissures potentielles, empêchant ainsi leur formation et leur propagation. Par conséquent, les zones où les fibres sont réparties de manière homogène présentent une plus grande résistance au développement des fissures, ce qui explique l'absence de fissures visibles dans les 30 autres échantillons. En revanche, les zones avec une teneur en fibres insuffisante sont plus susceptibles et vulnérables à la formation de fissures.

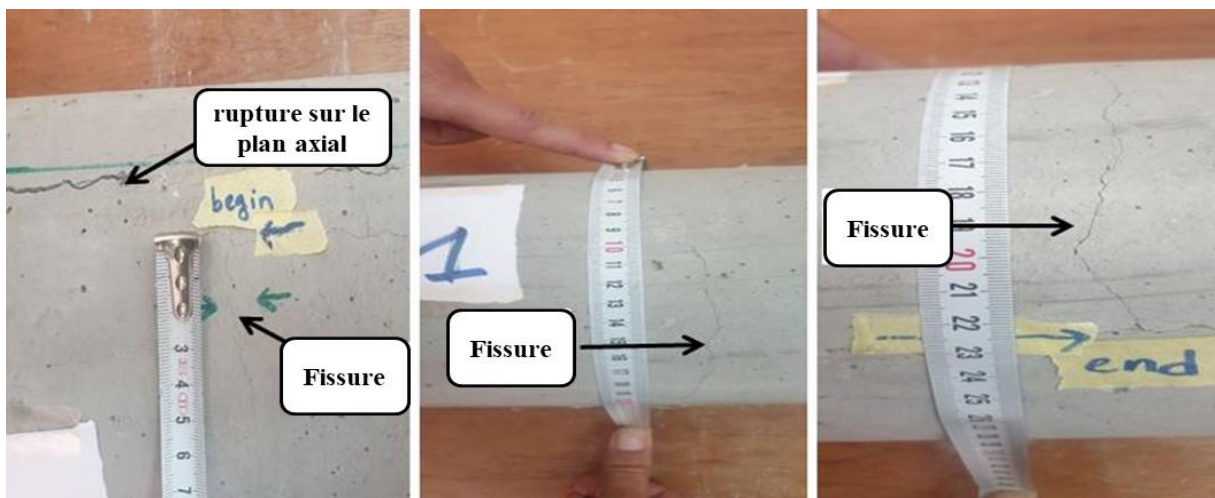
En analysant le motif et l'étendue de ces fissures, il est possible d'évaluer la dispersion des fibres dans le béton.

La Figure 4. 13 montre l'échantillon A1 de BRFA après l'essai destructif brésilien, où une règle mesure la fissure depuis le sommet de l'échantillon. On observe que la fissure est située à une distance de 195 mm du sommet.



**Figure 4. 13.** Échantillon de BRFA A1 après l'essai destructif.

La Figure 4. 14 illustre le parcours exact de la fissure dans l'échantillon A1 de BRFA, qui s'est formée approximativement perpendiculairement à l'axe de l'échantillon cylindrique. La longueur mesurée de la fissure est de 22,5 cm

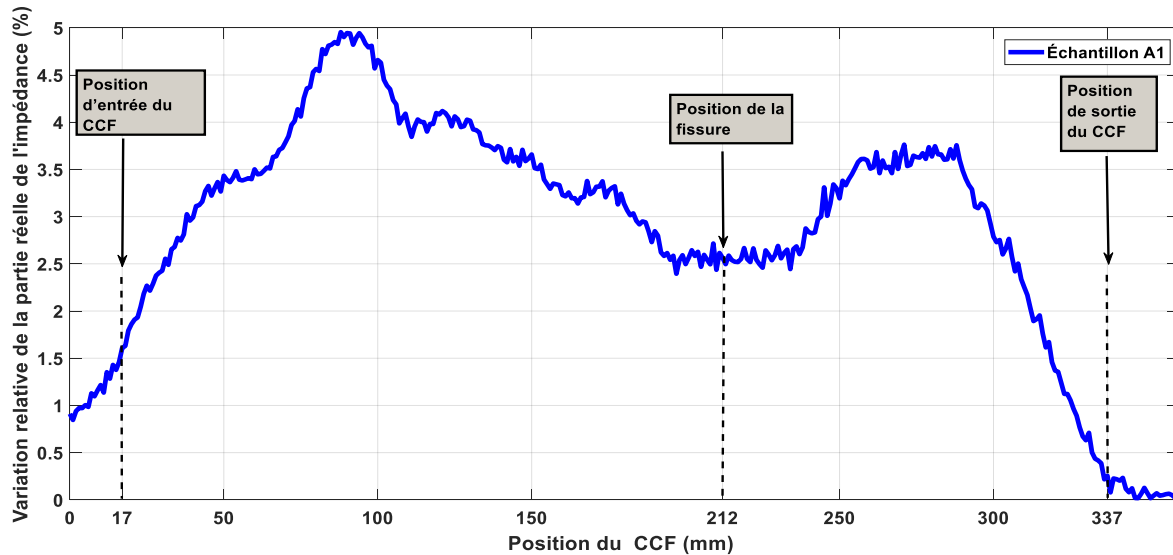


**Figure 4. 14** Trajet et longueur de la fissure dans l'échantillon de BRFA A1.

La Figure 4. 15 représente les variations de la partie réelle de l'impédance pour l'échantillon A1 de BRFA en fonction de la position du capteur. Les positions de début (0 mm) et de fin (320 mm) (Figure 4. 14) correspondent aux extrémités de l'échantillon.

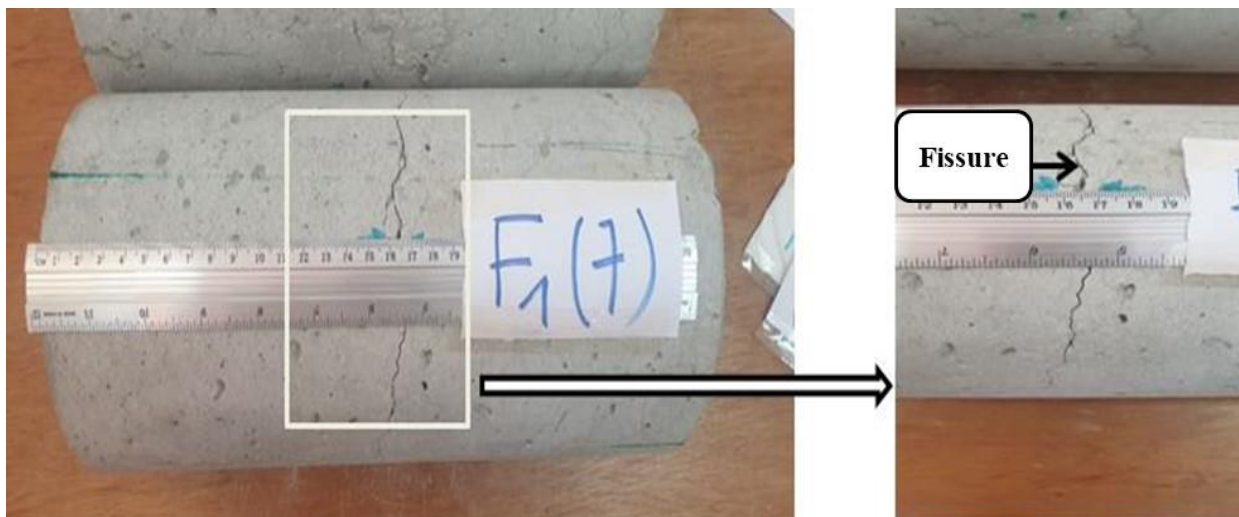
Comme indique dans sur la figure 4. 14. La fissure s'est formée à la position de 195 mm, à cette position comme indiqué dans la figure 4. 15, la partie réelle de l'impédance du capteur est remarquablement faible, d'ordre de 2,5 %, soit la moitié de sa valeur maximale (5 %). Cette faible valeur indique un problème potentiel, soit un manque de fibres dans cette zone, soit une

mauvaise position des fibres. De plus, il est important de noter que la zone où la variation de la partie réelle de l'impédance est faible s'étend sur une distance considérable, d'environ 37 mm. Dans cette zone, les fibres sont dispersées de manière inadéquate, limitant leur capacité à absorber efficacement les forces de contrainte, ce qui entraîne la formation de la fissure.



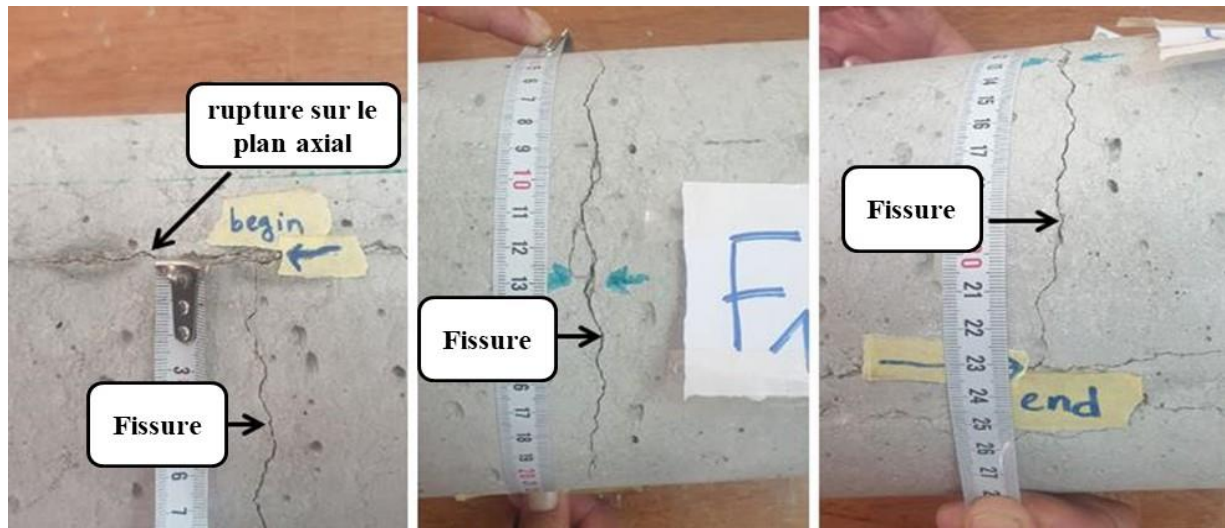
**Figure. 4.15** Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA A1.

La Figure 4. 16 représente l'état de l'échantillon de BRFA F1(7) après avoir subi l'essai destructif brésilien. La fissure est observée à 165 mm du sommet.



**Figure 4. 16** Échantillon de BRFA F1(7) après l'essai destructif.

La Figure 4. 17 illustre le parcours exact de la fissure dans l'échantillon de BRFA F1(7), qui s'est formée approximativement perpendiculairement à l'axe de l'échantillon cylindrique. La longueur mesurée de la fissure est de 230 mm.

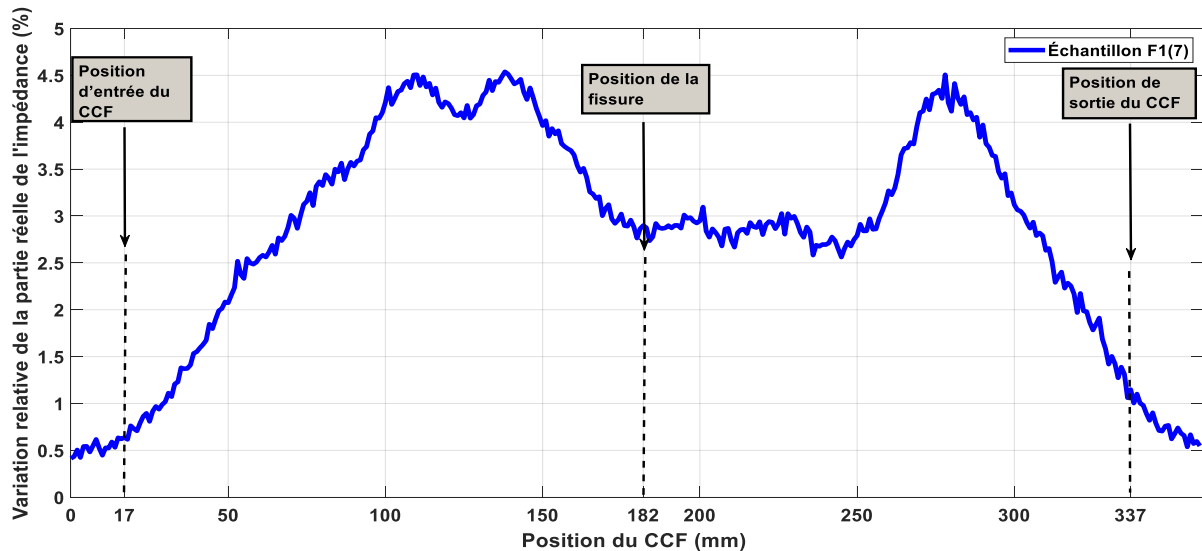


**Figure 4. 17** Trajet et longueur de la fissure dans l'échantillon de BRFA F1(7).

La Figure 4. 18 illustre les variations de la partie réelle de l'impédance CCF pour l'échantillon de BRFA F1(7). A La position de la fissure qui est localisée à 165 mm . Une valeur d'impédance remarquablement faible d'environ 3 %, soit une baisse de 5 %, par rapport aux valeurs maximales, ce qui indique un manque de fibres ou un mauvais positionnement des fibres dans cette zone de l'échantillon.

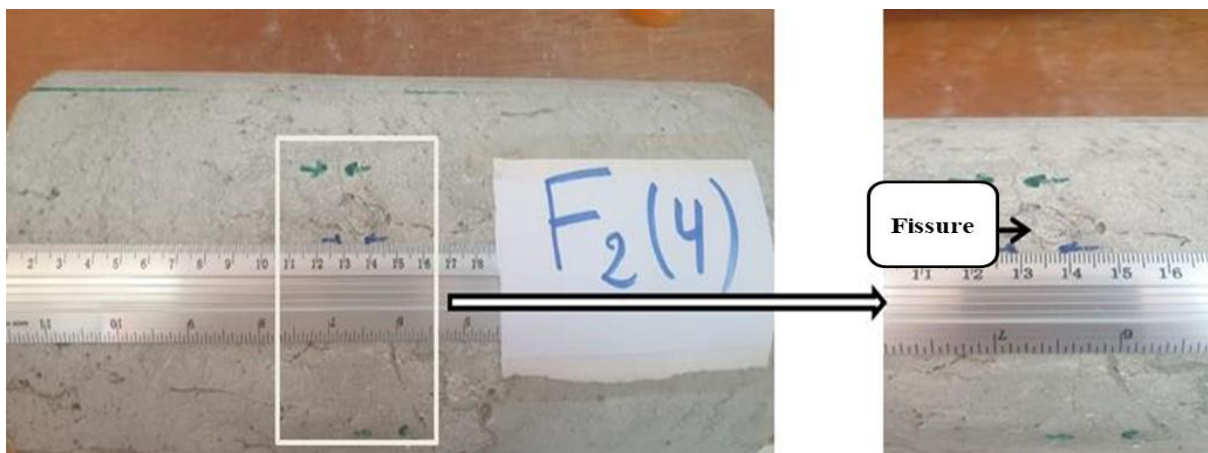
De plus, la zone de faible variation d'impédance, s'étendant sur environ 83 mm, couvrant une distance significative où les fibres sont dispersées de manière inadéquate, rendant le matériau vulnérable aux forces de contrainte. La mauvaise dispersion des fibres est identifiée comme la cause de cette vulnérabilité.





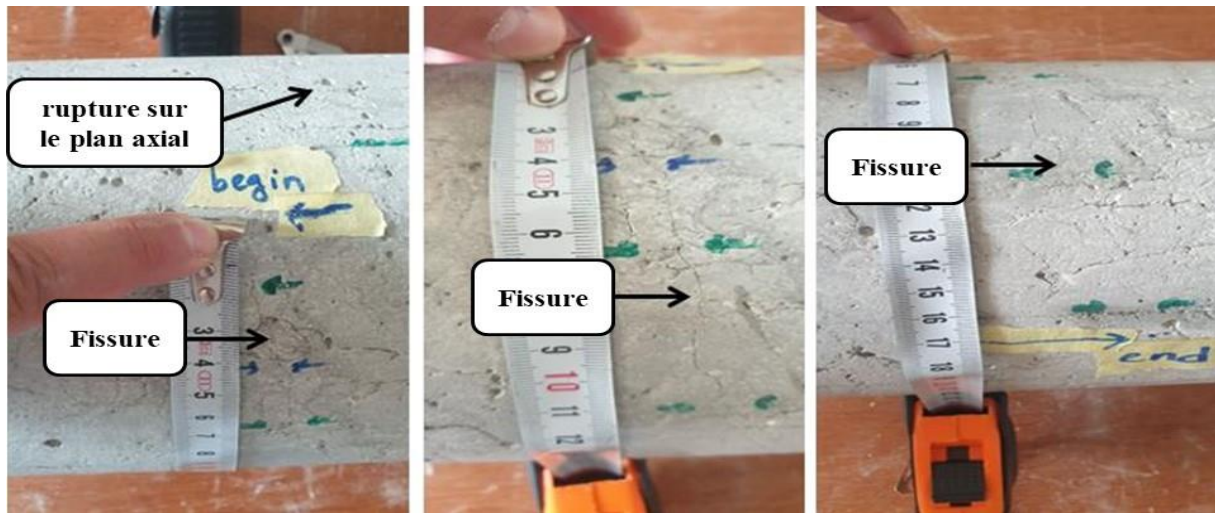
**Figure 4. 18** Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA F1(7).

La Figure 4. 19 illustre l'échantillon de BRFA F2(4) après avoir subi l'essai destructif brésilien. Dans cet échantillon la fissure est observée à une position située à 135 mm du sommet de l'échantillon.



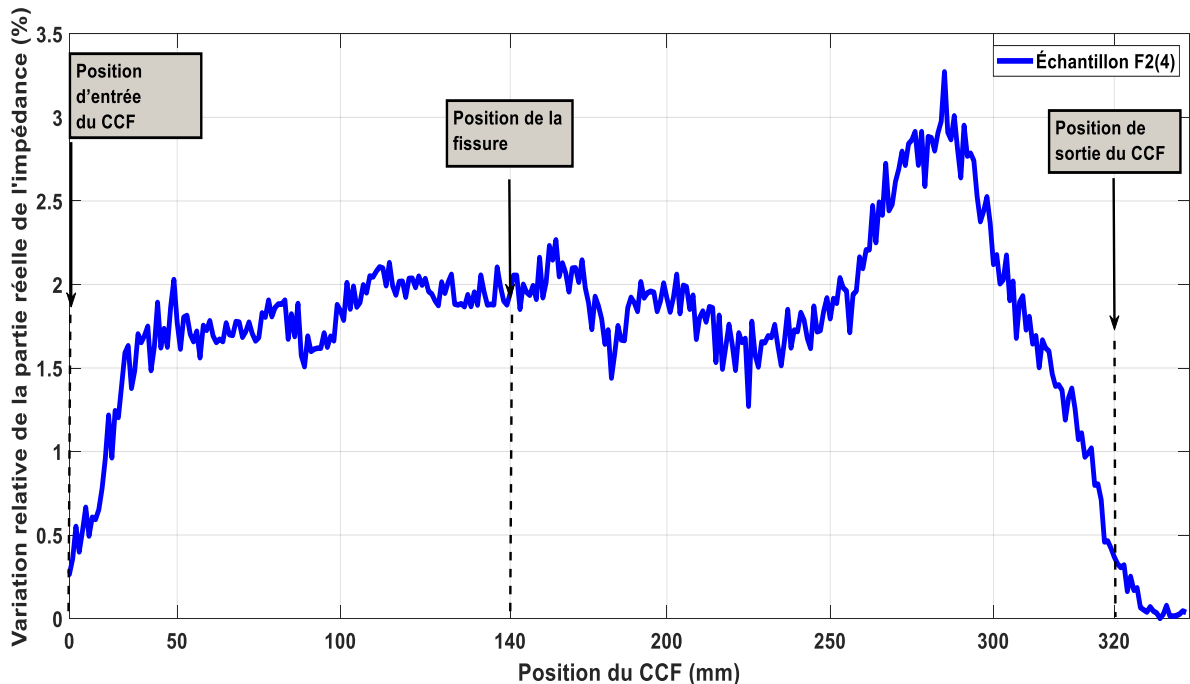
**Figure 4. 19** Échantillon de BRFA F2(4) après l'essai destructif.

La Figure 4. 20 illustre le parcours exact de la fissure dans l'échantillon de BRFA F2(4), qui s'est formée approximativement perpendiculairement à l'axe de l'échantillon cylindrique. La longueur mesurée de la fissure est de 17 cm.



**Figure 4.20** Trajet et longueur de la fissure dans l'échantillon de BRFA F2(4).

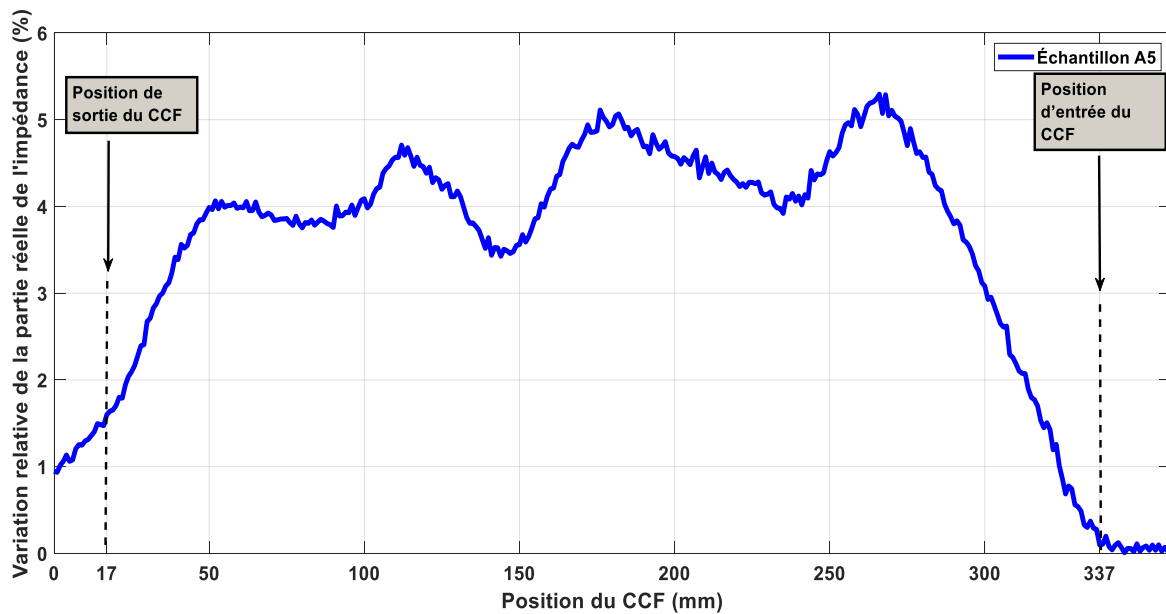
La Figure 4. 21 illustre les variations de la partie réelle de l'impédance CCF pour l'échantillon de BRFA F2(4). De la même manière que les échantillons précédents, la position de la fissure (135 mm) correspond à une valeur d'impédance faible, égale 1,8 %, soit environ la moitié de la valeur maximale d'impédance, ce qui indique que la mauvaise dispersion des fibres est la cause du développement de la fissure dans cette zone.



**Figure 4. 21** Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA F2(4).

La zone de faible variation d'impédance s'étend sur environ 200 mm, couvrant une distance importante où les fibres sont dispersées de manière inappropriée, rendant le matériau vulnérable aux forces de contrainte et entraînant ainsi la formation de la fissure dans cette zone.

Il est noté que 30 échantillons parmi les 33 préparés n'ont développés aucune fissure suite aux essais traction par fendage. La Figure 4. 22 illustre la variation de la partie réelle de l'impédance CCF pour un échantillon parmi ceux qui n'ont pas développée des fissures (exemple échantillon A5).



**Figure 4. 22** Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur à courants de Foucault (CCF) en fonction de la position du capteur sur l'échantillon de BRFA A5.

La mesure de l'impédance varie entre 4 % et 5 %, avec une légère diminution observée à 150 mm, atteignant une valeur de 3,5 %. Cette valeur remonte rapidement pour atteindre de nouveau 4 %.

L'absence de fissures dans cette zone est attribuée à l'absence de zones présentant des variations significativement faibles de l'impédance. De plus, la valeur de 3,5 % ne s'étend pas sur une grande distance, indiquant que les fibres qui sont potentiellement mal réparties couvrent seulement 10 mm. En outre, les zones présentant une forte variation d'impédance à proximité de la zone vulnérable (avec une faible variation d'impédance) absorbent l'énergie des contraintes, ce qui peut exacerber le risque de formation de fissures.



Il est à noter que tous les échantillons n'ayant pas développé de fissures présentent la même signature, comme celle montrée sur la Figure 18.

Les résultats obtenus ont permis d'identifier les zones vulnérables où des fissures sont apparues lors des essais destructifs, confirmées par une observation visuelle directe. Ces fissures sont associées soit à un manque de fibres dans la zone, soit à un mauvais positionnement des fibres.

La signature des variations d'impédance donnée par le système de balayage non destructif à courants de Foucault confirme la présence de ces zones vulnérables susceptibles de fissuration, décrites par de larges zones de faible variation d'impédance. Ainsi, les corrélations entre la signature des variations d'impédance et les résultats des essais brésiliens permettent de confirmer la faisabilité de la prédiction des fissures sans avoir recours aux essais destructifs.

Puisque la fraction volumique des fibres reste constante à 1 % pour tous les groupes, des fissures sont apparues uniquement dans trois échantillons en raison de la distribution des fibres dans le béton. Dans ces échantillons, la distribution des fibres était irrégulière, créant des zones de vulnérabilité où des fissures se développent sous contrainte. En revanche, dans les 30 autres échantillons, la distribution des fibres a été plus uniforme, empêchant le développement de fissures.

La corrélation entre les zones de fissures et les signatures de variation d'impédance a été effectuée de manière successive. Cela nous a permis d'affirmer que les fissures ne se produisent que dans les zones présentant les valeurs d'impédance les plus faibles et une grande étendue de ces zones. Ces fissures se forment approximativement le long de l'axe perpendiculaire au cylindre.

L'approche proposée permet donc de prédire la formation de fissures sur la base du critère des zones d'impédance les plus faibles et de leur large étendue.

#### **4. 4 Conclusion**

Dans ce chapitre, une méthode basée sur les courants de Foucault innovante a été proposée et validée pour évaluer de manière non destructive la répartition des fibres d'acier dans le BRFA. La méthode repose sur un système de balayage par courants de Foucault, combiné à un dispositif de déplacement motorisé permettant une cartographie zonale précise de la distribution des fibres. Cette approche représente une avancée significative par rapport aux méthodes

traditionnelles en offrant des mesures détaillées et localisées, tout en conservant un caractère non destructif.

Les résultats obtenus à travers deux séries d'échantillons démontrent l'efficacité et la robustesse de la méthode. Les échantillons avec une répartition de fibres connue ont permis de valider la capacité de l'approche à détecter des variations locales de la fraction volumique des fibres et à différencier distinctement les zones de concentration inégale. En parallèle, les échantillons avec une répartition aléatoire ont montré une corrélation claire entre les variations d'impédance mesurées et les propriétés mécaniques post-fissuration, notamment via les essais destructifs brésiliens.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les matériaux composites renforcés de fibres d'acier (BRFA) occupent une place stratégique dans le domaine du génie civil grâce à leurs performances améliorées en termes de résistance mécanique, durabilité et capacité d'absorption d'énergie. Leur comportement dépend largement de la distribution et de l'orientation des fibres d'acier, qui influencent directement leurs propriétés mécaniques. Pour garantir une évaluation précise et fiable de ces matériaux, des méthodes non destructives avancées sont essentielles.

Dans ce contexte, notre travail de recherche s'est articulé autour de plusieurs axes complémentaires visant à améliorer l'évaluation de la distribution des fibres dans le BRFA par les méthodes électromagnétiques.

Dans un premier temps on s'est intéressé à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des fibres d'acier utilisées dans le BRFA, en particulier leur conductivité électrique et leur perméabilité magnétique qui a une forme complexe en fonction de la fréquence. Une approche combinant les essais expérimentaux et un modèle numérique est adoptée afin de déterminer ces paramètres avec une grande fiabilité. Cette méthodologie repose sur la mesure de l'impédance d'un capteur solénoïdal à courants de Foucault et la résolution d'un problème inverse en utilisant une solution logicielle à licence libre FEMM et Python, garantissant une accessibilité à l'ensemble des chercheurs. L'identification des valeurs précises de la perméabilité magnétique et de la conductivité nous a permis de comprendre le comportement électromagnétique du BRFA et d'affiner les techniques d'évaluation basées sur les courants de Foucault. Cette contribution constitue une avancée majeure en fournissant des références précises pour la conception de capteurs et le développement de méthodes d'analyse adaptées à l'évaluation non destructive des matériaux composites renforcés en fibres d'acier.

Nous avons ensuite entamé une analyse paramétrique de l'influence de la distribution des fibres d'acier sur la réponse électromagnétique des capteurs CF. L'objectif est d'évaluer l'impact du positionnement, de l'orientation et du dosage des fibres sur la mesure de l'impédance, afin de mieux comprendre leur rôle dans la caractérisation du BRFA et d'optimiser les techniques de contrôle non destructif.

Une étude paramétrique approfondie est menée pour examiner la relation entre la concentration des fibres et la variation d'impédance, ainsi que l'effet de leur orientation par rapport au champ magnétique appliqué. De plus, l'influence de la position des fibres par rapport au capteur est analysée, afin de quantifier son impact sur la réponse électromagnétique mesurée.

Les résultats obtenus permettent d'affiner l'interprétation des signatures du capteur CF et d'améliorer la précision dans l'évaluation de la distribution des fibres dans le BRFA. Cette contribution vise à renforcer la fiabilité des méthodes d'analyse électromagnétiques et à proposer des stratégies adaptées pour une meilleure détection d'anomalies et de caractérisation du BRFA.

Le troisième volet de cette étude a porté sur une amélioration de la méthode d'évaluation inductive antérieur dans laquelle le profil de la distribution des fibres d'acier le long des échantillons en BRFA recherché. Plusieurs groupes d'échantillons en béton fibré ont été réalisés. La réponse en impédance capteur CF, est mesurée le long de chaque échantillon pour avoir leur signature électromagnétique. Dans ce contexte un system motorisé permettant un scan précis le long de l'échantillon test est proposé et mis en œuvre, conduisant à une analyse détaillée et continue de la distribution des fibres le long de l'échantillon.

Le système proposé est une contribution majeure qui a permis la détection des variations locales des fractions volumiques des fibres, offrant ainsi une meilleure évaluation de la répartition des fibres dans la matrice cimentaire. Nous avons démontré que cette approche permet d'identifier les zones de concentration inhomogène, réduisant ainsi les limites des anciennes techniques inductives.

Afin de valider les résultats obtenus de l'approche expérimentale développée, ils ont été confrontés aux mesures issues des essais destructifs (tests de traction par fendage). La comparaison effectuée a confirmé une corrélation directe entre la distribution des fibres et les performances mécaniques post-fissuration du BRFA. Ces résultats ont démontré que les zones à faible impédance (creux apparents) correspondent à des régions à faible densité de fibres ou à orientation non adéquates, présentant ainsi une plus grande vulnérabilité à la fissuration sous contrainte.

Grâce à l'approche proposée, nous avons pu améliorer la précision de la technique de contrôle non destructif par CF, en proposant un outil capable de fournir un profil d'impédance exprimant avec précision la distribution localisée des fibres dans le BRFA. Cette contribution ouvre ainsi une voie à l'utilisation de méthodes non destructives avancées adaptées aux applications industrielles, permettant une meilleure évaluation et optimisation des structures en béton renforcé de fibres d'acier.

### Perspective

- Simulation numérique 3D intégrant l'échantillon de béton renforcé en fibres d'acier et le capteur CF. La simulation exploitera les propriétés électromagnétiques obtenues au chapitre 2 afin de prédire la réponse électromagnétique du BRFA sous l'effet des champs magnétiques variables.
- Étendre l'application de la méthode inductive développée à des structures de formes complexes, telles que des dalles ou des poutres, pour évaluer leur distribution de fibres à grande échelle.
- Application de l'approche proposée sur des fibres d'acier de diamètres et de types différents, afin d'évaluer de manière approfondie l'influence de ces paramètres sur la réponse électromagnétique du capteur et d'optimiser la méthode inductive en fonction des caractéristiques des fibres.

## Référence

- [1] Fischer, G. (2015). Matériaux composites aéronautiques hautes températures à matrice bismaléimide renforcée (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).
- [2] Tanguy, M. (2016). Contribution à l'étude de matériaux composites à matrice polypropylène et renforcés par des fibres végétales: de la fibre à la pièce automobile (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Sud).
- [3] Zombré, W. (2019). Durabilité des matériaux composites dans un environnement Génie Civil: expérimentation multi-échelle et analyse statistique (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- [4] Perron, C. (2017). Définition et mise en œuvre d'un matériau composite à matrice métallique pour les packagings d'électronique embarquée (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- [5] Bensaid, S. (2006). Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes (Doctoral dissertation, Université de Nantes).
- [6] Tossou, E. (2019). Développement de nouveaux composites hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin: mise en œuvre et caractérisation mécanique (Doctoral dissertation, Normandie Université).
- [7] Mohammed Riad, Kired. (2019). Contribution to the modeling of structures based on nano-composites in the presence of multiple heterogeneities.
- [8] Priyanka, Pragati & Dixit, Anurag & Mali, Harlal. (2017). High-Strength Hybrid Textile Composites with Carbon, Kevlar, and E-Glass Fibers for Impact-Resistant Structures. A Review.. *Mechanics of Composite Materials*. 53. 10.1007/s11029-017-9696-2.
- [9] Ratiarisoa, L.B. (2019). Etude de matériaux naturels 2D : Potentialités d'utilisation comme renfort de matériaux composites.
- [10] Griesser, A. (2012). Réalisation de matériaux composites à conductivité thermique accrue pour l'aéronautique (Doctoral dissertation, Université Bordeaux 1).
- [11] Renault, T. (2001). Les matériaux composites dans l'automobile. *Mécanique & industries*, 2(3), 211-218.
- [12] Allagui, S., El Mahi, A., Rebiere, J. L., Bouguecha, A., Beyaoui, M., & Haddar, M. (2019, July). Contrôle de santé intégré de matériau bio-composite unidirectionnel. In 21ème Journées Nationales sur les Composites.
- [13] Petersen, R. (2016). Carbon fiber biocompatibility for implants. *Fibers*, 4(1), 1.

## Références

- [14] Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Devarajan, P., Stefańska, A., Wodzyński, Ł., & Koda, E. (2023). Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites in civil engineering application—a comprehensive review. *Buildings*, 13(6), 1509.
- [15] Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374.
- [16] Casanova, P. (1995). Bétons renforcés de fibres métalliques: du matériau à la structure. Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant (Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
- [17] Rezaei, F., Yunus, R., Ibrahim, N. A., & Mahdi, E. D. O. S. C. F. R. P. C. F. C. B. (2008). Development of short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composite for car bonnet. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47(4), 351-357.
- [18] Gao, J., Sun, W., & Morino, K. (1997). Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 307-313.
- [19] Yan, X., Gao, Y., Luo, Y., Bi, Y., & Xie, Y. (2021, July). Effect of different steel fiber types on mechanical properties of ultra-high performance concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1167, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- [20] YAGOUB, M. (2022). Caractérisation expérimentale d'un matériau composite Cas d'une matrice cimentaire et des renforts hybrides (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et de la technologie).
- [21] ACI Committee 544. (2002). Report on Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.1R-02). American Concrete Institute. ISBN 9780870315282.
- [22] Zia, A., & Ali, M. (2017). Behavior of fiber reinforced concrete for controlling the rate of cracking in canal-lining. *Construction and Building Materials*, 155, 726-739.
- [23] Paul, S. C., van Zijl, G. P., & Šavija, B. (2020). Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*, 13(20), 4562.
- [24] Bhat, A. R., & Vikram, A. (2023). Performance of concrete with polypropylene fibre and polyvinyl chloride fibre. *Materials Today: Proceedings*.
- [25] Belferrag, A. (2016). Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [26] Djamila, M. M. (2024). Synthèse et caractérisation d'un matériau composite à base de fibre de verre (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem).



## Références

- [27] Derombise, G. (2009). Comportement à long terme des fibres aramides en milieux neutres et alcalins (Doctoral dissertation, Ecole des Ponts ParisTech).
- [28] Balaguru, P., Nanni, A., Giancaspro, J. "FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures", a guide to fundamentals and design for repair and retrofit. Taylor & Francis, London, UK, 334 p, 2009.
- [29] Jassal, M., & Ghosh, S. (2002). Aramid fibres-An overview.
- [30] Chaabani, C. "Composites à fibres de carbone : récupération des fibres par solvolysse hydrothermale. Impact sur la qualité des fibres et valorisation de la phase liquide", Thèse de doctorat, Université Fédérale Toulouse-Midi-Pyrénées, 2017, pp 200.
- [31] Leveuf, L. (2017). Caractérisation et modélisation du comportement mécanique et de la tenue en fatigue d'un composite thermoplastique à fibres de carbone courtes pour applications aéronautiques (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest).
- [32] SETTI, F. (2021). Contribution à l'étude de l'effet d'échelle sur les propriétés d'un béton fibré (Doctoral dissertation, Université de Chlef).
- [33] WANG, Q. S., LI, X. B., ZHAO, G. Y., Peng, S. H. A. O., & YAO, J. R. (2008). Experiment on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete and application in deep underground engineering. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(1), 64-81.
- [34] Gherdaoui, L., Bensaid, S., Trichet, D., Houassine, H., & Saoudi, N. (2023). Complex Magnetic Permeability Evaluation of Steel Fibers Using Eddy Current NDE and Inverse Problem Methods. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 113, 81-90.
- [35] Guermiti, L. "Contribution à l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques", Thèse de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013, pp 145.
- [36] Faris, M. A., Abdullah, M. M. A. B., Muniandy, R., Abu Hashim, M. F., Błoch, K., Jeż, B., ... & Ghazali, M. F. (2021). Comparison of hook and straight steel fibers addition on Malaysian fly ash-based geopolymer concrete on the slump, density, water absorption and mechanical properties. *Materials*, 14(5), 1310.
- [37] Xu, L., Li, B., Chi, Y., Li, C., Huang, B., & Shi, Y. (2018). Stress-Strain Relation of Steel-Polypropylene-Blended Fiber-Reinforced Concrete under Uniaxial Cyclic Compression. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), 9174943.
- [38] Abdel-Rahman, A. M., Hassan, N. Z., & Soliman, A. M. (2018). Punching shear behavior of reinforced concrete slabs using steel fibers in the mix. *HBRC journal*, 14(3), 272-281.

## Références

- [39] Konieczny, K., Dudek, D., & Kukielka, A. (2024). Load Capacity of Screw Anchor Installed in Concrete Substrate Reinforced with Steel Fibers Depending on Fiber Content. *Materials*, 17(5), 1105.
- [40] Gontero, R. (2022). Modélisation du comportement mécanique des structures en bétons fibrés à ultra-hautes performances (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III; Université Laval (Québec, Canada)).
- [41] De Montaignac, R., Massicotte, B., Charron, J. P., & Nour, A. (2012). Design of BRFA structural elements: post-cracking tensile strength measurement. *Materials and structures*, 45, 609-622.
- [42] Ige, O. A. (2017). Key Factors Affecting Distribution and Orientation of Fibres in Steel Fibre Reinforced Concrete and Subsequent Effects on Mechanical Properties (Doctoral dissertation, University of Portsmouth).
- [43] Balendran, R., Zhou, F., Nadeem, A., & Leung, A. (2002). Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. *Building and Environment*, 37(12), 1361-1367.
- [44] Yazıcı, Ş., İnan, G., & Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of BRFA. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1250-1253.
- [45] Tanoli, W. A., Naseer, A. M. J. A. D., & Wahab, F. A. Z. L. I. (2014). Effect of steel fibers on compressive and tensile strength of concrete. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 3(4), 393-397.
- [46] Akcay, B., & Tasdemir, M. A. (2012). Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 287-293.
- [47] Bayramov, F., Taşdemir, C., & Taşdemir, M. (2004). Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. *Cement and concrete composites*, 26(6), 665-675.
- [48] Ou, Y. C., Tsai, M. S., Liu, K. Y., & Chang, K. C. (2012). Compressive behavior of steel-fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2), 207-215.
- [49] Soutsos, M., Le, T., & Lampropoulos, A. (2012). Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 36, 704-710.

## Références

- [50] Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Parthiban, D., Jakimiuk, A., Bayat, H., Podlasek, A., ... & Koda, E. (2022). A comprehensive analysis of the use of BRFA in structures and its current state of development in the construction industry. *Materials*, 15(19), 7012.
- [51] Eddy, D. (2008). UK's biggest-ever BRFA flooring project. *Concrete*, 42(2), 24.
- [52] Henager, C. H. (1981). Steel fibrous shotcrete: a summary of the state-of-the-art. *Concrete International: Design and Construction*, 3(1), 55-58.
- [53] The Concrete Society. (2007). Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete. Camberley, Surrey.
- [54] Portland Cement Association. (1991). SP039T - MIT Fiber reinforced concrete. Illinois USA: Portland Cement Assn.
- [55] Bekaert NV. (2013) Technical Presentation; Reinforcing the future. New and ultimate Dramix range. London..
- [56] Akkaya, Y., S. P. Shah, and B. Ankenman, "Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 127, no. 4, 311-316, 2001.
- [57] Kang, S.T. and J.K Kim, "The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious.
- [58] Raju, R. A., Lim, S., Akiyama, M., & Kageyama, T. (2020). Effects of concrete flow on the distribution and orientation of fibers and flexural behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete beams. *Construction and Building Materials*, 262, 119963.
- [59] Lee, S., Lee, J., & Lee, C. (2023). Effects of inherent and external factors on the distributions of steel fibers in rectangular section of BRFA. *Construction and Building Materials*, 408, 133748.
- [60] Gherdaoui, L., Bensaid, S., Saoudi, N., Trichet, D., & Houassine, H. (2024). Eddy current-based measurement system for evaluating fiber distribution to predict cracks in steel fiber-reinforced concrete: experimental study.
- [61] Daviau-Desnoyers, D. (2015). Caractérisation et modélisation de l'évolution de la fissuration des bétons renforcés de fibres sous charge soutenue (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).
- [62] Guenet, T. (2016). Modélisation du comportement des bétons fibrés à ultra-hautes performances par la micromécanique: effet de l'orientation des fibres à l'échelle de la structure (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

- [63] Li, Z., Zhang, H., & Wang, R. (2022). Influence of steel fiber distribution on splitting damage and transport properties of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104373.
- [64] Kheddache, L., Chahour, K., & Safi, B. (2020). Effect of fiber distribution on the mechanical behavior in bending of self-compacting mortars. *Selected Scientific Papers- Journal of Civil Engineering*, 15(1), 129-148.
- [65] Zhou, B., & Uchida, Y. (2017). Relationship between fiber orientation/distribution and post-cracking behaviour in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Composites*, 83, 66-75.
- [66] Doyon-Barbant, J., & Charron, J. P. (2018). Impact of fibre orientation on tensile, bending and shear behaviors of a steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 51, 1-16.
- [67] Dupont, D., & Vandewalle, L. (2005). Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), 391-398.
- [68] Fladr, J., Bily, P., & Broukalova, I. (2019). Evaluation of steel fiber distribution in concrete by computer aided image analysis. *Compos. Mater. Eng*, 1(1), 49-70.
- [69] Kooiman, A. G., Van Der Veen, C., & Walraven, J. C. (2000). Modelling the post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete for structural design purposes. *HERON- ENGLISH EDITION*-, 45(4), 275-308.
- [70] Liu, J., Li, C., Liu, J., Cui, G., & Yang, Z. (2013). Study on 3D spatial distribution of steel fibers in fiber reinforced cementitious composites through micro-CT technique. *Construction and Building Materials*, 48, 656-661.
- [71] Lataste, J. F., Behloul, M., & Breysse, D. (2008). Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *Ndt & E International*, 41(8), 638-647.
- [72] Ozyurt, N., Mason, T. O., & Shah, S. P. (2006). Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: An industrial-scale application. *Cement and concrete research*, 36(9), 1653-1660.
- [73] Faifer, M., Ottoboni, R., Toscani, S., & Ferrara, L. (2010, May). Steel fiber reinforced concrete characterization based on a magnetic probe. In *2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings* (pp. 157-162). IEEE.
- [74] Van Damme, S., Franchois, A., De Zutter, D., & Taerwe, L. (2004). Nondestructive determination of the steel fiber content in concrete slabs with an open-ended coaxial probe. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11), 2511-2521.

## Références

- [75] Cavalaro, S. H., López-Carreño, R., Torrents, J. M., Aguado, A., & Juan-García, P. (2016). Assessment of fibre content and 3D profile in cylindrical BRFA specimens. *Materials and Structures*, 49, 577-595.
- [76] Bowler, N., “Frequency-dependence of relative complex magnetic permeability in steel,” *AIP Conference Proceedings*, Vol. 820, No. 1, 1269–1276, 2006.
- [77] Okumura, Y., K. Fujii, T. Nagaya, et al., “Simple permeability measurement of thin ferromagnetic sheets at low frequency using LCR meter,” *Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 8, No. 2, 53–58, 2018.
- [78] Fouladgar, J. (1997). The inverse problem methodology for the measurement of the permeability of the ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on magnetics*, 33(2), 2139-2142.
- [79] Chen, Y., X. Wang, H. Chen, et al., “Novel ultra-wide band (10 MHz-26 GHz) permeability measurements for magnetic films,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, 1–4, 2018.
- [80] Radonić, V., N. Blaž, and L. Živanov, “Measurement of complex permeability using short coaxial line reflection method,” *Acta Physica Polonica A*, Vol. 117, No. 5, 820–824, 2010.
- [81] Kacki, M., M. S. Rylko, J. G. Hayes, et al., “Measurement methods for high-frequency characterizations of permeability, permittivity, and core loss of Mn-Zn ferrite cores,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 37, No. 12, 15152–15162, 2022.
- [82] FEMM (Version 4.2) [Computer software], 2021.
- [83] David Meeker (2021) PyFEMM (0.1.3) Available from: <https://www.femm.info/wiki/pyFEMM>.
- [84] SAFER, O. A. Contributions à la Modélisation et à la Conception d’un Banc d’essai d’Evolution Non Destructive par Courants de Foucault des Matériaux Composites Anisotropes (Doctoral dissertation, Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf).
- [85] Bensaid, S., Trichet, D., & Fouladgar, J. (2015). Optimal design of a rotating eddy-current probe—Application to characterization of anisotropic conductive materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(3), 1-4.
- [86] Bensaid, S., Trichet, D., & Fouladgar, J. (2009). Electrical conductivity identification of composite materials using a 3-D anisotropic shell element model. *IEEE transactions on magnetics*, 45(3), 1859-1862.
- [87] Nelder, J. A. and R. Mead, “A simplex method for function minimization,” *The Computer Journal*, Vol. 7, No. 4, 308–313, 1965.

## Références

- [88] Xia, J., Z. Yuanzhou, B. Ji, et al., “An eddy current testing method based on magnetic induction intensity for detecting cracks in steel bridge decks,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 37, No. 3, 04023014, 2023.
- [89] Abeywickrama, K., T. Daszczyński, Y. Serdyuk, et al., “Determination of complex permeability of silicon steel for use in high-frequency modeling of power transformers,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 4, 438–444, 2008.
- [90] Torrents, J. M., Blanco, A., Pujadas, P., Aguado, A., Juan-García, P., & Sánchez-Moragues, M. Á. (2012). Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials and structures*, 45, 1577-1592.
- [91] Cavalero, S. H. P., López, R., Torrents, J. M., & Aguado, A. (2015). Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in BRFA. *Materials and Structures*, 48, 1859-1873.