

Titre: Développement de béton fibré intelligent pour le suivi des
Title: infrastructures en béton

Auteur: Salima Erriani
Author:

Date: 2026

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Erriani, S. (2026). Développement de béton fibré intelligent pour le suivi des
Citation: infrastructures en béton [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/76913/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/76913/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Mahdi Ben Ftima, Bruno Massicotte, & Christian Dupuis
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Développement de béton fibré intelligent pour le suivi des infrastructures en
béton**

SALIMA ERRIANI

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie Civil

Mai 2026

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Développement de béton fibré intelligent pour le suivi des infrastructures en béton

présenté par **Salima ERRIANI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Jean-Philippe CHARRON, président

Mahdi BEN FTIMA, membre et directeur de recherche

Bruno MASSICOTTE, membre et codirecteur de recherche

Christian DUPUIS, membre et codirecteur de recherche

Clélia DESMETTRE, membre

DÉDICACE

À mes parents et à ma famille.

À tous ceux qui m'ont soutenue et encouragée.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Mahdi Ben-Ftima, pour m'avoir accordé sa confiance en acceptant de m'encadrer. Son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils avisés ont été essentiels tout au long de cette maîtrise. Son soutien et ses orientations ont largement contribué à la réussite de ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent également à mes co-directeurs, Bruno Massicotte et Christian Dupuis (ULaval), pour avoir accepté de participer à l'encadrement de ce projet et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je remercie Polytechnique Montréal et l'École Hassania des Travaux Publics pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer ce double diplôme, qui constitue une expérience académique et humaine très enrichissante.

Je tiens à remercier Clélia Desmettre, associée de recherche à Polytechnique Montréal, pour son aide précieuse, son partage d'informations ainsi que pour son accompagnement tout au long de ce projet.

Je remercie profondément Professeur Jean-Philippe Charron ainsi que Victor Perreault, stagiaire sous sa supervision, pour leur contribution aux mesures magnétiques réalisées dans le cadre de ce projet.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des personnes du laboratoire des structures pour leur aide et leur soutien. Je remercie Monsieur Abdelhak Draoui, les techniciens Ronny Kabanga, Yazid Cheklat et Sylvain Gerhardt, ainsi que mes collègues Mohamed et Amine, pour leur assistance en laboratoire, leur disponibilité et leur précieuse aide lors des expérimentations.

Je souhaite également remercier les membres du jury, Jean-Philippe Charron et Clélia Desmettre, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour le temps qu'ils y ont consacré.

Je tiens également à remercier le CRIB et Sika pour leur contribution à ce projet, notamment le soutien financier du CRIB et la fourniture par Sika du prémix BFUP utilisé dans cette étude.

Enfin, mes plus sincères remerciements vont à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible tout au long de cette aventure. Je remercie également toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à mon parcours et à mon épanouissement.

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans le contexte du développement de matériaux cimentaires intelligents capables d'assurer un suivi en temps réel de l'état de contrainte des structures. Dans une perspective d'amélioration de la durabilité, de la sécurité et de la gestion des infrastructures, l'intégration de fonctions d'auto-détection directement au sein des matériaux constitue une alternative prometteuse aux systèmes de capteurs conventionnels, souvent difficiles à installer et à maintenir. L'objectif principal de ce travail est de caractériser expérimentalement le comportement piézorésistif du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP), en analysant l'évolution de sa résistivité électrique sous sollicitation mécanique et en évaluant l'influence des ajouts conducteurs, notamment les fibres d'acier et le laitier, sur sa sensibilité.

Une démarche expérimentale progressive a été adoptée. Dans un premier temps, un protocole de mesure fiable de la résistivité électrique intrinsèque du matériau a été développé en l'absence de sollicitation mécanique. Les mesures par impédance spectroscopique ont été réalisées utilisant un dispositif récemment acquis au laboratoire de structures de Polytechnique Montréal. Le protocole repose sur le développement d'une méthode de coulée du BFUP, le choix de configurations d'électrodes adaptées, du dispositif de mesure et des conditions d'acquisition. Une comparaison entre différentes configurations (deux électrodes externes, quatre électrodes externes et quatre électrodes internes) a permis de mettre en évidence l'influence significative des résistances de contact électrode-matériau. Les résultats ont montré que la configuration à quatre électrodes internes permet de minimiser ces effets et d'obtenir des mesures fiables et reproductibles, représentatives des propriétés intrinsèques du matériau.

L'étude paramétrique de la composition du BFUP a mis en évidence une diminution progressive de la résistivité électrique avec l'augmentation du taux de fibres d'acier, traduisant l'amélioration de la connectivité du réseau conducteur au sein de la matrice cimentaire. Pour les pourcentages volumiques étudiés en fibres (0%, 0.5%, 1%, 2% et 3%), aucun seuil de percolation net n'a été identifié, bien qu'une augmentation marquée de la conductivité soit observée à partir de 2 % de fibres. L'ajout de laitier d'acier contribue également à améliorer la conductivité électrique, certaines formulations combinant 2 % de fibres et 5 à 10 % (pourcentage massique de ciment) de laitier ajouté au prémix initial atteignant des performances comparables à celles de mélanges

contenant 3 % de fibres. Ces résultats mettent en évidence un compromis intéressant entre performance électrique, ouvrabilité et dosage en fibres. Par ailleurs, l'influence du procédé de mise en œuvre a été étudiée, révélant une anisotropie du comportement électrique liée à l'orientation préférentielle des fibres. Les mesures de résistivité ont permis de détecter indirectement cette orientation, démontrant le potentiel des techniques électriques pour caractériser la microstructure interne du matériau.

Dans un second temps, le comportement piézorésistif du BFUP a été étudié sous chargement mécanique en compression, afin d'évaluer sa capacité à fonctionner comme capteur intégré. Les essais ont mis en évidence une corrélation claire entre la contrainte appliquée et la réponse électrique du matériau, confirmant son comportement piézorésistif. Une diminution de la résistivité électrique avec l'augmentation de la contrainte a été observée, interprétée comme une amélioration de la connectivité du réseau conducteur sous l'effet du rapprochement des inclusions conductrices. Les essais de chargement cyclique ont également révélé une légère non-réversibilité de la réponse électrique après déchargement, attribuée à des phénomènes de micro-endommagement ou de réorganisation du réseau conducteur.

L'analyse du facteur de jauge a permis de quantifier la sensibilité du matériau, mettant en évidence une dépendance marquée à la teneur en fibres d'acier, paramètre dominant du comportement piézorésistif. La sensibilité maximale est obtenue pour un dosage de 3 % de fibres, tandis que l'ajout de laitier procure une amélioration plus modérée, avec un optimum observé autour de 5 % pour les mélanges à 2 % de fibres. Toutefois, les valeurs de facteur de jauge obtenues, de l'ordre de 0,06 %/MPa, demeurent inférieures à celles rapportées pour les formulations les plus performantes de la littérature, ce qui souligne la nécessité d'une optimisation plus poussée de la formulation du matériau.

Enfin, ce travail met en évidence le potentiel du BFUP comme matériau autodétectant pour des applications de suivi de santé structurale. Il met également en évidence le potentiel des mesures par spectroscopie d'impédance électrique pour détecter indirectement l'orientation des fibres et caractériser l'anisotropie du matériau.

Les perspectives de recherche portent sur l'optimisation de la formulation du BFUP, notamment par l'introduction d'inclusions conductrices multi-échelles visant à améliorer la connectivité et la stabilité du réseau conducteur. Le développement de modèles analytiques et numériques reliant la

microstructure à la réponse électromécanique constitue également un axe clé pour une meilleure compréhension et une optimisation du matériau. Par ailleurs, l'étude du comportement sous sollicitations variées (traction, flexion, fatigue) et en conditions environnementales réalistes apparaît nécessaire pour valider son utilisation en pratique. À terme, l'intégration du BFUP autodétectant dans des éléments structuraux réels, en particulier dans des zones critiques telles que les systèmes de précontrainte, représente une perspective prometteuse pour le suivi de santé structurale des infrastructures.

ABSTRACT

This study investigates the piezoresistive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) for structural health monitoring applications. An experimental program was conducted to characterize the evolution of electrical resistivity under mechanical loading and to assess the influence of conductive additions, namely steel fibers and steel slag.

A reliable measurement protocol based on electrical impedance spectroscopy was first developed to evaluate the intrinsic electrical properties of the material. Among the tested configurations, the four-internal-electrode setup provided the most stable and reproducible results by minimizing electrode–material contact effects. The results show a decrease in electrical resistivity with increasing fiber content, reflecting improved connectivity of the conductive network. Although no clear percolation threshold was identified within the investigated range (0–3%), a significant increase in conductivity was observed beyond 2% fiber content. The addition of steel slag further enhanced conductivity, with mixtures containing 2% fibers and +5–10% slag achieving performance comparable to 3% fiber mixtures. Electrical measurements also revealed anisotropy associated with preferential fiber orientation induced by casting.

Under compressive loading, a clear correlation between applied stress and electrical response was observed, confirming the piezoresistive behavior of UHPFRC. Electrical resistivity decreased with increasing stress due to enhanced conductive network connectivity. Slight non-reversibility upon unloading was attributed to microstructural changes within the material. The gauge factor analysis showed that sensitivity is primarily governed by fiber content, with a maximum obtained at 3%, while slag addition provided a secondary improvement. However, the measured gauge factors ($\sim 0.06\%/MPa$) remain lower than those reported for the most sensitive cement-based composites.

Overall, the results demonstrate the potential of UHPFRC as a self-sensing material. However, further work is required to optimize material formulation, improve measurement robustness, and validate performance under realistic loading and environmental conditions for practical implementation.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES ANNEXES.....	XXII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte général.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	3
1.4 Méthodologie du projet	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Introduction	6
2.2 Phénomène de piézorésistivité dans les matériaux composites	6
2.2.1 Description du phénomène et interprétation de ses origines.....	6
2.2.2 Modélisation analytique	9
2.2.3 Modélisation par la méthode des éléments finis	14
2.3 Propriétés d'auto-détection du béton.....	16
2.3.1 Comportement en traction.....	16
2.3.2 Comportement en compression.....	17
2.3.3 Comportement en flexion.....	18

2.4	Piézorésistivité dans les bétons fibrés	20
2.4.1	Mélanges et résultats expérimentaux	22
2.4.2	Seuil de percolation	26
2.4.3	Effet de l'orientation des fibres sur les caractéristiques mécaniques et piézorésistivité	28
2.5	Exemples d'applications structurales potentielles du BFUP intelligent	29
2.5.1	Suivi des zones critiques par béton intelligent et capteurs intégrés	30
2.5.2	Application aux structures de stockage souterrain	32
2.5.3	Application pour la détection du trafic routier	33
2.6	Mesures de la résistivité électrique dans les bétons fibrés	34
2.6.1	Spectroscopie d'impédance	35
2.6.2	Mesures conventionnelles pour le béton	38
2.6.3	Configurations d'électrodes et méthodes de mesure	41
2.6.4	Acquisition et traitement du signal électrique	42
2.7	Conclusion	43
CHAPITRE 3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU BFUP SANS CHARGEMENT MÉCANIQUE		45
3.1	Introduction	45
3.2	Conception expérimentale et fabrication des spécimens	45
3.2.1	Mélanges étudiés	45
3.2.2	Configuration d'électrodes choisies	48
3.2.3	Coffrages et dimensions des prismes	49
3.2.4	Procédure des coulées de béton	50
3.3	Utilisation du dispositif de mesures électriques et mesures préliminaires	53
3.3.1	Dispositif de mesure	53

3.3.2	Méthodologie générale des mesures électriques	55
3.3.3	Mesures préliminaires	56
3.4	Mesures pour différentes configurations d'électrodes	62
3.4.1	Méthodologies.....	62
3.4.2	Résultats des mesures.....	67
3.5	Étude de l'orientation des fibres.....	78
3.5.1	Évaluation de l'orientation des fibres par mesures de résistivité	78
3.5.2	Vérification par comparaison avec un coulage sans orientation préférentielle.....	80
3.5.3	Analyse complémentaire par mesures d'inductance magnétique	82
3.6	Conclusion.....	84
CHAPITRE 4 COMPOTEMENT PIÉZORÉSISTIF DU BFUP EN PRÉSENCE D'UN CHARGEMENT MÉCANIQUE DE COMPRESSION.....		86
4.1	Introduction	86
4.2	Procédure expérimentale	86
4.2.1	Montage expérimental.....	86
4.2.2	Procédure de préparation des spécimens pour compression	88
4.2.3	Protocole de chargement électrique	89
4.3	Résultats et interprétation.....	91
4.3.1	Comportement mécanique.....	91
4.3.2	Résultats des essais combinés	94
4.4	Conclusion.....	101
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		103
5.1	Rappel des objectifs et de la méthodologie	103
5.2	Conclusions générales	104
5.2.1	Comportement électrique de BFUP en absence de chargement	104

5.2.2	Comportement piézorésistif de BFUP sous chargement de compression.....	106
5.3	Limitations et recommandations	108
5.3.1	Limitations de l'étude.....	108
5.3.2	Recommandations et perspectives de recherche	109
RÉFÉRENCES.....		111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Synthèse des études expérimentales de la sensibilité électrique des spécimens de béton sous compression	24
Tableau 2.2 : Diagrammes Nyquist des circuits électriques usuels (Inspiré de (Zurich Instruments, 2022)	37
Tableau 3.1 : Propriétés des matériaux conducteurs.....	46
Tableau 3.2 : Mélanges choisis pour l'étude de résistivité du BFUP sans chargement mécanique ...	47
Tableau 3.3 : Composition des mélanges (dosages exprimés pour un volume de 6L de béton)	48
Tableau 3.4 : Matériaux utilisés pour les électrodes de cette configuration	65
Tableau 4.1 : Propriétés des plaques isolantes	87
Tableau 4.2 Facteurs de jauge de chaque mélange de fibres	99
Tableau 4.3 : Comparaison de la sensibilité des mélanges avec variation de laitier d'acier	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Contexte d'utilisation possible du béton fibré intelligent pour la surveillance de la perte de post-tension: (a) Pont en béton précontraint, (b) Ancrage des câbles de post-tension d'un pont ; (c) Bloc d'ancrage intelligent (modifié de Lee et al., 2019).....	2
Figure 1.2 Organigramme organisationnel du mémoire	5
Figure 2.1 : Modèle de réseau de résistances 3D de CNT distribué de manière aléatoire (modifié de Tamayo-Vegas et al., 2022)	7
Figure 2.2 : Évolution de la conductivité électrique dans la matrice en fonction de la fraction volumique des inclusions conductrice	8
Figure 2.3: Distance minimale entre deux nanotubes de carbone à l'intérieur du modèle de résistance (Tamayo-Vegas et al., 2022).....	9
Figure 2.4 : Simulation d'un modèle non pénétrable (D = diamètre réel de la fibre, d_c =distance de tunnel) (Taya et al., 1998).....	10
Figure 2.5 : Le modèle de réorientation des fibres 3D où seul l'angle θ est montré à titre d'illustration ; (a) avant la déformation et (b) après la déformation (Taya et al., 1998).	11
Figure 2.6 : Dispersion CNT à l'intérieur des plaques d'électrodes avec angle d'orientation maximal et la distance la plus courte entre deux CNT voisins (Haghgoo et al., 2020)	13
Figure 2.7 : Schéma de (a) un modèle de résistance avec quelques nanoparticules (NP) enchaînées dans les nanofillers fins et (b) le courant électrique entre le i -ième NP et ses voisins (Wang et al., 2018).....	14
Figure 2.8 : Élément de volume représentatif de la matrice (en bleu) et des inclusions conductrices (en rouge) dans DIGIMAT FE (Tamayo-Vegas et al., 2022)	15
Figure 2.9 : Variation de la résistivité électrique sous chargement (a) traction VS (b) compression (Han et al., 2014).....	17
Figure 2.10 : Évidence expérimentale du changement de résistivité électrique en fonction de contrainte de compression (Han et al., 2014).....	18

Figure 2.11 : Propriétés de détection du béton renforcé de fibres de carbone en flexion. (a) Schéma du dispositif expérimental. (b) Résultats des essais : (A) 0 % de fibres de carbone, (B) 0,20 % de fibres de carbone, (C) 0,55 % de fibres de carbone et (D) 0,80 % de fibres de carbone	19
Figure 2.12 : Phénomènes menants au changement de résistivité électrique sous traction ou compression (Bouillard et al., 2025)	20
Figure 2.13 : Comportement en traction des différents types de béton (Cours de technologie de béton – PolyMtl, J-P Charron)	21
Figure 2.14 : Exemples d'inclusions conductrices : (a) Fibres d'acier, (b) Laitiers d'acier, (c) Nanofibres de carbones (Lee et al., 2019), (d) Particules de Nickel.....	23
Figure 2.15 Changement de conductivité électrique en fonction de la fraction volumique pour différents types de fibres (Han et al., 2014).....	27
Figure 2.16 L'influence de l'orientation des fibres en fonction de l'emplacement des électrodes de mesures électrique (Lee et al., 2021)	29
Figure 2.17 Développement de bloc d'ancrage des câbles de précontrainte en béton intelligent (Lee et al., 2021)	30
Figure 2.18 Système de détection sans fil développé (H.-V. Le et al., 2021).....	31
Figure 2.19 : Exemple suggéré de suivi d'une structure de Pont par béton intelligent (Azhari 2008)	31
Figure 2.20 : Section d'une galerie des déchets radioactifs (Bouillard et al., 2025).....	33
Figure 2.21 : Schéma d'une structure de chaussée en béton auto-déTECTrice pour la détection de véhicules (Han et al., 2014)	34
Figure 2.22 : Schéma classique d'un circuit RLC représentant l'impédance électrique (Sam Cooper, 2021)	36
Figure 2.23 : Techniques conventionnelles de mesure de résistivité pour le béton (Layssi et al. 2015) : (a) mesure standardisée sur cylindre de béton avec deux électrodes (supportée par A23.2); (b) Mesure avec quatre électrodes (méthode Wenner supportée par l'AASHTO 95)	38

Figure 2.24 : Diagramme Nyquist typique du béton(Layssi et al. 2015).....	40
Figure 2.25 : Diagramme Nyquist des résultats expérimentaux de (Lee et al., 2019), illustrant la détection du point considéré comme résistance des spécimens (M : béton sans aucun ajout ; MF : avec ajout de fibres ;MS : avec ajout de laitier d'acier ; MSF : avec ajout de laitier et fibres ; MFMW : avec ajout de fibres et des nanotubes de carbone multi-parois.)	41
Figure 2.26 : Différentes configurations à deux ou quatre électrodes : Externes (a), (b) / Internes (c) (modifié de Han et al., 2014)	42
Figure 2.27 Exemple d'instrument de mesures électrique avec logiciel d'acquisition des données (Lee et al., 2021).....	43
Figure 3.1 : Coffrage type utilisé pour les coulées du projet	50
Figure 3.2 : Grillage des électrodes intérieures avant et après ajustement	51
Figure 3.3 : Procédure de fabrication des prismes de BFUP	52
Figure 3.4 : Impédance mètre	53
Figure 3.5 : Interface d'acquisition des données liée à l'impédancemètre	54
Figure 3.6 : Configuration expérimentale pour la mesure de résistivité électrique par impédancemètre	55
Figure 3.7 : Branchement des câbles (exemple de spécimen avec quatre électrodes internes)	56
Figure 3.8 : Réponse spectrale d'impédance d'un spécimen avec injection de tension (a) ou injection de courant (b)	58
Figure 3.9 : Superposition des réponses spectrales de l'impédance avec injection de courant et de tension	59
Figure 3.10 : Choix final des données d'entrées pour les mesures électriques	60
Figure 3.11 : Méthode de détermination de la résistance électrique de l'échantillon d'après le diagramme Nyquist	61
Figure 3.12 : Évolution de la conductivité électrique de béton en fonction de temps	62
Figure 3.13 : Produits utilisés la configuration retenue	63

Figure 3.14 : Configuration à quatre électrodes extérieures	64
Figure 3.15 : Exemple de la configuration de ruban adhésif en cuivre collé sur l'agent conducteur	65
Figure 3.16 Produits utilisés pour cette configuration	66
Figure 3.17 : Configuration à deux électrodes extérieures	66
Figure 3.18 : Diagrammes Nyquist d'un spécimen cubique avec différents matériaux d'électrodes.	68
Figure 3.19 : Diagramme Nyquist de spécimen cubique avec l'effet d'utilisation des plaques vs les rubans en cuivre	69
Figure 3.20 : Diagrammes Nyquist moyens des spécimens avec quatre électrodes extérieures - variation de pourcentage de fibres	70
Figure 3.21 : Diagrammes Nyquist de tous les spécimens avec électrodes intérieures - variation de pourcentage de fibres	72
Figure 3.22 : Diagrammes Nyquist moyens des spécimens avec électrodes intérieures - variation de pourcentage de fibres	73
Figure 3.23 : Variation de la résistivité électrique de BFUP en fonction du taux des fibres	74
Figure 3.24 : Variation de la conductivité électrique de BFUP en fonction du taux des fibres	75
Figure 3.25 : Diagrammes Nyquist des spécimens avec 4 électrodes intérieures et 2% des fibres - variation de laitier d'acier	76
Figure 3.26 Superposition avec les résultats de variation en laitier d'acier : résistivité (à gauche) et conductivité (à droite)	77
Figure 3.27 : Définition des orientations des mesures avec le montage à deux électrodes externes.	78
Figure 3.28 : Comparaison du comportement électrique des spécimens dans les directions X, Y et Z	79
Figure 3.29 : Coulée avec orientation non préférentielle des fibres	80
Figure 3.30 : Comparaison d'un spécimen avec coulée orientée (d) vs des spécimens avec orientations non préférentielle (a) : Spécimen 1, (b) : Spécimen 3 et (c) Spécimen 2	81
Figure 3.31 : Dispositif CAMBOT des mesures d'inductance magnétique	82

Figure 3.32 : (a) Inductance magnétique avec CAMBOT VS (b) résistance électrique en fonction de la direction de mesure pour les spécimens cubiques.....	83
Figure 4.1 : L'ensemble de dispositif des essais	88
Figure 4.2 : Procédure de préparation aux essais.....	89
Figure 4.3 : Chargement cyclique de la première phase	90
Figure 4.4 : Chargement par paliers de la deuxième phase	91
Figure 4.5 : Essai de compression des plaques isolantes	92
Figure 4.6 Diagramme Force-Déplacement de BFUP - 3% de fibres : Avant correction (a), et après correction (b).....	93
Figure 4.7 : Etat du coulis après essais	94
Figure 4.8 Courbe de suivi continu dans le temps de l'impédance absolue en fonction de chargement mécanique (spécimen F2L+5).....	95
Figure 4.9 : Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 3% des fibres....	96
Figure 4.10 : Courbes de changement de résistivité électrique en fonction des contraintes de compression pour différents mélanges de BFUP avec variation de volume des fibres ..	98
Figure 4.11 : Courbes de changement de résistivité électrique en fonction des contraintes de compression pour différents mélanges de BFUP avec variation de laitier d'acier	100
Figure A.1 Diagramme Force-Déplacement de BFUP - 3% des fibres	114
Figure A.2 Diagramme Force-Déplacement de BFUP - 2% des fibres	114
Figure A.3 Diagramme Force-Déplacement de BFUP - 1% des fibres	114
Figure A.4 Diagramme Force-Déplacement de BFUP - 0.5% des fibres	114
Figure B.1 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 3% des fibres ...	115
Figure B.2 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 2% des fibres ...	115
Figure B.3 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 1% des fibres ...	116
Figure B.4 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 0.5% des fibres	116

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Abréviations:

BFUP	Béton Fibré Ultra-Performant
CNT	Nanotube de Carbone
RVE	Volume élémentaire représentatif
NP	Nanoparticules
EF	Éléments finis
BO	Béton ordinaire
BHP	Béton à haute performance
BFHP	Béton fibré à haute performance
AC	Courant alternatif
DC	Courant continu
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
RC	Circuit résistance-capacité
RLC	Circuit résistance-inductance -capacité
Avg	<i>Average</i> / Moyenne

Variables:

d_c	Distance de <i>Tunneling</i>
-------	------------------------------

D	Diamètre des fibres
l	Longueur des fibres
f_p	Seuil de percolation
f	Fraction volumique des ajouts conducteurs
t	Exposant de conductivité caractéristique
R	Résistance électrique
d	Distance entre les fibres
FCR	Variation fractionnaire de la résistivité électrique
FG	Facteur de jauge
L	Distance entre les électrodes
A	Section transversale traversée par le courant
Z	Impédance
V	Tension électrique
I	Courant électrique
C	Capacité
L	Induction magnétique
$Re(Z)$	Partie réelle de l'impédance
$Im(Z)$	Partie imaginaire de l'impédance
$Ratio(\%)$	Ratio de variation de résistivité

Variables grecques:

σ_c	Conductivité effective du composite
σ_f	Conductivité électrique de la fibre
$\Delta\varepsilon$	Déformation
ν	Coefficient de poisson
α	Paramètre dépendant de la hauteur de barrière énergétique de la matrice
ρ_i	Résistivité électrique initiale
ρ	Résistivité électrique de béton
σ	Contrainte mécanique appliquée
ω	Pulsation / Fréquence angulaire
ρ_{20}	Résistivité électrique à 20MPa

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Comportement mécanique du BFUP	114
ANNEXE B Comportement électrique du BFUP sous différents paliers de contraintes de compression	115

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte général

Le béton constitue l'un des matériaux les plus utilisés dans le domaine du génie civil, en particulier pour la réalisation d'infrastructures telles que les ponts, les bâtiments, les tunnels et les ouvrages d'art. Son utilisation à grande échelle s'explique par ses performances mécaniques, sa durabilité et sa capacité à être mis en œuvre dans des formes variées. Toutefois, les structures en béton sont soumises, tout au long de leur durée de service, à des sollicitations mécaniques et environnementales susceptibles d'entraîner des phénomènes de dégradation.

Dans ce contexte, la surveillance de l'état des structures représente un enjeu important afin d'assurer leur sécurité et leur durabilité. Les méthodes classiques de surveillance reposent généralement sur des capteurs externes ou intégrés, permettant de mesurer certaines grandeurs physiques telles que la déformation ou la contrainte. Cependant, ces systèmes présentent plusieurs limites : une durabilité réduite, un coût élevé et une capacité limitée à fournir une information représentative à l'échelle globale de la structure (Han et al., 2014).

Afin de répondre à ces limitations, le concept de béton autodétectant, appelé aussi intelligent, s'est développé au cours des dernières décennies. Ce type de matériau repose sur l'intégration d'inclusions fonctionnelles conductrices dans la matrice cimentaire, permettant de le rendre sensible aux sollicitations mécaniques. Sous l'effet d'une contrainte ou d'une déformation, la structure interne du matériau évolue, entraînant une variation de sa résistivité électrique. Cette propriété permet d'envisager le béton non seulement comme un matériau structurel, mais également comme un capteur distribué.

L'utilisation de tels matériaux ouvre la voie au développement de structures intelligentes, capables d'assurer simultanément leur fonction portante et la surveillance de leur état de santé. Cette approche est particulièrement pertinente pour les ouvrages soumis à des exigences élevées en termes de sécurité, notamment les structures précontraintes.

Dans le cas des ponts en béton précontraint par post-tension (Figure 1.1-a), les câbles de précontrainte assurent l'introduction d'un état de compression dans le béton, essentiel à la reprise des efforts et au contrôle de la fissuration. Les zones d'ancrage (Figure 1.1-b) constituent des

régions critiques, caractérisées par de fortes concentrations de contraintes et des états de contrainte tridimensionnels complexes. Des pertes de précontrainte peuvent s'y développer, qu'elles soient immédiates (ancrage, frottement) ou différées (relaxation des câbles, fluage et retrait du béton, dégradations locales). Le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP), reconnu pour ses propriétés mécaniques élevées et sa durabilité exceptionnelle, constitue ainsi une solution prometteuse pour la réalisation de ces blocs d'ancrage. Il permet d'améliorer significativement la résistance aux fissures de fendage et de limiter l'ouverture des fissures, tout en assurant une protection accrue des câbles de précontrainte contre les agressions environnementales, notamment la pénétration d'agents délétères et les phénomènes de corrosion. Par ailleurs, ses propriétés électriques peuvent être exploitées pour développer des fonctions d'auto-détection, ouvrant la voie à une surveillance intégrée de l'état de contrainte dans ces zones critiques. Cette idée originale a été développée par Lee et al. (2019, 2021) et constitue une des motivations principales pour ce projet de recherche (Figure 1.1-c).

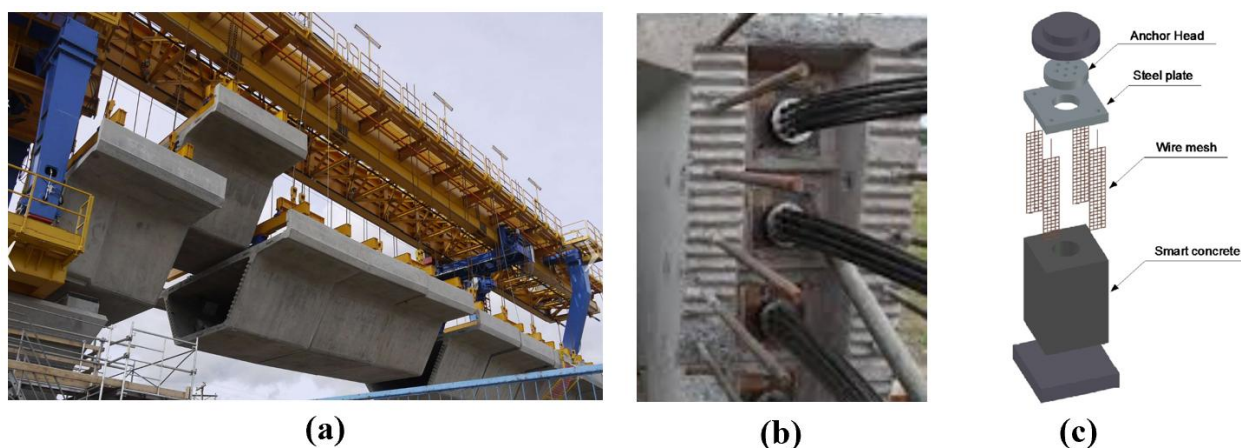


Figure 1.1 Contexte d'utilisation possible du béton fibré intelligent pour la surveillance de la perte de post-tension: (a) Pont en béton précontraint, (b) Ancrage des câbles de post-tension d'un pont ; (c) Bloc d'ancrage intelligent (modifié de Lee et al., 2019)

1.2 Problématique

Le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP), reconnu pour ses propriétés mécaniques et sa durabilité exceptionnelles, apparaît comme une alternative prometteuse pour le développement de solutions de surveillance intégrée. En effet, ce matériau peut être utilisé comme un capteur distribué intrinsèque, grâce à son comportement *piézorésistif*, c'est-à-dire la capacité de sa résistivité électrique à varier sous l'effet d'une sollicitation mécanique. Des travaux récents (Lee et al., 2019,

2021) ont montré que l'incorporation combinée de fibres métalliques et d'ajouts conducteurs, tels que les cendres ou laitiers d'acier, permet d'améliorer significativement cette capacité de détection, notamment via des mécanismes de conduction liés à l'effet tunnel (quantum tunneling). Le matériau ainsi modifié est communément désigné sous le terme de *BFUP intelligent*.

L'intégration de blocs en BFUP intelligent au niveau des zones d'ancrage des câbles de précontrainte constitue une perspective particulièrement intéressante. Ces blocs pourraient en effet assurer simultanément trois fonctions essentielles : (i) le contrôle de la fissuration induite par les fortes concentrations de contraintes liées à la précontrainte, (ii) la protection des câbles vis-à-vis des agressions environnementales, et (iii) le suivi des pertes de précontrainte, qu'elles soient instantanées ou différées. Une étude expérimentale récente (Lee et al., 2021) a permis de démontrer la faisabilité de ce concept, en mettant en évidence la capacité du BFUP à détecter des variations de précontrainte. Toutefois, cette étude est restée limitée à une démonstration de type piézorésistive et a notamment souligné l'influence significative de l'orientation des fibres sur la réponse électrique du matériau.

Dans une perspective d'application réelle, plusieurs verrous scientifiques et techniques doivent encore être levés. Il s'agit notamment d'assurer la répétabilité des propriétés piézorésistives du matériau, d'optimiser la formulation et les procédés de mise en œuvre afin de maîtriser l'orientation des fibres et le choix des configurations d'électrodes, tout en garantissant un compromis satisfaisant entre performances mécaniques, électriques et durabilité. Par ailleurs, l'influence à long terme des conditions environnementales, telles que les variations de température et d'humidité, ainsi que des effets différés, doit être prise en compte afin d'assurer la fiabilité du système de mesure dans des conditions d'exploitation réelles. La stabilité électrochimique à long terme des ajouts électriques est un des éléments les plus importants à considérer. Pour qu'un facteur de jauge soit utile, il doit demeurer stable tout au long de sa mise en service.

1.3 Objectifs du projet de recherche

Ce travail de maîtrise s'inscrit dans un programme de recherche plus large visant, à long terme, le développement et *l'intégration du BFUP intelligent dans des stratégies de réparation durable d'ouvrages existants en béton*, afin d'assurer un suivi continu de l'état structural et de l'évolution des performances. Dans cette perspective, la première étape consiste à *mettre en place une démarche expérimentale rigoureuse visant à caractériser les performances piézorésistives à court*

terme du matériau composite, en tenant compte notamment de l'influence de l'orientation des fibres. Cette étape constitue l'objectif principal de ce travail de maîtrise.

Les objectifs spécifiques, axés sur la caractérisation du comportement à court terme (en excluant les effets liés au vieillissement et aux phénomènes à long terme), sont les suivants:

- Évaluer la capacité du BFUP intelligent à relier l'état de contrainte à des variations de résistivité électrique sous chargement en compression.
- Analyser l'influence des ajouts conducteurs (fibres, laitier) et de l'orientation des fibres sur la résistivité et la sensibilité piézorésistive, afin d'identifier une formulation offrant un compromis optimal.
- Développer et valider un protocole expérimental de mesure de la résistivité, assurant des résultats fiables et reproductibles pour la caractérisation du comportement piézorésistif sous chargement.

Il est important de préciser que l'approche adoptée dans ce travail repose sur l'utilisation *d'ingrédients existants*, à savoir un prémix de BFUP, un laitier et des fibres couramment utilisés dans les essais mécaniques du laboratoire de Structures de Polytechnique Montréal. Dans cette optique, seules les proportions de ces constituants sont ajustées, sans modification de leurs caractéristiques intrinsèques (telles que la longueur des fibres ou la granulométrie du laitier). L'idée est ainsi d'évaluer si des performances comparables à celles des mélanges piézorésistifs les plus performants rapportés dans la littérature peuvent être atteintes sans recourir à des modifications complexes ou à des ajouts spécifiques.

1.4 Méthodologie du projet

La méthodologie adoptée dans ce travail de recherche s'articule autour d'une démarche expérimentale progressive, visant à caractériser le comportement électrique et électromécanique du BFUP autodétectant. Elle repose sur une succession d'étapes allant de l'étude du matériau en absence de chargement jusqu'à l'évaluation de sa réponse sous sollicitation mécanique en compression. L'organisation générale du mémoire et le déroulement des différentes phases du projet sont présentés sous forme d'un organigramme à la Figure 1.2.

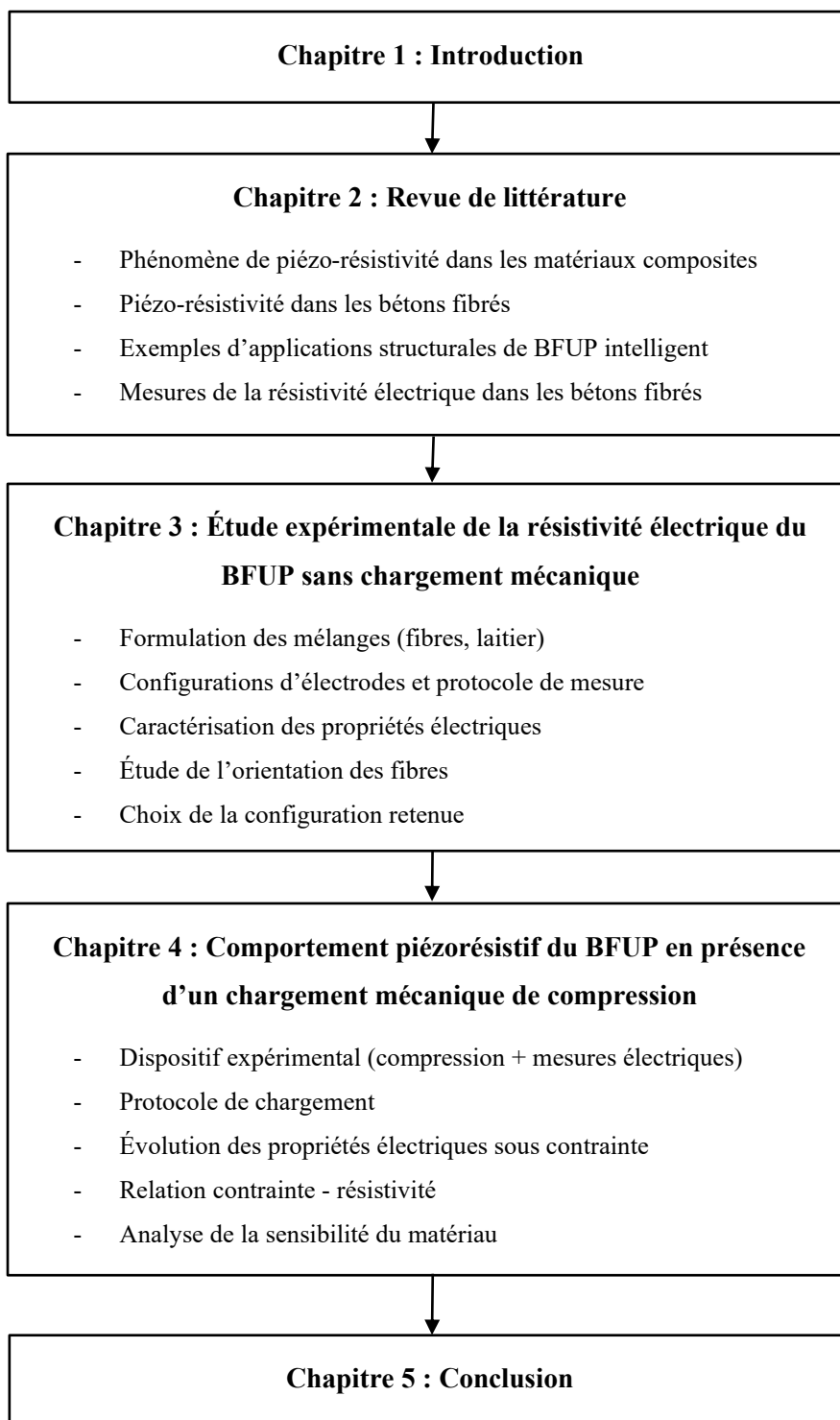


Figure 1.2 Organigramme organisationnel du mémoire

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse des travaux scientifiques portant sur le comportement piézorésistif des composites cimentaires et leur application dans le domaine des structures intelligentes. Il vise à établir les bases théoriques et expérimentales nécessaires à la compréhension du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) auto-détecteur, en mettant l'accent sur les mécanismes de conduction électrique, l'influence des ajouts conducteurs, les méthodes de mesure de la résistivité électrique et les potentielles applications structurales de ces matériaux. Cette revue permet d'identifier les paramètres influençant la sensibilité piézorésistive et de situer le cadre scientifique du programme expérimental développé dans ce mémoire.

2.2 Phénomène de piézorésistivité dans les matériaux composites

La piézorésistivité est la caractéristique qui décrit le changement de la résistance électrique dans un matériau en réponse à une variation de contrainte mécanique. De nombreuses études ont été effectuées dans le but de suivre la réponse de cette propriété, principalement dans les matériaux composites, qui ont été utilisés dans certains secteurs industriels en raison de leur bonne tenue mécanique et leur faible poids. Ces études permettent de mettre en évidence la capacité de détection électrique des déformations dans les matériaux composites, principalement ceux qui sont renforcés par des ajouts conducteurs (Fibres ou nanotubes de Carbone). Cette section présente une description détaillée du phénomène de piézorésistivité dans les matériaux composites, en expliquant les mécanismes physiques associés et leurs origines. Les sous-sections 2.2.2 et 2.2.3 détaillent deux différentes approches de modélisation de ce phénomène : La méthode analytique et la méthode par éléments finis.

2.2.1 Description du phénomène et interprétation de ses origines

Le matériau composite étudié est constitué d'une matrice cimentaire faiblement conductrice dans laquelle sont dispersées des fibres ou nanotubes de carbone (CNT) conducteurs. En l'absence d'un

réseau conducteur continu, la conductivité électrique du composite demeure très faible, car les inclusions conductrices sont isolées les unes des autres et ne permettent pas le passage efficace des charges électriques (Wei et al., 2022), tel que montré schématiquement dans le modèle de la Figure 2.1.

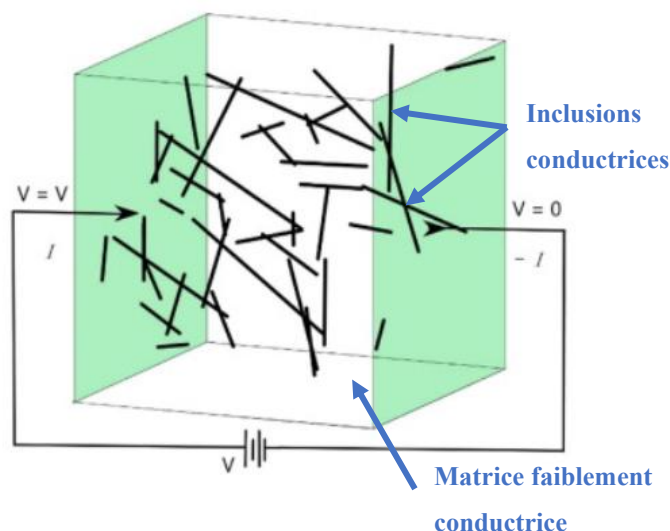


Figure 2.1 : Modèle de réseau de résistances 3D de CNT distribué de manière aléatoire (modifié de Tamayo-Vegas et al., 2022)

Cependant, des travaux issus des domaines de l'électromagnétisme et de la physique des milieux composites ont montré que ces matériaux peuvent devenir conducteurs lorsque la fraction volumique des inclusions conductrices atteint une valeur critique. Ce phénomène est décrit par la théorie de la percolation, selon laquelle un réseau conducteur continu se forme à partir d'une concentration minimale appelée seuil de percolation. Au-delà de ce seuil, des chemins conducteurs interconnectés apparaissent à travers le matériau, permettant le transport des charges électriques (Wang et al., 2018), (Taya et al., 1998). Même en dessous du seuil de percolation, une conduction électrique peut subsister via des mécanismes de type effet tunnel entre inclusions conductrices proches.

Il convient de préciser que cette description s'applique principalement aux régimes de conduction en courant continu (galvanique) ou en courant alternatif à basse fréquence. À des fréquences plus élevées, la réponse du matériau est dominée par des phénomènes de polarisation interfaciale et de couplage capacitif entre inclusions conductrices. Dans ce cas, les électrons n'ont pas à 'sauter' d'une particule à une autre pour que le champ électrique puisse être induit, la réponse du matériau est

dominée par des phénomènes de polarisation interfaciale (type Maxwell–Wagner–Sillars), conduisant à un comportement essentiellement capacitif.

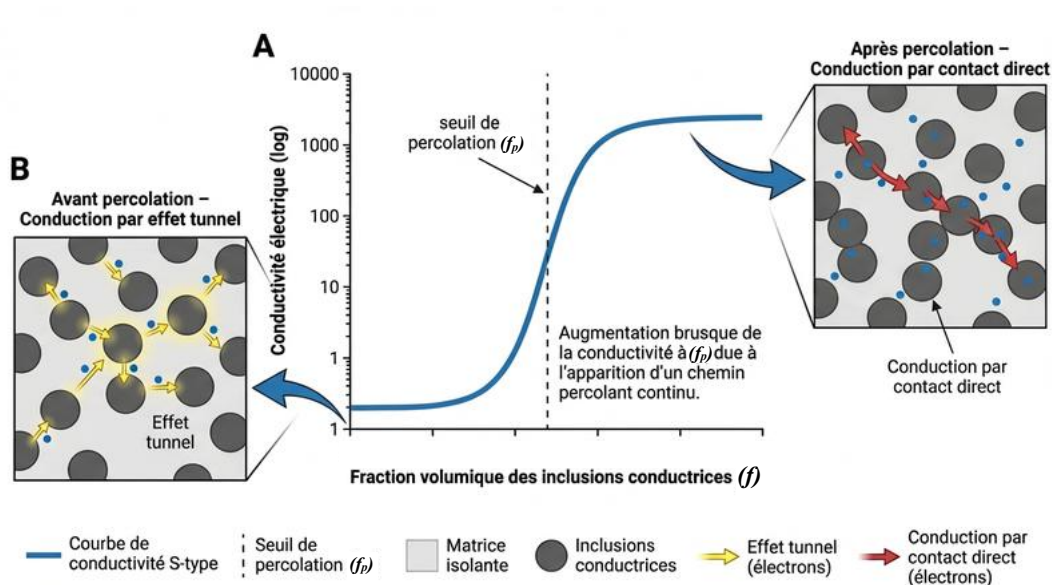


Figure 2.2 : Évolution de la conductivité électrique dans la matrice en fonction de la fraction volumique des inclusions conductrice

Dans les composites cimentaires conducteurs, deux mécanismes principaux de conduction électrique peuvent être distingués en fonction de la fraction volumique des inclusions conductrices (Figure 2.2). En dessous du seuil de percolation, les fibres ou particules conductrices sont dispersées de manière isolée dans la matrice, et aucun réseau conducteur continu n'est formé. La conduction électrique reste alors très faible et est principalement assurée par des mécanismes de type effet tunnel, où les électrons peuvent traverser les faibles distances séparant des inclusions proches sans contact direct. À mesure que la fraction volumique augmente, la distance moyenne entre inclusions diminue, ce qui accroît la probabilité de conduction. Lorsque la concentration atteint le seuil de percolation, un réseau conducteur interconnecté se forme à travers le matériau, entraînant une augmentation importante de la conductivité électrique. Au-delà de ce seuil, la conduction est dominée par des chemins conducteurs continus, et la conductivité augmente plus progressivement avec la fraction volumique des inclusions. Cette transition entre les deux régimes

se traduit typiquement par une évolution en forme de S de la conductivité en fonction de la fraction volumique (Wei et al., 2022).

La Figure 2.3 illustre la distance minimale entre deux nanotubes de carbone dispersés dans la matrice, paramètre clé contrôlant les mécanismes de conduction électrique dans le composite. Lorsque cette distance devient suffisamment faible, un transfert de charges peut se produire par effet tunnel, même en l'absence de contact direct entre les nanotubes.

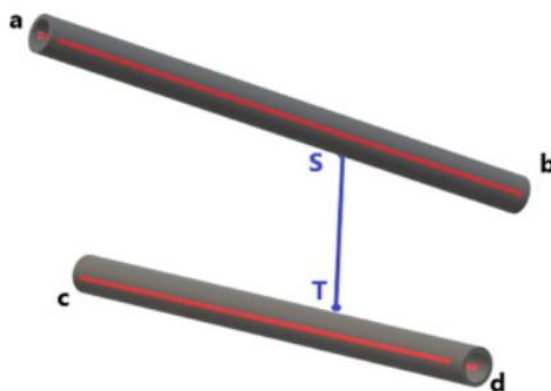


Figure 2.3: Distance minimale entre deux nanotubes de carbone à l'intérieur du modèle de résistance (Tamayo-Vegas et al., 2022)

2.2.2 Modélisation analytique

Dans le but de prédire le comportement piézorésistif des matériaux composites, plusieurs études ont été faites en adoptant une ou plusieurs méthodes d'analyse. La modélisation analytique a été l'une des méthodes les plus élaborées afin de décrire la conductivité d'un matériau composite.

Dans une étude faite par (Taya et al., 1998), un modèle de percolation des fibres a été élaboré en se basant sur une simulation de Monte Carlo qui prend en paramètres les coordonnées centrales et vecteurs orientation des fibres générées aléatoirement. Le chevauchement entre les fibres n'est pas autorisé, et le transfert de charge peut s'effectuer sur une épaisseur d_c comme il est montré sur la Figure 2.4 (La distance du « Tunneling » est égale à $2d_c$).

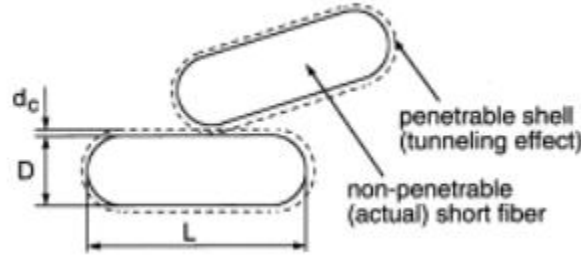


Figure 2.4 : Simulation d'un modèle non pénétrable (D = diamètre réel de la fibre, d_c =distance de tunnel) (Taya et al., 1998)

L'approche développée par (Taya et al., 1998) repose sur une modélisation micromécanique de la conductivité électrique des composites conducteurs basée sur la théorie de la percolation. Le matériau est représenté comme un système tridimensionnel de fibres conductrices dispersées aléatoirement dans une matrice isolante, où la conduction électrique dépend de la formation d'un réseau conducteur interconnecté. Le modèle introduit le concept de distance de conduction effective, incluant un mécanisme de conduction par effet tunnel. Chaque fibre est modélisée comme un cylindre non pénétrable entouré d'une enveloppe pénétrable représentant la distance maximale de conduction électrique. Deux fibres sont considérées connectées si leurs enveloppes se chevauchent, même en l'absence de contact direct.

La formation d'un réseau conducteur est ensuite analysée à l'aide d'un modèle de percolation basé sur des simulations de type Monte Carlo, permettant de déterminer la fraction volumique critique f_p à partir de laquelle un cluster conducteur traverse le matériau. Au-delà de ce seuil, la conductivité effective du composite suit une loi de type puissance pour calculer la conductivité effective du composite σ_c

$$\sigma_c = \sigma_f \times (f - f_p)^t \quad (2.1)$$

Où σ_f est la conductivité de la fibre, f la fraction volumique des conducteurs, f_p une fraction volumique critique correspondant au seuil de percolation et t est un exposant de conductivité caractéristique généralement proche de 2.0 pour les systèmes tridimensionnels.

Le modèle est ensuite étendu pour tenir compte des effets de la déformation mécanique, ce qui permet de décrire le comportement piézorésistif du composite. Sous chargement, la microstructure évolue en raison de la réorientation et du déplacement des fibres. En traction (allongement), l'augmentation des distances entre inclusions et la rupture de contacts existants entraînent une diminution de la connectivité du réseau conducteur, ainsi qu'une réduction de la probabilité de conduction par effet tunnel. Cela se traduit par une augmentation du seuil de percolation effectif et, macroscopiquement, par une diminution de la conductivité électrique (augmentation de la résistivité). À déformation suffisante, le matériau peut même transiter vers un état quasi isolant.

À l'inverse, en compression (contraction), le rapprochement des inclusions favorise la formation de nouveaux contacts et renforce les mécanismes de conduction (contact direct et effet tunnel), ce qui améliore la connectivité du réseau conducteur. Il en résulte généralement une diminution de la résistivité électrique.

Afin de décrire cette évolution microstructurale sous chargement, une transformation affine est généralement adoptée. Comme illustré à la Figure 2.5 pour le cas d'un allongement selon l'axe X, une déformation uniaxiale entraîne une modification proportionnelle des dimensions du matériau ainsi que des positions et orientations des fibres. Dans cette approche, les composantes de longueur d'une fibre évoluent de manière cohérente avec celles de la matrice environnante. Ainsi, une fibre initialement orientée selon un angle donné voit sa position et son orientation transformées après déformation, traduisant un réarrangement progressif du réseau conducteur. Cette hypothèse permet de relier directement la déformation macroscopique aux changements de connectivité à l'échelle microscopique, à l'origine de la variation de la conductivité électrique.

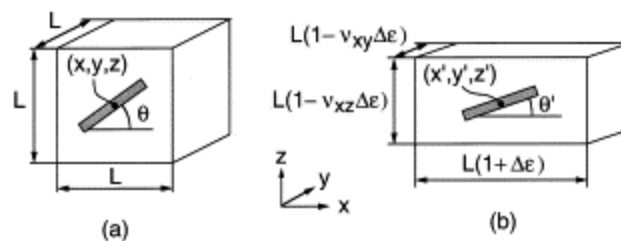


Figure 2.5 : Le modèle de réorientation des fibres 3D où seul l'angle θ est montré à titre d'illustration ; (a) avant la déformation et (b) après la déformation (Taya et al., 1998).

Dans le même contexte, l'approche proposée par (Haghgoo et al., 2020) vise à modéliser de manière unifiée la conductivité électrique et la réponse piézorésistive des nanocomposites polymères renforcés par nanotubes de carbone (CNT). Contrairement aux modèles purement percolatifs, cette approche intègre explicitement les mécanismes physiques de conduction à l'échelle microscopique, en particulier la conduction par effet tunnel entre inclusions conductrices, ainsi que l'évolution de la microstructure sous chargement mécanique.

Le matériau est représenté par un volume élémentaire représentatif (RVE) contenant un ensemble de nanotubes de carbone distribués aléatoirement dans une matrice polymère isolante (Figure 2.6). La conduction électrique est décrite comme résultant de la formation d'un réseau de chemins conducteurs constitué de jonctions CNT-CNT. Ces jonctions peuvent être de deux types : contact direct ou interaction à courte distance gouvernée par un mécanisme de type tunnel quantique. Dans ce cadre, la distance minimale entre nanotubes joue un rôle déterminant, puisqu'elle conditionne l'activation ou non du mécanisme de conduction.

La contribution dominante à la résistance du composite provient de la résistance de tunnel entre nanotubes, bien supérieure à la résistance intrinsèque des CNT eux-mêmes. Cette résistance R est décrite à l'aide d'une loi exponentielle issue de la théorie de Simmons, dépendant de la distance inter-particules :

$$R \propto \exp(\alpha d) \quad (2.2)$$

Où d est la distance entre nanotubes et α un paramètre dépendant de la hauteur de barrière énergétique de la matrice.

La conductivité macroscopique du composite dépend alors de la densité et de la connectivité du réseau de jonctions conductrices. À faible fraction volumique de CNT, les chemins conducteurs sont rares et discontinus, ce qui conduit à une faible conductivité. À mesure que la fraction volumique augmente, le nombre de jonctions croît rapidement, ce qui favorise la formation d'un réseau percolant et entraîne une augmentation importante de la conductivité. Le modèle permet ainsi de reproduire un seuil de percolation très faible (de l'ordre de 0.002 en fraction volumique pour les CNT).

Sous chargement mécanique, la déformation du composite modifie la position relative des nanotubes, ce qui entraîne une variation de la distance inter-CNT. Cette variation affecte

directement la résistance de tunnel, conduisant à une modification de la conductivité globale. L'évolution de la résistivité est ainsi liée à deux mécanismes concurrents : la destruction de chemins conducteurs existants par augmentation des distances inter-particules, et la formation de nouveaux contacts dans certaines directions en raison de l'effet de Poisson.

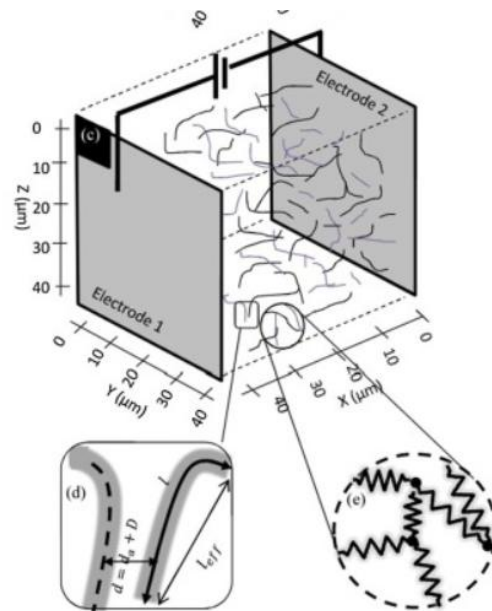


Figure 2.6 : Dispersion CNT à l'intérieur des plaques d'électrodes avec angle d'orientation maximal et la distance la plus courte entre deux CNT voisins (Haghgoo et al., 2020)

Une seconde famille de modèles repose sur une représentation discrète du réseau conducteur à l'échelle microscopique (Wang et al., 2018). Comme illustré à la Figure 2.7, les inclusions conductrices sont modélisées sous forme d'éléments (sphères ou fibres) distribués dans un volume représentatif. Les interactions électriques entre ces éléments dépendent de leur distance relative, en distinguant les cas de contact direct, de conduction par effet tunnel ou d'absence de connexion. Le système est ainsi assimilé à un réseau de résistances, où chaque inclusion constitue un nœud caractérisé par un potentiel électrique V_i , tandis que les courants I_{ij} circulent entre inclusions voisines i et j . Les conductances associées dépendent de la nature du contact entre particules. L'application de la loi des nœuds de Kirchhoff impose que la somme des courants en chaque nœud soit nulle, ce qui permet d'établir un système d'équations reliant les potentiels électriques de l'ensemble des inclusions. La résolution de ce système conduit à l'évaluation du courant global traversant le matériau, puis de sa conductivité effective. Contrairement aux approches semi-

empiriques, cette méthode permet de faire émerger naturellement le seuil de percolation à partir de la microstructure du matériau, au prix d'une complexité de calcul plus élevée.

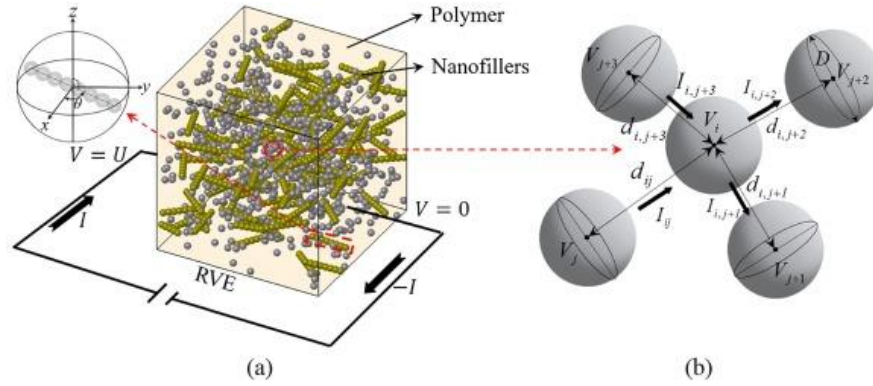


Figure 2.7 : Schéma de (a) un modèle de résistance avec quelques nanoparticules (NP) enchaînées dans les nanofillers fins et (b) le courant électrique entre le i -ième NP et ses voisins (Wang et al., 2018)

2.2.3 Modélisation par la méthode des éléments finis

En plus des approches analytiques, la méthode des éléments finis a été utilisée dans la littérature pour modéliser le phénomène de piézorésistivité dans les matériaux composites, notamment à l'aide de logiciels spécialisés tels que ABAQUS, COMSOL Multiphysics et DIGIMAT FE.

Dans un matériau composite, la différence entre les tailles des inclusions et les éléments composites a incité l'utilisation des éléments de volume représentatifs (RVE) dans une modélisation macroscopique directe. Cette méthode a été largement utilisée dans la littérature et nécessite l'utilisation des conditions aux limites périodiques.

À titre d'exemple, l'article de (Tamayo-Vegas et al., 2022) propose une étude combinée expérimentale et numérique de la conductivité électrique de nanocomposites époxy renforcés par nanotubes de carbone (CNT), en s'appuyant sur deux approches complémentaires : un modèle de réseau de résistances et une modélisation par éléments finis (EF) implémentée sous DIGIMAT FE. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de la distance de tunnel et de la fraction massique de CNT sur le seuil de percolation et la conductivité effective du composite.

Sur le plan numérique, la démarche repose sur la génération d'un volume élémentaire représentatif (RVE) tridimensionnel dans lequel les nanotubes sont distribués aléatoirement selon les propriétés géométriques réelles (longueur, diamètre, fraction volumique) (voir Figure 2.8). Dans le cadre de

la modélisation EF, le matériau est traité comme un milieu biphasique composé d'une matrice isolante et d'inclusions conductrices. Le RVE est discrétisé à l'aide d'un maillage volumique fin (de l'ordre de 420 000 éléments), garantissant la convergence de la solution électrique (Tamayo-Vegas et al., 2022).

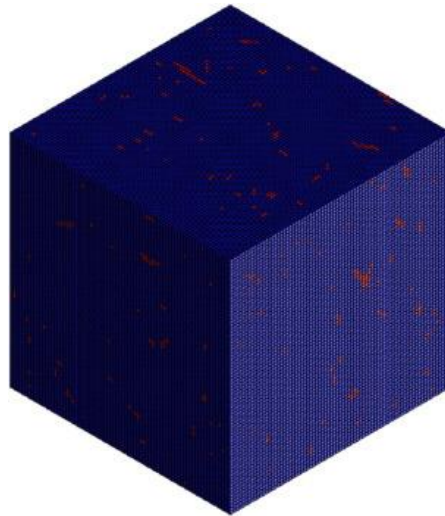


Figure 2.8 : Élément de volume représentatif de la matrice (en bleu) et des inclusions conductrices (en rouge) dans DIGIMAT FE (Tamayo-Vegas et al., 2022)

La conductivité effective est obtenue en résolvant le problème de conduction électrique à l'échelle du RVE, en imposant des conditions aux limites de potentiel sur deux faces opposées. Le champ de potentiel électrique est calculé dans tout le domaine, permettant d'extraire la conductivité globale du système. Contrairement au modèle de réseau de résistances, l'approche EF permet de capturer explicitement la distribution spatiale du champ électrique ainsi que les effets d'anisotropie induits par la distribution aléatoire des nanotubes.

Cependant, une limite importante du modèle EF réside dans sa difficulté à représenter précisément les mécanismes de conduction avant percolation. En effet, comme le modèle repose sur une homogénéisation du domaine, il tend à surestimer la résistivité de la matrice et ne capture pas correctement les effets de conduction par effet tunnel à très faible concentration. En revanche, au-delà du seuil de percolation, les résultats EF montrent généralement une excellente corrélation avec les données expérimentales, reproduisant fidèlement l'augmentation exponentielle de la conductivité.

En comparaison avec le modèle analytique, la méthode EF présente l'avantage d'être plus générale et directement applicable à des géométries complexes et à des analyses couplées multiphysiques. Elle permet notamment d'accéder à des champs locaux (potentiel, courant), ce qui est essentiel pour l'étude de la piézorésistivité. Toutefois, elle nécessite un coût de calcul élevé et reste dépendante de la qualité de la représentation géométrique du RVE (Tamayo-Vegas et al., 2022).

2.3 Propriétés d'auto-détection du béton

Les matériaux cimentaires conducteurs, tels que les composites à base de fibres conductrices, présentent des propriétés d'auto-détection leur permettant de traduire une sollicitation mécanique en variation de résistance électrique. Cette capacité repose sur la modification du réseau conducteur interne sous chargement, en lien avec l'évolution des contacts inter-fibres et des distances entre inclusions. Comme présenté dans le chapitre 5 du livre de Han et al., 2014, ces variations électriques dépendent du type de sollicitation appliquée, notamment en traction, en compression ou en flexion, chacune induisant des mécanismes spécifiques au sein du matériau.

2.3.1 Comportement en traction

Sous sollicitation en traction, l'allongement du matériau entraîne une augmentation progressive des distances entre les inclusions conductrices, ainsi qu'une réorganisation du réseau interne. Cette évolution conduit à une réduction du nombre de contacts directs entre fibres et à une dégradation du réseau percolant, illustré par la Figure 2.9 de (Han et al., 2014), cette modification microstructurale se traduit généralement par une augmentation de la résistance électrique en fonction de la déformation.

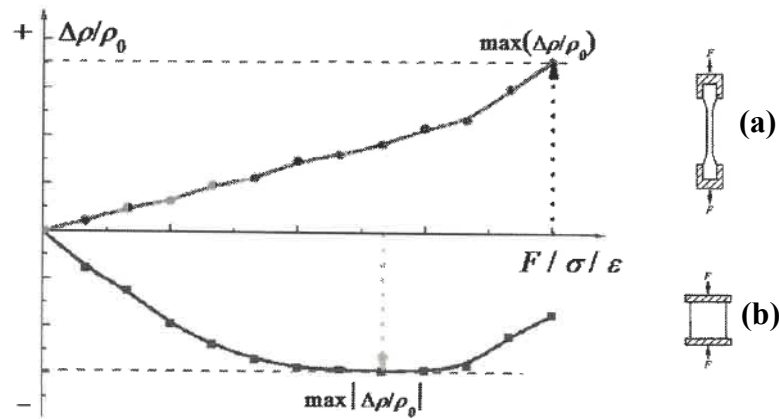


Figure 2.9 : Variation de la résistivité électrique sous chargement (a) traction VS (b) compression (Han et al., 2014)

Ce comportement s'explique par la transition progressive d'un mode de conduction dominé par des contacts directs vers un mode davantage contrôlé par l'effet tunnel, beaucoup plus sensible aux variations de distance. À des niveaux de déformation plus élevés, l'apparition de microfissures accentue encore cette tendance, en interrompant certains chemins conducteurs. Ainsi, la traction induit globalement une diminution de la conductivité électrique, faisant de ce mode de sollicitation un cas particulièrement sensible pour la détection de l'endommagement.

2.3.2 Comportement en compression

À l'inverse, sous chargement en compression, le rapprochement des inclusions conductrices favorise la multiplication des contacts électriques et améliore la connectivité du réseau percolant (Figure 2.10). Cette densification du réseau conducteur se traduit généralement par une diminution de la résistance électrique avec l'augmentation de la contrainte (Lee et al., 2019).

Dans ce cas, le mode de conduction par contact direct devient prédominant, ce qui permet un transport plus efficace des charges électriques à travers le matériau. Toutefois, ce comportement n'est pas toujours strictement linéaire. À des niveaux de contrainte plus élevés, des phénomènes tels que la formation de microfissures ou l'endommagement local peuvent apparaître, perturbant le réseau conducteur et entraînant des écarts par rapport à la tendance initiale (Figure 2.9 et Figure 2.10). Malgré cela, la compression reste généralement associée à une amélioration de la conductivité globale du matériau (Han et al., 2014).

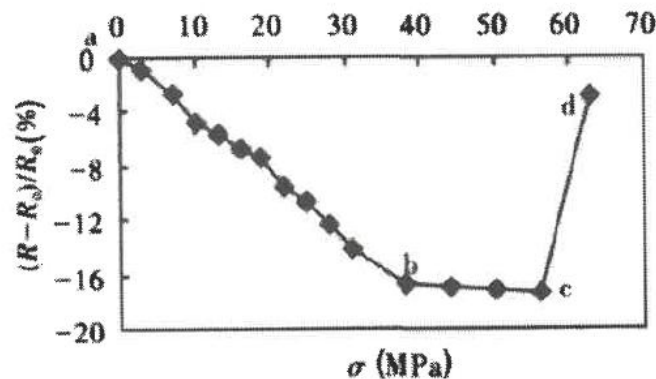


Figure 2.10 : Évidence expérimentale du changement de résistivité électrique en fonction de contrainte de compression (Han et al., 2014)

2.3.3 Comportement en flexion

Dans le cas de la flexion, le comportement piézorésistif est plus complexe en raison de la distribution non uniforme des contraintes au sein de l'élément. En effet, la partie supérieure de l'éprouvette est soumise à la compression, tandis que la partie inférieure est en traction, ce qui induit des effets opposés sur le réseau conducteur.

Comme illustré par la Figure 2.11 (Han et al., 2014), la réponse électrique est présentée sous forme de variation de résistance en fonction du chargement appliqué, souvent lors d'essais cycliques. On observe que la résistance évolue de manière corrélée avec le cycle de charge, traduisant la capacité du matériau à suivre les variations de sollicitation en temps réel. Les courbes montrent généralement une augmentation et une diminution répétées de la résistance, correspondant respectivement aux phases dominées par la traction et la compression au sein de la section.

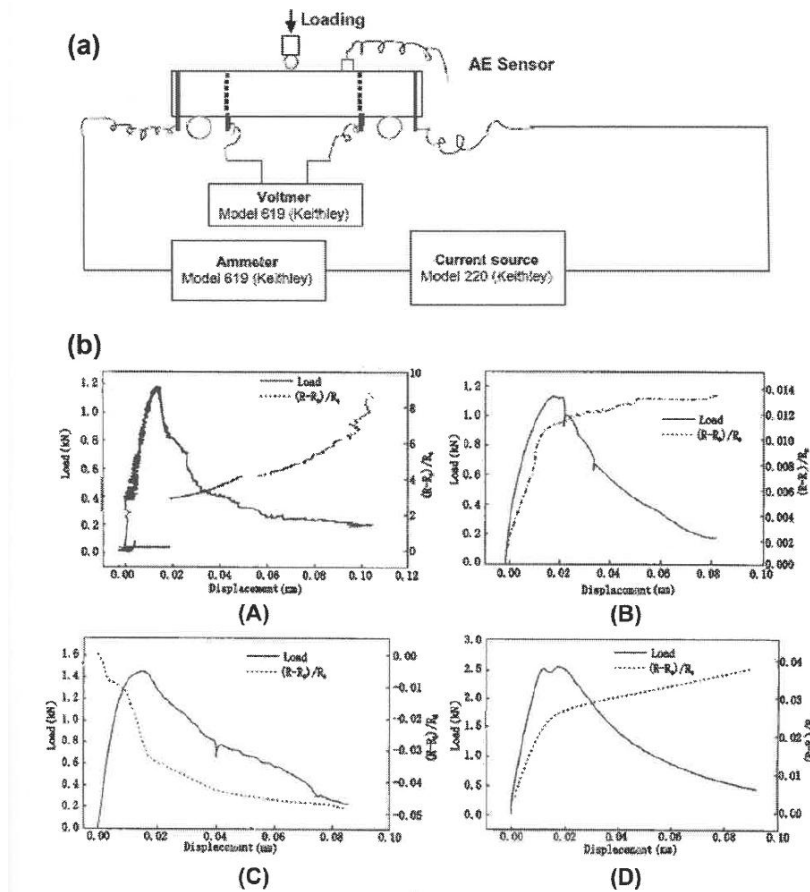


Figure 2.11 : Propriétés de détection du béton renforcé de fibres de carbone en flexion. (a) Schéma du dispositif expérimental. (b) Résultats des essais : (A) 0 % de fibres de carbone, (B) 0,20 % de fibres de carbone, (C) 0,55 % de fibres de carbone et (D) 0,80 % de fibres de carbone

La variation mesurée résulte de la superposition des contributions des zones en traction, où la résistance tend à augmenter en raison de l'ouverture des chemins conducteurs, et des zones en compression, où elle diminue du fait du rapprochement des inclusions (Figure 2.12 de (Bouillard et al., 2025)). Cette interaction conduit à une réponse globale non linéaire, pouvant également présenter des effets d'hystérésis entre les phases de chargement et de déchargement.

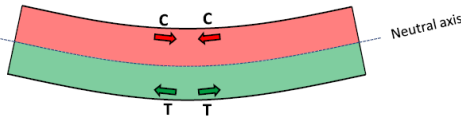
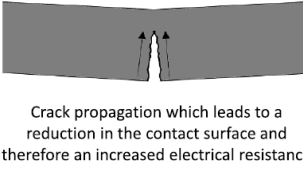
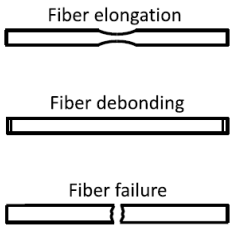
	Before cracking		After cracking	
	Stress distribution		Related to concrete micro-structure	Related to the fibers
Effect on concrete structure and fibers				
	Tensile stress  Reduced pore interconnectivity Increased distance between the fibers	Compressive stress  Increased pore interconnectivity Reduced distance between fibers		
Effect on resistivity	Increasing of the resistivity	Decreasing of the resistivity	Increasing of the resistivity	Increasing of the resistivity

Figure 2.12 : Phénomènes menants au changement de résistivité électrique sous traction ou compression (Bouillard et al., 2025)

Dans le cadre de ce projet, et selon une approche progressive, l'analyse est volontairement limitée au comportement piézorésistif sous sollicitations de compression. Cet état de chargement a été retenu d'une part pour sa simplicité de mise en œuvre expérimentale et sa bonne reproductibilité, et d'autre part parce qu'il permet d'isoler la réponse intrinsèque du matériau. Il constitue ainsi le seul cas de sollicitation permettant une comparaison pertinente des performances piézo-électriques à l'échelle du matériau entre différentes configurations (formulations, géométries et positions des électrodes, orientation des fibres), sans l'influence de mécanismes tels que la fissuration ou le décollement fibre-matrice (*debonding*), connus pour altérer significativement la résistivité électrique (Figure 2.12).

2.4 Piézorésistivité dans les bétons fibrés

Le béton fibré est un matériau composite aux performances mécaniques et de durabilité élevées, résultant principalement de l'ajout de fibres qui renforcent son comportement structural. Au-delà de cet apport mécanique, les fibres conductrices en acier confèrent au matériau des propriétés fonctionnelles avancées, notamment un comportement piézorésistif permettant de corréler les variations de résistivité électrique aux états de contrainte. En effet, comme présenté à la section 2.2, le comportement piézorésistif des fibres conductrices au sein de la matrice cimentaire permet de relier les variations de résistivité électrique aux sollicitations mécaniques appliquées. Cette propriété ouvre la voie au développement de bétons fibrés dits « intelligents » (*smart materials*),

capables d'assurer un auto-suivi de leur état, marquant ainsi une avancée significative dans le domaine des structures intelligentes.

La Figure 2.13 présente une comparaison du comportement pré-pic en traction de différents types de bétons. Le béton ordinaire (BO) correspond au béton classique, sans ajout de fibres ni optimisation particulière de la formulation. Le béton à haute performance (BHP) se distingue par une formulation optimisée (faible rapport eau/ciment, ajout d'adjuvants et éventuellement de fines) visant à améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

Le béton fibré à haute performance (BFHP) correspond à un BHP auquel sont ajoutées des fibres, généralement en faible proportion (de l'ordre de 1 %), permettant d'améliorer certaines propriétés mécaniques. Enfin, le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) est un matériau à matrice très dense et optimisée, renforcé par un taux élevé de fibres (environ 2 à 4 %), lui conférant des performances mécaniques supérieures.

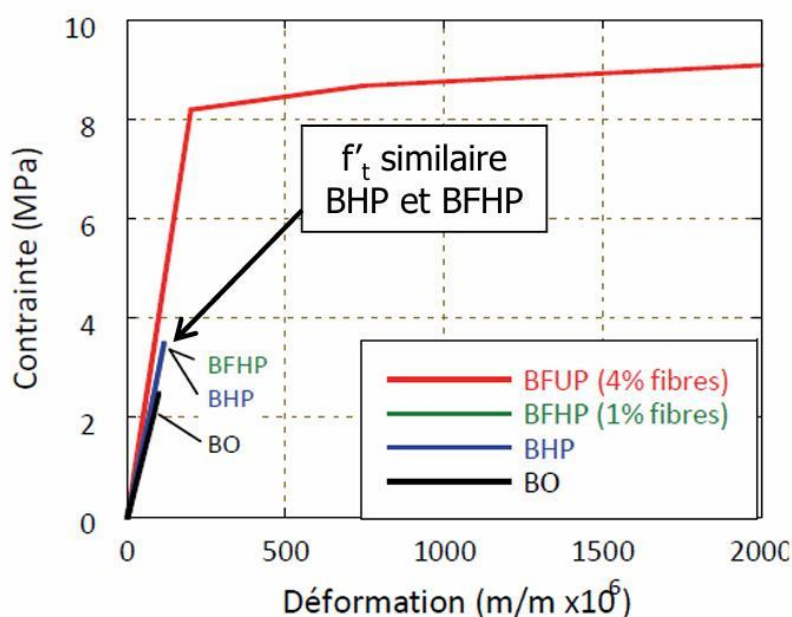


Figure 2.13 : Comportement en traction des différents types de béton (Cours de technologie de béton – PolyMtl, J-P Charron)

Comme observé sur la Figure 2.13, ces matériaux présentent des niveaux de contrainte différents pour une même déformation, le BFUP se distinguant par des niveaux de contrainte plus élevés. Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur le BFUP pour les chapitres suivants, en raison

de ses performances mécaniques élevées et de la présence importante de fibres conductrices, favorisant le développement d'un réseau conducteur adapté à l'étude du comportement piézorésistif.

2.4.1 Mélanges et résultats expérimentaux

L'intégration d'ajouts conducteurs dans les matériaux cimentaires constitue l'approche la plus répandue pour conférer aux bétons fibrés des propriétés auto-déetectrices.

Les études expérimentales rapportées dans la littérature montrent une grande diversité d'ajouts conducteurs, allant des fibres et particules carbonées aux inclusions métalliques et aux sous-produits industriels riches en phases conductrices.

2.4.1.1 Ajouts conducteurs utilisés dans les mélanges

Les premiers travaux fondateurs ont porté sur l'utilisation de fibres de carbone comme inclusion conductrice. Par exemple, (Chen et al., 2005) ont confirmé que ces fibres forment un réseau conducteur efficace, permettant le suivi des déformations et de l'endommagement.

Afin d'améliorer la conductivité et la robustesse du réseau électrique, des inclusions métalliques ont également été étudiées. (Han et al., 2011) ont utilisé des particules de nickel, exploitant leur forte conductivité intrinsèque pour réduire la résistivité du matériau et améliorer la stabilité du signal électrique. Ces particules permettent une conduction volumique efficace mais peuvent nécessiter des dosages élevés pour atteindre une sensibilité optimale.

Plus récemment, les recherches se sont orientées vers des systèmes hybrides et des ajouts issus de sous-produits industriels. (Lee et al., 2019) ont étudié des mélanges intégrant fibres d'acier et laitier d'aciérie, démontrant que ces ajouts simultanés peuvent améliorer la conductivité électrique, la durabilité et les performances mécaniques. Les auteurs illustrent dans un autre article (Lee et al., 2021) également le potentiel structurel du matériau à travers l'exemple d'un bloc d'ancrage en béton intelligent, mettant en évidence l'intégration possible de la fonction d'auto-détection dans des éléments d'infrastructure.

D'autres travaux similaires ont poursuivi ces investigations en optimisant les dosages et les combinaisons d'ajouts conducteurs afin d'améliorer la sensibilité et la stabilité du signal électrique sous chargements cycliques (H. V. Le et al., 2020), (Liu et al., 2024).

Les inclusions conductrices généralement utilisées sont illustrées sur la Figure 2.14.

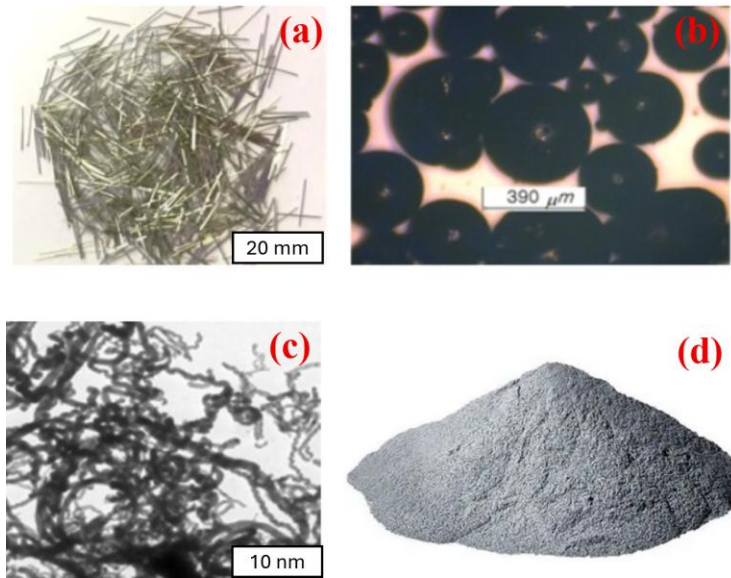


Figure 2.14 : Exemples d'inclusions conductrices : (a) Fibres d'acier, (b) Laitiers d'acier, (c) Nanofibres de carbones (Lee et al., 2019), (d) Particules de Nickel

2.4.1.2 Indicateurs de performance piézorésistive

La performance auto-déetectrice est généralement quantifiée à l'aide de la variation fractionnaire de la résistivité électrique (FCR) :

$$FCR = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (2.3)$$

Où ρ_0 est la résistivité électrique initiale, et ρ la résistivité électrique sous chargement.

La sensibilité du matériau est exprimée par le facteur de jauge FG :

$$FG = \frac{\Delta FCR(\%)}{\Delta \sigma} \quad (2.4)$$

Avec $\Delta \sigma$ la variation de la contrainte au cours du chargement.

Ce paramètre représente la variation relative de résistivité par unité de contrainte mécanique et permet d'évaluer la capacité du matériau à détecter de faibles déformations; les matériaux les plus sensibles électriquement sont ceux qui ont un facteur de jauge plus élevé

L'analyse des études expérimentales permet de synthétiser les principales caractéristiques des mélanges et résultats de mesures de résistivité électrique sous compression des spécimens cubiques dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Synthèse des études expérimentales de la sensibilité électrique des spécimens de béton sous compression

Référence	Composition des inclusions			Dimensions Spécimens (mm×mm×mm)	FG
	Fibres d'acier *	Laitiers d'acier	Diamètre		
	% Volumique	% Massique	(µm)		
(Lee et al., 2019)	2	-	-		0.124
	-	35.68	<390	50×50×50	0.096
	2	35.71	<390		0.157
(H. V. Le et al., 2020)	2	-	-		0.150
	2	35.59	390		0.246
	1	35.59	390	50×50×50	0.200
	2	35.59	5000		0.099
	2	17.79	390		0.298

(Liu et al., 2024)	2	-		40×40×40	0.111
	2	11.11	ND		0.210
	2	42.86			0.119
(Chen et al., 2005)	Fibres de carbone seulement (Diamètre : 7µm) : 3%			70.7×70.7×70.7	0.200
(Han et al., 2011)	Particules de Nickel seulement (Taille entre 3 et 7 (µm)): 21% du mélange			50×50×50	0.180

* : Les fibres d'aciers ont toutes les mêmes dimensions : Longueur = 6mm, Diamètre = 200µm

** ND : non disponible

En se basant sur les facteurs de jauge indiqués sur le Tableau 2.1 , l'incorporation de laitier d'acier contribue à l'amélioration du facteur de jauge grâce à la présence de phases métalliques conductrices et à l'optimisation de la connectivité du réseau électrique. Toutefois, lorsque le dosage devient élevé ou que des particules de dimensions plus grossières sont utilisées, la sensibilité tend à diminuer (H. V. Le et al., 2020), (Liu et al., 2024).

Dans le cas des composites contenant uniquement des fibres de carbone, la sensibilité rapportée demeure généralement bonne, ces fibres assurent la formation d'un réseau conducteur efficace (Chen et al., 2005).

Par ailleurs, l'utilisation exclusive de particules de nickel peut conduire à une sensibilité élevée en raison de leur forte conductivité intrinsèque et de la conduction volumique qu'elles induisent. Cependant, cette performance est généralement obtenue au prix de dosages élevés, ce qui peut affecter la maniabilité du mélange, la densité du matériau et ses propriétés mécaniques (Han et al., 2011).

Enfin, il convient de souligner que la majorité des études recensées dans la littérature privilégient l'utilisation de fibres courtes, typiquement de l'ordre de 6 mm de longueur, plutôt que des fibres plus longues d'environ 13 mm couramment employées dans les applications structurales. Par ailleurs, ces travaux se concentrent généralement sur des taux de fibres avec des fractions

volumiques proches de 2 %, sans toutefois fournir de justification explicite quant au choix de cette valeur ni à son caractère optimal au regard des propriétés visées.

2.4.2 Seuil de percolation

Le phénomène de percolation a été introduit dans la section 2.2.2. Lorsque le volume des ajouts atteint un certain seuil, appelée seuil de percolation, un réseau continu de connexions conductrices se forme, permettant une conductivité significative. En dessous de ce seuil, les connexions sont insuffisantes pour permettre un passage de courant.

Certaines études ont essayé de mettre en évidence le seuil de percolation dans le cadre des études expérimentales. Comme illustré à la Figure 2.15 de (Han et al., 2014), l'évolution de la conductivité en fonction de la fraction volumique des fibres présente une allure sigmoïdale caractéristique. Cette courbe en forme de « S » met en évidence l'existence d'un point d'inflexion, correspondant au seuil de percolation. Ce résultat expérimental confirme ainsi les prédictions théoriques discutées précédemment, selon lesquelles une transition importante du comportement électrique se produit à partir d'une concentration critique en inclusions conductrices.

Par ailleurs, les résultats montrent que le seuil de percolation dépend fortement des caractéristiques géométriques des fibres, notamment de leur diamètre et de leur rapport de forme ou élanement (ratio longueur sur diamètre). Une augmentation du rapport d'aspect (fibres plus longues et fines) entraîne une diminution du seuil de percolation, en facilitant la formation de chemins conducteurs à plus faible fraction volumique. À l'inverse, des fibres plus courtes nécessitent un dosage plus élevé pour atteindre la connectivité du réseau conducteur.

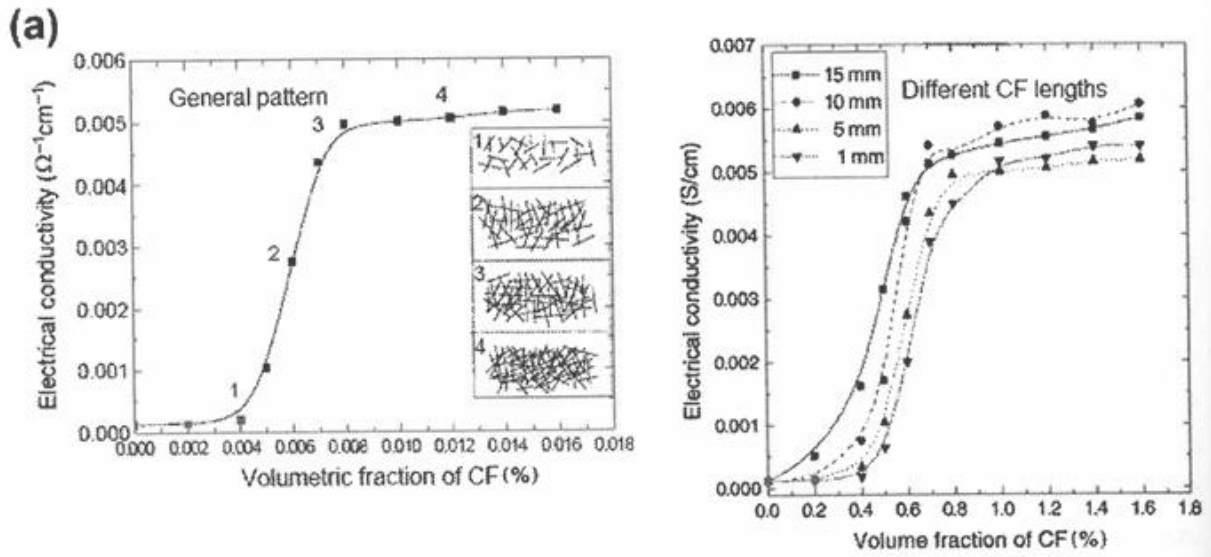


Figure 2.15 Changement de conductivité électrique en fonction de la fraction volumique pour différents types de fibres (Han et al., 2014)

Dans ce contexte, certaines approches analytiques ont été proposées pour estimer ce seuil. Notamment, l'étude de (Haghgoo et al., 2020) utilise une relation semi-empirique proposée par (Berhan & Sastry, 2007) reliant le seuil de percolation au rapport d'aspect des fibres, permettant ainsi une estimation a priori de la fraction volumique critique :

$$f_p = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 l + \frac{\pi}{6} D^3}{\frac{4\pi}{3} D^3 l \left(1 + \frac{3}{2} \frac{l}{D} + \frac{3}{8} \frac{l^2}{D^2}\right)} \quad (2.5)$$

Avec D et l sont respectivement le diamètre et la longueur des fibres

En revanche, la notion de seuil de percolation a été rarement explicitement discutée dans les études expérimentales portant sur les bétons fibrés renforcés par fibres d'acier présentées dans la sous-section précédente. Néanmoins, l'analyse des formulations utilisées révèle une utilisation récurrente de dosages proches de 2 % en volume de fibres d'acier, sans justification détaillée dans les articles.

Afin d'apporter un éclairage sur ce choix empirique, une estimation du seuil de percolation peut être réalisée à l'aide de la relation semi-empirique (2.5). Pour des fibres de longueur 6 mm et de diamètre 200 μm , utilisées dans plusieurs études de la littérature, la valeur obtenue est d'environ

1.47 %, tandis que pour les fibres retenues dans le cadre de ce mémoire (longueur 13 mm, diamètre 200 μm), le seuil estimé est de l'ordre de 0.72 %.

Ces résultats confirment l'influence du rapport d'aspect sur le seuil de percolation, une augmentation de la longueur des fibres conduisant à une diminution du seuil critique. Par ailleurs, la valeur obtenue de 1.47% reste du même ordre de grandeur que les dosages expérimentaux couramment utilisés, notamment autour de 2%, ce qui suggère que ces choix empiriques correspondent implicitement à une zone proche du seuil de percolation.

2.4.3 Effet de l'orientation des fibres sur les caractéristiques mécaniques et piézorésistivité

L'orientation des fibres se révèle déterminante dans l'évaluation des propriétés des bétons renforcés de fibres. En effet, des études ont démontré que l'orientation des fibres exerce une influence significative non seulement sur les propriétés mécaniques, mais également sur la conductivité électrique et le comportement piézorésistif du matériau. Cette orientation conditionne la formation, la continuité et l'efficacité des chemins de conduction électrique à travers la matrice cimentaire comme le démontre les études expérimentales de Lee et al., 2021, réalisées sur des éprouvettes cylindriques en BFUP, contenant des fibres d'acier et des particules de laitier d'acier (notées FSSA dans la Figure 2.16)

Comme illustré à la Figure 2.16, deux configurations principales peuvent être distinguées en fonction de l'orientation des fibres par rapport à la direction du courant électrique et à la position des électrodes. Dans le cas (b), les fibres sont orientées transversalement à la direction du courant. Cette configuration limite la formation de chemins conducteurs continus, car le courant doit traverser plusieurs interfaces fibre-matrice, souvent via des mécanismes de type effet tunnel. Il en résulte une conduction moins efficace et plus dispersée, ainsi qu'une sensibilité plus faible aux variations de déformation.

En revanche, dans le cas (a), les fibres sont orientées préférentiellement selon la direction du courant électrique, c'est-à-dire entre les électrodes. Cette orientation favorise la formation de chemins conducteurs directs et continus, en augmentant le nombre de contacts fibre-fibre dans la

direction de mesure. Le réseau conducteur devient alors plus structuré et plus efficace, ce qui améliore la conductivité globale du matériau.

D'un point de vue piézorésistif, cette configuration est également plus favorable, car toute modification de la distance ou du contact entre fibres sous chargement se traduit par une variation mesurable de la résistance électrique. Ainsi, une orientation alignée avec la direction du courant permet d'optimiser à la fois la conductivité et la sensibilité du matériau.

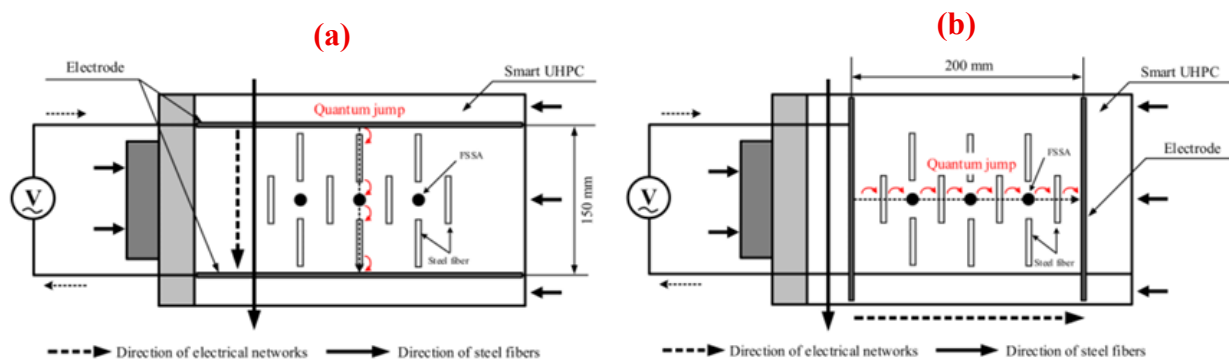


Figure 2.16 L'influence de l'orientation des fibres en fonction de l'emplacement des électrodes de mesures électrique (Lee et al., 2021)

2.5 Exemples d'applications structurales potentielles du BFUP intelligent

Le développement des bétons intelligents ouvre des perspectives pour leur utilisation dans des applications structurales, où leur capacité d'auto-détection représente un avantage significatif.

Cette section présente quelques applications potentielles dans le domaine du génie civil. À notre connaissance, ces approches ont principalement été étudiées en conditions de laboratoire et n'ont pas encore fait l'objet de validations à grande échelle en conditions réelles in situ. La stabilité physico-chimique à long terme des inclusions conductrices, notamment dans des environnements moins contrôlés, constitue vraisemblablement l'un des principaux verrous à leur mise en œuvre opérationnelle.

2.5.1 Suivi des zones critiques par béton intelligent et capteurs intégrés

Les zones d'ancrage des câbles de précontrainte constituent des régions critiques dans les structures en béton, en raison des concentrations élevées de contraintes et du risque de fissuration localisée. Dans ce contexte, l'utilisation de bétons intelligents permet d'intégrer directement une fonction de suivi structural au sein même du matériau (Lee et al., 2021).

Comme illustré à la Figure 2.17, un béton fibré intelligent peut être utilisé dans la zone d'ancrage, avec l'intégration d'électrodes permettant de mesurer les variations de résistance électrique. Sous l'effet des sollicitations mécaniques, notamment lors de la mise en tension des câbles ou en service, les modifications du réseau conducteur interne (variation des distances inter-fibres, apparition de microfissures) se traduisent par des variations mesurables de la résistivité. Ces mesures permettent ainsi de suivre l'évolution de l'état de contrainte et de détecter l'endommagement au niveau de cette zone critique.

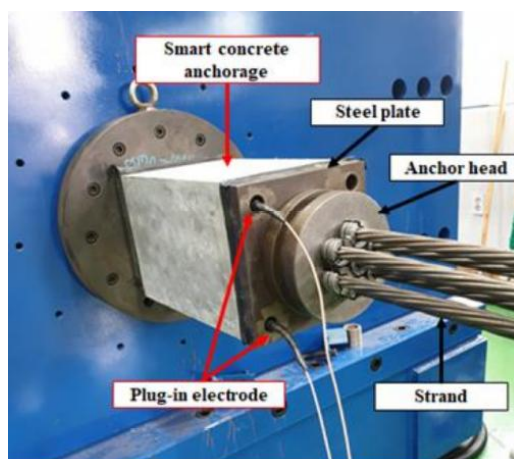


Figure 2.17 Développement de bloc d'ancrage des câbles de précontrainte en béton intelligent (Lee et al., 2021)

Dans une approche plus avancée, ces capteurs intégrés peuvent être couplés à des systèmes d'acquisition et de transmission sans fil, comme illustré à la Figure 2.18. Le matériau joue alors simultanément le rôle d'élément structurel et de capteur distribué utilisant un réseau de dispositifs électroniques associés permettent de collecter, traiter et transmettre les données en temps réel (H.-V. Le et al., 2021).

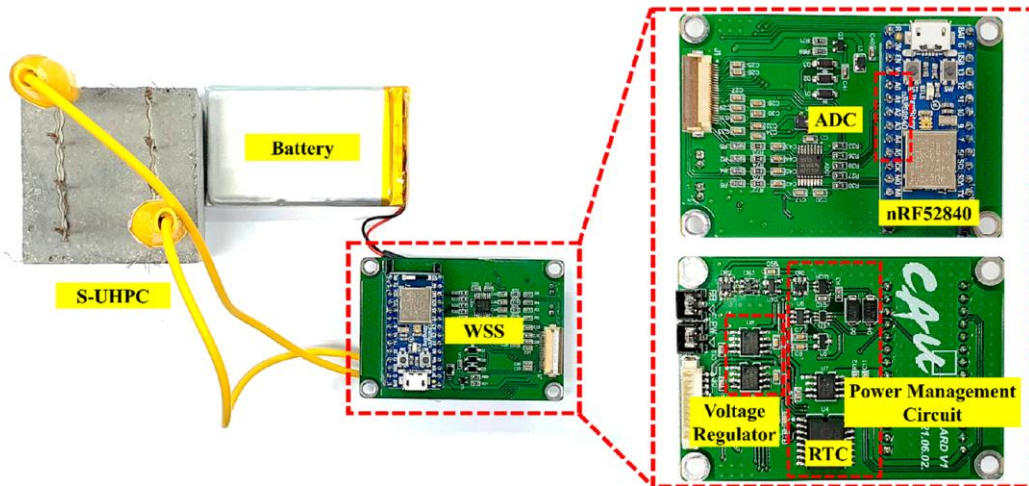


Figure 2.18 Système de détection sans fil développé (H.-V. Le et al., 2021)

Azhari, 2008 a développé des capteurs à base de ciment et des inclusions en fibres de carbone, ainsi que de nanotubes de carbone à paroi simple et à parois multiples. Ces capteurs présentent des facteurs de jauge 100 fois supérieurs à ceux des jauges de déformation conventionnelles. La Figure 2.19 illustre une utilisation suggérée de ces capteurs dans le contexte d'un suivi continu des structures dans des zones difficilement accessibles ou critiques pour la sécurité, notamment pour les ponts.

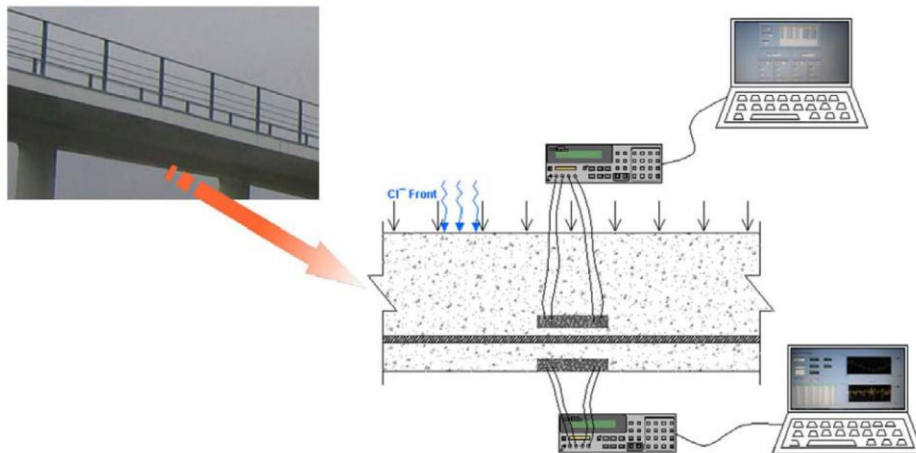


Figure 2.19 : Exemple suggéré de suivi d'une structure de Pont par béton intelligent (Azhari 2008)

2.5.2 Application aux structures de stockage souterrain

Le béton intelligent présente un intérêt particulier pour des applications structurales critiques, notamment les ouvrages de stockage profond de déchets radioactifs. Ces infrastructures sont constituées de galeries de grande section en béton, comme illustré à la Figure 2.20, pouvant atteindre plusieurs mètres de diamètre, et conçues pour assurer des fonctions de confinement, de support mécanique et de durabilité sur des horizons temporels de plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années. Dans ce contexte, la détection précoce et le suivi de l'évolution de la fissuration constituent un enjeu majeur pour garantir l'intégrité à long terme des barrières ouvragées.

Ces structures sont soumises à des conditions particulièrement sévères, combinant des sollicitations mécaniques complexes (contraintes in situ, gradients thermiques liés à la dissipation de chaleur des déchets, effets différés tels que le fluage et le retrait), ainsi que des environnements physico-chimiques agressifs. De plus, leur accessibilité devient très limitée, voire impossible, après fermeture des installations, ce qui restreint fortement le recours aux méthodes d'inspection et de maintenance conventionnelles.

Dans ce contexte, l'utilisation de bétons fibrés conducteurs ouvre la voie à une instrumentation intrinsèque du matériau, permettant d'intégrer directement une fonction de surveillance au sein même de la structure (Bouillard et al., 2025).

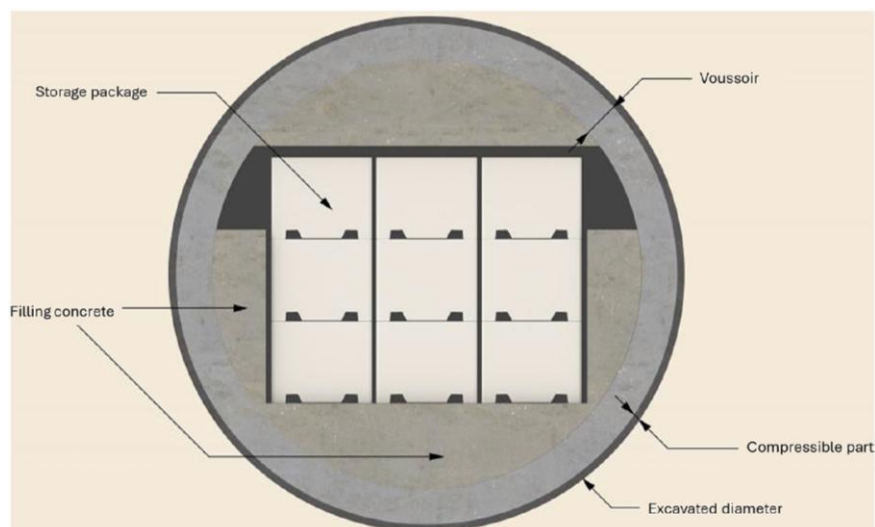


Figure 2.20 : Section d'une galerie des déchets radioactifs (Bouillard et al., 2025)

2.5.3 Application pour la détection du trafic routier

Le béton intelligent peut être utilisé comme capteur pour la détection du trafic et le suivi des charges appliquées aux infrastructures routières. Cette application repose sur l'intégration du matériau auto-détectant directement dans la chaussée, permettant ainsi de mesurer les sollicitations induites par le passage des véhicules (Han et al., 2014).

Comme illustré à la Figure 2.21, des capteurs en béton intelligent peuvent être disposés au sein de la structure de la route. Lors du passage des véhicules, les charges appliquées génèrent des déformations locales dans le matériau, entraînant des variations de sa résistivité électrique.

Ces variations permettent de détecter la présence des véhicules ainsi que l'intensité des sollicitations appliquées à la chaussée.

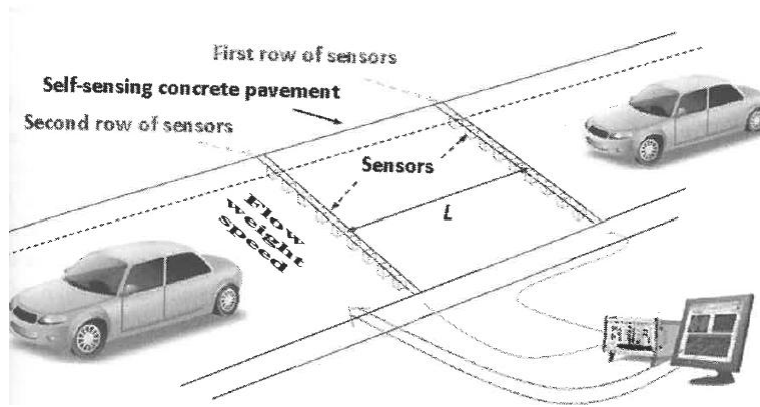


Figure 2.21 : Schéma d'une structure de chaussée en béton auto-délectrice pour la détection de véhicules (Han et al., 2014)

Cette approche ouvre des perspectives pour le développement d'infrastructures routières intelligentes, capables d'assurer un suivi en temps réel des conditions de circulation et de contribuer à la gestion et à la maintenance des ouvrages.

2.6 Mesures de la résistivité électrique dans les bétons fibrés

La caractérisation électrique des composites cimentaires auto-détecteurs repose sur la mesure de la résistance électrique et de la résistivité volumique. La résistance mesurée dépend de la géométrie de l'échantillon et de la configuration des électrodes, tandis que la résistivité constitue une propriété intrinsèque du matériau, indépendante de ses dimensions.

Dans le cas idéal d'un échantillon cylindrique ou prismatique soumis à un champ de courant uniforme, avec des lignes de courant parallèles et perpendiculaires à la section transversale, la résistivité électrique ρ peut être estimée à partir de la résistance mesurée R selon:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2.6)$$

Où A représente la section transversale traversée par le courant et L la distance entre les électrodes.

Le passage de la résistance R à la résistivité ρ s'effectue généralement à l'aide d'un facteur de forme. Dans le cas simple décrit ci-dessus, ce facteur est donc égal à A/L . En revanche, pour des configurations plus complexes avec un champ de courant non uniforme, la détermination de ce

facteur nécessite le recours à des approches analytiques ou à des simulations numériques, par exemple par la méthode des éléments finis (Nahir, 2005).

Dans le contexte des matériaux auto-détecteurs, la variation relative de la résistance ou de la résistivité constitue le signal de détection le plus utilisé, car elle reflète les modifications du réseau conducteur interne sous sollicitation mécanique.

2.6.1 Spectroscopie d'impédance

Dans l'étude de la résistivité des bétons fibrés, l'utilisation d'un courant alternatif (AC) est généralement privilégiée par rapport au courant continu (DC). En effet, les mesures en courant continu sont affectées par les phénomènes de polarisation aux interfaces électrode-béton, qui induisent une accumulation de charges et faussent la mesure de la résistance réelle du matériau. À l'inverse, un courant alternatif permet de limiter ces effets en imposant une variation périodique du signal, empêchant ainsi l'établissement d'un régime de polarisation stable (Nahir, 2005).

Par ailleurs, le courant alternatif permet d'explorer le comportement électrique du matériau en fonction de la fréquence, ce qui offre une information plus riche sur les mécanismes de conduction (conduction dans la matrice, aux interfaces, ou à travers les fibres).

Dans ce contexte, la notion d'impédance électrique est introduite. Contrairement à la résistance en régime continu, l'impédance $Z(\omega)$ est une grandeur complexe qui dépend de la fréquence du signal appliqué. Elle est définie par :

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.7)$$

Où $V(\omega)$ et $I(\omega)$ représentent respectivement la tension et le courant en régime sinusoïdal à la pulsation $\omega = \frac{2\pi}{f}$. L'impédance s'écrit généralement sous forme complexe :

$$Z = R + iX \quad (2.8)$$

Avec R la partie réelle (résistive) et X la partie imaginaire (réactive), liée aux effets capacitifs C ou inductifs L (Figure 2.22).

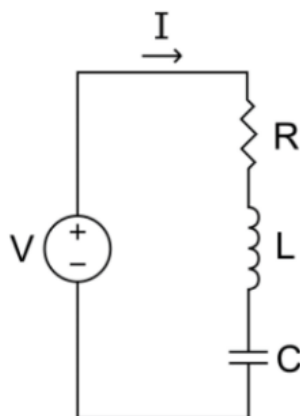


Figure 2.22 : Schéma classique d'un circuit RLC représentant l'impédance électrique (Sam Cooper, 2021)

2.6.1.1 Diagramme de Nyquist

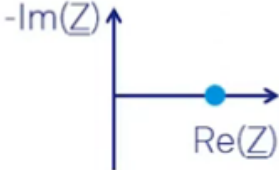
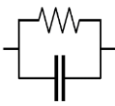
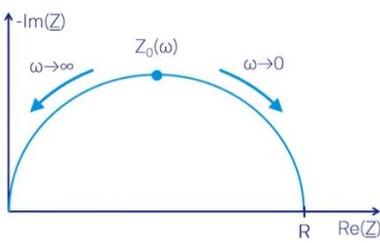
Le diagramme de Nyquist est une représentation graphique de l'impédance complexe, où la partie imaginaire $Im(Z)$ est tracée en fonction de la partie réelle $Re(Z)$. Chaque point correspond à une fréquence donnée.

Ce diagramme permet d'identifier les mécanismes électriques dominants et d'extraire des paramètres caractéristiques comme la résistance du matériau.

2.6.1.2 Comportement Nyquist des circuits usuels

Le Tableau 2.2 représente les expressions de l'impédance électrique des circuits avec les composantes usuelles résistives ou réactives.

Tableau 2.2 : Diagrammes Nyquist des circuits électriques usuels (Inspiré de (Zurich Instruments, 2022))

Circuit usuel	Expression de Z	Forme du Nyquist	Interprétation
 Résistance pure R	$Z = R$		Point sur l'axe réel car c'est une conduction pure sans effets capacitifs. Pour le béton, elle est associée à la connectivité du réseaux poreux.
 Condensateur C	$Z = \frac{1}{j\omega C}$		Droite verticale avec $\text{Im}(Z) < 0$. Comportement capacitif (interfaces, électrodes)
 Inductance L	$Z = j\omega L$		Droite verticale avec $\text{Im}(Z) > 0$. Comportement inductif (câbles, connexions)
 Circuit RC en parallèle	$Z = \frac{R}{1 + j\omega RC}$		Demi-cercle : -En basses fréquences, l'effet de C est négligeable, donc comportement résistif dominé par R. -En hautes fréquences, le C se comporte comme court-circuit, donc les charges ne produisent pas de résistance.

2.6.2 Mesures conventionnelles pour le béton

La mesure de la résistivité électrique du béton repose généralement sur l'application d'un champ électrique à travers une éprouvette saturée, puis la mesure du courant résultant. Selon la norme canadienne CSA A23.2 (A23.2-26C), cette mesure est réalisée à l'aide de deux électrodes plates placées aux extrémités de l'échantillon, couvrant toute la section transversale (Figure 2.23-a). Une tension est appliquée entre ces électrodes, et le courant traversant l'éprouvette est mesuré, permettant de déterminer la résistance électrique du matériau, puis sa résistivité à partir de ses dimensions géométriques.

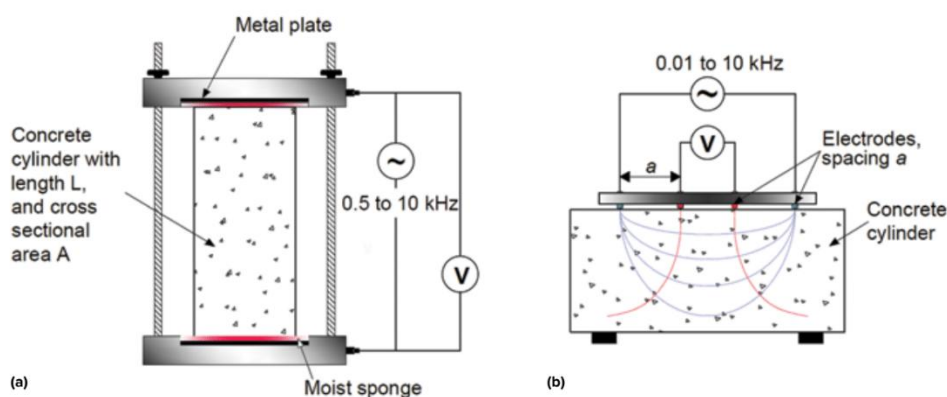


Figure 2.23 : Techniques conventionnelles de mesure de résistivité pour le béton (Layssi et al. 2015) : (a) mesure standardisée sur cylindre de béton avec deux électrodes (supportée par A23.2); (b) Mesure avec quatre électrodes (méthode Wenner supportée par l'AASHTO 95)

Comme illustré à la Figure 2.23-b, il est aussi possible de placer quatre électrodes à la surface externe d'un spécimen de béton selon la configuration connue sous le nom de configuration de Wenner supportée par l'AASHTO 95 (espacement a uniforme entre les 4 électrodes). Le courant est injecté par les électrodes externes et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes internes. Tel qu'il sera détaillé plus loin, cette approche est connue pour minimiser l'effet de la résistance de contact entre les électrodes.

Il convient de noter que la norme Canadienne CSA A23.2 (A23.2-26C) ne mentionne pas explicitement la nécessité d'utiliser un courant alternatif. Elle mentionne que : ``... Les mesures doivent être effectuées sur l'éprouvette conformément aux instructions du fabricant. **Note** : Pour

les instruments d'essai capables de mesurer un courant alternatif à fréquence variable, les essais doivent être réalisés à 1 kHz, sauf indication contraire...''

À l'inverse, la méthode utilisant 4 électrodes supportée par la norme AASHTO TP 95, repose sur l'utilisation d'un courant alternatif à basse fréquence (13 Hz), permettant de limiter les effets de polarisation et d'obtenir une mesure plus représentative des propriétés intrinsèques du matériau. Ainsi, dans le cadre des matériaux cimentaires conducteurs, l'utilisation de la spectroscopie d'impédance en courant alternatif apparaît plus adaptée, car elle permet d'analyser la réponse électrique du matériau en fonction de la fréquence et de mieux caractériser les différents phénomènes physiques en jeu.

2.6.2.1 Comportement électrique du béton et diagramme Nyquist

Le comportement électrique du béton peut être modélisé de manière simplifiée par un circuit équivalent de type résistance-capacité (RC) en parallèle. Cette représentation traduit la coexistence de deux mécanismes principaux de conduction au sein du matériau : d'une part, une conduction ohmique à travers la solution interstitielle contenue dans les pores, et d'autre part, des effets capacitifs liés aux interfaces internes (interfaces pâte-granulat, fibres-matrice) ainsi qu'à l'interface électrode-béton (Layssi et al. 2015).

Dans ce modèle, la résistance représente la conduction ionique dans le réseau poreux du béton, tandis que la capacité traduit les phénomènes de stockage de charges aux interfaces. La configuration en parallèle est alors adaptée aux matériaux hétérogènes comme le béton, où plusieurs chemins de conduction coexistent simultanément.

Le diagramme de Nyquist associé à ce comportement présente une allure en demi-cercle déformé, comme illustré sur la Figure 2.24. Cette forme résulte de la réponse combinée des contributions résistives et capacitives du matériau, ainsi que du contact électrodes-béton. À très basse fréquence, les effets de polarisation au niveau du contact électrodes-béton entraînent une augmentation de la composante imaginaire de l'impédance, ce qui explique la remontée de la courbe sur le diagramme de Nyquist. Cette zone est influencée par les conditions de contact électrique et ne reflète pas uniquement les propriétés intrinsèques du matériau.

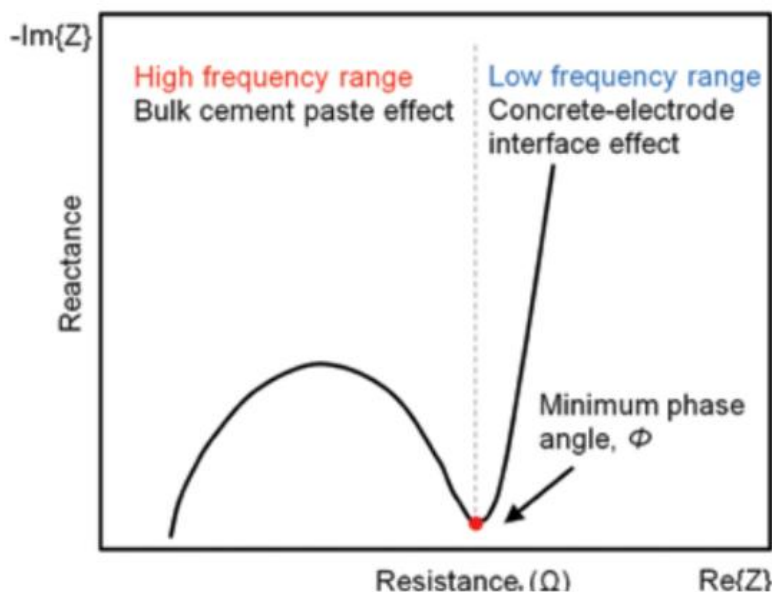


Figure 2.24 : Diagramme Nyquist typique du béton(Layssi et al. 2015)

Le point situé à proximité de l'intersection avec l'axe réel, correspondant à un minimum de la partie imaginaire de l'impédance, est généralement utilisé pour estimer la résistance électrique du béton. Ce point correspond à un régime où les effets capacitifs, notamment liés aux interfaces électrode-matériau, sont atténués, et où le comportement du système se rapproche d'un régime quasi-ohmique. Il permet ainsi d'extraire une valeur représentative de la résistance interne du matériau, tout en limitant l'influence des phénomènes de polarisation. Cette approche est couramment adoptée dans la littérature (voir par exemple la Figure 2.25) et a été retenue dans le cadre de ce projet pour estimer la résistance du spécimen.

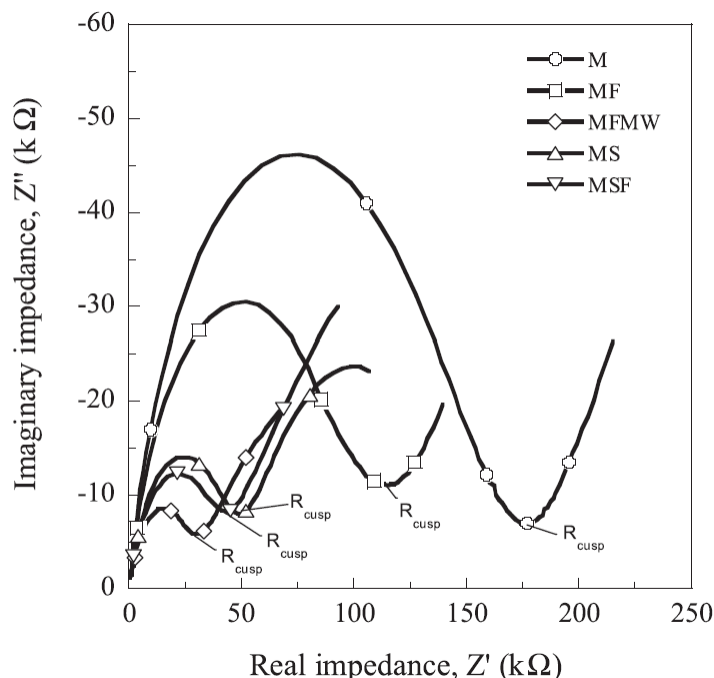


Figure 2.25 : Diagramme Nyquist des résultats expérimentaux de (Lee et al., 2019), illustrant la détection du point considéré comme résistance des spécimens (M : béton sans aucun ajout ; MF : avec ajout de fibres ; MS : avec ajout de laitier d'acier ; MSF : avec ajout de laitier et fibres ; MFMW : avec ajout de fibres et des nanotubes de carbone multi-parois.)

2.6.3 Configurations d'électrodes et méthodes de mesure

La mesure des propriétés électriques des matériaux cimentaires dépend étroitement de la configuration des électrodes utilisée. En effet, le mode d'injection du courant et de mesure du potentiel influence la distribution des lignes de courant dans le matériau, ainsi que la zone effectivement sollicitée lors de la mesure (Han et al., 2014).

La Figure 2.26 présente différentes configurations d'électrodes qui ont été utilisées dans la littérature pour la caractérisation électrique du béton. La configuration (a) correspond à une méthode à deux électrodes placées aux extrémités de l'échantillon, généralement associées à un matériau conducteur collé sur un adhésif conducteur assurant le contact électrique. Le courant traverse alors l'ensemble du volume du béton entre les deux faces opposées, et la différence de potentiel est mesurée aux mêmes bornes.

La configuration (b) correspond à une méthode à quatre électrodes disposées en surface de l'échantillon. Dans ce cas, les électrodes sont collées à l'extérieur du béton à l'aide d'un adhésif conducteur, deux servant à l'injection du courant et deux autres à la mesure de la différence de potentiel. Le courant circule ainsi dans une zone proche de la surface, avec une distribution tridimensionnelle dépendant de la position et de l'espacement des électrodes.

La configuration (c) correspond également à une méthode à quatre électrodes, mais avec des électrodes intégrées à l'intérieur du matériau lors du coulage. Dans ce cas, le courant circule directement à l'intérieur du volume du béton entre les électrodes internes, et la différence de potentiel est mesurée dans cette zone interne, définissant ainsi un volume de mesure plus localisé au cœur du matériau.

Dans le cadre de ce mémoire, ces configurations seront mises en œuvre expérimentalement. Leur influence sur les mesures sera analysée en détail dans le CHAPITRE 3.

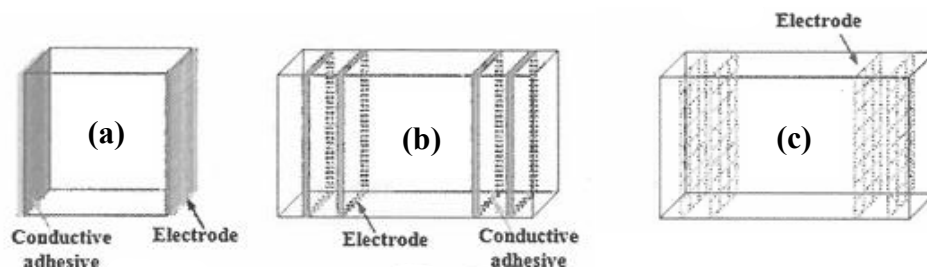


Figure 2.26 : Différentes configurations à deux ou quatre électrodes : Externes (a), (b) / Internes (c) (modifié de Han et al., 2014)

2.6.4 Acquisition et traitement du signal électrique

La résistance électrique du matériau peut être obtenue à partir des mesures de tension et de courant, permettant de suivre son évolution sous chargement mécanique. Cette approche transforme la variation de résistance en un signal électrique exploitable par un système d'acquisition de données (Figure 2.27).

Les signaux électriques sont généralement enregistrés simultanément avec les paramètres mécaniques tels que la charge ou la déformation, ce qui permet d'établir une corrélation entre la

réponse électrique et le comportement mécanique du composite cimentaire. Toutefois, les mesures peuvent être affectées par du bruit électrique ou des perturbations environnantes. Un traitement du signal, incluant le filtrage et le lissage des données, est souvent nécessaire afin d'extraire la réponse piézorésistive réelle du matériau (Han et al., 2014).



Figure 2.27 Exemple d'instrument de mesures électrique avec logiciel d'acquisition des données (Lee et al., 2021)

2.7 Conclusion

La présente revue de littérature a permis de présenter les principaux travaux portant sur le comportement piézorésistif des composites cimentaires conducteurs ainsi que leur potentiel pour le développement de matériaux intelligents. L'intégration d'ajouts conducteurs au sein des matrices cimentaires permet la formation d'un réseau électrique sensible aux sollicitations mécaniques, rendant possible la détection des déformations, des contraintes et de l'endommagement directement au cœur du matériau.

Les études analysées montrent que la réponse piézorésistive dépend des paramètres tels que la nature, la fraction volumique, la géométrie et la dispersion des inclusions conductrices. La formation d'un réseau conducteur efficace est généralement associée à l'atteinte du seuil de percolation, au-delà duquel une sensibilité piézorésistive significative peut être obtenue. Les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature mettent en évidence l'utilisation de différentes inclusions conductrices, telles que les fibres d'acier, les laitiers d'acier ou certains ajouts

industriels, permettant d'améliorer la conductivité électrique tout en conservant des propriétés mécaniques compatibles avec des applications structurales.

Par ailleurs, la caractérisation du comportement piézorésistif repose sur des méthodes de mesure adaptées aux matériaux cimentaires conducteurs. L'utilisation du courant alternatif et des techniques de spectroscopie d'impédance permet d'analyser plus finement les mécanismes de conduction, en distinguant les contributions résistives et capacitives du matériau. Dans ce cadre, la configuration des électrodes et le protocole sont considérables dans l'interprétation des résultats, en influençant la distribution du courant et la zone effectivement caractérisée.

Les suggestions d'applications structurales recensées dans la littérature confirment le potentiel des bétons intelligents pour le suivi structural des infrastructures. Ces matériaux peuvent être utilisés comme capteurs intégrés pour le suivi des zones critiques, telles que les zones d'ancrage des câbles de précontrainte, ou dans des structures complexes comme les galeries souterraines. Leur intégration peut être réalisée dans des systèmes de surveillance sans fil, ainsi que pour la détection des charges dynamiques, comme dans le cas des infrastructures routières. À ce jour, ces approches restent majoritairement limitées au laboratoire, la stabilité physico-chimique à long terme des inclusions conductrices constituant un obstacle majeur à leur déploiement en conditions réelles.

CHAPITRE 3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU BFUP SANS CHARGEMENT MÉCANIQUE

3.1 Introduction

Le présent chapitre vise à analyser la résistivité du BFUP à l'état non sollicité mécaniquement. Le programme expérimental porte sur l'évaluation de différents mélanges de BFUP, comprenant une variation de la quantité des éléments conducteurs, principalement les fibres d'acier et le laitier d'acier dans la matrice cimentaire. Ces paramètres influencent la formation du réseau conducteur interne et, par conséquent, les propriétés électriques du matériau.

Ce chapitre présente successivement la conception expérimentale et la fabrication des spécimens, le protocole établi de mesure et l'analyse comparative des différentes configurations d'électrodes, ainsi que l'étude de l'orientation des fibres. Les résultats obtenus permettront d'identifier les paramètres dominants du comportement électrique du BFUP et d'établir les bases expérimentales nécessaires à l'étude de son comportement sous chargement mécanique.

3.2 Conception expérimentale et fabrication des spécimens

3.2.1 Mélanges étudiés

Afin d'évaluer la résistivité électrique du BFUP en absence de contraintes mécaniques, un programme expérimental a été élaboré autour de formulations présentant différentes caractéristiques conductrices. L'objectif principal est d'examiner l'influence de constituants conducteurs incorporés dans la matrice cimentaire sur les propriétés électriques du matériau.

3.2.1.1 Éléments conducteurs dans la matrice cimentaire

L'amélioration de la conductivité électrique du BFUP repose sur l'introduction d'éléments conducteurs capables de favoriser la formation d'un réseau conducteur interne. Dans le cadre de cette étude, deux ajouts conducteurs ont été utilisés : les fibres d'acier et le laitier d'acier.

Les fibres d'acier contribuent à la conductivité électrique par la création de chemins conducteurs discontinus au sein de la matrice, facilitant le transport des charges électriques. Leur géométrie et leur distribution influencent directement la formation du réseau conducteur et la stabilité des mesures électriques.

Le laitier d'acier, utilisé comme ajout cimentaire, présente quant à lui une conductivité électrique intrinsèque supérieure à celle des constituants cimentaires traditionnels. Son incorporation modifie la microstructure de la matrice et peut améliorer la connectivité électrique entre les fibres et la pâte cimentaire. Contrairement aux fibres d'acier, la conductivité du laitier est indépendante de l'orientation de ses particules, celles-ci étant majoritairement de forme sphérique.

Le Tableau 3.1 présente les principales caractéristiques physiques et électriques des ajouts conducteurs utilisés.

Tableau 3.1 : Propriétés des matériaux conducteurs.

Type	Diamètre (μm)	Longueur (mm)	Module d'élasticité (GPa)
Fibres d'acier	200	13	200
Laitiers d'acier	45*	-	Inconnu

* Estimation du diamètre maximal des particules

3.2.1.2 Choix des pourcentages et formulation des mélanges

Les proportions des ajouts conducteurs ont été déterminées afin d'évaluer leur influence sur la formation du réseau conducteur et sur les propriétés électriques du BFUP.

Deux séries de mélanges ont été étudiées :

- Une première série visant à analyser l'effet de la variation du taux de fibres d'acier.
- Une seconde série dans laquelle le taux de fibres est maintenu constant tandis que la proportion de laitier d'acier est modifiée.

Les pourcentages retenus ont été choisis de manière à couvrir une plage représentative permettant d'observer les seuils de percolation électrique et les variations de conductivité associées. Pour chaque formulation, trois prismes ont été coulés afin de quantifier la variabilité des mesures expérimentales.

Le Tableau 3.2 présente la composition des mélanges étudiés et le nombre d'échantillons réalisés.

Tableau 3.2 : Mélanges choisis pour l'étude de résistivité du BFUP sans chargement mécanique

	Notation du mélange	Composition en matériaux conducteurs		Nombre de réplifications
		Fibres d'acier (%)	Laitiers d'acier (%) *	
	F3	3	Réf	3
Variation de % volumique des fibres (par rapport au mélange complet)	F2	2	Réf	3
	F1	1	Réf	3
	F0.5	0.5	Réf	3
	F0	0	Réf	3
Variation de % massique de laitier ajouté (% par rapport au liant)	F2L+5	2	Réf+5	3
	F2L+10	2	Réf+10	3

* Réf : pourcentage de référence présent dans le prémix du BFUP

Les dosages des constituants de chaque mélange ont été établis pour une gâchée correspondant à un volume de 6L de BFUP qui correspond à la capacité du petit malaxeur disponible dans le laboratoire.

Le Tableau 3.3 présente les quantités correspondantes pour l'ensemble des mélanges étudiés, ainsi que les résultats des essais d'étalement et de compression.

Tableau 3.3 : Composition des mélanges (dosages exprimés pour un volume de 6L de béton)

Mélange	Prémix BFUP (kg)	Adjuvants (kg)	Fibres d'acier (kg)	Laitier d'acier ajouté (kg)	Eau (kg)	Test d'étalement (mm)	f_c^{**} (MPa)
F3	11.69	0.23	1.40	-	1.28	241	121
F2	11.84	0.25	0.94	-	1.27	266	130
F1	11.98	0.23	0.47	-	1.24	260	125
F0.5	12.06	0.23	0.23	-	1.24	271	119
F0	12.14	0.22	-	-	1.25	266	-
F2L+5	11.81	0.29	0.94	+0.31	1.23	260	-
F2L+10	11.81	0.29	0.94	+0.58	1.23	255	-

* En raison de contraintes expérimentales indépendantes du cadre de ce projet, certains essais de compression n'ont pas pu être réalisés.

3.2.2 Configuration d'électrodes choisies

Les différentes configurations d'électrodes utilisées pour mesurer la résistivité électrique des matériaux cimentaires ont été présentées dans le CHAPITRE 2. Chaque méthode possède des avantages, des limites et un domaine d'application spécifique. En particulier, le choix de la configuration influence directement des aspects clés tels que l'effet de la résistance de contact aux interfaces électrode-matériau, le degré d'homogénéité du champ électrique généré dans l'échantillon, ainsi que la précision et la reproductibilité des mesures obtenues.

Dans le cadre du présent travail expérimental, trois configurations d'électrodes ont été retenues afin d'évaluer leur influence sur la qualité et la reproductibilité des mesures électriques du BFUP.

- Mesure à quatre électrodes internes : sur spécimen 100 x 100 x 150 mm
- Mesure à quatre électrodes externes : sur spécimen 100 x 100 x 150 mm

- Mesure à deux électrodes externes : sur spécimen 100 x 100 x 100 mm

Les matériaux utilisés et les détails de chaque configuration sont détaillés dans les sections suivantes.

3.2.3 Coffrages et dimensions des prismes

Les configurations d'électrodes mentionnées dans la section précédente nécessitent la fabrication de spécimens présentant des géométries adaptées aux différentes méthodes de mesure électrique. Afin de répondre à ces exigences tout en optimisant la fabrication des éprouvettes, il a été choisi d'utiliser des coffrages prismatiques de dimensions $100 \times 100 \times 450$ mm (Figure 3.1).

Chaque coffrage permet de couler un prisme unique correspondant à un mélange donné. Après durcissement, ce prisme est découpé en trois spécimens de longueurs différentes, soit 150 mm, 150 mm et 100 mm (Des portions de 25mm ont été coupées des extrémités pour éliminer les effets de surface de coffrage), afin d'obtenir les éprouvettes nécessaires aux trois configurations de mesure étudiées. Les spécimens de 150 mm sont utilisés pour les mesures à quatre électrodes (internes ou externes), tandis que les spécimens cubiques de 100 mm sont destinés aux mesures à deux électrodes externes.

L'utilisation de coffrages de grande longueur présente également l'avantage de permettre l'application d'une méthode de coulage spécifique visant à favoriser l'orientation des fibres dans la direction longitudinale du prisme. Cette approche contribue à assurer une distribution plus contrôlée des fibres dans les spécimens destinés aux mesures électriques.

Afin de permettre l'intégration des électrodes internes, quatre rainures ont été réalisées dans les parois des coffrages. Ces rainures permettent de positionner et de maintenir en place des grillages métalliques utilisés comme électrodes internes avant le coulage du béton. Cette disposition assure un positionnement précis des électrodes à l'intérieur du prisme.

Après le coulage et le durcissement du matériau, les prismes obtenus sont découpés selon les longueurs prévues afin d'obtenir les trois types de spécimens correspondant aux configurations d'électrodes étudiées pour chaque mélange.

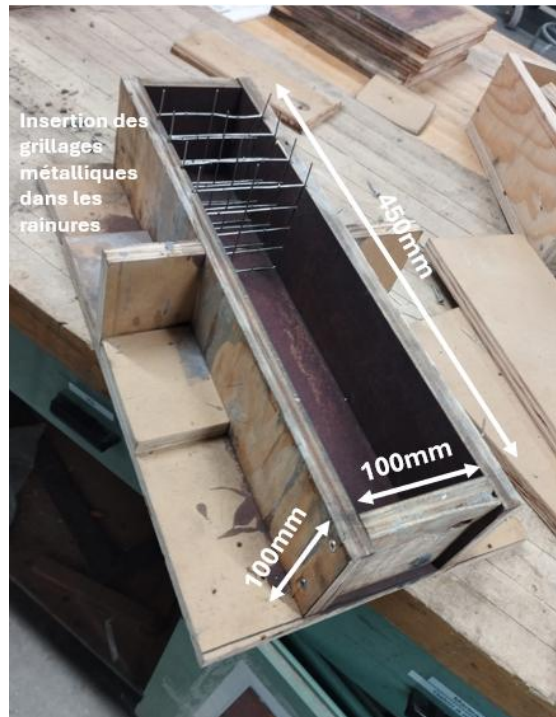


Figure 3.1 : Coffrage type utilisé pour les coulées du projet

3.2.4 Procédure des coulées de béton

Les mélanges de BFUP ont été préparés à l'aide d'un malaxeur de laboratoire permettant la production d'environ 6 L de béton par mélange. Les constituants ont été introduits dans le malaxeur selon les dosages définis dans la section précédente afin d'obtenir un mélange homogène avant la mise en place dans les coffrages.

Afin de favoriser une orientation préférentielle des fibres d'acier selon l'axe longitudinal des prismes, les coffrages ont été positionnés en configuration inclinée lors de la coulée. Cette disposition induit un écoulement gravitaire du béton le long du coffrage, générant un champ de vitesse principalement unidirectionnel qui tend à aligner les fibres dans la direction principale du prisme. Cette approche est reconnue pour améliorer l'anisotropie contrôlée du matériau, en lien avec l'orientation des fibres.

Des coulées préliminaires ont été réalisées afin de définir les caractéristiques des électrodes internes en grillage métallique en acier inoxydable. Ces essais ont permis d'identifier un diamètre de fil approprié, d'environ 5 mm : un grillage plus épais s'est avéré difficile à ancrer dans le

coffrage, tandis qu'un grillage plus mince avait tendance à être entraîné par l'écoulement du béton lors de la coulée.

Malgré ces ajustements, des phénomènes d'agglomération du mélange ont été observés au niveau des électrodes internes. Ces difficultés étaient principalement liées à la présence d'un taux élevé de fibres d'acier, qui entravait l'écoulement du béton à travers les grillages métalliques utilisés comme électrodes internes. Le maillage initial des grillages, de dimension 25×25 mm, s'est avéré trop fin pour permettre un passage adéquat du mélange.

Afin de remédier à cette situation, la géométrie du maillage a été modifiée en adoptant des ouvertures rectangulaires de 25×50 mm, facilitant ainsi l'écoulement du béton à travers les électrodes, ce qui est illustré sur la Figure 3.2.

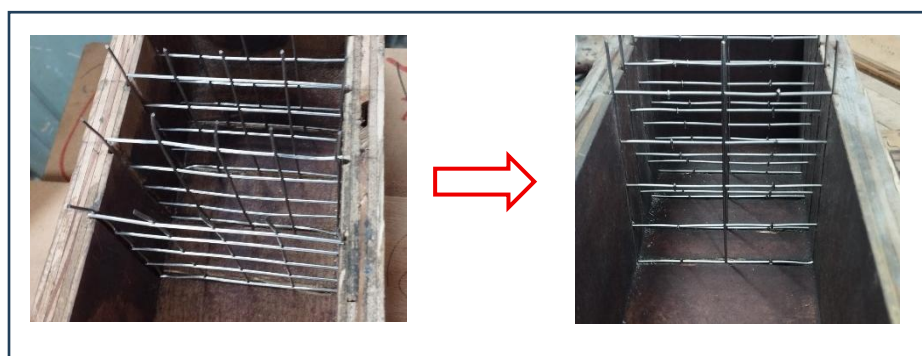


Figure 3.2 : Grillage des électrodes intérieures avant et après ajustement

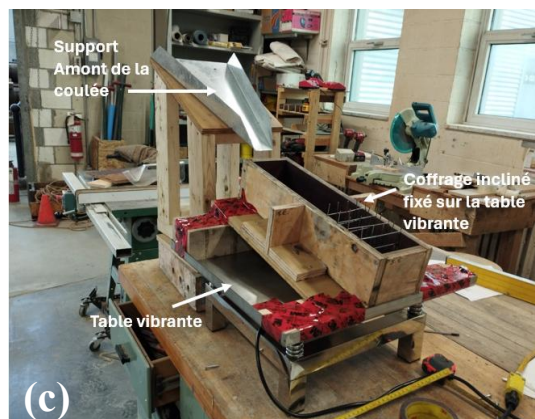
Malgré cet ajustement, certaines difficultés d'écoulement ont persisté pour les mélanges contenant les taux de fibres les plus élevés (2% et 3%). Une table vibrante a donc été utilisée afin d'améliorer localement l'écoulement du béton lors du passage à travers les grillages. Le coffrage incliné était fixé sur la table vibrante, cependant la vibration n'était appliquée que pendant de courtes périodes lorsque le mélange atteignait la zone des électrodes, afin de minimiser la perturbation de la distribution et de l'orientation des fibres dans le prisme. L'amplitude de vibration utilisée était volontairement faible et la durée moyenne d'application était d'environ 40 secondes. Cette procédure a été appliquée uniquement pour les mélanges présentant les taux de fibres les plus élevés, soit 2 % et 3 %. La séquence générale de fabrication des spécimens est résumée en plusieurs étapes illustrées la Figure 3.3.

Étape 1 : Préparation du mélange (a), (b)

- Malaxage des constituants dans le malaxeur (6 L)
- Réalisation de l'essai d'étalement afin de vérifier la maniabilité du mélange

**Étape 2 : Mise en place dans les coffrages (c)**

- Coulée du mélange dans le coffrage incliné
- Passage du mélange au niveau des électrodes internes
- Application brève de vibrations pour faciliter l'écoulement du béton

**Étape 3 : Préparation des spécimens (d),(e)**

- Durcissement du prisme pendant 24h
- Décoffrage
- Sciage des prismes afin d'obtenir les spécimens correspondant aux différentes configurations d'électrodes

**Étape 4 : Entreposage des spécimens (e)**

- dans la salle de cure afin de maintenir des conditions contrôlées jusqu'à leur utilisation lors des mesures électriques



Figure 3.3 : Procédure de fabrication des prismes de BFUP

3.3 Utilisation du dispositif de mesures électriques et mesures préliminaires

3.3.1 Dispositif de mesure

Les mesures électriques réalisées dans le cadre de cette étude ont été effectuées à l'aide d'un impédancemètre *Sciospec ISX-3* récemment acquis au laboratoire, permettant de caractériser les propriétés électriques des matériaux à travers des mesures d'impédance dans une plage de fréquences déterminée.

Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur l'injection d'un signal électrique alternatif dans le matériau à l'aide d'électrodes disposées sur ou à l'intérieur du spécimen. La réponse électrique du matériau est ensuite mesurée sous forme de différence de potentiel, permettant de déterminer l'impédance électrique du système.

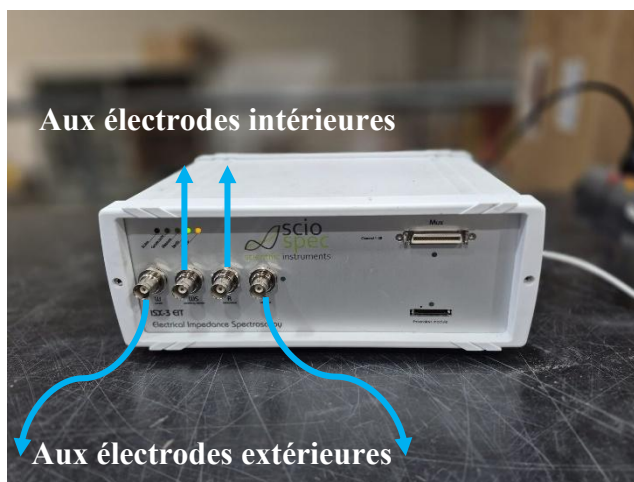


Figure 3.4 : Impédance mètre

L'impédancemètre est équipé de quatre entrées (Figure 3.4), qui sont reliées directement aux électrodes du spécimen à l'aide de câbles conducteurs. Cette configuration permet de réaliser les différentes méthodes de mesure étudiées dans ce travail, notamment les configurations à deux électrodes externes, quatre électrodes externes et quatre électrodes internes. Dans le cas des mesures à deux électrodes, les électrodes situées à chaque extrémité du spécimen sont électriquement court-circuitées deux à deux afin de former deux électrodes équivalentes.

L'acquisition des données est effectuée en connectant l'impédancemètre à un ordinateur équipé du logiciel de contrôle et d'acquisition associé. Ce logiciel (Figure 3.5) permet de définir les

paramètres de mesure (entre autres, la configuration à deux électrodes ou à quatre électrodes) et d'enregistrer les résultats obtenus. Les données peuvent ensuite être exportées sous différentes formes, notamment sous forme de diagrammes de Nyquist, ou sous forme de variations de l'impédance en fonction du temps ou de la fréquence.

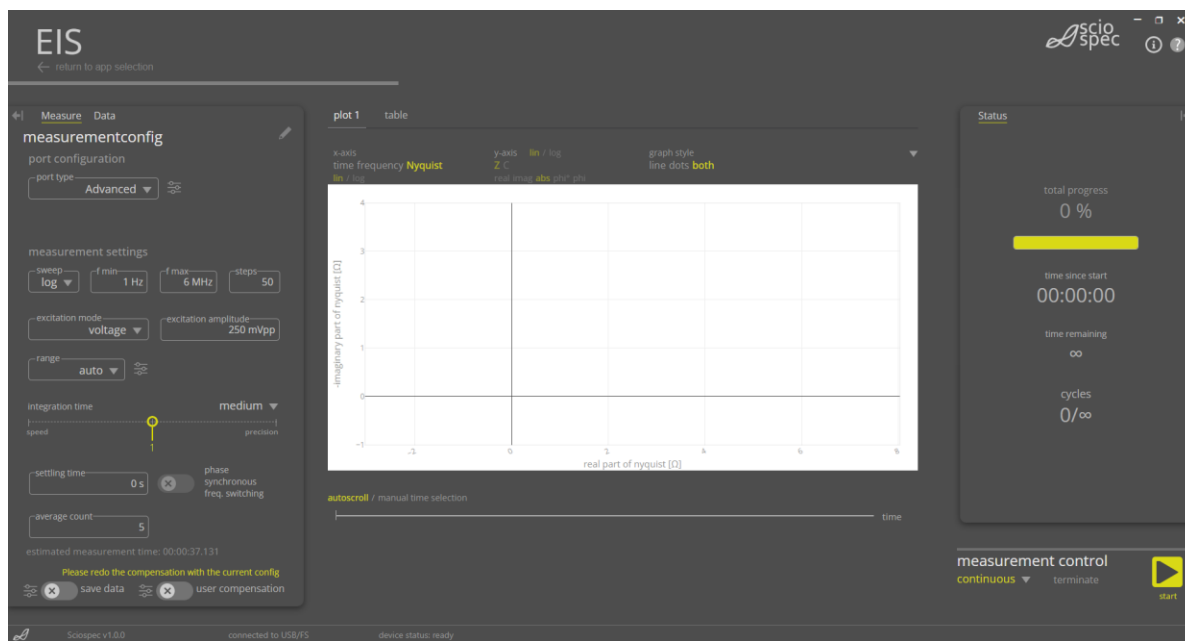


Figure 3.5 : Interface d'acquisition des données liée à l'impédancemètre

La réalisation des mesures nécessite de définir plusieurs paramètres d'entrée, tels que la plage des fréquences appliquées, ainsi que l'amplitude du signal électrique injecté (courant ou tension). Afin de déterminer les conditions de mesure les plus appropriées pour les spécimens étudiés, une série de mesures préliminaires a été réalisée. Ces essais ont d'abord été effectués en utilisant des paramètres fréquemment rapportés dans la littérature, puis en faisant varier progressivement certains paramètres afin d'évaluer leur influence sur la stabilité et la qualité des mesures.

Les essais ont été réalisés sur une table de laboratoire dédiée (Figure 3.6), dans un environnement présentant un niveau limité de perturbations électriques, afin de réduire l'influence des interférences électromagnétiques sur les mesures d'impédance.

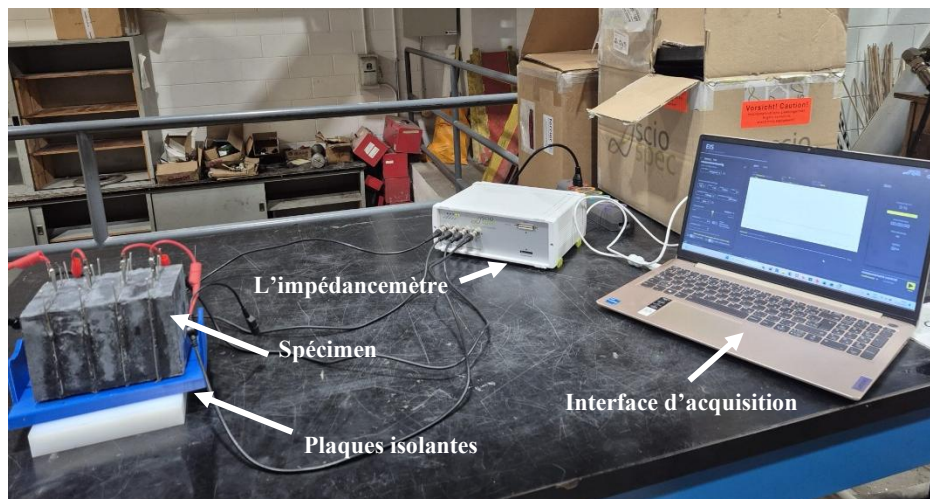


Figure 3.6 : Configuration expérimentale pour la mesure de résistivité électrique par impédancemètre

3.3.2 Méthodologie générale des mesures électriques

Les mesures électriques ont été réalisées selon une procédure expérimentale standardisée afin d'assurer la comparabilité des résultats entre les différents spécimens et configurations d'électrodes.

Avant chaque mesure, les spécimens sont retirés de la salle de cure humide et laissés à l'air libre dans le laboratoire pendant une durée d'environ 15 minutes. Cette étape vise à assurer des conditions de séchage similaires pour l'ensemble des spécimens avant la réalisation des mesures électriques.

À l'issue de cette période, le spécimen est placé sur la table de mesure et connecté à l'impédancemètre à l'aide de câbles conducteurs. Le schéma de branchement dépend de la configuration d'électrodes étudiée, soit les configurations à deux électrodes externes, à quatre électrodes externes ou à quatre électrodes internes.

Dans le cas des spécimens équipés de quatre électrodes internes sous forme de grillages d'acier, les câbles de l'impédancemètre sont connectés directement aux extrémités des grillages métalliques émergeant de la surface du spécimen. Les électrodes sont ensuite reliées aux bornes correspondantes de l'appareil selon l'ordre défini par la configuration de mesure (Figure 3.7).

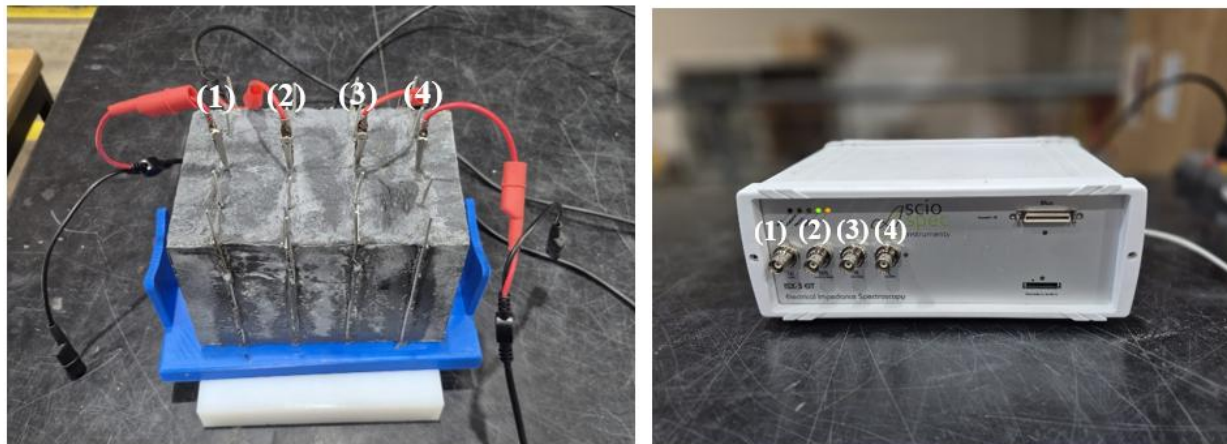


Figure 3.7 : Branchement des câbles (exemple de spécimen avec quatre électrodes internes)

Une fois les connexions établies, les mesures sont réalisées à l'aide du logiciel de contrôle de l'impédancemètre, en définissant les paramètres d'entrée nécessaires tels que la plage de fréquences et l'amplitude du signal électrique injecté. Le choix de ces paramètres peut influencer la stabilité et la qualité des mesures obtenues.

Afin de déterminer les paramètres les plus appropriés pour les spécimens étudiés, une série de mesures préliminaires a été réalisée. Ces essais visent à analyser l'influence de différents paramètres d'entrée sur les résultats obtenus et à identifier les conditions de mesure les plus adaptées. La méthodologie et les résultats de ces essais préliminaires sont présentés dans la sous-section suivante.

3.3.3 Mesures préliminaires

3.3.3.1 Choix des paramètres d'entrée

Dans les études rapportées dans la littérature, le choix des paramètres d'entrée pour les mesures d'impédance repose généralement sur l'utilisation d'un intervalle de fréquences relativement large, incluant notamment des fréquences faibles, afin de capter les phénomènes électriques liés à la conduction dans la matrice cimentaire et aux interfaces électrode-matériau. Les basses fréquences permettent en effet de mieux observer les mécanismes de conduction et de polarisation présents

dans les matériaux cimentaires, tandis que les fréquences plus élevées permettent d'analyser la réponse capacitive du système.

Cependant, la revue de la littérature montre que le choix du mode d'excitation électrique, en tension ou en courant, ainsi que l'amplitude du signal injecté sont généralement rapportés, mais rarement accompagnés d'une justification détaillée des valeurs retenues, notamment en l'absence d'études de sensibilité.

Dans ce contexte, une série de mesures préliminaires a été réalisée afin d'évaluer l'influence de ces choix sur les résultats obtenus. Les mesures ont été effectuées sur des spécimens équipés de quatre électrodes internes, en utilisant un intervalle de fréquences proche de celui rapporté dans plusieurs références, soit de 1 Hz à 6 MHz, avec 50 points de mesure répartis sur l'intervalle.

Deux modes d'excitation ont été étudiés : l'injection d'une tension et l'injection d'un courant. Les essais ont d'abord été réalisés en utilisant des valeurs initiales inspirées de la littérature, soit 250 mV dans le cas d'une excitation en tension et 0,02 mA dans le cas d'une excitation en courant. Par la suite, une étude de sensibilité des mesures a été réalisée autour de ces valeurs.

L'analyse des diagrammes de Nyquist obtenus sur la Figure 3.8 montre que la variation de l'amplitude du signal n'entraîne pas de modification significative de la forme des courbes d'impédance, que ce soit dans le cas d'une excitation en tension ou en courant. Les résultats obtenus pour différentes amplitudes restent globalement superposables.

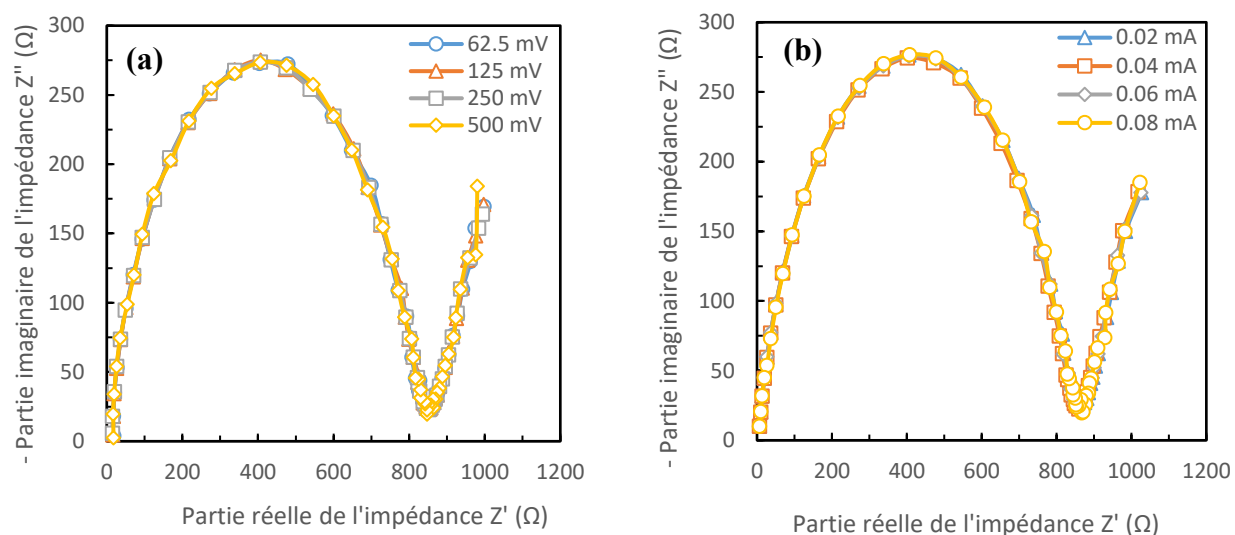


Figure 3.8 : Réponse spectrale d'impédance d'un spécimen avec injection de tension (a) ou injection de courant (b)

Une correspondance similaire a également été observée entre les résultats obtenus en mode tension et en mode courant (Figure 3.9).

Ces observations montrent que le choix du mode d'excitation, qu'il soit en tension ou en courant, n'a pas d'influence significative sur les résultats dans les conditions étudiées. Toutefois, il est recommandé d'adopter une amplitude de signal modérée, afin d'éviter toute excitation électrique excessive pouvant altérer les propriétés du matériau ou engendrer un échauffement local, et ainsi de garantir un comportement dans le domaine linéaire électrique.

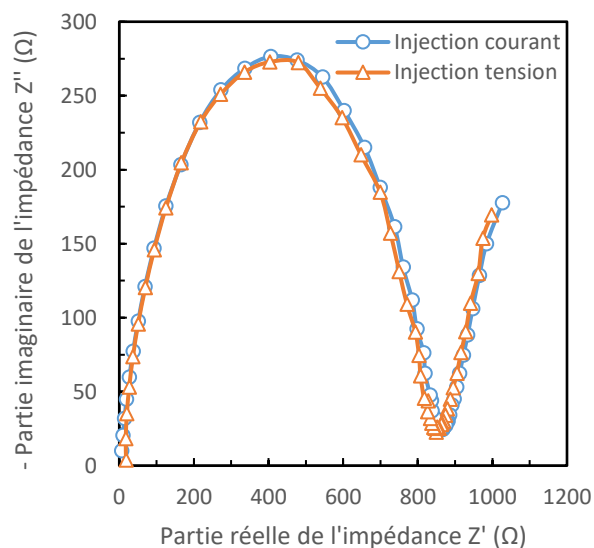


Figure 3.9 : Superposition des réponses spectrales de l'impédance avec injection de courant et de tension

Sur la base de ces observations, les mesures réalisées dans le cadre de ce projet ont été effectuées en utilisant une excitation en tension de 250 mV. Les autres paramètres de mesure ont été définis comme suit : un intervalle de fréquences compris entre 1 Hz et 6 MHz, un mode de sélection automatique de la plage de mesure (auto range) et une moyenne de cinq acquisitions (*average count* = 5) afin de réduire l'influence du bruit expérimental et d'améliorer la stabilité des mesures (Figure 3.10).

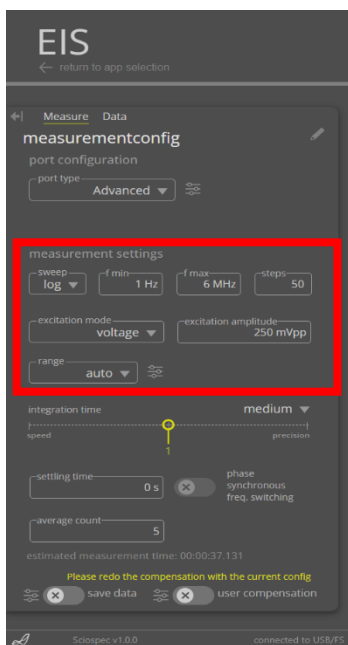


Figure 3.10 : Choix final des données d'entrées pour les mesures électriques

3.3.3.2 Suivi de l'évolution de la conductivité électrique au cours de la cure

Une seconde série de mesures préliminaires a été réalisée afin d'étudier l'évolution des propriétés électriques du BFUP au cours du temps, en particulier durant la période de cure du matériau. L'objectif de cette analyse était d'évaluer l'influence de l'évolution microstructurale du béton sur sa conductivité électrique et de déterminer le moment le plus approprié pour réaliser les mesures expérimentales principales.

Pour ce faire, un spécimen équipé de quatre électrodes internes a été sélectionné, et des mesures d'impédance ont été effectuées à différentes périodes au cours de la cure. Les mesures ont été réalisées à intervalles réguliers afin de suivre l'évolution de la résistivité électrique du matériau pendant les 28 premiers jours, puis au-delà de cette période.

Pour chaque mesure, le diagramme de Nyquist correspondant a été exporté. À partir de ce diagramme, la valeur de la résistance électrique du matériau a été déterminée en identifiant le point minimal. Cette méthode sera utilisée pour tous les résultats de l'expérimental (Figure 3.11).

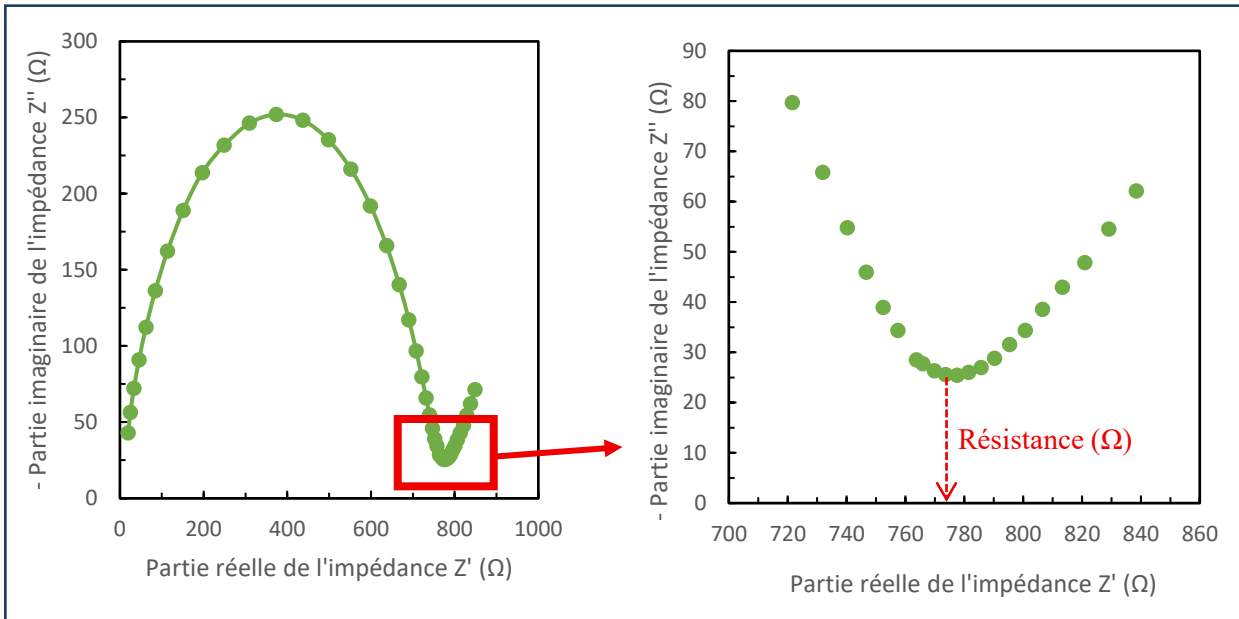


Figure 3.11 : Méthode de détermination de la résistance électrique de l'échantillon d'après le diagramme Nyquist

La résistivité électrique du matériau a ensuite été calculée à partir de la relation (2.6) reliant la résistivité à la résistance mesurée et à la géométrie du spécimen. Dans le cas de la configuration à quatre électrodes, la distance caractéristique utilisée pour le calcul correspond à la distance entre les deux électrodes centrales, soit $L = 33 \text{ mm}$, et la section $A = 100 \text{ mm}$. La conductivité électrique σ (S/m) a ensuite été déterminée à partir de la relation (3.1)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.1)$$

La Figure 3.12 présente l'évolution de la conductivité électrique du spécimen en fonction du temps de cure. Les résultats montrent une diminution marquée de la conductivité électrique durant les premiers 28 jours. Ce comportement peut être attribué à l'évolution microstructurale du BFUP au cours de l'hydratation des liants cimentaires. Au cours de cette période, les produits d'hydratation se développent progressivement dans la matrice, entraînant une réduction de la porosité et de l'eau libre et une densification de la microstructure, ce qui limite la conduction ionique via la solution poreuse.

Après cette phase initiale de cure, la variation de la conductivité devient plus faible, indiquant une stabilisation progressive des propriétés électriques du matériau. Cette observation suggère que les

mesures électriques peuvent être fortement influencées par l'évolution de la microstructure au jeune âge.

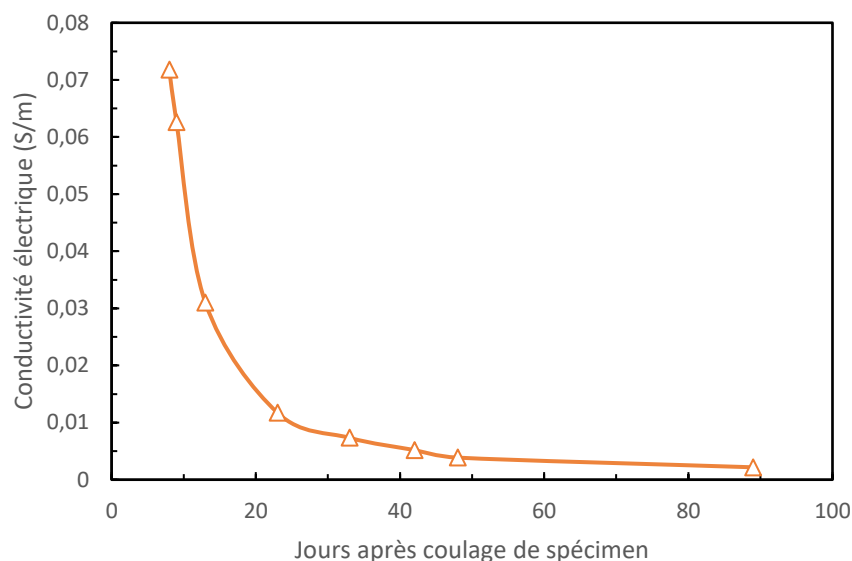


Figure 3.12 : Évolution de la conductivité électrique de béton en fonction de temps

Sur la base de ces résultats, et afin de maintenir une durée raisonnable des travaux expérimentaux, il a été retenu de réaliser les mesures principales sur les spécimens après une cure prolongée d'environ 90 jours (± 8 jours), à l'exception des spécimens sans fibres (0%), qui ont été évalués à 30 jours.

3.4 Mesures pour différentes configurations d'électrodes

3.4.1 Méthodologies

La méthodologie générale des mesures électriques adoptée dans cette étude repose sur la procédure décrite précédemment dans la section relative aux mesures préliminaires. Cette procédure vise à assurer des conditions de mesure reproductibles pour l'ensemble des configurations d'électrodes étudiées.

Toutefois, la mise en œuvre expérimentale diffère selon la configuration des électrodes utilisée, notamment en ce qui concerne la préparation des surfaces du spécimen et le type de contact électrique établi entre l'impédancemètre et le matériau.

3.4.1.1 Mesures avec quatre électrodes intérieures

Pour les spécimens équipés de quatre électrodes internes sous forme de grillages en acier, la procédure expérimentale adoptée est identique à celle utilisée lors des mesures préliminaires (Figure 3.7).

3.4.1.2 Mesures avec quatre électrodes extérieures

Dans le cas des mesures à quatre électrodes externes, les électrodes sont collées à la surface des spécimens prismatiques de dimensions $100 \times 100 \times 150$ mm.

Après avoir retiré le spécimen de la salle de cure humide, quatre bandes sont tracées sur les grandes faces du prisme. Chaque bande présente une largeur de 25 mm, et elles sont espacées selon une distance centre à centre de 33 mm.

Une peinture conductrice à base de nickel (Figure 3.13 (a)) est ensuite appliquée sur ces bandes afin d'améliorer le contact électrique entre le béton et les électrodes. Après un temps de séchage d'environ 30 minutes, un ruban adhésif en cuivre conducteur (Figure 3.13 (b)), de largeur 25 mm, est appliqué sur chaque bande peinte afin de constituer les électrodes.



Figure 3.13 : Produits utilisés la configuration retenue

Les fils de connexion de l'impédancemètre sont ensuite attachés aux rubans conducteurs, permettant ainsi la réalisation des mesures de résistivité électrique (Figure 3.14).

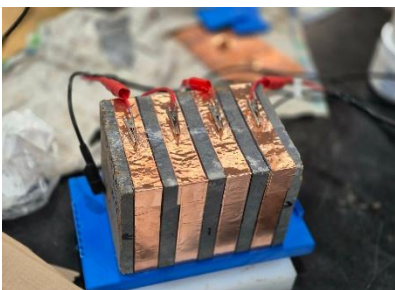


Figure 3.14 : Configuration à quatre électrodes extérieures

3.4.1.3 Mesures avec deux électrodes externes

Les mesures à deux électrodes externes sont réalisées sur des spécimens prismatiques de dimensions $100 \times 100 \times 100$ mm.

Après retrait de la salle de cure humide, les spécimens sont laissés à l'air libre pendant environ 15 minutes avant la préparation des surfaces de contact.

Dans cette configuration, une attention particulière a été portée au choix des matériaux constituant les électrodes externes, afin d'assurer un contact électrique adéquat et des mesures fiables. De manière générale, la procédure nécessite l'utilisation d'un matériau conducteur principal, jouant le rôle d'électrode, qui peut être soit collé directement sur les deux faces opposées du spécimen, soit fixé sur un agent de contact conducteur appliqué initialement sur le béton, afin de réduire la résistance de contact à l'interface électrode-matériau (Tableau 3.4). Dans le cadre de cette étude, un agent de contact conducteur commercial a été utilisé à cet effet.

Plusieurs configurations ont été testées, incluant l'utilisation de rubans conducteurs en cuivre ainsi que des plaques de cuivre, appliqués sur la surface traitée.

Tableau 3.4 : Matériaux utilisés pour les électrodes de cette configuration

Agents de contact conducteur (AC)	Rubans conducteurs en cuivre (RC)		Plaques en cuivre (PC)
AC	RC1	RC2	PC
			
-Pâte conductrice (usage médical - électrocardiogramme) -Améliore le contact électrode–objet -Réduit la résistance de contact	Produit de marque reconnue 3M	Produit bon marché	

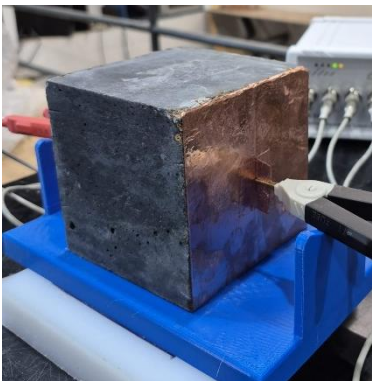


Figure 3.15 : Exemple de la configuration de ruban adhésif en cuivre collé sur l'agent conducteur

Les résultats de ces essais comparatifs, présentés dans la section 3.4.2.1, ont permis d’identifier la configuration offrant le meilleur compromis en termes de stabilité des mesures, qualité du signal et reproductibilité.

Sur cette base, la configuration retenue consiste en l’application d’un agent de contact conducteur AC (Figure 3.16 (a)) sur les faces opposées du spécimen, suivie de la mise en place de plaques de cuivre (Figure 3.16 (b)) fixées à l’aide d’attaches constituées de matériaux électriquement isolants.

Un ruban conducteur est finalement appliqué au centre des plaques afin de permettre la connexion des fils de l'impédancemètre (Figure 3.17).

Cette configuration est adoptée pour la suite de l'étude, notamment pour les mesures liées à l'orientation des fibres.

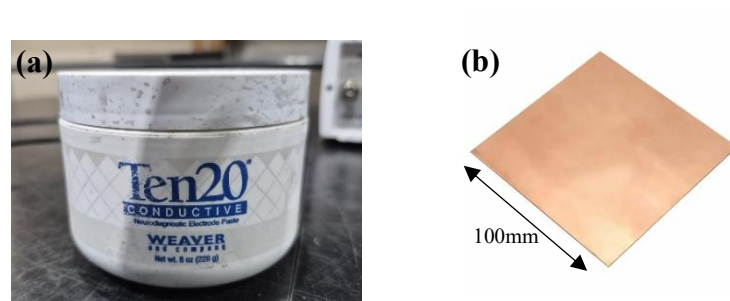


Figure 3.16 Produits utilisés pour cette configuration

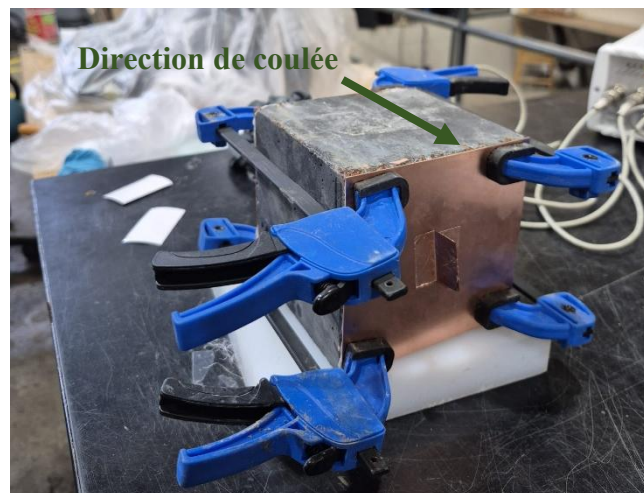


Figure 3.17 : Configuration à deux électrodes extérieures

3.4.2 Résultats des mesures

3.4.2.1 Mesures à deux électrodes externes – essais préliminaires

Dans le cadre de cette configuration, des essais préliminaires ont été réalisés afin d'évaluer l'influence du choix des matériaux d'électrodes ainsi que la pertinence de cette méthode pour les essais ultérieurs, notamment en compression.

La Figure 3.18 présente la superposition des diagrammes de Nyquist obtenus pour un spécimen de dimensions $100 \times 100 \times 100$ mm, en utilisant différentes combinaisons de matériaux : plaques de cuivre avec agent conducteur (PC+AC), rubans de cuivre de type 1 et 2 avec agent conducteur (RC+AC), ainsi que ces mêmes rubans utilisés sans agent de contact (RC1, RC2).

Les résultats montrent que les configurations utilisant un agent de contact conducteur conduisent à des diagrammes de Nyquist présentant des formes cohérentes et des valeurs de résistance modérées et rapprochées, compatibles avec les propriétés attendues du matériau. En revanche, les configurations sans agent de contact présentent des courbes fortement dispersées, caractérisées par des valeurs de résistance élevées et une grande instabilité.

Ces observations confirment le rôle déterminant de l'agent de contact conducteur, qui assure un bon couplage électrique entre l'électrode et le matériau en mobilisant l'ensemble de la surface du spécimen et en compensant les irrégularités de l'interface de BFUP.

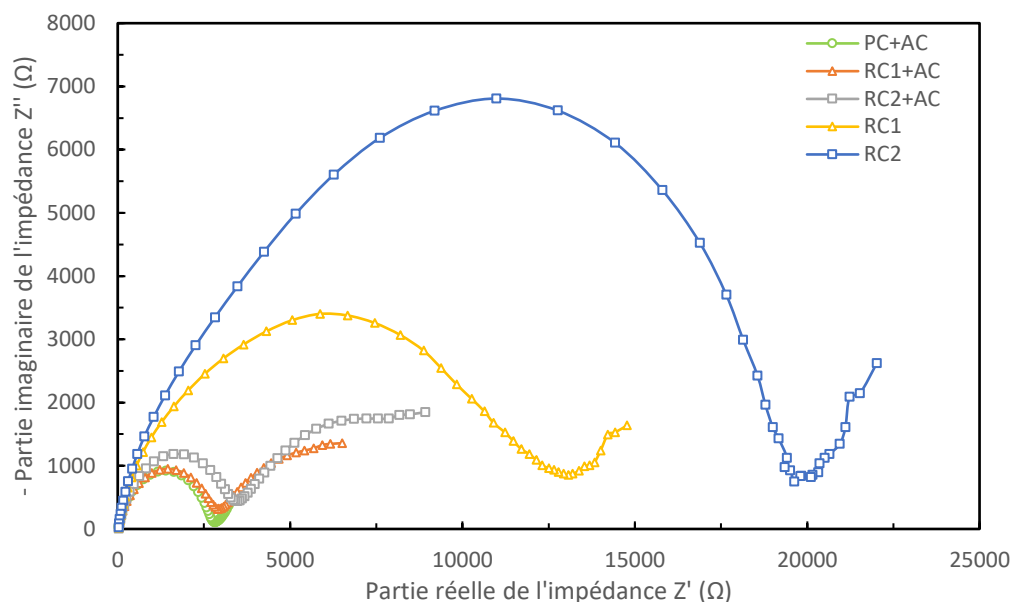


Figure 3.18 : Diagrammes Nyquist d'un spécimen cubique avec différents matériaux d'électrodes

Afin de raffiner l'analyse, la Figure 3.19 présente uniquement les résultats obtenus avec les configurations utilisant un agent de contact. Bien que les diagrammes obtenus soient globalement similaires, une différence est observée au niveau de la position du point avec phase minimale, utilisé pour la détermination de la résistance électrique.

Dans le cas des plaques de cuivre (PC), ce point est situé à proximité de l'axe des abscisses, ce qui correspond à un comportement conforme aux attentes théoriques. En revanche, pour les configurations utilisant des rubans de cuivre, ce point reste décalé vers des valeurs imaginaires plus élevées, traduisant la présence d'effets capacitifs ou d'interfaces non idéales. Ce comportement indique une perturbation du signal et rend la détermination de la résistance moins fiable.

Sur cette base, l'utilisation des rubans conducteurs en cuivre a été écartée au profit des plaques de cuivre associées à un agent de contact conducteur, offrant une meilleure qualité de mesure.

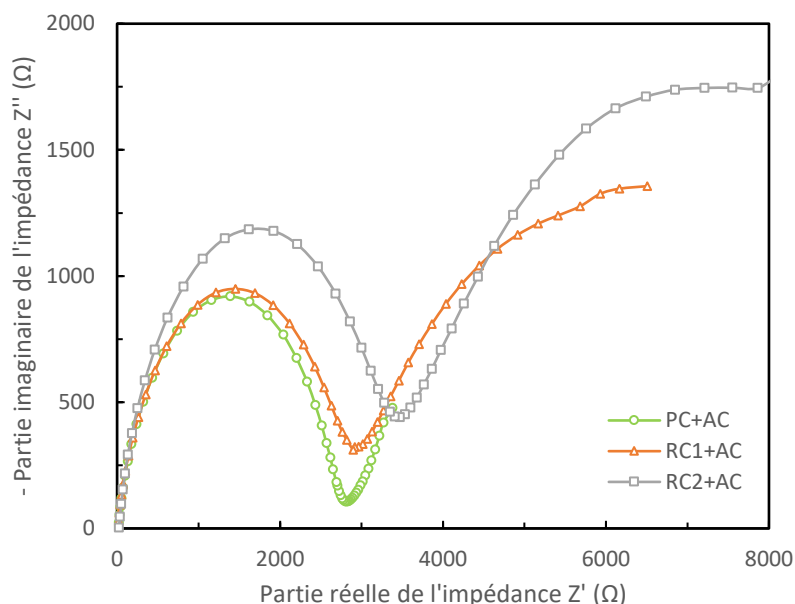


Figure 3.19 : Diagramme Nyquist de spécimen cubique avec l'effet d'utilisation des plaques vs les rubans en cuivre

Les études réalisées dans cette sous-section montrent clairement que les mesures à deux électrodes externes sont caractérisées par une forte sensibilité aux conditions de contact, entraînant une variabilité significative des résultats. De plus, leur mise en œuvre dans le cadre d'essais de compression s'avère difficile, puisque les électrodes sont placées sur des faces soumises directement aux charges, ce qui peut entraîner leur dégradation et affecter la fiabilité des mesures.

Ainsi, cette configuration n'a pas été retenue pour les essais de compression présentés dans le chapitre suivant. Toutefois, elle a été conservée, en utilisant les plaques de cuivre avec agent conducteur, pour des applications spécifiques, notamment l'étude de l'orientation des fibres, pour laquelle des mesures directionnelles sont recherchées.

3.4.2.2 Mesures à quatre électrodes externes

La Figure 3.20 présente les diagrammes de Nyquist moyens obtenus pour les différents mélanges caractérisés par des taux de fibres de 3%, 2%, 1% et 0,5%, dans la configuration à quatre électrodes externes.

Les courbes obtenues présentent une allure globale caractérisée par une dispersion notable des points et une déviation du comportement semi-circulaire attendu. En particulier, le point

correspondant à la résistance électrique du matériau, théoriquement situé à l'intersection de la courbe avec l'axe réel, apparaît ici déplacé vers des valeurs imaginaires plus élevées.

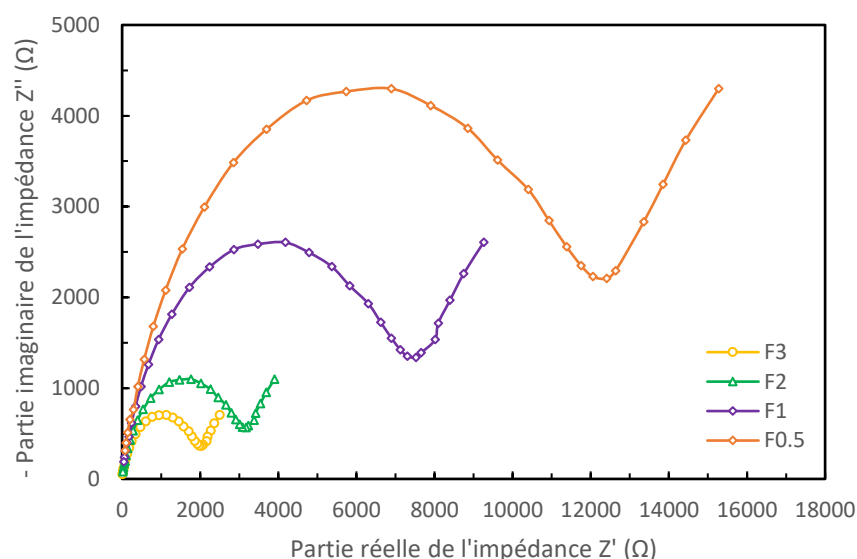


Figure 3.20 : Diagrammes Nyquist moyens des spécimens avec quatre électrodes extérieures - variation de pourcentage de fibres

Ce comportement, déjà observé dans la section précédente, traduit la présence d'effets capacitifs et de phénomènes d'interface au niveau des électrodes. De plus, dans cette configuration, les électrodes étant placées à la surface du spécimen, la distribution du courant électrique dans le matériau n'est pas uniforme. Les lignes de courant ne se diffusent pas dans tout le volume du béton et ne suivent pas un trajet rectiligne entre les électrodes, ce qui entraîne une distorsion du champ électrique.

Par conséquent, la détermination de la résistance électrique à partir de l'intersection avec l'axe réel devient incertaine, et la composante imaginaire reste significative même à basse fréquence. Cette situation rend difficile l'identification d'une valeur représentative de la résistance du matériau.

De plus, l'utilisation de la relation classique de calcul de la résistivité (2.4) repose sur l'hypothèse d'un champ électrique uniforme et d'un trajet uniforme des lignes du courant entre les électrodes. Ces conditions ne sont pas respectées dans le cas des électrodes externes, en raison de la dispersion des lignes de courant dans le matériau. Ainsi, l'application directe de cette formule dans cette configuration ne permet pas d'obtenir une estimation fiable de la résistivité électrique du BFUP.

Malgré ces limitations, les résultats obtenus conservent une tendance cohérente. En effet, l'ordre des diagrammes de Nyquist, du plus petit au plus grand, suit l'augmentation du taux de fibres. Les spécimens contenant 3 % de fibres présentent les courbes les plus réduites, traduisant une résistance plus faible, tandis que les mélanges avec des taux de fibres plus faibles présentent des courbes plus étendues. Cette observation confirme qualitativement l'influence du volume de fibres sur la conductivité électrique du matériau.

En raison des incertitudes liées à la détermination de la résistance électrique et à la non-validité de l'approche géométrique utilisée pour le calcul de la résistivité, cette configuration ne permet pas une caractérisation quantitative fiable. Cette méthode présente également des limitations pratiques importantes pour les essais mécaniques. En particulier, la présence de rubans conducteurs en surface rend le dispositif sensible aux effets de fissuration et aux déformations transversales du spécimen (effet de Poisson) lors des essais de compression, ce qui peut entraîner un décollement ou une détérioration des électrodes.

3.4.2.3 Mesures à quatre électrodes internes

Les mesures d'impédance réalisées sur les spécimens équipés de quatre électrodes internes ont permis d'obtenir les diagrammes de Nyquist pour l'ensemble des mélanges étudiés, incluant trois répliques par formulation.

La superposition des diagrammes de Nyquist obtenus pour l'ensemble des spécimens montre une allure caractéristique attendue pour les matériaux cimentaires conducteurs (Figure 3.21), composée d'un arc semi circulaire dominant dans la zone des fréquences intermédiaires, suivi d'une zone délimitant le point à angle de phase minimale pour les très basses fréquences.

Il est observé que l'augmentation du taux de fibres d'acier entraîne une réduction de la taille des arcs de Nyquist, traduisant une diminution de la résistance électrique du matériau. Cette tendance est cohérente avec le rôle des fibres dans la formation de chemins conducteurs au sein de la matrice cimentaire, facilitant le transport des charges électriques.

Les spécimens présentant un même pourcentage de fibres montrent des diagrammes globalement similaires, ce qui confirme la faible variabilité des mesures et la cohérence du protocole

expérimental. L'analyse des résultats montre que la variabilité augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres.

En revanche, les spécimens sans fibres (0%) présentent une réponse électrique distincte, caractérisée par une allure en spirale à proximité de l'axe réel. Ce comportement s'explique principalement par l'absence de réseau conducteur dans la matrice, de sorte que la réponse est dominée par la conduction ionique et les phénomènes de polarisation interfaciale, plutôt que par une conduction électronique à travers un réseau fibreux. Il peut également être influencé par l'âge des spécimens, ces derniers ayant été testés à 30 jours, contrairement aux autres mesurés à 90 jours.

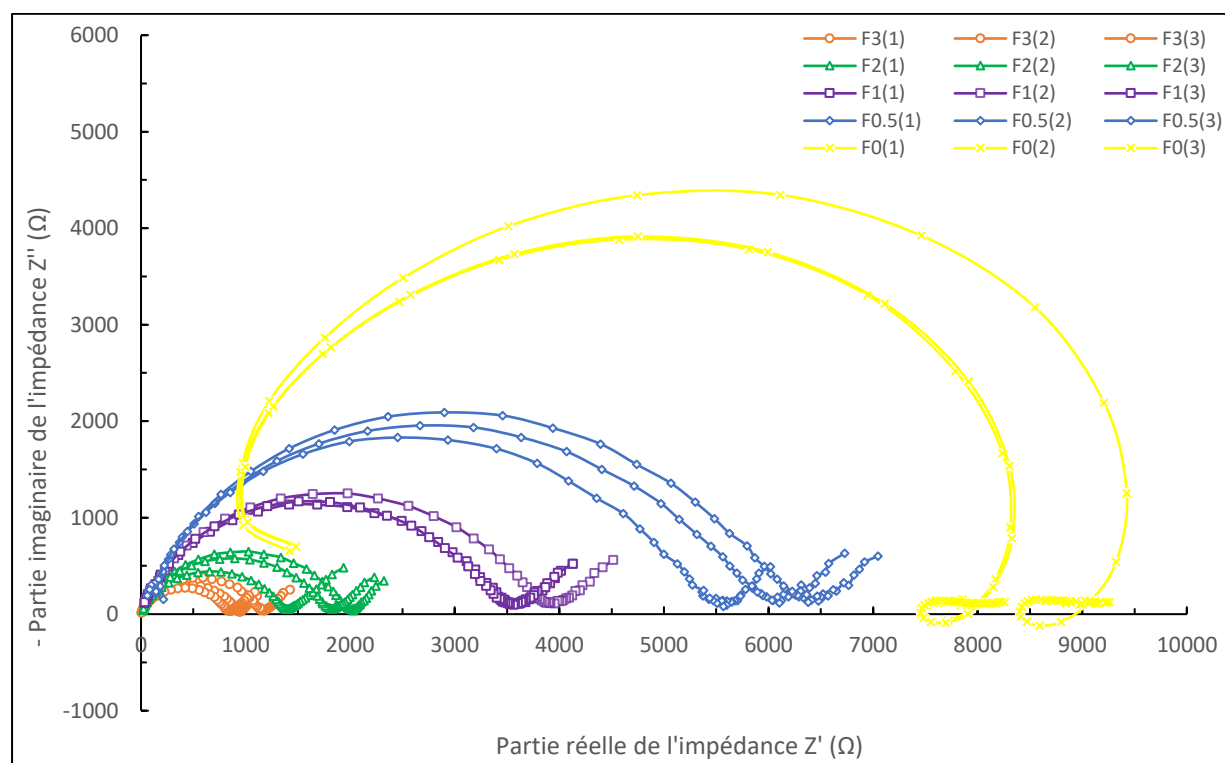


Figure 3.21 : Diagrammes Nyquist de tous les spécimens avec électrodes intérieures - variation de pourcentage de fibres

Afin de faciliter l'analyse comparative entre les différents mélanges, les diagrammes de Nyquist ont été moyennés pour chaque taux de fibres (Figure 3.22), en considérant les trois spécimens testés pour chaque formulation.

Les courbes moyennes obtenues conservent l'allure générale observée précédemment, confirmant la tendance décroissante de la résistance électrique avec l'augmentation du volume de fibres.

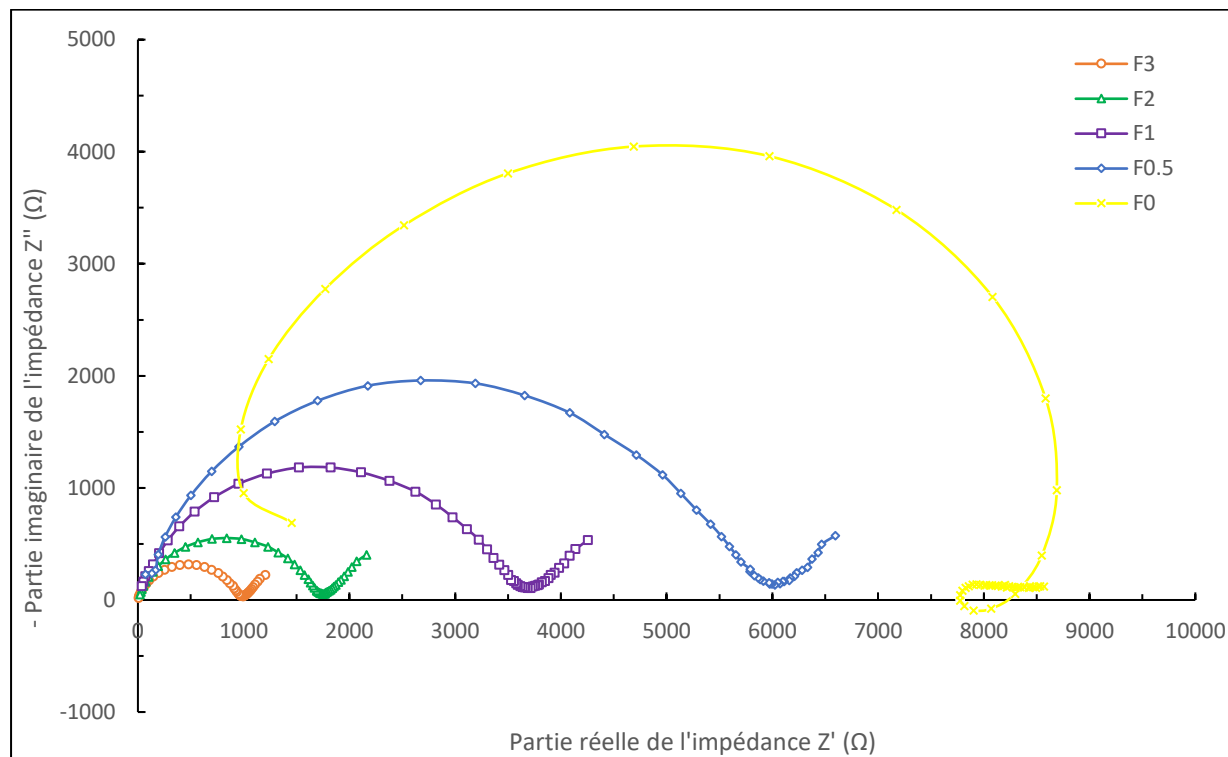


Figure 3.22 : Diagrammes Nyquist moyens des spécimens avec électrodes intérieures - variation de pourcentage de fibres

Les mesures réalisées à l'aide de la configuration à quatre électrodes internes étant les plus fiables, celle-ci a été retenue dans la section suivante pour l'évaluation quantitative de la résistivité électrique en fonction des ajouts conducteurs (fibres et laitier), ainsi que pour l'ensemble des mesures sous chargement présentées au CHAPITRE 4.

3.4.2.4 Détermination de la résistivité électrique

La résistance électrique du matériau a été déterminée par la méthodologie décrite dans la section précédente (Figure 3.11) et en utilisant la configuration à quatre électrodes internes.

Les valeurs de résistivité électrique ont ensuite été calculées en utilisant l'équation (3.2), prenant en compte la géométrie du spécimen et la distance entre les électrodes internes.

La Figure 3.23 présente l'évolution de la résistivité électrique en fonction du pourcentage volumique de fibres d'acier. L'allure décroissante montre une diminution de la résistivité, passant d'environ 2400 $\Omega.m$ pour le mélange sans fibres à environ 300 $\Omega.m$ pour un taux de fibres de 3%.

La Figure 3.24 présente l'évolution de la conductivité électrique. Bien que la courbe obtenue ne permette pas d'identifier clairement un point d'inflexion indicatif d'un seuil de percolation électrique (voir Figure 2.2 du CHAPITRE 2), elle démontre clairement l'amélioration de la conductivité électrique et de la sensibilité (taux de variation de la conductivité électrique en fonction du pourcentage des fibres) à partir d'un taux de fibres de 2%. En théorie, des teneurs en fibres supérieures à 3 % auraient probablement été nécessaires pour faire apparaître clairement ce point d'inflexion. En pratique, toutefois, les difficultés de mise en œuvre rencontrées à 3 % (risque d'accumulation des fibres au niveau du maillage d'électrodes retenu), combinées à une variabilité plus importante des mesures pour ce dosage (plus grande dispersion verticale des points observée à la Figure 3.24), suggèrent que 2 % constitue un compromis optimal. Ce taux a ainsi été retenu, car il permet d'obtenir un taux de variation de la conductivité proche de celui observé à 3 %, tout en assurant une meilleure ouvrabilité du mélange et une variabilité réduite.

Ce choix a été utilisé comme base pour les mélanges étudiés ultérieurement avec variation du taux de laitier.

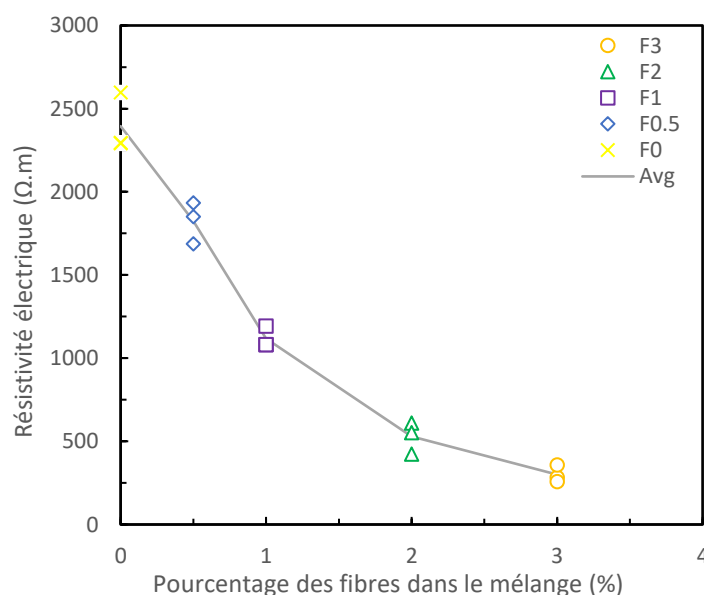


Figure 3.23 : Variation de la résistivité électrique de BFUP en fonction du taux des fibres

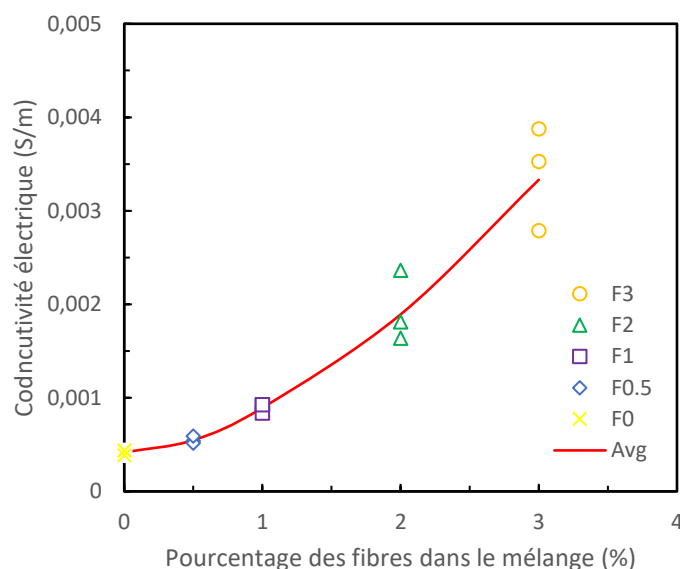


Figure 3.24 : Variation de la conductivité électrique de BFUP en fonction du taux des fibres

3.4.2.5 Influence de l'ajout de laitier

Les diagrammes de Nyquist obtenus pour les mélanges contenant 2 % de fibres et différents taux de laitier sont montrés à la Figure 3.25. Cette figure montre clairement une diminution progressive de la résistance électrique avec l'augmentation du taux de laitier, suggérant que le laitier contribue à améliorer la connectivité électrique au sein de la matrice.

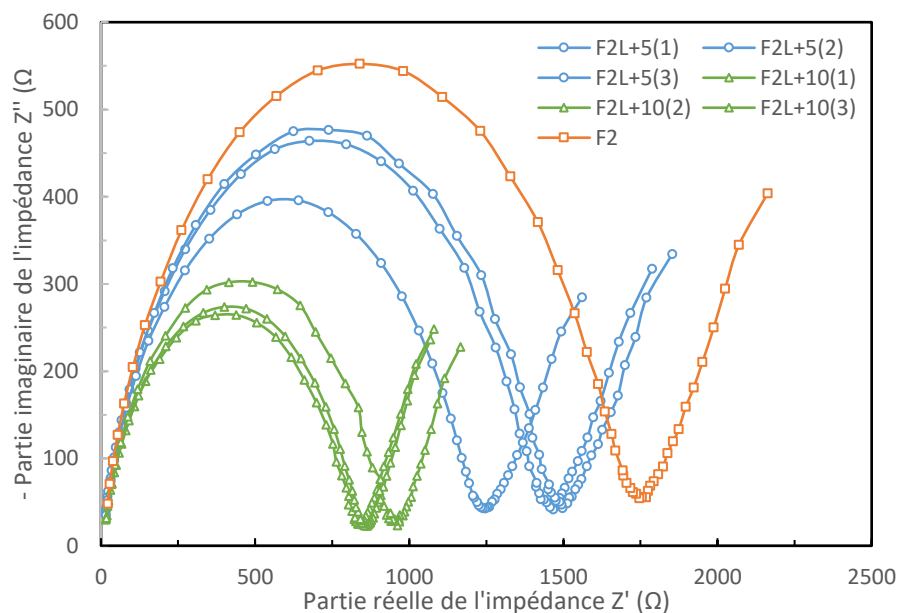


Figure 3.25 : Diagrammes Nyquist des spécimens avec 4 électrodes intérieures et 2% des fibres - variation de laitier d'acier

Les valeurs de résistivité et de conductivité obtenues avec les ajouts de laitier ont été intégrées aux résultats des autres mélanges dans la Figure 3.26, afin d'offrir une vision globale de l'influence combinée des fibres et du laitier sur les propriétés électriques du BFUP.

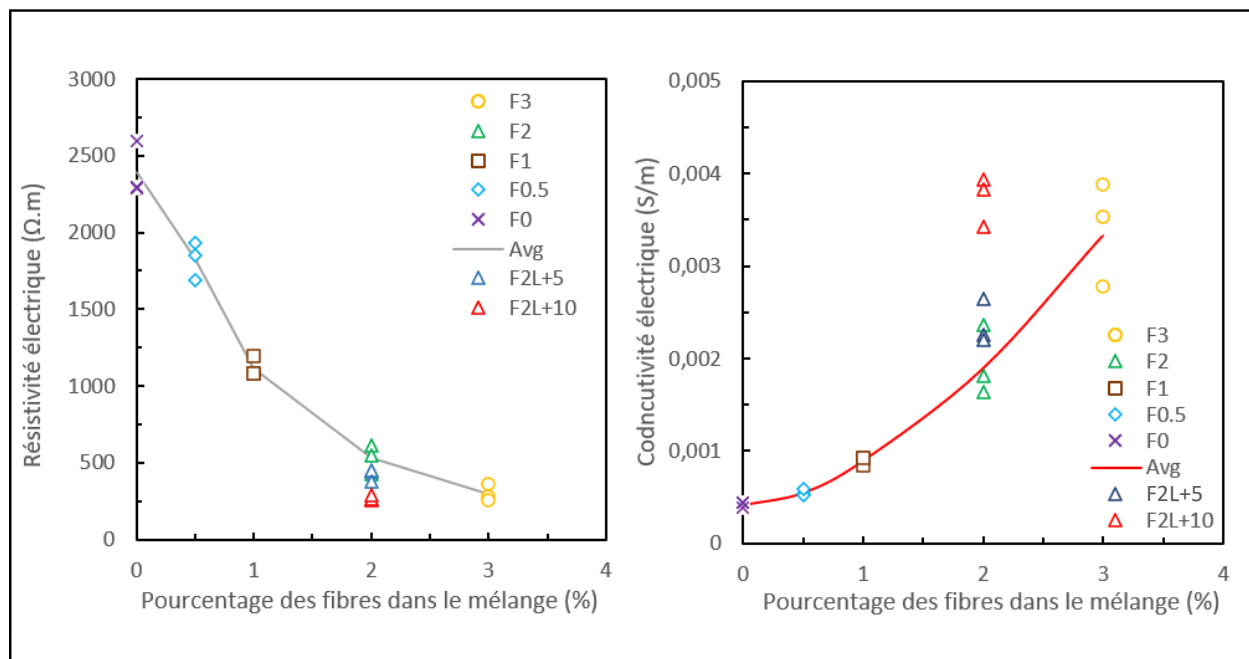


Figure 3.26 Superposition avec les résultats de variation en laitier d'acier : résistivité (à gauche) et conductivité (à droite)

Ces résultats indiquent que l'incorporation du laitier contribue à améliorer la connectivité électrique au sein de la matrice cimentaire, en favorisant une meilleure interaction entre les fibres conductrices et la pâte cimentaire. Les valeurs obtenues pour les mélanges F2L+5 et F2L+10 deviennent ainsi comparables à celles du mélange contenant 3% de fibres, ce qui permet d'atteindre un niveau de conductivité élevé tout en maintenant un taux de fibres plus modéré.

Cette observation présente un intérêt pratique, puisqu'elle permet de réduire la teneur en fibres, facilitant ainsi la mise en œuvre du béton, tout en conservant des performances électriques élevées.

Toutefois, il n'est pas possible de déterminer un taux de variation de la conductivité pour ces nouveaux mélanges, une seule série de mesures ayant été réalisée (correspondant à un unique pourcentage de fibres), ce qui ne permet pas d'estimer une pente (voir Figure 3.26, à droite). Il a donc été décidé de retenir le mélange comportant 2% de fibres et la teneur en laitier de référence du prémix (F2) pour la phase de chargement mécanique présentée au CHAPITRE 4.

3.5 Étude de l'orientation des fibres

3.5.1 Évaluation de l'orientation des fibres par mesures de résistivité

Dans cette partie, la configuration à deux électrodes externes a été mise en œuvre afin d'examiner si l'écoulement dirigé du béton dans un coffrage incliné a induit une orientation préférentielle des fibres. L'objectif est d'évaluer la capacité des mesures électriques à détecter une éventuelle anisotropie induite par cette orientation et, par conséquent, d'apprécier le potentiel de cette approche pour l'estimation indirecte de l'orientation des fibres.

Pour ce faire, des mesures d'impédance ont été réalisées sur les spécimens selon trois directions orthogonales, notées X, Y et Z (Figure 3.27), la direction X étant celle parallèle au sens de l'écoulement lors de la coulée. Les diagrammes de Nyquist obtenus pour chaque direction ont ensuite été comparés pour chaque mélange (3 %, 2 % et 1 % de fibres).

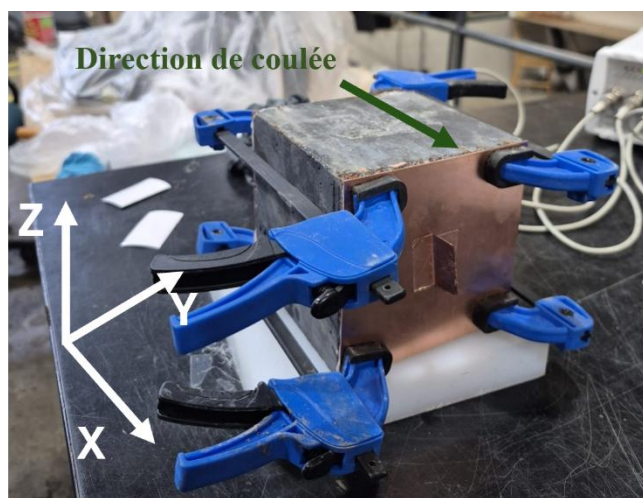


Figure 3.27 : Définition des orientations des mesures avec le montage à deux électrodes externes

Les résultats de la Figure 3.28 montrent de manière générale que les diagrammes correspondant à la direction X présentent des tailles plus réduites, traduisant une résistance électrique plus faible et donc une conductivité plus élevée dans cette direction. Cette tendance est observée pour l'ensemble des mélanges étudiés. La direction Y présente des résultats relativement proches de ceux obtenus en direction X, tandis que la direction Z se distingue par des valeurs de résistance nettement plus élevées.

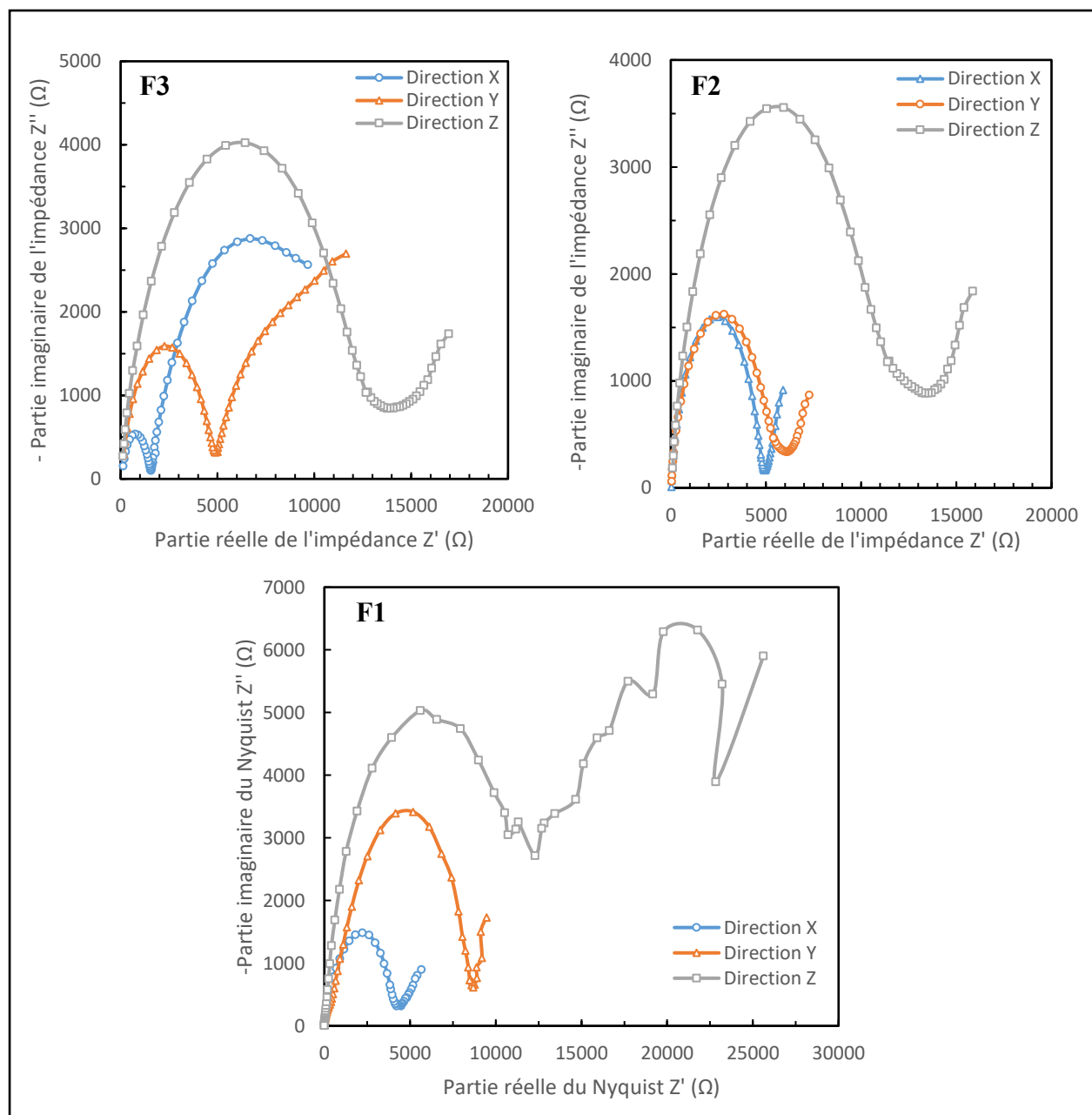


Figure 3.28 : Comparaison du comportement électrique des spécimens dans les directions X, Y et Z

Ces observations suggèrent une orientation préférentielle partielle des fibres, principalement dans le plan XY, avec une conductivité plus faible dans la direction Z, correspondant à une moindre connectivité des fibres dans cette direction. Elles démontrent aussi le potentiel des mesures de résistivité électrique pour l'estimation indirecte de l'orientation des fibres.

3.5.2 Vérification par comparaison avec un coulage sans orientation préférentielle

Afin de confirmer l'influence de la méthode de coulage sur l'orientation des fibres, un essai complémentaire a été réalisé en utilisant un coffrage de dimensions $100 \times 100 \times 300$ mm, dans lequel le mélange à 2 % de fibres a été coulé sans orientation préférentielle (Figure 3.29).

Après durcissement, le prisme a été découpé en trois spécimens de dimensions $100 \times 100 \times 100$ mm, sur lesquels des mesures d'impédance ont été effectuées dans les trois directions X, Y et Z.



Figure 3.29 : Coulée avec orientation non préférentielle des fibres

Contrairement aux résultats obtenus pour les spécimens issus du coulage incliné, les diagrammes de Nyquist obtenus dans ce cas ne présentent pas de direction clairement dominante. Les valeurs de résistance varient d'un spécimen à l'autre, sans hiérarchie fixe entre les directions. De plus, aucune direction ne se distingue de manière significative par une différence marquée de comportement électrique (Figure 3.30).

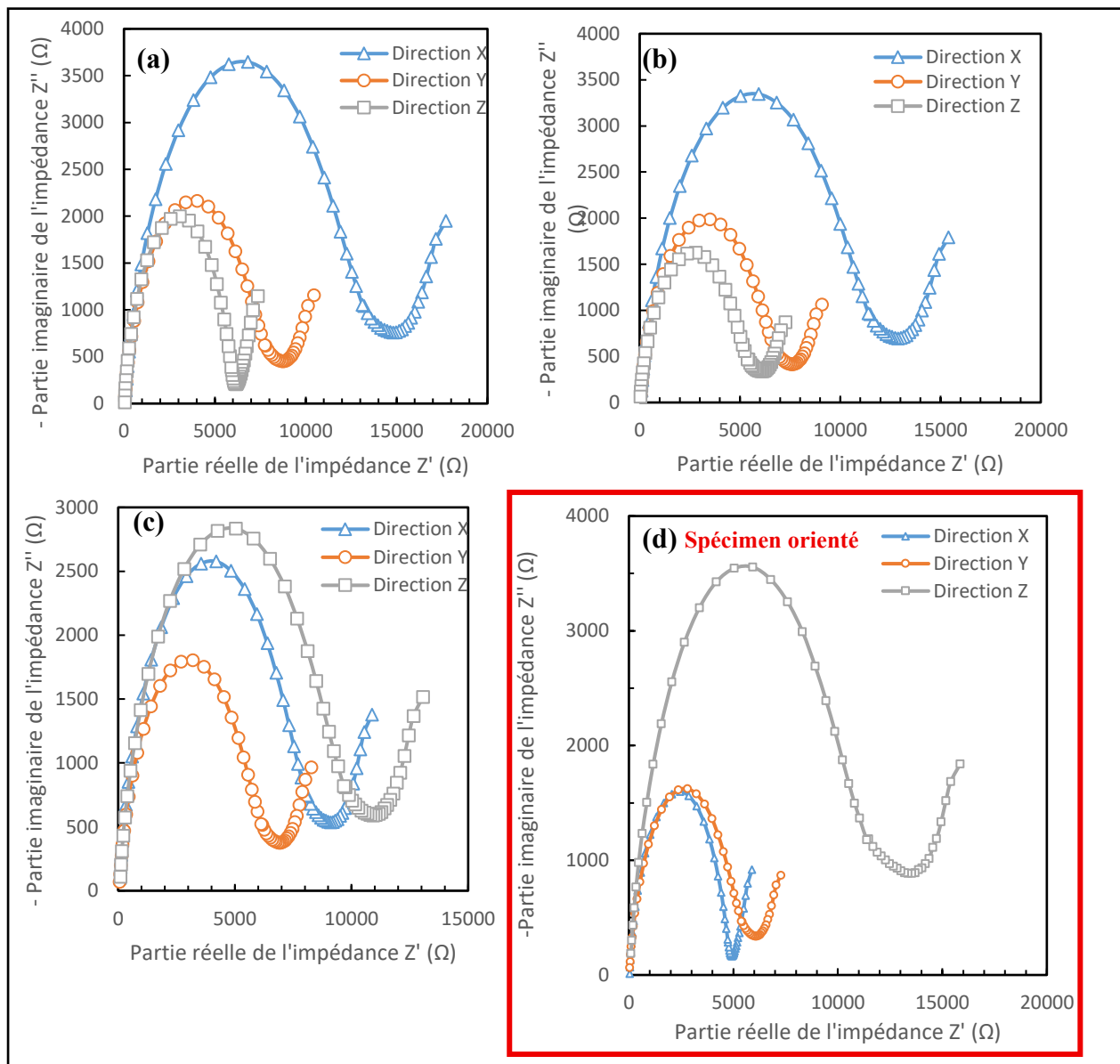


Figure 3.30 : Comparaison d'un spécimen avec coulée orientée (d) vs des spécimens avec orientations non préférentielle (a) : Spécimen 1, (b) : Spécimen 3 et (c) Spécimen 2

Ces résultats confirment que l'absence de direction privilégiée de coulage conduit à une distribution plus aléatoire des fibres, se traduisant par une réponse électrique plus isotrope.

3.5.3 Analyse complémentaire par mesures d'inductance magnétique

Afin de consolider les observations issues des mesures de résistivité, une analyse complémentaire a été réalisée à l'aide de mesures d'inductance magnétique, effectuées à l'aide d'un dispositif *CAMBOT* (Figure 3.31) récemment acquis dans le laboratoire. Les spécimens ont été positionnés dans l'appareil selon différentes orientations, permettant d'évaluer l'influence de la direction sur la réponse magnétique.



Figure 3.31 : Dispositif CAMBOT des mesures d'inductance magnétique

La Figure 3.32 (a) présente l'évolution de l'inductance magnétique en fonction de la direction de mesure (X, Y et Z) pour les différents taux de fibres étudiés. Pour chaque mélange, les valeurs d'inductance mesurées selon les directions X et Y sont relativement proches, tandis que la direction Z présente des valeurs plus faibles.

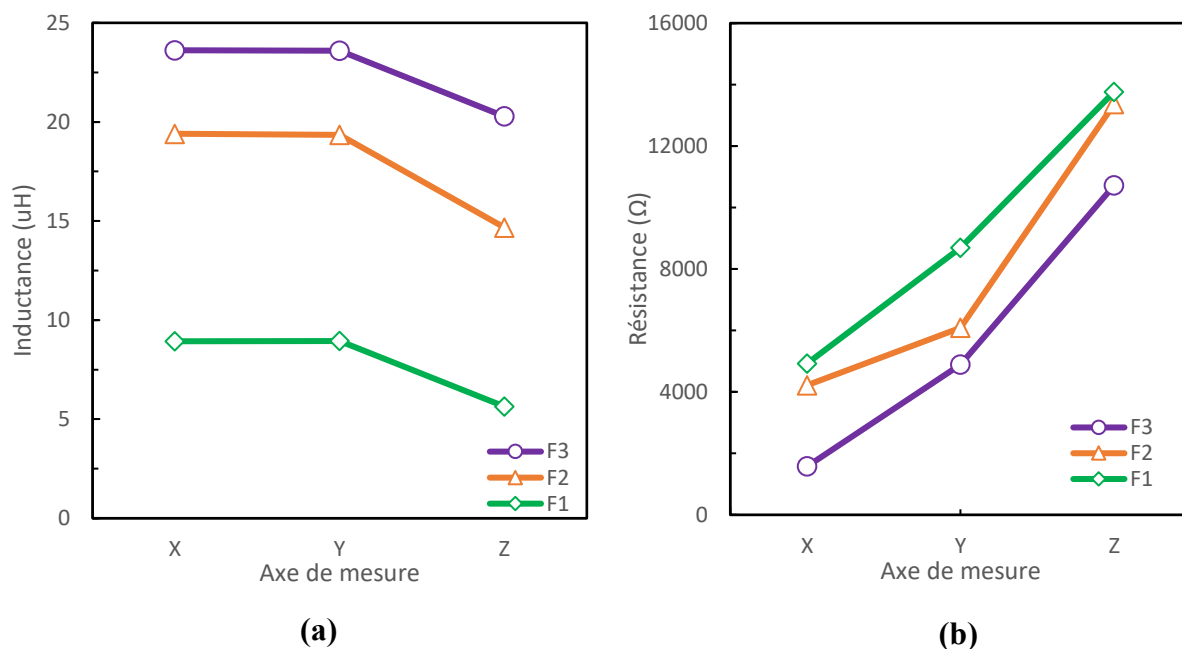


Figure 3.32 : (a) Inductance magnétique avec CAMBOT VS (b) résistance électrique en fonction de la direction de mesure pour les spécimens cubiques

Cependant, contrairement aux mesures de résistance électrique (Figure 3.32 (b)), les variations d'inductance en fonction de la direction restent plus modérées. Bien qu'une tendance similaire soit observée (une réponse plus élevée dans le plan XY et plus faible selon Z), l'anisotropie mise en évidence par l'inductance est moins marquée et ne permet pas, à elle seule, de conclure de manière robuste à une orientation préférentielle des fibres. Par ailleurs, l'allure observée est globalement inverse de celle des résistances : les directions associées à de faibles résistances (X et Y) correspondent à des inductances plus élevées.

En revanche, les différences d'inductance entre les mélanges apparaissent nettement plus prononcées que dans le cas de la résistance. À titre d'exemple, les valeurs passent d'environ 9 μH pour le mélange à 1% de fibres à près de 24 μH pour le mélange à 3% selon les directions X et Y, traduisant une forte sensibilité de l'inductance à la teneur en fibres métalliques.

Ainsi, les mesures d'inductance magnétique confirment partiellement la tendance observée par la résistance vers un comportement plus conducteur dans le plan d'écoulement, tout en mettant davantage en évidence l'influence du taux de fibres que celle de leur orientation.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de mesurer la résistivité du BFUP en absence de sollicitation mécanique, en mettant en évidence l'influence de la composition du matériau ainsi que celle des configurations de mesure électrique. Les principaux résultats obtenus peuvent être synthétisés comme suit :

- Les mesures à deux électrodes externes ont montré une forte dépendance aux conditions de contact. L'utilisation d'un agent de contact conducteur permet d'obtenir des résultats cohérents qualitativement et stables, tandis que son absence entraîne une forte dispersion et des valeurs de résistance élevées. Toutefois, cette configuration reste difficilement exploitable en conditions de compression en raison de la dégradation potentielle des électrodes situées sur les faces sollicitées.
- Forte sensibilité des mesures avec électrodes externes (2 ou 4), liée à la résistance de contact électrode-béton. L'utilisation d'un agent de contact conducteur est essentielle pour assurer un bon contact sur toute la surface du spécimen, ainsi que d'un élément conducteur adéquat entre électrodes et agent de contact.
- La configuration à quatre électrodes externes nécessite l'estimation d'un facteur de forme pour convertir la résistance en résistivité. Ce facteur est spécifique à la géométrie adoptée, absent de la littérature et doit être déterminé par analyses aux éléments finis.
- La configuration à quatre électrodes internes s'est révélée la plus fiable et reproductible. Les diagrammes de Nyquist obtenus présentent une allure caractéristique des matériaux cimentaires conducteurs, avec une diminution nette de la résistance électrique lorsque le taux de fibres augmente, traduisant l'amélioration de la connectivité du réseau conducteur. C'est cette configuration qui a été retenue pour l'évaluation quantitative de la résistivité électrique dans ce chapitre.
- Une faible variabilité des mesures de résistivité/conductivité (propriété intrinsèque du mélange) est observée pour une configuration donnée, mais cette variabilité augmente avec le volume de fibres incorporé. La conductivité électrique augmente significativement à partir de 2 % de fibres, sans identification claire d'un seuil de percolation. Ce dosage constitue un compromis optimal entre sensibilité, ouvrabilité et variabilité.
- L'influence de l'ajout de laitier pour ce pourcentage choisi, a permis de mettre en évidence une amélioration de la conductivité électrique du matériau. Les mélanges avec ajout de 5%

et 10% de laitier, combinés à 2% de fibres, atteignent des niveaux de conductivité comparables à ceux d'un mélange à 3% de fibres, offrant ainsi une alternative intéressante pour limiter la teneur en fibres tout en conservant de bonnes performances électriques.

- L'étude de l'orientation des fibres a mis en évidence une anisotropie partielle dans les spécimens issus du coulage incliné, avec une conductivité plus élevée dans le plan XY que dans la direction Z. À l'inverse, les spécimens coulés sans orientation préférentielle présentent une réponse électrique plus isotrope, confirmant le lien entre procédé de mise en œuvre et organisation interne du réseau fibreux. Ces résultats démontrent le potentiel des mesures électriques pour estimer indirectement l'orientation des fibres.
- Les mesures d'inductance magnétique montrent une tendance cohérente avec celles de la résistivité et confirment une orientation planaire des fibres, mais avec des variations directionnelles plus faibles. Elles se révèlent en revanche plus sensibles au taux de fibres.

Au regard de ces résultats, la configuration à quatre électrodes internes avec grillage en acier inoxydable a été retenue comme méthode de référence pour la suite de l'étude, en raison de sa fiabilité et de sa capacité à représenter les propriétés électriques intrinsèques du matériau.

Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse du comportement piézorésistif du BFUP sous chargement mécanique en compression, en s'appuyant sur cette configuration expérimentale optimisée.

CHAPITRE 4 COMPOTEMENT PIÉZORÉSISTIF DU BFUP EN PRÉSENCE D'UN CHARGEMENT MÉCANIQUE DE COMPRESSION

4.1 Introduction

Dans la continuité des investigations présentées au CHAPITRE 3, ce chapitre vise à analyser le comportement piézorésistif du BFUP en présence d'un chargement mécanique de compression. Les essais ont été réalisés sur des spécimens prismatiques de dimensions $100 \times 100 \times 150$ mm, instrumentés par quatre électrodes intérieures en grillage d'acier inoxydable. Le choix de cette configuration expérimentale repose sur les conclusions issues du chapitre précédent, qui ont montré que ce type d'éprouvette et ce mode d'instrumentation permettent d'obtenir des mesures électriques plus stables et représentatives du comportement intrinsèque du matériau.

Les essais présentés dans ce chapitre consistent en des essais de compression monotone couplés à un suivi simultané du comportement mécanique et électrique. Cette approche expérimentale permet d'évaluer l'évolution des propriétés électriques du BFUP sous sollicitation mécanique et d'analyser sa sensibilité piézorésistive en fonction du niveau de contrainte appliqué. L'objectif principal est ainsi de caractériser la réponse piézorésistive du matériau et d'identifier les paramètres influençant son potentiel d'utilisation dans des applications de surveillance structurale.

4.2 Procédure expérimentale

Les essais de compression présentés dans ce chapitre ont été réalisés dans l'objectif de l'application contrôlée de chargements mécaniques et de reproduire des conditions de sollicitation monotone en compression en permettant le suivi simultané de la réponse mécanique et électrique des spécimens instrumentés. La présente section décrit le montage expérimental adopté, la préparation des éprouvettes ainsi que le protocole de mesure électrique mis en œuvre durant les essais.

4.2.1 Montage expérimental

Les essais de compression ont été réalisés sur la presse hydraulique *Instron*, utilisant un contrôle en force. Afin d'assurer une isolation électrique entre les plateaux de la machine et les spécimens, deux plaques intermédiaires qui sont à la fois mécaniquement résistantes et électriquement isolantes ont été utilisées (Tableau 4.1). Les plaques de 1 po d'épaisseur sont faites de PEEK

(Polyether Ether Ketone), reconnu comme matériau isolant électriquement, avec de bonnes propriétés mécaniques. Ces plaques ont été fixées sur les plateaux de la presse.

Tableau 4.1 : Propriétés des plaques isolantes

Plaques 150×150×25.4	Résistance mécanique à la compression (MPa)	Module d'Young (MPa)	Résistivité électrique ($\Omega.m$)
	140	4000	10^{14}

Les spécimens instrumentés, de dimensions $100 \times 100 \times 150$ mm et équipés de quatre électrodes intérieures en grillage d'acier inoxydable, ont été positionnés entre ces plaques isolantes (Figure 4.1). L'ensemble du dispositif doit éviter l'interférence électrique avec la machine tout en garantissant une transmission homogène du chargement mécanique.

Par ailleurs, les électrodes ont été connectées à un impédancemètre, lui-même relié à un ordinateur dédié à l'acquisition des données, afin d'assurer un suivi simultané des réponses électriques et mécaniques au cours des essais.

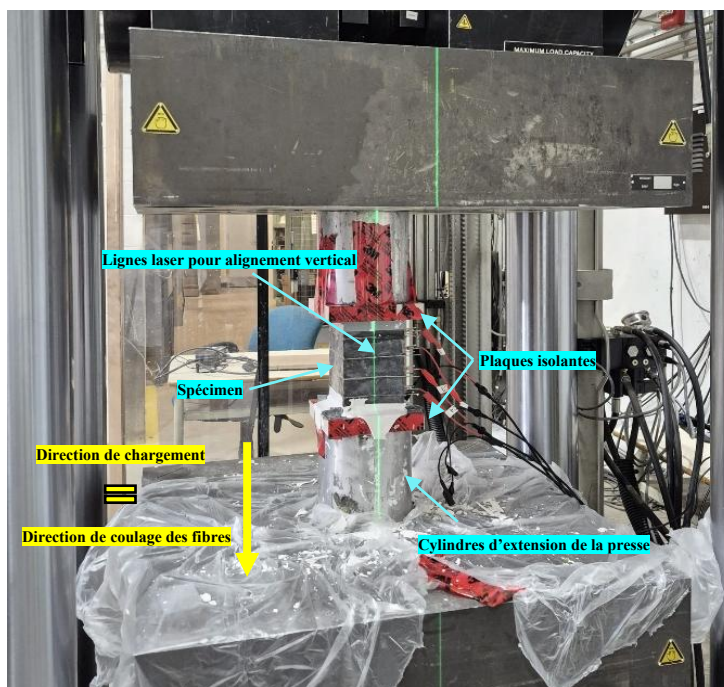


Figure 4.1 : L'ensemble de dispositif des essais

4.2.2 Procédure de préparation des spécimens pour compression

Les spécimens utilisés dans cette étude correspondent aux éprouvettes déjà caractérisées au chapitre 3, et conservées en salle humide jusqu'au moment des essais. Avant leur mise en place, chaque spécimen a été extrait de la salle humide, essuyé à l'aide d'un chiffon afin d'éliminer l'eau accumulée en surface, puis laissé à l'air libre pendant environ 15 minutes, avant l'installation sous la presse.

Afin d'améliorer les conditions de contact avec les plateaux de chargement, et faute de pouvoir utiliser la rectifieuse du laboratoire, un surfaçage par coulis a été réalisé afin d'assurer la planéité des faces de compression. Pour ce faire, un coffrage en ruban toile a été installé autour des deux faces opposées du spécimen, puis un coulis a été coulé de manière à obtenir des surfaces planes et parallèles.

Le spécimen a ensuite été positionné dans la presse hydraulique *Instron* en veillant à aligner la direction de chargement avec la direction de coulage des fibres via un faisceau laser (Figure 4.1).

Pendant la phase de prise du coulis, une charge constante de 1 kN a été appliquée pendant environ 1 heure, afin d'assurer un bon contact et d'éviter toute inclinaison ou défaut d'alignement.

L'ensemble des étapes est illustré dans la Figure 4.2.

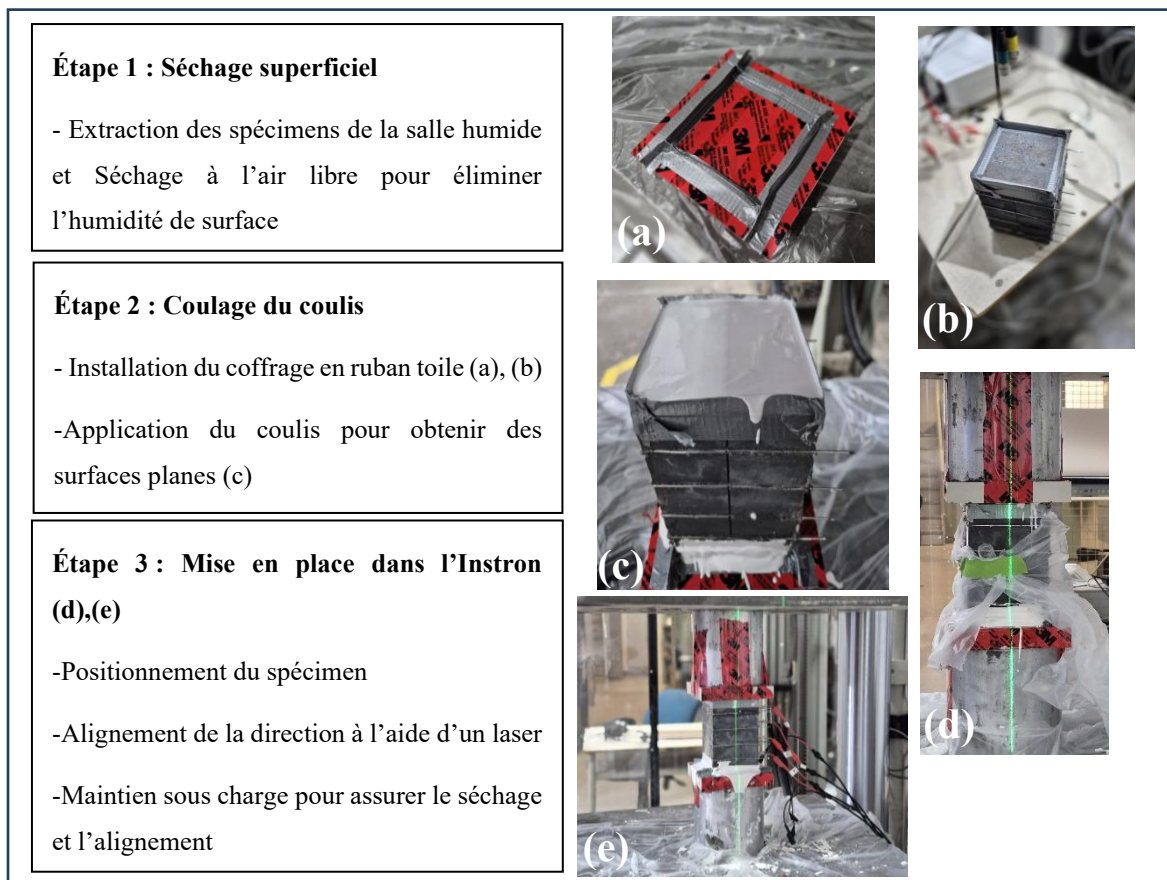


Figure 4.2 : Procédure de préparation aux essais

4.2.3 Protocole de chargement électrique

Une fois le spécimen préparé et correctement installé, les quatre câbles de l'impédancemètre ont été connectés aux électrodes intégrées. Le dispositif de mesure a ensuite été relié à un ordinateur pour l'enregistrement des données.

Le protocole expérimental comporte deux phases : une première phase qualitative pour l'étude de la sensibilité des mesures sur un spécimen et une deuxième phase, principale, réalisée pour l'ensemble des spécimens. La première phase consiste en un chargement cyclique (Figure 4.3), avec une montée en contrainte jusqu'à 30 MPa suivie d'une décharge, puis une seconde montée

jusqu'à 50 MPa également suivie d'une décharge. Durant cette phase, l'objectif est de suivre l'évolution de l'impédance en continu au cours du temps. Pour ce faire, une fréquence unique de 300 Hz a été sélectionnée, correspondant à la fréquence moyenne associée à la détermination de la résistance électrique dans les diagrammes de Nyquist obtenus au chapitre 3. Les mesures ont été réalisées avec une tension d'excitation constante de 250 mV.

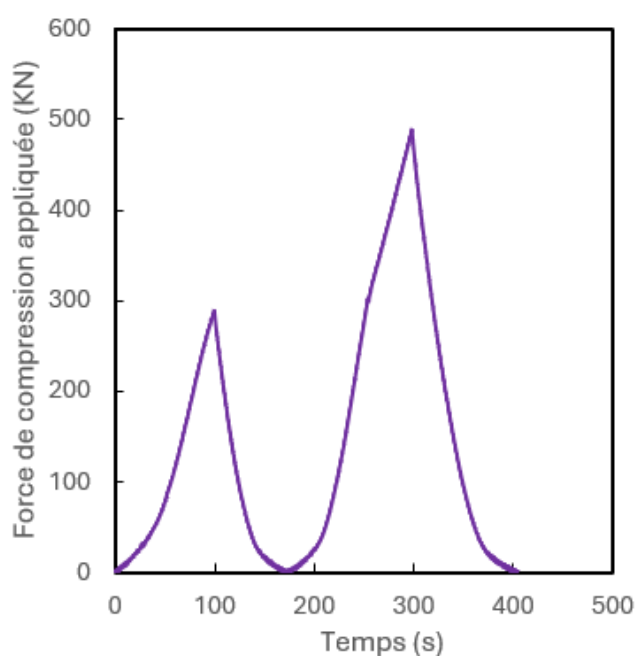


Figure 4.3 : Chargement cyclique de la première phase

Tel qu'il sera expliqué plus loin, cette première phase de chargement cyclique a été réalisée seulement sur un spécimen (F2L+5) et n'a pas été retenue pour l'ensemble des autres spécimens.

La seconde phase consiste en un chargement par paliers (Figure 4.4), avec une montée progressive jusqu'à 100 MPa. Des arrêts ont été effectués à des niveaux de contrainte intermédiaires de 20, 40, 60 et 80 MPa. À chaque palier, des mesures d'impédance ont été réalisées sur une plage de fréquences, permettant de tracer les diagrammes de Nyquist correspondants à chaque niveau de contrainte. Cette approche permet d'analyser l'évolution de la résistivité du matériau en fonction du chargement mécanique appliqué.

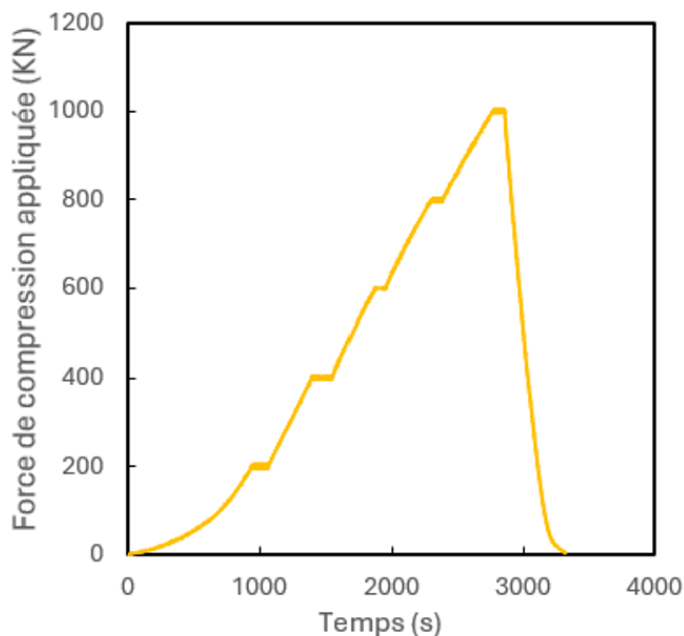


Figure 4.4 : Chargement par paliers de la deuxième phase

4.3 Résultats et interprétation

4.3.1 Comportement mécanique

Cette section présente l'analyse du comportement mécanique des mélanges de BFUP soumis à un chargement de compression. Les résultats expérimentaux ont été obtenus à partir des courbes force-déplacement enregistrées lors des essais réalisés sur la presse *Instron*.

Afin d'isoler le comportement propre du matériau et d'éliminer l'influence du dispositif expérimental, une correction des mesures a été effectuée. En effet, le système de chargement comprend des plaques isolantes interposées entre le spécimen et les plateaux de la presse, dont la déformabilité peut affecter les résultats globaux. Pour cette raison, un essai de compression a été réalisé sur les plaques isolantes seules (Figure 4.5 a), permettant d'obtenir leur réponse force-déplacement (Figure 4.5 b). Cette contribution a ensuite été soustraite des mesures globales obtenues sur les spécimens, afin d'accéder au comportement mécanique réel du BFUP.

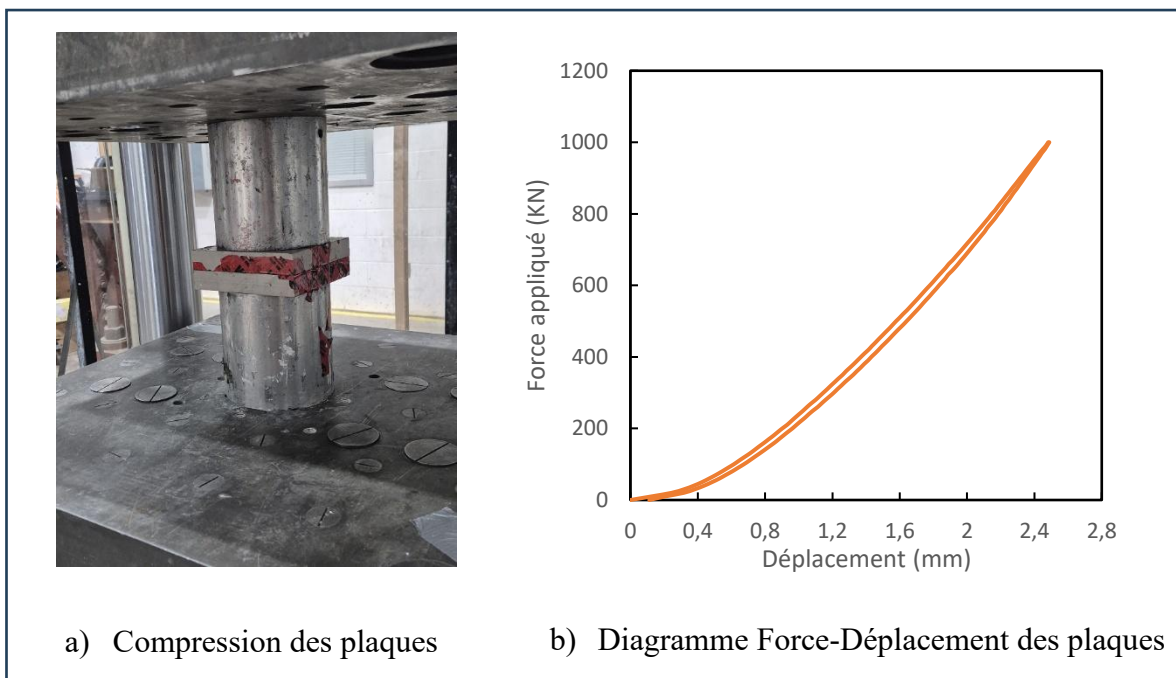


Figure 4.5 : Essai de compression des plaques isolantes

À titre illustratif, une courbe représentative force-déplacement d'un mélange est présentée dans cette section (Figure 4.6), tandis que les résultats correspondant aux autres mélanges sont reportés en ANNEXE A.

Les courbes corrigées mettent en évidence un comportement globalement linéaire du matériau. Toutefois, une légère non-linéarité est observée aux faibles niveaux de chargement, plus précisément en dessous de 200 kN (donc 20 MPa de compression dans le spécimen), où la réponse présente une évolution non linéaire avant de tendre vers une linéarité plus marquée. Ce phénomène peut être attribué à plusieurs facteurs, notamment la mise en contact progressive des surfaces de chargement, ainsi que la présence du coulis de surfacage, qui peut induire une phase initiale d'adaptation du système sous charge.

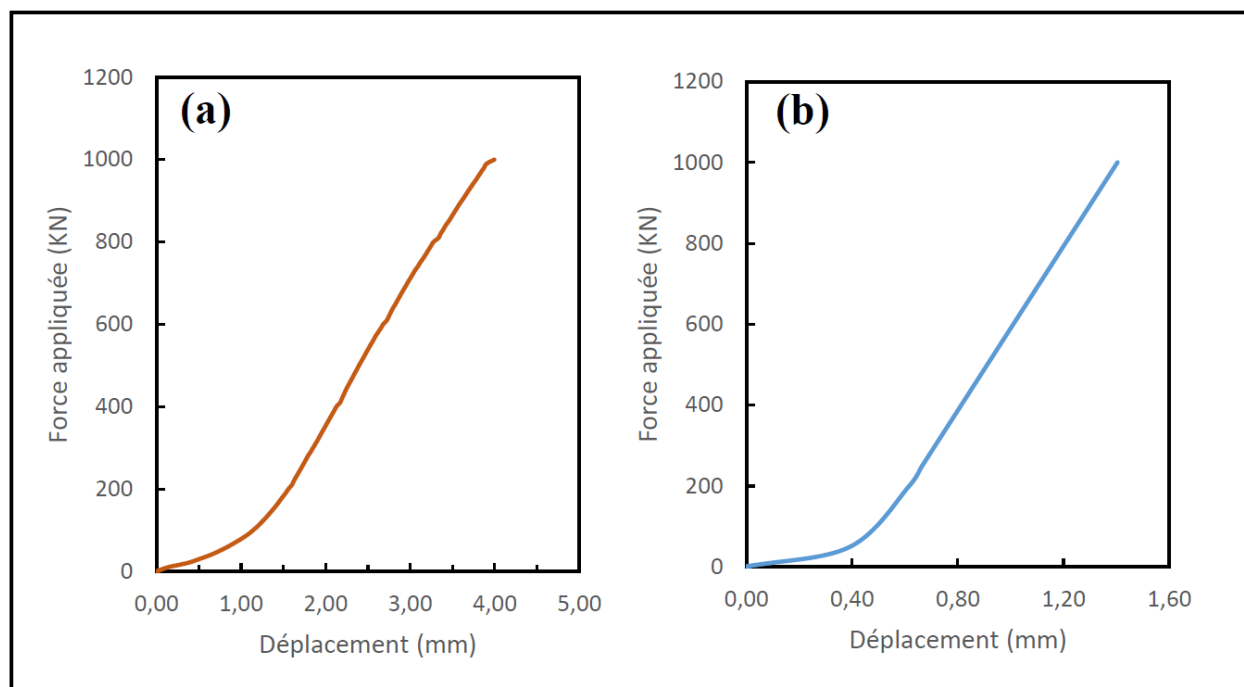


Figure 4.6 Diagramme Force-Déplacement de BFUP - 3% de fibres : Avant correction (a), et après correction (b)

Au-delà de cette phase initiale, le comportement devient nettement linéaire, traduisant une réponse élastique stable du matériau. Par ailleurs, il est important de noter que le coulis utilisé pour le surfacage a montré une résistance mécanique suffisante, ne présentant aucun signe de dégradation même sous des niveaux de chargement élevés atteignant 1000 kN (100 MPa), comme le confirment les observations visuelles post-essais comme montré sur la Figure 4.7. Ces observations mettent toutefois en évidence la présence de quelques fissures superficielles localisées en partie inférieure des spécimens, ce qui reste cohérent avec le comportement attendu sous compression et n'affecte pas l'intégrité globale des éprouvettes.

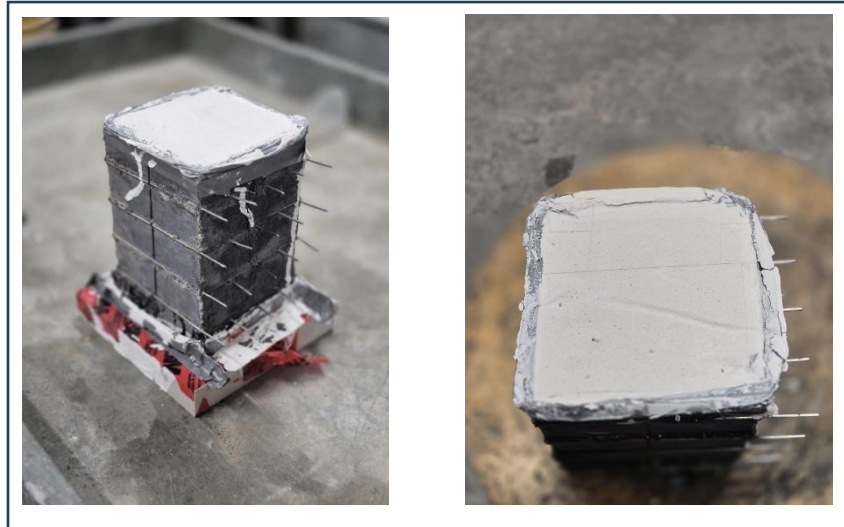


Figure 4.7 : Etat du coulis après essais

Ces résultats valident ainsi la qualité de la préparation des spécimens et confirment que les mesures mécaniques obtenues sont représentatives du comportement du BFUP, constituant la base pour l'analyse du couplage électromécanique présentée dans les sections suivantes.

4.3.2 Résultats des essais combinés

4.3.2.1 Réponse électromécanique sous chargement continu

La première phase d'essai consiste en un chargement continu, avec une montée en contrainte jusqu'à 30MPa suivie d'une décharge, puis une seconde montée jusqu'à 50 MPa également suivie d'une décharge. Durant cet essai, un suivi en continu de l'impédance absolue a été réalisé en fonction du temps, en parallèle de l'enregistrement du chargement mécanique.

La Figure 4.8 présente la superposition de la contrainte appliquée et de l'impédance mesurée. Globalement, les résultats montrent que l'impédance suit l'allure du chargement mécanique. En phase de chargement, une diminution de l'impédance est observée, avec un minimum atteint à proximité des niveaux de contrainte maximale, soit environ 1489Ω à 30 MPa et 1483Ω à 50MPa. Inversement, lors des phases de décharge, l'impédance augmente progressivement.

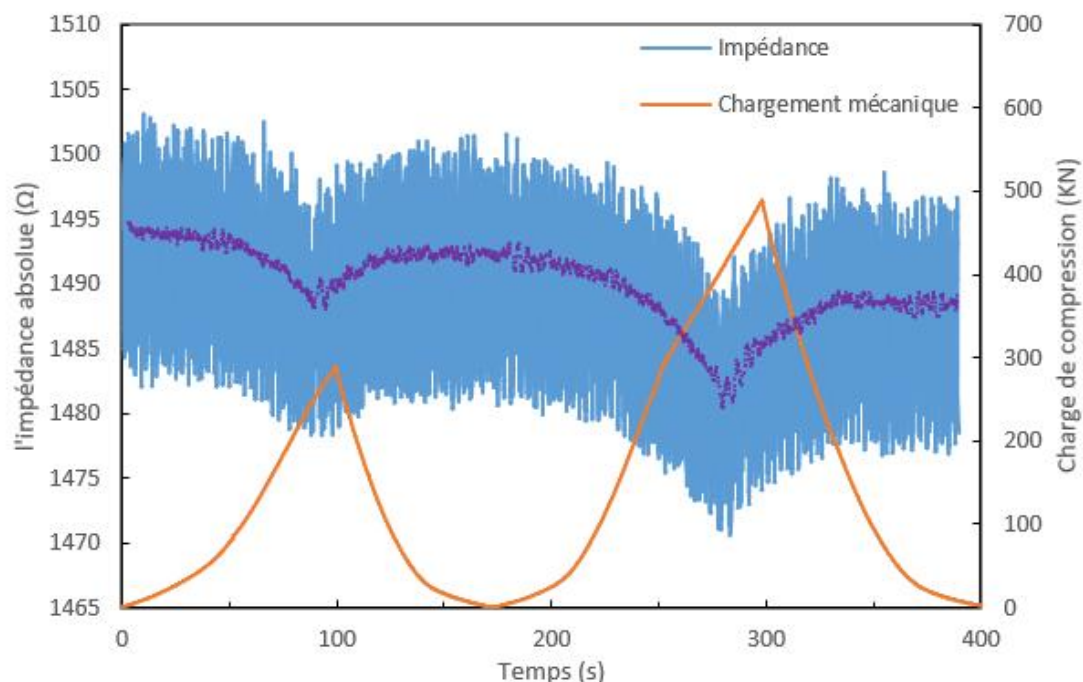


Figure 4.8 Courbe de suivi continu dans le temps de l'impédance absolue en fonction de chargement mécanique (spécimen F2L+5)

Un léger décalage temporel entre les courbes mécanique et électrique est toutefois observé, pouvant être attribué à l'utilisation de deux systèmes d'acquisition distincts pour l'enregistrement des données.

Par ailleurs, bien que la tendance générale soit cohérente, la réponse électromécanique ne présente pas une parfaite réversibilité. En effet, après décharge, l'impédance ne retrouve pas exactement sa valeur initiale. À titre indicatif, l'impédance initiale mesurée au début de l'essai est d'environ 1495Ω, tandis qu'après la première décharge (30 MPa), elle atteint 1493 Ω, puis 1489 Ω après la seconde décharge (50 MPa).

Cette dérive peut être associée à des effets irréversibles à l'échelle microscopique, tels que la réorganisation du réseau conducteur interne (contacts entre fibres, effet tunnel), ou encore à des phénomènes de micro-endommagement du matériau sous chargement. Elle peut également être influencée par des facteurs expérimentaux, notamment la stabilisation des contacts électriques ou des variations liées aux conditions de mesure.

Malgré ces écarts, la corrélation observée entre la contrainte appliquée et la variation de l'impédance confirme le comportement piézorésistif du BFUP, avec une sensibilité notable aux sollicitations mécaniques, constituant une base pour l'analyse approfondie présentée dans les sections suivantes. En raison de la dérive des mesures associée à la sollicitation cyclique, la première phase de chargement cyclique n'a pas été retenue pour les autres spécimens.

4.3.2.2 Réponse électromécanique sous chargement par palier

Dans cette partie, l'analyse est menée sur les essais de compression par paliers, permettant d'étudier l'évolution des propriétés électriques du BFUP en fonction du niveau de contrainte appliqué.

À titre illustratif, la Figure 4.9 (a) présente la superposition des diagrammes de Nyquist obtenus pour un spécimen donné, aux niveaux de contrainte de 20, 40, 60, 80 et 100 MPa, tandis que les résultats des autres spécimens sont reportés en ANNEXE B. Un zoom est également proposé au niveau de la zone correspondante à la résistance électrique du matériau (Figure 4.9 (b)).

L'analyse de ces courbes met en évidence une diminution progressive de la résistance électrique avec l'augmentation de la contrainte mécanique. Cette évolution traduit l'amélioration du réseau conducteur interne sous compression, liée notamment à la réduction des distances inter particulaires.

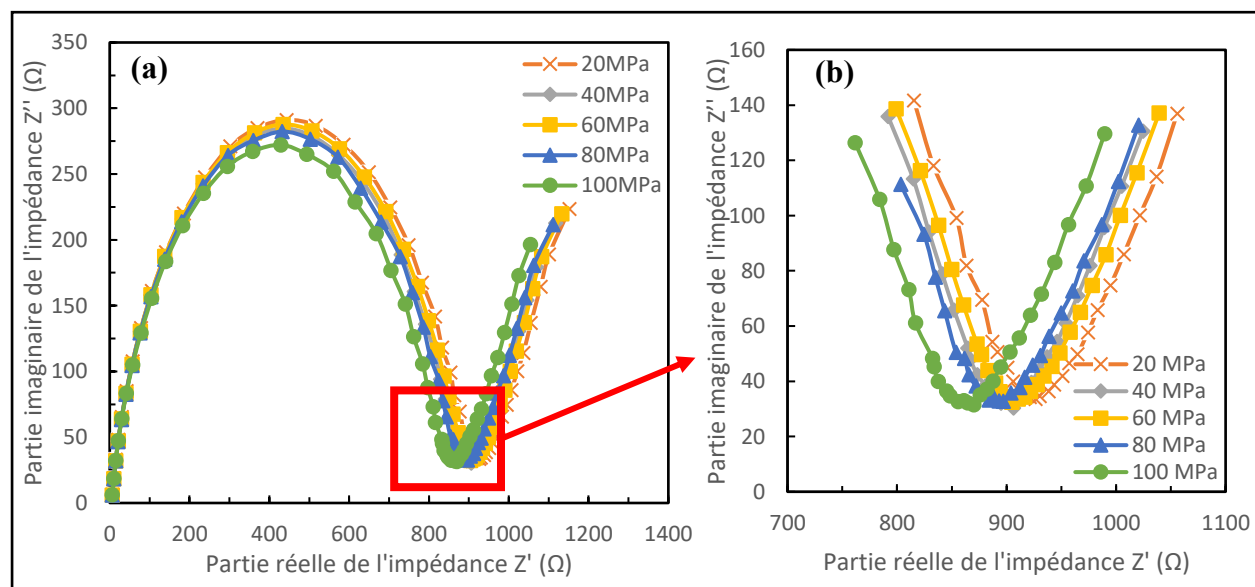


Figure 4.9 : Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 3% des fibres

Les valeurs de résistance extraites des diagrammes de Nyquist ont ensuite permis de calculer la résistivité électrique pour chaque mélange et pour chaque niveau de contrainte. Afin de quantifier la sensibilité du matériau, un ratio de variation de résistivité a été défini sous la forme :

$$Ratio(\%) = \frac{\rho}{\rho_i} \times 100 \quad (3.1)$$

Où la résistivité initiale ρ_i est prise à 20 MPa. Ce choix de résistivité initiale de référence est justifié par le jeu dans le montage expérimental clairement identifié dans Figure 4.6 pour des faibles niveaux de contraintes et discuté dans la section précédente.

Les courbes représentant ce ratio en fonction de la contrainte mécanique ont été tracées pour chaque mélange sur la Figure 4.10, en considérant les valeurs moyennes obtenues sur les trois spécimens. Une régression linéaire a ensuite été appliquée, et la pente de la droite obtenue correspond au facteur de jauge (FG) du matériau. Il est à noter que cette pente est équivalente à celle obtenue en utilisant le changement fractionnel de résistivité FCR (Voir Formule (3.2)).

$$FG = \frac{\Delta FCR(\%)}{\Delta \sigma} = \frac{\frac{\rho_1 - \rho_i}{\rho_i} - \frac{\rho_2 - \rho_i}{\rho_i}}{\Delta \sigma} \times 100 = \frac{\frac{\rho_1}{\rho_i} - \frac{\rho_2}{\rho_i}}{\Delta \sigma} \times 100 = \frac{\Delta Ratio(\%)}{\Delta \sigma} \quad (3.2)$$

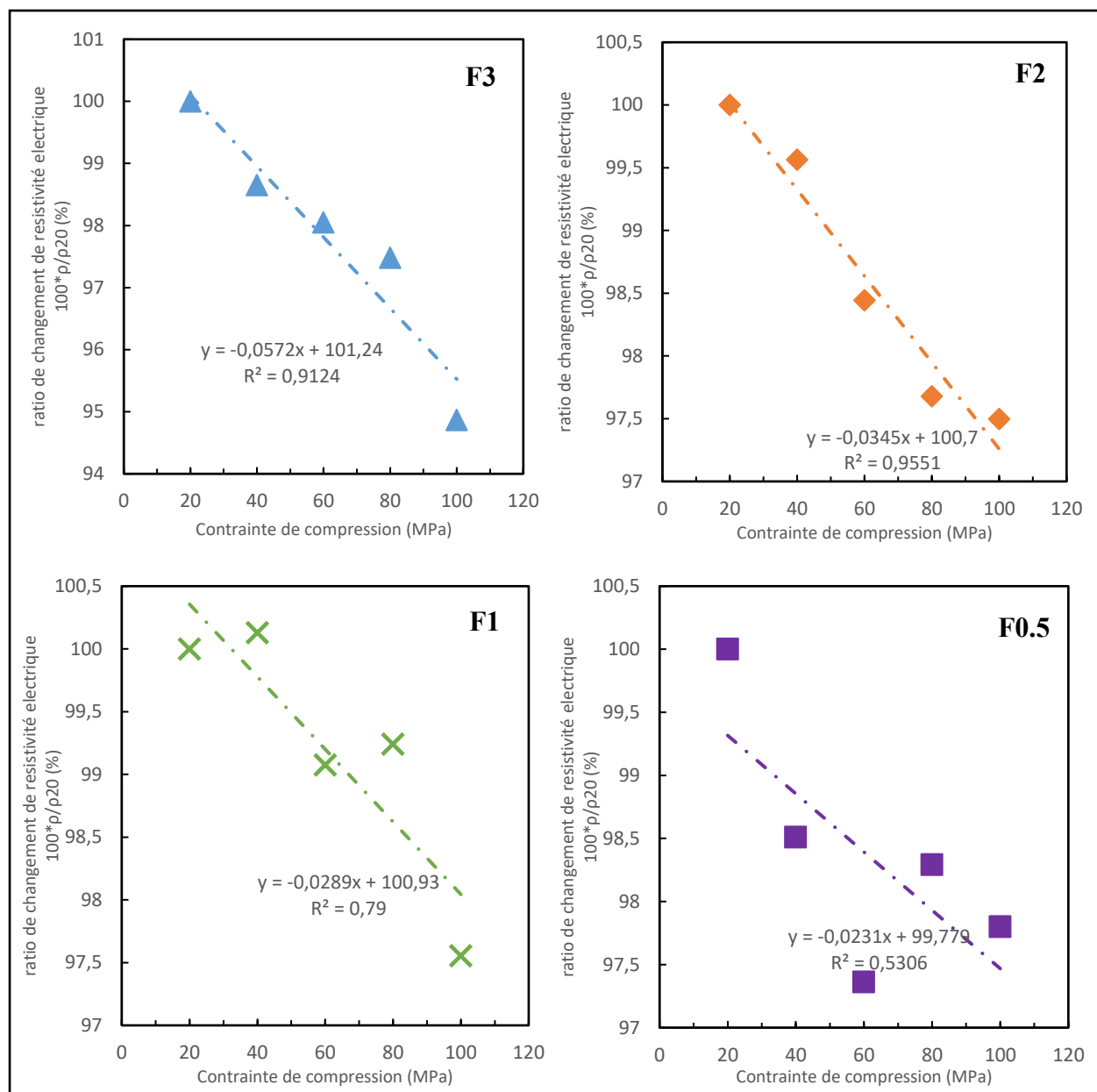


Figure 4.10 : Courbes de changement de résistivité électrique en fonction des contraintes de compression pour différents mélanges de BFUP avec variation de volume des fibres

Les résultats montrent une assez bonne linéarité pour les mélanges contenant 3 % et 2 % de fibres, avec des coefficients de détermination élevés (supérieurs à 0.9), traduisant une réponse électromécanique stable et reproductible. En revanche, les mélanges à 1 % et 0.5 % de fibres présentent une dispersion plus importante et des valeurs de plus faibles, ce qui peut être attribué à un réseau conducteur plus aléatoire.

Le Tableau 4.2 présente les valeurs du facteur de jauge obtenues pour chaque mélange.

Tableau 4.2 Facteurs de jauge de chaque mélange de fibres

Mélange Fibres	Spécimen	Facteur de jauge (%/MPa)	FG moyen par mélange (%/MPa)
3%	F3(1)	0.0435	0.0572
	F3(2)	0.0619	
	F3(3)	0.0661	
2%	F2(1)	0.0342	0.0345
	F2(2)	0.0382	
	F2(3)	0.0309	
1%	F1(1)	0.0382	0.0289
	F1(2)	0.0248	
	F1(3)	0.0233	
0.5%	F0.5(1)	0.0194	0.0231
	F0.5(2)	0.0258	
	F0.5(3)	0.0242	

Les valeurs du facteur de jauge obtenues restent relativement faibles par rapport à celles obtenues dans la littérature pour des matériaux en béton fibré, qui sont de l'ordre de 0.180 %/MPa (Tableau 2.1). Bien que le BFUP présente un comportement piézorésistif exploitable, sa sensibilité demeure limitée. Cela suggère que des améliorations sont nécessaires, notamment par l'optimisation du dosage et de la distribution des fibres ou l'ajout de phases conductrices, afin d'augmenter la performance du matériau pour des applications de surveillance structurale.

4.3.2.3 Influence de l'ajout de laitier d'acier

L'influence de l'ajout de laitier a été étudiée à travers les mélanges contenant 2% de fibres, avec des ajouts additionnels de 5% et 10% de laitier, et comparée au mélange de référence. Les courbes de la Figure 4.11 présentent les courbes moyennes du ratio de variation de résistivité en fonction de la contrainte mécanique, ainsi que leurs droites de tendance associées.

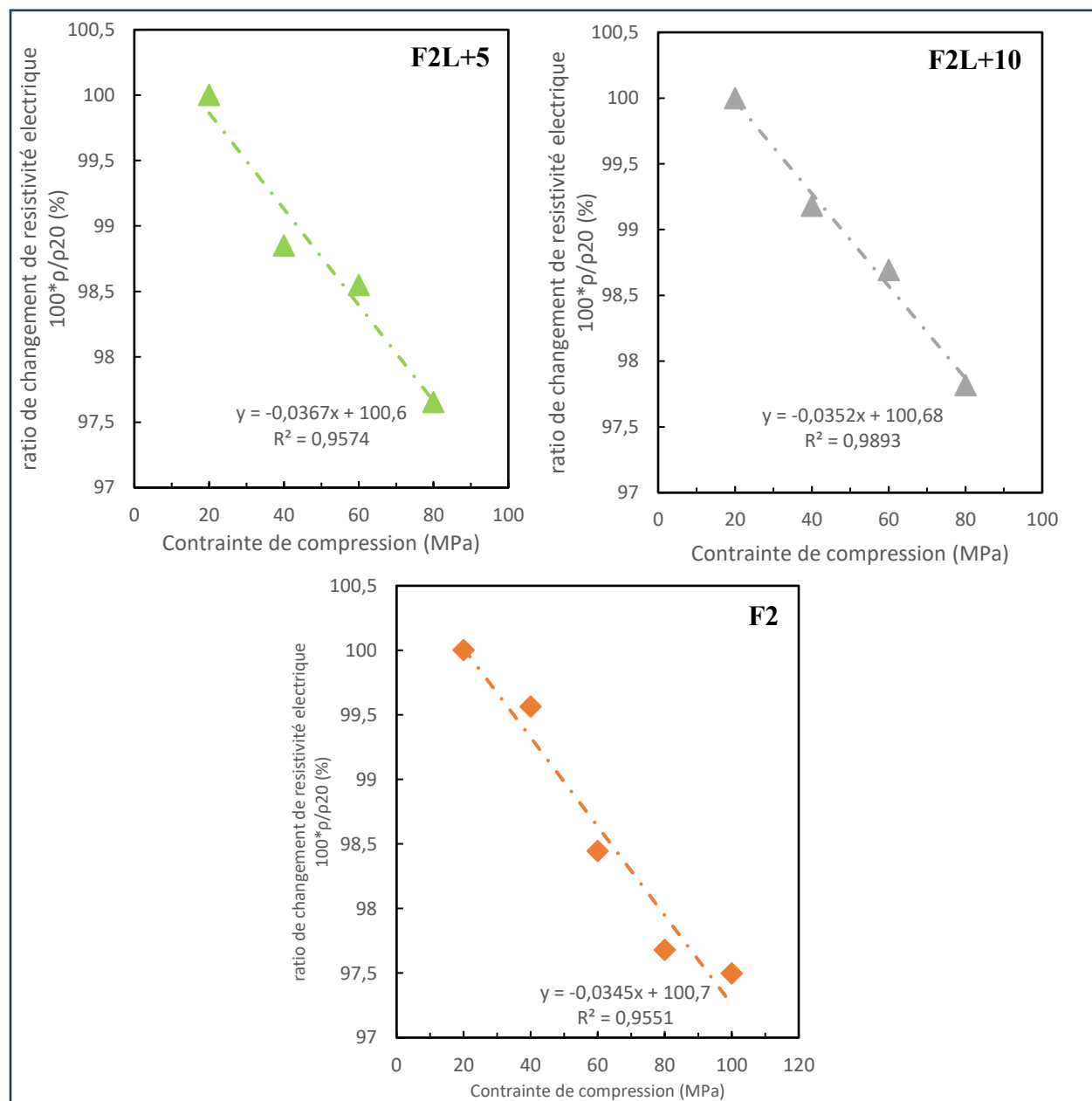


Figure 4.11 : Courbes de changement de résistivité électrique en fonction des contraintes de compression pour différents mélanges de BFUP avec variation de laitier d'acier

Les résultats montrent une bonne corrélation linéaire pour l'ensemble des mélanges, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0.95, traduisant une réponse électromécanique stable. Les facteurs de jauge obtenus sont relativement proches, avec des valeurs de 0.0345 pour le mélange de référence F2, 0.0367 pour F2L+5 et 0.0352 pour F2L+10 (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Comparaison de la sensibilité des mélanges avec variation de laitier d'acier

Mélange Fibres	Facteur de jauge (%/MPa)
F3	0.0572
F2L+10	0.0352
F2L+5	0.0367
F2	0.0345

Ces résultats indiquent une légère amélioration de la sensibilité piézorésistive avec l'ajout de laitier avec un optimum obtenu pour le mélange F2L+5 contenant +5 % de laitier. Toutefois, cette amélioration reste modérée et ne permet pas d'atteindre les niveaux de performance observés pour des mélanges à plus forte teneur en fibres (notamment 3 %).

Ainsi, bien que l'ajout de laitier contribue à optimiser légèrement le comportement électrique du matériau, son effet demeure secondaire par rapport à celui du dosage en fibres, qui reste le paramètre dominant dans le contrôle de la sensibilité piézorésistive.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier le comportement piézorésistif du BFUP sous chargement de compression, à travers un dispositif expérimental combinant mesures mécaniques et électriques.

Dans un premier temps, l'analyse du comportement mécanique, après correction de l'influence des plaques isolantes, a mis en évidence une réponse globalement linéaire du matériau, validant la fiabilité des essais réalisés.

Les essais de chargement continu ont mis en évidence une corrélation claire entre la contrainte appliquée et l'évolution de l'impédance, confirmant le comportement piézorésistif du BFUP. Une légère non-réversibilité de la réponse électrique après déchargement a toutefois été observée, traduisant la présence de phénomènes irréversibles au sein du matériau, tels que des réorganisations du réseau conducteur ou un micro-endommagement.

Les essais de compression par paliers ont permis une caractérisation plus fine du comportement électromécanique. Les résultats montrent une diminution progressive de la résistivité avec l'augmentation de la contrainte, attribuée à une amélioration de la connectivité du réseau de fibres. L'analyse de ces données a permis de déterminer le facteur de jauge, révélant une augmentation de la sensibilité avec le taux de fibres, paramètre dominant du comportement piézorésistif. La sensibilité maximale est obtenue pour un dosage de 3 % de fibres, avec un facteur de jauge de l'ordre de 0,06 %/MPa, valeur toutefois inférieure à celles rapportées pour les mélanges les plus performants de la littérature.

L'incorporation de laitier conduit à une légère amélioration de la sensibilité, avec une performance optimale observée pour un taux de 5 % au-dessus de taux de référence, sans toutefois égaler les gains obtenus par l'augmentation du volume de fibres. Globalement, les valeurs de facteur de jauge demeurent modestes, indiquant qu'une optimisation de la formulation est nécessaire pour améliorer les performances du matériau en vue d'applications de surveillance structurale.

Ainsi, ce chapitre confirme le potentiel du BFUP comme matériau auto-capteur, tout en mettant en évidence les principaux leviers d'amélioration, notamment en termes de formulation et de contrôle du réseau conducteur, afin d'accroître sa sensibilité et sa robustesse en conditions réelles.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 Rappel des objectifs et de la méthodologie

Ce travail de recherche s'inscrit dans le contexte du développement des matériaux cimentaires intelligents, capables d'assurer un suivi en temps réel de l'état de contrainte au sein des structures. Dans une perspective d'amélioration de la durabilité et de la gestion des ouvrages, l'intégration de fonctions d'auto-détection directement dans les matériaux constitue une alternative prometteuse aux systèmes de capteurs traditionnels.

Dans ce cadre, l'objectif principal de ce mémoire est de caractériser expérimentalement le comportement piézorésistif à court terme du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP), en analysant l'évolution de sa résistivité électrique en fonction des sollicitations mécaniques, et en évaluant l'influence des ajouts conducteurs (fibres d'acier et laitier) sur sa sensibilité, notamment à travers le facteur de jauge.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes ont été mises en œuvre. Dans un premier temps, un protocole expérimental fiable a été développé afin de mesurer la résistivité électrique intrinsèque du BFUP en l'absence de chargement mécanique. Ce protocole repose notamment sur le choix de la géométrie des spécimens, des configurations d'électrodes, du procédé de mise en place du matériau, du dispositif de mesure ainsi que des paramètres d'acquisition.

Une fois ce protocole établi et validé, l'étape suivante a consisté à optimiser la composition du mélange en termes de pourcentage volumique de fibres et de pourcentage massique d'ajout de laitier. Il est important de préciser que l'approche retenue reposait sur l'utilisation d'ingrédients existants: un prémix de BFUP, un laitier et des fibres couramment utilisés dans les essais mécaniques du laboratoire, en faisant varier uniquement leur dosage, sans modifier leurs caractéristiques intrinsèques (par exemple, la longueur des fibres ou la granulométrie du laitier).

En l'absence d'un outil de modélisation numérique fiable, nécessitant lui-même un calibrage expérimental, et afin de limiter le nombre d'essais de chargement, une approche en deux étapes a été adoptée, basée sur des essais de mesure de résistivité réalisés sans chargement mécanique. La première étape a consisté à optimiser le taux de fibres d'acier en conservant la teneur en laitier de référence du prémix, en explorant des dosages compris entre 0 % et 3 %, couvrant à la fois les

valeurs des mélanges les plus sensibles rapportés dans la littérature et le seuil de percolation théorique associé à la géométrie des fibres. Dans un second temps, une fois ce dosage optimal identifié, l'effet du laitier a été étudié en ajoutant une proportion 5 % et 10 % de la masse du liant dans le prémix.

Les formulations retenues ont ensuite fait l'objet d'une validation ultérieure sous chargement mécanique. Le choix a été porté sur le chargement en compression, retenu d'une part pour sa simplicité de mise en œuvre expérimentale et sa bonne reproductibilité, et d'autre part parce qu'il permet d'isoler la réponse intrinsèque du matériau composite, sans l'influence de mécanismes tels que la fissuration ou le décollement fibre-matrice (*debonding*), connus pour altérer significativement la résistivité électrique

5.2 Conclusions générales

Ce mémoire a permis d'apporter une contribution à la compréhension du comportement piézorésistif du BFUP, en s'appuyant sur une démarche expérimentale progressive allant de la caractérisation électrique intrinsèque du matériau à l'étude de sa réponse sous sollicitation mécanique. Les résultats obtenus mettent en évidence à la fois le potentiel de ce matériau en tant que capteur intégré et les limites actuelles liées à sa formulation et aux conditions de mesure.

Les conclusions principales peuvent être synthétisées selon les deux volets de l'étude.

5.2.1 Comportement électrique de BFUP en absence de chargement

Une campagne expérimentale étendue a été mise en œuvre, reposant sur la comparaison de plusieurs configurations d'électrodes (deux électrodes externes, quatre électrodes externes et quatre électrodes internes), ainsi que sur l'étude de différents paramètres de formulation du matériau. Les mesures d'impédance ont été réalisées sur des spécimens de BFUP présentant des teneurs variables en fibres d'acier, et d'ajout de laitier, afin d'évaluer leur influence sur la conductivité électrique. Une attention particulière a également été portée à l'étude de l'orientation des fibres, en lien avec le procédé de mise en œuvre, ainsi qu'à l'évolution temporelle des propriétés électriques du matériau.

Les résultats obtenus au cours de cette phase ont permis de mettre en évidence plusieurs éléments essentiels.

- Les mesures réalisées à deux électrodes externes ont montré une forte sensibilité aux conditions de contact entre les électrodes et le matériau. Lorsque l'interface est améliorée par l'utilisation d'un agent de contact conducteur, les résultats deviennent cohérents et relativement stables, traduisant une meilleure transmission du courant électrique à travers le spécimen. En revanche, en l'absence de cet agent, les mesures présentent une dispersion importante et des valeurs de résistance élevées, révélant l'effet de rugosité de la surface de contact. Ces observations mettent en évidence les limites intrinsèques de cette configuration, en particulier dans une perspective d'essais sous chargement, où la stabilité des électrodes ne peut être garantie.
- L'analyse de la configuration à quatre électrodes externes a permis de mettre en évidence des phénomènes d'interface plus complexes, notamment des effets capacitifs associés à la nature du contact électrode-matériau et une distribution non conventionnelle des lignes de courant. Par ailleurs, la conversion des mesures de résistance en résistivité intrinsèque nécessite la détermination d'un facteur de forme non disponible dans la littérature et devant être évalué par des analyses numériques, notamment par éléments finis.
- La configuration à quatre électrodes internes s'est révélée la plus adaptée pour la caractérisation des propriétés électriques du BFUP. En limitant l'influence des résistances de contact et en favorisant une circulation plus homogène du courant au sein du matériau, cette configuration permet d'obtenir des résultats reproductibles et représentatifs du comportement intrinsèque du composite cimentaire. Les diagrammes de Nyquist obtenus présentent des allures caractéristiques, permettant notamment d'identifier de manière fiable la résistance électrique associée au matériau, et ensuite le passage à la résistivité, via un facteur de forme classique.
- L'influence de la teneur en fibres a été mise en évidence, avec une diminution progressive de la résistivité électrique lorsque le taux de fibres augmente. Ce comportement traduit l'amélioration de la connectivité du réseau conducteur au sein de la matrice cimentaire, en lien avec les mécanismes de percolation décrits dans la littérature. Ainsi, l'augmentation du dosage en fibres favorise la formation de chemins conducteurs continus, améliorant les propriétés électriques du matériau. Les résultats démontrent que le seuil de percolation pour les fibres choisies est plus grand que 2%.

- L'ajout de laitier d'acier a permis de mettre en évidence une amélioration de la conductivité électrique, en particulier pour des mélanges combinant une teneur modérée en fibres (2%) avec des ajouts de 5% et 10% de laitier par rapport à la référence. Ces formulations atteignent des niveaux de conductivité comparables à ceux obtenus avec des teneurs plus élevées en fibres (3%), ce qui constitue un résultat intéressant du point de vue de l'optimisation du matériau.
- L'étude de l'orientation des fibres a mis en évidence une anisotropie marquée du comportement électrique, directement liée au procédé de mise en œuvre. Les mesures de résistivité réalisées pour le coulage incliné, selon différentes directions montrent une conductivité plus élevée dans le plan de coulée (XY) et plus faible selon la direction Z, traduisant une orientation préférentielle des fibres et une meilleure connectivité du réseau conducteur dans ce plan. À l'inverse, les spécimens issus d'un coulage sans direction privilégiée présentent une réponse plus isotrope. Ces résultats confirment la capacité des mesures électriques, notamment en configuration à deux électrodes externes, à détecter indirectement l'orientation des fibres et à caractériser l'anisotropie du matériau.

Au regard de l'ensemble de ces résultats, la configuration à quatre électrodes internes en grillage d'acier inoxydable a été retenue comme méthode de référence pour la suite de l'étude. Cette première phase a ainsi permis de valider une approche expérimentale robuste et de mieux comprendre les mécanismes influençant les propriétés électriques du BFUP, constituant une base pour l'analyse du comportement piézorésistif sous chargement mécanique.

5.2.2 Comportement piézorésistif de BFUP sous chargement de compression

L'objectif de cette seconde phase était d'évaluer le comportement piézorésistif du BFUP sous sollicitation mécanique, en analysant l'évolution de ses propriétés électriques en fonction de la contrainte appliquée.

Les résultats obtenus au cours de cette phase mettent en évidence des aspects fondamentaux du comportement du matériau.

- L'essai de chargement continu et cyclique a mis en évidence une corrélation claire entre la contrainte appliquée et l'évolution de l'impédance, confirmant le comportement piézorésistif du BFUP et le potentiel de son utilisation comme capteur en temps réel. Une légère non-réversibilité de la réponse électrique après déchargement a toutefois été

observée, traduisant la présence de phénomènes irréversibles au sein du matériau, tels que des réorganisations du réseau conducteur ou un micro-endommagement.

- Les essais par paliers de chargement ont permis d'approfondir l'analyse du comportement électromécanique, en mettant en évidence une diminution progressive de la résistivité électrique avec l'augmentation de la contrainte. Ce comportement peut être interprété comme une amélioration de la connectivité du réseau conducteur sous compression, liée au rapprochement des inclusions conductrices et à la facilitation des mécanismes de conduction. L'exploitation de ces résultats a permis d'établir des relations quantitatives entre la résistivité et la contrainte appliquée, constituant une base pour le développement de capteur.
- L'analyse du facteur de jauge a montré une sensibilité dépendante de la composition du matériau, la teneur en fibres apparaissant comme le paramètre prédominant. L'augmentation du taux de fibres favorise la formation d'un réseau conducteur plus dense et plus sensible aux variations mécaniques, ce qui se traduit par une amélioration de la réponse piézorésistive. La meilleure sensibilité est obtenue pour le mélange à 3%.
- L'ajout de laitier contribue également à une amélioration de la sensibilité, bien que cet effet reste modéré. Les résultats indiquent l'existence d'un optimum pour un certain taux d'ajout, notamment autour de 5% par rapport au mélange de référence pour le mélange à 2% de fibres, suggérant que le laitier influence indirectement la microstructure du matériau et la qualité du réseau conducteur, sans toutefois remplacer l'effet dominant des fibres.
- Malgré ces résultats encourageants, les valeurs du facteur de jauge obtenues restent relativement modestes (ne dépassent pas 0.06 %/MPa) au regard des mélanges les plus sensibles recensés dans la littérature (facteur de jauge de l'ordre de 0.2 %/MPa). Cela met en évidence la nécessité d'une phase d'optimisation plus poussée de la formulation du matériau en termes de granulométrie/dosage du laitier d'acier et probablement de géométrie/matériau des fibres à utiliser.

Ainsi, cette seconde phase a permis de confirmer le potentiel du BFUP en tant que matériau auto-capteur, capable de traduire une sollicitation mécanique en une réponse électrique mesurable. Elle met également en lumière les mécanismes physiques sous-jacents à ce comportement, tout en identifiant les principaux leviers d'amélioration nécessaires pour une utilisation opérationnelle dans le domaine du génie civil.

5.3 Limitations et recommandations

Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire ont permis de démontrer le potentiel du BFUP en tant que matériau autodétectant. Néanmoins, certaines limitations expérimentales, méthodologiques et matérielles ont été identifiées, mettant en évidence des axes d'amélioration et des perspectives de recherche nécessaires pour une application à plus grande échelle.

5.3.1 Limitations de l'étude

Malgré le soin apporté à la conception expérimentale, plusieurs limites ont été observées au cours de ce travail.

- Les mesures de résistivité présentent une variabilité persistante au-delà de 28 jours de cure humide, difficile à interpréter à ce stade. Cette variabilité suggère une influence combinée de l'évolution microstructurale du matériau (hydratation tardive, redistribution de l'eau) et des conditions hygrothermiques, nécessitant des investigations complémentaires pour en identifier précisément les mécanismes.
- Le comportement non parfaitement réversible observé lors des essais de compression constitue une autre limitation importante. La présence d'effets irréversibles, liés à la microfissuration ou à la réorganisation du réseau conducteur, constitue un obstacle quant à l'utilisation du BFUP intelligent comme capteur.
- La majorité des analyses issues de la spectroscopie d'impédance se sont limitées à l'exploitation de la composante résistive (partie réelle de l'impédance), alors que les diagrammes de Nyquist, obtenus sur une large plage de fréquences, contiennent également des informations pertinentes liées aux phénomènes capacitifs et de polarisation (partie imaginaire). L'absence d'exploitation de ces contributions limite l'interprétation complète des mécanismes électrochimiques et microstructuraux gouvernant la réponse électrique du matériau.
- Enfin, l'étude s'est principalement concentrée sur des essais de compression monotone ou par paliers, dans un environnement contrôlé. Les effets de sollicitations complexes (fatigue, traction, flexion) ainsi que l'influence des conditions environnementales (température, humidité, vieillissement) n'ont pas été abordés, ce qui limite la portée des conclusions pour des applications réelles. En particulier, la forte sensibilité de la résistivité aux conditions

hygrothermiques constitue une limitation majeure pour des applications réelles, en l'absence de méthodes robustes de compensation ou de calibration.

5.3.2 Recommandations et perspectives de recherche

Au regard des conclusions de ce travail et des limitations, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

- Une optimisation approfondie de la formulation du matériau apparaît essentielle, en explorant des combinaisons d'ajouts conducteurs multi-échelles. L'introduction de systèmes hybrides (fibres d'acier + nano-inclusions telles que nanotubes de carbone ou noir de carbone) pourrait favoriser la formation de réseaux conducteurs plus denses et stables, abaisser le seuil de percolation et augmenter significativement la sensibilité piézorésistive.
- Le développement de modèles analytiques et numériques reliant la microstructure (distribution et orientation des fibres, connectivité, phénomènes de percolation) à la réponse électromécanique constitue un axe clé. De tels modèles permettraient de mieux interpréter les mécanismes observés et d'optimiser la formulation du matériau à différentes échelles (fibres–matrice–nano-inclusions). Les résultats expérimentaux de ce travail peuvent servir de base pour une première phase de calibration de ces approches.
- Une meilleure maîtrise de la dispersion et de l'orientation des fibres ainsi que des autres ajouts conducteurs constitue également un axe de recherche important. Le développement de procédés de mise en œuvre contrôlés, permettant d'obtenir une distribution plus homogène ou orientée selon les besoins, pourrait améliorer la reproductibilité et les performances du matériau.
- L'étude du comportement piézorésistif du BFUP sous des sollicitations mécaniques variées (traction, flexion, chargements cycliques et de longue durée), ainsi que sous différentes conditions hygrothermiques, constitue une étape essentielle pour valider son utilisation en conditions réelles. Une attention particulière doit être portée à la durabilité et à la stabilité physico-chimique des inclusions conductrices dans le temps, compte tenu de leur influence directe sur la connectivité du réseau conducteur et la fiabilité de la réponse électrique.
- Enfin, l'intégration du BFUP autodétectant dans des systèmes structuraux réels représente une perspective prometteuse, notamment pour des zones critiques telles que les blocs d'ancrage de câbles de post-tension. Le présent travail constitue une première étape

exploratoire, ayant permis d'identifier les principaux mécanismes du comportement piézorésistif et de démontrer le potentiel du matériau, ouvrant ainsi la voie à des développements orientés vers des applications in situ.

RÉFÉRENCES

- Azhari, F. (2008). *Cement-based sensors for structural health monitoring* [University of British Columbia]. <https://doi.org/10.14288/1.0063120>
- Berhan, L., & Sastry, A. M. (2007). Modeling percolation in high-aspect-ratio fiber systems. II. The effect of waviness on the percolation onset. *Physical Review E*, 75(4), 041121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.041121>
- Bouillard, T., Turatsinze, A., Helson, O., Balayssac, J.-P., Toumi, A., & Soula, C. (2025). Mechanical performance and self-sensing capability of an amorphous fiber-reinforced concrete for radioactive waste storage facilities. *Nuclear Engineering and Design*, 431, 113727. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113727>
- Chen, B., Liu, J., & Wu, K. (2005). Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading. *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2183-2191. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.02.004>
- Haghgoo, M., Hassanzadeh-Aghdam, M. K., & Ansari, R. (2020). A comprehensive evaluation of piezoresistive response and percolation behavior of multiscale polymer-based nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 130, 105735. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105735>
- Han, B., Yu, X., & Ou, J. (2014). *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Butterworth-Heinemann.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E., & Ou, J. (2011). Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection. *Measurement*, 44(9), 1645-1650. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.06.014>
- Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A. R., & Salehi, M. (s. d.). *Electrical Resistivity of Concrete*.

- Le, H. V., Lee, D. H., & Kim, D. J. (2020). Effects of steel slag aggregate size and content on piezoresistive responses of smart ultra-high-performance fiber-reinforced concretes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 305, 111925.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111925>
- Le, H.-V., Tae-Uk, K., Khan, S., Jun-Young, P., Park, J.-W., Kim, S.-E., Jang, Y., & Dong-Joo, K. (2021). Development of Low-Cost Wireless Sensing System for Smart Ultra-High Performance Concrete. 21(19), 6386. <https://doi.org/10.3390/s21196386>
- Lee, S. Y., Le, H. V., & Kim, D. J. (2019). Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress. *Construction and Building Materials*, 220, 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.197>
- Lee, S. Y., Le, H. V., Kim, M. K., Kim, D. J., & Park, J. (2021). An Innovative Smart Concrete Anchorage with Self-Stress Sensing Capacity of Prestressing Stress of PS Tendon. *Sensors*, 21(15), 5251. <https://doi.org/10.3390/s21155251>
- Liu, Z., Qi, X., Yu, Z., Ke, J., Gao, X., & Shui, Z. (2024). Development and properties of cost-effective self-sensing Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating steel slags. *Construction and Building Materials*, 449, 138502.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138502>
- Nahir, T. M. (2005). Impedance Spectroscopy : Theory, Experiment, and Applications, 2nd ed Edited by Evgenij Barsoukov (Texas Instruments Inc.) and J. Ross Macdonald (University of North Carolina, Chapel Hill). John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ. 2005. xvii + 596 pp. \$125.00. ISBN 0471-64749-7. *Journal of the American Chemical Society*, 127(35), 12431-12431. <https://doi.org/10.1021/ja059742o>

Sam Cooper. (2021, février 18). *Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS : Maths and Theory)* [Enregistrement vidéo].

<https://www.youtube.com/watch?v=5puDQjCl2pk>

Tamayo-Vegas, S., Muhsan, A., Tarfaoui, M., Lafdi, K., & Chang, L. (2022). Effect of CNT additives on the electrical properties of derived nanocomposites (experimentally and numerical investigation). *Materials Today: Proceedings, NanoOstrava 2021*, 52, 199-205.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.361>

Taya, M., Kim, W. J., & Ono, K. (1998). Piezoresistivity of a short fiber/elastomer matrix composite. *Mechanics of Materials*, 28(1), 53-59. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(97\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(97)00064-1)

Wang, G., Wang, C., Zhang, F., & Yu, X. (2018). Electrical percolation of nanoparticle-polymer composites. *Computational Materials Science*, 150, 102-106.

<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.03.051>

Wei, X., Xia, Z., Luo, W., & Zhou, W. (2022). Prediction of electrical conductivity of graphene-filled composites considering the tunneling effect. *2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 1-6.

<https://doi.org/10.1109/ICEPT56209.2022.9873203>

Zurich Instruments. (2022, juin 28). *Hands-on Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) | Zurich Instruments Webinar* [Enregistrement vidéo].

<https://www.youtube.com/watch?v=KAkIIWyOSOG>

ANNEXE A COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BFUP

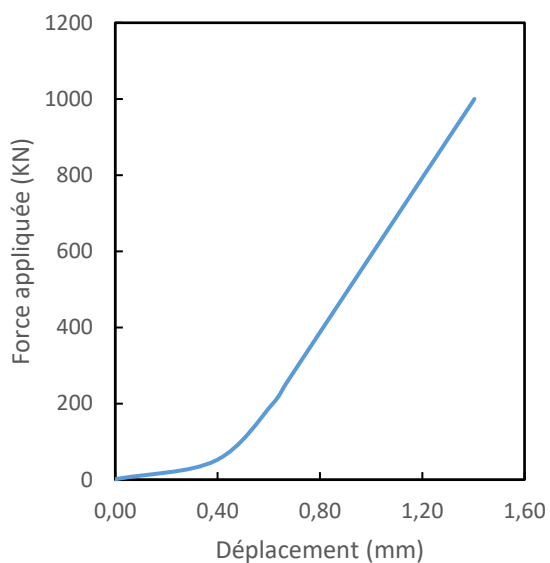


Figure A.5.1 Diagramme Force-Déplacement de BFUP
- 3% des fibres

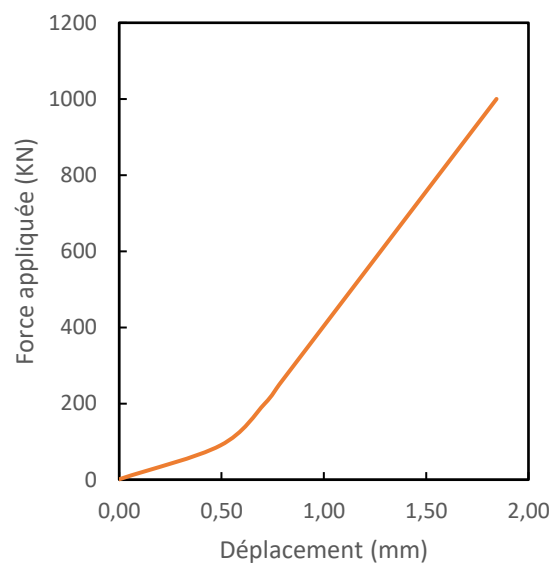


Figure A.5.2 Diagramme Force-Déplacement de BFUP
- 2% des fibres

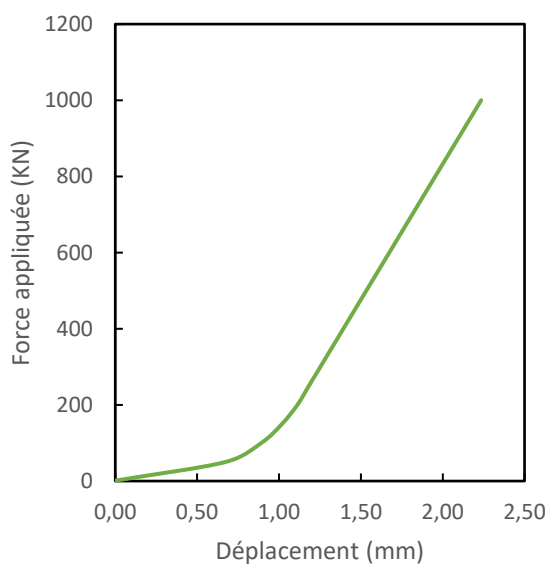


Figure A.5.3 Diagramme Force-Déplacement de BFUP
- 1% des fibres

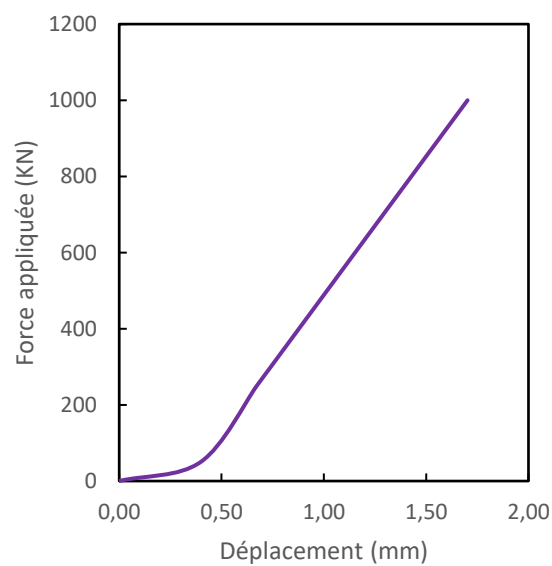


Figure A.5.4 Diagramme Force-Déplacement de BFUP
- 0.5% des fibres

ANNEXE B COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE DU BFUP SOUS DIFFÉRENTS PALIERS DE CONTRAINTES DE COMPRESSION

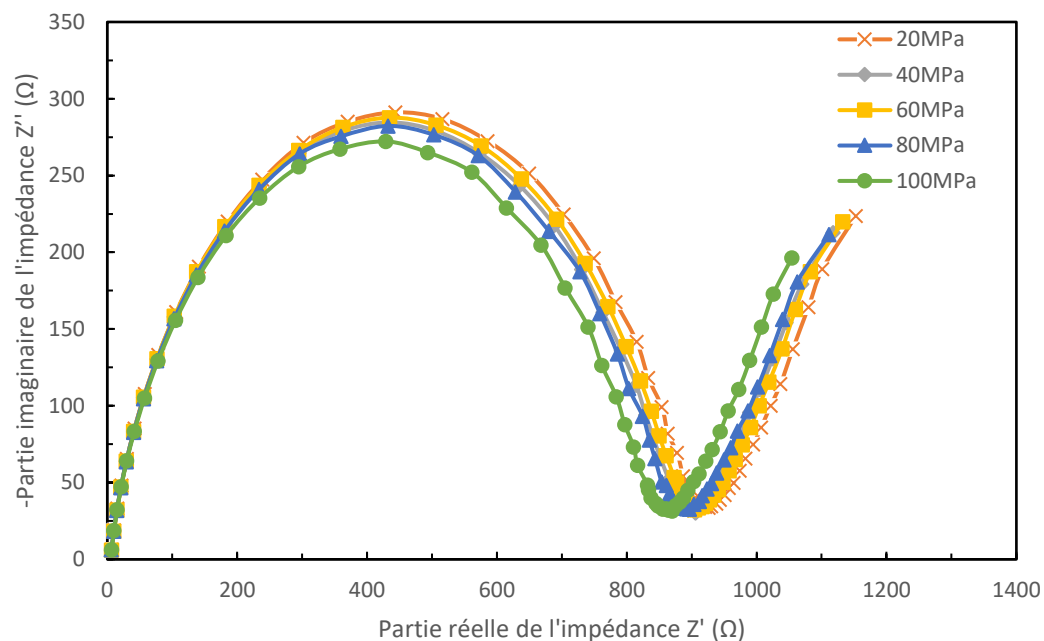


Figure B.1 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 3% des fibres

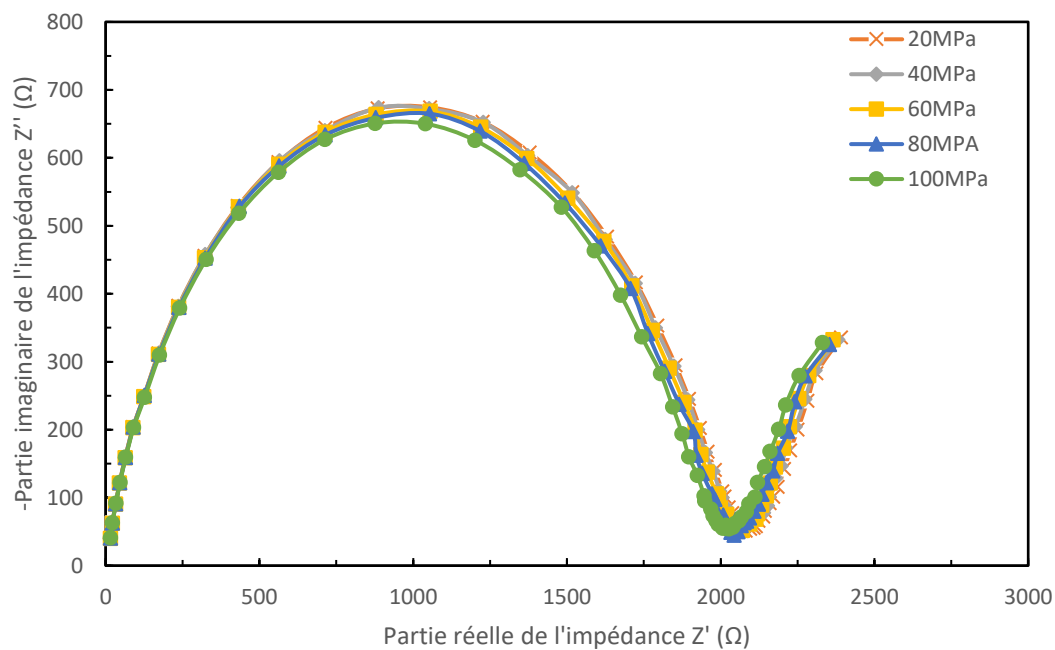


Figure B.2 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 2% des fibres

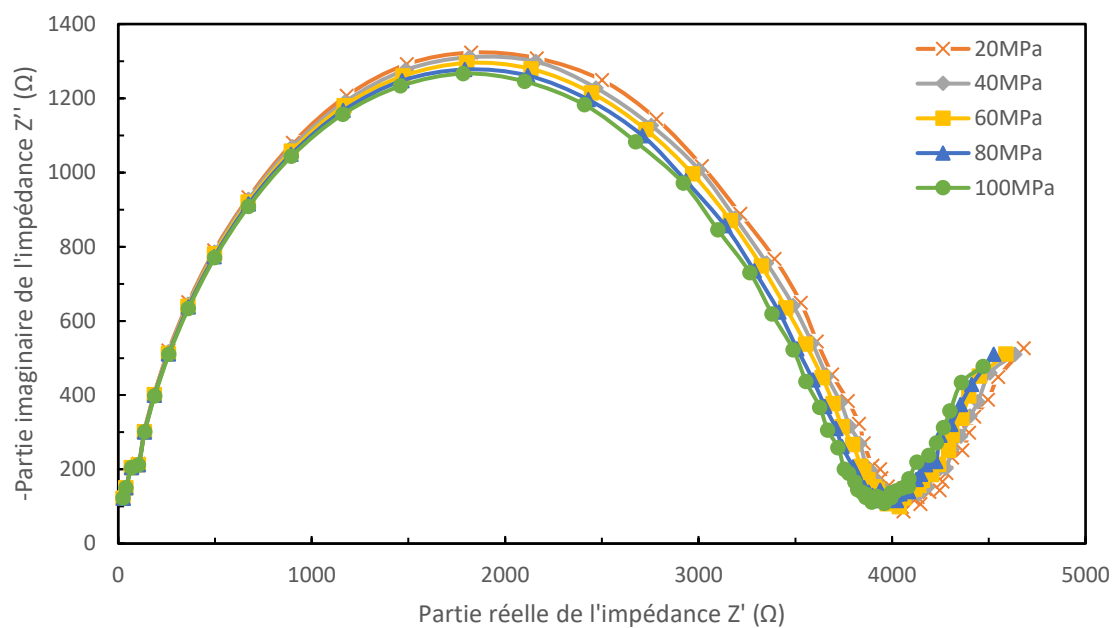


Figure B.3 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 1% des fibres

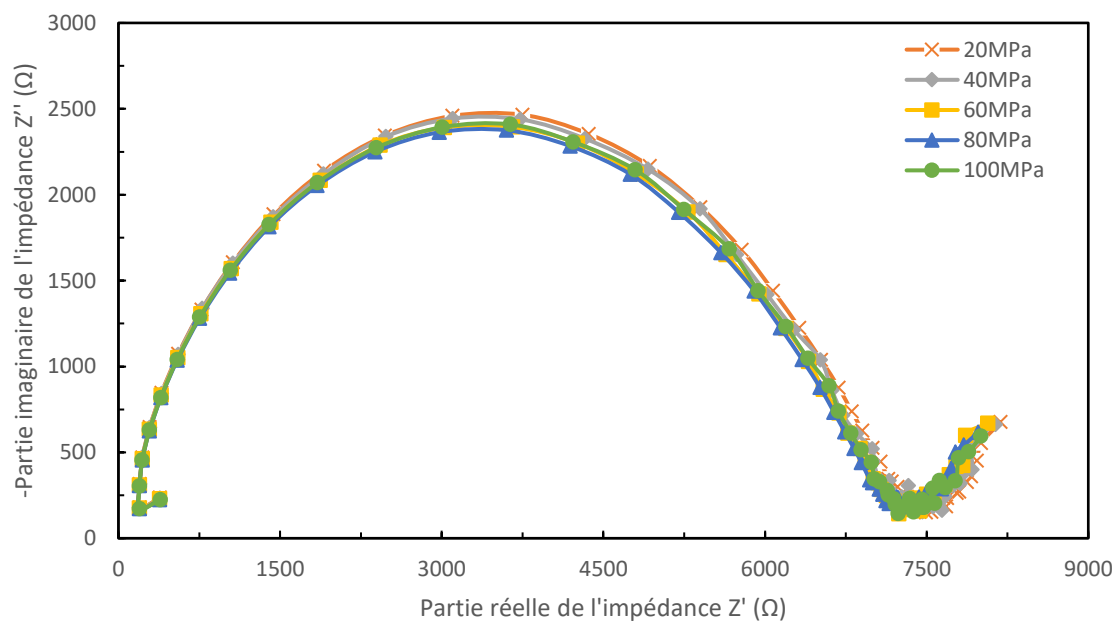


Figure B.4 Diagramme Nyquist des différents paliers de contraintes sur BFUP - 0.5% des fibres