

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS
PHYSIQUES ET MÉCANIQUES ET
ÉTUDE DES EFFETS DE L'HUMIDITÉ
ET DE L'ALCALINITÉ SUR DE
NOUVELLES BARRES D'ARMATURE EN
POLYMÈRE RENFORCÉ DE FIBRES DE
BASALTE (PRFB)

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Wassim ABDELKAFI

Sherbrooke (Québec) Canada

Mars 2024

MEMBRES DU JURY

Prof. Brahim BENMOKRANE

Directeur

Prof. Mathieu ROBERT

Évaluateur

Dr. Patrice COUSIN

Évaluateur

Dr. Brahim TIGHIOUART

Évaluateur

RÉSUMÉ

Les polymères renforcés de fibres (PRF) sont des matériaux composites de plus en plus utilisés en génie civil. Ils sont principalement utilisés pour réhabiliter et améliorer les performances des structures en béton armé. Ces matériaux, notamment les polymères renforcés de fibres de verre (PRFV), les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC), les polymères renforcés de fibres d'aramide (PRFA) et les polymères renforcés de fibres de basalte (PRFB), offrent des avantages significatifs en termes de résistance mécanique et de durabilité par rapport aux renforts en acier traditionnels. Cependant, leur performance à long terme peut être affectée par diverses conditions environnementales, ce qui souligne la nécessité de mener des recherches approfondies sur leur durabilité. L'objectif de ce projet est d'évaluer la durabilité des barres PRFB et PRFV par des tests de vieillissement accéléré qui simulent des conditions d'exposition réalistes. Les tests consistent à immerger les barres dans une solution alcaline pendant trois mois à 60 °C afin d'accélérer les processus de dégradation. L'étude vise à étudier les effets de ces conditions sur les propriétés physiques et mécaniques des barres en PRF en comparant les performances des échantillons exposés à celles d'échantillons de référence non conditionnés. Une étude comparative a été menée sur les propriétés mécaniques des barres PRFB et PRFV sablées provenant de *Pultrall Inc.*, ainsi que sur les barres sablées et déformées (non sablées) de *Basanite Industries Inc.*. Des diamètres variés ont été examinés pour chaque type de barre, distinguant ceux de *Pultrall Inc.*, comme type 1 et ceux de *Basanite Industries Inc.*, comme type 2. Les diamètres étudiés pour les barres de basalte de type 1 sont, #3 (10 mm), #4 (13 mm), #5 (15 mm), et #6 (20 mm), et pour le verre #3 (10 mm), #4 (13 mm), #5 (15 mm), #6 (20 mm), et #8 (25 mm); tandis que pour le type 2 de basalte, les diamètres sont #5 (15 mm), #6 (20 mm), et #8 (25 mm). Les résultats indiquent que les barres de plus petit diamètre offrent généralement une meilleure performance, sans que leur taille n'affecte significativement leurs propriétés physiques. En outre, les études de durabilité ont révélé une réduction de la résistance au cisaillement interlaminaire et de la résistance au cisaillement transversal dans les échantillons immergés dans la solution alcaline. Ces résultats soulignent la nécessité d'une compréhension approfondie des mécanismes de dégradation affectant les PRF dans des environnements alcalins, afin de développer des stratégies d'amélioration de leur durabilité. Enfin, ce projet vise à contribuer de manière significative à l'optimisation de l'utilisation des PRF dans le renforcement interne des structures de génie civil, en fournissant des données cruciales sur leur performance à long terme dans des conditions environnementales exigeantes.

Mots-clés : PRFB, PRFV, propriété mécanique, propriété physique, durabilité, alcaline, humidité, température

À mes chers parents, **Rafik** et **Amel** qui
m'ont guidé durant les moments les plus dif-
ficiles de ce long parcours, qui ont été à mes
côtés et m'ont soutenu tout au long de ma
vie, et qui ont tout fait pour mon bonheur et
ma réussite

REMERCIEMENTS

La rédaction d'une maîtrise et de son mémoire représente l'aboutissement d'un engagement assidu et souvent exigeant, un défi qui ne saurait être relevé sans une persévérance inébranlable et une détermination à réussir. Cette réussite, cependant, n'aurait jamais été possible sans l'apport inestimable de plusieurs individus à qui je tiens à exprimer ma profonde gratitude.

Je souhaite avant tout exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de recherche, le Professeur Brahim Benmokrane. Son accompagnement éclairé, marqué par des conseils avisés, son professionnalisme sans faille et son expérience précieuse, a été un pilier de mon parcours. L'opportunité qu'il m'a offerte de rejoindre son groupe de recherche représente pour moi un honneur particulier. Je lui suis également reconnaissant pour sa lecture attentive et ses corrections rigoureuses de ce manuscrit.

Il est également essentiel de remercier le docteur, Salaheldin Ali Mousa, pour ses précieux conseils tout au long de la période de rédaction du mémoire. Sa guidance et son soutien ont joué un rôle crucial dans l'achèvement de ce travail.

Mes remerciements s'étendent à l'ensemble des enseignants et professeurs qui ont jalonné mon parcours académique. Leur enseignement a été le socle sur lequel j'ai construit mes connaissances et compétences. Je suis éternellement reconnaissant à chacun d'entre eux pour leur soutien, même le plus minime, qui a contribué à mon épanouissement académique.

Je désire également exprimer ma gratitude au Docteur Patrice Cousin, dont l'aide précieuse et le partage généreux de son temps m'ont permis d'appréhender des procédures jusqu'alors inconnues à mes yeux, et qui a participé activement à certains travaux présentés dans ce mémoire.

Un merci spécial est adressé aux techniciens du laboratoire, dont Pascal St-Laurent, Benjamin Boisvert, Steven MacEachern et Jérôme Lacroix, pour leur assistance technique indispensable et leurs conseils avisés.

Je ne saurais conclure sans témoigner ma gratitude envers ma mère, dont le soutien indéfectible à l'égard de ses enfants représente le plus précieux des héritages. Ce travail lui est dédié, de même qu'à la mémoire de mon père. Ma reconnaissance s'étend également à mes frères et sœurs, dont les encouragements n'ont cessé de me porter.

Je souhaite exprimer mes remerciements les plus sincères à ma chère épouse, pour sa compréhension et son pardon face aux moments où j'ai été absent ces quatre dernières années. Ce mémoire est le fruit de nos sacrifices communs, et je te le dédie avec tout mon amour.

Enfin, je ne peux oublier le soutien moral et les encouragements de tous mes amis, qui ont été un véritable réconfort tout au long de la rédaction de ce mémoire. Leur présence et leur soutien ont été une source constante de motivation.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1	Contexte et problématiques	1
1.2	État de la question	2
1.3	Structure du mémoire	5
2	OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	6
2.1	Définition du projet de recherche	6
2.2	Objectifs du projet de recherche	7
2.3	Conclusion	9
3	ÉTAT DE L'ART	10
3.1	Introduction	10
3.2	Dégradations des constructions en béton armé	11
3.2.1	Définition et caractéristiques du béton armé	11
3.2.2	Facteurs de dégradation du béton armé	11
3.2.3	Conséquences de la corrosion sur les ouvrages en béton armé	13
3.2.4	Corrosion de l'armature d'acier	14
3.2.5	Solutions pour éviter la corrosion de l'armature d'acier	17
3.3	Développement des PRF en génie civil	19
3.3.1	Historique	19
3.3.2	Développement d'un réseau de recherche sur les PRF au Canada . .	21
3.3.3	Développement de la recherche sur la durabilité des PRF	22
3.3.4	Applications des PRF dans le Génie Civil	24
3.3.5	Description des composites	25
3.3.6	Barres en polymère renforcé de fibres (PRF)	28
3.3.7	Matrice polymérique	32
3.3.8	Agents de polymérisation et inhibiteurs	34
3.3.9	Agents de couplage	35
3.3.10	Charges et additifs	36
3.4	Fabrication des armatures de PRF	37
3.4.1	Mise en œuvre des Composites	37
3.4.2	Procédé par Pultrusion	38
3.5	Pourquoi Étudier les Barres en Fibre de Basalte	39
3.6	Défis et Perspectives	40
3.7	Conclusion	41
4	MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	42
4.1	Introduction	42
4.2	Description des Essais de Propriétés Mécaniques	43
4.2.1	Résistance à la Traction	43

4.2.2	Résistance à l'Arrachement des Barres en PRF	45
4.2.3	Résistance au Cisaillement Interlaminaire	48
4.2.4	Résistance au Cisaillement Transversal	51
4.2.5	Résistance aux Alcalins	53
4.3	Description des Essais de Propriétés Physiques	55
4.3.1	Section effective	55
4.3.2	Teneur en fibres	57
4.3.3	Taux d'absorption d'humidité	59
4.3.4	Température de transition vitreuse	60
4.3.5	Taux de Polymérisation	62
4.3.6	Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)	62
4.3.7	Microscope électronique à balayage (MEB)	63
4.4	Conclusion	65
5	RÉSULTATS ET ANALYSES	66
5.1	Propriétés mécaniques	66
5.1.1	Résistance à la traction	66
5.1.2	Résistance à l'arrachement des barres	77
5.1.3	Résistance au cisaillement interlaminaire	82
5.1.4	Résistance au cisaillement transversal	88
5.2	Durabilité des armatures : Résistance aux alcalins	93
5.2.1	Résistance à la traction sans charges	94
5.2.2	Résistance à la traction avec charges	102
5.2.3	Résistance au cisaillement interlaminaire	106
5.2.4	Résistance au cisaillement transversal	110
5.3	Bilan des essais de propriétés mécaniques	114
5.3.1	Barres en PRFB (type 1 et 2)	114
5.3.2	Barres en PRFV (type 1)	117
5.3.3	Implications pour le Génie Civil	119
5.4	Propriétés physiques	119
5.4.1	Section effective	119
5.4.2	Teneur en fibres	124
5.4.3	Taux d'absorption d'humidité à court et à long terme	126
5.4.4	Température de transition vitreuse	131
5.4.5	Taux de Polymérisation	133
5.4.6	Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)	133
5.4.7	Microscope électronique à balayage (MEB)	135
5.5	Bilan des essais de propriétés physiques	136
6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS EN FRANÇAIS	141
6.1	Généralité sur les travaux réalisés	141
6.2	Recommandations pour les recherches futures	142
	LISTE DES RÉFÉRENCES	144

LISTE DES FIGURES

1.1	Armature galvanisée	2
1.2	Armature revêtue d'époxy	2
3.1	Fissuration du béton à la suite de la réaction Alkali-Agrégat (RAA)	12
3.2	Les effets de l'attaque des chlorures, présents dans les sels de déneigement et dans l'eau de mer, sur le béton [51]	12
3.3	Fissuration de la chaussée due aux effets du gel et du dégel	13
3.4	Éclatement du béton environnant dû à la corrosion des armatures en acier	14
3.5	Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton	16
3.6	Utilisation d'armatures galvanisées dans les constructions en béton armé .	17
3.7	Utilisation d'armatures revêtues d'époxy dans les constructions en béton armé	18
3.8	Barres en Polymères Renforcés de Fibres (PRF)	18
3.9	Produits en PRF	20
3.10	Les différents Tissus utilisés pour le renforcement externe du béton	24
3.11	Les différents types de fibres utilisés pour la fabrication de composants en matériaux composites (PRF) [68]	25
3.12	Composants de base des matériaux composites PRF	26
3.13	Comportement des différents composants d'un matériau composite [69] . .	27
3.14	Barres en PRF avec différents types de fibre : (a) aramide; (b) basalte; (c) carbone; (d) verre [22]	28
3.15	Procédure de fabrication des armatures en PRF par pultrusion (ISIS Canada)	38
4.1	Préparation des barres de fibre de verre et de basalte pour les tests de traction	44
4.2	Mise en place de l'extensomètre de 200 mm	44
4.3	Préparation des spécimens en fibre de basalte et de verre pour les tests d'arrachements	46
4.4	Remplissage des tubes d'aciers avec le ciment expansif et coulage des blocs de béton	46
4.5	Blocs de béton pour les essais d'arrachement	47
4.6	Procédure de mise en place d'un ensemble d'échantillon sur la machine MTS pour réaliser l'essai d'arrachement de barre en PRF du béton	47
4.7	Blocs de béton après l'arrachement des barres	48
4.8	Configuration de la portée avec les détails des distances entre les appuis [30]	50
4.9	Mise en place des barres de PRFB et PRFV sur les appuis, conformément aux lignes tracées sur les barres et les appuis	50
4.10	Composants de la machine hydraulique MTS 647 conçue pour les essais de cisaillement	51
4.11	Dispositif utilisé dans les essais de cisaillement transversal	52
4.12	Préparation des spécimens pour les tests de traction sans charges	54
4.13	Préparation des spécimens pour les tests de traction avec charges	55

4.14	Procédure pour déterminer la section effective	56
4.15	Teneur en fibres des barres sablées et non sablées	58
4.16	Procédure pour déterminer la teneur en fibres : exemple avec une barre en fibre de verre sablée	58
4.17	Taux d'absorption des barres non sablées	60
4.18	Préparation du spécimen pour le test de détermination de la température de transition vitreuse	61
4.19	Courbe typique d'une mesure par DSC [18]	61
4.20	Spectromètre FT/IR-4600 FTIR	63
4.21	Observations microscopiques de la dégradation des fibres et de la matrice dans les barres d'armature en PRFV [100]	64
4.22	Procédure de test au Microscope Électronique à Balayage (MEB)	65
5.1	Analyse par infrarouge d'échantillons de références et conditionnées dans une solution alcaline à 60 °C des barres en PRFB	134
5.2	Analyse par infrarouge d'échantillons de références et conditionnées dans une solution alcaline à 60 °C des barres en PRFV	134
5.3	Balayage au microscope électronique d'une coupe transversale des barres de basalte # 3 de type 1	135
5.4	Balayage au microscope électronique d'une coupe transversale des barres de verre # 3 de type 1	136

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Propriétés des fibres [69]	29
3.2	Propriétés des résines [69]	33
4.1	Composition chimique de la solution alcaline	53
5.1	Minimum de la contrainte de traction ultime de barres en PRF pour chaque barre selon la norme ASTM D7957/D7957M-22 (kN) [15]	66
5.2	Résistance à la traction des barres #3 en PRFB de type 1	67
5.3	Résistance à la traction des barres #4 en PRFB de type 1	68
5.4	Résistance à la traction des barres #5 en PRFB de type 1	68
5.5	Résistance à la traction des barres #6 en PRFB de type 1	68
5.6	Résistance à la traction des barres #3 en PRFV de type 1	70
5.7	Résistance à la traction des barres #4 en PRFV de type 1	70
5.8	Résistance à la traction des barres #5 en PRFV de type 1	70
5.9	Résistance à la traction des barres #6 en PRFV de type 1	71
5.10	Résistance à la traction des barres #8 en PRFV de type 1	71
5.11	Résistance à la traction des barres #5-Lot 1 en PRFB de type 2	72
5.12	Résistance à la traction des barres #5-Lot 2 en PRFB de type 2	73
5.13	Résistance à la traction des barres #5-Lot 3 en PRFB de type 2	73
5.14	Résistance à la traction des barres #6-Lot 1 en PRFB de type 2	74
5.15	Résistance à la traction des barres #6-Lot 2 en PRFB de type 2	74
5.16	Résistance à la traction des barres #6-Lot 3 en PRFB de type 2	75
5.17	Résistance à la traction des barres #8-Lot 1 en PRFB de type 2	75
5.18	Résistance à la traction des barres #8-Lot 2 en PRFB de type 2	76
5.19	Résistance à la traction des barres #8-Lot 3 en PRFB de type 2	76
5.20	Résistance à l'arrachement des barres en fibre de basalte de type 1	77
5.21	Résistance à l'arrachement des barres en fibre de basalte de type 1	78
5.22	Résistance à l'arrachement des barres en fibre de verre de type 1	79
5.23	Résistance à l'arrachement des barres en fibre de verre de type 1	79
5.24	Résistance à l'arrachement des barres #5 non sablées en PRFB de type 2 .	81
5.25	Résistance à l'arrachement des barres #6 non sablées en PRFB de type 2 .	81
5.26	Résistance à l'arrachement des barres #8 non sablées en PRFB de type 2 .	82
5.27	Contraintes minimales de cisaillement interlaminaire (MPa) [84]	82
5.28	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #3 et #4 en PRFB de type 1	84
5.29	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #5 et #6 en PRFB de type 1	84
5.30	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #3 , #4 et #5 en PRFV de type 1	85
5.31	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #6 et #8 en PRFV de type 1	86

5.32	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #5 en PRFB de type 2	87
5.33	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #6 en PRFB de type 2	87
5.34	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #8 en PRFB de type 2	88
5.35	Contraintes minimales de cisaillement transversal (MPa) [84]	88
5.36	Propriétés en cisaillement transversal des barres #3 et #4 en PRFB de type 1	89
5.37	Propriétés en cisaillement transversal des barres #5 et #6 en PRFB de type 1	90
5.38	Propriétés en cisaillement transversal des barres #4 et #5 en PRFV de type 1	91
5.39	Propriétés en cisaillement transversal des barres #6 et #8 en PRFV de type 1	91
5.40	Propriétés en cisaillement transversal des barres #5 en PRFB de type 2	92
5.41	Propriétés en cisaillement transversal des barres #6 en PRFB de type 2	93
5.42	Propriétés en cisaillement transversal des barres #8 en PRFB de type 2	93
5.43	Résistance à la traction des barres #3 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	95
5.44	Résistance à la traction des barres #4 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	96
5.45	Résistance à la traction des barres #5 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	96
5.46	Résistance à la traction des barres #6 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	96
5.47	Rétention de la résistance à la traction des barres en PRFB de type 1	97
5.48	Résistance à la traction des barres #3 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	98
5.49	Résistance à la traction des barres #4 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	99
5.50	Résistance à la traction des barres #5 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	99
5.51	Résistance à la traction des barres #6 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	99
5.52	Résistance à la traction des barres #8 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	100
5.53	Rétention de la résistance à la traction des barres en PRFV de type 1	100
5.54	Résistance à la traction des barres #8 - Lot 1 en PRFB de type 2 (barres conditionnées)	101
5.55	Résistance à la traction des barres #8 - Lot 2 en PRFB de type 2 (barres conditionnées)	101
5.56	Résistance à la traction des barres #8 - Lot 3 en PRFB de type 2 (barres conditionnées)	102
5.57	Rétention de la résistance à la traction des barres #8 en PRFB de type 2	102
5.58	Résistance à la traction des barres #5 - Lot 1 en PRFB de type 2 (avec charge)	104

5.59	Résistance à la traction des barres #5 - Lot 2 en PRFB de type 2 (avec charge)	104
5.60	Résistance à la traction des barres #5 - Lot 3 en PRFB de type 2 (avec charge)	104
5.61	Rétention de la résistance à la traction des barres #5 en PRFB de type 2 .	105
5.62	Résistance à la traction des barres #6 - Lot 1 en PRFB de type 2 (avec charge)	105
5.63	Résistance à la traction des barres #6 - Lot 2 en PRFB de type 2 (avec charge)	105
5.64	Résistance à la traction des barres #6-Lot 3 en PRFB de type 2 (avec charge)	106
5.65	Rétention de la résistance à la traction des barres #6 en PRFB de type 2 .	106
5.66	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #3 et #4 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	107
5.67	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #5 et #6 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	108
5.68	Rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire des barres en PRFB de type 1	108
5.69	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #3 , #4 et #5 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	109
5.70	Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #6 et #8 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	109
5.71	Rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire des barres en PRFV de type 1	110
5.72	Propriétés en cisaillement transversal des barres #3 et #4 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	111
5.73	Propriétés en cisaillement transversal des barres #5 et #6 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)	112
5.74	Rétention de la résistance au cisaillement transversal des barres en PRFB de type 1	112
5.75	Propriétés en cisaillement transversal des barres #4 et #5 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	113
5.76	Propriétés en cisaillement transversal des barres #6 et #8 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)	113
5.77	Rétention de la résistance au cisaillement transversal des barres en PRFV de type 1	114
5.78	Limites des diamètres de barres en PRF pour chaque barre selon la norme ASTM D7957/D7957M-22 (mm ²) [15]	120
5.79	Section effective de barres de fibre de basalte de type 1 (mm ²)	120
5.80	Section effective de barres de fibre de verre de type 1 (mm ²)	121
5.81	Section effective de barres non sablées en fibre de basalte de type 2 (mm ²) .	123
5.82	Taux de fibres de barres de fibre de basalte de type 1 (%)	124
5.83	Taux de fibres de barres de fibre de verre de type 1 (%)	124
5.84	Taux de fibres de barres #5 en fibre de basalte de type 2 (%)	125
5.85	Taux de fibres de barres #6 en fibre de basalte de type 2 (%)	125

5.86	Taux de fibres de barres #8 en fibre de basalte de type 2 (%)	126
5.87	Limites maximales d'absorption (%)	126
5.88	Taux d'absorption d'humidité de la barre #5 de type 2 de trois lots différents après 24 heures et jusqu'à saturation (%)	128
5.89	Taux d'absorption d'humidité de la barre #6 de type 2 de trois lots différents après 24 heures et jusqu'à saturation (%)	129
5.90	Taux d'absorption d'humidité de la barre #8 de type 2 de trois lots différents après 24 heures et jusqu'à saturation (%)	130
5.91	Température de transition vitreuse des barres en fibre de basalte de type 1 (°C)	131
5.92	Température de transition vitreuse des barres en fibre de verre de type 1 (°C)	131
5.93	Température de transition vitreuse des barres #5 de type 2	132
5.94	Température de transition vitreuse des barres #6 de type 2	132
5.95	Température de transition vitreuse des barres #8 de type 2	132
5.96	Taux de cure des barres en fibre de basalte de type 1 (%)	133
5.97	Taux de cure des barres en fibre de verre de type 1 (%)	133
5.98	Taux de cure pour les trois lots de barres (#5 , #6 et #8) de type 2 (%) .	133

LISTE DES ACRONYMES

Acronymes en français :

Acronyme	Définition
COV	Coefficients de Variation
CRSNG	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie
IRTF	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
MCAPC	Matériaux Composites d'Avant-garde pour Ponts et Charpentes
MEB	Microscope Électronique à Balayage
PA	Polyamide
PE	Polyéthylène
PET	Polyéthylène Téréphtalate
PP	Polypropylène
PRF	Polymère Renforcé de Fibres
PRFA	Polymère Renforcé de Fibres d'Aramide
PRFB	Polymère Renforcé de Fibres de Basalte
PRFC	Polymère Renforcé de Fibres de Carbone
PRFV	Polymère Renforcé de Fibres de Verre
RAC	Réaction Alkali-Carbonate
RAA	Réaction Alkali-Agrégat
RAS	Réaction Alkali-Silice
RCE	Réseaux de Centres d'Excellence
SCGC	Société Canadienne de Génie Civil
T_g	Température de transition vitreuse
TDLV	Transducteur de Déplacement Linéaire Variable
UV	Ultraviolet

English acronyms :

Acronym	Definition
AAR	Alkali-Aggregate Reactions
ACI	American Concrete Institute
ACR	Alkali-Carbonate Reactions
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
ASR	Alkali-Silica Reactions
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFRP	Basalt Fiber Reinforced Polymer
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CSA	Canadian Standards Association
CV	Coefficients of Variation
DSC	Differential Scanning Calorimetry
FRP	Fiber Reinforced Polymer
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PA	Polyamide
PE	Polyethylene
PET	Polyethylene Terephthalate
PP	Polypropylene
T_g	Glass transition temperature
UV	Ultraviolet

Unités de mesures :

Unité	Définition	Définition en anglais
cm	Centimètres	Centimeters
g	Gramme	Grams
GPa	Gigapascal	Gigapascal
kg	Kilogramme	Kilograms
kN	Kilonewton	Kilonewton
m	Mètre	Meters
mm	Millimètres	Millimeters
mm ²	Millimètre carré	Square millimeter
MPa	MégaPascal	Megapascal
N	Newton	Newton
Pa	Pascal	Pascal

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte et problématiques

Le béton armé est une technologie qui est née en 1849 et qui a révolutionné le secteur de la construction au cours du 20^{ème} siècle. Cette invention a grandement contribué à faire du béton le matériau le plus utilisé dans les constructions de génie civil dans le monde entier [26]. Progressivement, le béton armé a trouvé sa place dans divers domaines de la construction, allant des ponts aux gratte-ciels, en passant par les barrages, tunnels, routes et autres infrastructures essentielles. Sa robustesse et sa polyvalence ont hissé le béton au rang de matériau de prédilection pour des projets architecturaux de grande ampleur.

Bien que le béton soit intrinsèquement capable de résister efficacement aux charges de compression, sa faible résistance en traction constitue un défi majeur pour de nombreuses applications structurales. Pour remédier cette lacune, des armatures en acier, souvent à base de fer, ont été introduites par les ingénieurs civils. Cette combinaison donne naissance à un matériau qui marie la résilience en compression du béton avec la ténacité en traction de l'acier. Par conséquent, le béton armé affiche une résistance nettement supérieure au béton sans armatures, permettant de concevoir des structures plus robustes et durables, adaptées aux besoins des projets de construction modernes.

Cependant, ce mélange (béton et barre d'acier) souffre de divers problèmes qui ont un impact négatif sur les constructions en béton armé. En effet, plusieurs phénomènes de dégradation, tels que la corrosion induite par les chlorures et la carbonatation, peuvent nuire aux propriétés mécaniques du béton. Les oxydations résultant de la présence d'acier peuvent engendrer des expansions, menant éventuellement à la fissuration et l'éclatement du béton. Outre les implications esthétiques, ces altérations peuvent compromettre la sécurité des structures, un enjeu crucial dans des pays comme le Canada où plus de 40 % des ponts, ayant dépassé 40 ans, montrent des signes de détérioration principalement à cause du vieillissement et de la corrosion des armatures [80]. Ces détériorations sont causées principalement par les écarts de températures et l'utilisation fréquente de sels de déglacage. Par exemple, au Québec, les écarts de températures varient de 60 à 70 °C, descendant jusqu'à environ moins de 30 °C pendant l'hiver et montant jusqu'à environ plus de 30 °C en été [27].

Les coûts associés à la réparation de ces dégradations sont gigantesques. Au Canada, le coût estimé pour la réparation et la restauration des infrastructures en béton armé, comme les stationnements multi-étages, dépasse les 6 milliards de dollars canadiens, tandis qu'aux États-Unis, ce montant oscille entre 50 et 100 milliards de dollars américains annuellement. Des méthodes passives et actives ont été mises en œuvre pour prolonger la durée de vie de l'acier d'armature. Les méthodes passives comprennent le traitement de surface par galvanisation (figure 1.1) ou revêtement époxy (figure 1.2) pour former une barrière entre l'oxydant et l'acier. Néanmoins, la détérioration de l'enveloppe protectrice, l'oxydation est accélérée de manière ponctuelle, jusqu'à sa rupture complète. Les méthodes actives telles que la protection cathodique sont difficilement applicables. Cependant, ces techniques offrent souvent une protection temporaire de l'acier contre la corrosion [80] et [70]. Il est donc essentiel de rechercher des solutions plus durables qui peuvent être appliquées dans la plupart des situations.



FIGURE 1.1 Armature galvanisée



FIGURE 1.2 Armature revêtue d'époxy

1.2 État de la question

La corrosion de l'acier est un enjeu critique en construction civile, principalement à cause des caractéristiques inhérentes de ce matériau. Les solutions actuelles, qu'il s'agisse de méthodes actives ou passives, comportent des conditions non négligeables. Lors des étapes de ferrailage et de stockage, un contrôle rigoureux est essentiel. En effet, des armatures présentant des fissurations, des imperfections ou qui n'auraient pas bénéficié d'une protection intégrale via des procédés tels que la galvanisation de l'acier d'armature ou le revêtement époxy peuvent conduire à des problématiques analogues à celles des armatures en acier non traité. Cependant, de nouvelles alternatives sont en exploration. Parmi celles-ci, nous retrouvons les revêtements obtenus par fusion électrostatique de résine et le béton imprégné de polymère. Ces solutions offrent des atouts considérables par rapport au béton

traditionnel, notamment une meilleure résistance, une perméabilité réduite à l'eau, ainsi qu'une robustesse face aux agents chimiques et aux cycles de gel et de dégel [25].

Néanmoins, l'armature d'acier revêtue d'époxy se révèle être la plus efficace, surtout dans des milieux hautement corrosifs. Mais la découverte de corrosion sur ces armatures, en particulier dans certaines structures de Floride des années 1970, et leur coût élevé [70], ont souligné le besoin pressant d'alternatives plus économiques et durables.

Face à ce défi, les spécialistes du génie civil ont intensifié leurs recherches, investissant dans l'étude et le développement de nouveaux matériaux capables d'allonger la durée de vie des ouvrages d'art. Une avancée notable a été la mise au point des Polymères Renforcés de Fibres (PRF), un composite innovant alliant fibres et résine.

La popularité croissante des PRF s'ancre dans leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques exceptionnelles : une résistance spécifique optimale, une rigidité structurale notable et une excellente résistance à la corrosion qui surpasse largement celle de l'acier conventionnel. Ainsi, les composites en PRF ont apporté une solution tangible aux limites des armatures traditionnelles en acier. Les barres d'armature en PRF sont devenues une alternative de premier plan, éradiquant presque entièrement les préoccupations liées à la corrosion [2], [4], [57], [87] et [99]. Ces avancées ont favorisé leur intégration dans divers projets d'infrastructure, notamment dans les ponts. En outre, leur champ d'application s'étend désormais au renforcement externe de structures en béton armé, d'édifices métalliques et même de charpentes en bois.

Les PRF se distinguent par leur nature anisotrope, ce qui signifie que leurs propriétés varient en fonction de la direction, contrairement à l'acier, dont les propriétés mécaniques sont uniformément réparties dans toutes les directions en raison de son isotropie. L'origine de cette anisotropie des PRF est principalement attribuée à l'orientation spécifique des fibres qui composent le matériau. Ces orientations particulières confèrent au PRF des propriétés mécaniques remarquables, notamment en ce qui concerne la ténacité et le module d'élasticité.

Un autre avantage notoire des PRF réside dans leur rapport résistance/poids. Effectivement, grâce à leur faible densité associée à une résistance mécanique élevée, ce rapport s'avère être supérieur de près de trente fois à celui de l'acier traditionnel [89]. De plus, leur composition chimique spécifique les rend intrinsèquement résistantes à la corrosion, notamment lorsqu'elles sont exposées à des agents corrosifs usuels tels que les sels de déglacage, divers produits chimiques, ou même à un environnement humide. Ainsi, lorsqu'on

intègre des barres de PRF dans des ouvrages en béton armé, il en résulte une augmentation significative de la durabilité de ces structures [81].

Par ailleurs, une avancée technologique majeure concerne l'incorporation de capteurs en fibre optique dans les armatures en PRF. Cette innovation ouvre des perspectives considérables pour la surveillance en temps réel et le contrôle des structures en génie civil, assurant ainsi une maintenance proactive et une garantie de sécurité renforcée. Face à ces avantages manifestes, l'intérêt pour le développement des PRF est grandissant, incitant les chercheurs et les professionnels du génie civil à élaborer de nouveaux codes et manuels de calcul spécifiques à ce matériau.

Les formulations de ces composites sont variées, intégrant différents types de fibres (tels que le carbone, le verre, le basalte, et l'aramide) et de résines (à la fois thermodurcissables et thermoplastiques) pour répondre à des besoins spécifiques et renforcer les structures en béton ou en béton armé. Parmi les variantes de PRF, les polymères renforcés de fibres de verre (PRFV), de fibres de carbone (PRFC), et de fibres d'aramide (PRFA) dominent le marché [1], [47], [75] et [78]. Toutefois, au cours des dernières années, l'attention des fabricants et des chercheurs a été attirée par les caractéristiques prometteuses des polymères renforcés de fibres de basalte (PRFB) en tant que nouveau matériau de renforcement fiable pour les structures en béton [2], [4], [5] et [87]. Comme les autres produits de PRF, les barres de PRFB se caractérisent par leur résistance à la corrosion, leur comportement élastique à la rupture, leur rapport résistance/poids élevé et leur module d'élasticité relativement faible par rapport aux barres d'armature en acier. Également, l'intérêt de l'utilisation des barres de PRFB est que les fibres de basalte proviennent de roches basaltiques par un processus de fusion, qui constitue un avantage significativement supplémentaire, par rapport aux autres fibres, pour la réduction des coûts et surtout la protection de l'environnement.

La question de recherche associée à mon projet est : comment les propriétés mécaniques et physiques des barres d'armature en PRF de basalte et de verre évoluent-elles lors d'une exposition à des conditions environnementales similaires à celles du béton, notamment l'humidité, l'alcalinité et les variations de température ?

1.3 Structure du mémoire

Outre le présent **chapitre**, "introduction générale", dans lequel j'ai défini le contexte et les problèmes rencontrés dans les constructions de génie civil liés à la dégradation des armatures conventionnelles et les solutions proposées pour y remédier, la présente mémoire contient également six autres chapitres.

Le **chapitre 2**, "Objectifs de la recherche", servira à définir clairement le but du projet de recherche, à exposer les questions spécifiques qui seront abordées et à établir les objectifs précis qui guideront toutes les activités de recherche ultérieures.

Le **chapitre 3**, "Revue de littérature", fournira une analyse exhaustive des travaux de recherche antérieurs liés à l'utilisation des barres d'armature en PRF dans le génie civil. Ce chapitre inclut des discussions sur la dégradation et la corrosion des structures en béton armé, une introduction aux composites, leurs fibres de renfort, les résines utilisées et une comparaison entre les barres de PRF et l'acier.

Le **chapitre 4**, "Méthodologie de recherche", expliquera en détail les procédures de test utilisées pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques des barres d'armature en PRF.

Le **chapitre 5**, "Résultats et Analyses", présentera les données recueillies à partir des tests de recherche et fournira une analyse détaillée de ces résultats, permettant une compréhension claire et complète des propriétés des barres d'armature en PRF.

Le **chapitre 6**, "Conclusion générale", synthétisera l'ensemble du travail, récapitulant les principales conclusions tirées de la recherche. Il offrira également des recommandations pour les recherches futures, en suggérant des avenues potentielles pour une exploration plus approfondie.

Enfin, la dernière partie du rapport, "**liste des références**", présentera toutes les sources utilisées lors de la réalisation de cette recherche. Cela permettra aux lecteurs de retracer les informations présentées et de poursuivre leurs propres recherches si nécessaire.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

2.1 Définition du projet de recherche

Le projet de recherche porte le titre suivant : caractérisation des propriétés physiques et mécaniques et étude des effets de l'humidité et de l'alcalinité d'une nouvelle barre d'armature de Polymère Renforcé de Fibres de Basalte (PRFB). Ce projet, mené sous la direction du professeur Brahim Benmokrane, se déroule dans le cadre de la chaire de recherche industrielle CRSNG axée sur les armatures en matériaux composites innovants en PRF pour les infrastructures en béton. Par ailleurs, le professeur Benmokrane détient également la chaire de recherche du Canada dédiée aux matériaux composites pour les structures de génie civil. Ce travail de recherche s'inscrit donc parmi les projets de recherche menés à l'Université de Sherbrooke dans le cadre des activités de la Chaire de recherche du CRSNG.

Le cœur de ce projet repose sur l'analyse des propriétés mécaniques et physiques, ainsi que sur la durabilité, des barres d'armature en polymères renforcées par des fibres de verre (PRFV) et de basalte (PRFB). Pour ce faire, il a été choisi de caractériser cinq diamètres de barres d'armature distincts, à savoir les barres numérotées **#3**, **#4**, **#5**, **#6**, et **#8** ayant pour diamètres respectifs 10 mm, 13 mm, 15 mm, 20 mm et 25 mm. Ces barres, élaborées via un procédé de pultrusion, sont fournies par la société *Pultrall Inc.*, ainsi que par la compagnie *Basanite Industries Inc.*. Selon les indications du fabricant, les sections nominales des barres sont respectivement de 71 mm², 129 mm², 199 mm², 284 mm² et 510 mm² pour les tailles allant de la barre **#3** à la barre **#8**.

Dans le cadre de nos investigations, chaque catégorie d'échantillons est, dans un premier temps, soumise à des tests pour servir de caractérisation de référence. Par la suite, elles sont testées après avoir subi un conditionnement dans une solution alcaline. Ce conditionnement, simulant un vieillissement accéléré, consiste à immerger les échantillons dans une solution alcaline à une température élevée de 60 °C pendant une période de trois mois (soit 90 jours). À l'issue de ce laps de temps, les barres d'armature sont extraites de la solution pour être testées dans des conditions identiques à celles initiales. Ces divers tests ont pour ambition de quantifier la possible dégradation des propriétés mécaniques et physiques des barres d'armature en conditions simulant celles du béton. Tous ces tests sont effectués dans le strict respect des normes *ASTM* et *CSA*. Les résultats obtenus pourront ainsi

valider (ou non) l'hypothèse selon laquelle les structures renforcées par des PRF jouissent d'une durabilité supérieure. De plus, ils permettront d'évaluer si les normes actuelles se montrent trop conservatrices ou, à l'inverse, insuffisantes.

La démarche adoptée dans ce projet est axée sur la caractérisation et l'intégration des barres d'armature de Polymère Renforcé de Fibres de basalte (PRFB) comme solution novatrice pour le renforcement interne des ouvrages en béton. Cette approche trouve sa pertinence au regard des défis que pose la durabilité des infrastructures soumises à des contraintes environnementales accrues. Ainsi, la mise en œuvre de ces barres d'armature se révèle essentielle, particulièrement pour les structures exposées à des milieux hautement corrosifs ou à des variations thermiques importantes. On pense notamment aux structures marines, constamment exposées à l'agression saline, aux stationnements souterrains, où le taux d'humidité est élevé, ou encore aux dalles de pont, fréquemment sujettes aux cycles de gel-dégel.

Aussi, au-delà de la seule fonctionnalité de ces barres, leur intégration pourrait marquer une révolution dans la conception traditionnelle en génie civil, en offrant des alternatives durables et résilientes face aux aléas climatiques et environnementaux. En outre, le choix de se concentrer sur les barres de PRFB n'est pas anodin. Il s'appuie sur des bases scientifiques solides, témoignant de leurs atouts mécaniques et de leur résistance exceptionnelle face aux agents dégradants typiques des environnements constructifs.

2.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer la durabilité des barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) et de basalte (PRFB) face à diverses contraintes environnementales. En effet, dans le monde moderne du génie civil, où la recherche d'alternatives durables et robustes est constamment recherchée, il est impératif d'explorer en profondeur les propriétés et les comportements des matériaux novateurs. Les PRFV et PRFB, en tant que candidats potentiels pour remplacer les matériaux traditionnels, méritent une investigation approfondie pour établir leur efficacité et leur fiabilité.

Dans ce contexte, la présente recherche s'articulera autour d'une comparaison méticuleuse entre les PRFV et PRFB, en termes de changements de leurs propriétés mécaniques et physiques lorsque exposés à des facteurs tels que l'humidité, l'alcalinité et la température. En extrapolant les données de cette étude, il sera alors possible d'établir une corrélation entre les propriétés des barres de PRFV et PRFB, préalablement conditionnées dans une solution alcaline pendant trois mois à 60 °C, par rapport à celles non conditionnées. Cette démarche vise à déduire si les codes et normes civils actuellement en vigueur sont adaptés,

ou si une révision est nécessaire pour mieux refléter les performances de ces matériaux innovants.

Plus spécifiquement, les objectifs détaillés du mémoire sont les suivants :

1. Caractérisation des barres selon leur diamètre conformément aux normes *ASTM* et *CSA* : Cette étape implique la mise en œuvre de tests spécifiques pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques des barres d'armature en fibre de verre (PRFV) et en basalte (PRFB). La première phase critique de cette caractérisation est axée sur l'évaluation des propriétés physiques, comprenant la section effective, le teneur en fibres, le taux d'absorption d'humidité à court et à long terme, la température de transition vitreuse (T_g), le taux de polymérisation, l'infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) et le Microscope Électronique à Balayage (MEB). En complémentarité, une analyse détaillée des propriétés mécaniques est réalisée, mettant en lumière des aspects tels que la résistance à la traction, la résistance à l'arrachement des barres et la résistance au cisaillement interlaminaire et transversale.
2. Évaluation de la durabilité des barres de PRF : Cette étape consiste à immerger les barres dans une solution alcaline pendant 90 jours à 60 °C, simulant un vieillissement accéléré. Suite à cette immersion, les barres sont retirées et testées sous des conditions similaires à celles de référence pour déterminer les éventuelles variations dans leurs propriétés ;
3. Analyse du comportement thermique des barres de PRF : Dans cette section, une investigation approfondie est conduite pour déterminer le comportement des barres de PRF lorsqu'elles sont soumises à des températures élevées, évaluant ainsi leur stabilité thermique et résistance sous de telles contraintes ;
4. Étude de la robustesse des résines vinylesters : Ces résines, largement reconnues pour leur résistance au sein des polymères thermodurcissables, sont mises à l'épreuve. Une série d'échantillons est conditionnée et testée pour identifier toute altération, qu'elle soit mécanique, thermique ou autre, suite au processus de conditionnement.

Pour conclure la présentation des objectifs principaux et secondaires, il est essentiel de souligner que ce mémoire se propose d'offrir une valeur ajoutée notable au domaine du génie civil. Notre démarche tend à révéler les atouts, les opportunités, ainsi que les enjeux associés à l'emploi des barres d'armature en PRFB. Ces dernières se présentent comme des solutions à la fois durables et écologiques dans le secteur de la construction, notamment en comparaison avec d'autres catégories de barres en PRF [79] et [89].

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, le cadre du projet de recherche a été explicitement détaillé, mettant en exergue à la fois les objectifs principaux et secondaires. L'objectif central est d'explorer, de caractériser et d'évaluer les propriétés tant physiques que mécaniques des barres d'armature en polymères renforcés par fibres de verre (PRFV) et de basalte (PRFB). Ces matériaux seront soumis à diverses sollicitations environnementales, en insistant particulièrement sur les effets de l'humidité et de l'alcalinité, le tout en respect des standards *ASTM* et *CSA*.

L'importance de ce travail réside dans son potentiel à influencer les méthodologies courantes en génie civil. Il pourrait introduire des alternatives robustes, capables de résister aux contraintes environnementales. L'accent mis sur la comparaison entre les barres de PRFV et celles de PRFB est essentiel, car il promet de mettre en lumière les éventuels avantages intrinsèques des barres renforcées de fibres de basalte.

Les résultats qui émergeront de cette étude pourraient non seulement révolutionner l'approche traditionnelle en génie civil, mais également offrir des solutions durables face aux défis environnementaux croissants. En fin de compte, cette recherche s'inscrit dans une démarche visant à favoriser l'avancement technologique et la durabilité dans le domaine du génie civil, avec une focalisation particulière sur l'utilisation des barres d'armature PRFB comme alternatives potentiellement supérieures [79].

CHAPITRE 3

ÉTAT DE L'ART

3.1 Introduction

Le domaine du génie civil se caractérise par une approche méthodique et circonspecte à l'égard de l'adoption de nouveaux matériaux. En effet, chaque innovation matérielle est généralement soumise à une évaluation rigoureuse, ponctuée par de multiples essais en laboratoire et sur site, avant d'être pleinement intégrée aux pratiques constructives. Cette prudence s'explique en partie par la nécessité d'assurer la sécurité, la durabilité et la fonctionnalité optimale des ouvrages de génie civil, qu'il s'agisse d'infrastructures routières, de structures portantes ou de systèmes d'assainissement.

Dans le contexte actuel d'évolution technologique rapide, le génie civil se trouve à la croisée des chemins, poussé à innover tout en garantissant la pérennité de ses réalisations. Au cœur de cette révolution se distinguent les composites à base de PRF (Polymères Renforcés de Fibres). Ces composites, dotés de propriétés mécaniques et physiques avancées, ont suscité l'intérêt des chercheurs, ingénieurs et les professionnelles de génie civil. Leur potentiel d'application est vaste, englobant aussi bien la réhabilitation des ouvrages existants que la conception de nouvelles infrastructures, telles que les ponts, viaducs ou tunnels.

Néanmoins, malgré leur potentiel indéniable, l'adoption généralisée des composites de PRF demeure sujette à débat. La principale interrogation porte sur la durabilité de ces matériaux dans des conditions d'exploitation variées et parfois extrêmes. En génie civil, chaque composant doit non seulement supporter les sollicitations mécaniques répétitives, mais aussi résister aux agressions environnementales, telles que les cycles de gel-dégel, les expositions prolongées à des UV intenses ou les variations thermiques. Dans ce cadre, les composites de PRF sont confrontés à l'exigence de démontrer leur aptitude à maintenir leurs performances sur le long terme, en dépit des défis environnementaux.

En conclusion, si les composites de PRF incarnent incontestablement une avancée majeure pour le génie civil, la quête de leur validation reste une préoccupation centrale. Leur résilience face aux défis imposés par les conditions réelles d'utilisation déterminera leur place au sein des solutions constructives de demain.

3.2 Dégénéralations des constructions en béton armé

Les processus de dégradation affectant les constructions en béton armé représentent des défis complexes et multifactoriels dans le domaine de l'ingénierie civile. Ces phénomènes, influençant considérablement la longévité et la sécurité des structures, sont le résultat d'une combinaison de facteurs physiques, chimiques, et environnementaux. Cette section vise à explorer en détail les principales causes et les mécanismes sous-jacents de ces détériorations. En se concentrant sur des aspects tels que la corrosion des armatures en acier, les réactions chimiques nuisibles, et les influences environnementales.

3.2.1 Définition et caractéristiques du béton armé

Le béton armé, un matériau composite essentiel dans le domaine du génie civil, est constitué de deux composants principaux : le béton et les armatures en acier. Le béton, caractérisé par une excellente résistance à la compression, présente toutefois un comportement quasi fragile et une faible résistance à la traction [34] et [53]. Sa résistance à la compression est environ dix fois supérieure à sa résistance à la traction [64], une disproportion qui justifie l'intégration de l'acier. Les armatures en acier, quant à elles, compensent cette limitation en fournissant la capacité nécessaire pour supporter les forces de traction [34], [53] et [64]. Bien que l'acier améliore considérablement la résistance mécanique globale du béton armé, il ne peut pas entièrement prévenir l'apparition de fissures dans le béton sous des charges élevées ou en raison de contraintes thermiques [35] et [36]. Néanmoins, cette combinaison de béton et d'acier crée une synergie qui confère au béton armé une grande polyvalence et une adaptabilité remarquable pour une multitude d'applications infrastructurelles. Cette complémentarité des propriétés du béton et de l'acier fait du béton armé un choix privilégié pour la construction d'édifices, de ponts, de tunnels, et d'autres structures importantes en génie civil [5], [23], [26], [29] et [88].

3.2.2 Facteurs de dégradation du béton armé

Bien que le béton armé offre de nombreux avantages, il reste susceptible à diverses formes de dégradation qui peuvent compromettre sa stabilité structurelle et la sécurité des ouvrages. Ces dégradations résultent principalement de facteurs environnementaux et de contraintes mécaniques. Parmi les facteurs environnementaux, on compte la présence de chlorures (provenant de l'exposition au sel marin ou des sels de déneigement), le dioxyde de carbone (conduisant à la carbonatation du béton), et les sulfates (trouvés dans certains sols ou eaux souterraines). Les contraintes mécaniques, telles que les charges lourdes et les sollicitations répétées, peuvent également jouer un rôle significatif. Ces facteurs sont susceptibles d'engendrer des réactions chimiques et physiques néfastes, telles que la fis-

suration, l'affaiblissement de la structure, et, dans les cas les plus sévères, la défaillance structurelle [8], [26], [42], [49], [70], [80] et [95].

Réaction Alkali-Agrégat (RAA)

La réaction alcali-agrégat est une réaction chimique entre les alcalis du béton (souvent provenant du ciment) et certains agrégats réactifs. Cette réaction forme un gel qui peut absorber l'eau et se dilater, entraînant des fissures et des dommages structuraux dans le béton, comme présenté dans la figure 3.1 [8] et [42]. On distingue principalement deux types de RAA : la réaction alcali-carbonate (RAC) et la réaction alcali-silice (RAS), chacune avec ses propres mécanismes et impacts sur les structures en béton [44] et [86].



FIGURE 3.1 Fissuration du béton à la suite de la réaction Alkali-Agrégat (RAA)

Attaques Chimiques

Les attaques chimiques, telles que la sulfatation (réaction avec les sulfates) ou l'attaque acide, peuvent également détériorer le béton armé (figure 3.2). Ces réactions chimiques décomposent la matrice de ciment et peuvent entraîner la perte de masse et la réduction de la résistance mécanique du béton [8].



FIGURE 3.2 Les effets de l'attaque des chlorures, présents dans les sels de déneigement et dans l'eau de mer, sur le béton [51]

Gel-Dégel et Autres Facteurs Environnementaux

Les cycles de gel-dégel dans les climats froids peuvent causer des dommages importants aux structures en béton armé. L'eau qui pénètre dans les fissures du béton peut geler, son expansion causant des fissurations supplémentaires et la détérioration progressive de la structure (figure 3.3). D'autres facteurs environnementaux tels que l'exposition aux UV, la température et l'humidité jouent également un rôle dans la dégradation du béton [8], [49], [63] et [95].



FIGURE 3.3 Fissuration de la chaussée due aux effets du gel et du dégel

Fatigue et Surcharge

Les structures en béton armé peuvent également subir une dégradation due à la fatigue, en particulier dans les zones soumises à des charges répétées ou vibratoires. De même, les surcharges, dépassant les limites de conception initiale, peuvent provoquer des fissurations et des défaillances structurelles [49] et [95]. La compréhension de ces mécanismes de dégradation est cruciale pour la conception de structures en béton armé plus durables et pour le développement de méthodes de réparation et de renforcement efficaces.

3.2.3 Conséquences de la corrosion sur les ouvrages en béton armé

Les premiers signes visibles de cette corrosion se manifestent généralement sous forme de tâches de rouille à la surface du béton, suivies de l'apparition de fissures dues à l'expansion volumétrique de l'acier corrodé. Cette expansion exerce une pression interne, provoquant la fissuration et l'éclatement du béton environnant, ce qui entraîne une diminution de la section effective des armatures et une réduction conséquente de la capacité portante de l'élément structurel. Par ailleurs, la corrosion affecte la liaison acier-béton, essentielle pour le transfert des efforts de traction dans les zones sollicitées. L'altération de cette adhérence compromet la distribution uniforme des charges et peut conduire à une performance structurale déficiente. Ainsi, la surveillance régulière et l'évaluation précise de

l'état de corrosion sont indispensables pour maintenir la sécurité et prolonger la durée de vie des structures en béton armé [5], [23], [26], [29], [34], [35], [36], [53], [64] et [88].

3.2.4 Corrosion de l'armature d'acier

La corrosion des armatures en acier est l'une des causes principales de la dégradation du béton armé. Ce processus de détérioration est souvent initié par la pénétration de chlorures, comme ceux provenant de sels de déneigement ou de l'eau de mer, ou par la carbonatation du béton, qui réduit son alcalinité [66], [70], [77], [80] et [105]. L'oxydation de l'acier dans ces conditions peut causer une expansion qui fissure le béton environnant, affaiblissant ainsi sa résistance et sa durabilité (figure 3.5).

Cette problématique est particulièrement aiguë dans des régions comme le Québec, où les conditions climatiques rigoureuses et l'utilisation fréquente de sels de déneigement (déglacage) accentuent les risques de corrosion. La corrosion des armatures en acier y est devenue une préoccupation majeure pour la sécurité publique et la durabilité des infrastructures. La figure 3.4 illustrent quelques exemples parmi des millions d'autres des effets de la corrosion sur les structures en béton armé.



FIGURE 3.4 Éclatement du béton environnant dû à la corrosion des armatures en acier

Corrosion passive

La corrosion passive de l'armature d'acier se produit dans un environnement alcalin, typique du béton frais. Dans cet état, une couche passive se forme sur la surface de l'acier, protégeant efficacement l'armature contre la corrosion. Cette couche passive est généralement stable et protectrice tant que l'alcalinité du béton est maintenue. Cependant, des facteurs tels que la carbonatation (réduction de l'alcalinité due à la réaction avec le dioxyde de carbone atmosphérique) ou la présence de chlorures peuvent compromettre l'intégrité de cette couche passive, menant potentiellement à une corrosion active.

Corrosion active

La corrosion active de l'armature d'acier se produit lorsque la couche passive est rompue, exposant l'acier à un environnement plus corrosif. Cette forme de corrosion est souvent accélérée par la présence de chlorures, qui peuvent pénétrer le béton et atteindre l'armature. Les ions chlorure déstabilisent la couche passive, permettant ainsi à l'oxygène et à l'humidité de réagir avec le fer de l'armature pour former de l'oxyde de fer (rouille). La corrosion active se manifeste par une expansion de l'armature due à la formation de rouille, ce qui peut entraîner la fissuration et l'écaillage du béton environnant, compromettant ainsi la résistance mécanique et la durabilité de la structure.

Réaction anodique

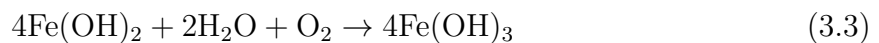
La réaction anodique, indiquée dans équation 3.1, dans le processus de corrosion de l'acier dans le béton armé, est une réaction d'oxydation. Au cours de cette réaction, l'acier perd des électrons et forme des ions ferreux (Fe^{2+}). Cette étape est essentielle dans le processus de corrosion, car elle marque le début de la transformation de l'acier solide en une forme dissoute, ce qui est une condition préalable à la formation ultérieure de produits de corrosion [70], [72], [80], [94] et [97].



Une fois formés, les ions ferreux Fe^{2+} réagissent avec les ions hydroxyle (OH^{-}) présents dans l'environnement alcalin du béton pour former de l'hydroxyde ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$). Cette réaction est représentée par l'équation suivante (3.2) :

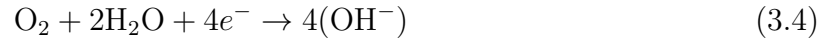


L'hydroxyde ferreux formé est ensuite oxydé en présence d'oxygène et d'eau pour former de l'hydroxyde ferrique ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), communément appelé rouille. Cette transformation est cruciale, car la rouille a un volume beaucoup plus grand que l'acier initial, ce qui entraîne des contraintes internes et des fissures dans le béton environnant. Cette réaction est représentée dans l'équation 3.3.

**Réaction cathodique**

La réaction cathodique dans la corrosion de l'acier dans le béton armé est un processus de réduction impliquant l'oxygène dissous et l'eau présents dans la solution électrolytique [70], [72], [80], [94] et [97]. Cette réaction est cruciale dans la formation de la pile

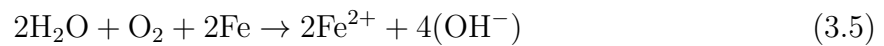
électrochimique qui conduit à la corrosion (équation 3.4).



La réaction cathodique produit des ions hydroxyle (OH^-), qui jouent un rôle essentiel dans le processus de corrosion en migrant vers les zones anodiques et en réagissant avec les ions ferreux pour former de l'hydroxyde ferrique, le précurseur de la rouille.

Équation-bilan de la corrosion

En équilibrant les réactions anodiques et cathodiques, on obtient l'équation-bilan de la corrosion de l'acier dans le béton (équation 3.5) :



Cette équation illustre l'interaction entre les processus anodiques et cathodiques, conduisant à la formation de rouille et à la dégradation de l'acier [80] et [70].

Facteurs influençant la corrosion

En conditions normales, l'armature d'acier dans le béton armé est protégée par un film d'oxyde de fer, formé dans un milieu alcalin (pH supérieur à 11,5). Ce film imperméable et adhérent à la surface de l'acier prévient efficacement la corrosion tant qu'il reste intact [70] et [80]. Cependant, lorsque le pH autour de l'armature baisse, cette couche protectrice peut se détériorer, laissant l'acier vulnérable à la corrosion, en particulier si l'oxygène et l'humidité nécessaires sont présents. Le mécanisme de corrosion peut être associé à deux principaux phénomènes : la carbonatation et la diffusion d'ions chlorure, comme illustré dans la figure ci-dessous (figure 3.5).

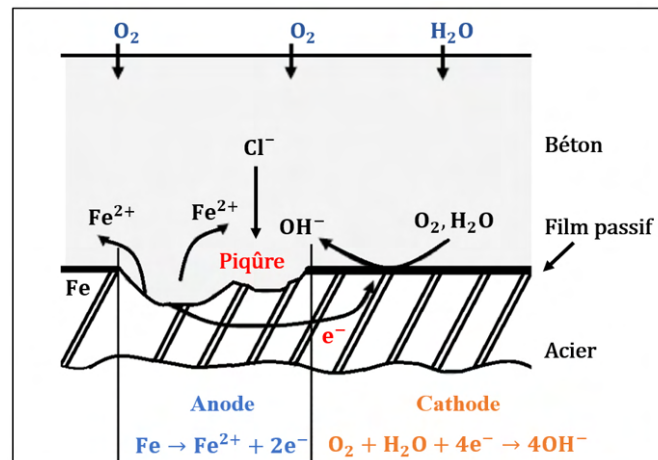
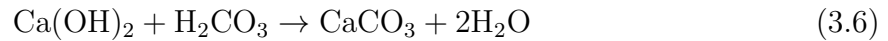


FIGURE 3.5 Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton

La carbonatation est un processus chimique dans lequel la chaux présente dans le béton ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) réagit avec l'acide carbonique (H_2CO_3), un produit de la dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau (équation 3.6). Cette réaction diminue le pH de la solution interstitielle dans la pâte durcie de ciment Portland, passant d'une valeur initiale d'environ 12,6 à 13,5 à environ 9. Ce changement de pH affecte la stabilité de la couche d'oxyde protectrice et rend l'acier susceptible à la corrosion. Le taux de carbonatation dépend de plusieurs facteurs, dont la perméabilité du béton et son taux d'humidité [72], [97], et [94].



La gestion de la corrosion, qu'elle soit passive ou active, est essentielle pour prolonger la durée de vie des structures en béton armé. Cela implique des stratégies de conception et de construction appropriées, telles que l'utilisation de béton de haute qualité, l'application de revêtements protecteurs sur l'armature, l'utilisation d'armatures en matériaux résistants à la corrosion (comme les composites PRF), et la mise en œuvre de techniques de maintenance et de réparation efficaces.

3.2.5 Solutions pour éviter la corrosion de l'armature d'acier

Pour améliorer la durabilité des infrastructures, des méthodes alternatives de réfection et de construction sont nécessaires. Ces méthodes doivent cibler la sécurité et la viabilité économique des structures tout au long de leur cycle de vie. Parmi les solutions envisagées pour protéger l'armature d'acier de la corrosion est la galvanisation (figure 3.6). Il s'agit de recouvrir l'acier d'une couche de zinc, formant un film protecteur avec l'hydroxyde de calcium du béton. Toutefois, cette méthode peut entraîner des réactions secondaires indésirables, telles que l'électrolyse entre l'acier et le zinc [70] et [80].



FIGURE 3.6 Utilisation d'armatures galvanisées dans les constructions en béton armé

Une autre méthode présentée dans la figure 3.7 consiste à appliquer un revêtement d'époxy sur les barres d'acier, une technique qui a connu un certain succès dans les années auparavant. L'utilisation de barres revêtues nécessite cependant une manipulation et un entreposage soigneux pour éviter d'endommager le revêtement, ce qui pourrait engendrer des zones propices à la corrosion. Par ailleurs, le coût de ces barres est presque deux fois plus élevé que celui des barres d'acier standard. Bien que l'usage de ces barres nécessite une attention particulière, cela ne garantit pas l'élimination totale de la corrosion. En effet, des cas de corrosion ont été signalés sur des ponts utilisant de l'acier revêtu d'époxy, ce qui a incité les chercheurs à explorer de nouvelles techniques de renforcement afin de lutter plus efficacement contre la corrosion de l'acier dans le béton [70] et [80].



FIGURE 3.7 Utilisation d'armatures revêtues d'époxy dans les constructions en béton armé

Une alternative prometteuse est l'utilisation de barres d'armature en matériaux composites, tels que les Polymères Renforcés de Fibres (PRF). Un exemple de barres en fibre de verre est illustré dans la figure 3.8.

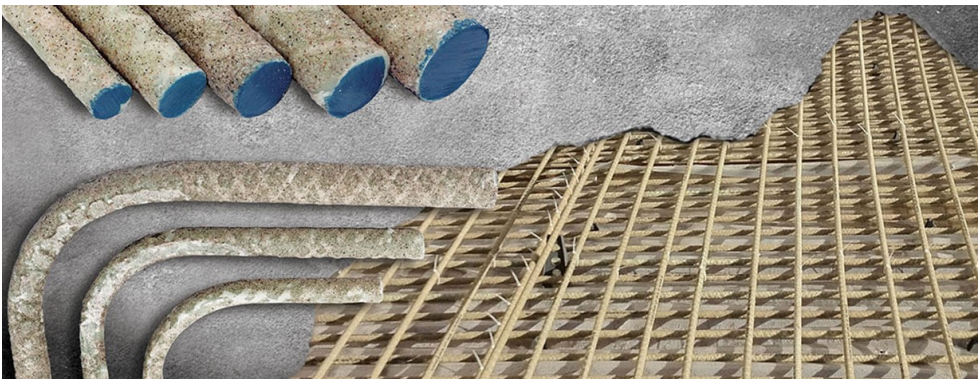


FIGURE 3.8 Barres en Polymères Renforcés de Fibres (PRF)

Ces composites offrent une excellente résistance à la corrosion, une légèreté et une résistance mécanique élevée. Leur intégration dans le béton armé représente une solution efficace et économiquement viable, permettant de prolonger la durée de vie des structures tout en réduisant les coûts de maintenance et en améliorant la sécurité globale. Cette méthode, en comparaison avec les autres solutions, se révèle être la plus fiable et répond aux besoins actuels en matière de durabilité et de sécurité des infrastructures [5], [23], [26], [29] et [88]. L'adoption de ces nouvelles technologies et matériaux représente une avancée majeure dans la conception et la maintenance des infrastructures en béton armé, répondant ainsi aux défis croissants de durabilité et de sécurité dans le domaine du génie civil.

3.3 Développement des PRF en génie civil

3.3.1 Historique

Le développement des matériaux de Polymères Renforcés de Fibres (PRF) remonte aux années quarante avec la fin de la deuxième guerre mondiale. Pendant cette période, une pénurie de matériaux conventionnels, dont l'acier, a poussé vers l'utilisation des PRF, particulièrement dans les domaines militaire et aérospatial. L'aérospatiale, l'automobile et le secteur maritime, attirées par la combinaison de haute résistance et de légèreté de ces matériaux composites, ont rapidement adopté les PRF. Les avancées technologiques de la Guerre Froide, particulièrement dans le secteur aérospatial et de la défense, ont propulsé l'utilisation des composites à un niveau sans précédent [70] et [80].

Au cours des années 1950, face à la croissance rapide des infrastructures routières dans les pays industrialisés et les défis posés par les conditions climatiques rigoureuses, la maintenance des routes toute l'année est devenue cruciale. L'application de sels de déglacage sur les ponts pour combattre le gel et la neige est devenue une pratique courante. Toutefois, cette solution a conduit à des problèmes de corrosion pour les renforcements en acier des structures, particulièrement celles exposées à l'environnement marin salin. Plusieurs alternatives ont été explorées, allant de la galvanisation à divers types de revêtements protecteurs. Parmi celles-ci, l'acier revêtu d'époxy a gagné en popularité comme solution à la corrosion. Néanmoins, la découverte de corrosion sur des barres d'acier revêtues d'époxy dans les années 70 en Floride a conduit à une remise en question de cette approche et à une recherche pour des alternatives non corrosives [70] et [80].

Dans les années 1980, le secteur du génie civil a été confronté à des défis croissants en matière de durabilité des infrastructures. Dans ce contexte, l'adoption des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) a marqué un tournant significatif. Les PRF ont été de plus en plus utilisés pour la réhabilitation et le renforcement de structures existantes, telles que

les ponts et les bâtiments, en particulier ceux approchant ou ayant dépassé leur durée de vie utile initialement prévue. Cette période a été caractérisée par un intérêt accru pour la prolongation de la durée de vie des infrastructures et la réduction des coûts de maintenance [89].

Les années 1990 ont constitué un siècle de consolidation et de normalisation pour les PRF dans le domaine du génie civil. Cette décennie a vu l'établissement de normes et de directives détaillées pour la conception et l'utilisation des PRF, signe d'une reconnaissance et d'une compréhension désenveloppées de leur potentiel et de leurs applications. Ces normes ont joué un rôle crucial dans la normalisation des pratiques de construction et ont favorisé une adoption plus large de cette technologie innovante [70], [76] et [80]

Les PRF ont été développés sous différentes formes adaptées à diverses applications en génie civil, notamment sous forme de barres, de feuilles, de treillis bidimensionnels et tridimensionnels, ainsi que dans des formes structurales standardisées. Cette variété de formes, illustrée à la figure 3.9 [69], témoigne de la polyvalence et de l'adaptabilité des PRF pour répondre aux exigences spécifiques des projets d'ingénierie, allant de la rénovation de structures anciennes à la construction de nouveaux édifices.

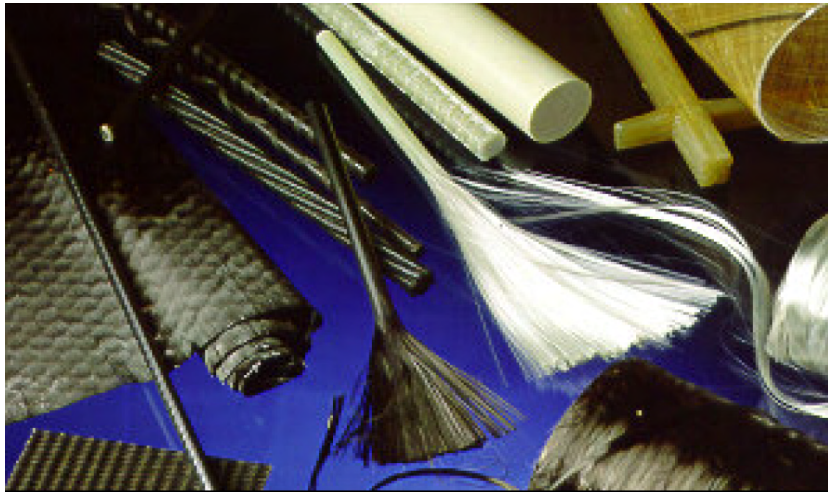


FIGURE 3.9 Produits en PRF

Au tournant du siècle, avec l'avènement des années 2000, l'accent a été mis sur l'innovation et la recherche. Les PRF ont commencé à être intégrés dans la conception initiale des structures, plutôt que simplement utilisés pour la réhabilitation. Les composites hybrides, combinant différents types de fibres tels que le carbone, le verre et le basalte, ont gagné en popularité, offrant une gamme élargie de propriétés mécaniques et fonctionnelles [88].

La dernière décennie, des années 2010 à aujourd'hui, a été marquée par une adoption mondiale massive des PRF dans presque tous les aspects du génie civil. Des projets d'infrastructure emblématiques ont été réalisés en utilisant principalement ou entièrement des PRF, montrant au monde leur potentiel et leur viabilité. En outre, l'accent sur la construction durable et écoresponsable a renforcé l'importance des PRF comme solution de choix pour de nombreux défis d'ingénierie. Aujourd'hui, leur utilisation est bien établie, et ils continuent de façonner l'avenir du génie civil à travers le monde.

3.3.2 Développement d'un réseau de recherche sur les PRF au Canada

Face aux développements rapides des Polymères Renforcés de Fibres (PRF), la Société Canadienne de Génie Civil (SCGC) a initié en 1989 un effort concerté pour évaluer et intégrer ces technologies innovantes. Un comité technique a été formé pour étudier les avantages des PRF et explorer leur potentiel d'application au Canada. Des missions techniques ont été organisées en Europe et au Japon pour acquérir une expertise globale [70].

En 1992, la première Conférence internationale sur les Matériaux Composites d'Avant-garde pour Ponts et Charpentes (MCAPC) s'est tenue à Sherbrooke, marquant un tournant dans la reconnaissance de cette technologie. L'année suivante (1993), le Réseau MCAPC du Canada a été créé avec le soutien financier du gouvernement fédéral. Ce réseau avait pour objectif principal de diffuser les connaissances sur l'utilisation des matériaux composites dans des applications spécifiques du génie civil. Parmi les initiatives soutenues par le Réseau figuraient un colloque Canada-Japon, la publication de bulletins techniques et la formation d'alliances stratégiques entre les membres corporatifs du Réseau, les gouvernements et les universités [70].

Le réseau ISIS Canada, créé en 1995 dans le cadre du programme des Réseaux de Centres d'Excellence (RCE) du gouvernement canadien, a renforcé cette dynamique. Avec la mission de positionner le Canada comme le responsable international dans le domaine du génie civil grâce à l'utilisation de PRF et de systèmes de détection par fibres optiques intégrés aux structures, ISIS Canada a œuvré pour une infrastructure novatrice et intelligente. Ce réseau a publié de nombreux manuels, dont un guide sur le calcul des structures en béton armé, de barres en PRF et un manuel sur le renforcement externe des structures en béton à l'aide de PRF [70].

En 2000, une avancée importante a été réalisée dans la réglementation des matériaux de construction au Canada, marquée par l'intégration d'un chapitre dédié aux armatures en PRF dans le code canadien sur le calcul des ponts routiers, CSA S6-19 [82]. Cette inclusion,

la première à l'échelle mondiale, a représenté un tournant décisif dans la reconnaissance et l'adoption des PRF dans les infrastructures de génie civil, notamment pour les tabliers de ponts en béton (Section 16) [70].

Parallèlement, la norme CSA S806-12 [83], élaborée en collaboration avec l'association canadienne de normalisation et le Ministère des travaux publics et des services gouvernementaux, a offert un cadre détaillé pour la conception de structures avec des composantes en PRF. Cette norme aborde de manière exhaustive les aspects de calcul, les méthodes d'essai et les spécifications techniques des armatures en PRF, établissant ainsi une base solide pour leur intégration dans divers projets de construction [70].

Le développement de ces normes a été suivi par l'élaboration de plusieurs autres réglementations, affinant et étendant les applications des PRF dans le domaine du génie civil. Par exemple, la norme CSA S807-19 [84] couvre spécifiquement les propriétés des matériaux et les exigences de fabrication des barres en polymère renforcé de fibres (PRF) ou des barres constituant un treillis pour le renforcement interne des éléments en béton non précontraint de structures variées, telles que les ponts, les bâtiments et les structures marines.

Ces avancées réglementaires reflètent l'évolution rapide des technologies de construction et l'adoption croissante de solutions innovantes comme les PRF dans les infrastructures canadiennes. Elles témoignent également de l'engagement du Canada envers la recherche et l'innovation dans le domaine du génie civil, visant à améliorer la durabilité, la sécurité et la performance des structures de construction à travers le pays.

3.3.3 Développement de la recherche sur la durabilité des PRF

Un des défis majeurs dans l'application des PRF dans le génie civil est leur durabilité, c'est-à-dire leur capacité à maintenir une performance optimale malgré l'exposition à des conditions environnementales sévères. Le manque de données fiables et de résultats concluants concernant la durabilité à long terme des composites de PRF a été un facteur clé motivant la communauté de recherche à intensifier les travaux dans ce domaine critique. Cette lacune représente un obstacle majeur à l'acceptation généralisée des PRF dans l'industrie de la construction [80].

Les efforts de recherche déployés ont permis le développement de divers matériaux en PRF, en utilisant différents types de fibres et de résines polymères. Ces produits sont désormais commercialisés et disponibles pour diverses applications. Cependant, il existe toujours une grande variabilité dans les résultats expérimentaux relatifs à la durabilité des composites de PRF. Cette incertitude quant à la performance à long terme des PRF limite leur adoption à grande échelle et freine l'enthousiasme initial pour ces matériaux [70].

Cette situation a mis en évidence la nécessité d'une collaboration accrue entre chercheurs, fabricants et praticiens du génie civil pour standardiser les méthodes d'essai, partager les résultats de recherche, et développer des lignes directrices claires pour l'utilisation des PRF. De telles initiatives sont cruciales pour surmonter les défis de durabilité et pour établir les PRF comme une solution fiable et durable dans le domaine de la construction [38] et [67].

L'accent mis sur la durabilité des PRF est donc un enjeu central pour l'avenir de ces matériaux dans le génie civil. La poursuite des recherches, l'amélioration des techniques de fabrication et l'élaboration de normes rigoureuses sont des étapes essentielles pour réaliser le plein potentiel des PRF et pour assurer leur intégration réussie dans les infrastructures modernes [52] et [73].

Facteurs environnementaux

Les PRF, bien que résistants à la corrosion, sont susceptibles d'être affectés par d'autres facteurs environnementaux tels que les UV, les variations de température, l'humidité et les agents chimiques. La recherche s'oriente vers la compréhension de l'impact de ces facteurs sur la dégradation des PRF, notamment en termes d'altération de leurs propriétés mécaniques et chimiques [52], [67], [70] et [80].

Comportement sous charge

Un autre aspect important de la recherche est l'étude du comportement des PRF sous différentes formes de charges mécaniques. Cela inclut l'analyse de la fatigue sous des charges cycliques, la résistance à la traction et à la compression, et le comportement en flexion. Comprendre comment ces matériaux réagissent sous des contraintes continues ou intermittentes est essentiel pour évaluer leur durabilité dans des structures telles que les ponts, les bâtiments et les structures marines [103].

Innovations en matière de formulation et de traitement

La recherche vise également à améliorer la durabilité des PRF par l'innovation dans leur formulation et leur traitement. Cela inclut le développement de nouvelles résines, l'amélioration des techniques de renforcement des fibres, et l'intégration de nanomatériaux pour augmenter la résistance et la durabilité des composites [54] et [80].

Études de cas et essais sur le terrain

Des études de cas et des essais sur le terrain sont menés pour évaluer la performance des PRF dans des conditions réelles. Ces études fournissent des données précieuses sur la durée de vie réelle des PRF et aident à identifier les domaines nécessitant des améliorations [38].

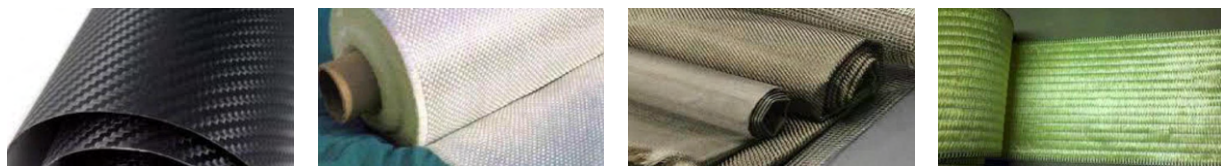
Collaborations interdisciplinaires

La recherche sur la durabilité des PRF bénéficie grandement de collaborations interdisciplinaires, rassemblant des experts en matériaux, génie civil, chimie et sciences environnementales. Ces échanges multidisciplinaires permettent d'aborder de manière globale les enjeux liés à la durabilité des PRF, en développant des solutions innovantes et adaptées aux défis spécifiques de leur utilisation dans les infrastructures. L'implication conjointe de ces différents domaines d'expertise est cruciale pour avancer dans la recherche sur les PRF et pour établir des standards de durabilité renforcés, assurant ainsi l'avenir de ces matériaux dans le secteur de la construction et leur contribution à des infrastructures plus résilientes et durables [103].

3.3.4 Applications des PRF dans le Génie Civil

Les matériaux composites en PRF ont commencé à révolutionner le domaine du génie civil, en trouvant des applications variées et innovantes. Pour le renforcement des structures existantes, les lamelles ou feuilles, treillis et tissus en PRF se révèlent être des renforts efficaces. Ces matériaux peuvent être appliqués sur la surface de structures en béton, augmentant ainsi leur capacité portante et leur résistance aux contraintes environnementales. Cette technique, connue sous le nom de renforcement externe, a prouvé son efficacité dans l'amélioration de la durabilité des structures en béton [7], [9], [48], [91] et [92].

Les tissus utilisés pour les renforcements se classent principalement en quatre catégories, comme indiqué dans la figure 3.10 [92] : le polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) (figure 3.10a) [91], de verre (PRFV) (figure 3.10b) [7], de basalte (PRFB) (figure 3.10c) [48], et, moins couramment, le polymère renforcé de fibres d'aramide (PRFA) (figure 3.10d) [9]. Chacun de ces matériaux présente des caractéristiques spécifiques qui influencent leur sélection en fonction des exigences structurelles et environnementales des projets [92] et [9]. Le PRFC, par exemple, est reconnu pour sa haute résistance et sa légèreté, tandis que le PRFV offre une excellente résistance à la corrosion. Le PRFB, quant à lui, se distingue par sa résilience thermique, et le PRFA est bien connu pour sa résistance aux chocs et à la fatigue.



(a) Tissu en PRFC

(b) Tissu en PRFV

(c) Tissu en PRFB

(d) Tissu en PRFA

FIGURE 3.10 Les différents Tissus utilisés pour le renforcement externe du béton

D'autre part, dans la construction de ponts, l'utilisation de poutres et de dalles en PRF se distingue par leur légèreté et leur résistance exceptionnelle à la corrosion. Ces caractéristiques confèrent aux ponts une longévité accrue et une maintenance réduite, des atouts majeurs dans les projets d'infrastructures. De plus, les tubes en PRF s'avèrent être une solution optimale pour les applications nécessitant des éléments verticaux tels que les poteaux d'éclairage et les mâts de signalisation. Leur résistance à la corrosion, leur légèreté et leur facilité d'installation en font un choix privilégié pour ces applications.

Ces innovations en matière de composites PRF s'inscrivent dans une démarche de développement durable, répondant aux enjeux actuels de réduction de l'empreinte carbone et de durabilité dans le génie civil. Pour une compréhension approfondie de ces applications.

En intégrant ces nouvelles technologies, les ingénieurs civils peuvent désormais concevoir des structures plus résilientes, économiques et écologiques, répondant ainsi aux défis du 21^{ème} siècle. L'adoption de ces matériaux composites marque une évolution significative dans les pratiques de construction et de rénovation, soulignant l'importance de l'innovation dans le domaine du génie civil.

3.3.5 Description des composites

Les composites en Polymères Renforcés de Fibres (PRF) sont constitués d'une matrice polymère, généralement des résines thermodurcissables telles que l'époxy, le polyester ou le vinyle-ester. Cette matrice est renforcée par des fibres (figure 3.11) de haute performance comme le carbone (figure 3.11a), le verre (figure 3.11b), le basalte (figure 3.11c) [93] ou l'aramide (figure 3.11d), conférant au matériau une résistance mécanique supérieure. La matrice polymère a pour fonction de protéger les fibres et la répartition homogène des charges mécaniques, garantissant ainsi la stabilité et l'intégrité structurelle du composite [3], [25] et [27].



(a) Fibre de carbone

(b) Fibre de verre

(c) Fibre de basalte

(d) Fibre d'aramide

FIGURE 3.11 Les différents types de fibres utilisés pour la fabrication de composants en matériaux composites (PRF) [68]

Pour améliorer encore leurs propriétés, des additifs spécifiques peuvent être incorporés dans les composites PRF. Ces additifs, tels que des agents d'UV, des retardateurs d'incendie, agents de durcissement, agents mouillants, et des colorants, sont choisis pour augmenter la résistance aux agressions environnementales, améliorer les propriétés ignifuges ou même pour des raisons esthétiques. Ces additifs sont utilisés de façon complémentaire à la matrice dans un volume de 20 à 30 % [84].

Les produits en PRF sont constitués de deux éléments clés : la matrice polymère et les fibres de renforcement, comme illustré dans figure 3.12. Ces composants présentent des propriétés mécaniques distinctes et complémentaires, essentielles à la performance globale du matériau. La matrice polymère, bien que moins résistante mécaniquement que les fibres, joue un rôle crucial dans le maintien de l'intégrité structurelle du composite.

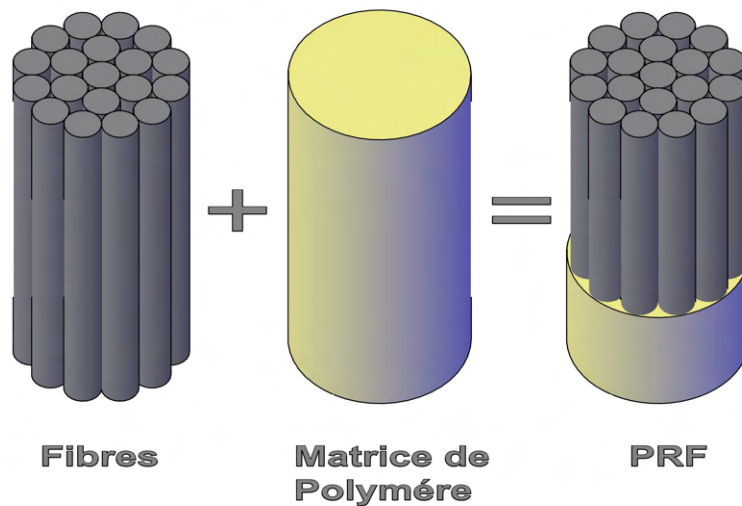


FIGURE 3.12 Composants de base des matériaux composites PRF

L'association synergique des fibres et de la matrice polymère aboutit à un matériau composite dont les performances surpassent celles de chaque constituant pris séparément. La résistance et l'efficacité globale du composite sont influencées par plusieurs paramètres tels que le type, l'orientation, la forme et le volume des fibres, leur adhésion à la résine, ainsi que par le processus de fabrication. Ce dernier aspect est particulièrement significatif. En effet, une simple combinaison de fibres de haute qualité avec une matrice n'est pas une garantie de la qualité supérieure du produit final. Ainsi, des composites PRF élaborés à partir des mêmes types de fibres et de résines, et avec des proportions volumiques équivalentes, peuvent présenter des propriétés mécaniques considérablement différentes, comme le démontre la figure 3.13.

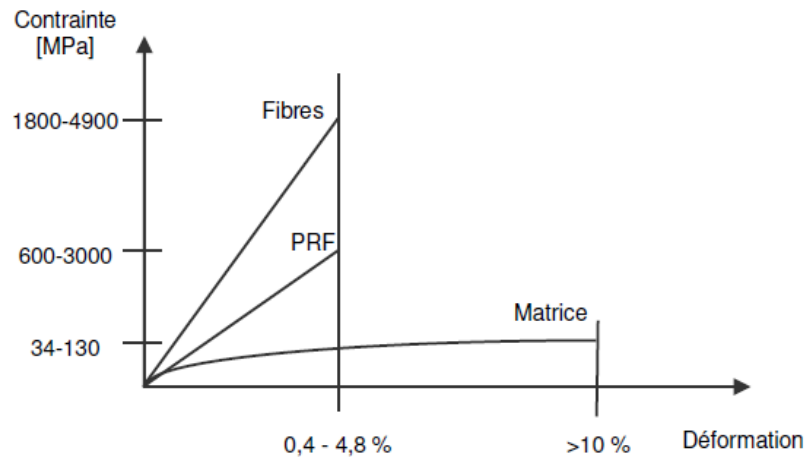


FIGURE 3.13 Comportement des différents composants d'un matériau composite [69]

La sélection et l'intégration d'additifs et de charges, adaptés aux systèmes de fibres et de résines utilisés, sont des étapes cruciales dans le processus de fabrication. Ces éléments sont incorporés pour moduler la polymérisation de la résine, influençant ainsi les propriétés finales du composite, telles que la résistance thermique, la durabilité et les caractéristiques ignifuges.

De plus, les composites PRF présentent généralement une anisotropie, c'est-à-dire que leurs propriétés varient en fonction de la direction. Cette anisotropie est principalement attribuée à l'orientation spécifique des fibres au sein du matériau, conférant aux PRF des caractéristiques mécaniques exceptionnelles, telles que la ténacité accrue et un module d'élasticité élevé.

Dans le domaine du génie civil, les barres de PRF présentent des avantages significatifs comparés aux matériaux traditionnels tels que les armatures en acier, notamment en termes de légèreté, de résistance à la corrosion et de la possibilité de les configurer spécifiquement pour des propriétés mécaniques ciblées (rigidité, résistance à la traction et à la compression) pour répondre aux exigences spécifiques des projets d'ingénierie. Ces propriétés facilitent la conception de structures plus durables et adaptées aux défis environnementaux et de charge de travail [23].

Contrairement aux armatures en acier, dont les propriétés mécaniques isotropes garantissent une uniformité de résistance dans toutes les directions, les barres de PRF présentent une dépendance de la résistance à la traction au diamètre de la barre. Cette particularité est due à la distribution inégale des contraintes au sein de l'armature, où les fibres cen-

trales subissent des sollicitations moindres comparées aux fibres situées aux surfaces. Cette distribution de contrainte inégale, exacerbée par des efforts de cisaillement élevés, peut entraîner une dégradation progressive des fibres, menant à une diminution de la résistance mécanique, un phénomène qui s'intensifie avec l'augmentation du diamètre de la barre. Cette limitation intrinsèque a incité les fabricants à privilégier la production de barres de PRF de diamètres plus petits [69] et [83].

3.3.6 Barres en polymère renforcé de fibres (PRF)

L'analyse des différentes fibres constituant les composites en Polymères Renforcés de Fibres (PRF) est cruciale pour comprendre et évaluer leur contribution à la performance globale du matériau. Les fibres d'aramide (PRFA), de basalte (PRFB), de carbone (PRFC) et de verre (PRFV) sont les plus couramment utilisées, chacune présentant des propriétés distinctes qui influencent les capacités et les limitations du composite résultant comme présenté dans le tableau 3.1. Les barres fabriquées à partir de ces différents types de fibres sont présentées dans la figure 3.14.

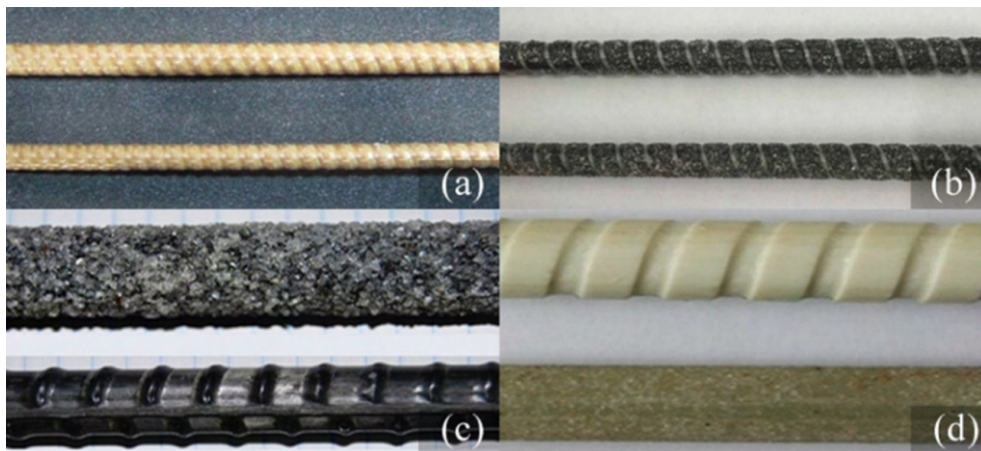


FIGURE 3.14 Barres en PRF avec différents types de fibre :
(a) aramide ; (b) basalte ; (c) carbone ; (d) verre [22]

Ces fibres varient considérablement en termes de résistance mécanique, de durabilité, de résistance thermique et de coût. Cette diversité rend certains composites particulièrement adaptés à des applications spécifiques dans le génie civil. Le choix de la fibre la plus appropriée est donc dicté par les exigences spécifiques du projet, notamment en termes de résistance, de durabilité et de coût, ce qui est essentiel pour optimiser à la fois les performances et la longévité des structures.

Les caractéristiques géométriques des fibres, comme leur longueur, leur forme et leur section transversale, jouent un rôle déterminant dans leurs propriétés mécaniques. Par exemple, des fibres plus longues peuvent offrir une meilleure adhérence dans la matrice

polymère, améliorant ainsi la transmission des charges et la résistance du composite. De même, la section transversale des fibres affecte leur flexibilité et leur capacité à se conformer à diverses formes structurales. En outre, la composition chimique des fibres a une influence marquée sur leurs propriétés chimiques et physiques.

TABLEAU 3.1 Propriétés des fibres [69]

Type de fibre	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement (%)
Aramide	2800-3620	74-179	1,9-4,6
Basalte	992-4840	76-92	2,6
Carbone	2500-4000	200-800	0,4-2,8
Verre	1800-3600	74-87	2,9-5,0

Fibres de verre (PRFV)

Les fibres de verre, composées principalement de silice (SiO_2) et d'autres minéraux, sont fabriquées par fusion de ces composants suivie d'un étirage du matériau en fusion pour former des fibres. Cette méthode de production permet de contrôler avec précision les propriétés physiques des fibres, telles que leur diamètre et leur longueur, influençant directement leurs caractéristiques mécaniques [55].

L'usage répandu des fibres de verre dans les composites PRF est principalement dû à leur coût relativement faible, comparativement à d'autres renforts comme les fibres de carbone et d'aramide [104]. Leur bonne résistance à la traction, combinée à un faible poids, les rend particulièrement attractives pour une variété d'applications en génie civil. De plus, elles sont notoirement résistantes à la corrosion, un atout majeur pour les structures exposées à des environnements agressifs ou humides [45].

Les fibres de verre sont également appréciées pour leur polyvalence et leur capacité à être facilement incorporées dans diverses matrices polymères, permettant de produire des composites adaptés à une large gamme de besoins structurels. Elles sont couramment utilisées dans la construction de panneaux, de tuyaux, de réservoirs et d'autres composants structuraux où la légèreté et la durabilité sont primordiales.

En outre, les propriétés isolantes des fibres de verre les rendent utiles dans des applications nécessitant une isolation thermique ou électrique. Cette caractéristique est exploitée dans la construction d'infrastructures de transport, de bâtiments et d'installations industrielles.

En général, les fibres de verre offrent un équilibre optimal entre coût, performance et adaptabilité, faisant d'elles un choix prépondérant pour les ingénieurs et concepteurs dans le domaine du génie civil, notamment pour des projets exigeant un compromis entre performance mécanique et contraintes économiques.

Fibres de carbone (PRFC)

Les fibres de carbone sont constituées de filaments de carbone extrêmement fins, typiquement d'environ 5 à 10 micromètres de diamètre. Elles sont fabriquées à partir de précurseurs organiques tels que la rayonne ou le polyacrylonitrile (PAN), transformés par un processus de carbonisation sous des conditions de température et d'atmosphère contrôlées. Cette étape cruciale dans la fabrication des fibres de carbone permet de maintenir une structure à haut contenu en carbone, tout en éliminant les autres éléments non-carbone [55].

Les propriétés remarquables des fibres de carbone incluent une légèreté exceptionnelle couplée à une résistance à la traction et un module d'élasticité élevés. Ces caractéristiques rendent les fibres de carbone particulièrement attractives pour les applications où la performance en termes de rigidité et de résistance à la fatigue est essentielle. Leur haute résistance spécifique (rapport résistance/poids) les rend idéales pour des applications où la réduction de poids est primordiale, comme dans l'aérospatiale, le sport automobile et les constructions de haute performance.

Bien que les fibres de carbone offrent des avantages significatifs en termes de performance mécanique, elles présentent un coût de production plus élevé par rapport à d'autres fibres comme le verre ou l'aramide. Cette considération économique est un facteur important dans la décision de leur utilisation pour des projets spécifiques.

En génie civil, les fibres de carbone sont de plus en plus utilisées dans des applications de renforcement structurel et de réhabilitation, notamment dans le renforcement des ponts, des bâtiments et d'autres infrastructures. Leur capacité à être facilement moulées en différentes formes et intégrées dans diverses matrices polymères permet de créer des composites PRF personnalisés pour des besoins structurels spécifiques.

En conclusion, malgré leur coût plus élevé, les fibres de carbone représentent une option de choix pour des applications exigeantes en génie civil, offrant des avantages indéniables en termes de résistance, de légèreté et de performance.

Fibres d'aramide (PRFA)

Les fibres d'aramide, reconnues pour leur résistance exceptionnelle à la traction et leur module d'élasticité élevé, se distinguent également par leur grande résistance aux tempé-

ratures élevées et à la corrosion. On distingue principalement trois types de fibres d'aramide sur le marché : Kevlar, produit par Dupont aux États-Unis d'Amérique, Twaron, fabriqué par Aramide Maarschappijvof (AKZO) aux Pays-Bas, et Technora, développé par Teijin au Japon. Parmi toutes les fibres disponibles, l'aramide présente la densité la plus faible et le rapport résistance/poids le plus élevé. Elle est également notable pour être l'unique fibre organique couramment utilisée dans les applications structurelles [80].

En raison de leurs propriétés mécaniques, les fibres d'aramide sont privilégiées dans des applications spécifiques. Leur légèreté et leur résistance supérieure à l'impact les rendent particulièrement adaptées pour les applications balistiques dans le domaine de la défense. De plus, les fibres d'aramide sont fréquemment utilisées dans la création de structures de renforts hybrides, en les combinant avec des fibres de carbone ou de verre. Cette approche hybride permet d'exploiter les avantages complémentaires de différentes fibres, aboutissant à des matériaux adaptés à des applications de haute performance telles que la course automobile, le sport d'élite, l'aéronautique, etc.

Leur utilisation dans des composites hybrides offre un équilibre optimal entre légèreté, résistance et flexibilité, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans la conception de matériaux composites avancés. Cette polyvalence fait des fibres d'aramide un choix privilégié pour les ingénieurs cherchant à développer des solutions innovantes et performantes dans des domaines où les exigences en termes de résistance mécanique et de légèreté sont particulièrement élevées.

Fibres de basalte (PRFB)

Les fibres de basalte, extraites de roches ignées naturelles, sont de plus en plus reconnues dans le domaine des composites PRF pour leurs qualités exceptionnelles, en particulier leur résistance thermique supérieure et leur résistance à la traction, qui est environ cinq fois supérieure à celle des barres d'acier. Comparées aux fibres de carbone, elles offrent une alternative moins coûteuse, tout en conservant d'excellentes propriétés mécaniques et une résistance remarquable aux températures élevées. Le prix des fibres de basalte est six fois moins cher que les fibres d'aramides et de carbone [45] et [55].

Ces fibres sont particulièrement prisées dans les applications nécessitant une résistance au feu ou une stabilité à des températures élevées. Par exemple, elles sont utilisées dans la fabrication de matériaux composites pour des structures exposées à des environnements thermiquement exigeants, comme dans certains secteurs de l'industrie chimique ou pour des composants de machines opérant à haute température [45].

En outre, les fibres de basalte présentent une bonne résistance à l'alcalinité et aux agents chimiques, ce qui les rend idéales pour les applications dans des environnements corrosifs. Leur durabilité et leur résistance à la dégradation environnementale les rendent également attrayantes pour des projets de construction durable et des infrastructures nécessitant une longévité accrue avec peu d'entretien [65].

Leur capacité à être produites à partir de sources naturelles et abondantes ajoute à leur attrait, en particulier dans le contexte actuel de recherche de solutions de construction plus durables et respectueuses de l'environnement. Cette caractéristique positionne les fibres de basalte comme une option viable et écologiquement responsable pour les ingénieurs et les concepteurs cherchant à réduire l'empreinte écologique de leurs projets [45] et [65].

En résumé, l'utilisation des fibres de basalte dans les composites PRF offre un équilibre optimal entre performance thermique, coût et durabilité, les rendant adaptées à une multitude d'applications dans le génie civil et au-delà, tout en répondant aux préoccupations environnementales contemporaines [5].

3.3.7 Matrice polymérique

La matrice polymérique joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés mécaniques et de la durabilité des composites PRF. Elle peut être classée en deux grandes catégories : thermoplastique et thermodurcissable.

Les résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des polymères qui, comme leur nom l'indique, deviennent malléables ou plastiques à des températures élevées et se solidifient à nouveau en refroidissant. Cette propriété de réversibilité thermique leur confère une grande flexibilité en termes d'application et de recyclage, ce qui est particulièrement important dans le contexte actuel de la construction durable et de la préservation de l'environnement [90].

En génie civil, les résines thermoplastiques sont utilisées dans une variété d'applications où la capacité de reformer ou de recycler le matériau est essentielle. Elles sont privilégiées pour des projets nécessitant des ajustements ou des modifications post-production, car elles peuvent être réchauffées, remoulées et refroidies sans dégradation significative de leurs propriétés.

Un autre avantage notable des résines thermoplastiques est leur capacité à être soudées, ce qui peut être avantageux dans la fabrication de structures composites de grande taille ou dans les réparations. De plus, leur résistance à l'humidité et aux produits chimiques les rend utiles dans des applications où les matériaux sont susceptibles d'être exposés à des environnements corrosifs.

Parmi les exemples courants de résines thermoplastiques utilisées dans les composites PRF, on trouve le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polyamide (PA) et le Polyéthylène téréphtalate (PET). Chaque type présente des caractéristiques distinctes en termes de résistance mécanique, de résistance thermique et de durabilité, permettant ainsi aux ingénieurs de choisir la résine la plus adaptée aux exigences spécifiques de leurs projets.

En conclusion, les résines thermoplastiques offrent une flexibilité, une facilité de traitement et des options de recyclage qui les rendent attrayantes pour diverses applications en génie civil, en particulier dans les contextes où la durabilité et la réutilisation des matériaux sont des priorités.

Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables, caractérisées par leur capacité à durcir de manière irréversible lorsqu'elles sont exposées à la chaleur, sont un composant essentiel dans la fabrication des composites en Polymères Renforcés de Fibres (PRF). Cette transformation irréversible, ou réticulation, résulte de réactions chimiques qui créent des liaisons tridimensionnelles entre les molécules de la résine, conférant au matériau fini des propriétés mécaniques supérieures et une excellente stabilité dimensionnelle [90].

Ces résines sont particulièrement appréciées dans les applications en génie civil où une haute résistance mécanique est cruciale. Leur structure rigide et résistante les rend idéales pour des projets nécessitant une grande durabilité et une résistance prolongée aux charges mécaniques, aux conditions environnementales et aux contraintes chimiques.

Parmi les types les plus courants de résines thermodurcissables utilisées dans les composites PRF, on trouve l'époxy, le polyester insaturé et le vinylester, comme indiqué dans le tableau 3.2. Les résines époxy sont notamment reconnues pour leur adhérence exceptionnelle, leur résistance à la corrosion et leur faible retrait lors de la polymérisation, ce qui les rend idéales pour des applications nécessitant une précision dimensionnelle élevée et une excellente adhésion aux fibres de renforcement.

TABLEAU 3.2 Propriétés des résines [69]

Type de résine	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement (%)
Époxyde	55-130	2,75-4,10	>10
Polyester	34-104	2,10-3,45	>10
Vinyle-ester	73-81	3,00-3,35	>10

Les résines polyester et vinylester, quant à elles, offrent un bon compromis entre performance mécanique, résistance chimique et coût, les rendant adaptées à un large éventail d'applications structurelles, notamment dans la construction de bâtiments, de ponts et d'infrastructures maritimes.

Les résines thermodurcissables sont également appréciées pour leur résistance à des températures élevées et leur stabilité dans des conditions environnementales diverses, ce qui les rend particulièrement adaptées à des projets de génie civil où la longévité et la résilience des matériaux sont primordiaux.

En effet, l'utilisation des résines thermodurcissables dans les composites PRF permet de réaliser des structures avec une intégrité mécanique supérieure, une durabilité prolongée et une fiabilité à long terme, répondant ainsi aux exigences rigoureuses du génie civil moderne.

3.3.8 Agents de polymérisation et inhibiteurs

Dans le processus de fabrication des résines thermodurcissables, plusieurs agents jouent des rôles cruciaux pour assurer la qualité et la performance du produit final. Ces agents incluent les catalyseurs, les accélérateurs, les durcisseurs et les inhibiteurs, chacun ayant une fonction spécifique dans la réaction de polymérisation.

Les catalyseurs, tout d'abord, sont des composés essentiels qui augmentent la vitesse de la réaction chimique sans altérer la composition chimique finale de la résine. Ils facilitent la réticulation des polymères, et ce, même en faible quantité. Cette caractéristique permet d'optimiser le processus de fabrication tout en conservant l'intégrité du matériau.

Les accélérateurs, quant à eux, interagissent avec le catalyseur pour augmenter la rapidité de la réaction entre ce dernier et la résine. Leur présence est cruciale pour ajuster le temps de prise et la vitesse de durcissement, ce qui est particulièrement important dans les applications où le temps de traitement est un facteur clé.

Les durcisseurs jouent un rôle différent : ils sont ajoutés à la résine pour promouvoir ou contrôler la réaction de polymérisation et influencer le degré de dureté du matériau final. Le choix du durcisseur et sa proportion dans la résine sont déterminants pour les propriétés mécaniques et la stabilité thermique du produit fini.

Enfin, les inhibiteurs sont des substances ajoutées pour ralentir les réactions chimiques indésirables. Ils sont particulièrement utiles pour stabiliser la résine pendant le stockage, prévenir la formation de gel pendant le mélange et parfois pour ajuster la vitesse de

polymérisation. L'utilisation d'inhibiteurs est essentielle pour maintenir la qualité et la maniabilité de la résine avant son utilisation finale.

Ces composants interagissent de manière complexe pour former des résines thermodurcissables qui répondent aux exigences spécifiques des applications en génie civil et d'autres domaines industriels, comme souligné dans les travaux de Navaratnam et Thomason [68] et [98]. Leur rôle dans le contrôle des propriétés physiques et chimiques des résines est fondamental pour le développement de matériaux performants et durables.

3.3.9 Agents de couplage

L'agent de couplage dans les matériaux composites est d'une importance vitale, notamment dans la fabrication de composites thermodurcissables. Sa principale fonction est de renforcer l'adhérence entre les fibres de renforcement et la matrice polymère, ce qui est essentiel pour améliorer les propriétés mécaniques globales du matériau composite [80].

Dans les matériaux composites, les agents de couplage tels que les composés de chrome [26] et de silane [39] jouent un double rôle. D'une part, ils réagissent avec les sites réactifs à la surface des fibres pour former un lien chimique. D'autre part, le groupement organique non-saturé de ces agents réagit avec la résine pendant la polymérisation, créant ainsi une liaison doublement renforcée. Cette double liaison est cruciale pour assurer une adhérence optimale entre les fibres et la matrice.

Sans l'utilisation d'un agent de couplage, le transfert de charge entre les fibres et la matrice se fait principalement par enclenchement mécanique, influencé par les contraintes résiduelles dues à la polymérisation de la matrice et à sa contraction thermique lors de la cure. Or, étant donné que le coefficient d'expansion thermique de la résine est environ dix fois supérieur à celui des fibres, des différences d'expansion à des températures élevées peuvent affaiblir cet enclenchement mécanique. Cette détérioration de l'interaction mécanique peut conduire à la formation de microfissures et, par conséquent, diminuer les propriétés mécaniques du composite [70].

De plus, l'agent de couplage offre une protection contre les effets néfastes de l'humidité et des fluides réactifs. Ces éléments peuvent se diffuser à travers la résine et s'accumuler à l'interface fibre-matrice, causant la détérioration des fibres. L'agent de couplage agit donc comme une barrière protectrice, empêchant cette accumulation et protégeant ainsi l'intégrité structurelle du composite [98].

En général, les agents de couplage sont essentiels dans la fabrication de composites thermodurcissables pour assurer une adhérence efficace entre les fibres et la matrice, minimiser

les risques de microfissuration et protéger contre les influences environnementales, comme décrit par Thomason [98]. Ils contribuent de manière significative à la longévité et aux performances mécaniques des matériaux composites dans diverses applications en génie civil et autres domaines industriels.

3.3.10 Charges et additifs

Les additifs représentent un ensemble de réactifs chimiques ajoutés à un polymère pour obtenir une variété de propriétés. Les additifs comprennent : 1) les charges et renforcements ; 2) les plastifiants ; 3) les colorants ; et 4) les stabilisateurs. Les charges bon marché peuvent réduire le coût de fabrication en diminuant le pourcentage d'une matrice polymère coûteuse avec une charge bon marché, tandis que les renforcements renforcent les polymères ou modifient d'autres propriétés mécaniques. Les plastifiants abaissent les températures de transition vitreuse et rendent les matériaux moins cassants. Les colorants teintent les plastiques d'une certaine couleur tandis que les stabilisateurs empêchent la dégradation.

L'utilisation de charges et d'additifs dans la résine est également une pratique courante pour améliorer les propriétés du matériau. Ces ajouts sont particulièrement importants pour optimiser la performance et la durabilité des barres de PRF dans diverses applications de génie civil [26].

Les charges ajoutées à la résine des barres de PRF peuvent considérablement améliorer des caractéristiques telles que la résistance mécanique, la stabilité thermique, et la résistance à l'usure. Ces améliorations sont importantes pour assurer que les barres de PRF peuvent supporter les contraintes mécaniques et environnementales auxquelles elles sont soumises dans les structures de génie civil. Les charges peuvent également influencer d'autres propriétés, comme la densité du matériau, ce qui peut être avantageux dans des applications spécifiques où le poids est un facteur critique [80].

Les additifs, bien qu'intégrés en faibles quantités dans la composition des barres de PRF (quelques pourcents au plus), jouent un rôle significatif dans l'amélioration de leurs performances et de leur fabrication. Ces additifs remplissent diverses fonctions essentielles : ils peuvent servir à lubrifier ou faciliter le démoulage des pièces, pigmenter ou colorer les barres pour des raisons esthétiques ou d'identification, prévenir le retrait des pièces moulées, et protéger les pièces fabriquées contre les rayons ultraviolets. Par exemple, l'ajout de stabilisateurs UV améliore la résistance des barres de PRF à la dégradation sous l'effet du soleil, une caractéristique primordiale pour les applications en extérieur. De même, les agents ignifuges augmentent la résistance au feu des barres, ce qui est crucial pour garantir la sécurité dans les structures de génie civil. Ainsi, bien que présents en petite quantité,

ces additifs ont un impact considérable sur la qualité, la sécurité et l'efficacité des barres de PRF dans leurs diverses applications [70] et [80].

Dans l'ensemble, l'incorporation soigneusement calibrée de charges et d'additifs dans la résine des barres de PRF est essentielle pour atteindre les caractéristiques de performance désirées. Cela permet d'obtenir des barres de PRF qui non seulement répondent aux exigences structurelles, mais offrent également une durabilité et une efficacité accrues dans leurs applications respectives en génie civil [68].

3.4 Fabrication des armatures de PRF

La fabrication des composites de PRF (Polymères Renforcés de Fibre) varie considérablement en fonction de leur utilisation, mais on peut distinguer trois étapes communes dans ce processus. La première étape consiste en la fabrication des composants de base, à savoir la résine et les fibres. Ensuite, vient la mise en forme de ces matériaux, suivie par la cuisson du matériau final avec la géométrie souhaitée.

Le choix des composants est déterminé par plusieurs facteurs, tels que la facilité de fabrication, l'utilisation prévue, la compatibilité entre les fibres et la matrice, ainsi que le coût. En ajustant le pourcentage relatif de chaque composant, il est possible de répondre à des besoins spécifiques en termes de résistance mécanique (en augmentant le pourcentage de fibres) ou de durabilité (en augmentant le pourcentage de résine) [70] et [80]

3.4.1 Mise en œuvre des Composites

La mise en œuvre des composites de PRF comprend deux méthodes principales : une méthode directe et une méthode utilisant des produits semi-finis. La méthode directe englobe plusieurs techniques, y compris le moulage sans pression, qui peut être réalisé par le moulage au contact, le moulage par projection simultanée ou le moulage sous vide. De plus, le moulage par compression, qui comprend le moulage par injection de résine. Le moulage en continu, le moulage par pultrusion, le moulage par centrifugation et le moulage par enroulement filamentaire.

D'autre part, la méthode utilisant des produits semi-finis intègre l'utilisation de pré-imprégnés, impliquant le moulage par compression à chaud ou en autoclave, et des composés de moulage, qui peuvent être formés par des techniques telles que le moulage par compression et l'estampage. Les armatures de PRF sont généralement produites en utilisant la méthode directe, notamment par le moulage par pultrusion, en raison de son efficacité et de sa pertinence pour ce type de produit [70], [71] et [74].

3.4.2 Procédé par Pultrusion

La pultrusion est un processus utilisant un moulage continu, idéal pour la fabrication de matériaux composites de grande longueur et de section constante, tels que les barres d'armature, câbles, poutres, tubes, et plaques. Ce processus débute avec le débobinage de fibres (stratifils) traitées avec un agent de couplage pour assurer une bonne adhésion avec la matrice. Si nécessaire, un séchage des fibres est effectué pour éliminer toute humidité avant leur introduction dans le processus. Les fibres sont ensuite orientées grâce à une série de dispositifs et immergées dans un bain de résine thermodurcissable, potentiellement enrichie avec des accélérateurs, catalyseurs, et autres additifs pour améliorer ses propriétés. Il est crucial que la résine présente une faible viscosité pour une imprégnation aisée, une longue durée de vie en pot à température ambiante, et une polymérisation rapide une fois dans la filière [71] et [74].

Les fibres imprégnées passent ensuite dans une filière de préformation où l'air piégé et l'excès de résine sont éliminés, et la section désirée est formée. Le produit passe alors dans une chambre de polymérisation pour durcir la résine polymère. Pour éviter la gélification prématurée de la résine, une circulation d'eau froide est maintenue à l'entrée de la chambre. La température dans le four de polymérisation varie généralement entre 110 °C et 180 °C, en fonction du type de résine utilisé [26], [70] et [80].

La pultrusion, étant un processus continu, nécessite un mécanisme d'entraînement puissant pour surmonter les forces de friction. Deux techniques principales sont utilisées : des presses en rouleaux revêtues de caoutchouc résistant à l'usure et des systèmes hydrauliques à pinces. Après la sortie de la ligne de production, le matériau est refroidi et coupé à la longueur désirée. Le niveau de production peut atteindre plusieurs centaines de mètres par heure, sous le contrôle d'un seul opérateur. Il est important de noter que la polymérisation complète des sections plus complexes et épaisses prend plus de temps que pour les sections minces [70] et [80]. La figure 3.15 illustre le processus de fabrication par pultrusion.

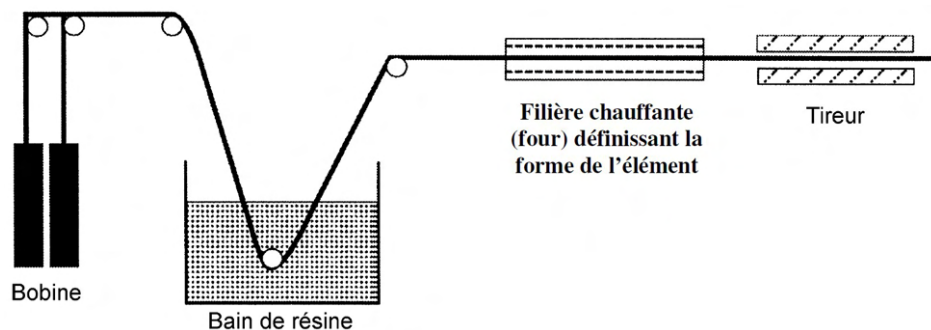


FIGURE 3.15 Procédure de fabrication des armatures en PRF par pultrusion (ISIS Canada)

Plusieurs paramètres de fabrication peuvent influencer la performance des produits finis en composites de PRF. Ces paramètres se divisent en deux catégories principales : les paramètres directs et ceux liés au procédé de fabrication.

Les paramètres directs comprennent le type et le pourcentage de fibres, le choix de la résine, ainsi que les additifs utilisés. Ces éléments sont cruciaux, car ils déterminent les propriétés intrinsèques du matériau, telles que la résistance, la flexibilité, et la durabilité.

Quant aux paramètres liés au procédé de fabrication, ils englobent l'orientation des fibres, l'imprégnation des fibres par la résine, la température de la filière, la pression interne, la force de traction et le guidage, la vitesse de production, ainsi que la finition de surface. Ces aspects du processus de fabrication jouent un rôle déterminant dans la qualité finale du produit, affectant des propriétés telles que la résistance mécanique, la stabilité dimensionnelle et l'apparence esthétique du matériau.

Concernant spécifiquement les armatures de PRF, des fibres unidirectionnelles orientées sont généralement utilisées. Cependant, pour améliorer la résistance, certains fabricants ajoutent des fibres orientées obliquement par rapport à l'axe de la barre. Cette technique peut améliorer la résistance aux forces appliquées sous différents angles, augmentant ainsi la polyvalence et la performance structurelle de l'armature [26, 70, 80].

3.5 Pourquoi Étudier les Barres en Fibre de Basalte

L'étude des barres en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) de basalte (PRFB) par rapport aux autres types de PRF (carbone, verre et aramide) et aux barres en acier conventionnelles revêt une importance particulière en raison de leurs avantages distincts. Les barres PRFB, fabriquées à partir de fibres de basalte issues de roches volcaniques sans additifs, se distinguent comme une option écologique, offrant des propriétés mécaniques et une durabilité comparables aux barres en PRF de verre (PRFV), mais à un coût moindre. Bien que les barres en PRF de carbone (PRFC) présentent des propriétés mécaniques supérieures, leur coût élevé limite leur utilisation généralisée. Les PRFB, en revanche, offrent un équilibre optimal entre performance, coût et respect de l'environnement, les rendant particulièrement attrayantes pour les constructions en milieu marin [37], [43], [46], [62], [101] et [102].

Les barres PRFB présentent également une résistance à la corrosion par l'eau de mer et une résistance modérée à la corrosion acide, des propriétés cruciales pour les applications en environnements marins. Cependant, il est important de noter que, malgré ces avantages, les barres PRFB peuvent subir une dégradation dans les environnements alcalins, un aspect critique dans le béton. Des études ont montré que les performances des PRFB

peuvent se détériorer dans de telles conditions, notamment à cause de la réaction alcali-silice (RAS) due au SiO_2 actif des fibres de basalte. L'utilisation de cendres volantes a été suggérée comme moyen d'atténuer cette réaction, soulignant la nécessité d'approfondir la compréhension de la durabilité des PRFB dans des conditions alcalines [23] et [59].

En comparaison avec l'acier conventionnel, les barres PRFB offrent l'avantage supplémentaire de la non-susceptibilité à la corrosion, un problème majeur avec l'acier dans les environnements marins. De plus, les barres PRFB ne sont pas seulement non toxiques et incombustibles, mais elles peuvent également améliorer le comportement à l'impact lorsqu'elles sont utilisées dans des composites hybrides. Ces propriétés font des PRFB un matériau prometteur pour les structures exposées aux environnements océaniques, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour pleinement comprendre et optimiser leur performance à long terme dans ces conditions [6], [56], [58] et [85].

3.6 Défis et Perspectives

L'utilisation des barres en Polymère Renforcé de Fibres de Basalte (PRFB) présente à la fois des défis et des opportunités prometteuses [60]. Parmi les principaux défis se trouve la durabilité des PRFB dans des environnements alcalins, typiques du béton, où des phénomènes tels que la réaction alcali-silice et d'autres formes de dégradation nécessitent une attention particulière. De plus, l'optimisation des coûts de production demeure cruciale [61], car la transformation des fibres de basalte implique des dépenses significatives. Un autre aspect important est la compréhension et l'amélioration des propriétés à long terme des PRFB, particulièrement dans des conditions environnementales variables, un domaine où la recherche est encore en développement. Enfin, l'absence de normalisation et de réglementation spécifiques aux PRFB freine leur intégration généralisée dans les pratiques de construction [96]. Cependant, ces défis ouvrent la porte à de nombreuses perspectives. Des recherches avancées sur la durabilité des PRFB pourraient conduire à des améliorations significatives de leur résistance et de leur performance à long terme. L'innovation dans les procédés de fabrication pourrait également réduire les coûts et augmenter l'efficacité, rendant les PRFB plus accessibles. Par ailleurs, l'exploration de nouvelles applications des PRFB dans diverses structures du génie civil, particulièrement celles exposées à des conditions extrêmes, pourrait élargir considérablement leur champ d'utilisation. Une collaboration accrue entre les milieux académiques et industriels est essentielle pour aligner la recherche avec les besoins pratiques et développer des solutions applicables. Enfin, l'établissement de normes internationales pour les PRFB faciliterait leur adoption généralisée, assurant une qualité et une performance constantes. En somme, bien que les PRFB offrent d'énormes avantages, leur potentiel complet dans le génie civil ne pourra être pleinement

réalisé qu'en relevant ces défis et en exploitant les opportunités qu'ils présentent, nécessitant une approche multidisciplinaire et une collaboration étroite entre toutes les parties prenantes[37] et [59].

3.7 Conclusion

Les composites de PRF ont le potentiel de transformer l'industrie de la construction [40] en offrant des solutions légères, durables et résistantes à la corrosion. Bien qu'il existe encore des obstacles à leur adoption généralisée, l'évolution constante de la technologie et de la recherche promet un avenir lumineux pour ces matériaux innovants dans le domaine du génie civil [50].

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

4.1 Introduction

Cette étude se concentre sur une analyse comparative approfondie des propriétés mécaniques et physiques des barres d'armature en Polymère Renforcé de Fibres de Basalte (PRFB) par rapport à celles en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV). L'objectif est d'exploiter et de comprendre les avantages distincts et les performances des PRFB. Le choix d'utiliser les barres de PRFB et de les comparer à celles en PRFV est motivé par plusieurs avantages des PRFB, notamment en termes de résistance à la corrosion, particulièrement dans des environnements alcalins typiques des structures en béton. De plus, l'utilisation du basalte, une ressource naturelle, confère aux PRFB un atout écologique notable par rapport aux autres types de PRF, comme ceux en fibres de carbone ou d'aramide. En outre, les barres PRFB offrent un rapport coût-efficacité avantageux, les rendant accessibles pour une variété plus large de projets.

Pour ce faire, des barres d'armature de différents diamètres et sections sont sélectionnées pour l'étude. Les diamètres spécifiques choisis pour l'analyse sont #3 (10 mm, section nominale de 71 mm²), #4 (13 mm, section nominale de 129 mm²), #5 (15 mm, section nominale de 199 mm²), #6 (20 mm, section nominale de 284 mm²), et #8 (25 mm, section nominale de 510 mm²). Ces barres, fabriquées par *Pultrall Inc.*, et *Basanite Industries Inc.*, sont fabriquées via un processus de pultrusion, assurant une qualité et une uniformité optimales. Après une caractérisation initiale, les échantillons subiront un conditionnement dans une solution alcaline à une température de 60 °C pendant une période de 90 jours pour simuler un vieillissement accéléré. Après cette phase de conditionnement, les échantillons seront à nouveau évalués afin de déterminer les éventuelles modifications de leurs propriétés mécaniques et physiques résultant de cette exposition.

L'analyse comparative de ces deux types de barres vise à déterminer si les propriétés avantageuses des PRFB se traduisent par une performance supérieure ou équivalente aux PRFV sous conditions standardisées de test. Cette démarche méthodologique permettra non seulement d'évaluer la viabilité des PRFB en tant que matériaux de construction, mais aussi de fournir des données essentielles pour l'optimisation des pratiques actuelles de conception et de construction dans le domaine du génie civil.

4.2 Description des Essais de Propriétés Mécaniques

Les propriétés mécaniques des barres d'armature en Polymère Renforcé de Fibres de Basalte (PRFB) et en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV) sont évaluées à travers un ensemble d'essais conformes aux standards des normes *ASTM* et *CSA*. Chaque essai vise à déterminer une propriété spécifique des barres, assurant ainsi leur performance et fiabilité dans des applications de génie civil.

Les barres d'armature en PRFB et PRFV sont soumises à une série d'essais détaillés pour mesurer leur résistance à la traction, leur résistance au cisaillement transversal, leur résistance au cisaillement interlaminaire (*ILSS*), leur résistance à l'arrachement, ainsi que leur résistance aux alcalins. La résistance à la traction est déterminée conformément à la norme ASTM D7205/D7205M-21 [13], la résistance au cisaillement transversal est déterminée conformément à la norme ASTM D7617/D7617M-17 [14], la résistance au cisaillement interlaminaire (*ILSS*) est déterminée conformément à la norme ASTM D4475-21 [30], la résistance à l'arrachement est déterminée conformément à la norme ASTM D7913/D7913M-20 [32] et la résistance aux alcalins est déterminée conformément à la norme ASTM D7705/D7705M [31].

4.2.1 Résistance à la Traction

La résistance à la traction est une propriété fondamentale pour évaluer la performance des barres en Polymère Renforcé de Fibres (PRF), y compris celles composées de fibres de basalte (PRFB) et de fibres de verre (PRFV). Ce test détermine la capacité des barres à résister aux forces de traction, ce qui est essentiel pour leur application comme armatures dans les structures en béton. Conformément aux normes établies par la CSA S807-19 [84], la résistance à la traction des barres PRF a été évaluée en suivant les protocoles de la norme D7205/D7205M-21 [13], tel qu'indiqué dans l'annexe C de la norme CSA S806-12 [83]. Cette norme spécifie en détail la méthode de test pour les matériaux composites.

Dans le cadre de cette étude, cinq échantillons de chaque diamètre de barres PRF de basalte et de verre ont été préparés. Chaque échantillon a été soigneusement coupé et ancré dans des tubes d'acier (figure 4.4a) aux deux extrémités, puis scellé avec du ciment expansif (figure 4.4b) pour garantir une fixation solide lors des tests de traction. Un extensomètre de 200 mm a été installé pour mesurer précisément les déformations pendant les essais, qui ont été réalisés à l'aide d'une machine de traction MTS. La figure 4.1 illustre la préparation des échantillons pour les tests de traction. La figure 4.2 montre la mise en place de l'extensomètre sur les échantillons.



FIGURE 4.1 Préparation des barres de fibre de verre et de basalte pour les tests de traction



FIGURE 4.2 Mise en place de l'extensomètre de 200 mm

La contrainte de traction ultime a été calculée selon l'équation (4.1) :

$$F_{tu} = \frac{P_{max}}{A}; (\text{MPa}) \quad (4.1)$$

Il est à noter que la contrainte ultime de traction a été calculée en utilisant l'aire nominale des barres, c'est-à-dire #3 (10 mm, section nominale de 71 mm²), #4 (13 mm, section nominale de 129 mm²), #5 (15 mm, section nominale de 199 mm²), #6 (20 mm, section nominale de 284 mm²), et #8 (25 mm, section nominale de 510 mm²). Le module d'élasticité a été établi à partir d'une droite moyenne sur l'ensemble des données entre 25 % et 50 % de la contrainte ultime de traction de chaque spécimen.

Le module d'élasticité a été calculé selon l'équation (4.2) :

$$E = 1000 \times \frac{(P_1 - P_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times A}; (\text{GPa}) \quad (4.2)$$

P_1 et ε_1 représentent la charge et la déformation correspondante, respectivement, à environ 50 % de la charge de rupture, tandis que P_2 et ε_2 correspondent à environ 25 % de la charge de rupture.

Finalement, la déformation de traction ultime a été déterminée par l'équation (4.3) :

$$\varepsilon = \frac{F_{tu}}{E}; (\%) \quad (4.3)$$

4.2.2 Résistance à l'Arrachement des Barres en PRF

La résistance à l'arrachement des barres en Polymère Renforcé de Fibres (PRF), y compris celles en fibres de basalte (PRFB) et en fibres de verre (PRFV), est un facteur critique pour assurer une liaison efficace entre l'armature et le béton dans les structures de béton armé. Cette liaison est essentielle pour éviter le glissement des barres et une potentielle défaillance structurelle sous des charges ultimes. Un comportement composite optimal entre la barre d'armature et le béton est crucial, surpassant même l'importance de l'utilisation de matériaux à haute résistance. L'adhérence solide entre les barres et le béton est nécessaire pour optimiser la résistance à la traction des barres et pour maintenir la ductilité de la structure. L'objectif principal de ces tests est d'étudier le comportement de liaison entre les barres PRF et le béton, ainsi que de déterminer la longueur de développement nécessaire pour une adhérence adéquate dans la conception des structures. Ces tests d'arrachement sont réalisés conformément à la norme ASTM D7913/D7913M-20 [32], tel que recommandé par la norme CSA S807-19 [84].

Pour cette étude, cinq échantillons de chaque diamètre de barres PRF de basalte et de verre ont été préparés. Chaque échantillon a été ancré à une extrémité dans des tubes d'acier (figure 4.4a) et scellé avec du ciment expansif (figure 4.4b) pour assurer une fixation solide. L'autre extrémité de chaque échantillon a été coulée dans un bloc de béton (figure 4.4d), mesurant 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 300 mm, réalisé avec du béton de résistance normale visant une résistance cible du béton de 30 MPa. La résistance moyenne à la compression du béton, mesurée à 29.7 MPa, a été déterminée après 28 jours de cure à partir de trois cylindres en béton de 100 mm $\times$ 200 mm, conformément à la norme ASTM C39/C39M-23 [28]. Un dispositif spécifique a été utilisé pour définir la longueur d'ancrage nécessaire pour assurer une bonne adhérence avec le béton et de respecter la longueur d'ancrage de $5d_b$, comme illustré dans la figure 4.4c. Les spécimens préparés et la procédure de préparation sont illustrés respectivement dans la figure 4.3 et la figure 4.4.



FIGURE 4.3 Préparation des spécimens en fibre de basalte et de verre pour les tests d'arrachements



(a) Tubes d'acier



(b) Ciment expansif



(c) Dispositif
anti-retenu



(d) Coulage du béton

FIGURE 4.4 Remplissage des tubes d'aciers avec le ciment expansif et coulage des blocs de béton

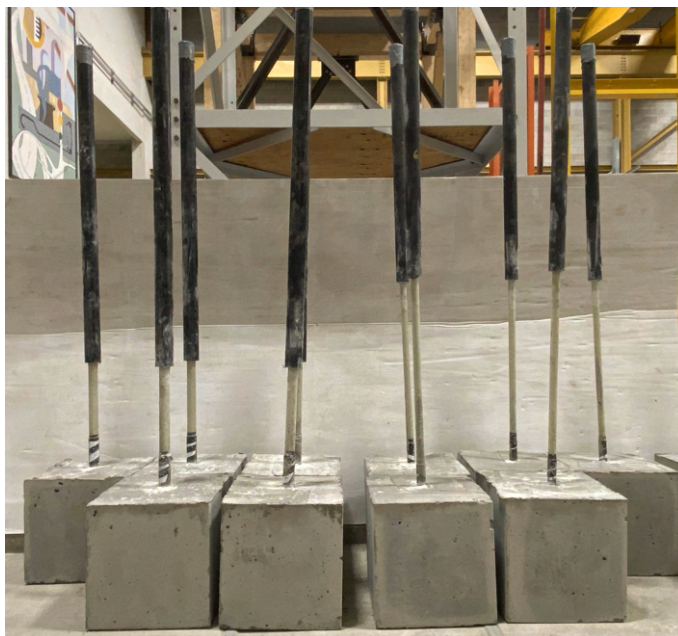
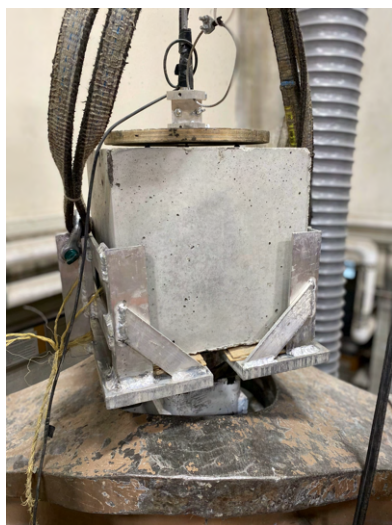


FIGURE 4.5 Blocs de béton pour les essais d'arrachement

Les essais ont été menés à un taux de chargement compris entre 12 et 15 kN/min jusqu'à la rupture. Un Transducteur de Déplacement Linéaire Variable (LVDT) a été installé au-dessus du bloc de béton pour mesurer le glissement de la barre noyée dans le béton, comme montré dans la figure 4.6.



(a) Installation d'un dispositif pour maintenir le bloc de béton à sa place



(b) Installation du LVDT sur le bloc du béton



(c) Mise en place de l'ensemble de l'échantillon dans la machine MTS

FIGURE 4.6 Procédure de mise en place d'un ensemble d'échantillon sur la machine MTS pour réaliser l'essai d'arrachement de barre en PRF du béton



FIGURE 4.7 Blocs de béton après l'arrachement des barres

La charge appliquée et le glissement de la barre ont été enregistrés par un système d'acquisition de données informatisé, connecté à la machine MTS utilisée pour les tests. La contrainte d'adhérence a été calculée selon l'équation (4.4), fournissant des données précieuses sur la capacité de liaison des barres PRF avec le béton. Ces résultats sont cruciaux pour la conception et la réalisation de structures en béton armé fiables et durables.

$$\tau = \frac{F}{C_b l}; (\text{MPa}) \quad (4.4)$$

où :

- F est la force de traction, en Newtons (N) ;
- C_b est la section effective, égale à $3.1416d_b$, où d_b est le diamètre effectif, calculé conformément à la norme ASTM D7205/D7205M [13], en millimètres (mm) ;
- l est la longueur d'arrachement de la barre, en millimètres (mm).

4.2.3 Résistance au Cisaillement Interlaminaire

La résistance au cisaillement interlaminaire est une propriété dominée par la matrice ou l'interface fibre/matrice, car la force de cisaillement agit sur un plan parallèle à la direction des fibres et les fibres ne résistent pas au cisaillement. Pour les barres PRF utilisées comme renforcement dans les éléments en béton, il est nécessaire de déterminer à la fois la résistance à court terme et à long terme.

La résistance au cisaillement interlaminaire peut être efficacement déterminée à l'aide d'un test de cisaillement interlaminaire (longitudinal). Ce test est largement utilisé, principalement en raison de sa simplicité, de sa faible consommation de temps et de sa capacité à capturer, par exemple, le niveau de dégradation, etc. Dans le monde entier, ces tests sont principalement effectués conformément à l'ASTM D4475-21 [30], également comme mentionnée dans la CSA S807-19 [84]. Cependant, une évaluation complète des paramètres des essais de cisaillement longitudinal (interlaminaire) est essentielle, car de nombreuses variables ne sont pas directement spécifiées. C'est pourquoi les études utilisant ces essais présentent une variété de conditions différentes aux limites et, par conséquent, souffrent d'une comparabilité limitée.

Le test de cisaillement interlaminaire (longitudinal) a été utilisé dans plusieurs études pour déterminer les propriétés de l'interface fibre/matrice de différents types de barres PRF, en particulier les barres PRFB, comme étape préliminaire vers l'introduction de ces nouveaux matériaux dans la pratique et les codes de conception, et aussi vers la détermination des effets de la dégradation environnementale.

La configuration du test et son exécution sont décrites dans la norme ASTM D4475-21 [30]. Ce test est réalisé sous forme de flexion à trois points avec une portée très courte, laquelle est admissible entre 3 et 6 fois le diamètre de l'échantillon. Le seul mode de rupture acceptable selon cette norme est la création d'une fissure de cisaillement horizontale, indiquant un décollement à l'interface entre les fibres et la matrice.

Les avantages du test de cisaillement interlaminaire résident dans sa capacité à être utilisé pour des échantillons de petite taille et ses exigences de temps réduites. Le temps de test est prescrit pour durer entre 20 et 200 secondes, nécessitant ainsi un ajustement précis de la vitesse de déplacement pour se conformer aux limites de temps spécifiées. Cette exigence assure que le test est à la fois efficace et conforme aux standards établis. La figure 4.8 illustre les distances entre les trois appuis utilisés dans le test.

Pour cette série d'essais, cinq spécimens de chaque type de barres PRF (PRFB et PRFV) ont été préparés. Ces spécimens ont été coupés à une longueur égale à cinq fois le diamètre de chaque barre testée. Par exemple, les longueurs étaient de 47,625 mm (1,875 pouces) pour les barres #3, 63,5 mm (2,5 pouces) pour les #4, 80 mm (3,15 pouces) pour les #5, 95,25 mm (3,75 pouces) pour les #6, et 127 mm (5 pouces) pour les #8. Cette méthode de préparation des échantillons assure une uniformité dans les tests et permet une évaluation précise de la résistance au cisaillement interlaminaire des barres PRF. La mise en place des barres sur les instruments utilisés pour les tests est illustrée dans la figure 4.9.

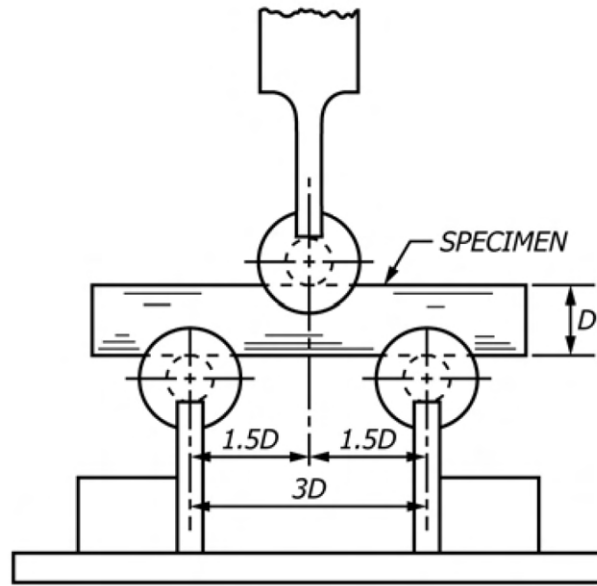
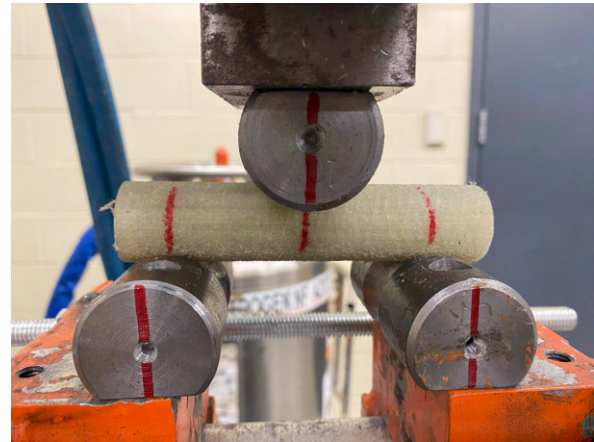


FIGURE 4.8 Configuration de la portée avec les détails des distances entre les appuis [30]



(a) Positionnement de la barre de PRFB sur les lignes tracées sur les appuis



(b) Positionnement de la barre de PRFV sur les lignes tracées sur les appuis

FIGURE 4.9 Mise en place des barres de PRFB et PRFV sur les appuis, conformément aux lignes tracées sur les barres et les appuis

La contrainte de cisaillement interlaminaire exercée sur les barres testées a été calculée à l'aide de l'équation 4.5 conformément à la norme ASTM D4475-21 [30].

$$S = 0.849 \times \frac{P}{d^2} ; (\text{N/m}^2) \quad (4.5)$$

où :

- P est la charge à la rupture, en Newton (N) ;

- S est la contrainte d'adhérence du béton, en Newtons par mètre carré (N/m^2).

4.2.4 Résistance au Cisaillement Transversal

La résistance au cisaillement transversal est une mesure clé de la résistance de la résine utilisée dans la fabrication des barres en Polymère Renforcé de Fibres (PRF). Cette propriété est particulièrement importante pour évaluer la capacité des barres PRF à résister aux forces de cisaillement qui peuvent se produire dans des applications structurales [41].

Conformément aux normes établies par la CSA S807-19 [84], l'évaluation de la résistance au cisaillement transversal des barres en PRF doit être effectuée suivant les protocoles définis par la norme ASTM D7617/D7617M-11 [14]. Le dispositif d'essai conçu pour mesurer cette résistance est spécifiquement adapté pour garantir des résultats précis. Il se compose de deux pièces en acier en forme de V, formant un siège pour la barre, et de deux lames inférieures créant un espace pour l'insertion de la lame supérieure, laquelle est connectée à la machine (MTS) (figure 4.10) de test pour appliquer la charge sur la barre. Ce dispositif comprend aussi des guides pour faciliter l'insertion de la lame supérieure et est équipé de lames de cisaillement de tailles diverses afin de s'adapter aux différentes tailles de barres utilisées dans l'étude [41]. La configuration de ce dispositif d'essai est illustrée dans la figure 4.11.



(a) Mâchoire hydraulique inférieure



(b) Mâchoire hydraulique supérieure



(c) Machine hydraulique MTS 647

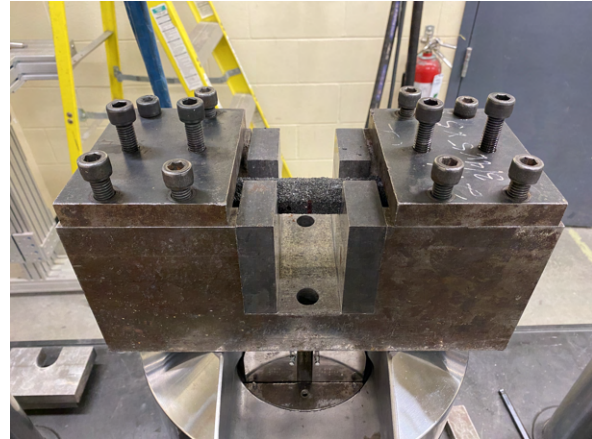
FIGURE 4.10 Composants de la machine hydraulique MTS 647 conçue pour les essais de cisaillement

Pour cette série d'essais, cinq spécimens mesurant 225 mm (9 pouces) de long ont été préparés. Chaque spécimen a été inséré à travers le siège de barre en forme de V (figure 4.11a) et fixé à l'aide de vis (figure 4.11b). La vitesse de chargement a été réglée sur un contrôle de

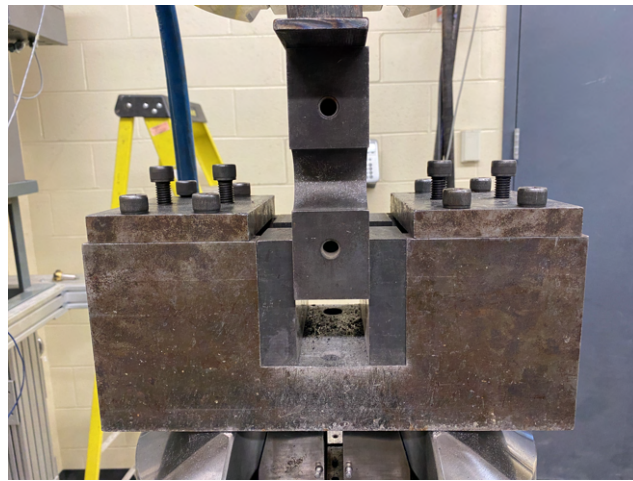
déplacement de 2,3 mm/min (0,09 pouce/min) pour toutes les tailles de barres. Ce réglage a été choisi pour garantir que la rupture de l'échantillon se produise dans un intervalle de temps compris entre une et dix minutes, permettant ainsi une évaluation précise de la résistance au cisaillement transversal.



(a) Mise en place de la barre sur les deux lames inférieures



(b) Fixation de la barre avec les vis



(c) Descente de la lame supérieure sur la barre

FIGURE 4.11 Dispositif utilisé dans les essais de cisaillement transversal

La contrainte de cisaillement transversal appliquée sur la barre PRF est calculée en utilisant l'équation 4.6, fournie dans la norme ASTM D7617/D7617M-11 [14]. Cette formule permet de déterminer la contrainte en fonction de la force appliquée, de la géométrie de l'échantillon et des caractéristiques spécifiques du matériau. Cette méthode d'essai fournit des informations essentielles sur la performance des barres PRF, en particulier leur

capacité à maintenir l'intégrité structurelle sous des charges de cisaillement.

$$\tau_U = \frac{P_S}{2A}; (\text{MPa}) \quad (4.6)$$

où :

- P_S est la charge à la rupture, en Newtons (N) ;
- A est la section effective du spécimen, en mm^2 .

4.2.5 Résistance aux Alcalins

La résistance aux alcalins des barres PRF, notamment celles en fibres de basalte (PRFB) et en fibres de verre (PRFV), est un facteur déterminant pour évaluer leur durabilité dans les environnements de construction typiques, notamment dans le béton de ciment Portland. Ce dernier est caractérisé par un environnement hautement alcalin, avec un pH souvent compris entre 12 et 13, dépendant du mélange et du type de liant utilisé. La capacité des barres PRF à résister à la dégradation chimique dans de telles conditions est un indicateur essentiel de leur longévité en milieu réel.

Conformément aux normes de la CSA S807-19 [84], l'évaluation de la résistance aux alcalins des barres PRF doit être réalisée selon les protocoles de la norme ASTM D7705/D7705M [31], ou comme spécifié dans l'annexe M de la norme CSA S806-12 [83]. La norme ASTM D7705/D7705M [31] exige que les barres PRF soient conditionnées dans une solution aqueuse à une température de 60 ± 3 °C pour simuler la composition de l'eau de porosité du béton de ciment Portland. Plusieurs échantillons de différents diamètres de barres ont été immergés pendant trois mois dans un bassin en acier inoxydable placé dans une chambre à température contrôlée pour maintenir la température requise, comme illustré dans la figure 4.12.

Le bassin était hermétiquement fermé pour prévenir toute perte excessive d'humidité ou de température, ainsi que pour éviter la réaction de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) avec le dioxyde de carbone de l'air (CO_2). La solution de conditionnement comprenait 118,5 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 0,9 g de NaOH et 4,2 g de KOH par litre d'eau déionisée, avec un pH variant entre 12,6 et 13,0, comme indiqué dans le tableau 4.1.

TABLEAU 4.1 Composition chimique de la solution alcaline

Composition chimique de la solution alcaline			
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g)	NaOH (g)	KOH (g)	Eau (L)
118,5	0,9	4,2	1

Après l'exposition à cette solution, les barres PRF de verre et de basalte ont été soumises à des tests pour évaluer leurs propriétés mécaniques et physiques. Ces tests sont essentiels pour déterminer l'impact de l'exposition à un environnement alcalin sur la performance des barres PRF et leur potentiel d'utilisation dans des structures en béton, où la résistance aux conditions alcalines est primordiale pour la durabilité et la sécurité des constructions.

La rétention de la résistance à la traction des barres est calculée en utilisant l'équation 4.7, fournie dans la norme ASTM D7705/D7705M [31]. Cette formule permet de déterminer la résistance en fonction de la résistance des barres de référence et les barres conditionnées.

$$R_{et} = \frac{F_{tu1}}{F_{tu0}} \times 100; (\%) \quad (4.7)$$

où :

- R_{et} = est la rétention de la résistance à la traction, en pourcent (%);
- F_{tu0} = est la résistance à traction avant conditionnement, en Newtons (kN);
- F_{tul} = est la résistance à traction après conditionnement, en Newtons (kN).

La figure 4.12 montre les échantillons préparés pour déterminer la résistance à la traction des barres immergées dans une solution alcaline sans charge, tandis que la figure 4.13 présente les échantillons préparés pour déterminer la résistance à la traction des barres PRF avec charge.



FIGURE 4.12 Préparation des spécimens pour les tests de traction sans charges



FIGURE 4.13 Préparation des spécimens pour les tests de traction avec charges

4.3 Description des Essais de Propriétés Physiques

Comme les propriétés mécaniques, les propriétés physiques des barres d'armature en Polymère Renforcé de Fibres de Basalte (PRFB) et en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV) sont évaluées à travers un ensemble d'essais conformes aux standards des normes ASTM et CSA. Chaque essai a été mené avec précision et réalisé conformément aux normes pertinentes, assurant la fiabilité et la précision des résultats obtenus.

Les barres d'armature en PRFB et PRFV sont soumises à une série d'essais détaillés pour mesurer leur section effective, leur teneur en fibres, leur taux d'absorption d'humidité, leur température de transition vitreuse (T_g), leur taux de polymérisation, ainsi que leur analyse par Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) et Microscope électronique à balayage (MEB). La section effective est évaluée conformément à l'annexe A de la norme ASTM D792-20 [33], la teneur en fibre selon la norme ASTM D2584-18 [10], l'absorption d'humidité selon la norme ASTM D570-22 [12], la température de transition vitreuse (T_g) selon la norme ASTM E1356-23 [18], le taux de polymérisation selon la norme ASTM E2160-23 [21], l'IRTF selon la norme ASTM E168-16 (2023) [20], et le microscope électronique à balayage (MEB) est déterminé conformément à la norme CSA S807-19 [84].

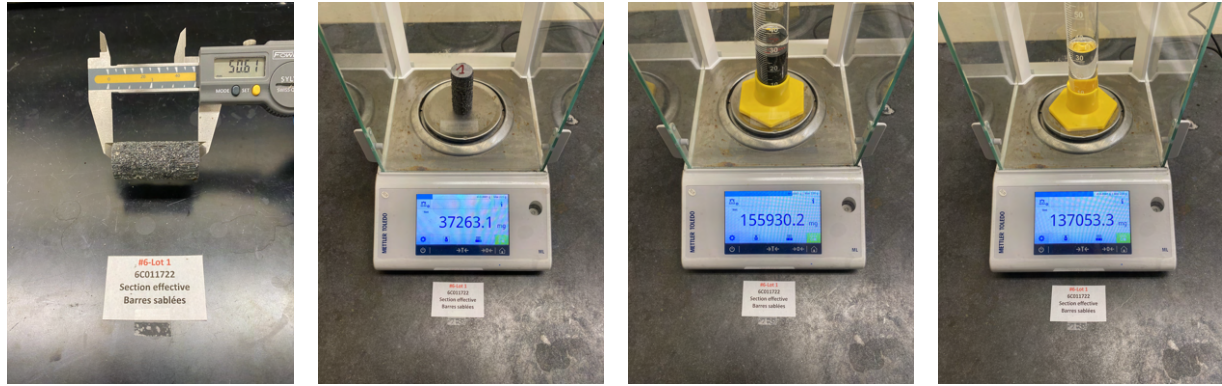
4.3.1 Section effective

La détermination de la section effective, qui représente la surface transversale réellement apte à supporter des charges, est un aspect fondamental dans le calcul de la capacité portante et la conception d'éléments structuraux en génie civil. Cette méthode permet d'évaluer de manière précise la capacité intrinsèque des barres à résister aux forces de traction et de compression. Conformément aux normes établies par la CSA S807-19 [84], l'évaluation de la densité des barres en PRF doit être effectuée suivant les protocoles

définis par la norme ASTM D792-20 [33], tel qu'indiqué dans l'annexe A de la norme CSA S806-12 [83]. À partir des données de densité, de poids et de longueur des spécimens, la section effective a été calculée. Il est à noter que la norme CSA S807-19 [84] et la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15] établissent les mêmes limites spécifiques pour la section effective en fonction du diamètre de chaque barre.

Suivant les directives de la norme ASTM D792-20 [33], un minimum de cinq spécimens pour chaque diamètre de barre a été préparé, veillant à ce que la masse de chaque spécimen reste idéalement inférieure à 50 grammes. Ces spécimens ont été séchés dans une température de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 10\%$, pour une durée minimale de 40 heures avant les tests.

La longueur et le diamètre de chaque spécimen ont été mesurés avec précision, et leur masse à sec a été déterminée (figure 4.14b). Pour obtenir la longueur moyenne, chaque spécimen a été mesuré trois fois le long de son bord extérieur, en effectuant une rotation de 120 degrés entre chaque mesure (figure 4.14a). Chaque spécimen a ensuite été immergé dans un récipient rempli d'eau, et la masse du récipient avec le spécimen et l'eau a été enregistrée (figure 4.14c). Cette mesure a été répétée avec le même niveau d'eau, mais sans le spécimen, pour déterminer la masse de l'eau seule (figure 4.14d).



(a) Longueur du spécimen (b) Poids du spécimen sec (c) Poids du spécimen dans l'eau (d) Poids du récipient avec l'eau

FIGURE 4.14 Procédure pour déterminer la section effective

La densité de chaque spécimen est calculée en utilisant une méthode basée sur le principe d'Archimède, qui implique la mesure du poids du spécimen dans l'air et sous l'eau. L'équation pour déterminer la densité est la suivante (4.8) :

$$\rho = 0.998 \times \frac{P_S}{P_S + P_W - P_{W+S}} \quad (4.8)$$

où ρ représente la densité du spécimen, P_S est le poids du spécimen sec dans l'air, P_W est le poids du récipient contenant l'eau, et P_{W+S} est le poids du récipient avec le spécimen immergé dans l'eau. Le facteur 0.998 correspond à la densité de l'eau à une température de 23 °C. Ce facteur a été considéré comme un constant pour toutes les mesures de densité. Le volume (mm^3) du spécimen a été déduit du rapport entre le poids du spécimen sec dans l'air (P_S) multiplié par 1000 et la densité calculée (ρ). L'équation pour déterminer le volume est la suivante (4.9) :

$$V = 1000 \times \frac{P_S}{\rho}; (\text{mm}^3) \quad (4.9)$$

La section effective des barres est obtenue en divisant le volume (V) par la longueur moyenne (L_m) du spécimen, comme l'indique l'équation (4.10) :

$$S = \frac{V}{L_m}; (\text{mm}^2) \quad (4.10)$$

Enfin, le diamètre exact des barres est déterminé par l'équation (4.11) :

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{A}{3.1416}}; (\text{mm}) \quad (4.11)$$

4.3.2 Teneur en fibres

La détermination précise de la teneur en fibres est essentielle dans la conception des composites en Fibres de Basalte (PRFB) ou en Fibres de Verre (PRFV). Cette mesure est cruciale, car les propriétés mécaniques du composite dépendent largement du rapport entre les fibres, qui confèrent la résistance en traction longitudinale, et la résine, responsable de la cohésion des fibres. Ainsi, un équilibre optimal entre ces deux composants est recherché pour garantir l'intégrité structurelle du composite.

Selon les spécifications de la norme CSA S807-19 [84], la quantification de la teneur en fibres dans les barres d'armature en PRFB ou PRFV (figure 4.15) doit être effectuée conformément aux protocoles de la norme ASTM D2584-18 [10] ou de la norme ASTM E1131-20 [16].

Dans le cadre de cette étude, il a été choisi d'appliquer la norme ASTM D2584-18 [10] pour cette quantification. Des essais ont été réalisés sur des barres de fibres de verre (figure 4.15a) et de basalte (figure 4.15b) de type 1 ainsi que sur des fibres de basalte de type 2 (figure 4.15c). Les mesures ont été effectuées sur des barres sablées et non sablées. Bien que la norme recommande la préparation d'au moins trois échantillons, cinq

spécimens de 25,4 mm de long pour chaque diamètre de barre (#3, #4, #5, #6 et #8) ont été préparés, afin de minimiser le risque de perte d'échantillon et d'assurer une plus grande fiabilité des résultats.



FIGURE 4.15 Teneur en fibres des barres sablées et non sablées

La méthodologie expérimentale a été conforme aux directives de la norme ASTM D2584-18 [10]. La procédure détaillée de détermination de la teneur en fibres, en particulier pour une barre de fibre de verre sablée, est présentée dans figure 4.16. Les échantillons ont été soumis à un séchage à température ambiante durant 40 heures avant pesage. La pesée a été effectuée avant (figure 4.16a) et après (figure 4.16c) le placement des échantillons dans un four calibré à une température de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 28\text{ }^{\circ}\text{C}$), légèrement inférieure à la température recommandée de $565\text{ }^{\circ}\text{C}$, afin de favoriser une dégradation intégrale de la résine. Cette phase thermique, d'une durée variant entre 12 et 24 heures selon le diamètre de la barre, a permis la décomposition totale de la matrice polymère. Les résidus, essentiellement composés de fibres (figure 4.16c), ont ensuite été récupérés et pesés. Le sable, lorsque présent, a été séparé et pesé distinctement (figure 4.16d). La teneur en fibres a été calculée à l'aide de formules spécifiques intégrées dans un fichier Excel dédié. Ce protocole a été appliqué de manière identique aux échantillons sablés et non sablés, garantissant ainsi une évaluation précise et fiable de la composition des composites.

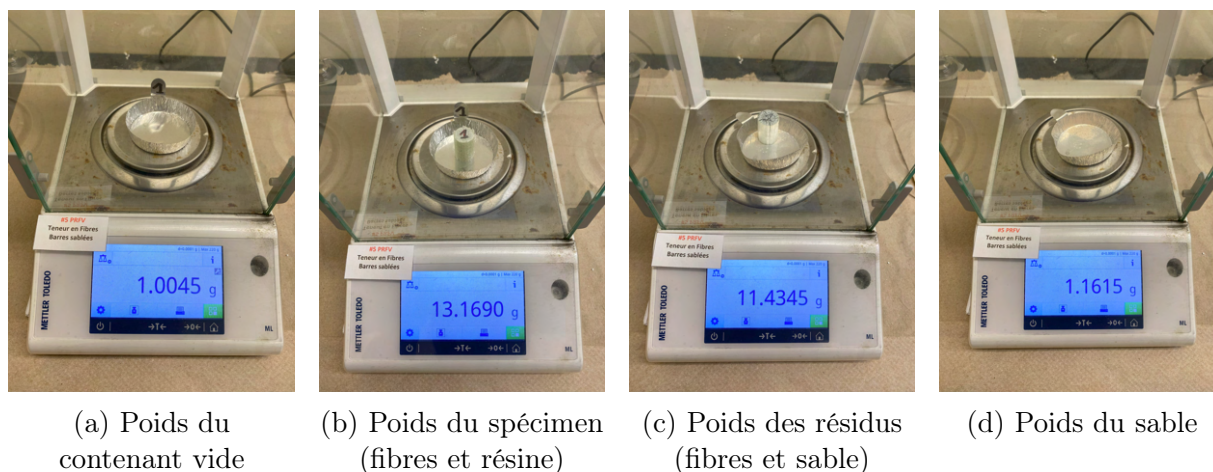


FIGURE 4.16 Procédure pour déterminer la teneur en fibres : exemple avec une barre en fibre de verre sablée

4.3.3 Taux d'absorption d'humidité

Les essais d'absorption d'humidité constituent un élément fondamental de ce projet, formant la base de toutes les déductions et hypothèses subséquentes. Il est donc primordial que les mesures d'absorption soient effectuées avec une précision et une rigueur exemplaires. Ces mesures sont obtenues par des pesées successives d'échantillons, minutieusement documentées dans le temps. La pesée initiale est réalisée sur des échantillons en état sec, afin de garantir la fiabilité des données recueillies.

Cependant, la mise en œuvre de ce processus s'est avérée complexe en raison de la composition spécifique des barres d'armature. Ces dernières, notamment celles fournies par Pultral, sont revêtues d'une couche sableuse destinée à améliorer l'adhérence avec le béton. Cette caractéristique pose un défi majeur : les grains de sable ont tendance à se détacher facilement lors de l'essuyage préalable à chaque pesée, faussant ainsi les mesures de masse. Il a été observé que la perte de masse due à cette désolidarisation est comparable à l'augmentation de masse résultant de l'absorption d'humidité, créant ainsi une source significative d'erreur dans les résultats.

Face à ce problème, nous avons opté pour l'utilisation des barres similaires en termes de caractéristiques et de processus de fabrication, mais distinctes par l'absence de revêtement sableux, comme indiqué dans la figure 4.17a. Ces barres, composées de fibres de basalte, ont permis une évaluation plus précise du taux d'absorption d'humidité des barres en PRFB. Les tests ont été menés sur trois lots de barres de type 2 de différents diamètres (#5, #6 et #8).

Selon la norme CSA S807-19 [84], le taux d'absorption d'eau des barres en PRF doit être déterminé en suivant la méthode décrite dans la norme ASTM D570-22 [12]. Le Taux d'absorption d'humidité est calculé en utilisant l'équation (4.12), où W_s et W_d représentent respectivement le poids de la barre saturée et le poids à sec :

$$W = 100 \times \frac{W_s - W_d}{W_d}; (\%) \quad (4.12)$$

Conformément à la norme ASTM D570-22 [12], les spécimens, dont la taille est fixée à 25.4 mm (figure 4.17b), ont été préparés pour chaque diamètre de barre. Après un séchage à température ambiante et une pesée initiale, les spécimens ont été immergés dans l'eau et placés dans un four à 50 °C (figure 4.17c). Les échantillons ont été périodiquement retirés, essuyés superficiellement, pesés, puis réintroduits dans l'eau et le four jusqu'à atteindre un état de saturation. La saturation est considérée comme atteinte lorsque deux pesées successives indiquent un poids constant [24].

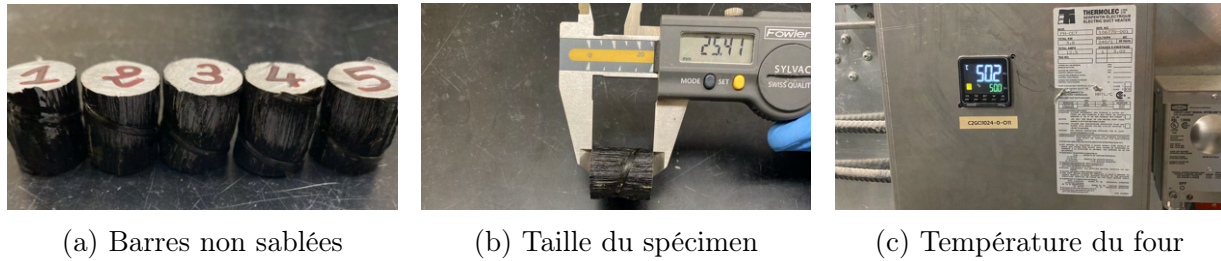


FIGURE 4.17 Taux d'absorption des barres non sablées

L'évaluation de l'absorption d'humidité s'est déroulée en deux phases distinctes : une évaluation à court terme et une à long terme. Dans la phase à court terme, les échantillons ont été immergés pendant 24 heures, simulant une exposition brève, mais intense à l'humidité, afin de mesurer la réactivité initiale des matériaux face à l'absorption d'eau. La phase à long terme a consisté en une immersion continue des échantillons jusqu'à saturation, représentant une exposition prolongée à l'humidité typique des environnements de génie civil. Cette saturation est définie par la stabilisation du poids de l'échantillon entre deux mesures consécutives.

4.3.4 Température de transition vitreuse

La température de transition vitreuse (T_g) est la température à laquelle la résine passe d'un état vitreux et cassant à un état plus plastique et ductile. Ce phénomène est caractérisé par un ramollissement de la résine, affectant significativement les performances des Polymères Renforcés de Fibres (PRF), notamment en termes de résistance au feu, de flexibilité et d'adhérence. Même en l'absence d'air et malgré la protection offerte par le béton, la résine des PRF peut subir des changements physiques sous l'effet de températures élevées. La T_g des barres de PRF dépasse généralement 100 °C. À cette température, plusieurs propriétés sont affectées, en particulier la résistance à la flexion et l'adhérence des barres. Cela souligne la nécessité d'études approfondies pour comprendre comment les barres réagissent sous l'effet de la température.

Conformément à la norme CSA S807-19 [84], la température de transition vitreuse (T_g) des barres en PRF doit être déterminée en suivant les méthodes d'essai des normes ASTM E1356-23 [18], ASTM D3418-21 [11] ou ASTM E1640-23 [19]. La norme CSA S807-19 [84] spécifie une T_g minimale de 80 °C pour les barres de classe de durabilité modérée (D2) et de 100 °C pour celles de classe de durabilité élevée (D1) pour les analyses par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC), et de 90 °C pour les barres D2 et 110 °C pour les barres D1 en analyses mécaniques dynamiques.

La méthode couramment utilisée pour mesurer la T_g est la Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC), basée sur la norme ASTM E1356-23 [18]. Pour ces essais, des échantillons

conditionnés et non conditionnés, pesant entre 30 et 50 mg, sont prélevés sur des barres de PRFB et PRFV [24]. Ces échantillons sont soigneusement découpés pour s'adapter aux plateaux d'aluminium utilisés dans la DSC. Après pesée, ils sont placés dans des récipients en aluminium et chauffés de 30 à 230 °C sous un flux d'azote gazeux à une vitesse de 20 °C/min, comme indiqué dans la figure 4.18.



FIGURE 4.18 Préparation du spécimen pour le test de détermination de la température de transition vitreuse

La valeur de T_g est déterminée à mi-hauteur du saut de capacité calorifique, caractérisé par un changement brutal de courbure dans la courbe de DSC, comme illustré dans la figure 4.19.

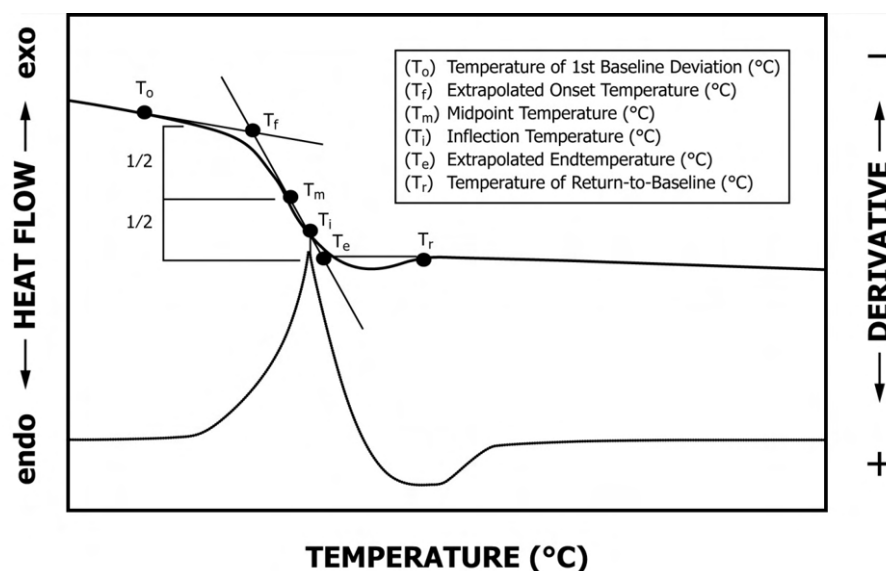


FIGURE 4.19 Courbe typique d'une mesure par DSC [18]

4.3.5 Taux de Polymérisation

Le taux de polymérisation est un indicateur clé de la qualité de la cure de la résine. Une polymérisation incomplète peut compromettre les propriétés physiques et mécaniques du matériau, entraînant par exemple une température de transition vitreuse réduite, un module de Young diminué ou une résistance à la rupture inférieure. L'utilisation de la Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) permet de détecter un éventuel pic de post-polymérisation lors du chauffage de la résine, indiquant l'enthalpie de post-polymérisation du composite. Cette enthalpie est ensuite comparée à celle de la résine liquide pour déterminer le taux de cure.

Selon la norme CSA S807-19 [84], le taux de polymérisation des barres en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) doit être évalué conformément à l'Annexe A de cette norme. Bien que cette norme ne spécifie pas de valeurs minimales ou maximales pour le taux de polymérisation, la norme ASTM E2160-23 [21] a été choisie comme référence, comme indiqué dans la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15], stipulant un taux de cure minimum de 95 % pour les barres PRF [24].

Pour ces analyses, cinq échantillons de barres PRFB et PRFV, pesant entre 30 et 50 mg, ont été prélevés et préparés. Ces échantillons ont été placés dans des récipients en aluminium et chauffés de 30 à 230 °C sous un flux d'azote gazeux à une vitesse de 20 °C/min, comme indiqué dans la figure 4.18.

Le taux de polymérisation est déterminé en utilisant l'équation (4.13) :

$$C = 100 \times \frac{\Delta H_{\text{total}} - \Delta H_R}{\Delta H_{\text{total}}}; (\%) \quad (4.13)$$

où ΔH_{total} est l'enthalpie totale de polymérisation de la résine (J/g) et ΔH_R est l'enthalpie résiduelle de polymérisation du spécimen (J/g). Cette méthode assure une évaluation précise et fiable du degré de cure de la résine dans les composites PRF, un aspect crucial pour garantir la performance optimale des matériaux dans des applications de génie civil.

4.3.6 Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) est une méthode analytique puissante pour étudier la composition chimique des composites en Polymère Renforcé de Fibres (PRF), tels que les barres en fibres de basalte et de verre. Cette technique est particulièrement efficace pour identifier les groupements chimiques et détecter les changements dans ces composants, permettant ainsi d'étudier des phénomènes tels que la réticulation, le

vieillissement et la dégradation chimique des matériaux. La figure 4.20 illustre le dispositif utilisé pour l'enregistrement des spectres IRTF.



FIGURE 4.20 Spectromètre
FT/IR-4600 FTIR

L'une des applications clés de l'IRTF est l'évaluation de la dégradation chimique des liaisons ester dans les composites de vinylester, particulièrement lorsqu'ils sont exposés à des environnements corrosifs, comme les solutions alcalines. Cela est crucial pour comprendre la résilience et la durabilité des composites PRF dans des conditions difficiles.

Pour mener cette étude, trois échantillons de chaque dimension de barres en PRF de basalte et de verre, à la fois conditionnés et non conditionnés (échantillons de référence), ont été testés conformément aux directives de la norme CSA S807-19 [84]. Cette norme suggère l'utilisation des méthodes d'essai ASTM E168-16 (2023) [20] ou ASTM E1252-98 (2021) [17]. Dans notre cas, la norme ASTM E168-16 (2023) [20] a été utilisée pour enregistrer les spectres IRTF. Ces spectres ont été obtenus à l'aide d'un spectromètre Jasco 4600 IRTF équipé d'un dispositif de réflectance diffusée. Ce dispositif permet une analyse précise et détaillée des échantillons, fournissant des informations essentielles sur la structure chimique et la stabilité des matériaux composites.

4.3.7 Microscope électronique à balayage (MEB)

Le test au Microscope Électronique à Balayage (MEB) est une technique d'analyse essentielle dans l'étude des barres en Polymère Renforcé de Fibres (PRF), offrant une visualisation de haute résolution indispensable pour examiner la structure interne de ces composites. Cette méthode d'imagerie avancée est essentielle pour une analyse détaillée de l'interface entre les fibres et la résine, permettant de détecter les défauts microscopiques comme les fissures, vides ou pores, et d'évaluer la répartition des fibres au sein de la matrice de résine. Ces éléments, visibles lors d'un balayage microscopique, sont cruciaux pour assurer la résistance mécanique, la durabilité du composite et pour prévenir

les éventuelles défaillances structurales. Les divers défauts pouvant être observés grâce au MEB sont illustrés dans la figure 4.21.

Le MEB permet également de vérifier l'efficacité des traitements de surface appliqués aux barres PRF, tels que le sablage ou les traitements chimiques, qui sont destinés à améliorer l'adhérence avec le béton ou à augmenter la résistance à des facteurs environnementaux spécifiques.

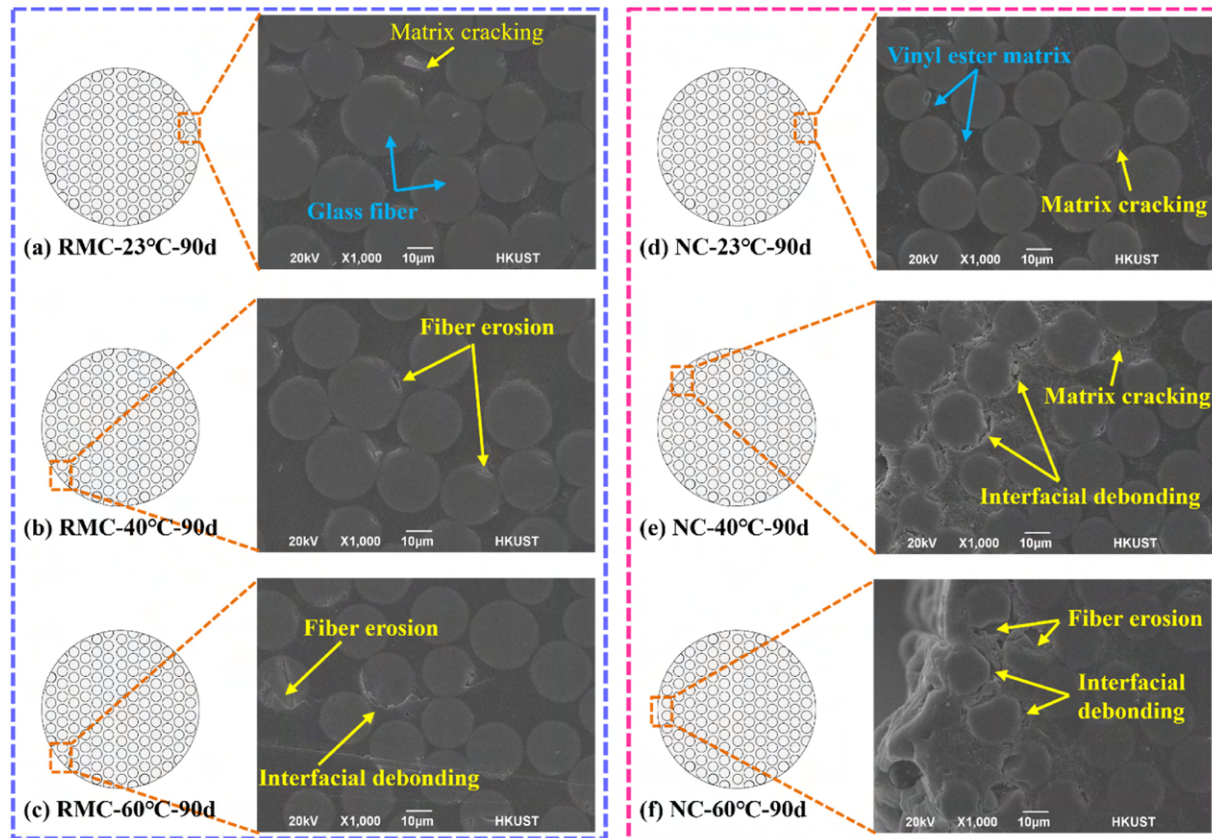


FIGURE 4.21 Observations microscopiques de la dégradation des fibres et de la matrice dans les barres d'armature en PRFV [100]

Pour la caractérisation au MEB, des échantillons de barres de PRFB et de PRFV sont d'abord coupés transversalement à l'aide d'une scie conçue spécifiquement pour les composites à matrice polymère. Ces échantillons sont successivement polis avec trois types de pâte diamantée de granulométrie décroissante (15, 3 et 1 μm). Les échantillons sont ensuite placés dans des récipients appropriés et entièrement recouverts de résine. Après polymérisation de la résine, une partie de celle-ci est coupée jusqu'à ce que la surface de l'échantillon soit atteinte. Les surfaces externes sont ensuite polies des deux côtés des échantillons pour exposer complètement la surface des barres. Les spécimens sont alors

montés sur des supports adaptés et recouverts d'une fine couche de métal conducteur pour améliorer leur conductivité électrique, préparant ainsi les échantillons pour l'examen au MEB. Toutes ces étapes sont illustrées dans la figure figure 4.22.

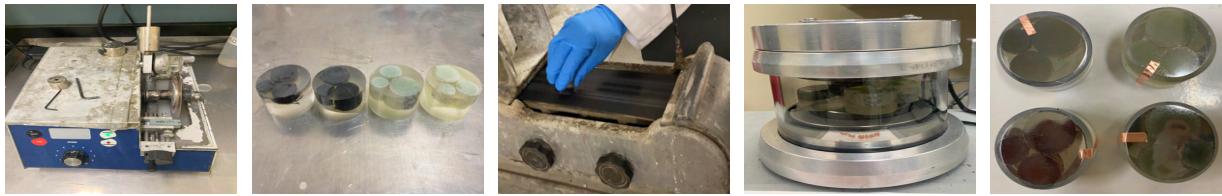


FIGURE 4.22 Procédure de test au Microscope Électronique à Balayage (MEB)

Les analyses MEB qui en résultent fournissent des images détaillées de la microstructure des échantillons. Cette méthode d'imagerie avancée permet une compréhension profonde des caractéristiques matérielles des composites en PRF, garantissant ainsi leur qualité et leur fiabilité pour les applications en génie civil.

4.4 Conclusion

Les résultats de cette étude comparative offriront une évaluation approfondie de la performance des barres en fibres de Basalte (PRFB) face aux barres en fibres de Verre (PRFV) dans un environnement simulant les conditions réelles des structures en béton. Cette analyse contribuera à enrichir la base de données existante, permettant ainsi de déterminer l'adéquation des normes et codes actuels ou la nécessité de leur révision pour refléter plus fidèlement les capacités de ces matériaux avant-gardistes dans le secteur du génie civil.

En résumé, l'objectif principal de cette recherche est de déceler une compréhension plus nuancée des propriétés et du comportement des barres d'armature en PRFB et PRFV, particulièrement en termes de leur durabilité et efficacité dans des conditions analogues à leur mise en œuvre dans des structures en béton. Les conclusions tirées de cette étude apporteront une contribution significative au corpus de connaissances en génie civil, influençant positivement les futures normes de construction et les décisions de conception pour les infrastructures à venir.

Le choix entre ces deux variantes de barres d'armature sera ainsi guidé par une évaluation rigoureuse de leurs performances respectives, prenant en compte les conditions environnementales spécifiques, les critères de résistance et de durabilité exigés, et les considérations budgétaires. Cette démarche assure que les ingénieurs et les concepteurs disposent d'une base de connaissances solide pour sélectionner le matériau le plus approprié à leurs projets de construction spécifiques.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET ANALYSES

5.1 Propriétés mécaniques

Les tests pour la détermination des propriétés mécaniques des barres en PRF, ont été menés conformément aux normes ASTM et CSA, qui définissent les cadres méthodologiques pour les tests de résistance à la traction, d'arrachement, de cisaillement interlaminaire et de cisaillement transversal. L'objectif principal de ces essais est de fournir une comparaison fiable entre les performances des barres en fibre de basalte (PRFB) et celles des barres en fibre de verre (PRFV).

5.1.1 Résistance à la traction

La résistance à la traction des barres en fibre de basalte et de verre de type 1 et de basalte de type 2 a été déterminée par des tests, dont les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Les valeurs de la contrainte de traction ultime (F_{tu}), le module d'élasticité (E) et la déformation ultime (ε) obtenues ont été comparées aux limites établies par la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15], laquelle spécifie un module d'élasticité minimum de 44,8 GPa et une déformation ultime minimum de 1,1 %. Les valeurs minimales de contrainte de traction ultime nécessaires pour chaque diamètre de barres sont présentées dans tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 Minimum de la contrainte de traction ultime de barres en PRF pour chaque barre selon la norme ASTM D7957/D7957M-22 (kN) [15]

Barre	Minimum
#3	59
#4	96
#5	130
#6	182
#8	297

Barres de type 1**Barres en fibres de basalte**

1. Les barres **#3** (tableau 5.2) révèlent des résistances à la traction moyenne de 1007 MPa, un module d'élasticité moyen de 67,0 GPa, et une déformation ultime moyenne de 1,51 %.
2. Les barres **#4** (tableau 5.3) affichent une moyenne de résistance à la traction de 845 MPa, avec un module d'élasticité moyen de 64,6 GPa et une déformation ultime moyenne de 1,31 %.
3. Concernant les barres **#5** (tableau 5.4), les résultats indiquent une résistance à la traction moyenne de 985 MPa, un module d'élasticité moyen de 62,1 GPa, et une déformation ultime moyenne de 1,59 %.
4. Enfin, pour les barres **#6** (tableau 5.5), l'analyse montre une résistance à la traction moyenne de 972 MPa, un module d'élasticité moyen de 62,9 GPa, et une déformation ultime moyenne de 1,55 %.

Ces résultats révèlent que les barres en PRFB de type 1 non seulement respectent mais surpassent les exigences de la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15]. Leur haute résistance à la traction, modules d'élasticité élevés et déformations ultimes satisfaisantes démontrent leur potentiel comme solution de choix pour le renforcement et la construction dans le génie civil.

TABLEAU 5.2 Résistance à la traction des barres **#3** en PRFB de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	40	567	69,1	0,82
2	78	1094	69,0	1,59
3	80	1127	65,9	1,71
4	80	1124	63,2	1,78
5	80	1125	67,7	1,66
Moyenne	72	1007	67,0	1,51
Écart type	17,50	246,52	2,48	0,39
COV (%)	24,47	24,47	3,70	25,96

TABLEAU 5.3 Résistance à la traction des barres #4 en PRFB de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	100	777	64,0	1,21
2	114	886	65,9	1,34
3	110	857	66,7	1,28
4	110	853	63,8	1,34
5	110	853	62,8	1,36
Moyenne	109	845	64,6	1,31
Écart type	5,21	40,35	1,62	0,06
COV (%)	4,77	4,77	2,51	4,56

TABLEAU 5.4 Résistance à la traction des barres #5 en PRFB de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	183	921	61,4	1,50
2	193	970	59,9	1,62
3	194	975	67,7	1,44
4	209	1049	60,9	1,72
5	201	1012	60,8	1,67
Moyenne	196	985	62,1	1,59
Écart type	9,53	47,87	3,12	0,12
COV (%)	4,86	4,86	5,03	7,32

TABLEAU 5.5 Résistance à la traction des barres #6 en PRFB de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	241	848	62,1	1,36
2	255	898	64,0	1,40
3	300	1058	63,5	1,67
4	293	1032	61,3	1,68
5	291	1025	63,4	1,62
Moyenne	276	972	62,9	1,55
Écart type	26,47	93,21	1,11	0,15
COV (%)	9,59	9,59	1,77	9,82

Barres en fibres de verre

Les essais de résistance à la traction sur les barres en PRFV de type 1 ont révélé des performances supérieures, surpassant les attentes et démontrant l'excellence des matériaux composites utilisés. Une évaluation détaillée pour les diamètres #3, #4, #5, #6, et #8 révèle leur potentiel significatif pour des applications dans le secteur du génie civil, grâce à leur résistance exceptionnelle et à leur ductilité. Voici un aperçu des résultats obtenus :

1. Les barres #3 (tableau 5.6) en PRFV ont montré une résistance à la traction moyenne impressionnante de 1243 MPa, avec un module d'élasticité moyen de 68,5 GPa et une déformation ultime moyenne de 1,81 %.
2. Pour les barres #4 (tableau 5.7), la résistance à la traction moyenne atteinte 1030 MPa, accompagnée d'un module d'élasticité moyen de 65,7 GPa et d'une déformation ultime moyenne de 1,57 %.
3. Les barres #5 (tableau 5.8) affichent une résistance à la traction moyenne de 1007 MPa, un module d'élasticité moyen de 65 GPa, et une déformation ultime moyenne de 1,55 %.
4. Concernant les barres #6 (tableau 5.9), elles révèlent une résistance moyenne à la traction de 864 MPa, un module d'élasticité moyen de 64,8 GPa, et une déformation ultime moyenne de 1,34 %.
5. Enfin, les barres #8 (tableau 5.10) démontrent une résistance à la traction moyenne de 765 MPa, avec un module d'élasticité moyen de 63,2 GPa et une déformation ultime moyenne de 1,22 %. Bien que légèrement inférieurs à ceux des diamètres plus petits, ces résultats restent impressionnants, mettant en avant la durabilité et la fiabilité des barres de plus grand diamètre.

Ces données, illustrant clairement la supériorité des barres en PRFV de type 1, soutiennent leur application avantageuse dans des projets de construction et de rénovation où la performance mécanique est critique. Leur résistance élevée à la traction, couplée à d'excellents modules d'élasticité et des déformations ultimes significatives, en fait des candidats idéaux pour renforcer la sécurité et la durabilité des structures civiles.

TABLEAU 5.6 Résistance à la traction des barres #3 en PRFV de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	102	1439	69,2	2,08
2	83	1163	64,3	1,81
3	86	1208	73,1	1,65
4	87	1229	68,9	1,79
5	83	1175	67,3	1,75
Moyenne	88	1243	68,5	1,81
Écart type	8,01	112,81	3,20	0,16
COV (%)	9,08	9,08	4,67	8,82

TABLEAU 5.7 Résistance à la traction des barres #4 en PRFV de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	112	872	66,5	1,31
2	130	1011	67,2	1,50
3	142	1101	67,1	1,64
4	141	1092	65,4	1,67
5	138	1071	62,2	1,72
Moyenne	133	1030	65,7	1,57
Écart type	12,25	94,98	2,07	0,17
COV (%)	9,23	9,23	3,15	10,55

TABLEAU 5.8 Résistance à la traction des barres #5 en PRFV de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	184	927	63,0	1,47
2	210	1054	64,7	1,63
3	210	1054	65,2	1,62
4	192	966	66,1	1,46
5	206	1036	66,2	1,56
Moyenne	200	1007	65,0	1,55
Écart type	11,47	57,64	1,29	0,08
COV (%)	5,72	5,72	1,98	5,10

TABLEAU 5.9 Résistance à la traction des barres #6 en PRFV de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	240	846	64,4	1,31
2	241	847	66,7	1,27
3	242	851	66,8	1,27
4	250	880	62,5	1,41
5	254	895	63,4	1,41
Moyenne	245	864	64,8	1,34
Écart type	6,29	22,16	1,93	0,07
COV (%)	2,57	2,57	2,98	5,23

TABLEAU 5.10 Résistance à la traction des barres #8 en PRFV de type 1

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	376	738	62,8	1,18
2	392	769	60,8	1,26
3	392	768	70,9	1,08
4	395	775	61,1	1,27
5	396	777	60,4	1,29
Moyenne	390	765	63,2	1,22
Écart type	8,06	15,81	4,42	0,09
COV (%)	2,07	2,07	7,00	7,11

Barres de type 2

1. Les barres de diamètre #5 présentent des résistances à la traction très élevées, avec des moyennes oscillant autour de 972 MPa pour le Lot 1 (tableau 5.11), 998 MPa pour le Lot 2 (tableau 5.12), et 980 MPa pour le Lot 3 (tableau 5.13), accompagnées de modules d'élasticité autour de 63 GPa et des déformations ultimes supérieures à 1,5 %. Cette cohérence des performances à travers les lots témoigne d'une fabrication de haute précision et d'une qualité de matériau constante.
2. Les barres de diamètre #6 présentent des résultats sont tout aussi remarquables, avec des moyennes de résistance à la traction proches de 867 MPa pour le Lot 1 (tableau 5.14), 864 MPa pour le Lot 2 (tableau 5.15), et 877 MPa pour le Lot 3 (tableau 5.16). Ces valeurs sont associées à des modules d'élasticité avoisinant les

58 GPa et des déformations ultimes autour de 1,5 %. La légère variation entre les lots reflète une maîtrise du processus de fabrication, garantissant une performance mécanique fiable et prévisible.

3. Les barres de diamètre #8, quant à elles, affichent des résistances à la traction légèrement inférieures, avec des moyennes autour de 675 MPa pour le Lot 1 (tableau 5.17), 661 MPa pour le Lot 2 (tableau 5.18), et 681 MPa pour le Lot 3 (tableau 5.19), mais maintiennent des modules d'élasticité et des déformations ultimes comparables aux diamètres plus petits. Cette réduction de la résistance à la traction pour un diamètre plus grand peut être attribuée à des facteurs inhérents au processus de pultrusion et aux propriétés de la fibre de basalte.

Globalement, ces résultats mettent en évidence non seulement la capacité des barres PRFB de type 2 à répondre aux exigences rigoureuses des applications de génie civil indiquées dans la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15], mais aussi leur potentiel à offrir des solutions de renforcement durables et fiables. La combinaison d'une résistance élevée à la traction, de modules d'élasticité élevés et de bonnes déformations ultimes rend ces barres particulièrement adaptées aux applications exigeantes, où les performances structurelles et la durabilité sont essentielles.

TABLEAU 5.11 Résistance à la traction des barres #5-Lot 1 en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	185	929	62,9	1,48
2	194	973	60,6	1,61
3	196	983	65,5	1,50
4	197	992	63,0	1,57
5	193	968	63,5	1,52
6	193	970	64,4	1,50
7	195	982	64,1	1,53
8	194	974	62,5	1,56
9	194	977	64,5	1,51
10	193	972	62,0	1,57
Moyenne	193	972	63,3	1,54
Écart type	3,3	16,6	1,4	0,00
COV (%)	1,7	1,7	2,2	2,58

TABLEAU 5.12 Résistance à la traction des barres #5-Lot 2 en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	216	1086	60,9	1,78
2	196	983	65,0	1,51
3	193	968	62,9	1,54
4	193	968	60,4	1,60
5	192	966	61,6	1,57
6	191	962	62,4	1,54
7	199	998	65,1	1,53
8	203	1019	61,1	1,67
9	192	967	62,6	1,54
10	211	1060	61,2	1,73
Moyenne	199	998	62,3	1,60
Écart type	8,8	44,0	1,6	0,00
COV (%)	4,4	4,4	2,6	0,17

TABLEAU 5.13 Résistance à la traction des barres #5-Lot 3 en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	194	973	62,0	1,57
2	192	966	64,1	1,51
3	193	968	63,2	1,53
4	205	1029	61,9	1,66
5	195	981	61,4	1,60
6	197	988	62,0	1,59
7	196	986	63,9	1,54
8	194	976	66,2	1,47
9	193	969	62,9	1,54
10	192	966	63,4	1,52
Moyenne	195	980	63,1	1,55
Écart type	3,8	19,0	1,4	1,32
COV (%)	1,9	1,9	2,3	0,08

TABLEAU 5.14 Résistance à la traction des barres #**6-Lot 1** en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	245	864	58,2	1,49
2	243	857	58,2	1,47
3	243	854	59,6	1,43
4	244	859	58,0	1,48
5	244	859	56,2	1,53
6	245	862	56,9	1,51
7	243	854	57,9	1,48
8	268	943	60,7	1,55
9	243	856	58,7	1,46
10	243	857	56,4	1,52
Moyenne	246	867	58,1	1,49
Écart type	7,7	27,1	1,4	1,95
COV (%)	3,1	3,1	2,4	0,13

TABLEAU 5.15 Résistance à la traction des barres #**6-Lot 2** en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	237	836	59,0	1,42
2	241	849	58,3	1,46
3	240	847	56,3	1,51
4	250	879	57,1	1,54
5	242	852	58,3	1,46
6	251	883	55,8	1,58
7	241	848	58,7	1,44
8	245	864	57,4	1,50
9	242	851	59,3	1,43
10	266	936	58,4	1,60
Moyenne	245	864	57,9	1,49
Écart type	8,3	29,3	1,2	0,00
COV (%)	3,4	3,4	2,0	0,17

TABLEAU 5.16 Résistance à la traction des barres **#6-Lot 3** en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	236	832	59,2	1,41
2	247	868	59,3	1,47
3	246	868	57,2	1,52
4	243	856	57,2	1,50
5	257	907	60,2	1,51
6	250	880	58,0	1,52
7	263	925	58,7	1,58
8	244	858	59,4	1,44
9	256	903	57,1	1,58
10	247	870	58,4	1,49
Moyenne	249	877	58,5	1,50
Écart type	7,9	27,7	1,1	0,00
COV (%)	3,2	3,2	1,8	0,17

TABLEAU 5.17 Résistance à la traction des barres **#8-Lot 1** en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	346	678	50,0	1,36
2	348	682	52,3	1,30
3	348	682	49,9	1,37
4	342	671	52,1	1,29
5	343	673	50,7	1,33
6	344	675	51,4	1,31
7	346	678	50,7	1,34
8	343	672	53,1	1,27
9	345	677	52,8	1,28
10	341	669	51,8	1,29
Moyenne	344	675	51,5	1,31
Écart type	2,2	4,4	1,1	0,00
COV (%)	0,7	0,7	2,2	0,03

TABLEAU 5.18 Résistance à la traction des barres **#8-Lot 2** en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	332	650	51,2	1,27
2	336	659	51,8	1,27
3	337	661	52,7	1,25
4	336	659	53,6	1,23
5	341	668	53,1	1,26
6	338	663	53,3	1,24
7	336	660	53,0	1,24
8	338	663	53,0	1,25
9	338	664	53,7	1,24
10	337	661	52,2	1,27
Moyenne	337	661	52,8	1,25
Écart type	2,3	4,6	0,8	0,00
COV (%)	0,7	0,7	1,5	0,04

TABLEAU 5.19 Résistance à la traction des barres **#8-Lot 3** en PRFB de type 2

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	345	676	51,9	1,30
2	350	687	51,9	1,32
3	346	678	53,2	1,28
4	346	679	53,4	1,27
5	349	684	51,2	1,34
6	352	691	53,9	1,28
7	349	684	53,7	1,28
8	344	675	54,0	1,25
9	344	675	51,4	1,31
10	349	683	53,7	1,27
Moyenne	347	681	52,8	1,29
Écart type	2,8	5,5	1,1	0,00
COV (%)	0,8	0,8	2,1	0,04

5.1.2 Résistance à l'arrachement des barres

La résistance à l'arrachement des barres en fibre de basalte et de verre de type 1 et de basalte de type 2 est présentée dans les tableaux suivants. Les valeurs de contrainte à l'arrachement des barres (τ) obtenues ont été comparées aux limites définies dans la norme CSA S807-19 [84], laquelle spécifie une limite de 10 MPa.

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Les résultats des tests d'arrachement pour les barres en fibre de basalte de type 1 montrent une performance notable qui dépasse les exigences de la norme CSA S807-19, laquelle fixe une limite minimale de résistance à l'arrachement de 10 MPa.

1. Les barres de diamètres **#3** et **#4** démontrent des capacités d'arrachement particulièrement élevées, avec des moyennes respectives de 16 MPa et 11 MPa, soulignant une adhérence exceptionnelle au béton. Cette performance est significative, indiquant que les barres en fibre de basalte de type 1 peuvent offrir une liaison robuste dans les applications de renforcement structural.
2. Pour les barres de plus grands diamètres, **#5** et **#6**, les résultats sont également impressionnants. Les barres **#5** affichent une moyenne de résistance à l'arrachement de 13 MPa, tandis que les barres **#6** maintiennent une moyenne de 10 MPa, toutes deux confortablement au-dessus du seuil de la norme. Le diamètre **#6**, en particulier, montre une variabilité plus élevée dans la performance d'arrachement, comme indiqué par un coefficient de variation (COV) de 11,85 %, mais reste dans une gamme acceptable pour assurer une fiabilité dans des conditions d'application diverses.

TABLEAU 5.20 Résistance à l'arrachement des barres en fibre de basalte de type 1

Spécimen	#3		#4	
	<i>F</i> (KN)	τ (MPa)	<i>F</i> (KN)	τ (MPa)
1	25	16	29	11
2	26	17	28	10
3	23	15	29	11
4	28	18	31	12
5	21	14	34	13
Moyenne	25	16	30	11
Écart Type	2,63	1,67	2,35	0,89
COV (%)	10,59	10,59	7,85	7,85

TABLEAU 5.21 Résistance à l'arrachement des barres en fibre de basalte de type 1

Spécimen	#5		#6	
	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)
1	40	11	61	10
2	44	13	64	10
3	49	14	67	11
4	46	13	58	9
5	45	13	79	13
Moyenne	45	13	66	10
Écart Type	3,33	0,94	7,82	1,24
COV (%)	7,43	7,43	11,85	11,85

Barres en fibres de verre

Les tests d'arrachement pour les barres en fibre de verre (PRFV) de type 1 révèlent des performances qui satisfont et dépassent également les normes spécifiées par la CSA S807-19 [84], avec une limite de contrainte d'arrachement de 10 MPa. Les résultats pour les barres de diamètres #3, #4, #5, #6, et #8 montrent une résistance à l'arrachement remarquable, mettant en avant l'excellente adhérence de ces barres au béton.

1. Pour les barres de diamètre #3 (tableau 5.22), une uniformité exceptionnelle est observée avec une contrainte à l'arrachement constante de 13 MPa, démontrant leur capacité à fournir une liaison fiable et forte dans les structures de béton. Cette performance est particulièrement notable, étant donné que ces valeurs sont bien au-dessus de la limite minimale requise, ce qui indique une qualité supérieure du matériau et une efficacité dans les applications d'ancrage.
2. Les diamètres #4 et #5 (tableau 5.22) présentent des moyennes de contrainte à l'arrachement de 15 MPa et 16 MPa respectivement, confirmant la tendance des barres en PRFV à offrir une résistance supérieure, adaptée pour les applications nécessitant des niveaux élevés de performance en termes d'arrachement. La légère augmentation de la résistance à l'arrachement avec le diamètre suggère une capacité améliorée des barres plus larges à s'ancrer efficacement dans le béton.
3. Pour les diamètres plus importants, #6 et #8 (tableau 5.23), les résultats montrent des résistances à l'arrachement de 9 MPa et 10 MPa respectivement. Bien que ces valeurs restent proches ou égales à la limite stipulée par la norme CSA S807-19 [84],

elles indiquent une légère diminution de la performance par rapport aux diamètres plus petits. Cette tendance peut refléter les défis inhérents à l'ancrage de barres de plus grand diamètre ou une spécificité du matériau qui influence l'interaction avec le béton.

En somme, les barres en PRFV de type 1 démontrent une capacité d'arrachement robuste et fiable à travers tous les diamètres testés, affirmant leur aptitude à être intégrées dans des systèmes de renforcement où la sécurité, la durabilité, et l'efficacité de l'ancrage sont primordiales.

TABLEAU 5.22 Résistance à l'arrachement des barres en fibre de verre de type 1

Spécimen	#3		#4		#5	
	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)
1	20	13	43	16	59	17
2	20	13	41	15	55	16
3	20	13	38	14	51	15
4	20	13	39	15	59	17
5	20	13	37	14	54	15
Moyenne	20	13	40	15	56	16
Écart Type	0,00	0,00	2,15	0,81	3,25	0,92
COV (%)	0,00	0,00	5,45	5,45	5,83	5,83

TABLEAU 5.23 Résistance à l'arrachement des barres en fibre de verre de type 1

Spécimen	#6		#8	
	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)
1	55	9	106	11
2	51	8	112	11
3	56	9	99	10
4	55	9	101	10
5	52	8	97	10
Moyenne	54	9	103	10
Écart Type	2,19	0,35	5,78	1
COV (%)	4,08	4,08	5,60	6

Barres de type 2

Les résultats des tests d'arrachement pour les barres en PRFB de type 2 présentent des résultats dépassant les critères de la norme CSA S807-19 [84] qui fixe une limite de contrainte à l'arrachement de 10 MPa. Une analyse approfondie des résultats obtenus pour les diamètres #5, #6, et #8 démontre une supériorité notable par rapport aux exigences minimales, ce qui atteste de la qualité supérieure et de la constance de production des barres de type 2.

1. Pour les barres #5, les résultats indiquent une moyenne de résistance à l'arrachement de 10 MPa pour le lot 1, 11 MPa pour le lot 2, et 11 MPa pour le lot 3. Ces valeurs témoignent d'une production de haute qualité avec une homogénéité remarquable. Malgré des écarts types et des coefficients de variation relativement élevés, la performance générale demeure supérieure aux normes.
2. Les barres #6 l'analyse révèle une adhérence remarquable avec des moyennes de résistance à l'arrachement atteignant 10 MPa et allant jusqu'à 12 MPa. L'uniformité des résultats obtenus, en particulier pour les lots 2 et 3, démontre une fiabilité exceptionnelle des barres sous des contraintes d'arrachement, soulignant l'aptitude de ces matériaux à maintenir une liaison forte et durable avec le béton.
3. Quant aux barres #8, elles montrent une résistance à l'arrachement moyenne de 12 MPa pour le lot 1, 10 MPa pour le lot 2, et 10 MPa pour le lot 3. Cette consistance dans les performances, accompagnée de COV modérés, confirme la robustesse et la durabilité des barres de plus grand diamètre pour les applications structurales exigeantes.

L'ensemble de ces résultats, surpassant de manière significative les limites imposées par la norme CSA S807-19 [84], met en lumière la qualité exceptionnelle des barres en PRFB de type 2 et confirme leur viabilité pour une utilisation dans le domaine du génie civil. La résistance élevée à l'arrachement des barres PRFB est un indicateur déterminant de leur aptitude à être intégrées dans des structures sujettes à des sollicitations dynamiques ou exposées à des conditions environnementales sévères, garantissant ainsi sécurité et durabilité sur le long terme.

TABLEAU 5.24 Résistance à l'arrachement des barres #5 non sablées en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)
1	43	11	41	10	40	10
2	41	10	48	12	49	12
3	34	8	40	10	38	10
4	30	8	38	10	45	11
5	43	11	44	11	47	12
Moyenne	38	10	42	11	44	11
Écart Type	6,03	1,52	3,90	0,98	4,76	1,20
COV (%)	15,85	15,85	9,29	9,29	10,85	10,85

TABLEAU 5.25 Résistance à l'arrachement des barres #6 non sablées en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)
1	53	9	67	12	63	11
2	69	12	70	12	64	11
3	43	8	70	12	70	12
4	64	11	61	11	63	11
5	64	11	61	11	64	11
Moyenne	59	10	66	12	65	11
Écart Type	10,53	1,84	4,34	0,76	2,80	0,49
COV (%)	17,98	17,98	6,58	6,58	4,33	4,33

TABLEAU 5.26 Résistance à l'arrachement des barres #8 non sablées en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)	F (KN)	τ (MPa)
1	123	12	98	10	91	9
2	102	10	102	10	106	10
3	119	12	110	11	115	11
4	123	12	113	11	109	11
5	125	12	108	11	105	10
Moyenne	118	12	106	10	105	10
Écart Type	9,64	0,95	5,95	0,59	8,86	0,87
COV (%)	8,15	8,15	5,60	5,60	8,43	8,43

5.1.3 Résistance au cisaillement interlaminaire

La résistance au cisaillement interlaminaire des barres en fibre de basalte et de verre de type 1 et les barres de basalte de type 2 est décrite dans les tableaux suivants. Les valeurs de contrainte au cisaillement interlaminaire (S) obtenues ont été évaluées par rapport aux limites spécifiées dans la norme CSA S807-19 [84]. Selon cette norme, la limite de résistance au cisaillement est fixée à 35 MPa, 40 MPa et 45 MPa pour les barres de grade 1, 2 et 3, respectivement. Les contraintes minimales de cisaillement interlaminaire sont indiquées dans le tableau 5.27. Pour l'analyse comparative des moyennes de contraintes, le seuil maximal (45 MPa) a été adopté comme référence minimale.

TABLEAU 5.27 Contraintes minimales de cisaillement interlaminaire (MPa) [84]

Barre	Minimum
Grade 1	35
Grade 2	40
Grade 3	45

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Les propriétés en cisaillement interlaminaire des barres en PRFB de type 1, notamment pour les diamètres #3, #4, #5, et #6, révèlent des performances qui non seulement

répondent aux exigences de la norme CSA S807-19 [84] mais les surpassent également de manière significative.

1. Les barres de diamètres **#3** et **#4**, présentées dans le tableau 5.28, montrent des contraintes (S) respectables, avec des moyennes de contrainte de 46 MPa pour le diamètre **#3** et de 47 MPa pour le diamètre **#4**. L'écart type et le coefficient de variation (COV) pour ces deux diamètres indiquent une consistance relativement bonne dans la fabrication et la performance des barres, avec un COV de 8,30 % pour **#3** et de 4,50 % pour **#4**.
2. Les diamètres **#5** et **#6**, présentées dans le tableau 5.29, révèlent des performances améliorées en termes de résistance au cisaillement, avec des contraintes moyennes s'élevant à 58 MPa pour les deux diamètres. Cela indique non seulement une capacité de charge plus élevée mais aussi une homogénéité de la matière, comme en témoignent les écarts types réduits et les COV de 4,09 % pour **#5** et de 1,50 % pour **#6**. La réduction du COV pour le diamètre **#6** reflète une excellente uniformité dans la production et une fiabilité accrue de ces barres dans des applications structurales.

L'étude des propriétés en cisaillement interlaminaire des barres en PRFB de type 1 démontre une augmentation de la résistance au cisaillement avec l'augmentation du diamètre des barres, ce qui peut être attribué à la distribution et l'orientation des fibres dans la matrice du composite. Les barres de plus grand diamètre (**#5** et **#6**) présentent une meilleure uniformité de performance, comme le suggèrent les COV plus faibles, ce qui est essentiel pour garantir la fiabilité des matériaux composites dans des applications structurales exigeantes.

Ces résultats soulignent l'importance de choisir le diamètre de barre approprié en fonction des exigences spécifiques de chaque projet, en tenant compte de la résistance au cisaillement nécessaire pour assurer la sécurité et la durabilité des structures en béton armé.

TABLEAU 5.28 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #3 et #4 en PRFB de type 1

Spécimen	#3		#4	
	F (KN)	S (MPa)	F (KN)	S (MPa)
1	6	47	10	50
2	6	47	9	45
3	5	42	9	46
4	5	41	9	45
5	6	50	10	48
Moyenne	5	46	9	47
Écart Type	0,45	3,79	0,42	2,11
COV (%)	8,30	8,30	4,50	4,50

TABLEAU 5.29 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #5 et #6 en PRFB de type 1

Spécimen	#5		#6	
	F (KN)	S (MPa)	F (KN)	S (MPa)
1	18	59	26	59
2	17	58	24	57
3	18	60	25	58
4	16	54	25	58
5	17	57	25	58
Moyenne	17	58	25	58
Écart Type	0,70	2,36	0,37	0,87
COV (%)	4,09	4,09	1,50	1,50

Barres en fibres de verre

Les propriétés en cisaillement interlaminaire des barres en PRFV de type 1, couvrant les diamètres du #3 au #8, montrent des performances qui surpassent largement les exigences de la norme CSA S807-19 [84].

1. Les résultats pour les barres de diamètres #3, #4, et #5, indiqués dans le tableau 5.30, montrent des contraintes en cisaillement (S) impressionnantes, avec des moyennes respectives de 51 MPa, 53 MPa, et 58 MPa. Ces valeurs surpassent nettement les limites spécifiées par la norme CSA S807-19 [84]. L'homogénéité des résul-

tats, illustrée par des COV relativement bas, témoigne de la qualité constante et de la fiabilité des barres en PRFV de type 1, rendant ces matériaux particulièrement adaptés pour des applications nécessitant une forte résistance au cisaillement.

2. Pour les diamètres plus grands, #6 et #8, présentés dans le tableau 5.31, les performances demeurent élevées avec des contraintes moyennes en cisaillement de 58 MPa et 50 MPa, respectivement. Ces résultats continuent de dépasser les exigences de la norme CSA S807-19 [84], affirmant la supériorité des barres en PRFV de type 1 en termes de résistance au cisaillement. Le faible COV pour ces diamètres indique également une production cohérente et fiable, essentielle pour garantir la performance des composites dans des applications structurales.

Les barres en PRFV de type 1 démontrent une excellente résistance au cisaillement interlaminaire à travers tous les diamètres testés, excédant significativement les critères établis par la norme CSA S807-19 [84]. Cette performance supérieure souligne l'efficacité et la fiabilité de ces matériaux composites pour le renforcement des structures en béton, où la résistance au cisaillement joue un rôle crucial dans la prévention des défaillances structurales.

Ces résultats offrent aux ingénieurs et concepteurs une sécurité accrue et renforcent leur confiance dans l'emploi de ces barres pour des projets à enjeux élevés. La régularité et la stabilité des performances des barres en PRFV attestent de leur capacité à répondre aux exigences contemporaines du génie civil, proposant une option durable et sûre pour le renforcement et la restauration d'infrastructures.

TABLEAU 5.30 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #3, #4 et #5 en PRFV de type 1

Spécimen	#3		#4		#5	
	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)
1	6	50	11	53	17	59
2	6	51	11	53	18	59
3	6	52	11	55	17	56
4	6	50	11	53	17	58
5	6	51	11	54	17	57
Moyenne	6	51	11	53	17	58
Écart Type	0,09	0,78	0,19	0,96	0,40	1,33
COV (%)	1,53	1,53	1,80	1,80	2,30	2,30

TABLEAU 5.31 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #6 et #8 en PRFV de type 1

Spécimen	#6		#8	
	F (KN)	S (MPa)	F (KN)	S (MPa)
1	24	57	39	51
2	24	57	37	48
3	25	59	39	51
4	25	58	36	47
5	25	59	38	50
Moyenne	25	58	38	50
Écart Type	0,45	1,05	1,42	1,87
COV (%)	1,81	1,81	3,78	3,78

Barres de type 2

Les essais sur la résistance au cisaillement interlaminaire des barres en PRF de basalte de type 2 illustrent une supériorité notable par rapport aux exigences de la norme CSA S807-19. À travers trois séries de tests pour les diamètres #5, #6, et #8, chaque lot révèle des performances qui excèdent les seuils minimaux stipulés, témoignant de l'excellence en matière de fabrication et de résistance de ces matériaux.

1. Pour les barres #5 (tableau 5.32), les résultats suggèrent une moyenne de contrainte au cisaillement d'environ 82 MPa, soulignant une homogénéité et une qualité de production qui va au-delà des normes actuelles. Cette constance dans les résultats, avec des écarts types et des coefficients de variation modérés, confirme l'uniformité du processus de fabrication.
2. Pour le diamètre #6 (tableau 5.33), les performances restent robustes avec des contraintes moyennes en cisaillement de 76 MPa, 74 MPa, et 82 MPa pour les lots 1, 2, et 3 respectivement. Ces valeurs continuent d'exceller par rapport aux exigences de la norme CSA S807-19 [84], affirmant la supériorité des barres en PRFB de type 2 en termes de résistance au cisaillement. La consistance de la fabrication est également mise en évidence par les faibles COV
3. Les barres de diamètre #8 (tableau 5.34) démontrent une résistance au cisaillement remarquable avec des moyennes de 71 MPa, 69 MPa, et 69 MPa pour les trois lots. Bien que ces valeurs soient légèrement inférieures à celles des diamètres plus petits, elles restent significativement au-dessus des limites définies par la norme CSA S807-19.

Ces résultats, en dépassant largement les critères définis par la norme CSA S807-19, mettent en lumière la qualité exceptionnelle des barres en PRFB de type 2 et leur potentiel d'application dans le secteur du génie civil, où la fiabilité et la performance sont des critères de sélection primordiaux.

TABLEAU 5.32 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #5 en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)
1	24	80	26	86	22	74
2	27	90	24	79	26	87
3	24	79	25	83	24	81
4	24	81	25	82	25	85
5	24	82	24	81	23	76
Moyenne	25	82	25	82	24	81
Écart Type	1,24	4,15	0,74	2,49	1,62	5,42
COV (%)	5,03	5,03	3,03	3,03	6,73	6,73

TABLEAU 5.33 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #6 en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)
1	36	83	31	72	38	88
2	32	74	31	73	34	80
3	31	73	31	73	36	83
4	33	76	35	82	33	76
5	33	76	30	71	35	81
Moyenne	33	76	32	74	35	82
Écart Type	1,79	4,17	1,92	4,48	1,83	4,26
COV (%)	5,46	5,46	6,03	6,03	5,22	5,22

TABLEAU 5.34 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #8 en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	F (KN)	S (MPa)	F (KN)	S (MPa)	F (KN)	S (MPa)
1	48	63	51	68	57	75
2	53	70	52	69	47	62
3	59	77	51	67	53	70
4	53	70	51	67	51	67
5	57	75	57	76	54	71
Moyenne	54	71	53	69	52	69
Écart Type	4,06	5,34	2,85	3,75	3,59	4,73
COV (%)	7,53	7,53	5,43	5,43	6,85	6,85

5.1.4 Résistance au cisaillement transversal

La résistance au cisaillement transversal des barres en fibre de basalte et de verre de type 1 et de basalte de type 2 est détaillée dans les tableaux ci-dessous. Les valeurs de contrainte au cisaillement transversal (τ_u) obtenues ont été comparées aux limites spécifiées dans la norme CSA S807-19 [84] et dans la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15]. Étant donné que les limites spécifiées par la norme CSA S807-19 diffèrent de celles de la norme ASTM D7957/D7957M-22, la limite de 180 MPa a été choisie comme valeur minimale pour la comparaison des moyennes de contraintes. Les limites spécifiées dans la norme CSA S807-19 ont été indiquées dans le tableau 5.35.

TABLEAU 5.35 Contraintes minimales de cisaillement transversal (MPa) [84]

Barre	Minimum
Grade 1	160
Grade 2	170
Grade 3	180

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Les tableaux suivants illustrent les propriétés en cisaillement transversal des barres en PRFB de type 1 pour les diamètres #3, #4, #5, et #6. Ces données servent à évaluer la performance des barres en termes de résistance au cisaillement transversal.

1. Les barres de diamètre **#3** et **#4** (tableau 5.36) ont montré des valeurs de contrainte ultime en cisaillement (τ_u) avec des moyennes de 244 MPa et 227 MPa, respectivement. Ces valeurs dépassent largement la limite spécifiée de 180 MPa selon la norme CSA S807-19 [84], démontrant une performance exceptionnelle de ces matériaux composites en termes de résistance au cisaillement. Le faible COV pour ces diamètres (6,92 % et 2,20 %) indique une grande uniformité dans la production et la qualité des barres, affirmant la fiabilité et la consistance de leurs performances mécaniques.
2. Pour les barres de plus grands diamètres, **#5** et **#6** (tableau 5.37), les résultats continuent d'être impressionnants, avec des valeurs moyennes de τ_u de 225 MPa et 217 MPa, respectivement. Ces résultats soulignent encore une fois la capacité des barres en PRFB de type 1 à maintenir une résistance au cisaillement bien au-dessus des exigences normatives, même pour les diamètres plus larges. Les COV relativement bas pour ces diamètres (2,79 % et 3,66 %) reflètent également une production de haute qualité, essentielle pour la prévisibilité et la fiabilité dans des applications structurales exigeantes.

Les barres en PRFB de type 1, à travers tous les diamètres testés, montrent une résistance au cisaillement transversal significativement supérieure à la limite de 180 MPa spécifiée par la norme CSA S807-19. Cette supériorité en performance souligne l'efficacité et la fiabilité de ces matériaux composites pour le renforcement des structures en béton, où la résistance au cisaillement joue un rôle crucial dans la prévention des défaillances structurales.

TABLEAU 5.36 Propriétés en cisaillement transversal des barres **#3** et **#4** en PRFB de type 1

Spécimen	#3		#4	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	34	238	57	223
2	32	225	58	226
3	38	270	59	229
4	35	248	57	222
5	34	238	60	234
Moyenne	35	244	59	227
Écart Type	2,40	16,88	1,29	4,99
COV (%)	6,92	6,92	2,20	2,20

TABLEAU 5.37 Propriétés en cisaillement transversal des barres #5 et #6 en PRFB de type 1

Spécimen	#5		#6	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	87	218	125	220
2	92	231	129	226
3	91	229	124	218
4	91	228	124	218
5	87	218	116	205
Moyenne	89	225	124	217
Écart Type	2,50	6,27	4,51	7,95
COV (%)	2,79	2,79	3,66	3,66

Barres en fibres de verre

Les tableaux ci-dessus présentent les résultats des tests en cisaillement transversal pour les barres en PRFV de type 1 de diamètres #4, #5, #6, et #8. Ces résultats permettent d'évaluer la capacité de ces barres à résister aux forces de cisaillement transversales.

1. Les barres de diamètres #4 et #5 (tableau 5.38) ont montré des valeurs de contrainte ultime en cisaillement (τ_u) avec des moyennes respectives de 243 MPa et 224 MPa. Ces valeurs, similaires à celles observées pour les barres en PRFB de type 1, dépassent également la limite spécifiée de 180 MPa selon la norme CSA S807-19 [84]. Cela indique une excellente performance de ces matériaux composites en termes de résistance au cisaillement. La cohérence des résultats, illustrée par les faibles COV (2,91 % pour #4 et 1,53 % pour #5), souligne une production et une qualité constantes des barres, garantissant une fiabilité et une performance mécanique uniformes.
2. Pour les barres de plus grands diamètres, #6 et #8, les résultats restent impressionnants (tableau 5.39), avec des valeurs moyennes de τ_u de 184 MPa et 180 MPa, respectivement. Bien que ces valeurs soient légèrement inférieures à celles des diamètres plus petits, elles restent bien au-dessus de la norme CSA S807-19 [84], affirmant la capacité des barres en PRFV de type 1 à maintenir une résistance au cisaillement élevée même pour les plus grands diamètres. Les COV pour ces diamètres (4,22 % pour #6 et 2,44 % pour #8) reflètent aussi une excellente uniformité dans la production de ces barres, essentielle pour assurer la fiabilité des structures en béton armé.

Les barres en PRFV de type 1, pour tous les diamètres testés, ont démontré une résistance au cisaillement transversal significativement supérieure à la limite de 180 MPa spécifiée par la norme CSA S807-19 [84]. Cette performance exceptionnelle met en lumière l'efficacité et la fiabilité de ces matériaux composites pour le renforcement des structures en béton, où la résistance au cisaillement transversal est cruciale pour prévenir les défaillances structurales.

TABLEAU 5.38 Propriétés en cisaillement transversal des barres #4 et #5 en PRFV de type 1

Spécimen	#4		#5	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	61	236	90	225
2	60	234	88	222
3	64	249	89	224
4	64	249	87	219
5	63	245	91	228
Moyenne	63	243	89	224
Écart Type	1,82	7,05	1,36	3,42
COV (%)	2,91	2,91	1,53	1,53

TABLEAU 5.39 Propriétés en cisaillement transversal des barres #6 et #8 en PRFV de type 1

Spécimen	#6		#8	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	104	182	185	182
2	104	183	179	175
3	101	178	186	183
4	102	179	190	186
5	112	197	180	176
Moyenne	105	184	184	180
Écart Type	4,41	7,77	4,49	4,40
COV (%)	4,22	4,22	2,44	2,44

Barres de type 2

Les essais relatifs aux propriétés de cisaillement transversal des barres en PRFB de type 2 ont démontré une performance supérieure, excédant largement les limites définies par la

norme CSA S807-19 [84]. Une évaluation approfondie pour les diamètres #5, #6, et #8 a révélé des performances significativement au-dessus des exigences minimales, mettant en évidence l'excellence de la fabrication et la robustesse de ces matériaux.

1. Pour les barres #5 (tableau 5.40), les données obtenues suggèrent une contrainte de cisaillement moyenne d'environ 246 MPa pour les trois lots, ce qui révèle une constance et une qualité de production qui dépassent les normes en vigueur. Cette cohérence des résultats, avec des écarts types et des coefficients de variation (COV) modérés, confirme l'uniformité et la fiabilité du processus de fabrication.
2. Les barres #6 (tableau 5.41) présentent également une robustesse impressionnante en cisaillement, avec une moyenne globale de 245 MPa pour le lot 1, 236 MPa pour le lot 2, et une performance notablement supérieure pour le lot 3 à 253 MPa. Ces résultats, dépassant les critères de la norme CSA S807-19, attestent de la capacité des barres de type 2 à offrir une résistance élevée sous des charges intensives.
3. Quant aux barres #8 (tableau 5.42), les essais révèlent une résistance moyenne au cisaillement de 247 MPa, 216 MPa, et 243 MPa pour le lot 1, 2 et 3, respectivement. Bien que les résultats varient légèrement d'un lot à l'autre, ces valeurs dépassent nettement les exigences minimales définies par les standards applicables.

En dépassant largement les critères définis par la norme CSA S807-19, ces résultats mettent en évidence la qualité exceptionnelle des barres PRFB de type 2 et leur application potentielle en génie civil, où la fiabilité et la performance en cisaillement sont des critères de sélection primordiaux.

TABLEAU 5.40 Propriétés en cisaillement transversal des barres #5 en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	97	245	102	257	98	246
2	100	250	100	252	99	248
3	101	255	89	222	99	248
4	97	243	101	254	103	260
5	95	238	100	250	96	241
Moyenne	98	246	98	247	99	248
Écart Type	2,63	6,62	5,55	13,96	2,70	6,79
COV (%)	2,69	2,69	5,65	5,65	2,73	2,73

TABLEAU 5.41 Propriétés en cisaillement transversal des barres #6 en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	130	229	133	234	161	283
2	143	253	140	247	134	236
3	137	241	135	238	142	250
4	138	243	136	240	136	240
5	147	259	124	219	145	255
Moyenne	139	245	134	236	144	253
Écart Type	6,55	11,52	5,94	10,46	10,57	18,61
COV (%)	4,71	4,71	4,43	4,43	7,36	7,36

TABLEAU 5.42 Propriétés en cisaillement transversal des barres #8 en PRFB de type 2

Spécimen	Lot 1		Lot 2		Lot 3	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	256	251	200	196	221	216
2	259	254	222	217	259	253
3	262	257	240	235	242	238
4	258	253	239	234	243	238
5	225	221	200	196	276	271
Moyenne	252	247	220	216	248	243
Écart Type	15,15	14,85	19,86	19,47	20,63	20,23
COV (%)	6,01	6,01	9,02	9,02	8,32	8,32

5.2 Durabilité des armatures : Résistance aux alcalins

L'étude de la durabilité des armatures en PRF face à l'agression alcaline représente un domaine de recherche essentiel pour garantir leur performance dans les infrastructures de génie civil exposées à des conditions corrosives. Cette recherche se focalise sur l'évaluation de la résistance des armatures PRF, notamment en fibre de basalte (PRFB) et en fibre de verre (PRFV), dans des solutions alcalines qui simulent l'environnement chimique du béton de ciment Portland. En suivant les directives de la norme ASTM D7705/D7705M [31], les échantillons sont immergés dans une solution aqueuse (tableau 4.1) à 60 °C, conçue pour

refléter les conditions alcalines rencontrées dans le béton, afin d'examiner leur résistance à la traction et leur résistance aux cisaillements interlaminaire et transversal.

Ce volet du mémoire s'attache à comparer rigoureusement les performances des deux types de PRF après exposition à un milieu alcalin, en se basant sur des protocoles standardisés par les normes ASTM et CSA. L'objectif est de déterminer le matériau le plus durable et le plus adapté pour résister aux agressions chimiques typiques des environnements de construction.

5.2.1 Résistance à la traction sans charges

La résistance à la traction sans charge des barres de fibre de verre et de basalte de type 1 et de basalte de type 2 a été déterminée par des essais dont les résultats sont présentés dans les tableaux de la section suivante. Les valeurs de la contrainte de traction ultime (F_{tu}), le module d'élasticité (E) et la déformation ultime (ε) obtenues ont été comparées aux limites établies par la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15], laquelle spécifie un module d'élasticité minimum de 44,8 GPa et une déformation ultime minimum de 1,1 %. Les valeurs minimales de contrainte de traction ultime nécessaires pour chaque diamètre de barres sont présentées dans le tableau 5.1. En outre, conformément aux directives ASTM D7705/D7705M [31], la limite de rétention de la résistance à la traction est de 80 %.

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Les tableaux présentés ci-dessous montrent les résultats de résistance à la traction, module d'élasticité et déformation ultime pour différentes tailles de barres en PRFB de type 1 après un processus de conditionnement.

Ces résultats sont essentiels pour évaluer la durabilité et la fiabilité des armatures en PRFB sous diverses conditions environnementales.

1. Barres #3 (tableau 5.43) : la moyenne de résistance à la traction après conditionnement est de 893 MPa, avec un module d'élasticité moyen de 59,9 GPa et une déformation moyenne de 1,50 %. Ces valeurs montrent une réduction par rapport à l'état non conditionné, mais restent bien au-dessus des exigences minimales de la norme.
 2. Barres #4 (tableau 5.44) : la résistance moyenne à la traction est de 731 MPa, avec un module d'élasticité de 65,1 GPa et une déformation de 1,12 %. Bien que la résistance diminue après conditionnement, le module d'élasticité reste élevé, indiquant une bonne rigidité.
-

3. Barres #5 (tableau 5.45) et barres #6 (tableau 5.46) : pour ces diamètres plus grands, on observe également une diminution de la résistance à la traction après conditionnement, avec des moyennes respectives de 811 MPa et 689 MPa. Le module d'élasticité et la déformation ultime pour ces barres indiquent cependant que les matériaux conservent une bonne partie de leur intégrité structurelle.
4. Selon le tableau 5.47, les barres #3, #4 et #5 montrent une rétention de la résistance à la traction (R_{et}) supérieure à 80 %, conformément aux exigences de la norme ASTM D7705/D7705M [31]. Toutefois, les barres #6 montrent une rétention de 71 %, en dessous de la limite de 80 %, ce qui peut indiquer une sensibilité plus élevée aux conditions de conditionnement pour les diamètres plus larges.

En résumé, les résultats montrent que les barres en PRFB de type 1 maintiennent une majorité de leurs propriétés mécaniques après conditionnement, malgré des variations en fonction du diamètre des barres et une réduction de la résistance à la traction. Cela souligne l'importance de la prise en compte des effets du conditionnement dans le choix des matériaux pour le génie civil, en particulier pour les applications nécessitant une durabilité accrue dans des environnements agressifs. Il est crucial de considérer la rétention de la résistance à la traction pour assurer la durabilité et la fiabilité des structures en béton armé de PRFB, qui, bien que prometteuses, exigent une sélection minutieuse pour répondre aux normes de performance mécanique.

TABLEAU 5.43 Résistance à la traction des barres #3 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	74	1038	55,7	1,86
2	61	860	60,3	1,43
3	61	860	61,7	1,39
4	62	871	58,1	1,50
5	60	838	63,6	1,32
Moyenne	63	893	59,9	1,50
Écart type	5,79	81,56	3,08	0,21
COV (%)	9,13	9,13	5,15	14,21

TABLEAU 5.44 Résistance à la traction des barres #4 en PRFB de type 1
(barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	94	729	61,7	1,18
2	105	817	69,3	1,18
3	89	691	65,0	1,06
4	91	704	64,9	1,08
5	92	712	64,4	1,11
Moyenne	94	731	65,1	1,12
Écart type	6,50	50,38	2,70	0,05
COV (%)	6,89	6,89	4,16	4,86

TABLEAU 5.45 Résistance à la traction des barres #5 en PRFB de type 1
(barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	161	807	60,0	1,35
2	159	797	65,6	1,21
3	161	808	61,5	1,31
4	165	828	61,3	1,35
5	162	814	61,4	1,32
Moyenne	161	811	62,0	1,31
Écart type	2,23	11,20	2,14	0,13
COV (%)	1,38	1,38	3,45	4,19

TABLEAU 5.46 Résistance à la traction des barres #6 en PRFB de type 1
(barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	232	815	63,5	1,28
2	182	642	65,5	0,98
3	181	636	65,9	0,96
4	191	671	62,2	1,08
5	193	680	63,2	1,08
Moyenne	196	689	64,1	1,08
Écart type	20,74	73,04	1,58	0,13
COV (%)	10,60	10,60	2,46	11,82

TABLEAU 5.47 Rétention de la résistance à la traction des barres en PRFB de type 1

Barre	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
#3	72	63	89
#4	109	94	86
#5	196	161	82
#6	276	196	71

Barres en fibres de verre

Les données présentées dans les tableaux suivants offrent un aperçu des performances des barres en PRFV de type 1 suite à un processus de conditionnement, évaluant ainsi leur durabilité sous diverses conditions environnementales.

1. Barres #3 (tableau 5.48) : les résultats montrent une moyenne de résistance à la traction de 908 MPa, avec un module d'élasticité moyen de 64,3 GPa et une déformation moyenne de 1,42 %. Bien que ces valeurs indiquent une légère baisse par rapport à l'état initial, elles restent significativement supérieures aux critères minimaux définis par la norme, soulignant la robustesse des barres en PRFV même après conditionnement.
2. Barres #4 (tableau 5.49) : la résistance à la traction moyenne observée est de 871 MPa, accompagnée d'un module d'élasticité de 66,3 GPa et d'une déformation de 1,32 %. Malgré une diminution due au conditionnement, ces valeurs montrent que les barres conservent une rigidité et une résistance adéquate.
3. Barres #5 (tableau 5.50) et barres #6 (tableau 5.51) : pour ces diamètres, une résistance à la traction moyenne de 811 MPa pour les #5 et 689 MPa pour les #6 a été enregistrée, avec un module d'élasticité respectif de 62,0 GPa et 64,1 GPa. La déformation ultime reste conforme aux attentes pour des matériaux destinés à des applications structurales, illustrant la capacité des barres à supporter des déformations sans rupture immédiate.
4. Barres #8 (tableau 5.52) : les résultats montrent que la résistance à la traction moyenne pour les barres #8 est de 771 MPa, avec un module d'élasticité moyen de 60,9 GPa et une déformation moyenne de 1,27 %. Ces valeurs indiquent une excellente performance des barres #8, même après conditionnement, mettant en évidence la capacité des barres en PRFV de type 1 à maintenir une résistance et une rigidité substantielles dans des conditions défavorables.

5. Selon le tableau 5.53 les barres **#3** à **#5** présentent une rétention de la résistance à la traction (R_{et}) supérieure à 80 %, satisfaisant ainsi aux exigences de la norme ASTM D7705/D7705M [31]. Par ailleurs, les barres **#6** et **#8** présentent également une rétention de la résistance à la traction supérieure à 80 %, est de 102 % et 101 % respectivement, indiquant une excellente durabilité, mais aussi une potentialité de conservation des propriétés mécaniques initiales sous certaines conditions de conditionnement.

Les résultats indiquent que les barres en PRFV de type 1 conservent une performance satisfaisante conforme aux normes ASTM, malgré une réduction de leurs propriétés mécaniques après conditionnement, ce qui souligne leur potentiel pour des applications durables dans le génie civil. La préservation de la résistance à la traction, du module d'élasticité, et de la déformation ultime démontre que ces barres sont des choix fiables pour le renforcement de structures exigeant longévité et résistance à la corrosion. En somme, les barres en PRFV de type 1 représentent une option attractive pour diverses applications structurelles, nécessitant une attention particulière à la rétention de la résistance à la traction pour garantir la durabilité et la fiabilité des constructions renforcées.

TABLEAU 5.48 Résistance à la traction des barres **#3** en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	77	1080	63,6	1,70
2	61	859	59,4	1,45
3	62	875	64,6	1,35
4	62	876	69,4	1,26
5	60	849	64,5	1,32
Moyenne	64	908	64,3	1,42
Écart type	6,89	97,02	3,57	0,17
COV (%)	10,69	10,69	5,55	12,14

TABLEAU 5.49 Résistance à la traction des barres #4 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	101	784	70,0	1,12
2	116	897	64,9	1,38
3	116	896	64,5	1,39
4	114	887	63,7	1,39
5	115	891	68,5	1,30
Moyenne	112	871	66,3	1,32
Écart type	6,27	48,59	2,76	0,12
COV (%)	5,58	5,58	4,16	8,82

TABLEAU 5.50 Résistance à la traction des barres #5 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	199	999	63,0	1,59
2	176	885	66,3	1,33
3	179	900	65,0	1,38
4	179	902	66,5	1,36
5	175	880	64,6	1,36
Moyenne	182	913	65,1	1,41
Écart type	9,70	48,73	1,42	0,10
COV (%)	5,34	5,34	2,18	7,30

TABLEAU 5.51 Résistance à la traction des barres #6 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	254	895	66,1	1,35
2	246	866	61,0	1,42
3	262	923	66,0	1,40
4	243	856	68,9	1,24
5	246	867	61,9	1,40
Moyenne	250	882	64,8	1,36
Écart type	7,72	27,17	3,28	0,07
COV (%)	3,08	3,08	5,06	5,26

TABLEAU 5.52 Résistance à la traction des barres #8 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (kN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	390	766	60,4	1,27
2	386	757	62,0	1,22
3	386	756	60,9	1,24
4	420	824	61,9	1,33
5	385	754	59,1	1,28
Moyenne	393	771	60,9	1,27
Écart type	15,18	29,76	1,20	0,04
COV (%)	3,86	3,86	1,98	3,29

TABLEAU 5.53 Rétention de la résistance à la traction des barres en PRFV de type 1

Barre	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
#3	88	64	73
#4	133	112	85
#5	200	182	91
#6	245	250	102
#8	390	393	101

Barres de type 2

Les tableaux suivants fournissent un aperçu détaillé des performances des barres en PRFB de type 2 suite à des conditions dans une solution alcaline pendant trois mois, mesurant la résistance à la traction, le module d'élasticité, et la déformation ultime pour les barres de diamètre #8, réparties en trois lots.

1. Barres #8 - Lot 1 (tableau 5.54) : les résultats montrent une résistance moyenne à la traction de 661 MPa, avec un module d'élasticité moyen de 52 GPa et une déformation moyenne de 1,28 %. Ces valeurs indiquent une légère baisse par rapport aux valeurs initiales mais démontrent néanmoins une résilience significative et une conservation des propriétés structurelles essentielles.
2. Barres #8 - Lot 2 (tableau 5.55) : ces résultats indiquent une résistance moyenne à la traction de 625 MPa, un module d'élasticité de 53 GPa, et une déformation de 1,18 %, soulignant une performance consistante avec une légère variabilité entre les lots, tout en maintenant une intégrité structurelle robuste.

3. Barres #8 - Lot 3 (tableau 5.56) : la moyenne de résistance à la traction pour ce lot est de 634 MPa, avec un module d'élasticité de 53 GPa et une déformation de 1,20 %, ce qui confirme la durabilité des barres en PRFB de type 2 même après exposition à des conditions potentiellement dégradantes.

La rétention de la résistance à la traction (tableau 5.57) fournit un indicateur clé de la performance des barres sous des conditions de vieillissement accéléré. Pour les barres de diamètre #8, la rétention de résistance varie de 93 % à 98 % à travers les différents lots, avec une moyenne de 95 %, dépassant la limite de rétention de 80 % définie par la norme ASTM D7705/D7705M [31].

TABLEAU 5.54 Résistance à la traction des barres #8 - Lot 1 en PRFB de type 2 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	353	692	53,6	1,29
2	334	656	51,2	1,28
3	325	637	50,7	1,25
4	333	653	52,1	1,25
5	341	669	51,0	1,31
Moyenne	337	661	52	1,28
Écart type	10,51	20,60	1,15	1,79
COV (%)	3,12	3,12	2,22	0,14

TABLEAU 5.55 Résistance à la traction des barres #8 - Lot 2 en PRFB de type 2 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	331	650	53,2	1,22
2	281	552	52,4	1,05
3	323	633	51,9	1,22
4	339	664	52,7	1,26
5	320	628	53,7	1,17
Moyenne	319	625	53	1,18
Écart type	22,14	43,41	0,72	6,07
COV (%)	6,94	6,94	1,36	0,51

TABLEAU 5.56 Résistance à la traction des barres #8 - Lot 3 en PRFB de type 2 (barres conditionnées)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	332	651	52,9	1,23
2	325	638	52,9	1,20
3	317	622	52,2	1,19
4	322	632	53,0	1,19
5	321	630	52,3	1,21
Moyenne	324	634	53	1,20
Écart type	5,49	10,76	0,38	2,83
COV (%)	1,70	1,70	0,72	0,23

TABLEAU 5.57 Rétention de la résistance à la traction des barres #8 en PRFB de type 2

Lot	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
Lot 1	344	337	98
Lot 2	337	319	95
Lot 3	347	324	93
Moyenne	343	327	95

5.2.2 Résistance à la traction avec charges

La résistance à la traction avec charge des barres de fibre de verre, et de basalte de type 1 et de type 2 a été déterminée par des essais dont les résultats sont présentés dans les tableaux de la section suivante. Les valeurs de la contrainte de traction ultime (F_{tu}), le module d'élasticité (E) et la déformation ultime (ε) obtenues ont été comparées aux limites établies par la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15], laquelle spécifie un module d'élasticité minimum de 44,8 GPa et une déformation ultime minimum de 1,1 %. Les valeurs minimales de contrainte de traction ultime nécessaires pour chaque diamètre de barres sont présentées dans le tableau 5.1. En outre, conformément aux directives ASTM D7705/D7705M [31], la limite de rétention de la résistance à la traction est de 70 %.

Barres de type 2

Barres en fibres de basalte

Les tableaux présentés ci-dessous montrent les résultats de résistance à la traction, module d'élasticité, et déformation ultime pour les barres #5 et #6 de type 2 dans trois lots différents après un processus de conditionnement avec charge. Ces résultats sont cruciaux

pour évaluer la durabilité et la fiabilité des armatures en PRFB sous des charges continues et diverses conditions environnementales.

1. Pour les barres **#5**, les lots 1 (tableau 5.58), 2 (tableau 5.59), et 3 (tableau 5.60) montrent une résistance à la traction moyenne de 696 MPa, 672 MPa, et 754 MPa respectivement, avec des modules d'élasticité autour de 63 GPa et des déformations ultimes entre 1,07 % et 1,19 %. Ces résultats indiquent une bonne résilience sous charge, malgré une réduction par rapport aux états initiaux non conditionnés, et une rétention de la résistance à la traction moyenne de 72 %, surpassant la norme de 70 %, comme indiqué dans le tableau 5.61. Cela témoigne de la capacité des barres **#5** à maintenir une partie significative de leurs propriétés mécaniques sous des charges continues, soulignant l'importance d'une fabrication précise et d'un conditionnement adéquat pour assurer une performance constante.
2. Pour les barres **#6**, les performances sous charge varient également, avec des résistances à la traction moyennes de 739 MPa, 728 MPa, et 864 MPa pour les lots 1 (tableau 5.62), 2 (tableau 5.63), et 3 (tableau 5.64), respectivement. Les modules d'élasticité se situent autour de 57 à 59 GPa, avec des déformations ultimes de 1,30 % à 1,48 %. Ces valeurs démontrent une excellente tenue sous charge, en particulier pour le lot 3 qui affiche une supériorité notable en termes de résistance et de déformation. Les résultats de la rétention de la résistance à la traction présentés dans le tableau 5.65, variant de 84 % à 99 % et une moyenne de 89 %, souligne la robustesse et la durabilité des barres **#6**, même sous conditions de charge prolongées, dépassant largement la norme de 70 %.

Ces analyses confirment que les barres en PRFB de type 2, tant pour les diamètres **#5** que **#6**, conservent efficacement leurs propriétés mécaniques après un processus de conditionnement avec charge, malgré certaines variations entre les lots. La performance globale satisfaisante répond aux standards des normes, mettant en avant le potentiel de ces barres pour des applications de génie civil où la durabilité et la fiabilité face à des charges continues sont primordiales.

TABLEAU 5.58 Résistance à la traction des barres **#5 - Lot 1** en PRFB de type 2 (avec charge)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	116	582	70,4	0,83
2	110	553	62,4	0,89
3	153	767	66,5	1,15
4	170	856	60,7	1,41
5	143	721	64,2	1,12
Moyenne	138	696	65	1,07
Écart type	25,31	127,17	3,79	3,36
COV (%)	18,28	18,28	5,84	0,31

TABLEAU 5.59 Résistance à la traction des barres **#5 - Lot 2** en PRFB de type 2 (avec charge)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	145	729	63,9	1,14
2	116	581	60,8	0,96
3	139	696	63,6	1,09
4	130	654	57,2	1,14
5	139	698	57,6	1,21
Moyenne	134	672	61	1,11
Écart type	11,40	57,30	3,19	1,80
COV (%)	8,53	8,53	5,26	0,16

TABLEAU 5.60 Résistance à la traction des barres **#5 - Lot 3** en PRFB de type 2 (avec charge)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	138	694	63,3	1,10
2	148	746	63,7	1,17
3	167	838	65,7	1,28
4	156	782	63,4	1,23
5	141	710	61,2	1,16
Moyenne	150	754	63	1,19
Écart type	11,52	57,89	1,60	3,63
COV (%)	7,68	7,68	2,51	0,31

TABLEAU 5.61 Rétention de la résistance à la traction des barres #5 en PRFB de type 2

Lot	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
Lot 1	193	138	72
Lot 2	199	134	67
Lot 3	195	150	77
Moyenne	196	141	72

TABLEAU 5.62 Résistance à la traction des barres #6 - Lot 1 en PRFB de type 2 (avec charge)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	205	720	51,5	1,40
2	216	759	59,3	1,28
3	205	723	59,0	1,22
4	223	784	59,8	1,31
5	201	707	55,5	1,27
Moyenne	210	739	57	1,30
Écart type	9,10	32,03	3,54	0,91
COV (%)	4,34	4,34	6,20	0,07

TABLEAU 5.63 Résistance à la traction des barres #6 - Lot 2 en PRFB de type 2 (avec charge)

Spécimen	P_{max} (KN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	201	707	56,4	1,25
2	204	718	57,9	1,24
3	204	717	58,7	1,22
4	223	786	58,8	1,34
5	202	710	54,5	1,30
Moyenne	207	728	57	1,27
Écart type	9,39	33,08	1,81	1,83
COV (%)	4,55	4,55	3,15	0,14

TABLEAU 5.64 Résistance à la traction des barres #6-Lot 3 en PRFB de type 2 (avec charge)

Spécimen	P_{max} (kN)	F_{tu} (MPa)	E (GPa)	ε (%)
1	256	900	58,6	1,54
2	214	755	57,2	1,32
3	265	934	60,8	1,54
4	240	846	57,6	1,47
5	251	882	58,5	1,51
Moyenne	245	864	59	1,48
Écart type	19,43	68,41	1,38	4,97
COV (%)	7,92	7,92	2,35	0,34

TABLEAU 5.65 Rétention de la résistance à la traction des barres #6 en PRFB de type 2

Lot	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
Lot 1	246	210	85
Lot 2	245	207	84
Lot 3	249	245	99
Moyenne	247	221	89

5.2.3 Résistance au cisaillement interlaminaire

La résistance au cisaillement interlaminaire des barres en fibre de basalte de type 1 et de type 2 et de verre de type 1 est décrite dans les tableaux de la section suivante. Les valeurs de contrainte au cisaillement interlaminaire (S) obtenues ont été évaluées par rapport aux limites spécifiées dans la norme CSA S807-19 [84]. Selon cette norme, la limite de résistance au cisaillement est fixée à 35 MPa, 40 MPa et 45 MPa pour les barres de grade 1, 2 et 3, respectivement. Les contraintes minimales de cisaillement interlaminaire sont indiquées dans le tableau 5.27. Pour l'analyse comparative des moyennes de contraintes, le seuil maximal (45 MPa) a été adopté comme référence minimale. Également, cette norme spécifie une limite de 85 % de la rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire.

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Les tableaux ci-dessous illustrent les propriétés en cisaillement interlaminaire des barres en PRFB de type 1 pour les diamètres #3, #4, #5, et #6. Les valeurs obtenues dans ces

essais sont cruciales pour évaluer la performance des barres en PRFB sous des conditions potentiellement dégradantes.

1. Les données des tableaux 5.66 et 5.67 montrent que les barres de diamètres **#3**, **#4**, **#5**, et **#6** maintiennent des valeurs de contrainte au cisaillement interlaminaire (S) qui répondent ou surpassent la limite minimale de 45 MPa spécifiée par la norme pour les barres de grade 3. Les moyennes de contrainte pour les barres **#3** et **#4** sont de 43 MPa, tandis que pour les barres **#5**, et **#6**, les valeurs moyennes sont respectivement de 60 MPa et 58 MPa, démontrant une excellente capacité à résister au cisaillement interlaminaire même après un processus de conditionnement.
2. Le tableau 5.68 révèle que la rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire (R_{et}) pour les barres varie de 92 % à 105 %, avec les barres **#5**, et **#6** montrant une rétention qui égale ou excède 100 %. Cette performance indique non seulement que les barres en PRFB de type 1 conservent leur intégrité structurelle face aux forces de cisaillement post-conditionnement, mais aussi que, dans certains cas, elles peuvent être encore plus performantes que leurs propriétés mécaniques initiales.

Ces résultats confirment la durabilité exceptionnelle des barres PRFB de type 1 face aux contraintes environnementales et mécaniques, ce qui garantit leur fiabilité pour des applications structurelles exigeantes. En effet, ces barres maintiennent des performances stables dans les essais de cisaillement interlaminaire lorsqu'elles sont exposées à des solutions alcalines et, dans certains cas, ne présentent aucun changement notable ou impact négatif.

TABLEAU 5.66 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres **#3** et **#4** en PRFB de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#3		#4	
	F (KN)	S (MPa)	F (KN)	S (MPa)
1	5	44	9	43
2	5	38	9	45
3	5	45	8	42
4	6	49	9	43
5	5	39	9	44
Moyenne	5	43	9	43
Écart Type	0,54	4,58	0,20	0,99
COV (%)	10,64	10,64	2,29	2,29

TABLEAU 5.67 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #5 et #6 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#5		#6	
	F (kN)	S (MPa)	F (kN)	S (MPa)
1	18	61	25	58
2	19	62	25	59
3	18	59	24	55
4	19	62	24	57
5	17	58	26	60
Moyenne	18	60	25	58
Écart Type	0,53	1,79	0,76	1,77
COV (%)	2,97	2,97	3,06	3,06

TABLEAU 5.68 Rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire des barres en PRFB de type 1

Barre	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
#3	5	5	94
#4	9	9	92
#5	17	18	105
#6	25	25	100

Barres en fibres de verre

Les résultats des tests de cisaillement interlaminaire pour les barres en PRFV de type 1, après un processus de conditionnement, fournissent des informations importantes sur la performance et la durabilité de ces matériaux dans des conditions potentiellement dégradantes.

1. Pour les barres #3, #4 et #5, les valeurs moyennes de contrainte au cisaillement interlaminaire se situent autour de 54 à 58 MPa, dépassant la limite de 45 MPa spécifiée pour les barres de grade 3. De même, les barres #6, et #8 montrent des moyennes de contrainte au cisaillement interlaminaire de 58 MPa et 47 MPa respectivement, affirmant leur capacité à maintenir une intégrité structurelle robuste sous des forces de cisaillement, même après conditionnement.
2. La rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire, comme indiqué dans le tableau 5.71, varie de 95 % à 107 %, avec la majorité des barres montrant une rétention de 100 % ou plus. Cela indique non seulement que les barres en PRFV de

type 1 conservent efficacement leur résistance au cisaillement interlaminaire après conditionnement mais aussi, dans certains cas, peuvent présenter une amélioration par rapport à leurs propriétés initiales.

Ces résultats soulignent l'excellente durabilité des barres en PRFV de type 1 face à des conditions environnementales exigeantes, prouvant leur fiabilité pour des applications de renforcement structural où la résistance au cisaillement est un critère crucial. La performance remarquable des barres en PRFV après conditionnement réaffirme leur potentiel comme solution durable et résistante pour le renforcement des structures en génie civil, offrant une alternative viable aux matériaux traditionnels dans des environnements soumis à des sollicitations mécaniques et chimiques importantes.

TABLEAU 5.69 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #3, #4 et #5 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#3		#4		#5	
	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)
1	6	50	11	56	17	56
2	6	51	11	55	18	59
3	7	60	11	55	17	58
4	7	59	10	52	17	58
5	6	53	10	52	17	57
Moyenne	6	54	11	54	17	58
Écart Type	0,53	4,49	0,40	1,99	0,36	1,22
COV (%)	8,25	8,25	3,67	3,67	2,12	2,12

TABLEAU 5.70 Propriétés en cisaillement interlaminaire des barres #6 et #8 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#6		#8	
	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)	<i>F</i> (KN)	<i>S</i> (MPa)
1	25	58	34	45
2	24	57	37	48
3	26	60	37	48
4	24	57	36	48
5	25	58	34	45
Moyenne	25	58	36	47
Écart Type	0,67	1,55	1,29	1,70
COV (%)	2,67	2,67	3,62	3,62

TABLEAU 5.71 Rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire des barres en PRFV de type 1

Barre	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
#3	6	6	107
#4	11	11	101
#5	17	17	100
#6	25	25	101
#8	38	36	95

5.2.4 Résistance au cisaillement transversal

La résistance au cisaillement transversal des barres en fibre de basalte et de verre produites par type 1 est détaillée dans les tableaux de cette section. Les valeurs de contrainte au cisaillement transversal (τ_u) obtenues ont été comparées aux limites spécifiées dans la norme CSA S807-19 [84] et dans la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15]. Étant donné que les limites spécifiées par la norme CSA S807-19 [84] diffèrent de celles de la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15], la limite de 180 MPa a été choisie comme valeur minimale pour la comparaison des moyennes de contraintes. Les limites spécifiées dans la norme CSA S807-19 ont été indiquées dans le tableau 5.35. cette norme spécifie une limite de 85 % de la rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire.

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Les données présentées dans les tableaux démontrent une performance remarquable des barres en PRFB de type 1 sous des conditions de cisaillement transversal après conditionnement. Les résultats sont significatifs pour évaluer la durabilité et la fiabilité des armatures en PRFB dans des environnements potentiellement dégradants.

1. Barres #3 et #4 (tableau 5.72) : la moyenne de résistance au cisaillement transversal observée pour les barres #3 est de 205 MPa, et de 193 MPa pour les barres #4. Ces valeurs démontrent une excellente capacité des barres à résister aux forces de cisaillement, surpassant largement la limite minimale de 180 MPa définie pour la comparaison des moyennes de contraintes. Cette performance supérieure souligne la qualité et la fiabilité des barres en PRFB de type 1 dans des applications structurales exigeant une résistance élevée au cisaillement.
2. Barres #5 et #6 (tableau 5.73) : pour les diamètres plus grands, les barres #5 et #6 montrent également une forte résistance au cisaillement transversal avec des

moyennes de 211 MPa et 208 MPa respectivement. Ces résultats indiquent que les barres en PRFB de type 1 conservent leur intégrité structurale et leur capacité de charge sous des contraintes de cisaillement significatives, affirmant leur adaptabilité à une variété d'applications dans le génie civil où de telles charges sont prévalentes.

3. La rétention de la résistance au cisaillement transversal (tableau 5.74) pour les barres testées indique une performance remarquable après conditionnement, avec des valeurs de rétention allant de 84 % à 96 % pour les différents diamètres. Cela met en évidence la durabilité exceptionnelle des barres en PRFB de type 1 face à des conditions environnementales potentiellement dégradantes, conservant une grande part de leur capacité originale à résister aux forces de cisaillement.

En conclusion, les barres en PRFB de type 1 démontrent une excellente résistance au cisaillement transversal après conditionnement, surpassant les exigences normatives et affirmant leur efficacité pour une utilisation dans des structures soumises à des charges transversales importantes. Cette robustesse, associée à une bonne rétention de résistance, confirme la fiabilité des barres en PRFB de type 1 pour des applications de génie civil nécessitant une durabilité et une performance mécanique élevées.

TABLEAU 5.72 Propriétés en cisaillement transversal des barres **#3** et **#4** en PRFB de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#3		#4	
	<i>F</i> (KN)	τ_u (MPa)	<i>F</i> (KN)	τ_u (MPa)
1	32	225	49	191
2	27	190	48	186
3	30	214	49	189
4	28	198	48	188
5	28	198	54	209
Moyenne	29	205	50	193
Écart Type	2,03	14,27	2,45	9,50
COV (%)	6,96	6,96	4,93	4,93

TABLEAU 5.73 Propriétés en cisaillement transversal des barres #5 et #6 en PRFB de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#5		#6	
	F (kN)	τ_u (MPa)	F (kN)	τ_u (MPa)
1	83	208	115	203
2	88	222	117	206
3	80	201	124	219
4	84	211	121	213
5	85	214	114	201
Moyenne	84	211	118	208
Écart Type	3,03	7,62	4,26	7,50
COV (%)	3,61	3,61	3,60	3,60

TABLEAU 5.74 Rétention de la résistance au cisaillement transversal des barres en PRFB de type 1

Barre	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
#3	35	29	84
#4	59	50	85
#5	89	84	94
#6	124	118	96

Barres en fibres de verre

Les résultats des tests de cisaillement transversal après le processus de conditionnement sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

1. Barres #4 et #5 (tableau 5.75) : les moyennes des contraintes au cisaillement transversal pour les barres #4 et #5 sont respectivement de 213 MPa et 198 MPa. Ces résultats dépassent la limite minimale de 180 MPa, montrant une excellente capacité à supporter des charges de cisaillement après conditionnement. La faible variation des résultats, indiquée par les COV inférieurs à 2 %, souligne une consistance et une fiabilité élevées dans la performance des matériaux.
2. Barres #6 et #8 (tableau 5.76) : pour ces diamètres plus grands, les barres conservent également une forte résistance au cisaillement transversal, avec des moyennes de 189 MPa pour les barres #6 et 176 MPa pour les barres #8. Ces valeurs maintiennent la performance au-dessus des exigences normatives, affirmant la durabilité des matériaux sous des charges de cisaillement significatives.

3. La rétention de la résistance au cisaillement transversal (tableau 5.77) met en lumière une remarquable durabilité des barres en PRFV de type 1, avec des taux de rétention de 88 % pour les barres #4 et #5, de 102 % et 98 % pour les barres #6 et #8 respectivement. Cela démontre l'exceptionnelle robustesse des barres en PRFV face à des défis environnementaux.

En conclusion, les armatures en PRFV de type 1 exhibent une excellente résistance au cisaillement transversal après conditionnement. Cette performance souligne l'efficacité de ces matériaux pour des applications de génie civil où la résistance au cisaillement est primordiale, offrant une solution durable et fiable pour le renforcement des structures exposées à des conditions environnementales difficiles.

TABLEAU 5.75 Propriétés en cisaillement transversal des barres #4 et #5 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#4		#5	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	55	214	80	201
2	54	210	77	194
3	55	213	79	197
4	54	210	80	200
5	56	219	78	195
Moyenne	55	213	79	198
Écart Type	0,96	3,72	1,15	2,88
COV (%)	1,75	1,75	1,46	1,46

TABLEAU 5.76 Propriétés en cisaillement transversal des barres #6 et #8 en PRFV de type 1 (barres conditionnées)

Spécimen	#6		#8	
	F (KN)	τ_u (MPa)	F (KN)	τ_u (MPa)
1	108	191	175	171
2	112	197	180	177
3	100	177	184	181
4	107	188	177	173
5	108	191	183	180
Moyenne	107	189	180	176
Écart Type	4,21	7,42	4,21	4,13
COV (%)	3,93	3,93	2,34	2,34

TABLEAU 5.77 Rétention de la résistance au cisaillement transversal des barres en PRFV de type 1

Barre	F_{tu0} (kN)	F_{tul} (kN)	R_{et} (%)
#4	63	55	88
#5	89	79	88
#6	105	107	102
#8	184	180	98

5.3 Bilan des essais de propriétés mécaniques

La comparaison entre les barres en fibre de basalte de type 1 et 2, et les barres en fibre de verre de type 1, révèle des nuances importantes dans leurs propriétés mécaniques qui les rendent adaptées à diverses applications dans le domaine du génie civil.

5.3.1 Barres en PRFB (type 1 et 2)

Barres de référencés

1. Les barres en PRFB, qu'elles soient de type 1 ou de type 2, présentent des résistances à la traction et des modules d'élasticité élevés. Les valeurs moyennes de résistance à la traction varient entre 845 MPa et 1007 MPa pour les barres de type 1, avec des performances similaires observées pour les barres de type 2, témoignant d'une forte capacité à résister aux forces de traction. Leur module d'élasticité, se situant autour de 62 à 67 GPa, indique une rigidité importante et une faible déformation sous charge, caractéristiques essentielles pour les structures devant supporter de lourdes charges.
2. Les tests d'arrachement pour les barres en PRFB, tant de type 1 que de type 2, ont montré des excellents résultats, avec des valeurs de contrainte à l'arrachement surpassant nettement la norme CSA S807-19, qui stipule une contrainte minimale de 10 MPa, avec des résultats allant de 10 à 16 MPa pour des diamètres allant de #3 à #6. Les barres de type 2 en PRFB ont révélé des contraintes à l'arrachement variant de 10 à 12 MPa pour les diamètres #5, #6, et #8, signifiant une adhérence robuste et une intégration solide au béton, ce qui est crucial pour les applications de renforcement structurel. Les résultats similaires obtenus pour les barres en PRFB de type 1 renforcent cette conclusion, démontrant leur efficacité dans des contextes où une forte adhérence est essentielle.
3. Les essais de cisaillement interlaminaire ajoutent une couche supplémentaire d'appréciation de la qualité de ces barres. Les barres en PRFB de type 2 surpassent

largement les exigences de la norme CSA S807-19, avec des contraintes en cisaillement moyennes excédant les 80 MPa pour les diamètres testés, bien au-dessus de la limite spécifiée dans la norme. Cette performance supérieure souligne non seulement la haute capacité de charge des barres en PRFB mais aussi leur homogénéité et fiabilité dans des contextes structurels exigeants.

4. Les résultats des tests de cisaillement transversal fournissent des résultats précieux sur la capacité des barres à résister à des forces perpendiculaires à leur axe. Pour les barres en PRFB de type 2, les contraintes de cisaillement transversal (τ_u) ont largement surpassé la limite spécifiée par la norme CSA S807-19 [84] de 180 MPa, avec des valeurs moyennes atteignant jusqu'à 247 MPa pour les barres #5, 245 MPa pour les barres #6, et jusqu'à 247 MPa pour les barres #8, démontrant une résistance exceptionnelle aux forces de cisaillement. De même, les barres en PRFB de type 1 ont montré d'excellentes performances, avec des valeurs moyennes de τ_u dépassant également les exigences normatives, affirmant leur fiabilité et durabilité dans des applications structurales soumises à des sollicitations transversales importantes.

Barres conditionnées

1. Les résultats de résistance à la traction des barres en PRFB de type 1 après conditionnement montrent une certaine diminution de la résistance et du module d'élasticité par rapport aux valeurs initiales, mais restent significativement au-dessus des limites normatives, avec une rétention de résistance dépassant généralement les 80 %, sauf pour les barres de diamètre #6. Cette performance illustre la bonne durabilité des barres en PRFB face à des conditions potentiellement dégradantes, affirmant leur fiabilité pour des applications structurales à long terme.

Les barres en PRFB de type 2, quant à elles, démontrent également une excellente durabilité, avec des rétentions de résistance à la traction particulièrement élevées pour les différents lots testés, avoisinant ou dépassant les 95 %. Ces résultats confirment la capacité des barres de type 2 à maintenir une grande partie de leurs propriétés mécaniques après exposition à des conditions environnementales sévères, soulignant leur aptitude pour des utilisations où la durabilité est un facteur critique.

2. Les résultats des tests de résistance à la traction avec charge des barres en PRFB de type 2 révèlent une adaptation remarquable de ces matériaux face aux différentes conditions appliquées. Malgré l'application de charges, ces barres présentent une capacité de conservation de leurs propriétés mécaniques essentielles, avec une réduction contenue de la résistance et du module d'élasticité par rapport aux états initiaux non conditionnés. De façon significative, la rétention de résistance pour les barres testées

dépasse souvent le seuil de 70 % recommandé par les normes, atteignant dans certains cas jusqu'à 99 % pour le lot 3 des barres de diamètre #6. Cette performance exceptionnelle sous charge témoigne de la robustesse et de la fiabilité des barres en PRFB de type 2 pour des applications de génie civil exigeant une longévité et une résilience élevées face aux contraintes mécaniques continues. Elle confirme leur positionnement en tant que solution durable et performante, apte à répondre aux défis des environnements les plus rigoureux.

3. Les tests de cisaillement interlaminaire sur les barres en PRFB de type 1 conditionnées révèlent une performance remarquable, indiquant une robustesse significative de ces matériaux face aux forces de cisaillement entre les couches. Les barres de diamètres #3 et #4 ont montré des contraintes moyennes de cisaillement (S) de 43 MPa, tandis que pour les diamètres plus importants, #5 et #6, les valeurs moyennes atteignent respectivement 60 MPa et 58 MPa, surpassant largement la limite minimale spécifiée de 45 MPa pour la résistance au cisaillement interlaminaire selon les normes. Ces résultats démontrent non seulement la capacité des barres à maintenir leur intégrité sous des contraintes importantes mais aussi leur potentiel d'application dans des environnements exigeants où la résistance au cisaillement est critique. De plus, la rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire, avec des pourcentages de rétention allant de 94 % à 105 % pour différentes tailles de barres, souligne la durabilité exceptionnelle des barres en PRFB de type 1. Cette durabilité est cruciale pour les applications de génie civil où la longévité et la fiabilité des matériaux sont primordiales, en particulier dans les structures soumises à des charges cycliques ou à des environnements agressifs.
4. Les tests de cisaillement transversal sur les barres en PRFB de type 1 pour les diamètres #3, #4, #5, et #6 montrent des résultats impressionnants, soulignant la robustesse de ces matériaux sous des sollicitations perpendiculaires à leur axe longitudinal. Les valeurs de contrainte au cisaillement transversal (τ_u) pour les barres #3 et #4 s'établissent respectivement à une moyenne de 205 MPa et 193 MPa, surpassant nettement les exigences normatives minimales. Pour les barres de plus grands diamètres, #5 et #6, les performances restent tout aussi remarquables, avec des moyennes de τ_u atteignant 211 MPa et 208 MPa. Ces résultats témoignent de la capacité exceptionnelle des barres en PRFB de type 1 à résister aux charges de cisaillement, un attribut crucial pour les applications structurelles où de telles sollicitations sont fréquentes. De plus, la rétention de la résistance au cisaillement transversal après conditionnement illustre la durabilité de ces barres face à des conditions environnementales potentiellement dégradantes. Les taux de rétention observés, al-

lant de 84 % pour les barres #3 à 96 % pour les barres #6, révèlent une perte minimale de performance, assurant ainsi une fiabilité à long terme des structures qui les intègrent. Ce niveau de performance soutenu, même après conditionnement, renforce la confiance dans l'utilisation des barres en PRFB de type 1 pour des applications de génie civil exigeantes, où la durabilité et la résistance au cisaillement sont des critères déterminants.

5.3.2 Barres en PRFV (type 1)

Barres de référencés

1. La résistance à la traction est exceptionnellement élevée pour les petits diamètres, atteignant jusqu'à 1243 MPa pour les barres #3, mais cette résistance tend à diminuer légèrement pour les plus grands diamètres. Cette caractéristique les rend particulièrement adaptées aux applications où une très haute résistance à la traction est cruciale, tout en conservant une certaine légèreté. Leur module d'élasticité, comparable à celui des barres en PRFB, assure une bonne rigidité structurelle, tandis que leur déformation ultime, légèrement supérieure dans certains cas, offre une meilleure ductilité.
 2. La résistance à l'arrachement des barres, en particulier pour les petits diamètres, présentant des valeurs dépassant les exigences de la norme. Cette forte adhérence au béton, combinée à leur haute résistance à la traction et module d'élasticité, rend les barres en PRFV particulièrement adaptées à des applications où la légèreté, la haute performance en traction, et une bonne adhérence sont critiques.
 3. Les résultats des tests de cisaillement interlaminaire pour les barres en PRFV indiquent également une excellente performance, avec des contraintes en cisaillement moyennes dépassant les 50 MPa pour tous les diamètres étudiés, réitérant leur aptitude à maintenir une intégrité structurelle sous des charges de cisaillement élevées.
 4. Les tests de cisaillement transversal présentent de bonnes performances mécaniques, avec des contraintes de cisaillement moyennes (τ_u) dépassant la limite de 180 MPa. Bien que ces valeurs soient inférieures à celles observées pour les barres en PRFB, elles restent significatives, surtout considérant la haute résistance à la traction des barres en PRFV. Cela indique que les barres en PRFV maintiennent une intégrité structurelle solide même sous des charges de cisaillement élevées, ce qui les rend aptes pour diverses applications dans le génie civil où la résistance au cisaillement est critique.
-

Barres conditionnées

1. La résistance à la traction des barres conditionnées montre une bonne rétention de leurs propriétés mécaniques, avec une légère diminution de la résistance à la traction et du module d'élasticité par rapport aux valeurs non conditionnées. Notamment, les barres de plus petit diamètre (**#3**) ont montré une réduction plus marquée, tandis que les barres de plus grand diamètre (**#6** et **#8**) ont révélé une rétention de la résistance à la traction de plus de 100 %, indiquant non seulement une conservation mais une possible amélioration de leurs propriétés après conditionnement. Cette performance exceptionnelle met en évidence la robustesse des barres en PRFV de type 1 face aux défis environnementaux, les rendant particulièrement adaptées pour des environnements exigeants.
 2. Les tests de cisaillement interlaminaire sur les barres en PRFV de type 1 conditionnées pour les diamètres **#3**, **#4**, **#5**, **#6**, et **#8** révèlent une performance exceptionnelle, avec des moyennes de contrainte au cisaillement (S) respectivement de 54 MPa, 54 MPa, 58 MPa, 58 MPa, et 47 MPa. Ces résultats surpassent la limite spécifiée de 45 MPa pour la résistance au cisaillement interlaminaire, démontrant une intégrité structurelle impressionnante des barres en PRFV sous des sollicitations de cisaillement. La rétention de la résistance au cisaillement interlaminaire est également notable, avec des valeurs allant de 95 % à 107 % pour les différents diamètres, illustrant la durabilité remarquable de ces barres face à des conditions de test exigeantes. Cette performance souligne la robustesse des barres en PRFV de type 1, affirmant leur capacité à maintenir une liaison structurale solide et à résister efficacement à des forces de cisaillement, ce qui les rend idéales pour des applications dans le génie civil où la résistance au cisaillement est critique.
 3. Les tests de cisaillement transversal sur les barres en PRFV de type 1 conditionnées pour les diamètres **#4**, **#5**, **#6**, et **#8** ont mis en évidence des performances remarquables, avec des moyennes de contrainte au cisaillement transversal (τ_u) respectivement de 213 MPa, 198 MPa, 189 MPa, et 176 MPa. Ces résultats dépassent largement la limite minimale de 180 MPa spécifiée, soulignant l'exceptionnelle résistance au cisaillement transversal de ces matériaux, même après conditionnement. La rétention de la résistance, variant de 88 % à 102 %, témoigne de la durabilité et de la robustesse des barres en PRFV face aux sollicitations transversales, critère essentiel pour les applications de génie civil exigeant une intégrité structurelle sous des charges transversales élevées. La performance particulièrement élevée du diamètre **#6**, avec une rétention dépassant 100 %, illustre la capacité des barres
-

PRFV de type 1 à conserver leurs propriétés mécaniques intactes face aux forces de cisaillement transversales.

5.3.3 Implications pour le Génie Civil

Les barres en fibre de basalte (PRFB), de type 1 ou de type 2, sont avantageuses pour les applications nécessitant une haute résistance à la traction combinée à une bonne rigidité et une ductilité modérée. Elles sont idéales pour les structures exigeant une forte capacité de charge et une résistance durable aux conditions environnementales.

Les barres en fibre de verre (PRFV), de type 1, offrent une résistance à la traction très élevée pour les petits diamètres, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications où la légèreté et la haute performance en traction sont critiques. Leur module d'élasticité et leur déformation ultime comparables aux barres en PRFB les rendent également appropriées pour une large gamme d'applications structurales.

En conclusion, le choix entre les barres en PRFB et PRFV de type 1 devrait être guidé par les exigences spécifiques du projet, notamment la nécessité de résistance à la traction, de rigidité, et de ductilité. Tandis que les barres en PRFB offrent une excellente combinaison de ces propriétés pour une utilisation généralisée dans le génie civil, les barres en PRFV se distinguent par leur résistance à la traction exceptionnelle pour les petits diamètres, suggérant une spécialisation pour des applications où cette caractéristique est primordiale.

5.4 Propriétés physiques

Les tests pour la détermination des propriétés physiques des barres en PRF, ont été menés conformément aux normes ASTM et CSA en vigueur, notamment la section effective, le taux de fibre, le taux d'absorption d'humidité à court et long terme, la température de transition vitreuse (T_g) et le taux de cure. Comme mentionné précédemment, les propriétés des barres de fibre de basalte sont comparées à la limitation des barres PRF de verre, car elles n'ont pas été incluses dans les spécifications standard des PRF.

5.4.1 Section effective

Le tableau 5.78 récapitule les limites minimales et maximales de la section effective pour différentes tailles de barres en PRF, conformément à la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15]. Cette norme établit des critères spécifiques pour la section transversale des barres en PRF.

TABLEAU 5.78 Limites des diamètres de barres en PRF pour chaque barre selon la norme ASTM D7957/D7957M-22 (mm²) [15]

Barre	Minimum	Maximum
#3	67	104
#4	119	169
#5	186	251
#6	268	347
#8	476	589

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Le tableau 5.79 présente les sections effectives des barres de fibre de basalte de type 1. Les dimensions des barres étudiées varient du numéro #3 au numéro #6. Pour la taille #8, les données ne sont pas disponibles, ce qui représente une différence notable par rapport aux essais menés sur les barres en fibres de verre. Les valeurs mesurées sont mises en comparaison avec les exigences de la norme ASTM D7957/D7957M-22 [15], qui spécifie les dimensions minimales et maximales pour les sections effectives des barres en PRF pour chaque diamètre standard.

Les résultats montrent que les sections effectives des barres de type 1 sont conformes aux limites établies par les normes, comme le démontre le tableau 5.78. La consistance des mesures, indiquée par des écarts types faibles et des coefficients de variation réduits, souligne l'uniformité du processus de fabrication des barres de type 1.

TABLEAU 5.79 Section effective de barres de fibre de basalte de type 1 (mm²)

Spécimen	#3	#4	#5	#6	#8
1	88	143	240	347	N/A
2	83	144	233	346	N/A
3	84	145	243	343	N/A
4	84	144	245	345	N/A
5	83	145	236	342	N/A
Moyenne	84	144	239	345	N/A
Écart Type	2,08	0,85	4,63	2,07	N/A
COV (%)	2,47	0,59	1,94	0,60	N/A

Barres en fibres de verre

Le tableau 5.80 présente les sections effectives des barres en fibre de verre de type 1. Les tailles des barres étudiées vont du #3 au #8. Les valeurs moyennes des barres respectent les limites établies dans le tableau 5.78. Les écarts types et les coefficients de variation (COV) restent dans une marge acceptable, soulignant ainsi la régularité et la fiabilité du produit fini.

TABLEAU 5.80 Section effective de barres de fibre de verre de type 1 (mm²)

Spécimen	#3	#4	#5	#6	#8
1	90	157	238	338	566
2	89	151	241	341	587
3	87	154	229	333	557
4	91	152	241	337	557
5	92	147	236	335	544
Moyenne	90	152	237	337	562
Écart Type	1,67	3,94	4,90	3,10	16,02
COV (%)	1,86	2,59	2,07	0,92	2,85

Les sections effectives des barres de fibre de basalte et de fibre de verre de type 1 pour chaque diamètre de barre révèlent quelques différences intéressantes :

1. Pour le diamètre #3, la moyenne des sections effectives des barres de fibre de verre est légèrement supérieure (90 mm²) à celle des barres de fibre de basalte (84 mm²). Les écarts types et COV sont également plus faibles pour les barres de basalte, ce qui indique une consistance de production plus élevée pour ce matériau à ce diamètre.
2. Pour le diamètre #4, les barres de fibre de verre présentent une section effective moyenne de 152 mm², tandis que les barres de basalte ont une moyenne de 144 mm². Encore une fois, le basalte montre une plus grande uniformité avec un COV plus faible.
3. Pour le diamètre #5, les deux types de barres ont des sections effectives très similaires, avec une moyenne de 239 mm² pour le basalte et 237 mm² pour le verre. Cependant, l'écart type et le COV sont considérablement plus élevés pour les barres de fibre de verre, suggérant une variation plus importante dans la production.
4. Pour le diamètre #6, les sections effectives des barres de verre et de basalte sont presque identiques avec une moyenne de 345 mm² pour le basalte et 337 mm² pour le verre. Cependant, les barres de verre ont un écart type plus élevé, indiquant une variation plus grande dans la section effective par rapport aux barres de basalte.

5. Pour le diamètre #8, il n'y a pas de données disponibles pour les barres de basalte, mais les barres de verre ont une section effective moyenne de 562 mm^2 avec un écart type significatif de 16,02, indiquant la plus grande variabilité parmi tous les diamètres et matériaux analysés.

En résumé, bien que les barres de fibre de verre de type 1 aient généralement des sections effectives légèrement plus élevées, les barres de fibre de basalte démontrent une meilleure consistance dans leurs dimensions à travers les différents diamètres. Cette uniformité est cruciale pour l'intégrité structurale et la fiabilité dans les applications d'ingénierie.

Barres de type 2

Barres en fibres de basalte

Le tableau 5.81 présente les sections effectives des barres non sablées en fibre de basalte de type 2 :

1. Le tableau 5.81a présente les résultats de la section effective pour les barres non sablées en fibre de basalte de type 2 de diamètre #5. Les résultats pour les différents lots montrent des sections effectives moyennes qui se situent autour de 220 mm^2 , avec de très faibles écarts par rapport aux valeurs attendues. Les données révèlent une grande régularité dans la section effective des barres, avec des écarts types qui ne dépassent pas $3,45 \text{ mm}^2$ et des coefficients de variation (COV) maximaux de 1,56 %, indiquant une production homogène et bien contrôlée. Ces caractéristiques démontrent l'aptitude des barres de type 2 à répondre aux exigences des applications structurales.
2. Le tableau 5.81b illustre les valeurs de la section effective pour les barres non sablées en fibre de basalte de type 2, correspondant au diamètre #6. Les mesures sont effectuées pour trois lots différents, mettant en évidence une constance remarquable des dimensions avec des moyennes de section effective allant de 302 à 341 mm^2 . Malgré quelques variations naturelles de production, illustrées par des écarts types sous les 3 mm^2 et des coefficients de variation inférieurs à 1 %, les sections effectives demeurent dans une plage de tolérance très serrée. Cette précision dans la fabrication des barres de type 2 assure leur fiabilité et leur conformité avec les normes.
3. Le tableau 5.81c détaille les mesures de la section effective des barres non sablées en fibre de basalte de type 2 de diamètre #8. Ces données sont effectuées pour trois lots distincts. La consistance des résultats est notable, avec des moyennes de section effective oscillant entre 552 et 567 mm^2 . Bien que l'écart type et le coefficient de variation (COV) soient légèrement plus élevés que pour les diamètres inférieurs (#5 et #6), ils demeurent suffisamment bas pour témoigner de la qualité et de l'uniformité du produit fini.

TABLEAU 5.81 Section effective de barres non sablées en fibre de basalte de type 2 (mm²)

(a) Barres #5				(b) Barres #6			
Spécimen	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Spécimen	Lot 1	Lot 2	Lot 3
1	219	222	222	1	342	342	300
2	220	223	220	2	340	341	304
3	220	216	218	3	341	337	304
4	223	220	221	4	340	343	297
5	221	219	224	5	337	344	307
6	221	216	224	6	338	340	303
7	220	220	225	7	334	341	302
8	221	220	217	8	342	343	304
9	218	215	228	9	337	339	300
10	220	223	219	10	338	336	303
Moyenne	220	219	222	Moyenne	339	341	302
Écart Type	1,42	2,72	3,45	Écart Type	2,49	2,66	2,74
COV (%)	0,65	1,24	1,56	COV (%)	0,73	0,78	0,90

(c) Barres #8

Spécimen	Lot 1	Lot 2	Lot 3
1	565	556	561
2	537	554	559
3	527	547	571
4	573	542	563
5	566	555	565
6	560	558	571
7	565	551	571
8	569	552	573
9	549	550	562
10	563	553	569
Moyenne	557	552	567
Écart Type	14,81	4,54	5,13
COV (%)	2,66	0,82	0,91

5.4.2 Teneur en fibres

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Le tableau 5.82 présente les taux de fibres dans les barres de fibre de basalte de type 1. Les spécimens analysés varient des tailles #3 à #6, avec une absence de données pour la taille #8, contrairement aux tests effectués sur les barres en fibres de verre.

Les résultats démontrent une uniformité remarquable dans la composition des barres de basalte, avec des taux de fibres variant entre 83 % et 86 %, largement supérieurs au seuil minimal de 70 % exigé par les normes.

TABLEAU 5.82 Taux de fibres de barres de fibre de basalte de type 1 (%)

Spécimen	#3	#4	#5	#6	#8
1	84	86	84	83	N/A
2	84	86	83	83	N/A
3	84	86	84	84	N/A
4	84	86	84	83	N/A
5	84	86	83	84	N/A
Moyenne	84	86	84	83	N/A
Écart Type	0,17	0,05	0,23	0,06	N/A
COV (%)	0,20	0,05	0,27	0,07	N/A

Barres en fibres de verre

Le tableau 5.83 présente les résultats obtenus pour les barres de fibre de verre de type 1. Dans ces résultats, les taux de fibres varient entre 85 % et 86 % pour toutes les tailles de barres, ce qui démontre une régularité similaire à celle observée pour les barres de basalte.

TABLEAU 5.83 Taux de fibres de barres de fibre de verre de type 1 (%)

Spécimen	#3	#4	#5	#6	#8
1	85	85	86	86	86
2	85	85	85	86	86
3	85	85	86	86	86
4	85	85	86	86	86
5	85	85	86	86	86
Moyenne	85	85	85	86	86
Écart Type	0,29	0,13	0,25	0,06	0,04
COV (%)	0,34	0,16	0,30	0,07	0,05

Barres de type 2**Barres en fibres de basalte**

Les résultats présentés dans les tableaux 5.84, 5.85 et 5.86, révèlent une variabilité notable dans les taux de fibres de leurs barres de basalte. Pour les barres sablées, les taux de fibres oscillent entre 75 % et 76 %, tandis que pour les barres non sablées, ces valeurs varient entre 71 % et 77 %. Bien que ces chiffres respectent la norme minimale de 70 % établie par l'ASTM D2584-18 [10], les écarts types et les coefficients de variation (COV) sont significativement plus élevés que ceux observés pour les barres de type 1, indiquant une hétérogénéité dans la composition des barres de type 2.

TABLEAU 5.84 Taux de fibres de barres #5 en fibre de basalte de type 2 (%)

(a) Barres sablées				(b) Barres non sablées			
Spécimen	Lot 2	Lot 2	Lot 3	Spécimen	Lot 2	Lot 2	Lot 3
1	75	77	76	1	74	74	76
2	75	76	76	2	74	75	76
3	76	76	76	3	75	74	76
4	75	76	75	4	75	74	76
5	75	76	76	5	74	74	76
Moyenne	75	76	76	Moyenne	75	74	76
Écart Type	0,30	0,33	0,34	Écart Type	0,27	0,30	0,13
COV (%)	0,40	0,44	0,45	COV (%)	0,37	0,40	0,18

TABLEAU 5.85 Taux de fibres de barres #6 en fibre de basalte de type 2 (%)

(a) Barres sablées				(b) Barres non sablées			
Spécimen	Lot 2	Lot 2	Lot 3	Spécimen	Lot 2	Lot 2	Lot 3
1	76	76	75	1	72	77	76
2	75	76	75	2	71	77	76
3	76	76	75	3	71	76	76
4	76	76	75	4	71	77	76
5	75	76	75	5	71	77	76
Moyenne	76	76	75	Moyenne	71	77	76
Écart Type	0,34	0,17	0,21	Écart Type	0,14	0,26	0,13
COV (%)	0,44	0,22	0,27	COV (%)	0,20	0,33	0,17

TABLEAU 5.86 Taux de fibres de barres #8 en fibre de basalte de type 2 (%)

(a) Barres sablées				(b) Barres non sablées			
Spécimen	Lot 2	Lot 2	Lot 3	Spécimen	Lot 2	Lot 2	Lot 3
1	73	70	72	1	73	73	72
2	73	71	73	2	72	73	73
3	73	71	73	3	73	73	73
4	72	71	73	4	73	73	73
5	71	71	73	5	73	73	73
Moyenne	72	71	73	Moyenne	73	73	73
Écart Type	0,80	0,41	0,11	Écart Type	0,18	0,10	0,10
COV (%)	1,10	0,57	0,16	COV (%)	0,25	0,14	0,14

5.4.3 Taux d'absorption d'humidité à court et à long terme

Selon la norme ASTM D570-22 [12], il est spécifié que le Taux d'absorption d'humidité à court terme, sur une période de 24 heures, ne doit pas excéder 0,25 % et ne doit pas dépasser 1 % pour le taux d'absorption à long terme (saturation). Les seuils spécifiés sont présentés dans le tableau tableau 5.87 ci-dessous, qui résume les critères d'absorption d'eau conformément à la norme ASTM D570-22 [12]. L'analyse se concentre exclusivement sur les échantillons de type, étant donné que seules les barres non sablées sont considérées comme pertinentes pour évaluer le taux d'absorption d'humidité. Il est à noter que, bien que les barres de type 1 aient été testées, les résultats obtenus ont été inconsistants à chaque expérimentation.

TABLEAU 5.87 Limites maximales d'absorption (%)

Conditionne	24 h	Saturation
Limite	0,25	1

Barres de type 2

Barres en fibres de basalte

Les résultats des Taux d'absorption d'humidité pour les barres fibres de basalte de type 2, notamment pour les diamètres #5, #6, et #8, analysées dans le tableau 5.88, tableau 5.89, et tableau 5.90, démontrent une performance exceptionnelle par rapport aux normes ASTM D570-22 [12]. Les résultats, après 24 heures, montrent que les taux d'absorption sont significativement inférieurs à la limite de 0,25 % pour tous les lots et diamètres testés, oscillant entre 0,03 % et 0,22 %. À saturation, les taux d'absorption demeurent

également bien en dessous de la limite de 1 %, avec des valeurs s'étendant de 0,12 % à 0,43 %.

TABLEAU 5.88 Taux d'absorption d'humidité de la barre #5 de type 2 de trois lots différents après 24 heures et jusqu'à saturation (%)

(a) #5 Lot 1

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,22	0,41	0,43	0,43	0,43
2	0,15	0,46	0,46	0,46	0,46
3	0,22	0,41	0,41	0,41	0,41
4	0,11	0,32	0,33	0,33	0,33
5	0,11	0,35	0,35	0,35	0,35
Moyenne	0,16	0,39	0,40	0,40	0,40
Écart Type	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05
COV (%)	34,63	14,29	13,68	13,75	13,75

(b) #5 Lot 2

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,05	0,09	0,11	0,14	0,14
2	0,04	0,09	0,17	0,18	0,18
3	0,05	0,09	0,12	0,13	0,13
4	0,03	0,07	0,10	0,12	0,12
5	0,03	0,07	0,11	0,13	0,13
Moyenne	0,04	0,08	0,12	0,14	0,14
Écart Type	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02
COV (%)	24,66	13,23	22,07	16,77	16,77

(c) #5 Lot 3

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,04	0,11	0,17	0,18	0,18
2	0,05	0,10	0,15	0,20	0,20
3	0,10	0,10	0,17	0,27	0,27
4	0,06	0,12	0,15	0,20	0,20
5	0,09	0,12	0,15	0,21	0,21
Moyenne	0,07	0,11	0,16	0,21	0,21
Écart Type	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03
COV (%)	36,44	9,31	7,30	15,06	15,06

TABLEAU 5.89 Taux d'absorption d'humidité de la barre #6 de type 2 de trois lots différents après 24 heures et jusqu'à saturation (%)

(a) #6 Lot 1

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,13	0,26	0,32	0,36	0,36
2	0,13	0,25	0,34	0,38	0,38
3	0,16	0,26	0,39	0,42	0,42
4	0,10	0,22	0,28	0,34	0,34
5	0,13	0,28	0,39	0,40	0,40
Moyenne	0,13	0,26	0,34	0,38	0,38
Écart Type	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03
COV (%)	18,31	9,04	13,68	8,35	8,35

(b) #6 Lot 2

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,08	0,32	0,33	0,33	0,33
2	0,12	0,30	0,31	0,31	0,31
3	0,14	0,25	0,30	0,30	0,30
4	0,10	0,23	0,27	0,28	0,28
5	0,10	0,22	0,28	0,28	0,28
Moyenne	0,11	0,27	0,30	0,30	0,30
Écart Type	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02
COV (%)	20,41	17,20	7,99	6,90	6,90

(c) #6 Lot 3

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,04	0,10	0,14	0,16	0,16
2	0,03	0,09	0,13	0,15	0,15
3	0,04	0,10	0,13	0,16	0,16
4	0,04	0,13	0,14	0,22	0,22
5	0,06	0,11	0,13	0,20	0,20
Moyenne	0,04	0,11	0,14	0,18	0,18
Écart Type	0,01	0,02	0,00	0,03	0,03
COV (%)	21,13	14,87	3,23	15,93	15,93

TABLEAU 5.90 Taux d'absorption d'humidité de la barre #8 de type 2 de trois lots différents après 24 heures et jusqu'à saturation (%)

(a) #8 Lot 1

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,06	0,11	0,13	0,13	0,13
2	0,05	0,11	0,13	0,13	0,13
3	0,06	0,11	0,12	0,14	0,14
4	0,04	0,13	0,12	0,12	0,12
5	0,06	0,10	0,12	0,12	0,12
Moyenne	0,05	0,11	0,13	0,13	0,13
Écart Type	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
COV (%)	13,21	8,58	3,54	4,89	4,89

(b) #8 Lot 2

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,04	0,09	0,11	0,12	0,12
2	0,06	0,08	0,11	0,12	0,12
3	0,05	0,10	0,12	0,21	0,21
4	0,04	0,13	0,14	0,15	0,15
5	0,04	0,08	0,11	0,12	0,12
Moyenne	0,05	0,09	0,12	0,15	0,15
Écart Type	0,01	0,02	0,01	0,04	0,04
COV (%)	22,24	21,17	12,03	25,47	25,47

(c) #8 Lot 3

Spécimen	24 h	1 semaine	2 semaines	3 semaines	Saturation
1	0,11	0,15	0,18	0,19	0,19
2	0,08	0,16	0,21	0,23	0,23
3	0,07	0,12	0,17	0,20	0,20
4	0,09	0,12	0,16	0,19	0,19
5	0,07	0,14	0,22	0,25	0,25
Moyenne	0,09	0,14	0,19	0,21	0,21
Écart Type	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
COV (%)	21,43	13,39	13,31	12,20	12,20

5.4.4 Température de transition vitreuse

La détermination de la température de transition vitreuse fournit des informations précieuses sur les processus de fabrication et contribue à une meilleure compréhension des propriétés mécaniques et physiques du matériau. La norme ASTM E1356-23 [18] précise que cette température doit être supérieure à 100 °C.

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte

Les tests de température de transition vitreuse sur les barres en fibre de basalte et en fibre de verre de type 1 révèlent des performances supérieures à l'exigence minimale de 100 °C. Les résultats pour les barres en fibre de basalte (Tableau 5.91) montrent des températures moyennes de transition vitreuse entre 122 °C et 135 °C.

TABLEAU 5.91 Température de transition vitreuse
des barres en fibre de basalte de type 1 (°C)

Spécimen	#3	#4	#5	#6
1	132	139	125	120
2	133	130	126	123
3	137	136	124	122
Moyenne	134	135	125	122

Barres en fibres de verre

Également, les barres en fibre de verre (Tableau 5.92) affichent des températures de transition vitreuse moyennes allant de 118 °C pour les barres #3 et #6 à 125 °C pour les barres #5 et #8, démontrant, elles aussi, une excellente stabilité thermique. Ces résultats soulignent non seulement la conformité des matériaux de type 1 avec les standards établis, mais aussi leur capacité à offrir une marge de sécurité thermique considérable.

TABLEAU 5.92 Température de transition vitreuse
des barres en fibre de verre de type 1 (°C)

Spécimen	#3	#4	#5	#6	#8
1	120	132	127	118	127
2	116	120	120	121	125
3	117	114	128	116	122
Moyenne	118	122	125	118	125

Barres de type 2

Barres en fibres de basalte

Les tests de température de transition vitreuse sur les barres en fibre de basalte de type 2 montrent que toutes les mesures restent au-dessus de l'exigence de la norme, qui exige une température supérieure à 100 °C. Pour les barres **#5** (tableau 5.93), la température moyenne de transition vitreuse est uniformément reportée à 105 °C à travers les trois lots. Les barres **#6** (Tableau 5.94) présentent des températures moyennes comprises entre 102 °C et 108 °C. Enfin, les barres **#8** (tableau 5.95) affichent des températures moyennes de transition vitreuse stables, variant de 114 à 116 °C, ce qui indique une excellente tenue thermique à travers différents diamètres de barres.

TABLEAU 5.93 Température de transition vitreuse
des barres **#5** de type 2 (°C)

Spécimen	Lot 1	Lot 2	Lot 3
1	107	105	105
2	105	105	106
3	103	107	103
Moyenne	105	105	105

TABLEAU 5.94 Température de transition vitreuse
des barres **#6** de type 2 (°C)

Spécimen	Lot 1	Lot 2	Lot 3
1	110	104	101
2	108	101	103
3	107	101	104
Moyenne	108	102	103

TABLEAU 5.95 Température de transition vitreuse
des barres **#8** de type 2 (°C)

Spécimen	Lot 1	Lot 2	Lot 3
1	116	113	115
2	118	114	114
3	116	115	114
Moyenne	116	114	114

5.4.5 Taux de Polymérisation

Le Taux de Polymérisation a été obtenu conformément à la norme ASTM E2160-23 [21], par calorimétrie différentielle à balayage (DSC), laquelle précise que le taux de cure doit être au minimum de 95 %.

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte et de verre

Les tests de taux de cure pour les barres en fibre de basalte de type 1 et 2 et de fibre de verre de type 1, révèlent une polymérisation complète à travers tous les échantillons testés, conformément à la norme ASTM E2160-23. Les résultats, indiqués dans les tableaux 5.96, 5.97, et 5.98, montrent un taux de cure de 100 % pour chaque spécimen, dépassant ainsi la limite minimale de 95 % prescrite par la norme.

TABLEAU 5.96 Taux de cure des barres en fibre de basalte de type 1 (%)

Spécimen	#3	#4	#5	#6
1	100	100	100	100
2	100	100	100	100
3	100	100	100	100
Moyenne	100	100	100	100

TABLEAU 5.97 Taux de cure des barres en fibre de verre de type 1 (%)

Spécimen	#3	#4	#5	#6	#8
1	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100
3	100	100	100	100	100
Moyenne	100	100	100	100	100

Barres de type 2

Barres en fibres de basalte

TABLEAU 5.98 Taux de cure pour les trois lots des barres (#5, #6 et #8) de type 2 (%)

Spécimen	Lot 1	Lot 2	Lot 3
1	100	100	100
2	100	100	100
3	100	100	100
Moyenne	100	100	100

5.4.6 Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)

Le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est une méthode qui permet d'identifier les groupes chimiques d'une résine en analysant les pics d'absorption résultant des vibrations moléculaires. Chaque groupe chimique absorbe à des longueurs d'onde spécifiques, ce qui permet de déduire la composition chimique de la résine étudiée. Les figures

5.1 et 5.2 présentent les spectres IRTF pour les barres de basalte et de verre de type 1, à la fois dans leur état de référence et après un conditionnement de trois mois à 60 °C dans une solution alcaline.

Barres de type 1

Les spectres montrent des pics significatifs dans les bandes associées aux vibrations des liaisons C-H, aux alentours de 2900 cm^{-1} , et aux hydroxyles O-H (présents dans les groupes alcool ou acide carboxylique) vers 3500 cm^{-1} . Les spectres des lignes continues correspondent aux échantillons de référence pour les diamètres #3, #4, et #5, tandis que les lignes discontinues représentent les échantillons après immersion dans la solution alcaline.

La stabilité des pics hydroxyles (observée dans tous les échantillons), sans augmentation notable après le conditionnement, suggère l'absence d'hydrolyse significative des unités sensibles telles que les groupes esters dans les résines. Cela indique que la matrice de résine vinylester des barres de type 1 conserve sa composition chimique et ne subit pas de dégradation notable lorsqu'elle est exposée à un environnement alcalin pendant trois mois à 60 °C.

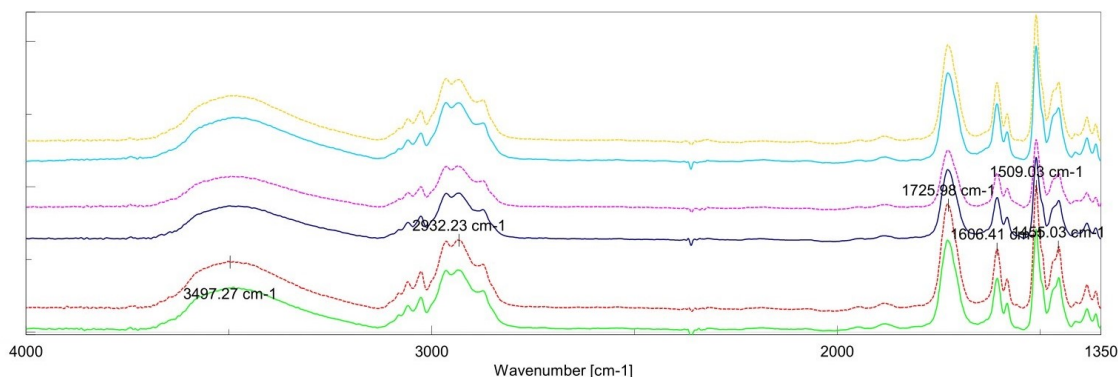


FIGURE 5.1 Analyse par infrarouge d'échantillons de références et conditionnées dans une solution alcaline à 60 °C des barres en PRFB

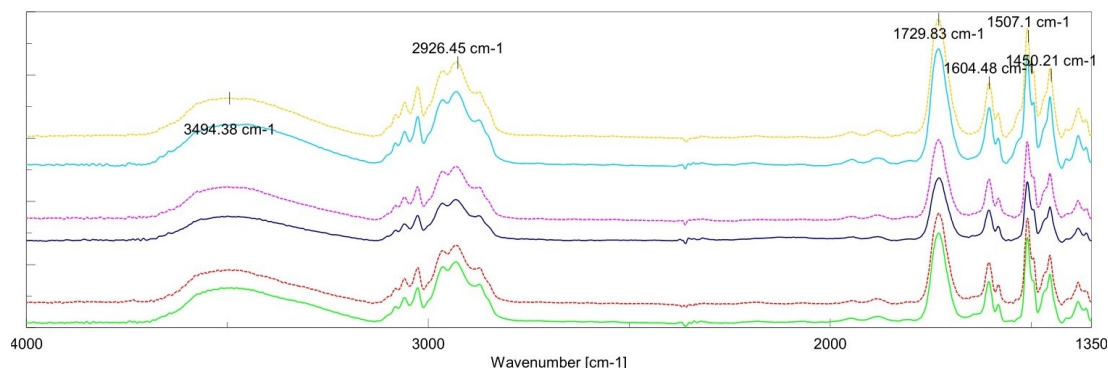


FIGURE 5.2 Analyse par infrarouge d'échantillons de références et conditionnées dans une solution alcaline à 60 °C des barres en PRFV

5.4.7 Microscope électronique à balayage (MEB)

L'analyse au Microscope Électronique à Balayage (MEB) constitue une méthode d'investigation essentielle pour examiner la microstructure des armatures en Polymères Renforcés de Fibres (PRF), offrant une visualisation détaillée des interfaces fibre-résine et des défauts microscopiques. Cette technique permet d'évaluer de manière approfondie l'impact des environnements agressifs sur la structure interne des composites, en particulier après l'exposition à des conditions alcalines simulées.

Pour ce projet, l'emploi du MEB s'est concentré sur l'analyse des sections transversales des échantillons en PRF de basalte (PRFB) et de verre (PRFV), conditionnés dans une solution alcaline. L'objectif était de déceler les modifications structurales induites par ce conditionnement, en comparant les caractéristiques microscopiques des échantillons traités à celles des spécimens de référence non exposés.

Barres de type 1

Barres en fibres de basalte et de verre

Les observations au MEB des armatures en PRFB ont révélé la présence de plusieurs formes de détérioration. Notamment, la formation de pores au sein de la matrice polymère et le détachement, voire la rupture, de certaines fibres ont été clairement identifiées (figure 5.3). Ces anomalies peuvent compromettre l'intégrité structurale des barres et, par conséquent, influencer négativement leurs propriétés mécaniques. De plus, des microfissures au niveau des fibres ont été observées, ce qui témoigne d'une vulnérabilité de ces composites face aux milieux alcalins.

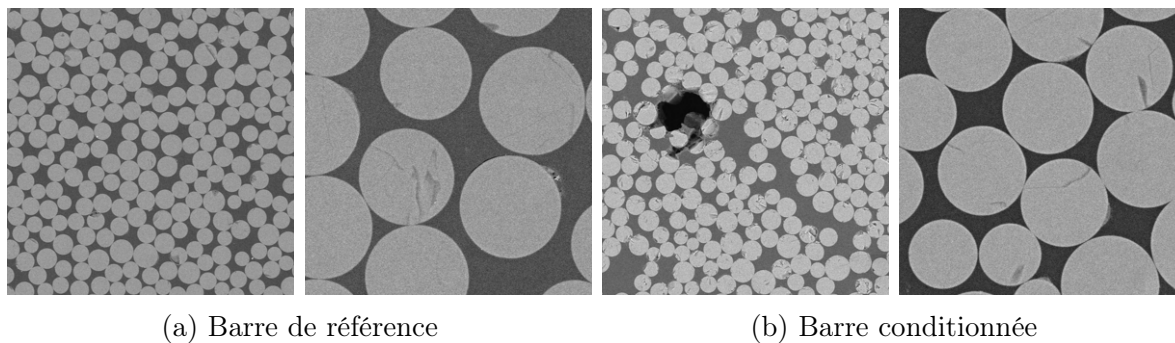


FIGURE 5.3 Balayage au microscope électronique d'une coupe transversale des barres de basalte #3 de type 1

Barres en fibres de verre

L'analyse au MEB des armatures en PRFV après conditionnement n'a pas montré de défauts majeurs susceptibles d'affecter de manière significative leurs propriétés mécaniques.

Cette observation montre une meilleure résistance des PRFV face aux agressions chimiques, comparativement aux PRFB. En conséquence, les armatures en PRFV pourraient présenter une durabilité accrue dans les environnements alcalins typiques des structures en béton armé.

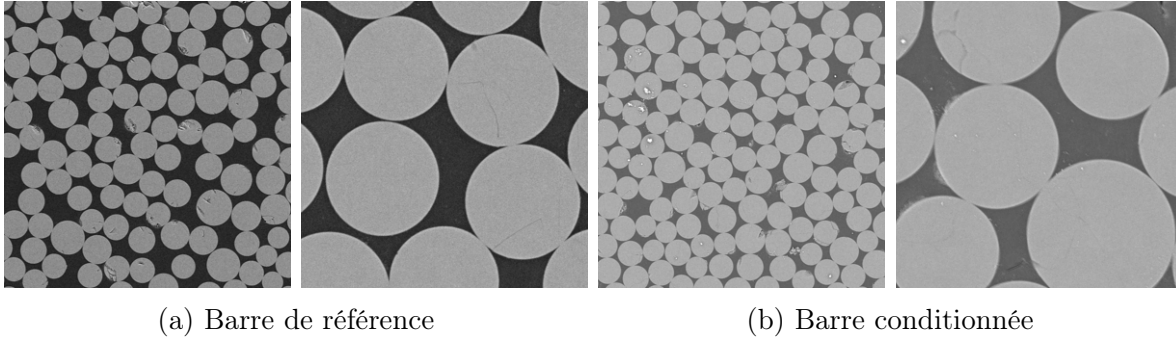


FIGURE 5.4 Balayage au microscope électronique d'une coupe transversale des barres de verre #3 de type 1

5.5 Bilan des essais de propriétés physiques

La comparaison entre les barres en fibre de basalte de type 1 et 2, et les barres en fibre de verre de type 1, révèle des nuances importantes dans leurs propriétés physiques qui les rendent adaptées à diverses applications dans le domaine du génie civil.

Section effective

L'analyse des données fournies révèle des différences intéressantes entre les barres en fibres de basalte de type 1 et de type 2, notamment en ce qui concerne les diamètres #5 et #6, où les barres de type 1 présentent, en moyenne, des sections effectives légèrement supérieures à celles des barres de type 2. Cette observation suggère que les barres de type 1 pourraient offrir une meilleure capacité de charge pour ces tailles spécifiques, un aspect crucial dans la conception et l'ingénierie structurelle.

En se focalisant sur la production des barres de type 1, on remarque une bonne uniformité pour les fibres de basalte et de verre, malgré une variabilité légèrement accrue pour les fibres de verre, en particulier pour le diamètre #8. Cette tendance à une plus grande variabilité pourrait influencer le choix des matériaux en fonction de l'application spécifique et des critères de performance requis. Pour les diamètres #3 et #4, il est pertinent de noter que les sections effectives des barres de basalte et de verre de type 1 montrent des différences distinctes, avec des valeurs moyennes indiquant des performances potentiellement différentes entre ces deux types de fibres. Ces variations soulignent l'importance de sélectionner le matériau approprié en fonction des exigences spécifiques de chaque projet.

Les barres de type 2 se distinguent par une meilleure uniformité dans la production de ses fibres de basalte, surtout pour les diamètres #5 et #6, comme le démontrent les coefficients de variation plus faibles. Cette uniformité supérieure peut être avantageuse pour des applications nécessitant une grande fiabilité et une prévisibilité des performances matérielles. D'autre part, les fibres de basalte de type 2 offrent des sections effectives compétitives pour les plus grands diamètres, suggérant une capacité potentielle supérieure à supporter des charges importantes.

En conclusion, les fibres de verre des barres de type 1, avec leurs sections effectives élevées pour le diamètre #8, peuvent être préférées pour des applications exigeant une capacité de charge significative. Néanmoins, la meilleure uniformité des fibres de basalte de type 2, associée à leur performance compétitive pour les plus grands diamètres, indique que ces matériaux pourraient être plus adaptés à certaines applications structurales.

Teneur en fibres

La teneur en fibres des barres en PRFB et PRFV de type 1 ainsi que des barres en PRFB de type 2 révèlent des distinctions significatives qui influencent directement leurs performances mécaniques. Les barres de type 1, tant en fibre de basalte qu'en fibre de verre, montrent une teneur élevée en fibres, avec des moyennes oscillant entre 83 % et 86 % pour le basalte et une uniformité remarquable de 85 % à 86 % pour le verre. Cette homogénéité traduit une composition matérielle cohérente, essentielle pour garantir la fiabilité et la prévisibilité des performances des armatures dans diverses applications structurales.

Du côté des barres de type 2, la variabilité dans les traitements de surface (sablées et non sablées) pour les barres en fibre de basalte de diamètres #5, #6, et #8 montre une légère fluctuation dans la teneur en fibres, généralement maintenue autour de 71 % à 76 % selon les lots et le traitement. Les barres sablées présentent une légère augmentation de la teneur en fibres, indiquant potentiellement une meilleure adhérence dans les applications de renforcement du béton grâce à une surface externe plus rugueuse.

Les faibles coefficients de variation (COV) observés à travers toutes les gammes et types de barres témoignent d'une fabrication et d'une qualité de matériau constantes, attribut crucial pour l'intégrité structurelle des projets de génie civil. La teneur en fibre élevée est synonyme de meilleures propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction et la rigidité, mais peut aussi impliquer une attention particulière lors de la mise en œuvre pour éviter des ruptures prématurées dues à une concentration élevée de fibres.

En conclusion, la sélection entre les barres en PRFB et PRFV de type 1 ou de PRFB de type 2 doit tenir compte de la teneur en fibres, qui influence directement non seulement les performances mécaniques mais aussi la durabilité. Alors que les barres en PRFB peuvent offrir une meilleure résistance à la corrosion et une durabilité accrue, les barres en PRFV se distinguent par leur légèreté et leur résistance élevée, ce qui les rend idéales pour des applications nécessitant une réduction de poids sans compromis sur la capacité portante.

Taux d'absorption d'humidité

Les tests d'absorption d'humidité pour les barres en fibre de basalte de type 2 ont montré des différences significatives en fonction du diamètre des barres, révélant leur capacité à résister à l'humidité de manière variée sur des périodes courtes et longues. À court terme, après 24 heures, l'absorption d'humidité varie minimalement de 0,03 % à 0,16 % à travers les diamètres #5, #6, et #8, indiquant une excellente barrière initiale contre l'humidité. Cette faible absorption initiale est essentielle pour des applications exposées à des environnements humides de manière temporaire ou intermittente, offrant une protection immédiate efficace.

À long terme, à l'état de saturation, les taux d'absorption augmentent légèrement pour atteindre des valeurs comprises entre 0,12 % et 0,40 % pour l'ensemble des diamètres testés. Cette gamme élargie reflète la capacité des barres à gérer l'humidité sur des périodes prolongées, avec une performance qui reste dans un intervalle qui garantit la durabilité et la résistance à la pénétration d'eau sur le long terme.

Température de transition vitreuse (T_g)

Les tests de Température de transition vitreuse réalisés sur les barres de type 1 et 2 montrent que les matériaux utilisés dans les deux types de barres dépassent largement la norme ASTM E1356-23 [18] qui exige une température de transition vitreuse supérieure à 100 °C. Pour les barres en fibre de basalte de type 1, la température moyenne de transition vitreuse varie entre 122 °C et 135 °C (tableau 5.91), indiquant une excellente stabilité thermique qui les rend aptes à être utilisées dans des environnements soumis à des températures élevées. De même, les barres en fibre de verre de type 1 présentent des températures de transition vitreuse comprises entre 118 °C et 125 °C (tableau 5.92), confirmant leur résilience face à la chaleur.

Les barres en fibre de basalte de type 2 affichent des températures de transition vitreuse uniformément réparties autour de 105 °C pour les diamètres #5, 102 à 108 °C pour les #6, et 114 à 116 °C pour les #8 (tableau 5.95), montrant une performance thermique

légèrement inférieure par rapport aux barres de type 1 mais toujours adéquate selon les critères de la norme. Cette différence pourrait influencer le choix du matériau en fonction des conditions thermiques spécifiques du site d'application.

Les résultats indiquent que les matériaux composites utilisés pour la fabrication des barres de type 1 et 2 possèdent des propriétés de transition vitreuse qui leur confèrent une stabilité et une durabilité thermique supérieures, essentielles pour des applications structurales exposées à des variations de température. Ces propriétés garantissent que les barres conservent leur intégrité mécanique et leur performance même dans des conditions extrêmes, offrant ainsi une solution fiable pour le renforcement et la réparation des structures dans le génie civil.

Taux de Polymérisation

Les tests de taux de cure, réalisés conformément à la norme ASTM E2160-23 [21], indiquent une polymérisation complète pour les barres en fibres de basalte et de verre de type 1 ainsi que pour les barres en fibres de basalte de type 2, affichant un taux de cure de 100 % à travers tous les échantillons testés (tableaux 5.96, 5.97, 5.98). Cette performance supérieure au seuil minimal de 95 % suggéré par la norme souligne l'excellente qualité de polymérisation des matériaux utilisés, garantissant ainsi leur intégrité structurelle et leur durabilité dans des applications de génie civil. La consistance des résultats à travers différentes compositions de fibres et de fabricants démontre une maîtrise remarquable des processus de fabrication, assurant une fiabilité élevée des barres pour des utilisations structurales exigeantes.

Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

Les tests de spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) pour les barres en fibre de basalte et en fibre de verre de type 1, ainsi que l'analyse des échantillons conditionnés dans une solution alcaline, fournissent des informations précieuses sur la stabilité chimique des résines utilisées. Les spectres IRTF présentés dans les figures 5.1 et 5.2 montrent des pics caractéristiques associés aux vibrations des liaisons C-H autour de 2900 cm^{-1} et aux hydroxyles O-H vers 3500 cm^{-1} , indiquant la présence de groupes chimiques spécifiques dans la matrice des résines.

La stabilité observée des pics hydroxyles dans tous les échantillons, sans changements significatifs après un conditionnement de trois mois à 60 °C dans un environnement alcalin, indique qu'il n'y a pas d'hydrolyse notable des groupes esters ou d'autres composants sensibles. Cette résistance à la dégradation chimique est cruciale pour les applications où

les matériaux sont susceptibles d'être exposés à des conditions alcalines, comme dans les structures en béton armé.

En conclusion, les barres en PRFB et PRFV de type 1 démontrent une excellente stabilité chimique, avec une matrice de résine qui résiste à la dégradation dans des conditions potentiellement corrosives, assurant ainsi la longévité et l'intégrité des armatures dans les applications de génie civil.

Microscope Électronique à Balayage (MEB)

Les tests de Microscope Électronique à Balayage (MEB) pour les barres de type 1, en fibre de basalte et en fibre de verre, mettent en évidence les différences structurelles clés entre les deux matériaux, particulièrement après conditionnement dans un milieu alcalin. L'analyse MEB des barres de basalte montre une détérioration notable, avec des pores et des ruptures de fibres qui signalent une susceptibilité à l'hydrolyse alcaline. Ces défauts microscopiques, exacerbés par des conditions environnementales agressives, sont susceptibles d'impacter négativement les propriétés mécaniques des barres en PRFB.

Cependant, les barres en PRFV démontrent une résistance supérieure à ce type de dégradation. Les images MEB ne révèlent pas de défauts significatifs pouvant altérer les performances mécaniques, indiquant ainsi une meilleure stabilité chimique et une potentialité de durée de vie accrue dans les milieux alcalins. Cette différence de comportement souligne l'importance de choisir le matériau approprié en fonction de l'environnement prévu, les barres en PRFV offrant une meilleure option pour les conditions de service exigeantes.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS EN FRANÇAIS

6.1 Généralité sur les travaux réalisés

Le présent projet de recherche s'est concentré sur une évaluation détaillée des propriétés physiques et mécaniques des barres en Polymères Renforcés de Fibres (PRF), mettant en exergue les barres en fibre de basalte (PRFB) et en fibre de verre (PRFV) de type 1 et les barres en PRFB de type 2. Cette exploration avait pour but de déterminer leur conformité aux exigences spécifiques du génie civil et leur comportement face à des conditions environnementales potentiellement dégradantes, telles que l'humidité et la réactivité aux milieux alcalins, qui pourraient compromettre leur intégrité et leur fonctionnalité sur le long terme.

Une série de tests a été réalisée pour examiner les propriétés physiques et mécaniques. Les propriétés physiques comprenaient l'évaluation de la section effective, la teneur en fibres, le taux d'absorption d'humidité, la température de transition vitreuse, le taux de polymérisation, et la stabilité chimique à travers des analyses par Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) et des observations au Microscope Électronique à Balayage (MEB). Les propriétés mécaniques comprenaient la résistance à la traction (avec et sans charge), la résistance à l'arrachement des barres, la résistance au cisaillement interlaminaire et transversal. Ces tests ont été conçus pour simuler des conditions réelles d'utilisation et pour anticiper les réactions des matériaux face aux environnements agressifs typiques des structures de génie civil.

Les barres en fibre de basalte (PRFB) et les barres en fibre de verre (PRFV) présentent des propriétés mécaniques distinctives qui les rendent adaptées à des applications spécifiques. Les barres PRFB, qu'elles soient de type 1 ou de type 2, offrent de hautes résistances à la traction et des modules d'élasticité élevés, indiquant une forte capacité à résister aux forces de traction et une rigidité importante pour soutenir de lourdes charges. Les performances au cisaillement interlaminaire et transversal montrent également une robustesse significative, avec une résistance exceptionnelle et une bonne durabilité, même dans des conditions environnementales défavorables.

Les barres en fibre de verre (PRFV) de type 1 se distinguent par une résistance à la traction très élevée, en particulier pour les petits diamètres, ce qui les rend idéales là où la légèreté et la haute performance en traction sont essentielles. Bien que les valeurs de contrainte au cisaillement soient légèrement inférieures à celles des barres PRFB, les barres PRFV maintiennent une intégrité structurelle solide sous des charges élevées de cisaillement et démontrent une bonne rétention de leurs propriétés mécaniques après conditionnement.

Dans l'ensemble, l'étude a révélé que les barres de type 1 et 2 utilisées offrent des performances supérieures aux normes ASTM et CSA actuelles. Les tests de température de transition vitreuse ont confirmé l'excellente stabilité thermique des matériaux, avec des températures de transition vitreuse dépassant largement l'exigence minimale de 100 °C. La polymérisation complète à travers tous les échantillons testés a mis en avant la qualité de fabrication et la fiabilité des barres pour des utilisations structurales exigeantes.

Les analyses par IRTF ont confirmé la résistance chimique des résines de vinylester, révélant une absence de dégradation hydrolytique après un conditionnement alcalin. Cette robustesse chimique présume d'une durabilité accrue, même dans des environnements potentiellement corrosifs. Cependant, les examens au MEB ont indiqué que les barres en PRFB pourraient être sujettes à une détérioration microstructurale dans ces mêmes conditions, contrairement aux barres en PRFV qui ont affiché une résistance supérieure aux dommages chimiques. Dans le cas des barres de PRFB, il est difficile de conclure qu'un environnement alcalin est le seul impact sur les performances des barres en PRFB, étant donné que leurs performances initiales étaient médiocres dans certains cas.

En résumé, les barres en PRFB sont préférées pour leur résistance et leur rigidité dans des applications nécessitant une capacité de charge élevée et une durabilité dans des environnements exigeants. Les barres en PRFV sont quant à elles avantageuses dans les situations où une haute résistance à la traction et une légèreté sont prioritaires. Le choix entre ces deux types de barres devrait être basé sur les exigences spécifiques du projet, en tenant compte des besoins de résistance à la traction, de rigidité, et de ductilité.

6.2 Recommandations pour les recherches futures

Afin d'améliorer les performances des barres en PRFB et PRFV, il est crucial de continuer la recherche, en mettant l'accent sur l'amélioration de leurs propriétés à long terme, surtout dans diverses conditions environnementales. À partir des résultats obtenus dans cette étude, nous proposons les recommandations suivantes pour les futures recherches sur la durabilité des armatures en PRFB et PRFV :

1. Explorer des méthodes de production alternatives qui pourraient réduire les coûts tout en améliorant l'efficacité de fabrication des PRFV et éventuellement des PRFB.
 2. Mener des études approfondies sur les PRFB dans divers environnements, en ajustant notamment le pH des solutions pour simuler différentes conditions environnementales. Des immersions prolongées de 3 à 24 mois, voire plus, aideraient à mieux comprendre la durabilité et la résistance des PRFB face à l'hydrolyse alcaline et d'autres réactions chimiques.
 3. Établir des normes et réglementations internationales spécifiques aux barres en PRFB.
 4. Élaborer et adopter des protocoles de tests standardisés pour évaluer de façon fiable et cohérente la performance des PRFB.
-

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] F Abed, H El-Chabib, and M AlHamaydeh. Caractéristiques de cisaillement des poutres profondes en béton armé GFRP sans armature de bande. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, pages 1063–1073, August 2012. Publisher : SAGE Publications Ltd STM.
- [2] Farid Abed and Abdul Rahman Alhafiz. Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars. *Composite Structures*, pages 23–34, May 2019.
- [3] Abathar Al-Hamrani and Wael Alnahhal. Bond durability performance of sand-coated BFRP bars in high-strength fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 321 :117306, 2023.
- [4] Ahmed H. Ali, Hamdy M. Mohamed, and Brahim Benmokrane. Bar size effect on long-term durability of sand-coated basalt-FRP composite bars. *Composites Part B : Engineering*, page 108059, August 2020.
- [5] Ahmed H. Ali, Hamdy M. Mohamed, Brahim Benmokrane, Adel ElSafty, and Omar Chaallal. Durability performance and long-term prediction models of sand-coated basalt frp bars. *Composites Part B : Engineering*, pages 248–258, August 2018.
- [6] Ahmad Altalmas, Ahmed El Refai, and Farid Abed. Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions. *Construction and Building Materials*, 81 :162–171, 2015.
- [7] N. Aravind, Amiya K. Samanta, Joseph V. Thanikal, and D. K. Singha Roy. Comparative study on the performance of corrugated GFRP laminates on normal and pre-cracked flexural concrete members. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(6) :799–806, 2019.
- [8] Hasan Şahan Arel, Ertug Aydin, and Sudarshan D. Kore. Ageing management and life extension of concrete in nuclear power plants. *Powder Technology*, 321 :390–408, 2017.
- [9] Mand Kamal Askar, Ali Falyeh Hassan, and Yaman S. S. Al-Kamaki. Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites : A state of the art. *Case Studies in Construction Materials*, 17 :e01189, 2022.
- [10] ASTM D2584-18. Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [11] ASTM D3418-21. Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [12] ASTM D570-22. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- [13] ASTM D7205 / D7205M-21. Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

-
- [14] ASTM D7617/D7617M-11. Standard Test Method for Transverse Shear Strength of Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite Bars. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
 - [15] ASTM D7957/D7957M-22. Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
 - [16] ASTM E1131-20. Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
 - [17] ASTM E1252-98 (Reapproved 2021). Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
 - [18] ASTM E1356-23. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
 - [19] ASTM E1640-23. Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
 - [20] ASTM E168-16 (Reapproved 2023). Practices for General Techniques of Infrared Quantitative Analysis. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
 - [21] ASTM E2160-23. Test Method for Heat of Reaction of Thermally Reactive Materials by Differential Scanning Calorimetry. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
 - [22] Boğaçhan Başaran, İlker Kalkan, Ahmet Beycioğlu, and Izabela Kasprzyk. A Review on the Physical Parameters Affecting the Bond Behavior of FRP Bars Embedded in Concrete. *Polymers*, 14(9) :1796, 2022.
 - [23] Brahim Benmokrane, Fareed Elgabbas, Ehab A. Ahmed, and Patrice Cousin. Characterization and comparative durability study of glass/vinylester, basalt/vinylester, and basalt/epoxy frp bars. *Journal of Composites for Construction*, 19(6) :04015008, 2015.
 - [24] Brahim Benmokrane, Shehab Mehany, Carol Shield, Antonio Nanni, and Vicki Brown. Physical properties, longitudinal tensile properties, and bond strength of the new generation of gfrp bars. *Journal of Composites for Construction*, 27 :04023056, 2023.
 - [25] A. Blaga and J. J. Beaudoin. Le béton modifié aux résines. *NRC Publications Archive*, page 6, 1986.
 - [26] Jean-Charles Bouhet. Étude de l’impact de l’humidité et de l’alcalinité sur des armatures de polymères renforcés de fibres (PRF). Master’s thesis, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 2015.
 - [27] Julien Bricola. Optimisation structurale de dalles de chaussées en béton jointées avec des goujons en matériaux composites en polymères renforcés de fibres de verre (prfv). Master’s thesis, Université de Sherbrooke, November 2012.
 - [28] C39/C39M-23. Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
-

-
- [29] Wensu Chen, Thong Pham, Henry Sichembe, Li Chen, and Hong Hao. Experimental study of flexural behaviour of rc beams strengthened by longitudinal and u-shaped basalt frp sheet. *Composites Part B : Engineering*, pages 114–126, February 2018.
 - [30] ASTM D4475-21. Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
 - [31] D7705/D7705M-12. Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
 - [32] D7913/D7913M-20. Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
 - [33] ASTM D792-20. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
 - [34] Zohra Dahou, Z. Mehdi Sbartaï, Arnaud Castel, and Fouad Ghomari. Artificial neural network model for steel–concrete bond prediction. *Engineering Structures*, 31 :1724–1733, 2009.
 - [35] Atef Daoud. *Étude expérimentale de la liaison entre l’acier et le béton autoplaçant : contribution à la modélisation numérique de l’interface*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2003.
 - [36] Atef Daoud, Olivier Maurel, and Christian Laborderie. 2D mesoscopic modelling of bar–concrete bond. *Engineering Structures*, 49 :696–706, 2013.
 - [37] Zhi-Qiang Dong, Gang Wu, Xiao-Ling Zhao, and Jin-Long Lian. Long-term bond durability of fiber-reinforced polymer bars embedded in seawater sea-sand concrete under ocean environments. *Journal of Composites for Construction*, 22(5) :04018042, 2018.
 - [38] Yongyu Duo, Xiaogang Liu, Yue Liu, T. Tafsirojjaman, and Md Sabbrojjaman. Environmental impact on the durability of FRP reinforcing bars. *Journal of Building Engineering*, 43 :102909, 2021.
 - [39] Yongyu Duo, Xiaogang Liu, Yue Liu, T. Tafsirojjaman, and Md Sabbrojjaman. Environmental impact on the durability of frp reinforcing bars. *Journal of Building Engineering*, 43 :102909, 2021.
 - [40] Xiaochun Fan, Zhengrong Zhou, Wenlin Tu, and Mingzhong Zhang. Shear behaviour of inorganic polymer concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. *Composite Structures*, 255 :112901, 2021.
 - [41] Mohammed Fasil and Mesfer M. Al-Zahrani. Transverse Shear Capacity Predictions of GFRP Bars Subjected to Accelerated Aging Using Artificial Neural Networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4) :04023024, April 2023.
 - [42] R.B. Figueira, R. Sousa, L. Coelho, M. Azenha, J.M. De Almeida, P.A.S. Jorge, and C.J.R. Silva. Alkali-silica reaction in concrete : Mechanisms, mitigation and test methods. *Construction and Building Materials*, 222 :903–931, 2019.
 - [43] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, and A. Valenza. A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B : Engineering*, 74 :74–94, 2015.
-

-
- [44] Benoit Fournier and Marc-André Bérubé. Alkali-aggregate reaction in concrete : a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(2) :167–191, 2000.
- [45] Ganesh Naidu Gopu, A. Sofi, Ch Brahmareddy, and G. Sairaman. Experimental investigation of tensile, compression, shear and flexural behaviour of basalt fibre and glass fibre reinforced polymer bars. *Materials Today : Proceedings*, 64 :1122–1128, 2022.
- [46] F. Guo, S. Al-Saadi, R. K. Singh Raman, and X. L. Zhao. Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment. *Corrosion Science*, 141 :1–13, 2018.
- [47] M. N. Habeeb and A. F. Ashour. Flexural Behavior of Continuous GFRP Reinforced Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*, 12(2) :115–124, 2008.
- [48] Jintao He, Dong Lei, Zesheng She, and Bin Xi. Investigation on bonding behavior of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) sheet reinforced concrete beam. *Journal of Building Engineering*, 75 :106963, 2023.
- [49] J.G. Jang, H.K. Kim, T.S. Kim, B.J. Min, and H.K. Lee. Improved flexural fatigue resistance of PVA fiber-reinforced concrete subjected to freezing and thawing cycles. *Construction and Building Materials*, 59 :129–135, 2014.
- [50] Ondřej Januš, František Girgle, Iva Rozsypalová, Vojtěch Kostiha, Jan Prokeš, Petr Štěpánek, and Đorđe Čairović. Influence of test parameters on the interlaminar shear strength of FRP bars. *Composite Structures*, 299 :116061, 2022.
- [51] Pradeep K. Goyal and Andualem E. Yadeta. Review on Chloride Ingress in Concrete : Chloride Diffusion and Predicting Corrosion Initiation Time. *International Journal of Civil Engineering*, 9(4) :8–14, 2022.
- [52] V. M. Karbhari, J. W. Chin, D. Hunston, B. Benmokrane, T. Juska, R. Morgan, J. J. Lesko, U. Sorathia, and D. Reynaud. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, 7(3) :238–247, 2003.
- [53] Bozabe Renonet Karka, Bassa Bruno, Nadjitonon Ngarmaïm, and Alladjo Rimbarn-gaye. The Effects of Degradation Phenomena of the Steel-Concrete Interface in Reinforced Concrete Structures. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 11(03) :1–21, 2023.
- [54] Ahmed Khalil, Mohamed Elkafrawy, Wael Abuzaid, Rami Hawileh, and Mohammad AlHamaydeh. Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Pre-Stressed Iron-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) Bars : Numerical Study. *Buildings*, 12(12) :2228, 2022.
- [55] Balaji K.V., Kamyar Shirvanimoghaddam, Guru Sankar Rajan, Amanda V. Ellis, and Minoo Naebe. Surface treatment of Basalt fiber for use in automotive composites. *Materials Today Chemistry*, 17 :100334, 2020.
- [56] Jianglin Li, Jianhe Xie, Feng Liu, and Zhongyu Lu. A critical review and assessment for FRP-concrete bond systems with epoxy resin exposed to chloride environments. *Composite Structures*, 229 :111372, 2019.
- [57] Chai Lijuan, Liping Guo, Bo Chen, Andrea Carpinteri, Daniela Scorza, and Sabrina Vantadori. Effects of bfrp bar diameter and cover thickness on fracture behavior
-

- of bfrp bar-reinforced ecological high-ductility cementitious composites. *Journal of Testing and Evaluation*, 49 :4086–4101, 2021.
- [58] Huaxin Liu, Jianwei Yang, and Xuezhi Wang. Bond behavior between BFRP bar and recycled aggregate concrete reinforced with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, 135 :477–483, 2017.
- [59] Zhongyu Lu, Yongchao Li, and Jianhe Xie. Durability of BFRP bars wrapped in seawater sea sand concrete. *Composite Structures*, 255 :112935, 2021.
- [60] Zhongyu Lu, Lizhu Su, Jiawei Lai, Jianhe Xie, and Bing Yuan. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete with fly ash in aggressive environments. *Composite Structures*, 271 :114121, 2021.
- [61] Zhongyu Lu, Lizhu Su, Guijun Xian, Baihang Lu, and Jianhe Xie. Durability study of concrete-covered basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars in marine environment. *Composite Structures*, 234 :111650, 2020.
- [62] Zhongyu Lu and Guijun Xian. Resistance of basalt fibers to elevated temperatures and water or alkaline solution immersion. *Polymer Composites*, 39(7) :2385–2393, 2018.
- [63] San Luo, Tianwen Bai, Mingqin Guo, Yi Wei, and Wenbo Ma. Impact of Freeze–Thaw Cycles on the Long-Term Performance of Concrete Pavement and Related Improvement Measures : A Review. *Materials*, 15(13) :4568, 2022.
- [64] LeRoy A. Lutz and Peter Gergely. Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete. *Journal Proceedings*, 64(11) :711–721, 1967.
- [65] Karolina Mazur, Zuzanna S. Siwy, Arkadiusz Adamczyk, and Stanisław Kuciel. Synergistic effect of aramid and basalt fibers on mechanical, thermal and dynamic properties of polylactide hybrid composites. *Industrial Crops and Products*, 198 :116630, 2023.
- [66] Takashi Miwa and Yuri Nakazawa. Nondestructive Evaluation of Localized Rebar Corrosion in Concrete Using Vibro-Radar Based on Pulse Doppler Imaging. *Remote Sensing*, 14 :4645, January 2022.
- [67] Aftab Mufti, M Onofrei, B Benmokrane, N Banthia, M Boulfiza, J Newhook, B Bakht, G Tadros, and P Brett. Durability of GFRP reinforced concrete in field structures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7), New Orleans, Louisiana, USA*, August 2005.
- [68] Satheeskumar Navaratnam, Kajan Selvaranjan, Darshana Jayasooriya, Pathmanathan Rajeev, and Jay Sanjayan. Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure : A suitability assessment. *Journal of Building Engineering*, 66 :105835, 2023.
- [69] John Newhook. Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, Design Manual No 3, Version 2, ISIS-Canada. Technical report, ISIS Canada, Winnipeg, Manitoba, 2007.
- [70] Gilbert Nkurunziza. *Performance de Barres d’Armature en Polymères Renforcés de Fibre (PRF) de Verre pour des Structures en Béton sous les Effets Combinés de la Charge Soutenue, de la Température et de l’Environnement Humide et Alcalin*. PhD thesis, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 2004.

-
- [71] Yunfeng Pan and Dongming Yan. Study on the durability of GFRP bars and carbon/glass hybrid fiber reinforced polymer (HFRP) bars aged in alkaline solution. *Composite Structures*, 261 :113285, 2021.
- [72] Poornachandra Pandit. *Effect of Corrosion on Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams*. Master's thesis, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal, Sep 2014. Accepted : 2020-08-05.
- [73] Hetal Parmar, Tayyab Khan, Fausto Tucci, Rehan Umer, and Pierpaolo Carlone. Advanced robotics and additive manufacturing of composites : towards a new era in Industry 4.0. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(5) :483–517, 2022.
- [74] Xi Peng, Mizi Fan, John Hartley, and Majeed Al-Zubaidy. Properties of natural fiber composites made by pultrusion process. *Journal of Composite Materials*, 46 :237–246, 2012.
- [75] Muhammad Masood Rafi, Ali Nadjai, and Faris Ali. Essais expérimentaux de poutres en béton renforcées avec des barres en PRF de carbone. *Journal of Composite Materials*, 41(22) :2657–2673, 2007.
- [76] Mahdi Rafieizonooz, Jang-Ho Jay Kim, Hesam Varaei, Yeonwoo Nam, and Elnaz Khankhaje. Testing methods and design specifications for FRP-prestressed concrete members : A review of current practices and case studies. *Journal of Building Engineering*, 73 :106723, 2023.
- [77] Vasantha Ramani and Kevin Sze Chiang Kuang. Monitoring of rebar corrosion in concrete structures using a lens-based plastic optical fiber (LPOF) sensor. *Construction and Building Materials*, 276 :122129, 2021.
- [78] M. A. Rashid, M. A. Mansur, and P. Paramasivam. Behavior of Aramid Fiber-Reinforced Polymer Reinforced High Strength Concrete Beams under Bending. *Journal of Composites for Construction*, 9(2) :117–127, 2005.
- [79] Ahmed El Refai, Mohamed-Amine Ammar, and Radhouane Masmoudi. Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars to concrete. *Journal of Composites for Construction*, 19(3) :04014050, 2015.
- [80] Mathieu Robert. *Étude de la Performance de Barres de Renforcement Interne en PRF Soumises à des Conditions Environnementales Extrêmes*. PhD thesis, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 2009.
- [81] Kévin Répécaud, Khaled Mohamed, and Brahim Benmokrane. Développement d'un nouveau protocole d'essais de caractérisation mécanique de barres d'armature en polymère renforcé de fibre (PRF) pour les barres courbes. Technical report, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2018.
- [82] CSA S6-19. Code canadien sur le calcul des ponts routiers. Technical report, CSA (Canadian Standards Association), Ontario, Canada, November 2019.
- [83] CSA S806-12. Design and construction of building structures with fiber-reinforced polymers. Technical report, CSA (Canadian Standards Association), Ontario, Canada, October 2012.
- [84] CSA S807-19. Spécification pour des polymères renforcés de fibres. Technical report, CSA (Canadian Standards Association), Ontario, Canada, March 2020.
- [85] Ashish Kumer Saha, M. N. N. Khan, Prabir Kumar Sarker, Faiz Ahmed Shaikh, and Alokesh Pramanik. The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and
-

- its mitigation by fly ash : A critical review. *Construction and Building Materials*, 171 :743–758, 2018.
- [86] Muhammad Usama Salim and Mohammad Ali Mosaberpanah. The mechanism of alkali-aggregate reaction in concrete/mortar and its mitigation by using geopolymers materials and mineral admixtures : a comprehensive review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(14) :6766–6806, 2022.
- [87] Andreea Serbescu, Maurizio Guadagnini, and Kypros Pilakoutas. Mechanical Characterization of Basalt FRP Rebars and Long-Term Strength Predictive Model. *Journal of Composites for Construction*, 19(2) :04014037, 2015.
- [88] Yin Shen, Shaohui Lu, and Fangyuan Li. An Experimental Study on Concrete Flat Slabs Prestressed with Carbon Fibre Reinforced Polymer Sheets. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015 :e792320, 2015.
- [89] Chenglong Shi, Jigang Zhang, Junbo Zhang, Menglin Zhang, Qingfeng Yan, Yang Zhao, Yingchun Yang, and Feng Shao. Experimental study and finite element analysis on impact resistance of large-rupture-strain FRP reinforced civil air defense wall. *Structures*, 41 :511–524, 2022.
- [90] Jian Shi, Mamoru Mizuno, Limin Bao, and Chunhong Zhu. A Facile Molding Method of Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites and Its Mechanical Property. *Polymers*, 14(5) :947, 2022.
- [91] A. O. Sojobi and K. M. Liew. Multi-objective optimization of high performance concrete columns under compressive loading with potential applications for sustainable earthquake-resilient structures and infrastructures. *Composite Structures*, 315 :117007, 2023.
- [92] P. Somiyadevi and V. Ramasamy. Performance of RC beams supported with hybrid FRP laminates : A review. *Materials Today : Proceedings*, 80 :2590–2594, 2023.
- [93] Kangjia Song, Yang Yu, Yutao Liu, and Jichong Zhao. Flexural Performance Study of Basalt-Fiber-Reinforced Polymer Bar Basalt-Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Buildings*, 13(10) :2583, 2023.
- [94] Yarong Song, Elaine Wightman, Yimei Tian, Kevin Jack, Xuan Li, Huiyun Zhong, Philip L. Bond, Zhiguo Yuan, and Guangming Jiang. Corrosion of reinforcing steel in concrete sewers. *Science of The Total Environment*, 649 :739–748, 2018.
- [95] W. Sun, Y.M. Zhang, H.D. Yan, and R. Mu. Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles. *Cement and Concrete Research*, 29(9) :1519–1523, 1999.
- [96] Alaa Taha, Wael Alnahhal, and Nasser Alnuaimi. Bond durability of basalt FRP bars to fiber reinforced concrete in a saline environment. *Composite Structures*, 243 :112277, 2020.
- [97] Qixiang Tang. *Early-Stage Corrosion Detection of Reinforced Concrete Structures Using Ultrasonic Waves Generated by an Embedded Fiber Optical Transmitter*. Ph.d. thesis, University of Massachusetts Lowell, May 2020. ISBN : 9798645475512.
- [98] J. L. Thomason. The interface region in glass fibre-reinforced epoxy resin composites : 3. Characterization of fibre surface coatings and the interphase. *Composites*, 26(7) :487–498, 1995.
-

-
- [99] Jun Wang, Hota GangaRao, Ruifeng Liang, Ding Zhou, Weiqing Liu, and Yuan Fang. Durability of glass fiber-reinforced polymer composites under the combined effects of moisture and sustained loads. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(21) :1739–1754, 2015.
 - [100] Peng Wang, Hao liang Wu, Lin yu-wen Ke, Wei wen Li, and Christopher K.Y. Leung. Mechanical properties and microstructure of glass fiber reinforced polymer (gfrp) rebars embedded in carbonated reactive mgo-based concrete (rmc). *Cement and Concrete Composites*, 142 :105207, 2023.
 - [101] Xin Wang, Xing Zhao, and Zhishen Wu. Fatigue degradation and life prediction of basalt fiber-reinforced polymer composites after saltwater corrosion. *Materials & Design*, 163 :107529, 2019.
 - [102] Bin Wei, Hailin Cao, and Shenhua Song. Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. *Corrosion Science*, 53(1) :426–431, January 2011.
 - [103] Gang Wu, Zhi-Qiang Dong, Xin Wang, Ying Zhu, and Zhi-Shen Wu. Prediction of long-term performance and durability of bfrp bars under the combined effect of sustained load and corrosive solutions. *Journal of Composites for Construction*, 19(3) :04014058, 2015.
 - [104] Gang Wu, Yuhang Ren, Jinbo Du, Hongguang Wang, and Xin Zhang. Mechanical properties and failure mechanism analysis of basalt-glass fibers hybrid FRP composite bars. *Case Studies in Construction Materials*, 19 :15, 2023.
 - [105] Ahmad Zaki, Megat Azmi Megat Johari, Wan Muhd Aminuddin Wan Hussin, and Yessi Jusman. Experimental Assessment of Rebar Corrosion in Concrete Slab Using Ground Penetrating Radar (GPR). *International Journal of Corrosion*, 2018 :1–10, 2018.
-