

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieure et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)

Faculté du génie de la construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de L'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Structure

Thème

Valorisation du sable de dune dans la formulation des mortiers armés de textiles : caractérisation mécanique initiale et après tests de durabilité

Réalisé par :

- **MAUCHE Nabil**
- **MAMET Kenza**

Dirigé par :

- **M^{me} F. BOUZEBODJA**

Devant le jury composé de :

- | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------|
| - M^{me} AIT TALEB | Maître de conférences | Présidente |
| - M^r SI SALEM | Maître de conférences | Examineur |

Promotion : 2023/2024

Soutenu le 18/09/2024

Remerciements

Nous remercions **Dieu**, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé, la persévérance et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à :

Nos parents, pour leur soutien inébranlable et leur encouragement indéfectible tout au long de notre parcours académique. Leur présence constante a été une source de force et de motivation pour nous.

Notre promotrice, **Mme BOUZEBODJA**, pour son encadrement exceptionnel, sa disponibilité constante et ses conseils éclairés. Son expertise, son soutien inestimable, ainsi que sa rigueur nous ont permis d'avancer avec assurance à chaque étape de ce travail. Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour l'accompagnement précieux qu'elle nous a offert tout au long de ce projet.

Tous les enseignants qui ont contribué à notre formation par la transmission de leur savoir et de leur expérience, et qui ont enrichi notre parcours académique.

Les responsables et le personnel du laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, notamment **Mr BOUHERRAOUA** et **Mme MEDJBAR**, pour leur assistance inestimable lors de la réalisation de la partie expérimentale de ce travail. Leur soutien technique a été d'une grande aide dans le bon déroulement de notre projet.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, **M^{me} AIT TALEB**, présidente, et **M^r SI SALEM**, examinateur, pour l'attention méticuleuse qu'ils ont accordée à notre recherche en acceptant d'examiner ce travail. Nous leur sommes profondément reconnaissants pour le temps et l'intérêt qu'ils ont consacrés à notre recherche.

Nos remerciements vont à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont soutenus et accompagnés dans la réalisation de ce projet de fin d'études. Leur contribution, qu'elle soit morale ou matérielle, a été essentielle à l'accomplissement de cette étape importante de notre parcours.



Dédicace

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce travail à Tous ceux qui sont chers

A ma mère, qui a œuvré à ma réussite, par son amour, son soutien, ainsi que tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour sa présence dans ma vie, reçois à travers ce modeste travail, l'expression de mon amour éternel. Mon défunt père, merci pour les nobles valeurs que tu as su m'inculquer, merci d'avoir été un père pour moi, paix à ton âme.

A mes sœurs Sara, Imene, Ikrame, Celles qui ont partagé avec moi tous les Moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Elles m'ont Chaleureusement Supporté et encouragé tout au long de mon parcours. Sans oublier mes grands parents

A mon cher H. El hadi, qui a été toujours à mes côtés, et qui m'a beaucoup encouragé

Sans oublier mon binôme MAOUCHE Nabil pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

A tous mes amis(es) et ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail ; et qui m'ont encouragé tout au long de mon parcours « L. Cylia, H. Nabila, G. Yazid, S. Noureddine, Y. Salim, H. Said, G. HOURJA, M. KATIA »

A tous ceux que j'aime.

Merci

Kenza





Dédicaces

Au terme de cette étape significative de mon parcours, je dédie ce mémoire

À ma mère bien-aimée

Aucun mot ne pourra jamais exprimer toute ma gratitude envers toi. Ton amour me réchauffe, ta sagesse m'oriente, et ta présence constante m'a toujours donné la force nécessaire pour surmonter les épreuves de la vie.

À mon père cher

Ton soutien inconditionnel et tes encouragements m'ont accompagné à chaque étape. Puisses-tu voir dans ce travail l'expression de ma reconnaissance et de mon affection profonde.

À ma sœur Nawel et à mon frère Naim

Que Dieu vous accorde santé, bonheur, courage et réussite dans tout ce que vous entreprendrez.

À tous les membres de ma famille, à mes proches, et à tous ceux qui m'entourent d'amour et d'énergie.

À ma binôme, MAMET Kenza

Avec qui j'ai eu la chance de partager cette aventure. Merci pour ton dévouement et ta précieuse amitié.

À mes amis et camarades : L. Cylia, H. Nabila, S. Noureddine, G. Yazid, Y. Salim, H. Said, Avec qui j'ai partagé des moments inoubliables, remplis de joie et de complicité. Que notre amitié, marquée par tant de souvenirs précieux, reste forte sous la bienveillance de Dieu.

*À tous ceux que j'aime et à ceux qui m'aiment,
Je vous dédie humblement ce travail.*

Nabil



Table de Matière

| | |
|-----------------------------|---|
| Introduction générale | 1 |
|-----------------------------|---|

PARTIE I : Synthèse Bibliographique

CHAPITRE I : Les fibres et les textiles utilisés dans la construction.

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction..... | 5 |
| I.2 Les fibres..... | 5 |
| I.2.1 Différents types de fibre | 6 |
| I.2.1.1 Les fibres naturelles..... | 6 |
| I.2.1.2 Les fibres synthétiques | 6 |
| I.2.1.2 Les fibres minérales | 7 |
| I.3 Les fibres de carbone..... | 7 |
| I.3.1 Différents types de fibre de carbone..... | 8 |
| I.3.2 Avantages et inconvénients de la fibre de carbone | 8 |
| I.4 Les fibres de verre | 8 |
| I.4.1 Principe de fabrication de la fibre de verre..... | 9 |
| I.4.2 Avantages des fibres de verre | 10 |
| I.5 Les fibres d'aramide..... | 10 |
| I.5.1 Différents types de fibres d'aramide | 11 |
| I.5.2 Avantages et inconvénients de la fibre d'aramide..... | 12 |
| I.6 Les fibres de polypropylène | 12 |
| I.6.1 Principe de fabrication des fibres de polypropylène..... | 13 |
| I.6.2 Avantages des fibres de polypropylène | 14 |
| I.7 Les Textiles | 14 |
| I.7.1 Technologies des textiles..... | 14 |
| I.7.1.1 Textiles bidimensionnels..... | 14 |
| I.7.1.2 Textiles Tridimensionnels | 15 |
| I.8 Conclusion | 16 |

CHAPITRE II : Bétons armés de textiles (TRC).

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction | 19 |
| II.2 Béton armé de textiles | 19 |
| II.3 Comportement mécaniques des TRC | 20 |
| II.3.1 Comportement d'adhérence | 20 |
| II.3.1.1 Adhérence filament-mortier | 20 |
| II.3.1.2 Adhérence fil-mortier..... | 21 |
| II.3.2 Comportement en traction par flexion..... | 22 |

| | |
|---|----|
| II.3.3 Comportement en traction directe..... | 24 |
| II.4 Paramètres influençant le comportement des TRC | 25 |
| II.4.1 Nature de la matrice..... | 25 |
| II.4.2 La nature des filaments..... | 25 |
| II.4.3 Taux de renfort..... | 26 |
| II.4.4 Orientation des fils | 26 |
| II.5 Procédés de production des TRC..... | 26 |
| II.5.1 Procédés de mise en œuvre in-situ | 26 |
| II.5.1.1 Technique du moulage au contact..... | 26 |
| II.5.1.2 Technique de projection In-situ | 27 |
| II.5.2 Procédé de mise en œuvre par préfabrication | 28 |
| II.5.2.1 Pultrusion..... | 28 |
| II.5.2.2 Imprégnation mécanique | 28 |
| II.5.2.3 Pompage et injection | 29 |
| II.6 Avantages du béton armé textile (TRC)..... | 30 |
| II.7 Applications récentes des TRC | 30 |
| II.8 Conclusion..... | 33 |

CHAPITRE III : Durabilité des TRC.

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction..... | 35 |
| III.2 Les facteurs influençant la durabilité des structures..... | 35 |
| III.2.1 Facteurs mécaniques..... | 36 |
| III.2.1.1 Fissures | 36 |
| III.2.1.2 Retrait | 36 |
| III.2.2 Facteurs physiques..... | 37 |
| III.2.2.1 Abrasion..... | 37 |
| III.2.2.2 Érosion | 38 |
| III.2.2.3 Gel-Dégel..... | 38 |
| III.2.2.4 Haute température..... | 39 |
| III.2.3 Facteurs chimiques | 40 |
| III.2.3.1 Action des chlorures | 40 |
| III.2.3.2 Alkali-Réaction | 41 |
| III.2.3.3 Action des eaux..... | 42 |
| III.3 Types d'essai de durabilité des TRC..... | 43 |
| III.3.1 Durabilité des TRC en milieu marin..... | 43 |
| III.3.2 Durabilité des TRC aux cycles gel-dégel..... | 44 |
| III.3.3 Durabilité des TRC au cycle chaleur-pluie..... | 45 |
| III.4 Revue des travaux récents sur les propriétés des TRC | 46 |

| | |
|---|----|
| III.4.1 Influence des fibres courtes..... | 46 |
| III.4.2 Influence de la position des renforts textiles..... | 47 |
| III.4.2 Influence des conditions de cure..... | 49 |
| III.5 Revue des travaux antérieurs sur la durabilité des TRC..... | 50 |
| III.5.1 Travaux antérieurs sur le milieu marin..... | 51 |
| III.5.2 Travaux antérieurs sur les attaques acides..... | 52 |
| III.5.3 Travaux antérieurs sur les cycles chaleur-pluie..... | 54 |
| III.6 Conclusion..... | 55 |

PARTIE 2 : Expérimentale.

CHAPITRE IV : Matériaux et procédure expérimentale.

| | |
|---|----|
| IV.1 Introduction..... | 58 |
| IV.2 Objectif du travail..... | 58 |
| IV.3 Matériaux utilisés..... | 59 |
| IV.3 .1 Le renfort..... | 59 |
| IV.3.1.1 Textile en fibre de verre..... | 59 |
| IV.3.1.2 Les fibres courtes de polypropylène..... | 62 |
| IV.3.1 Ciment..... | 63 |
| IV.3.2 Le sable..... | 65 |
| IV.3.3 L'eau de gâchage..... | 66 |
| IV.3.4 Les additions minérales..... | 66 |
| IV.3.5 Les adjuvants..... | 67 |
| IV.4 Caractérisation des sables utilisés..... | 68 |
| IV.4.1. Analyse granulométrique [EN 933-1, EN 933-2]..... | 68 |
| IV.4.2 Module de finesse [NFP 18-540]..... | 72 |
| IV.4.3 Equivalent de sable [EN 933-8]..... | 73 |
| IV.5 Formulation des mortiers..... | 75 |
| IV. 5 .1 Composition du mortier..... | 77 |
| IV. 5.4 Confection des éprouvettes [EN 196-1]..... | 77 |
| IV. 5.4 .1 Préparation des pesés..... | 77 |
| IV. 5.4 .2 Le malaxage..... | 78 |
| IV.5.4.3 Préparation des moules..... | 79 |
| IV.5.4.4 Remplissage des moules..... | 79 |
| IV.5.4.3Le démoulage..... | 80 |
| IV.6 Caractérisation des mortiers..... | 81 |
| IV.6.1 Essais non destructifs..... | 81 |
| IV.6.1.1 Essai ultrasonique [NF EN 12504-4]..... | 81 |
| IV.6.2 Essais de résistance mécanique..... | 83 |

| | |
|--|----|
| IV.6.3.1 Résistance à la compression [EN 196-1]..... | 83 |
| IV.6.3.2 Résistance à la flexion à quatre points [NFP 18–407]..... | 83 |
| IV.6.4 Essais de durabilité du béton armé textile..... | 84 |
| IV.6.4.1 Chaleur-pluie (HR) [NBN EN 12467]..... | 84 |
| IV.7 Conclusion..... | 86 |

CHAPITRE V : Résultats et discussions.

| | |
|--|-----|
| V.1 Introduction..... | 88 |
| V.2 Résultats et discussions..... | 88 |
| V.2.1 Cubes..... | 88 |
| V.2.1.1 Le poids des éprouvettes..... | 88 |
| V.2.1.2 Résultats de l'essai ultrasonores..... | 90 |
| V.2.1.3 Résultats des essais de résistance à la compression..... | 92 |
| V.2.1.4 Essai de durabilité aux cycles chaleur-pluie..... | 100 |
| V.2.2 Plaques..... | 107 |
| V.2.2.1 Résultats de l'essai ultrasonores..... | 107 |
| V.2.2.2 Résultats de l'essai de flexion 4 points..... | 109 |
| V.2.2.3 Essai de durabilité aux cycles chaleur-pluie..... | 119 |
| V.3 Conclusion..... | 130 |
| Conclusion générale..... | 133 |

Liste des Figures :

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Bobine de fils de carbone [8]. | 7 |
| Figure I.2 : Fils de carbone [5]. | 7 |
| Figure I.3 : Bobine de fibre de verre [12]. | 9 |
| Figure I.4 : Micrographie MEB d'une fibre de verre [12]. | 9 |
| Figure I.5 : Principe de fabrication de la fibre de verre [12]. | 10 |
| Figure I.6 : Fibre d'aramide [10]. | 11 |
| Figure I.7 : Réactions de polymérisation conduisant aux deux types de polymères aramides (para et méta) [15]. | 12 |
| Figure I.8 : Micrographie MEB des fibres de polypropylène [13]. | 13 |
| Figure I.9 : Fibre de polypropylène [13]. | 13 |
| Figure I.10 : Grille bidimensionnelle [6]. | 15 |
| Figure I.11 : Géogrille tissée tridimensionnelle [6]. | 16 |
| Figure I.12 : Principales technologies de mise en œuvre de renforts textiles [7]. | 16 |
| Figure II.1 : Béton arme de textile [18]. | 19 |
| Figure II.2 : Comportement d'un mono filament noyé dans une matrice cimentaire [4]. | 21 |
| Figure II.3 : Un filament enrobe dans sa matrice. Visualisation des filaments intérieurs non imprégnés et extérieurs imprégnés [5]. | 21 |
| Figure II.4 : Comportement d'arrachement fil-matrice selon Schladitz [21]. | 22 |
| Figure II.5 : Comportement en traction par flexion de composite TRC [22]. | 24 |
| Figure II.6 : Comportement contrainte-déformation qualitatif en traction directe du composite TRC [23]. | 25 |
| Figure II.7 : Technique de moulage au contact [7]. | 27 |
| Figure II.8 : Technique de projection In-situ [26]. | 27 |
| Figure II.9 : Schéma procédé de pultrusion utilisé par Promis [26]. | 28 |
| Figure II.10 : Unité de compactage mécanique mise en place [28]. | 29 |
| Figure II.11 : Procédé de pompage et injection mis en place par Brockman [29]. | 29 |
| Figure II.12 : Rénovation d'un toit en forme de tonneau à Zwickau en Allemagne [26]. | 31 |
| Figure II.13 : Passerelle piétons de Lautlingen en Allemagne [26]. | 31 |
| Figure II.14 : Institut-fritz en Allemagne [23]. | 32 |
| Figure II.15 : Façades ventilées en TRC de l'université d'Aix la chapelle [23]. | 32 |
| Figure II.16 : Prototype de toit incurvé en TRC [30]. | 33 |
| Figure III.1 : Poutre en béton fissuré [32]. | 36 |
| Figure III.2 : Dalle en béton fissurée par retrait [32]. | 37 |
| Figure III.3 : Abrasion du béton [32]. | 37 |
| Figure III.4 : Érosion du béton [32]. | 38 |
| Figure III.5 : Phénomène du Gel-Dégel [33]. | 39 |
| Figure III.6 : Élément structural après exposition au feu [34]. | 40 |
| Figure III.7 : Illustration de la corrosion des armatures en présence d'oxygène, d'eau et d'ions chlorure [35]. | 41 |
| Figure III.8 : Effets de l'Alcali-Réaction sur la bordure de route [39]. | 42 |
| Figure III.10 : Effet marin sur les structures en béton [42]. | 43 |
| Figure III.11 : Désignation des spécimens | 46 |
| Figure III.12 : Histogrammes des résistances en flexion et en compression à 28 jours. | 47 |
| Figure III.13 : Courbes de déformation en flexion sous charge. | 47 |
| Figure III.14 : Effet du positionnement du renfort sur le comportement du TRC [50]. | 48 |
| Figure III.15 : conditions de conservation et comportement en traction [51]. | 49 |
| Figure III.16 : Conditions de conservation et comportement en traction du composite [50]. | 50 |
| Figure III.17 : Propriétés mécaniques de la matrice hydraulique avant et après exposition environnementale [53]. | 51 |

| | |
|---|----|
| Figure III.18 : Courbes contrainte-déformation des essais de traction sur les fils de verre après expositions [53]. | 52 |
| Figure III.19 : Images MEB de la section des fils de verre avant exposition [53]. | 52 |
| Figure III.20 : Images MEB de la section des fils de verre après exposition [53]. | 52 |
| Figure III.21 : Résultats compression flexion de la matrice utilisée [54]. | 53 |
| Figure III.22 : Diminution de la résistance à la traction due à l'action des environnements étudiés [54]. | 53 |
| Figure III.23 : courbe contrainte-déformation moyenne [55]. | 54 |
| Figure III.24 : courbe contrainte-déformation moyenne de référence [55]. | 54 |
| Figure III.25 : image MEB matrice-fibre après vieillissement [55]. | 55 |
| Figure III.26 : image MEB matrice-fibre avant vieillissement [55]. | 55 |
| Figure IV.1 : Grille en fibres de verre. | 60 |
| Figure IV.2 : Application de résine sur les grilles. | 60 |
| Figure IV.3 : Résine GRANITEX. | 60 |
| Figure IV.4 : Fibres de Polypropylènes. | 62 |
| Figure IV.5 : Le ciment CEM II/A 42.5R. | 64 |
| Figure IV.6 : Sable de rivière tamisé après avoir été lavé et séché à l'étuve au niveau du laboratoire béton-UMMTO. | 66 |
| Figure IV.7 : Sable de dune tamisé après avoir été lavé et séché à l'étuve. | 66 |
| Figure IV.8 : Laitier haut fourneau fournit par la société GRANITEX. | 67 |
| Figure IV.9 : Superplastifiant MEDAFLOW 30/30 (GRANITEX). | 68 |
| Figure IV.10 : La machine à tamiser. | 69 |
| Figure IV.11 : Courbes Granulométriques des différents sables. | 71 |
| Figure IV.12 : différentes hauteurs utiles. | 74 |
| Figure IV.13 : Equivalent de sable au niveau du laboratoire béton-UMMTO. | 75 |
| Figure IV.14 : Moules utilisés pour la confection des éprouvettes. | 77 |
| Figure IV.15 : Balance électronique de marque Scout Pro. | 78 |
| Figure IV.16 : Pesée pour une des compositions. | 78 |
| Figure IV.17 : Malaxeur électrique utilisé dans le malaxage au niveau du laboratoire béton-UMMTO. | 78 |
| Figure IV.18 : Préparation des moules pour les plaques. | 79 |
| Figure IV.19 : Coulage des éprouvettes. | 80 |
| Figure IV.20 : Les éprouvettes sont vibrées sur une table vibrante. | 80 |
| Figure IV.21 : Conservation des éprouvettes dans de l'eau. | 81 |
| Figure IV.22 : Différents types de dispositions des transducteurs. | 82 |
| Figure IV.23 : Appareil PUNDIT pour mesure de la vitesse de propagation des ondes. | 82 |
| Figure IV.24 : Les essais de compressions avec la machine IBERTEST niveau du laboratoire de béton [UMMTO]. | 83 |
| Figure IV.25 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion a quatre points. | 84 |
| Figure IV.26 : L'essai de flexion quatre points avec la machine IBERTEST au niveau du laboratoire de béton [UMMTO]. | 84 |
| Figure IV.27 : Réglages de l'étuve Memmert pour le traitement thermique des éprouvettes. | 85 |
| Figure IV.28 : éprouvettes immergées dans de l'eau. | 85 |
| Figure IV.29 : éprouvettes en cours de traitement thermique dans l'étuve. | 85 |
| Figure V.1 : Histogramme des masses des éprouvettes cubiques en fonction des différentes compositions. | 89 |
| Figure V.2 : propagation des ultrasons des éprouvettes après 14 et 28 jours de cure. | 91 |
| Figure V.3 : Résistances à la compression en fonction du type de sable à différents âges. | 94 |
| Figure V.4 : Courbes force-déplacement des éprouvettes sans fibre courtes à 7, 14 et 28 jours. | 95 |
| Figure V.5 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 95 |

| | |
|---|-----|
| Figure V.6 : Résultats de la résistance à la compression en fonction du taux de fibres courtes. | 96 |
| Figure V.7 : courbes force-déplacement des éprouvettes avec 1.5% de fibres courtes à 7, 14 et 28 jours. | 98 |
| Figure V.8 : courbes force-déplacement des éprouvettes avec 2% de fibres courtes à 7, 14 et 28 jours. | 98 |
| Figure V.9 : Effet de variation du Pourcentage de fibres courtes sur la résistance à la compression à 28 jours. | 99 |
| Figure V.10 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 1.5%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 100 |
| Figure V.11 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 2%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 100 |
| Figure V.12 : propagation des ultrasons à travers les éprouvettes après exposées aux cycles chaleur-pluie (HR). | 101 |
| Figure V.13 : Résistance à la compression après exposition aux cycles chaleur-pluie. | 103 |
| Figure V.14 : courbes force-déplacement des éprouvettes exposées aux cycles. | 104 |
| Figure V.15 : Effet de variation du Pourcentage de fibres courtes sur la résistance à la compression des éprouvettes soumises aux cycles chaleur-pluie (HR). | 105 |
| Figure V.16 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques exposées aux cycles chaleur- pluie : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 106 |
| Figure V.17 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 1,5%PP exposées aux cycles chaleur-pluie : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 106 |
| Figure V.18 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 2 %PP exposées aux cycles chaleur-pluie : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 106 |
| Figure V.19 : Vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers les plaques à 28 jours. | 107 |
| Figure V.20 : Résultats de la résistance à la flexion a 28 jours en fonction de type de sable. | 109 |
| Figure V.21 : Force maximale en flexion des trois types de sable sans renfort textile. | 110 |
| Figure V.22 : Résultats de la flèche à 28 en fonction du type de sable. | 110 |
| Figure V.23 : Modes de ruptures des plaques : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 111 |
| Figure V.24 : Résultats de la résistance à 28 jours en fonction de renfort de verre. | 112 |
| Figure V.25 : Force maximale en flexion des trois types de sable avec et sans renfort textile. | 113 |
| Figure V.26 : Résultats de la flèche à 28 en fonction du renfort en verre. | 113 |
| Figure V.27 : Modes de ruptures des plaques avec renfort : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 114 |
| Figure V.28 : Vue macro des plaques avec renfort : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt 3) sable de Bou Saâda. | 114 |
| Figure V.29 : Résultats de la résistance à 28 jours en fonction du taux de fibres courtes. | 116 |
| Figure V.30 : Force maximale en flexion des trois types de sable avec renfort textile et fibres courtes. | 116 |
| Figure V.31 : Résultats de la flèche à 28 jours en fonction du taux de fibres courtes. | 117 |
| Figure V.32 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 1.5%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 118 |
| Figure V.33 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 2%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 118 |
| Figure V.34 : propagation des ultrasons des plaques exposées aux cycles chaleur-pluie. | 120 |
| Figure V.35 : Résultats de la résistance à 28 jours en fonction du type de sable après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR). | 121 |
| Figure V.36 : Force maximale en flexion des trois types de sable sans renfort textile après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR). | 122 |
| Figure V.37 : Modes de ruptures des plaques après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda. | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figure V.38: Résultats de la résistance à 28 jours en fonction de renfort de verre après exposition aux cycles..... | 124 |
| Figure V.39: Force maximale en flexion des trois types de sable avec et sans renfort textile après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR)..... | 125 |
| Figure V.40 : Modes de ruptures des plaques avec renfort après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda..... | 126 |
| Figure V.41: Résultats de la résistance à 28 jours en fonction du taux de fibres courtes après exposition aux cycles..... | 127 |
| Figure V.42: Force maximale en flexion des trois types de sable avec renfort textile et fibres courtes après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR)..... | 128 |
| Figure V.43 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 1.5%PP après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda..... | 129 |
| Figure V.44 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 2%PP après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda..... | 129 |

Liste des Tableaux :

| | |
|---|-----|
| Tableau IV.1 : Quelques caractéristiques des fibres de verre. | 61 |
| Tableau IV.2 : Caractéristiques physiques et mécaniques de fibre polypropylène [6]. | 63 |
| Tableau IV.3 : Caractéristiques physiques du ciment. | 64 |
| Tableau IV.4 : Résistance du ciment. | 64 |
| Tableau IV.5 : Caractéristiques chimiques du ciment. | 64 |
| Tableau IV.6 : Composition du Clinker. | 65 |
| Tableau IV.7 : Valeurs du temps de prise en minute. | 65 |
| Tableau IV.8 : Caractéristiques du MEDAFLOW 30. | 68 |
| Tableau IV.9 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de rivière (SR). | 70 |
| Tableau IV.10 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune Touggourt (SDT). | 70 |
| Tableau IV.11 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune Bou Saâda (SDB). | 71 |
| Tableau IV.12 : Module de finesse du sable. | 72 |
| Tableau IV.13 : Résultats de module de finesse des sables. | 73 |
| Tableau IV.14 : Les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable. | 74 |
| Tableau IV.15 : Résultat de l'essai E.S. | 75 |
| Tableau IV.16 : Tableau illustrant les différentes abréviations des éprouvettes cubiques. | 76 |
| Tableau IV.17 : Tableau illustrant les différentes abréviations des éprouvettes rectangulaires. | 76 |
| Tableau IV.18 : Composition d'un mortier pour 1m ³ | 77 |
| Tableau IV.19 : Quantités des matériaux nécessaires pour un cube et une plaque. | 77 |
| Tableau IV.20 : évaluation de la qualité du mortier par la vitesse des ondes ultrasonores. | 82 |
| Tableau V.1 : Masse des éprouvettes cubiques selon les différentes compositions. | 89 |
| Tableau V.2 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après 14 jours de cure. | 90 |
| Tableau V.3 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après 28 jours de cure. | 91 |
| Tableau V.4 : Résultats de la résistance à la compression en fonction du type de sable à différents âges. | 93 |
| Tableau V.5 : Résultats de la résistance à la compression en fonction du taux de fibres courtes. | 96 |
| Tableau V.6 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après exposition aux cycles... .. | 101 |
| Tableau V.7 : Résistance à la compression après exposition aux cycles chaleur-pluie. | 103 |
| Tableau V.8 : Vitesses de propagation des ultrasons des plaques après 28 jours de cure. | 107 |
| Tableau V.9 : Résultats de béton témoin a base des différent type de sable. | 109 |
| Tableau V.10 : Résultats de l'effet du textile de verre sur la résistance à la flexion. | 112 |
| Tableau V.11 : Résultats de l'effet du taux de fibre courte sur la résistance à la flexion. | 115 |
| Tableau V.12 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après exposition aux cycles. | 119 |
| Tableau V.13 : Résultats de béton témoin selon les différent type de sable après exposition aux cycles. | 121 |
| Tableau V.14 : Résultats de l'effet du textile de verre sur la résistance à la flexion après exposition aux cycles. | 124 |
| Tableau V.15 : Résultats de la résistance à la flexion en fonction du taux de fibres après exposition aux cycles. | 127 |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les matériaux composites, en particulier les Textiles Reinforced Concrete (TRC), ont connu un succès fulgurant dans le domaine du génie civil en raison de leurs propriétés mécaniques et chimiques supérieures par rapport aux matériaux de construction traditionnels [48]. Leur capacité à offrir une résistance accrue tout en permettant une flexibilité de conception et une réduction significative du poids des structures en fait des solutions privilégiées pour de nombreuses applications.

Les TRC trouvent des applications variées dans le secteur de la construction. Ils sont souvent employés pour le renforcement des structures existantes (réhabilitation). Dans ce cas, ils sont utilisés principalement sous forme de tissus par moulage au contact, apportant des améliorations substantielles en termes de résistance et de légèreté aux éléments renforcés [1]. Le renforcement interne est utilisé, pour la réalisation de parois fines et de structures à architectures complexes (alternative au ferrailage conventionnel). Ce nouveau concept offre des avantages importants tels que la résistance à la corrosion, et permet d'avoir des structures plus minces et plus légères par rapport aux structures en béton armé traditionnelles. Ces matériaux permettent d'optimiser les performances des structures tout en offrant une durabilité accrue [48].

La surexploitation du sable de rivière a entraîné plusieurs effets négatifs, tant sur l'environnement que sur les sociétés humaines, tels que la diminution des nappes phréatiques, des déséquilibres hydrologiques et la détérioration des infrastructures, comme les ponts. Pour remédier à cette situation, l'utilisation de matériaux alternatifs devient primordiale. Le Sahara, avec ses abondantes réserves de sable, telles que ceux de Touggourt et de Bou Saâda, offre une alternative viable. Ces sables sahariens sont envisagés comme substituts dans la formulation des composites cimentaires renforcés de textile (TRC), favorisant des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.

Dans ce contexte, la durabilité des matériaux de construction est un enjeu majeur pour garantir leur performance à long terme et leur impact environnemental réduit. La durabilité des TRC est particulièrement cruciale, car ces matériaux doivent résister à des conditions d'utilisation variées et parfois extrêmes. Évaluer la durabilité de ces composites, notamment face aux températures élevées et aux environnements marins, est essentiel pour confirmer leur fiabilité et leur performance dans des conditions sévères.

Pour répondre à ces enjeux, une étude expérimentale a été menée, ayant pour objectifs :

- 1- Utilisation du sable de Touggourt et de Bou Saâda comme substituts du sable de rivière dans la formulation des TRC afin de valoriser ces ressources sahariennes.
- 2- Evaluer l'impact de ces sables sur la durabilité des TRC dans des conditions extrêmes, telles que des températures élevées et des environnements marins.

Les résultats de cette étude fourniront des informations cruciales sur la performance de ces matériaux dans des environnements sévères et contribueront à promouvoir une approche plus durable et économiquement viable dans le domaine du génie civil.

Cette étude se divise en deux parties principales : une partie bibliographique et une partie expérimentale. La première partie est consacrée à la synthèse bibliographique, réalisée en amont des essais en laboratoire. La seconde partie présente le travail expérimental, en détaillant les méthodes utilisées, les résultats obtenus, et leur interprétation.

Chapitre I : Ce chapitre explore les différents types de fibres et textiles utilisés dans le domaine de la construction, en mettant en évidence leurs caractéristiques mécaniques et physiques spécifiques. Il examine les rôles essentiels de ces matériaux dans les applications modernes de construction.

Chapitre II : Cette section se concentre sur l'utilisation des TRC dans la construction. Elle décrit les diverses applications des TRC, leurs avantages, et les contextes dans lesquels ils sont intégrés.

Chapitre III : Ce chapitre est dédié aux facteurs influençant la durabilité des structures et présente les différents types d'essais nécessaires pour évaluer leur performance dans des conditions variées.

Chapitre IV : Ce chapitre décrit les matériaux utilisés et la procédure expérimentale. Il détaille les matériaux employés dans les expériences, la caractérisation des sables utilisés dans la formulation des spécimens testés, ainsi que les techniques d'essai appliquées pour évaluer les différents paramètres de l'étude.

Chapitre V : Cette section présente les résultats expérimentaux, accompagnés de leur discussion et interprétation. Les résultats sont analysés en lien avec les objectifs de l'étude, et les implications des données sont examinées en profondeur.

En conclusion, une récapitulation des principaux résultats obtenus au cours de l'étude sera fournie, mettant en lumière les implications pratiques et proposant des orientations pour des recherches futures dans le domaine des TRC et de leur durabilité.

CHAPITRE I :
Les fibres et les textiles utilisés
dans la construction

I.1 Introduction

Les textiles et les fibres ont profondément transformé le secteur de la construction en apportant des solutions novatrices et polyvalentes qui renforcent et optimisent les performances des matériaux traditionnels. Grâce à leur légèreté, leur résistance exceptionnelle et leur capacité d'adaptation à diverses configurations structurelles, ces matériaux sont devenus indispensables pour la conception de bâtiments modernes, capables de supporter des contraintes mécaniques tout en réduisant significativement leur poids global [2]. Les fibres, qu'elles soient en carbone, en verre, en aramide ou en polypropylène, se distinguent par des propriétés spécifiques qui répondent à des exigences techniques rigoureuses, offrant ainsi une flexibilité d'utilisation sans égale.

Parallèlement, les textiles, développés à partir de technologies de fabrication avancées telles que le tricotage et le tissage, permettent la création de renforts structuraux adaptés à une large gamme d'applications, allant des couches bidimensionnelles aux configurations tridimensionnelles complexes [1]. En intégrant des fibres de haute performance dans des structures textiles sophistiquées, ces matériaux composites jouent un rôle déterminant dans l'amélioration de la durabilité et de l'efficacité énergétique des ouvrages bâtis.

Ce chapitre se propose d'examiner en profondeur les fibres et textiles employés dans la construction, en explorant leurs caractéristiques distinctives, leurs domaines d'application, ainsi que les technologies qui sous-tendent leur développement et leur mise en œuvre.

I.2 Les fibres

Les fibres sont des éléments discontinus, de formes généralement cylindriques, dont le diamètre et la longueur peuvent varier. Elles peuvent être réparties dans la matrice de manière aléatoire ou avec une orientation préférentielle. Les fibres constituent également les éléments de base des structures textiles. On distingue les fibres courtes, mesurant entre 20 - 150mm et des fibres longues ou filaments continus.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille, . . .etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et la mode de performance du composite.

Les fibres sont employées dans de nombreux domaines, tels que la production de textiles, les matériaux composites, les filtres, les produits de consommation et les applications médicales. Leurs propriétés varient en fonction de leur composition, de leur forme et de leur taille, ce qui les rend utiles pour une grande variété d'usages.

I.2.1 Différents types de fibre

I.2.1.1 Les fibres naturelles

Elles sont utilisées depuis des années dans l'industrie du textile. Tous les vêtements étaient réalisés à partir de matières naturelles avant l'arrivée de la fibre synthétique, au milieu du XXème siècle. On parle de fibres naturelles lorsque la matière première est obtenue par transformations physiques et mécaniques d'une matière naturelle, sans modifier sa composition. La fibre naturelle peut être d'origine végétale ou animale [10].

- Les fibres végétales : elles sont issues des feuilles, des tiges, des graines, de la sève, voire des fruits des arbres et des plantes. Il s'agit de la première source de fibres transformées pour la conception de textile, elles sont biodégradables. Le coton est la fibre la plus répandue car elle constituée de cellulose quasi-pure et est donc plus simple à produire. Voici quelques exemples de fibres végétales : le coton, le chanvre, la ramie, la jute.
- Les fibres animales : elles sont issues des poils d'animaux ou de leur production comme la laine, le mohair, le cachemire, l'alpaga, la soie.

I.2.1.2 Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques n'ont aucun élément de base qui est naturel, il s'agit de production à partir de polymères organiques et inorganiques. Certaines fibres synthétiques découlent du recyclage de bouteilles plastiques mais elles sont principalement issues de la pétrochimie. Leur atout principal est leur résistance, elles sont généralement mélangées avec des fibres artificielles ou naturelles [12]. On y retrouve :

- Le polyester : Il s'agit de la fibre la plus utilisée dans l'industrie textile.
- Le polyamide (nylon) : Le polyamide est doux et infroissable.
- L'élasthanne (lycra) : C'est une fibre synthétique appréciée pour son élasticité, notamment utilisée dans la fabrication des vêtements de sport.
- L'acrylique : L'acrylique s'apparente souvent à un tissu épais. Il a un faible coût mais une durée de vie relativement réduite.

I.2.1.2 Les fibres minérales

Elles sont connues pour leurs propriétés mécaniques et thermiques exceptionnelles, ce qui les rend utiles pour une grande variété d'applications. Par exemple, les fibres de verre et de carbone sont souvent utilisées dans la production de matériaux composites pour les applications aéronautiques et spatiales, tandis que les fibres de quartz sont utilisées dans la production de filtres pour les applications médicales et industrielles [10].

I.3 Les fibres de carbone

La fibre de carbone, d'environ cinq à dix micromètres de diamètre, est constituée principalement d'atomes de carbone agglomérés en cristaux microscopiques alignés parallèlement à l'axe de la fibre. Cet alignement confère à la fibre une résistance exceptionnelle pour sa taille. Plusieurs milliers de ces fibres sont enroulées pour former un fil, qui peut être utilisé tel quel ou tissé.

Ce matériau se distingue par sa faible densité (1,7 à 2), sa grande résistance à la traction et à la compression, ainsi que par sa flexibilité, sa bonne conductivité électrique et thermique, sa tenue en température, et son inertie chimique (excepté contre l'oxydation) [7]. Il est principalement utilisé comme renfort dans les composites, offrant des pièces légères avec d'excellentes propriétés mécaniques comparées aux pièces métalliques.



Figure I.2 : Fils de carbone [4].



Figure I.1 : Bobine de fils de carbone [7].

I.3.1 Différents types de fibre de carbone

Les fibres de carbone se classifient en trois familles, selon leurs précurseurs et caractéristiques distinctes [3] :

- Fibres de carbone ex-PAN : Issues du polyacrylonitrile, elles offrent une haute résistance et un module d'élasticité élevé, idéales pour les applications industrielles.
- Fibres de carbone issues du brai : Fabriquées à partir de goudron ou de pétrole, elles sont moins coûteuses, dotées d'une bonne conductivité thermique et utilisées dans les freins et composites.
- Fibres de carbone issues de la cellulose : Provenant de matières naturelles comme le coton ou le bois, elles sont moins courantes, durables et économiques, adaptées aux applications spécifiques où le coût et la durabilité priment.

I.3.2 Avantages et inconvénients de la fibre de carbone

- Les avantages :
 - Grande résistance en tension et en compression.
 - Excellente tenue à haute température.
 - Excellente rigidité.
 - Inertie complète à la corrosion et aux produits chimiques.
 - Faible coefficient de dilatation.
- Inconvénients :
 - Coût élevé.
 - Mauvais isolant.
 - Faible allongement et rayon de courbure.
 - Une conductivité électrique qui peut engendrer des corrosions galvaniques au contact avec l'acier.

I.4 Les fibres de verre

Les fibres de verre sont un matériau composite constitué de nombreuses fibres de verre extrêmement fines. Elles sont de plus en plus utilisées dans le domaine de la construction et du renforcement de matériaux grâce à leurs propriétés uniques.



Figure I.3 : Bobine de fibre de verre [10].

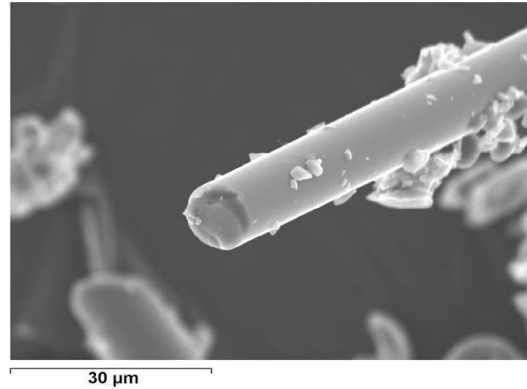


Figure I.4 : Micrographie MEB d'une fibre de verre [10].

L'utilisation des fibres de verre ne cesse de croître dans ces secteurs, en raison de leurs performances et de leur coût relativement abordable par rapport à d'autres fibres de renfort comme le carbone. Leur facilité de mise en œuvre et leur recyclabilité en font également un matériau durable et écologique.

I.4.1 Principe de fabrication de la fibre de verre

Ce procédé se déroule en 5 étapes principales [3] :

- Affinage à 1500°C : la composition (SiO_2 , MgO , CaO , B_2O_3) est chauffée ; elle devient visqueuse (vers 800°C), puis liquide, et finalement se vitrifie. À 1500°C, elle est homogène, et les dernières bulles et impuretés disparaissent.
- Filage par étirement : le verre en fusion se transforme en lamenet en étant étiré à grande vitesse ; la filature des filaments s'apparente en fait à la filature textile classique pour produire un l. Ce fil de verre se bobine ensuite autour d'une broche.
- Ensimage : l'étirage et le bobinage n'ont pas suffisamment d'effet pour rassembler durablement les centaines de filaments en un l (le verre est trop lisse pour s'agglomérer). L'ensimage consiste à ajouter un revêtement protecteur pour permettre l'agglomération des filaments et faciliter l'intégration dans les polymères.
- Finition : les fils sont ensuite bobinés ou coupés selon les finalités.

- Séchage : les fils sont finalement séchés à des températures de 600 à 700°C.

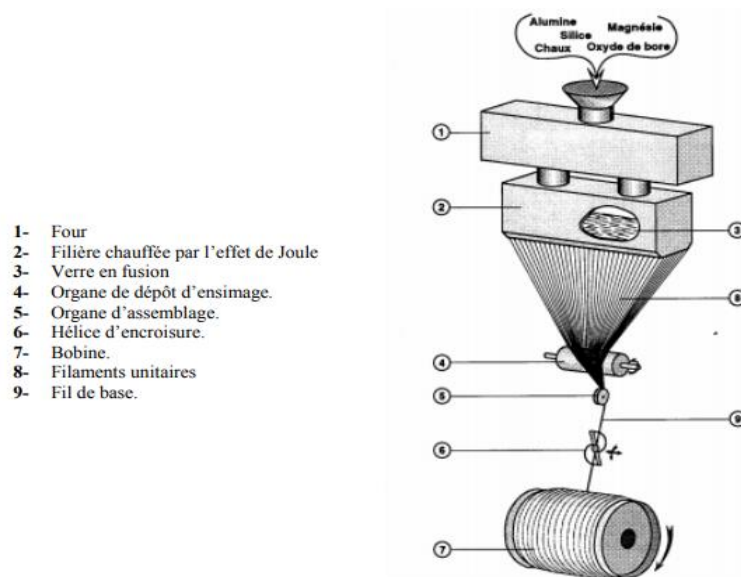


Figure I.5 : Principe de fabrication de la fibre de verre [10].

I.4.2 Avantages des fibres de verre

- La fibre de verre offre résistance élevée par rapport à son poids, améliorant la performance structurelle sans augmentation significative de la masse.
- La fibre de verre est non corrosive, ce qui garantit une durabilité accrue.
- La fibre de verre résiste à de nombreux produits chimiques, ce qui la rend adaptée à différents environnements industriels.
- La fibre de verre agit comme un bon isolant électrique.
- Son faible coefficient de dilatation thermique minimise les risques de fissuration et de déformation sous l'effet des variations de température.

I.5 Les fibres d'aramide

Les fibres d'aramide sont des polymères synthétiques aux structures moléculaires complexes, se distinguent par leur nature unique et leur polyvalence. Issues de la famille des polyamides aromatiques, ces fibres se caractérisent par la présence de groupes amides (-CONH-) et de cycles aromatiques dans leur chaîne polymérique. Cette composition chimique confère aux fibres d'aramide une combinaison rare de légèreté et de robustesse, qui les rend indispensables dans divers secteurs industriels. Développées à l'origine pour des applications militaires et industrielles, les fibres d'aramide, telles que le Kevlar et le Nomex, sont aujourd'hui intégrées dans une multitude de produits allant des gilets pare-balles aux composites avancés pour l'aéronautique [3].



Figure I.6 : Fibre d'aramide [8].

I.5.1 Différents types de fibres d'aramide

Les fibres d'aramide sont divisées en deux catégories principales : les para-aramides et les méta-aramides. Cette distinction repose sur la structure moléculaire des fibres et influe sur leurs propriétés spécifiques [13].

- Les para-aramides sont généralement fabriqués à partir de monomères tels que le PPD-T, leur structure linéaire confère une résistance exceptionnelle à la traction, une grande rigidité et une résistance à l'abrasion, les rendant idéaux pour les gilets pare-balles et les renforcements structurels.
- Les méta-aramides sont synthétisés à partir de monomères tels que le MPD-I, avec des groupes amides perpendiculaires, ils offrent une bonne résistance thermique et aux flammes. Utilisés dans les vêtements de protection thermique, comme le Nomex, et les combinaisons de pilotes.

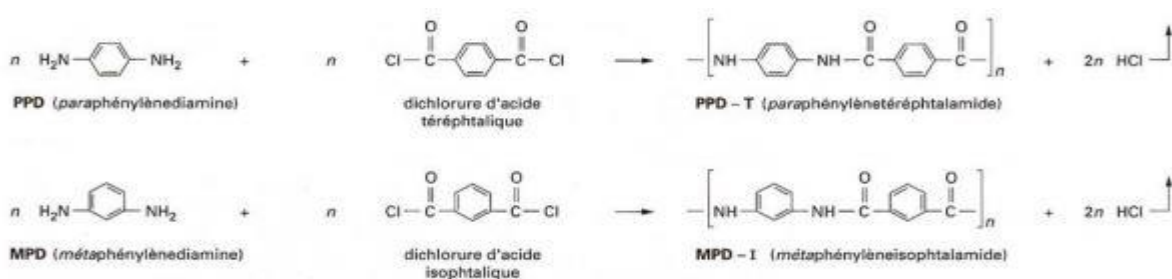


Figure I.7 : Réactions de polymérisation conduisant aux deux types de polymères aramides (para et méta) [13].

I.5.2 Avantages et inconvénients de la fibre d'aramide

- Les avantages [14] :
 - Excellentes propriétés diélectriques.
 - Haute résistance à la traction.
 - Bonne résistance à la fatigue.
 - Excellente stabilité thermique de 70 °C à + 200 °C.
 - Excellente résistance à la déchirure.
 - Excellente résistance aux vibrations.
 - Faible densité.
- Les inconvénients [14] :
 - Particulièrement sensible aux UV.
 - Faible résistance à la compression.
 - Reprise d'humidité importante (4%).
 - Faible adhérence avec les résines d'imprégnation.

I.6 Les fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont des matériaux composites constitués de fibres synthétiques fines dérivées du polypropylène, un polymère thermoplastique obtenu par polymérisation du propylène. Leur fabrication implique l'extrusion et l'étirage du polypropylène fondu pour former des fibres légères et résistantes.

Ces fibres sont de plus en plus utilisées dans divers domaines, notamment dans la construction. Leur adoption croissante s'explique par leurs performances globales et leur coût relativement abordable par rapport à d'autres fibres synthétiques. Elles sont employées pour renforcer le béton et les sols, les tapis, les cordages et les filtres [11].

La popularité des fibres de polypropylène dans la construction est également due à leur facilité de mise en œuvre et à leur recyclabilité, répondant ainsi aux exigences de performance et de durabilité de ce secteur.



Figure I.9 : Fibre de polypropylène [11].

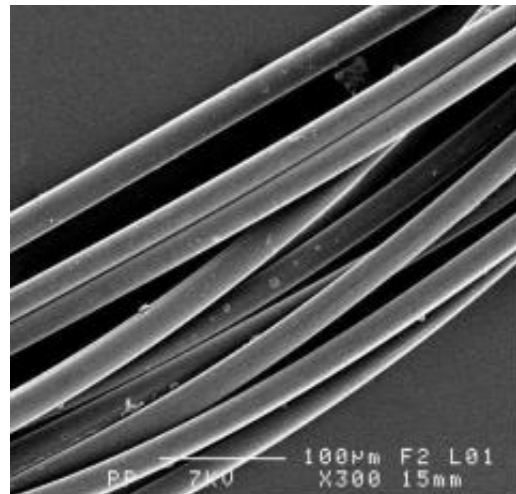


Figure I.8 : Micrographie MEB des fibres de polypropylène [11].

I.6.1 Principe de fabrication des fibres de polypropylène

La fabrication de la fibre de polypropylène implique plusieurs étapes cruciales [4] :

- Extrudeuse : Le polypropylène est fondu et extrudé à travers une filière pour former des filaments continus.
- Pack de filature : Les filaments fondus passent à travers un pack de filature pour les aligner et les orienter correctement.
- Conduit de trempe : Les filaments extrudés sont refroidis rapidement dans un conduit de trempe pour les solidifier. Ce refroidissement rapide aide à fixer la structure initiale des filaments.
- Étirement : Les filaments sont étirés pour augmenter leur orientation moléculaire et leur résistance mécanique. Cette étape est cruciale pour améliorer les propriétés mécaniques des fibres.
- Stabilisation : Les filaments sont stabilisés thermiquement pour conserver leur structure cristalline et améliorer leur durabilité.
- Étirement : deuxième étape d'étirement pour assurer une orientation uniforme et une résistance optimale des fibres.
- Crantage : Les filaments sont crantés pour leur donner une texture ondulée, ce qui améliore leur capacité à être transformés en textile.
- Coupure : Les filaments sont coupés à la longueur souhaitée pour leur utilisation finale dans diverses applications textiles.

I.6.2 Avantages des fibres de polypropylène

- Elles sont relativement économiques [9].
- Elles ont un faible coefficient de frottement [9].
- Elles ont une faible densité.
- Elles résistent bien à l'humidité.
- Elles possèdent une bonne résistance chimique.
- Elles présentent une excellente résistance à la flexion, à la fatigue et aux chocs [9].

I.7 Les Textiles

Les textiles sont des matériaux flexibles composés de fibres naturelles ou synthétiques, qui sont filées en fils puis tissées, tricotées, tressées ou feutrées pour former des tissus. Utilisés principalement dans la fabrication de vêtements, les textiles ont également des applications variées dans des domaines tels que la décoration intérieure, l'industrie, la construction, et les matériaux composites avancés. Les textiles peuvent varier en termes de texture, durabilité, élasticité, et d'autres propriétés en fonction des fibres et des techniques utilisées pour les produire.

I.7.1 Technologies des textiles

Les technologies textiles peuvent être classées en deux grandes familles : les textiles bidimensionnels et tridimensionnels [6]. Ces technologies jouent un rôle crucial dans le domaine des composites destinés à des applications structurelles, notamment en aéronautique, en automobile, et dans les structures industrielles.

I.7.1.1 Textiles bidimensionnels

Comme leur nom l'indique, ils sont conçus pour supporter des efforts principalement dans deux directions du plan. Ils se composent de préformes bidimensionnelles, qui incluent également des textiles unidirectionnels. Dans ces textiles, l'ensemble des fils, à l'exception de ceux nécessaires au maintien de la structure, est orienté dans la même direction. Les composites bidimensionnels sont souvent composés d'un empilement de couches de textiles bidirectionnels (ou plis) indépendantes. Cependant, cette structure est vulnérable aux efforts hors plan, qui ne sont repris que par la matrice, ce qui limite la résistance et rend les matériaux sensibles au délaminage, un processus qui réduit leur résistance et durabilité.



Figure I.10 : Grille bidimensionnelle [5].

I.7.1.2 Textiles Tridimensionnels

Pour pallier les limitations des textiles bidimensionnels, les textiles tridimensionnels ont été développés. Ces textiles sont conçus pour transférer les charges non seulement dans le plan, mais aussi dans l'épaisseur du matériau, permettant ainsi un transfert de charge dans les trois directions de l'espace.

Les textiles tridimensionnels offrent plusieurs avantages significatifs :

- **Résistance Améliorée** : Les composites tridimensionnels répartissent les charges de manière uniforme dans toutes les directions, offrant ainsi une meilleure résistance structurelle et une plus grande durabilité.
- **Efficacité de mise en œuvre** : La fabrication des composites tridimensionnels est plus rapide et efficace, car un seul pli de textile tridimensionnel peut remplacer plusieurs plis de textiles bidimensionnels.



Figure I.11 : Géogrille tissée tridimensionnelle [5].

Les principales technologies de textile utilisées comme armature dans les composites textile-mortier sont le canevas, le tricotage à maille jetée, le tricotage à maille jetée en 3 dimensions ainsi que le tissage [6].

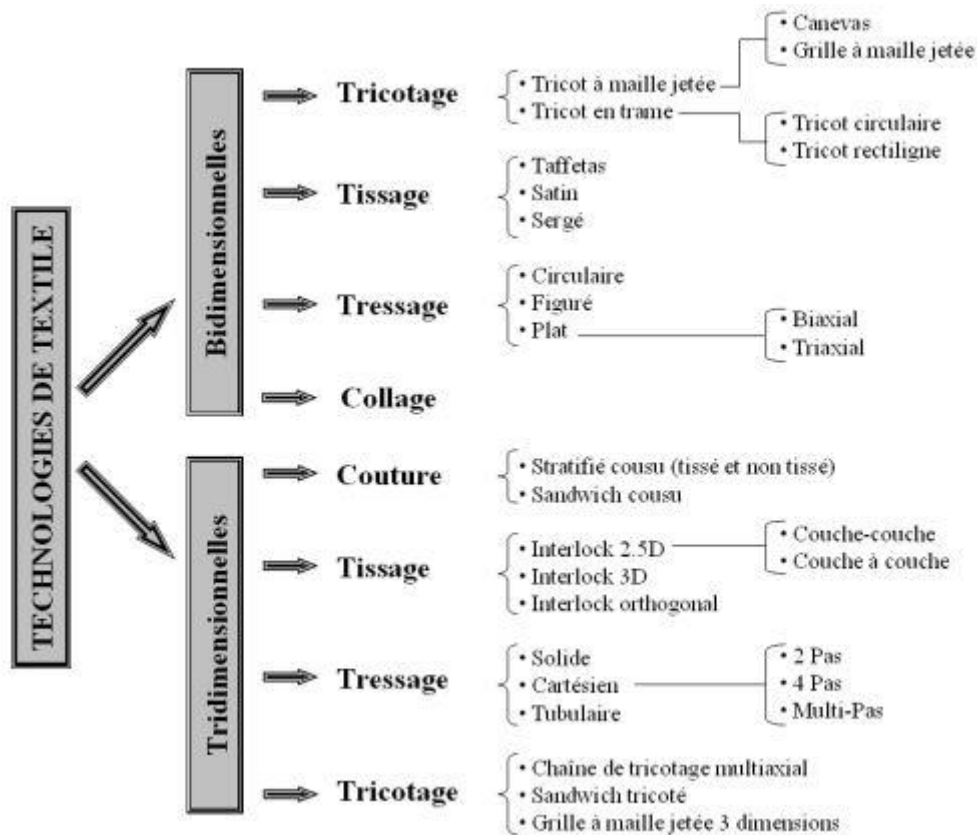


Figure I.12 : Principales technologies de mise en œuvre de renforts textiles [6].

I.8 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'importance croissante des textiles et des fibres dans le domaine de la construction, en soulignant leur capacité à améliorer significativement les performances des matériaux traditionnels. Les fibres de carbone, de verre, d'aramide et de polypropylène, ainsi que les textiles fabriqués à partir de techniques avancées telles que le tricotage et le tissage, se sont révélés être des solutions clés pour répondre aux exigences contemporaines en matière de légèreté, de résistance et d'efficacité énergétique.

Ces matériaux innovants ne se contentent pas de compléter les matériaux traditionnels, mais ils deviennent des éléments centraux de l'ingénierie moderne, offrant des alternatives durables et performantes. Leur utilisation étendue promet de transformer encore davantage le secteur de la construction, avec des applications variées allant des structures légères aux renforcements complexes.

Enfin, les perspectives de recherche future pourraient inclure l'exploration de nouvelles fibres et textiles, ainsi que l'amélioration des technologies de fabrication pour optimiser encore davantage leurs performances. En somme, les textiles et les fibres jouent un rôle essentiel dans le façonnement de l'avenir du bâtiment, et leur impact continuera de croître à mesure que les technologies évoluent.

CHAPITRE II :
Bétons armée de textiles (TRC)

II.1 Introduction

Le béton armé de textiles (TRC) se distingue comme une avancée remarquable dans le domaine des matériaux de construction. Cette technologie associe la solidité du béton aux propriétés spécifiques des renforts textiles, tels que les fibres de carbone, de verre ou d'aramide, pour offrir des solutions innovantes aux défis de l'architecture moderne [21]. Les TRC permettent non seulement d'améliorer la résistance mécanique et la durabilité des structures, mais aussi d'élargir considérablement les possibilités de conception.

Les caractéristiques des fibres textiles intégrées dans le béton offrent une flexibilité accrue, permettant la réalisation de formes complexes et des configurations architecturales variées qui seraient difficiles à atteindre avec des méthodes de construction conventionnelles [7]. Cette capacité à concevoir des structures innovantes tout en optimisant la performance des matériaux représente un avantage significatif des TRC. Ce chapitre explore en profondeur les caractéristiques des TRC, leurs avantages techniques, ainsi que leurs applications récentes dans le domaine de la construction.

II.2 Béton armé de textiles

Le béton armé de textile est une technique de renforcement du béton qui utilise des textiles de fibres comme matériau de renforcement au lieu des barres d'acier traditionnelles. Le béton textile est un matériau qui combine une armature non-métallique dans une matrice à base de ciment. L'armature est généralement constituée d'un tissu de fibres de carbone ou de verre (armature textile) qui est résistant à la corrosion. Les textiles sont intégrés dans le béton pour augmenter sa résistance et sa durabilité [15]. Le composite textile-mortier est un type de béton armé généralement composé d'une matrice de ciment hydraulique renforcée de plusieurs couches textiles continues 2D ou 3D.

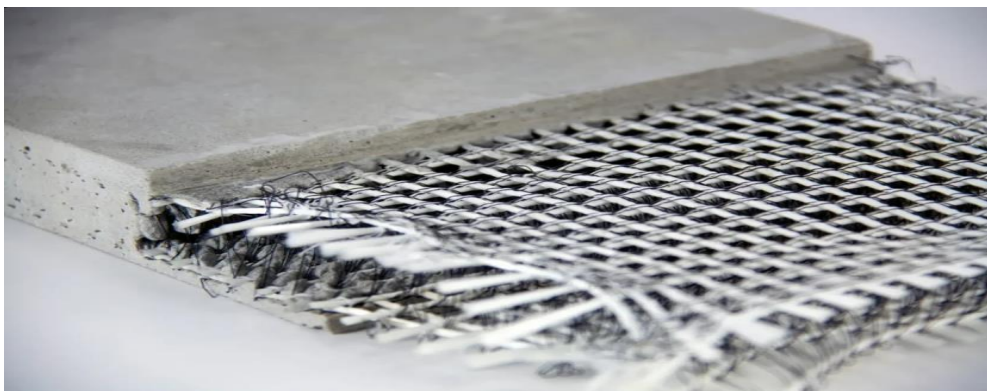


Figure II.1 : Béton armé de textile [16].

II.3 Comportement mécaniques des TRC

Pour certains matériaux composites, notamment ceux à matrice cimentaire, l'adhésion entre le renfort textile et la matrice est particulièrement forte. Cette caractéristique permet de modéliser leur comportement en traction de manière simple et précise, en utilisant des relations contrainte-déformation.

II.3.1 Comportement d'adhérence

II.3.1.1 Adhérence filament-mortier

II.3.1.1.1 Échelle nanoscopique

Au cœur des matériaux composites, entre la matrice et le renfort, se trouve une zone unique appelée interphase. Fruit de processus complexes, cette zone de transition d'épaisseur non négligeable présente des propriétés physico-chimiques distinctes de celles de ses constituants.

L'interphase joue un rôle crucial dans le comportement mécanique du composite. Elle assure la transmission des efforts entre le renfort et la matrice, influençant ainsi la propagation des fissures. Un transfert de charge efficace est essentiel pour l'obtention de composites performants. Cependant, la relation entre l'adhésion interfaciale et les propriétés du composite est complexe. Si une forte liaison conduit à une grande rigidité et résistance, elle peut également fragiliser le matériau et le rendre sensible aux chocs [7]. Dans ce cas, les fissures se propagent perpendiculairement aux fibres, menant à la rupture du composite

II.3.1.1.2 Échelle microscopique

L'analyse de la liaison entre les filaments et la matrice cimentaire peut également s'effectuer à l'échelle nanométrique. Cette approche permet d'examiner l'interface, une zone infiniment fine située entre les deux phases distinctes que sont le renfort et la matrice. L'interface, en l'absence de gradient de propriétés physico-chimiques, se distingue des phases qu'elle relie. Cette discontinuité au niveau nanométrique peut avoir un impact significatif sur le comportement mécanique du composite.

La figure II.2 présente les résultats d'un test de traction sur un composite constitué d'un filament de verre-AR noyé dans une matrice cimentaire. Ce test permet d'analyser l'effet de la perte d'adhésion entre le filament et la matrice sur la contrainte tangentielle.

Les résultats montrent que la perte d'adhésion n'a qu'un impact minime sur la contrainte tangentielle. Cela signifie que le transfert de contraintes par friction entre le filament et la matrice reste relativement constant même lorsque l'adhésion est compromise [17].

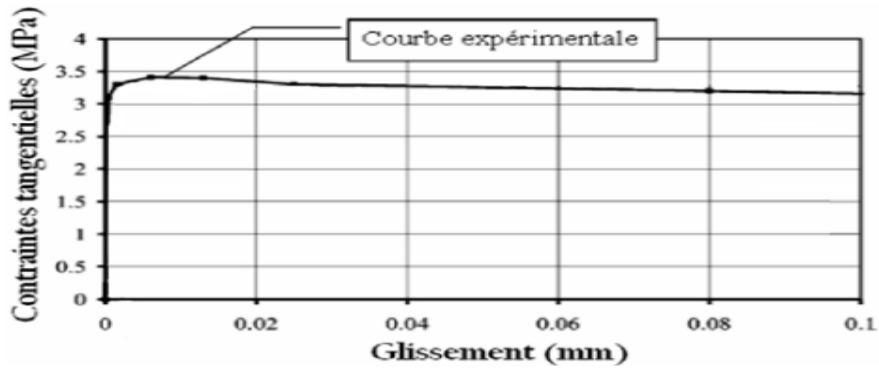


Figure II.2 : Comportement d'un mono filament noyé dans une matrice cimentaire [4].

II.3.1.2 Adhérence fil-mortier

II.3.1.2.1 Échelle microscopique

Les fils, destinés à reprendre les efforts, généralement utilisés dans les textiles de renforcement des TRC, sont constitués de 400 à 7000 filaments d'un diamètre compris entre 5 et 30 µm. L'imprégnation des textiles dans les composites cimentaires dépend de la configuration du textile et de la fluidité du ciment. Plus le tissage est serré, plus il est difficile pour le ciment de pénétrer entre les fils. Cependant, même dans les tissus les plus denses, un espace subsiste entre chaque filament. Cet espace, généralement de l'ordre du diamètre du filament, permet au ciment de s'infiltrer et d'enrober partiellement les fils [18]. Des études ont montré que les filaments extérieurs du fil sont les plus imprégnés. En effet, ils sont en contact direct avec la matrice sur une plus grande surface. A mesure que l'on s'approche du centre du fil, la surface de contact avec la matrice diminue. Les filaments internes, situés au cœur du fil, ne sont généralement pas imprégnés par le ciment.

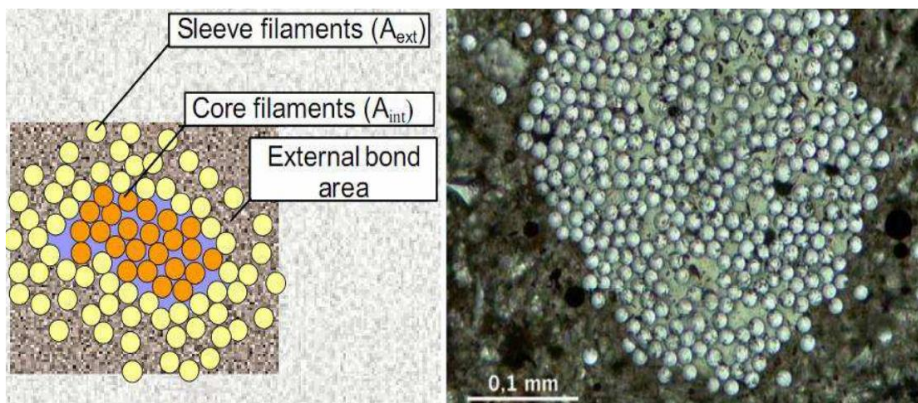


Figure II.3 : Un filament enrobe dans sa matrice. Visualisation des filaments intérieurs non imprégnés et extérieurs imprégnés [5].

II.3.1.2.2 Échelle macroscopique

L'adhérence entre une fibre unique et le mortier est la force qui résiste à l'arrachement de la fibre du mortier. Cette force est influencée par les propriétés de surface de la fibre et du mortier. L'adhérence entre un textile et le mortier est la force qui résiste à la séparation du textile du mortier. Cette force est influencée par les propriétés du textile, notamment le type de fibre, le motif de tissage et la densité du tissu. Elle est également influencée par les propriétés du mortier, telles que le rapport eau-ciment et le type de granulats. La géométrie du textile peut influencer davantage l'adhérence entre un textile et le mortier, cela inclut le type de textile (tricoté, tissé, etc.) et la configuration du maillage (type de maillage et largeur). Le comportement de l'arrachement fibre-mortier peut être caractérisé et quantifié par une courbe, comme illustré sur la figure II .4 pour obtenir cette courbe, Schladitz ont réalisé un essai d'arrachement d'une seule fibre d'un renfort textile noyé dans le mortier pour une courte longueur d'ancrage. Les résultats obtenus mesurent la force de traction en fonction du glissement de la fibre dans le mortier [19].

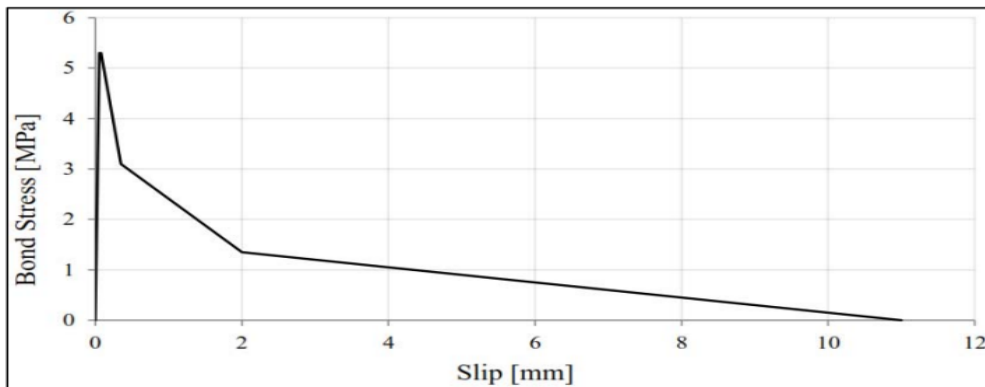


Figure II.4 : Comportement d'arrachement fil-matrice selon Schladitz [19].

II .3.2 Comportement en traction par flexion

La procédure d'essai de flexion est relativement simple par rapport aux essais de traction directe. La méthode d'exploitation dite indirecte de cet essai s'accommode fort bien pour identifier la caractérisation de bétons fibrés ou des composites TRC, présentant une répartition plus ou moins homogène des fibres [20].

L'analyse des résultats d'essais de flexion du composite TRC s'appuie souvent sur l'étude de la courbe charge-flèche le comportement du TRC en flexion peut être divisé en trois zones distinctes :

- Zone I : dans cette zone, aucun dommage n'est observé dans les matériaux constitutifs du composite. La rigidité est uniquement déterminée par les propriétés de la matrice. Le comportement est linéaire, ce qui signifie que la déformation est proportionnelle à la charge appliquée.
- Zone IIA : au-delà de la limite élastique, lorsque la résistance en traction de la matrice est atteinte, la première fissure apparaît. Cette fissure marque le début de la zone IIA dans la courbe charge-flèche.
- Zone IIB : à un certain stade de la propagation des fissures, un changement de comportement se produit dans le composite TRC. La formation de fissures se stabilise, marquant la transition vers la zone IIB de la courbe charge-flèche. Dans cette zone, le transfert d'effort s'achève. La totalité de la charge appliquée est désormais supportée par le renfort textile. La matrice, fragilisée par les fissures, ne joue plus qu'un rôle de liant entre les fibres. La propagation des fissures se poursuit, mais de manière verticale. Les fissures s'ouvrent et s'élargissent, créant des vides dans la matrice. Ce phénomène est favorisé par la concentration de contraintes à l'extrémité des fissures. Parallèlement à la propagation des fissures, la rigidité du composite augmente significativement par rapport à la zone IIA.
- Zone III : cette zone correspond à la rupture localisée du composite TRC. Cette rupture survient lorsque le renfort textile atteint sa résistance limite. Au-delà de cette limite, le comportement du composite est marqué par deux phénomènes distincts :
 - 1- Glissement entre le fil et la matrice : Les fibres du renfort textile commencent à glisser et à se détacher de la matrice. Ce phénomène est dû à la rupture des liaisons entre les fibres et la matrice, fragilisée par les fissures.
 - 2- Ruine progressive des filaments : Les filaments du renfort textile se rompent progressivement, concentrés au niveau d'une seule fissure. Cette concentration de ruptures est due à la concentration de contraintes à l'extrémité de la fissure.

Cette zone est définie par un comportement post-pic du composite qui est présenté par un comportement d'arrachement entre le renfort textile et la matrice. L'ensemble de ces phénomènes conduit à une diminution progressive de la résistance du composite.

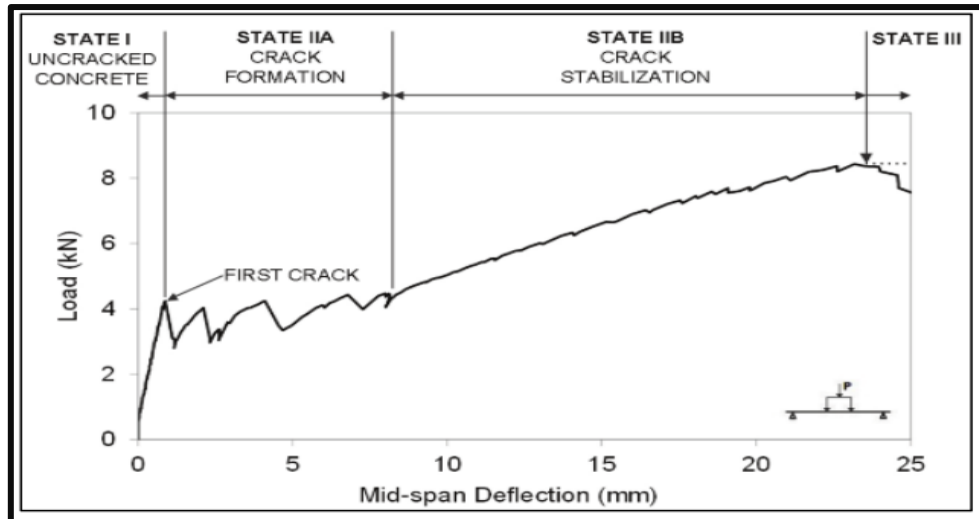


Figure II.5 : Comportement en traction par flexion de composite TRC [20].

II.3.3 Comportement en traction directe

La grande majorité des études montre que la loi de comportement du composite TRC exprimée en contrainte-déformation peut être divisée en trois zones [21].

- Zone I : dans cette zone initiale, le TRC se comporte de manière linéaire et élastique. Ni la matrice en béton ni le renfort textile ne sont encore endommagés.
- Zone IIA : la transition entre les zones I et IIA est marquée par un changement soudain de rigidité, indiquant l'apparition de la première fissure dans le mortier. La matrice atteint sa résistance à la traction et se fissure. Le renfort textile entre alors en jeu pour redistribuer les efforts et ponter la fissure. De nouvelles fissures se forment ensuite à différents endroits du composite, leur formation et multiplication dépendant fortement de la qualité de la liaison entre la matrice et le renfort textile.
- Zone IIB : cette zone se distingue par une augmentation notable de la rigidité par rapport à la zone IIA. Une fois que la formation des fissures s'est stabilisée et que la distribution des efforts dans le composite est devenue stable, le renfort textile prend en charge la totalité de l'effort. La contrainte (ou la déformation) dans le renfort textile augmente ensuite jusqu'à sa limite de rupture.
- Zone III : elle correspond au comportement post-pic du composite. Elle se caractérise par un arrachement progressif entre le renfort textile et la matrice, couplé à la rupture du textile localisée à une seule fissure. Contrairement au béton armé d'acier, le renfort textile ne présente pas de comportement plastique. La rupture du composite TRC est donc fragile.

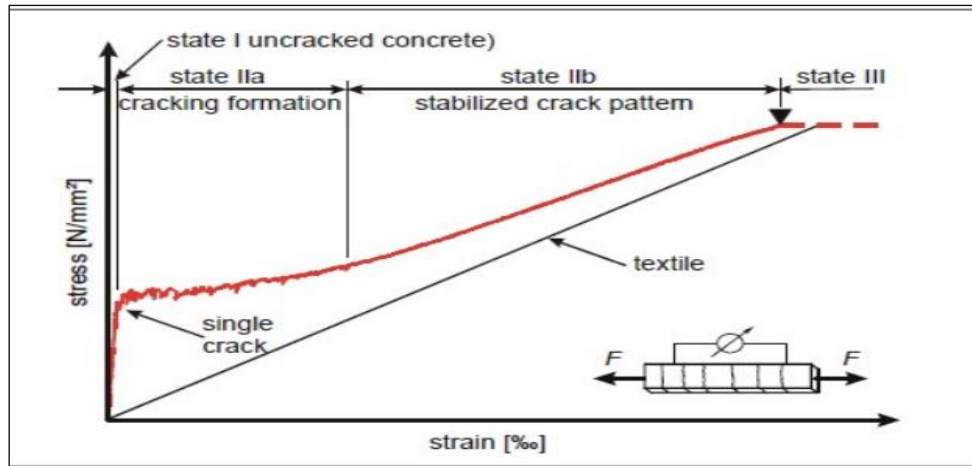


Figure II.6 : Comportement contrainte-déformation qualitatif en traction directe du composite TRC [21].

II.4 Paramètres influençant le comportement des TRC

Comprendre l'impact des paramètres clés sur le comportement des composites TRC est essentiel. Bien que des recherches approfondies aient été menées, les résultats restent limités. Cette section explore les analyses paramétriques visant à élucider l'influence de ces paramètres sur le comportement global en traction du composite.

II.4.1 Nature de la matrice

En théorie, la nature de la matrice définit l'influence sur le comportement de la phase élastique du TRC, ainsi que sur l'imprégnation du renfort textile par le mortier qui domine l'adhérence entre le renfort textile et la matrice. Brameshuber et al [22] conclut que quel que soit la matrice utilisée, son influence sur le comportement en traction du TRC se limite au comportement pré-fissuration du TRC (rigidité de la phase élastique, ainsi que la contrainte marquant la fin de cette phase). D'autre part Mobasher et al a montré que la nature de la matrice peut aussi avoir une influence significative sur la phase IIB (phase de stabilité de fissuration) de la courbes contrainte-déformation, ainsi que sur la résistance et la déformation ultime du composite [23].

II.4.2 La nature des filaments

La nature des filaments a une importance capitale dans le comportement post-fissuration des composites textiles, car elle influence directement l'adhérence entre le renfort et la matrice. Bien que de nombreuses études aient examiné l'impact de divers types de fibres, peu se sont attardées sur une analyse paramétrique rigoureuse où seule la nature des filaments varie. Cette variation affecte non

seulement la rigidité du composite, mais également sa capacité à préserver son intégrité après une fissuration. Une compréhension approfondie de ces interactions est essentielle pour optimiser les performances des composites textiles [21].

II.4.3 Taux de renfort

Le taux de renfort est un paramètre déterminant pour les propriétés mécaniques des composites textile-mortier (TRC). Les études existantes montrent que l'augmentation du nombre de couches de renfort dans un composite d'épaisseur constante conduit généralement à une amélioration de la résistance en traction et en flexion. Avec l'augmentation du taux de renfort on obtient une meilleure distribution des contraintes dans le composite TRC, ce qui conduit un mode de rupture caractérisé par un réseau de fissures de faibles ouvertures et longueurs [21].

II.4.4 Orientation des fils

Le textile tricoté se caractérise par deux directions principales : la direction chaîne 0° et la direction trame 90° . Selon les études [27], pour un textile tricoté avec la même configuration de fil et le même espacement entre fils dans les directions chaîne et trame, le composite est plus résistant lorsque le textile est orienté dans le sens trame. L'auteur explique cela par la diminution du taux d'imprégnation des fils de chaîne par rapport à celui des fils de trame, en raison de l'obstruction à l'imprégnation des fils de chaîne par les fils de chaînettes qui les entourent [21].

II.5 Procédés de production des TRC

Les techniques de production des composites TRC diffèrent en fonction du renfort textile, de la matrice ainsi que l'utilisation du TRC. A cet effet, les procédés sont divisés en deux grandes familles.

II.5.1 Procédés de mise en œuvre in-situ

II.5.1.1 Technique du moulage au contact

Le moulage au contact est une technique simple et économique pour fabriquer des TRC. Il consiste à superposer des couches de matrice et de renfort textile dans un moule. La matrice est d'abord appliquée sur le substrat, puis le renfort est posé et imprégné à l'aide d'outils comme une truelle ou un débulleur pour éliminer l'air et assurer une bonne imprégnation des fibres. Un film plastique est ajouté pour limiter les défauts de surface. Toutefois, cette méthode présente des risques : une imprégnation inégale ou des défauts internes peuvent entraîner une dispersion des propriétés mécaniques, compromettant ainsi la performance du composite, en particulier dans les applications structurales [7].



Figure II.7 : Technique de moulage au contact [7].

II.5.1.2 Technique de projection In-situ

La technique de projection est similaire à celle du moulage au contact, mais se distingue par l'application de la matrice par projection sur le renfort textile. Cette méthode est particulièrement adaptée à la production en série et est fréquemment utilisée pour des réparations structurales. Bien qu'elle augmente les taux de production, elle peut également entraîner des défauts d'imprégnation du renfort textile. Pour minimiser ces problèmes, il est essentiel que les matrices projetées doivent présenter des caractéristiques spécifiques [7] :

- Une très bonne fluidité, tout en étant thixotropique (viscosité qui diminue sous l'effet du cisaillement)
- Une excellente compatibilité avec le renfort textile afin d'assurer une imprégnation optimale

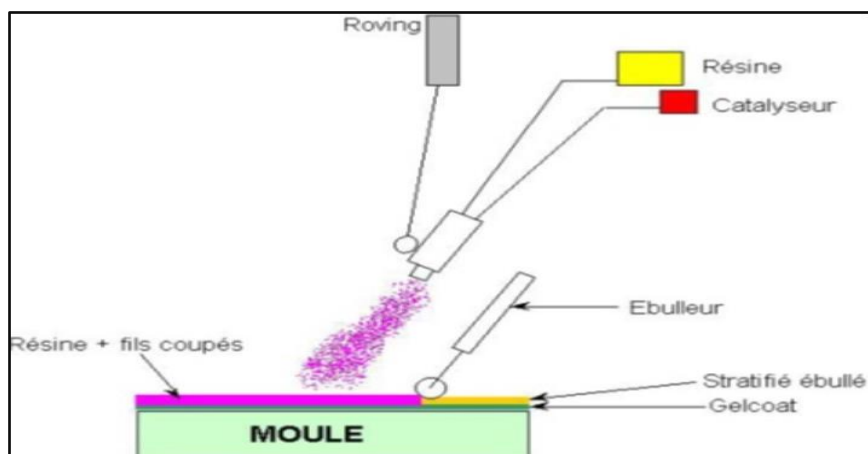


Figure II.8 : Technique de projection In-situ [24].

II.5.2 Procédé de mise en œuvre par préfabrication

Les techniques de préfabrication ont pour objectif de produire des composites TRC à destination industrielle. Elles ont pour avantage par rapport aux procédés de mise en œuvre in-situ de garantir une faible dispersion des propriétés mécaniques et physiques des TRC produits, ainsi qu'une possibilité d'optimiser leurs performances mécaniques. Diverses techniques de préfabrication existent, les plus connues sont les suivantes :

II.5.2.1 Pultrusion

Ce type de moulage est destiné à l'obtention des profils à section constante rectiligne ou courbe la première étape consiste à imprégner le renfort en continu dans un bain d'imprégnation. Dans la seconde étape le renfort imprégné passe dans une filière chauffée à l'intérieur d'une étuve où a lieu simultanément la mise en forme du profil et la polymérisation de la résine [24].

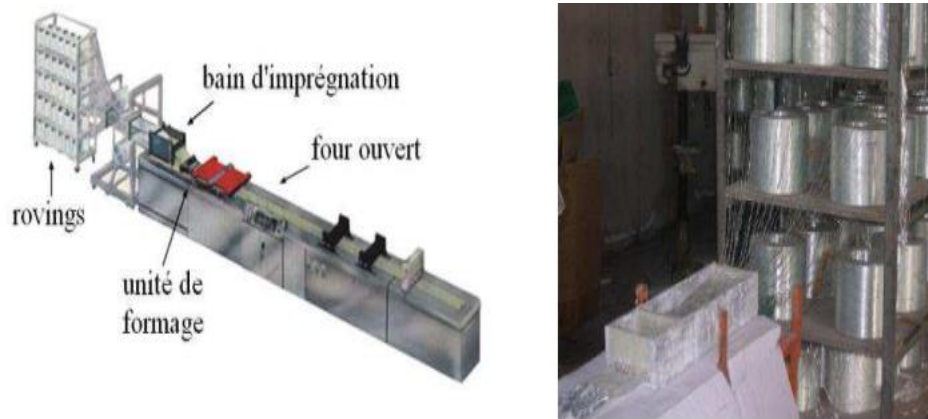


Figure II.9 : Schéma procédé de pultrusion utilisé par Promis [24].

II.5.2.2 Imprégnation mécanique

Wastiels a mis en place une unité de compactage composée de deux cylindres qui permettent l'imprégnation du textile de renfort juste après sortie du bain d'imprégnation contenant la matrice. Cette technique a permis d'atteindre des taux de renfort de 25% pour des matrices de type Vubonite.

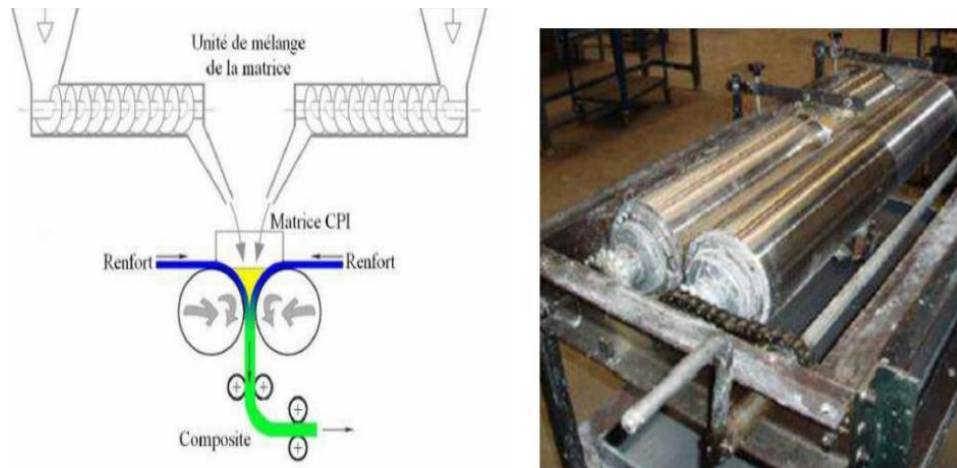


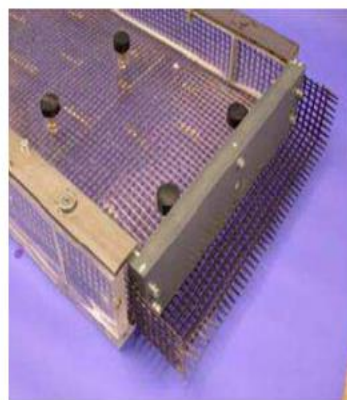
Figure II.10 : Unité de compactage mécanique mise en place [25].

II.5.2.3 Pompage et injection

Une technique d'imprégnation mécanique par injection de matrice a été mise en œuvre pour la fabrication de composites cimentaires renforcés de textiles (TRC). Ce procédé consiste à injecter un mortier dans un moule à double face, où le renfort textile est préalablement positionné. L'injection est réalisée à l'aide d'une pompe, permettant un contrôle précis de l'imprégnation. Une étude préliminaire est nécessaire pour déterminer l'emplacement optimal des points d'injection afin d'éviter les poches d'air et d'assurer une distribution homogène de la matrice. Bien que cette méthode permette la fabrication de pièces aux formes complexes, le taux de renfort volumique du composite est souvent inférieur à celui d'autres techniques de fabrication. [26].



a) Pompe à mortier



b) moule en verre



c) Injection du mortier

Figure II.11 : Procédé de pompage et injection mis en place par Brockman [26].

II.6 Avantages du béton armé textile (TRC)

L'utilisation des TRC dans la construction présente plusieurs avantages parmi lesquels on peut citer :

- Renfort en fibres textiles non corrosives : Le renfort textile utilisé dans le TRC est de nature non corrosive, ce qui signifie qu'il ne sera pas affecté par les agents chimiques ou les conditions climatiques.
- Efficacité accrue : Les structures en TRC offrent un degré d'efficacité élevé en termes de résistance et de durabilité, ce qui les rend idéales pour les applications où la performance est critique.
- Amélioration du comportement mécanique : L'armature textile améliore le comportement mécanique du béton, en renforçant ses propriétés de résistance à la compression et à la traction.
- Léger et polyvalent : Les structures en TRC sont légères et peuvent être utilisées pour créer différents types de composants structurés, offrant ainsi une grande flexibilité dans la conception des produits finaux.
- Liberté de conception : Le matériau textile permet d'offrir une liberté de conception des produits finaux pour un objectif spécifique, en permettant des configurations optimales pour les besoins particuliers.
- Durabilité : Le TRC est durable par nature. Il développe des structures minces et consomme donc moins de matériau par rapport aux structures en béton conventionnelles. La rénovation des structures anciennes à l'aide de TRC contribue à augmenter la durée de vie des structures.

II.7 Applications récentes des TRC

- Les composites TRC, en plus d'être utilisés dans la réparation et le renforcement de structures [24], émergent dans les constructions neuves et plus précisément dans des applications dans l'enveloppe du bâtiment.



Figure II.12 : Rénovation d'un toit en forme de tonneau à Zwickau en Allemagne [24].

- La construction de ponts, de piliers et de protections routières en béton armé avec des fibres de Kevlar ou de jute est une technique avancée qui permet de renforcer significativement ces structures contre les secousses et les vibrations soudaines [24].



Figure II.13 : Passerelle piétons de Lautlingen en Allemagne [24].

- Éléments de façade en matériau de membrane architecturale sont fabriqués à partir de tissus en fibre de verre enduits de résine PTFE. Ce matériau de film a de bonnes performances de soudage des performances antivieillessement. Utilisé dans les grandes installations publiques (installations de transport, installations sportives, installations paysagères commerciales, installations industrielles et autres zones) telles que : systèmes de toit de stade, halls d'aéroport, plates-formes, etc... [21].



Figure II.14 : Institut-fritz en Allemagne [21].

- Les composite TRC ont également été utilisés pour la réalisation de façades ventilées ($2.68 \times 325 \times 25$ mm) composées de mortier à granulométrie très fine renforcé par deux couches de textile en verre de type AR. Les panneaux ont été utilisés en tant que revêtement lors de l'extension de l'institut du béton de l'Université d'Aix-la-Chapelle en 2002 [21].



Figure II.15 : Façades ventilées en TRC de l'université d'Aix la chapelle [21].

- Les TRC peuvent s'adapter à la production de géométries complexes telles que la construction de toits légers sous forme de coques dont la courbure peut augmenter la capacité portante et compenser le caractère léger du TRC. Un prototype de toit incurvé en TRC à double couche de mortier renforcé par du Verre alkali résistant, a été réalisé à l'université RWT Aachen [27].



Figure II.16 : Prototype de toit incurvé en TRC [27].

II.8 Conclusion

Les composites à matrice textile renforcée (TRC) offrent des avantages significatifs, notamment une résistance accrue à la corrosion, une réduction des coûts de maintenance, ainsi qu'une meilleure isolation thermique et acoustique. Leur flexibilité permet également aux architectes et ingénieurs de concevoir des solutions innovantes et adaptées à des besoins spécifiques.

Pour exploiter pleinement ces avantages, il est essentiel de disposer d'une expertise technique approfondie à chaque étape, de la conception à l'installation. De plus, une attention particulière aux aspects environnementaux est requise pour garantir non seulement la performance mais aussi la sécurité des structures. Assurer ces exigences permet de tirer le meilleur parti des TRC tout en garantissant la durabilité et la fiabilité des ouvrages.

CHAPITRE III :

Durabilité des TRC

III.1 Introduction

La durabilité des structures en TRC (Textile Reinforced Concrete) est une préoccupation essentielle dans le domaine du génie civil. La longévité et la performance des matériaux de construction jouent un rôle crucial dans la sécurité, l'efficacité économique et la viabilité environnementale des infrastructures. La durabilité des TRC, en particulier, est influencée par une multitude de facteurs allant des conditions environnementales aux propriétés intrinsèques des matériaux utilisés.

Les TRC, bien que reconnus pour leurs excellentes propriétés mécaniques, doivent être rigoureusement évalués pour leur capacité à résister aux diverses formes de dégradation au fil du temps [28]. Les conditions climatiques extrêmes, les cycles de gel-dégel, l'exposition aux agents chimiques agressifs, et les charges mécaniques répétées sont autant de facteurs susceptibles d'affecter la durabilité de ces structures [29].

Afin d'assurer une performance durable des TRC, il est indispensable de mener des essais de durabilité spécifiques et de s'appuyer sur des recherches antérieures. Ces essais permettent de simuler les conditions réelles auxquelles les TRC seront exposés, et ainsi d'identifier les mécanismes de dégradation et les solutions possibles pour les améliorer.

Ce chapitre vise à examiner de manière approfondie les différents facteurs influençant la durabilité des structures en TRC, à décrire les types d'essais utilisés pour évaluer cette durabilité, et à passer en revue les principaux travaux de recherche qui ont été réalisés sur ce sujet. Une compréhension détaillée des mécanismes de dégradation et des performances à long terme des matériaux composites est cruciale pour leur utilisation efficace et durable dans les infrastructures modernes.

III.2 Les facteurs influençant la durabilité des structures

Ces facteurs peuvent être classés en trois catégories principales : mécanique, physique, et chimique. Chaque catégorie regroupe des mécanismes de détérioration spécifiques qui, combinés, influencent la capacité des structures à maintenir leurs propriétés structurelles et esthétiques dans des conditions d'utilisation réelles.

III.2.1 Facteurs mécaniques

III.2.1.1 Fissures

Les fissures sont des discontinuités soudaines ou des défauts qui apparaissent dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, provoquant une séparation de la matière sur une surface spécifique. Tant que les contraintes persistent, une forte concentration de contrainte demeure à la pointe de la fissure [29].

Dans le cas du béton saturé, les fissures peuvent se propager à travers toute la masse, entraînant une intense microfissuration de la pâte de ciment. Cette dégradation se manifeste par une altération marquée de toutes les surfaces exposées, avec des profondeurs pouvant atteindre plusieurs centimètres. Les gros granulats peuvent se détacher facilement, et le béton sévèrement attaqué perd toute cohésion, s'érodant rapidement et libérant des fragments de pâte ainsi que son squelette granulaire [29]. Les fissures réduisent la résistance à la compression, entraînent une diminution significative de la résistance à la traction et du module d'élasticité du béton. Elles peuvent également compromettre la performance du béton d'enrobage en augmentant sa perméabilité, facilitant ainsi la pénétration des agents externes potentiellement agressifs.



Figure III.1 : Poutre en béton fissuré [29].

III.2.1.2 Retrait

Le retrait dans les matériaux cimentaires comme le béton fait référence à la réduction de volume qui se produit après sa mise en place et durcissement. Ce phénomène est principalement causé par la perte d'eau du matériau, entraînant des contraintes internes qui peuvent se traduire par des fissures, des déformations ou d'autres dommages structurels. Ces contraintes résultent des différents types de retraits, tels que le retrait plastique pendant la phase

plastique du béton avant sa prise, le retrait thermique dû aux variations de température, le retrait chimique par réactions internes spécifiques, et le retrait endogène par des processus internes comme l'hydratation du ciment [29]. Chaque type de retrait présente des caractéristiques distinctes et nécessite une gestion appropriée pour assurer la durabilité et la performance à long terme des structures en béton.



Figure III.2 : Dalle en béton fissurée par retrait [29].

III.2.2 Facteurs physiques

III.2.2.1 Abrasion

L'abrasion est la dégradation mécanique de la surface d'un matériau due au frottement ou au contact répété avec des particules dures ou des objets. Dans les structures en béton, elle peut être causée par le passage de véhicules, de machines ou de piétons. Cette dégradation réduit l'épaisseur de la couche protectrice du béton et expose les couches internes à des agents agressifs. Elle peut également rendre les surfaces rugueuses et affecter l'adhérence des revêtements.



Figure III.3 : Abrasion du béton [29].

III.2.2.2 Érosion

L'érosion est un processus de dégradation physique où la surface d'un matériau est progressivement usée par des agents naturels tels que le vent, l'eau, ou la glace. Dans les structures en béton, l'érosion peut être causée par le ruissellement de l'eau, les vagues, les courants, les cycles de gel-dégel, et le vent chargé de particules abrasives. Entraînent une perte progressive de matière à la surface du béton, ce qui peut exposer les couches internes et les armatures à des agents agressifs



Figure III.4 : Érosion du béton [29]

III.2.2.3 Gel-Dégel

La dégradation du béton due au cycle gel-dégel est un phénomène bien connu. Lorsque la température descend en dessous de 0°C, l'eau non combinée présente dans le béton gèle, entraînant une augmentation de volume d'environ 9 % [30]. Ce processus peut se produire dans les régions montagneuses et dans les parties du béton non protégées par des revêtements étanches. L'utilisation de sels anti-verglas peut également aggraver ces effets.

Les symptômes typiques de cette dégradation incluent l'écaillage et le gonflement du béton. Ces dégradations peuvent compromettre l'intégrité structurelle et réduire la durée de vie des ouvrages en béton. Plusieurs paramètres influencent la dégradation des bétons exposés au cycle gel-dégel, notamment la porosité et le degré de saturation [30].

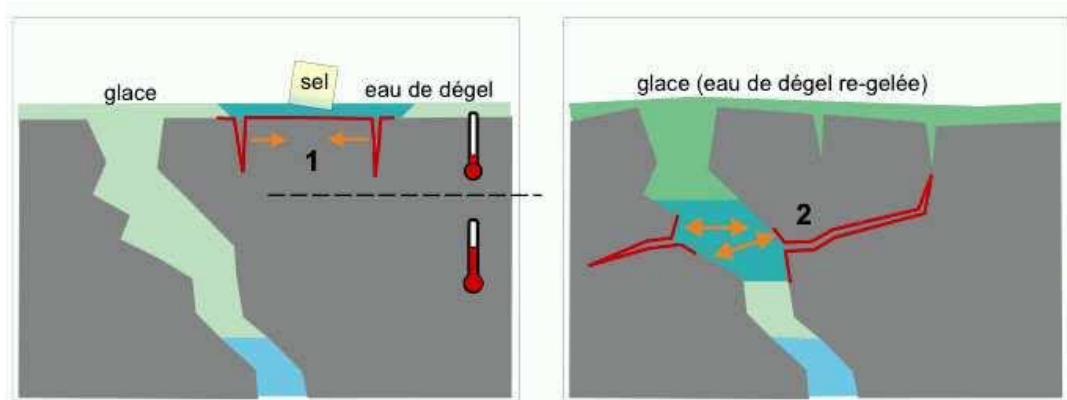


Figure III.5 : Phénomène du Gel-Dégel [30].

III.2.2.4 Haute température

Lorsque le béton est exposé à de fortes températures, il subit une dilatation thermique, générant des contraintes internes qui causent des fissures et des microfissures. L'évaporation de l'eau libre et liée physiquement entraîne un retrait du matériau, augmentant ainsi les risques de fissuration. De plus, la chaleur modifie la composition chimique de la pâte de ciment [31] :

- Jusqu'à 300°C : Évaporation de l'eau libre et liée physiquement.
- De 300 à 550°C : Décomposition de la portlandite (Ca(OH)_2) en CaO et H_2O .
- De 600 à 700°C : Destruction des C-S-H réduisant la résistance du béton.

Les granulats dans le béton subissent également des transformations :

- À 573°C : Éclatement des granulats siliceux.
- De 600 à 800°C : Décohésion entre le liant et les granulats.
- Au-delà de 700°C : Décarbonatation des matériaux calcaires (CaCO_3).

Les armatures métalliques, intégrées dans le béton, perdent leur résistance à des températures élevées :

- Jusqu'à 300°C : Propriétés mécaniques stables.
- De 300 à 550°C : La limite élastique et le module d'Young sont réduits de 50 %.
- À partir de 700°C : Modifications structurelles de l'acier, fusion vers 1450°C.

Ces transformations augmentent la perméabilité du béton, compromettant sa durabilité face aux agents environnementaux agressifs [31]. Une compréhension approfondie de ces mécanismes est cruciale pour la conception et la maintenance des structures en béton exposées à des conditions thermiques extrêmes.



Figure III.6 : Élément structural après exposition au feu [31]

III.2.3 Facteurs chimiques

III.2.3.1 Action des chlorures

Les chlorures sont l'une des principales causes de dégradation du béton, particulièrement en ce qui concerne la corrosion des armatures en acier. Cette dégradation peut compromettre l'intégrité structurelle des ouvrages en béton et réduire leur durée de vie.

Les chlorures peuvent pénétrer dans le béton de deux manières principales : dès sa préparation ou à partir de l'environnement extérieur. Lors de la préparation, les chlorures peuvent être présents dans les composants du béton, tels que l'eau de gâchage ou les agrégats contaminés. Les chlorures peuvent également provenir de certains adjuvants utilisés dans la fabrication du béton. Une fois le béton en place, les chlorures de l'environnement peuvent pénétrer par absorption capillaire ou par diffusion [32].

Pour prévenir cette dégradation, la norme NBN B 15-001 [33], qui complète la norme européenne NBN EN 206-1 [34], fixe des limites strictes sur la teneur en ions chlorure dans le béton. Cette norme limite la teneur en chlorures à 0,4 % de la masse du ciment pour le béton armé ou avec des pièces métalliques noyées, à 0,2 % pour le béton précontraint, et à 1 % pour le béton non armé. De plus, elle interdit l'utilisation d'adjuvants à base de chlorures en présence d'armatures ou de pièces métalliques.

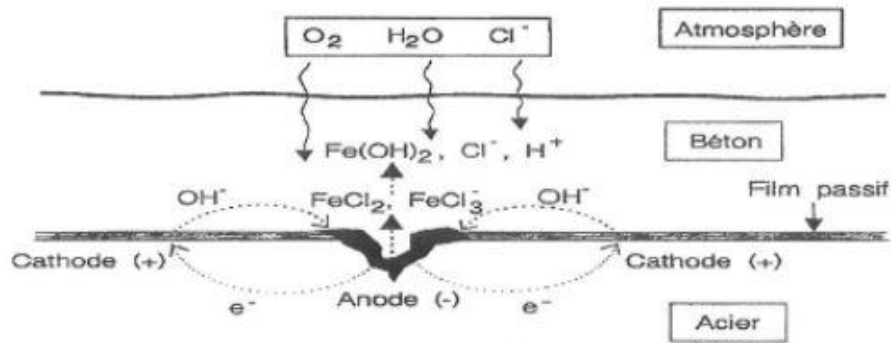


Figure III.7 : Illustration de la corrosion des armatures en présence d'oxygène, d'eau et d'ions chlorure [32].

III.2.3.2 Alkali-Réaction

L'alcali-réaction, également connue sous le nom de réaction alcali-silice (RAS), est un phénomène destructeur affectant les structures en béton. Ce processus débute lorsque des minéraux réactifs présents dans les granulats interagissent avec les alcalins solubles présents dans le ciment, en présence d'eau. Les principaux alcalins impliqués sont le sodium (Na_2O) et le potassium (K_2O), dérivés du ciment lui-même. Lorsque ces conditions sont réunies, une série de réactions chimiques complexes se déclenche, formant un gel expansif à l'intérieur du béton [35].

Ce gel est hygroscopique, ce qui signifie qu'il a la capacité d'absorber l'humidité de l'environnement environnant, entraînant ainsi une expansion volumétrique significative. Cette expansion génère des contraintes internes qui peuvent dépasser la résistance en traction du béton, provoquant des déformations internes, des microfissurations, et potentiellement une fissuration visible en surface. Ces fissures suivent souvent la direction des armatures métalliques intégrées dans le béton, aggravant ainsi les risques de dégradation structurelle [35].

Qu'est-ce qu'un gel hygroscopique ? Un gel hygroscopique est un matériau qui a la capacité d'absorber et de retenir l'humidité de l'air ambiant ou de son environnement immédiat. Ce type de gel présente une propriété hygroscopique prononcée, ce qui lui permet d'attirer activement l'eau et de l'incorporer dans sa structure moléculaire.



Figure III.8 : Effets de l'Alcali-Réaction sur la bordure de route [35]

III.2.3.3 Action des eaux

III.2.3.3.1 Action des eaux pluviales

Les pluies agressives sont caractérisées par un pH proche de 4, rendues corrosives principalement par la formation d'acide sulfurique et d'acide nitrique à partir des oxydes de soufre (SO_2 et SO_3) et d'azote (NO_2 et NO_3) présents dans les environnements industriels. Ces conditions peuvent causer des dommages superficiels par dissolution et des dommages internes, tels que l'expansion des sulfates [36].

III.2.3.3.2 Action de l'eau de mer

L'action de l'eau de mer sur les structures en béton est un phénomène complexe influencé principalement par la teneur en sels, en particulier les chlorures et les sulfates. La mer contient environ 3,5 % de sels dissous en masse, avec des concentrations significatives de sodium (Na^+) et de chlorure (Cl^-), typiquement 11 000 mg/l et 20 000 mg/l respectivement [37].

Les bétons situés en milieu maritime sont exposés à divers types de dégradations :

- **Agressions mécaniques :** causées par les vagues et les marées, incluant l'abrasion due aux chocs des matériaux flottants et l'érosion par les vagues.
- **Agressions chimiques :** dues principalement aux chlorures et aux sulfates présents dans l'eau de mer.
- **Agressions climatiques :** incluant les variations de température et les cycles de gel-dégel.

Les chlorures, en particulier, ont un impact significatif sur la corrosion des armatures en acier dans le béton. La présence de chlorures abaisse le seuil de corrosion des barres d'armature, facilitant ainsi le développement de la rouille. La corrosion des armatures entraîne une expansion volumétrique, créant des contraintes internes qui provoquent la fissuration du béton environnant et la dégradation de la structure [37].

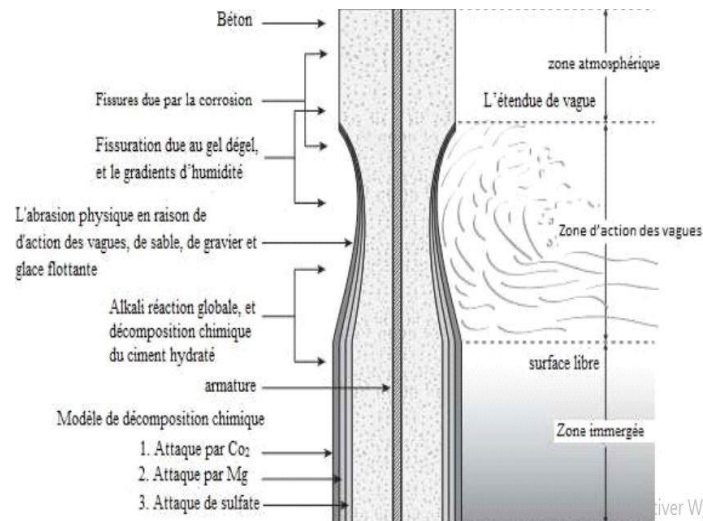


Figure III.9 : Effet marin sur les structures en béton [37].

III.3 Types d'essai de durabilité des TRC

Pour évaluer la durabilité des matériaux composites renforcés de textile (TRC), il est indispensable de réaliser des essais standardisés conformes aux normes établies. Ces tests permettent de déterminer la résistance des TRC sous diverses conditions environnementales rigoureuses. En reproduisant ces conditions, les essais normalisés fournissent des données précises sur le comportement et la longévité des TRC, assurant ainsi que ces matériaux répondent aux exigences de performance nécessaires pour leur utilisation dans des applications structurales critiques.

III.3.1 Durabilité des TRC en milieu marin

Les essais de durabilité des TRC en milieu marin sont effectués selon la norme ASTM D7705 [38], avec certaines adaptations pour répondre aux spécificités des TRC. Les méthodes d'essai ont évolué au fil du temps pour mieux simuler les conditions réelles des environnements marins. Les premiers essais se concentraient sur des expositions simples à l'eau de mer, mais des techniques plus complexes de vieillissement accéléré et des cycles

d'exposition alternés ont été développées pour une évaluation plus précise de la durabilité des matériaux.

Les TRC sont testés pour évaluer leur résistance aux conditions maritimes en simulant l'impact du chlorure de sodium (NaCl) et les variations climatiques typiques des milieux marins. Des éprouvettes sont préparées selon des dimensions standardisées. Pour les essais, la solution saline est préparée en dissolvant 3,5% de chlorure de sodium (NaCl) de haute pureté dans de l'eau distillée ou déionisée [38]. Cette solution est utilisée dans les protocoles suivants :

- **Immersion en solution saline** : les éprouvettes de dimensions spécifiques sont immergées dans une solution saline contenant du NaCl pendant une durée définie par la norme, simulant une exposition continue aux conditions maritimes et reproduisant l'effet corrosif du chlorure de sodium sur les matériaux.
- **Cycles humide-sec** : les éprouvettes sont soumises à des cycles alternés de conditions humides et sèches, chaque cycle comprenant des périodes définies par la norme dans une solution saline contenant du NaCl, suivies de périodes sèches. Cette méthode simule les conditions réelles, telles que les marées hautes et basses.

Après les essais, plusieurs tests sont effectués pour évaluer leur performance : des tests de résistance mesurent la résistance à la compression et à la flexion afin de détecter toute dégradation des propriétés mécaniques ; la perméabilité est évaluée pour vérifier l'impact de l'exposition saline sur l'absorption d'eau ; et un examen visuel des éprouvettes est effectué pour détecter les signes de détérioration ou de dégradation superficielle.

III.3.2 Durabilité des TRC aux cycles gel-dégel

Les essais de durabilité des TRC soumis à des conditions de gel-dégel sont réalisés selon les normes ASTM C666 [39] et NBN EN 12467 [40]. Avant le début des essais, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau pour être complètement saturées. Cette saturation est essentielle pour simuler les conditions réelles auxquelles les matériaux seront exposés.

Conformément à la norme ASTM C666, la procédure d'essai repose sur la préparation d'éprouvettes aux dimensions standardisées. Chaque échantillon est exposé à des cycles répétés de gel et de décongélation. Un cycle typique comprend une période de congélation à $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ suivie d'une décongélation à $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, avec une durée totale de cycle de 4 heures. Les éprouvettes sont soumises à un nombre variable de cycles [39].

De manière similaire, la norme NBN EN 12467 spécifie une procédure où chaque cycle inclut une congélation à $-20^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ et une décongélation à $20^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$, également avec une durée totale de cycle de 4 heures [40]. Les éprouvettes sont soumises à un nombre variable de cycles.

Après les cycles de gel-dégel, les éprouvettes sont évaluées pour déterminer leur performance. Les tests mesurent la résistance à la compression et à la flexion pour identifier toute dégradation des propriétés mécaniques. La perméabilité est examinée pour évaluer l'impact sur l'absorption d'eau, et un examen visuel permet de détecter toute détérioration superficielle.

III.3.3 Durabilité des TRC au cycle chaleur-pluie

Les essais de durabilité des Textiles Renforcés de Ciment (TRC) soumis à des cycles de chaleur-pluie sont réalisés conformément à la norme NBN EN 12467 [40]. Cette norme prescrit une méthode d'évaluation pour simuler les effets des variations thermiques et de l'humidité sur les propriétés des matériaux composites utilisés dans la construction.

Pour procéder à ces essais, les éprouvettes de TRC sont d'abord chauffées à une température de $60 \pm 4^{\circ}\text{C}$ pendant une période de 3 heures [40]. Cette phase de chauffage est conçue pour reproduire l'exposition prolongée à des températures élevées, similaires à celles rencontrées dans des environnements chauds ou lors d'une exposition prolongée au soleil. Ce processus thermique vise à évaluer la stabilité dimensionnelle et la résistance des matériaux à des conditions de chaleur intense.

À la suite de cette phase de chauffage, une pause de 10 minutes est effectuée [40]. Cette pause permet au matériau de stabiliser sa température avant de passer à l'étape suivante. L'éprouvette est ensuite refroidie à température ambiante par un jet d'eau pendant une durée de 3 heures [40]. Cette méthode de refroidissement rapide simule l'impact des conditions climatiques telles que la pluie ou le refroidissement rapide après une période de chaleur, mettant en évidence la capacité des TRC à supporter des variations thermiques rapides sans subir de dégradations significatives.

Les essais sont réalisés sur plusieurs cycles pour représenter des conditions climatiques prolongées. Par exemple, en Algérie, les zones intérieures comme Ghardaïa et Tamanrasset, connaissent des variations climatiques importantes. Ces conditions climatiques variées nécessitent une évaluation approfondie pour garantir que les TRC conservent leur performance dans des environnements soumis à des changements thermiques et hydriques extrêmes.

Après exposition aux cycles de chaleur-pluie, les éprouvettes subissent des tests de résistance pour évaluer leur intégrité structurale, incluant la résistance à la compression et à la flexion. La perméabilité est mesurée pour déterminer l'impact sur l'absorption d'eau, et un examen visuel détecte les détériorations superficielles telles que fissures et décollements.

III.4 Revue des travaux récents sur les propriétés des TRC

III.4.1 Influence des fibres courtes

Bouzeboudja et al [41] ont réalisé une étude approfondie sur l'effet de l'ajout de fibres coupées sur les propriétés mécaniques des TRC. Dans cette recherche, 15 plaques de dimensions $40 \times 10 \times 2$ mm³ et 12 cubes de $5 \times 5 \times 5$ mm³ ont été fabriqués. Les rapports E/L et S/L étaient respectivement de 0,31 et 2,53. Les plaques ont été renforcées avec du textile de verre et des fibres de verre coupées de 6 mm de longueur. Après 28 jours de cure, les échantillons ont été soumis à des essais de flexion quatre points et à des essais de compression à une vitesse de chargement de 0,5 Kn/s. La fraction volumique des fibres coupées a varié entre 0,5 %, 0,75 % et 1 %. Les résultats ont permis d'évaluer la contribution des fibres avant et après fissuration du composite.

| Designation | Glass textile | Chopped fibres % |
|-------------|---------------|------------------|
| RW | - | - |
| WCF | 1 | - |
| CF0.5 | 1 | 0,5 |
| CF0.75 | 1 | 0,75 |
| CF1 | 1 | 1 |

Figure III.10 : Désignation des spécimens [41].

Les tests ont montré que l'inclusion de fibres de verre coupées dans le béton renforcé de textiles améliore significativement la résistance en flexion du composite. L'analyse des courbes charge-déformation a révélé que la présence de ces fibres permet de retarder l'apparition des premières fissures, avec un gain de 89,22 % pour la charge de première fissure de l'échantillon FC1. De plus, l'augmentation de la quantité de fibres coupées, allant de 0,5 % à 1 %, a entraîné une amélioration notable des performances mécaniques. L'échantillon FC1 a enregistré une charge maximale atteignant 1562 N et une résistance à la flexion de 15,62 MPa. En outre, cet échantillon a également affiché un gain de 27,16 % en résistance à la compression par rapport aux éprouvettes de référence. Ces résultats démontrent que l'inclusion de fibres de verre

coupées contribue de manière significative à l'amélioration des propriétés mécaniques du composite.

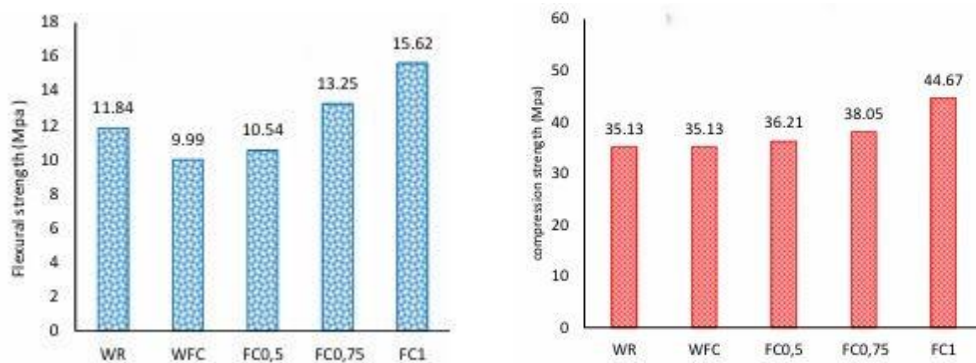


Figure III.11 : Histogrammes des résistances en flexion et en compression à 28 jours [41].

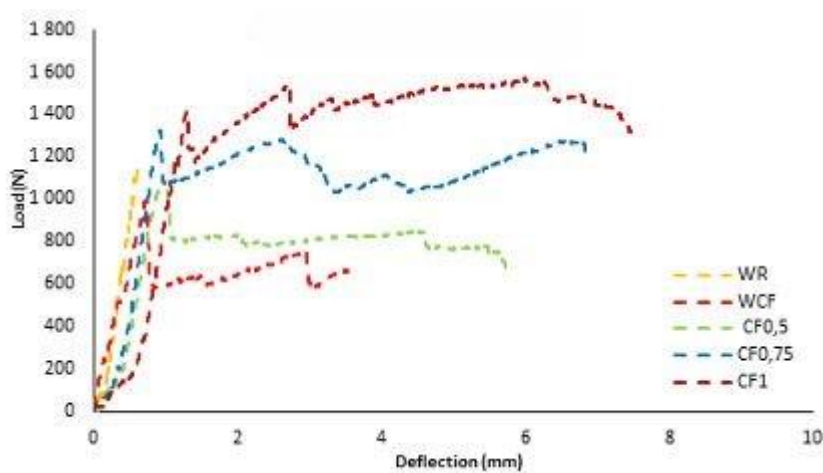


Figure III.12 : Courbes de déformation en flexion sous charge [41].

III.4.2 Influence de la position des renforts textiles

Colombo et al [42] ont réalisé une étude détaillée pour évaluer l'influence des configurations de renfort sur les propriétés mécaniques des composites à base de ciment renforcés de fibres de verre AR. L'objectif de cette recherche était de déterminer comment la disposition des fibres affecte le comportement mécanique des composites.

Les échantillons, mesurant $40 \times 7 \times 0,6 \text{ cm}^3$, étaient constitués d'une matrice en ciment avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0,19. Les propriétés mécaniques moyennes de cette matrice étaient de 13,62 MPa en flexion et de 97,54 MPa en compression. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans un environnement humide avec une humidité relative de 95 % pendant 28 jours pour assurer une cure complète du ciment.

Trois configurations de renforcement ont été examinées :

- F2-1 Fabric : Une seule couche de fibres de verre AR au centre des éprouvettes, les fils parallèles à la longueur.
- F2-2 Fabrics : Deux couches de fibres de verre AR superposées au centre, sans couche de matrice entre elles.
- F2-2 Layers : Deux couches de fibres de verre AR séparées par une couche de 2 mm de matrice.

Les éprouvettes ont été testées en traction pour évaluer leur résistance et ductilité. Les résultats ont montré que la configuration F1-2 Layers offrait les meilleures performances en termes de résistance à la traction et de ductilité. Les éprouvettes avec deux couches de fibres séparées par une couche de matrice ont exhibé une résistance à la traction accrue, atteignant jusqu'à 17,88 MPa pour le tissu F1 et 24,42 MPa pour le tissu F2. Les courbes de contrainte en fonction du déplacement ont révélé une meilleure répartition des fissures et une performance globale supérieure par rapport aux autres configurations.

En revanche, la configuration F1-1 Fabric a présenté une performance moins optimale, avec une absence des phases de multicraquement typiques des composites renforcés de textile. La configuration F1-2 Fabrics a montré une amélioration par rapport à F1-1, avec une distribution plus uniforme des fissures et une résistance accrue. Ces résultats soulignent l'importance de la configuration des couches de renfort pour optimiser les propriétés mécaniques des composites à base de ciment renforcés de fibres de verre.

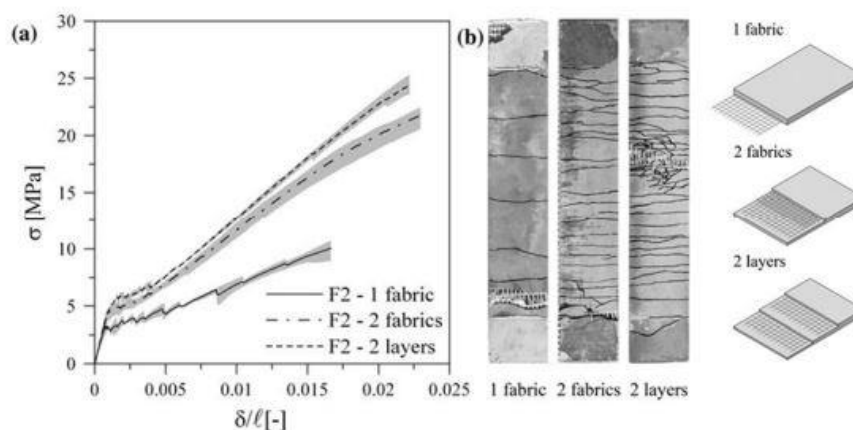


Figure III.13 : Effet du positionnement du renfort sur le comportement du TRC [42].

III.4.2 Influence des conditions de cure

Mobasher et al [43] ont exploré l'influence de deux méthodes de cure sur les propriétés des composites cimentaires renforcés de textiles. Les éprouvettes utilisées avaient des configurations identiques, mais les procédés de cure étaient distincts :

- Méthode de Cure Longue : Les échantillons ont été durcis pendant 25 jours à une température de 23°C avec une humidité relative (HR) de 100 %, puis stockés dans des conditions normales jusqu'à l'essai.
- Méthode de Cure Accélérée : Les éprouvettes ont subi une cure accélérée durant 3 jours à 80°C avec une HR de 90 %, suivie d'un stockage pendant 4 jours dans une pièce à 20 % HR.

Le composite soumis à la cure accélérée présentait une rigidité nettement inférieure à celle du composite durci par la méthode longue. L'auteur explique que cette diminution de la rigidité serait liée à une moins bonne adhérence textile-matrice que celle obtenue dans le cas d'une cure de 28 jours.

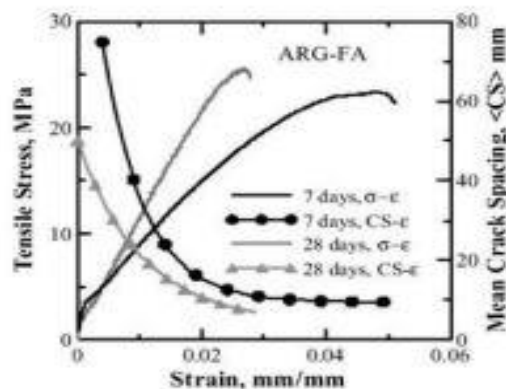


Figure III.14 : conditions de conservation et comportement en traction [43].

Cependant, Colombo et al [42] ont examiné l'impact de trois méthodes de cure sur des éprouvettes de dimensions $40 \times 7 \times 0.6$ cm³, renforcées avec du textile en fibre de verre AR (taux de renfort de 3,07 %) :

- Cure dans l'Eau : Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 28 jours.
- Cure dans l'Air : Les éprouvettes ont été durcies dans l'air pendant 28 jours.
- Cure à Haute Température : Les échantillons ont été conservés à 60°C pendant 6 jours.

Les résultats ont révélé que la cure dans l'eau conduisait à une contrainte au début de fissuration plus faible ainsi qu'à une rigidité réduite en phase post-fissuration. Cela pourrait être attribué à

la pénétration d'eau qui réduit la liaison entre le textile et la matrice. En revanche, les éprouvettes durcies dans l'air présentaient de meilleures performances en termes de début de fissuration et de rigidité post-fissuration, expliquées par un retrait important favorisant une meilleure adhérence entre la matrice et le textile. Les éprouvettes durcies à 60°C pendant 6 jours ont montré des résultats intermédiaires, reflétant un retrait compensable dû à la cuisson et une hydratation lente du laitier.

Concernant le schéma de fissuration, Colombo et al ont observé une meilleure distribution de l'effort dans le composite avec la cure dans l'air et à 60°C par rapport à la cure dans l'eau, ce qui indique une amélioration de l'espacement des fissures.

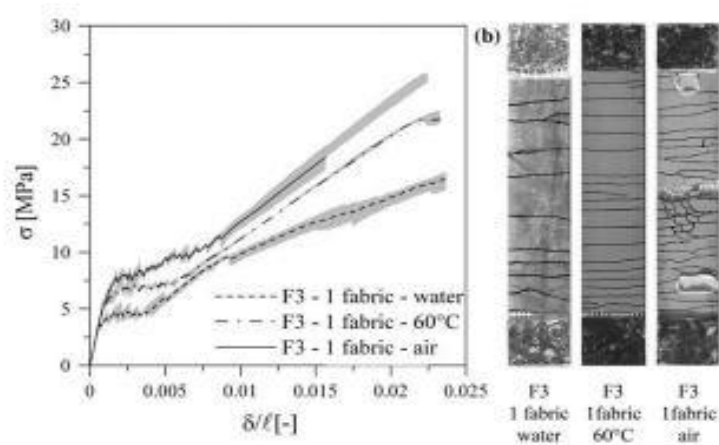


Figure III.15 : Conditions de conservation et comportement en traction du composite [42].

III.5 Revue des travaux antérieurs sur la durabilité des TRC

La durabilité des composites renforcés de textiles (TRC) est un domaine de recherche crucial, avec de nombreux travaux évaluant leur performance dans divers environnements et conditions mécaniques.

Les travaux antérieurs qui seront présentés ci-après sont regroupés dans la revue de Alma'aitah et al [44]. Cette revue rassemble et synthétise les différents travaux effectués sur la durabilité des TRC, offrant ainsi une vue d'ensemble complète des études réalisées. Leur compilation fournit un cadre précieux pour comprendre les résultats obtenus et les tendances dans le domaine, facilitant ainsi l'évaluation des performances des TRC dans diverses conditions.

III.5.1 Travaux antérieurs sur le milieu marin

Donnini [45] a mené une recherche approfondie sur la durabilité des TRC exposés à des conditions environnementales simulant celles des eaux océaniques. Dans cette étude, des éprouvettes d'un mortier hydraulique renforcé de fibres de verre AR recouvertes d'un revêtement en styrène-butadiène ont été soumises à des cycles d'immersion et de dessèchement pour évaluer leur comportement sous des conditions simulées de l'eau de mer.

Les éprouvettes ont été immergées dans une solution saline à 3,5 % de NaCl, puis exposées à un cycle alternant 2 jours d'immersion et 2 jours de séchage, répété pendant 10 cycles. La solution saline était maintenue à une température constante de 60°C pour reproduire les conditions sévères des environnements marins. Ce protocole a également été appliqué aux fibres de verre isolées pour évaluer les effets de ces conditions sur leur performance individuelle.

Les essais ont inclus des tests de compression et de flexion sur les éprouvettes pour mesurer la résistance du matériau après exposition. Les dimensions des éprouvettes étaient de 16x4x4 cm³, et les résultats ont été comparés aux propriétés initiales des échantillons non exposés. Les résultats montrent une diminution significative des propriétés mécaniques du matériau [45]. Après exposition, la résistance à la compression des éprouvettes a diminué de 22 %, tandis que la résistance à la flexion a montré une réduction de 35 %.

| Specimen | | Compressive strength | Flexural strength | Elastic modulus |
|-------------|---------|----------------------|----------------------|-----------------|
| | | $\sigma_{c,m}$ (MPa) | $\sigma_{f,m}$ (MPa) | E_m (GPa) |
| Mortar Ref | Average | 7.12 | 2.93 | 8.5 |
| | CoV (%) | 4.5 | 5.9 | 2.9 |
| Mortar S 60 | Average | 7.66 | 2.68 | 8.7 |
| | CoV (%) | 8.6 | 6.9 | 3.2 |
| Mortar SC | Average | 6.74 | 2.65 | 8.1 |
| | CoV (%) | 8.8 | 8.5 | 2.9 |
| Mortar W 60 | Average | 7.53 | 3.01 | 8.5 |
| | CoV (%) | 9.1 | 8.8 | 3.5 |

Figure III.16 : Propriétés mécaniques de la matrice hydraulique avant et après exposition environnementale [45].

Les fibres de verre AR, également soumises à ces cycles, ont enregistré une diminution de 36 % de leur résistance à la traction. Cette réduction indique une dégradation notable de la performance des fibres sous les conditions d'exposition simulées.

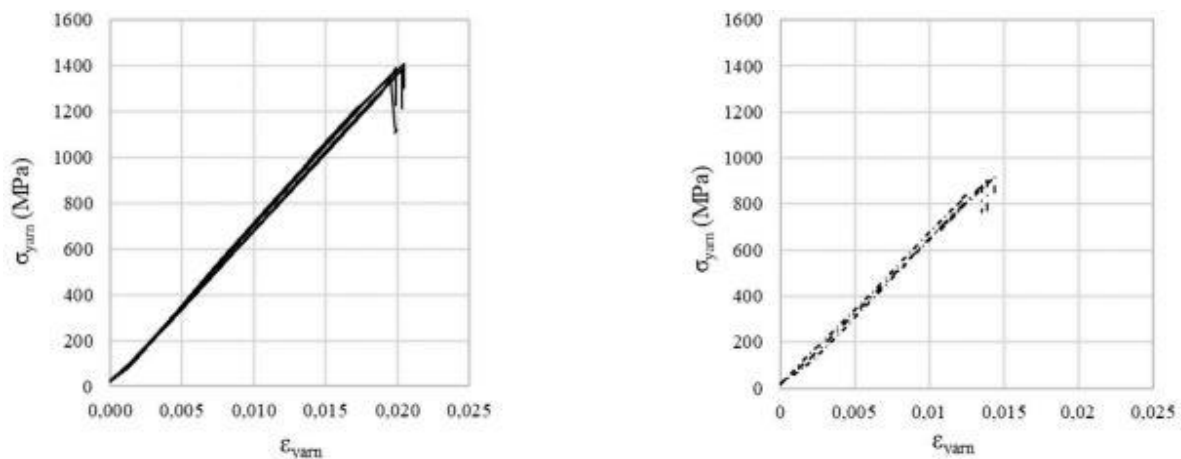


Figure III.17 : Courbes contrainte-déformation des essais de traction sur les fils de verre après expositions [45].

L'étude met en lumière l'impact potentiel des conditions océaniques sur la durabilité des TRC et souligne la nécessité de considérer ces effets lors de la conception et de l'évaluation des matériaux de construction utilisés dans des environnements marins. De plus, les fibres de verre AR ont également été soumises aux mêmes cycles, et des analyses ont révélé que les fibres pouvaient présenter des signes de détérioration ou de défaillance progressive sous les conditions d'exposition, influençant ainsi l'intégrité globale du composite [45]. L'étude a utilisé des techniques de microscopie électronique à balayage (MEB) pour examiner les dommages au niveau des fibres et de la matrice, fournissant des informations cruciales sur les mécanismes de défaillance induits par l'exposition à l'environnement océanique simulé.

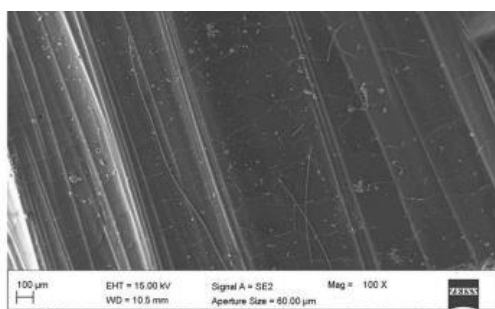


Figure III.19 : Images MEB de la section des fils de verre avant exposition [45].

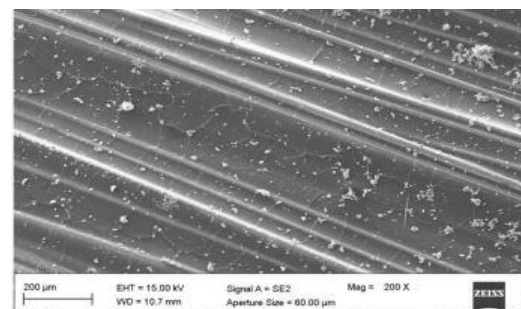


Figure III.19 : Images MEB de la section des fils de verre après exposition [45].

III.5.2 Travaux antérieurs sur les attaques acides

Machovec et Reiterman [46] ont examiné l'impact d'une solution acide à 10 % H_2SO_4 sur la durabilité des composites cimentaires renforcés de textile (TRC). Les échantillons, comprenant une matrice cimentaire à base de BHP et des fibres de verre recouvertes d'un

revêtement en styrène-butadiène, ont été testés pour la compression, la flexion et la traction après une immersion de 60 jours dans la solution acide.

Les résultats ont révélé une détérioration significative des propriétés mécaniques des TRC. Les tests de compression et de flexion ont montré une réduction notable de la résistance des échantillons exposés à l'acide [46]. Les cubes de 10x10x10 cm³, utilisés pour les tests de compression, et les prismes de 16x4x4 cm³, utilisés pour les tests de flexion, ont tous deux subi une diminution de performance en raison de l'exposition prolongée à l'acide.

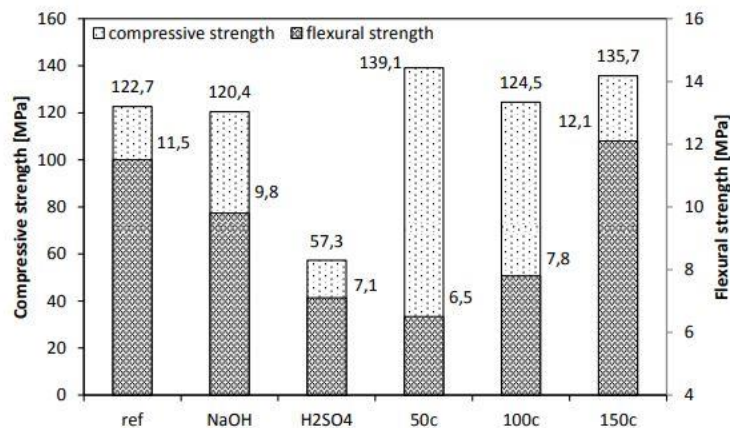


Figure III.20 : Résultats compression flexion de la matrice utilisée [46].

En ce qui concerne les tests de traction réalisés avec des éprouvettes en forme de "dog-bone", les résultats ont montré une dégradation significative de la résistance à la traction. Les échantillons immergés dans la solution acide ont présenté une perte importante de résistance, ce qui témoigne de la fragilisation des fibres et de la matrice cimentaire sous l'effet de l'environnement agressif [46].

| | Environment | | Freeze-thaw cycles | | |
|------------|-------------|----------|--------------------|------|------|
| | acidic | alkaline | 50 | 100 | 150 |
| Without TR | 63.9 | 86.9 | 63.9 | 48.2 | 51.0 |
| 1 × 131 | 74.7 | 79.4 | 85.6 | 54.4 | 49.6 |
| 1 × 275 | 90.6 | 67.7 | 67.0 | 47.9 | 52.1 |
| 1 × 585 | 101.3 | 99.5 | 79.1 | 58.4 | 60.7 |
| 2 × 131 | 91.9 | 84.5 | 78.7 | 48.9 | 51.5 |
| 2 × 275 | 56.8 | 76.7 | 60.7 | 39.2 | 38.3 |
| 2 × 585 | 72.7 | 75.8 | 58.4 | 41.5 | 41.5 |

Figure III.21 : Diminution de la résistance à la traction due à l'action des environnements étudiés [46].

L'analyse du pH de la solution acide a montré une neutralisation significative pendant l'immersion des échantillons, avec une variation du pH initial de 0,2 à 3,4 après 60 jours. Cette augmentation du pH est le reflet de la réaction chimique entre l'acide et les composants du TRC, entraînant une perte de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et une décomposition des phases hydratées. Cette réaction a contribué à la perte de résistance observée dans les tests de compression, de flexion et de traction.

III.5.3 Travaux antérieurs sur les cycles chaleur-pluie

De Munck et al [47] ont étudié l'impact des cycles chaleur-pluie (RH) sur la durabilité des TRC. Leur recherche s'est concentrée sur les effets dégradants de ces cycles sur les propriétés mécaniques et la structure interne des TRC. Les spécimens, de dimensions 47,5x5x1 cm, étaient découpés à l'aide d'une scie diamantée refroidie à l'eau dans des plaques rectangulaires de 50x50x10 cm. Chaque éprouvette comportait une épaisseur de 3 mm de matrice cimentaire entre les fibres, avec deux fibres par éprouvette. Les spécimens ont été soumis à 50 cycles chaleur-pluie afin d'évaluer les effets de ce type de chargement environnemental. Les tests ont été effectués en traction pour mesurer les performances des TRC.

Les résultats ont montré que les cycles chaleur-pluie (RH) réduisent la résistance à la première fissuration (σ_{crack}) de 30 % par rapport aux spécimens de référence. La résistance ultime (σ_{ultimate}) a également été affectée, avec une réduction de 42 % [47]. Cette diminution notable est attribuée à des modifications dans l'interface matrice-fibre, causées par les conditions environnementales sévères.

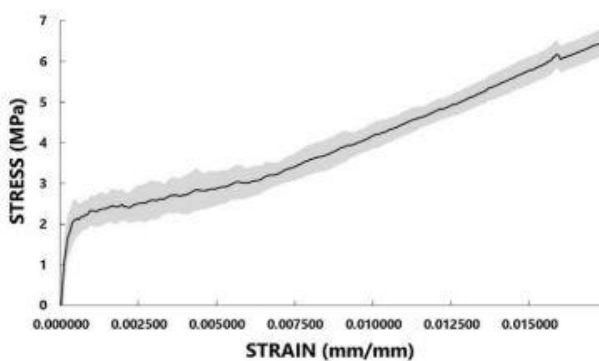


Figure III.23 : courbe contrainte-déformation moyenne de référence [47].

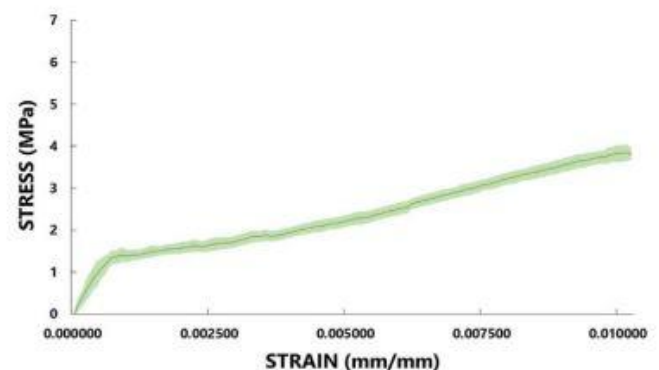


Figure III.22 : courbe contrainte-déformation moyenne [47].

L'interface entre la matrice cimentaire et les fibres de renforcement a révélé des changements significatifs sous l'effet des cycles chaleur-pluie. Ces cycles ont entraîné une pénétration accrue de la matrice dans le faisceau de fibres, avec une densification du matériau de la matrice à proximité des fibres. Les spécimens chauffés jusqu'à 60 °C ont subi une hydratation supplémentaire des particules de ciment, aboutissant à la formation de précipités à l'interface matrice-fibre et dans les vides entre les filaments des fils multi-filaments. Ces précipitations ont engendré des entailles sur les fibres, entravant la sortie télescopique des filaments et fragilisant ainsi le composite cimentaire.



Figure III.25 : image MEB matrice-fibre avant vieillissement [47].

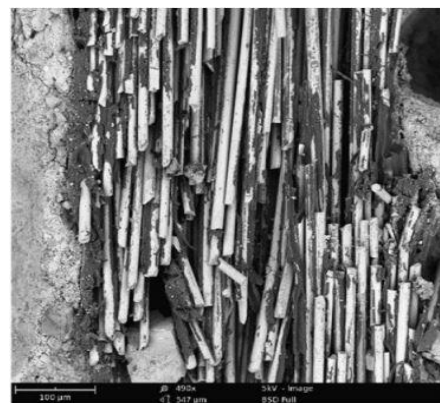


Figure III.24 : image MEB matrice-fibre après vieillissement [47].

Il a été observé que les cycles chaleur-pluie détériorent davantage le comportement structurel des TRC que les cycles gel-dégel. Cette constatation souligne l'importance de prendre en compte les conditions environnementales spécifiques lors de la conception et de l'évaluation des structures TRC. De Munck et al suggèrent que l'utilisation de fibres enduites pourrait atténuer ces effets dégradants. Un revêtement sur les fibres empêcherait la pénétration des particules de ciment entre les filaments, réduisant ainsi la dégradation physique et améliorant la durabilité des TRC soumis aux cycles chaleur-pluie.

III.6 Conclusion

L'étude approfondie de la durabilité des TRC révèle des performances variées selon les conditions environnementales auxquelles ces matériaux sont exposés. Cette évaluation est essentielle pour garantir que les TRC peuvent répondre aux exigences des applications structurelles dans des environnements sévères.

Les TRC à base de fibres de verre ont prouvé leur solidité face aux cycles de gel-dégel, comme le montrent les essais réalisés par Colombo et al. Ces matériaux conservent une bonne intégrité structurale malgré les variations climatiques importantes, ce qui est essentiel pour les applications dans des environnements sujets à des fluctuations de température. Cependant, la performance des TRC en conditions acides et à haute température est moins satisfaisante. Les attaques acides, telles que démontrées par Machovec et Reiterman, ont entraîné une dégradation importante des propriétés des TRC, tandis que les tests à haute température ont révélé une perte de résistance allant jusqu'à 85 %, comme indiqué par Kapsalis, soulignant les limites de la résistance thermique des TRC.

Les essais de chaleur-pluie, réalisés par De Munck et conformes à la norme NBN EN 12467, ont montré une diminution de 42 % de la résistance ultime initiale des TRC. Cette réduction significative indique que les cycles alternants de chaleur et d'humidité ont un impact important sur les propriétés mécaniques des TRC, suggérant une vulnérabilité accrue dans des environnements où ces conditions sont fréquentes.

Dans les environnements marins, les tests réalisés par Donnini, conformes à la norme ASTM D7705, ont révélé une diminution de 22 % de la résistance à la compression et de 35 % à la flexion des TRC après une exposition prolongée à l'eau salée. Bien que les TRC puissent résister à l'exposition prolongée à l'eau salée, leur performance est considérablement réduite, ce qui souligne la nécessité d'améliorations pour optimiser leur durabilité en milieu marin.

Bien que les TRC offrent une solution prometteuse pour diverses applications structurales, les résultats des tests montrent des limites importantes sous certaines conditions environnementales. Les performances globales des TRC sont globalement positives, mais il est crucial de prendre en compte les défis spécifiques rencontrés dans des environnements extrêmes. Des recherches futures devraient se concentrer sur le développement de formulations innovantes et de méthodes de protection adaptées aux différentes conditions environnementales.

CHAPITRE IV :
Matériaux et procédure expérimentale

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents matériaux utilisés pour la confection des spécimens étudiés, puis nous détaillons les démarches techniques mises en œuvre pour obtenir des résultats fiables et représentatifs. ; ainsi que les outils et procédures utilisés pour réaliser les essais expérimentaux réalisés au sein du laboratoire de Génie Civil de la faculté du Génie de la Construction à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi – Ouzou.

IV.2 Objectif du travail

L'objectif principal du présent travail est la valorisation de deux types de sable de dune disponibles en quantités inépuisables dans le sud de notre pays, en les utilisant comme alternatives au sable de rivière surexploité dans un mortier armé de textile (TRM ou TRC). Les types de sable utilisés sont le sable de dune de Touggourt, le sable de dune de Bou Saâda et comme référence le sable de rivière. Le renfort utilisé est la grille de fibres de verre alkali résistant, ainsi que les fibres courtes de polypropylène

Le but est de comparer les propriétés des mortiers fabriqués avec ces trois types de sable afin d'identifier d'éventuelles différences de comportement, l'incorporation de fibres courtes dans la matrice de mortier sera examinée, avec des pourcentages de 1,5% et 2% du volume total. Cela vise à déterminer l'impact de l'ajout de ces fibres sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des TRC.

L'étude se divise en deux grandes parties, la première partie consiste à l'étude des caractéristiques mécaniques, dans les conditions ordinaires, le second est l'étude de la durabilité des variantes confectionnées. L'étude des caractéristiques mécaniques dans les conditions normales est constituée de la mesure de la vitesse des ondes ultrasonores à travers les spécimens confectionnés, la résistance à la compression à l'Age de 7 jours, 14 jours et 28 jours ; ainsi que le comportement en flexion quatre points du TRC pour les différentes compositions. La seconde partie consiste à l'étude de la durabilité en soumettant nos éprouvettes à des cycles HR (Heat-Rain).

En combinant ces différents aspects, ce travail cherche à optimiser la formulation des TRC en termes composition de la matrice, en modifiant le type de sable afin de valoriser le sable de dune. Dans le but d'obtenir des matériaux de construction performants et durables.

IV.3 Matériaux utilisés

Les échantillons d'essai dans notre étude ont été préparés en utilisant des mortiers composés de trois types de sable, de renfort en grille de fibres de verre, ainsi que de fibres courtes en polypropylène.

IV.3.1 Le renfort

IV.3.1.1 Textile en fibre de verre

Les fibres de verre sont fabriquées à partir de silice et d'autres oxydes métalliques fondus et étirés en fines fibres. Elles offrent une combinaison intéressante de propriétés telles qu'une grande résistance mécanique, une bonne rigidité, une faible densité et une bonne résistance aux agents chimiques et aux températures élevées. Ces caractéristiques font des fibres de verre un matériau de choix pour de nombreuses applications dans la construction et l'industrie. Elles sont notamment utilisées pour renforcer les plastiques, les bétons et les céramiques, mais aussi pour fabriquer des textiles techniques comme les rideaux coupe-feu, les voiles de bateau ou les revêtements de façade.

IV.3.1.1.1 Différents types de fibre de verre

Il existe différents types de fibres de verre, chacun ayant des caractéristiques spécifiques pour diverses applications industrielles et techniques. Les variations proviennent de la composition chimique et des processus de fabrication, qui influencent les propriétés mécaniques, électriques et chimiques ainsi que la qualité et la performance des fibres [20].

- E-Glass (Electrical Glass) : Fibre de verre courante avec un bon rapport coût/performance, utilisée pour l'isolation électrique, les applications électroniques et les matériaux composites.
- C-Glass (Chemical Glass) : Formulé pour une excellente résistance chimique, il est adapté aux environnements corrosifs comme ceux des industries chimiques et marines.
- D-Glass (Dielectric Glass) : Se distingue par sa faible constante diélectrique, ce qui signifie une faible capacité à stocker de l'énergie électrique. Cette caractéristique est cruciale pour certaines applications électroniques.
- R-Glass (Résistant Glass) : Offre une haute résistance mécanique et chimique, souvent utilisé dans des applications industrielles nécessitant une grande durabilité, telles que les éoliennes.

- AR-Glass (Alkali-Resistant Glass) : Conçu pour résister aux environnements alcalins grâce à l'ajout d'oxydes de zirconium, il est principalement utilisé pour renforcer les bétons, améliorant la durabilité et la résistance des structures en conditions alcalines.

Dans notre étude, nous avons utilisé comme matériau de renfort, une grille en fibres de verre de type AR (alcalis résistant) avec des mailles de 5x5mm, spécifiquement conçu pour résister aux environnements alcalins, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications de renforcement des mortiers et des bétons.

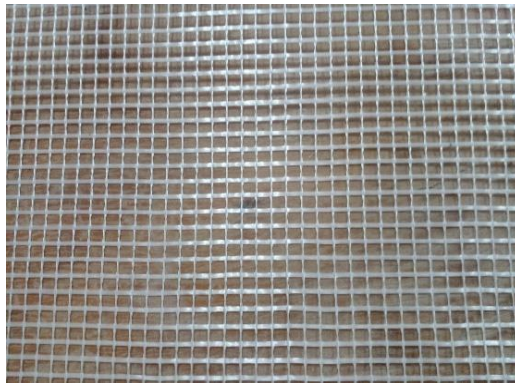


Figure IV.1 : Grille en fibres de verre.

Les grilles ont été découpés sous forme de rectangulaire, avec des dimensions de 10x40 cm, et ensuite recouverte d'une couche de résine (GRANITEX) appliquée à l'aide d'un pinceau et laissées sécher pendant 24 heures.

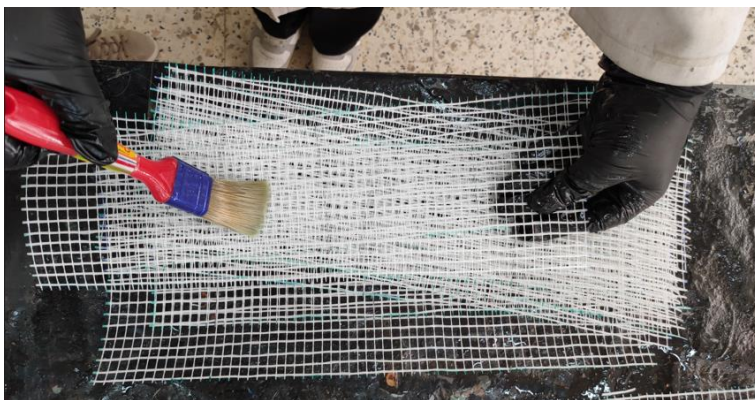


Figure IV.2 : Application de résine sur les grilles.



Figure IV.3 : Résine GRANITEX.

IV.3.1.1.2 Caractéristiques de la fibre de verre

La fibre de verre offre une résistance élevée par rapport à son poids, améliorant la performance structurelle sans augmentation significative de la masse. Non corrosive et résistante à de nombreux produits chimiques, elle est durable et adaptée à divers environnements industriels. De plus, son faible coefficient de dilatation thermique minimise les risques de fissuration et de déformation sous les variations de température.

Tableau IV.1 : Quelques caractéristiques des fibres de verre.

| Caractéristiques | Description |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Couleur | Blanche |
| Longueur du rouleau | 50 m |
| Largeur du rouleau | 0.15, 0.20, 0.25, 1m |
| Température de stockage | 5 à 35°C |
| Densité des fibres sèches | 225 g/m ² |
| Résistance à la traction | 2 000 à 3 500 MPa |
| Module de Young (rigidité) | 70 à 80 GPa. |
| Densité | 2,5 g/cm ³ . |
| Allongement à la rupture | 2 à 5 %. |
| Coefficient de dilatation thermique | 65 °C ⁻¹ |

IV.3.1.2.3 Applications

- L'élaboration de géométries complexes, comme les toits arrondis, pour assurer leur stabilité et durabilité.
- Les infrastructures marines exposées à des environnements corrosifs.
- Amélioration de la durabilité des ponts pour résister aux charges dynamiques.
- Le renforcement des poutres en béton pour contrôler la fissuration.
- Le renforcement des revêtements de sols industriels soumis à de fortes charges.
- Le renforcement des structures en béton armé exposées à des vibrations ou à des charges dynamiques.

IV.3.1.2 Les fibres courtes de polypropylène

Les fibres courtes de polypropylène (PP), sont des fibres synthétiques utilisées pour renforcer les matériaux comme les bétons et les mortiers. Elles réduisent la formation de fissures de retrait plastique sur le béton, augmentent la résistance aux chocs et prolongent la durée de vie du matériau. De plus, ils améliorent l'élasticité et la cohésion des mortiers et des chapes lors de la mise en place, selon la norme EN 14889-2. Elles peuvent être réparties dans la matrice de manière aléatoire ou avec une orientation préférentielle.



Figure IV.4 : Fibres de Polypropylènes.

IV.3.1.2.1 Différents types de fibres de polypropylène

- Fibres de polypropylène discontinues(courtes) : Ces fibres sont coupées en longueurs spécifiques et mélangées dans le béton pour réduire la fissuration due au retrait plastique et pour améliorer sa résistance à la flexion.
- Fibres de polypropylène haute ténacité : Ces fibres offrent une résistance et une durabilité accrues, ce qui les rend idéales pour des applications structurelles où des performances élevées sont requises. Elles sont souvent utilisées dans les bétons renforcés pour des structures exposées à des conditions sévères, telles que les chaussées, les ponts, et les sols industriels [6].

IV.3.1.2.2 Caractéristiques de la fibre de verre

Tableau IV.2 : Caractéristiques physiques et mécaniques de fibre polypropylène [6].

| Caractéristiques | Description |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Couleur | Blanc |
| Longueur | 6 ($\pm 10\%$) mm |
| Diamètre | 25 ($\pm 10\%$) μm |
| Densité | 0.91 g/cm ³ |
| Point de fusion | 160-170°C |
| Module d'élasticité | 1.6 GPa |
| Résistance à la traction | 400 ($\pm 10\%$) N/mm ² |
| Nombre de fibres par kg | 120 $\times 10^6$ |

IV.3.1.2.3 Applications

Les fibres de polypropylène sont couramment utilisées dans :

- Le béton projeté pour le revêtement de tunnels et de mines.
- Les dalles de béton pour les planchers industriels.
- Les mortiers pour les façades et les éléments architecturaux.
- Les chaussées et les infrastructures routières.
- Les structures marines et les ouvrages exposés à des environnements agressifs.

Dans le cadre de ce travail nous nous sommes intéressés à l'effet de l'incorporation de fibres de polypropylène de 6mm de longueur, à des taux de 1,5 et 2 %, dans les mortiers aux trois types de sable.

IV.3.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique sous forme de poudre fine qui, en contact avec l'eau, réagit par hydratation pour former une pâte durcissante. Il est largement utilisé dans divers domaines de la construction, y compris pour les grands ouvrages d'infrastructure, le béton armé ou non armé, le béton projeté, les applications d'étanchéité, ainsi que dans les préfabriques industrielles.

Dans le cadre du présent travail, nous avons utilisé un ciment Portland au calcaire de type CEM II/A-L 42.5R, Ciment portland aux ajouts recommandés pour bétons à performances élevées avec une prise Rapide, destiné à la réalisation des infrastructures, construction dans le bâtiment, le génie civil, ainsi que pour le domaine de préfabrication.



Figure IV.5 : Le ciment CEM II/A 42.5R

Les caractéristiques du ciment utilisé sont présentées dans les tableaux suivants [49] :

➤ **Caractéristiques physiques du ciment**

Tableau IV.3 : Caractéristiques physiques du ciment.

| Propriétés physiques | Valeur |
|-------------------------|-----------|
| Consistance normale (%) | 25.4 - 26 |
| Expansion à chaud (mm) | < 1 mm |

➤ **Propriété mécanique**

Tableau IV.4 : Résistance du ciment.

| Résistances à la compression | Valeur |
|------------------------------|---------|
| 2 jours (MPa) | 23 - 26 |
| 28 jours (MPa) | 45 - 50 |

➤ **Caractéristiques chimiques du ciment**

Tableau IV.5 : Caractéristiques chimiques du ciment.

| Analyses chimiques (%) | Valeur |
|------------------------------------|-----------|
| Perte au feu | 6 - 8 |
| Teneur en sulfates SO ₃ | 2.5 - 2.9 |
| Teneur en Oxyde de Magnésium | < 3.5 |
| Teneur en Chlorures Cl | < 0.08 |
| Résidu insoluble | NA |

➤ **Composition du clinker****Tableau IV.6 :** Composition du Clinker.

| Composition potentielle du clinker (selon bogue) (%) | Valeur |
|---|---------------|
| C3S | 60 – 65 |
| C3A | 6 – 10 |

Tableau IV.7 : Valeurs du temps de prise en minute.

| Temps de prise (min) | Valeur |
|-----------------------------|---------------|
| Début de prise | 150 min |
| Fin de prise | 260 min |

IV.3.2 Le sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le béton et mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments chimiques nocifs.

Dans ce travail on s'intéresse à l'exploitation des matériaux locaux dans la construction au lieu d'utiliser des matériaux qui exigent un approvisionnement très coûteux, et comme le sud algérien est très riche en sable de dunes, nous avons envisagé de remplacer le sable de rivière par ce dernier pour la fabrication de nos mortiers. Dans cette étude, nous avons utilisé trois types de sables ayant le même diamètre maximal. Le premier est un sable local de rivière (SR) de classe 0/1.25 et roulé. Le second est un sable siliceux de dune de la région de Touggourt (SDT) de classe 0/1.25. Le troisième est un sable fin de dune de la région de Bou Saâda (SDB) également de classe 0/1.25. Avant utilisation, ces sables ont été lavés afin de réduire les impuretés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24heurs puis tamisé.



Figure IV.6 : Sable de rivière tamisé après avoir été lavé et séché à l'étuve au niveau du laboratoire béton-UMMTO.



Figure IV.7 : Sable de dune tamisé après avoir été lavé et séché à l'étuve.

IV.3.3 L'eau de gâchage

Lors du gâchage de nos mortiers, nous avons utilisé l'eau de robinet, qui est une eau potable du réseau de la ville de Tizi-Ouzou. Aucune analyse chimique n'a été réalisée sur cette eau. Nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

IV.3.4 Les additions minérales

Nous avons exclusivement utilisé le laitier de haut fourneau comme addition minérale. Le laitier de haut fourneau est un sous-produit obtenu lors de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Lors du processus de fusion du minerai de fer, des impuretés sont éliminées sous forme de laitier. Ce matériau est composé principalement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases. Une fois refroidi rapidement, le laitier peut être granulé, broyé en

une poudre fine, et utilisé comme ajout cimentaire dans le béton et le mortier. Cela améliore les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux de construction.



Figure IV.8 : Laitier haut fourneau fournit par la société GRANITEX.

IV.3.5 Les adjuvants

Nous avons utilisé un super plastifiant, haut réducteur d'eau appelé « MEDAFLOW30 » fourni par la société GRANITEX. Sa densité absolue est de 1.07 et sa concentration en particule solide est de 30 %. Inférieur ou égale à 5 % en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés.

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération, conçu à base de poly carboxylates d'éther. Grâce à cette formulation innovante, il permet d'améliorer considérablement les propriétés des bétons et mortiers, permettant d'obtenir des produits de très haute qualité. Son action principale est de fluidifier les mélanges tout en impliquant significativement la quantité d'eau de gâchage. Cette forte réduction d'eau, sans impact sur la maniabilité, permet d'augmenter les résistances mécaniques du béton, à la fois au jeune âge et à long terme. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur sur la prise du béton.



Figure IV.9 : Superplastifiant MEDAFLOW 30/30 (GRANITEX).

Les caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Caractéristiques du MEDAFLOW 30.

| Nature | Couleur | Densité | Teneur en chlore | Extrait sec | PH |
|---------|----------|---------|------------------|-------------|-----|
| Liquide | Jaunâtre | 1,07 | < 0,1g/L | 20% | 6,2 |

IV.4 Caractérisation des sables utilisés

La caractérisation des matériaux de construction, comme la matrice cimentaire, nécessite une compréhension approfondie de la nature de leurs composants. De plus, pour établir des dosages optimaux et illustrer certaines interprétations.

IV.4.1. Analyse granulométrique [EN 933-1, EN 933-2]

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution pondérale des particules d'un matériau selon leurs dimensions, et elle s'effectue par tamisage conformément aux normes EN933-1 et EN933-2.

Avant de commencer l'essai, il est nécessaire de sécher l'échantillon dans une étuve à une température maximale de 105 °C. L'essai consiste à classer les grains de l'échantillon à l'aide d'une série de tamis emboîtés, dont les mailles diminuent de haut en bas. La séparation des grains est réalisée par vibration de la colonne de tamis, et l'opération se termine lorsque la quantité de refus varie de moins de 1 %. La courbe granulométrique obtenue fournit des informations précieuses, telles que les limites d (petit diamètre) et D (grand diamètre) des

granulats, la proportion d'éléments fins, ainsi que la continuité ou la discontinuité de la granularité.

Une courbe granulométrique plus continue et régulière indique une meilleure compacité du squelette du béton ou du mortier. De plus, elle permet d'anticiper d'éventuels problèmes lors de la formulation du mortier, garantissant ainsi une meilleure fluidité sans risque de ségrégation. La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs.



Figure IV.10 : La machine à tamiser.

Les résultats de l'essai pour les différents sables utilisés sont présentés ci-après, avec les courbes des sables suivants : sable de rivière (SR), sable de dune de Touggourt (SDT) et sable de dune de Bou Saâda (SDB).

➤ **Sable de rivière****Tableau IV.9** : Analyse granulométrique par tamisage du sable de rivière (SR).

| Sable de Rivière | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Masse sèche totale : M1= 1230g | | | |
| Ouverture des tamis [mm] | Masse des refus cumulés [g] | Pourcentage refus cumulés [%] | Pourcentage tamisats cumulés [%] |
| 1,25 | 0 | 0 | 100 |
| 0,8 | 205 | 16,667 | 83,333 |
| 0,63 | 350 | 28,455 | 71,545 |
| 0,5 | 45 | 36,585 | 63,415 |
| 0,315 | 715 | 58,130 | 41,870 |
| 0,2 | 980 | 79,675 | 20,325 |
| 0,16 | 1075 | 87,398 | 12,602 |
| 0,125 | 1155 | 93,902 | 6,098 |
| 0,08 | 1215 | 98,780 | 1,220 |
| Fond de tamis | 1225 | 99,593 | 0,407 |

➤ **Sable de dune de Touggourt****Tableau IV.10** : Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune Touggourt (SDT).

| Sable de Touggourt | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Masse sèche totale : M1= 1230g | | | |
| Ouverture des tamis [mm] | Masse des refus cumulés [g] | Pourcentage refus cumulés [%] | Pourcentage tamisats cumulés [%] |
| 1,25 | 0 | 0 | 100 |
| 0,8 | 110 | 8,943 | 91,057 |
| 0,63 | 255 | 20,732 | 79,268 |
| 0,5 | 330 | 26,829 | 73,171 |
| 0,315 | 740 | 60,163 | 39,837 |
| 0,2 | 1120 | 91,057 | 8,943 |
| 0,16 | 1180 | 95,935 | 4,065 |
| 0,125 | 1205 | 97,967 | 2,033 |
| 0,08 | 1220 | 99,187 | 0,813 |
| Fond de tamis | 1225 | 99,593 | 0,407 |

➤ **Sable de dune de Bou Saâda**

Tableau IV.11 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune Bou Saâda (SDB).

| Sable de Bou Saâda | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Masse sèche totale : M1= 1230g | | | |
| Ouverture des tamis [mm] | Masse des refus cumulés [g] | Pourcentage refus cumulés [%] | Pourcentage tamisats cumulés [%] |
| 1,25 | 0 | 0 | 100 |
| 0,8 | 0 | 0 | 100 |
| 0,63 | 5 | 0,407 | 99,593 |
| 0,5 | 5 | 0,407 | 99,593 |
| 0,315 | 10 | 0,813 | 99,187 |
| 0,2 | 240 | 19,512 | 80,488 |
| 0,16 | 855 | 69,512 | 30,488 |
| 0,125 | 1170 | 95,122 | 4,878 |
| 0,08 | 1230 | 100 | 0 |
| Fond de tamis | 1230 | 100 | 0 |

➤ **Courbes granulométriques**

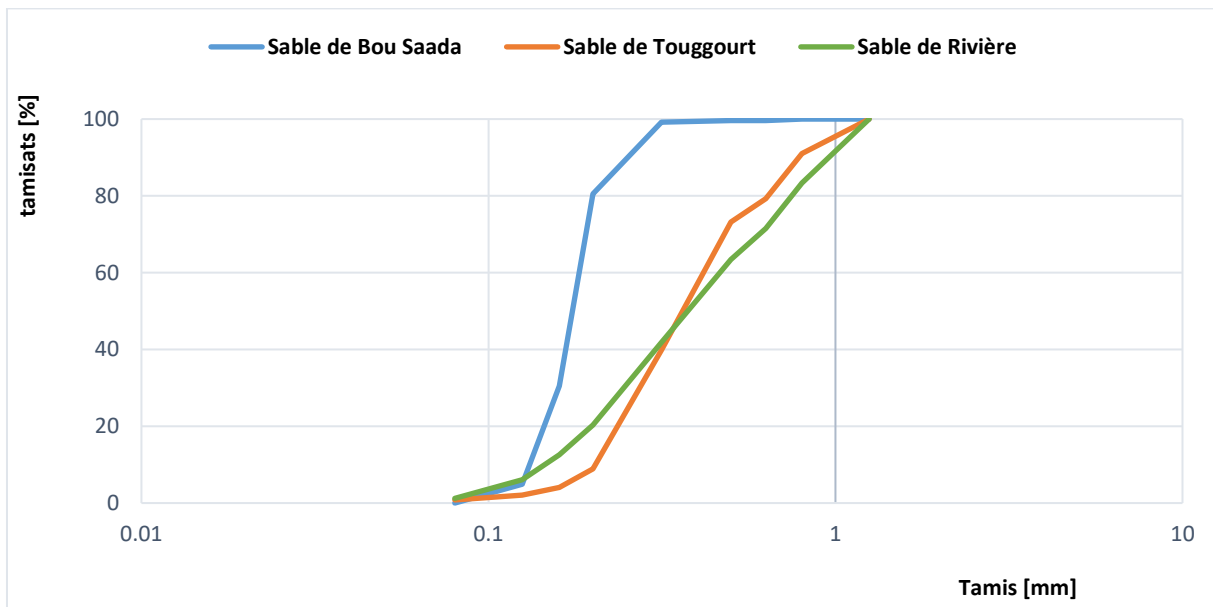


Figure IV.11 : Courbes Granulométriques des différents sables.

D'après les courbes obtenues, on constate que le sable de Bou Saâda présente une distribution granulométrique qui favorise une plus grande proportion de particules fines, d'autre part le sable de Touggourt, bien qu'également fin, contient une proportion un peu plus élevée de particules grossières, ce qui peut conférer des caractéristiques différentes en termes de résistance et de compacité dans les mélanges de mortier.

IV.4.2 Module de finesse [NFP 18-540]

Les sables doivent présenter une granulométrie équilibrée, où la proportion d'éléments fins n'est ni excessive ni insuffisante. Un excès de particules fines nécessitera une augmentation du dosage en eau dans la composition du mortier, tandis qu'un sable trop grossier compromettra la plasticité du mélange, rendant son application difficile.

Le degré de finesse d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse, qui permet d'évaluer la distribution granulométrique et d'assurer une formulation adéquate du mortier.

Selon la norme française [NFP18-540], le module de finesse est égal au $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm .

$$Mf = \frac{1}{100} \sum_{i=0.16}^5 Ri$$

Ri : refus cumulé en pourcentage (%) des tamis.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables.

Tableau IV.12 : Module de finesse du sable.

| Granulats | Spécifications |
|----------------------|--|
| Module de finesse Mf | <p>1.8 < Mf < 2.2 : le sable est à majorité de grains fins.</p> <p>2.2 < Mf < 2.8 : le sable est moyen.</p> <p>2.8 < Mf < 3.3 : le sable est grossier.</p> |

➤ **Calcul du module de finesse des différents sables****Tableau IV.13** : Résultats de module de finesse des sables.

| Module de finesse | | |
|---------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Sable de Bou Saâda | $M_f = (0+0+0+0.40+0.81+69.51)/100$ | 0,707 |
| Sable de Touggourt | $M_f = (0+0+0+20.73+60.16+95.93)/100$ | 1,768 |
| Sable de Rivière | $M_f = (0+0+0+28.45+58.13+87.39)/100$ | 1,740 |

- Le sable de dune Touggourt (SDT) et le sable de rivière ont un module de finesse inférieure à 1.8 donc on dira qu'ils sont très fin.
- Le SDB a un module de finesse (M_f) de 0.707, ce qui indique qu'il est très fin, avec une majorité de grains fins. Cela le classe en dessous de 1.8, confirmant sa finesse.

IV.4.3 Equivalent de sable [EN 933-8]

Cet essai est un test de propreté, dont la valeur de l'E.S. indique le pourcentage de fines présentes dans le sable. L'absence de fines empêche d'obtenir un béton ou un mortier compact, tandis qu'un excès de fines est défavorable car il augmente la demande en eau, ce qui élève le rapport E/C et entraîne une faible résistance.

Pour réaliser cette méthode, on utilise une éprouvette graduée ou, à défaut, un récipient à fond plat. On remplit l'éprouvette d'eau jusqu'à environ un tiers de sa hauteur, puis on y introduit 120 g de sable. On attend quelques minutes avant de bien boucher le récipient, puis on agite l'éprouvette horizontalement, en théorie 90 fois en une minute. Ensuite, on remplit l'éprouvette d'eau, on agite une dernière fois, et on laisse reposer pendant 20 minutes.

L'essai a été fait conformément à la norme EN 933-8 l'indice d'équivalent sable est donnée par la relation suivante :

$$E. S(\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

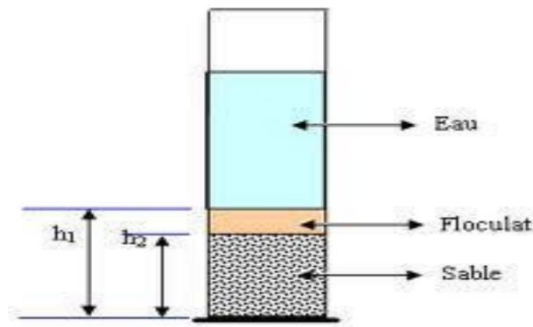


Figure IV.12 : différentes hauteurs utiles.

Avec :

- La hauteur h_1 : sable + éléments fins.
- La hauteur h_2 : sable seulement.

L'essai d'équivalent de sable sert à évaluer la propreté des sables utilisés dans les mélanges de béton et de mortier.

Tableau IV.14 : Les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.

| La valeur de E.S | Nature et qualité du sable |
|------------------------|---|
| $E_s < 60\%$ | Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylènes. |
| $60\% \leq E_s < 70\%$ | Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton. |
| $70\% \leq E_s < 80\%$ | Sable propre à faible proportion de fines argileuse convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité. |
| $E_s \geq 80\%$ | Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau. |

➤ **Calcul de l'équivalent de sable (E.S)**

L'essai a été effectué pour les trois types de sable afin de comparer leur propreté et leur adéquation pour la fabrication de béton et de mortier.

Tableau IV.15 : Résultat de l'essai E.S.

| Equivalent de sable | | | | |
|---------------------------|----------------------------|--------------|----------|---|
| Sable de Touggourt | H1 = 9.5cm H2 = 8.9cm | Es = 93.68% | Es > 80% | Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau. |
| Sable de Bou Saâda | H1 = 10.4cm H2 = 8.4cm | Es = 80.769% | Es > 80% | |
| Sable de Rivière | H1 = 9.8 cm H2 = 9.6 cm | Es = 97.95% | Es > 80% | |



Figure IV.13 : Equivalent de sable au niveau du laboratoire béton-UMMTO.

IV.5 Formulation des mortiers

Dans le cadre de cette étude, des éprouvettes cubiques de 5x5x5cm³ ont été confectionnées. Trois types de sable ont été utilisés : le sable de rivière, le sable de Touggourt et le sable de Bou Saâda. Pour chaque type de sable, trois éprouvettes cubiques ont été réalisées

pour chaque dosage de fibres courtes de polypropylène, soit 0%, 1,5% et 2%. Ces cubes ont été soumis à des essais de compression après des périodes de cure de 7, 14 et 28 jours.

Par ailleurs, des plaques de 2x10x40cm³ ont également été fabriquées. Pour chaque type de sable, trois plaques ont été réalisées avec 0% de fibres courtes et sans renforcement en fibre de verre. D'autres plaques ont été confectionnées avec 0%, 1,5%, et 2% de fibres courtes, chacune renforcée par 5 couches de fibre de verre. Ces plaques ont été destinées à des essais de flexion à quatre points après 28 jours de cure.

Les abréviations utilisées pour désigner ces éprouvettes sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau IV.16 : Tableau illustrant les différentes abréviations des éprouvettes cubiques.

| Abréviations des éprouvettes | Sable de Rivière | Sable de Bou Saâda | Sable de Touggourt | Taux de fibre |
|------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| SR | 100% | - | - | - |
| SDB | - | 100% | - | - |
| SDT | - | - | 100% | - |
| SR-1.5%PP | 100% | - | - | 1.5% |
| SDB-1.5%PP | - | 100% | - | 1.5% |
| SDT-1.5%PP | - | - | 100% | 1.5% |
| SR-2%PP | 100% | - | - | 2% |
| SDB-2%PP | - | 100% | - | 2% |
| SDT-2%PP | - | - | 100% | 2% |

Tableau IV.17 : Tableau illustrant les différentes abréviations des éprouvettes rectangulaires.

| Abréviations des éprouvettes | Sable de Rivière | Sable de Bou Saâda | Sable de Touggourt | Nombre de couches de fibre de verre | Taux de fibre |
|------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|---------------|
| SR | 100% | - | - | - | - |
| SDB | - | 100% | - | - | - |
| SDT | - | - | 100% | - | - |
| SRV | 100% | - | - | 5 | - |
| SDBV | - | 100% | - | 5 | - |
| SDTV | - | - | 100% | 5 | - |
| SRV-1,5 %PP | 100% | - | - | 5 | 1,5% |
| SDBV-1,5 %PP | - | 100% | - | 5 | 1,5% |
| SDTV-1,5 %PP | - | - | 100% | 5 | 1,5% |
| SRV-2 %PP | 100% | - | - | 5 | 2% |
| SDBV-2 %PP | - | 100% | - | 5 | 2% |
| SDTV-2 %PP | - | - | 100% | 5 | 2% |

IV. 5.1 Composition du mortier

Le tableau ci-dessous présente la composition du mortier pour un volume de 1m³

Tableau IV.18 : Composition d'un mortier pour 1m³.

| Composants | Ciment | Sable | Eau | Super plastifiant | Laitiers de haut fourneau | E/L |
|------------|--------|-------|-----|-------------------|---------------------------|------|
| Poids [kg] | 605 | 1380 | 262 | 8 | 35 | 0,41 |



Figure IV.14 : Moules utilisés pour la confection des éprouvettes.

Le tableau ci-dessous représente les quantités des matériaux utilisés pour une plaque ou un cube.

Tableau IV.19 : Quantités des matériaux nécessaires pour un cube et une plaque.

| Matériaux | Ciment | Sable | Eau | Super plastifiant | Laitier haut fourneau |
|---------------------|--------|--------|--------|-------------------|-----------------------|
| Pour un cube [g] | 83,2 | 179,4 | 34,06 | 1,04 | 4,55 |
| Pour une plaque [g] | 588,8 | 1269,6 | 241,04 | 7,36 | 32,2 |

IV. 5.4 Confection des éprouvettes [EN 196-1]

IV. 5.4.1 Préparation des pesés

Les matériaux nécessaires (eau, granulats, ciment, laitiers de haut fourneau et superplastifiant) ont été préparés avec précision. Les pesées ont été réalisées à l'aide d'une balance électronique de la marque Scout Pro d'une capacité de 6kg.



Figure IV.16 : Pesée pour une des compositions.



Figure IV.15 : Balance électronique de marque Scout Pro.

IV. 5.4 .2 Le malaxage

Pour cette étude, nous avons utilisé un malaxeur de laboratoire à axe vertical pour homogénéiser les composants des mortiers. Ce malaxeur comprend une cuve de 5 litres équipée d'une palette centrale rotative à deux vitesses : lente et rapide.



Figure IV.17 : Malaxeur électrique utilisé dans le malaxage au niveau du laboratoire béton-UMMTO.

La procédure de malaxage se déroule comme suit :

1. Le ciment et le sable sont d'abord placés dans la cuve du malaxeur. Le malaxeur est ensuite démarré à basse vitesse pendant 30 secondes pour un pré-malaxage à sec.
2. L'eau est ajoutée et le malaxage se poursuit pendant 2 minutes.
3. Une pause de 15 secondes est enregistrée pour gratter rapidement les parois de la cuve et recentrer le mortier.

4. Le superplastifiant est mélangé avec une petite quantité d'eau avant d'être ajouté dans la cuve. Le malaxeur est alors réglé à haute vitesse pour le malaxage final, en ajoutant les fibres courtes jusqu'à atteindre la durée totale de 4 minutes requise.

IV.5.4.3 Préparation des moules

Au préalable, les moules sont nettoyés en frottant avec une brosse métallique, puis ils sont huilés pour faciliter le démoulage ultérieur. Pour les moules prismatiques, des bandes de ruban adhésif de 2 cm de largeur sont placées pour délimiter la hauteur des plaques à couler.



Figure IV.18 : Préparation des moules pour les plaques.

IV.5.4.4 Remplissage des moules

- Les éprouvettes cubiques sont remplies et vibrées pendant 20 secondes.
- Concernant les plaques, une couche d'enrobage de mortier de 3 à 4 mm d'épaisseur est d'abord appliquée au fond du moule prismatique. Ensuite, une couche de fibre de verre imprégnée de résine est placée sur cette première couche de mortier. Par-dessus la fibre de verre, une nouvelle couche de mortier de 3 à 4 mm est appliquée. Cette séquence est répétée à chaque couche de fibre de verre, jusqu'à ce que la dernière couche de fibre de verre soit posée. Finalement, une couche de mortier de 3 à 4 mm est ajoutée pour atteindre la bande de repère du moule. Après le coulage, une vibration de 20 secondes est effectuée pour assurer une compaction adéquate du mortier.



Figure IV.19 : Coulage des éprouvettes.

- Après la confection des éprouvettes, celles-ci sont couvertes par un film en plastique, afin d'éviter tout échange hydrique avec l'environnement et l'évaporation de l'eau.



Figure IV.20 : Les éprouvettes sont vibrées sur une table vibrante.

IV.5.4.3 Le démoulage

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans de l'eau à température ambiante, cette conservation évite le retrait et garantit le processus d'hydratation du ciment, Une fois le temps de cure requis est atteint, les éprouvettes sont enlevées de l'eau et

déposées à l'air libre (dans le laboratoire) pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité avant de passer aux l'essais.



Figure IV.21 : Conservation des éprouvettes dans de l'eau.

IV.6 Caractérisation des mortiers

IV.6.1 Essais non destructifs

IV.6.1.1 Essai ultrasonique [NF EN 12504-4]

Cet essai non destructif est crucial pour évaluer diverses caractéristiques du béton durci, telles que sa compacité, son degré de fissuration et l'uniformité du coulage. La méthode des ultrasons repose sur la mesure du temps nécessaire aux impulsions ultrasoniques pour traverser le béton. L'interprétation des résultats dépend du procédé spécifique de mesure utilisé, notamment de la position des transducteurs sur l'appareil à ultrasons.

Trois types de dispositions des transducteurs sont communément utilisés : -

- Mesure par la transmission directe.
- Mesure par la transmission semi directe
- Mesure par la transmission indirecte ou de surface.

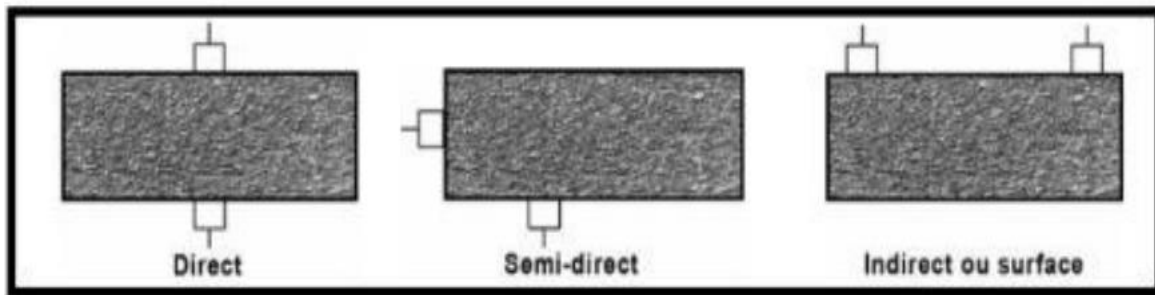


Figure IV.22 : Différents types de dispositions des transducteurs.

Il est recommandé d'utiliser la transmission directe si les conditions le permettent, cette méthode consiste à presser les deux têtes de mesure sur deux faces de l'éprouvette, en utilisant un gel de contact qui facilite la transmission maximale du signal entre les transducteurs. Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire la vitesse de propagation en m/s.

La qualité des éprouvettes est évaluée à l'aide du tableau suivant :

Tableau IV.20 : évaluation de la qualité du mortier par la vitesse des ondes ultrasonores.

| Vitesse de propagation [m/s] | Qualité du mortier |
|------------------------------|--------------------|
| > 4575 | Excellente |
| 3600 à 4575 | Bonne |
| 3050 à 3660 | Douteuse |
| 2135 à 3050 | Mauvaise |
| < à 2135 | Très mauvaise |

Pour notre étude, les mesures des vitesses ultrasonores ont été réalisées en mode de transmission directe, Ce mode fournit le maximum d'énergie, Elles sont réalisées par un testeur ultrasonique PUNDIT de marque Proceq, comprenant un transducteur de transmission et un transducteur de réception calé à une fréquence de 150 kHz.



Figure IV.23 : Appareil PUNDIT pour mesure de la vitesse de propagation des ondes.

IV.6.2 Essais de résistance mécanique

IV.6.3.1 Résistance à la compression [EN 196-1]

L'essai le plus fréquemment réalisé sur le béton et le mortier est celui de la résistance à la compression. Cela s'explique en partie par sa facilité d'exécution et aussi parce que de nombreuses propriétés du béton, bien que pas toutes, peuvent être qualitativement liées à sa résistance à la compression.

Le but de l'essai est de déterminer la résistance du béton à la compression après l'application d'un chargement sur des éprouvettes cubiques de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. La vitesse de charge appliquée reste constante jusqu'à la rupture des échantillons. Les essais de compression ont été réalisés avec la machine IBERTEST au laboratoire de béton [UMMTO].



Figure IV.24 : Les essais de compressions avec la machine IBERTEST niveau du laboratoire de béton [UMMTO].

IV.6.3.2 Résistance à la flexion à quatre points [NFP 18–407]

L'essai de résistance en flexion à quatre points est couramment utilisé pour évaluer la performance des bétons et des mortiers sous des charges flexurales. Cet essai permet de déterminer la capacité des matériaux à résister aux forces de flexion, ce qui est crucial pour des applications structurelles où la résistance à la flexion est essentielle.

Le but de l'essai est de mesurer la résistance en flexion des plaques de $2 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ soumises à un chargement réparti sur quatre points de support. Les charges sont appliquées de manière à créer une zone de flexion maximale au centre de l'éprouvette, générant ainsi un

moment de flexion maximum au milieu de la portée entre les deux charges. La vitesse de chargement est maintenue constante tout au long de l'essai jusqu'à la rupture des échantillons.

Les résultats du test de flexion à quatre points fournissent des informations cruciales sur la capacité du matériau à résister à la flexion, offrant une mesure importante de la résistance structurale. Ces données sont souvent utilisées pour évaluer la qualité et la durabilité des matériaux de construction, tels que le béton, dans diverses applications. Les essais de flexion ont été réalisés avec la machine IBERTEST au laboratoire de béton [UMMTO].

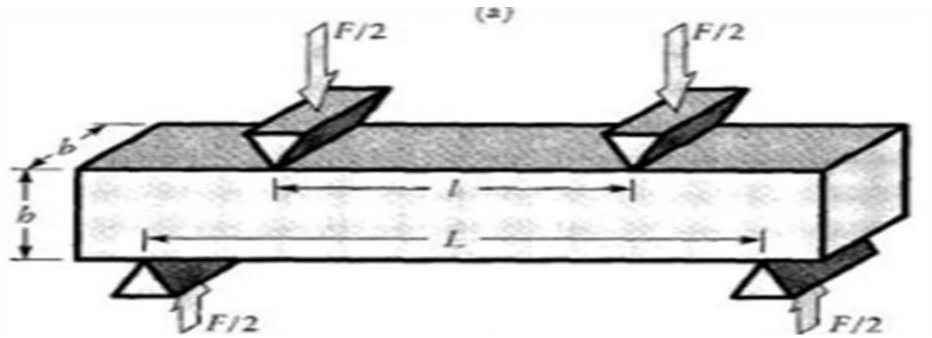


Figure IV.25 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion a quatre points.



Figure IV.26 : L'essai de flexion quatre points avec la machine IBERTEST au niveau du laboratoire de béton [UMMTO].

IV.6.4 Essais de durabilité du béton armé textile

IV.6.4.1 Chaleur-pluie (HR) [NBN EN 12467]

La durabilité est définie comme la capacité d'un matériau ou d'un composant à résister à des charges sans défaillance pendant sa durée de vie. Pour l'application structurale des TRC,

la capacité de déformation à long terme, et la résistance aux environnements agressifs sont les indicateurs de durabilité les plus critiques.

Pour évaluer le comportement mécanique du TRC sur le long terme, le vieillissement des éprouvettes dû aux conditions climatiques a été accéléré en soumettant les échantillons à différents cycles de durabilité plus particulièrement aux cycles s chaleur-pluie (HR), selon la norme (NBN EN 12467) [45].

Pour optimiser les cycles de traitement, les échantillons ont été soumis à un chauffage programmé à 60 °C sur une durée de 45 minutes, suivi d'une phase de maintien à cette température pendant 45 minutes. Le refroidissement des échantillons a été effectué par immersion dans un bain-marie à 15 °C. Selon les calculs de transfert thermique, après 30 minutes d'immersion, la température de surface des échantillons a stabilisé à 20 °C [55]. Les cycles thermiques ont été réalisés à l'aide d'une étuve de marque Memmert au laboratoire de béton [UMMTO], avec un total de 50 cycle appliqué [45].



Figure IV.27 : Réglages de l'étuve Memmert pour le traitement thermique des éprouvettes.



Figure IV.29 : éprouvettes en cours de traitement thermique dans l'étuve.



Figure IV.28 : éprouvettes immergées dans de l'eau.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé en détail les différentes étapes de préparation des spécimens d'essai, comprenant les éprouvettes cubiques de $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$ et les plaques de $2 \times 10 \times 40 \text{cm}^3$. Nous avons commencé par la caractérisation des matériaux, en analysant les propriétés des différents constituants du béton et en formulant les mélanges en fonction des exigences des tests.

La méthodologie de fabrication des éprouvettes et des plaques a été soigneusement décrite, en incluant les procédures de mélange, de moulage et de traitement. Chaque étape a été effectuée avec précision pour assurer la cohérence et la fiabilité des échantillons. Ce processus est crucial car il établit les bases sur lesquelles reposent les résultats expérimentaux. La rigueur dans la préparation et la standardisation des conditions garantit des données fiables et reproductibles.

Les résultats des essais mécaniques effectués sur ces spécimens, incluant les tests de compression et de flexion, seront analysés et discutés en détail dans le chapitre suivant. Ces essais fournissent des informations essentielles sur les performances et la durabilité des matériaux testés.

CHAPITRE V :
Résultats et discussions

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenus à partir des essais réalisés sur les mortiers à l'état durci, à savoir :

- Des essais ultrasonores pour les plaques de 2x10x40cm³ à 28 jours, et pour les cubes de 5x5x5cm³ à 7, 14 et 28 jours.
- Des essais de compression sur les éprouvettes cubiques à 7, 14 et 28 jours.
- Des essais de flexion à 4 points sur des plaques à 28 jours.

V.2 Résultats et discussions

V.2.1 Cubes

V.2.1.1 Le poids des éprouvettes

Cette étude examine l'impact de différents types de sable (Rivière, Bou Saâda, et Touggourt) ainsi que les différents dosages de fibres courtes (0%, 1.5%, 2%) sur les caractéristiques physiques des mortiers.

Pour chaque combinaison de sable et de fibres, des cubes de mortier de dimensions 5×5×5cm³ ont été fabriqués. Après 28 jours de cure dans l'eau, les éprouvettes ont été retirées et pesées. Les moyennes des masses ont été calculées en utilisant la formule suivante :

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} m_i}{3}$$

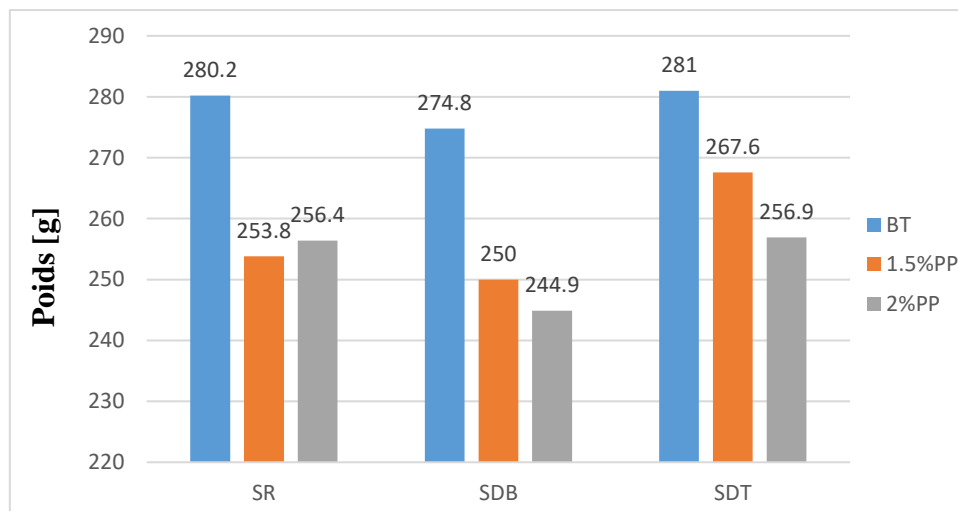
m_i : représente la masse de chaque éprouvette mesurée.

Cette approche permet de comparer les variations de masse en fonction des types de sable et des dosages de fibres, offrant ainsi des insights sur l'effet de ces variables sur les propriétés du mortier.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant ainsi que dans l'histogramme ci-dessous :

Tableau V.1 : Masse des éprouvettes cubiques selon les différentes compositions.

| Type de sable | Compositions | Masse[g] |
|--------------------|--------------|----------|
| Sable de rivière | 0%PP | 280.2 |
| | 1.5%PP | 253.8 |
| | 2%PP | 256.4 |
| Sable de Bou Saâda | 0%PP | 274.8 |
| | 1.5%PP | 250 |
| | 2%PP | 244.9 |
| Sable de Touggourt | 0%PP | 281 |
| | 1.5%PP | 267.6 |
| | 2%PP | 256.9 |

**Figure V.1** : Histogramme des masses des éprouvettes cubiques en fonction des différentes compositions.

- L'histogramme révèle que pour tous les dosages de fibre courtes, les éprouvettes à base de sable de Touggourt sont les plus lourdes, suivies de celles à base de sable de rivière. Les éprouvettes à base de sable de Bou Saâda sont les plus légères
- La masse la plus élevée a été enregistrée pour les éprouvettes à base de sable de Touggourt sans fibres courtes, avec une masse de **281 g**. Cela indique que le sable de Touggourt, associé à un dosage de 0% de fibres courtes, donne les éprouvettes les plus lourdes.
- À l'inverse, la masse la plus faible a été observée pour les éprouvettes à base de sable de Bou Saâda à 2% de fibres courtes, avec une masse de **244,9 g**. Cela suggère que le

sable de Bou Saâda, combiné avec un dosage de 2% de fibres courtes, produit les éprouvettes les plus légères.

- De plus, il est noté que l'augmentation du pourcentage de fibres courtes est associée à une réduction des masses des éprouvettes.

V.2.1.2 Résultats de l'essai ultrasonores

Après les pesées des éprouvettes cubiques, celles-ci ont été soumises à des essais ultrasonores pour évaluer leurs propriétés mécaniques et physiques. Les essais ont été réalisés à deux moments distincts : après 14 jours et après 28 jours de cure. Pour chaque formulation de mortier, trois éprouvettes ont été testées à chaque période de mesure afin de déterminer les vitesses de propagation des ultrasons. Chaque essai a été répété plusieurs fois par éprouvette pour garantir la précision et la fiabilité des données recueillies.

Les mesures ont été réalisées en mode de transmission directe, où le signal est transmis d'un transducteur émetteur à un transducteur récepteur à travers l'éprouvette. Les essais ont été effectués à l'aide du testeur ultrasonique PUNDIT, modèle Proceq Réf 10.0497, conforme à la norme EN 12504-4.

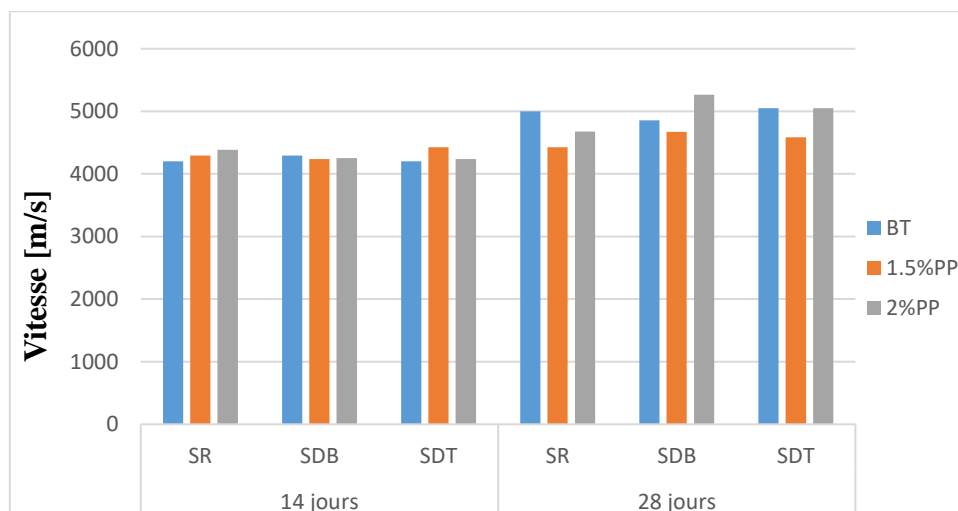
Les valeurs moyennes des vitesses ultrasonores, calculées à partir des mesures répétées, sont ensuite présentées dans les tableaux ci-dessous. Ces données sont également illustrées graphiquement sous forme d'histogramme pour faciliter leur interprétation.

Tableau V.2 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après 14 jours de cure.

| Type de sable | Variable | Résultats ultrasons | Qualité du mortier |
|---------------|----------|---------------------|--------------------|
| SR | BT | 4202 | Bonne |
| | 1.5%PP | 4294 | Bonne |
| | 2%PP | 4386 | Bonne |
| SDB | BT | 4294 | Bonne |
| | 1.5%PP | 4237 | Bonne |
| | 2%PP | 4251 | Bonne |
| SDT | BT | 4202 | Bonne |
| | 1.5%PP | 4425 | Bonne |
| | 2%PP | 4237 | Bonne |

Tableau V.3 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après 28 jours de cure.

| Type de sable | Variable | Résultats ultrasons | Qualité du mortier |
|---------------|----------|---------------------|--------------------|
| SR | BT | 5000 | Excellente |
| | 1.5%PP | 4425 | Bonne |
| | 2%PP | 4679 | Excellente |
| SDB | BT | 4854 | Excellente |
| | 1.5%PP | 4673 | Excellente |
| | 2%PP | 5263 | Excellente |
| SDT | BT | 5051 | Excellente |
| | 1.5%PP | 4587 | Excellente |
| | 2%PsP | 5051 | Excellente |

**Figure V.2** : propagation des ultrasons des éprouvettes après 14 et 28 jours de cure.

Les résultats obtenus après 28 jours de cure sont particulièrement importants pour notre analyse, car ils fournissent une évaluation plus représentative des propriétés mécaniques et de la durabilité des mortiers, contrairement aux résultats préliminaires observés après 14 jours.

➤ **Après 14 jours de cure :**

- Pour le béton témoin, le sable de Bou Saâda produit la vitesse ultrasonore la plus élevée, enregistrant une vitesse de **4294 m/s**.
- Lorsqu'une teneur en fibres courtes de 1.5% est appliquée, une augmentation des vitesses est observée pour les formulations utilisant le sable de Touggourt et le sable de rivière. Tandis que le sable de Bou Saâda montre une légère diminution de la vitesse, avec une mesure de **4237 m/s**.

- À un dosage de 2% de fibres courtes, les formulations avec le sable de rivière et le sable de Bou Saâda présentent une légère augmentation des vitesses par rapport aux valeurs mesurées avec 1.5% de fibres courtes. Cependant, le sable de Touggourt révèle une diminution de la vitesse, atteignant **4237 m/s**.
- **Après 28 jours de cure :**
 - Pour le béton témoin, le sable de Touggourt affiche la vitesse ultrasonore la plus élevée, mesurée à **5051 m/s**, surpassant les vitesses des formulations avec le sable de rivière et le sable de Bou Saâda.
 - Avec 1.5% de fibres courtes, une diminution générale des vitesses est observée pour tous les types de sable. Le sable de Bou Saâda enregistre la vitesse la plus élevée à **4673 m/s** parmi les formulations avec 1.5% de fibres courtes, mais cette vitesse est inférieure à celle du béton témoin.
 - À 2% de fibres courtes, une augmentation des vitesses ultrasonores est constatée pour tous les types de sable par rapport aux valeurs obtenues avec 1.5% de fibres courtes. En particulier, le sable de Bou Saâda obtient la vitesse la plus élevée à **5263 m/s**, montrant une amélioration significative des propriétés mécaniques.

Les résultats obtenus montrent des variations significatives dans les vitesses ultrasonores en fonction des types de sable et des dosages de fibres courtes. Pour les bétons témoins, le sable de Touggourt a révélé la plus grande densité, indiquant une structure interne plus compacte par rapport aux autres sables. En examinant les dosages de fibres courtes, il apparaît que les formulations optimales diffèrent selon le type de sable. Le dosage de 2% de fibres courtes a été le plus efficace pour le sable de Touggourt et le sable de Bou Saâda, montrant une amélioration notable des vitesses ultrasonores et, par conséquent, des propriétés mécaniques du mortier. Ces résultats soulignent l'importance de l'adaptation des dosages de fibres en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque type de sable pour obtenir des performances optimales.

V.2.1.3 Résultats des essais de résistance à la compression

Les essais de compression sont couramment utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques des mortiers, en particulier leur résistance à la compression. Cette caractéristique essentielle correspond à la charge maximale enregistrée lors de l'essai d'écrasement, où l'éprouvette est soumise à une force axiale continue jusqu'à sa rupture. La force est appliquée à une vitesse de charge de 2 Kn/s, garantissant une montée en charge continue et régulière pour

obtenir des résultats fiables. Les éprouvettes ont été soumises à des tests de compression à différents âges : 7, 14 et 28 jours, afin d'évaluer l'évolution de leur résistance au cours du temps.

La résistance à la compression est calculée en utilisant la formule suivante :

$$R = \frac{F}{S}$$

Avec :

- R : Résistance à la compression en [MPa]
- F : Charge de rupture en [N]
- S : Section de l'éprouvette qui est égale à 50x50 [mm²]

L'interprétation des résultats sera effectuée en deux étapes : d'abord par type de sable, puis en fonction du taux de fibres courtes.

V.2.1.3.1 Selon le type de sable

Les résultats obtenus pour les différents types de sable à 7, 14 et 28 jours sont récapitulés dans le tableau suivant et présentés sous forme d'histogramme dans la figure qui suit.

Tableau V.4 : Résultats de la résistance à la compression en fonction du type de sable à différents âges.

| | 7 jours | | 14 jours | | 28 jours | |
|------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
| | Force[Kn] | Résistance[MPa] | Force[Kn] | Résistance[MPa] | Force[Kn] | Résistance[MPa] |
| SR | 75.82 | 30.33 | 81.06 | 32.42 | 89.60 | 35.84 |
| SDB | 70.55 | 28.22 | 77.06 | 30.83 | 89.43 | 35.77 |
| SDT | 72.98 | 29.19 | 78.44 | 31.38 | 83.11 | 33.24 |

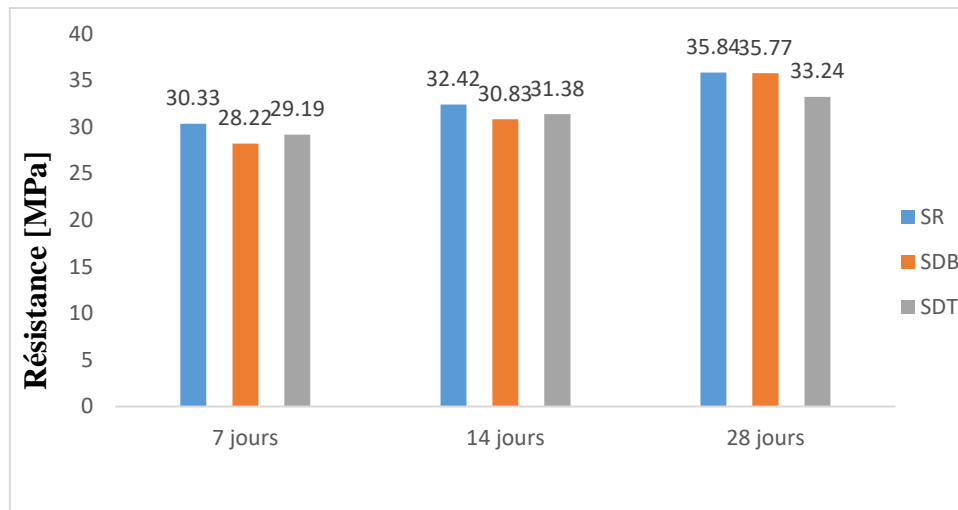


Figure V.3 : Résistances à la compression en fonction du type de sable à différents âges.

- À 7 jours, le sable de rivière montre la meilleure résistance à la compression parmi les trois types de sable, tandis que le sable de Touggourt et le sable de Bou Saâda présentent des performances légèrement plus faibles.
- Comparés aux résultats obtenus à 7 jours, les données de 14 jours montrent une augmentation générale de la résistance à la compression pour tous les types de sable, comme l'indique l'historgramme. Le sable de rivière continue de dominer, suivi par le sable de Touggourt et le sable de Bou Saâda, qui montrent également des améliorations notables.
- Les résultats à 28 jours confirment une tendance continue à la hausse de la résistance à la compression. Le sable de rivière atteint la résistance maximale, dépassant le sable de Bou Saâda de **0,2 %** et le sable de Touggourt de **7,2 %**. Cependant, les différences de performance entre le sable de Bou Saâda et le sable de Touggourt par rapport au sable de rivière ne sont pas énormes. Ces résultats soulignent que, malgré une légère infériorité, les sables de Bou Saâda et de Touggourt offrent des performances proches de celles du sable de rivière

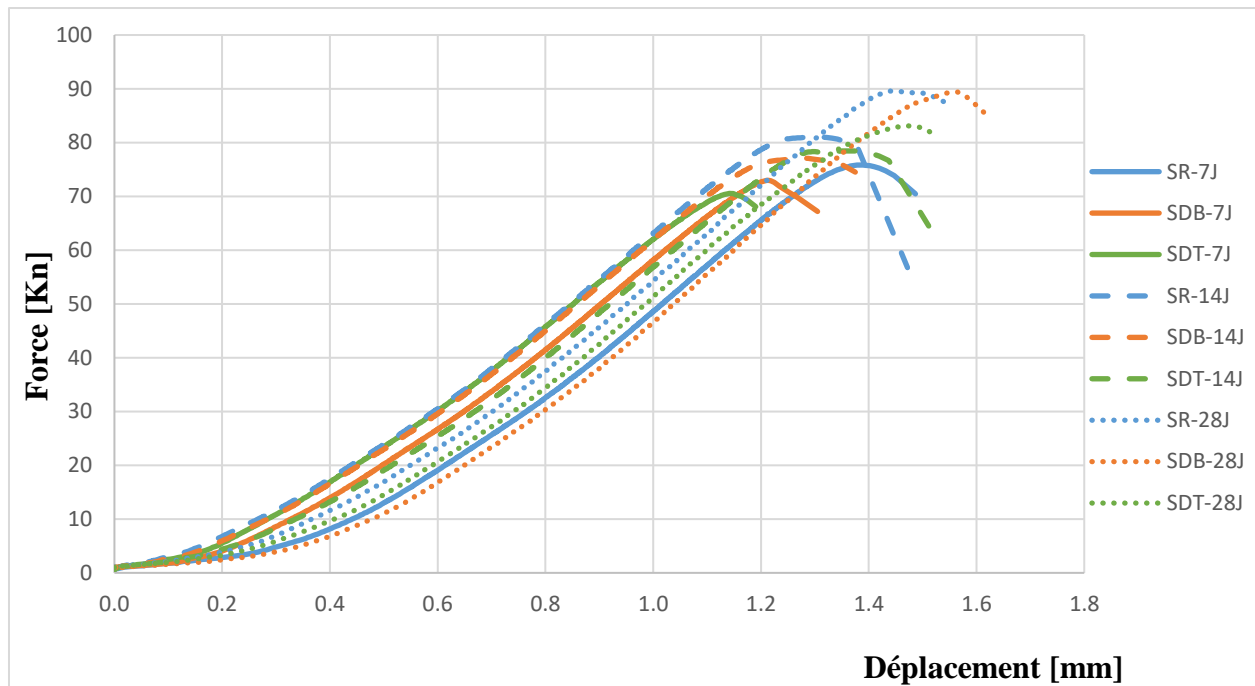


Figure V.4 : Courbes force-déplacement des éprouvettes sans fibre courtes à 7, 14 et 28 jours.

Au final, bien que le sable de rivière présente la meilleure résistance à la compression parmi les types de sable testés, les sables de Bou Saâda et de Touggourt offrent des performances très compétitives. Les courbes force-déplacement confirment que ces sables bien qu'étant légèrement inférieurs en performance, fournissent des résultats très proches de ceux du sable de rivière. Cette performance comparable des sables de Bou Saâda et de Touggourt souligne leur potentiel comme alternatives viables, permettant ainsi de réduire la dépendance au sable de rivière tout en maintenant une résistance du béton satisfaisante.

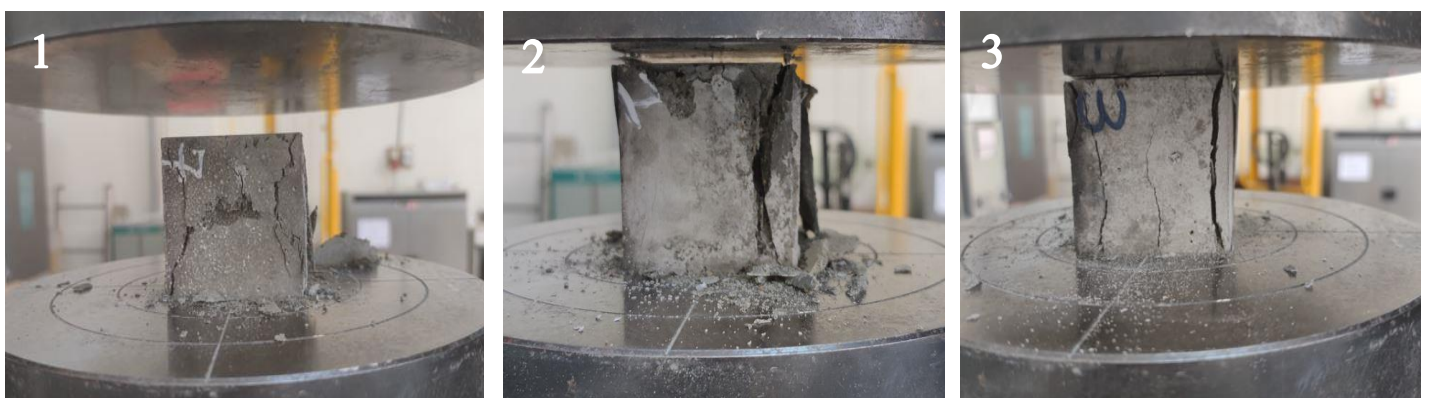


Figure V.5 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

V.2.1.3.2 Selon le taux de fibres courtes

L'analyse des résultats a été effectuée en tenant compte des différents taux de fibres courtes ajoutés aux formulations (1,5% et 2%) pour chaque type de sable. Les performances en termes de résistance à la compression ont été évaluées à 7, 14, et 28 jours, afin de déterminer l'impact du taux de fibres sur la résistance globale des mortiers.

Les résultats obtenus pour les différentes formulations sont résumés dans le tableau ci-dessous et illustrés par l'histogramme suivant.

Tableau V.5 : Résultats de la résistance à la compression en fonction du taux de fibres courtes.

| | 7 jours | | 14 jours | | 28 jours | |
|-------------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
| | Force[Kn] | Résistance[MPa] | Force[Kn] | Résistance[MPa] | Force[Kn] | Résistance[MPa] |
| SR-1.5%PP | 85.28 | 34.11 | 108.45 | 43.38 | 117.81 | 47.13 |
| SDB-1.5%PP | 76.95 | 30.78 | 88.31 | 35.32 | 96.14 | 38.46 |
| SDT-1.5%PP | 66.94 | 26.77 | 102.51 | 41.00 | 107.72 | 43.09 |
| SR-2%PP | 99.77 | 39.91 | 98.94 | 39.58 | 102.16 | 40.87 |
| SDB-2%PP | 78.68 | 30.79 | 94.07 | 37.63 | 100.13 | 40.05 |
| SDT-2%PP | 76.37 | 30.55 | 85.49 | 34.19 | 89.58 | 35.83 |

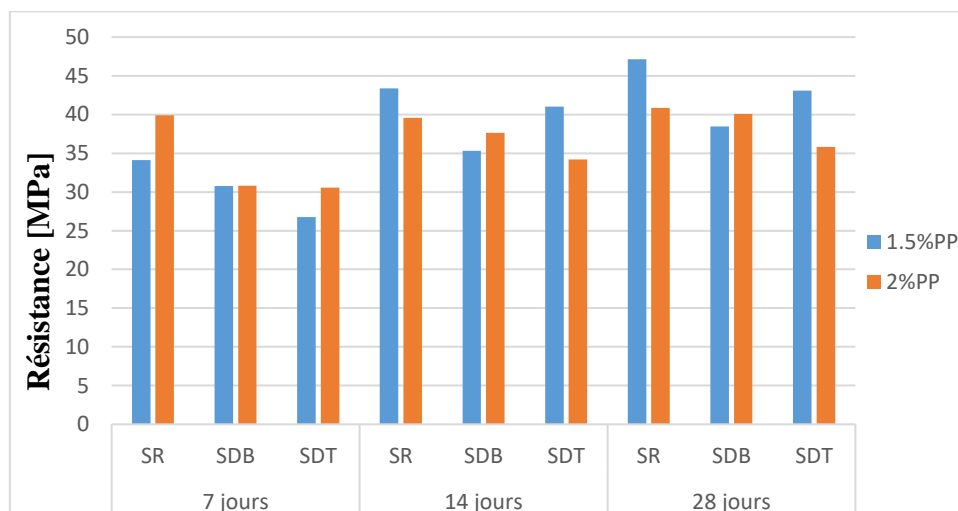


Figure V.6 : Résultats de la résistance à la compression en fonction du taux de fibres courtes.

- À 7 jours, pour les formulations contenant 1.5% de fibres courtes, le béton utilisant du sable de rivière présente la résistance à la compression la plus élevée, surpassant le béton avec sable de Bou Saâda, qui est, à son tour, supérieur à celui avec sable de Touggourt. Pour les formulations avec 2% de fibres courtes, le béton avec sable de rivière continue de montrer la meilleure résistance, suivi du sable de Bou Saâda, tandis que le sable de Touggourt démontre une performance inférieure.
- À 14 jours, pour les formulations avec 1.5% de fibres courtes, une inversion de tendance est observée : le béton avec sable de Touggourt dépasse désormais celui avec sable de Bou Saâda en termes de résistance à la compression, bien que le sable de rivière demeure le plus performant. En ce qui concerne les formulations avec 2% de fibres courtes, le béton avec sable de rivière maintient la résistance la plus élevée, tandis que le sable de Bou Saâda montre une meilleure performance par rapport au sable de Touggourt.
- À 28 jours, pour les formulations avec 1.5% de fibres courtes, la tendance observée persiste : le béton avec sable de Touggourt continue de présenter une meilleure résistance que celui avec sable de Bou Saâda, avec le sable de rivière restant en tête en termes de performance. Pour les formulations avec 2% de fibres courtes, le béton avec sable de rivière conserve la meilleure résistance à la compression, suivi du sable de Bou Saâda, tandis que le sable de Touggourt reste le moins performant parmi les trois types de sable.

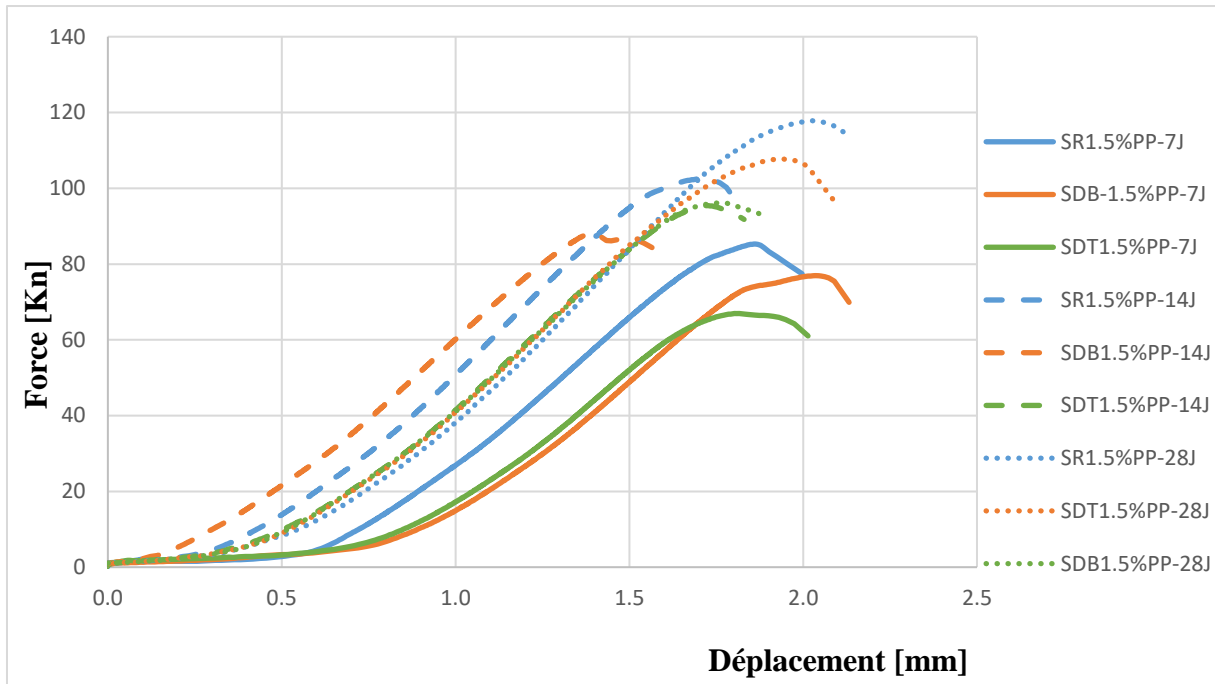


Figure V.7 : courbes force-déplacement des éprouvettes avec 1.5% de fibres courtes à 7, 14 et 28 jours.

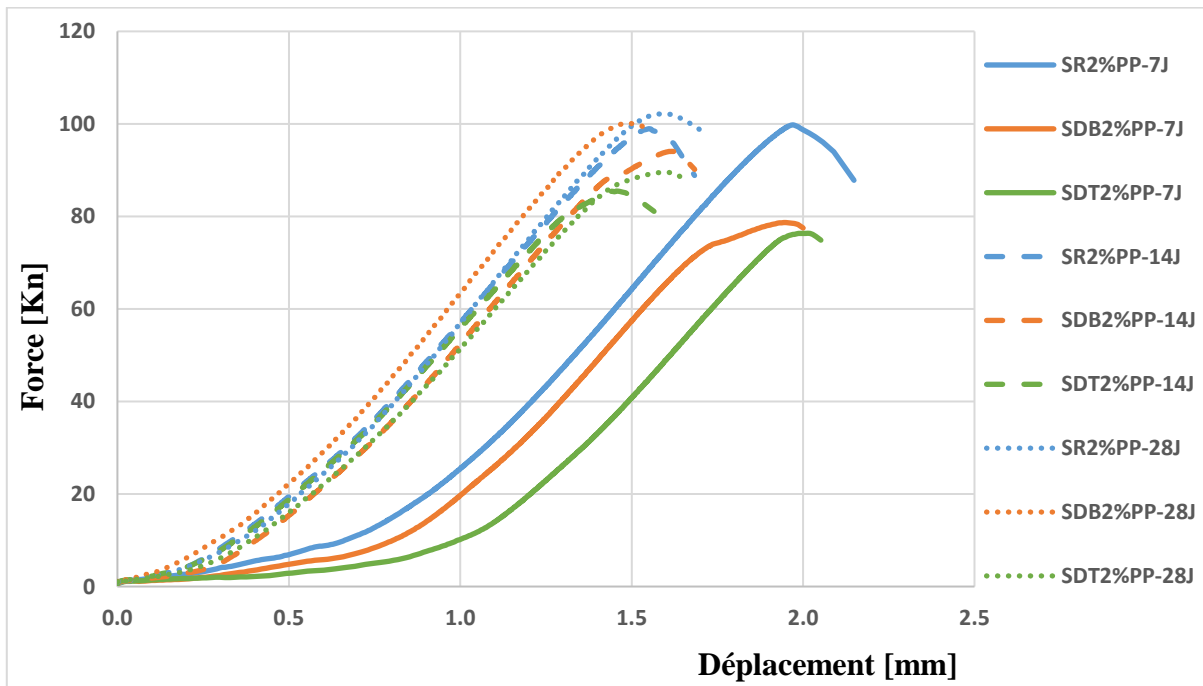


Figure V.8 : courbes force-déplacement des éprouvettes avec 2% de fibres courtes à 7, 14 et 28 jours.

Depuis l'analyse des courbes force-déplacement ainsi que des résultats présentés dans le tableau et l'histogramme, il ressort que le mortier avec sable de rivière et sable de Touggourt démontre des performances optimales en termes de résistance à la compression lorsqu'il est formulé avec un dosage de 1,5% de fibres courtes. Plus précisément, le béton avec sable de rivière à 1,5% de fibres courtes enregistre un gain de **24 %** de résistance par rapport à la formulation sans fibres, tandis que le béton avec sable de Touggourt à 1,5% de fibres courtes montre un gain de **22,8 %**. En revanche, le sable de Bou Saâda révèle ses meilleures caractéristiques de résistance à la compression avec un dosage de 2% de fibres courtes, affichant un gain de **10,7 %** par rapport à la formulation sans fibres. Ces résultats démontrent l'influence significative du type de sable et du taux de fibres courtes sur les propriétés mécaniques du béton, soulignant ainsi la nécessité d'une sélection appropriée pour optimiser les performances du matériau.

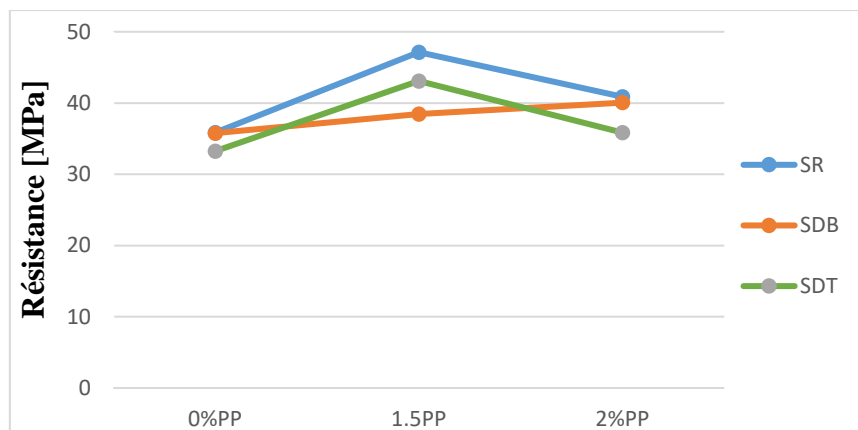


Figure V.9 : Effet de variation du Pourcentage de fibres courtes sur la résistance à la compression à 28 jours.



Figure V.10 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 1.5%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

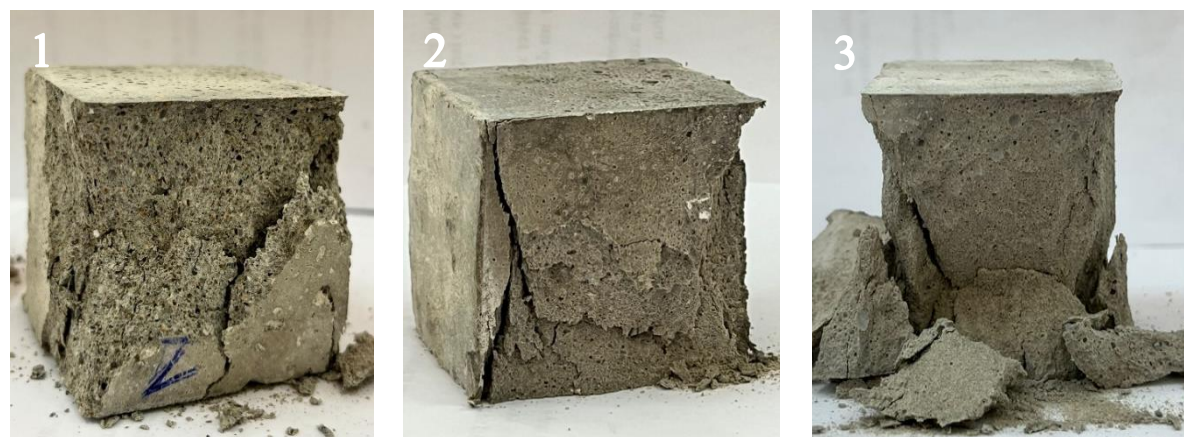


Figure V.11 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 2%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

V.2.1.4 Essai de durabilité aux cycles chaleur-pluie

Après avoir soumis les éprouvettes cubiques à 50 cycles de chaleur et de pluie simulant les conditions environnementales, celles-ci ont été soumises à des tests ultrasonores suivis d'essais de compression afin d'évaluer l'impact de ces cycles sur leurs propriétés mécaniques et leur intégrité structurelle.

V.2.1.4.1 Résultats de l'essai ultrasonores

L'essai ultrasonore a été réalisé de manière identique à celui effectué sur les éprouvettes non exposées aux cycles chaleur-pluie. Les mesures ont été prises en mode de transmission

directe à l'aide du testeur ultrasonique PUNDIT (modèle Proceq Réf 10.0497), conforme à la norme EN 12504-4. Les vitesses ultrasonores moyennes, calculées à partir des mesures répétées, sont présentées dans les tableaux suivants et illustrées graphiquement sous forme d'histogramme pour une meilleure interprétation.

Tableau V.6 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après exposition aux cycles.

| Type de sable | Variable | Résultats ultrasons | Qualité du mortier |
|---------------|----------|---------------------|--------------------|
| SR | BT | 4275 | Bonne |
| | 1.5%FC | 4117 | Bonne |
| | 2%FC | 4099 | Bonne |
| SDB | BT | 4294 | Bonne |
| | 1.5%FC | 4255 | Bonne |
| | 2%FC | 4099 | Bonne |
| SDT | BT | 4587 | Excellente |
| | 1.5%FC | 4275 | Bonne |
| | 2%FC | 4117 | Bonne |

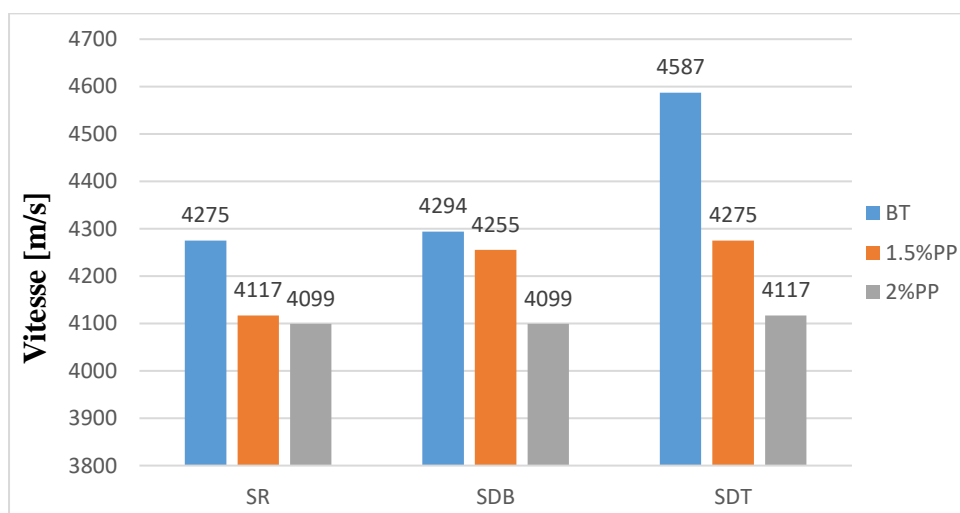


Figure V.12 : propagation des ultrasons à travers les éprouvettes après exposées aux cycles chaleur-pluie (HR).

- Les vitesses de propagation des ondes ultrasonores à travers les éprouvettes soumises aux cycles thermiques sont globalement inférieures à celles des

éprouvettes non soumises aux cycles. Cette diminution est observable pour tous les types de sable et tous les taux de fibres.

- La vitesse de propagation des ondes ultrasonores diminue à mesure que le dosage de fibres courtes augmente, quel que soit le type de sable ou le taux de fibres.
- Pour les éprouvettes avec 0% de fibres courtes de polypropylène, les vitesses de propagation des ultrasons sont les plus élevées pour le sable de Touggourt, puis pour le sable de Bou Saâda et enfin pour le sable de rivière.
- Les éprouvettes avec 1,5% et 2% de fibres de polypropylène montrent une diminution générale de la vitesse des ultrasons, mais le sable de Touggourt reste le plus performant, suivi par le sable de Bou Saâda et le sable de rivière.
- Pour toutes les formulations, les valeurs observées pour le sable de Touggourt sont supérieures à celles du sable de Bou Saâda et du sable de rivière, indiquant une meilleure homogénéité ou une moindre perturbation de la structure interne du mortier sous l'effet des cycles thermiques.

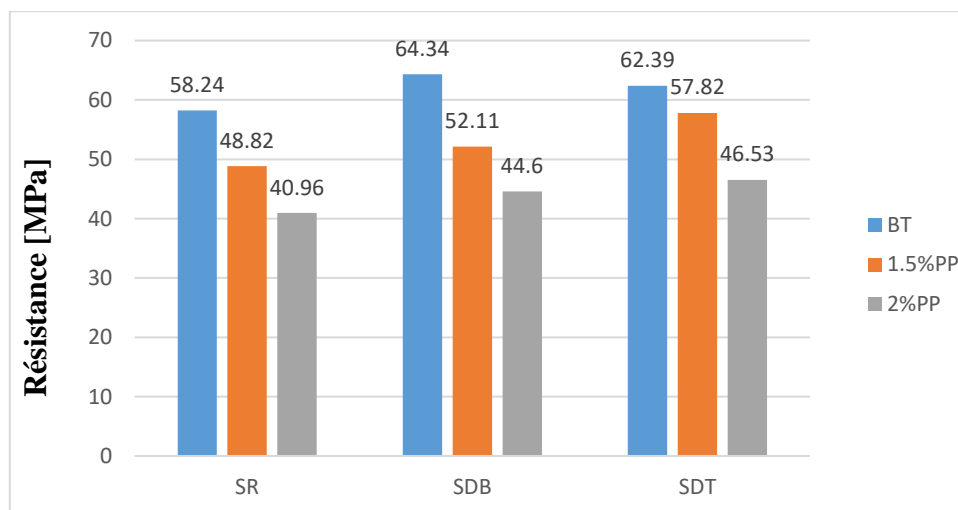
Les résultats des essais ultrasonores montrent que les éprouvettes soumises aux cycles chaleur-pluie présentent des vitesses de propagation des ondes ultrasonores plus faibles que celles non soumises aux cycles. Cela peut être expliqué par l'apparition de microfissures et de perturbations internes dans le mortier, causées par les variations de température. Les cycles de chauffage à 60°C et de refroidissement répétés provoquent des tensions internes qui créent des fissures et altèrent la structure du matériau, ralentissant ainsi la propagation des ondes ultrasonores. Avec un dosage élevé de fibres courtes, ces fissures peuvent se propager davantage ou se multiplier, augmentant les obstacles à la propagation des ondes ultrasonores. De plus, à 60°C, l'eau contenue dans les éprouvettes peut commencer à s'évaporer, même si elle n'a pas atteint sa température d'ébullition de 100°C. Cette évaporation partielle contribue à la formation de vides et de microfissures dans le mortier, exacerbant ainsi les perturbations internes.

V.2.1.4.2 Résultats des essais de résistance à la compression

Après avoir réalisé les mesures ultrasonores sur les éprouvettes, ces dernières ont été soumises à des essais de compression afin d'évaluer leur résistance mécanique sous charge. Les résultats obtenus sont ensuite présentés dans le tableau et l'histogramme suivants.

Tableau V.7 : Résistance à la compression après exposition aux cycles chaleur-pluie.

| | Force [Kn] | Résistance [MPa] |
|-------------------|------------|------------------|
| SR | 145.61 | 58.24 |
| SDB | 160.85 | 64.34 |
| SDT | 155.97 | 62.39 |
| SR-1.5%PP | 122.06 | 48.82 |
| SDB-1.5%PP | 130.27 | 52.11 |
| SDT-1.5%PP | 144.56 | 57.82 |
| SR-2%PP | 102.39 | 40.96 |
| SDB-2%PP | 111.50 | 44.60 |
| SDT-2%PP | 116.33 | 46.53 |

**Figure V.13** : Résistance à la compression après exposition aux cycles chaleur-pluie.

- Les éprouvettes exposées aux cycles thermiques chaleur-pluie affichent des résistances à la compression significativement plus élevée que celles qui ne subissent pas ces conditions, indiquant un effet favorable des cycles thermiques sur le durcissement du mortier.
- Le sable de Touggourt enregistre le gain le plus élevé, soit **87,7 %**, par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles thermiques. Le sable de Bou Saâda suit avec un gain de **79,9 %**, bien qu'il présente la résistance à la compression la plus élevée, atteignant **64,34 MPa**. En revanche, le sable de rivière affiche la résistance la plus faible, avec un gain de **62,5 %**.

- Pour les compositions avec 1,5 % de fibres courtes, les résultats indiquent que le sable de Touggourt, avec une résistance de **57,82 MPa**, présente la plus grande résistance avec un gain de **25,4 %** par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles thermiques. Le sable de Bou Saâda, prend la deuxième place et montre un gain de **26,1 %**. En revanche, le sable de rivière prend la troisième place, et enregistre le gain le plus faible de **3,5 %** par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles.
- L'augmentation du dosage de fibres courtes dans les formulations conduit à une réduction de la résistance à la compression. Pour les compositions avec 2 % de fibres courtes, le sable de Touggourt offre la résistance la plus élevée avec **46,53 MPa**, correspondant à un gain de **23 %** par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles thermiques. Le sable de Bou Saâda suit avec un gain de **10,2 %**, tandis que le sable de rivière affiche la résistance la plus faible avec un gain de seulement **0,2 %**.

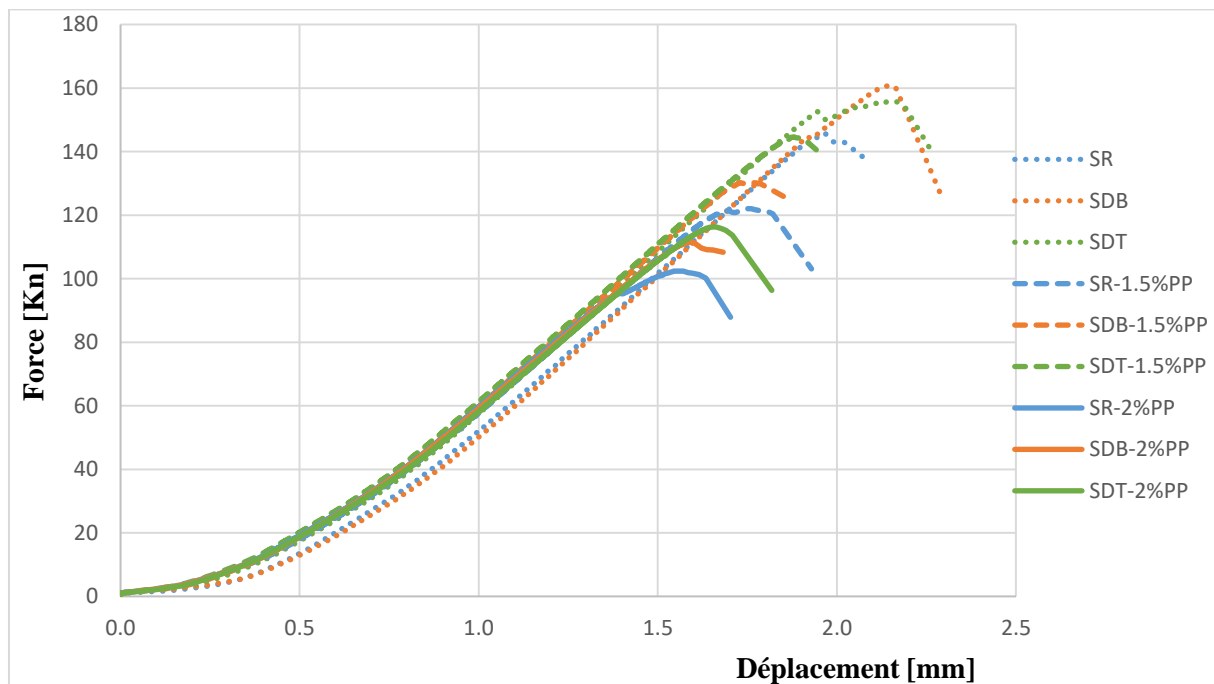


Figure V.14 : courbes force-déplacement des éprouvettes exposées aux cycles.

Au final, les éprouvettes soumises aux cycles chaleur-pluie présentent une augmentation significative de la résistance à la compression, confirmant ainsi les effets bénéfiques de ces cycles sur le durcissement du matériau. En revanche, une tendance générale révèle une diminution de la résistance avec l'augmentation du dosage de fibres courtes en polypropylène. Cette réduction de performance peut être expliquée par le fait que, bien que les fibres courtes

ne fondent pas à ces températures, elles tendent à devenir plus souples, ce qui compromet la cohésion du mortier.

Le sable de rivière enregistre le gain de résistance le plus faible comparé aux autres types de sable, soulignant ainsi sa performance inférieure par rapport aux sables de Bou Saâda et de Touggourt en termes de durabilité. Cette constatation met en évidence la nécessité d'une sélection rigoureuse des matériaux et des dosages de fibres pour optimiser les propriétés mécaniques du béton.

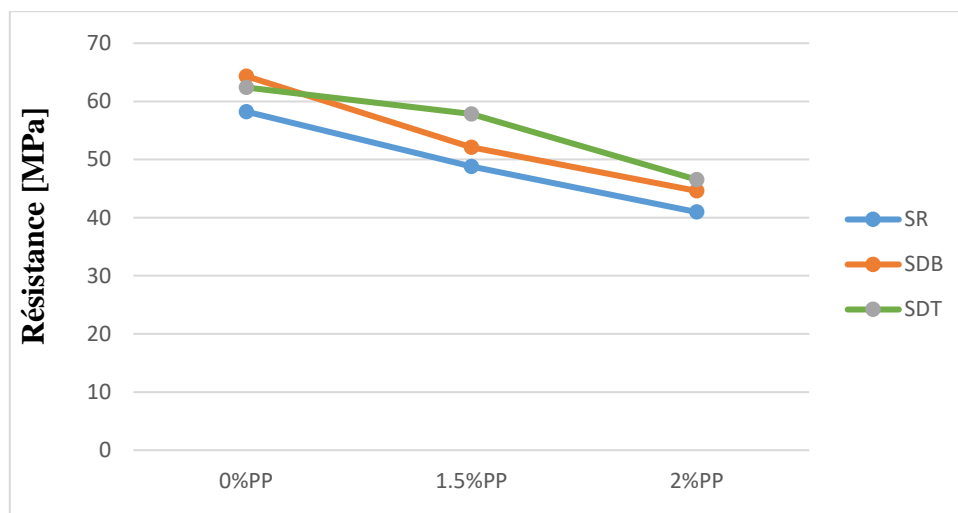


Figure V.15 : Effet de variation du Pourcentage de fibres courtes sur la résistance à la compression des éprouvettes soumises aux cycles chaleur-pluie (HR).

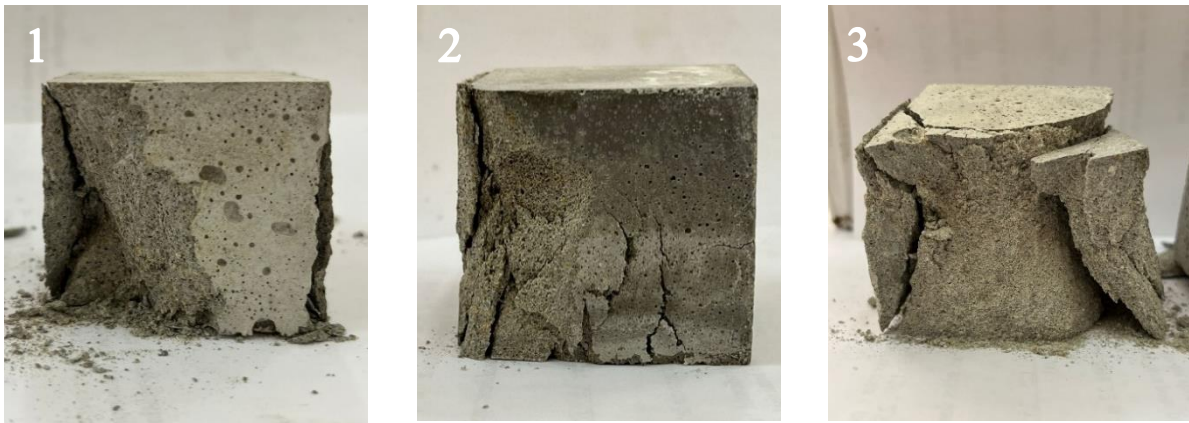


Figure V.16 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques exposées aux cycles chaleur- pluie : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.



Figure V.17 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 1,5%PP exposées aux cycles chaleur- pluie : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

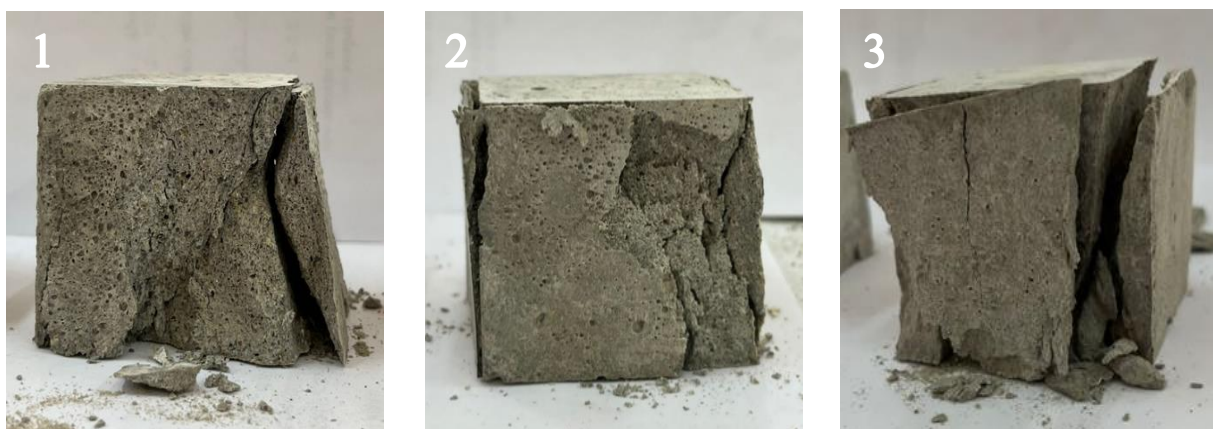


Figure V.18 : Modes de ruptures des éprouvettes cubiques avec 2 %PP exposées aux cycles chaleur- pluie : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

V.2.2 Plaques

V.2.2.1 Résultats de l'essai ultrasonores

Nous avons réalisé des tests par ultrasons sur des plaques à 28 jours. La vitesse des ultrasons est déterminée en mesurant le temps que mettent les ondes ultrasonores à traverser l'éprouvette. Les résultats des essais effectués sur les plaques sont présentés dans le tableau suivant et reportés sur les histogrammes ci-dessous.

Tableau V.8: Vitesses de propagation des ultrasons des plaques après 28 jours de cure.

| Type de sable | Variable | Résultats ultrasons | Qualité du mortier |
|---------------|----------|---------------------|--------------------|
| SR | BT | 3509 | Bonne |
| | V-0%PP | 3478 | Douteuse |
| | V-1.5%PP | 4762 | Excellente |
| | V-2%PP | 4000 | Bonne |
| SDB | BT | 4082 | Bonne |
| | V-0%PP | 5468 | Excellente |
| | V-1.5%PP | 5714 | Excellente |
| | V-2%PP | 6452 | Excellente |
| SDT | BT | 4255 | Bonne |
| | V-0%PP | 4325 | Bonne |
| | V-1.5%PP | 4235 | Bonne |
| | V-2%PP | 3390 | Douteuse |

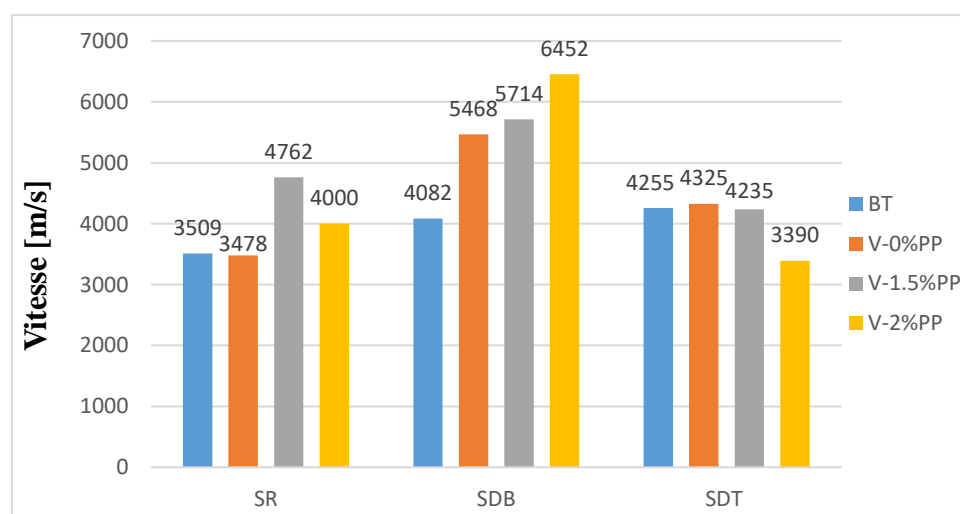


Figure V.19: Vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers les plaques à 28 jours.

- Les vitesses de propagation des ondes ultrasonores montrent des comportements distincts selon le type de sable utilisé. Les variations observées ne suivent pas un modèle uniforme pour les trois types de sable, indiquant des différences significatives dans la réponse du mortier aux variations de fibres courtes.
- Pour le béton témoin, les vitesses de propagation des ondes ultrasonores sont les plus élevées pour le sable de Touggourt avec **4255 m/s**, suivies par le sable de Bou Saâda avec **4082 m/s**, et enfin le sable de rivière avec **3509 m/s**. Cette tendance indique que le sable de Touggourt confère une meilleure densité et homogénéité au mortier par rapport aux autres types de sable.
- Pour les éprouvettes renforcées avec 0 % de fibres courtes, les vitesses de propagation des ultrasons sont les plus élevées pour le sable de Bou Saâda, suivi du sable de Touggourt, puis du sable de rivière. Cette hiérarchie reflète les propriétés intrinsèques des différents types de sable en termes de densité et de structure.
- À 1,5 % de fibres courtes, les résultats montrent que le sable de Bou Saâda présente la meilleure performance avec une vitesse de propagation de **5714 m/s**, tandis que le sable de rivière et le sable de Touggourt affichent des vitesses légèrement inférieures, respectivement à **4762 m/s** et **4235 m/s**.
- À 2 % de fibres courtes, le sable de Bou Saâda conserve la meilleure performance avec une vitesse de **6452 m/s**, indiquant une amélioration continue par rapport aux autres types de sable. En revanche, le sable de rivière présente une diminution notable à **4000 m/s**, et le sable de Touggourt affiche la vitesse la plus basse à **3390 m/s**.

Les variations dans les vitesses de propagation des ultrasons peuvent être attribuées à des changements dans la densité et l'homogénéité du mortier, influencés par la proportion de fibres courtes et le type de sable utilisé. L'augmentation de la proportion de fibres courtes semble améliorer la densité du mortier dans certains cas, mais peut également introduire des irrégularités qui affectent négativement la propagation des ondes ultrasonores, notamment pour les formulations avec 2% de fibres courtes.

V.2.2.2 Résultats de l'essai de flexion 4 points

L'essai de flexion quatre points offre un avantage significatif par rapport à l'essai trois points : il évite la concentration de contraintes au niveau de l'appui central, qui peut induire des défauts prématurés et fausser les résultats, En effet, le mode de rupture principal dans un essai trois points est le cisaillement, alors que l'essai quatre points favorise une rupture en traction, plus représentative du comportement réel du matériau.

V.2.2.2.1 Selon le type de sable (sans renfort)

Les résultats de flexion obtenus pour les différents types de sable à 28 jours sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau V.9: Résultats de béton témoin a base des différent type de sable.

| | Force [Kn] | Résistance [MPa] | Flèche [mm] |
|------------|------------|------------------|-------------|
| SR | 0,952 | 10,71 | 1,128 |
| SDB | 0,863 | 9,703 | 1,892 |
| SDT | 0,503 | 5,657 | 1,358 |

Les résultats du tableau sont repris dans les figures suivantes qui représentent les histogrammes de flèche, des résistances ainsi que le radar des forces :

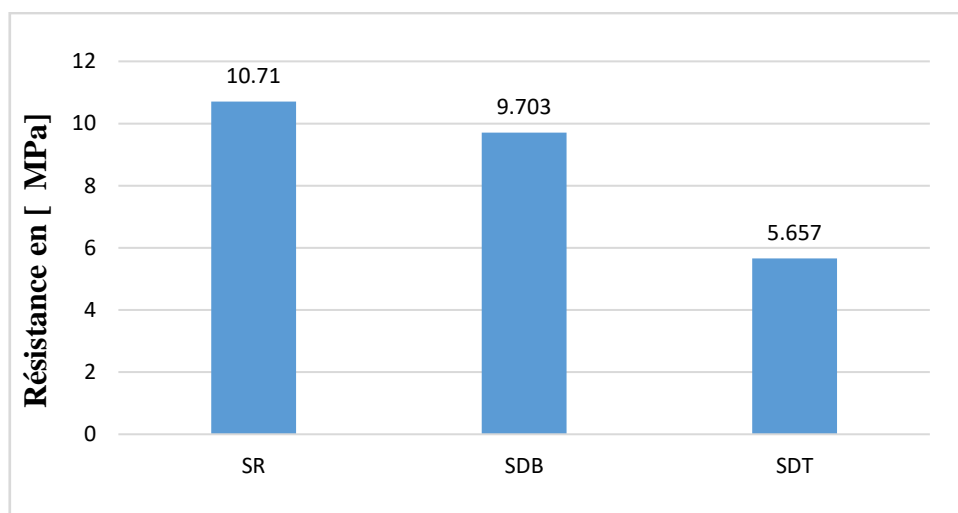


Figure V.20: Résultats de la résistance à la flexion a 28 jours en fonction de type de sable.

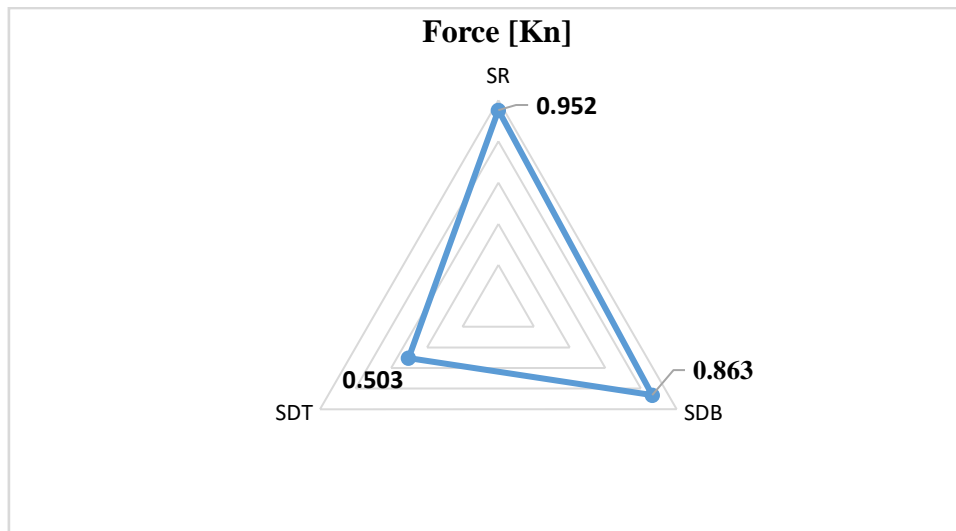


Figure V.21: Force maximale en flexion des trois types de sable sans renfort textile.

- Les résultats montrent que le sable de rivière se distingue par sa plus grande force à la flexion de **0,952 Kn** et sa plus élevée résistance à la flexion de **10,71 MPa**. Cette combinaison de force et de résistance lui permet de supporter des charges plus importantes avant de se déformer de manière permanente ou de se fissurer. En comparaison, le sable de Bou Saâda affiche une force à la flexion intermédiaire de **0,863 Kn** et une résistance à la flexion légèrement inférieure de **9,703 MPa**. Bien que le sable de Bou Saâda soit légèrement moins performant que le sable de rivière, la différence entre ces deux matériaux n'est pas énorme. Enfin, le sable de Touggourt présente la force à la flexion la plus faible de **0,503 Kn** et la résistance à la flexion la plus basse de **5,657 MPa**, ce qui le rend significativement moins performant sous charge par rapport aux deux autres types de sable.

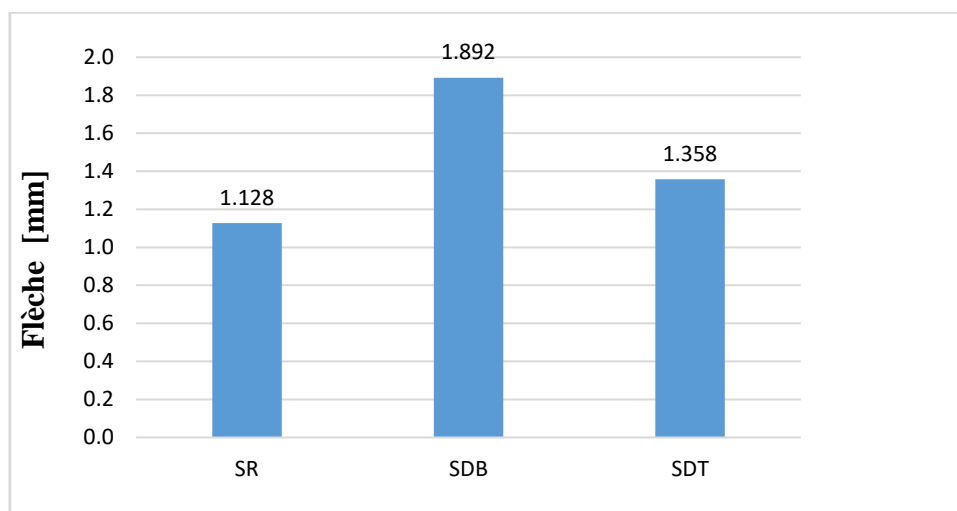


Figure V.22 : Résultats de la flèche à 28 en fonction du type de sable.

- Le sable de Bou Saâda présente la plus grande flèche, ce qui indique qu'il se déforme le plus sous l'effet de la charge appliquée, En revanche, le sable de Touggourt affiche une flèche intermédiaire, ce qui suggère qu'il se déforme moins que le sable de Bou Saâda. Enfin, le sable de rivière montre la plus petite flèche, se déformant donc le moins sous l'effet de la charge appliquée.

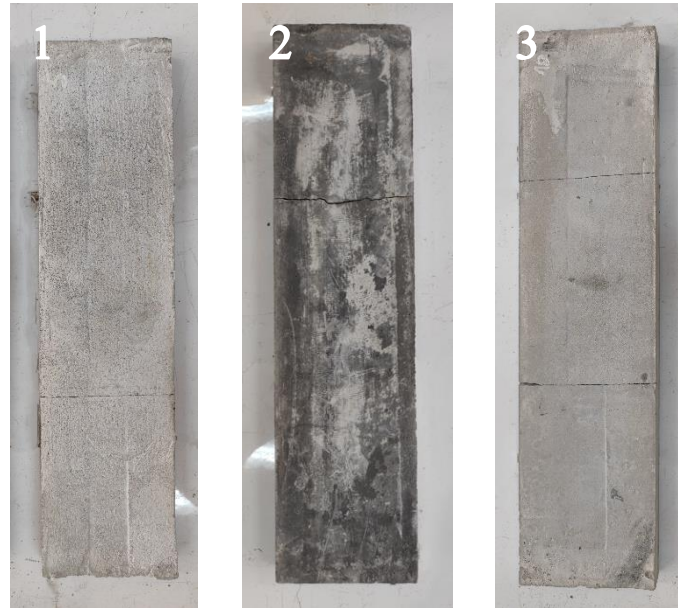


Figure V.23: Modes de ruptures des plaques : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda

Les essais de flexion ont mis en évidence une nette différence de comportement entre les trois sables, Le sable de rivière présente la plus haute résistance à la flexion, suivi du sable de Bou Saâda et du sable de Touggourt.

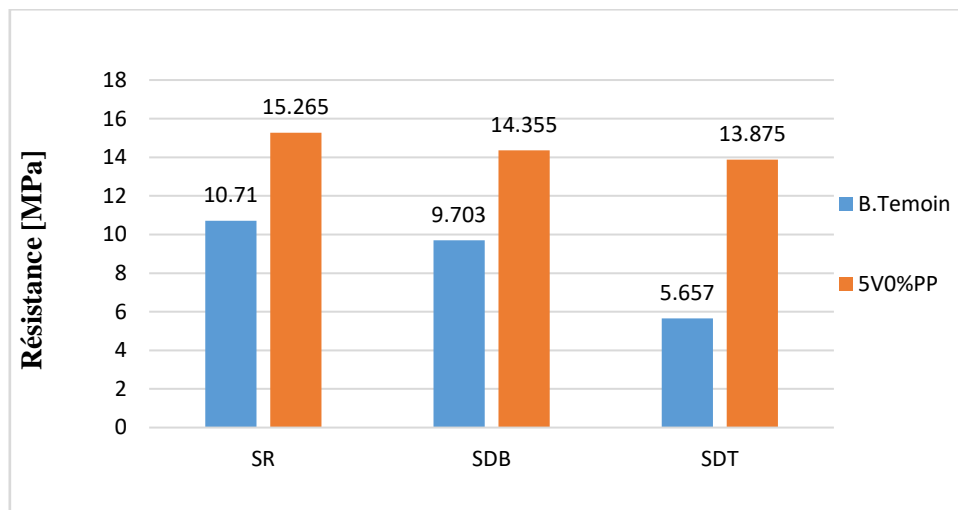
V.2.2.2.2 Effet de textile de verre

Les plaques ont été fabriquées à partir de sable de rivière, de sable de Touggourt et de sable de Bou Saâda, et ont été renforcées par cinq couches de textile en verre. Cette étude vise à examiner l'influence du renfort en textile de verre sur les propriétés mécaniques des mortiers utilisant ces différents types de sable. Les résultats des essais de flexion sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.10: Résultats de l'effet du textile de verre sur la résistance à la flexion.

| | Force [Kn] | Résistance [MPa] | Flèche [mm] |
|-------------------|------------|------------------|-------------|
| SR | 0,952 | 10,71 | 1,128 |
| SDB | 0,863 | 9,703 | 1,892 |
| SDT | 0,503 | 5,657 | 1,358 |
| SRV-0%PP | 1,357 | 15,265 | 3,286 |
| SDBV-0%PP | 1,276 | 14,355 | 3,286 |
| SDTV-0 %PP | 1,233 | 13,88 | 4,131 |

Les résultats du tableau sont repris dans les figures suivantes qui représentent les histogrammes de flèche, des résistances ainsi que le radar des forces :

**Figure V.24 :** Résultats de la résistance à 28 jours en fonction de renfort de verre.

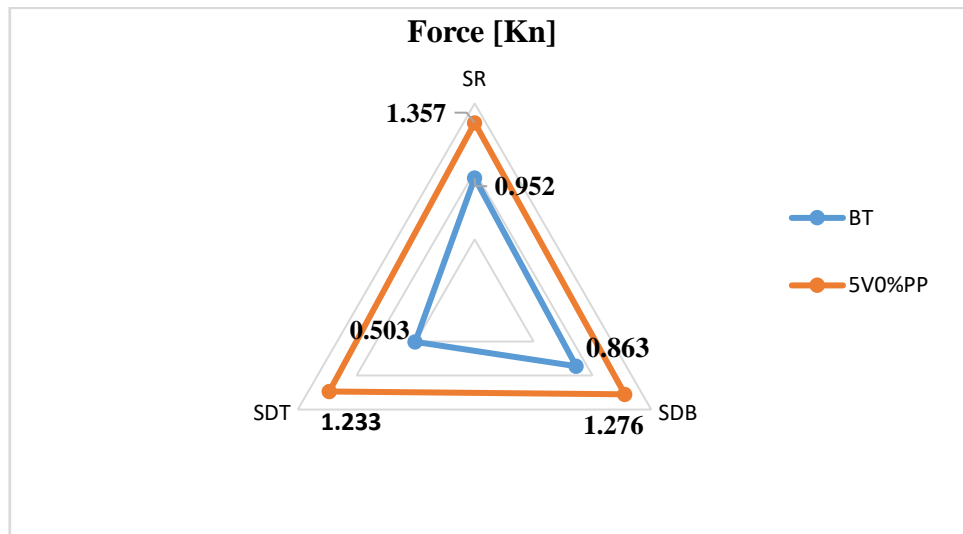


Figure V.25 : Force maximale en flexion des trois types de sable avec et sans renfort textile.

- D'après les données présentées dans le radar et l'histogramme, l'ajout de textiles en verre améliore de manière significative les propriétés mécaniques des matériaux testés. Le sable de Touggourt montre une amélioration notable avec un gain de **145,2 %** en force et en résistance à la flexion. Le sable de Bou Saâda et le sable de rivière présentent également des gains significatifs, respectivement de **47,9 %** et **42,5 %**.

Bien que le sable de rivière affiche des performances supérieures dans ces deux critères, les différences avec le sable de Bou Saâda et le sable de Touggourt ne sont pas très marquées. En somme, l'ajout de textiles en verre améliore de façon substantielle les propriétés mécaniques de tous les types de sable testés, avec des bénéfices notables pour chacun d'eux.

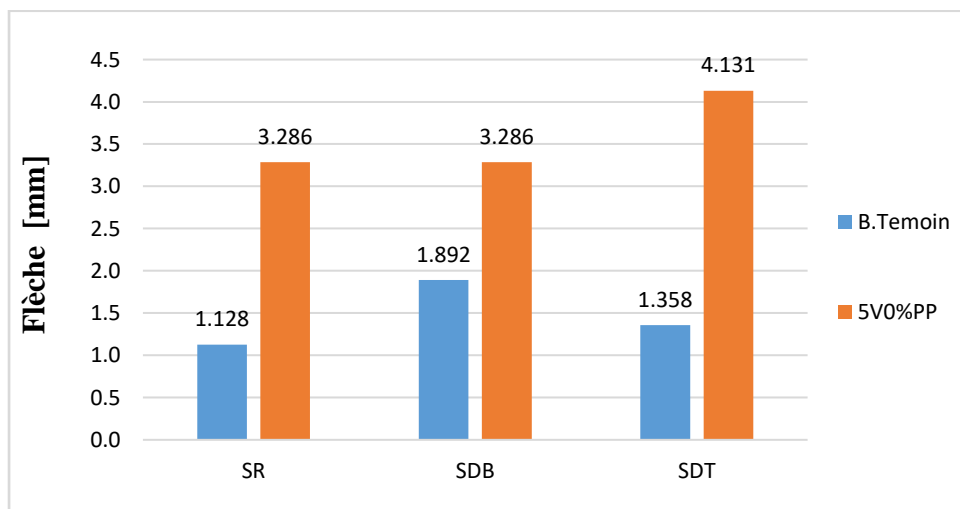


Figure V.26 : Résultats de la flèche à 28 en fonction du renfort en verre.

- D'après les données présentées dans le radar et l'histogramme, l'ajout de couches de textiles en verre améliore de manière significative les propriétés mécaniques des matériaux testés. Le sable de Touggourt montre une amélioration notable avec un gain de **145,2 %** en force et en résistance à la flexion. Le sable de Bou Saâda et le sable de rivière présentent également des gains significatifs, respectivement de **47,9 %** et **42,5 %**.

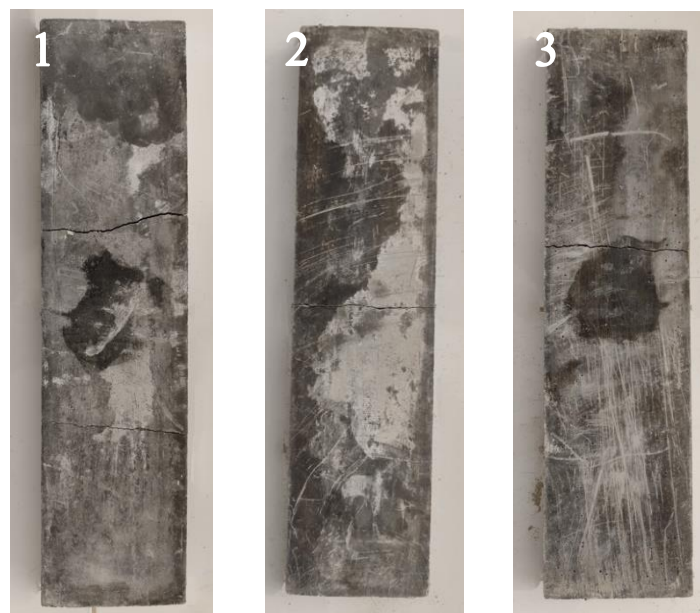


Figure V.27 : Modes de ruptures des plaques avec renfort : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.



Figure V.28 : Vue macro des plaques avec renfort : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt 3) sable de Bou Saâda.

L'étude démontre de manière convaincante que le renforcement textile, et plus particulièrement par des grilles en fibre de verre, est un levier essentiel pour optimiser les propriétés mécaniques des matériaux composites, Même pour des pièces de faible épaisseur, l'ajout de ces renforts permet d'obtenir des gains significatifs en termes de force et de rigidité.

V.2.2.2.3 Effet de l'utilisation des fibres courtes

Les résultats obtenus pour les différents types de sable, en ajoutant des fibres courtes à des proportions de 1,5 % et 2 %, renforcées par 5 couches grilles en fibre de verre, ont été comparés à ceux du béton témoin et ils sont récapitulés dans le tableau suivant et présentés sous forme d'histogramme dans la figure qui suit :

Tableau V.11: Résultats de l'effet du taux de fibre courte sur la résistance à la flexion.

| | Force [Kn] | Résistance [MPa] | Flèche [mm] |
|---------------------|------------|------------------|-------------|
| SRV-0%PP | 1,357 | 15,265 | 3,286 |
| SDBV-0%PP | 1,276 | 14,355 | 3,286 |
| SDTV-0 %PP | 1,233 | 13,875 | 4,131 |
| SRV-1,5 %PP | 1,641 | 18,465 | 4,205 |
| SDBV-1,5 %PP | 1,724 | 19,4 | 7,04 |
| SDTV-1,5 %PP | 1,526 | 17,17 | 5,194 |
| SRV-2 %PP | 1,448 | 16,295 | 6,0135 |
| SDBV-2%PP | 1,428 | 16,06 | 7,366 |
| SDTV-2%PP | 1,236 | 13,91 | 5,442 |

Les résultats du tableau sont repris dans les figures suivantes qui représentent les histogrammes de flèche, des résistances ainsi que le radar des forces :

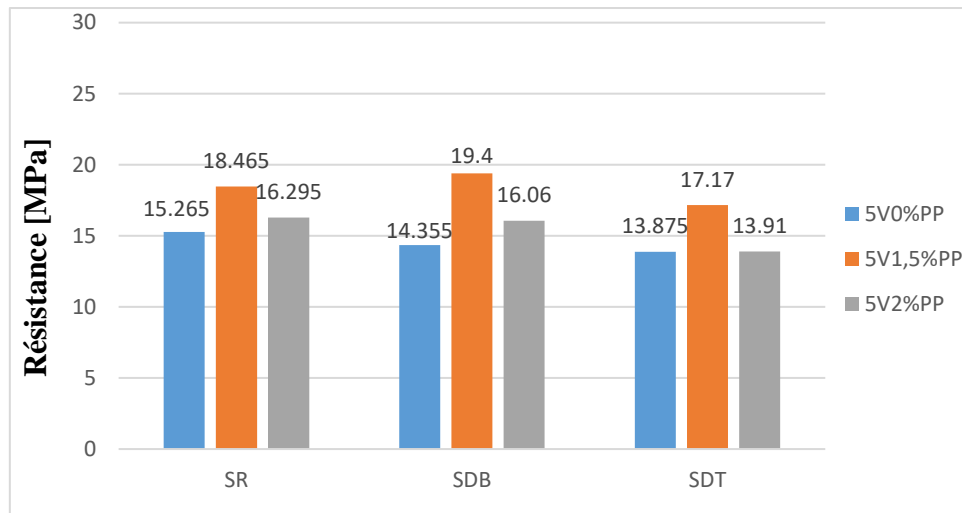


Figure V.29 : Résultats de la résistance à 28 jours en fonction du taux de fibres courtes.

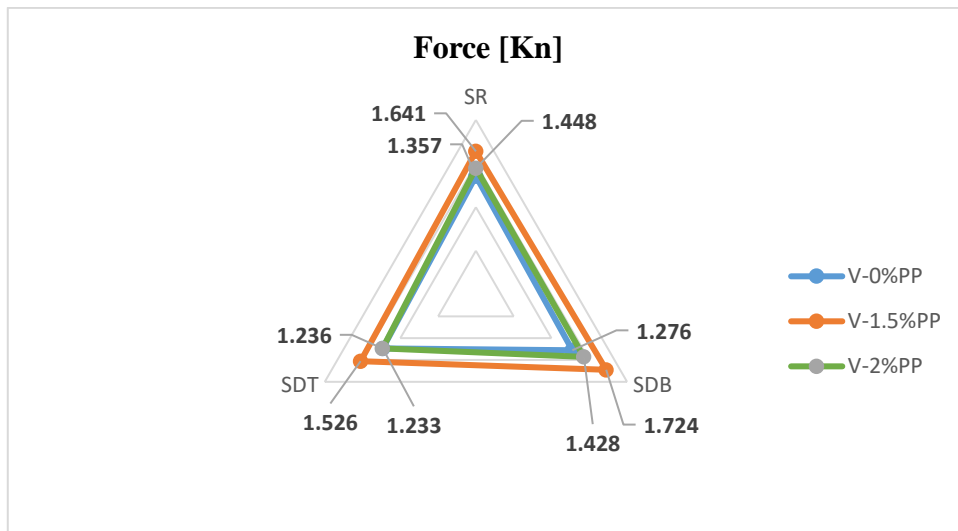


Figure V.30 : Force maximale en flexion des trois types de sable avec renfort textile et fibres courtes.

- L'ajout de fibres courtes a un effet variable sur la force en fonction du type de sable utilisé. Avec une proportion de 1,5 % de fibres courtes, des valeurs plus élevées sont obtenues par rapport à une proportion de 2 %. Cela pourrait être attribué à une agglomération des fibres ou à une perturbation de la structure du matériau. Par exemple, le sable de Bou Saâda avec 1,5 % de fibres courtes affiche une augmentation de la force et de la résistance, atteignant un gain de 35,1 %. En revanche, le sable de Touggourt montre une légère augmentation de la force, avec un

gain de 23,7 %. Enfin, le sable de rivière présente une augmentation modeste de 20,9 %.

Avec l'application de 5 couches de grilles en fibre de verre et un dosage de 1,5 % de fibres de courtes, le sable de Bou Saâda a surpassé le sable de rivière en termes de résistance à la flexion. Cette amélioration significative indique une optimisation efficace des propriétés mécaniques du sable de Bou Saâda grâce à l'intégration des renforts, offrant ainsi une performance supérieure comparée au sable de rivière.

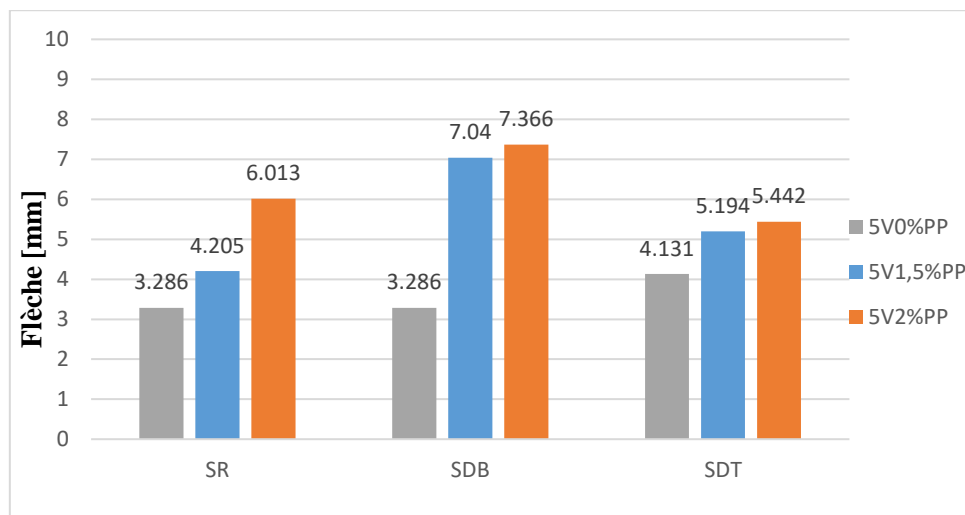


Figure V.31 : Résultats de la flèche à 28 jours en fonction du taux de fibres courtes.

- Depuis l'analyse des données présentées dans l'histogramme, une corrélation positive est observée entre la teneur en fibres courtes et la flèche des éprouvettes, avec des augmentations notables pour toutes les variantes étudiées. L'ajout de 2 % de fibres courtes induit une augmentation significative de la flèche pour les éprouvettes fabriquées avec le sable de rivière, le sable de Bou Saâda, et le sable de Touggourt, avec des gains respectifs de **45,3 %**, **55,4 %**, et **24 %**.

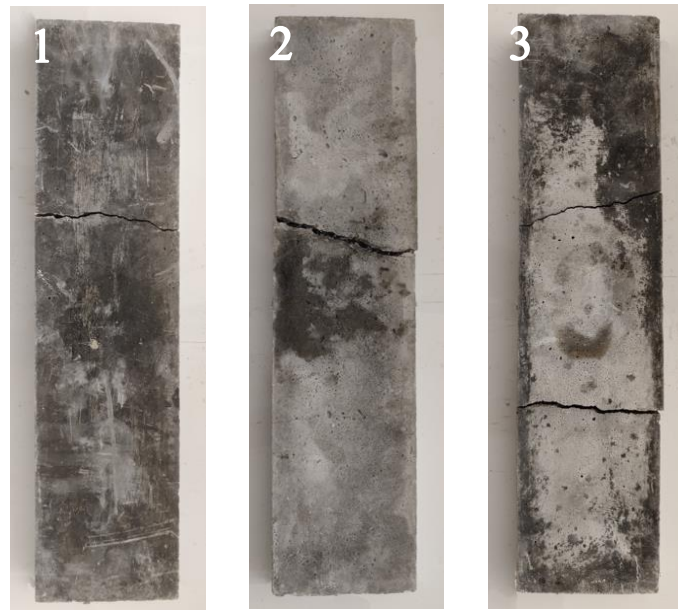


Figure V.32 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 1.5%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

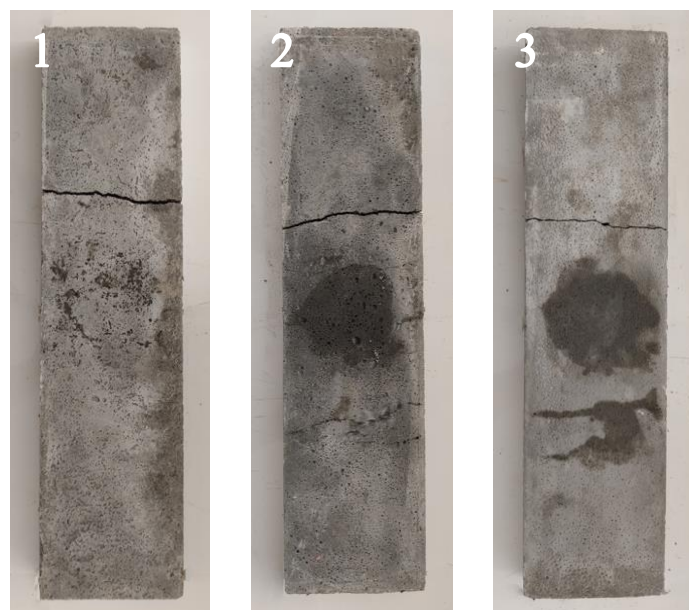


Figure V.33 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 2%PP : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

V.2.2.3 Essai de durabilité aux cycles chaleur-pluie

Des plaques ont subi 50 cycles de vieillissement accéléré, comprenant des alternances de chaleur et de pluie simulant des conditions environnementales extrêmes. Leur intégrité a été évaluée par des essais non destructifs (essai ultrasonores), et complétés par des essais de flexion à 4 points.

V.2.2.3.1 Résultats de l'essai ultrasonores

L'essai ultrasonore a été réalisé de manière identique à celui effectué sur les plaques non exposées aux cycles chaleur-pluie, et les résultats sont donnés dans le tableau suivant, et reportés sur histogrammes présentés ci-dessous :

Tableau V.12 : Vitesses de propagation des ultrasons des éprouvettes après exposition aux cycles.

| Type de sable | Variable | Résultats ultrasons | Qualité du mortier |
|---------------|----------|---------------------|--------------------|
| SR | BT | 2940 | Mauvaise |
| | V-0%FC | 3250 | Douteuse |
| | V-1.5%FC | 3390 | Douteuse |
| | V-2%FC | 2667 | Mauvaise |
| SDB | BT | 3450 | Douteuse |
| | V-0%FC | 1660 | Mauvaise |
| | V-1.5%FC | 3705 | Bonne |
| | V-2%FC | 2695 | Mauvaise |
| SDT | BT | 3390 | Douteuse |
| | V-0%FC | 3316 | Douteuse |
| | V-1.5%FC | 3390 | Douteuse |
| | V-2%FC | 2626 | Mauvaise |

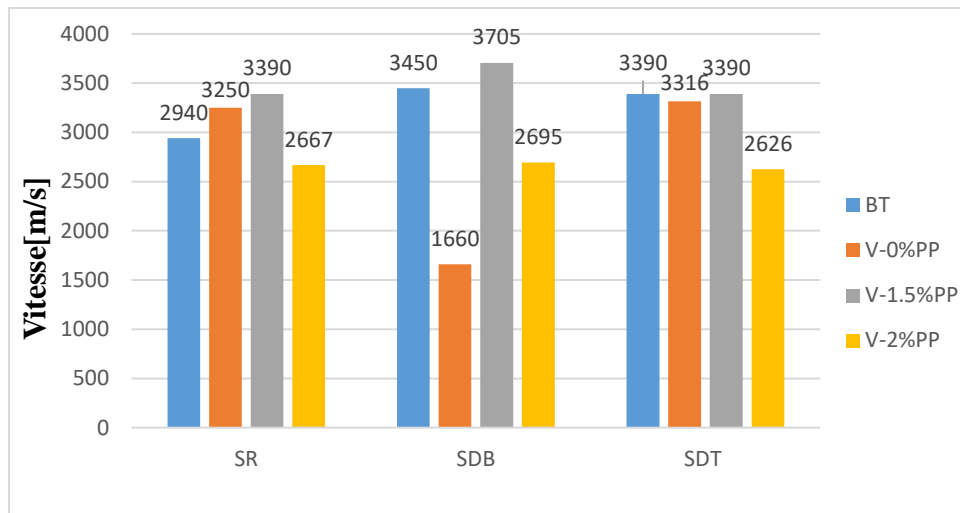


Figure V.34: propagation des ultrasons des plaques exposées aux cycles chaleur-pluie.

- Les vitesses de propagation des ondes ultrasonores dans les éprouvettes soumises aux cycles thermiques sont plus faibles que celles mesurées dans les éprouvettes non exposées à ces cycles. Cette tendance est visible pour tous les types de sable et toutes les proportions de fibres courtes.
- Pour le béton témoin, la vitesse des ondes ultrasonores est la plus élevée pour le sable de Bou Saâda, avec **3450 m/s**, suivie par le sable de Touggourt à **3390 m/s**, et enfin le sable de rivière à **2940 m/s**.
- Pour les éprouvettes avec 0 % de fibres courtes, la vitesse des ondes ultrasonores est la plus élevée pour le sable de Touggourt, avec **3316 m/s**, suivi du sable de rivière à **3250 m/s**. Le sable de Bou Saâda présente une vitesse de propagation beaucoup plus faible, à **1660 m/s**, indiquant une dégradation importante après les cycles thermiques.
- Les éprouvettes avec 1,5 % de fibres courtes montrent des vitesses de propagation les plus élevées pour le sable de Bou Saâda, avec **3705 m/s**, suivi du sable de rivière et du sable de Touggourt, tous deux à **3390 m/s**.
- Pour les éprouvettes avec 2 % de fibres courtes, les vitesses de propagation les plus élevées sont observées pour le sable de Bou Saâda, avec **2695 m/s**, suivi du sable de rivière à **2667 m/s**, et du sable de Touggourt à **2626 m/s**.

Les résultats montrent que la diminution des vitesses de propagation des ondes ultrasonores pourrait être liée à la formation de microfissures dans le mortier après les cycles thermiques. On soupçonne également que les fibres courtes peuvent perdre leurs propriétés, comme une diminution de leur rigidité. Le sable de Bou Saâda semble particulièrement affecté

par ces cycles, tandis que le sable de Touggourt et le sable de rivière montrent des variations selon les proportions de fibres courtes. Ces facteurs peuvent expliquer les différences observées dans la dégradation du mortier.

V.2.2.3.2 Résultats des essais de résistance à la flexion

V.2.2.3.2.1 Selon le type de sable (sans renfort)

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau V.13: Résultats de béton témoin selon les différents types de sable après exposition aux cycles.

| | Après cycles HR | | Avant cycles HR |
|------------|-----------------|------------------|------------------|
| | Force [Kn] | Résistance [MPa] | Résistance [MPa] |
| SR | 1.408 | 15.85 | 10.71 |
| SDB | 1.180 | 13.28 | 9.70 |
| SDT | 1.289 | 14.50 | 5.66 |

Les résultats du tableau sont repris dans les figures suivantes qui représentent l'histogramme des contraintes ainsi que le radar des forces :

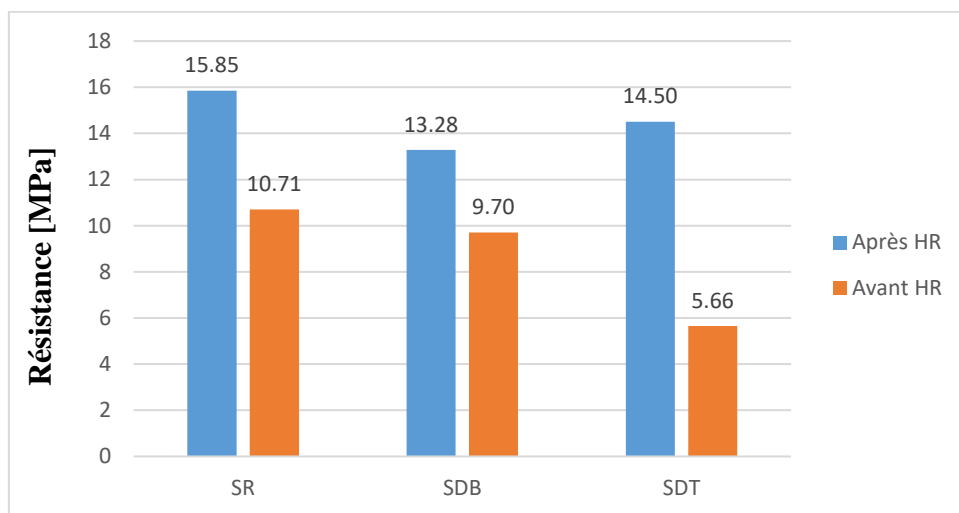


Figure V.35: Résultats de la résistance à 28 jours en fonction du type de sable après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR).

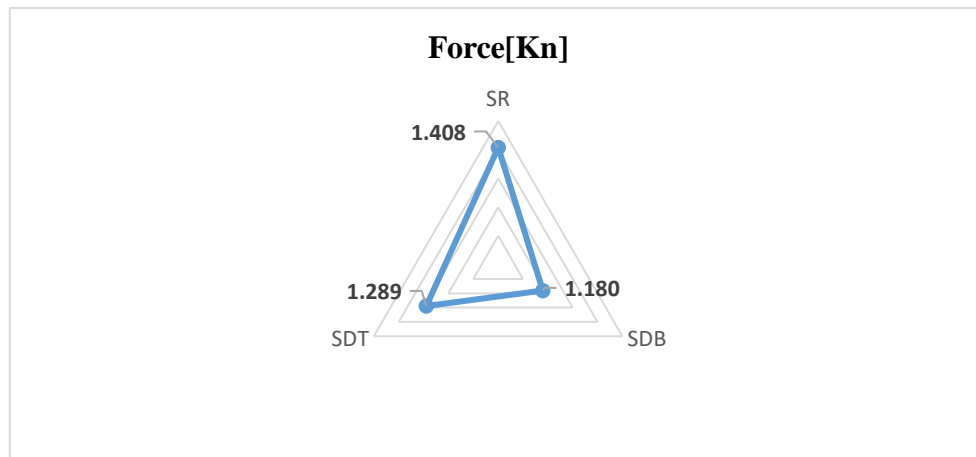


Figure V.36: Force maximale en flexion des trois types de sable sans renfort textile après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR).

- Les plaques de mortier soumises aux cycles thermiques chaleur-pluie montrent une résistance à la flexion globalement plus élevée que celles non soumises à ces cycles, indiquant que ces cycles ont été favorables à l'amélioration des propriétés mécaniques du matériau.
- Le sable de rivière atteint une résistance de **15,85 MPa** après les cycles thermiques, ce qui représente un gain de **48 %** par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles thermiques. Ce sable affiche également la meilleure force de flexion parmi les trois types de sable étudiés après les cycles.
- Le sable de Touggourt, qui présentait initialement la résistance et la force les plus faibles, affiche une résistance de **14,5 MPa** après les cycles thermiques, avec un gain impressionnant de **157,9 %** par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles. Cette amélioration significative permet au sable de Touggourt de se rapprocher de la résistance et de la force du sable de rivière, tout en surpassant le sable de Bou Saâda.
- Le sable de Bou Saâda enregistre une résistance de **13,28 MPa** après les cycles thermiques, correspondant à un gain de **36,9 %** par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles. Bien que cette amélioration soit notable, elle reste inférieure à celle observée pour le sable de rivière et le sable de Touggourt, et la force de flexion est également moindre comparée à ces sables.

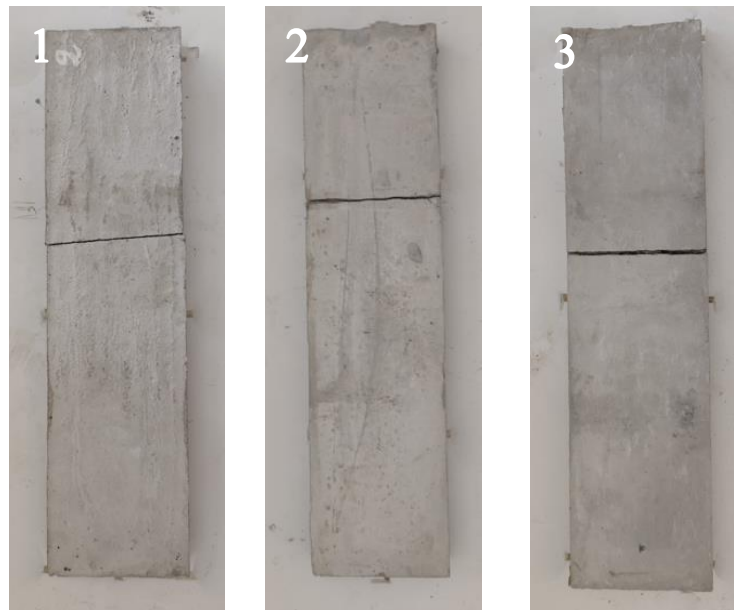


Figure V.37 : Modes de ruptures des plaques après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

Bien que le sable de rivière présente la résistance et la force les plus élevées après les cycles thermiques chaleur-pluie, le sable de Touggourt se distingue par son impressionnante amélioration en termes de force et de résistance, se rapprochant de celles du sable de rivière et surpassant le sable de Bou Saâda.

Ces cycles thermiques accélèrent la cinétique d'hydratation du ciment, permettant ainsi une poursuite de l'hydratation au-delà de 28 jours, Cela entraîne la formation d'hydrates supplémentaires qui densifient la pâte, En revanche, ce phénomène n'est pas observé dans les plaques non soumises aux cycles.

V.2.2.3.2.2 Effet de textile de verre

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V.14 : Résultats de l'effet du textile de verre sur la résistance à la flexion après exposition aux cycles.

| | Après cycles HR | | Avant cycles HR |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | Force [Kn] | Résistance [MPa] | Résistance [MPa] |
| SR | 1.408 | 15.85 | 10.71 |
| SDB | 1.180 | 13.28 | 9.70 |
| SDT | 1.289 | 14.50 | 5.66 |
| SRV-0%PP | 1.320 | 14.90 | 15.27 |
| SDBV-0%PP | 0.827 | 9.30 | 14.36 |
| SDTV-0%PP | 0.676 | 7.61 | 13.88 |

Les résultats du tableau sont repris dans les figures suivantes qui représentent l'histogramme des contraintes ainsi que le radar des forces :

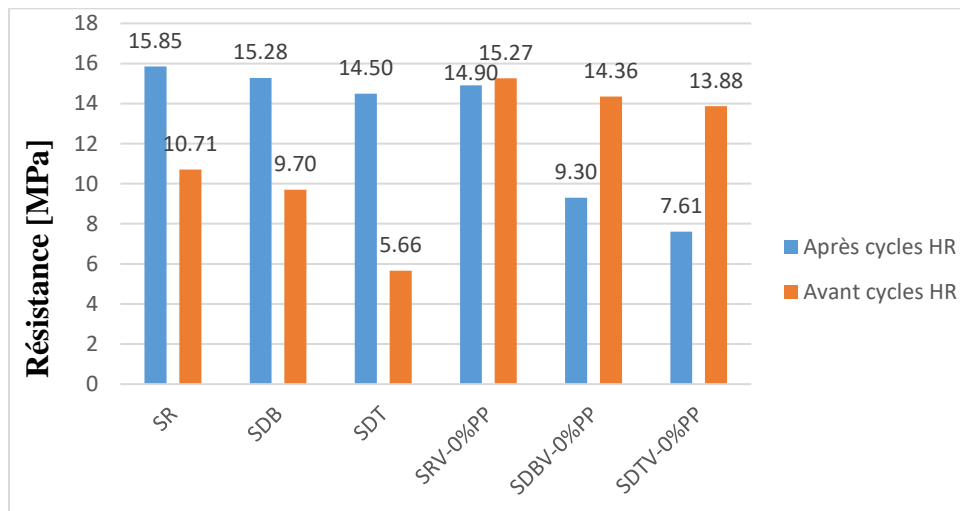


Figure V.38: Résultats de la résistance à 28 jours en fonction de renfort de verre après exposition aux cycles.

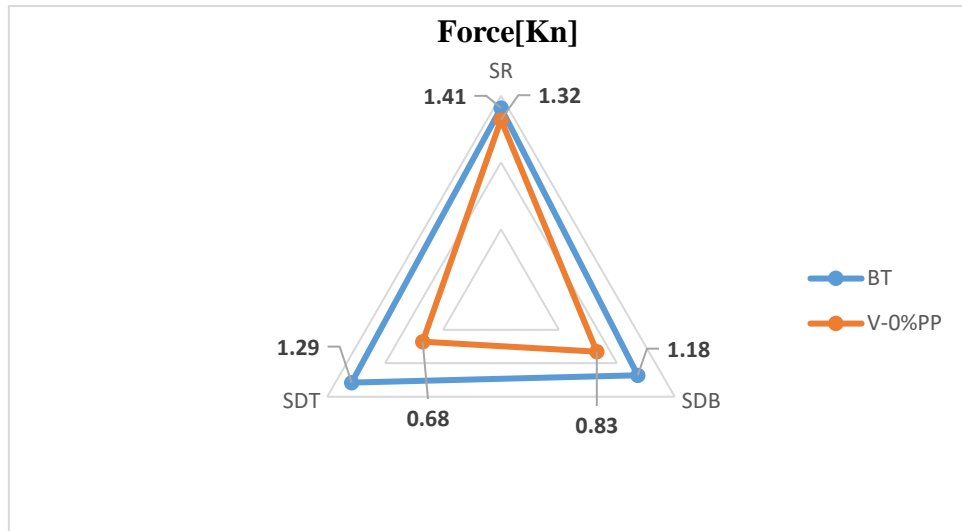


Figure V.39: Force maximale en flexion des trois types de sable avec et sans renfort textile après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR).

- Les plaques de mortier avec 5 couches de fibres de verre et 0 % de fibres courtes montrent une diminution de la résistance et de la force après les cycles thermiques chaleur-pluie, quel que soit le type de sable utilisé.
- Pour le sable de rivière, la résistance après les cycles thermiques a diminué de **2,4 %**, atteignant **14,90 MPa**. Cette variation modérée indique que la résistance et la force du mortier sont relativement bien conservées malgré l'exposition aux cycles thermiques.
- Le sable de Bou Saâda affiche une réduction significative de **35,2 %** dans la résistance après les cycles, avec une valeur de **9,30 MPa**. Cette baisse importante de la résistance et de la force suggère une dégradation notable des propriétés mécaniques après les cycles thermiques.
- Pour le sable de Touggourt, la résistance après les cycles a chuté de **45,1 %**, atteignant **7,61 MPa**. Cette réduction marquée de la résistance et de la force indique une dégradation importante après les cycles.



Figure V.40 : Modes de ruptures des plaques avec renfort après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

La diminution de la résistance et de la force observée après les cycles thermiques pourrait être due à des dommages subis par le textile de verre. Les cycles thermiques peuvent altérer les propriétés mécaniques du textile, réduisant ainsi sa capacité à renforcer le mortier. En outre, ces cycles peuvent également affecter l'interaction entre la matrice de mortier et le textile de verre, compromettant l'adhérence et l'intégrité de la liaison. Ces facteurs combinés peuvent expliquer la réduction des performances observées dans les échantillons testés.

V.2.2.3.2.3 Effet de l'utilisation des fibres courtes

L'analyse a pris en compte l'effet des taux de fibres courtes (1,5% et 2%) sur la résistance à la flexion des mortiers, Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau et l'histogramme suivants :

Tableau V.15 : Résultats de la résistance à la flexion en fonction du taux de fibres après exposition aux cycles.

| | Après cycles HR | | Avant cycles HR |
|--------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | Force [Kn] | Résistance [Mpa] | Résistance [Mpa] |
| SR-0%PP | 1.32 | 14.90 | 15.27 |
| SDBV-0%PP | 0.83 | 9.30 | 14.36 |
| SDTV-0%PP | 0.68 | 7.61 | 13.88 |
| SRV-1.5%PP | 1.00 | 11.30 | 18.47 |
| SDBV-1.5%PP | 0.97 | 10.90 | 19.40 |
| SDTV-1.5%PP | 1.08 | 12.17 | 17.17 |
| SRV-2%PP | 1.23 | 13.82 | 16.30 |
| SDB-2%PP | 1.31 | 14.79 | 16.06 |
| SDT-2V%PP | 0.70 | 7.92 | 13.91 |

Les résultats du tableau sont repris dans les figures suivantes qui représentent l'histogramme des contraintes ainsi que le radar des forces :

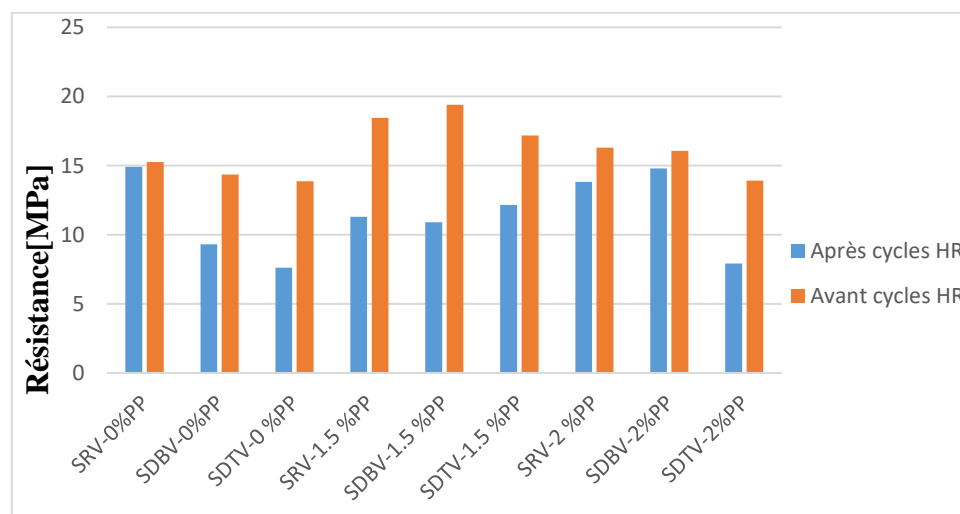


Figure V.41: Résultats de la résistance à 28 jours en fonction du taux de fibres courtes après exposition aux cycles.

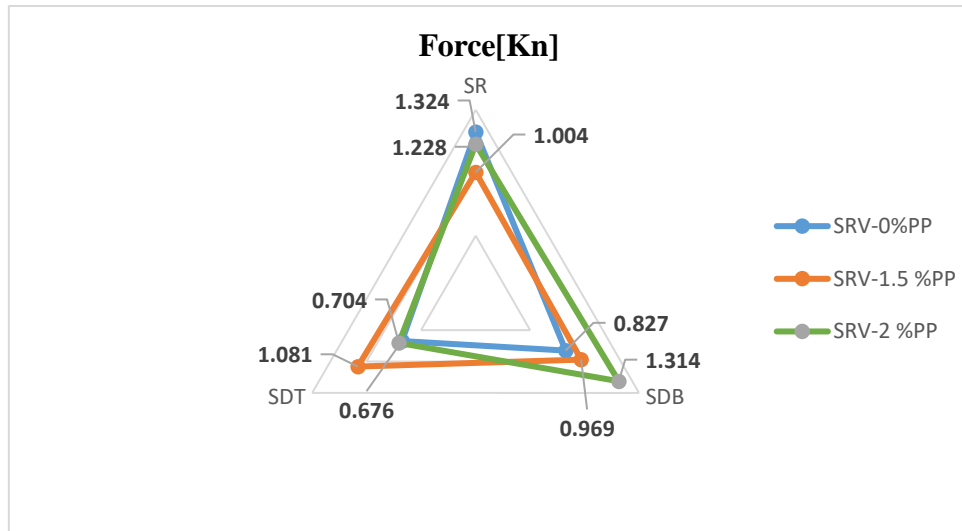


Figure V.42: Force maximale en flexion des trois types de sable avec renfort textile et fibres courtes après exposition aux cycles chaleur-pluie (HR).

- Les plaques de mortier renforcées avec 5 couches de fibres de verre et différentes proportions de fibres courtes montrent une diminution générale de la résistance et de la force après les cycles thermiques chaleur-pluie.
- Pour les éprouvettes contenant 1,5% de fibres courtes, le sable de Touggourt enregistre la meilleure résistance après les cycles, avec une valeur de **12,17 MPa**, correspondant à une diminution de **29,1 %** par rapport aux éprouvettes non soumises aux cycles thermiques. Le sable de rivière suit avec une résistance de **11,30 MPa**, affichant une réduction de **38,8 %**. Le sable de Bou Saâda, quant à lui, montre une résistance de **10,90 MPa** après les cycles, ce qui représente une baisse significative de **43,8 %**.
- Pour les éprouvettes contenant 2% de fibres courtes, le sable de Bou Saâda obtient la meilleure performance avec une résistance de **14,79 MPa**, ce qui correspond à une diminution modérée de **7,9 %**. Le sable de rivière affiche une résistance de **13,82 MPa**, avec une réduction de **15,2 %**. En revanche, le sable de Touggourt présente la plus grande diminution, avec une résistance de **7,92 MPa** et une baisse importante de **43 %**.



Figure V.43 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 1.5%PP après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda.

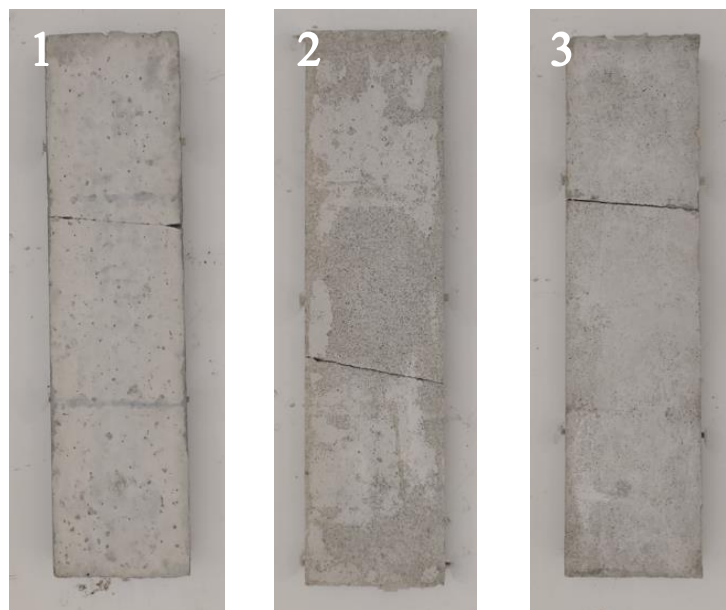


Figure V.44 : Modes de ruptures des plaques avec renfort et 2%PP après cycles HR : 1) sable de rivière, 2) sable de Touggourt et 3) sable de Bou Saâda

La diminution générale de la résistance et de la force observée après les cycles thermiques chaleur-pluie pourrait être attribuée à des dommages subis par le textile de verre. De plus, il est possible que les fibres courtes, bien qu'elles n'aient pas fondu, aient perdu certaines de leurs caractéristiques physiques essentielles, telles que la rigidité, compromettant ainsi leur efficacité en tant qu'élément renforçant du mortier.

V.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons comparé l'influence de trois types de sable (sable de Touggourt, sable de Bou Saâda et sable de rivière) sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers. Nous avons également évalué l'impact des couches de textile de verre sur ces propriétés, ainsi que l'effet de l'ajout de fibres courtes en polypropylène. En outre, nous avons examiné la durabilité des mortiers en les soumettant à des cycles de chaleur et de pluie.

- En ce qui concerne les cubes, les résultats montrent que la vitesse des ondes ultrasonores est influencée par le type de sable et le taux de fibres courtes. Le sable de Touggourt présente la structure la plus compacte. Un dosage de 2% de fibres s'avère optimal pour améliorer les propriétés des bétons à base de sables de Touggourt et de Bou Saâda.
- L'ajout de fibres courtes améliore la résistance des mortiers, bien que les taux optimaux dépendent du type de sable utilisé. Le sable de Touggourt présente des résultats optimaux avec un dosage de 1,5 % de fibres courtes, entraînant une augmentation de **29,6 %** par rapport au mortier sans fibres. En revanche, le sable de Bou Saâda montre des performances accrues avec un dosage de 2 % de fibres courtes, offrant un gain de **12 %**.
- Concernant les plaques, le renforcement par textile de verre et l'ajout de fibres courtes ont permis d'accroître significativement la résistance à la flexion du mortier ainsi que la flèche. Le sable de Touggourt a enregistré le plus grand gain en termes de résistance, suivi de près par le sable de Bou Saâda, tandis que le sable de rivière a montré un gain plus modéré.
- Le sable de Bou Saâda se distingue par sa capacité à former, avec l'ajout de 5 grilles en fibre de verre et de 1,5 % de fibres courtes, une combinaison hautement performante en flexion, optimisant ainsi considérablement la résistance du TRC. Toutefois, à un taux de 2 %, bien que tous ces sables réagissent positivement à l'ajout de fibres, une diminution de la résistance a été observée.
- Après exposition aux cycles chaleur-pluie, une augmentation de la résistance à la compression et à la flexion des mortiers a été constatée pour les trois types de sable. Cependant, avec l'utilisation du textile une réduction de la résistance à flexion du TRC a eu lieu.
- L'utilisation des fibres courtes, a affecté négativement la résistance à la compression, le meilleur comportement a été obtenu pour le cas du sable de dune de Bou Saâda. Cependant dans le cas de la sollicitation de flexion la résistance augmente avec un taux

de 1,5% pour les trois types de sable, atteignant son maximum à 2%, pour le sable de Bou Saâda. Contrairement aux autres sables ou on constate une réduction de la résistance à la compression avec l'augmentation du taux de fibres courtes a 2%.

L'utilisation du sable de dune notamment le sable Bou Saâda en remplacement du sable de rivière s'est révélée être une alternative durable dans les TRC. Les spécimens confectionnés avec ce sable, renforcés par du textile de verre avec ajout de fibres de polypropylène, ont montré des performances mécaniques égales ou supérieures à ceux du sable de rivière. Les tests de durabilité ont confirmé que ces composites conservent leurs propriétés mécaniques sous des conditions extrêmes, attestant de leur fiabilité.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de cette étude expérimentale est la valorisation du sable de dune, abondamment disponible dans le sud de l'Algérie, dans la formulation des bétons armés de textiles (TRC), en remplacement du sable de rivière surexploité. Une investigation expérimentale a été menée, constituée de l'étude des caractéristiques mécaniques des TRC conçus dans des conditions normales ainsi qu'après soumission à des cycles chaleur-pluie (HR). Les paramètres étudiés incluent la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, le comportement sous sollicitations en compression ainsi qu'en flexion quatre points. Deux types de sable de dune ont été utilisés : le sable de dune provenant de Touggourt et de Bou Saâda. Les principaux paramètres examinés incluent l'effet du renfort en textile de verre et l'incorporation de fibres courtes de polypropylène dans le mortier du TRC. Les principaux résultats de notre recherche mettent en évidence :

- Le sable de Bou Saâda, combiné avec un dosage de 2 % de fibres courtes, produit les éprouvettes les plus légères.
- Le mortier à base de sable de Bou Saâda affiche de meilleures vitesses de propagation des ondes ultrasonores pour les taux de fibres courtes de 1,5 % et 2 %, indiquant une structure interne plus compacte par rapport aux autres sables.
- Le mortier formulé avec du sable de rivière et du sable de Touggourt montre des performances optimales en résistance à la compression avec un dosage de 1,5 % de fibres courtes, le sable de Touggourt affichant un gain de **29,6 %**. Tandis que le sable de Bou Saâda atteint ses meilleures performances en termes de résistance à la compression avec un dosage de 2 % de fibres courtes, montrant un gain de **12 %** par rapport à la formulation sans fibres courtes.

Cette performance comparable des sables de Bou Saâda et de Touggourt souligne leur potentiel comme alternatives viables, permettant ainsi de réduire la dépendance au sable de rivière tout en maintenant une résistance TRC. Ces résultats démontrent l'influence significative du type de sable et du taux de fibres courtes sur les propriétés mécaniques du TRC, soulignant ainsi la nécessité d'une sélection appropriée pour optimiser les performances du matériau.

- Avec l'utilisation de 5 couches de grilles en fibre de verre et 1,5 % de fibres courtes, le sable de Bou Saâda a surpassé le sable de rivière en termes de résistance à la flexion et de ductilité, avec des gains de **99 %** et de **65,5 %** pour les dosages de 1,5 % et 2 % de

fibres courtes, respectivement. Cette amélioration significative indique une optimisation efficace des propriétés mécaniques du sable de Bou Saâda grâce à l'intégration des renforts, offrant ainsi une performance supérieure comparée au sable de rivière.

- Les éprouvettes sans renfort soumises aux cycles chaleur-pluie ont révélé une augmentation significative de la résistance à la compression et à la flexion, confirmant les effets bénéfiques de ces cycles sur le durcissement du matériau. Tandis que les éprouvettes armées de textile de verre ont enregistré une diminution de la résistance à la flexion pour tous les types de sable. Néanmoins, avec le TRC à base de sable de dune de Bou Saâda avec 2 % de fibres courtes, on a obtenu une diminution plus faible par rapport aux autres variantes.
- Le sable de Bou Saâda se distingue par sa capacité à former, avec le textile et les fibres courtes, une combinaison hautement performante en flexion. L'ajout de fibres courtes à ce sable crée une synergie qui optimise considérablement la résistance TRC. Les autres sables, bien que réagissant positivement à l'ajout de fibres, montrent une diminution de la résistance pour un taux de 2 % de fibres.

Au final, cette étude met en évidence le potentiel des composites TRC fabriqués avec du sable de dune et renforcés avec du textile de verre et des fibres de polypropylène. Ces résultats ouvrent la voie à une exploration plus large de l'utilisation du sable de dune dans le domaine des bétons armés de textiles. Comme perspectives à ce travail, nous proposons :

- L'utilisation d'autres types de renfort textile.
- L'utilisation de fibres naturelles.
- L'étude vis avis des sollicitations de cisaillement.

Références bibliographiques

- [1] YARIN, A. L., POURDEYHIMI, B., & RAMAKRISHNA, S. (2014). "Fundamentals and applications of micro-and nanofibers". Université de Cambridge.
- [2] Diana ARBOLEDA. "Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Réhabilitation : Characterization Methods". Thèse Doctorat, Université de Miami, 2014.
- [3] Jean-Marie BERTHELOT. "Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures". Editions Tec & Doc, 2005.
- [4] CHAND, Subhash, BHAT, Gajanan S., SPRUIELL, Joseph E., et al. "Structure et propriétés des fibres de polypropylène pendant le collage thermique". *Thermochimica Acta*, 2001, vol. 367, p. 155-160.
- [5] Julie BRENNAN, Remo PEDRESCHI, Pete WALKER, and Martin ANSELL. "The potential of advanced textiles for fabric formwork. Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Construction Materials". 166(CM4) :229237, 2013.
- [6] R CONTAMINE, "Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textile-mortier : application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton armé vis-à-vis de l'effort tranchant". Université Claude Bernard-Lyon I, 2011.
- [7] DELHAES, Pierre et OLRYS, Pierre. "Fibres de carbone et matériaux composites". *Actualité chimique*, 2006, vol. 295, p. 42.
- [8] M. Jassal and S. Chosh. "Aramid bres- an overview. Indian Journal of Fibre & Textile Research". Department of Textile Technology, Indian Institute of Technology, New Delhi, India. 27 :290306, September 2002
- [9] A KALAM and H ISMAIL. *Journal of reinforced plastics and composites*. 2010.
- [10] Pr. KHARROUBI. "Elaboration des fibres de verre et Optiques". Université de Djelfa. 2018.
- [11] MAIER Clive and CALAFUT Theresa. "Polypropylene : the definitive user's guide and databook". William Andrew, 1998.

- [12] IMOGEN E Napper and Richard C THOMPSON. "Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines : Effects of fabric type and washing conditions". *Marine pollution bulletin*, 112(1-2) :3945, 2016.
- [13] PINZELLI, René. "Fibres aramides pour matériaux composites. Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites", 1995, no A3985, p. A3985. 1-A3985. 12.
- [14] REYNE Maurice. "Technologie des composites". Hermes, Paris, 2e éd. édition, 1998.
- [15] KEDDAM LYDIA "Caractérisation expérimentale des mortiers à base de poudre de marbre" mémoire master, Tizi-Ouzou, université Mouloud Mammeri, 2017
- [16] Laboratoire de construction en béton IBETON – EPFL, 2019.
- [17] BRAMESHUBER, W., BANHOLZER, B. "Bond characteristics of filaments embedded in fine concrete; Textile Reinforced Structures". *Proceedings of the 2nd colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2)*; 2003
- [18] KRÜGER, M., et al. "Etudes expérimentales et numériques des propriétés d'adhérence entre béton à grains fins haute performance et textile carbone à l'aide d'essais d'arrachement." *Beiträge aus der Befestigungstechnik und dem Stahlbetonbau, Festschrift Professor R. Eligehausen* , 2002, p. 151-164.
- [19] F. SCHLADITZ, M. FRENZEL, D. EHLIG, and M. CURBACH, "Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete, " *Eng. Struct*, 2012.
- [20] HEGGER, J., WILL, N., BRUCKERMANN, Oliver, et al. "Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete". *Materials and structures*, 2006, vol. 39, p. 765-776.
- [21] TRUONG Ba Tam. "Formulation, performances mécaniques, et applications, d'un matériau TRC pour le renforcement et la réparation de structures en béton/et béton armé : Approches expérimentale et numérique". Thèse de Doctorat. Université de LYON. Décembre 2016.
- [22] BRAMESHUBER, Wolfgang (ed.). Report 36 "textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC". RILEM publications, 2006.
- [23] MOBASHER, Barzin, PELED, Alva, et PAHILAJANI, Jitendra. "Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites". *Materials and structures*, 2006, vol. 39, p. 317-331.

- [24] DJAMAI, Zakaria Ilyes. "Contribution à la caractérisation multi-échelle de composites textile mortier à inertie thermique renforcée par des matériaux à changement de phase (composite MCP-TRC)" : application au bâtiment. 2018. Thèse de doctorat. Université de Lyon.
- [25] WASTIELS, Jan. "Sandwich panels in construction with HPFRCC faces: new possibilities and adequate modelling. High performance fibre reinforced cement composites", 1999, p. 143-51.
- [26] BROCKMANN, T. et BRAMESHUBER, W. "Matrix development for the production technology of textile reinforced concrete (TRC) structural elements. In : Proceedings of the 3rd International Conference on Composites in Construction". 2005. p. 1165-1172.
- [27] HEGGER, J., HORSTMANN, M., et ZELL, M. "Applications for TRC. In : Proceedings of the 15th International Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association (GRCA) ", Prague, Czech Republic. 2008. p. 20-23.
- [28] SCHMITT, Lucie. "Durabilité des ouvrages en béton soumis à la corrosion : optimisation par une approche probabiliste". 2019. Thèse de doctorat. INSA de Toulouse.
- [29] OLLIVIER, J et VICHOT, A. "La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2008.
- [30] Guide technique édité par le LCPC en décembre 2003 intitulé recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel.
- [31] Phan, L. T. (2003). "High-temperature effects on concrete and concrete structures". Journal of Structural Engineering, 129(10), 1400-1408.
- [32] Groupement belge du béton Cours de technologie du béton. Bruxelles, GBB, 2006.
- [33] NBN B 15-001. Béton : Spécification, performances, production et conformité. Institut Belge de Normalisation, 2024.
- [34] NBN EN 206-1 Béton. Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité. Institut Belge de Normalisation, 2001.
- [35] Un fascicule édité par le LCPC en juin 1994 intitulé : recommandations pour les préventions des désordres dus à l'alcali-réaction.

- [36] BEDDIAR, Abdelhakim. "Renforcement des poutres en béton armé a l'aide de matériaux composites". Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra. 2004.
- [37] BERKE, N.S., ROBERTS, L.R. "Sea Water Attack on Concrete." ACI SP-65, American Concrete Institute, 163-177. 1989
- [38] ASTM D7705-11. "Standard Test Method for Evaluating the Durability of Concrete Using Sodium Chloride Solution". ASTM International. 2011.
- [39] ASTM C666-15. "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing". ASTM International. 2015.
- [40] NBN EN 12467. "Ciment pour mortier - Exigences et méthodes d'essai". Institut Belge de Normalisation. 1998.
- [41] BOUZEBODJA F, SI SALEM A, ALI AHMED C, "Effet of chopped fibres addition on the behaviour of a new textile reinforced concrete under flexural loading". IJRST, 2023.
- [42] I. G. COLOMBO, A. MAGRI, G. ZANI, M. COLOMBO, and M. DI PRISCO, "Erratum to: Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters". Mater. Struct., vol. 46, no. 11, pp. 1953–1971, 2013.
- [43] B. MOBASHER, A. PELED, and J. PAHILAJANI, "Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites". Mater. Struct., vol. 39, no. 3, pp. 317–331, 2006.
- [44] ALMA'AITAH, Mohammad, GHIASSI, Bahman, et DALALBASHI, Ali. "Durability of textile reinforced concrete: existing knowledge and current gaps". Applied Sciences, vol. 11, no 6, p. 2771. 2021.
- [45] DONNINI, J. "Durabilité des systèmes FRCC en verre : effets de différents environnements sur les propriétés mécaniques". Composer. Partie B, 2019.
- [46] MACHOVEC, J. ; REITERMAN, P. "Influence de l'environnement agressif sur les propriétés de traction du béton armé textile". Acta Polytech, 58, 245-252. 2018.
- [47] DE MUNCK, M. ; EL KADI, M. et al. "Influence des charges environnementales sur le comportement à la traction et à la fissuration des composites cimentaires renforcés de textiles". Constr. Construire. Maître. 181, 325-334. 2018.
- [48] SEGGAR Razika, GOUSSAADA Syla. "Etude expérimentale de mortier à hautes performances armé de textiles". Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. 2020.

- [49] SPA Biskria, fiche technique des produits cimentaires, <https://www.spabiskria.com>, 2024.
- [50] F. BOUZEBODJA and A. SI SALEM, "Experimental investigation on flexural behavior of textile-reinforced concrete: Effect of reinforcement type and dune sand addition," *World Journal of Engineering*, ahead-of-print, 2023. <https://doi.org/10.1108/WJE-05-2023-0139>.
- [51] F. BOUZEBODJA, et al., "Valorization of natural materials in the composition of textile-reinforced concrete: Mechanical characterization," *Advances in Science and Technology & Innovation, IEREK Series for Interdisciplinary Studies*, ahead-of-print, 2024.
- [52] F. BOUZEBODJA and C. A. AHMED, "Modeling of the interface between the concrete and the fibers grid in concrete slab," *Journal of Building Materials and Structures*, vol. 5, no. 1, pp. 137-146, 2018. <https://doi.org/10.34118/jbms.v5i1.52>
- [53] FERHANI Yacine, AIT MENGUELLET Jugurtha, "Caractérisation mécanique d'un mortier à base de sable de dune arme de textile et fibres courtes", 2023.
- [54] MAZEGHRANE Djedjiga, ARAB Yasmine, "Etude expérimentale d'un mortier à base de sable de dune, arme de textile de fibres de verre avec ajout de fibres courtes", 2023.
- [55] BOUDJEMA Maryem "Etude expérimentale de mortier à hautes performances destiné à la formulation des TRC et TRM (Textile Reinforced Concret/Mortar) ", 2020.
- [56] HAMADACHE Lynda, "Etude expérimentale de dalles en béton renforcées par matériaux composites soumises au poinçonnement", 2016.

Résumé

Le béton armé de textile (TRC) est un matériau innovant, composé d'une matrice de béton finement granulée et de fils résistants à la corrosion, tels que le verre alcali-résistant, le carbone et le basalte. Face à la surexploitation et la rareté du sable alluvionnaire, ce mémoire à caractère expérimental explore l'influence de la substitution de ce dernier par le sable de dune disponible en quantités inépuisables au sud algérien, sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité d'un nouveau TRC. Les tests portent sur l'effet de l'utilisation de différents types de sable (rivière, Bou Saada et Touggourt) et l'ajout de fibres courtes en polypropylène (1,5% et 2%), sur le comportement en compression à différents âges (7,14 et 28 jours) et en flexion quatre points du TRC. Dans le but d'étude de la durabilité, les mêmes paramètres ont été étudiés après soumission à des cycles chaleur -pluie (HR). Les résultats ont montré que les sables de dune (Bou Saada et Touggourt) forment avec le textile et les fibres courtes, une combinaison hautement performante. En termes de durabilité, ces matériaux, notamment le sable de Bou Saada, préservent de manière plus efficace les caractéristiques mécaniques du TRC. Cette étude démontre l'efficacité de ces sables respectueux de l'environnement, dans l'optimisation des performances des TRC.

Mot clés : Mortier armé de textile, compression, flexion, textile de verre, fibres courtes, durabilité des TRC.

Abstract

Textile reinforced concrete (TRC) is an innovative material, consisting of a finely granulated concrete matrix and corrosion-resistant yarns, such as alkali-resistant glass, carbon, and basalt. Confronted to the overexploitation and scarcity of alluvial sand, this experimental study explores the effect of substitution of river sand, by dune sand available in vast quantities in southern Algeria, on the mechanical characteristics and durability of a new TRC. The tests focus on the effect of the use of different types of sand (river, Bou Saada and Touggourt) and the addition of short polypropylene fibers (1.5% and 2%), on the compression behavior at different ages (7, 14 and 28 days) and on flexural behavior of the TRC. For studying durability, the same parameters were studied after subjecting to heat-rain (HR) cycles. The results showed that the dune sands (Bou Saada and Touggourt) form a high-performance combination with the textile and the short fibers. In terms of durability, these materials, especially the Bou Saada sand, preserve the mechanical characteristics of the TRC more effectively. This study demonstrates the efficacy of these Eco-Friendly sands in optimizing the performance of CRTs.

Keywords : Textile-reinforced mortar, compression, bending, glass textile, short fibers, Durability of TRC