
Influence du procédé de pré-imprégnation sur la performance mécanique d'un composite verre/matrice ettringitique

Omayma Homoro ^a, Marie Michel^{a*}, Thouraya Baranger ^a

^a Université de Lyon, Université Lyon 1, LMC2-EA7427, F-69622 Villeurbanne, France.

* Email: Marie.Michel@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. Les matériaux composites textile-micro béton (TRC) retiennent actuellement une grande attention dans le domaine du renforcement et réparation des structures en béton, maçonnerie ou bois, grâce à leurs multiples intérêts (grande résistance en traction, non toxicité, recyclabilité, etc.). Cependant, l'utilisation d'un renfort multi-filaments avec du ciment est difficile car la pénétration des particules de ciment reste limitée aux filaments externes, ce qui rend faible l'adhérence fil/matrice et par conséquent la performance mécanique du composite. L'objectif de ce travail est d'améliorer cette adhérence en pré-imprégnant le fil par une poudre minérale selon deux procédés différents : pré-imprégnation classique par voie humide et pré-imprégnation par voie sèche basée sur l'application d'un champ électrostatique alternatif. Une campagne d'essai d'arrachement d'un fil de verre AR enrobé dans une matrice ettringitique a été réalisée. Trois types d'éprouvettes ont été testés : fil sec (S), fil pré-imprégné par voie humide (PIH) et fil pré-imprégné par voie sèche (PIS) par différents types de poudre. Quatre longueurs d'enrobage ont été testées et leur effet a été analysé.

ABSTRACT. Textile-reinforced concrete (TRC) materials are currently receiving great attention for strengthening or repair of concrete, masonry and wood structures, owing to their many advantages (high tensile strength, nontoxicity, recyclability, etc.). However, the use of multifilament reinforcements for cements is challenging because the cement particles cannot fully penetrate the space between the inner filaments, which leads to the decrease of the yarn/matrix bond and consequently the mechanical performance of the composite. The objective of this work is to improve this bond by pre-impregnating the glass yarn with mineral powder according to two different processes: Conventional pre-impregnation in a wet way and pre-impregnation in a dry way, which is based on the use of an alternating electrostatic field. The pullout response of AR glass yarn embedded in ettringitic matrix has been investigated. Three types of specimens have been tested: a dry yarn (S), a yarn pre-impregnated in a wet way (PIH) with matrix particles, and a yarn pre-impregnated in a dry way (PIS) with different types of powder. Four embedded lengths have been experimented and their effect on the result is discussed.

MOTS-CLÉS : Fil de verre multi-filaments, matrice ettringitique, pré-imprégnation, pull-out, adhérence fil/matrice.

KEY WORDS : Glass multifilament yarns, ettringitic matrix, pre-impregnation, pullout, yarn/matrix bond.

1. Introduction

Les matériaux composites TRC sont constitués d'une matrice à base de ciment contenant des granulats très fins et des fils multi-filaments continus de verre alcali résistant (AR), de carbone, de polymère ou d'autres matériaux. Grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et durabilités, ces matériaux peuvent être très appropriés pour plusieurs applications en génie civil.

En général, les particules de ciment ont un diamètre plus grand que l'espace entre les filaments constituant le fil. Il en résulte une microstructure dans laquelle les filaments externes sont en contact direct avec la matrice, alors que les filaments internes restent relativement libres (Figure 1) [ZHU 13]. Afin d'obtenir une meilleure performance du composite, il est nécessaire d'assurer un bon transfert des forces de la matrice à l'ensemble des filaments du fil notamment les filaments internes, cela peut être obtenu en remplissant les espaces entre les filaments par des charges minérales ou polymères [Xu 04], [Dvo 16]. Dans le domaine de préfabrication, la pré-imprégnation de textiles par voie humide par des poudres minérales est classiquement utilisée pour améliorer la performance des composites. Cependant, dans le domaine de renforcement et réparation de structures en béton ou d'autres matériaux traditionnels, cette technique ne peut pas être appliquée. Elle peut être remplacée par la nouvelle technique de pré-imprégnation par voie sèche, décrite dans la suite du présent article.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement à l'arrachement d'un fil de verre AR, enrobé dans une matrice ettringitique, pré-imprégné par différents types de poudre (minérale et organique) selon deux méthodes différentes: (i) pré-imprégnation classique par voie humide et (ii) pré-imprégnation par voie sèche qui se base sur l'utilisation d'un champ électrostatique alternatif permettant la pénétration de la poudre à l'intérieur du fil. L'effet de la longueur d'enrobage a également été évalué dans cette étude.

2. Procédure expérimentale

Cette partie décrit les propriétés des matériaux utilisés, la méthode de fabrication des éprouvettes selon les deux procédés de pré-imprégnation, et le protocole expérimental.

2.1. Matériaux

Le fil utilisé dans cette étude est un roving (fil fabriqué par assemblage de filaments continus) de verre AR. Les filaments sont assemblés directement en fil par l'ensimage (direct roving). Les principales caractéristiques du fil sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés physico-mécaniques du fil de verre AR données par le fabricant

Diamètre des filaments	Masse volumique	Masse linéique	Résistance en traction	Module d'élasticité	Point de ramollissement
19 μm	2.68g/cm ³	1200 Tex	1700 MPa	72 GPa	860 °C

La matrice cimentaire K3 utilisée est constituée d'un squelette granulaire (combinaison de silice broyée, de fillers calcaires, et d'additions silico-alumineuses) de taille maximale de 300 μm , d'un liant ettringitique constitué de ciment alumineux (CAC), de sulfate de calcium et de ciment Portland et d'un système d'adjuvantation comprenant des agents modificateurs de prise et une association d'agents de rhéologie pour assurer la fluidité et la stabilité de la matrice. La consistance de cette matrice a été mesurée par l'essai à la table d'écoulement suivant la norme EN-423-2 :2016, l'étalement obtenu est de 18.5 cm.

La matrice K3 se caractérise par un durcissement et une montée en résistance rapides grâce à la nature de son liant qui est un liant ettringitique.

2.2. Préparation des éprouvettes

Des éprouvettes cylindriques de 34 mm de diamètre ont été testées dans cette étude, constituées d'un fil de verre rectiligne qui passe par leur axe longitudinal, de la matrice cimentaire K3 qui enrobe le fil, de deux tiges métalliques filetées de 4 mm de diamètre et du talon composite collé à l'extrémité libre du fil (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Des tubes PVC ont été utilisés pour le moulage des éprouvettes. Chaque tube a été posé sur une plaque de moulage préalablement percée de 3 trous circulaires de 4 mm de diamètre: un trou situé au centre de la plaque permettant le passage du fil sans endommagement des filaments et deux autres trous pour les tiges filetées faisant avec le trou central une distance correspondant à la moitié du rayon du cylindre. Une colle a été appliquée à la jonction du tube et de la plaque de moulage afin d'assurer l'étanchéité lors du coulage de la matrice. Un

dispositif spécifique a été utilisé pour maintenir la position verticale du fil pendant le coulage. Au fur et à mesure du coulage de la matrice, les moules ont été mis en vibration pour faire remonter les bulles d'air à la surface. La prise de l'éprouvette a été effectuée en milieu ambiant sous la protection d'une couche de polyane pour éviter l'évaporation de l'eau et ainsi limiter le retrait prématuré de la surface supérieure de l'éprouvette. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées. Ensuite deux plaques composites ont été collées à l'extrémité libre du fil au moyen de résine époxy (Eponal 380). Les éprouvettes ont été ensuite conservées à température ambiante pendant 6 jours avant d'être testées.

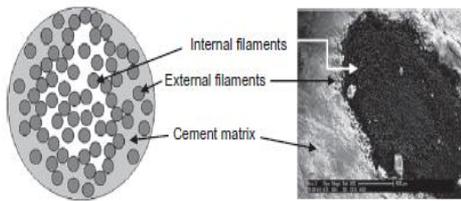


Figure 2. Visualisation des filaments intérieurs non imprégnés et extérieurs imprégnés [ZHU.13]



Figure 1. Eprouvettes cylindriques de l'essai d'arrachement

2.3. Méthodes de pré-imprégnation

Afin d'améliorer l'adhérence fil/matrice, le fil a été pré-imprégné, avant de le fixer dans le moule, par différents types de poudre selon deux procédés différents :

- Pré-imprégnation par voie humide: le fil est saturé par la matrice K3 par action manuelle.
- Pré-imprégnation par voie sèche: Cette nouvelle technologie développée par l'entreprise Fibroline permet une pénétration rapide et homogène de la poudre dans les porosités du fil. Le principe de cette technique est présenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Cinq types de poudre mélangés avec des charges de silices permettant d'assurer leur fluidité (96% poudre + 4% charges de silice) ont été saupoudrés sur des segments de fil de verre. Ensuite, un champ électrique alternatif a été appliqué perpendiculairement au système fils/poudre par l'intermédiaire d'un jeu d'électrodes raccordées aux pôles respectifs d'un générateur électrostatique pendant une durée de quelques secondes. Les fils pré-imprégnés ont été pulvérisés d'eau avant le coulage de la matrice cimentaire.

2.4. Configurations expérimentales

Plusieurs configurations expérimentales ont été envisagées afin de déterminer l'influence de différents paramètres (méthode de pré-imprégnation, type de poudre de pré-imprégnation et longueur d'enrobage de fil dans la matrice) sur le comportement à l'arrachement du fil :

- S : fil sec au moment du coulage
- PIH.K3 : fil pré-imprégné par voie humide par la matrice cimentaire K3;
- PIS.K3 : fil pré-imprégné par voie sèche par la matrice cimentaire K3;
- PIS.B : fil pré-imprégné par voie sèche par le liant la matrice cimentaire K3;
- PIS.B+F : fil pré-imprégné par voie sèche par le liant et les charges de la matrice cimentaire K3;
- PIS.SAC : fil pré-imprégné par voie sèche par le liant mono-composant CSA (ciment sulfo-alumineux) ;
- PIS.P : fil pré-imprégné par voie sèche par la poudre polymère (acétate de polyvinyle).

Quatre longueurs d'enrobage ($L_e = 2, 5, 7$ et 10 mm) ont été étudiées. Au moins quatre éprouvettes ont été testées pour chaque configuration.

2.5. Protocole expérimental

Les essais d'arrachement ont été conduits en utilisant une machine de traction universelle Zwick/Roell de capacité 65 KN (Figure 4.a). Une plaque métallique liée à l'éprouvette et la machine au moyen du système illustré sur la Figure 4.b a été utilisée. L'extrémité libre du fil a été fixée par serrage du talon composite dans le mors inférieur. La vitesse de déplacement de la traverse est fixée à 1 mm/min.

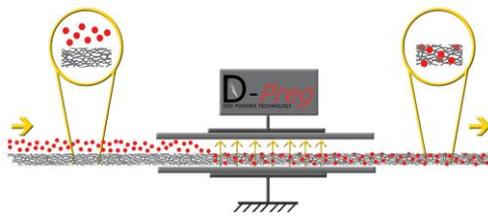


Figure 3. Principe du procédé d'imprégnation par voie sèche Fibroline [CAR 16]

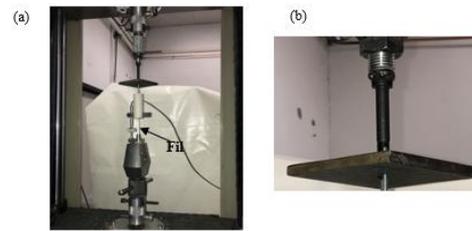


Figure 4 : (a) dispositif expérimental d'un essai d'arrachement ;(b) plaque métallique

3. Résultats et discussions

3.1. Courbes d'arrachement

La Figure 5(a) montre les courbes d'arrachement représentatives pour chaque longueur d'enrobage dans le cas d'un fil Sec. Toutes les courbes commencent par une partie linéaire où le fil résiste à l'arrachement par la contrainte de cisaillement élastique, ce comportement se poursuit jusqu'à atteindre approximativement 70 à 95% de la charge maximale (en fonction du type de l'éprouvette), où les liaisons filaments-matrice commencent à rompre. Cette rupture se traduit par la rupture en traction des filaments d'une part (filaments externes qui sont bien imprégnés par la matrice cimentaire), et par la rupture de l'adhérence filament-matrice suivie par le glissement des filaments d'autre part (filaments internes qui sont peu ou non imprégnés dans la matrice). La rupture successive de ces liaisons entraîne une diminution de la pente de la partie ascendante de la courbe jusqu'à atteindre l'effort maximum. La partie descendante de la courbe est caractérisée par une chute importante et nette de l'effort d'arrachement accompagnée de la rupture des dernières liaisons entre les filaments et la matrice jusqu'à atteindre un effort seuil (de l'ordre de 40 N). Une fois que toutes les liaisons filament-matrice sont rompues, les filaments internes glissent et transfèrent la contrainte seulement à travers leur surface de contact.

La Figure 5(b) montre les courbes d'arrachement représentatives pour chaque longueur d'enrobage dans le cas d'un fil PIH.K3. Les courbes sont constituées de deux parties. La première, correspondant à la partie ascendante de la courbe, présente trois phénomènes : un adoucissement initial qui résulte de la mise en tension progressive des filaments ayant des longueurs légèrement différentes, suivi d'un comportement linéaire où tous les filaments sont chargés, et ensuite une diminution de la pente à partir des premières ruptures des filaments. En effet, ce sont les filaments les plus courts qui se rompent les premiers, ensuite l'effort se répartit entre les filaments moins chargés jusqu'à atteindre l'effort maximal où un grand nombre de filaments sont cassés, ce qui mène à une chute brutale de l'effort représenté par la deuxième partie de la courbe. La rupture des liaisons filaments-matrice dans ce cas correspond seulement à la rupture en traction des filaments. Aucun glissement des filaments n'a été observé, ce qui signifie que l'adhérence fil-matrice a été améliorée par ce traitement.

Quelle que soit la poudre utilisée pour la pré-imprégnation par voie sèche (PIS.L, PIS.L+Ch, PIS.K3, PIS.CSA), le comportement est similaire à celui d'un fil S caractérisé par un glissement des filaments pour un effort de l'ordre de 16N. Hormis pour le polymère (PIS.P), l'allure de la courbe est similaire à celle d'un fil PIH, caractérisée par une chute brutale de l'effort en raison de la perte d'adhérence entre les charges de polymères et la matrice cimentaire.

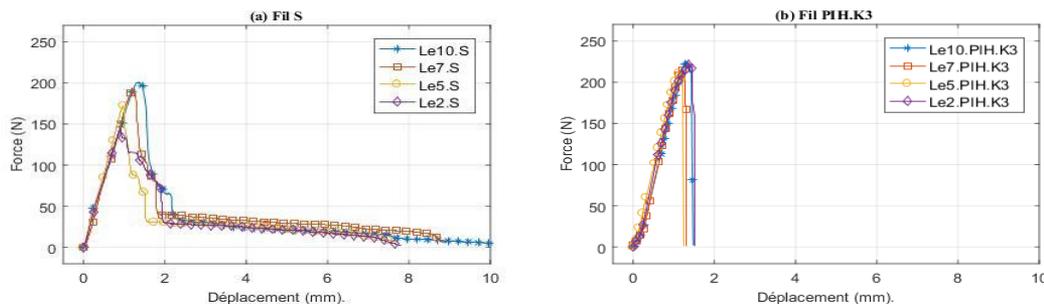


Figure 5. Courbes d'arrachement (a) fil sec, (b) fil PIH.K3 pour différentes longueurs d'enrobage

3.2. Influence de la longueur d'enrobage Le

L'évolution de l'effort maximal en fonction de la longueur d'enrobage pour les configurations S, PIH.K3, PIS.L, PIS.CSA et PIS.P est présentée sur la Figure 6(a). L'effort maximal d'un fil S augmente quand la longueur

d'enrobage augmente, cette augmentation est plus importante lorsque Le varie de 2 à 5 cm (gain de 50%), au-delà de 5 cm, cette augmentation devient faible (gain de 6%). Cela était attendu car une grande longueur d'ancrage nécessite une grande force pour rompre l'adhérence fil-matrice. Le même effet est observé pour un fil pré-imprégné à sec mais avec une légère augmentation de l'effort maximal moyen au-delà de 5 cm. Dans le cas d'un fil PIH, la longueur d'enrobage n'a pas un effet significatif sur l'effort maximal si on prend en considération la dispersion des valeurs. Cela est expliqué par le mode de rupture des éprouvettes correspondant à une rupture par traction du fil dont la résistance ne dépend pas de la longueur d'enrobage.

3.3. Influence de la méthode de pré-imprégnation

L'effet de la méthode de pré-imprégnation ainsi que le type de poudre utilisée sur la force d'arrachement pour une longueur d'enrobage de 5cm est montré sur la Figure 6(b). Les résultats révèlent que la pré-imprégnation par voie humide présente la plus grande valeur de l'effort d'arrachement avec un gain de 25 % par rapport au fil S, grâce à la bonne pénétration des particules de ciment au cœur du fil. La pré-imprégnation par voie sèche a permis également une augmentation de l'ordre de 7% de l'effort par rapport au fil S mais seulement en utilisant le liant, le CSA et les charges polymères. Ainsi, le procédé de pré-imprégnation et le type de poudre utilisé jouent un rôle important sur la résistance à l'arrachement. L'ajout des charges et des additifs a un effet négatif sur l'adhérence fil-matrice à cause de la taille des particules. Les charges de polymères ont amélioré la résistance de l'éprouvette mais présentent une faible adhérence aux matrices cimentaires.

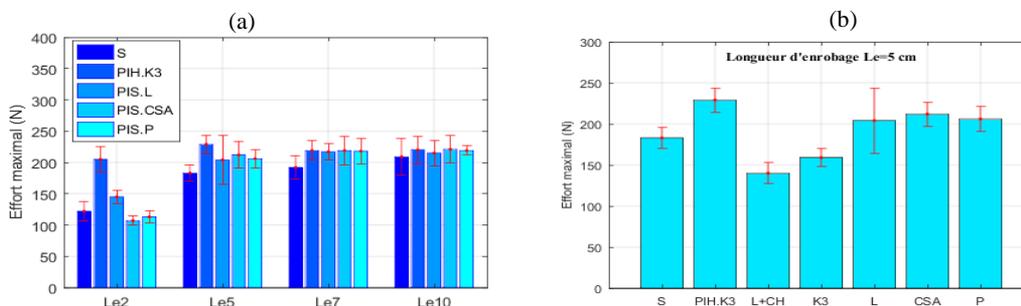


Figure 6. (a) : Effet de longueur d'enrobage sur l'effort maximal en fonction du mode de traitement du fil; (b) : Effet de pré-imprégnation du fil sur l'effort maximal pour une longueur d'enrobage de 5 cm

4. Conclusion

En se basant sur les résultats et les analyses présentés dans les sections précédentes, trois conclusions peuvent être tirées : (i) la longueur d'enrobage a un effet sur la résistance à l'arrachement d'un fil S et PIS notamment dans le cas des petites longueurs. Cependant, la résistance maximale d'un fil PIH reste relativement constante car elle correspond à la résistance en traction du fil. (ii) le procédé d'imprégnation par voie humide conduit au meilleur comportement d'arrachement, ensuite vient la pré-imprégnation par voie sèche en utilisant le liant, le CSA et les charges polymères. Cependant les polymères présentent une faible adhérence avec la matrice cimentaire. (iii) L'ajout des charges et des additifs dans la poudre de pré-imprégnation à sec a diminué l'adhérence fil-matrice. Bien que la pré-imprégnation par voie humide présente la meilleure amélioration de l'adhérence fil/matrice, son utilisation reste limitée aux éléments préfabriqués simples, contrairement à la pré-imprégnation par voie sèche qui permet de réaliser des éléments de construction de grandes tailles in situ.

5. Bibliographie

- [CAR 16] CARAMARO L., MARDUEL J., « Imprégnation voie sèche - Procédé d'imprégnation électrostatique de la société Fibroline », *Techniques de l'Ingénieur*, 2016.
- [DVO 16] DVORKIN D., PELED A., « Effect of reinforcement with carbon fabrics impregnated with nanoparticles on the tensile behavior of cement-based composites », *Cement and Concrete Research*, vol. 85, 2004, p. 28-38.
- [MEC 13] MECHTCHERINE V., « Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures », *Construction and Building Materials*, vol. 41, 2013, p. 365-373.
- [Xu 04] XU S., KRUGER M., REINHARDT W., « Bond characteristics of carbon, alkali resistant glass, and aramid textiles in mortar », *Journal of materials in civil engineering*, vol. 16, n° 4, 2004, p. 356-364.
- [ZHU 13] ZHU D., MOBASHER B., PELED A., « Experimental study of dynamic behavior of cement-based composites », *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 2, n° 1, 2013, p. 1-12.