

Etude des paramètres de l'imprégnation d'un fil multifilamentaire par des matrices cimentaires

Mis en forme

Anne-Claire Slama¹,

¹ CY Cergy Paris Université, L2MGC, 5 Mail Gay-Lussac, 95000 Neuville-sur-Oise, France

RESUME Le mécanisme complexe d'imprégnation du fil multifilamentaire par une matrice cimentaire a été étudié afin de pouvoir prédire le comportement des composites de ce type. En particulier, les paramètres caractérisant cette imprégnation ont été quantifiés expérimentalement, notamment par observation du fil enrobé. Pour cela, des tests d'arrachement ont été réalisés sur des fils multifilamentaires enrobés dans différentes matrices cimentaires, sur différentes longueurs d'enrobage, et une méthode de double imprégnation par de la résine suivie d'imagerie confocale a été mise en place. Cela a permis d'améliorer les modèles existants en permettant une définition expérimentale de certains paramètres de l'imprégnation, notamment le nombre de filaments imprégnés, qui est déterminant pour le comportement mécanique, comme notre étude l'a montré.

Mots-clefs fil multifilamentaire, matrice cimentaire, imprégnation, arrachement, microscopie confocale

I. INTRODUCTION

Le renforcement du béton par des armatures est une technologie bien connue et très utilisée pour pallier aux faibles performances du béton en traction (Breccolotti and Materazzi, 2013). Cependant, d'autres technologies plus récentes existent également, à base de renforts textiles, et elles se développent de plus en plus (Brameshuber, 2006). Ces renforts textiles peuvent avoir des structures variées, mais la plus prometteuse est le renfort par des fils multifilamentaires longs et continus, qui permettent de réaliser des grilles textiles et de renforcer la matrice cimentaire dans la direction des sollicitations. Un inconvénient vient cependant freiner le développement de cette technologie : le fil multifilamentaire est composé d'un millier de filaments, et cette structure complexe entraîne une imprégnation aléatoire du fil par la matrice cimentaire, qui est également une structure hétérogène. En effet, les particules solides de la matrice sont de taille supérieure ou égale aux espaces interfilamentaires du fil, provoquant une interpénétration difficile des deux matériaux. Or, il a été établi que cette imprégnation est cruciale pour les propriétés mécaniques du composite obtenu (Alijewfi et al., 2010; Homoro et al., 2019; Peled et al., 2008). Afin de mieux comprendre ce mécanisme complexe d'imprégnation, les paramètres qui l'influencent, et son impact sur le comportement mécanique, différents essais ont été menés, complétés par la mise en place d'une technique d'observation microscopique innovante. Des essais d'arrachement ont ainsi été menés sur des éprouvettes composées d'un fil multifilamentaire enrobé, sur différentes longueurs d'enrobage,

dans des matrices cimentaires avec différentes propriétés mécaniques et rhéologiques. Une double imprégnation par de la résine suivie d'une observation microscopique au microscope confocal ont été réalisées après l'arrachement afin de caractériser l'imprégnation du fil pour chaque éprouvette, et de pouvoir relier les caractéristiques de l'imprégnation aux résultats mécaniques à l'arrachement. Ainsi, un modèle phénoménologique a pu être mis en place, utilisant majoritairement des données mesurées physiquement sur chaque éprouvette plutôt que des paramètres obtenus par calage sur les courbes expérimentales, afin de pouvoir prédire efficacement le comportement mécanique à l'arrachement de ce type de composites en fonction de l'imprégnation du fil.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Fil multifilamentaire et matrices cimentaires

Un seul fil multifilamentaire est utilisé dans cette étude, car le but est d'étudier principalement l'influence des propriétés des matrices cimentaires sur l'imprégnation du fil. Ce fil multifilamentaire est un roving direct de verre alcali-résistant (AR), adapté à la mise en place dans une matrice cimentaire. Il est composé d'environ 1600 filaments, de 27 μm de diamètre chacun présentant une faible cohésion puisque l'ensimage est de 0.8%. Le fil présente un titre de 2400 Tex, ce qui est élevé, mais permet ainsi un endommagement plus faible lors de la mise en place et une imprégnation plus aléatoire par la matrice cimentaire.

Les matrices utilisées sont des mortiers caractérisés mécaniquement par leur résistance à la compression et rhéologiquement par leur maniabilité. Elles ont été sélectionnées afin d'avoir des matrices de résistance similaire mais rhéologie différente et inversement, et ainsi pouvoir bien séparer l'influence de chacun de ces facteurs sur l'imprégnation du fil par la matrice cimentaire. Dans le même objectif, une partie du ciment a été substituée par du filler calcaire dans certaines matrices et un adjuvant superplastifiant a été additionné.

TABLEAU 1. Composition et propriétés des matrices utilisées

Matrice	Ciment en % du liant	Rapport V_f/V_t	Rapport A/L	Maniabilité (s)	Résistance en compression (MPa)
M57-00 100C	100	1,57	0,00	10	58 \pm 2
M57-05 100C	100	1,57	0,05	4	55 \pm 3
M57-10 100C	100	1,57	0,10	2	59 \pm 3
M41-20 100C	100	1,41	0,20	10	68 \pm 2
M41-30 100C	100	1,41	0,30	4	61 \pm 4
M57-00 50C	50	1,57	0,00	3	27 \pm 1
M57-00 30C	30	1,57	0,00	4	9,3 \pm 0,2
M48-00 30C	30	1,48	0,00	6	10,5 \pm 0,2
M41-00 30C	30	1,41	0,00	8	12,7 \pm 0,1

B. Fabrication des éprouvettes et essais d'arrachement

Les éprouvettes (visibles en figure 1) sont réalisées dans des moules 4*4*16 en acier, avec des trous sur les parois latérales pour permettre le passage des fils. Les fils sont mis en légère tension et le mortier est coulé en deux couches, chaque couche étant compactée à l'aide de 60 coups à la table à chocs. Après 24h, les éprouvettes sont démoulées et conservées 28 jours dans l'eau, puis sciées à leur longueur d'enrobage et préparées pour l'essai d'arrachement, en collant un talon en plaquettes epoxy à l'extrémité de la longueur libre de fil, qui est gardée à 10 cm pour toutes les éprouvettes.

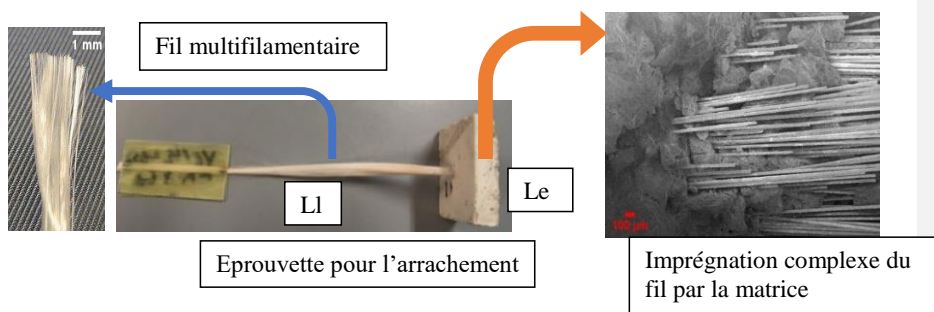


FIGURE 1. Epreuve réalisée pour l'arrachement, avec ici $L_e = 0,7\text{cm}$

L'essai d'arrachement est réalisé sur une presse Instron à 2 mm/min, à l'aide d'un dispositif spécial pour maintenir les éprouvettes. Le déplacement de la traverse ainsi que la charge sont enregistrés. Les courbes charge / déplacement sont ensuite tracées puis, après lissage par moyenne pondérée des extrema locaux, différents paramètres mécaniques sont calculés sur ces courbes, comme la valeur de la charge au pic P_{max} .

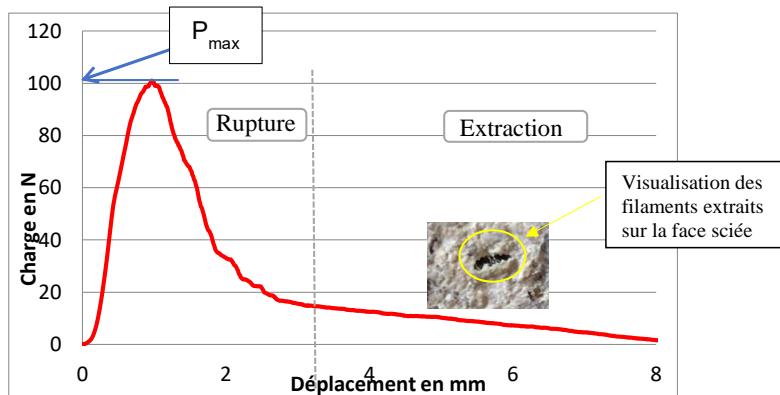


FIGURE 2. Comportement caractéristique à l'arrachement à 28j (épreuve M57-00 $L_e = 0,7\text{ cm}$)

Deux comportements sont remarqués lors des essais d'arrachement : soit un glissement d'une partie des filaments suivi d'une extraction tout le long de la longueur d'enrobage ou une rupture du fil au niveau de l'interface longueur libre / longueur enrobée (L_l / L_e). Ce dernier mode a été rapproché au comportement en traction du fil non enrobé, et n'est donc pas considéré comme un

arrachement dans la suite. Seules les éprouvettes présentant un glissement et une extraction d'une partie des filaments sont prises en compte et soumises à la double imprégnation expliquée par la suite. Ce comportement est présenté en figure 2.

C. Double imprégnation et observations microscopiques

La double imprégnation a été mise en place afin de pouvoir visualiser par microscopie confocale l'imprégnation du fil après l'essai d'arrachement.

Dans un premier temps, une résine colorée à la rhodamine est déposée à la seringue au niveau de l'interface L_i / L_e , puis, après la prise de cette résine, la matrice cimentaire est dissoute. Le moulage récupéré est imprégné à nouveau dans de la résine, colorée cette fois-ci à la fluorescéine. L'échantillon obtenu ensuite est observé au microscope confocal, avec un polissage successif à différentes sections.

Cette étude post-arrachement permet de déterminer 3 zones dans le fil, caractérisée chacune par leur degré d'imprégnation. La première zone contient les filaments très peu enrobés par la matrice cimentaire et qui ont été extraits lors de l'arrachement. Cette zone est donc vide de filament et remplie uniquement de résine colorée à la rhodamine. Une deuxième zone contient les filaments peu ou pas imprégnés mais qui n'ont pas été extraits lors de l'essai. La troisième zone contient les filaments totalement imprégnés par la matrice cimentaire. Ces zones sont visibles sur la figure 3.

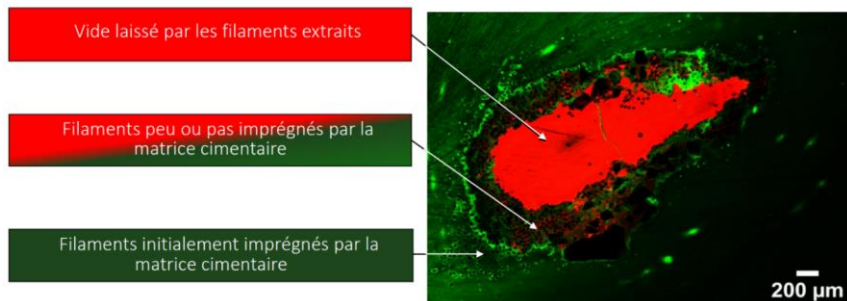


FIGURE 3. Différentes zones observées dans la section d'un échantillon doublement marqué observé au microscope confocal

Cette identification des différentes zones est effectuée sur différentes sections le long de la longueur d'enrobage. Cela permet un suivi de l'imprégnation le long de cette longueur, puisque l'aspect aléatoire de cette imprégnation ne se retrouve pas uniquement dans la section du fil mais également dans sa longueur. L'aire et le périmètre de ces zones sont mesurés à l'aide du logiciel ImageJ. Par une méthode de machine learning, également disponible sur ImageJ, les filaments restants après arrachement sont décomptés, et cela séparément pour chaque zone présentant des filaments.

III. RESULTATS

Malgré une variabilité importante des résultats mécaniques, mise en évidence par une étude de la répétabilité de l'essai d'arrachement, certaines corrélations peuvent être déduites.

Tout d'abord, il est nécessaire de séparer le comportement des éprouvettes avec une matrice 100% ciment et celles avec une matrice contenant une part de filler calcaire en substitution du ciment.

Pour les éprouvettes avec une matrice 100% ciment (M57-00 100C, M57-05 100C, M57-10 100C, M41-20 100C, M41-30 100C), seules de faibles longueurs d'enrobage ont pu être testées (0,7 cm et 1 cm), du fait de la forte résistance mécanique de la matrice. Pour ces éprouvettes, seule la résistance mécanique de la matrice ainsi que la présence de superplastifiant semblent influencer les résultats mécaniques à l'arrachement et donc l'imprégnation du fil.

Plus la matrice a une résistance en compression élevée, plus les valeurs de P_{\max} moyens pour les éprouvettes à l'arrachement sont élevées comme le montre la figure 4. La présence de superplastifiant induit également une augmentation de ces valeurs de P_{\max} moyens.

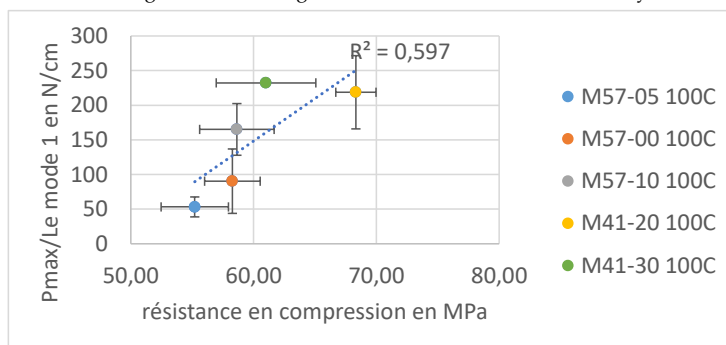


FIGURE 4. P_{\max}/L_e moyens pour les matrices 100% ciment en fonction de la résistance en compression

Cela se vérifie également par les observations microscopiques, qui semblent indiquer qu'une matrice avec superplastifiant et forte résistance mécanique (M57-10 100C) présente le plus grand nombre de filaments totalement imprégnés par la matrice cimentaire comme le montre la figure 5.

Pour les éprouvettes avec du filler calcaire et du ciment (M57-00 50C, M57-00 30C, M48-00 30C et M41-00 30C), les résultats montrent que les paramètres influençant le plus leur comportement mécanique sont la longueur d'enrobage et la fluidité de la matrice. Les longueurs d'enrobage testées vont de 1 cm à 8 cm, et une augmentation de cette longueur conduit à des valeurs supérieures de P_{\max} moyens pour les éprouvettes à l'arrachement, et la même tendance est observée avec l'augmentation de la fluidité (donc la diminution du temps d'écoulement mesuré au maniabilimètre) comme le montre la figure 6.

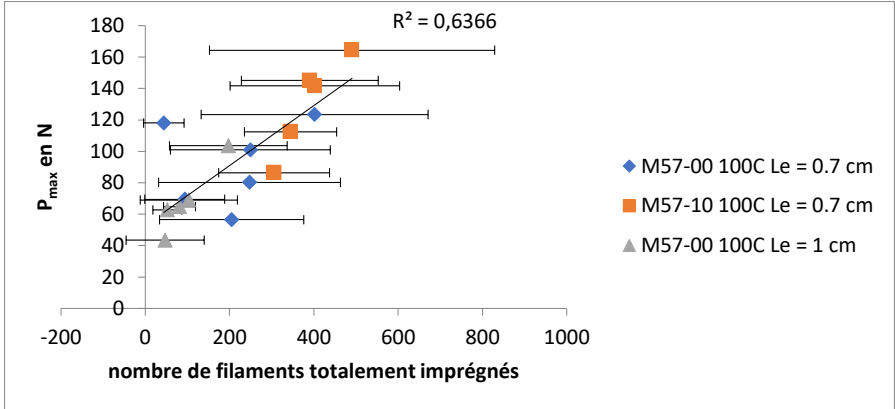


FIGURE 5. Nombre de filaments totalement imprégnés par la matrice cimentaire en fonction de P_{max} , matrices 100% ciment

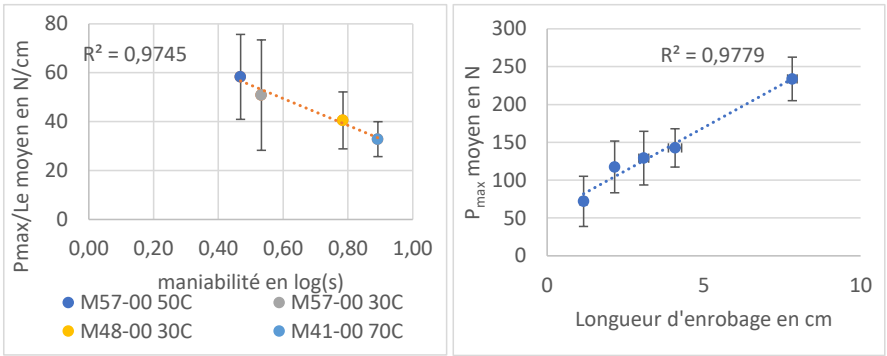


FIGURE 6. P_{max}/Le moyens pour les matrices 50% et 30% ciment en fonction de la maniabilité (à gauche) et en fonction de la longueur d'enrobage (à droite)

IV. AMELIORATION DU MODELE

A. Modèles existants et leurs limites

Différents modèles ont été développés dans la littérature afin de pouvoir décrire et prédire le comportement à l'arrachement des composites fil multifilamentaire / matrice cimentaire. Pour cela, deux approches ont été réalisées. La première approche consiste à séparer les filaments en deux groupes : filaments périphériques imprégnés par la matrice, qui rompent pendant l'arrachement et filaments de cœur non imprégnés, subissant une extraction (Ohno and Hannant, 1994). Par la suite, ces deux groupes ont été nuancés en modélisant le fil comme un ensemble de couches concentriques, dont le degré d'imprégnation augmente du centre à la périphérie du fil. A partir de

cette modélisation concentrique, il a également été théorisé que la rupture de ces couches de filaments se faisaient en fait de manière télescopique (Banholzer, 2006).

La deuxième approche consiste à modéliser les différents matériaux et leur interaction à différentes échelles afin de bien comprendre les différents phénomènes à l'œuvre au sein de cette structure (Konrad et al., 2005) et permettant la mise en place du Bond Layer Model (Konrad and Chudoba, 2004).

Cependant, la définition des filaments de cœur et des filaments périphériques restent imprécise, puisque leur nombre par exemple, nécessaire dans ces modèles, est bien souvent déterminé par calage sur les résultats mécaniques expérimentaux plutôt que par observation microscopique de la longueur enrobée.

B. Apports à un modèle existant

Dans notre étude, grâce à la méthode de double imprégnation suivie d'imagerie confocale, il a été possible de dénombrier les filaments totalement imprégnés par la matrice cimentaire déterminant dans les modèles.

Il a également été possible de déterminer la répartition des ruptures des filaments, en utilisant les images effectuées sur les différentes sections, permettant une évaluation de la forme du volume de fil extrait (cylindrique ou conique). Cette évaluation montre bien que la majorité des ruptures ne sont pas télescopiques, et que les quelques ruptures télescopiques correspondent à des cas particuliers avec des valeurs de P_{\max} très faibles. Il semble donc que l'extraction s'effectue sur un bloc distinct de filaments.

Le modèle utilisé a été établi par Langlois (Langlois, 2004), il sépare le comportement des filaments de cœur et des filaments périphériques mais ne considère pas la rupture comme télescopique.

Pour les filaments périphériques, l'équation (1) est utilisée :

$$F_A = E_f n_p S_f \left[\left(\frac{1}{L_e} \right) \ln \left(\frac{\sigma_f L_e}{E_f \delta} \right) \right] * \delta \quad (1)$$

avec E_f le module élastique des filaments ; n_p la part de filaments périphériques ; S_f la section totale des filaments ; L_e la longueur d'enrobage ; δ la valeur d'allongement ; σ_f la résistance en traction des filaments

Pour les filaments de cœur, c'est l'équation (2) :

$$F_{NA} = F_{NA\infty} \frac{\sigma_f L_e}{E_f \delta} \quad (2)$$

avec $F_{NA\infty}$ la valeur de charge pour laquelle la courbe atteint un plateau en phase post-pic

Ces deux équations ont été modifiées au vu des observations menées dans la présente étude. La principale amélioration de l'équation (1) réside dans le fait que n_p , le nombre de filament imprégnés, est maintenant obtenu par comptage sur les images obtenues après double imprégnation et microscopie confocale. Concernant l'équation (2), elle a également été modifiée afin de prendre en compte le fait que l'extraction se fait sous forme d'un cylindre de filaments, et non de façon télescopique. Ainsi, l'équation a été définie afin de modéliser un frottement linéaire

et régulier jusqu'à l'extraction, sur une surface frottante cylindrique. Une bonne adéquation est notée entre les résultats expérimentaux et la modélisation, comme le montre la figure 7.

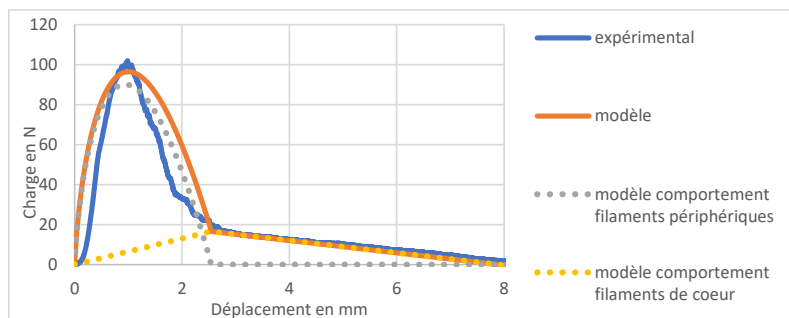


FIGURE 7. Comparaison entre le modèle et le comportement expérimental à l'arrachement pour $L_e=0,7$ cm et la matrice M57-00 100C

REFERENCES

- Alijewfi, H., Fiorio, B., Gallias, J.-L., 2010. Characterization of the impregnation by a cementitious matrix of five glass multi-filament yarns. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 14, 529–544. <https://doi.org/10.3166/ejece.14.529-544>
- Banholzer, B., 2006. Bond of a strand in a cementitious matrix. *Mater. Struct.* 39, 1015–1028. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9115-y>
- Brameshuber, W., 2006. Report 36: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. RILEM Publications.
- Breccolotti, M., Materazzi, A.L., 2013. Structural reliability of bonding between steel rebars and recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 47, 927–934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.017>
- Homoro, O., Michel, M., Baranger, T.N., 2019. Pull-out response of glass yarn from ettringite matrix: Effect of pre-impregnation and embedded length. *Compos. Sci. Technol.* 170, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.045>
- Konrad, M., Chudoba, R., 2004. The Influence of Disorder in Multifilament Yarns on the Bond Performance in Textile Reinforced Concrete. *Acta Polytech.* 44. <https://doi.org/10.14311/654>
- Konrad, M., Chudoba, R., Butenweg, C., 2005. Textile Reinforced Concrete Part II: Multi-Level Modeling Concept. *Spec. Publ.* 224. <https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet.323>
- Langlois, V., 2004. Etude du comportement mécanique de matériaux cimentaires à renforts synthétiques longs ou continus (thesis). Cergy-Pontoise.
- Ohno, S., Hannant, D.J., 1994. Modeling the Stress-Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composites. *Mater. J.* 91, 306–312. <https://doi.org/10.14359/4293>
- Peled, A., Zaguri, E., Marom, G., 2008. Bonding characteristics of multifilament polymer yarns and cement matrices. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 39, 930–939. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.03.012>