

Etude du comportement à l'arrachement des fils multifilamentaires de verre

Slama A-C¹, Gallias J-L¹, Fiorio B.¹

¹ L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, 5 Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise

RÉSUMÉ

Dans l'objectif d'étudier l'adhérence mécanique d'un fil multi-filamentaire dans un mortier en fonction de son imprégnation par la matrice cimentaire, des essais d'arrachement ont été réalisés. Des matrices présentant des propriétés rhéologiques et des rapports E/C différents ont été utilisées. Deux longueurs enrobées ont été testées pour chacune de ces matrices. La microstructure de l'interface fil-mortier à l'issue des essais a été caractérisée par une méthodologie spécifique basée sur la réalisation d'une double imprégnation de la zone endommagée du fil par des résines contenant différents fluorochromes afin de créer un double marquage et permettre l'analyse de différentes sections de l'interface fil-mortier par microscopie confocale. Les résultats obtenus permettent d'identifier différents modes de rupture du fil multi-filamentaire à l'arrachement et de relier certains paramètres mécaniques à la géométrie de la zone endommagée.

ABSTRACT.

In order to investigate the mechanical bonding of a multifilament yarn in a mortar according to its impregnation by the cementitious matrix, pull-out tests have been performed. Matrixes with various rheological properties and W/C ratios were used. Two embedded lengths were tested for each matrix. The microstructure of the yarn/mortar interface after those tests was characterized using a specific method based on a double impregnation of the damaged area of the yarn with epoxy resin containing different fluorochromes to create a double marking and enable the analysis of different sections by confocal microscopy. The results show different breaking modes of the multifilament yarn during the pull out test and a relation between some mechanical parameters to the geometry of the damaged zone.

MOTS-CLÉS: microscopie confocale, mortier, fils multifilamentaires, arrachement, imprégnation.

KEY WORDS: confocal microscopy, mortar, multifilament yarns, pull-out, impregnation.

Introduction

Le renforcement du béton par des structures monolithiques tels que des barres d'acier ou des fibres courtes est une technique connue. L'adhésion entre ces types de renfort et le béton a été très étudiée [BAR 81] [MAJ 74]. Un nouveau type de composite, les TRC (textile reinforced concrete), utilisent comme renforcement des structures multifilamentaires qui impliquent une imprégnation plus complexe [KON 04]. L'avantage de ces composites est de pouvoir remplacer, dans certaines situations, les renforts en acier dans le béton armé et de pouvoir s'affranchir des contraintes de fabrication qui leurs sont propres. Cependant, la grande variabilité de leur comportement mécanique du fait de leur imprégnation variable rend leur utilisation difficile. Pour cette raison, différentes études ont été menées afin de définir des modèles permettant de prédire le comportement mécanique de ces composites, en fonction du type de renfort et du type de matrice utilisés. Ces modèles définissent un degré d'imprégnation spécifique pour différents groupes de filaments, ce degré étant maximal pour les filaments à la périphérie du fil (zone de contact du fil avec la matrice) et diminuant en allant vers ceux du centre [BAN 06]. Lors de l'essai d'arrachement, les filaments avec un degré d'imprégnation suffisant sont rompus, alors que ceux avec un degré d'imprégnation plus faible subissent un glissement avant de rompre ou d'être totalement extraits de la matrice. Les différences de proportion de ces deux types de comportement expliquent la variabilité mécanique. Bien que différentes méthodes d'observations innovantes aient été développées pour valider expérimentalement ces modèles, aucune ne permet une visualisation précise de l'interface fil/matrice.

1. Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes d'arrachement sont constituées d'un fil multifilamentaire (roving direct de verre AR 2400 tex avec environ 1600 filaments de 27 μm de diamètre et un ensimage faible) placé dans une matrice cimentaire composée de sable normalisé (1350g), de ciment CEM I 52.5R (450g ; Calcia), d'eau et d'un superplastifiant (Sika Tempo 635). Le tableau 1 donne les propriétés des matrices.

Le mortier est coulé en deux couches, chacune consolidée par 60 chocs, dans un moule 4x4x16 spécifique préalablement traversé, le long de son axe, par le fil multifilamentaire. Les prismes de mortier sont démoulés à

24h et conservés 26 jours dans l'eau. Les extrémités sont alors sciées pour obtenir deux prismes 4x4xLe ou Le est la longueur enrobée du fil dans le mortier (0,7 ou 1 cm). Après quelques heures de séchage à l'air libre, l'extrémité de la longueur libre du fil est collée entre deux plaquettes epoxy pour permettre son serrage dans les mors de la presse. La longueur libre du fil est de 10 cm.

dénomination	Rapports massiques		Propriétés rhéologiques (NF P18-452, NF EN 12350-2, ISO 9812)			Résistances mécaniques (NF 196-1)	
	E/C	A/C	Maniabilité (sec)	Affaissement (cm)	Etalement (%)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
M50-00	0,5	0	10	2	38	7,8± 0,4	58± 2
M50-05	0,5	0,05	4	3,5	60	7,7± 0,6	55± 3
M50-10	0,5	0,1	2	5,5	114	7,7± 0,8	59± 3
M47-20	0,47	0,2	2	5	98	8,3± 0,3	64± 2
M45-20	0,45	0,2	10	2	41	9,1± 0,6	68± 2
M45-30	0,45	0,3	4	4	68	8,4± 0,4	61± 4

Tableau 1. Composition et propriétés des matrices utilisées

2. Comportement mécanique à l'arrachement

Après 24h de séchage à l'air libre, l'essai d'arrachement direct est réalisé à 28 jours sur une presse pilotée en déplacement (2mm/min). Un dispositif adapté permet le maintien du prisme de mortier et l'alignement du fil. L'essai est mené jusqu'à désolidarisation du fil et de la matrice. Les courbes effort-déplacement sont obtenues.

Malgré une grande variabilité du comportement à l'arrachement constatée pour chacune des matrices, deux modes d'arrachement se distinguent (figure 1), pour les deux longueurs enrobées testées. Le premier mode (mode 1) correspond à une rupture dans la partie imprégnée du fil, suivie de l'extraction partielle des filaments sur la longueur totale d'enrobage. Cette extraction induit un glissement des filaments avec frottement qui explique la phase résiduelle post-pic observée sur les courbes charge/déplacement. Le deuxième mode d'arrachement (mode 2) correspond à une rupture en traction de la partie libre du fil (partie non enrobée). La courbe charge/déplacement ne présente alors pas de phase résiduelle post-pic et est similaire à celle obtenue en traction directe sur des fils conservés 28 jours dans l'eau. Le déplacement pour lequel la charge revient à zéro est très inférieur à la longueur enrobée.

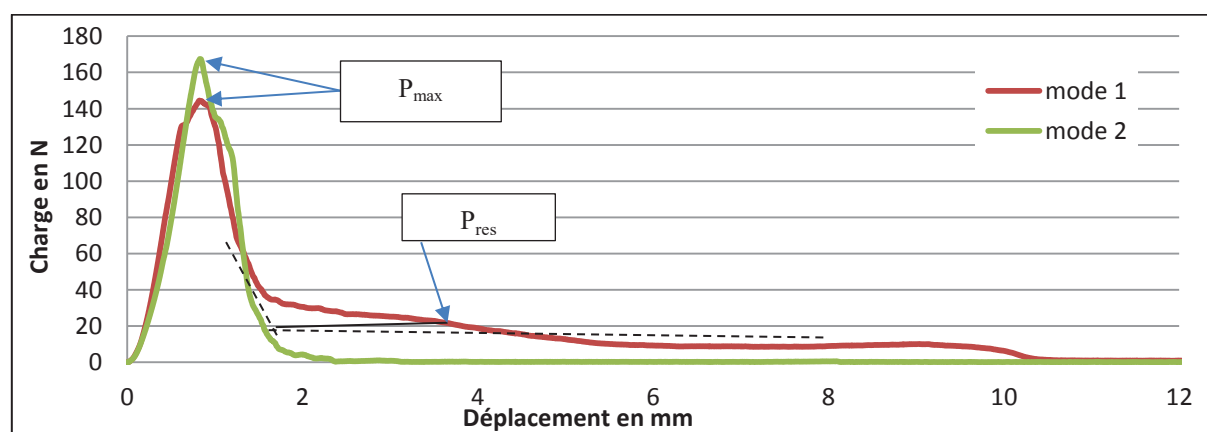


Figure 1. Modes d'arrachement : extraction de filaments (mode 1) ou rupture en traction de l'ensemble des filaments dans la partie libre du fil (mode 2). Matrice M50-10, Le = 1 cm.

Différents paramètres mécaniques sont déterminés à partir des courbes effort-déplacement. On s'intéresse ici à la charge à la rupture $P_{\max}$, et, lorsque des filaments glissent dans la phase finale de l'arrachement, à la charge résiduelle P_{res} associée à la résistance à l'extraction de ces filaments. Un dernier paramètre mesuré après arrachement est la masse de fil extrait de la matrice.

Les valeurs de $P_{\max}$ correspondant au mode 1 vont de 20 à 180 N pour $Le = 1$ cm et 30 à 200 N pour $Le = 0,7$ cm. Ces écarts importants viennent du fait que le phénomène de glissement apparaît de différentes manières : soit de façon très rapide après le début de mise en charge, ce qui semble indiquer une quantité importante de filaments de cœur non imprégnés, soit de façon plus lente, simultanément ou après la rupture en traction des filaments enrobés, ce qui libère les filaments de cœur et permet d'obtenir un phénomène de

glissement sur une plus petite quantité de filaments et conduit à un $P_{\max}$ plus important. Cette analyse est confirmée par la mesure de la masse des filaments extraits. Bien que la tendance ne soit pas clairement marquée du fait de la grande variabilité des résultats obtenus, les propriétés rhéologiques de la matrice semblent influencer le comportement à l'arrachement. Les matrices les plus fluides permettent probablement une meilleure imprégnation des filaments qui conduit plutôt au mode 2 d'arrachement. De plus, en considérant les valeurs moyennes, il est possible de conclure que le $P_{\max}$ du mode 1 est en majorité inférieur à celui du mode 2, mais que les valeurs moyennes de P_{res} ne sont pas reliées aux valeurs moyennes des $P_{\max}$ pour ce mode 1. De même, il n'est pas possible de conclure concernant l'influence de la longueur d'ancrage sur les valeurs de $P_{\max}$ et celles de P_{res} .

	Le = 1 cm				Le = 0,7 cm			
	Mode 1		Mode 2		Mode 1		Mode 2	
	$P_{\max}$ (N)	P_{res} (N)	$P_{\max}$ (N)	P_{res} (N)	$P_{\max}$ (N)	P_{res} (N)	$P_{\max}$ (N)	P_{res} (N)
M50-00	60±28	8,8±6,8	-	-	91±27	12,9±5,1	-	-
M50-05	55±14	6,8±3,0	-	-	31	4,7	94	0,2
M50-10	144	16,7	157±22	1,2±1,5	129±30	9,4±4,6	172	3,1
M47-20	-	-	155±70	0,8±0,3	-	-	128±63	2,7±2,0
M45-20	182	8,1	173±44	0,6±0,5	176±38	18,5±19,4	183±20	2,7±1,7
M45-30	-	-	102±43	0,3±0,2	174	9,5	83±44	0,6±0,7

Sans écart type : 1 éprouvette ; avec écart type : 4 à 6 éprouvettes (sauf M45-20, Le = 0,7 cm, Mode 1 : 2 éprouvettes).

Tableau 2. $P_{\max}$ et P_{res} en fonction de la matrice, de la longueur enrobée et du mode d'arrachement.

3. Observations microscopiques des faciès de rupture

Après arrachement, le fil et son mortier d'enrobage sont imprégnés sous vide avec une résine epoxy marquée à la rhodamine (viscosité comprise entre 600 et 800 cP). Le mortier est ensuite dissous à l'acide et le moulage obtenu est alors enrobé dans la même résine marquée à la fluorescéine (voir figure 2 le détail du processus). Ainsi un double marquage est obtenu. Il permet de visualiser l'espace laissé vide par les filaments extraits (zone contenant uniquement de la résine marquée rhodamine), les filaments restants peu ou pas imprégnés par la matrice cimentaire (enrobés par la résine marquée rhodamine) et les filaments restants imprégnés par la matrice cimentaire (enrobés par la résine marquée fluorescéine, non enrobés par la résine marquée rhodamine car imprégnés par la matrice cimentaire avant sa dissolution). Des coupes de ces échantillons, réalisées par polissage, sont enfin observées à l'aide d'un microscope inversé confocal (figure 3).

Sur les images obtenues, plusieurs paramètres sont mesurés par analyse d'image (ImageJ) : l'aire et la forme (rapport largeur sur longueur) de l'espace laissé libre par les filaments extraits, l'aire et la forme (rapport largeur sur longueur) de l'espace contenant les filaments restants.

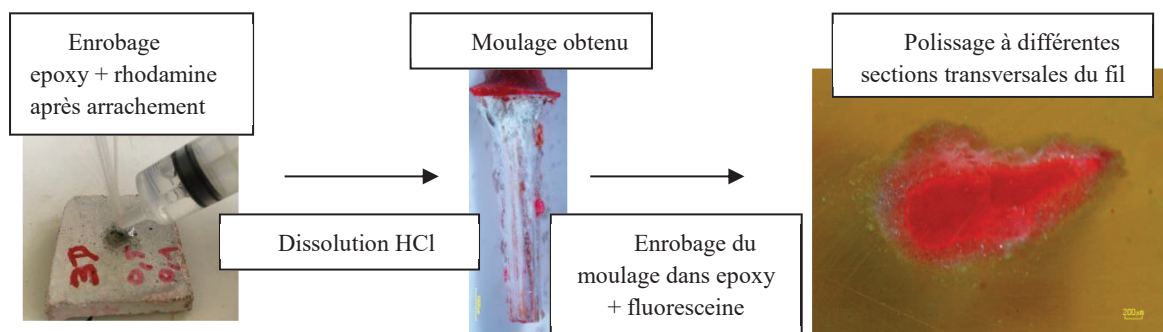


Figure 2. Mise en œuvre de la double imprégnation.

Les observations microscopiques ne sont réalisées que pour les éprouvettes présentant un glissement sur toute la longueur enrobée (mode 1). Pour les échantillons M50-00 et M50-10, Le = 0,7, les paramètres mécaniques résiduels présentent des corrélations avec l'aire de la zone des filaments extraits observées au microscope confocal, quelle que soit la section étudiée le long du fil (figure 4).

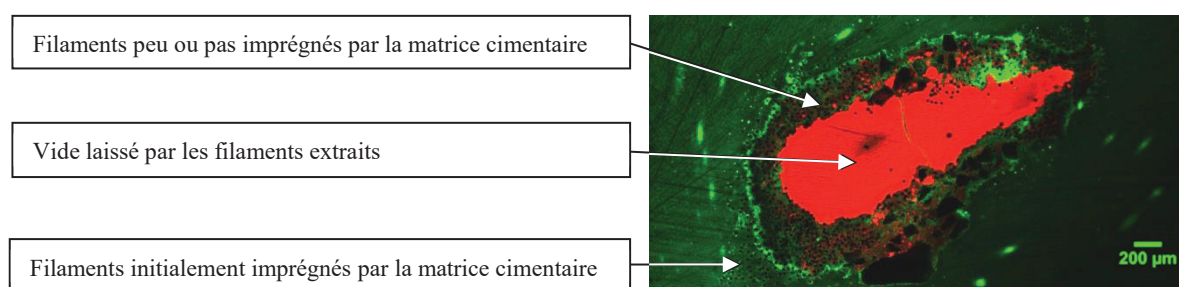


Figure 3. Section du moulage du fil après essai d'arrachement.

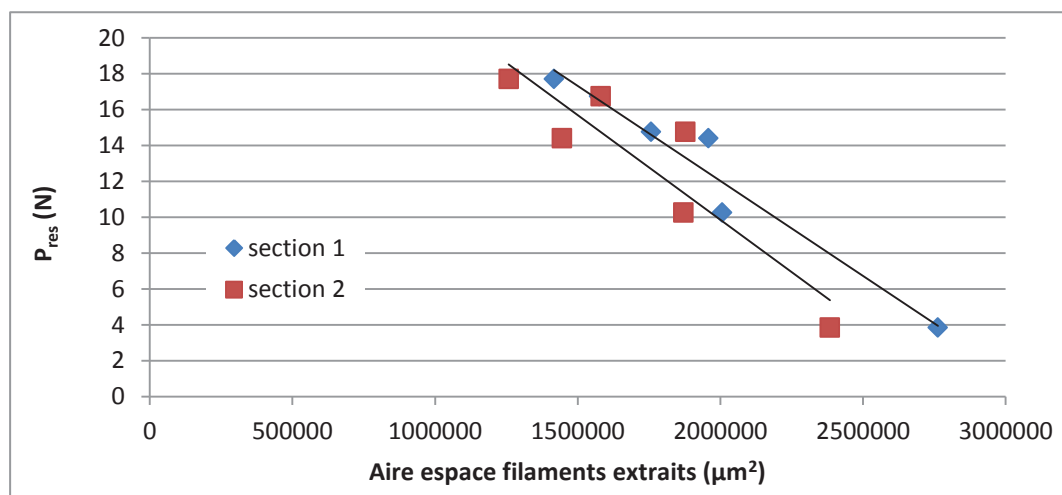


Figure 4. P_{res} en fonction de l'aire de l'espace laissé par les filaments extraits (M50-00, $L_e=0,7\text{cm}$).

4. Conclusion et perspectives

Les études menées ont permis d'identifier deux comportements mécaniques à l'arrachement : une rupture dans la partie imprégnée suivie de l'extraction partielle des filaments sur la longueur totale enrobée ou une rupture en traction de la partie libre du fil (non imprégnée). Le mode de rupture obtenu semble dépendre de la fluidité de la matrice utilisée. Plusieurs paramètres autres que celui-ci interviennent également dans le mécanisme d'imprégnation du fil par le mortier. Afin de comprendre ces mécanismes, une méthode de moulage en résine des éprouvettes après arrachement, utilisant un double marquage, suivie d'observations au microscope confocal a été développée. Des paramètres mesurés sur les images obtenues permettent d'expliquer le comportement résiduel post-pic de l'essai d'arrachement.

L'utilisation de matrices de faible résistance afin d'augmenter la longueur enrobée pour laquelle il y a glissement et ainsi éviter les zones avec effets de bord (zone proche de la partie libre du fil) est envisagée pour la suite de ces travaux.

Bibliographie

- [BAN 06] B. BANHOLZER, « Bond of a strand in a cementitious matrix », *Materials and Structures*, vol. 39, n° 10, p. 1015-1028, déc. 2006.
- [BAR 81] P. BARTOS, « Review paper: Bond in fibre reinforced cements and concretes », *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 3, n° 3, p. 159-177, août 1981.
- [KON 04] M. KONRAD et R. CHUDOKA, « The Influence of Disorder in Multifilament Yarns on the Bond Performance in Textile Reinforced Concrete », *Acta Polytechnica*, vol. 44, n° 5-6, janv. 2004.
- [MAJ 74] A. J. MAJUMDAR, « The role of the interface in glass fibre reinforced cement », *Cement and Concrete Research*, vol. 4, n° 2, p. 247-268, mars 1974.