

**UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE**  
**ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET INGENIERIE**

**THESE**

Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université de Cergy-Pontoise  
Spécialité : génie civil

**Etude du comportement mécanique à l'arrachement de  
fils multi-filamentaires enrobés dans une matrice  
cimentaire et influence de l'imprégnation**

Par

**Hana ALJEWIFI**

Soutenue le

**12 décembre 2011**

**Devant le juré composé de :**

M. FIORIO Bruno	MCF Université de Cergy-Pontoise	Examineur
M. GALLIAS Jean-Louis	Pr. Université de Cergy-Pontoise	Directeur de thèse
M. HUSSON Bernard	MCF HDR Université Paul Sabatier (Toulouse III)	Rapporteur
M. JESSE Frank	Pr. Brandenburgische Technische Universität Cottbus	Examineur
M. NOUMOWE Albert	Pr. Université de Cergy-Pontoise	Examineur
M. REMOND Sébastien	Pr. Ecole des Mines de Douai	Rapporteur

Travail réalisé au

Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (EA 4114)

**Titre :** Etude du comportement mécanique à l'arrachement de fils multi-filamentaires enrobés dans une matrice cimentaire et influence de l'imprégnation

**Résumé :** Cette recherche porte sur les fils multi-filamentaires de verre utilisés pour renforcer les matériaux à base de ciment. Elle est focalisée sur les interactions mécaniques de ce type de fils, constitués d'un assemblage de milliers de filaments micrométriques, avec un micro-béton et sur le rôle spécifique de l'imprégnation du fil par cette matrice cimentaire. Trois pré-conditionnements des fils ont été employés lors de la fabrication des éprouvettes afin de moduler les conditions d'imprégnation par la matrice cimentaire. L'imprégnation de 5 fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire a été caractérisée et les paramètres d'imprégnation ont été définis en s'appuyant sur des observations MEB, ainsi que des essais de porosimétrie au mercure et des essais spécifiques d'écoulement le long du fil enrobé. Des essais classiques d'arrachement de type pull-out ont été utilisés pour la caractérisation mécanique. L'analyse des liens entre les propriétés mécaniques et les paramètres d'imprégnation ont permis de mieux comprendre les micro-mécanismes d'interaction filaments / matrice cimentaire et d'expliquer le comportement macroscopique à l'arrachement.

**Mots clés :** *fils multi-filamentaires de verre, matrice cimentaire, imprégnation, interface, micro structure, micromécanique, essai d'arrachement.*

**Title:** Study of the mechanical pull-out behaviour of multi-filament yarns embedded in a cementitious matrix and influence of the impregnation.

**Abstract:** This research deals with multi-filaments glass yarns used as reinforcement of cement based materials. It focuses on the mechanical interactions of these yarns, made of thousands of micrometric filaments, with a micro-concrete and on the specific part of the impregnation of the yarn by the cementitious matrix. Modulated impregnation conditions of the yarns were obtained by using three different manufacturing processes for the samples preparation. The impregnation of 5 multi-filament yarns by the cementitious matrix has been characterized and physical parameters of impregnation were determined using SEM investigations, mercury intrusion porosity measurements and specific tests of flow all along the embedded yarn. Classical pull-out tests have been used for the mechanical characterisation. The study of the links between the mechanical properties and the physical parameters of impregnation allowed accessing a better understanding of the filaments / cementitious matrix interaction micro-mechanisms, and explaining the macroscopic pull-out behaviour.

**Keywords:** *Glass multi-filament yarns, cementitious matrix, impregnation, interface microstructure, micromechanics, pull-out test.*

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier grandement Bruno Fiorio, mon encadrant, qui a enrichi cette thèse de ses idées et qui m'a aidé à trouver des solutions dans les moments les plus compliqués des travaux expérimentaux, qui m'a également aidé à être plus précise pour la réalisation des essais. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité et pour tous le temps qu'il m'a consacré à discuter et rediscuter l'analyse des résultats.

Je remercie vivement Jean-Louis Gallias, mon directeur de thèse, pour m'avoir permis d'apprendre un peu de ses riches connaissances scientifiques, ainsi que pour avoir éclairé beaucoup des points de cette thèse. Je le remercie également beaucoup pour son grand cœur et sa grande qualité personnelle.

J'offre cette thèse à l'âme de Richard Cabrillac, pour sa gentillesse, son sourire et sa bonne humeur, ainsi que pour ses encouragements et son soutien moral.

Je remercie Albert Noumowe, directeur du Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Sébastien Remond, professeur à l'Ecole des Mines de Douai, Bernard Husson, Maître de Conférences HDR à l'Université Paul Sabatier de Toulouse et Frank Jesse, professeur à l'Université Technique de Cottbus, Allemagne, ont accepté de juger ce travail de thèse. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux. Je remercie en outre messieurs Remond et Husson pour le travail supplémentaire réalisé en tant que rapporteurs de cette thèse.

Je tiens à remercier également Xiao-Bing Zhang, professeur à l'université de Blaise Pascal de Clermont Ferrand, pour l'intérêt qu'elle a porté à cette thèse, pour ses encouragements et sa gentillesse envers moi.

La société Owens Corning a fourni les fils multi-filamentaires utilisés et m'a accordé du temps pour me donner les informations qui m'ont été nécessaires. Qu'elle en soit remerciée.

Je remercie Annelise Cousture pour sa grande patience, pour son écoute et pour toutes nos discussions lors des séances d'observation au MEB.

Je remercie également toute l'équipe technique du L2MGC pour son soutien pendant les essais et son aide précieuse dans la réalisation de ce travail : Lilian Cristofol, Noémie Chaumont. Je remercie également pour leur disponibilité Edmond Dru, Pascal Manceau et Valérie Mignot.

Un remerciement plus particulier à tous mes camarades doctorant du laboratoire, pour leur gentillesse, leur écoute, leur soutien, les moments inoubliables pendant notre travail. Mes meilleurs souvenirs vont en particulier à Zhi, Prosper, Hung, Gildas et à ceux qui ont repris leur chemin et qui sont rentrés chez eux.

Papa, grâce à toi je suis là et j'ai réalisé ce que tu as souhaité pour moi. Je ne te remercierai jamais assez pour ton courage et ton soutien pour aller jusque au bout. Je souhaite que Dieu te garde auprès de moi toute la vie.

Maman, je te remercie pour tes sourires et tes mots qui m'ont apporté, quand je les entendais, le courage et le bonheur dans les moments les plus difficiles.

Abdualrhman, mon langage est incapable de te remercier comme tu le mérites pour ton acceptation que je sois si loin de toi mais cette séparation arrive maintenant à sa fin. Malgré la distance entre nous, tu as toujours été avec moi. Ton courage et ta patience ont été la lumière qui a éclairé ma vie ici.

Mes chaleureux remerciements vont enfin à mes sœurs et frères, pour m'avoir donné le courage d'aller au bout de ce travail.

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b> .....	1
---------------------------	---

## **Chapitre 1**

<b>Etude bibliographique</b> .....	5
1.1 Introduction .....	6
1.2 Constitution des fils multi-filamentaires à base de verre .....	6
1.2.1 Le verre et la fabrication des filaments .....	7
1.2.2 La structure du fil multi-filamentaire .....	9
Les mèches et les fils.....	10
1.3 La matrice cimentaire.....	12
1.4 Comportement mécanique des fils multi-filamentaires .....	14
1.5 Comportement mécanique du fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice cimentaire lors d'un essai d'arrachement.....	19
1.6 Modélisation du comportement mécanique du composite.....	25
1.7 Durabilité des fils multi-filamentaires à base de verre enrobés dans une matrice cimentaire.....	38
1.8 Synthèse .....	40

## **Chapitre 2**

<b>Caractérisation des fils multi-filamentaires et de leur enrobage cimentaire</b> .....	43
2.1 Introduction .....	44
2.2 Choix des fils multi-filamentaires pour l'étude .....	44
2.3 Structure des fils multi-filamentaires .....	46
2.3.1 Les filaments.....	46
2.3.2 Les mèches.....	47
2.3.3 Le fil multi-filamentaire .....	49
2.3.4 Le fil de chanvre .....	50
2.4 Propriétés physiques des fils multi-filamentaires .....	51
2.4.1 Evaluation de la variabilité des caractéristiques du fil .....	51
2.4.2 Etude de l'imprégnation des fils par l'eau .....	53
2.5 Propriétés mécaniques des fils multi-filamentaires.....	58
2.5.1 Préparation des éprouvettes .....	59
2.5.2 Mode opératoire des essais .....	60
2.5.3 Configurations expérimentales étudiées .....	61
2.5.4 Comportement mécanique en traction des fils multi-filamentaires.....	61
2.5.5 Comportement mécanique de la mèche .....	66
2.5.6 Influence de la longueur libre du fil .....	68
2.5.7 Influence vitesse de déformation .....	72
2.5.8 Influence de l'eau .....	73
2.6 Enrobage du fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire.....	77
2.6.1 Principe de fabrication des éprouvette de mortier .....	77
2.6.2 Prétraitement du fil avant l'enrobage par le mortier.....	78

2.6.3 Conservation des éprouvettes .....	79
2.7 Caractérisation du mortier et du coulis d'enrobage du fil multi-filamentaire.....	80
2.7.1 Le ciment .....	80
2.7.2 Le sable .....	81
2.7.3 Le superplastifiant .....	82
2.7.4 Composition du mortier et du coulis .....	82
2.7.5 Malaxage et caractérisation de l'ouvrabilité.....	83
2.7.6. Temps de prise .....	83
2.7.7 Résistances mécaniques du mortier durci.....	84
2.7.8 Module de Young du mortier .....	87
2.7.9 Porosité accessible à l'eau du mortier et masse volumique apparente du mortier et du coulis.....	88

### **Chapitre 3**

<b>Etude et caractérisation de l'imprégnation des fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire.....</b>	<b>91</b>
3.1 Introduction.....	92
3.2 Observations au microscope électronique à balayage.....	92
3.2.1 Préparation des éprouvettes .....	92
3.2.2 Fil multi-filamentaire SG1 .....	93
3.2.3 Fil multi-filamentaire SG2.....	98
3.2.4 Fil multi-filamentaire SG3.....	100
3.2.5 Fil multi-filamentaire OC1 .....	103
3.2.6 Fil multi-filamentaire OC2 .....	106
3.2.7 Bilan quantitatif de l'imprégnation des fils multi-filamentaires.....	108
3.3 Porosimétrie mercure différentielle.....	110
3.3.1 Objectif et principe de la méthode.....	110
3.3.1.1 La porosimétrie mercure .....	110
3.3.1.2 Mesure de porosité mercure différentielle .....	111
3.3.1.3 Paramètres caractéristiques de l'imprégnation .....	112
3.3.2 Mise en œuvre de la méthode et résultats généraux .....	114
3.3.2.1 Echantillons utilisés pour la porosimétrie mercure.....	114
3.3.2.2 Process de mesure utilisé .....	114
3.3.2.3 Résultats généraux .....	115
3.3.3 Caractérisation du mortier : distribution de référence .....	116
3.3.3.1 Echantillons de référence .....	116
3.3.3.2 Résultats et discussion .....	117
3.3.3.3 Distribution et volumes de référence .....	118
3.3.4 Caractérisation des fils imprégnés .....	119
3.3.4.1 Résultats des essais de porosimétrie mercure .....	119
3.3.4.2 Détermination des volumes différentiels de pores.....	120
3.3.4.3 Résultats et discussion .....	124
3.4 Essai d'écoulement.....	125
3.4.1 Objectif de la méthode.....	125
3.4.2 Méthodologie de l'essai .....	127
3.4.2.1 Dispositif expérimental.....	127
3.4.2.2 Echantillons testés.....	127

3.4.2.3 Réalisation des essais et résultats bruts.....	128
3.4.3 Résultats et discussion .....	129
3.4.3.1 Débit d'écoulement dans les échantillons.....	129
3.4.3.2 Débit d'écoulement dans les fils .....	130
3.5 Relation entre les paramètres caractéristiques de l'imprégnation.....	132
3.5.1 Relation entre l'index d'imprégnation et le débit d'écoulement surfacique.....	132
3.5.2 Relation entre l'indice d'imprégnation et les volumes différentiels de pores .....	133
3.5.2.1 Cas du volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ .....	133
3.5.2.2 Cas du volume différentiel de pores $\Delta v_{3-30}$ .....	134
3.5.3 Corrélation entre le débit d'écoulement surfacique et les volumes différentiels de pores.....	134
3.6 Conclusion.....	136

## **Chapitre 4**

<b>Etude du comportement mécanique à l'arrachement des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire .....</b>	<b>139</b>
4.1 Introduction générale .....	140
4.2 Méthode expérimentale .....	141
4.2.1 Description de l'essai d'arrachement.....	141
4.2.2 Méthode de préparation des éprouvettes .....	141
4.2.3 Mise en œuvre de l'essai.....	142
4.3 Comportement mécanique observé .....	143
4.3.1 Description qualitative du comportement.....	143
4.3.1.1 Comportement observé – exemple du fil SG1 .....	143
4.3.1.2 Autres fils.....	148
4.3.2 Paramètres caractéristiques du comportement à l'arrachement.....	148
4.3.2.1 Définition des paramètres caractéristiques retenus.....	148
4.3.2.2 Tableau de résultats.....	149
4.4 Filaments de cœur / filaments périphériques .....	156
4.4.1 Problématique .....	156
4.4.2 Grandeurs physiques caractéristiques.....	156
4.4.2.1 Détermination de la longueur extraite relative des filaments .....	157
4.4.2.2 Détermination de la proportion massique de filaments extraits.....	157
4.4.2.3 Résultats et discussion .....	158
4.5 Influence de la longueur enrobée dans le micro béton sur les paramètres de comportement mécanique .....	164
4.5.1 Influence de la longueur enrobée sur les efforts résistants .....	164
4.5.1.1 Résistance à l'arrachement $P_{max}$ .....	164
4.5.1.2 Effort de transition phase post-pic / phase post-pic résiduelle $P_{résiduel}$ .....	167
4.5.2 Influence de la longueur enrobée sur les raideurs .....	168
4.5.2.1 Raideur pré-pic $k_{bond}$ .....	168
4.5.2.2 Raideur post-pic $k_{debond}$ .....	171
4.5.2.3 Raideur résiduelle $k_{frictional}$ .....	171
4.5.3 Influence de la longueur enrobée sur les paramètres énergétiques.....	173
4.5.3.1 Travail total $W_{total}$ .....	173
4.5.3.2 Travail pré-pic $W_{pré-pic}$ (ténacité) .....	173
4.5.3.3 Travail post-pic $W_{post-pic}$ .....	173

4.5.4 Discussion.....	178
4.6 Longueur minimale d'enrobage et propriétés mécaniques associées .....	179
4.6.1 Détermination de la longueur minimale d'enrobage ( $L_{min}$ ) .....	179
4.6.2 Propriétés mécaniques de références des fils lors de l'essai d'arrachement .....	179
4.7 Caractéristiques intrinsèques à l'arrachement des fils enrobés.....	181
4.7.1 Caractérisation du comportement des fils en traction simple.....	181
4.7.2 Comportement intrinsèque à l'arrachement.....	182
4.7.2.1 Evaluation des paramètres de comportement dans la phase pré-pic.....	182
4.7.2.2 Paramètres de comportement dans les phases post-pic et post-pic résiduelle .....	183
4.8 Influence du type de fil et du prétraitement sur le comportement intrinsèque à l'arrachement.....	184
4.8.1 Influence du fil et du prétraitement sur les résistances.....	184
4.8.1.1 Résistance à l'arrachement $P_{max,a}$ .....	184
4.8.1.2 Résistance résiduelle $P_{résiduel,a}$ .....	185
4.8.2 Influence du fil et du prétraitement sur les raideurs .....	186
4.8.2.1 Raideur pré-pic $k_{bond,a}$ .....	186
4.8.2.2 Raideur post-pic $k_{debond,a}$ .....	187
4.8.2.3 Raideur résiduelle $k_{frictional,a}$ .....	187
4.8.3 Influence du fil et du prétraitement sur les paramètres énergétiques .....	188
4.8.3.1 Travail total $W_{total,a}$ .....	188
4.8.3.2 Travail pré-pic $W_{pré-pic,a}$ .....	188
4.8.3.3 Travail post-pic $W_{post-pic,a}$ .....	189
4.8.4 Relation entre la répartition des filaments de cœur et le comportement mécanique .....	190
4.8.4.1 Mesures de la quantité de filaments de cœur.....	190
4.8.4.2 Lien entre résistance à l'arrachement et filaments de cœur.....	192
4.8.4.3 Lien entre rigidités pré- et post-pic et filaments de cœur .....	193
4.8.4.4 Lien entre phase résiduelle et filaments de cœur .....	194
4.8.4.5 Aspects énergétiques.....	195
4.8.5 Analyse .....	197
4.9 Conclusion.....	198

## **Chapitre 5**

<b>Relation entre microstructure de l'interface et comportement mécanique à l'arrachement .....</b>	<b>201</b>
5.1. Introduction.....	202
5.2. Principe de travail .....	203
5.3. Etude des paramètres caractéristiques du comportement mécanique .....	203
5.3.1. Relation entre le débit d'écoulement et le comportement mécanique à l'arrachement .....	203
5.3.1.1. Cas de la phase pré-pic du comportement à l'arrachement .....	203
5.3.1.2. Cas de la phase post-pic du comportement à l'arrachement.....	205
5.3.1.3. Cas de la phase résiduelle du comportement à l'arrachement .....	206
5.3.2. Relation entre les paramètres porosimétriques et le comportement mécanique à l'arrachement .....	208
5.3.2.1. Paramètres porosimétriques pertinents .....	208

5.3.2.2. Cas de la phase pré-pic du comportement à l'arrachement .....	209
5.3.2.3. Cas de la phase post-pic du comportement à l'arrachement.....	211
5.3.2.4. Cas de la phase résiduelle du comportement à l'arrachement .....	213
5.3.3. Discussion.....	213
5.4. Etude des aspects énergétiques .....	214
5.4.1. Cas de la phase pré-pic .....	214
5.4.2. Cas des phases post-pic et post-pic résiduelle .....	216
5.4.3. Analyse globale .....	218
5.5. Influence de l'aptitude au mouillage du fil .....	221
5.5.1. Problématique .....	221
5.5.2. Influence sur les grandeurs caractéristiques du comportement mécanique.....	222
5.5.3. Influence sur les grandeurs énergétiques .....	224
5.6. Conclusion.....	227
<b>Conclusion générale</b> .....	229
<b>Références bibliographiques</b> .....	235

# Liste des figures

## Chapitre 1

Figure 1.1. Filaments enrobés d'ensimage d'une mèche de fil multi-filamentaire [Jes01].....	9
Figure 1.2. Fils multi-filamentaires à structure modifiée [Kon08].....	11
Figure 1.3. Bobines à fil (à droite et au centre), bandes tressées (au centre) et textiles tissés (à gauche) à base de fils multi-filamentaires de verre et tas de fibres courtes (au premier plan à gauche) [Won04]. ....	11
Figure 1.4. Techniques de fabrication des éléments en béton renforcés des fils multi-filamentaires [Kon08]. ....	12
Figure 1.5. Imprégnation limitée à l'extrême périphérie d'un fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire [Pei08]. ....	13
Figure 1.6. Imprégnation limitée à l'extrême périphérie d'un fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire [Alj10]. ....	13
Figure 1.7. Comparaison de la résistance en traction entre les filaments et les fils multi-filamentaires [Gri06].	15
Figure 1.8. Mode préparatoire des éprouvettes de fil multi-filamentaire pour les essais de traction basé sur une imprégnation totale du fil par une résine [Dil06].....	16
Figure 1.9. Courbes effort - déformation des fils multi-filamentaires de verre AR de longueurs libres variables. A gauche : courbes brutes. A droite : Courbes corrigées en tenant compte du glissement et des déformations au niveau des pinces de fixation du fil sur la presse [Chu06b]. ....	16
Figure 1.10. Distinction de deux zones d'action des interactions fil multi-filamentaire – matrice : zone périphérique correspondant au périmètre du fil et zone interne [Rei06]. ....	18
Figure 1.11. Schématisation des différents comportements mécaniques d'un fil multi-filamentaire lors d'un essai d'arrachement selon la résistance des liaisons internes [Rei06]. ....	19
Figure 1.12. Imprégnation partielle des filaments par la matrice cimentaire dans la zone périphérique d'une mèche enrobée dans un mortier [Hol04]. ....	21
Figure 1.13. Analyse multi-échelles des interactions entre le fil multi-filamentaire et la matrice cimentaire et principaux facteurs influant sur le comportement mécanique du composite [Kon03a]. ....	21
Figure 1.14. Suivi du processus de rupture des filaments dans une mèche multi-filamentaire enrobée dans une matrice polymérique lors des différentes étapes d'un essai d'arrachement [Ban04]. ....	22
Figure 1.15. Analyse et modélisation des différentes phases du mécanisme de rupture des filaments des essais de Banholzer par [Chu05]. ....	24
Figure 1.16. Modélisations analytiques simplifiées d'un fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice cimentaire [Zas02]; [Ban04]; [Ohn94]; [Sej02]; [Bey97]. ....	24
Figure 1.17. Simulation du comportement mécanique de la liaison des filaments externes et internes enrobés dans une matrice cimentaire [Hol04]. ....	25
Figure 1.18. Equilibre des contraintes entre les surfaces de liaison [Hol04]. ....	26
Figure 1.19. Simulation de l'essai d'arrachement d'un seul filament pour différentes longueurs d'enrobage par la matrice cimentaire $L_v$ [Ban04]. ....	27
Figure 1.20. Modélisation du degré d'imprégnation des filaments par la matrice en fonction de profondeur [Bon04]. ....	27
Figure 1.21. Modélisation de du comportement mécanique à l'arrachement fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire [Bon04]. ....	28
Figure 1.22. Élément caractéristique du fil multi-filamentaire qui prend en compte de la variabilité des caractéristiques géométriques et mécaniques des filaments [Chu06b]. ....	29
Figure 1.23. Le rôle de l'ondulation des filaments sur le comportement mécanique [Heg03]. ....	30
Figure 1.24. Rôle de la liaison chimique entre matrice polymérique et filament enrobé au niveau moléculaire sur la propagation de la fissure et la rupture de la liaison [Zha05]. ....	31
Figure 1.25. Prise en compte de la complexité de la liaison matrice cimentaire – fil multi-filamentaire au plan microstructural [Kon03b]. ....	31
Figure 1.26. Calcul de la distribution de la contrainte de cisaillement le long de l'interface du fil enrobé en supposant un comportement non – linéaire de la liaison [Ban04]. ....	32
Figure 1.27. Calcul de la distribution des déformations/et des glissements le long de la rupture de la liaison, [Hol04]. ....	33
Figure 1.28. Prise en compte de la variation des propriétés de la liaison entre la périphérie et le centre du fil enrobé dans la matrice cimentaire [Kon06a]. ....	34
Figure 1.29. Prise en compte des imperfections à l'échelle microstructurale de la liaison filaments matrice cimentaire et de la variabilité géométrique du fil sur l'analyse du mécanisme de rupture [Mom06]. ....	34
Figure 1.30. Trois alternatives de simulation de la périphérie du fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice cimentaire [Jes04a]. ....	35

Figure 1.31. En haut, élément de béton renforcé par des fils multi-filamentaires près un essai de traction. En bas, modélisation du composite [Han05].	36
Figure 1.32. En haut, élément de béton renforcé avec des fils multi-filamentaires près un essai de traction. En bas, modélisation du composite [Chu06a].	36
Figure 1.33. Modélisation des déformations des filaments autour d'une fissure lors d'un essai de traction selon l'imprégnation des filaments par la matrice cimentaire [Jes05].	37
Figure 1.34. Schématisation du comportement mécanique d'un pontage de fissure par le fil multi-filamentaire en fonction de la longueur d'ancrage dans la matrice cimentaire [Kon06b].	38
Figure 1.35. Mécanisme de dégradation des filaments de verre AR (alcali-résistant) dans un environnement cimentaire [Cuy07].	39
Figure 1.36. Facteurs agissant sur la dégradation des propriétés mécaniques des composites à base de matrice cimentaire et des fils multi-filamentaires de verre AR [Cuy04].	40

## **Chapitre 2**

Figure 2.1. Les filaments à l'échelle microstructurale du fil (MEB, x500).	47
Figure 2.2. Pontage local des filaments par l'ensimage au niveau de la mèche (à gauche). Détail du recouvrement des filaments par l'ensimage (à droite) (MEB x300 et x1000 respectivement).	48
Figure 2.3. Assemblage d'une centaine de filaments en mèche à l'échelle mésostructurale du fil SG1 (microscopie optique x40).	48
Figure 2.4. Macrostructure des fils multi-filamentaires constitués par plusieurs mèches à l'exception du fil OC2	49
Figure 2.5. Bobine de fil SG2.	49
Figure 2.6. Forte ondulation des mèches du fil OC1 (à gauche) et faible ondulation des mèches du fil SG2 (à droite).	50
Figure 2.7. Fils de fibre de chanvre.	50
Figure 2.8. Microstructure du fil de chanvre. A gauche, assemblage de fibres dans le fil au niveau d'une section (MEB x30). A droite, détail de texture d'une fibre de chanvre (MEB x500).	51
Figure 2.9. Mesures de la masse de segments de fil de 5 cm de longueur.	51
Figure 2.10. Mesures de la masse de segments de fil de 100 cm de longueur.	52
Figure 2.11. Coefficient de variation de la masse linéique des fils en fonction de la longueur.	52
Figure 2.12. Masse linéique donnée par le fabricant et mesurée sur des segments de fil.	53
Figure 2.13. Teneur en eau du fil suivant le 1 <sup>er</sup> et le 2 <sup>ème</sup> mode opératoire.	55
Figure 2.15. Variation de la teneur en eau des fils en fonction de temps.	57
Figure 2.16. Teneur en eau des fils déterminée par les différents modes opératoires.	58
Figure 2.17. Eprouvettes de fil multi-filamentaire SG1 de longueur libre de 50 mm pour l'essai de traction.	59
Figure 2.18. Machine de traction en cours d'essai.	60
Figure 2.19. Essai de traction du fil SG2 (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> , M-S).	62
Figure 2.20. L'influence de la maîtrise du procédé de fabrication des éprouvettes sur la résistance en traction (fil OC1, LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	63
Figure 2.21. Eprouvette de fil OC1 après l'essai (LL = 25 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	64
Figure 2.23. Courbes effort-déformation d'une mèche (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	66
Figure 2.24. Comparaison la résistance en traction des mèches (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	67
Figure 2.25. Courbes effort-déformation du fil SG1 pour différentes longueurs libres (V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	68
Figure 2.26. Exemple de la détermination de la pente <sub>10-60</sub> et de la déformation $\Delta\varepsilon_{50}$ sur la courbe effort – déformation d'une éprouvette (fil SG1, LL = 100 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	69
Figure 2.27. Variation de la pente <sub>10-60</sub> en fonction de la longueur libre des fils (V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	70
Figure 2.28. Variation de la déformation $\Delta\varepsilon_{50}$ en fonction de la longueur libre des fils (V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	71
Figure 2.29. Résistance en traction des fils en fonction de la longueur libre des éprouvettes (V = 0,01 min <sup>-1</sup> , S-S).	71
Figure 2.30. Courbes effort-déformation du fil OC1 pour différentes vitesses de déformation (LL = 50 mm, S-S).	73
Figure 2.31. Résistance en traction des fils en fonction de la vitesse de chargement (S-S, LL = 50 mm).	73
Figure 2.32. Effet l'alignement par l'eau sur la pente <sub>10-60</sub> (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> ).	74
Figure 2.33. Effet l'alignement par l'eau sur la déformation $\Delta\varepsilon_{50}$ (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> ).	74
Figure 2.34. Effet l'alignement par l'eau sur la résistance en traction (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> ).	75
Figure 2.35. Effet de l'eau sur la pente <sub>10-60</sub> (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> ).	76
Figure 2.36. Effet de l'eau sur la déformation $\Delta\varepsilon_{50}$ (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> ).	76
Figure 2.37. Effet de l'eau sur la résistance en traction (LL = 50 mm, V = 0,01 min <sup>-1</sup> ).	76

Figure 2.38. Eprouvette cylindrique de mortier avec fil multifilamentaire sur son axe principal .....	77
Figure 2.39. Montage spécifique pour la confection des éprouvettes. ....	78
Figure 2.40. Pré-imprégnation du fil par le coulis de ciment. a- fil à l'état initial ; b- préparation du coulis ; c- trempage manuel du fil dans le coulis. ....	79
Figure 2.41. Conservation des éprouvettes sous l'eau. ....	79
Figure 2.42. Courbe granulométrique du sable. ....	81
Figure 2.43. Essai d'étalement sur le mortier. ....	83
Figure 2.44. Mesure du temps de prise du mortier. ....	84
Figure 2.45. Mesure du temps de prise du coulis. ....	84
Figure 2.46. Lots d'éprouvettes 4x4x16 cm et essai de flexion trois points sur une éprouvette avant et après la rupture. ....	85
Figure 2.47. Evolution de la résistance en compression et de la résistance en flexion du mortier jusqu'à 28 jours. ....	86
Figure 2.48. Essai extensométrique sur éprouvette cylindrique 16*32 cm. ....	88
Figure 2.49. Courbes contrainte - déformation obtenus lors des essais cycliques de compression simple sur les deux éprouvettes cylindriques 16*32 cm. ....	88

### **Chapitre 3**

Figure 3.1. Préparation et fendage des prélèvements avant l'observation au MEB. ....	93
Figure 3.2. Section longitudinale du fil SG1 pour les trois modes de prétraitement (G=4). ....	94
Figure 3.3. Fil multi-filamentaire SG1 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire. ....	96
Figure 3.4. Fil multi-filamentaire SG1 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire. ....	96
Figure 3.5. Fil multifilamentaire SG1 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire. ....	97
Figure 3.6. Aspects typiques de la matrice cimentaire des échantillons hors fil multi-filamentaire. ....	97
Figure 3.7. Section longitudinale du fil SG2 pour les trois modes de prétraitement (G=4). ....	99
Figure 3.8. Fil multi-filamentaire SG2 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire. ....	99
Figure 3.9. Fil multi-filamentaire SG2 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire. ....	100
Figure 3.10. Fil multi-filamentaire SG2 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire. ....	100
Figure 3.11. Section longitudinale du fil SG3 pour les trois modes de prétraitement (G=4). ....	101
Figure 3.12. Détail de la section longitudinale du fil SG3 pour le prétraitement W (G=10). ....	102
Figure 3.13. Fil multi-filamentaire SG3 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire. ....	102
Figure 3.14. Fil multi-filamentaire SG3 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire. ....	102
Figure 3.15. Fil multi-filamentaire SG3 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire. ....	103
Figure 3.16. Section longitudinale du fil OC1 pour les trois modes de prétraitement (G=4). ....	104
Figure 3.17. Fil multi-filamentaire OC1 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire. ....	104
Figure 3.18. Fil multi-filamentaire OC1 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire. ....	105
Figure 3.19. Fil multi-filamentaire OC1 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire. ....	106
Figure 3.20. Section longitudinale du fil OC1 pour les trois modes de prétraitement (G=4). ....	107
Figure 3.21. Fil multi-filamentaire OC2 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire. ....	107
Figure 3.22. Fil multi-filamentaire OC2 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire. ....	107
Figure 3.23. Fil multi-filamentaire OC2 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire. ....	108
Figure 3.24. Estimation de la profondeur de pénétration de la matrice cimentaire et du diamètre apparent du fil OC1 avec prétraitement W (G=125). ....	108
Figure 3.25. Indice d'imprégnation des fils multi-filamentaires pour les différentes configurations expérimentales. ....	109
Figure 3.26. Diamètre apparent des fils multi-filamentaires pour les différentes configurations expérimentales. ....	110
Figure 3.27. Evaluation de la taille des pores inter-filamentaires. ....	113
Figure 3.28. Evaluation de la taille des plus gros pores inter-filamentaires à partir du diamètre des fils imprégnés. ....	113
Figure 3.29. Carottage réalisé dans des éprouvettes de mortier contenant un fil multi-filamentaire enrobé. ....	114
Figure 3.30. Appareil de porosité à mercure AUTOPORE IV 9500. ....	115
Tableau 3.2. Résultats généraux obtenus par porosimétrie mercure. ....	115
Figure 3.31. Principe de pénétration du mercure dans les échantillons sans fil massifs (a) ou percés (b). ....	117
Figure 3.32. Distribution des diamètres de pores dans le mortier. ....	117
Figure 3.33. Détail de la distribution des diamètres de pores dans le mortier. ....	118
Figure 3.34. Distribution de référence. ....	118
Figure 3.35. Fil SG1, distribution des diamètres de pores. ....	119

Figure 3.36. Distribution des pores dans la matrice cimentaire. Echantillons réalisés avec le fil SG1. ....	121
Figure 3.37. Distribution des pores dans la matrice cimentaire. Echantillons réalisés avec le fil OC1. ....	122
Figure 3.38. Comparaison entre les volumes $v_{0,3-3}$ des matrices obtenues avec ou sans fil (SG1). ....	122
Figure 3.39. Comparaison entre les volumes $v_{3-30}$ des matrices obtenues avec ou sans fil (SG1). ....	122
Figure 3.40. Comparaison entre les volumes $v_{0,3-3}$ des matrices obtenues avec ou sans fil (OC1). ....	123
Figure 3.41. Comparaison entre les volumes $v_{3-30}$ des matrices obtenues avec ou sans fil (OC1). ....	123
Figure 3.40. Volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ , (ml/g).....	124
Figure 3.41. Volume différentiel de pores $\Delta v_{3-30}$ , (ml/g).....	125
Figure 3.42. Volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-30}$ , (ml/g).....	125
Figure 3.45. Essai d'écoulement – dispositif expérimental. ....	127
Figure 3.46. Essai d'écoulement : éprouvettes de référence. ....	128
Figure 3.47. Essai d'écoulement: fils SG3. ....	128
Figure 3.48. Débits d'écoulement surfacique dans les fils imprégnés. ....	131
Figure 3.49. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et l'indice d'imprégnation. ....	132
Figure 3.50. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux $\Delta v_{0,3-3}$ . ....	133
Figure 3.51. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux $\Delta v_{3-30}$ . ....	133
Figure 3.52. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux $\Delta v_{0,3-3}$ . ....	134
Figure 3.53. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux $\Delta v_{3-30}$ . ....	135
Figure 3.54. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux $\Delta v_{0,3-3}$ et lien avec l'index d'imprégnation. ....	136

## Chapitre 4

Figure 4.1. Glissement des filaments lors de l'arrachement. ....	141
Figure 4.2. Protection des éprouvettes de la dessiccation lors de la préparation des éprouvettes d'arrachement. ....	142
Figure 4.3. Trois éprouvettes après l'arrachement, $L_e = 5$ cm. ....	142
Figure 4.4. Essai d'arrachement: montage utilisé. ....	143
Figure 4.5. Variabilité du comportement d'un fil multifilamentaire. 3 fils SG1 W, $L_e = 15$ cm. ....	144
Figure 4.6. Variation remarquable du comportement. 3 fils SG1 W, $L_e = 1$ cm. ....	145
Figure 4.7. Courbes charge - déplacement du fil SG1 (prétraitements W, D, PI). ....	146
Figure 4.8. Éprouvettes après essai d'arrachement, cas SG1 W, D et PI, $L_e = 5$ cm. ....	147
Figure 4.9. Paramètres caractéristiques du comportement à l'arrachement. ....	148
Figure 4.10. Filaments extraits de la matrice au cours de l'arrachement, OC1 D, $L_e = 3$ cm. ....	156
Figure 4.11. Mesure de la longueur extraite et portion de filaments de cœur. ....	157
Figure 4.12. Valeurs de $l_{er}$ en fonction de la longueur enrobée. ....	162
Figure 4.13. Valeurs de $p_{fc}$ en fonction de la longueur enrobée. ....	163
Figure 4.14. Variation de $p_{fc}$ pour une même longueur extraite relative $l_{er}$ . ....	164
Figure 4.15. Evolution de $P_{max}$ avec la longueur enrobée. Barre sombre : résistance en traction simple du fil. ....	165
Figure 4.16. Evolution de $P_{résiduel}$ avec la longueur enrobée. ....	166
Figure 4.17. Evolution de $k_{bond}$ avec la longueur enrobée. Barre sombre : raideur du fil en traction simple. ....	169
Figure 4.18. Evolution de $k_{debond}$ avec la longueur enrobée. Barre sombre : raideur du fil en traction simple. ....	170
Figure 4.19. Evolution de $k_{frictional}$ avec la longueur enrobée. ....	172
Figure 4.20. Travail total (jusqu'à déplacement d'arrachement de 8 mm) ....	175
Figure 4.21. Travail pré-pic. ....	176
Figure 4.22. Travail post-pic (travail total dans les phases post-pic et post-pic résiduelle). ....	177
Figure 4.23. Modélisation du comportement pré-pic. ....	182
Figure 4.24. Influence du fil et du prétraitement sur la résistance à l'arrachement $P_{max,a}$ . ....	185
Figure 4.25. Influence du fil et du prétraitement sur l'efficacité $e(P_{max,a})$ . ....	185
Figure 4.26. Influence du fil et du prétraitement sur l'effort résiduel $P_{résiduel,a}$ . ....	186
Figure 4.27. Influence du fil et du prétraitement sur la raideur pré-pic. ....	186
Figure 4.28. Influence du fil et du prétraitement sur la raideur post-pic. ....	187
Figure 4.29. Influence du fil et du prétraitement sur la raideur résiduelle. ....	187
Figure 4.30. Influence du fil et du prétraitement sur le travail total dissipé au cours de l'arrachement. ....	188
Figure 4.31. Influence du fil et du prétraitement sur le travail pré-pic dissipé au cours de l'arrachement. ....	189
Figure 4.32. Influence du fil et du prétraitement sur le travail post-pic dissipé au cours de l'arrachement. ....	190
Figure 4.33. Influence du fil et du prétraitement sur la part du travail post-pic dans le travail total. ....	190
Figure 4.34. Relation entre longueur extraite et proportion massique extraite. ....	191

Figure 4.35. Efficacité des fils à l'arrachement en fonction de la proportion de fil extrait.....	192
Figure 4.36. Raideur pré-pic en fonction de la proportion de fil extrait.....	193
Figure 4.37. Raideur post-pic en fonction de la proportion de fil extrait.....	194
Figure 4.38. Résistance résiduelle en fonction de la proportion de fil extrait.....	195
Figure 4.39. Raideur résiduelle en fonction de la proportion de fil extrait.....	195
Figure 4.40. Travail pré-pic en fonction de la proportion de fil extrait.....	196
Figure 4.41. Travail post-pic en fonction de la proportion de fil extrait.....	197

## Chapitre 5

Figure 5.1. Relation entre la résistance à l'arrachement $P_{max,a}$ et débit surfacique d'écoulement $q_f$ (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	204
Figure 5.2. Relation entre $e(P_{max,a})$ et débit surfacique d'écoulement $q_f$ (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	205
Figure 5.3. Relation entre la raideur pré-pic et le débit surfacique d'écoulement $q_f$ (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	205
Figure 5.4. Relation entre la raideur post-pic et le débit surfacique d'écoulement $q_f$ (traits pointillés : enveloppe).....	206
Figure 5.5. Fil OC1W après essai d'arrachement – glissement des filaments non ancrés au cours de la phase résiduelle (les filaments sont extraits vers la gauche).....	207
Figure 5.6. Fil SG2W après essai d'arrachement – entrainement de filaments générant la formation d'une boucle (les filaments sont extraits vers la gauche).....	207
Figure 5.8. Relation entre l'effort $P_{residuel,a}$ et le débit surfacique d'écoulement $q_f$ .....	208
Figure 5.9. Relation entre la raideur résiduelle $k_{frictional,a}$ et le débit surfacique d'écoulement $q_f$ .....	208
Figure 5.10. Relation entre la résistance à l'arrachement $P_{max,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).....	209
Figure 5.11. Relation entre l'efficacité d'arrachement $e(P_{max,a})$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).....	210
Figure 5.12. Relation entre la raideur pré-pic $k_{bond,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).....	210
Figure 5.13. Relation entre la raideur post-pic $k_{debond,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).....	211
Figure 5.14. Relation entre la raideur résiduelle $k_{frictional,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).....	211
Figure 5.15. Relation entre la raideur résiduelle $k_{frictional,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{3-30}$ . (traits pointillés : enveloppe).....	212
Figure 5.16. Relation entre l'effort $P_{residuel,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ .....	212
Figure 5.17. Relation entre $W_{pré-pic,a}$ et débit surfacique d'écoulement $q_f$ .....	214
Figure 5.18. Relation entre $W_{pré-pic,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	215
Figure 5.19. Relation entre $W_{pré-pic,a}$ et le volume différentiel des pores $\Delta v_{3-30}$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	215
Figure 5.20. Relation entre $W_{post-pic,a}$ et débit surfacique d'écoulement $q_f$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	216
Figure 5.21. Relation entre $W_{post-pic,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ (trait pointillé : courbe moyenne).....	217
Figure 5.22. Relation entre $W_{post-pic,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{3-30}$ .....	217
Figure 5.23. Relation entre $W_{total,a}$ et débit surfacique d'écoulement $q_f$ (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	219
Figure 5.24. Part de $W_{post-pic,a}$ dans l'énergie dissipée totale en fonction du débit surfacique d'écoulement $q_f$ (traits pointillés : enveloppe).....	219
Figure 5.25. Relation entre $W_{total,a}$ et le volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ .....	220
Figure 5.26. Part de $W_{post-pic,a}$ dans l'énergie dissipée totale en fonction du volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).....	220
Figure 5.27. Part de $W_{post-pic,a}$ dans l'énergie dissipée totale en fonction du volume différentiel de pores $\Delta v_{3-30}$ .....	221
Figure 5.28. Relation entre $P_{max,a}$ et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : courbes moyennes).....	222

Figure 5.29. Relation entre $e(P_{max,a})$ et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes). .....	223
Figure 5.30. Relation entre $k_{debond,a}$ et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes). .....	223
Figure 5.31. Relation entre $P_{residuel,a}$ et la capacité de rétention d'eau du fil. ....	224
Figure 5.32. Relation entre $W_{pré-pic,a}$ et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pointillés : enveloppe). ....	224
Figure 5.33. Relation entre $W_{post-pic,a}$ et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes). .....	225
Figure 5.34. Relation entre $W_{total,a}$ et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : enveloppe). .....	226
Figure 5.35. Part de $W_{post-pic,a}$ dans l'énergie dissipée totale en fonction de la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes). .....	226

# Liste des tableaux

## Chapitre I

Tableau 1.1. Propriétés mécaniques et physiques de filaments constitutifs des fils multi-filamentaires industriels les plus performants (selon les informations fournies par les fabricants).....	7
Tableau 1.2. Composition chimique des deux types de verre [selon Gri02].....	8

## Chapitre 2

Tableau 2.1. Principales caractéristiques de fils multi-filamentaires à base de verre. ....	45
Tableau 2.2. Principales caractéristiques du fil de chanvre.....	46
Tableau 2.3. Section estimée des fils. ....	53
Tableau 2.4. Imprégnation par l'eau de segments de fil de 10 cm (cinq mesures).....	54
Tableau 2.5. Imprégnation par l'eau de segments de fil de 10 m (deux mesures). ....	55
Tableau 2.6. Imprégnation par l'eau de segments de fil de 1,3 m (deux mesures). ....	57
Tableau 2.7. Pente <sub>10-60</sub> et déformation $\Delta\varepsilon_{50}$ sur les courbes effort - déformation pour différentes valeurs de la longueur libre des fils ( $V = 0,01 \text{ min}^{-1}$ , S-S). ....	70
Tableau 2.8. Caractéristiques physiques et mécaniques de ciment. ....	80
Tableau 2.9. Composition chimique élémentaire de ciment (%). ....	80
Tableau 2.10. Composition minéralogique du clinker Portland selon Bogue (%). ....	80
Tableau 2.11. Analyse granulométrique du sable. ....	81
Tableau 2.12. Caractéristiques de l'adjuvant superplastifiant.....	82
Tableau 2.13. Composition du mortier et du coulis. ....	82
Tableau 2.14. Evolution de la résistance en compression et de la résistance en flexion du mortier jusqu'à 28 jours. ....	86
Tableau 2.15. Résistance en compression à 28j. ....	87
Tableau 2.16. Résistance en flexion à 28j. ....	87
Tableau 2.17. Masse volumique apparente saturée du mortier et du coulis à 28 jours. ....	89

## Chapitre 3

Tableau 3.1. Principales caractéristiques de l'imprégnation des fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire .....	112
Tableau 3.2. Résultats généraux obtenus par porosimétrie mercure. ....	118
Tableau 3.3. Volume des pores de diamètre 0.3-3 $\mu\text{m}$ : $v_{0,3-3}$ .....	123
Tableau 3.4. Volume des pores de diamètre 3-30 $\mu\text{m}$ : $v_{3-30}$ .....	123
Tableau 3.5. Volume différentiel des pores. ....	127
Tableau 3.6. Débits d'écoulement mesurés, (ml/h).....	133
Tableau 3.7. Débits surfacique d'écoulement dans les fils, (ml/h/mm <sup>2</sup> ). ....	134

## Chapitre 4

Tableau 4.1. Pic de résistance et rigidités. ....	150
Tableau 4.2. Phase post-pic : rigidité ; phase résiduelle ; point de transition et ouverture de la courbe. ....	152
Tableau 4.3. Paramètres énergétiques. ....	154
Tableau 4.4. Valeurs de la longueur extraite relative $l_{er}$ et de la proportion massique $p_{fc}$ . ....	160
Tableau 4.5. Valeurs de la longueur minimale d'enrobage $L_{min}$ . ....	179
Tableau 4.6. Comportement mécanique à l'arrachement de référence : paramètres mécaniques descriptifs.....	180
Tableau 4.7. Comportement mécanique à l'arrachement de référence : paramètres énergétiques. ....	181
Tableau 4.8. Comportement mécanique des fils en traction simple. ....	182
Tableau 4.9. Comportement mécanique intrinsèque à l'arrachement : paramètres caractéristiques. ....	184
Tableau 4.10. Longueur extraite moyenne et proportion massique moyenne. ....	191

## Notations

- $A_f$  : Section du fil multi-filamentaire (mm<sup>2</sup>)  
 $b$  : Largeur de la section des éprouvettes 4\*4\*16 cm ( $b= 4$  cm)  
 $Ch$  : Fibre végétale de chanvre  
 $E$  : Etalement (%) ; Module de mortier (MPa)  
 $e(P_{max,lim})$  : Efficacité de résistance de fil à l'arrachement (%)  
 $f_c$  : Résistance à la rupture en compression (MPa)  
 $G_i$  : Différentes gâchées de mortier  
 $h$  : Hauteur de cube cimentaire des éprouvettes 4\*4\*16 cm ( $h = 4$ cm)  
 $i_y$  : Indice d'imprégnation (%)  
 $k_{bond,a}$  : Raideur pré-pic du fil à l'arrachement (N/mm)  
 $k_{bond,lim}$  : Raideur pré-pic moyenne du fil à l'arrachement pour  $L_e$  supérieur à  $L_{min}$  (N/mm)  
 $k_{bond,t}$  : Raideur pré-pic du fil en traction simple (N/mm)  
 $k_{debond,a}$  : Raideur post-pic du fil à l'arrachement (N/mm)  
 $k_{debond,lim}$  : Raideur post-pic moyenne du fil à l'arrachement pour  $L_e$  supérieur à  $L_{min}$  (N/mm)  
 $k_{frictional,a}$  : Raideur résiduelle à l'arrachement (N/mm)  
 $k_{frictional,lim}$  : Raideur résiduelle moyenne du fil à l'arrachement pour  $L_e$  supérieur à  $L_{min}$  (N/mm)  
 $l$  : Portée de l'éprouvette pour les essais de flexion sur éprouvette 4\*4\*16 cm ( $l= 100$  mm)  
 $L_e$  : Longueur enrobée du fil (cm)  
 $LL$  : Longueur libre du fil (cm)  
 $L_{min}$  : Longueur minimale d'enrobage (cm)  
 $MEB$  : Microscope Electronique à Balayage  
 $M_{eau}$  : Masse d'eau (g)  
 $M_{immergée}$  : Masse hydraulique (g)  
 $M_{mouillée}$  : Masse à l'air(g)  
 $M_{sèche}$  : Masse sèche (g)  
 $M-S$  : Mode de préparation du fil avant l'essai de traction (mouillé pendant la préparation, sec pendant l'essai)  
 $N$  : Effort de traction appliqué par la presse Instron au cours d'un essai (N)  
 $N_{max}$  : Effort maximal de traction (N)  
 $OC1$  : Fil multi-filamentaire de verre E  
 $OC2$  : Fil multi-filamentaire de verre E  
 $p$  : Porosité accessible à l'eau selon AFREM (%)  
 $P$  : Charge d'arrachement appliquée par la presse Instron au cours d'un essai (N)  
 $P_C$  : Effort de compression à la rupture (N)  
 $P_f$  : Effort de traction par flexion à la rupture (N)  
 $p_{fc}$  : Pourcentage massique de filaments de cœur extraits après l'arrachement  
 $P_{max}$  : Charge maximale d'arrachement appliquée sur le fil (N)  
 $P_{max,a}$  : Résistance à l'arrachement (modélisation à l'arrachement) (N)  
 $P_{max,lim}$  : Résistance à l'arrachement moyenne de  $P_{max}$  pour  $L_e$  supérieur à  $L_{min}$  (N)  
 $P_{résiduel}$  : Charge résiduelle (N)  
 $P_{résiduel,a}$  : Charge résiduelle à l'arrachement (N)  
 $P_{résiduel,lim}$  : Charge résiduelle moyenne pour  $L_e$  supérieur que  $L_{min}$  (N)  
 $SG1$  : Fil multi-filamentaire de verre AR  
 $SG2$  : Fil multi-filamentaire de verre AR  
 $SG3$  : Fil multi-filamentaire de verre AR  
 $S-M$  : Un mode de préparation le fil avant l'essai de traction (sec pendant la préparation, mouillé pendant l'essai)  
 $S-M1m$  : Mode de préparation du fil avant l'essai de traction (sec pendant la préparation, mouillé pendant un mois, mouillé pendant l'essai)  
 $S-M1s$  : Mode de préparation du fil avant l'essai de traction (sec pendant la préparation, mouillé pendant une semaine ; mouillé pendant l'essai)  
 $S-S$  : Mode de préparation du fil avant l'essai de traction (fil toujours sec)  
 $tex$  : unité de mesure de la masse linéique du fil (g/ km)  
 $V$  : Vitesse de déformation (min<sup>-1</sup>)  
 $W_{post-pic}$  : Travail dissipé pendant la phase post-pic (mJ = N.mm)  
 $W_{post-pic,a}$  : Travail dissipé pendant la phase post-pic de l'arrachement (mJ = N.mm)  
 $W_{post-pic,lim}$  : Travail moyen dissipé pendant la phase post-pic pour  $L_e$  supérieur à  $L_{min}$  (mJ = N.mm)  
 $W_{pré-pic}$  : Travail dissipé pendant la phase pré-pic (mJ = N.mm)  
 $W_{pré-pic,lim}$  : Travail moyen dissipé pendant la phase pré-pic pour  $L_e$  supérieur à  $L_{min}$  (mJ = N.mm)

$W_{\text{pré-pic}, t}$  : Travail dissipé en traction simple pendant la phase pré-pic (mJ = N.mm)  
 $W_{\text{total}}$  : Travail total dissipé (mJ = N.mm)  
 $W_{\text{total}, a}$  : Travail total dissipé à l'arrachement (mJ = N.mm)  
 $W_{\text{total}, \text{lim}}$  : Travail total moyen dissipé pour  $L_c$  supérieur à  $L_{\text{min}}$  (mJ = N.mm)  
 $\delta$  : Allongement du fil (mm)  
 $\delta_f$  : Allongement du fil correspond à la charge résiduelle  $P_f$  (mm)  
 $\delta_{\text{max}}$  : Allongement du fil à la (mm)  
 $\delta_{\text{max}, a}$  : Extraction du fil à la rupture par arrachement (mm)  
 $\delta_{\text{max}, \text{lim}}$  : Extraction moyenne du fil à la rupture par arrachement pour  $L_c$  supérieur à  $L_{\text{min}}$  (mm)  
 $\delta_{\text{max}, t}$  : Allongement à la rupture du fil en traction (mm)  
 $\varepsilon_{10}$  : Déformation de traction correspond à 10 % de  $N_{\text{max}}$   
 $\varepsilon_{50}$  : Déformation de traction correspond à 50 % de  $N_{\text{max}}$  (phase pré-pic)  
 $\varepsilon'_{50}$  : Déformation de traction correspond à 50 % de  $N_{\text{max}}$  (phase post-pic)  
 $\rho$  : Masse volumique absolue du fil ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\sigma_{\text{max}}$  : Contrainte maximale du mortier en compression ou en flexion (MPa)  
 $v_{0,3-3}$  : Volume cumulé des pores de diamètre 0,3  $\mu\text{m}$  à 3  $\mu\text{m}$  (mL/g)  
 $v_{0,3-30}$  : Volume cumulé des pores de diamètre 0,3  $\mu\text{m}$  à 30  $\mu\text{m}$  (mL/g)  
 $v_{3-30}$  : Volume cumulé des pores de diamètre 3  $\mu\text{m}$  à 30  $\mu\text{m}$  (mL/g)  
 $v_{30-300}$  : Volume cumulé des pores de diamètre 30  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$  (mL/g)



# **Introduction**

Le béton armé est le matériau composite le plus répandu dans le monde. Ses innombrables applications dans tous les domaines de la construction du génie civil depuis plus d'un siècle résultent des nombreux avantages du composite, tels que le relativement faible coût de production (comparativement aux autres matériaux de construction), la facilité de la mise en forme, les multiples possibilités d'adaptation aux conditions de sollicitation de l'ouvrage, la bonne résistance en compression (grâce au béton) la bonne tenue à la flexion et au cisaillement et sa ductilité (grâce à l'acier) ainsi que la pérennité du matériau lorsque l'environnement ne présente pas des facteurs agressifs pour l'acier ou le béton. La très grande étendue du champ d'applications a toutefois montré que le béton armé présentait aussi des points faibles qui le rendent mal adapté et peu pérenne dans plusieurs cas. Un premier inconvénient est la fissuration du béton induite par les contraintes de traction, et plus particulièrement, celles liées au retrait de dessiccation. Cette fissuration visible et gênante du point de vue esthétique constitue aussi le passage privilégié de l'eau et des facteurs agressifs de l'environnement. Un deuxième inconvénient, souvent lié au précédent, est sa faiblesse face aux facteurs agressifs capables d'induire la corrosion des armatures et, à plus ou moins long terme, la dégradation du composite. Les facteurs agressifs les plus courants sont le gaz carbonique atmosphérique et les ions chlorure présents dans le milieu marin et dans les sels de déverglaçage.

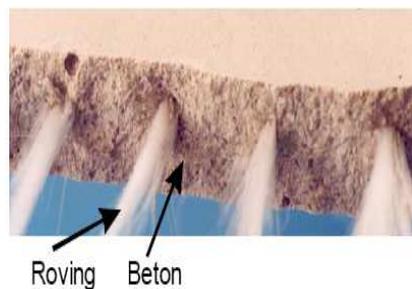
Pour palier au premier inconvénient, on peut envisager une augmentation du nombre des armatures et leur rapprochement à la surface libre du béton, la plus sollicitée par des contraintes de traction, souvent induites par la dessiccation. Néanmoins, cette solution augmente le risque de corrosion des armatures compte tenu que ce risque est d'autant plus important que le taux de ferrailage est élevé et que l'épaisseur d'enrobage est faible. Pour protéger les armatures des facteurs agressifs de l'environnement, le règlement actuel concernant le calcul des structures en béton armé (NF EN 1992.1, Eurocode 2) préconise une épaisseur minimale d'enrobage des aciers selon l'agressivité du milieu afin de garantir une pérennité du composite de l'ordre de 50 ans. Si l'on souhaite assurer à la fois une pérennité des structures en béton face aux facteurs agressifs à long ou très long terme et un faible enrobage, d'autres types de renfort que les armatures traditionnelles en acier doivent être envisagés.

Devant ces problèmes, beaucoup d'efforts ont été entrepris depuis plusieurs décennies pour trouver des solutions de renforcement du béton à la fois pérennes et économiques pour la construction. Dans un premier temps, les fibres courtes (métalliques, synthétiques, naturelles...) ont été utilisées pour rendre la fissuration du béton plus diffuse, moins visible et le composite plus résistant à la pénétration de l'eau et des autres facteurs agressifs de l'environnement. Les fibres courtes sont très souvent introduites aujourd'hui dans la formulation des bétons pour dallage ou pour éléments fléchis dont la fissuration est jugée préjudiciable. Toutefois, l'utilisation des fibres courtes n'a pas permis de réduire le taux de ferrailage nécessaire à la reprise des contraintes de traction et de cisaillement dans les éléments car leur présence ne modifie pas significativement la résistance en traction et cisaillement du béton. Elle n'a pas permis non plus de réduire l'épaisseur d'enrobage.

Pour diminuer le taux de ferrailage il faut envisager des renforts structurels capables de se substituer au rôle des aciers, c'est à dire capables de reprendre les efforts de traction dans l'élément composite tout en restant solidement ancrés dans les zones de compression ou de faible contrainte. Pour diminuer l'épaisseur d'enrobage, il faut des renforts structurels non sensibles aux facteurs agressifs de l'environnement et plus particulièrement au gaz carbonique atmosphérique et aux ions chlorure. L'avènement des fils multifilamentaires à

base de carbone ou de verre, de très grande résistance en traction (nettement supérieure à celle de l'acier de qualité courante) et chimiquement stables aux milieux agressifs précédents a permis d'envisager des solutions pour palier efficacement aux deux inconvénients précédents.

Les fils multifilamentaires ont, largement, fait la démonstration de leur efficacité en tant que renfort structurel de composites à base de résine. Ils ont trouvé, depuis quelques décennies, une multitude d'applications dans l'industrie aéronautique, navale et automobile, pour évoquer les cas les plus courants. Or, leur utilisation dans les éléments des structures en béton à la place des armatures en acier n'est pas chose facile. En effet, leur mise en place dans les coffrages ne peut pas se faire suivant les méthodes traditionnelles de ferrailage en raison de leur souplesse. En contrepartie, les fils multifilamentaires toujours en raison de leur souplesse peuvent facilement être tissés en textile et engendrer de nouveaux types de renfort qui ne sont absolument pas envisageables avec les armatures en acier. En peu de mots nous pouvons dire que les fils multifilamentaires offrent des nouvelles possibilités de renforcement structurel du béton à condition d'inventer des nouveaux modes de conception et de réalisation des ouvrages en génie civil.



**Figure 0.1.** Élément préfabriqué en béton renforcé par des fils multifilamentaires de verre présentant une épaisseur totale inférieure à 3 cm [Rau07]

L'industrie du béton a déjà relevé ce défi et réussi de produire des éléments préfabriqués décoratifs de très faible épaisseur, de très satisfaisante tenue mécanique, et très résistant aux facteurs agressifs de l'environnement, renforcés uniquement par des fils multifilamentaires tissés ou non. Cependant, l'utilisation de ce type de renfort dans la fabrication des éléments structurels des ouvrages sera toujours exclue tant que ce type de renfort ne sera pas pris en compte par les règlements. Mais pour cela, il faut comprendre, maîtriser et modéliser le comportement mécanique de ce nouveau composite. Cela n'est pas non plus chose facile si nous tenons compte de la variabilité des caractéristiques d'un fil multifilamentaire suivant sa longueur. En effet, un fil multifilamentaire se compose de plusieurs centaines (voire de milliers) de filaments longs, de diamètre micronique, assemblés, le plus souvent, à des structures intermédiaires qu'on appelle mèches par un ensimage. L'ensimage crée des pontages locaux entre filaments et donne à la mèche une certaine cohésion sans perte significative de sa souplesse. Le fil résulte de l'association d'un nombre plus ou moins important de mèches. Cette structure induit des variations géométriques à plusieurs échelles. D'une part, le caractère aléatoire des pontages et la variation de la quantité locale d'ensimage dans la mèche induisent des variations d'ordre microscopique, d'autre part, l'ondulation et la torsion plus ou moins prononcée des mèches dans le fil induit des variations d'ordre macroscopique. Toutes ces variations agissent directement sur le comportement micromécanique en traction du fil enrobé dans une matrice cimentaire. Elles influent également sur le degré d'imprégnation du fil multifilamentaire par la matrice cimentaire donc sur la qualité de l'adhérence entre les deux matériaux et consécutivement sur la transmission des efforts.

En conclusion, l'utilisation des fils multifilamentaires comme renfort structurel du béton nous met face à des importants défis scientifiques et techniques de compréhension, de maîtrise, de modélisation, d'optimisation et d'innovation. Dans ce contexte, nous sommes intéressés à l'étude du comportement micromécanique des fils multifilamentaires à base de verre dans le béton avec l'objectif d'identifier et d'évaluer les paramètres microstructuraux, physiques et mécaniques qui sont prépondérants et qui doivent être pris en compte dans la modélisation du comportement mécanique du composite. Notre approche est essentiellement expérimentale et comporte de nombreux essais mécaniques (essais d'arrachement), caractérisations physiques et examens microstructuraux. L'originalité de notre travail réside essentiellement dans la prise en compte de la complexité structurelle des fils multifilamentaires à base de verre et de la variabilité de leurs caractéristiques tant dans le processus d'imprégnation que dans le comportement micromécanique du composite. Ainsi, nous avons donné un poids particulier, d'une part, à l'étude des caractéristiques géométriques, physiques et mécaniques des fils multifilamentaires et leur variabilité en fonction de la longueur et, d'autre part, à l'examen microstructural des fils multifilamentaires enrobés dans la matrice cimentaire en connexion avec les essais d'arrachement sous différentes configurations expérimentales modulant l'imprégnation. Nous avons aussi essayé d'évaluer le degré d'imprégnation du fil multifilamentaire par la matrice cimentaire en associant des examens microstructuraux à des mesures physiques de la porosité et la perméabilité résiduelle du fil enrobé.

Le présent mémoire constitue la synthèse des travaux que nous avons réalisés sur les fils multifilamentaires à base de verre et des résultats que nous avons obtenus sur le comportement micromécanique des ces fils enrobés dans la matrice cimentaire en tenant compte du rôle de l'imprégnation. En plus, de la présente introduction le mémoire comprend cinq chapitres et une conclusion générale dont les grandes lignes sont les suivantes :

Le premier chapitre est dédié à une revue bibliographique des données actuelles sur le comportement mécanique des fils multifilamentaires dans les composites et plus particulièrement ceux à base de matrice cimentaire.

Le second chapitre traite des propriétés géométriques, physiques et mécaniques des cinq fils multifilamentaires à base de verre choisis pour l'étude ainsi que des caractéristiques du mortier d'enrobage utilisé pour la confection des éprouvettes destinées aux essais d'arrachement.

Le troisième chapitre étudie les caractéristiques microstructurales et porométriques des fils multifilamentaires enrobés dans la matrice cimentaire afin de déterminer le degré d'imprégnation sous différents pré-traitements des fils et son influence sur les propriétés physiques des éprouvettes.

Le quatrième chapitre est dédié aux essais d'arrachement des fils et à l'analyse détaillée de leur comportement micromécanique.

La liaison entre le comportement mécanique et les paramètres physiques et microstructuraux identifiés est réalisée dans le cinquième chapitre.

La conclusion générale permet de dégager les points les plus importants de ce travail de recherche et de donner les principales perspectives de recherche sur le sujet.

# **Chapitre 1**

## **Etude bibliographique**

## 1.1 Introduction

Dans l'étude bibliographique nous essayons faire le tour des connaissances actuelles sur l'utilisation des fils multi-filamentaires à base de verre comme renfort dans les structures composites et, plus particulièrement, ceux à base de matériaux cimentaires. Pour cela, les données publiées sur la constitution et les propriétés des fils multi-filamentaires à base de verre ainsi que celles sur les principales propriétés des matrices cimentaires qui les enrobent sont analysées en premier lieu. En second lieu, les études dédiées au comportement mécanique des fils multifilamentaires à base de verre en tant que renfort structurel des composites sont développées profitant aussi de la riche expérience accumulée dans l'étude des composites à base de liants polymériques. Une attention particulière est donnée aux études menées sur les interactions entre les fils multi-filamentaires et la matrice qui les enrobe afin de mieux comprendre le fonctionnement micromécanique du composite. En troisième lieu, un tour d'horizon des approches de modélisation employées pour étudier le comportement micromécanique des fils multi-filamentaires dans les matériaux composites est mené. L'étude bibliographique se termine par un bref aperçu des principaux aspects de durabilité des fils multi-filamentaires dans les matrices cimentaires.

## 1.2 Constitution des fils multi-filamentaires à base de verre

Depuis les temps préhistoriques l'homme a su filer les fibres naturelles extraites des différentes plantes ou recueillies sur les animaux et produire des fils retordus qui ont été utilisés aussi bien pour tisser que pour lier ou renforcer. Aujourd'hui, l'industrie fabrique une très grande variété de fils qui résultent d'un assemblage des filaments d'origine minérale, organique ou métallique et qui, en raison de leur constitution, présentent des propriétés mécaniques très significativement supérieures à celles des fils retordus traditionnels à base de fibres naturelles. Premièrement, les filaments constitutifs des fils industriels peuvent avoir une longueur aussi grande que souhaitée à la différence fibres naturelles qui, selon leur origine, ont une longueur limitée à quelques centimètres ou quelques dizaines de centimètres. Deuxièmement, en raison des matériaux très résistants utilisés dans la fabrication, les filaments industriels présentent une tenue mécanique sans commune mesure avec les fibres naturelles tout en garantissant une souplesse comparable à celle de ces dernières permettant de couvrir tout le champ d'applications des fils naturels. De par ces propriétés mécaniques spécifiques, les fils multi-filamentaires industriels ont permis de fabriquer des matériaux composites à propriétés mécaniques particulièrement élevées.

Les fils multi-filamentaires à base de verre font partie de la catégorie de fils les plus performants. Dans l'industrie automobile, navale et aéronautique ils ont été utilisés comme renfort structurel de pièces composites qui sont progressivement venues remplacer avantageusement des nombreuses pièces métalliques. Les filaments de verre présentent, en effet, une résistance à la traction plus de six fois supérieure à celle de l'acier de nuance courante et un module d'élasticité trois fois inférieur (**tableau 1.1**) conférant ainsi une excellente résistance associée à une grande souplesse aux pièces confectionnées. Par ailleurs, l'utilisation des fils multi-filamentaires à base de verre dans les composites est concurrentielle à celle des fils multi-filamentaires à base de carbone ou d'aramide dont les performances mécaniques sont supérieures à celles des fils à base de verre. La principale raison de leur succès est que la production industrielle des filaments de verre est beaucoup plus facile que

celle des autres filaments synthétiques concurrents et consécutivement leur coût est significativement plus faible.

**Tableau 1.1.** Propriétés mécaniques et physiques de filaments constitutifs des fils multi-filamentaires industriels les plus performants (selon les informations fournies par les fabricants).

Filament	Fabricant	Densité	Diamètre du filament	Résistance en traction	Module d'élasticité	Allongement à la rupture
		g/cm <sup>3</sup>	μm	GPa	GPa	%
Verre AR	Saint-Gobain Vetrotex®	2,68	27	1,7	72	2,4
Carbone	Tenax-fibers®	1,79	7	4,0	240	1,5
Aramide	Tejin Twaron®	1,39	12	3,5	78,5	4,6

Il serait injuste de présenter les principaux avantages des fils multi-filamentaires à base de verre sans évoquer aussi brièvement leurs principaux inconvénients. Il s'agit en premier lieu de la fragilité de filaments de verre de taille micronique face aux frictions exercées dans le fil lors du filage, du bobinage ou lors de la mise en œuvre dans les composites. Pour atténuer ces frictions et garantir l'intégrité des filaments, les fabricants les enrobent systématiquement d'un ensimage qui les lubrifie et les protège et, en plus, donne une certaine cohésion au lot de filaments traités appelé mèche. En raison de la présence de l'ensimage et des mèches, les fils multi-filamentaires à base de verre présentent une complexité structurelle et une certaine variabilité des caractéristiques géométriques et physiques en fonction de la longueur qui doivent être prises en compte dans l'analyse du comportement mécanique. Il s'agit en second lieu de la faible durabilité du verre courant (type E) en milieu alcalin tel que le milieu cimentaire. Pour palier à ce défaut, l'industrie du verre a mis au point un verre résistant en milieu alcalin (type AR) mais son coût est plus élevé.

### 1.2.1 Le verre et la fabrication des filaments

Les filaments sont fabriqués à partir du verre en fusion à 1500°C, poussé (extrudé) dans des filières à base d'alliages spéciaux et étiré avant d'être refroidi produisant ainsi des filaments continus de diamètre régulier. Le refroidissement du verre est relativement rapide afin de conserver son caractère amorphe et d'éviter toute cristallisation des composants qui compromettrait la tenue mécanique des filaments produits.

Comme il a été signalé précédemment, deux types de verre sont employés aujourd'hui dans la fabrication des fils multi-filamentaires : le type E et le type AR. Ils se différencient par la composition chimique (**tableau 1.2**) qui les rend plus ou moins résistants aux ions alcalins présents dans les matériaux cimentaires.

**Tableau 1.2.** Composition chimique des deux types de verre [selon Gri02].

	Verre type E	Verre type AR
SiO <sub>2</sub>	53-55%	55-65%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14-15%	-
CaO	17-23%	5%
MgO	1%	-
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8%	15-20%
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-8%	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3%	0.3%
TiO <sub>2</sub>	0.5%	-
ZrO <sub>2</sub>	-	15-20%

### Le verre type E

Le premier champ d'applications du verre type E a été la fabrication des pièces isolantes employées dans les réseaux aériens de transport de courant électrique en raison de leur extrêmement faible conductivité électrique associée à une excellente tenue aux intempéries. La lettre E désigne, en effet, le champ d'applications électriques de ce type de verre.

Le verre type E est particulièrement bien adapté à la fabrication de filaments de taille micronique destinés, selon les besoins, soit à la fabrication des fils multi-filamentaires longs, soit des fibres courtes. Toutefois, le risque d'altération des filaments en milieu alcalin exclut a priori l'utilisation des fils multi-filamentaires ou de fibres courtes à base de verre E dans la fabrication de composites à base de matériaux cimentaires sans protection préalable par l'ensimage. Ainsi les fils multi-filamentaires à base de verre E dominent aujourd'hui le domaine des renforts structurels des composites essentiellement à base de liants polymériques.

### Verre type AR

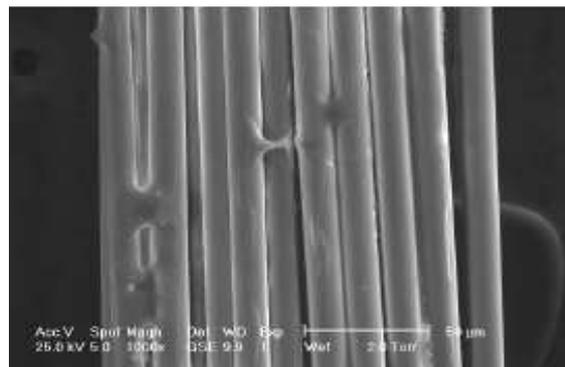
Le verre type AR est un verre alcali-résistant (AR). Il a été inventé dans les années 1970 et il a subi un développement continu depuis [Gri06]. C'est l'introduction d'oxyde de zirconium (ZrO<sub>2</sub>) dans la composition chimique du verre courant qui lui confère cette particularité tout en conservant les propriétés physiques et mécaniques du verre courant. La résistance aux alcalins du verre AR augmente proportionnellement à la teneur en oxyde de zirconium jusqu'à une teneur de 15% environ. Au delà de cette teneur l'amélioration de la résistance aux alcalins devient de moins en moins perceptible. Ainsi dans la plupart des cas, les verres AR contiennent entre 15 et 20 % de ZrO<sub>2</sub>. Notons toutefois que l'ajout de ZrO<sub>2</sub> dans les proportions précédentes fait que le prix du verre type AR est environ le double de celui du verre type E (voir sites web [3] et [4]).

L'utilisation du verre type AR est essentiellement dédiée aujourd'hui à la fabrication des fibres courtes (de quelques centimètres) pour le renforcement des bétons. Elles sont introduites dans la formulation en raison de 0,5 à 4% en volume pour conférer une ténacité post-fissuration du composite et une meilleure répartition (diffusion) de la fissuration. Toutefois, l'emploi de fils multi-filamentaires longs dans des pièces préfabriquées en béton architectonique commence progressivement à voir le jour essentiellement dans le cadre de la préfabrication.

## 1.2.2 La structure du fil multi-filamentaire

### Les filaments et l'ensimage

On définit comme filament une fibre de diamètre micronique d'une longueur indéfinie à l'image des fibres de soie. Les filaments de verre sont produits par extrusion du verre fondu de façon continue dans de filières à plusieurs centaines de buses parallèles (de 200 à 4000). Le diamètre des filaments est régulier sur toute la longueur. Il peut varier entre 3 et 30  $\mu\text{m}$  en fonction de la force d'étirement appliquée à l'issue de la filière et de la viscosité du verre fondu.



**Figure 1.1.** Filaments enrobés d'ensimage d'une mèche de fil multi-filamentaire [Jes01].

Peled et al., [Pel00] ont étudié l'impact de la technologie de production sur les propriétés du fil. Ils ont démontré que les filaments peuvent être plus ou moins endommagés au cours des différentes étapes de production et conduire à une réduction importante de leur résistance en traction. En raison de cette fragilité, les filaments de verre doivent être systématiquement traités, dès qu'ils sont solidifiés, afin d'éviter leur détérioration et rupture par friction et abrasion (entre filaments, mais aussi au contact des outils de fabrication) lors des opérations de filage, de bobinage et éventuellement de tissage [Wal94]. Ils sont donc immergés à l'issue de la filière dans des bains spéciaux dont les produits forment en séchant une enveloppe nanométrique autour du filament qu'on appelle ensimage.

L'ensimage assure plusieurs fonctions à la fois. Il lubrifie les filaments diminuant les frictions et le risque d'altération ou de rupture. Il élimine les charges électrostatiques à la surface des filaments facilitant le filage et le bobinage. En séchant, il crée des pontages locaux, aléatoires entre filaments voisins donnant une certaine cohésion à l'ensemble des filaments traités dans le même bain d'ensimage, formant ainsi une structure intermédiaire à plusieurs dizaines ou centaines de filaments qu'on appelle mèche (**figure 1.1**). L'ensimage forme une enveloppe continue protégeant les filaments de l'eau ou des alcalins assurant ainsi une plus grande pérennité des composites. Enfin, selon sa composition, il facilite le mouillage des filaments par la matrice polymérique ou cimentaire et permet une meilleure imprégnation du renfort par le liant et consécutivement une meilleure performance mécanique du composite.

Pour assurer toutes ces fonctions, l'ensimage résulte d'une formulation chimique complexe. Le plus souvent l'ensimage se présente comme une émulsion de polymères organiques éventuellement de lubrifiants et des sels minéraux selon les objectifs visés. Toutefois, pour des raisons concurrentielles évidentes, les fabricants de fils multi-filamentaires protègent

soigneusement par des clauses de confidentialité la composition exacte des ensimages employés.

### Les mèches et les fils

Le fil multi-filamentaire résulte de l'assemblage, généralement sans torsion ni tressage, d'un nombre défini de mèches ([Gri06], [Kon08]). Compte tenu que l'assemblage des mèches a lieu normalement après stabilisation et séchage de l'ensimage, les mèches ne sont pas solidarisiées entre elles et peuvent être facilement séparées ce qui, d'une part, garantit la souplesse du fil et, d'autre part, facilite la pénétration du liant jusqu'au cœur du fil lors de fabrication de composites. Toutefois, si l'ensimage n'est pas complètement stabilisé lors de l'assemblage, les mèches voisines peuvent être plus ou moins solidarisiées sur des longueurs plus ou moins importantes par des pontages analogues à ceux que l'ensimage engendre dans la mèche.

Il faut noter également que suite aux opérations de filage, la section des mèches n'est pas circulaire mais plutôt rectangulaire ce qui engendre une variabilité géométrique dans le fil suivant le changement de position relative de la section de chaque mèche le long du fil. En effet, lors des opérations de filage et de bobinage, les mèches ne restent pas strictement parallèles, elles sont légèrement torsadées autour de leur propre axe ou autour des autres mèches. Enfin, à cause de l'enroulement du fil dans la bobine, les mèches du fil déroulé peuvent présenter une ondulation d'ordre centimétrique plus ou moins marquée selon la nature de l'ensimage. Tous ces phénomènes engendrent une variabilité des caractéristiques géométriques de la section sur la longueur du fil. Pour cela les fils multi-filamentaires ne sont pas identifiés par leur section (comme les fils métalliques) mais par leur masse linéique exprimée en tex (1 tex = 1 gramme par kilomètre de fil)

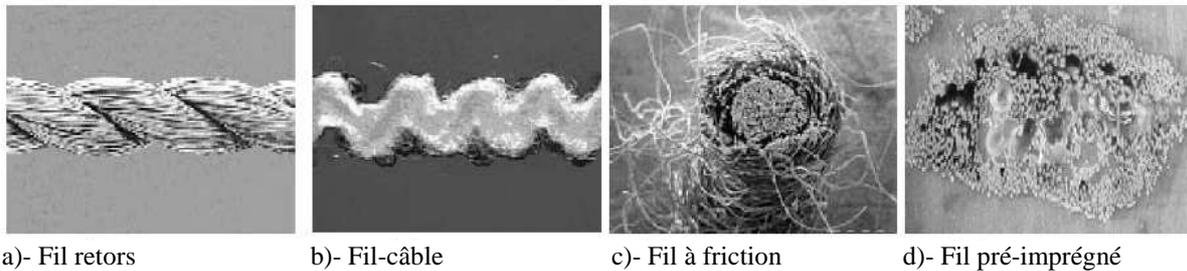
En résumant, la structure des fils multi-filamentaires présente des spécificités sur trois échelles différentes :

- à l'échelle micro, au niveau des filaments et des pontages aléatoires créés par l'ensimage dans la mèche ;
- à l'échelle méso, au niveau de la mèche de son orientation et de son positionnement relatif dans la section du fil et éventuellement de sa cohésion ou non avec les mèches voisines ;
- à l'échelle macro, au niveau du fil avec l'entremêlement et l'ondulation des mèches.

Avec ces considérations, il serait très approximatif et simplificateur d'appréhender la structure des fils multi-filamentaires comme un ensemble de filaments ou mèches strictement parallèles. Ainsi, les caractéristiques du fil dépendent bien évidemment du nombre de mèches qui le constituent, du nombre de filaments par mèche, des caractéristiques géométriques et mécaniques des filaments, mais aussi, des caractéristiques de l'ensimage et de sa capacité de pontage des filaments et des mèches ainsi que de toute la variabilité géométrique engendrée par la position relative des mèches dans le fil, leur ondulation et leur entremêlement.

Pour certaines applications spécifiques, la structure intermédiaire de mèches est supprimée afin de faciliter la pénétration du liant et obtenir une meilleure imprégnation des filaments. Toutefois, les filaments sont traités à l'ensimage mais, dans ce cas, le nombre de pontages créés par l'ensimage est volontairement réduit au minimum pour ne pas rigidifier l'ensemble.

Par ailleurs, plusieurs autres structures de fils multi-filamentaires sont proposées par les fabricants visant des objectifs précis [Gri01]; [Gri02]; [Gri03]. Certains exemples sont présentés sur la **figure 1.2** tels que *le fil retors* qui présente sous l'effet de la torsion une section plus compacte que les fils à mèches à peu près parallèles ce qui rend plus difficile la pénétration du liant mais confère une meilleure résistance à la traction au fil, *le fil-câble* qui est inspiré des câbles de précontrainte dont les mèches jouent le rôle de torons pour obtenir une meilleure tenue aux efforts de traction, *le fil à friction* dont les filaments sont soudés à chaud par une résine thermoplastique de manière aléatoire autour d'une mèche centrale [Kol05]; [Har06] et enfin *le fil totalement pré-imprégné* de polymère dont la section transversale présente un comportement plus homogène [Dil05].



a)- Fil retors

b)- Fil-câble

c)- Fil à friction

d)- Fil pré-imprégné

**Figure 1.2.** Fils multi-filamentaires à structure modifiée [Kon08].

### Les autres produits

Les fabricants de fils pour les composites proposent plusieurs produits qui résultent de l'association ou du tissage des fils multi-filamentaires avec imprégnation ou non par des liants polymériques (**Figure 1.3**).



**Figure 1.3.** Bobines à fil (à droite et au centre), bandes tressées (au centre) et textiles tissés (à gauche) à base de fils multi-filamentaires de verre et tas de fibres courtes (au premier plan à gauche) [Won04].

Les plus courants sont les bandes tressées et les textiles. Ces deux types de produits présentent l'avantage d'un renfort à deux dimensions. Leur différence consiste dans le fait que les textiles comportent des fils tissés dans les deux directions le plus souvent pré-imprégnés d'un liant alors que les bandes tressées résultent du tissage de plusieurs fils dans la même direction principale sans liant. Consécutivement, les textiles peuvent reprendre des efforts de traction

comparables dans les deux directions principales de leur plan, alors que les bandes tressées sont vulnérables face aux efforts de traction dans le sens de la largeur.

L'utilisation des textiles comme renfort dans le béton offre des nouvelles possibilités par rapport à l'armature en acier. Il faut toutefois que la texture du textile soit assez lâche (fils de petit diamètre et relativement espacés) de manière que la matrice cimentaire puisse les imprégner correctement.

### 1.3 La matrice cimentaire

Les matrices utilisées pour la fabrication de composites renforcés par des fils multi-filamentaires isolés, par des textiles ou par de bandes de renfort doivent répondre à des exigences particulières en ce qui concerne la formulation, le processus de mise en œuvre et les propriétés mécaniques. Dans l'écrasante majorité des cas, le liant doit être très fluide et riche en particules fines afin de faciliter la pénétration des espaces inter et intra filamentaires et de garantir la meilleure imprégnation des fils. Pour la même raison, la taille maximale des granulats du mélange est plutôt limitée à quelques millimètres. Ainsi les matrices cimentaires des composites sont plutôt des mortiers à base de sables fins et présentant un fort dosage en ciment et éventuellement en additions minérales. De plus, des adjuvants fluidifiants sont utilisés quasi-systématiquement pour garantir une fluidité suffisante avec des faibles rapports eau-liant. Ainsi, le plus souvent les matrices cimentaires employées dans les composites sont des formulations à hautes performances permettant d'obtenir des éléments de faible épaisseur. Par ailleurs, des ciments à faible teneur en alcalins actifs sont employés afin de réduire au le plus possible le risque d'altération du verre.

Compte tenu de la fluidité et de la finesse granulaire de la matrice cimentaire, le processus de fabrication des composites à base de fils multi-filamentaires permet d'employer une plus grande gamme de techniques de mise en œuvre que les produits en béton classique (**Figure 1.4**). Ainsi, en plus du coulage classique de la matrice dans le coffrage, l'injection du mélange dans le coffrage sous pression ou la projection sous pression de la matrice sur le renfort peuvent être très efficaces pour la fabrication des certains types composites (par exemple des tuyaux). Parfois, pour faciliter la pénétration de la matrice dans les fils et obtenir une surface extérieure lisse et peu perméable, un laminage au rouleau est aussi employé.



a) Coulage

b) Injection

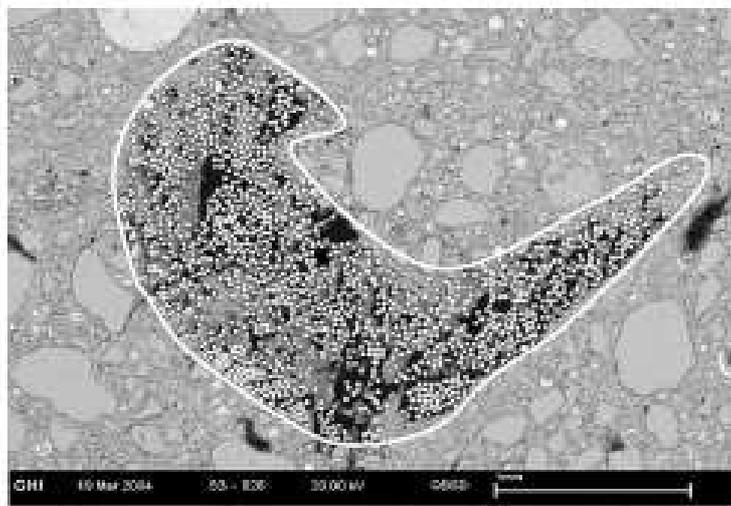
c) Laminage

d)- Projection

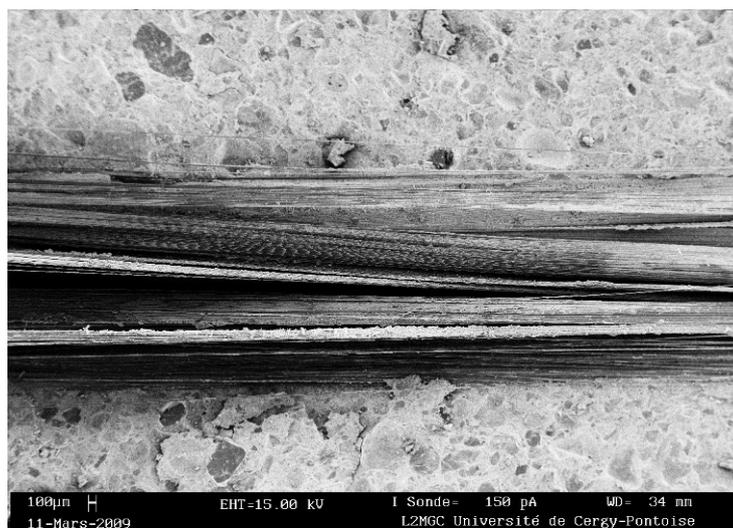
**Figure 1.4.** Techniques de fabrication des éléments en béton renforcés des fils multi-filamentaires [Kon08].

Il est important de noter que l'imprégnation du fil multi-filamentaire par une matrice cimentaire n'est jamais complète. Elle peut atteindre différents degrés selon les caractéristiques du fil multi-filamentaire, celles de la matrice et les conditions de fabrication du composite. Généralement, un meilleur degré d'imprégnation est obtenu par les méthodes

de projection et de laminage que par un coulage gravitaire de la matrice cimentaire dans le coffrage. Pour imprégner complètement une mèche du fil multi-filamentaire, il faut réussir à faire pénétrer les particules fines du liant et la phase liquide dans les espaces intra filamentaires à l'intérieur de la mèche sachant que la dimension de ces espaces est de quelques micromètres, comparable donc à la dimension des particules les plus fines du ciment et des additions. Ainsi, à l'échelle de la mèche, le plus souvent, ce sont les filaments périphériques qui sont plus faciles à imprégner et qui, en s'imprégnant, jouent un rôle de filtre qui empêche la pénétration des particules vers le cœur de la mèche en l'absence d'une action mécanique adéquate qui fera bouger les filaments [Pei08]. Seule la phase liquide de la matrice peut y pénétrer par absorption capillaire. De la même façon, à l'échelle de la section du fil dans son ensemble (échelle millimétrique), ce sont les mèches périphériques de la section qui sont les plus faciles à imprégner (**Figures 1.5 et 1.6**).



**Figure 1.5.** Imprégnation limitée à l'extrême périphérie d'un fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire [Pei08].



**Figure 1.6.** Imprégnation limitée à l'extrême périphérie d'un fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire [Alj10].

Ce comportement particulier de la matrice cimentaire face à l'imprégnation des fils multi-filamentaires dans les composites est inhérent à sa constitution qui à l'échelle micrométrique doit être considéré comme une suspension de particules solides dans une phase aqueuse. Ceci n'est pas le cas des liants polymériques qui sont des fluides homogènes à cette échelle et, de par ce fait, peuvent imprégner complètement les filaments et les mèches d'un fil multi-filamentaire à condition que leur viscosité ainsi que l'angle de raccordement avec l'ensimage soient assez faibles [Rau97].

Ainsi dans les composites cimentaires, il faut, en plus de la variabilité des caractéristiques géométriques de la structure du fil multi-filamentaire discutée dans le paragraphe précédent, considérer la variabilité à l'échelle micronique et à l'échelle millimétrique de l'imprégnation du fil par la matrice. En effet, lors de l'application d'un effort de traction sur le fil, les parties non imprégnées peuvent glisser plus ou moins facilement (en fonction des frottements dans le fil) par rapport aux parties imprégnées, ancrées dans la matrice [Jes05]. Une partie du fil seulement participe à la reprise de l'effort et la rupture est progressive alors que lors d'une imprégnation complète des filaments par le liant, la force transmise aux filaments est homogène, la capacité portante est augmentée et la rupture plutôt fragile.

En conclusion nous pouvons dire que le degré d'imprégnation des fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire joue un rôle prépondérant sur le comportement mécanique du composite.

### 1.4 Comportement mécanique des fils multi-filamentaires

La complexité structurelle des fils multi-filamentaires à base de verre (filaments, mèches, ensimage) et la variabilité géométrique induite par le positionnement relatif variable des filaments dans une mèche et des mèches dans le fil discutés précédemment font que le comportement mécanique des fils sous un effort de traction est loin d'être simple et facile à interpréter. Nombreux sont les facteurs qui agissent à différentes échelles et influencent ce comportement.

La complexité structurelle et la variabilité géométrique impactent en premier lieu la résistance en traction du fil multi-filamentaire de verre qui est significativement plus faible que celle des filaments qui le composent. Trois principaux facteurs peuvent être identifiés à l'origine de ce phénomène. Premièrement, les longueurs des filaments dans un segment de mèche et les longueurs des mèches dans un segment le fil n'étant pas strictement identiques conduisent à une mise en tension et à une rupture progressive des filaments et des mèches en commençant par les plus courts. Chudoba et al. [Chu05] [Chu06b] désignent ce comportement particulier comme activation retardée. Deuxièmement, les filaments et les mèches dans le fil n'étant pas strictement parallèles subissent sous l'effet d'effort principal de traction des frictions inter-filamentaires qui les fragilisent. Troisièmement, en raison du caractère multi-filamentaire du fil la dispersion des valeurs de résistance des filaments est plus grande conduisant à des valeurs moyennes plus faibles que sur un filament ou sur un nombre limité de filaments.

Ces trois facteurs agissent systématiquement dans tous les fils multi-filamentaires sollicités en traction indépendamment de la nature du filament. Ainsi, la diminution de la résistance en traction des fils multi-filamentaires par rapport à celle des filaments qui les composent a été vérifiée par Gries et al. [Gri06] aussi bien dans le cas de filaments de verre que dans le cas des filaments de carbone et d'aramide (**figure 1.7**).

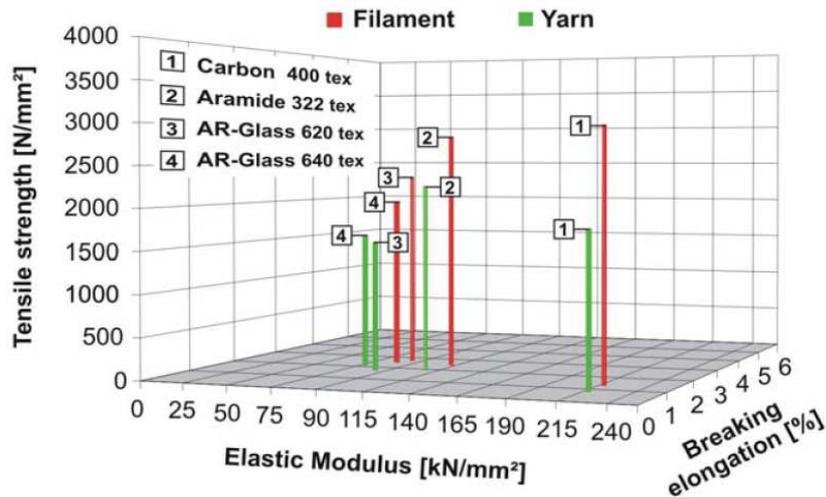
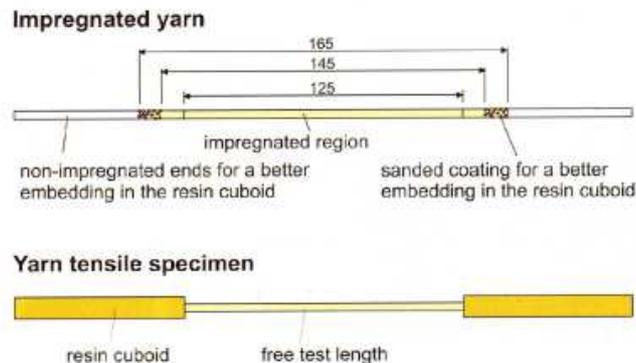


Figure 1.7. Comparaison de la résistance en traction entre les filaments et les fils multi-filamentaires [Gri06].

En plus des trois facteurs évoqués précédemment (variabilité des longueurs des filaments dans la mèche et surtout des mèches dans le fil, entremêlement des filaments dans la mèche et des mèches dans le fil, dispersion en raison du caractère multi-filamentaire du fil) plusieurs autres facteurs doivent être considérés pour interpréter l'allure de la courbe effort – déformation lors d'un essai de traction et, plus particulièrement, ceux relatifs aux conditions expérimentales et au mode opératoire de l'essai. Tous les auteurs s'accordent à signaler que la mise en œuvre d'une caractérisation mécanique fiable des fils multi-filamentaires s'avère particulièrement laborieuse. En conséquence, la norme ISO 3341 de 2000 [Nor00] concernant la détermination de la force de rupture et de l'allongement à la rupture des fils multi-filamentaires notifie clairement que les résultats d'essai dépendent du mode de fixation du fil sur les mors de la presse et qu'à ce titre ne peuvent être comparés que les résultats obtenus avec le même mode de fixation. En effet, la préparation des éprouvettes au niveau de la fixation du bout du fil (par pince mobile à rayons ou par pince plate collée pour ne citer que ces deux exemples) peut être à l'origine, d'une part, d'un plus ou moins important endommagement local des filaments pincés conduisant à leur rupture locale dans la fixation et, d'autre part, d'une plus ou moins grande possibilité de glissement des filaments partiellement fixés dans la pince influençant l'allongement mesuré en fonction de l'effort appliqué. Comme le stipule la norme, pour gagner en fiabilité, les mesures d'allongement doivent être faites par extensométrie sur la longueur libre du fil (hors zones de fixation sur la presse); néanmoins, la fixation d'un extensomètre sur le fil multi-filamentaire peut facilement endommager les filaments au même titre que les pinces au bout de l'éprouvette.

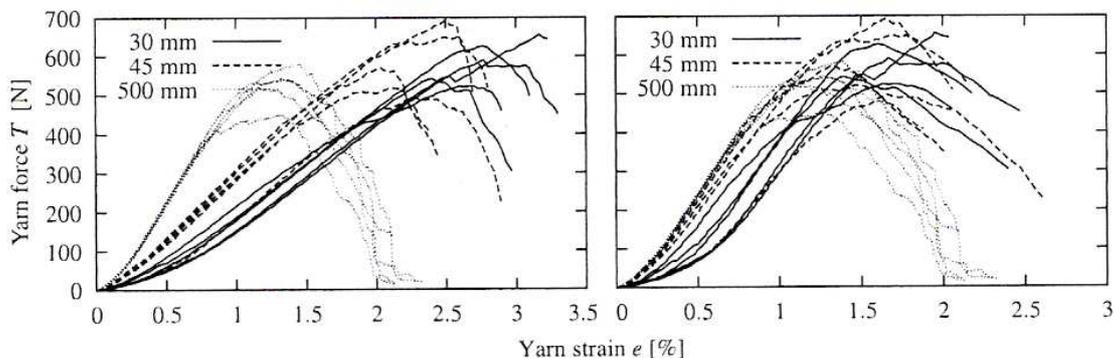
Il en résulte donc que la caractérisation mécanique des fils multi-filamentaires est étroitement dépendante du compromis fait sur les moyens expérimentaux mis en œuvre et sur le mode opératoire employé. Ainsi, Dilthey et al. [Dil06] proposent de caractériser le fil multi-filamentaire en imprégnant totalement dans une résine la partie libre de l'éprouvette et en appliquant des enrobages spécifiques au niveau du raccordement avec les pinces de fixation sur la presse pour éviter l'endommagement de filaments (figure 1.8). Il est évident que ce mode opératoire masque complètement le rôle de l'ensimage et des frottements inter-

filamentaires. Il atténue fortement le rôle de la variabilité structurelle du fil sur le comportement mécanique en traction, il peut néanmoins être jugé efficace pour approcher le comportement mécanique du fil multi-filamentaire dans un composite à base de cette même résine.



**Figure 1.8.** Mode préparatoire des éprouvettes de fil multi-filamentaire pour les essais de traction basé sur une imprégnation totale du fil par une résine [Dil06].

D'autres auteurs (Chudoba et al. [Chu06b]) reconnaissent qu'aucun mode de fixation n'est parfait et proposent de corriger les résultats d'essais bruts en tenant compte des déformations dans les pinces de fixation. Selon ces auteurs, cette correction doit tenir compte des différences de longueur des filaments enrobés de résine dans la pince, de la déformation de la résine au cisaillement (surtout pour les éprouvettes à courte longueur libre) ainsi que de la rétraction de la résine autour des filaments rompus pendant l'essai. Cette correction modifie significativement les résultats bruts de l'allongement du fil (**figure 1.9**) mais son application demande l'évaluation préalable de plusieurs paramètres expérimentaux rendant cette correction relativement délicate et parfois incertaine.



**Figure 1.9.** Courbes effort - déformation des fils multi-filamentaires de verre AR de longueurs libres variables. A gauche : courbes brutes. A droite : Courbes corrigées en tenant compte du glissement et des déformations au niveau des pinces de fixation du fil sur la presse [Chu06b].

Toutefois, nous constatons aussi bien sur les résultats bruts que ceux corrigés que l'allure de la courbe effort - déformation dépend en premier lieu de la longueur libre des éprouvettes. Le fil multi-filamentaire présente un comportement plutôt fragile et une résistance en traction plutôt élevée pour les faibles longueurs libres alors que le comportement devient plutôt ductile et la résistance en traction diminue avec l'augmentation de la longueur libre des éprouvettes. Deux causes principales sont évoquées à l'origine de ce comportement. D'une part, les

frictions et pressions entre filaments et mèches voisins sont plus importantes pour les grandes longueurs libres en raison de la variabilité du positionnement relatif des filaments et des mèches qui s'accroît avec la longueur. Les ondulations et les torsions des filaments et des mèches dans le fil induisent une ductilité après rupture tout en fragilisant les filaments et réduisant la résistance en traction du fil. D'autre part les défauts dans les filaments (induisant une plus grande fragilité) sont statistiquement plus nombreux pour les grandes longueurs libres conduisant à une diminution de la résistance en traction avec l'augmentation de la longueur libre. Il a été démontré que la structure interne du fil influe sur le mode de rupture [Jes06] et que les forces frictionnelles exercées entre filaments et mèches agissent sur le caractère ductile du matériau [Kon03a]. Il a été aussi démontré que les fils retors et les fils câbles ont des comportements mécaniques plus résistants et moins fragiles que les fils multifilamentaires obtenus sans torsion [Kol05]. Il faut toutefois signaler qu'il n'y a pas de critères tangibles et de caractéristiques physiques ou géométriques facilement quantifiables pour déterminer expérimentalement le degré d'entremêlement des filaments et des mèches dans le fil ou le degré de variabilité géométrique de la section du fil. Uniquement dans le cadre de la modélisation du comportement mécanique, certaines approches stochastiques du désordre dans le fil ont été introduites (voir ci-après paragraphe 1.6).

Par ailleurs, toutes les courbes expérimentales (**figure 1.9**) présentent un adoucissement initial (qui est amplifié, si l'on inclut les déformations dans les pinces de fixation) qui résulte de la mise en tension progressive des filaments dans le fil compte tenu des différences de longueurs entre filaments et entre mèches dans l'éprouvette. Cet adoucissement initial est beaucoup plus important pour les faibles longueurs libres. Enfin, l'allongement à la rupture du fil est important (supérieur à 1,0 - 1,75% sur les résultats corrigés), il est plus important pour les faibles longueurs libres en raison de l'adoucissement initial des courbes.

Il en résulte que la complexité structurelle et la variabilité géométrique du fil multifilamentaire engendrent un comportement mécanique particulier fortement dépendant de la longueur libre testée.

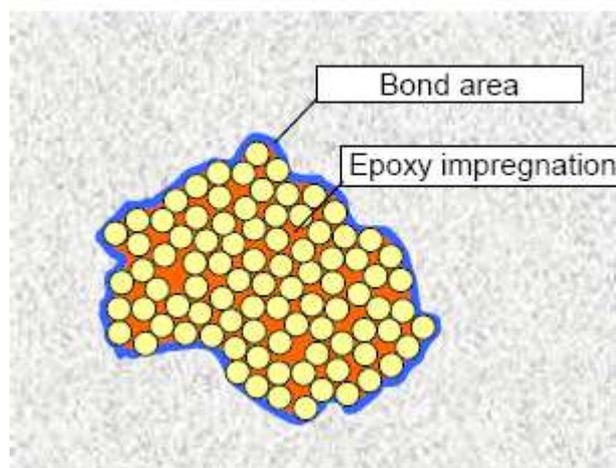
En plus du mode de fixation des éprouvettes et de la longueur libre du fil, d'autres facteurs influent sur son comportement mécanique. En premier lieu, il faut considérer les paramètres de constitution du fil tels que le diamètre des filaments, la nature et la quantité de l'ensimage, le nombre de filaments par mèche, le nombre de mèches dans le fil ainsi que le degré d'entremêlement des filaments dans les mèches et des mèches dans le fil. Abdkader et al. [Abd03] ont montré que la résistance des filaments diminue avec l'augmentation de leur diamètre en raison de l'augmentation statistique des défauts dans les filaments. En revanche, d'après Chudoba et al. [Chu06b], les légères variations du diamètre des filaments suite au procédé de fabrication influencent peu. L'ensimage joue aussi un rôle important [Han05] mais, compte tenu de l'absence de données sur la composition des ensimages employés par les fabricants de fils multifilamentaires, la discussion sur ce point reste plutôt qualitative.

Enfin, il faut considérer aussi les paramètres expérimentaux pendant les essais de traction. En effet, comme dans tous les essais mécaniques, le mode de pilotage des essais (en charge ou en déformation), la vitesse de chargement, les conditions d'humidité et de température ambiante doivent être pris en compte au même titre que le mode de fixation des fils multifilamentaires et la préparation des éprouvettes.

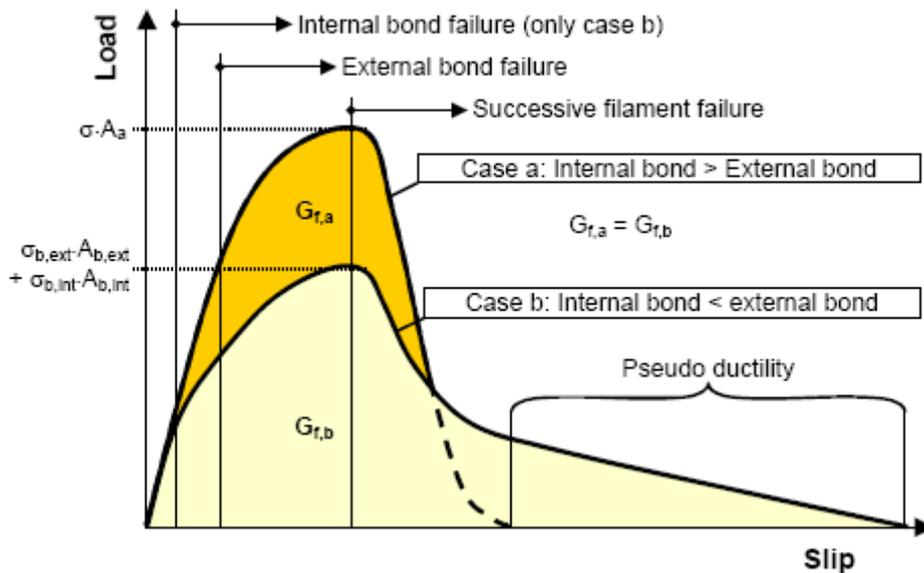
## 1.5 Comportement mécanique du fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice cimentaire lors d'un essai d'arrachement

Le comportement mécanique d'un fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice que ce soit polymérique ou cimentaire est particulièrement difficile à caractériser car, à la complexité du comportement mécanique propre du fil multi-filamentaire, étudiée précédemment, viennent s'ajouter les interactions entre fil multi-filamentaire et matrice ainsi que les propriétés mécaniques de la matrice. En effet, les forces de liaison d'origine chimique et mécanique entre fil et matrice, la rupture progressive de ces liaisons mais aussi des filaments et des mèches, le glissement et le frottement des filaments et des mèches au contact de la matrice ainsi que les déformations et les endommagements de la matrice elle-même sont autant de facteurs importants qui impactent le comportement mécanique. Néanmoins, l'étude de ces interactions est indispensable pour appréhender le comportement mécanique des matériaux composites et a fortiori pour modéliser et optimiser leurs propriétés. De nombreux travaux de recherche ont donc été consacrés à ce sujet. Sur le plan expérimental il s'agit essentiellement de l'analyse des essais d'arrachement sous différentes configurations expérimentales afin de juger de la qualité de la liaison fil – matrice. Sur le plan théorique plusieurs approches sont proposées pour interpréter les résultats expérimentaux, évaluer le rôle des différents paramètres et modéliser les matériaux composites.

Tous les auteurs s'accordent à distinguer les interactions en fonction de leur zone d'action : d'une part les interactions agissant dans la zone périphérique du fil multi-filamentaire (concernant les filaments périphériques du fil imprégnés correctement par la matrice qui les entoure), d'autre part, les interactions agissant à l'intérieur du fil multi-filamentaire (concernant les filaments plus ou moins imprégnés par la matrice). Dans sa configuration la plus simple, la zone périphérique peut être strictement limitée au périmètre géométrique du fil multi-filamentaire (**figure 1.10**) comme le propose Jesse et al. [Jes05]. Sur la base de cette configuration simplifiée, Reinhardt et al [Rei06] schématise deux comportements mécaniques distincts selon que les liaisons entre filaments à l'intérieur du fil sont moins résistantes ou présentent une résistance au moins équivalente à celle des liaisons entre filaments périphériques et matrice.



**Figure 1.10.** Distinction de deux zones d'action des interactions fil multi-filamentaire – matrice : zone périphérique correspondant au périmètre du fil et zone interne [Rei06].



**Figure 1.11.** Schématisation des différents comportements mécaniques d'un fil multi-filamentaire lors d'un essai d'arrachement selon la résistance des liaisons internes [Rei06].

Selon Reinhardt et al. [Rei06], lors d'un essai d'arrachement, dans le cas où les liaisons internes présentent une résistance équivalente ou supérieure à celle des liaisons périphériques (désigné comme « cas a » sur la **figure 1.11**), tous les filaments du fil sont sollicités. L'effort maximal repris par le fil est dans ce cas relativement important et dépend de la résistance propre des filaments. En revanche la rupture présente une ductilité plutôt faible, induite par la rupture des filaments les plus sollicités et le transfert des efforts vers les filaments non encore endommagés. Ce comportement est souvent observé dans le cas d'une imprégnation complète du fil par un liant polymérique à forte résistance [Chu06b]. Il est aussi proche de celui du fil non enrobé et de longueur libre importante (voir **figure 1.9**).

En revanche, dans le cas où les liaisons internes sont moins résistantes que les liaisons périphériques (désigné comme « cas b » sur la **figure 1.11**), les filaments internes les plus sollicités vont se désolidariser facilement de la matrice et l'effort sera transféré essentiellement aux filaments périphériques imprégnés. L'effort maximal repris par le fil est alors moindre que dans le cas précédent et la rupture présente une ductilité plus importante en raison des frictions induites par le glissement des fils internes désolidarisés de la matrice mais non rompus. Pour cette raison l'énergie globale de rupture peut rester comparable à celle du cas précédent. Ce comportement est souvent observé dans le cas de l'enrobage des fils multi-filamentaires par des matrices cimentaires en raison de la difficulté d'imprégnation des filaments internes par les particules du ciment.

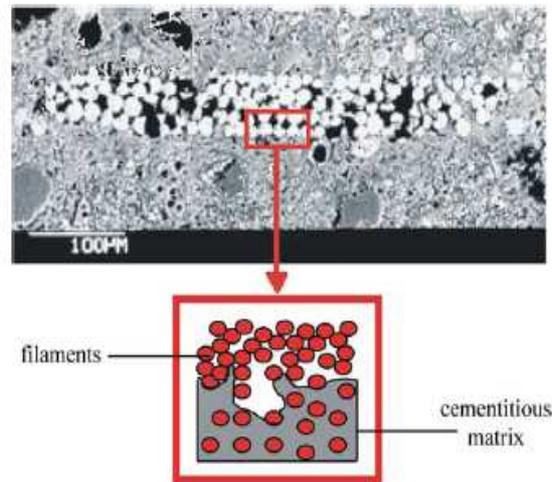
De l'analyse précédente, il résulte que le degré d'imprégnation des filaments du fil multi-filamentaire joue un rôle prépondérant sur le comportement mécanique du composite. Pour cette raison le comportement mécanique des matériaux renforcés par les fils multi-filamentaires diffère considérablement de celui des matériaux renforcés par des armatures en acier. Il est aussi différent des matériaux renforcés par des fibres courtes placées aléatoirement dans la matrice. Dans ces deux cas, le renfort s'identifie à un seul corps solide avec ses propriétés mécaniques et la matrice enrobe parfaitement la surface du renfort sans

poser de problème d'imprégnation partielle en fonction de la profondeur. Il faut souligner, toutefois, qu'aussi bien dans le cas des fils multi-filamentaires que dans le cas des autres types de renfort ce sont les contraintes de cisaillement entre renfort et matrice qui pilotent le comportement mécanique du composite [Häu07]. En revanche, dans le cas des fils multi-filamentaires la liaison entre filaments et matrice dans la périphérie du fil (où les filaments sont imprégnés par la matrice) n'a pas les mêmes caractéristiques mécaniques (rigidité et résistance) que la liaison entre filaments au cœur du fil (où les filaments sont peu ou pas imprégnés par la matrice). Ainsi, la proportion relative des filaments périphériques par rapport à celle des filaments de cœur sera un paramètre prépondérant sur le comportement du composite comme le soulignent Brameshuber et al. [Bra01]

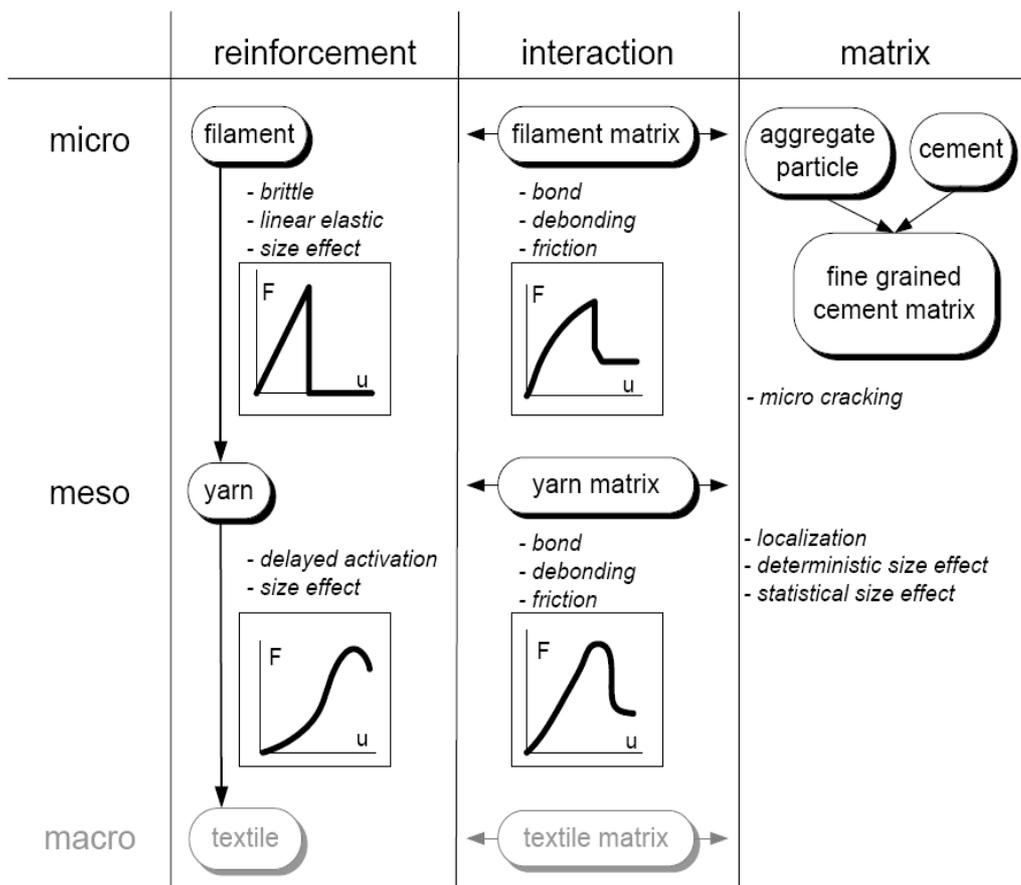
Selon d'autres auteurs [Kon03b], [Chu05], l'approche précédente reste très schématique et doit être complétée par la prise en compte, d'une part, des effets de la structure complexe du fil multi-filamentaire, qui se décline à plusieurs échelles (filament, mèche, fil) et, d'autre part des effets de la variabilité de caractéristiques géométriques de la section en fonction de la longueur (induite par l'ondulation, l'entremêlement et la torsion des filaments et des mèches dans le fil) qui agissent sur le comportement mécanique du composite. En effet, la liaison fil - matrice multi-filamentaire peut présenter localement beaucoup d'imperfections en raison de la structure complexe du fil et de la difficulté de pénétration du liant. Ceci est particulièrement vrai dans le cas d'enrobage par une matrice cimentaire (**figure 1.12**).

Par ailleurs, la variabilité des caractéristiques géométriques de la section du fil fait que, sur une importante longueur d'ancrage dans la matrice (de l'ordre de la dizaine de centimètres), les filaments et mèches qui se trouvent dans la zone centrale du fil dans une section donnée peuvent passer à la zone périphérique à une section plus éloignée et vis-versa. Ainsi, dans l'hypothèse d'une imprégnation périphérique du fil par la matrice cimentaire, un filament ou une mèche peut alterner sur sa longueur des parties peu ou pas imprégnés (lorsqu'il se trouve dans zone centrale du fil) et des endroits fortement ou totalement imprégnés (lorsqu'il se trouve sans la zone périphérique du fil). Dans ces conditions, la distinction entre « cas a » et « cas b » peut devenir beaucoup moins claire que celle présentée sur la **figure 1.11** et la répartition des efforts entre fil et matrice beaucoup plus complexe.

Enfin, la variabilité de la section fait que les filaments et les mèches n'ont pas tous la même longueur et lors de la mise sous tension du fil, ce sont les filaments et les mèches les plus courts qui sont sollicités en premier. Ainsi, la courbe effort – déformation présente systématiquement un adoucissement initial, désigné comme activation retardée. Il s'agit, au fait, du même phénomène que celui observé dans le cas d'un essai de traction simple du fil non enrobé par une matrice (**figure 1.9**).



**Figure 1.12.** Imprégnation partielle des filaments par la matrice cimentaire dans la zone périphérique d'une mèche enrobée dans un mortier [Hol04].

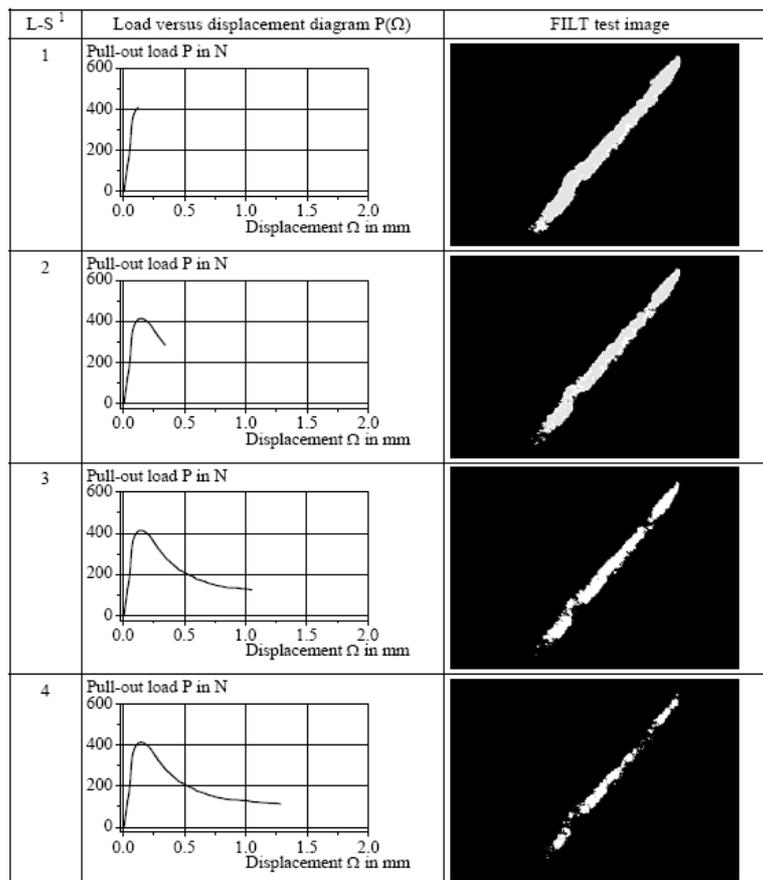


**Figure 1.13.** Analyse multi-échelles des interactions entre le fil multi-filamentaire et la matrice cimentaire et principaux facteurs influant sur le comportement mécanique du composite [Kon03a].

En tenant compte de la structure complexe du fil multi-filamentaire, de la variabilité des caractéristiques géométriques de la section sur la longueur et la variabilité de l'imprégnation

par la matrice tant sur le sens de la longueur que celui de chaque section, il devient clair que la traduction des efforts d'arrachement en contraintes de cisaillement agissant à l'interface des filaments ne peut pas être envisagée sans une approche multi-échelles et sans prise en compte de variables stochastiques. Konrad et al. [Kon03a] proposent, en effet, un tel type d'approche des interactions fil multi-filamentaire et matrice cimentaire et mettent en exergue les principaux facteurs qui interviennent sur le comportement mécanique du composite (**figure 1.13**).

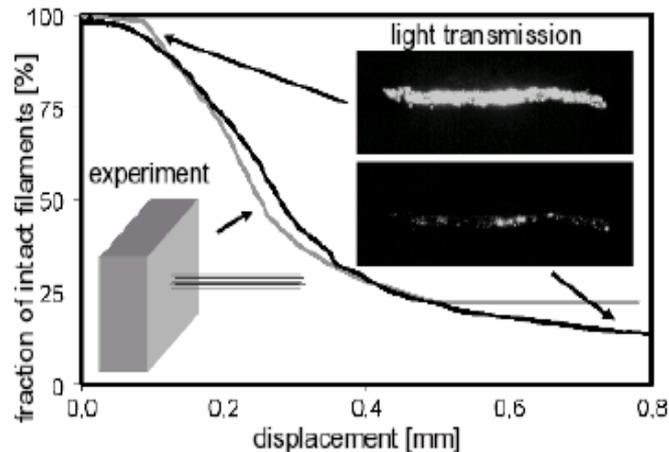
Afin de mieux comprendre les multiples interactions entre fil et matrice lors d'un essai d'arrachement, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude fine du mécanisme de rupture du composite et ont essayé de comprendre ce qui se passe à l'échelle des filaments. Dans cet objectif, Banholzer [Ban04] a conduit un essai mécanique très intéressant. Il s'agit de l'essai d'arrachement d'une mèche composée de plusieurs centaines de filaments de verre de diamètre micrométrique, enrobée dans une matrice en résine époxydique par trempage de la mèche dans la matrice à l'état fluide. Après durcissement, les filaments de verre ont été éclairés par une source lumineuse sur l'une de leurs extrémités et la lumière a été captée sur des cellules photosensibles sur l'autre extrémité pendant l'essai. Avec ce dispositif, le corps du filament joue le rôle de fibre optique qui transmet la lumière tant qu'elle conserve son intégrité. Ainsi, il a été possible d'identifier sans difficulté l'instant précis de rupture de chaque filament pendant l'essai (**figure 1.14**).



**Figure 1.14.** Suivi du processus de rupture des filaments dans une mèche multi-filamentaire enrobée dans une matrice polymérique lors des différentes étapes d'un essai d'arrachement [Ban04].

Il a constaté que la rupture des filaments commence à être perceptible dès que l'effort de traction atteint sa valeur maximale. Le mécanisme de rupture est caractérisé par des ruptures de blocs entiers de filaments aux différents endroits de la mèche en commençant principalement par la périphérie vers le cœur de la mèche, mais des ruptures de filaments individuels et des ruptures de blocs de filaments au cœur de la mèche sont aussi observés à différentes phases de l'essai. Il faut souligner qu'en raison du mode d'imprégnation de la mèche, ce sont essentiellement les filaments périphériques qui sont, normalement, les mieux enrobés par la matrice. Cet essai montre que, sur le plan micromécanique, le mécanisme de la rupture se caractérise par un processus discontinu et aléatoire bien que, sur le plan macromécanique, la courbe effort - déformation reste relativement continue et relativement reproductible. Il est évident que le caractère aléatoire de l'approche micromécanique doit être encore plus prononcé dans le cas d'imprégnation du fil par une matrice cimentaire en raison du plus grand nombre d'imperfections locales d'enrobage et la difficulté de pénétration de la matrice vers le cœur du fil comme ceci a été observé par plusieurs auteurs [Maj74]; [Bar87]; [Cur03b]; [Lan04]. Par ailleurs, la présence de plusieurs mèches dans un fil et leur entremêlement sur la longueur du fil sont deux facteurs importants qui doivent être pris en compte avant d'extrapoler les résultats de Banholzer vers le comportement du composite fil - matrice.

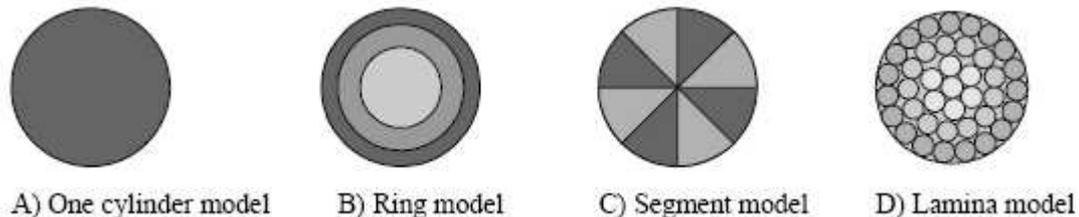
Les essais de Banholzer ont été analysés et modélisés par [Chu05]. Nous discutons dans le paragraphe suivant de la modélisation proposée, mais il est intéressant de noter ici que, si dans la première partie post-pic de la courbe effort - déformation, l'effort repris par la mèche diminue progressivement avec l'augmentation du taux de filaments rompus, dans la deuxième partie de la courbe, l'effort repris par la mèche varie beaucoup moins rapidement malgré la poursuite de la rupture des filaments (**figure 1.15**). Cet adoucissement de la courbe favorise très significativement le caractère ductile du composite, alors que le comportement mécanique du fil multi-filamentaire seul est généralement beaucoup plus fragile (**figure 1.9**). Ce complément de ductilité du composite est essentiellement attribué aux efforts de frottement qui se développent entre les filaments et la matrice qui les enrobait après rupture de la liaison filament-matrice et sous l'effet du glissement des filaments étirés (rompus ou non) dans la gaine de matrice restant à leur contact. L'état d'endommagement de la matrice restant au contact des filaments après rupture de la liaison filament-matrice joue donc un rôle très important sur la ductilité du composite. Il ne faut pas perdre de vue aussi que la liaison filaments matrice est généralement très fragile et peut se rompre pour des très faibles déformations locales, inférieures à 0.001 mm/mm.



**Figure 1.15.** Analyse et modélisation des différentes phases du mécanisme de rupture des filaments des essais de Banholzer par [Chu05].

## 1.6 Modélisation du comportement mécanique du composite

Un très grand nombre de tentatives de modélisation du comportement mécanique des fils multi-filamentaires dans les composites ont été proposées les deux dernières décennies dans la littérature. Les premiers modèles analytiques [Ohn94]; [Bey97]; [Zas02]; [Sej02]; [Ban04] ont été plutôt basés sur une simplification extrême de la géométrie de la section du fil en un corps cylindrique plus ou moins homogène (**figure 1.16**). Seul le caractère élastique linéaire du fil a été pris en compte (pas la déformation et l'endommagement de la matrice).



**Figure 1.16.** Modélisations analytiques simplifiées d'un fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice cimentaire [Zas02]; [Ban04]; [Ohn94]; [Sej02]; [Bey97].

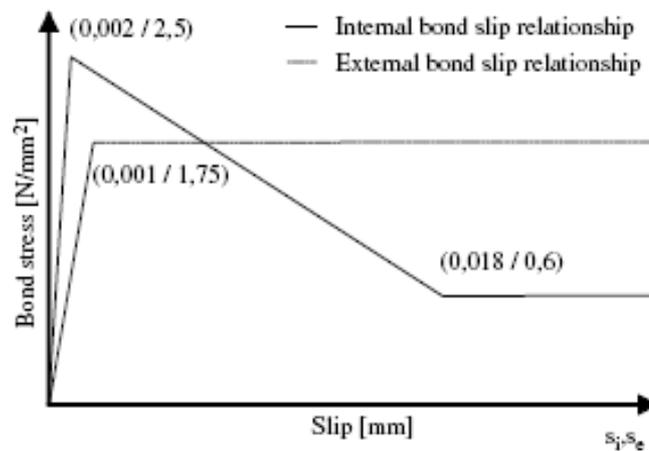
Le modèle de Ohno et Hannant [Ohn94] est une approche qui simule le composite fil - matrice comme trois anneaux concentriques avec des comportements mécaniques différents. L'anneau extérieur représente la matrice, l'anneau intermédiaire représente les filaments périphériques en liaison avec la matrice cimentaire et l'anneau intérieur les filaments de cœur (peu ou pas enrobés par la matrice). Les contraintes de cisaillement aux interfaces des anneaux sont constantes et les caractéristiques mécaniques de chaque anneau homogènes.

Un autre modèle introduit une approche stochastique sur la répartition entre filaments de cœur et les filaments périphériques en les regroupant par segments dont la section totale est équivalente au degré d'imprégnation de la section du fil par la matrice. Mais l'approche mécanique reste équivalente à la précédente.

Enfin, le modèle « lamina » propose une structure de fil représentée par des filaments parallèles. Les déformations de la matrice sont prises en compte grâce à un module élastique

significativement inférieur à celui des filaments. Les différents mécanismes de rupture ne sont pas considérés dans ce modèle.

En s’inspirant du modèle simplifié de Ohno et Hannant [Ohn94] de trois anneaux concentriques à comportement mécanique différent, Holler et al. [Hol04] ont développé un calcul analytique des contraintes au sein du composite fil – matrice cimentaire. Pour cela ils ont considéré que le comportement mécanique des filaments périphériques (externes) et des filaments de cœur (internes) se différencie tant en ce qui concerne la résistance à la traction de la liaison que la ductilité post-pic (**figure 1.17**). En effet la résistance en traction de la liaison des filaments périphériques enrobés dans la matrice cimentaire est plus grande que celle des filaments internes, alors que ces derniers présentent une plus grande contrainte de friction lors de leur glissement.



**Figure 1.17.** Simulation du comportement mécanique de la liaison des filaments externes et internes enrobés dans une matrice cimentaire [Hol04].

En considérant une infinitésimale longueur de fil,  $dx$ , l’équilibre des forces et des déplacements sur les surfaces de liaison des trois anneaux (**figure 1.18**) s’écrit de la manière suivante :

Matrice cimentaire :  $d\sigma_c(x)A_c = \tau_e(s_e)U_{Fe} dx,$

Filaments externes :  $d\sigma_{Fe}(x)A_{Fe} = (\tau_i(s_i)U_{Fi} - \tau_e(s_e)U_{Fe}) dx,$

Filaments internes :  $d\sigma_{Fi}(x)A_{Fi} = -\tau_i(s_i)U_{Fi} dx,$

Glissement externe :  $s_e(x) = v_{Fe}(x) - v_c(x),$

Glissement interne :  $s_i(x) = v_{Fe}(x) - v_{Fi}(x)$

où :

$\sigma_c(x)$  : la contrainte au niveau du béton,

- $\sigma_{fe}(x), \sigma_{fi}(x)$  : la contrainte au niveau des filaments externes et internes,
- $\tau_e(s_e), \tau_i(s_i)$  : la contrainte de cohésion externe et interne
- $s_e(x), s_i(x)$  : le glissement externe et interne des filaments,
- $v_{Fe}(x), v_{Fi}(x)$  : le déplacement externe et interne des filaments,
- $v_c(x)$  : le déplacement de la matrice cimentaire,
- $A_{Fe}, A_{Fi}$  : la section des filaments externes et internes,
- $A_c$  : la section de matrice cimentaire,
- $U_{Fe}, U_{Fi}$  : le périmètre externe et interne des filaments

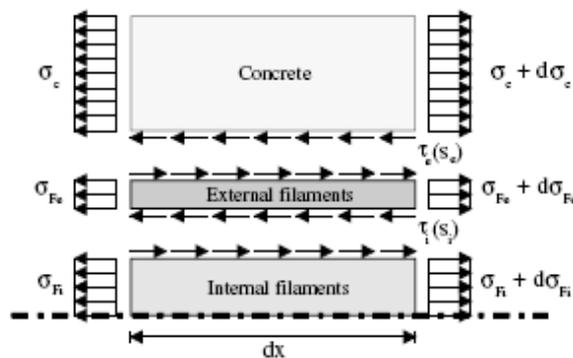
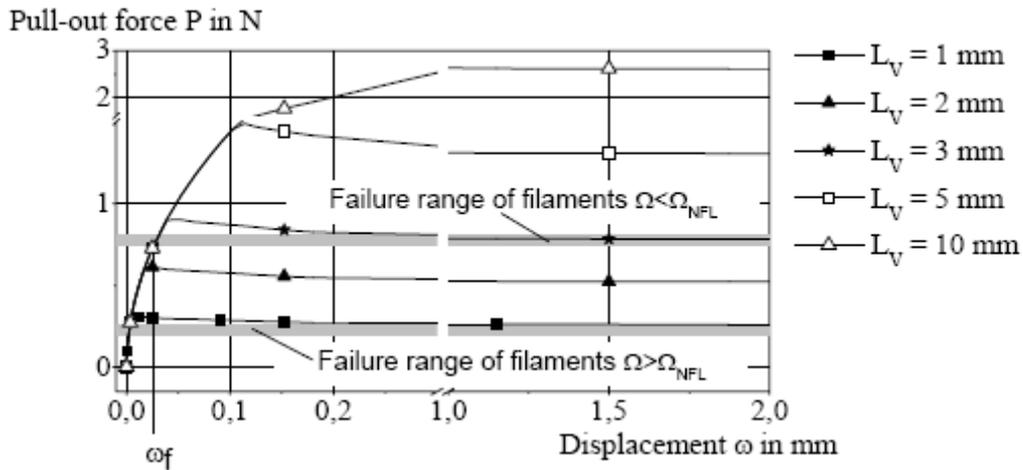


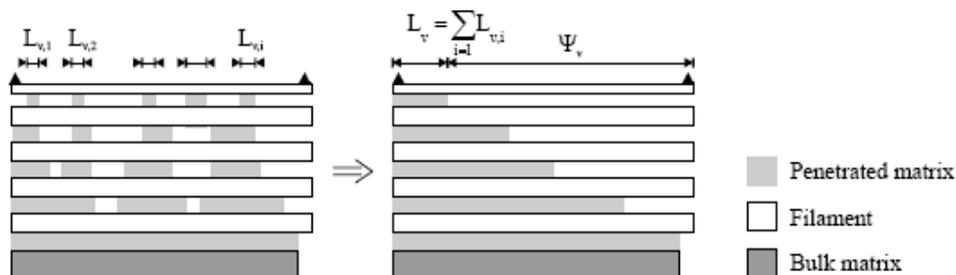
Figure 1.18. Equilibre des contraintes entre les surfaces de liaison [Hol04].

Plus complexe que le précédent, le modèle Y-M-B (de l'anglais : Yarn-Matrix-Bond) proposé par Bonzlohar [Bon04], se base sur l'approche analytique du comportement à l'arrachement de chaque filament constituant le fil multi-filamentaire et sur une prise en compte des données microstructurales sur la pénétration de la matrice dans le fil multi-filamentaire obtenues par microscopie laser confocale et le degré d'imprégnation des filaments. Sur la base de ces deux approches, le modèle Y-M-B détermine la réponse à l'arrachement du fil multi-filamentaire,  $P(\Omega)$ , par sommation de la réponse à l'arrachement de chaque filament activé par l'arrachement,  $P(\omega)$ . Ceci suppose que la variation de la contrainte de cisaillement de la liaison filament - matrice en fonction du glissement  $\tau(s)$  pour différentes longueurs d'enrobage soit déterminée à partir d'essais d'arrachement sur des filaments individuels (figure 1.19). On observe que seulement une longueur d'enrobage de quelque millimètre est suffisante pour transférer tout l'effort qu'un filament peut supporter vers la matrice.



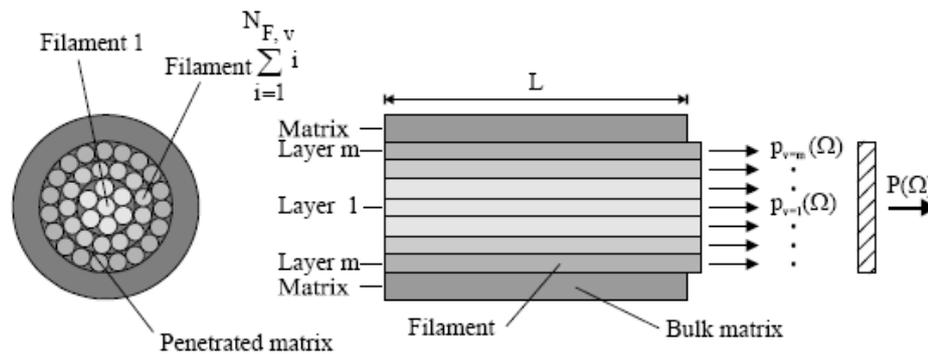
**Figure 1.19.** Simulation de l’essai d’arrachement d’un seul filament pour différentes longueurs d’enrobage par la matrice cimentaire  $L_v$  [Ban04].

Il suppose aussi que la réponse de chaque filament  $i$ , pour  $1 \leq i \leq N_{F,m}$  ( $N_{F,m}$  étant le nombre total de filaments activés) soit connue à chaque étape du chargement. Pour cela il considère que l’imprégnation du fil multi-filamentaire par la matrice qui l’enrobe est de moins en moins efficace de la périphérie vers le centre en accord avec les observations microstructurales. Il divise donc le fil à  $m$  couches concentriques de filaments caractérisées par un même degré d’imprégnation (à ce titre le modèle Y-M-B se rapproche du modèle lamina, proposé par Bey [Bey97]). La diminution du degré d’imprégnation à partir de la périphérie vers le centre du fil, se traduit à une longueur d’ancrage cumulée du filament dans la matrice (**figure 1.20**).



**Figure 1.20.** Modélisation du degré d’imprégnation des filaments par la matrice en fonction de profondeur [Bon04].

La rupture du composite commence par les filaments de la couche périphérique lorsqu’ils atteignent leur résistance en traction et se propage vers les anneaux internes. L’extension rigide du fil et les efforts transférés des filaments vers la matrice diminuent au fur et à mesure que les couches de filaments sont de moins en moins enrobées par la matrice (**figure 1.21**).



**Figure 1.21.** Modélisation de du comportement mécanique à l'arrachement fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire [Bon04].

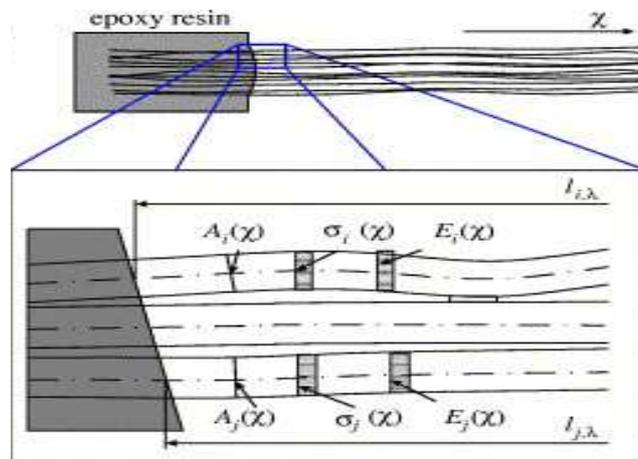
Bien évidemment cette modélisation considère que tous les filaments d'une couche donnée sont imprégnés de la même façon (absence d'imperfections) et que leur résistance en traction ne varie pas ni sur la longueur du filament ni d'un filament à l'autre (absence d'effet statistique). De plus, les différentes couches de filaments restent parallèles durant l'essai (absence de variabilité géométrique du fil et d'activation retardée).

Pour palier aux faiblesses des modèles précédents, des approches plus récentes introduisent des variables stochastiques sur certaines paramètres géométriques et mécaniques du composite en se basant en premier lieu sur une approche statistique de la dispersion des résultats mécaniques et géométriques. Rappelons ici que des bases de l'approche statistique de la fluctuation des caractéristiques mécaniques d'un fil multi-filamentaire ont été proposées il y a plusieurs dizaines d'années par Fisher et Tippett [Fis28], et Weibull [Wei39] s'inspirant de la théorie du « maillon faible » d'une chaîne. Cette approche a été introduite dans le modèle statistique F-B-M (de l'anglais : Fiber - Bundle - Model) proposé par Daniels [Dan45] et développé par Coleman [Col58] où la résistance en traction des filaments (supposés strictement parallèles) suit une distribution du type Weibull [Wei39].

Ce modèle statistique a été repris par d'autres auteurs [Pho78]; [Har78]; [Smi81] pour interpréter les résultats mécaniques sur la résistance à la traction des fils multi-filamentaires. Ceux-ci considèrent que les filaments cassent lorsque la charge appliquée dépasse leur résistance locale. La redistribution de l'effort dans le fil après rupture du filament peut se faire soit par un partage égal à tous les filaments intacts et actifs (en anglais : global load sharing, GLS) soit par un partage local sur les filaments voisins les plus proches (en anglais : local load sharing LLS).

Des travaux plus récents Ibnabdeljalil et al. [Ibn97] ont proposé de remplacer le modèle F-B-M par une approche micromécanique déterministe combinée à une simulation Monte-Carlo. Plus précisément, le diamètre de la zone d'interaction du filament rompu, c'est-à-dire la zone de transfert de l'effort vers les autres filaments à son voisinage, a été considérée suivre une distribution statistique continue entre les deux cas extrêmes (GLS et LLS) considérés précédemment.

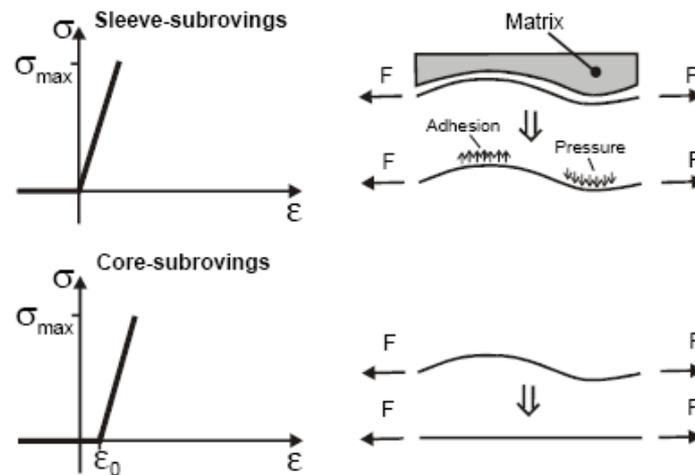
D'autres auteurs Chudoba et al. [Chu06b] se sont intéressés plus en détail à la variabilité des caractéristiques géométriques et mécaniques des filaments dans le fil multi-filamentaire (**figure 1.22**).



**Figure 1.22.** Élément caractéristique du fil multi-filamentaire qui prend en compte de la variabilité des caractéristiques géométriques et mécaniques des filaments [Chu06b].

Ils ont ainsi introduit une variation de la section  $A_i(\chi)$ , de la résistance en traction,  $\sigma_i(\chi)$ , et du module d'élasticité  $E_i(\chi)$  du filament  $i$  en fonction de sa longueur  $\chi$  afin de prendre en compte les défauts de microstructure des filaments. Ils ont introduit par ailleurs une dispersion des caractéristiques précédentes pour l'ensemble de filaments composant le fil afin de prendre en compte la variabilité des caractéristiques lors de la production ( $A_i(\chi) \neq A_j(\chi)$ ). Ils ont introduit enfin une longueur variable des filaments afin de prendre en compte l'ondulation. Ainsi ils ont pu modéliser l'activation retardée des filaments et la ductilité du comportement mécanique et démontré le caractère non-linéaire du comportement et le rôle prépondérant des paramètres stochastiques.

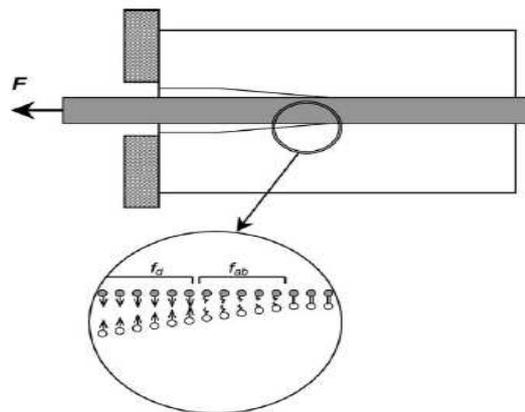
Dans une configuration plus simple que la précédente, Hegger et al. [Heg03] ont démontré aussi que l'ondulation des filaments le long du fil joue un double rôle sur le comportement mécanique (**figure 1.23**). Dans le cas des filaments au cœur du fil, non enrobés par la matrice cimentaire, cette ondulation est à l'origine de l'activation retardée car ces filaments ont la possibilité de s'étirer avant de commencer à glisser et présenter une résistance au frottement sur toute leur longueur, alors que dans le cas des filaments périphériques, parfaitement enrobés par la matrice cimentaire, l'ondulation procure un renforcement de l'ancrage en raison des efforts de compression exercés sur la matrice dans les zones où celle-ci est concave en raison de la courbure du filament.



**Figure 1.23.** Le rôle de l'ondulation des filaments sur le comportement mécanique [Heg03].

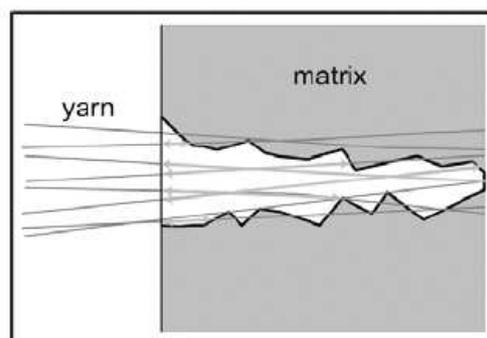
D'autres approches micromécaniques ont été aussi proposées dans la littérature. Elles ont essentiellement ciblé le mécanisme de rupture de la liaison filament – matrice et le développement des efforts frictionnels. Shah et Jenq [Sha87] supposent que la résistance à l'arrachement de l'interface filament / matrice résulte d'une contrainte de cisaillement constante. Il en résulte que la résistance de l'interface fil / matrice peut être caractérisée par deux paramètres : l'énergie d'ouverture de fissure et la contrainte frictionnelle interfaciale [Zha09]. Evidemment ces deux paramètres dépendent à leur tour de la structure du filament (géométrie et état de surface, rugosité, présence d'ensimage, rigidité, voire vieillissement du filament dans la matrice cimentaire) et de l'adhésion chimique de la matrice avec le filament [Naa91b]; [Leu96]; [Kab06].

Dans le cas d'enrobage du fil par une matrice polymérique, les chercheurs ont essayé de comprendre le fonctionnement micromécanique de la liaison filament – matrice à partir de l'échelle moléculaire. Ainsi, Zhandarov [Zha05], propose de considérer que la propagation de la fissure à l'interface filament - matrice implique deux étapes (**figure 1.24**) : une première étape d'allongement élastique des liaisons moléculaires (résultant des interactions acide-base à l'interface) sur une longueur  $f_{ab}$  du filament et une seconde étape, après rupture de liaison moléculaires, de développement des forces type Van der Waals, à l'interface sur une longueur  $f_d$ . L'énergie de cohésion peut donc être calculée à partir de ces considérations. Il faut ajouter qu'au-delà de la distance  $f_d$ , les forces moléculaires n'ont plus d'action et ce sont les frottements induits par la rugosité micrométrique au niveau de l'interface qui interviennent.



**Figure 1.24.** Rôle de la liaison chimique entre matrice polymérique et filament enrobé au niveau moléculaire sur la propagation de la fissure et la rupture de la liaison [Zha05].

Dans le cas d'enrobage du fil par une matrice cimentaire les phénomènes sont beaucoup plus complexes en raison de l'hétérogénéité de la matrice cimentaire. Sur le plan moléculaire, seulement des forces type Van der Waals peuvent être considérées et seulement aux endroits où les produits d'hydratation du ciment couvrent complètement la surface du filament. Compte tenu des imperfections d'enrobage, l'approche moléculaire de la liaison s'expose à des aléas considérables. Ainsi, Konrad et al. [Kon03a] se limitent à l'échelle du micromètre pour conclure que même à cette échelle la liaison matrice cimentaire – fil multi-filamentaire n'est pas simple à modéliser. En s'appuyant sur des observations microstructurales, ils déduisent que la longueur d'ancrage des filaments dans la matrice cimentaire peut être très variable si l'on considère la variabilité du positionnement des filaments dans la section du fil et la difficulté de pénétration de la matrice cimentaire entre les filaments (**figure 1.25**). Dans ces conditions, le mécanisme de rupture de la liaison ne peut être appréhendé sans une approche stochastique sur la longueur libre des filaments. Ce caractère aléatoire du positionnement géométrique de la liaison matrice filaments induit sur le plan macroscopique une réduction de la rigidité de la liaison aussi bien sur la partie pré-pic que post-pic de la courbe effort – déformation de l'essai d'arrachement.

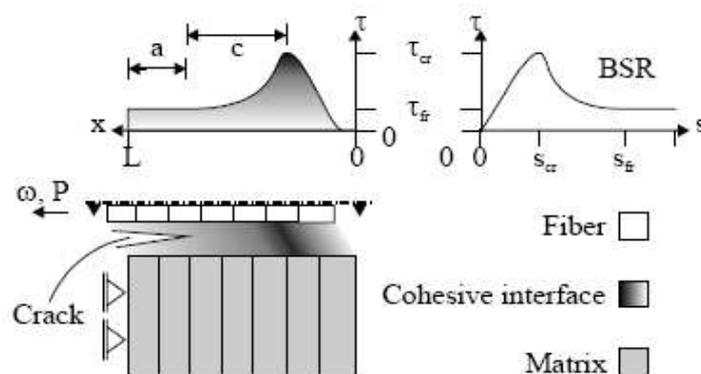


**Figure 1.25.** Prise en compte de la complexité de la liaison matrice cimentaire – fil multi-filamentaire au plan microstructural [Kon03b].

Naaman et al. [Naa91a] considèrent toutefois que le module de liaison filament – matrice cimentaire est particulièrement élevé et, par voie de conséquence, la rupture de la liaison à lieu pour des très faibles déplacements des filaments dans la matrice lors de l'essai

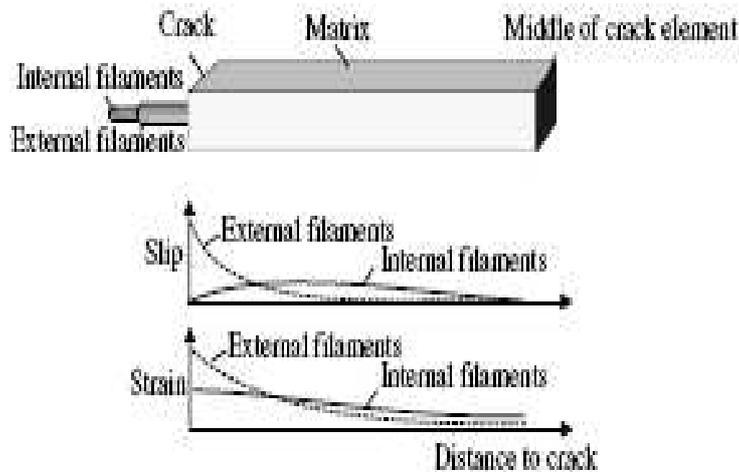
d'arrachement et pour des contraintes de cisaillement relativement faibles. Ils attribuent donc la ductilité du comportement macromécanique à l'instauration d'un mécanisme de frottement du filament enrobé dans la matrice sur toute la longueur après rupture de la liaison.

D'autres chercheurs [Abr96]; [Foc00] se sont intéressés à la modélisation de la variation de la contrainte de cisaillement le long de l'interface fil – matrice au cours de la rupture de la liaison fil – matrice afin de déterminer le mécanisme de rupture de la liaison. Ils se sont appuyés sur le principe selon lequel la rupture de la liaison a lieu lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface dépasse une valeur critique. En se basant sur une approche non-linéaire Banholzer [Ban04] a démontré en revanche que la valeur maximale de la contrainte de cisaillement est relativement délocalisée en aval de la pointe de la fissure qui se propage le long de l'interface lors de l'arrachement (**figure 1.26**) car le frottement joue un rôle prédominant dans le transfert des contraintes entre fil et matrice.



**Figure 1.26.** Calcul de la distribution de la contrainte de cisaillement le long de l'interface du fil enrobé en supposant un comportement non – linéaire de la liaison [Ban04].

Une approche similaire est aussi proposée par Holler et al. [Hol04] pour le calcul des déformations et des glissements des filaments lors de l'essai d'arrachement. Elle s'appuie sur une distinction simplificatrice des filaments en filaments internes peu ou pas enrobés par la matrice cimentaire et les filaments externes ou périphériques correctement enrobés avec propriétés de liaison propres (**figure 1.27**).

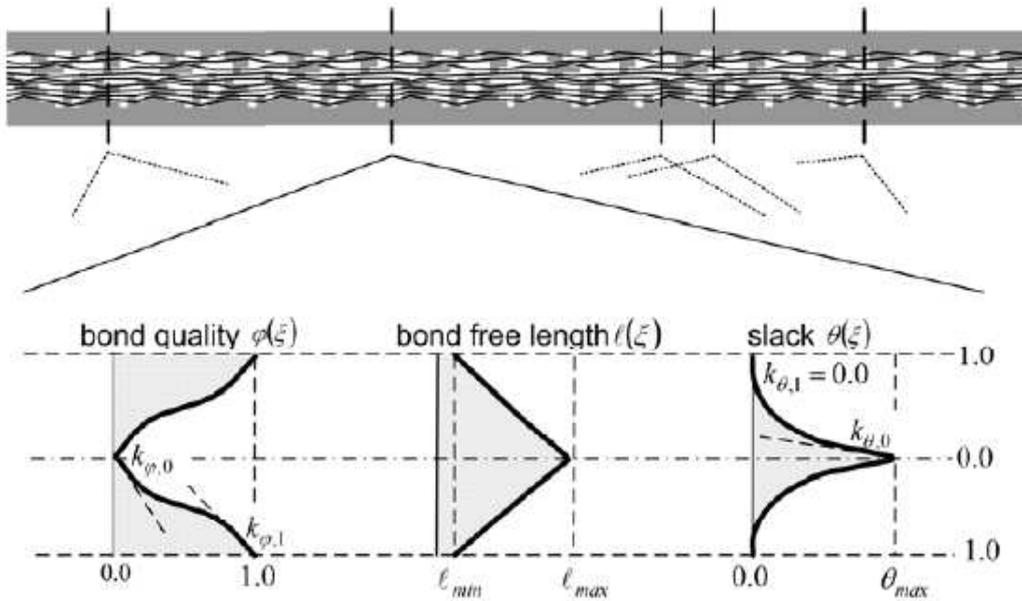


**Figure 1.27.** Calcul de la distribution des déformations/et des glissements le long de la rupture de la liaison, [Hol04].

Une approche plus complexe du mécanisme de rupture de la liaison fil multi-filamentaire - matrice cimentaire est proposée par [Kon06a]. Cette approche prend en considération les arguments de [Kon03b] sur la variabilité de la longueur libre des filaments dans le fil enrobé par la matrice cimentaire (**figure 1.25**) et enrichit l'approche de [Hol04] en introduisant un paramètre désignant la variation de la qualité de liaison des filaments entre la périphérie et le centre du fil de manière continue. De plus, ils tiennent compte de l'activation retardée induite par la diminution de la qualité de la liaison filament - matrice et l'augmentation de la longueur libre des filaments de la périphérie vers le centre du fil étudiée par [Chu05]. Ainsi leur modélisation du mécanisme de rupture s'appuie sur trois paramètres qui varient entre 0 et 1 selon que les filaments sont à l'extrême périphérie ou au centre du fil :

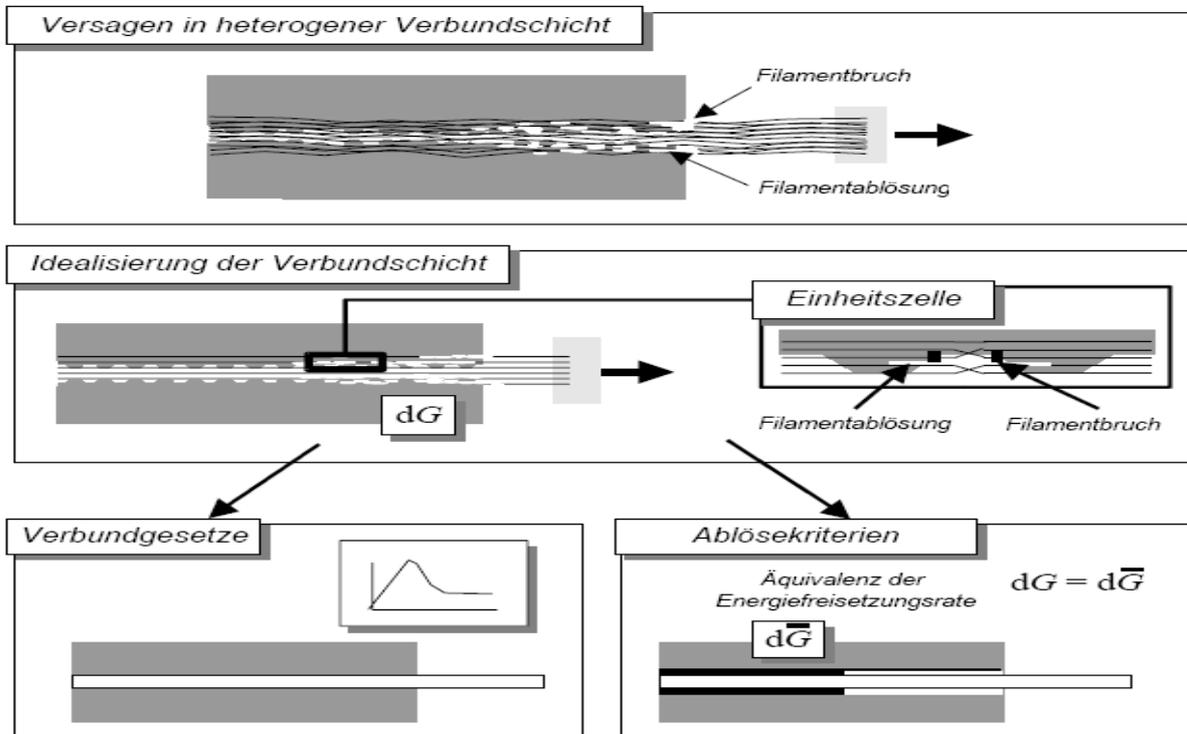
- un paramètre caractérisant la variation de la longueur libre des filaments,  $\ell(\xi)$ , qui augmente régulièrement de l'extérieur vers l'intérieur du fil ;
- un paramètre caractérisant la variation de la qualité de liaison,  $\varphi(\xi)$ , qui diminue de l'extérieur vers l'intérieur du fil mais sa valeur reste relativement élevée dans la couche périphérique des filaments ;
- un paramètre caractérisant la variation de l'activation retardée des filaments,  $\theta(\xi)$  des filaments en fonction de la longueur libre de liaison qui augmente exponentiellement de l'extérieur vers l'intérieur (**figure 1.28**).

Par ailleurs, la modélisation prend en compte l'entremêlement des filaments le long du fil, ce qui introduit une inhomogénéité sur le transfert des contraintes sur la longueur. Il démontre ainsi que la liaison fil - matrice est plus résistante pour des longueurs d'enrobage ou d'ancrage plus courtes. Il démontre aussi que la rigidité des filaments, la résistance et la rigidité de la liaison locale filaments - matrice n'ont pas d'influence significative sur la pente initiale de la courbe effort - déformation. En revanche, cette modélisation n'a pas permis de reproduire l'adoucissement initial de la courbe expérimentale effort - déformation qui semble insensible à la qualité de liaison filament - matrice.



**Figure 1.28.** Prise en compte de la variation des propriétés de la liaison entre la périphérie et le centre du fil enrobé dans la matrice cimentaire [Kon06a].

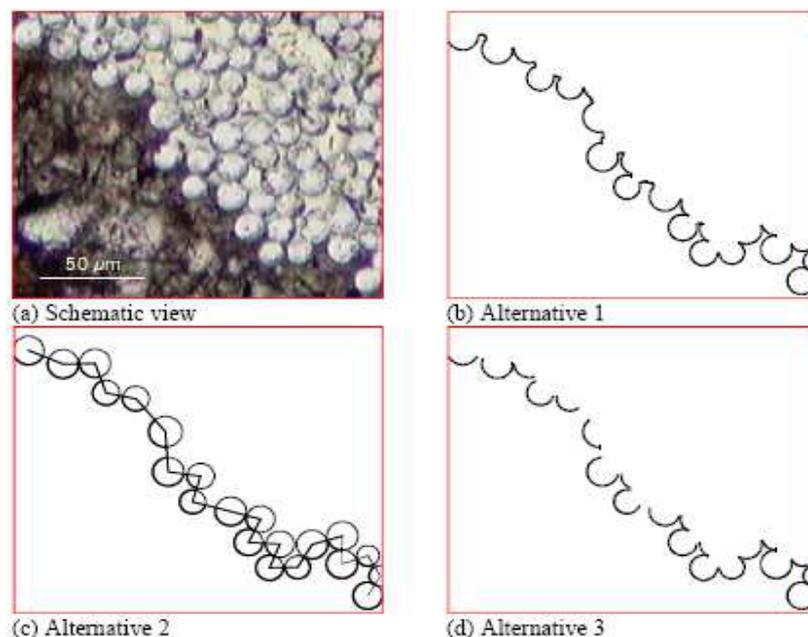
Le mécanisme de rupture a aussi été étudié par des approches énergétiques. Pisanova et al. [Pis01] proposent que la rupture de la liaison localement et sa propagation se produit pour un niveau d'énergie surfacique critique. Ce concept a été utilisé aussi par [Mom06] dans une approche plus complexe qui prend compte des imperfections de la liaison filament – matrice et de la variabilité géométrique du fil (**figure 1.29**).



**Figure 1.29.** Prise en compte des imperfections à l'échelle microstructurale de la liaison filaments matrice cimentaire et de la variabilité géométrique du fil sur l'analyse du mécanisme de rupture [Mom06].

Il est important de noter qu'aussi bien le principe de contrainte de cisaillement critique que celui d'énergie critique s'appuient sur l'hypothèse que l'aire de l'interface filaments - matrice est a priori connue. Dans cet objectif, certains chercheurs [Jes04a]; [Bra01] se sont intéressés à formaliser le mode de calcul du périmètre du fil en utilisant les données expérimentales obtenues par microscopie optique. Ils ont conclu que la détermination du périmètre du fil est loin d'être univoque. Elle peut se faire sur la base d'approches différentes qui donnent des résultats significativement différents. Par exemple, on peut considérer que le périmètre est continu et passe autour de tous les filaments extérieurs au contact de la matrice mais aussi autour des filaments adjacents lorsque les filaments extérieurs ne sont pas les uns au contact des autres (**figure 1.30**, alternative 1). Dans ce cas, le périmètre est surestimé, par rapport à un périmètre continu qui relie par ligne droite les espaces laissés entre filaments extérieurs sans considérer la présence de filaments adjacents (alternative 2). On peut aussi considérer que le périmètre est discontinu et se limite uniquement à la somme des parties de la circonférence des filaments au contact direct avec la matrice (alternative 3).

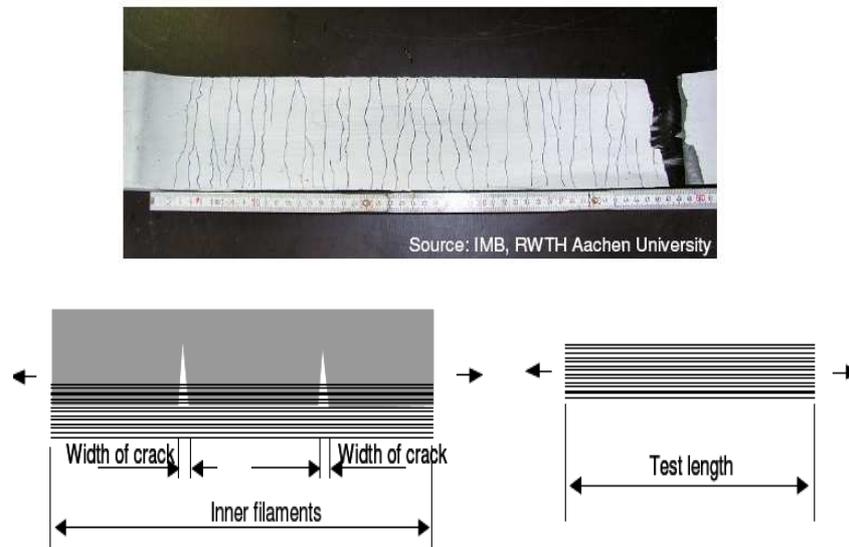
La question du périmètre devient encore plus complexe si l'on considère la variabilité géométrique le long du fil. A fortiori, l'estimation de l'aire de l'interface matrice – filaments reste actuellement un objectif difficile à atteindre compte tenu de la complexité de la structure du fil multi-filamentaire et des imperfections de l'enrobage, ce qui empêche une confrontation directe des résultats des modélisations précédentes à ceux issus des essais.



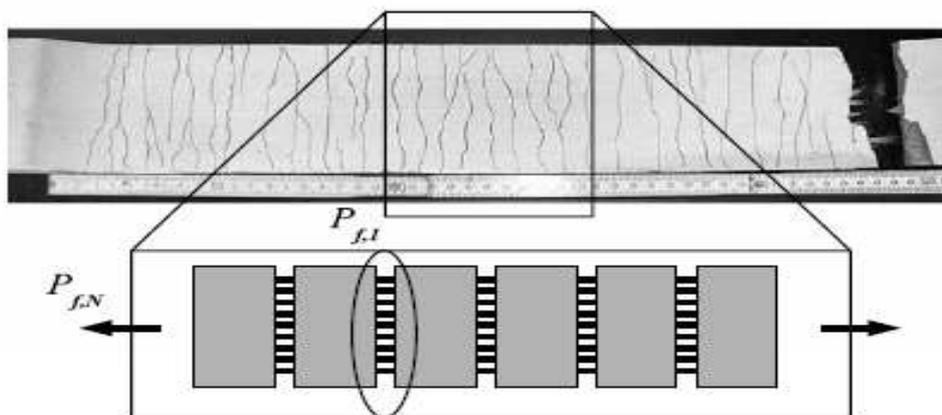
**Figure 1.30.** Trois alternatives de simulation de la périphérie du fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice cimentaire [Jes04a].

Avant de clore ce paragraphe sur la modélisation, nous souhaitons faire une brève référence aux publications concernant le comportement mécanique du composite matrice cimentaire – fil multi-filamentaire lors d'un essai de traction simple. En effet, dès la fissuration de la matrice cimentaire, beaucoup plus fragile que le fil, les efforts développés dans les zones non-fissurées sont tout à fait semblables à ceux développés au cours d'un essai d'arrachement (**figure 1.31 et 1.32**). Toutefois, il faut souligner que la présence des fils multi-filamentaires

augmente la résistance et la rigidité du composite et par conséquent sa résistance globale à la fissuration.



**Figure 1.31** En haut, élément de béton renforcé par des fils multi-filamentaires près un essai de traction. En bas, modélisation du composite [Han05].

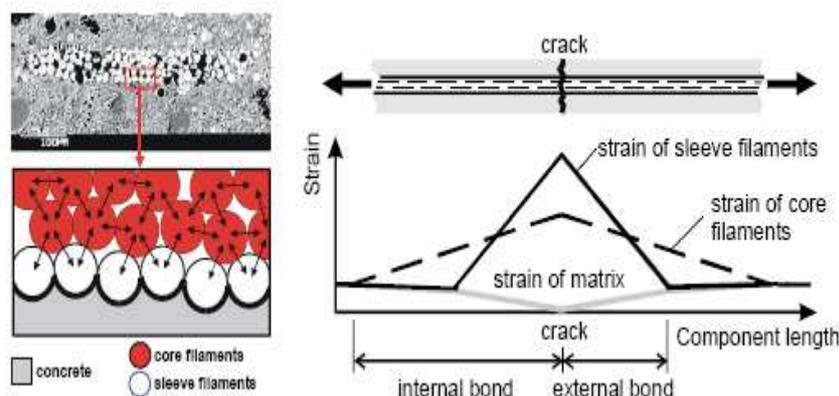


**Figure 1.32.** En haut, élément de béton renforcé avec des fils multi-filamentaires près un essai de traction. En bas, modélisation du composite [Chu06a].

Sur le plan de la modélisation plusieurs approches ont été proposées pour interpréter les résultats expérimentaux et plus particulièrement pour évaluer la ductilité du composite compte tenu de la fragilité de ses composants de base (matrice cimentaire et filaments de verre). Hanisch et al [Han05] proposent de considérer que la longueur libre des filaments enrobés par la matrice cimentaire est strictement limitée à l'ouverture locale de la fissure (sa dimension est donc de l'ordre du dixième de millimètre), alors que la longueur libre des filaments de cœur peut être beaucoup plus grande (plusieurs centimètres, voir la longueur entière de l'élément). Ainsi, la répartition des efforts dans les filaments après la fissuration de la matrice sont très différents selon leur degré d'imprégnation autour de la zone fissurée (**figure 1.31**). Les filaments de cœur reprennent un effort global sur toute la longueur du composite alors que ceux périphériques transmettent l'effort localement par leur liaison avec la matrice qui les enrobe.

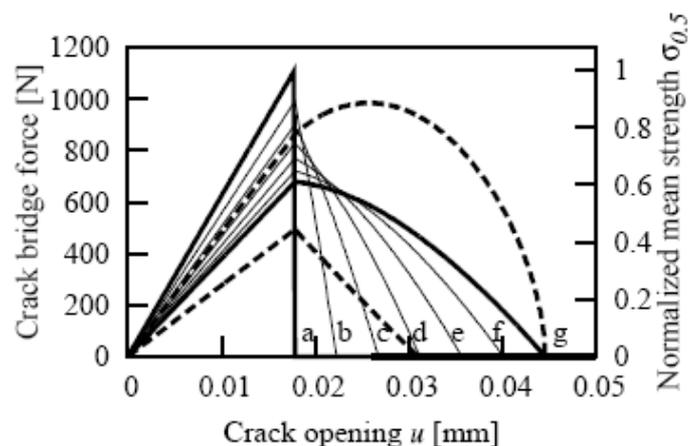
Une approche un peu différente est proposée par [Chu06a] le fil multi-filamentaire présente une variabilité de ces caractéristiques géométriques. Sur ces hypothèses les filaments périphériques imprégnés se différencient moins de ceux du cœur car ils subissent tous les mêmes déformations (**figure 1.32**). En revanche, la longueur de chaque filament va jouer un rôle aussi important que son degré d'imprégnation sur l'activation. A ce titre, le comportement micromécanique des zones entre deux plans de fissuration s'apparente fortement à l'essai d'arrachement et présente une activation retardée au prorata de la variation des longueurs des filaments discutée dans les pages précédentes. Toutefois, l'entremêlement et l'ondulation des filaments dans le fil ainsi que l'endommagement (ou éventuellement la rupture) des filaments lors de la propagation de la fissure sur la section sont des variables incontrôlables ce qui rend difficile la vérification de cette approche. Ainsi, Chudoba et al [Chu06a] proposent de considérer une variable stochastique qui décrit la probabilité de rupture des filaments en fonction du nombre de fissurations (donc de pontages) sur le composite.

Jesse [Jes05] s'est intéressé aussi au comportement micromécanique d'un composite en traction. En s'appuyant sur l'hypothèse que la liaison entre les filaments et la matrice est limitée à la frontière externe du fil multi-filamentaire (telle déterminée sur la **figure 1.30**), il a calculé les déformations des filaments autour de la fissure de la matrice cimentaire selon le positionnement des filaments à la périphérie ou à l'intérieur du fil afin de déterminer le risque de rupture (**figure 1.33**).



**Figure 1.33.** Modélisation des déformations des filaments autour d'une fissure lors d'un essai de traction selon l'imprégnation des filaments par la matrice cimentaire [Jes05].

Konrad, et al [Kon06b] ont essayé de schématiser le comportement mécanique global du pontage de fissure par le fil multi-filamentaire en fonction de la longueur effective d'ancrage du fil dans la zone non fissurée de la matrice (**figure 1.34**), alors que des études antérieures [Wan87]; [Naa91a] avaient essayé de calculer la résistance à la fissuration du composite et la longueur effective d'ancrage des fils dans la matrice cimentaire donc l'espacement moyen des fissures.



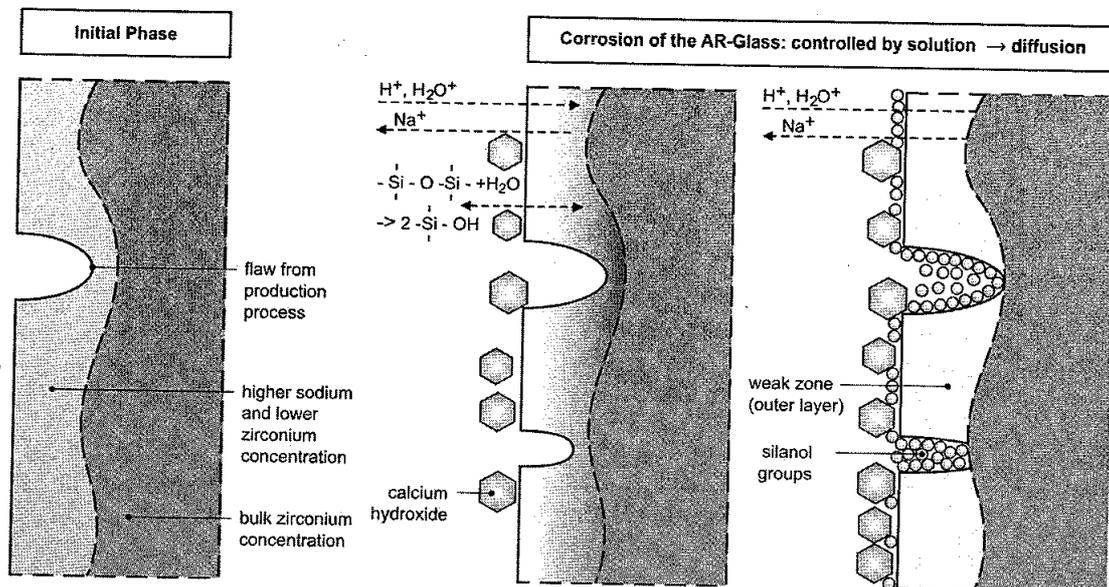
**Figure 1.34.** Schématisation du comportement mécanique d'un pontage de fissure par le fil multi-filamentaire en fonction de la longueur d'ancrage dans la matrice cimentaire [Kon06b].

## 1.7 Durabilité des fils multi-filamentaires à base de verre enrobés dans une matrice cimentaire

Nous avons évoqué dans le paragraphe 1.2 concernant la constitution des fils multi-filamentaires à base de verre que la composition chimique du verre joue un rôle prépondérant sur le comportement à long terme du fil multi-filamentaire dans une matrice cimentaire. En effet, le verre type E peut être facilement attaqué par le milieu fortement basique de la matrice cimentaire ( $\text{pH} > 12,5$ ) et conduire à une altération des propriétés mécaniques du composite au cours du temps exprimée le plus souvent par une réduction de la résistance, de la rigidité (pré-pic) et de la ductilité (post-pic) du composite [Lit81]; [Pro80]; [Pro82]. Pour répondre à ce problème, l'industrie du verre a mis au point le verre type AR (alcali-résistant) contenant entre 15 et 20% d'oxyde de zirconium ( $\text{ZrO}_2$ ). Bien que cette solution permette d'améliorer très significativement la durabilité des filaments enrobés dans une matrice cimentaire, elle ne permet pas de s'affranchir complètement du problème.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce sujet. Cuypers et al. [Cuy07] ont étudié en détail l'évolution à long terme (de l'ordre de plusieurs années) de l'interface filaments de verre – matrice cimentaire du point de vue chimique et microstructural. Ils ont conclu que le principal mécanisme de dégradation résulte de l'attaque chimique des liaisons siloxane des chaînes silicatées dans la structure du verre par le milieu alcalin de la matrice cimentaire ( $\text{pH} > 12,5$ ) en présence de portlandite et de leur transformation en liaisons silanol. Ceci conduit à la rupture de la structure amorphe et la formation de produits colloïdaux de plus faible cohésion que celle du verre amorphe. Les micro-défauts à la surface du verre sont le siège privilégié de ces réactions, par ailleurs, de nouveaux micro-défauts peuvent aussi être engendrés par ce mécanisme conduisant à une fragilisation des filaments attaqués. Ce mécanisme d'attaque chimique est tout à fait similaire à celui observé dans le cas du verre type E [Pro80]; [Pro82]. Selon Cuypers et al. [Cuy07] l'attaque chimique du verre AR trouve son origine dans une diminution relative de la teneur en oxyde de zirconium dans la couche superficielle des filaments en raison des très forts gradients thermiques qu'il subit au cours de la production. Cette diminution de la teneur en oxyde de zirconium dans la couche

superficielle du filament, observée par Orłowsky et al. [Orł05], prive la surface du filament d'une résistance suffisante face au milieu alcalin (**figure 1.35**).



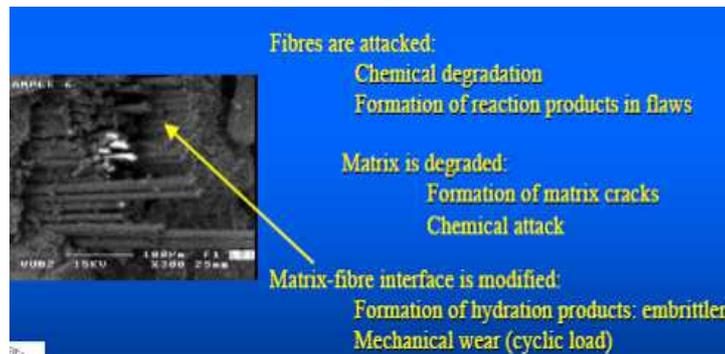
**Figure 1.35.** Mécanisme de dégradation des filaments de verre AR (alcali-résistant) dans un environnement cimentaire [Cuy07].

La possibilité d'une variation de la concentration en oxyde de zirconium entre la couche superficielle et le cœur du filament selon les conditions de production semble être une explication plausible face aux résultats contradictoires sur la durabilité des fils multifilamentaires à base de verre AR en milieu alcalin. En effet, à titre d'exemple citons l'étude de Soroushian et al. [Sor93] qui concernait des éprouvettes composées d'un fil multifilamentaire à base de verre AR enrobé dans une matrice cimentaire et conservées pendant 50 jours à 50°C dans l'eau afin d'accélérer le processus de dégradation. L'étude avait montré qu'aucune altération de la surface des filaments n'était visible à l'échelle microstructurale (MEB). D'autres études étaient arrivées aux mêmes conclusions. De plus, Soroushian et al. [Sor93] avaient démontré que le remplacement de 15% du ciment par une résine époxydique ne modifie pas significativement l'interface filaments – matrice où la présence des produits hydratés du ciment reste largement dominante.

Pour expliquer la réduction à long terme des performances mécaniques des composites renforcés de fils multifilamentaires à base de verre AR, observée dans certains cas, Brameshuber et al. [Bra03] avaient avancé l'hypothèse d'une dégradation mécanique des filaments par les produits hydratés du ciment. Cette dégradation trouverait son origine dans la concentration locale des contraintes aux endroits où des cristaux de portlandite de la matrice cimentaire seraient en contact direct avec la surface du filament engendrant par usure ou par poinçonnement le développement de micro-défauts sur la surface et conduisant à l'augmentation de la fragilité du verre et à la réduction de la ductilité du composite. Ils proposent même l'incorporation de fumées de silice dans la composition de la matrice cimentaire afin de réduire la cristallisation de portlandite à l'interface. Ils considèrent aussi que la carbonatation de la matrice cimentaire devrait jouer un rôle favorable à la durabilité du composite non seulement en raison de la transformation de la portlandite en calcite mais aussi en raison de la diminution du pH.

Le rôle favorable de la carbonatation constitue un des plus grands avantages de l'utilisation des fils multi-filamentaires à base de verre comme renforts dans les éléments en béton par rapport aux armatures ou aux fibres en acier car il permet la conception des éléments à très faible enrobage du renfort (donc éléments de très faible épaisseur) et à base de matrices cimentaires peu résistantes à la carbonatation soit en raison de faible alcalinité du liant soit en raison d'une perméabilité ou d'une fissuration diffuse importante ce qui n'est pas envisageable dans les cas des renforts en acier. De plus, les fils multi-filamentaires à base de verre AR sont insensibles à la présence d'ions chlorures.

L'hypothèse d'abrasion et d'usure de la surface des filaments à l'échelle micronique et la création de micro-défauts par des cristaux de la matrice cimentaire précipités à l'interface a été retenue aussi par Konrad et al. [Kon06a], [Kon06b] pour expliquer le comportement du composite sous chargement cyclique. En effet, la formation de micro-défauts de la liaison matrice - filament engendre un comportement inélastique et hystérétique à l'échelle macroscopique avec effet cumulatif lors de la succession des cycles chargement – déchargement même dans le cas de charges faibles. Sur le plan de la modélisation, la dégradation de la liaison matrice – filament et la fragilisation des filaments peut être représentée par un endommagement en fonction de la déformation imposée à l'interface.



**Figure 1.36.** Facteurs agissant sur la dégradation des propriétés mécaniques des composites à base de matrice cimentaire et des fils multi-filamentaires de verre AR [Cuy04].

En conclusion, nous pouvons considérer, comme le souligne Cuypers et al [Cuy04], que l'éventuelle dégradation des performances mécaniques à long terme des composites à base de fils multi-filamentaires de verre AR et de matrice cimentaire implique des facteurs chimiques, physiques et microstructuraux complexes (**figure 1.36**) dont le rôle n'est que partiellement élucidé aujourd'hui. Ainsi, afin d'assurer une durabilité à long terme des composites Raupach et al. [Rau06] proposent d'imprégner préalablement les fils multi-filamentaires dans une résine époxydique.

Il faut signaler qu'aucune des études évoquées précédemment ne mentionne l'éventuelle présence d'ensimage sur les filaments et a fortiori son rôle dans le mécanisme de dégradation du composite.

## 1.8 Synthèse

L'étude bibliographique a permis de mettre en avant le très grand potentiel d'utilisation des fils multi-filamentaires à base de verre en tant que renforts structurel des matériaux

cimentaires. Malgré le comportement a priori fragile de la matrice cimentaire et des filaments de verre, les composites à base de fils multi-filamentaires et de matrices cimentaires présentent une ductilité importante tout en conservant la rigidité et la résistance mécanique de la matrice cimentaire. De plus, la carbonatation de la matrice cimentaire joue un rôle favorable à la durabilité ce qui permet de concevoir des modes de renfort tout à fait innovants par rapport aux éléments renforcés par des armatures ou des fibres en acier.

La structure complexe du fil multi-filamentaire (filaments, ensimage, mèches, fil) et la variabilité des caractéristiques géométriques en fonction de la longueur (entremêlement, torsion et ondulation des filaments et des mèches) sont à l'origine de l'activation retardée et la ductilité du fil multi-filamentaire lors d'une sollicitation de traction. L'imprégnation partielle du fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire en raison de la difficulté de pénétration des particules du ciment dans les espaces intra-filamentaires au cœur du fil viennent renforcer l'activation retardée et la ductilité du composite lors d'un essai d'arrachement.

En contrepartie, cette complexité structurelle et variabilité géométrique du fil, d'une part, et le caractère imparfait et partiel de l'enrobage par la matrice cimentaire ainsi que l'hétérogénéité microstructurale de cette matrice, d'autre part, engendrent une dispersion importante des résultats d'essais mécaniques et rendent particulièrement difficile une modélisation analytique du comportement mécanique sans procéder à des simplifications considérables. L'approche multi-échelles et l'approche stochastique sont nécessaires pour interpréter et modéliser les résultats expérimentaux mais dans ce cas la modélisation devient particulièrement complexe et plusieurs paramètres expérimentaux restent à déterminer. Par ailleurs, nous ne disposons pas aujourd'hui de moyens de caractérisation de la variabilité géométrique du fil et la fragilité des filaments rend très difficile la mesure des déformations. De plus, les modes opératoires des essais (mode de préparation des éprouvettes, mode de fixation des éprouvettes à la presse, vitesse de charge et déformation, conditions hygrothermiques ambiantes) peuvent influencer très significativement sur les résultats.

En conclusion, le renforcement des matériaux cimentaires par des fils multi-filamentaires constitue un champ d'investigation et de recherche particulièrement large qui implique des approches multi-échelles et multi-facteurs aussi bien du point de vue microstructural, chimique, physique et mécanique et de par ce fait toute nouvelle contribution peut être utile pour combler des lacunes et éclaircir de nouveaux points.



## **Chapitre 2**

# **Caractérisation des fils multi-filamentaires et de leur enrobage cimentaire**

## 2.1 Introduction

L'un des objectifs de ce travail est de comprendre la relation qu'il y a entre le comportement mécanique à l'arrachement des fils multi-filamentaires et l'état d'imprégnation par la matrice cimentaire de l'amas de filaments constituant le fil. L'étude bibliographique (**chapitre 1**) a en effet montré que l'imprégnation joue un rôle prépondérant dans le comportement physique et mécanique du composite. Les filaments situés à la périphérie du fil, imprégnés par la matrice, ont un comportement complètement différent de ceux situés au cœur du fil, peu ou pas imprégnés. L'étude bibliographique a montré également que l'imprégnation est, en règle générale, loin d'être homogène tant dans le périmètre du fil que sur sa longueur en raison, d'une part, du caractère hétérogène de la matrice cimentaire (suspension de grains solides de différentes tailles dans une phase liquide) et, d'autre part, de la structure complexe du fil et de la variabilité de ses caractéristiques géométriques sur la longueur.

Pour étudier le lien entre imprégnation du fil et comportement mécanique à l'arrachement, nous avons fabriqué des éprouvettes de mortier renforcées de différents types de fil multi-filamentaire à base de verre, en cherchant à obtenir différents degrés d'imprégnation du fil par la matrice cimentaire lors de la mise en œuvre. Les éprouvettes ont été caractérisées du point de vue microstructural par des investigations au microscope électronique à balayage et aussi du point de vue porométrique par des essais au porosimètre au mercure et par des essais spécifiques d'écoulement à travers le fil enrobé. Ensuite elles ont été caractérisées mécaniquement par des essais d'arrachement et de nouvelles observées par microscopie optique et électronique. Les conditions expérimentales et les résultats obtenus par ces essais sont présentés et discutés dans les chapitres suivants.

Dans ce chapitre nous étudions préalablement les caractéristiques de base des fils multi-filamentaires et celles du mortier employé pour leur enrobage afin d'identifier et quantifier les paramètres influant sur les caractéristiques du composite. En ce qui concerne les fils multi-filamentaires, un poids particulier est donné à l'étude de la variabilité de leurs caractéristiques géométriques et structurales, à l'étude des phénomènes d'imprégnation par l'eau ainsi qu'à l'analyse du comportement mécanique à la traction en fonction de différentes conditions d'essai. Dans tous les cas, nous avons systématiquement recherché à évaluer la dispersion des valeurs des caractéristiques étudiées induite essentiellement par la variabilité structurale des fils multi-filamentaires. En ce qui concerne le mortier, l'accent était mis sur l'étude de ses propriétés physiques et mécaniques.

## 2.2 Choix des fils multi-filamentaires pour l'étude

Cinq fils à base de filaments de verre ont été étudiés dans le cadre de ce travail. Leurs principales caractéristiques sont données dans le **tableau 2.1**. Les fils peuvent être distingués en deux groupes en fonction de la nature du verre employé pour leur fabrication :

- Trois fils sont à base de verre AR (alcali-résistant), fournis par l'entreprise Saint Gobain, désignés SG1, SG2 et SG3. Les filaments constitutifs des ces trois fils ont le même diamètre (14  $\mu\text{m}$ ). Ils sont assemblés en mèches par l'ensimage sans torsion mais le nombre de filaments par mèche, le nombre de mèches par fil ainsi que la nature de l'ensimage diffèrent d'un fil à l'autre.

• Deux fils sont à base de verre E, fournis par l'entreprise Owens Corning, désignés OC1 et OC2. Ils se distinguent principalement par le mode d'assemblage des filaments. Les filaments du fil OC1 sont assemblés en mèches par l'ensimage sans torsion (multi-end yarn) alors que les filaments du fil OC2 ne sont pas assemblés en mèches (single end yarn) et sont traités par un ensimage spécifique. De plus, les filaments du fil OC1 sont plus fins (12  $\mu\text{m}$ ) que ceux du fil OC2 (17  $\mu\text{m}$ ).

La principale différence entre les deux verres (AR et E) est l'addition dans le verre AR de 10 à 20 % environ d'oxyde de zirconium qui lui confère une meilleure résistance en milieu alcalin, tel que le milieu cimentaire. Toutefois, il faut signaler que tous les filaments sont traités par un ensimage qui forme une couche de protection complémentaire contre l'éventuelle attaque par les ions alcalins. Par ailleurs, dans le cadre de notre étude, tous les essais ont été menés jusqu'à l'âge de 28 jours, ce qui constitue un laps de temps relativement court pour une éventuelle attaque significative des filaments ; ce qui a été vérifié systématiquement lors de nos observations au microscope électronique à balayage (voir **Chapitre 3**). Dans le cadre de ce travail donc, la différence entre les deux verres doit être considérée essentiellement du point de vue de leurs propriétés physique et mécanique plutôt que du point de vue de la durabilité.

Tous les fils étudiés sont commercialisés par les fabricants. Les fils OC (à base de verre E) sont principalement employés dans la fabrication de pièces pour les constructions navales, l'aéronautique et l'automobile mais aussi dans la fabrication de tubes et de réservoirs. Ils sont le plus souvent enrobés d'un liant polymérique (résine époxydique, polyester ou polyvinyle). Les fils SG (à base du verre AR) sont employés dans la fabrication des pièces en béton renforcées de verre tels que les panneaux de toiture ou de façade, les revêtements de murs, des pièces architecturales et décoratives. Tous les fils sont commercialisés en bobine.

**Tableau 2.1.** Principales caractéristiques de fils multi-filamentaires à base de verre.

Fil	Référence fabricant	Type de verre	Diamètre filament ( $\mu\text{m}$ )	Ensimage	Nombre approximatif de filaments par mèche	Nombre approximatif de mèches par fil	Masse linéique de la mèche (tex)	Masse linéique du fil (tex)	Masse volumique absolue du fil ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
SG1	Saint Gobain 54/38	AR	14	Silane, polymère et produits lubrifiants	100	55**	40	2450	2680
SG2	Saint Gobain 54/76	AR	14	Mêmes composants que SG1	200	30**	80	2450	2680
.SG3	Saint Gobain 61/2	AR	14	Différent de SG1, SG2	200	35**	82	2500	2680
OC1	Owens Corning 359A-AA	E	12*	Polyester, vinyle ester et silane	270	40**	60	2400	2530
OC2	Owens Corning 111A type 30	E	17	Polyester, vinyle ester et résine époxy	-	-	-	2400	2530

Données fabricants (sauf \* : estimation à partir d'images ; \*\* : comptage manuel)

A titre de comparaison, pour certains essais de l'étude, nous avons employé en plus un fil multi-filamentaire à base de fibres naturelles de chanvre, désigné Ch par la suite. Ce fil est utilisé essentiellement dans des applications domestiques mais aussi dans la fabrication d'agrotextiles et de géotextiles. Le fil de chanvre diffère significativement des fils de verre, non seulement par la nature cellulosique des fibres et par leur longueur limitée (de quelques cm à quelques dizaines de cm), mais aussi par sa texture torsadée, par l'absence d'ensimage et de mèches ainsi que par sa très forte variabilité structurale de la fibre et du fil. Les principales caractéristiques du fil de chanvre sont présentées dans le **tableau 2.2**.

**Tableau 2.2.** Principales caractéristiques du fil de chanvre

Fil	Nature du filament	Origine	Diamètre fibres ( $\mu\text{m}$ )	Nombre approximatif de fibres par fil	Masse linéique du fil (tex)	Masse volumique absolue du fil ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Ch	Fibre de chanvre	Libye	50-250	65	1907	1150

### 2.3 Structure des fils multi-filamentaires

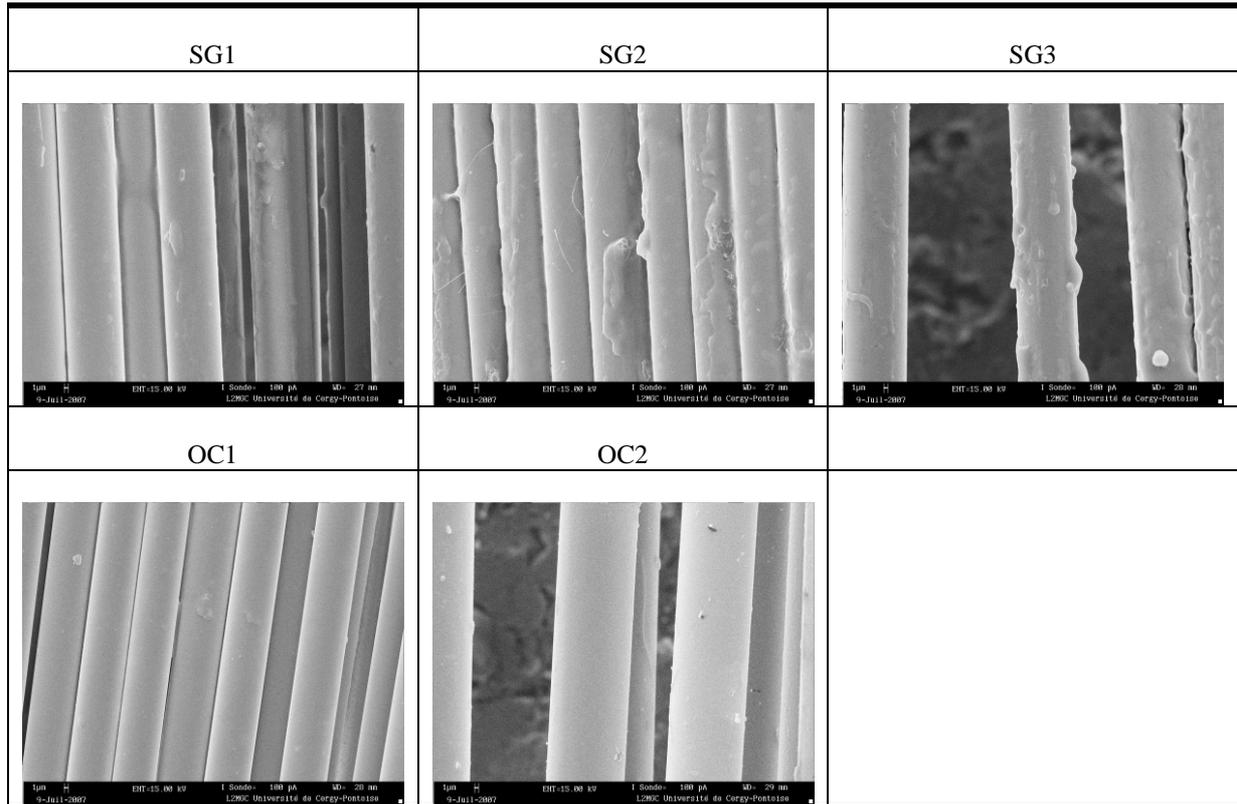
En général, les fils multi-filamentaires présentent trois niveaux de structuration : une microstructure à l'échelle du filament, une mésostructure à l'échelle de la mèche et une macrostructure à l'échelle du fil. Cette structuration résulte du procédé de fabrication qui se compose également de trois étapes. Nous rappelons toutefois que le fil de verre OC2 et le fil de chanvre ne présentent pas de mésostructure car les filaments sont directement assemblés en fil sans structuration intermédiaire (mèches).

#### 2.3.1 Les filaments

On désigne par filament une fibre fine, continue, de longueur indéfinie à l'image de la fibre naturelle de soie. Les filaments de verre sont obtenus par extrusion du verre fondu à  $1500^\circ\text{C}$  à travers d'une filière, à grande vitesse (entre 25 et 150 m/s). Leur forme est cylindrique et leur diamètre constant de l'ordre de 10 à 30  $\mu\text{m}$  en général.

Les fils choisis ont des filaments d'un diamètre très proche : 12, 14 et 17  $\mu\text{m}$  (**tableau 2.1**). La **figure 2.1** présente des prises de vues caractéristiques de l'état de surface des filaments dans le fil obtenues par microscopie électronique à balayage. Nous constatons que le diamètre des filaments est effectivement très régulier. Les filaments du fil OC1 ont le diamètre le plus faible (12  $\mu\text{m}$ ), ceux de OC2 le diamètre le plus important (17  $\mu\text{m}$ ) alors que les filaments des trois fils SG ont le même diamètre intermédiaire (14  $\mu\text{m}$ ). La surface cylindrique des filaments est parfaitement lisse. Les quelques aspérités que l'on observe, surtout dans le cas des fils SG, sont dues à la présence d'ensimage sur les filaments dont le rôle est analysé par la suite.

A cause de leur grande finesse, les filaments présentent une très grande flexibilité qui permet au fil d'épouser des formes complexes sans rupture.



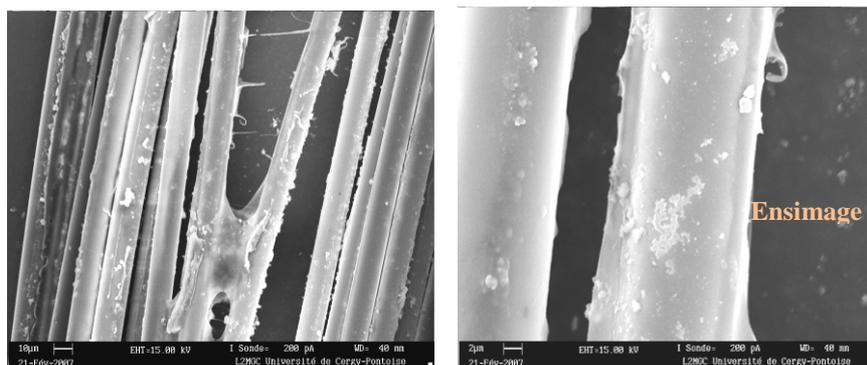
**Figure 2.1.** Les filaments à l'échelle microstructurale du fil (MEB, x500).

### 2.3.2 Les mèches

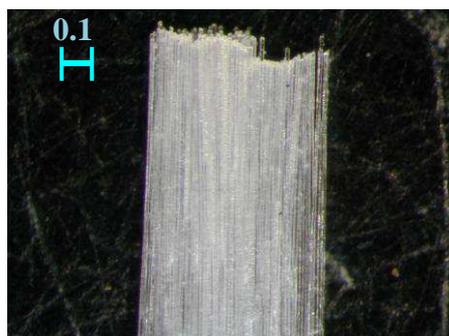
A l'issue de la filière et après leur refroidissement, les filaments sont systématiquement traités par un ensimage. Le rôle de cet ensimage est double :

- En premier lieu, l'ensimage enrobe les filaments et crée des pontages permettant de réduire très significativement les frictions interfilamentaires au cours des différentes étapes de fabrication du fil multi-filamentaire et son enroulement en bobine. Il empêche ainsi la fragilisation des filaments par abrasion. Les pontages locaux créés par l'ensimage entre les filaments (**figure 2.2**) conduisent à l'assemblage d'un groupe de filaments dans une structure intermédiaire qu'on appelle mèche (**figure 2.3**). Par sa relative cohésion, la mèche facilite la manipulation comparativement au groupe des filaments qui la composent lors des opérations de filetage et de bobinage ; elle offre aussi une meilleure tenue mécanique du fil dans son ensemble. Il faut toutefois souligner que le nombre des pontages entre les fils dans la mèche reste globalement limité afin d'éviter une rigidification de la structure de la mèche et consécutivement la perte de la flexibilité du fil. Pour les mêmes raisons le nombre de filaments par mèche reste limité (entre 100 et 300 en général)

- En deuxième lieu, l'ensimage est destiné à améliorer l'imprégnation et l'adhérence du liant lors de la fabrication de composites et consécutivement à améliorer leurs performances. Dans le cas des fils SG, destinés aux composites à base de matériaux cimentaires, l'ensimage constitue, en plus, un revêtement de protection contre l'attaque du verre par les alcalins de la matrice cimentaire.



**Figure 2.2.** Pontage local des filaments par l'ensimage au niveau de la mèche (à gauche). Détail du recouvrement des filaments par l'ensimage (à droite) (MEB x300 et x1000 respectivement).



**Figure 2.3.** Assemblage d'une centaine de filaments en mèche à l'échelle mésostructurale du fil SG1 (microscopie optique x40).

L'ensimage est constitué d'une émulsion aqueuse de polymères organiques et éventuellement de lubrifiants. Compte tenu de l'importance de son rôle dans la fabrication du fil multifilamentaire et dans l'imprégnation par les liants dans les composites, la composition exacte de l'ensimage est maintenue secrète par les fabricants. Ainsi, nous n'avons pas pu savoir s'il y a des similitudes entre l'ensimage du fil OC1 et ceux des trois fils SG, ni à quoi consistent les différences entre l'ensimage des fil SG1 et SG2 d'une part, et SG3 d'autre part (**Tableau 2.1**). Dans tous les cas, le traitement à l'ensimage se fait par immersion du bloc de filaments qui vont constituer la mèche dans le mélange. L'imprégnation a lieu en continu sans torsion de manière que les filaments restent parallèles dans la mèche. Une fois l'ensimage solidifié, la mèche présente une forme relativement aplatie.

Le nombre de filaments par mèche diffère d'un fil à l'autre (**Tableau 2.1**). Il est environ 270 pour le fil OC1, environ 100 pour le fil SG1 et environ 200 pour les fils SG2 et SG3. La quantité d'ensimage qui enrobe les filaments est de l'ordre de 0,5 à 5 % de leur poids. Le fil OC2, ne présente pas une structuration intermédiaire en mèche ; il a été néanmoins traité par un ensimage spécifique qui ne crée pas de pontages entre les filaments et n'augmente pas la rugosité de surface (**Figure 2.1**) afin que les filaments restent séparés tout en restant protégés de l'abrasion.

### 2.3.3 Le fil multi-filamentaire

Le fil multi-filamentaire est constitué de plusieurs mèches. Le nombre de mèches dans le fil (Tableau 2.1) est approximatif car l'ensimage permet, souvent, l'assemblage de deux ou plusieurs mèches sur une longueur de plusieurs mètres. L'assemblage du fil se fait sans torsion ce qui permet aux mèches de se maintenir plus ou moins parallèles lors du bobinage (Figure 2.4 et 2.5). Toutefois, les opérations d'assemblage et de bobinage conduisent à une légère ondulation des mèches d'ordre centimétrique donnant ainsi une variabilité dans la géométrie du fil dans le sens de la longueur (Figure 2.6). Par ailleurs, il faut souligner que la forme aplatie des mèches induit aussi une variabilité complémentaire lorsque, pendant les opérations de filage et de bobinage, celles-ci présentent une rotation autour de leur axe dans le fil.

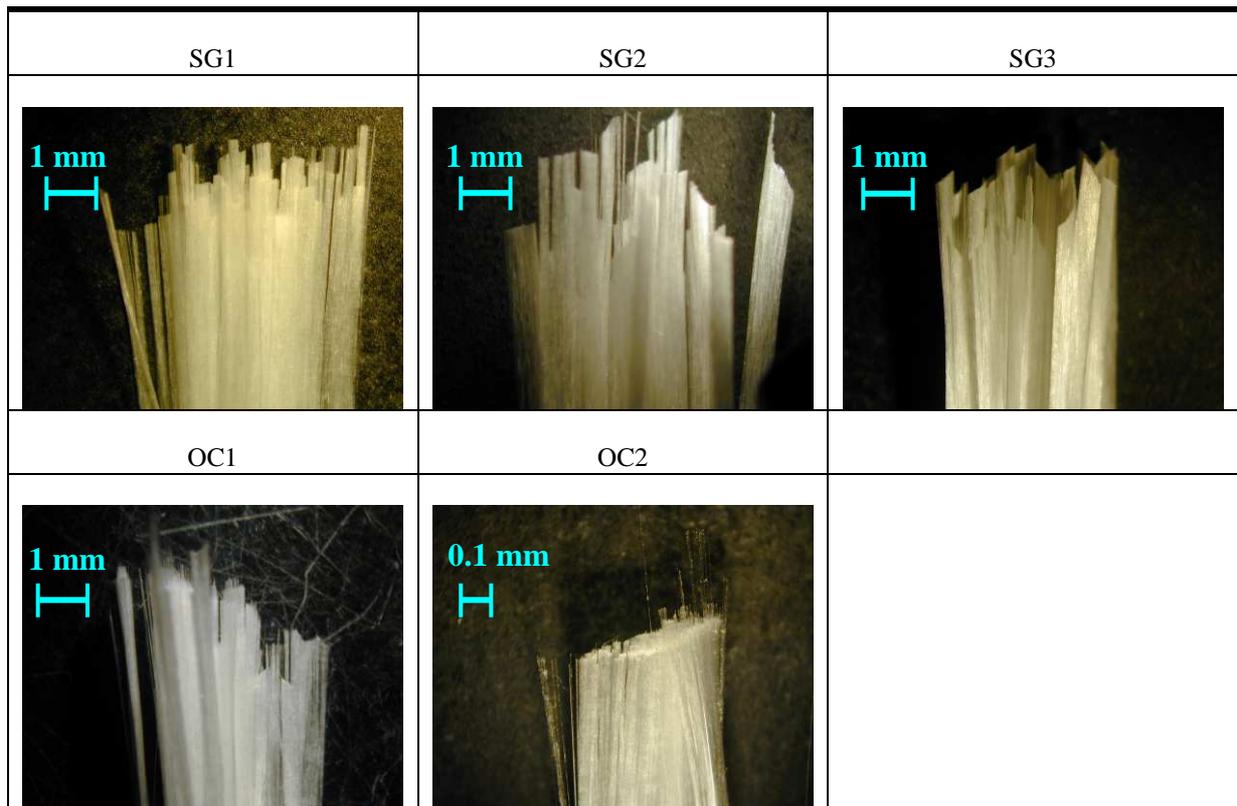
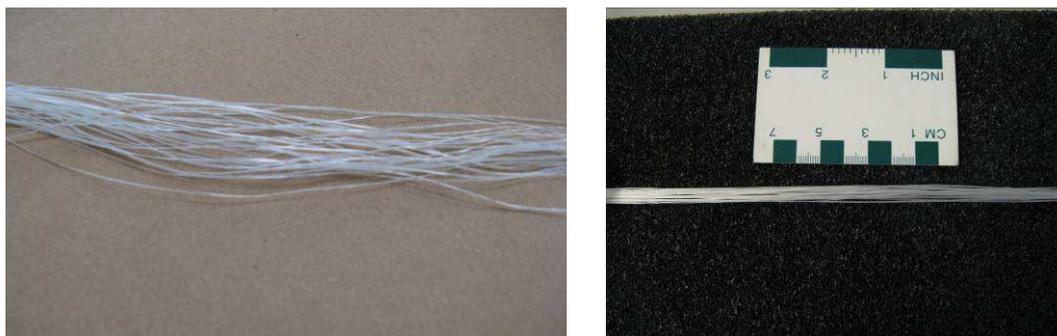


Figure 2.4. Macrostructure des fils multi-filamentaires constitués par plusieurs mèches à l'exception du fil OC2



Figure 2.5. Bobine de fil SG2.



**Figure 2.6.** Forte ondulation des mèches du fil OC1 (à gauche) et faible ondulation des mèches du fil SG2 (à droite).

En fonction du nombre de mèches constituant le fil et l'épaisseur de la mèche, le diamètre apparent du fil est plus ou moins important. Mais, compte tenu de l'ondulation et de la torsion des mèches, ce diamètre apparent varie significativement sur la longueur. Ainsi, l'industrie du textile détermine la grosseur d'un fil par sa masse linéique exprimée en « tex » équivalent à la masse en grammes du fil par kilomètre. Cette caractéristique du fil est néanmoins indicative et peut sensiblement varier d'un lot de production à l'autre. Ainsi nous pouvons considérer que les fils de l'étude ont une masse linéique comparable de l'ordre de 2300-2600 tex.

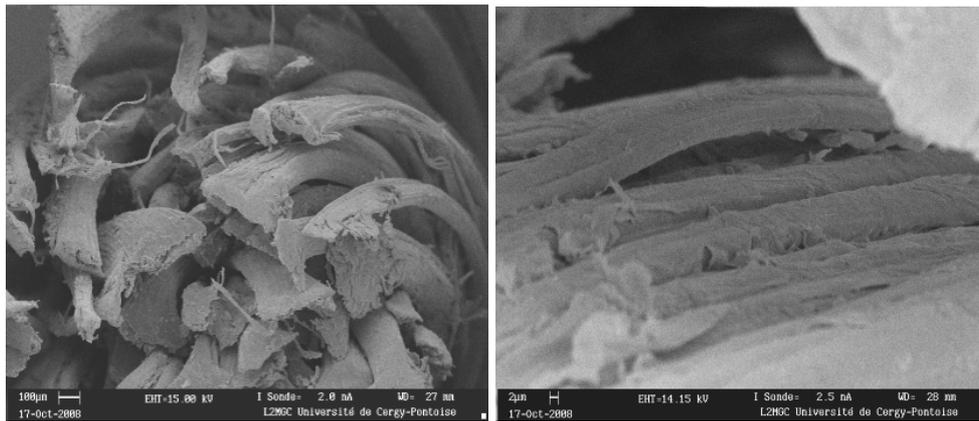
#### 2.3.4 Le fil de chanvre

La fibre naturelle de chanvre est une fibre connue et exploitée depuis le néolithique pour fabriquer des fils et des textiles. Elle est plus fine que la fibre de lin ou de palmier et présente une résistance à la traction et une durabilité supérieure à la plupart des fibres naturelles. Le fil à base de fibre de chanvre est obtenu par filage et torsion des fibres de longueur limitée (**Figure 2.7**)



**Figure 2.7.** Fils de fibre de chanvre.

Il est important de noter que la structure de la fibre de chanvre est particulièrement complexe. D'une part, les dimensions des fibres constitutives ne sont pas régulières, leur longueur est variable de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres et leur diamètre entre 50 et 250  $\mu\text{m}$ . D'autre part, la texture de la fibre résulte d'un assemblage de cellules cellulosiques de diamètre entre 5 et 10  $\mu\text{m}$  plus ou moins irrégulières et plus ou moins arrachées de la fibre au cours de l'extraction et du filage (**Figure 2.8**).

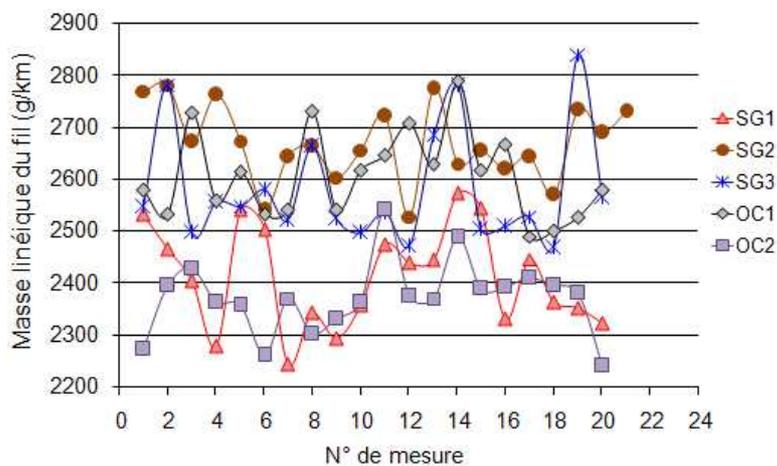


**Figure 2.8.** Microstructure du fil de chanvre. A gauche, assemblage de fibres dans le fil au niveau d'une section (MEB x30). A droite, détail de texture d'une fibre de chanvre (MEB x500).

## 2.4 Propriétés physiques des fils multi-filamentaires

### 2.4.1 Evaluation de la variabilité des caractéristiques du fil

En considérant que les fils multi-filamentaires présentent plusieurs paramètres géométriques et structuraux plus ou moins variables (tels que le nombre de filaments par mèche, le nombre de mèches par fil, la quantité d'ensimage, la plus ou moins grande ondulation des mèches) conduisant à une importante variabilité des caractéristiques du fil nous avons jugé utile de caractériser cette variabilité. Ainsi, nous avons procédé à des mesures de la masse linéique sur des segments de la même longueur. Vingt mesures ont été réalisées sur des segments de 5 cm et de 100 cm soigneusement coupés à différents endroits de la même bobine.



**Figure 2.9.** Mesures de la masse de segments de fil de 5 cm de longueur.

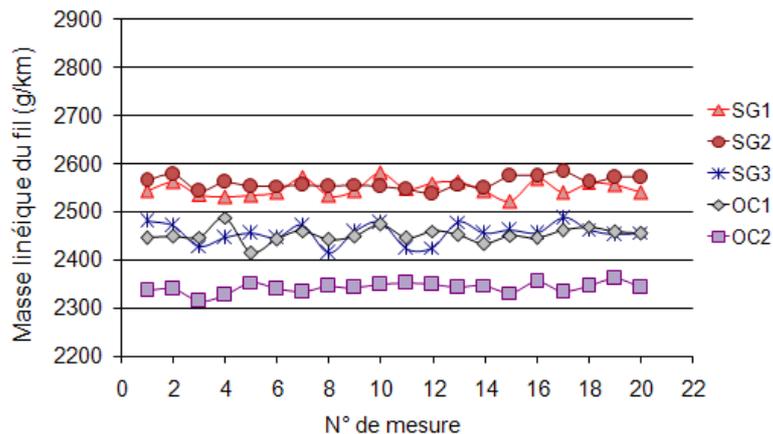


Figure 2.10. Mesures de la masse de segments de fil de 100 cm de longueur.

Les figures 2.9 et 2.10 montrent que la variabilité de la masse linéique des échantillons de même longueur est significative. Comme attendu, la variabilité est plus forte pour les échantillons de 5 cm que pour ceux de 100 cm. En effet, le coefficient de variation des mesures (Figure 2.11) est entre 10 et 2 % pour les premiers et inférieur à 2 % pour les seconds. Le fil SG3 présente la plus forte variabilité et le fil SG2 la plus faible.

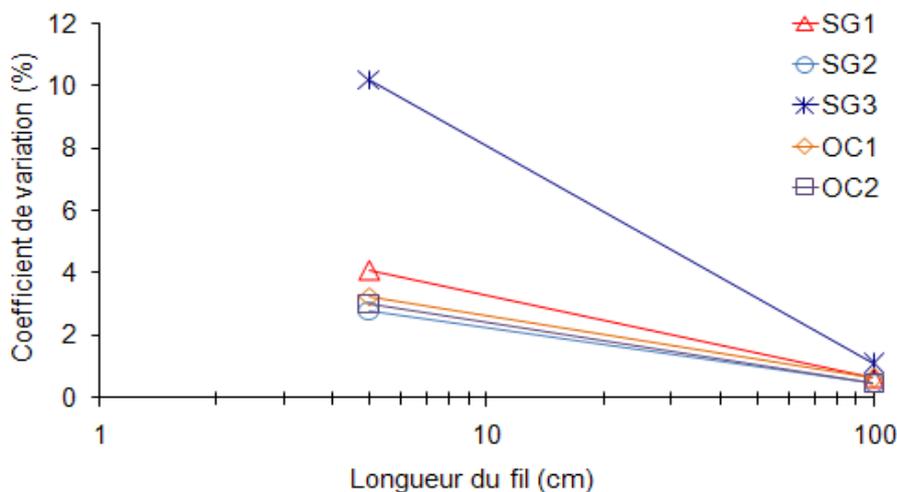
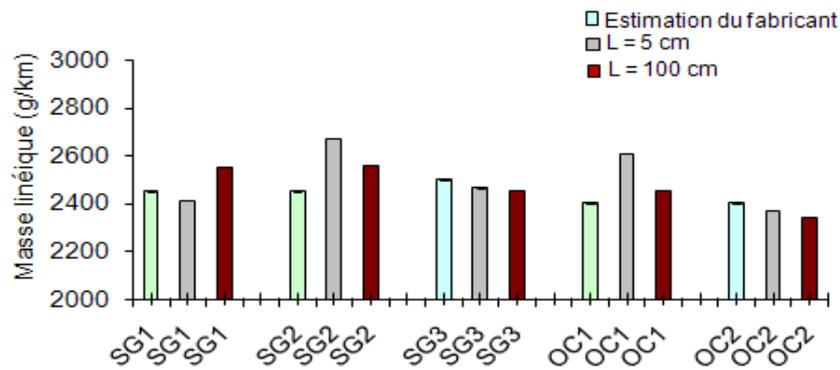


Figure 2.11. Coefficient de variation de la masse linéique des fils en fonction de la longueur.

Bien que globalement les valeurs de la masse linéique soient du même ordre de grandeur pour les deux longueurs mesurées, nous observons certains écarts importants (Figure 2.12). Par exemple, le fil SG1 présente à 5 cm une masse linéique plutôt faible comparativement aux autres fils et à 100 cm une masse plutôt forte. Des écarts de la même nature mais plus faibles peuvent aussi être observés pour le fil SG3. Ce phénomène est, en premier lieu, inhérent à l'ondulation des mèches qui est beaucoup moins perceptible à 5 cm qu'à 100 cm. Le rapprochement des valeurs de masse linéique du fil OC2 (sans mèches) à 5 et 100 cm renforce cet argument. En deuxième lieu, la quantité d'ensimage du fil peut significativement varier le long du fil selon la capacité de mouillage du produit employé, la température, la vitesse du processus et les conditions d'égouttage du fil après traitement.



**Figure 2.12.** Masse linéique donnée par le fabricant et mesurée sur des segments de fil.

Compte tenu que la masse linéique des fils peut varier selon la longueur du segment mesuré et du procédé de mesure, nous avons décidé de prendre comme valeur de référence par la suite, la valeur moyenne mesurée sur 20 segments de 100 cm, car, d'une part, elle présente une faible variabilité et, d'autre part, elle est représentative de la bobine de fil utilisée pour tous nos essais. Avec cette valeur de référence et la masse volumique absolue du fil donnée par le fabricant, nous pouvons estimer la section  $A_F$  de chaque fil (en  $\text{mm}^2$ ) suivant la formule :

$$A_F = \frac{\text{Masse linéique}}{\text{Masse volumique absolue}} \left[ \frac{\text{g/km}}{\text{g/cm}^3} \right] \cdot 10^{-3} \quad (2.1)$$

**Tableau 2.3.** Section estimée des fils.

Fil	Section du fil ( $\text{mm}^2$ )
SG1	0,951
SG2	0,955
SG3	0,914
OC1	0,969
OC2	0,926

Nous constatons que les sections estimées des cinq fils (**Tableau 2.3**) sont du même ordre de grandeur si nous tenons compte de la variabilité de la masse linéique. Il faut souligner toutefois que la section estimée est une section composée de la section des filaments en verre et de celle de l'ensimage qui les entoure.

En conclusion, nous pouvons dire que les caractéristiques géométriques et structurales des fils multi-filamentaires présentent une plus ou moins grande variabilité due à la complexité de leur structure et au mode de fabrication. Cette variabilité dépend de la longueur de fil considérée. Elle doit impérativement être prise en compte dans toute interprétation des résultats de ce travail.

#### 2.4.2 Etude de l'imprégnation des fils par l'eau

L'objectif de cette partie est de caractériser la capacité des différents fils multi-filamentaires à retenir l'eau dans leur structure afin d'appréhender l'absorption d'eau par les fils lors de leur enrobage par le mortier pendant la confection des éprouvettes. Cette caractérisation a été menée de trois façons différentes.

1<sup>er</sup> mode opératoire

Dans un premier temps nous avons testé des segments de 10 cm de fil sec préalablement pesés que nous avons immergés dans l'eau en les tenant horizontalement par leurs extrémités jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de dégagement de bulles d'air. La masse mouillée du fil a été déterminée par pesée tout de suite après l'immersion (sans égouttage). Avec ce mode opératoire, la variabilité de géométrie du fil et, plus particulièrement, celle induite par l'ondulation et la torsion des mèches est maintenue jusqu'à la pesée finale. Cinq essais ont été réalisés pour chaque fil. Les valeurs moyennes des masses sèches et mouillées ainsi que la teneur en eau et de son coefficient de variation figurent dans le **Tableau 2.4**.

**Tableau 2.4.** Imprégnation par l'eau de segments de fil de 10 cm (cinq mesures).

Fil	$M_{\text{sèche}}$	$M_{\text{mouillée}}$	$M_{\text{eau}}$	Teneur en eau	Coefficient de variation
	g	g	g	%	%
SG1	0,260	0,541	0,281	108	20,5
SG2	0,260	0,503	0,243	94	34,2
SG3	0,248	0,496	0,249	101	19,8
OC1	0,244	0,667	0,423	175	20,2
OC2	0,234	0,577	0,342	146	24,3
Ch	0,203	0,790	0,587	291	12,9

Nous constatons que la capacité de rétention d'eau des fils multi-filamentaires est très importante dans ces conditions. Si nous tenons compte du coefficient de variation des mesures nous pouvons considérer que la teneur en eau des trois fils SG est similaire (de l'ordre de 100 %) alors que celle des fils OC est plus importante et celle du fil de chanvre encore plus importante. Nous constatons aussi que les deux fils OC ont probablement une teneur en eau différente (175 % en moyenne pour OC1 et 146 % pour OC2) comme si la présence de mèches (fil OC1) favorisait la rétention d'eau comparativement à un assemblage direct de filaments sans mèches (fil OC2) surtout si nous tenons compte du fait que les mèches du fil OC1 présentent en plus une forte ondulation comparativement aux fils SG (**Figure 2.5**).

Nous avons observé par ailleurs, qu'une partie de l'eau retenue par le fil s'égouttait sur le plateau de la balance dès lors que nous ne tenions plus le fil par ses extrémités indiquant que la rétention d'eau pouvait varier suite aux manipulations et aux modifications induites de l'alignement des mèches dans le fil. Afin d'évaluer cette variabilité de la rétention d'eau nous avons procédé à la caractérisation de l'imprégnation des fils par un mode opératoire différent.

2<sup>ème</sup> mode opératoire

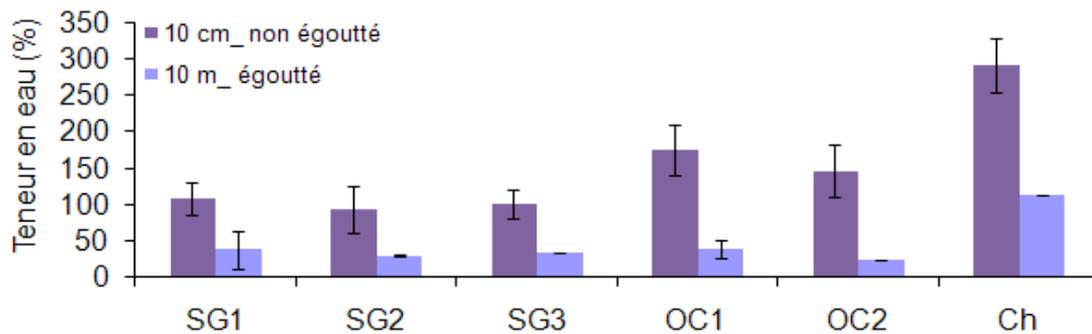
Pour le deuxième mode opératoire, nous avons testé un segment de 10 m de fil sec, préalablement pesé, que nous avons immergé dans l'eau et égoutté ensuite en serrant le fil entre les doigts sur toute sa longueur avant de le peser à nouveau. Avec ce mode opératoire, sous la pression des doigts et grâce aux forces capillaires, les mèches se placent parallèlement les unes aux autres dans une configuration serrée. L'ondulation globale du fil est alors réduite significativement. L'eau est essentiellement retenue par capillarité dans les interstices entre filaments et entre mèches. L'objectif de cet essai est d'estimer la capacité de rétention minimale des fils après égouttage. Un ou deux essais par fil ont été réalisés dont les résultats

figurent dans le **Tableau 2.5**. Une comparaison entre la teneur en eau moyenne du fil entre ce mode opératoire et le précédent est donnée sur la **figure 2.13**.

**Tableau 2.5.** Imprégnation par l'eau de segments de fil de 10 m (deux mesures).

Fil	$M_{\text{sèche}}$	$M_{\text{mouillée}}$	$M_{\text{eau}}$	Teneur en eau	Coefficient de variation
	g	g	g	(%)	%
SG1	26,89	37,21	10,32	38,4	66,6
SG2	25,65	33,47	7,82	30,5	3,5
SG3	24,60	32,95	8,35	34,0	*
OC1	24,69	34,50	9,81	39,7	32,2
OC2	23,07	28,72	5,65	24,5	2,7
Ch	26,20	55,84	29,64	113,1	*

(\*) une seule mesure



**Figure 2.13.** Teneur en eau du fil suivant le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> mode opératoire.

Nous constatons sur la **figure 2.13** que la teneur en eau des fils, déterminée par le deuxième mode opératoire (10 m égoutté), est significativement plus faible que celle déterminée par le premier (10 cm non égoutté) et ceci malgré la très forte dispersion des valeurs (voir coefficient de variation dans les **tableaux 2.4** et **2.5**). En effet, tous les fils en verre égouttés présentent une teneur en eau moyenne entre 25 et 40 %, entre trois et six fois plus faible que celle mesurée sur les fils non égouttés. La teneur en eau du fil de chanvre, présentant une beaucoup plus forte variabilité des caractéristiques structurales que les fils de verre, est réduite également de plus de 60 %.

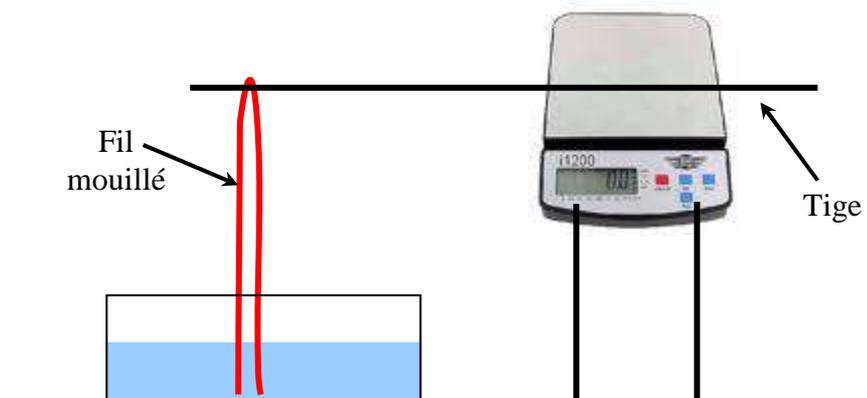
Nous constatons également que la réduction de la teneur en eau est plus importante pour les fils OC que pour les fils SG. En ce qui concerne le fil OC1, nous attribuons cette très forte réduction de la teneur en eau à la réduction aussi très significative de l'ondulation des mèches par l'égouttage compte tenu que ce fil présente la plus forte ondulation (**Figure 2.5**). En ce qui concerne le fil OC2, nous pensons qu'en raison de l'absence de mèches dans la structure de ce fil, les espaces entre les filaments remplis d'eau sont beaucoup plus petits (que ceux entre les mèches) conduisant à des forces capillaires plus fortes et une capacité de serrage du fil égoutté plus importante. Le fait que la teneur en eau moyenne du fil OC2 égoutté est plus faible que celle des tous les autres fils dans les mêmes conditions, renforce cette hypothèse.

Bien que ces deux modes opératoires permettent de mettre en exergue le comportement particulier des fils multi-filamentaires face à leur imprégnation par l'eau caractérisée par des

très forts écarts de la quantité d'eau retenue par les fils selon les conditions expérimentales, les valeurs mesurées souffrent cependant d'un défaut de fiabilité en raison, en premier lieu, de la différence de longueur de fil testé dans chaque cas (10 cm et 10 m) et, en second lieu, du caractère manuel des opérations d'imprégnation du fil lors du premier mode opératoire et d'égouttage lors du deuxième mode opératoire qui peuvent selon l'effort appliqué sur le fil et la vitesse des opérations influencer aussi bien la quantité d'eau d'imprégnation du fil que la quantité d'eau éliminée par l'égouttage. Les forts coefficients de variation des mesures en témoignent. Pour palier à ce problème, nous avons jugé utile de croiser les résultats précédents avec ceux issus d'un troisième mode opératoire qui s'affranchit de ces deux problèmes.

### 3<sup>ème</sup> mode opératoire

Un segment de fil sec de 1,3 m de longueur préalablement pesé a été immergé dans l'eau pendant 5 secondes. Ensuite, il a été pris avec une pince à son milieu et accroché sur une tige posée sur le plateau d'une balance de précision tout en conservant les extrémités du fil au contact de la surface de l'eau (**figure 2.14**). L'évolution de la masse du fil mouillé a été suivie pendant 15 minutes et la teneur en eau du fil a été calculée en fonction du temps (**figure 2.15**). Pour chaque fil deux essais ont été effectués. Les valeurs moyennes des masses sèches et mouillées au début et à la fin de l'essai sont présentées dans le **tableau 2.6**.



**Figure 2.14.** Principe de mesure selon le 3<sup>ème</sup> mode opératoire.

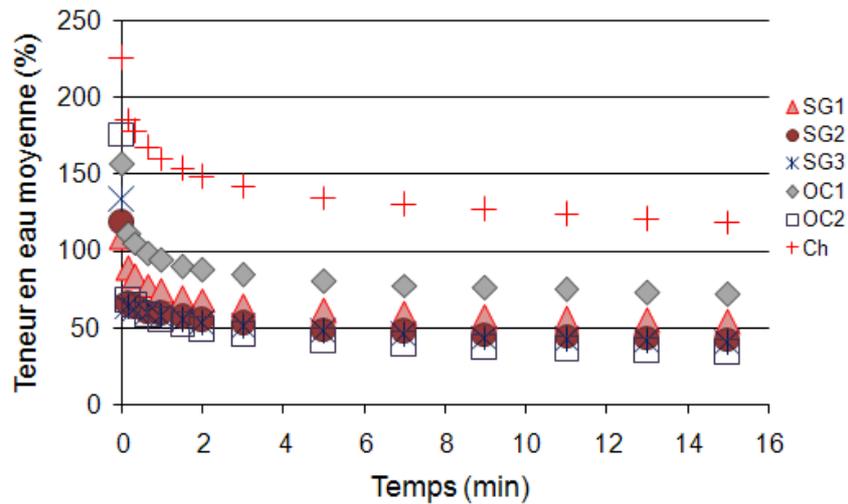
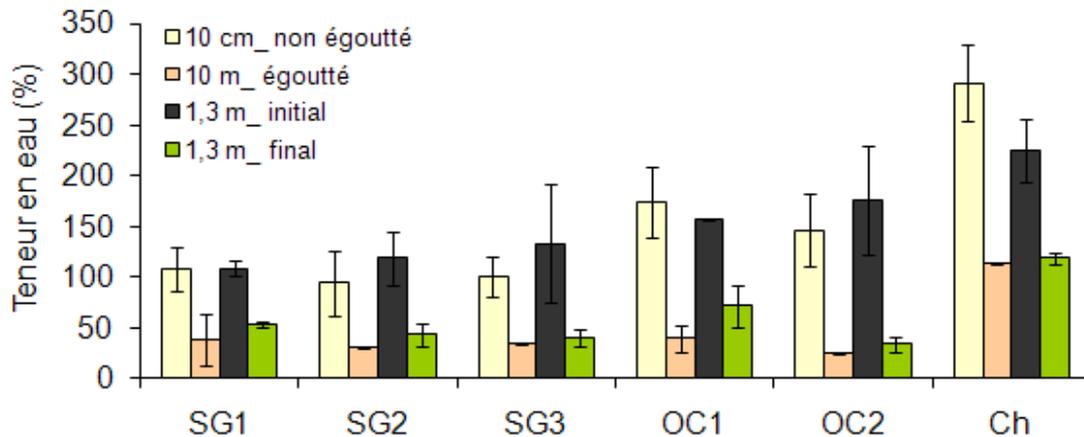


Figure 2.15. Variation de la teneur en eau des fils en fonction de temps.

Tableau 2.6. Imprégnation par l'eau de segments de fil de 1,3 m (deux mesures).

Fil	$M_{\text{sèche}}$	$M_{\text{mouillée}}$ initiale	$M_{\text{mouillée}}$ finale	Teneur en eau initiale	Coefficient de variation	Teneur en eau finale	Coefficient de variation
	g	g	g	%	%	%	%
SG1	3,36	7,02	5,17	108,8	6,5	53,7	4,3
SG2	3,31	7,24	4,73	118,5	23,0	43,1	25,8
SG3	3,06	7,12	4,30	133,3	43,5	40,5	20,5
OC1	3,16	8,10	5,43	156,7	0,3	72,0	28,3
OC2	3,05	8,42	4,09	176,1	30,0	33,9	19,8
Ch	2,19	7,14	4,79	225,23	13,8	118,9	4,6

Nous constatons que l'évolution de la teneur en eau du fil en fonction du temps (**figure 2.15**) est relativement rapide dans tous les cas. La plus grande partie d'eau retenue initialement est éliminée au cours des 2 ou 3 premières minutes d'égouttage sur la tige. Ensuite, la diminution de la teneur en eau progresse de plus en plus lentement. Au-delà de 15 minutes nous pouvons considérer que cette évolution est plutôt dominée par l'évaporation de l'eau interstitielle que par l'égouttage. Dans ces conditions, il nous a paru tout à fait légitime de rapprocher la teneur en eau initiale du fil à celle mesurée par le premier mode opératoire et la teneur en eau finale du fil avec celle mesurée par le deuxième mode opératoire. La **figure 2.16** permet ce rapprochement.



**Figure 2.16.** Teneur en eau des fils déterminée par les différents modes opératoires.

Il apparaît clairement (**figure 2.16**) que compte tenu de la variabilité des mesures, les valeurs de la teneur en eau obtenues par le premier mode opératoire sont très proches des valeurs initiales obtenues par le troisième mode opératoire et que celles obtenues par le deuxième mode opératoire sont tout à fait comparables des valeurs finales obtenues par le troisième mode opératoire. Ce constat permet de considérer comme cohérent et valide l'ensemble des essais effectués et de conclure qu'indépendamment de la longueur du fil et du détail des opérations du mode opératoire la teneur en eau des fils non égouttés peut facilement atteindre et dépasser 100 % et rester inférieure à 50 % après égouttage. Pour le fil de chanvre les valeurs réciproques sont 220 % et 120 %. Par ailleurs, les fils OC en raison des particularités de leur structure (importante ondulation des mèches du fil OC1 et absence de mèches du fil OC2) sont capables de retenir sans égouttage une plus grande quantité d'eau que les fils SG (teneur en eau de supérieure à 150 % au lieu de 100 % respectivement)

## 2.5 Propriétés mécaniques des fils multi-filamentaires

La caractérisation des propriétés mécaniques des fils multi-filamentaires est basée essentiellement sur l'analyse de la courbe effort déformation d'un essai de traction permettant la détermination de la résistance en traction du fil, de sa déformabilité, et de son mode de rupture. En raison de la complexité et de la variabilité structurale du fil sur plusieurs échelles l'essai de traction est mené à vitesse de déformation imposée. Pour les mêmes raisons, la mise au point de l'essai demande une attention particulière afin de maîtriser les paramètres expérimentaux (surtout en ce qui concerne la préparation des éprouvettes) qui peuvent influencer les résultats.

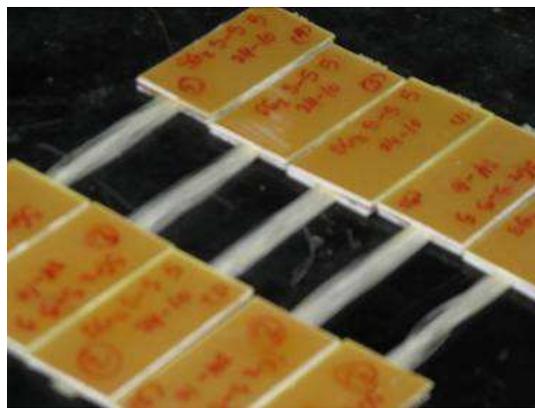
La norme ISO 3341 de 2000, concernant la détermination de la résistance en traction et de l'allongement à la rupture en traction des fils en verre, fait part de ces difficultés. Elle met en garde vis-à-vis de l'abrasion de filament à filament pendant l'essai et de l'insuffisante uniformité de tension qui peuvent augmenter la variabilité de l'essai et générer des résultats faibles. Elle souligne aussi que, compte tenu de l'impossibilité de mesure extensométrique directe sur le fil (ce qui aurait comme conséquence l'endommagement des filaments), l'allongement à la rupture déterminé par l'essai normalisé n'est pas suffisamment précis. Elle définit toutefois les grandes lignes concernant la préparation des éprouvettes, la conduite de l'essai et l'interprétation des résultats.

Dans le cadre de nos essais, nous avons souhaité élargir le champ d'investigation à plusieurs paramètres influant directement le comportement mécanique des fils multi-filamentaires, tels que la longueur libre du fil, l'effet de l'eau et la vitesse de chargement. Nous sommes donc amenés à sortir souvent du cadre de la norme ISO 3341 bien que tous nos essais aient suivi les grandes lignes définies par cette norme.

### 2.5.1 Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes a suivi le mode opératoire suivant :

- Chaque extrémité du segment de fil à tester a été collée entre deux plaquettes en résine époxy (habituellement utilisées pour l'impression des circuits électroniques) de 25 mm de largeur et de 56 mm de longueur préalablement rainurées à leur milieu afin d'y loger le fil sans l'écraser et avec leurs surfaces rendues rugueuses avec du papier abrasif pour mieux faire adhérer la colle.
- Le collage du fil entre les plaquettes a été réalisé avec une résine époxy durcissant en 6 heures dans les conditions de laboratoire. Le collage de la deuxième extrémité du fil a été opéré avec un jour de décalage par rapport à la première de façon que la résine soit durcie d'un côté avant de coller l'autre côté permettant ainsi un meilleur alignement de la longueur libre du fil entre les plaquettes (**figure 2.17**). Après collage, les plaquettes de chaque extrémité ont été maintenues serrées avec un serre-joint pendant 3 jours jusqu'à ce que la résine atteigne sa résistance nominale.



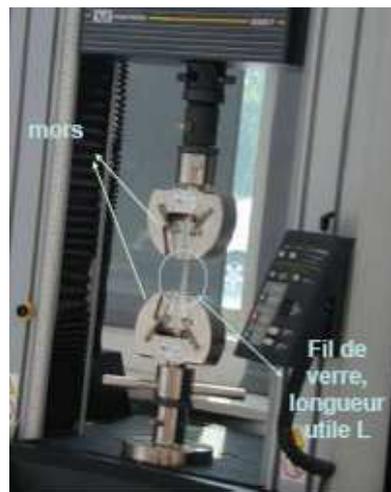
**Figure 2.17.** Eprouvettes de fil multi-filamentaire SG1 de longueur libre de 50 mm pour l'essai de traction.

Il faut souligner que la norme ISO 3341 ne donne aucune instruction précise concernant la préparation des éprouvettes. Pourtant, beaucoup de dextérité et d'attention sont nécessaires afin d'éviter les défauts d'alignement des mèches qui lors de l'essai conduisent à une mise en charge inhomogène des différentes parties du fil et à sa rupture précoce ainsi que l'endommagement des filaments lors du collage et du serrage des plaquettes conduisant à une rupture du fil localisée à leur voisinage ou dans la zone de collage. Pour cette raison, nous nous sommes amenés à réaliser plusieurs campagnes préliminaires de préparation d'éprouvettes et d'essais avant d'arriver à la maîtrise satisfaisante des détails de fabrication et à une relativement faible dispersion des valeurs mesurées. De plus, nous avons éliminé de

notre analyse toute éprouvette dont la rupture était localisée dans ou au voisinage de la zone de collage des plaquettes.

### 2.5.2 Mode opératoire des essais

Tous les essais ont été réalisés sur une machine électromécanique de traction-compression, de marque INSTRON, de classe A, de capacité maximale de 30 kN, pilotée en effort et en déformation et disposant d'un système spécifique de deux mors à pinces plates où les plaquettes collées aux extrémités des éprouvettes s'adaptent parfaitement assurant ainsi un parfait alignement et une fixation solide (a priori sans glissement) des éprouvettes tout le long de l'essai (**figure 2.18**).



**Figure 2.18.** Machine de traction en cours d'essai.

Un pré-chargement de 5 mN/tex suivant les consignes de la norme ISO 3341 a été appliqué sur les éprouvettes avant l'enregistrement de l'essai de traction afin d'aligner les fils (ce qui correspond à un effort de 12 à 13 N selon les cas).

Tous les essais ont été réalisés sous vitesse d'allongement contrôlée comme le suggère la norme. L'essai était arrêté lorsque l'effort de traction devenait inférieur à 0,2 % de l'effort de traction maximal enregistré pendant l'essai. Les résultats ont été exprimés en effort de traction (en N) en fonction de la déformation (en mm/mm) déterminée par le rapport de l'allongement de l'éprouvette au cours de l'essai à la longueur libre initiale du fil. Nous rappelons que dans le cas des fils multi-filamentaires il n'est pas possible de mesurer directement l'allongement du fil par extensométrie, l'allongement est, alors, déduit de l'écartement des mors de la machine de traction. Bien évidemment, cette détermination de la déformation induit une plus grande variabilité des résultats car elle englobe les éventuelles déformations ou glissements des plaquettes dans les mors de la machine.

Pour chaque configuration expérimentale 5 éprouvettes identiques ont été testées, ainsi, le nombre total d'éprouvettes caractérisées mécaniquement est de 280.

### 2.5.3 Configurations expérimentales étudiées

Une fois la fabrication des éprouvettes maîtrisée, plusieurs configurations expérimentales ont été envisagées afin de déterminer l'influence de différents paramètres sur les caractéristiques mécanique des fils :

#### Influence de la longueur libre du fil entre les plaquettes

Des longueurs libres (désignées par la suite LL) de 25 mm, 50 mm et 100 mm ont été testées pour tous les fils et 300 mm pour trois d'entre eux

#### Influence de la vitesse de déformation

Des vitesses de déformation du fil sous chargement (désignée V) de  $0,005 \text{ min}^{-1}$ ,  $0,01 \text{ min}^{-1}$ ,  $0,02 \text{ min}^{-1}$  et  $0,04 \text{ min}^{-1}$  ont été testées sur deux fils.

#### Influence de l'eau sur l'alignement et sur la tenue mécanique du fil

Les configurations expérimentales suivantes ont été testées :

Fil sec pendant la préparation des éprouvettes et sec pendant l'essai de traction, désigné par la suite S-S (tous les fils ont été testés dans cette configuration).

Fil mouillé pendant la préparation des éprouvettes afin d'assurer un meilleur alignement des mèches mais séché au niveau du collage des plaques afin d'assurer l'adhérence de la résine et entièrement séché avant l'essai, désigné M-S (quatre fils testés)

Fil sec pendant la préparation des éprouvettes et mouillé (sans égouttage) juste avant l'essai de traction, désigné S-M (quatre fils testés).

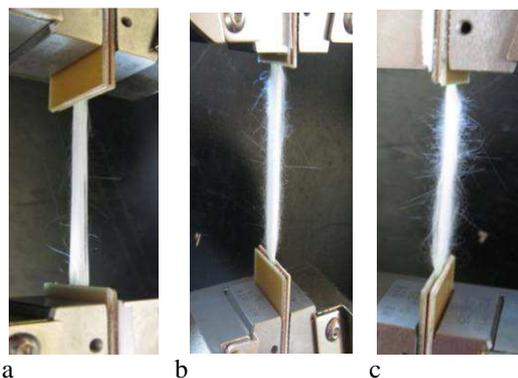
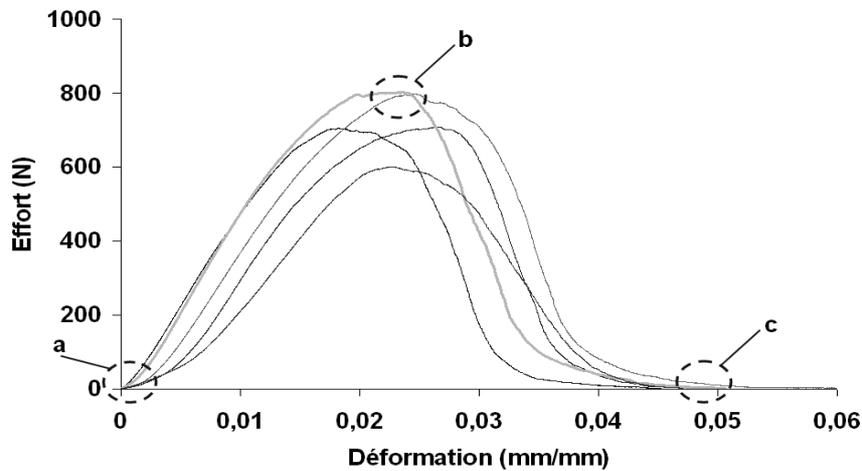
Fil sec pendant la préparation des éprouvettes et mouillé (sans égouttage) pendant une semaine avant l'essai de traction, désigné S-M1s (quatre fils testés).

Fil sec pendant la préparation des éprouvettes et mouillée pendant un mois avant l'essai de traction, désigné S-M1m (quatre fils testés). Les essais concernant l'influence de la longueur libre du fil ont été réalisés avec une vitesse de déformation de  $0,01 \text{ min}^{-1}$  sur fil sec pendant la préparation et sec pendant l'essai (S-S). Les essais sur l'influence de la vitesse de déformation ont été réalisés avec une longueur libre de 50 mm et sur fil sec pendant la préparation et sec pendant l'essai (S-S). Les essais sur l'influence de l'eau ont été réalisés avec une longueur libre de 50 mm et une vitesse de déformation de  $0,01 \text{ min}^{-1}$ .

### 2.5.4 Comportement mécanique en traction des fils multi-filamentaires

Pour commencer notre analyse du comportement mécanique des fils multi-filamentaires prenons l'exemple du fil SG2 dans une des différentes configurations expérimentales (LL = 50 mm, V =  $0,01 \text{ min}^{-1}$ , M-S). La **figure 2.19** montre les courbes effort - déformation obtenues sur les cinq éprouvettes ainsi que trois prises de vue correspondant aux trois points caractéristiques notés sur des courbes. Nous constatons que malgré une certaine variabilité non négligeable, les cinq essais désignent un comportement mécanique unique, caractérisé par une augmentation progressive de l'effort résistant sous action de l'allongement du fil jusqu'à une valeur maximale (point b), correspondant à la résistance en traction du fil,  $N_{\max}$ , suivi

d'une diminution de l'effort sous l'action de l'allongement jusqu'à une valeur quasi nulle (point c) correspondant à la rupture de tous les filaments et mèches. Aussi bien l'augmentation que la réduction de l'effort résistant n'est pas strictement proportionnelle à l'allongement imposé.



- a) Le fil aligné sous l'action de la pré-charge,
- b) Le fil atteint sa résistance maximale
- c) Rupture de tous les filaments

**Figure 2.19.** Essai de traction du fil SG2 (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>, M-S).

Pour les faibles valeurs d'allongement du fil, proches du point a de la courbe, l'effort suit une évolution hyperbolique qui atteint un point d'inflexion sur la courbe ascendante pour un effort compris entre 30 et 70% de l'effort maximal selon les cas. Ce comportement spécifique au début de l'essai s'explique par la mise en charge progressive d'un nombre croissant de mèches et de filaments qui, compte tenu des petits défauts d'alignement dans l'éprouvette, présentent des longueurs légèrement différentes (on parle d'activation retardée, Chudoba et al, [Chu06b]). Ce sont, en effet, les mèches les plus courtes qui sont chargées en premier. Nous considérons que l'adoucissement initial de la courbe est d'autant plus fort que les défauts d'alignement des mèches sont importants. Cet adoucissement reste toutefois limité dans la zone de 5 à 15 % de l'effort maximal. Nous considérons aussi que le point d'inflexion de la courbe correspond à la mise en charge de la totalité des mèches du fil sans qu'aucune rupture n'ait lieu.

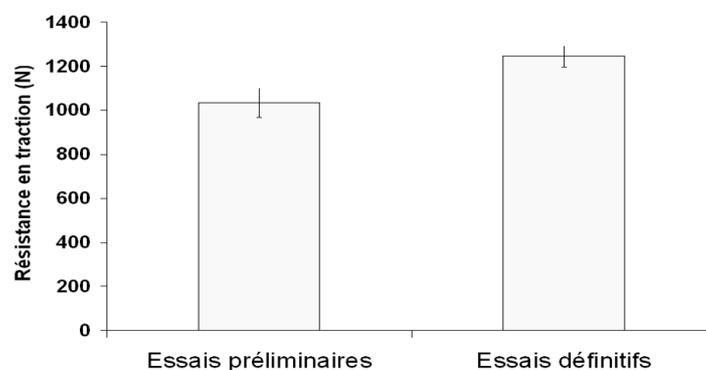
L'augmentation de l'effort résistant de la partie montante de la courbe est conditionnée par la résistance propre des filaments et des mèches et aussi par les interactions entre filaments dans la mèche et entre mèches dans le fil qui induisent sous l'action de l'effort de traction des forces de cisaillement et de frottement. Nous rappelons à ce propos que l'ensimage crée des

pontages entre les filaments dans la mèche et peut même assembler plusieurs mèches dans le fil. Ces pontages et assemblages sont sollicités en cisaillement lors des mouvements relatifs des filaments dans la mèche et des mèches dans le fil. Nous rappelons aussi qu'en raison de l'ondulation des mèches et de leur éventuelle rotation autour de leur axe longitudinal, la position relative des filaments et des mèches dans la section du fil varie sur la longueur de l'éprouvette conduisant à la multiplication des surfaces de frottement dans le fil au cours de mise en charge progressive des mèches et des filaments.

Le phénomène d'activation retardée engendre des différences de tension dans les filaments. Celles-ci induisent des ruptures non simultanées des filaments au cours de l'essai de traction. Les premières ruptures apparaissent après le point d'inflexion de la partie ascendante de la courbe et avant d'atteindre l'effort maximal. Elles conduisent à une redistribution des efforts aux autres filaments et mèches moins chargés permettant au fil d'augmenter son effort résistant global. Bien évidemment, ces ruptures se multiplient dans la zone de l'effort résistant maximal alors que le nombre de filaments et/ou mèches qui peuvent reprendre l'effort diminue ce qui conduit finalement à la décroissance de l'effort résistant.

La partie décroissante de la courbe résulte de la rupture progressive des filaments et des mèches non encore rompus et aussi des forces de frottement résiduel (et dans une moindre mesure de cisaillement) dans le fil compte tenu que les ruptures sont aléatoires dans toute la longueur libre du fil permettant à une partie de mèches et de filaments rompus de rester entremêlés avec ceux non encore rompus et offrir un certain effort résistant par frottement. Notons cependant que la pente moyenne de la partie descendante de la courbe est généralement plus forte que celle de la partie ascendante. L'effort résistant tend enfin vers zéro (point c) lorsque tous les filaments et mèches sont rompus et l'allongement important de l'éprouvette conduit à la séparation des filaments et des mèches entremêlés et consécutivement à la réduction très significative des frottements dans le fil.

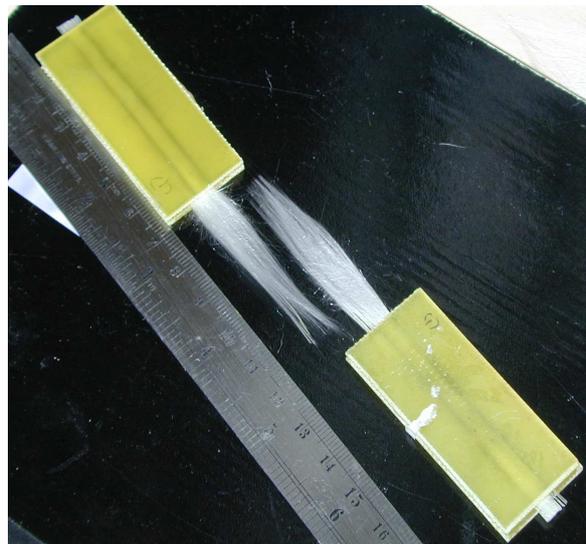
Il est évident que la complexité géométrique et structurale des fils multi-filamentaires est la première cause de ce comportement mécanique spécifique mais aussi de la variabilité des résultats. La résistance en traction ( $N_{max}$ ), par exemple, reste très sensible aux conditions de préparation des éprouvettes. Pour mieux illustrer ce propos, nous avons comparé sur la **figure 2.20** les résultats obtenus sur le fil OC1, d'une part, lors de nos essais préliminaires de fabrication des éprouvettes où plusieurs paramètres n'étaient pas contrôlés et, d'autre part, lors des essais définitifs où nous avons acquis une bonne maîtrise de la procédure de fabrication et plus particulièrement tout ce qui concerne l'alignement du fil.



**Figure 2.20.** L'influence de la maîtrise du procédé de fabrication des éprouvettes sur la résistance en traction (fil OC1, LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>, S-S).

Nous constatons que la maîtrise de la fabrication des éprouvettes a permis de gagner environ 20 % sur la valeur moyenne de la résistance en traction :  $N_{\max} = 1035 \text{ N}$  pour les essais préliminaires et  $N_{\max} = 1245 \text{ N}$  pour les essais définitifs. De plus, elle a permis de réduire significativement la variabilité des cinq valeurs mesurées : coefficient de variation de  $N_{\max}$  est 6,4 % pour les essais préliminaires et 3,8 % pour les essais définitifs. Dans ce contexte, nous devons être prudents quant à l'interprétation des résultats de la résistance en traction des fils car des défauts de fabrication des éprouvettes peuvent toujours subsister et perturber les résultats. Ainsi, dans la suite de ce travail nous avons considéré que les valeurs de la résistance en traction de deux configurations expérimentales restent comparables si elles se situent dans une fourchette de  $\pm 10 \%$  de la valeur moyenne indépendamment de la variabilité propre des essais de chaque configuration.

D'autres paramètres peuvent également influencer la variabilité et les résultats de l'essai, par exemple, la rupture de certains filaments (plus rarement de mèches) à l'intérieur de la zone de collage du fil entre les plaquettes mettant en sollicitation l'adhérence des filaments avec la résine de collage ainsi que des forces de frottement plus importantes entre les plaquettes que celles engendrées dans la partie libre du fil. Pour mieux illustrer ce propos nous avons étudié l'état des éprouvettes après l'essai de traction (**figure 2.21**). Nous avons, en effet, observé qu'un très faible pourcentage de filaments présentait une longueur supérieure à la longueur libre de l'éprouvette indiquant des ruptures et des glissements de filaments dans les plaquettes.



**Figure 2.21.** Eprouvette de fil OC1 après l'essai (LL= 25 mm,  $V = 0,01 \text{ min}^{-1}$ , S-S).

En tenant compte des causes de variabilité exposées précédemment, essayons maintenant de comparer le comportement des différents fils multi-filamentaires. La **figure 2.22** permet cette comparaison pour des essais effectués dans la même configuration expérimentale (LL = 100 mm,  $V = 0,01 \text{ mm/min}$ , S-S). Quatre principaux constats peuvent en être faits :

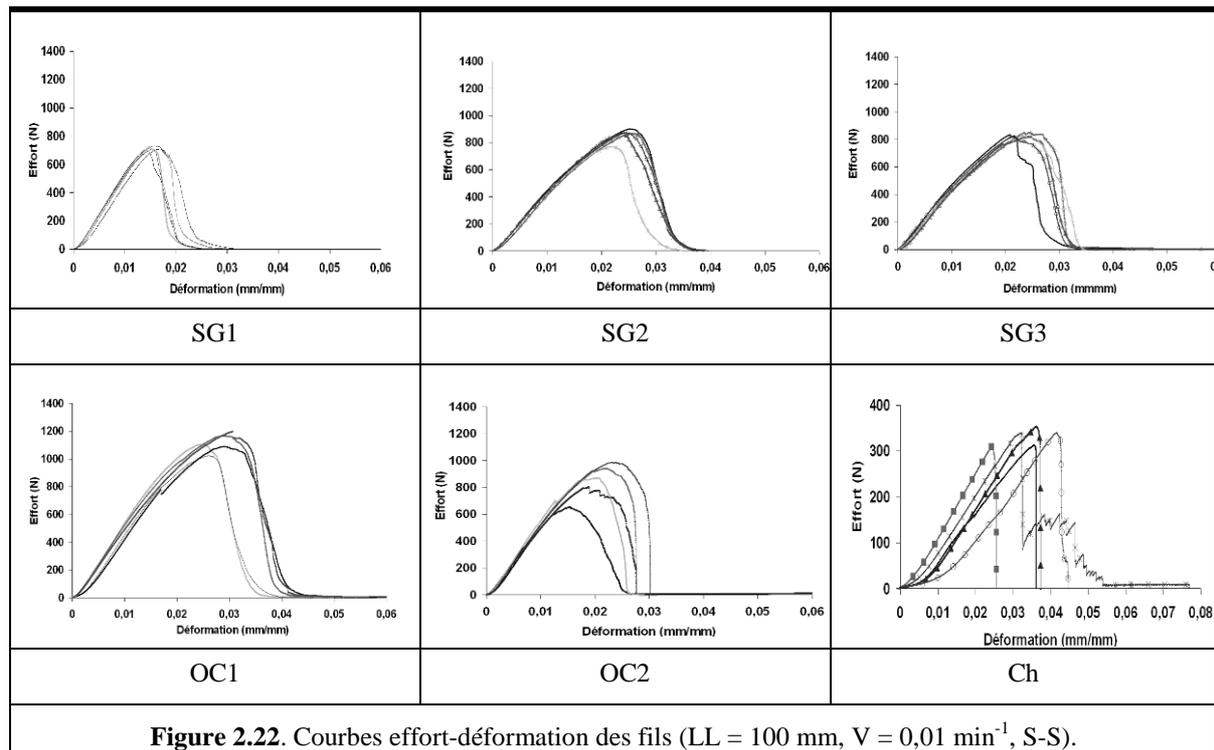
1. La résistance en traction des fils diffère. Le fil OC1 présente la plus grande résistance en traction (en moyenne  $N_{\max} = 1115 \text{ N}$ ) significativement plus forte que celle des autres fils.

Les fils OC2 (900 N), SG2 (855 N), SG3 (830 N) et SG1 (705 N) présentent une résistance en traction du même ordre de grandeur bien que très probablement le fil OC2 est plus résistant que le fil SG1. Le fil de chanvre présente une résistance en traction significativement plus faible (320 N) que celle des fils de verre.

2. La variabilité des courbes des fils de verre avec mèches est beaucoup plus faible que celle des courbes du fil OC2 sans mèches et aussi du fil de chanvre.

3. La déformation à la rupture des fils diffère. Elle est environ deux fois plus faible pour les fils de verre que pour le fil de chanvre. Elle aussi plus faible pour le fil SG1 comparativement aux autres fils de verre.

4. Le fil de chanvre a un comportement beaucoup plus fragile que les fils de verre.



Compte tenu que la section de tous les fils de verre est du même ordre de grandeur (**tableau 2.3**) et que les valeurs moyennes de la résistance en traction sont considérées comparables si elles se situent dans une fourchette de  $\pm 10\%$ , les meilleures propriétés mécaniques du verre E (des fils OC) comparativement à celles du verre AR (des fils SG) et le rôle structurant des mèches (assemblant les filaments avec des multiples pontages grâce à l'ensimage) sont à l'origine du premier et du deuxième constat. En ce qui concerne le deuxième constat et, plus particulièrement, la variabilité des courbes du fil OC2, il faut remarquer que les courbes qui donnent la résistance en traction la plus forte se caractérisent aussi par une plus grande fragilité (la pente de la partie descendante est plus forte). Cela peut s'expliquer par une plus forte variabilité de la longueur initiale des filaments constituant le fil, induite par l'absence de mèche (le groupement des filaments par mèche tend à uniformiser les longueurs initiales des filaments en facilitant leur alignement lors de la préparation de l'éprouvette). Lorsque les longueurs initiales des filaments sont similaires, l'ensemble des filaments rompt quasiment simultanément, ce qui permet d'obtenir un effort résistant important mais génère un comportement fragile. Une plus grande disparité dans les longueurs initiales réduit la

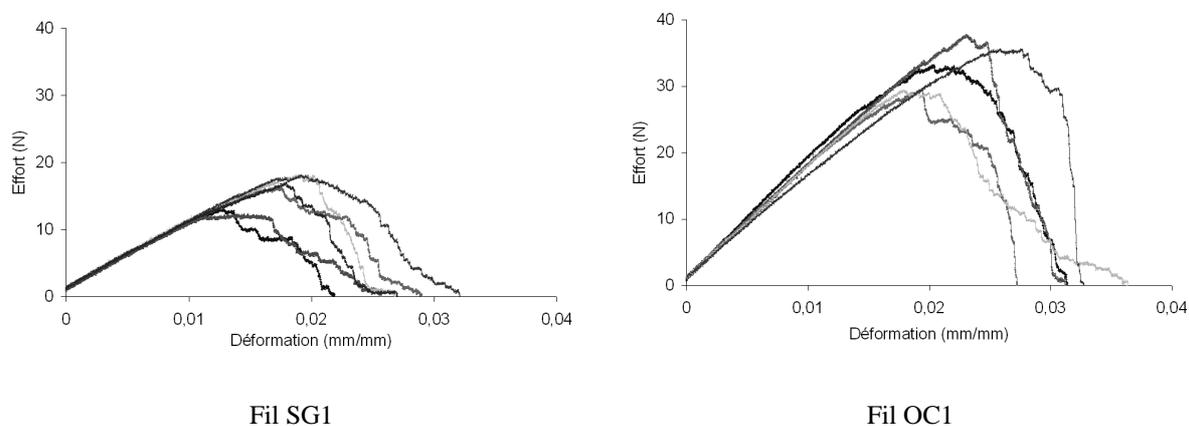
résistance du fil, mais réduit la fragilité du fil en augmentant le nombre de filaments résistants dans la phase post-pic.

Par ailleurs, les meilleures propriétés mécaniques du verre comparativement à celles des fibres cellulosiques du chanvre, l'absence de mèches et la structure torsadée du fil de chanvre font que le fil de chanvre présente une résistance en traction significativement plus faible que tous les fils de verre ainsi qu'une plus forte variabilité, en particulier en ce qui concerne la déformation à la rupture, et une plus grande déformabilité.

Par ailleurs, la faible ondulation des mèches du fil SG1 comparativement aux autres est probablement à l'origine du troisième constat. Enfin, la rupture aléatoire des filaments et des mèches sur toute la longueur libre des fils de verre comparativement à la rupture plutôt localisée du fil de chanvre (souvent proche des extrémités de la longueur libre du fil) est à l'origine du quatrième constat.

### 2.5.5 Comportement mécanique de la mèche

L'étude du comportement mécanique d'une seule mèche vient compléter notre analyse précédente sur le comportement mécanique du fil, car elle permet de s'affranchir des problèmes d'alignement et des forces de frottement entre les mèches. Les éprouvettes de mèche sont fabriquées sur le même principe que les éprouvettes de fil. Toutefois, compte tenu de la petite dimension de la mèche, la réalisation des éprouvettes d'une seule mèche demande encore plus d'attention que celle des éprouvettes de fil. **La figure 2.23** donne deux exemples de comportement mécanique d'échantillons prélevés sur une même mèche de fil SG1 et de fil OC1. Nous rappelons (**tableau 2.1**) que la mèche du fil SG1 est approximativement composée de 100 filaments de 14  $\mu\text{m}$  de diamètre alors que celle du fil OC1 est composée de 270 filaments 12  $\mu\text{m}$  de diamètre.



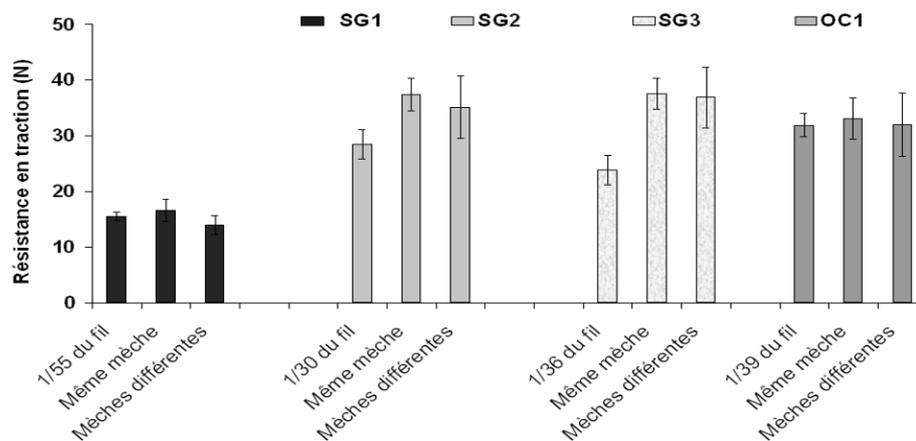
**Figure 2.23.** Courbes effort-déformation d'une mèche (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>, S-S)

Nous constatons que le comportement mécanique d'une mèche diffère sur plusieurs points du comportement mécanique du fil (**figures 2.19** et **2.22**). Premièrement, l'adoucissement observé au début du chargement dans le cas des fils disparaît compte tenu de l'absence de défauts d'alignement permettant la mise en charge simultanée de tous les filaments de la mèche (pas d'activation retardée). Deuxièmement, la pente ascendante des courbes est quasi-linéaire jusqu'à l'effort maximal, sans point d'inflexion, en raison de la non-redistribution de la charge entre parties plus ou moins chargées comme dans le cas du fil. Troisièmement,

l'effort maximal de la mèche est conditionné par la résistance en traction de la quasi-totalité des filaments sans apparition de ruptures de filaments avant d'atteindre l'effort maximal. Quatrièmement, la partie descendante de la courbe est en « en escalier » en raison de la rupture progressive de filaments dans la mèche et les déformations de cette partie sont plus ou moins importantes en fonction de la résistance au cisaillement des pontages créés par l'ensimage. Cinquièmement, la fluctuation des valeurs de la résistance en traction des mèches et la variabilité de la partie descendante de leur courbe sont plus fortes que celles des fils en raison de la faible dimension de la mèche qui empêche une maîtrise parfaite des conditions de préparation des éprouvettes.

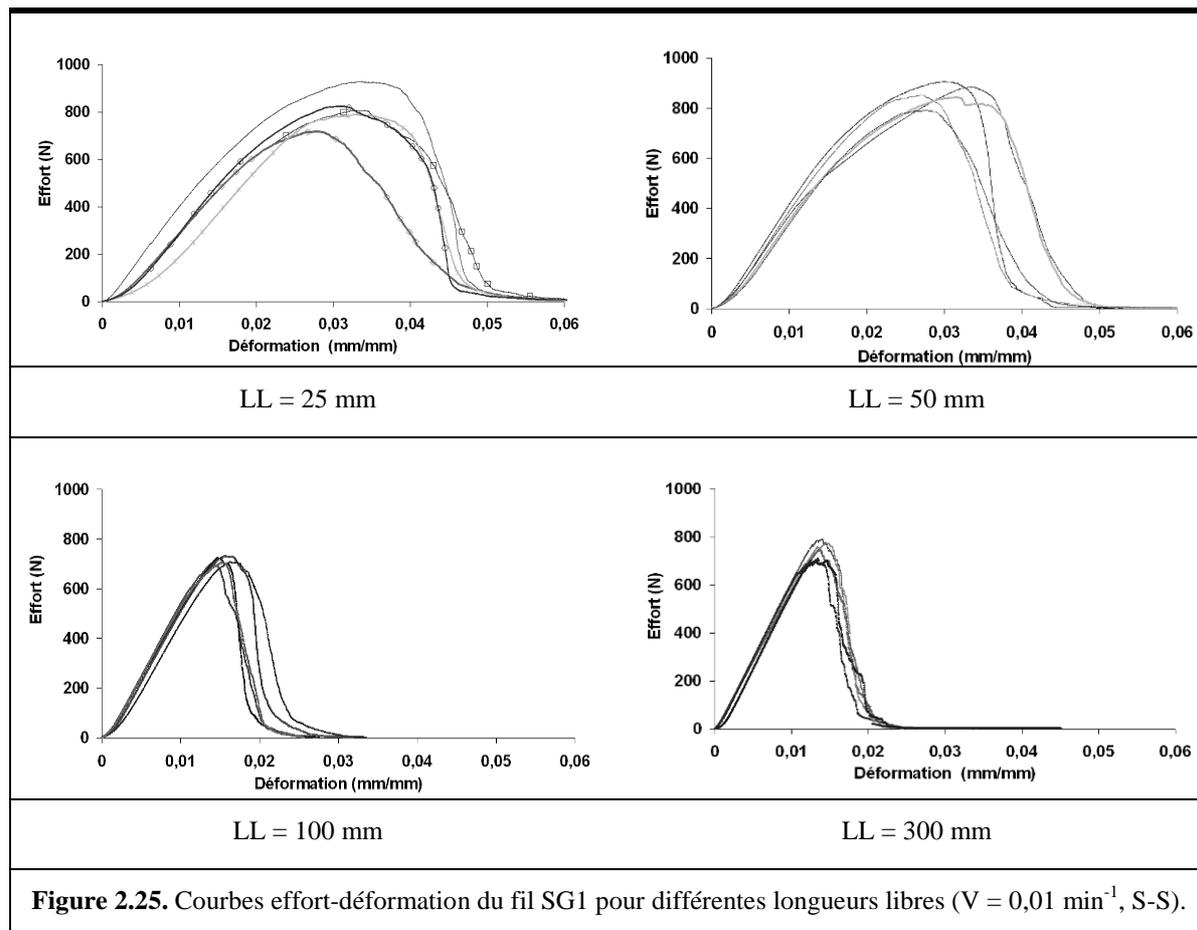
Pour compléter le tableau précédent nous présentons sur la figure 2.24 une comparaison des valeurs moyennes de la résistance en traction des mèches obtenues par trois procédés expérimentaux différents :

1. à partir de la valeur moyenne de la résistance en traction du fil, divisée par le nombre de mèches comptées dans le fil ;
2. à partir d'essais de traction directement sur 5 ou 6 échantillons d'une même mèche ;
3. à partir d'essais de traction directement sur 5 ou 6 échantillons provenant de différentes mèches du même fil.



**Figure 2.24.** Comparaison la résistance en traction des mèches (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>, S-S).

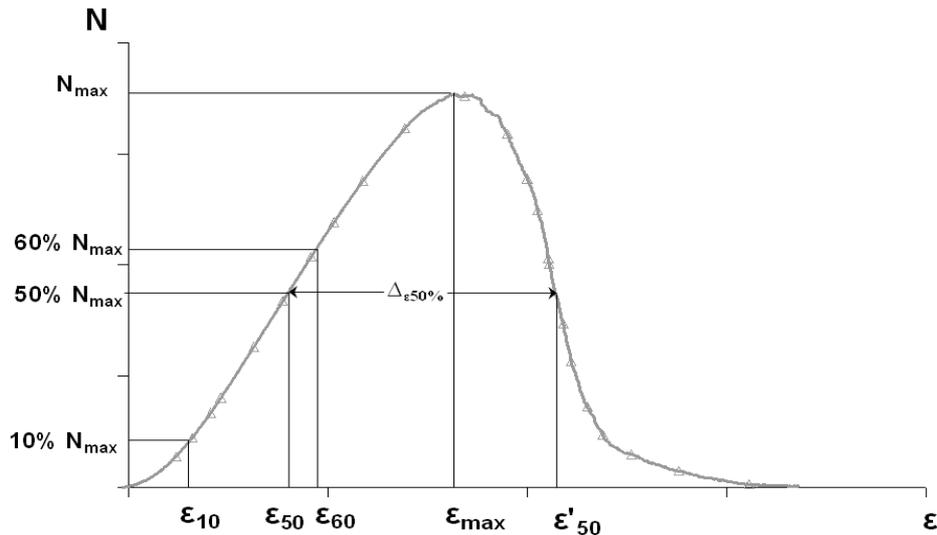
Nous constatons que la résistance en traction mesurée directement sur les mèches par les procédés 2 et 3 est, soit du même ordre de grandeur (fils SG1 et OC1), soit supérieure (fils SG2 et SG3) à celle calculée à partir de la résistance en traction du fil selon le procédé 1. Ceci s'explique, d'une part, par la complexité de la structure du fil qui dans certains cas il engendre des frottement important entre mèches conduisant à l'endommagement et à la rupture précoce des filaments avant d'atteindre l'effort maximal et, d'autre part, par l'absence de défauts d'alignement pour les éprouvettes de mèche.



### 2.5.6 Influence de la longueur libre du fil

La **figure 2.25** présente les courbes effort-déformation du fil SG1 pour différentes longueurs libres des éprouvettes. Nous constatons que la longueur libre du fil influe significativement sur l'allure des courbes. En effet, pour les faibles longueurs libres les déformations du fil sont plus importantes comparativement aux grandes longueurs libres pour les mêmes efforts résistants. Ce comportement est lié aux défauts d'alignement des mèches qui impactent plus significativement les éprouvettes de faible longueur libre. Ainsi, le fil à faible longueur libre subit un allongement plus grand avant que toutes les filaments et mèches soient sollicités jusqu'à leur rupture, consécutivement, la résistance en traction est atteinte pour une déformation plus importante. Par ailleurs, la variabilité des essais diminue globalement avec l'augmentation de la longueur libre car celle-ci permet une répartition des défauts d'alignement des mèches statistiquement plus homogène.

Afin de quantifier les observations précédentes sur le rôle de la longueur libre sur les autres fils, nous avons déterminé (**tableau 2.7** et **figures 2.27** et **2.28**) pour chaque configuration expérimentale deux caractéristiques importantes de la courbe effort – déformation schématisées sur la figure 2.26 qui s'affranchissent de l'adoucissement initial de la courbe dû à la mise en charge progressive des filaments et des mèches au début du chargement.



**Figure 2.26.** Exemple de la détermination de la pente<sub>10-60</sub> et de la déformation  $\Delta\epsilon_{50}$  sur la courbe effort – déformation d’une éprouvette (fil SG1, LL = 100 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>, S-S).

Premièrement, nous avons calculé la pente de la partie ascendante de la courbe effort – déformation entre les points situés entre 10 % et 60 % de l’effort maximal  $N_{\max}$ , désigné par la suite comme pente<sub>10-60</sub>. et exprimée en kN (ou kN/mm/mm) selon la formule :

$$pente_{10-60} = \frac{0,5N_{\max}}{\epsilon_{60} - \epsilon_{10}} \quad (2.2)$$

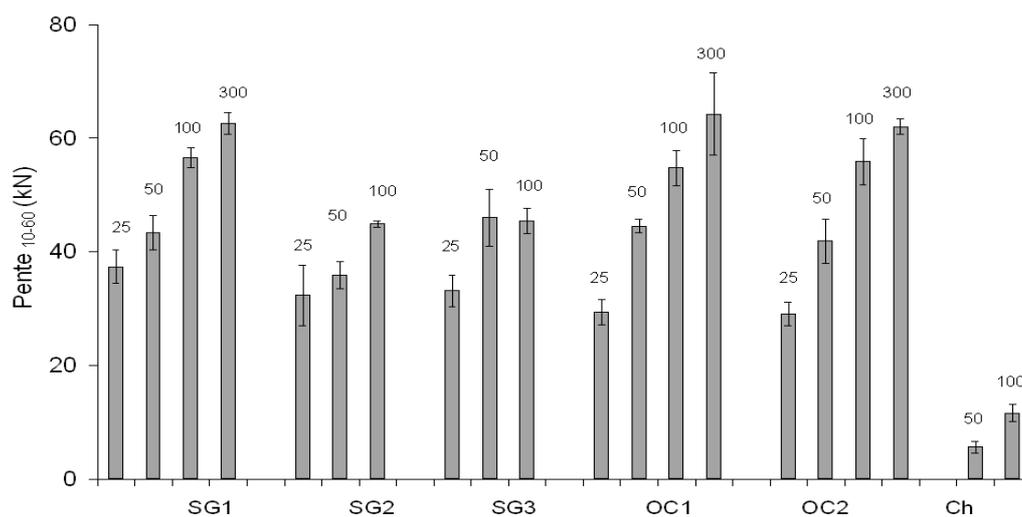
Le choix de cette partie de la courbe pour le calcul de la pente a été, après comparaison avec d’autres possibilités de calcul (25 % - 75 %, 20 % - 70 %, ...), basé sur le critère de la plus faible fluctuation des valeurs pour l’ensemble des essais.

Deuxièmement, nous avons calculé la déformation du fil entre les points situés à 50 % de l’effort maximal ( $\epsilon_{50}$ ) de la partie ascendante et 50 % de l’effort maximal ( $\epsilon'_{50}$ ) de la partie descendante, désignée  $\Delta\epsilon_{50}$  ( $= \epsilon'_{50} - \epsilon_{50}$ ) et exprimée en mm/mm.

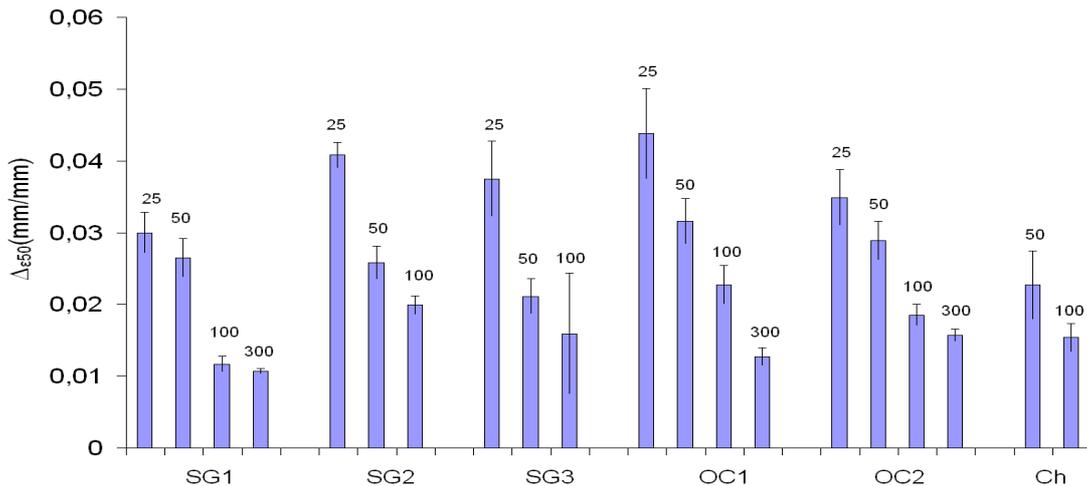
Les valeurs moyennes de ces deux caractéristiques et de leurs coefficients de variation en fonction de la longueur libre figurent dans le **tableau 2.7** et leur comparaison est illustrée sur les **figures 2.27** et **2.28**. Nous constatons que la pente des courbes effort-déformation augmente progressivement avec la longueur libre du fil. Pour une longueur libre de 300 mm la pente est environ deux fois plus forte que celle pour une longueur libre de 25 mm. Inversement, la déformation du fil diminue dans des proportions à peu près analogues. Il en résulte donc que la longueur libre influe significativement sur la rigidité et sur la déformabilité globale des éprouvettes, leur rigidité augmente et leur déformabilité diminue avec la longueur libre. Par ailleurs, si nous tenons compte de la fluctuation des valeurs, nous constatons que pour une longueur libre donnée tous les fils de verre présentent des rigidités et de déformabilités généralement proches.

**Tableau 2.7.** Pente<sub>10-60</sub> et déformation  $\Delta\epsilon_{50}$  sur les courbes effort - déformation pour différentes valeurs de la longueur libre des fils ( $V = 0,01 \text{ min}^{-1}$ , S-S).

Fil	LL (mm)	25		50		100		300	
	Caractéristique	Valeur moyen. (kN ou mm/mm)	Coef. de variation (%)	Valeur moyen. (kN ou mm/mm)	Coef. de variation (%)	Valeur moyen. (kN ou mm/mm)	Coef. de variation (%)	Valeur moyen. (kN ou mm/mm)	Coef. de variation (%)
SG1	Pente <sub>10-60</sub>	37,4	7,8	43,48	6,9	56,5	3,1	62,6	3,0
	$\Delta\epsilon_{50}$	0,0300	9,3	0,0265	10,2	0,0117	9,4	0,0107	3,56
SG2	Pente <sub>10-60</sub>	32,4	16,4	35,9	6,6	44,9	1,2		
	$\Delta\epsilon_{50}$	0,0408	4,4	0,0258	8,8	0,0199	6,5		
SG3	Pente <sub>10-60</sub>	33,2	8,4	46,0	10,9	45,5	5,0		
	$\Delta\epsilon_{50}$	0,0375	13,9	0,0211	11,6	0,0159	52,7		
OC1	Pente <sub>10-60</sub>	29,4	7,5	44,6	2,8	54,8	5,6	64,3	11,3
	$\Delta\epsilon_{50}$	0,0438	14,4	0,0316	10,1	0,0227	11,9	0,0127	9,9
OC2	Pente <sub>10-60</sub>	29,1	7,3	41,9	9,3	55,9	7,2	62,1	2,2
	$\Delta\epsilon_{50}$	0,0349	11,2	0,0289	9,3	0,0185	8,1	0,0157	5,4
Ch	Pente <sub>10-60</sub>			5,7	17,3	11,7	12,8		
	$\Delta\epsilon_{50}$			0,0227	21,1	0,0154	12,7		

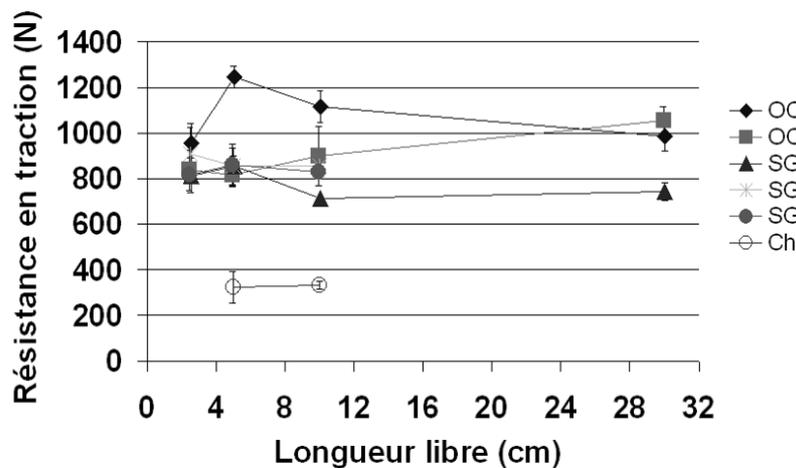


**Figure 2.27.** Variation de la pente<sub>10-60</sub> en fonction de la longueur libre des fils ( $V = 0,01 \text{ min}^{-1}$ , S-S).



**Figure 2.28.** Variation de la déformation  $\Delta\epsilon_{50}$  en fonction de la longueur libre des fils ( $V = 0,01 \text{ min}^{-1}$ , S-S).

A partir de la pente des courbes et de la section présumée des fils multi-filamentaires (**Tableau 2.3**), nous pouvons déterminer leur module élastique. Toutefois, cette détermination ne peut être considérée qu'à titre indicatif en raison des approximations faites sur l'estimation de la section (plus précisément, sur la masse linéique et sur la masse volumique absolue du fil) et de la fluctuation des valeurs mesurées. Ainsi, à titre indicatif, une variation de la pente entre 30 et 60 kN correspond à un module d'élasticité des différents fils de verre variant entre 31 et 65 GPa.



**Figure 2.29.** Résistance en traction des fils en fonction de la longueur libre des éprouvettes ( $V = 0,01 \text{ min}^{-1}$ , S-S).

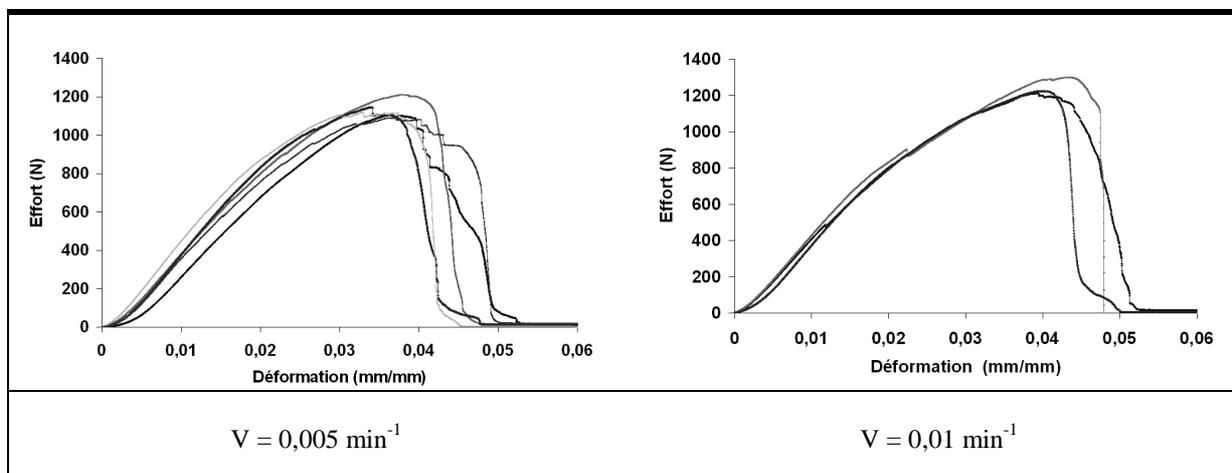
Par ailleurs, en ce qui concerne la résistance en traction des fils multi-filamentaires, nous constatons sur la **figure 2.25** que celle-ci semble en moyenne plus forte pour les longueurs libres courtes de 25 et 50 mm que pour les longueurs libres longues de 100 et 300 mm, mais, si nous tenons compte de notre analyse sur la variabilité des résultats (voire paragraphe précédent) nous ne pouvons pas affirmer qu'il s'agit bien d'une tendance. Afin de mieux illustrer ce propos, nous avons porté sur la **figure 2.29** les valeurs moyennes de la résistance en traction en fonction de la longueur libre où nous constatons que les variations pour les différents fils sont plutôt singulières et ne permettent pas de conclure que la longueur libre a une influence significative sur la résistance en traction des éprouvettes. En effet, toutes les valeurs moyennes de la résistance en traction d'un fil pour différentes longueurs libres sont

incluses dans une fourchette de  $\pm 12\%$ , ce qui reste comparable à la variabilité globale des essais. Ce constat diverge des résultats publiés dans la littérature Hanisch, et al. [Han05] qui toutefois concernent des essais avec des longueurs libres supérieures. Il est certain que lorsque la longueur libre croît significativement (plusieurs dizaines de centimètres) la probabilité de présence de défauts dans les filaments et les mèches devient plus forte et doit contribuer à une réduction de la résistance en traction.

Enfin, si nous considérons que la résistance en traction des fils ne varie pas avec la longueur libre alors que leur rigidité et déformabilité varient significativement, nous pouvons aussi conclure que l'énergie de rupture du fil diminue avec l'augmentation de la longueur libre.

### 2.5.7 Influence vitesse de déformation

La **figure 2.30** présente les courbes effort-déformation du fil OC1 pour différentes vitesses de déformation lors du chargement. Nous constatons que la vitesse influe sur la rigidité du fil. En effet, dans la partie ascendante des courbes, les déformations du fil sont plus importantes pour les faibles vitesses. Ce comportement ressemble à celui constaté pour les faibles longueurs libres (**figure 2.25**) pourtant, à notre avis, il ne s'agit pas du même mécanisme. Rappelons que la diminution de la rigidité avec la longueur libre a été expliquée en se basant sur l'hypothèse d'un plus grand nombre de défauts d'alignement pour les faibles longueurs libres. En revanche, à faible vitesse de déformation, les filaments et les mèches les plus sollicités ont le temps de s'allonger et les pontages créés par l'ensimage de fluer et éventuellement de rompre avant que la redistribution de la charge vers les filaments et les mèches moins sollicités survienne, nous constatons alors une plus grande déformation globale. En contrepartie, cette plus grande déformabilité de la partie ascendante de la courbe à faible vitesse est compensée en grande partie par un comportement plus fragile dans la partie descendante caractérisée par des pentes plus fortes comparativement aux courbes obtenues à plus grande vitesse de déformation, ce qui n'a pas été observé dans le cas des longueurs libres (**figure 2.23**). Dans la partie descendante de la courbe, la résistance au cisaillement et les forces de frottement entre les filaments et entre les mèches sont déjà en grande partie épuisés grâce à la déformabilité du fil et l'effort résistant diminue brusquement dès la rupture des filaments et des mèches au-delà de  $N_{max}$ . La pente est alors plus forte et une diminution de la charge « en escalier » est souvent observée. Les fils présentent alors un comportement plus fragile à l'image du comportement particulier du fil OC2, sans mèches sur la **figure 2.22**.



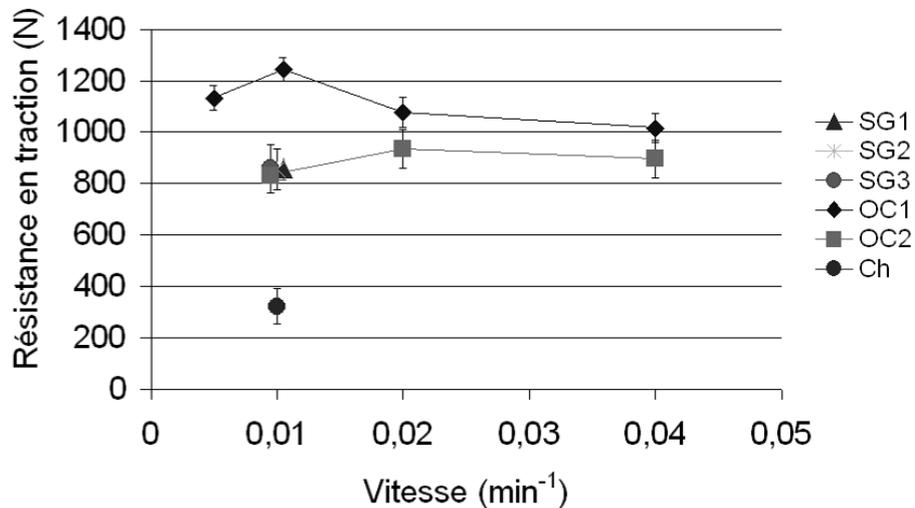
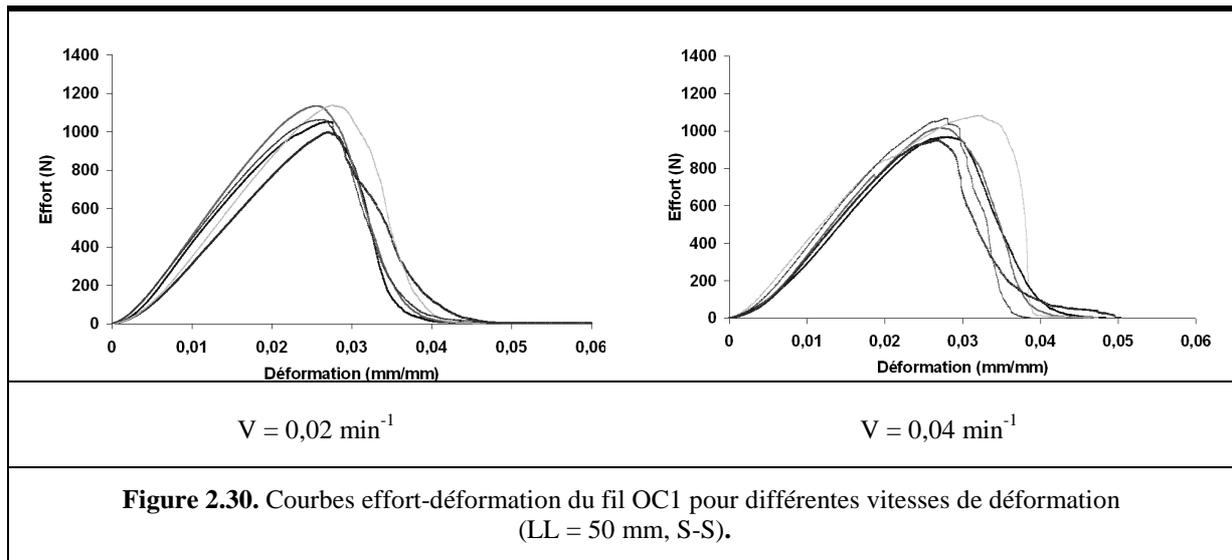


Figure 2.31. Résistance en traction des fils en fonction de la vitesse de chargement (S-S, LL= 50 mm).

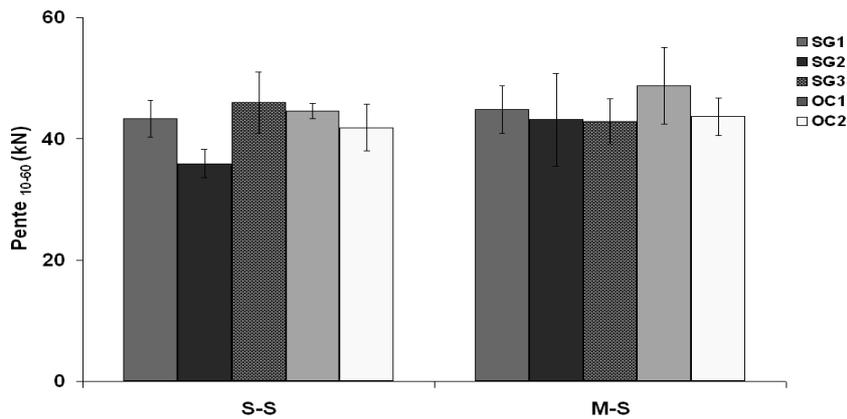
La variation de la déformabilité du fil en fonction de la vitesse de chargement n'influe pas sur la résistance en traction du fil. Sur la figure 2.31 nous pouvons constater que les valeurs de la résistance en traction varient de manière plutôt aléatoire dans une fourchette de  $\pm 10\%$  autour de la valeur moyenne, ce qui ne permet pas de dégager une tendance.

### 2.5.8 Influence de l'eau

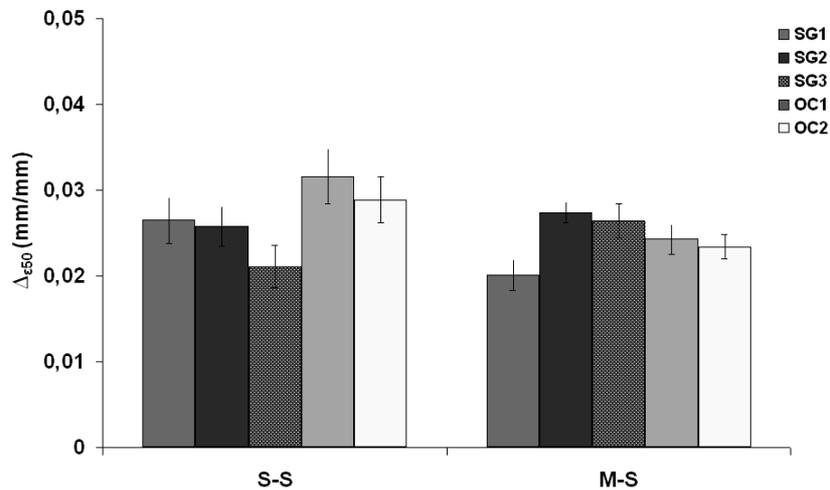
L'influence de l'eau sur le comportement mécanique des fils multi-filamentaires comporte deux aspects. Le premier concerne la capacité de l'eau à aligner les mèches par l'action des forces capillaires et induire éventuellement une modification du comportement mécanique en traction compte tenu que les défauts d'alignement influent, à leur tour, sur la déformabilité du fil et la fluctuation des valeurs mesurées. Le deuxième aspect concerne l'éventuelle modification physico-chimique de l'ensimage par l'eau avec des éventuelles conséquences sur le comportement mécanique du fil. Ces deux aspects sont étudiés par la suite.

*Effet de l'alignement des mèches par l'eau*

Nous rappelons que pour évaluer cet aspect nous avons envisagé une configuration expérimentale, désignée M-S (voir § 2.5.3), selon laquelle le fil était préalablement mouillé et aligné avec les doigts avant la préparation des éprouvettes et ensuite séché complètement avant l'essai de traction. Cette configuration a été comparée avec la configuration de référence, désignée S-S, selon laquelle le fil était sec tout le temps. Nous rappelons aussi que pour la fabrication des éprouvettes de la configuration M-S nous étions obligés de sécher par insufflation d'air chaud les bouts du fil destinés au collage des plaquettes, ce qui a pu perturber plus ou moins l'alignement obtenu par l'eau. Les **figures 2.32, 2.33 et 2.34** permettent la comparaison des principales caractéristiques des courbes effort - déformation des fils pour ces deux configurations.



**Figure 2.32.** Effet l'alignement par l'eau sur la pente<sub>10-60</sub> (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>).



**Figure 2.33.** Effet l'alignement par l'eau sur la déformation Δε<sub>50</sub> (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>).

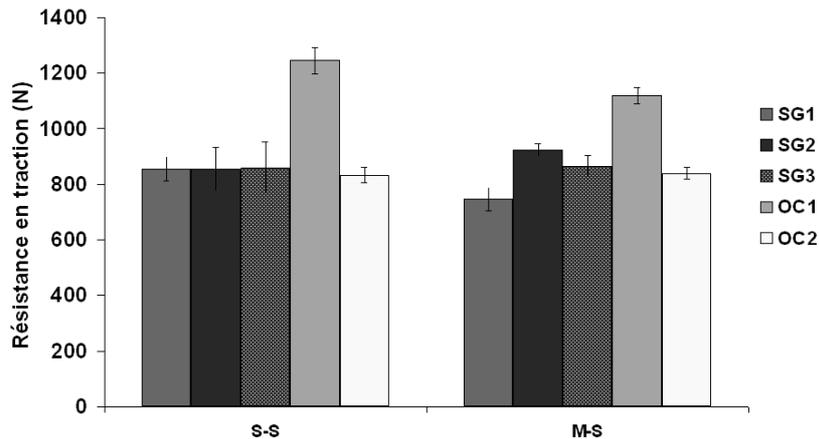


Figure 2.34. Effet l'alignement par l'eau sur la résistance en traction (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>).

Nous constatons que l'alignement par l'eau n'influe pas de manière significative sur les trois principales caractéristiques considérées des courbes effort – déformation. Compte tenu de la fluctuation des valeurs, les deux configurations donnent des résultats comparables. Le principal enseignement de ce constat est que pour la longueur libre de 50 mm l'alignement des mèches à sec ou mouillées donne des résultats comparables. Il est très probable, toutefois, que si la longueur libre du fil était beaucoup plus importante la différence entre les deux configurations serait plus marquée.

Par ailleurs, nous avons constaté que si globalement les résultats sont comparables pour les deux configurations, le fil OC1 présente dans la configuration M-S une pente plus forte, une déformation plus faible et une résistance en traction plus faible par rapport à la configuration S-S. Ce qui serait peut être interprété comme un indice de modification des caractéristiques mécaniques induite par l'eau. Nous nous sommes donc amené à procéder à la vérification de l'action de l'eau sur l'ensimage.

#### Effet de l'eau sur l'ensimage

Nous rappelons que pour évaluer cet aspect nous avons envisagé trois configurations expérimentales, désignées S-M, S-M1s, S-M1m (voir § 2.5.3), selon lesquelles la préparation des éprouvettes était réalisée avec le fil sec et ensuite les éprouvettes étaient immergées dans l'eau juste avant l'essai (S-M), pendant une semaine avant l'essai (S-M1s) ou pendant un mois avant l'essai (S-M1m). Dans les trois cas le fil restait mouillé pendant l'essai. Ces configurations ont été comparées avec la configuration de référence (S-S). Les figures 2.35, 2.36 et 2.37 donnent les principales caractéristiques des courbes effort - déformation des fils pour ces configurations.

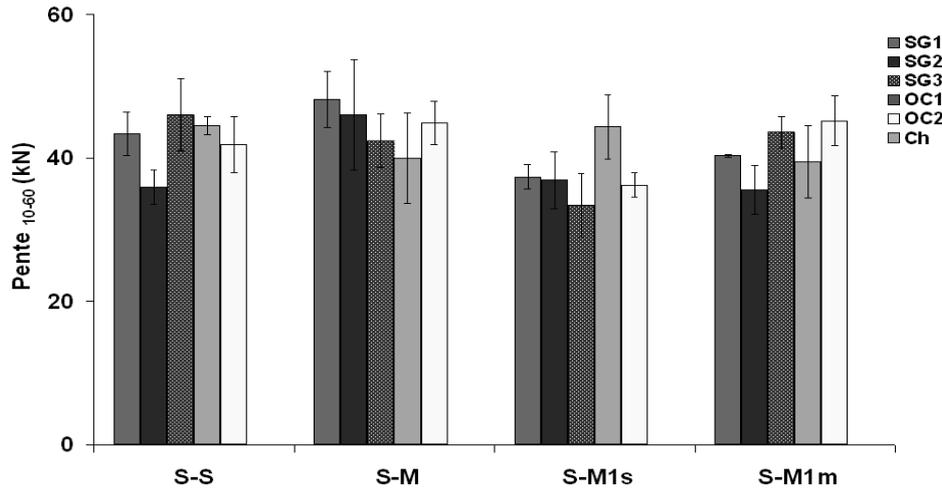


Figure 2.35. Effet de l'eau sur la pente<sub>10-60</sub> (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>).

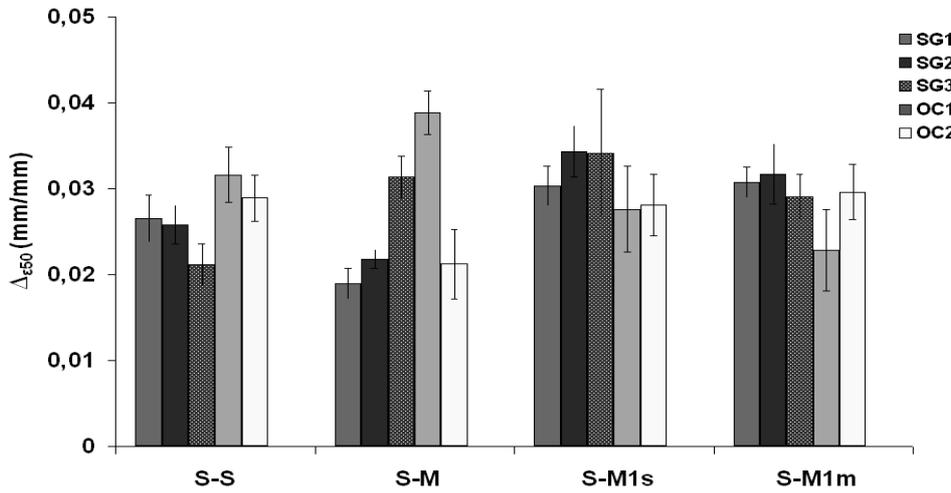


Figure 2.36. Effet de l'eau sur la déformation  $\Delta\epsilon_{50}$  (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>).

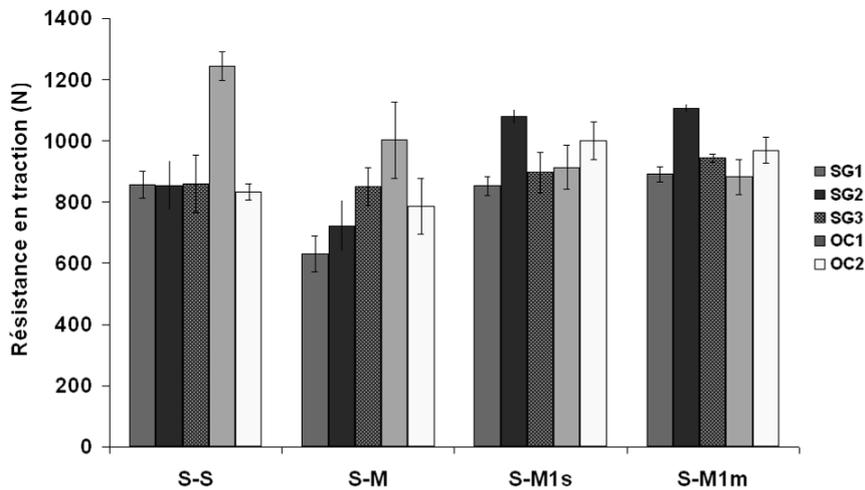


Figure 2.37. Effet de l'eau sur la résistance en traction (LL = 50 mm, V = 0,01 min<sup>-1</sup>).

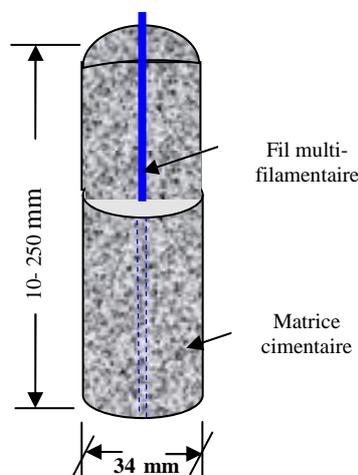
D'une manière générale nous ne pouvons pas dire que l'action de l'eau induit une vraie modification des courbes effort – déformation des fils à court terme (S-M) ou à long terme (S-M1s et S-M1m). Evidemment, il y a des variations sur les trois caractéristiques mesurées (qui dépassent parfois la fourchette de  $\pm 10\%$ ) d'une configuration expérimentale à l'autre, mais ces variations semblent aléatoires si nous tenons compte des quatre configurations ensemble. Les résultats obtenus ne permettent pas de dire que les forces de frottement entre les filaments et les mèches ou la résistance au cisaillement des pontages créés par l'ensimage sont systématiquement modifiées par la présence de l'eau et a fortiori que l'ensimage a subi une transformation impactant son rôle. La seule variation continue en fonction de la durée d'exposition des éprouvettes semble la diminution de la résistance en traction du fil OC1, mais, celle-ci reste discutable compte tenu des variations observées en fonction de la longueur libre ou de la vitesse de déformation (**figures 2.29 et 2.31**). Nous en concluons que, dans nos conditions expérimentales, l'eau n'a pas une influence significative sur le comportement mécanique des fils multi-filamentaires.

## 2.6 Enrobage du fil multi-filamentaire par la matrice cimentaire

### 2.6.1 Principe de fabrication des éprouvette de mortier

Dans l'objectif d'étudier le rôle des fils multi-filamentaires dans le renforcement des bétons dans des conditions expérimentales qui permettent un contrôle satisfaisant des différentes étapes de fabrication des corps d'épreuve afin de minimiser les aléas, il nous est apparu important de rechercher des formes d'éprouvettes et des procédés de fabrication relativement simples.

Ainsi, après plusieurs essais, nous nous sommes orientés vers la fabrication des éprouvettes cylindriques constituées d'un fil multi-filamentaire rectiligne, légèrement étiré le long de l'axe longitudinal de l'éprouvette (**figure 2.38**) et enrobé par un mortier très fluide et suffisamment stable de manière qu'il puisse être versé autour du fil sans modifier sa position tout en assurant la formation d'une interface parfaite avec lui et un remplissage du moule sans ségrégation ni ressuage. Pour cela nous avons mis au point un mortier spécifique dont les caractéristiques sont données par la suite.



**Figure 2.38.** Eprouvette cylindrique de mortier avec fil multifilamentaire sur son axe principal

Ce procédé de fabrication a permis, d'une part, de faire varier à volonté la hauteur du mortier et par conséquent la longueur d'ancrage du fil entre 10 et 250 mm et, d'autre part, de garantir une rectitude du fil dans l'éprouvette nécessaire pour obtenir des bonnes conditions d'étude de l'arrachement.

Pour le moulage des éprouvettes un tube PVC de diamètre externe 40 mm et de diamètre interne 34 mm a été utilisé. Le tube a été préalablement fendu sur toute sa longueur pour faciliter le démoulage. Un mastic siliconé a été appliqué sur la fente pour assurer l'étanchéité avant le coulage du mortier ainsi que sur la zone d'appui du tube. Une graisse légère a été utilisée comme agent de démoulage, appliqué sur la surface interne du tube. Le fil multi-filamentaire a été maintenu centré sur l'axe de l'éprouvette grâce à un montage à bois spécifiquement conçu pour la confection (**Figure 2.39**) permettant la fixation centrée du fil. Le montage permet le coulage simultané de quatre éprouvettes dont, selon les besoins, des éprouvettes sans fil servant de référence.

Afin d'éviter un drainage de l'eau interstitielle du mortier à travers le fil multi-filamentaire à la base du tube, le fil sortant du moule a été enrobé d'un peu de mastic silicone et une couche d'eau de quelques millimètres a été ajoutée sur la surface libre du mortier après le coulage afin d'assurer la saturation permanente du fil jusqu'à la prise du mortier et éviter le drainage de l'eau du mortier.

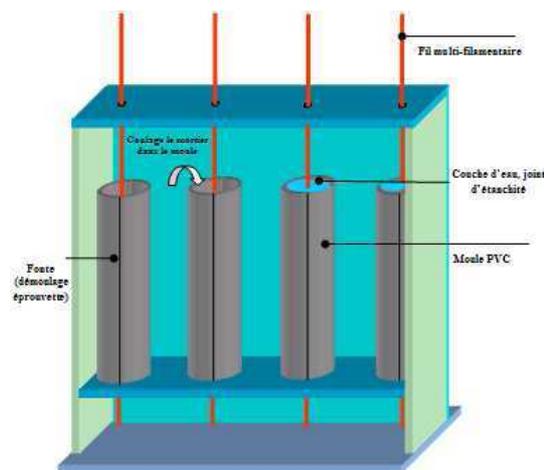


Figure 2.39. Montage spécifique pour la confection des éprouvettes.

### 2.6.2 Prétraitement du fil avant l'enrobage par le mortier

Afin de comprendre le rôle que les conditions d'imprégnation du fil multi-filamentaire par le mortier joue sur la structuration de l'interface, nous avons envisagé trois modes de prétraitement du fil avant coulage du mortier assurant ainsi différents degrés d'imprégnation :

1. Le fil a été préalablement immergé dans l'eau avant d'être fixé sur le montage de fabrication. Dans ce cas, désigné par la suite W, les forces capillaires tendent à rassembler et aligner les filaments et les mèches. Le diamètre apparent du fil diminue ainsi que l'ondulation des filaments et des mèches. Par ailleurs, compte tenu que l'eau remplit les vides inter-filamentaires la pénétration du mortier reste essentiellement superficielle.

2. Le fil est maintenu sec avant le coulage du mortier. Dans ce cas, désigné par la suite D l'eau interstitielle du mortier pénètre par capillarité dans les vides inter-filamentaires du fil

pendant le coulage, entraînant éventuellement les fines particules de ciment dans les zones superficielles du fil. On peut donc considérer que la pénétration du mortier doit être généralement plus importante pour ce type de prétraitement que pour le précédent. Toutefois, il faut noter que les forces capillaires dans le fil sont importantes et dès que le fil sec se trouve au contact du mortier frais la capillarité tend à diminuer très rapidement les défauts d'alignement des mèches et filaments du fil sec et réduire les vides inter-filamentaires avant la fin du coulage rapprochant ainsi ce type de prétraitement au précédent malgré leur différence initiale.

3. Le fil est pré-imprégné par un coulis représentant la matrice cimentaire du mortier dont les caractéristiques sont données ci-après. Dans ce cas, désigné par la suite PI, le fil est roulé manuellement dans une couche de coulis de manière à faire pénétrer le coulis entre les mèches (**Figure 2.40**). Ensuite, le fil imprégné est fixé rapidement sur le montage et le mortier est coulé immédiatement de manière à assurer la meilleure connexion entre les matériaux.



**Figure 2.40.** Pré-imprégnation du fil par le coulis de ciment.  
a- fil à l'état initial ; b- préparation du coulis ; c- trempage manuel du fil dans le coulis.

### 2.6.3 Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont démoulées après 24h et stockées verticalement dans l'eau pour une période de 28 jours dans une salle à température stable de  $20 \pm 1,5^\circ\text{C}$  et humidité relative de  $50 \pm 10\%$ . Le fil multi-filamentaire sortant de la partie haute de l'éprouvette a été maintenu hors d'eau par fixation sur une grille au-dessus du bac de stockage (**Figure 2.41**)



**Figure 2.41.** Conservation des éprouvettes sous l'eau.

Avant l'essai d'arrachement, l'extrémité libre du fil a été préparée de la même façon que les éprouvettes de fil seul non enrobé présentées dans le paragraphe 2.5.2 (collage de deux

plaques de résine sur le fil afin d'avoir une parfaite fixation aux mors de la machine de traction)

## 2.7 Caractérisation du mortier et du coulis d'enrobage du fil multi-filamentaire

Pour la confection du mortier et du coulis d'enrobage du fil multi-filamentaire, un ciment CEM I 52.5 N, un sable fin et un superplastifiant - haut réducteur d'eau ont été utilisés dont les caractéristiques sont présentées ci-après. Les conditions de gâchage du mortier et du coulis sont développées par la suite, ainsi que les résultats des caractérisations physiques et mécaniques à l'état frais et durci.

### 2.7.1 Le ciment

Un seul lot de ciment CEM I 52.5 N CP2 conforme à la norme européenne NF EN 197.1 et la norme française NF 13-318, provenant de l'usine de Villiers au Bouin (Italcementi) a été utilisé pour tous les essais. Il est composé de 92% de clinker Portland, de 2% de filler calcaire et de 6% de gypse. Ses caractéristiques physiques et mécaniques et sa composition chimique sont présentées dans les **tableaux 2.8** et **2.9**. La composition minéralogique du clinker selon Bogue est donnée dans le **tableau 2.10**.

**Tableau 2.8.** Caractéristiques physiques et mécaniques de ciment.

Masse volumique	Surface Blaine	Début de prise	Retrait à 28j	Résistance à la compression du mortier normal			
				(MPa)			
kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /g	min	µm/m	1j	2j	7j	28j
3130	359	165	580	18,1	31,7	48,5	61,3

**Tableau 2.9.** Composition chimique élémentaire de ciment (%).

Perte au feu	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl <sup>-</sup>	S <sup>2-</sup>
1,63	63,67	20,23	4,29	2,35	3,88	0,25	0,02	0,69	0,14	2,80	0,31	0,02	<0,02

**Tableau 2.10.** Composition minéralogique du clinker Portland selon Bogue (%).

C3S	C2S	C3A	C4AF
66.9	10.7	8.4	7.6

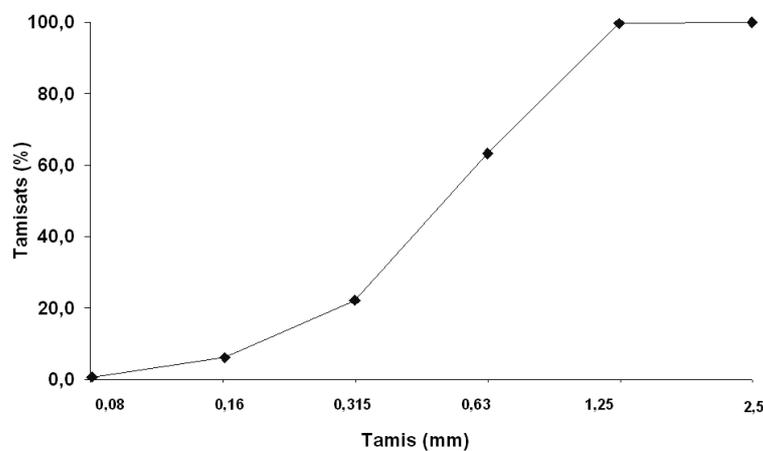
### 2.7.2 Le sable

Afin d'assurer les meilleures conditions d'enrobage du fil par le mortier, l'utilisation d'un sable fin,  $0/D = 0/1,25$  mm a été privilégiée dans la formulation du mortier. Le sable provient de la carrière d'Achères dans les Yvelines (GSM). Il est de composition silico-calcaire. Son analyse granulométrique selon la norme NF P 18-560 est donnée dans le **tableau 2.11** et la courbe granulométrique sur la **figure 2.42**.

Le coefficient d'absorption du sable, déterminé selon la norme européenne EN NF 1097-6, est 1,1 %. Pour la confection du mortier le sable a été préalablement séché à 105°C jusqu'à poids constant et sa capacité d'absorption a été prise en compte dans l'eau totale utilisée pour le gâchage du mortier.

**Tableau 2.11.** Analyse granulométrique du sable.

Module du tamis	Maille du tamis	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)	Module de Finesse
	(mm)			
35	2,5	0,00	100	3,91
32	1,25	0,27	99,73	
29	0,63	36,74	63,26	
26	0,315	77,80	22,20	
23	0,16	93,86	6,14	
20	0,08	99,31	0,69	



**Figure 2.42.** Courbe granulométrique du sable.

### 2.7.3 Le superplastifiant

Afin d'assurer une grande fluidité au mortier et au coulis un superplastifiant-haut réducteur d'eau, CIMFLUID 2002 (AXIM) à base de polycarboxylate modifié a été utilisé. Ses caractéristiques figurent dans le **tableau 2.12**. L'eau de l'adjuvant a été prise en compte dans l'eau totale du mortier. L'extrait sec de l'adjuvant a été vérifié selon la norme NF P18-380 sur le lot servant pour les essais.

**Tableau 2.12.** Caractéristiques de l'adjuvant superplastifiant.

Masse volumique	Viscosité à 20 C°	Extrait sec	pH	Na <sub>2</sub> O équivalent	Dosage recommandé
kg/dm <sup>3</sup>	cP	%		%	
1.11 ± 0.02	100	35,6	7.0 ± 1.0	≤ 0.10	0,2 à 2 % par rapport au ciment

### 2.7.4 Composition du mortier et du coulis

En visant un mortier très fluide, facile à mettre en place dans les moules, capable d'englober le fil multi-filamentaire le plus efficacement et sans présenter de ségrégation, nous avons, suite à plusieurs essais, mis au point une formulation basée sur un rapport eau efficace-ciment,  $E_{\text{eff}}/C = 0,48$ , un rapport sable sec-ciment,  $S/C = 1,4$  et un rapport extrait sec superplastifiant - ciment,  $SP_{\text{es}}/C = 0,125$  %. A partir de la composition du mortier, nous avons déterminé une composition de coulis représentant la matrice cimentaire du mortier et de par ce fait présentant les mêmes rapports  $E_{\text{eff}}/C = 0,48$  et  $SP_{\text{es}}/C = 0,125$  %. La composition du mortier et du coulis au m<sup>3</sup> est donnée dans le **tableau 2.13**.

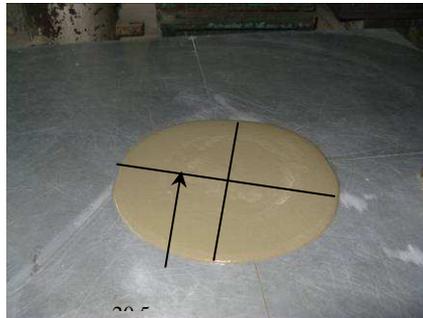
**Tableau 2.13.** Composition du mortier et du coulis.

Composants (kg/m <sup>3</sup> )	Mortier	Coulis
CEMI 52.5 N, (C)	736,3	1250,0
Sable (S)	1031,0	
Superplastifiant, extrait sec (SP <sub>es</sub> )	0,92	1,56
Eau totale (E <sub>tot</sub> )	366,8	603,5
Eau efficace (E <sub>eff</sub> )	353,4	603,5
Masse volumique apparente	2135	1855

### 2.7.5 Malaxage et caractérisation de l'ouvrabilité

Le mortier et le coulis ont été malaxés dans un malaxeur à mortier normal. Pour chaque gâchée de mortier (d'environ 1,15 l) 857 g de ciment sont mélangés avec 1200 g de sable à petite vitesse pendant 1 min ; ensuite 425 g d'eau préalablement mélangés avec 3 g de superplastifiant (en solution) sont ajoutés et le mélange est malaxé pendant 30 s à petite vitesse ; ensuite le malaxeur est arrêté et le mélange est homogénéisé manuellement (avec une spatule) pendant 30 s ; enfin le mélange est malaxé pendant 1 min à grande vitesse. La même procédure de malaxage a été appliquée au coulis dont la gâchée était composée de 350 g de ciment, 168,2 g d'eau et 1,23 g de superplastifiant (en solution).

Afin de caractériser la fluidité du mortier à l'issue du malaxage, nous avons procédé à la mesure de l'étalement sur une surface lisse préalablement mouillée en utilisant le moule de l'appareil de Vicat pour placer le mortier frais. L'étalement mesuré est de 20,5 cm (**figure 2.43**).



**Figure 2.43.** Essai d'étalement sur le mortier.

L'étalement peut être exprimé aussi en % de la variation du diamètre de la galette formée par rapport au diamètre du moule selon la norme expérimentale ISO 9812 suivant la formule :

$$E = (D_f - D_i) / D_i \quad (2.3)$$

où :  $D_f$  est le diamètre final de la galette formée par le mortier et  $D_i$  est le diamètre intérieur du moule.

Compte tenu que  $D_i = 8,3$  cm et  $D_f = 20,5$  cm,  $E = 147$  %, ce qui indique un mortier particulièrement fluide.

### 2.7.6. Temps de prise

La détermination du temps de début et de fin de prise a été réalisée avec l'appareil de Vicat suivant la norme NF P15-431 sur le mortier et le coulis en l'état. Les résultats sont présentés sur la **figure 2.44** pour le mortier et **figure 2.45** pour le coulis.

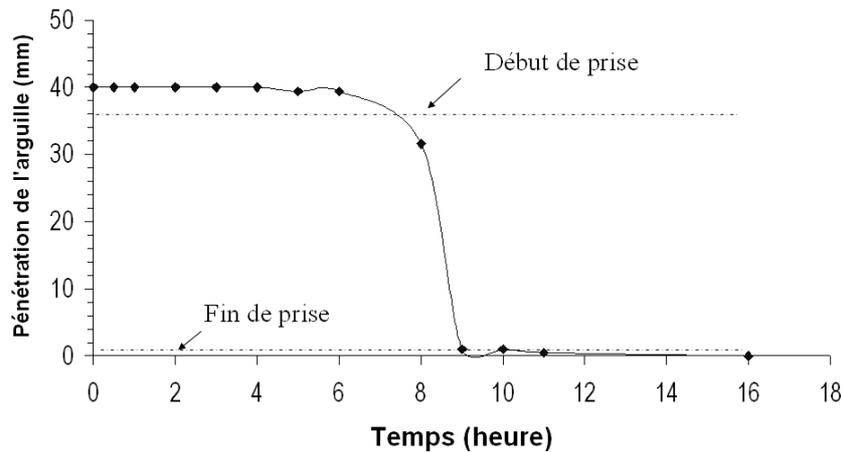


Figure 2.44. Mesure du temps de prise du mortier.

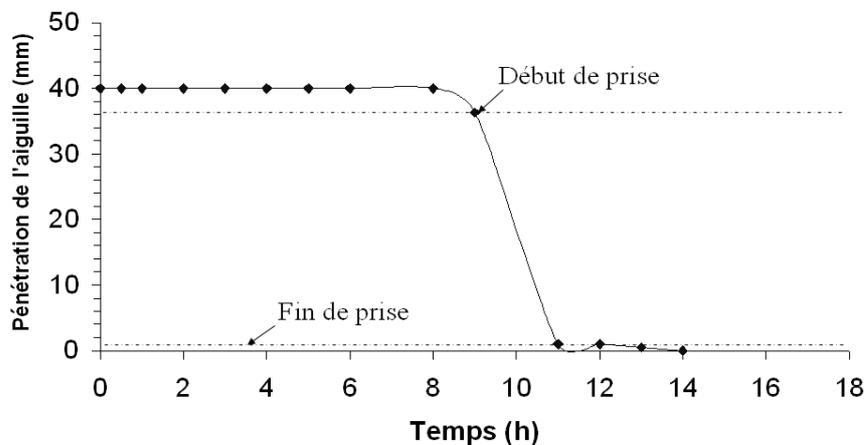


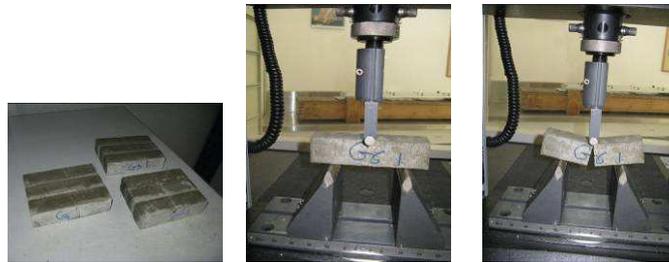
Figure 2.45. Mesure du temps de prise du coulis.

Nous constatons que, dans le cas du mortier (**figure 2.44**), le début de prise a lieu à partir de 7h30 environ et la fin de prise à partir de 9h environ et, que dans le cas du coulis (**figure 2.45**), le début de prise est à partir de 9h environ (retardé de 1h30 environ par rapport au mortier) et la fin de prise à partir de 11h environ (retardé 2h environ par rapport au mortier). Ces temps sont longs comparés à ceux du ciment (début de prise à 3h05 sur pâte à consistance normale) certainement en raison de l'effet retardateur de l'adjuvant superplastifiant et le plus important rapport eau/ciment du mortier et du coulis par rapport à la pâte à consistance normale. Le retard de prise ne perturbe pas l'enrobage du fil multi-filamentaire, bien au contraire il permet une meilleure pénétration par absorption capillaire en particulier lorsque le fil est sec.

### 2.7.7 Résistances mécaniques du mortier durci

Les résistances mécaniques du mortier durci en compression et en flexion ont été déterminées par les essais sur des éprouvettes 4x4x16 cm suivant la norme européenne EN 196-1. A l'issue du malaxage, le mortier était mis en place par coulage direct dans les moules en une seule couche et sans secousse compte tenu de sa grande fluidité. Les moules ont été conservés 1 jour à 20°C à l'abri de l'évaporation et, après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à 20°C jusqu'à la date de l'essai. Les essais ont été réalisés à différents âges entre 1 et 28 jours sur des lots composés de trois éprouvettes 4x4x16 cm pour la flexion et de six

éprouvettes 4x4x4 cm pour la compression (par gâchée). Une presse hydraulique de 3000 kN a été utilisée pour les essais de compression et une presse mécanique de 30 kN pour les essais de flexion trois points (**figure 2.46**).



**Figure 2.46.** Lots d'éprouvettes 4x4x16 cm et essai de flexion trois points sur une éprouvette avant et après la rupture.

La résistance en compression  $f_c$  (en MPa) a été déterminée à partir de la formule suivante :

$$f_C = \frac{P_c}{b^2} \quad (2.4)$$

où :  $P_C$  : la charge à la rupture en compression (N) ;

$b^2$  : la section d'éprouvette (en général 1600 mm<sup>2</sup>).

La résistance en flexion  $f_t$  (en MPa) a été déterminée à partir de la formule suivante :

$$f_t = \frac{3P_f l}{2bh^2} \quad (2.5)$$

où :  $P_F$  : charge à la rupture en flexion (N) ;

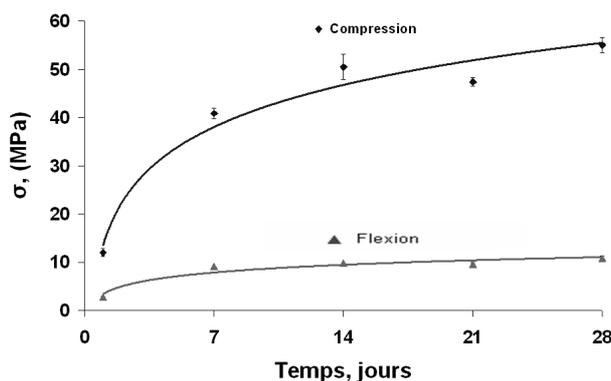
$l$  : portée de l'éprouvette (100 mm) ;

$b$  et  $h$  : sont respectivement le largeur et la hauteur d'éprouvette (en général  $b = h = 40$  mm).

L'évolution de la résistance en compression et en flexion du mortier est présentée dans le **tableau 2.14** et sur la **figure 2.47**. Nous constatons que l'évolution des résistances aussi bien en compression qu'en traction est très rapide entre 1 et 7 jours et qu'elle ralentit par la suite. Ainsi, à 7 jours la résistance en compression du mortier atteint environ 75% de la valeur à 28j et la résistance en flexion 85% de la valeur à 28j.

**Tableau 2.14.** Evolution de la résistance en compression et de la résistance en flexion du mortier jusqu'à 28 jours.

temps	Compression		Flexion	
	$\sigma_{\max}$	Coefficient de variation	$\sigma_{\max}$	Coefficient de variation
jours	MPa	%	MPa	%
1	12,0	7,06	2,89	1,87
7	40,9	2,70	9,11	0,31
14	50,5	5,23	9,83	0,34
21	47,4	1,94	9,66	3,17
28	55,1	2,88	10,83	5,31



**Figure 2.47.** Evolution de la résistance en compression et de la résistance en flexion du mortier jusqu'à 28 jours.

Nous avons constaté aussi une relative dispersion des valeurs de la résistance en compression du mortier entre 7 et 28 jours (**figure 2.47**). Nous avons attribué cette dispersion à la très forte capacité de la presse hydraulique comparativement à la charge de rupture de nos échantillons qui aurait pu induire une certaine imprécision. Pour cette raison, nous avons procédé à une étude statistique de la dispersion des valeurs de résistance en compression et en flexion à 28 jours sur 8 lots de trois éprouvettes 4x4x16 cm résultant de 8 gâchées indépendantes. Les résultats figurent dans les **tableaux 2.15** et **2.16**.

Il en résulte que la dispersion des valeurs dans un lot éprouvettes peut être significative avec un coefficient de variation maximal en compression de l'ordre de 9% et un coefficient de variation maximal en flexion de l'ordre de 17%, néanmoins, cette dispersion des valeurs se réduit très significativement entre les lots ou avec le coefficient de variation est de l'ordre de 3% et le coefficient de variation en flexion de l'ordre de 5%. Ce qui permet de conclure que la

valeur moyenne de la résistance en compression et en flexion bénéficie d'un très satisfaisant degré de fiabilité.

**Tableau 2.15.** Résistance en compression à 28j.

Gâchée	Résistance en compression	Écart type
	MPa	MPa
G1	55.2	2.11
G2	54.1	3.94
G3	55.5	4.18
G4	57.5	3.98
G5	53.3	4.71
G6	52.7	2.56
G7	55.8	1.89
G8	56.3	3.01
Moyenne	55.1	
Ecart type	1.58	

**Tableau 2.16.** Résistance en flexion à 28j.

Gâchée	Résistance en flexion	Ecart type
	MPa	MPa
G1	10.93	1.47
G2	10.28	1.76
G3	9.83	0.68
G4	11.11	0.64
G5	11.11	0.12
G6	11.53	0.06
G7	11.01	0.84
Moyenne	10.83	
Ecart type	0.58	

### 2.7.8 Module de Young du mortier

La mesure du module de Young a été effectuée sur deux éprouvettes cylindriques 16x32 cm par extensiométrie à l'âge de 28 jours (**figure 2.48**). En premier lieu, nous avons vérifié la résistance en compression  $f_c$  du mortier (selon la NF P 18-406) sur deux autres éprouvettes cylindriques 16x32 cm gâchées dans les mêmes conditions que les précédentes. Ensuite, nous avons procédé à trois cycles de chargement-déchargement en compression simple suivant la

méthode préconisée par le LCPC jusqu'à une contrainte maximale égale à  $0,3f_c$  avec une vitesse de 0,5 MPa/s. La déformation des éprouvettes a été mesurée par trois capteurs LVDT fixés sur une distance de 167 mm dans la partie centrale de l'éprouvette. Le module de Young a été déterminé par la pente de la courbe contrainte - déformation des deux derniers cycles pour un chargement entre  $0,1f_c$  et  $0,3f_c$  (figure 2.49). Sa valeur moyenne est égale à 31500 MPa avec un écart type égal à 800 MPa.



Figure 2.48. Essai extensométrique sur éprouvette cylindrique 16\*32 cm.

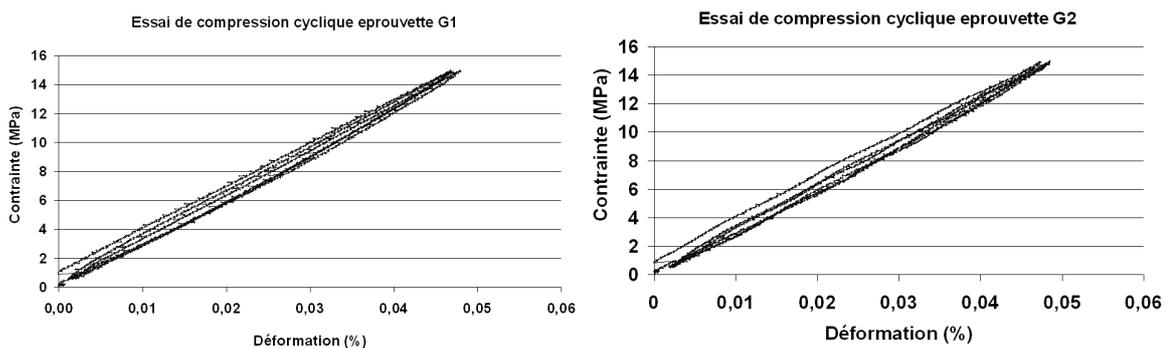


Figure 2.49. Courbes contrainte - déformation obtenus lors des essais cycliques de compression simple sur les deux éprouvettes cylindriques 16\*32 cm.

### 2.7.9 Porosité accessible à l'eau du mortier et masse volumique apparente du mortier et du coulis

Nous avons déterminé la porosité accessible à l'eau du mortier durci. Des éprouvettes cylindriques de diamètre 3,4 cm et de hauteur 24 cm ont été confectionnées et conservées jusqu'à 28 jours dans l'eau. Pour les essais de porosité, nous avons prélevé par sciage sous eau (avec une scie diamanté) la partie centrale de 10 cm de hauteur environ de chaque éprouvette. Compte tenu de la conservation en immersion des éprouvettes et du sciage sous eau, nous avons considéré que les échantillons de mortier étaient en état de saturation et nous avons déterminé par pesée leur masse saturée  $M_{saturée}$ . Ensuite, nous avons déterminé par pesée hydrostatique la masse des échantillons en immersion,  $M_{immergée}$ . Enfin, nous les avons séchés à l'étuve, à 75°C, jusqu'à masse constante et déterminé leur masse sèche,  $M_{sèche}$ . La porosité accessible à l'eau  $p$  est calculée par la formule suivante :

$$p = \left( \frac{(M_{saturée} - M_{sèche})}{(M_{saturée} - M_{immergée})} \right) * 100 \tag{2.6}$$

La valeur moyenne de la porosité accessible à l'eau du mortier déterminée sur 5 échantillons de mortier est égale à 24,7 % avec un écart type de 0,8 %.

On note que la procédure de détermination de la porosité du mortier diverge légèrement de la procédure préconisée par l'AFREM qui préconise une saturation préalable du mortier sous vide avant la pesée hydrostatique. Par conséquent, la porosité mesurée par notre procédure doit être légèrement plus faible mais représente mieux les vides accessibles à l'eau dans nos conditions de conservation.

Grâce à la première partie de la procédure précédente, nous avons aussi calculé la masse volumique apparente,  $\rho$  (en kg/m<sup>3</sup>) des éprouvettes de mortier et de coulis issus de la conservation dans l'eau pendant 28 jours en s'appuyant sur la formule suivante, où les masses ont été déterminées en grammes :

$$\rho = \frac{M_{Saturée}}{(M_{Saturée} - M_{immergée})} \times 1000 \quad (2.7)$$

Les valeurs moyennes et les écarts type de la masse volumique apparente saturée, déterminé sur 25 échantillons de mortier et sur 14 échantillons de coulis sont présentées dans le **tableau 2.17**.

**Tableau 2.17.** Masse volumique apparente saturée du mortier et du coulis à 28 jours.

Masse volumique apparente saturée	Mortier	Coulis
Valeur moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	2203,6	2041,1
Ecart type (kg/m <sup>3</sup> )	11,5	35,1

Si nous comparons la masse volumique apparente saturée du mortier et du coulis par rapport à la masse volumique apparente à l'état frais (**tableau 2.13**), nous constatons que la première est environ 3,1% et 9.1 % respectivement supérieure à la seconde. Deux raisons expliquent cette différence. En premier lieu avant prise, les éprouvettes de mortier et de coulis présentent un léger tassement de leur structure solide formant une ressuée de quelques millimètres en surface libre qui conduit à la densification du corps de l'éprouvette donc à l'augmentation de la masse volumique apparente et, en deuxième lieu, après démoulage et pendant leur conservation dans l'eau, les éprouvettes de mortier et de coulis absorbent une faible quantité d'eau (principalement en raison de la contraction le Chatelier au cours de l'hydratation du ciment).



## **Chapitre 3**

# **Etude et caractérisation de l'imprégnation des fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire**

### 3.1 Introduction

L'objectif de ce travail est de relier les caractéristiques d'imprégnation des fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire au comportement mécanique du fil à l'arrachement. L'intérêt est notamment d'identifier des paramètres physiques et microstructuraux décrivant l'état d'imprégnation du fil, quantifiables expérimentalement, et susceptibles d'être pris en compte dans la modélisation du comportement mécanique des bétons textiles.

Dans ce contexte, il nous est apparu judicieux de commencer notre étude du comportement physique et mécanique des fils multi-filamentaires enrobés dans une matrice cimentaire par l'étude de l'imprégnation des fils par la matrice cimentaire. Pour cela, nous avons associé cinq fils multi-filamentaires de verre à trois prétraitements du fil appliqués avant l'enrobage par la matrice cimentaire, afin de constituer quinze couples fil / prétraitement différents utilisés pour réaliser les éprouvettes de fils enrobés présentées au **chapitre 2**. Nous avons ainsi obtenu quinze états d'imprégnation différents, que nous avons caractérisé qualitativement et quantitativement en utilisant différentes méthodes expérimentales. Pour certaines méthodes, un sixième fil, de chanvre, a également été caractérisé.

La première de ces méthodes est basée sur des observations au microscope électronique à balayage. Elle a permis d'évaluer qualitativement l'influence du prétraitement des fils multi-filamentaires sur la structuration de l'interface fil multi-filamentaire - matrice cimentaire et a conduit à déterminer un indice d'imprégnation du fil lié à la profondeur de pénétration de la matrice dans le fil multi-filamentaire. Les deux autres méthodes utilisées consistent à s'intéresser à des mesures quantitatives liées au volume et de la géométrie de la porosité inter-filamentaires du fil. Elles sont donc dépendantes de l'imprégnation du fil par la matrice cimentaire et, de ce fait, sont deux points de vue différents sur l'imprégnation. L'une est basée sur des mesures de porosimétrie mercure. L'autre consiste à mesurer un débit d'écoulement d'eau le long du fil imprégné.

Après avoir présenté dans trois parties successives les trois méthodes de caractérisation utilisées et les résultats qu'elles nous ont permis d'obtenir, ce chapitre confronte l'indice d'imprégnation déterminé à partir des observations en microscopie électronique aux mesures des autres paramètres physiques du fil imprégné qui ont été déterminés par porosimétrie mercure et par essai d'écoulement d'eau. L'analyse des relations entre ces différents paramètres permet de comprendre les interactions qui se produisent entre la matrice cimentaire et les fils multi-filamentaires au moment du coulage, ce qui permet de préciser la structuration de l'imprégnation du fil multi-filamentaire par la matrice.

### 3.2 Observations au microscope électronique à balayage

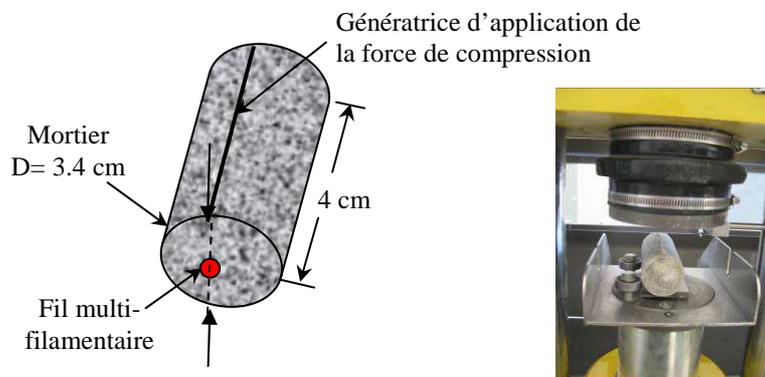
#### 3.2.1 Préparation des éprouvettes

Nous rappelons (voir **Chapitre 2**, §2.6.2) que trois modes de prétraitement des fils multi-filamentaires ont été mis en œuvre avant l'enrobage par la matrice cimentaire afin de mieux étudier les principaux paramètres qui influent sur le processus d'imprégnation et la structuration de l'interface fil-matrice :

- Le prétraitement désigné W pour lequel le fil multi-filamentaire a été mouillé avant d'être enrobé par la matrice cimentaire.

- Le prétraitement désigné D pour lequel le fil multi-filamentaire a été maintenu sec avant d'être enrobé par la matrice cimentaire.
- Le prétraitement PI pour lequel le fil a été pré-imprégné manuellement par un coulis cimentaire fluide (correspondant à la phase liante de la matrice cimentaire) avant d'être enrobé par la matrice cimentaire.

Des éprouvettes cylindriques de 3,4 cm de diamètre et de 25 cm de longueur ont été confectionnées avec le fil multi-filamentaire prétraité, placé suivant l'axe longitudinal du cylindre. Après démoulage à 24 heures, elles ont été conservées dans l'eau jusqu'à l'âge 28 jours. A la fin de la période de conservation, un sciage (scie diamantée) a été opéré pour prélever dans la partie centrale des éprouvettes un échantillon de 4 cm de longueur qui a été fendu en deux suivant deux génératrices diamétralement opposées (**figure 3.1**) et séché à 40°C jusqu'à masse constante. Ensuite, les deux surfaces de rupture de l'échantillon prélevé ont été métallisées à l'or et observées au microscope électronique à balayage à divers grossissements.



**Figure 3.1.** Préparation et fendage des prélèvements avant l'observation au MEB.

Il faut souligner que le fendage des échantillons composites permet l'observation de l'interface fil-matrice sur une longueur significative (4 cm le long du fil) et, de par ce fait, il permet d'apprécier le degré d'imprégnation du fil avec une précision satisfaisante. En revanche, en raison de l'entremêlement des filaments et des mèches, lors de la séparation des deux parties de l'échantillon fendu, il est possible que certains filaments ou mèches soient étirés ou déplacés de leur position initiale modifiant la structuration du fil par rapport à son état initial dans la matrice cimentaire. Afin d'évaluer l'éventuelle déstructuration du fil par le fendage, nous avons procédé aussi à des observations au MEB des sections perpendiculaires à l'axe longitudinal des éprouvettes composites. Or, nous avons constaté que le sciage de l'éprouvette et même le polissage de la section altéraient significativement les filaments surtout ceux situés dans la zone centrale du fil, peu ou pas imprégnée par la matrice. Ainsi, les observations sur sections perpendiculaires donnaient des résultats beaucoup moins fiables que celles obtenues sur les surfaces longitudinales issues du fendage malgré l'éventuelle déstructuration des filaments et des mèches.

### 3.2.2 Fil multi-filamentaire SG1

La **figure 3.2** montre les sections longitudinales des échantillons de fil multi-filamentaire SG1 enrobé dans la matrice cimentaire pour les trois modes de prétraitement du fil. Il faut noter que cette première approche est à très faible grossissement laissant apparaître uniquement les

mèches. Les filaments de  $14\ \mu\text{m}$  de diamètre ne sont pas identifiables à cette échelle. Néanmoins, la comparaison des trois faciès, permet de constater qu'à cette échelle l'état du fil diffère selon le mode de prétraitement.

Dans le cas du prétraitement W (fil mouillé) les mèches restent relativement parallèles alors que dans le cas du prétraitement D (fil sec) les mèches semblent plus dispersées dans la matrice cimentaire. De plus, le diamètre apparent du fil avec le prétraitement D est un peu plus grand que celui du fil avec le prétraitement W. Ces deux constats peuvent être facilement attribués au rôle de l'eau dans le cas du prétraitement W. En effet, sous l'action des tensions superficielles développées par l'eau dans les interstices du fil, les filaments et les mèches subissent un resserrement les uns contre les autres qui, d'une part, fait diminuer globalement le diamètre apparent du fil et, d'autre part, maintient les mèches et filaments plus proches de l'axe longitudinal du fil et diminue leur dispersion lors du coulage de la matrice cimentaire.

Par ailleurs, nous constatons que, pour ces deux modes de prétraitement, la pénétration de la matrice cimentaire reste très limitée à l'extrême périphérie du fil. En revanche, le faciès du fil avec le prétraitement PI diffère complètement des deux fils précédents en raison de la forte pénétration du coulis de pré-imprégnation dans les espaces entre les mèches.

Enfin, le diamètre apparent du fil avec le prétraitement PI est plutôt comparable à celui et du fil avec le prétraitement W. Nous pouvons considérer que le caractère fluide du coulis de prétraitement engendre un effet de resserrement des mèches similaire à celui de l'eau mais il faut considérer en contrepartie que la présence des particules solides du ciment dans les interstices du fil devrait tendre vers un écartement des mèches et des filaments.

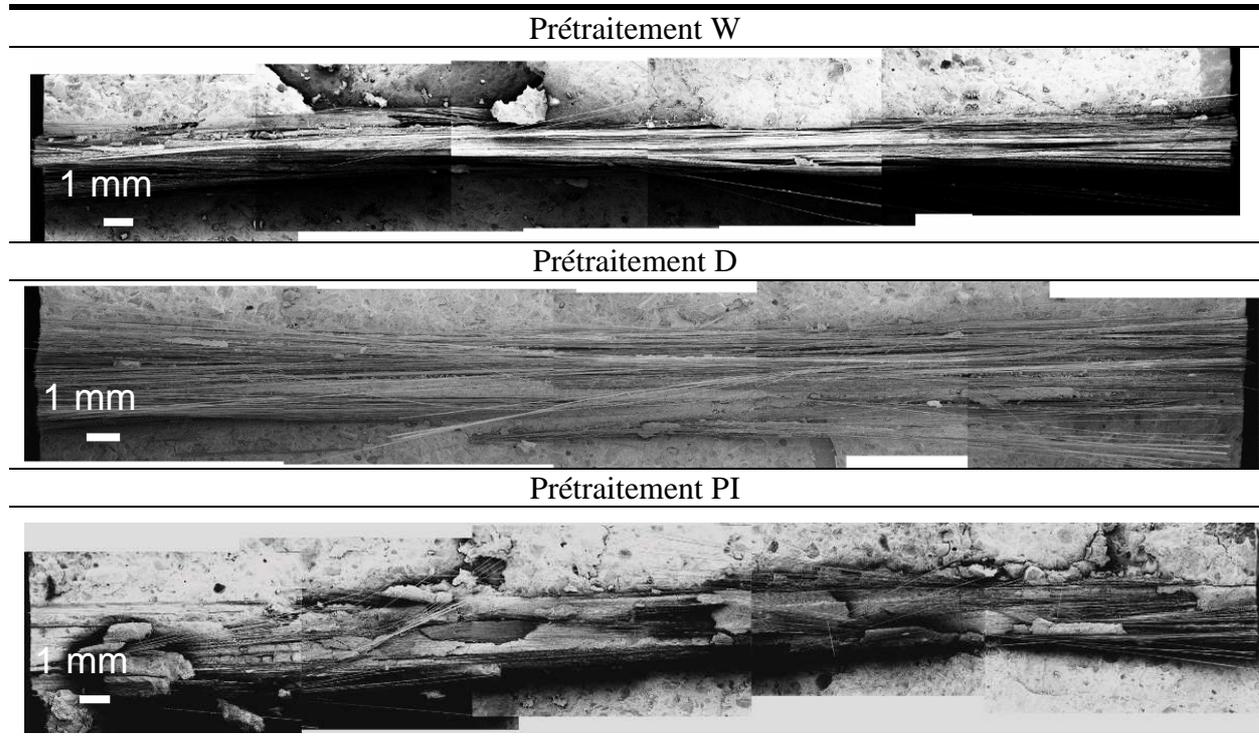


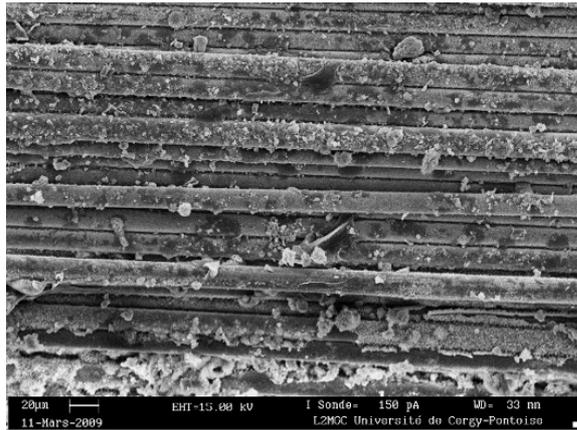
Figure 3.2. Section longitudinale du fil SG1 pour les trois modes de prétraitement (G=4).

Les **figures 3.3, 3.4 et 3.5** montrent plusieurs détails caractéristiques de l'imprégnation du fil par la matrice cimentaire pour les trois modes de prétraitement respectivement.

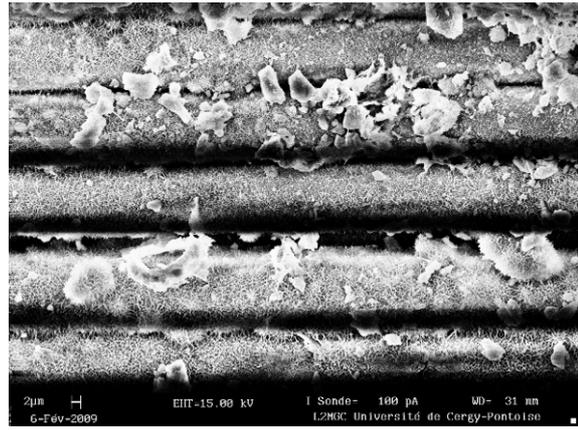
Nous constatons que pour le prétraitement W de très faibles dépôts de produits d'hydratation du ciment viennent cristalliser entre les filaments (**figure 3.3 a et b**). Des faciès similaires sont constatés sur les filaments périphériques (**figure 3.3 c et d**). Dans les deux cas, la quantité des produits hydratés présents entre filaments n'est pas suffisante pour renforcer leur cohésion mais peut influencer sur le frottement des filaments lors de l'essai d'arrachement. En revanche, dans le cas de la zone périphérique du fil des dépôts significatifs de matière solide existent entre les mèches indiquant la bonne imprégnation par la matrice cimentaire de ces espaces (**figure 3.3 c**).

Le prétraitement D présente des faciès sensiblement proches des précédents (**figure 3.4 a et b**) confirmant que dans la zone périphérique du fil l'imprégnation a lieu essentiellement dans les espaces laissés entre mèches que ceux laissés entre filaments. A notre avis, les espaces entre filaments dans une mèche ne sont pas suffisamment larges pour loger les particules du ciment et c'est essentiellement la diffusion des phases solubles dans ces espaces remplis par l'eau de mouillage (dans le cas du prétraitement W) ou absorption de l'eau de la matrice cimentaire (dans le cas du prétraitement D) qui permettent la cristallisation de la faible quantité de produits hydratés du ciment entre les filaments d'une mèche. En effet, ces espaces souvent de l'ordre du micron sont inférieurs à la grande majorité des particules du ciment.

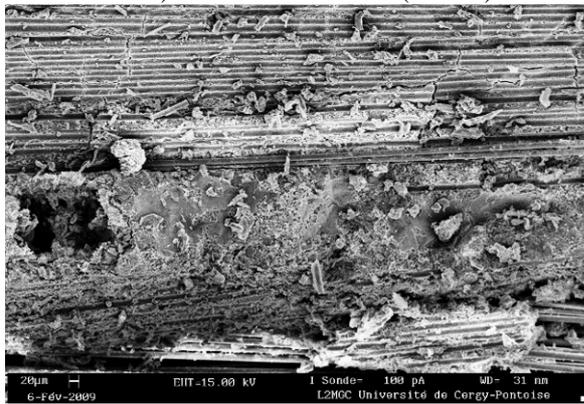
Les observations des détails morphologiques du prétraitement PI viennent renforcer les hypothèses précédentes. En effet, nous constatons (**figure 3.5 a, b, c et d**) que la pénétration du coulis se limite essentiellement dans les espaces entre les mèches. Les filaments ne sont enrobés que par une fine pellicule de produits hydratés insuffisante pour créer des liaisons solides entre les filaments (**figure 3.5 d**). Nous constatons aussi qu'il n'y a pas de différences significatives entre la zone périphérique et la zone de cœur du fil permettant de conclure que la pré-imprégnation du fil par le coulis est similaire sur toute la section.



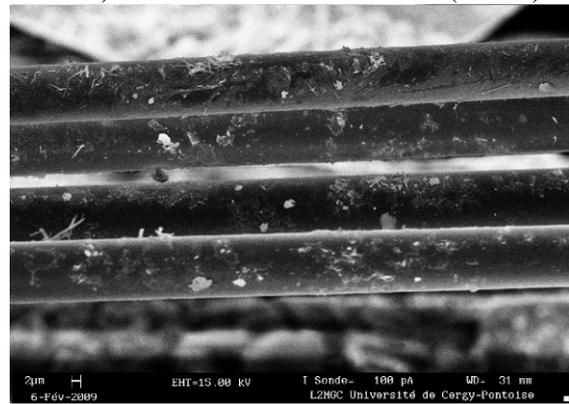
a) Filaments de cœur (G=175)



b) Détail des filaments de cœur (G=600)

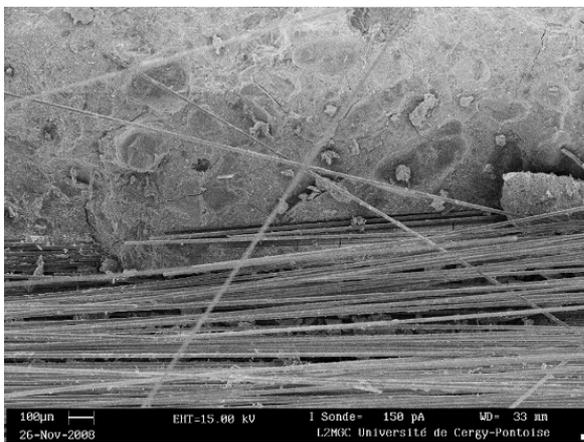


c) Filaments périphériques (G=60)

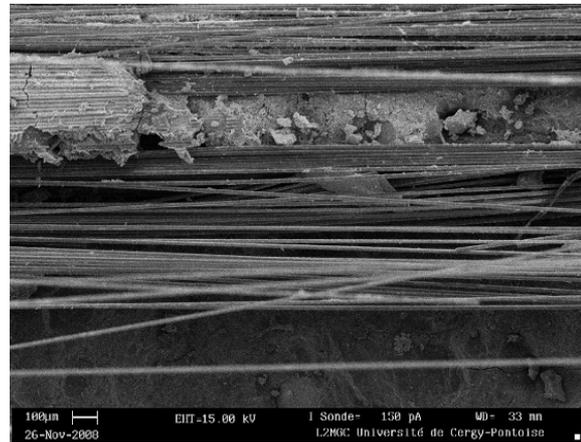


d) Détail des filaments de périphériques (G=600)

**Figure 3.3.** Fil multi-filamentaire SG1 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire.

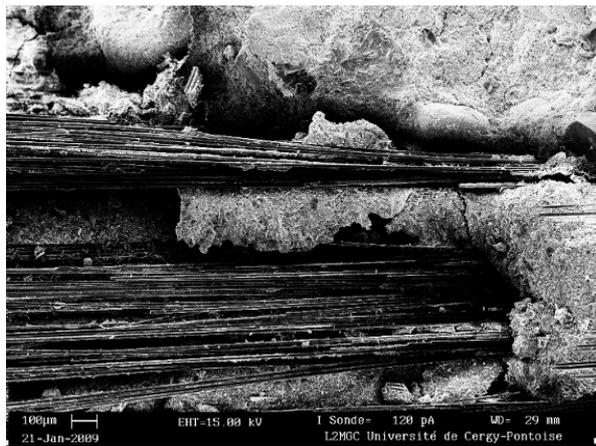


Filaments de périphériques (G= 30)

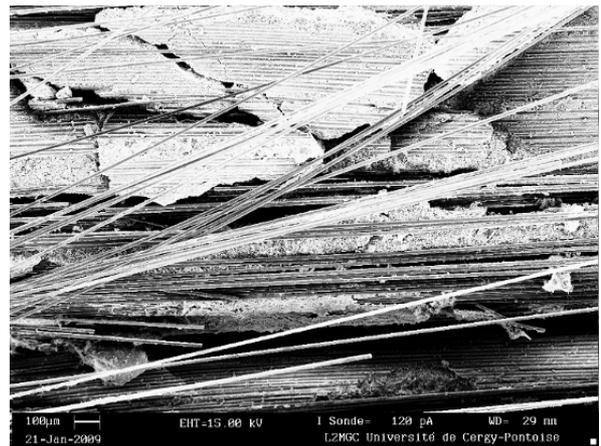


Filaments périphériques (G=30)

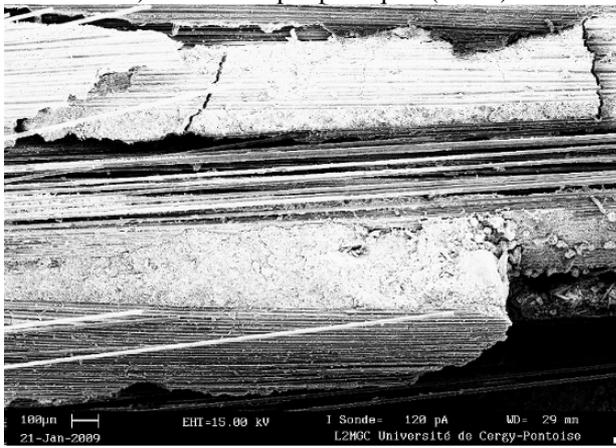
**Figure 3.4.** Fil multi-filamentaire SG1 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire.



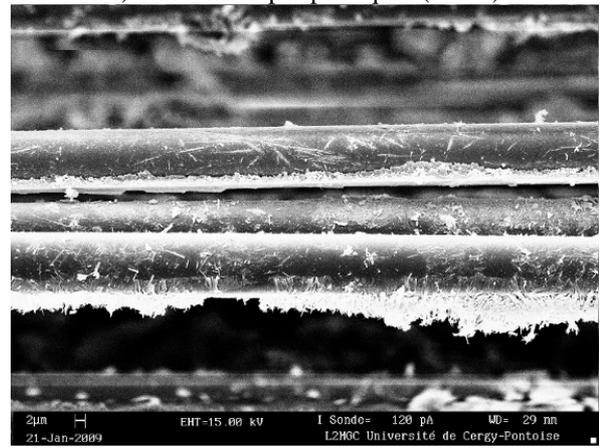
a) Filaments périphériques (G=30)



b) Filaments périphériques (G=30)



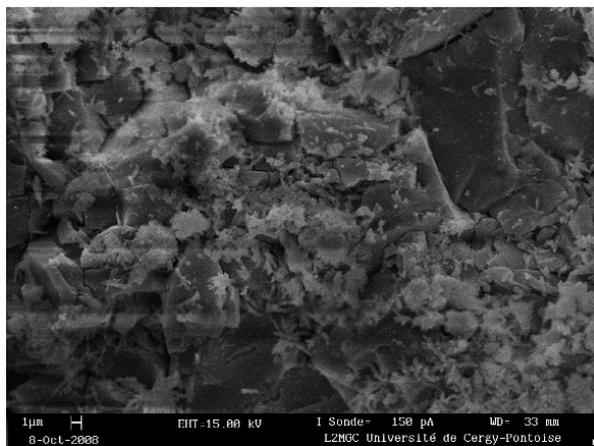
c) Filaments de cœur (G=30)



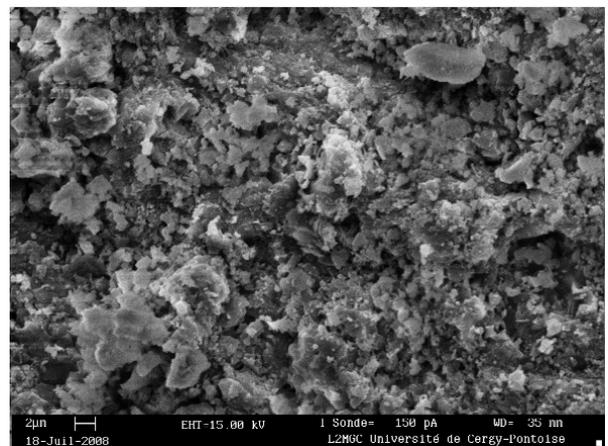
d) Détail des filaments de cœur (G=60)

**Figure 3.5.** Fil multifilamentaire SG1 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire.

A titre de comparaison, nous avons présenté sur la **figure 3.6** des aspects caractéristiques de la matrice cimentaire dans une zone éloignée du fil multi-filamentaire. Nous constatons que la densité des produits formés est très importante et sans commune mesure avec celle observée entre filaments.



(G=1200)



(G=1500)

**Figure 3.6.** Aspects typiques de la matrice cimentaire des échantillons hors fil multi-filamentaire.

### 3.2.3 Fil multi-filamentaire SG2

La **figure 3.7** montre les sections longitudinales des échantillons de fil multi-filamentaire SG2 enrobé dans la matrice cimentaire pour les trois modes de prétraitement du fil très faible grossissement.

Nous constatons qu'à cette échelle les faciès du fil pour les différents prétraitements sont très semblables à ceux du fil SG1. En effet, nous constatons que les mèches demeurent plus parallèles dans le cas du prétraitement W que dans le cas du prétraitement D et que dans les deux cas la pénétration de la matrice cimentaire est relativement limitée à l'extrême périphérie du fil alors que le faciès du fil dans le cas du prétraitement PI est complètement différent des précédents.

Cette forte similitude entre les fils SG1 et SG2 ne se limite pas aux aspects globaux précédents mais concerne aussi les détails. Sur les **figures 3.8, 3.9** et **3.10** nous pouvons constater, comme dans le cas du fil SG1 et pour les trois prétraitements, que la pénétration de la matrice cimentaire est essentiellement limitée aux espaces entre mèches et que la quantité de produits hydratés cristallisés dans les interstices entre les filaments au sein des mèches est faible et insuffisante pour assurer une liaison solide entre filaments.

La seule différence perceptible entre les fils SG1 et SG2 est plutôt quantitative et concerne le cas du prétraitement D. Nous constatons que la pénétration de la matrice cimentaire dans le fil SG2 est un peu plus forte que celle observée dans le cas du fil SG1 (voir **figure 3.7** SG2 D vers les bords des éprouvette) et aussi la quantité de formations cristallisées dans les espaces inter-filamentaires dans la zone centrale du fil un peu plus forte que celle observée sur le fil SG1 (**figure 3.9 c et d**). Toutefois, l'aspect qualitatif de l'imprégnation reste tout à fait comparable.

Nous rappelons ici (voir **Tableau 2.1** dans le chapitre précédent) que les deux fils ont plusieurs caractéristiques structurales communes (même verre, même ensimage, même diamètre des filaments et même masse linéique du fil), leur différence concerne uniquement le nombre de filaments par mèche du fil SG1 qui est deux fois plus faible que celui du fil SG2 (100 au lieu de 200) et consécutivement un nombre de mèches qui est environ deux fois plus fort (55 au lieu de 30). A notre avis, le fait que le fil SG2 est constitué des mèches plus grosses et moins nombreuses se traduit par des espaces libres entre mèches deux fois plus grands dans lesquels la matrice cimentaire peut pénétrer plus facilement surtout lorsque le fil est initialement sec (prétraitement D). Ainsi, l'imprégnation globale est un peu plus profonde et plus de matière cimentaire peut diffuser ou être absorbée par la zone centrale du fil SG2.

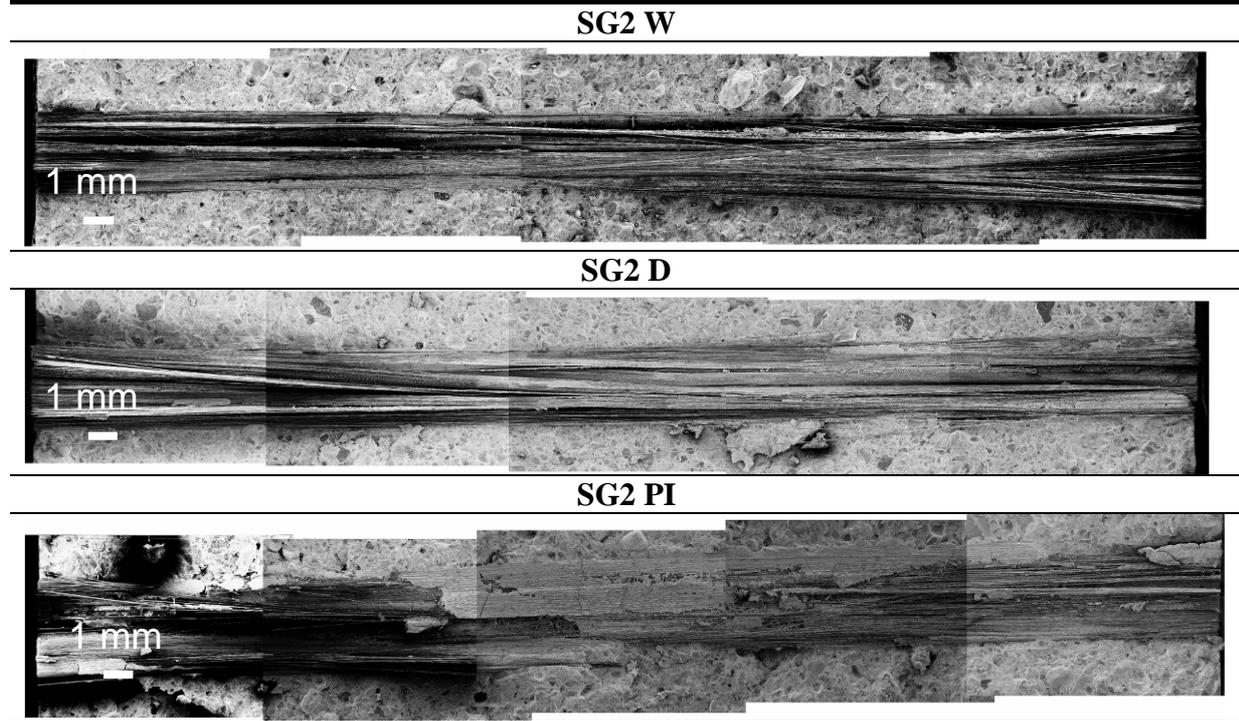
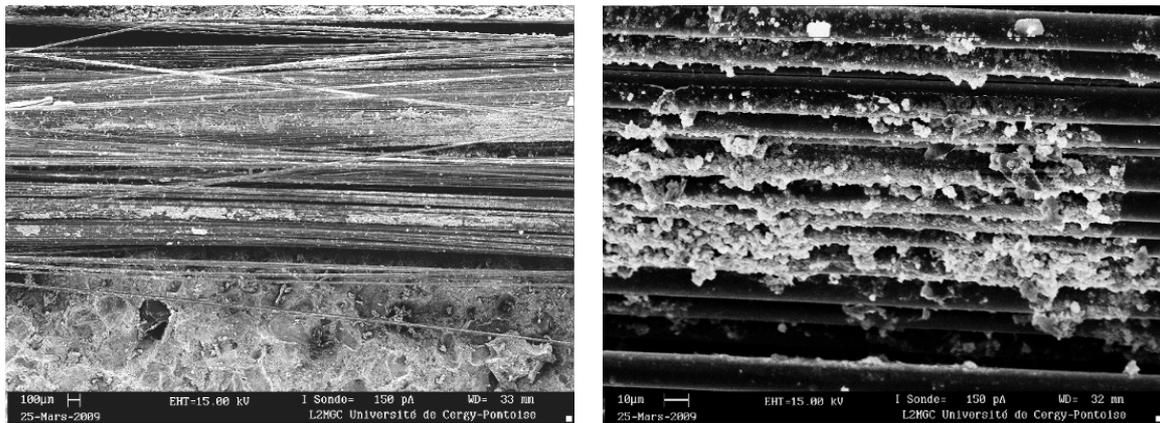


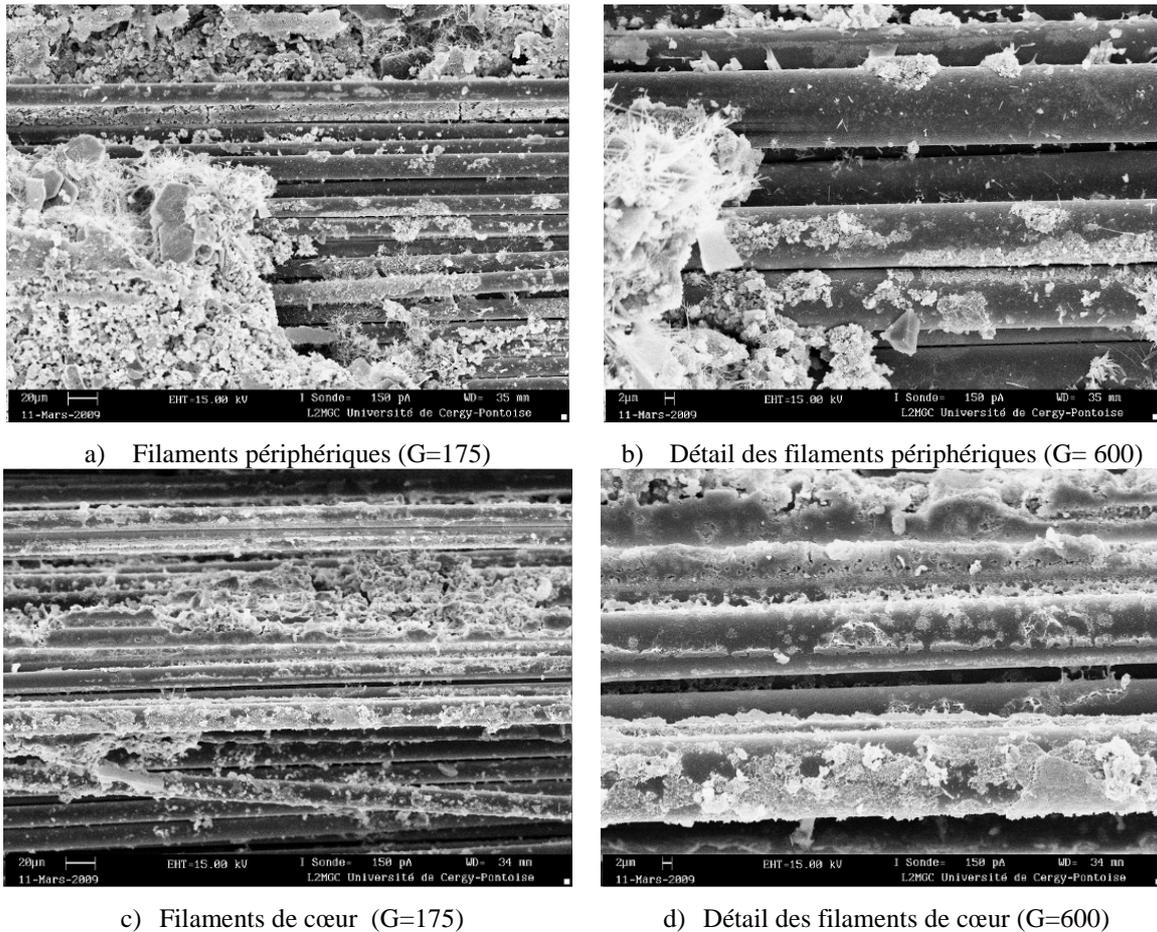
Figure 3.7. Section longitudinale du fil SG2 pour les trois modes de prétraitement (G=4).



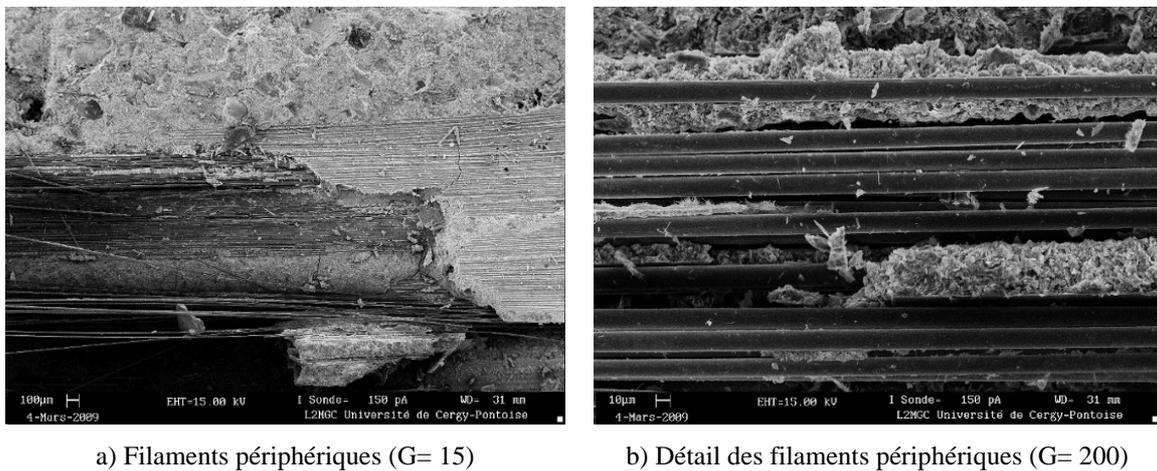
a) Filaments périphériques (G= 15)

b) Détail des filaments périphériques (G= 300)

Figure 3.8. Fil multi-filamentaire SG2 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire.



**Figure 3.9.** Fil multi-filamentaire SG2 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire.



**Figure 3.10.** Fil multi-filamentaire SG2 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire.

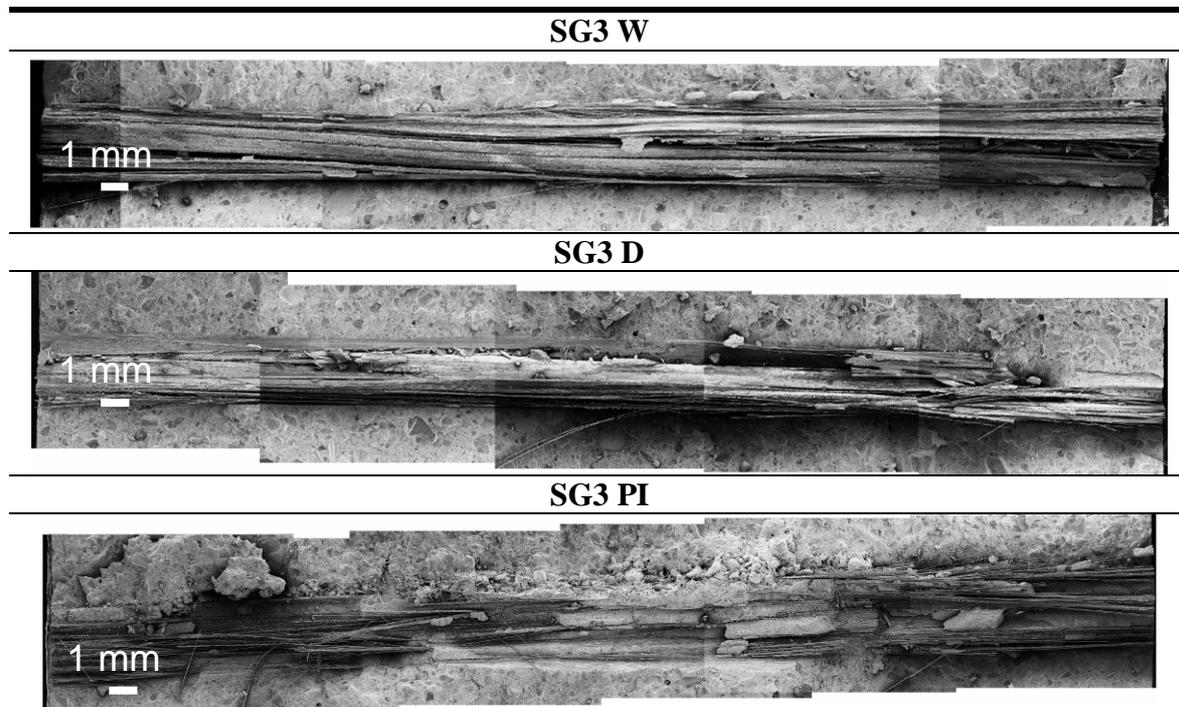
### 3.2.4 Fil multi-filamentaire SG3

Comparativement aux deux fils précédents, le fil multi-filamentaire SG3 présente des différences significatives en ce qui concerne les prétraitements W et D. Seulement, le

prétraitement PI donne un faciès global similaire avec celui des fils SG1 et SG2. Sur la figure 3.11, nous pouvons constater, en effet, que la pénétration du mortier est beaucoup plus importante que celle observée pour les deux fils précédents dans le cas du prétraitement D et dans une moindre mesure dans le cas du prétraitement W. De plus, dans le cas du prétraitement W du fil SG3, les mèches sont moins parallèles que dans le cas du prétraitement D. Une vue plus détaillée de la section longitudinale du fil SG3 avec un prétraitement W donnée sur la **figure 3.12** permet de mieux distinguer la pénétration de la matrice cimentaire dans une couche significative de la zone périphérique du fil et l'entremêlement des mèches le long du fil.

A notre avis, l'explication de ces différences notoires peut être recherchée dans les caractéristiques structurelles et géométriques du fil SG3. En premier lieu, le fil SG3 présente la plus forte variabilité des caractéristiques géométriques en raison de la forte ondulation des mèches (voir **Figures 2.9, 2.10 et 2.11** dans le chapitre précédent). En deuxième lieu, ce fil présente les mêmes caractéristiques structurelles que le fil SG2 (voir **Tableau 2.1** dans le chapitre précédent) mais, un ensimage différent qui selon le fabricant doit favoriser la mouillabilité du fil. La combinaison de ces deux particularités conduit à une imprégnation plus efficace du fil par la matrice cimentaire. De plus, le pré-mouillage du fil (prétraitement W) n'est pas suffisant pour diminuer la forte ondulation des mèches comme dans le cas des deux autres fils alors que lorsque le fil est sec (prétraitement D) la pression hydraulique du mortier sur les mèches lors du coulage doit atténuer cette ondulation.

Malgré ces différences sur l'aspect macroscopique du fil SG3 pour les prétraitements W et D, l'aspect microscopique (à l'échelle du filament) ne diverge pas notablement. Nous constatons sur les **figures 3.13, 3.14 et 3.15** que cette imprégnation reste essentiellement entre les mèches et que les cristallisations dans les espaces inter-filamentaires, bien que plus abondantes, restent insuffisantes pour assurer une liaison solide entre filaments.



**Figure 3.11.** Section longitudinale du fil SG3 pour les trois modes de prétraitement (G=4).

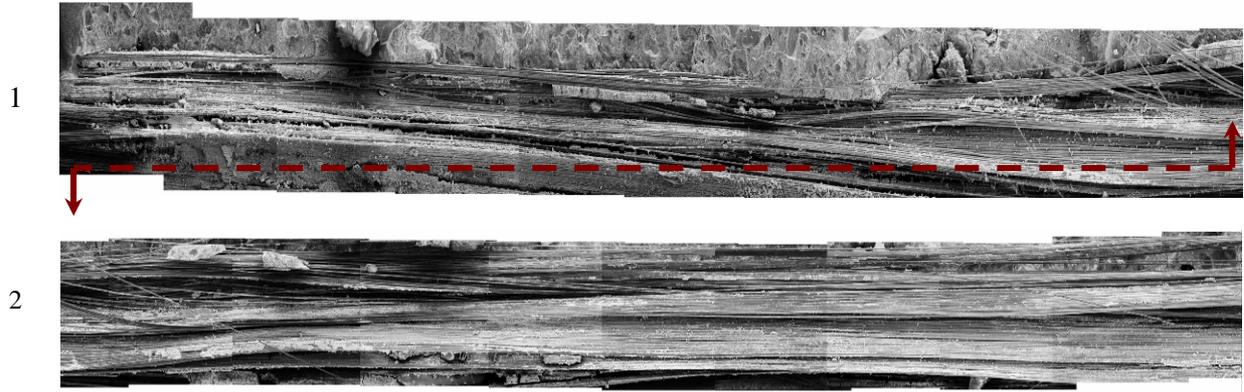
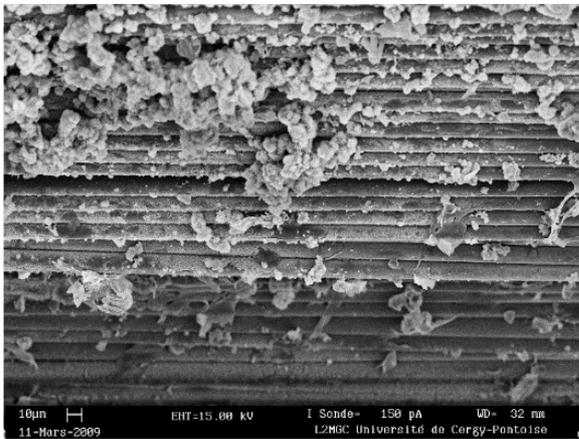
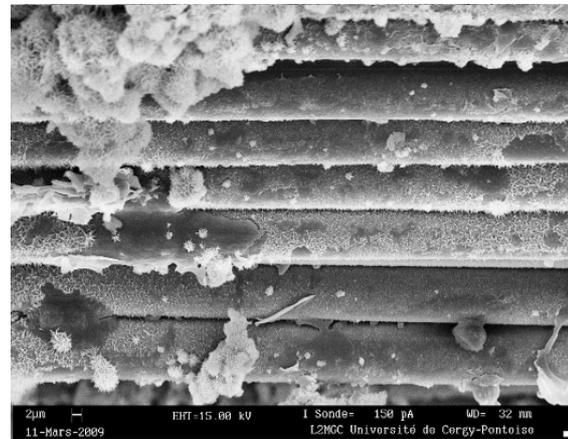


Figure 3.12. Détail de la section longitudinale du fil SG3 pour le prétraitement W ( $G=10$ ).

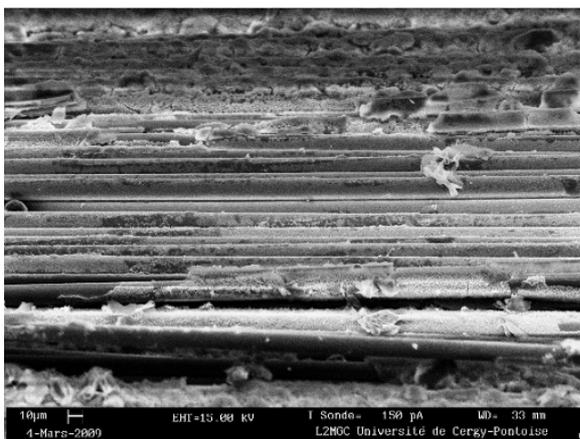


a) Filaments de cœur ( $G=200$ )

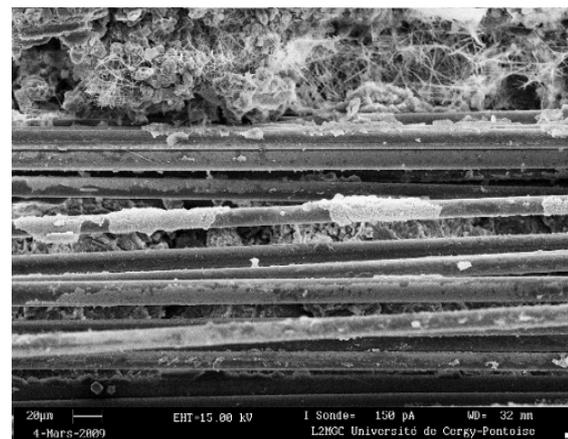


b) Détail des filaments de cœur ( $G=600$ )

Figure 3.13. Fil multi-filamentaire SG3 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire.

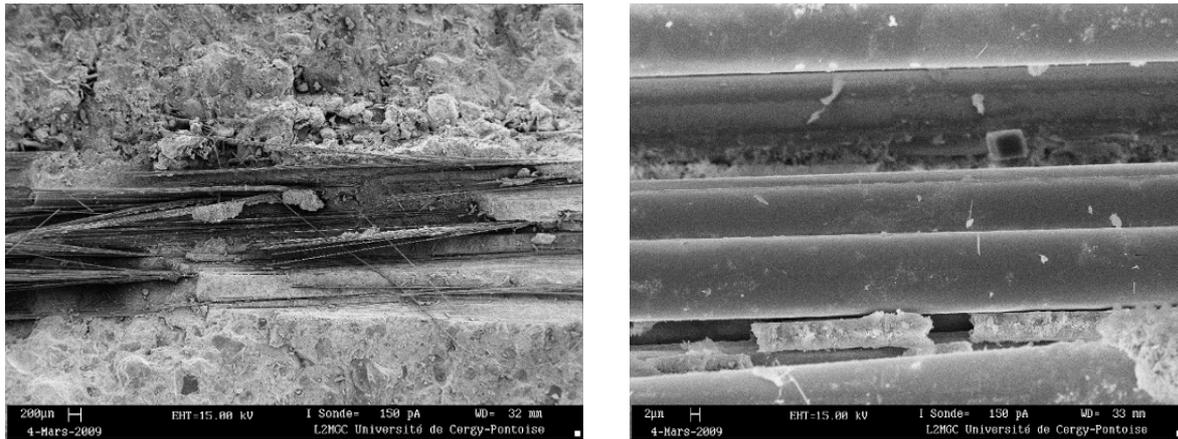


a) Filaments périphériques ( $G=200$ )



b) Filaments périphériques ( $G=200$ )

Figure 3.14. Fil multi-filamentaire SG3 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire.



a) Filaments de cœur (G=75)

b) Détail des filaments de cœur (G=600)

**Figure 3.15.** Fil multi-filamentaire SG3 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire.

### 3.2.5 Fil multi-filamentaire OC1

Nous rappelons que le fil OC1 est à base de verre E (non alcali-résistant), ces filaments sont plus fins que ceux de fils SG (12  $\mu\text{m}$  au lieu de 14  $\mu\text{m}$ ) et l'ensimage est différent. Le nombre de filaments par mèche est plus grand que celui des fils SG2 et SG3 (270 au lieu de 200) et le nombre de mèches dans le fil légèrement supérieur (40 au lieu de 35). De plus, le fil OC1 est capable de retenir une plus grande quantité d'eau que les fils SG lors du mouillage (voir **figure 2.16** dans le chapitre précédent) bien que sa variabilité géométrique soit plutôt faible. Il est normal que ces différences structurelles, géométriques et physiques impactent le processus d'imprégnation du fil OC1 par la matrice cimentaire et la structuration de l'interface.

Néanmoins, sur le plan global de l'imprégnation en fonction des différents prétraitements (**figure 3.16**), l'état du fil OC1 semble proche de celui du fil SG2 : une imprégnation plus forte du fil dans le cas du prétraitement D par rapport au prétraitement W et des mèches plus parallèles dans le cas du prétraitement W par rapport au prétraitement D. Comme les fils SG la pénétration du coulis dans le cas du prétraitement PI est forte sur toute la section.

Sur le plan microstructural nous constatons, en revanche, que la pénétration de la matrice cimentaire ne se limite pas aux espaces entre mèches dans les cas des prétraitements W et D (**figures 3.17** et **3.18**), une quantité importante de produits d'hydratation du ciment vient cristalliser dans les espaces inter-filamentaires. Bien que cette cristallisation ne présente pas une continuité systématique sur la longueur du fil de manière à relier solidement les filaments, localement elle peut contribuer à une reprise d'efforts plus significative lors d'un essai d'arrachement. Cette cristallisation plus abondante des produits hydratés entre les filaments est confirmée aussi dans le cas du prétraitement PI (**figure 3.19**).

A notre avis, c'est essentiellement la plus forte capacité de rétention de l'eau du fil OC1 qui favorise la cristallisation des produits hydraté du ciment dans les espaces inter-filamentaires et l'origine de cette capacité peut en grande partie être attribuée à la nature de l'ensimage (favorisant le mouillage).

Il faut souligner ici que les observations au microscope électronique à balayage n'ont pas permis de détecter des altérations visibles sur les filaments (attaque de la surface lisse des

filaments et augmentation du relief, microfissurations ou éclats). Nous en déduisons que pour la durée de nos essais le verre E n'est pas encore attaqué par l'alcalinité du ciment.

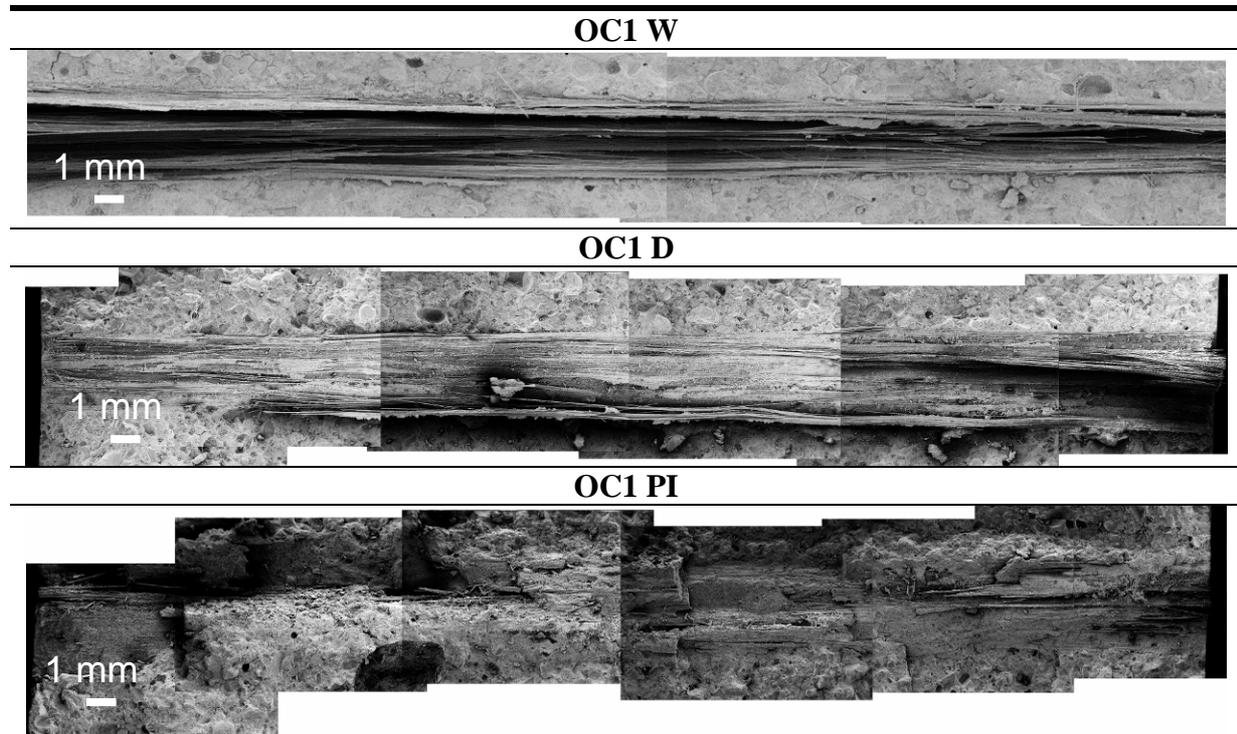
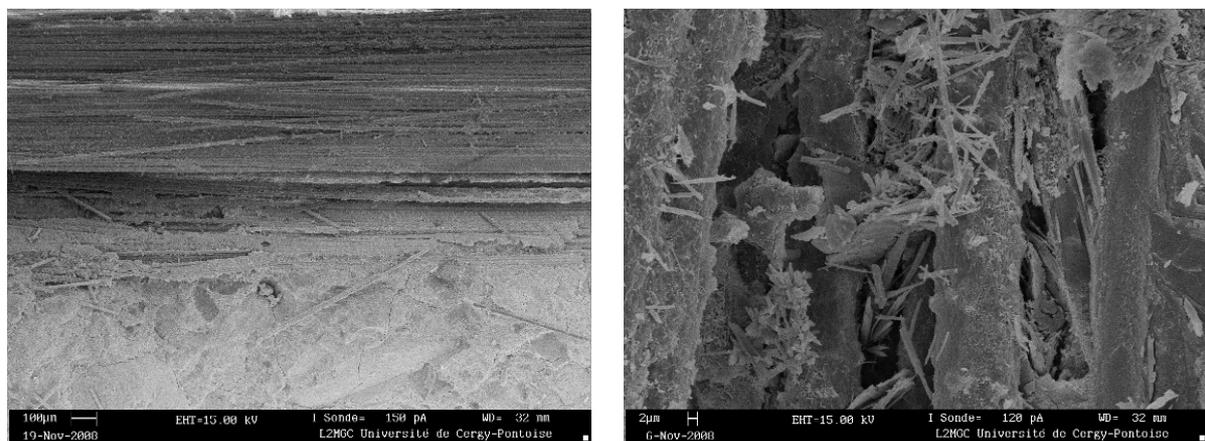


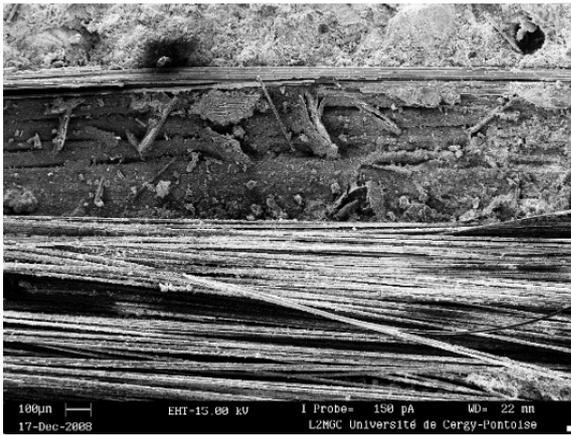
Figure 3.16. Section longitudinale du fil OC1 pour les trois modes de prétraitement (G=4).



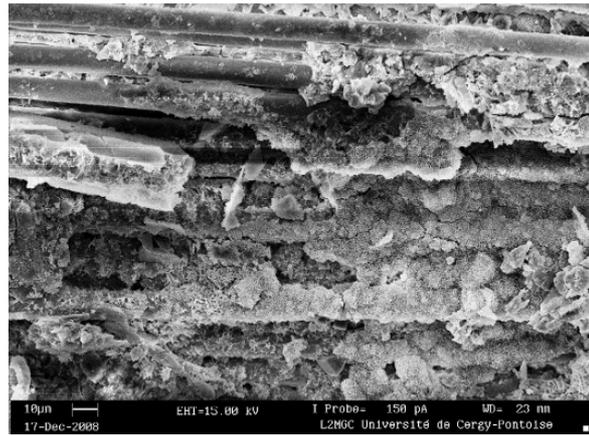
a) Filaments périphériques (G=30)

b) Détail des filaments périphériques (G=600)

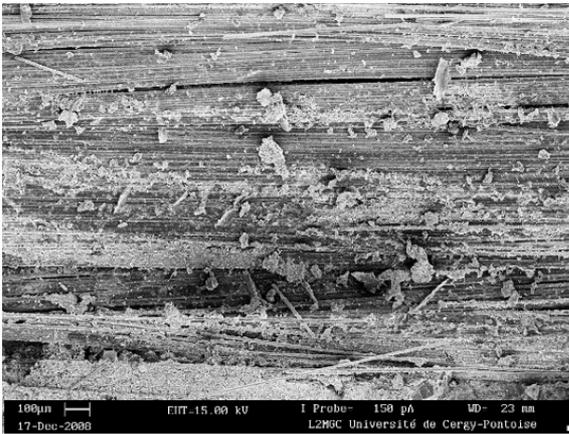
Figure 3.17. Fil multi-filamentaire OC1 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire.



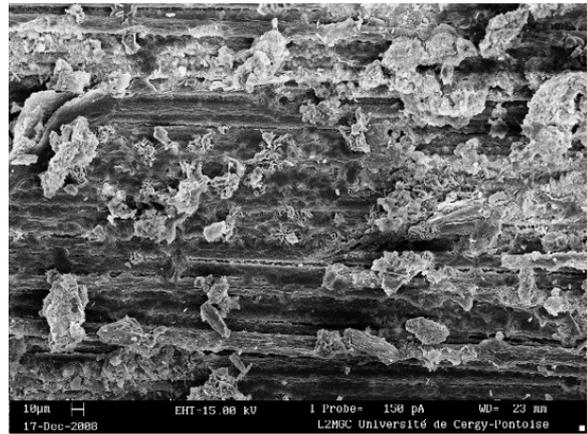
a) Filaments périphériques (G= 30)



b) Détail des filaments périphériques (G= 300)



a) Filaments de cœur (G=30)

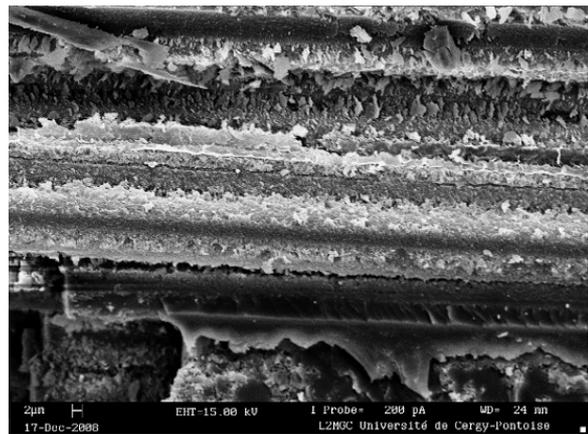


b) Détail des filaments de cœur (G=150)

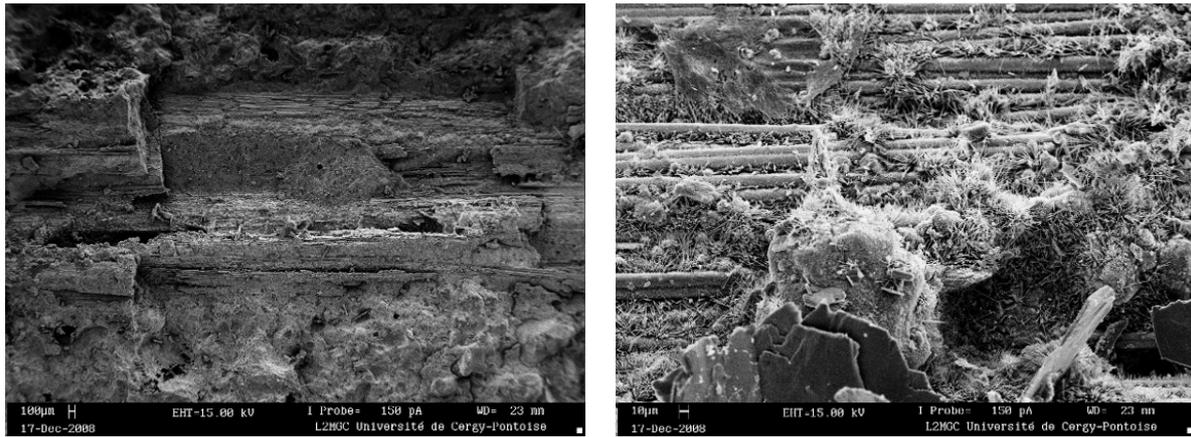
**Figure 3.18.** Fil multi-filamentaire OC1 avec prétraitement D enrobé dans la matrice cimentaire.



a) Filaments périphériques (G=30)



b) Détail des filaments périphériques (G=600)



a) Filaments de cœur (G=8)

b) Détail des filaments de cœur (G=125)

**Figure 3.19.** Fil multi-filamentaire OC1 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire.

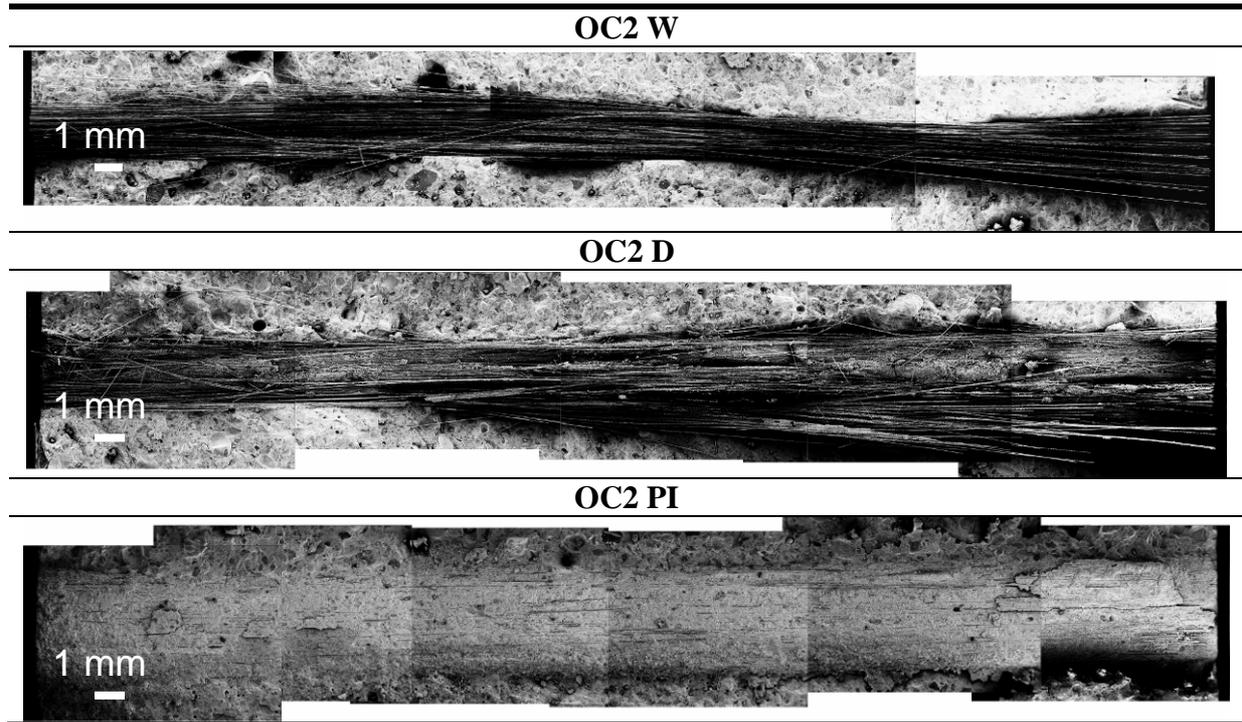
### 3.2.6 Fil multi-filamentaire OC2

La principale particularité du fil OC2 est qu'il ne dispose pas de mèches. Par ailleurs, il est proche du fil OC1 (même verre, relativement faible variabilité, forte capacité de retenir l'eau) seulement ses filaments sont plus gros ( $17\ \mu\text{m}$  au lieu de  $12\ \mu\text{m}$ ).

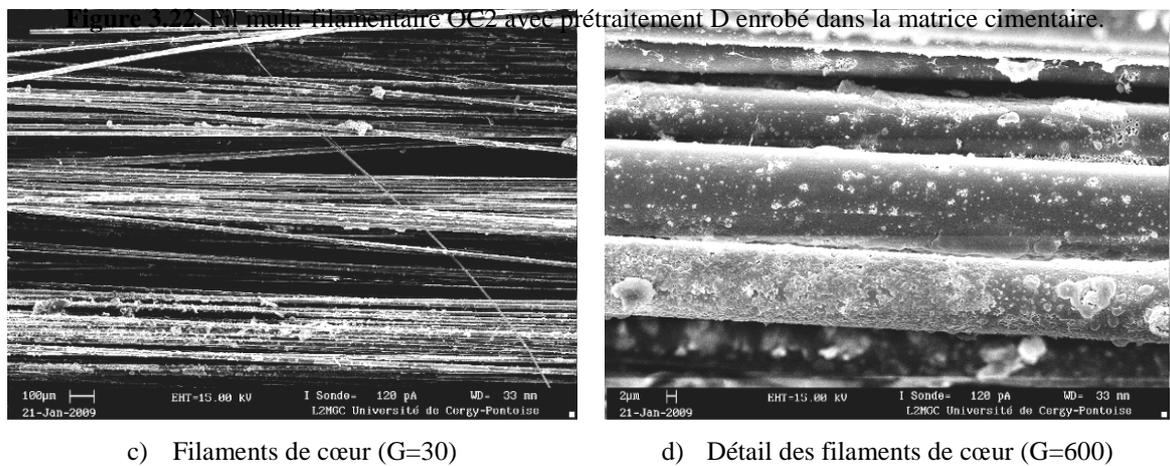
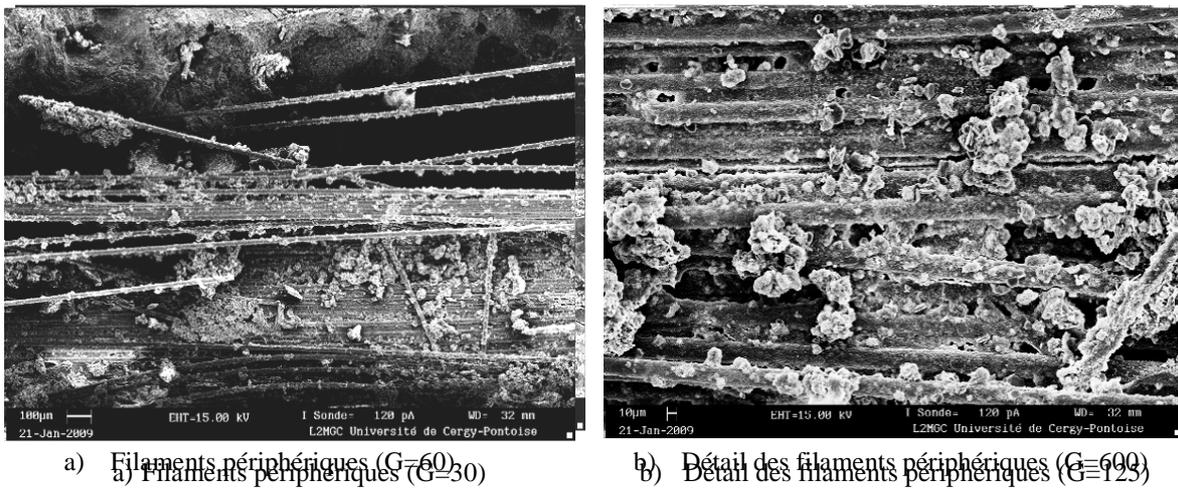
Sur le plan macroscopique (**figure 3.20**), nous constatons que l'absence de mèche fait que la pénétration de la matrice cimentaire reste limitée à l'extrême périphérie du fil pour les prétraitements W et D. Par ailleurs, nous constatons que les filaments restent plus parallèles dans le cas du prétraitement W.

Sur le plan microscopique (**figures 3.21, 3.22 et 3.23**), nous constatons que la cristallisation des produits hydratés du ciment entre les filaments est importante dans les zones imprégnées par la matrice cimentaire. Seulement dans le cas des prétraitements W et D, au cœur du fil les cristallisations des produits hydratés restent très faibles.

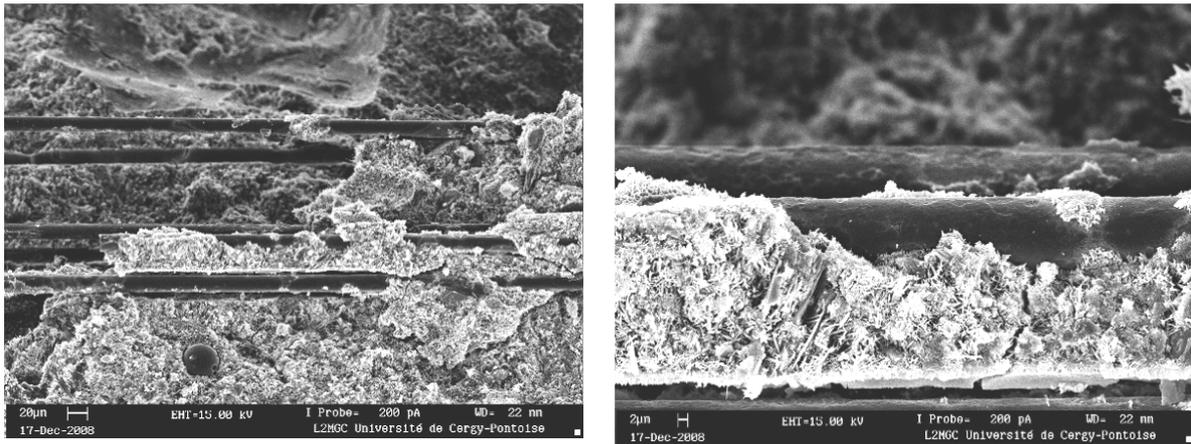
Nous avons vérifié aussi comme dans le cas du fil OC1 que les filaments du fil OC2 n'avaient pas subi une altération visible.



**Figure 3.20.** Section longitudinale du fil OC1 pour les trois modes de prétraitement (G=4).



**Figure 3.21.** Fil multi-filamentaire OC2 avec prétraitement W enrobé dans la matrice cimentaire.



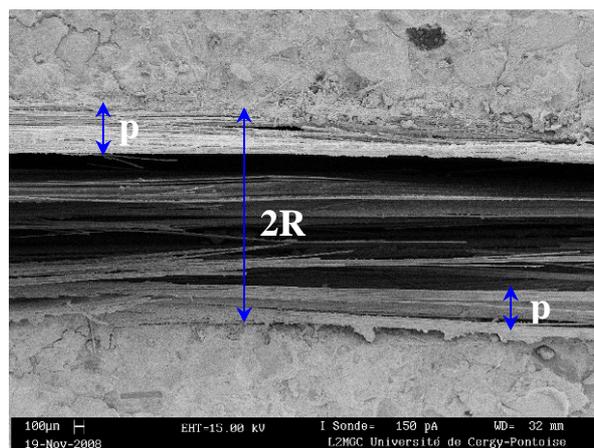
a) Filaments périphériques (G=125)

b) Détail des filaments périphériques (G=600)

**Figure 3.23.** Fil multi-filamentaire OC2 avec prétraitement PI enrobé dans la matrice cimentaire.

### 3.2.7 Bilan quantitatif de l'imprégnation des fils multi-filamentaires

Afin de dresser un bilan quantitatif de l'état d'imprégnation des cinq fils multi-filamentaires pour les différents prétraitements, nous avons procédé à une estimation de la profondeur de la pénétration de la matrice cimentaire,  $p$ , à partir de la périphérie du fil (figure 3.24). Cette estimation s'appuie sur environ 400 mesures de l'épaisseur de la zone imprégnée associées à 200 mesures environ du diamètre apparent du fil,  $2R$ , sur les prises de vues de la section longitudinale de chaque configuration expérimentale. Il faut signaler, cependant, que parfois la détermination de la limite de présence du fil sur la section n'est pas facile en raison des irrégularités de la surface de rupture et aussi l'étirement des fils lors de la séparation des deux morceaux de l'échantillon. Ainsi, malgré le nombre important de mesures dans chaque cas, les résultats conservent un caractère approximatif. Néanmoins, cette estimation donne une indication précieuse sur le degré d'imprégnation et servira à comparer les observations au MEB avec les autres mesures physiques et mécaniques.



**Figure 3.24.** Estimation de la profondeur de pénétration de la matrice cimentaire et du diamètre apparent du fil OC1 avec prétraitement W (G=125).

A partir des mesures précédentes de  $p$  et de  $2R$ , nous avons déterminé un indice d'imprégnation  $i_y$  qui caractérise la section du fil imprégné par la matrice cimentaire en supposant que la section du fil est circulaire (ce qui n'est pas toujours vérifié) :

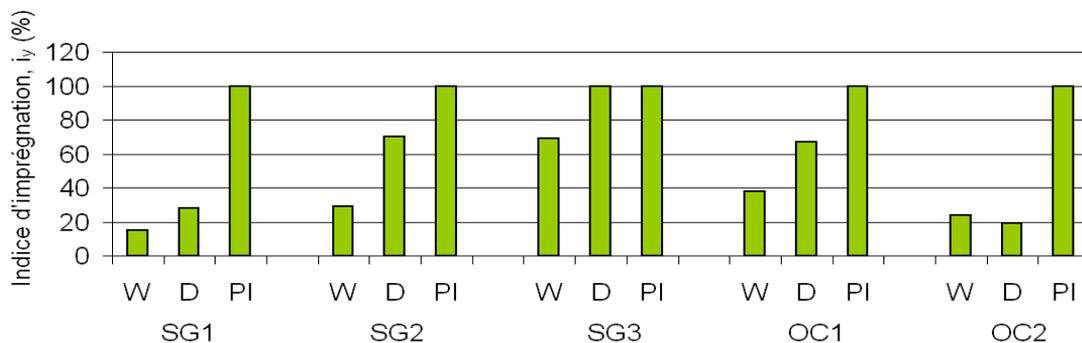
$$i_y = \frac{\pi R^2 - \pi(R - p)^2}{\pi R^2} \quad (3.1)$$

$$i_y = 1 - \left( \frac{R - p}{R} \right)^2 \quad (3.2)$$

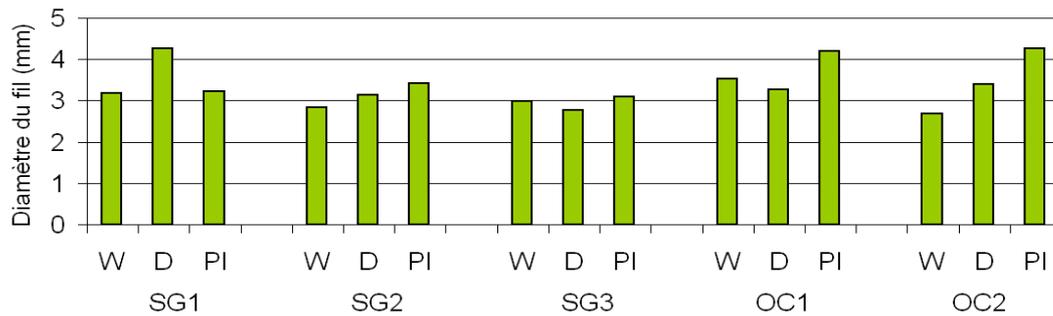
Le détail des résultats de ces mesures est donné dans le **tableau 3.1** en supposant que l'imprégnation des fils dans le cas du prétraitement PI est complète ( $i_y = 100\%$ ). Une comparaison des résultats des différentes configurations expérimentales est présentée sur les **figures 3.25** et **3.26**.

**Tableau 3.1.** Principales caractéristiques de l'imprégnation des fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire

Fil	Diamètre du fil imprégné (μm)	Profondeur d'imprégnation (μm)			$i_y$
		Minimum	Moyenne	Maximum	
SG1 W	3190	100	125	150	15%
SG1 D	4270	300	325	350	28%
SG1 PI	3220				100%
SG2 W	2841	153	225	321	29%
SG2 D	3141	440	714	1002	70%
SG2 PI	3422				100%
SG3 W	2986	487	664	803	69%
SG3 D	2760	1380	1380	1380	100%
SG3 PI	3090				100%
OC1 W	3520	250	375	500	38%
OC1 D	3260	600	700	800	67%
OC1 PI	4190				100%
OC2 W	2690	160	170	180	24%
OC2 D	3390	160	170	180	19%
OC2 PI	4260				100%



**Figure 3.25.** Indice d'imprégnation des fils multi-filamentaires pour les différentes configurations expérimentales.



**Figure 3.26.** Diamètre apparent des fils multi-filamentaires pour les différentes configurations expérimentales.

Nous constatons que l'imprégnation des fils avec le prétraitement W est généralement plus faible que celui du prétraitement D sauf pour le fil OC2 (sans mèches) indiquant que la présence d'eau dans le fil limite la pénétration de la matrice cimentaire dans les espaces entre les mèches. L'imprégnation des fils avec le prétraitement D est très variable d'un fil à l'autre. Elle est très forte pour le fil SG3 qui présente la plus forte variabilité et un ensimage favorable à la mouillabilité du fil. Elle est très faible pour le fil OC2 sans mèches et dans une moindre mesure pour le fil SG1 qui présente un grand nombre de petites mèches et une faible variabilité conduisant à des petits espaces entre les mèches limitant la pénétration de la matrice cimentaire.

Il en résulte que la pénétration de la matrice cimentaire est plus efficace quand le fil est sec, se compose d'un nombre limité de mèches, d'un nombre important de filaments par mèche et présente une forte variabilité géométrique de la section.

Enfin le diamètre apparent du fil varie dans une plutôt faible plage de valeurs sans corrélation apparente forte avec le mode de prétraitement ou la nature du fil. Nous avons attribué ces fluctuations à la combinaison de plusieurs paramètres tels que l'ondulation initiale des mèches et la variabilité géométrique de la section, l'action des forces capillaires dans le fil initialement mouillé ou encore les pressions hydrauliques sur le fil initialement sec engendrées par la matrice cimentaire lors du coulage des éprouvettes.

### 3.3 Porosimétrie mercure différentielle

#### 3.3.1 Objectif et principe de la méthode

##### 3.3.1.1 La porosimétrie mercure

La porosimétrie mercure est une des techniques les plus couramment utilisées pour caractériser les paramètres texturaux des milieux poreux à porosité ouverte (porosité, distribution poreuse, ...). Elle est basée sur la mesure du volume de mercure injecté dans le volume poreux de l'échantillon à caractériser, en fonction de la pression d'injection. C'est une technique couramment utilisée dans le domaine des matériaux cimentaires, notamment pour avoir accès à la connaissance de la distribution des pores capillaires.

Pour une pression appliquée  $P_{Hg}$ , le diamètre  $r_p$  des plus petits pores mouillés par le mercure est donné par l'équation de WASHBURN :

$$r_p = \frac{2 \cdot \sigma_{Hg} \cdot \cos \theta}{P_{Hg}} \quad (3.3)$$

Avec  $\theta$ , angle de contact entre le mercure et la surface de contact et  $\sigma_{Hg}$ , tension superficielle du mercure. Les valeurs de  $\theta$  et  $\sigma_{Hg}$  que nous avons retenu sont les valeurs moyennes utilisées pour les essais réalisés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées [Vér94]:  $\theta = 141.3^\circ$  et  $\sigma_{Hg} = 0.474 \text{ N.m}^{-1}$  pour une température comprise entre 20 et 25°C.

Le principe de la mesure de porosité par injection de mercure consiste à injecter, dans le réseau poreux du matériau étudié, du mercure sous une pression d'injection qui croît par incrément. Pour chaque incrément, on mesure le volume total de mercure injecté (volume cumulatif global).

En faisant l'hypothèse de pores cylindriques, et en considérant l'équation de WASHBURN donnée ci-dessus, l'augmentation de volume injecté pour un incrément de pression donné correspond au volume total des pores de diamètre associé à la pression d'injection. On peut ainsi déterminer la distribution volumique des pores en fonction de leur diamètre.

Cette méthode est relativement simple à appliquer mais pose cependant deux problèmes :

- La porosité fermée est ignorée (elle n'est par nature pas accessible au mercure).
- La méthode a tendance à surestimer le volume des petits pores et à sous-estimer le volume des plus gros pores (vu l'irrégularité de la forme des pores et la complexité du réseau, les tailles de pores mesurés par porosimétrie correspondent au diamètre d'entrée des pores et non aux diamètres réels).

Par ailleurs, dans le cas des bétons, des mortiers et des pâtes de ciment, la présence d'eau résiduelle dans le réseau poreux influence la mesure de porosité par intrusion de mercure et conduit à sous-estimer le volume poreux, en particulier pour les pores de plus petits diamètres [Vér94] [Set02]. Il est donc particulièrement important pour ces matériaux de procéder à un séchage complet, sans toutefois utiliser une température de séchage trop élevée qui peut engendrer des modifications de la microstructure du matériau.

### 3.3.1.2 Mesure de porosité mercure différentielle

L'objectif de cette mesure est de caractériser l'imprégnation d'un fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice cimentaire à partir de la connaissance de la distribution volumique des pores dans un échantillon de mortier contenant le fil dont l'imprégnation est à caractériser. La distribution des pores de l'échantillon contenant le fil à caractériser est obtenue par porosimétrie mercure.

Pour cela, la méthode doit prendre en compte le fait que la porosimétrie mercure donne une information pertinente à l'échelle du volume total de l'échantillon testé, mais ne permet pas d'avoir accès à des informations locales, par exemple correspondant exclusivement au volume d'un fil multi-filamentaire placé au sein d'une éprouvette poreuse et imprégné par le matériau constituant l'éprouvette.

Ces informations peuvent cependant être accessibles sous réserve des conditions suivantes :

- On connaît la distribution de pores de référence, correspondant à la distribution des pores de la matrice sans fil.
- La présence du fil imprégné dans l'échantillon génère une variation dans la distribution des pores de l'échantillon contenant le fil,
- La présence du fil imprégné ne modifie pas le réseau poreux de la matrice ailleurs qu'à l'intérieur de l'amas de filaments constituant le fil,

Dans ces conditions, en caractérisant par porosimétrie mercure la distribution des pores dans une éprouvette d'une matrice donnée contenant un fil multi-filamentaire imprégné puis en comparant cette distribution à celle d'un échantillon de référence constitué de la même matrice, sans fil, on obtient une information sur la porosité liée au fil imprégné.

Nous avons utilisé ce principe dans le cas des fils multi-filamentaires enrobés dans une matrice cimentaire en déterminant la répartition des pores dans une éprouvette constituée d'un fil multi-filamentaire positionné le long de l'axe d'un cylindre de mortier. La distribution de pores de référence est déterminée pour des éprouvettes constituées du même cylindre de mortier, sans fil.

### *3.3.1.3 Paramètres caractéristiques de l'imprégnation*

L'intérêt de la méthode réside dans sa capacité à donner une information simple sur la présence de vides inter-filamentaires dans le fil imprégné. Les vides inter-filamentaires qui nous intéressent étant liés à l'absence d'imprégnation du fil, il est important dans un premier temps d'évaluer les tailles des pores plus particulièrement liés à la non-imprégnation du fil.

Nous avons pour cela envisagé différentes configurations (**figure 3.27**) :

- Réseau de filaments resserré : dans ce cas, les filaments sont en contact les uns avec les autres. La plus petite taille de pores inter-filamentaires correspond à un arrangement des filaments suivant une maille triangulaire (**figure 3.27a**). Nous avons également considéré un arrangement moins compact suivant une maille carrée (**figure 3.27b**).
- Réseau de filaments plus lâche : du fait des variations dans l'orientation des filaments, certains filaments parallèles peuvent être séparés par des filaments orientés différemment, ce qui ouvre les espaces inter-filamentaires (**figure 3.27c**).

En considérant que le diamètre des pores associés à ces répartitions de filaments correspond au diamètre  $d$  du plus grand cylindre inscrit dans l'espace libre situé entre les filaments (cercles pointillés de la **figure 3.27**), on peut déterminer ce diamètre en fonction du diamètre  $D$  des filaments. On obtient :

- Pour le réseau resserré à maille hexagonale :  $d = 0,155 D$ , soit, compte tenu de la taille des filaments utilisés (12 à 17  $\mu\text{m}$  suivant les fils), des pores de 1,9 à 2,6  $\mu\text{m}$  suivant le fil.
- Pour le réseau resserré à maille carrée :  $d = 0,414 D$ , soit des pores de 5,0 à 7,0  $\mu\text{m}$  suivant le fil.

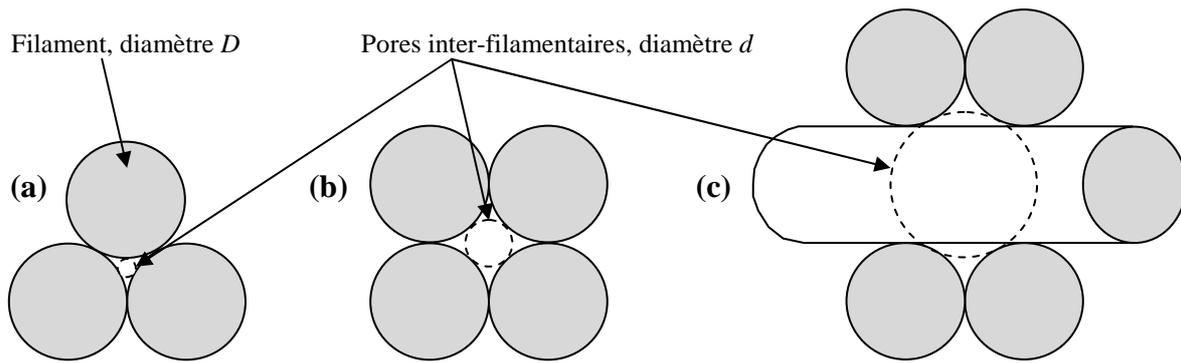


Figure 3.27. Evaluation de la taille des pores inter-filamentaires.

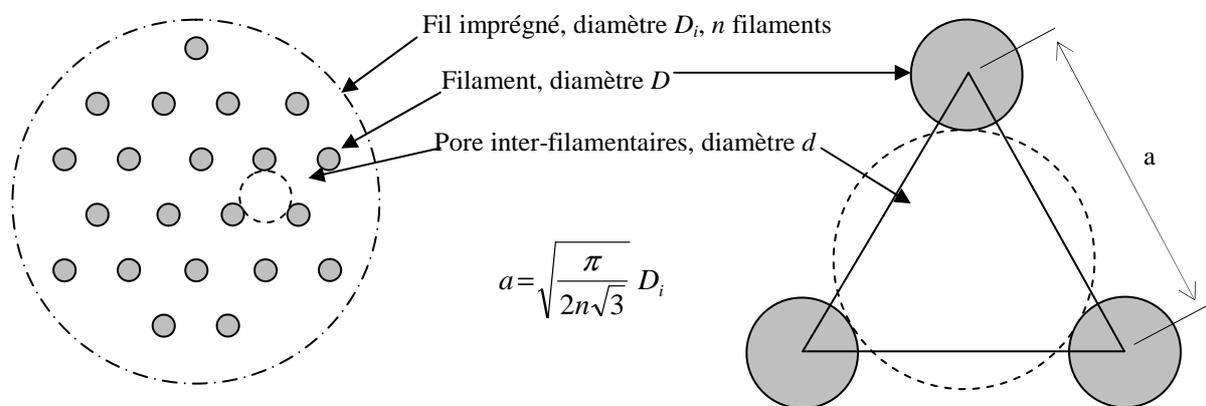


Figure 3.28. Evaluation de la taille des plus gros pores inter-filamentaires à partir du diamètre des fils imprégnés.

Pour compléter ces évaluations, nous avons également calculé la plus grande taille de pore  $d$  associée à un ensemble de filaments équi-répartis sur une surface circulaire correspondant à la section d'un fil imprégné de diamètre  $D_i$  (figure 3.28). En considérant une répartition des filaments suivant un réseau triangulaire, on détermine dans un premier temps l'entraxe des filaments. On en déduit le diamètre des plus gros pores :  $d = 1,1 D_i / n^{1/2} - D$ , ou  $n$  est le nombre de filaments de diamètre  $D$  du fil. Soit, compte tenu de la taille des filaments utilisés, du nombre de filaments par fil et du diamètre des fils imprégnés (voir partie 3.2), des pores de 25 à 55  $\mu\text{m}$  de diamètre, avec une large majorité d'entre eux au voisinage de 30  $\mu\text{m}$ .

Ces différentes évaluations donnent au final des diamètres de pores liés à la non-imprégnation des fils compris entre 2 et 55  $\mu\text{m}$ , suivant l'organisation des filaments au sein du fil. Ces valeurs sont déterminées en supposant qu'il n'y a aucun élément solide dans l'espace inter-filamentaires, ce qui n'est pas le cas puisque l'on constate que, quel que soit le prétraitement, les vides inter-filamentaires sont au moins partiellement occupés par la matrice cimentaire. Le diamètre des pores inter-filamentaires est donc pour cette raison vraisemblablement réduit par rapport aux évaluations faites ci-dessus.

En conséquence, nous avons choisi comme caractéristique de l'imprégnation le volume différentiel des pores de diamètre compris entre 0,3 et 30  $\mu\text{m}$ . Ce volume est déterminé par comparaison des volumes poreux d'un échantillon du mortier contenant un fil avec un échantillon de mortier sans fil.

Plus précisément, nous déterminons pour chaque échantillon deux volumes de pores :

- Le volume  $\Delta v_{0,3-3}$  des pores inter-filamentaires de diamètre compris entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ ,
- Le volume  $\Delta v_{3-30}$  des pores inter-filamentaires de diamètre compris entre 3 et 30  $\mu\text{m}$ .

### 3.3.2 Mise en œuvre de la méthode et résultats généraux

#### 3.3.2.1 Echantillons utilisés pour la porosimétrie mercure

Pour chacune des 15 associations fil / prétraitement, deux échantillons sont réalisés pour la mesure de porosimétrie mercure. Chacun des échantillons est obtenu par prélèvement dans une éprouvette de mortier contenant le fil ayant reçu le prétraitement ad-hoc. L'éprouvette est réalisée suivant la méthodologie exposée **section 2.6**. Le prélèvement se fait en deux temps :

- Prélèvement de la partie centrale de l'éprouvette de mortier par carottage. Le carottage est centré sur l'axe de l'éprouvette (diamètre de carottage : 25 mm). La **figure 3.29** montre quelques prélèvements réalisés par carottage.
- Prélèvement de l'échantillon destiné à la porosimétrie mercure dans la partie centrale de la carotte par sciage perpendiculaire à l'axe de la carotte.

Les échantillons sont cylindriques de 2,5 cm de diamètre, 2,5 cm de hauteur, et contiennent 2,5 cm de fil imprégné droit débouchant au centre de chacune des facettes circulaire du cylindre.

La distribution des pores dans ces échantillons est comparée à la distribution de référence afin d'obtenir une mesure de la porosité directement liée au fil.



**Figure 3.29.** Carottage réalisé dans des éprouvettes de mortier contenant un fil multi-filamentaire enrobé.

#### 3.3.2.2 Process de mesure utilisé

Les mesures sont réalisées sur des échantillons dont le mortier est âgé de 28 jours. Les éprouvettes de fils enrobés sont stockées dans l'eau à 20°C jusqu'à la réalisation du prélèvement des échantillons. Le prélèvement est réalisé suivant la méthode décrite au paragraphe précédent.

Après prélèvement, les échantillons sont séchés conformément à la norme NF EN 1936 (séchage à 75°C), afin de supprimer des pores l'eau qui pourrait gêner la pénétration du mercure dans le réseau capillaire.

Les mesures sont ensuite réalisées à l'aide d'un porosimètre AUTOPORE IV 9500 (**figure 3.30**) avec lequel l'injection de mercure se fait en deux étapes : injection sous basse pression puis injection sous haute pression. Nous l'avons utilisé avec un pénétromètre de 18,360 ml. Il permet d'avoir accès à des tailles de pores comprises entre 0,003 et 1000 µm, largement au-delà des tailles de pores qui nous intéressent ici.

Deux échantillons ont été traités pour chaque configuration fil / prétraitement. Pour la matrice sans fil (distribution de référence), six échantillons ont été traités (voir **section 3.2.3**)



**Figure 3.30.** Appareil de porosité à mercure AUTOPORE IV 9500.

### 3.3.2.3 Résultats généraux

Le **tableau 3.2** donne les principaux résultats bruts obtenus à partir des mesures porosimétriques.

**Tableau 3.2.** Résultats généraux obtenus par porosimétrie mercure.

Fil	Pré- traitement	Diamètre des pores médian (Volume)		Diamètre des pores médian (Surface)		Diamètre moyen des pores (4V/A)		Masse volumique		Masse volumique intrinsèque*		Porosité	
		Moy.	CV	Moy.	CV	Moy.	CV	Moy.	CV	Moy.	CV	Moy.	CV
		µm	%	µm	%	µm	%	g/ml	%	g/ml	%	%	%
SG1	W	0,105	2,97	0,038	3,57	0,060	0,59	2,02	0,75	2,38	0,88	15,10	9,16
	D	0,105	2,43	0,035	0,82	0,059	2,03	2,02	0,81	2,39	0,09	15,80	4,77
	PI	0,112	2,15	0,033	3,42	0,060	0,95	1,98	0,17	2,41	0,82	17,92	2,98
SG2	W	0,104	1,09	0,032	1,09	0,056	3,16	2,00	0,48	2,42	0,67	17,47	5,39
	D	0,108	3,62	0,037	4,62	0,062	2,18	2,00	0,46	2,39	0,92	16,19	2,42
	PI	0,103	6,02	0,038	1,12	0,060	1,54	1,99	1,71	2,39	0,69	16,68	13,34
SG3	W	0,104	5,80	0,034	36,80	0,054	19,39	1,98	0,87	2,40	0,48	17,49	6,35
	D	0,115	0,92	0,045	14,00	0,065	7,04	1,96	0,88	2,39	0,71	17,97	0,77
	PI	0,103	13,44	0,043	20,39	0,062	12,73	2,20	11,51	2,37	0,17	16,22	11,87
OC1	W	0,098	5,45	0,026	16,03	0,048	7,83	1,88	8,79	2,26	11,24	16,69	13,82
	D	0,094	4,97	0,026	24,94	0,049	10,94	2,01	2,30	2,45	3,02	17,93	3,47
	PI	0,099	5,87	0,027	1,59	0,050	5,54	1,96	1,43	2,37	0,90	17,56	10,93

Etude et caractérisation de l'imprégnation  
des fils multi-filamentaires par la matrice cimentaire

OC2	W	0,107	2,78	0,040	4,78	0,063	5,50	2,00	0,48	2,37	0,98	15,86	2,67
	D	0,097	0,94	0,038	12,89	0,059	6,47	2,00	2,89	2,41	3,22	16,67	1,64
	PI	0,074	55,37	0,029	14,68	0,044	32,78	1,96	1,03	2,36	0,79	17,31	1,18
Ch	W	0,126	2,41	0,055	7,15	0,074	6,09	2,01	0,66	2,37	0,34	15,30	5,52
	D	0,126	6,62	0,045	9,34	0,074	1,63	2,01	0,27	2,41	1,37	16,47	5,57
	PI	0,108	1,69	0,034	0,74	0,061	0,62	1,99	0,30	2,39	0,40	16,68	1,79
Référence		0,096	1,41	0,027	2,10	0,048	2,36	1,97	0,54	2,38	0,70	18,20	7,04

*Moy.* : moyenne des valeurs obtenues (deux échantillons par configuration fil / prétraitement)

*CV* : coefficient de variation

(\*) : déterminé sous une pression de 0,0034 MPa

### 3.3.3 Caractérisation du mortier : distribution de référence

#### 3.3.3.1 Echantillons de référence

La distribution de référence correspond à la distribution des pores dans un échantillon qui ne diffère des échantillons décrits au paragraphe précédent que par l'absence de fil.

Cela implique donc d'utiliser la même géométrie pour les échantillons destinés à la détermination de la distribution de référence que pour les échantillons contenant les fils. Nous avons donc réalisé ces échantillons en appliquant strictement la méthodologie présentée **section 3.3.2.1**.

Cependant, pour que ces échantillons sans fil soient au plus proche des échantillons avec fils, il faut s'assurer que l'écoulement du mercure dans le réseau poreux, lors de l'injection sous pression, est le plus possible similaire à l'écoulement obtenu dans le cas des éprouvettes avec fil. Or, dans ce dernier cas, l'écoulement est potentiellement très influencé par la présence du fil multi-filamentaire qui représente une voie de pénétration du mercure au cœur de l'échantillon du fait de la porosité potentiellement forte du fil (c'est en particulier le cas lorsque l'imprégnation par la matrice cimentaire est faible).

Pour cette raison, nous avons fabriqué deux types d'échantillons de référence (**figure 3.31**) :

- Des échantillons sans fil massifs, réalisés suivant le même mode opératoire que les échantillons avec fil, sans placer de fil multi-filamentaire dans le moule avant le coulage du mortier. L'intrusion du mercure dans ces échantillons se fait d'une manière similaire à l'intrusion du mercure dans les échantillons avec fil lorsque les vides inter-filamentaires sont remplis de pâte de ciment (donc plutôt les fils correspondant au prétraitement PI). Quatre échantillons ont été réalisés : deux de 25 mm de diamètre et deux autres de 13 mm de diamètre dont on expliquera l'utilisation dans la suite.
- Des échantillons percés, réalisés suivant le même mode opératoire que les échantillons avec fil, en remplaçant dans le moule, avant coulage du mortier, le fil multi-filamentaire par un mono-filament en plastique souple. Ce fil plastique est retiré après prise du mortier, ce qui laisse le long de l'axe de l'échantillon un vide cylindrique de 2,5 mm de diamètre. L'intrusion du mercure dans ces échantillons se fait d'une manière similaire à l'intrusion du mercure dans les échantillons avec fil lorsque les vides inter-filamentaires sont relativement peu remplis par la pâte de ciment (donc plutôt les fils correspondant aux prétraitements W et D).

Dans le cas des échantillons massifs, la distance moyenne à la paroi libre est de l'ordre du demi-rayon de l'échantillon, soit approximativement 6,3 mm pour les échantillons de 25 mm de diamètre et 3,3 mm pour les échantillons de 13 mm de diamètre. La présence d'un tube de 2,5 mm de diamètre permettant la pénétration à cœur du mercure dans les échantillons de 25 mm de diamètre réduit cette distance approximativement à 2,8 mm.

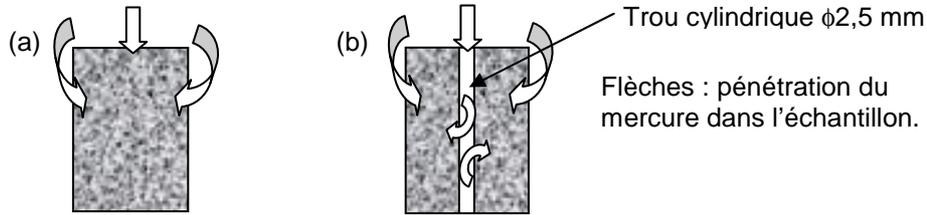


Figure 3.31. Principe de pénétration du mercure dans les échantillons sans fil massifs (a) ou percés (b).

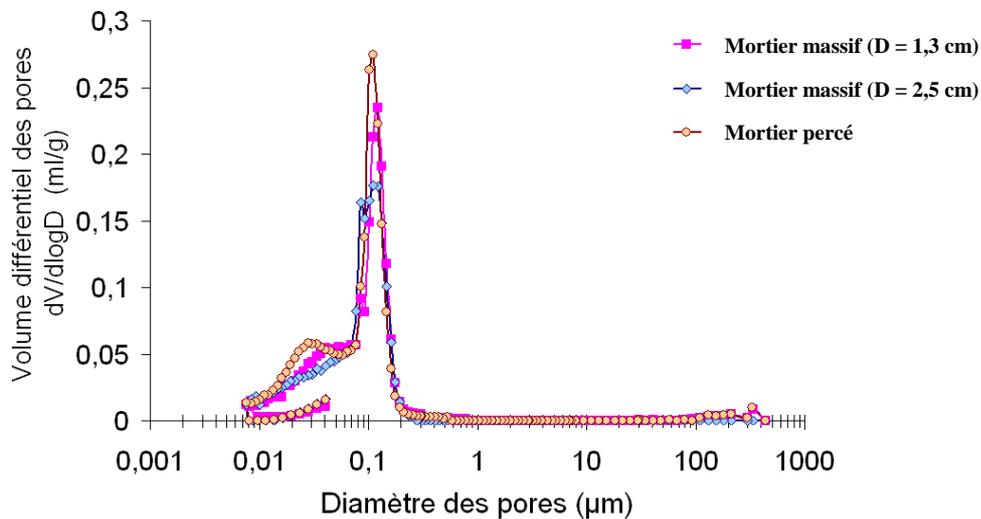


Figure 3.32. Distribution des diamètres de pores dans le mortier.

### 3.3.3.2 Résultats et discussion

Les figures 3.32 et 3.33 donnent respectivement la distribution des diamètres de pores dans les trois types d'échantillons utilisés et le détail de cette distribution dans la gamme de diamètre qui nous intéresse plus particulièrement (0,3 à 30 µm). Les courbes présentées correspondent aux courbes moyennes construites à partir des deux échantillons identiques utilisés dans chaque cas. La dispersion dans la mesure du volume différentiel des pores est estimé à  $1.10^{-3}$  ml/g pour les pores compris entre 0,3 à 30 µm de diamètre.

Dans la gamme de diamètres qui nous intéresse, on remarque que la distribution des pores déterminée à partir des échantillons percés est proche de celle déterminée à partir des échantillons pleins de 13 mm de diamètre, ce qui s'explique par des distances moyennes à la paroi libre similaire (respectivement 2,9 et 3,3 mm).

Dans le cas des échantillons pleins de 25 mm de diamètre, le volume poreux dans la gamme de diamètres 0,3 à 30 µm est quasiment nul, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de la

distance moyenne à la paroi libre (elle a approximativement doublée par rapport aux cas précédents). Cela rend plus difficile la pénétration du mercure dans l'échantillon et conduit à sous-estimer les pores de plus gros diamètres au profit des plus petits. On remarquera en l'occurrence que c'est cet échantillon qui donne la distribution maximale de pores au voisinage de  $0,1 \mu\text{m}$  de diamètre (**figure 3.32**).

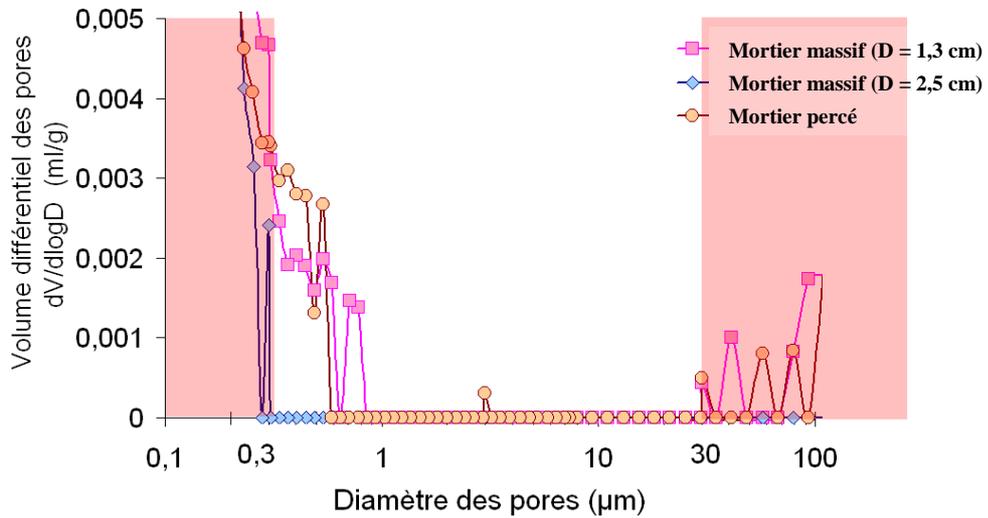


Figure 3.33. Détail de la distribution des diamètres de pores dans le mortier.

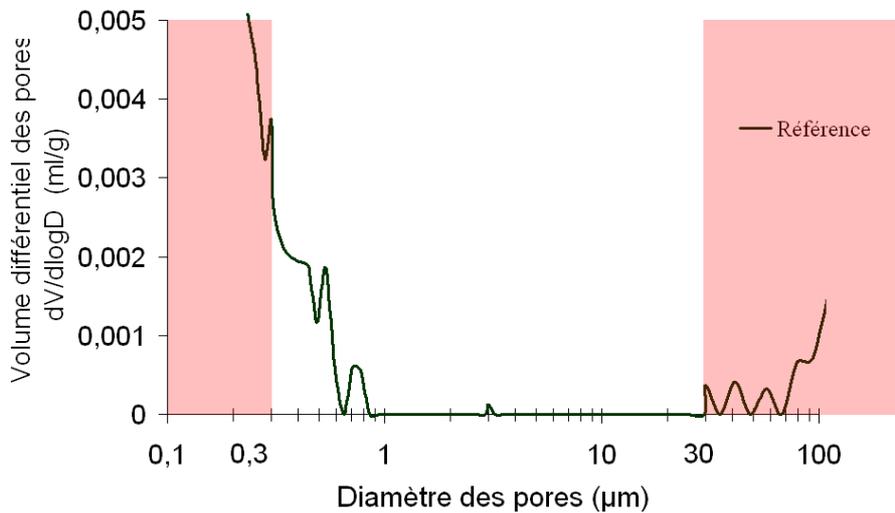


Figure 3.34. Distribution de référence.

### 3.3.3.3 Distribution et volumes de référence

Dans la mesure où nous ne pouvons pas savoir comment le fil enrobé favorisera ou non la pénétration du mercure dans l'échantillon, et parce que nous souhaitons travailler avec une référence unique pour l'ensemble de nos mesures, nous avons construit la distribution de

référence associée au mortier comme la moyenne des distributions obtenues pour les différents types d'échantillons de mortier sans fil.

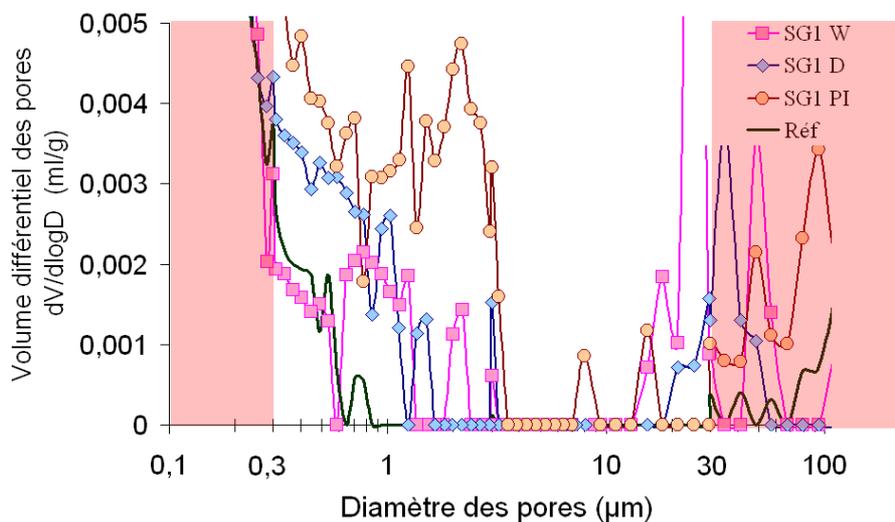
Cette distribution moyenne de référence est donnée dans la **figure 3.34**. Elle permet également de déterminer :

- le volume massique de référence  $v_{0,3-3}$  associé aux pores de diamètre compris entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ . Nous obtenons  $v_{0,3-3} = 0,00143 \text{ ml/g}$ .
- le volume massique de référence  $v_{3-30}$  associé aux pores de diamètre compris entre 3 et 30  $\mu\text{m}$ . Nous obtenons  $v_{3-30} = 0,00027 \text{ ml/g}$ .

### 3.3.4 Caractérisation des fils imprégnés

#### 3.3.4.1 Résultats des essais de porosimétrie mercure

Les mesures de porosimétrie sur les échantillons avec fil ont permis de déterminer la distribution des pores pour les diamètres compris entre 0,3 et 30  $\mu\text{m}$ . A titre d'exemple, cette distribution est donnée dans le cas du fil SG1 (**figure 3.35**). On constate que la distribution des pores varie suivant le type de prétraitement appliqué au fil : le prétraitement W donne une distribution proche de celle obtenue pour les échantillons sans fil (on note simplement une légère augmentation du volume poreux pour les diamètres de pores voisins de 1  $\mu\text{m}$ ), alors que les deux autres prétraitements (D et PI) conduisent à une augmentation du volume poreux plus marquée, en particulier pour les diamètres de pores inférieurs à 3  $\mu\text{m}$ . Chacun des prétraitements se distingue des autres dans la gamme de diamètre de pores que nous avons ciblé. Ce constat se retrouve également dans les distributions correspondant aux autres fils.



**Figure 3.35.** Fil SG1, distribution des diamètres de pores.

A partir de la connaissance de la distribution des pores pour chaque type d'échantillon, les volumes massiques  $v_{0,3-3}$  et  $v_{3-30}$  des pores inter-filamentaires de diamètre respectivement compris dans les intervalles 0,3 - 3  $\mu\text{m}$  et 3 - 30  $\mu\text{m}$  ont été déterminés. Les **tableaux 3.3** et

**3.4** donnent les valeurs obtenues. On rappelle que chacune des valeurs correspond à 2 mesures de porosité.

On constate que les volumes poreux correspondant aux plus gros pores (3 - 30  $\mu\text{m}$ ) est généralement plus faible (de l'ordre du tiers) que celui correspondant aux plus petits pores (0,3 - 3  $\mu\text{m}$ ). Par ailleurs, les coefficients de variation obtenus présentent dans certains cas des valeurs élevées, en particulier dans le cas de la mesure du volume des plus gros pores (3 - 30  $\mu\text{m}$ ). Cela montre que ces résultats doivent être utilisés plus comme une indication sur le volume des vides dans l'échantillon que comme une mesure fine de la distribution des pores capillaires.

**Tableau 3.3.** Volume des pores de diamètre 0.3-3  $\mu\text{m}$  :  $v_{0,3-3}$ .

Fil	W		D		PI	
	Moy.	Coefficient de variation	Moy.	Coefficient de variation	Moy.	Coefficient de variation
	ml/g	%	ml/g	%	ml/g	%
SG1	0,00151	139,33	0,00256	0,73	0,00407	18,14
SG2	0,00253	2,83	0,00327	3,59	0,00364	37,46
SG3	0,00223	33,93	0,00212	3,19	0,00192	7,92
OC1	0,00279	2,62	0,00221	30,35	0,00267	12,89
OC2	0,00159	83,88	0,00255	8,53	0,00346	28,53
Ch	0,00181	33,69	0,00255	31,47	0,00307	3,11
Référence	$v_{0,3-3} = 0,00143$ ml/g ; coefficient de variation : 42,05 %					

**Tableau 3.4.** Volume des pores de diamètre 3-30  $\mu\text{m}$  :  $v_{3-30}$ .

Fil	W		D		PI	
	Moy.	Coefficient de variation	Moy.	Coefficient de variation	Moy.	Coefficient de variation
	ml/g	%	ml/g	%	ml/g	%
SG1	0,00129	40,14	0,00095	18,61	0,00118	10,70
SG2	0,00089	57,54	0,00111	35,75	0,00083	86,13
SG3	0,00015	5,85	0,00037	9,30	0,00018	23,09
OC1	0,00055	91,71	0,00013	141,42	0,00042	134,31
OC2	0,00062	141,42	0,00142	35,26	0,00142	14,85
Ch	0	0	0,00086	29,65	0,00109	9,79
Référence	$V_{3-30} = 0,00027$ ml/g ; coefficient de variation : 51,74%					

### 3.3.4.2 Détermination des volumes différentiels de pores

Par définition, le volume différentiel des pores est la différence des volumes poreux de l'échantillon avec fil et de l'échantillon de référence (mortier sans fil). Ce volume est directement lié à la présence du fil, sous réserve que la présence du fil dans le mortier, au moment du coulage et au cours de la prise de celui-ci, n'influence pas la construction du réseau capillaire de la matrice cimentaire. Notamment, le fil pourrait jouer le rôle de drain dans le mortier frais et conduire à réduire le rapport E/C du mortier frais au voisinage du fil,

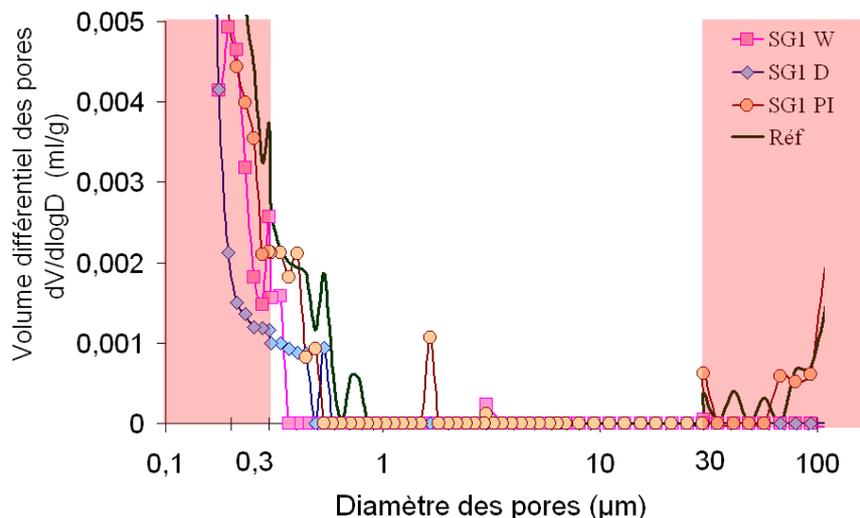
ce qui conduirait à une réduction de la porosité de la matrice sous l'effet des tassements induits par la gravité.

Nous avons vérifié cet aspect en comparant la distribution des pores capillaires dans les échantillons sans fil à celle de prélèvement de la matrice cimentaire fait dans les échantillons contenant un fil. Deux modes de prélèvement ont été pratiqués :

- Prélèvement par carottage d'un échantillon de matrice seule dans une éprouvette de 34 mm de diamètre, contenant un fil centré. La carotte prélevée fait 13 mm de diamètre. Elle est prélevée parallèlement juste à côté du fil, parallèlement à celui-ci. Cette méthode a été utilisée pour des échantillons réalisés avec le fil SG1.
- Ouverture de l'échantillon par fendage, puis élimination de la zone d'interface fil / matrice par grattage pour obtenir un échantillon de matrice seule. Cette méthode a été utilisée pour des échantillons réalisés avec le fil OC1.

Dans le cas du fil SG1, les prélèvements faits dans les échantillons réalisés avec les trois prétraitements W, D et PI donnent des distributions voisines (**figure 3.36**), ce qui n'était pas le cas des mesures faites sur les échantillons avec fil (**figure 3.35**). Ces distributions sont par ailleurs similaires à la distribution de référence.

Dans le cas du fil OC1, on constate également que le prétraitement du fil n'a pas d'influence sur la distribution des pores obtenue (**figure 3.37**). Cependant, les résultats obtenus donnent un volume poreux plus important que dans le cas des échantillons de référence. Nous pensons que cela est une conséquence du mode de prélèvement réalisé : le fendage de l'échantillon, réalisé en appliquant une compression radiale sur l'échantillon cylindrique, puis le grattage de la zone d'enrobage du fil, induit une microfissuration de l'échantillon qui augmente le volume poreux dans la gamme de tailles de pore étudiée. Les résultats obtenus pour OC1 confortent donc plutôt ceux obtenus pour les échantillons prélevés dans des éprouvettes SG1.



**Figure 3.36.** Distribution des pores dans la matrice cimentaire. Echantillons réalisés avec le fil SG1.

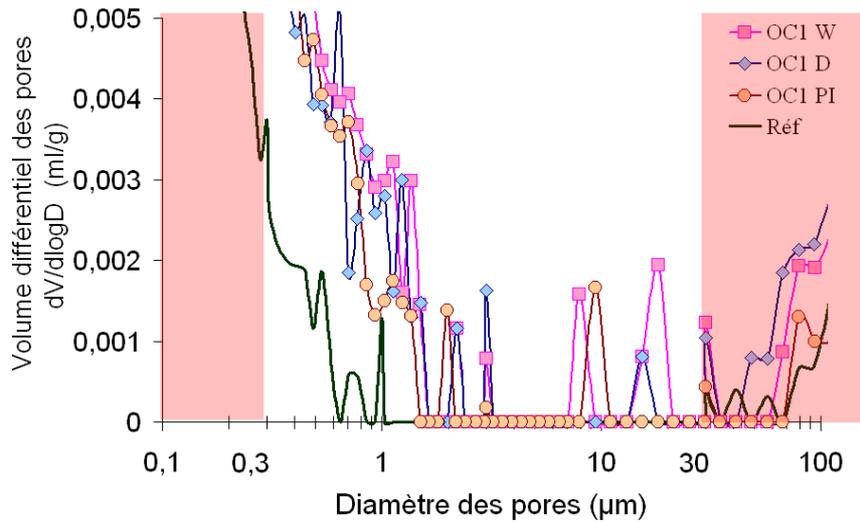


Figure 3.37. Distribution des pores dans la matrice cimentaire. Echantillons réalisés avec le fil OC1.

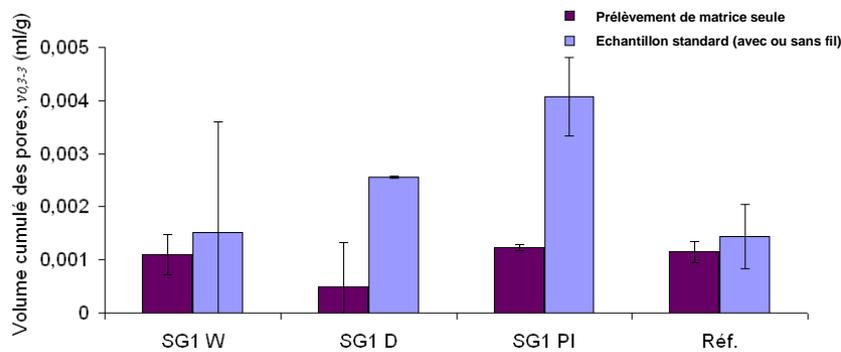


Figure 3.38. Comparaison entre les volumes  $v_{0,3-3}$  des matrices obtenues avec ou sans fil (SG1).

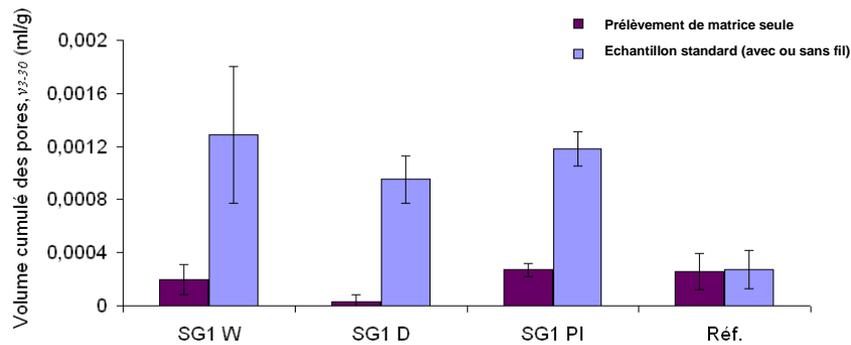
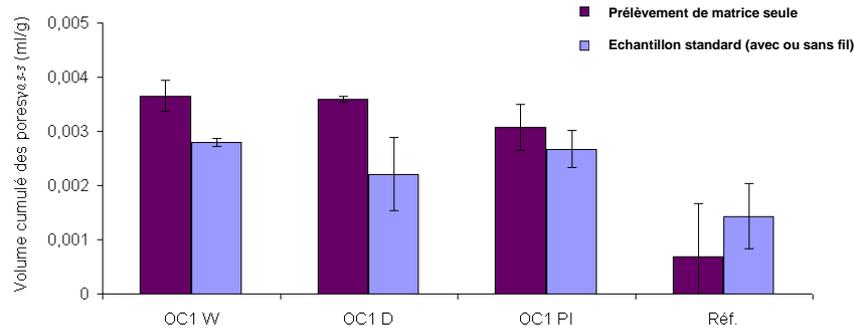


Figure 3.39. Comparaison entre les volumes  $v_{3-30}$  des matrices obtenues avec ou sans fil (SG1).

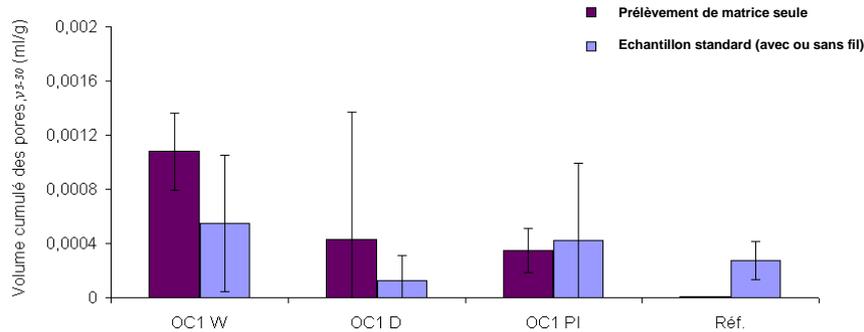
Ces constats sont confirmés par l'analyse des volumes poreux, comme le montrent les figures 3.38 et 3.39 qui comparent les volumes  $v_{0,3-3}$  et  $v_{3-30}$  de la matrice de l'éprouvette avec fil avec les volumes équivalents, d'une part de l'éprouvette avec fil, d'autre part de la matrice de l'éprouvette sans fil (référence).

Les figures 3.40 et 3.41 donnent les mêmes informations que les figures 3.38 et 3.39, dans le cas des échantillons obtenus à partir du fil OC1. On retrouve le décalage entre l'échantillon

sans fil (référence) et la matrice des échantillons avec fil. Il apparaît par ailleurs que le volume poreux de l'échantillon avec fil est très proche du volume poreux de la matrice associée, ce qui pourrait éventuellement être interprété comme un effet de la présence du fil sur la matrice. Cependant, la variation observée est à l'inverse de ce qui est potentiellement attendu (une réduction du volume poreux de la matrice). Nous pensons donc que c'est la méthode de prélèvement qui pose problème et que ces résultats ne sont pas significatifs. C'est en particulier le grattage du fil qui pourrait générer une fissuration supplémentaire (2,5 mm<sup>2</sup> de fissures ouvertes de 1 μm suffisent à expliquer la différence de volume mesuré). Dans le cas du prélèvement fait sur l'échantillon de référence, l'opération de grattage n'a pas été réalisée (il n'y avait pas de fil) et le volume mesuré correspond à celui de la matrice.



**Figure 3.40.** Comparaison entre les volumes  $v_{0,3-3}$  des matrices obtenues avec ou sans fil (OC1).



**Figure 3.41.** Comparaison entre les volumes  $v_{3-30}$  des matrices obtenues avec ou sans fil (OC1).

La matrice cimentaire étant réputée ne pas subir, du point de vue de la porosité, l'influence de la présence du fil, nous avons déterminé le volume différentiel des pores, pour une gamme de diamètre de pores donnée, comme la différence entre le volume poreux de l'échantillon avec fils et de l'échantillon sans fil, ramené à une unité de longueur de fil.

Les volumes différentiels sont donc calculés à l'aide des formules suivantes :

$$\Delta v_{0,3-3} = \pi \gamma_e D_e^2 (v_{0,3-3} - v_{0,3-3, ref})/4 \quad (3.4)$$

$$\Delta v_{3-30} = \pi \gamma_e D_e^2 (v_{3-30} - v_{3-30, ref})/4 \quad (3.5)$$

Où  $\Delta v_{0,3-3}$  est le volume différentiel des pores de diamètre compris entre 0,3 et 3 μm,  $v_{0,3-3}$  et  $v_{0,3-3,ref}$  respectivement les volumes de pores par unité de masse d'échantillon dans la même gamme de diamètres, pour l'échantillon avec fil et l'échantillon sans fil (référence).  $\gamma_e$  et  $D_e$  sont respectivement la masse volumique de l'échantillon avec fil (voir **tableau 3.2**) et le

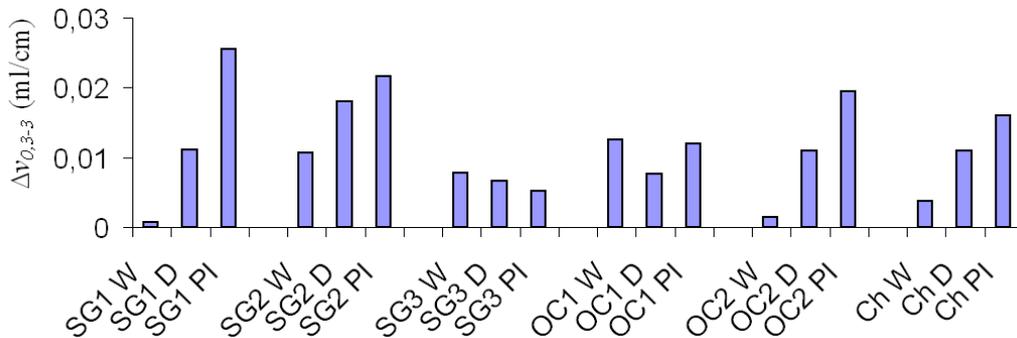
diamètre de l'échantillon ( $D_e = 25$  mm).  $\Delta v_{3-30}$ ,  $v_{3-30}$  et  $v_{3-30,ref}$  sont respectivement le volume différentiel et les volumes de pores de l'échantillon avec fil et sans fil pour les diamètres de pores compris entre 3 et 30  $\mu\text{m}$ .

### 3.3.4.3 Résultats et discussion

Les valeurs de  $\Delta v_{0,3-3}$  et  $\Delta v_{3-30}$  sont données dans le **tableau 3.5**. Concernant les pores de petites tailles (voir **figure 3.40**) on constate qu'à l'exception des fils SG3 et OC1, le prétraitement du fil influence significativement le volume différentiel. Celui-ci apparaît d'autant plus important que le prétraitement favorise la pénétration de la matrice cimentaire dans le fil. Cela s'explique par le rôle des actions mécaniques appliquées au fil lors du coulage du mortier, ou lors du prétraitement du fil (prétraitement PI). Ces actions mécaniques, liées à la pénétration des particules de ciment entre les filaments, tendent à désorganiser l'arrangement des filaments et à créer de nouveaux vides au sein du fil. Dans le cas du prétraitement W, les forces de tension surfacique associées à la saturation initiale du fil agglomèrent les filaments et stabilisent la structure du fil, ce qui limite fortement la création de vides inter-filamentaires nouveau.

**Tableau 3.5.** Volume différentiel des pores.

Fil	$\Delta v_{0,3-3}$ (ml/cm)			$\Delta v_{3-30}$ (ml/cm)		
	W	D	PI	W	D	PI
SG1	0,0007	0,0111	0,0256	0,0100	0,0067	0,0088
SG2	0,0107	0,0180	0,0216	0,0060	0,0082	0,0054
SG3	0,0078	0,0066	0,0052	- 0,0012	0,0009	- 0,0010
OC1	0,0125	0,0076	0,0119	0,0025	- 0,0015	0,0014
OC2	0,0015	0,0110	0,0195	0,0034	0,0112	0,0111
Ch	0,0037	0,0110	0,0160	- 0,0027	0,0058	0,0079

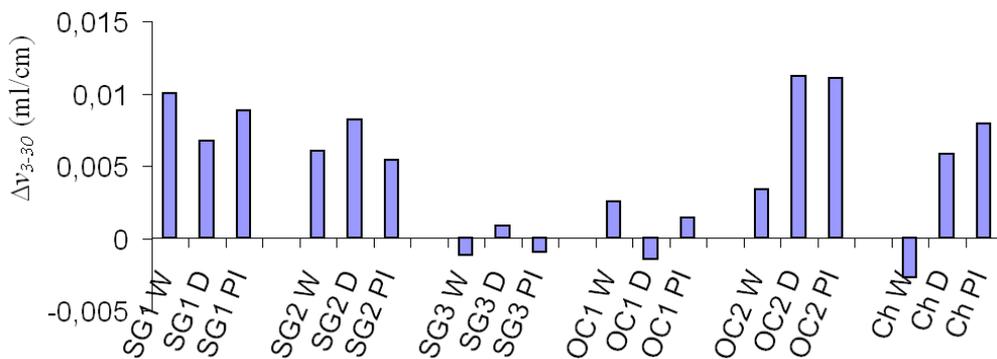


**Figure 3.40.** Volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ , (ml/g).

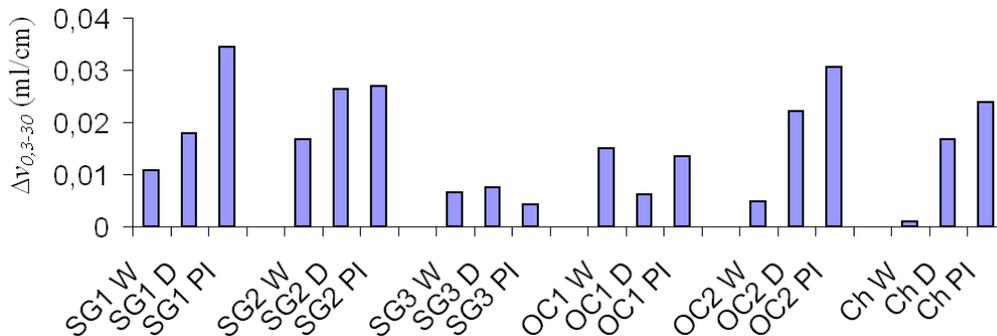
En ce qui concerne les pores de plus grosse taille (voir également **figure 3.41**), on ne retrouve pas cette variation du volume différentiel avec le type de prétraitement et le volume différentiel semble simplement lié au type de fil utilisé. Seul les fils OC2 et Ch donnent une variation significative entre le prétraitement W et les prétraitements W et PI.

Enfin, la **figure 3.42** donne  $\Delta V_{0,3-30}$ , cumul de  $\Delta V_{0,3-3}$  et de  $\Delta V_{3-30}$ , en fonction du type de fil et de prétraitement. Comme les valeurs de  $\Delta V_{3-30}$  sont relativement indépendantes du prétraitement et faibles devant les valeurs de  $\Delta V_{0,3-3}$ , les tendances observées pour  $\Delta V_{0,3-30}$  sont identiques à celles vues pour  $\Delta V_{0,3-3}$ .

Les mesures de porosité mercure différentielle réalisées permettent donc de distinguer les fils et les prétraitements les uns des autres, même si leur précision reste parfois limitée, du fait de la précision des mesures de porosimétrie. Les volumes différentiels des pores de diamètre 0,3-3  $\mu\text{m}$  et 3-30  $\mu\text{m}$  peuvent de ce fait être considérés comme deux mesures quantitatives qui sont liées à l'imprégnation des fils. Ces mesures représentent un point de vue sur la manière dont la matrice cimentaire pénètre le réseau de filaments du fil et sont donc ainsi liées a priori au comportement à l'arrachement du fil.



**Figure 3.41.** Volume différentiel de pores  $\Delta V_{3-30}$ , (ml/g).



**Figure 3.42.** Volume différentiel de pores  $\Delta V_{0,3-30}$ , (ml/g).

### 3.4 Essai d'écoulement

#### 3.4.1 Objectif de la méthode

La porosité mercure n'est pas suffisante à elle seule pour caractériser de manière univoque l'imprégnation d'un fil multi-filamentaire par une matrice cimentaire, même de manière

sommaire. En effet, la mesure des volumes poreux  $v_{0,3-3}$  et  $v_{3-30}$  dans les deux gammes de diamètre de pores 0,3-3  $\mu\text{m}$  et 3-30  $\mu\text{m}$  donnent une information sur le volume total des vides dans le fil mais ne caractérisent pas finement la taille de chacun de ces vides. Compte tenu des incertitudes de mesure, il semble par ailleurs peu fiable d'utiliser la distribution des tailles de pores donnée par les mesures de porosimétrie mercure pour accéder à ces informations.

Nous avons donc utilisé une deuxième méthode de mesure pour caractériser l'imprégnation du fil. Afin de disposer d'une méthode qui dépende plus de la taille des pores (et en particulier des plus gros) que de leur volume total, nous nous sommes orientés vers une méthode basée sur la mesure du débit d'écoulement d'un fluide le long du fil imprégné.

Si on assimile un fil imprégné de longueur  $L$  et de diamètre  $D_i$  à un milieu poreux constitué de  $n$  pores capillaires indépendants, de diamètre  $d$ , parallèles à l'axe du fil, alors le débit total  $Q$  d'un fluide de viscosité  $\mu$  le long du fil, sous l'effet d'un gradient de pression  $\Delta P/L$ , est donnée par :

$$Q = n \cdot q = n \frac{\pi d^4}{128\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.6)$$

Où le débit  $q$  dans un capillaire est donné par la relation de POISEUILLE.

Pour un volume de vides dans le fil imprégné  $V_f$ , et en supposant ces vides constitués exclusivement des pores de diamètre  $d$  mentionnés précédemment, on peut calculer le nombre de pores  $n$  :

$$n = \frac{4V_f}{\pi d^2 L} \quad (3.7)$$

D'où le débit total de fluide dans le fil imprégné :

$$Q = \frac{4V_f}{L} \frac{d^2}{128\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.8)$$

On constate qu'à volume de vide constant dans le fil, le débit d'écoulement varie comme le diamètre des pores au carré. Par exemple, si on considère deux fils imprégnés fictifs de même volume de pores, l'un constitué de pores de 6,5 mm de diamètre, l'autre de pores de 20 mm de diamètre, alors ces deux fils ont même volume de pores  $v_{3-30}$ , mais les débits d'écoulement le long de ces fils seront dans un rapport  $(20/6,5)^2 = 9,5$ .

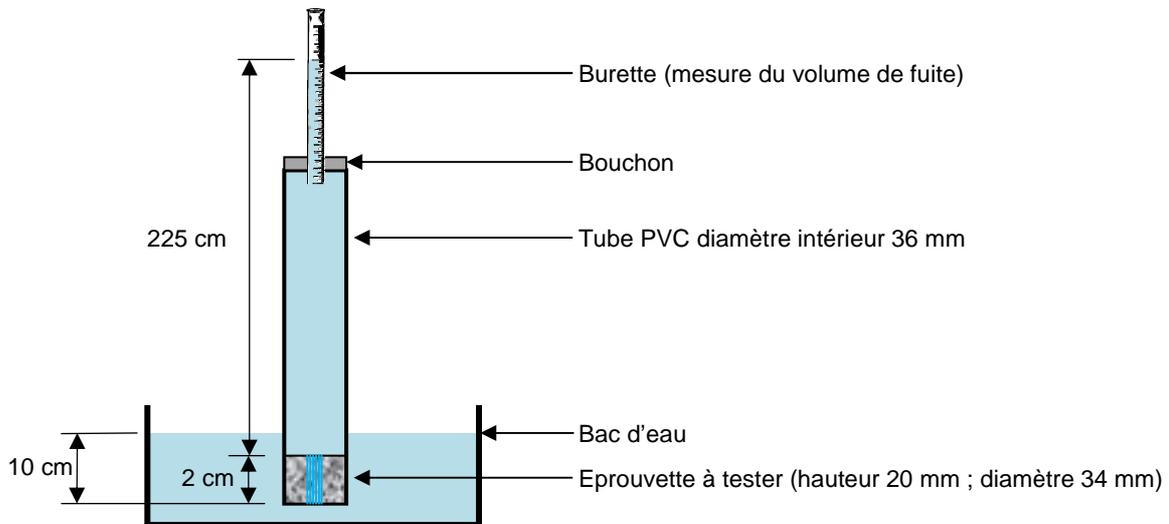
Une mesure du débit d'écoulement le long des fils imprégnés permet donc d'obtenir une information discriminante qui complète les informations obtenues par le biais de la porosimétrie mercure. Nous avons mis en œuvre cette mesure en réalisant un essai d'écoulement d'eau le long du fil. Le détail de la mise en œuvre de cet essai est donné dans la partie suivante.

### 3.4.2 Méthodologie de l'essai

#### 3.4.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est décrit dans la **figure 3.45**. Une éprouvette cylindrique de mortier de 20 mm de hauteur et 34 mm de diamètre, contenant un fil imprégné placé le long de son axe, est placée à l'extrémité inférieure d'un tube PVC rempli d'eau.

L'assemblage de l'éprouvette et du tube PVC est réalisé par l'intermédiaire d'un manchon souple et de collier de serrage, afin d'éviter toute fuite au niveau de l'interface tube / éprouvette. La partie supérieure du tube est fermée par un bouchon muni d'un tube gradué permettant la lecture visuelle de la variation du volume d'eau dans le tube (lecture au  $1/10^{\text{ème}}$  de ml).



**Figure 3.45.** Essai d'écoulement – dispositif expérimental.

La partie inférieure du tube est plongée dans un bac d'eau, de manière à permettre un écoulement continu de l'eau sans phénomène de goutte. Les niveaux d'eau dans le bac et dans le tube sont ajustés au début de l'essai d'écoulement pour imposer un gradient de pression de 10,53 kPa/cm dans l'éprouvette.

L'ensemble est placé dans un local fermé à température ambiante. Des mesures de température dans l'eau ont montré que les variations de la température de l'eau sont limitées ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ), ce qui correspond, en considérant un coefficient de dilatation thermique de l'eau de  $2.10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , à une variation volumique de  $\pm 0,45 \text{ ml}$ .

#### 3.4.2.2 Echantillons testés

Chaque éprouvette a été prélevée par sciage sur un échantillon de 25 mm de hauteur fabriqué suivant la méthodologie décrite **section 2.6**. Il est important de noter que cet échantillon est également utilisé pour les prélèvements nécessaires à la réalisation des essais de porosimétrie mercure présentés dans la **section 3.3**.

Les mesures sont réalisées sur des échantillons dont le mortier est âgé de 28 jours. Les échantillons de fils enrobés sont stockés dans l'eau à  $20^{\circ}\text{C}$  jusqu'à la réalisation du prélèvement des éprouvettes.

Chaque éprouvette associe un cylindre de mortier à l'un des fils multi-filamentaires utilisés dans notre recherche. Le fil a été prétraité avant coulage du mortier suivant l'une des méthodes décrites **section 2.6.2**. Des éprouvettes de référence, n'incorporant pas de fil multi-filamentaire, ont également été réalisées et testées afin de caractériser le débit d'écoulement au travers de la matrice cimentaire.

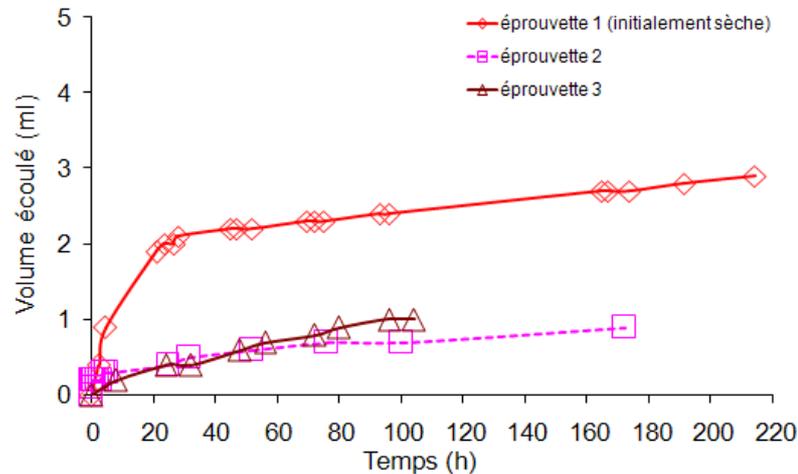


Figure 3.46. Essai d'écoulement : éprouvettes de référence.

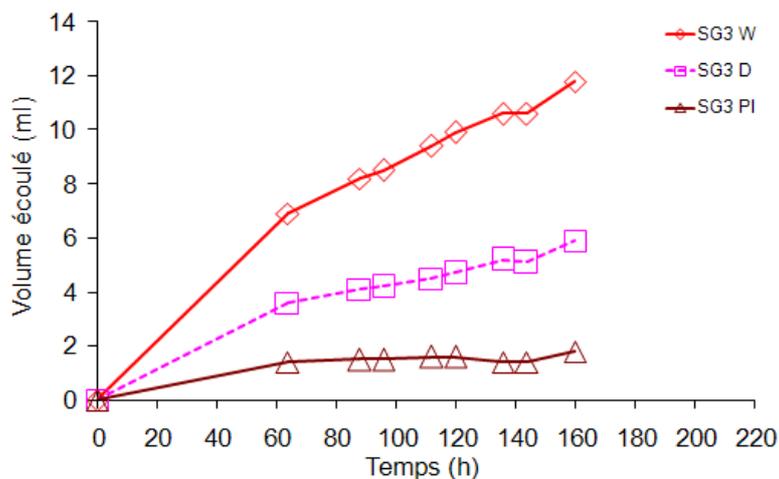


Figure 3.47. Essai d'écoulement: fils SG3.

### 3.4.2.3 Réalisation des essais et résultats bruts

La préparation et le déroulement d'un essai suit les étapes décrites ci-dessous :

- Prélèvement à 28 jours de l'éprouvette sur un échantillon de mortier (avec ou sans fil multi-filamentaire intégré),
- Mise en place de l'éprouvette dans le tube PVC. Vérification de l'étanchéité après avoir introduit l'eau dans le tube (cet aspect est la partie la plus délicate de l'essai d'écoulement tel que nous le réalisons),

- Mise en place du tube dans le bac inférieur. Mise à niveau des volumes d'eau amont et aval. L'écoulement d'eau se met en place dans les conditions requises,
- Après 48h d'essai (atteinte d'un régime d'écoulement permanent), ajout d'un complément d'eau pour ramener le volume total à zéro,
- Poursuite de l'essai pendant 5 jours.

Sauf exception, l'essai dure 7 jours, pendant lesquels le volume d'eau écoulé est régulièrement mesuré. Les 48 premières heures de l'essai correspondent au régime transitoire nécessaire à la mise en place d'un écoulement stationnaire. Cette phase transitoire étant dépendante de l'état hydrique de l'échantillon, nous avons travaillé systématiquement avec des éprouvettes initialement saturées et les débits d'écoulements ont été déterminés à partir des volumes écoulés au-delà des 48 premières heures d'essai.

Pour chaque configuration fil / prétraitement, ainsi que pour la configuration de référence (mortier sans fil), au moins 3 essais sont réalisés.

La **figure 3.46** donne l'évolution du volume écoulé au cours du temps, pour les éprouvettes de référence (mortier sans fil). On observe pour chaque éprouvette la phase transitoire comprise entre 24 et 48 heures, au-delà de laquelle le régime établi est atteint. L'éprouvette 1, initialement sèche, présente un comportement très différent de celui des deux autres éprouvettes au cours de la phase transitoire. Par contre, elle présente le même débit d'écoulement en régime établi.

La **figure 3.47** présente les volumes écoulés pour le fil SG3 et les 3 prétraitements possibles. Elle présente également le volume écoulé pour les éprouvettes de référence. Chacune des courbes présentées correspond à la courbe moyenne déterminée à partir des 3 éprouvettes correspondant à la situation donnée. On constate que les débits écoulés au travers des éprouvettes avec fibres sont supérieurs à celui obtenu avec l'éprouvette de référence, et que le débit obtenu en régime établi (la pente de la partie linéaire de la courbe), est variable suivant le prétraitement. Cela montre la capacité de l'essai d'écoulement à faire la différence entre les différents types de prétraitement du fil. Pour les autres fils, les courbes de volume écoulé font état de comportement tout à fait analogue à celui présenté **figure 3.47**.

### 3.4.3 Résultats et discussion

#### 3.4.3.1 Débit d'écoulement dans les échantillons

Le **tableau 3.6** donne les valeurs moyennes des débits d'écoulement obtenus au cours des essais d'écoulement pour chacune des configurations fil / prétraitement testées ainsi que pour le mortier de référence. Il donne également les coefficients de variations associés aux mesures.

**Tableau 3.6.** Débits d'écoulement mesurés, (ml/h).

Fil	W		D		PI	
	Moy.	Coefficient de variation	Moy.	Coefficient de variation	Moy.	Coefficient de variation
	ml/h	%	ml/h	%	ml/h	%
SG1	0,0848	10,53	0,0304	30,47	0,0105	33,23
SG2	0,0208	75,53	0,0153	16,82	0,0015	199,22
SG3	0,0387	37,42	0,0247	21,40	0,0015	269,08
OC1	0,0105	30,81	0,0306	53,36	0,0052	0,36
OC2	0,0408	18,91	0,0186	63,28	0,0116	3,89
Ch	0,0372	21,54	0,0433	35,82	0,0273	37,76
Référence	$q_{ref} = 0.0044$ ml/h ; coefficient de variation : 48,83 %					

On constate que ces derniers sont en général plus élevés pour les débits d'écoulement les plus faibles. Nous interprétons ce résultat par la configuration spécifique de l'écoulement. En effet, l'eau s'écoule principalement le long du fil, dans un réseau de pores quasi parallèles. De ce fait, la présence d'un défaut ponctuel conduisant à un étranglement le long du fil conduit à une réduction du débit d'écoulement par rapport au même fil sans défaut. En l'occurrence, les défauts qui nous intéressent correspondent à une pénétration de la matrice cimentaire dans le fil plus marquée localement. L'effet d'un tel défaut sur l'écoulement est d'autant plus marqué que l'écoulement se produit dans un volume réduit, plutôt lié à une forte imprégnation. Cela induit une variabilité plus marquée des mesures dans le cas des écoulements faibles, liés à un fil très imprégné.

#### 3.4.3.2 Débit d'écoulement dans les fils

La mesure de débit d'écoulement dont les résultats ont été donnés dans le paragraphe précédant intègre l'écoulement le long du fil et l'écoulement au travers de la matrice cimentaire. Par ailleurs, le débit d'écoulement le long du fil dépend de la nature de l'imprégnation, mais également de la surface de la section transversale du fil imprégné.

Pour cette raison, nous avons préféré caractériser le fil imprégné, non pas par le débit d'écoulement  $Q_f$  mesuré lors des essais d'écoulement, mais par le débit s'écoulant le long du fil, ramené à une unité de surface de la section du fil. Ce débit, noté  $q_f$  est calculé comme suit :

$$q_f = \frac{4(Q_f - Q_{ref})}{\pi D_i^2} \quad (3.9)$$

$Q_{ref}$  est le débit d'écoulement mesuré dans le cas des échantillons de référence (mortier sans fil).  $D_i$  est le diamètre du fil imprégné. Il dépend du type de fil et du prétraitement utilisé. Ce diamètre est donné dans la section 3.1.

Les valeurs obtenues pour le débit surfacique sont données dans le **tableau 3.7**. La **figure 3.48** permet par ailleurs une vision d'ensemble des résultats obtenus pour les différentes combinaisons fil / prétraitement.

De manière générale, pour les fils de verre, on constate que le débit d'écoulement surfacique varie de manière importante en fonction du prétraitement. Il est maximum pour chaque fil

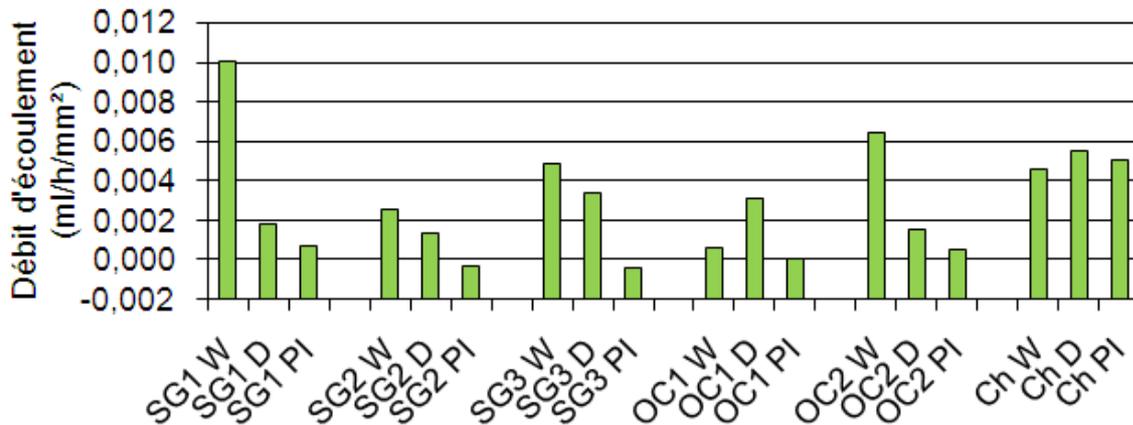
avec le prétraitement W (sauf pour le fil OC1), le prétraitement D donnant un débit plus faible, probablement parce que la légère pénétration de la matrice cimentaire réduit la section utile du fil comparé au prétraitement W. Le prétraitement PI conduit à des débits quasi nuls dans tous les cas, à l'exception du fil SG1 pour lequel un débit résiduel est mesuré.

**Tableau 3.7.** Débits surfacique d'écoulement dans les fils, (ml/h/mm<sup>2</sup>).

Fil	Prétraitement du fil		
	W	D	PI
SG1	0,0101	0,0018	0,0008
SG2	0,0026	0,0014	-0,0003
SG3	0,0049	0,0034	-0,0004
OC1	0,0006	0,0031	0,0001
OC2	0,0064	0,0016	0,0005
Ch	0,0046	0,0055	0,0051

Ces résultats mettent en évidence la manière dont les prétraitements influent sur la porosité des fils de verre. Le débit d'écoulement important obtenu avec le prétraitement W signe la présence de pores capillaire bien connectés, favorablement orientés vis-à-vis de l'écoulement. Ces pores sont pour l'essentiel les vides inter-filamentaires laissés libres entre des filaments bien alignés du fait de la présence d'eau dans le fil avant coulage du mortier. Le prétraitement PI, qui crée des vides dans le fil (la porosité augmente), déstructure la porosité intrinsèque du fil en augmentant la tortuosité du fait du remplissage partiel de l'espace inter-filamentaire par de la pate de ciment.

Pour le fil de chanvre, le débit surfacique semble relativement peu influencé par le type de prétraitement. Nous pensons que le tressage des filaments en mèches grossières permet un écoulement aisé de l'eau à l'intérieur des mèches, indépendamment de l'imprégnation de l'espace compris entre les mèches. Le débit d'écoulement n'est ainsi plus sensible au prétraitement.



**Figure 3.48.** Débits d'écoulement surfacique dans les fils imprégnés.

Ces résultats montrent que la mesure du débit d'écoulement est liée à l'imprégnation. Cette mesure peut donc, tout comme la mesure du volume poreux présentée **section 3.3**, servir d'indicateur quantitatif lié à l'imprégnation, sauf dans le cas du fil de chanvre pour lequel le débit d'écoulement ne permet pas la discrimination des prétraitements.

Cependant, il faut être prudent dans l'utilisation de cet indicateur, dans la mesure où le débit d'écoulement est également influencé par les propriétés de surface des filaments. En particulier, l'ensimage du fil joue vraisemblablement un rôle déterminant dans la mise en place de l'écoulement au sein du fil. Pour cette raison, le débit d'écoulement surfacique constitue un indicateur fiable lorsque l'on compare différents prétraitements réalisés sur un même fil. Ce n'est plus le cas lorsque l'on compare les fils entre eux dans la mesure où les ensimages sont variables.

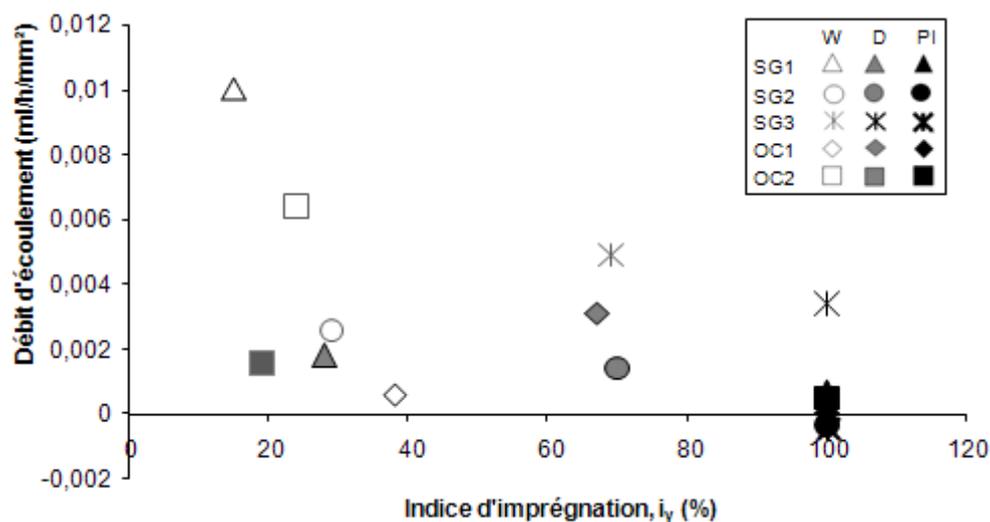
### 3.5 Relation entre les paramètres caractéristiques de l'imprégnation

#### 3.5.1 Relation entre l'index d'imprégnation et le débit d'écoulement surfacique

La **figure 3.49** présente le débit d'écoulement surfacique en fonction de l'indice d'imprégnation  $i_\gamma$  des fils imprégnés. Les fils de chanvre ne sont pas intégrés à ce graphe dans la mesure où la détermination de leur indice d'imprégnation n'a pas été possible avec la méthode que nous avons utilisé.

On constate globalement que le débit d'écoulement décroît lorsque l'indice d'imprégnation augmente, ce qui est lié à l'évolution de la tortuosité des pores avec la pénétration de la matrice cimentaire, comme expliqué **section 3.4.3.2**.

Par ailleurs, la différence entre débit maximum et débit minimum, pour un indice d'imprégnation donné, tend à s'atténuer lorsque l'indice d'imprégnation augmente. On peut y voir l'influence de l'évolution de la nature du matériau en contact avec l'écoulement en fonction de l'évolution de l'indice d'imprégnation. Lorsque celui-ci est élevé, la matrice cimentaire pénètre largement l'espace inter-filamentaire et l'eau est principalement en contact avec celle-ci, quelque soit le type de fil, ce qui explique la faible influence du type de fil sur les débits obtenus pour les forts indices d'imprégnation. Lorsque l'indice d'imprégnation est faible, l'eau est principalement en contact avec les filaments de verre et l'ensimage, ce qui explique la variation du débit avec le type de fil.



**Figure 3.49.** Relation entre le débit d'écoulement surfacique et l'indice d'imprégnation.

### 3.5.2 Relation entre l'indice d'imprégnation et les volumes différentiels de pores

#### 3.5.2.1 Cas du volume différentiel de pores $\Delta v_{0,3-3}$

Le volume différentiel des pores de diamètre compris entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$  est une fonction croissante de l'indice d'imprégnation, sauf dans le cas des fils SG3 et OC1 pour lesquels le volume différentiel des pores semble ne pas dépendre de l'indice d'imprégnation (**figure 3.50**). Cela peut être la conséquence de la pénétration de la matrice cimentaire, qui désorganise l'arrangement des filaments dans le fil, en particulier dans le cas du prétraitement PI pour lequel une action mécanique est mise en œuvre. La présence d'amas de matrice cimentaire ainsi que l'entremêlement croissant des filaments génèrent des vides au sein du fil qui induisent un accroissement du volume poreux différentiel dans cette gamme de diamètre de pores.

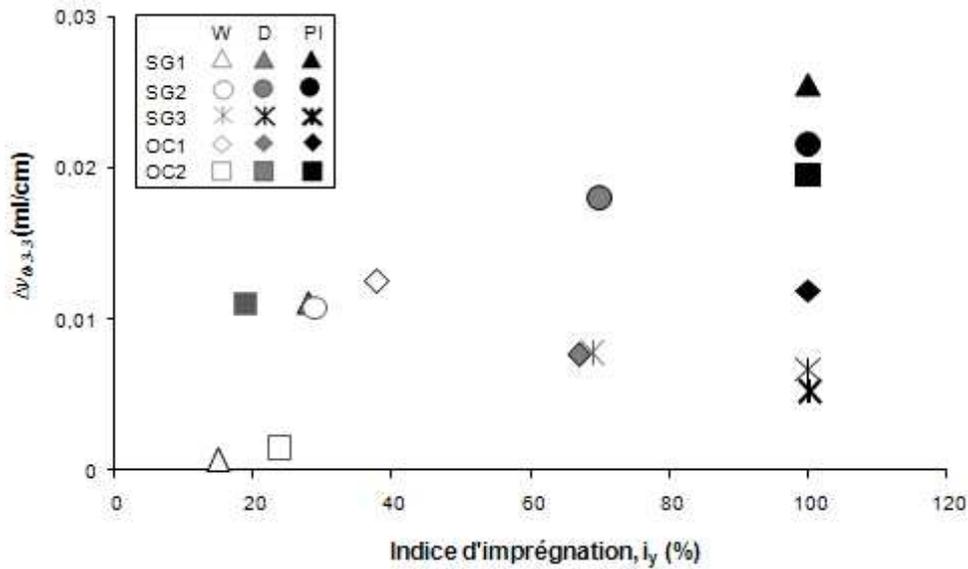


Figure 3.50. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux  $\Delta v_{0,3-3}$ .

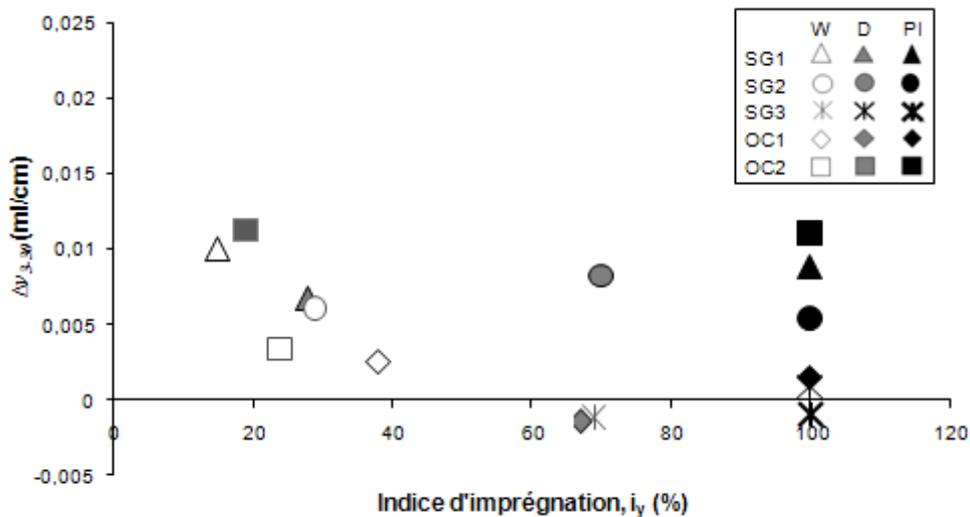


Figure 3.51. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux  $\Delta v_{3-30}$ .

### 3.5.2.2 Cas du volume différentiel de pores $\Delta v_{3-30}$

La **figure 3.51** montre la relation entre le volume différentiel de pores, pour les diamètres de pores compris entre 3 et 30  $\mu\text{m}$ , et l'indice d'imprégnation. Contrairement au cas du volume différentiel  $\Delta v_{0,3-3}$ , le volume différentiel  $\Delta v_{3-30}$  ne présente pas de variations significatives lorsque l'indice d'imprégnation change, et ce quel que soit le type de fil.

### 3.5.3 Corrélation entre le débit d'écoulement surfacique et les volumes différentiels de pores

Les **figures 3.52** et **3.53** présentent respectivement le volume différentiel  $\Delta v_{0,3-3}$  et le volume différentiel  $\Delta v_{3-30}$  en fonction du débit d'écoulement surfacique. Dans le cas des pores de diamètres compris entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ , le volume différentiel et le débit surfacique présente une bonne corrélation dans le cas des fils de verre. Seul le fil SG3 PI ne respecte pas cette corrélation mais l'imprécision des mesures de volume poreux peut expliquer cette différence. Pour ces fils, on constate que le volume différentiel évolue à l'inverse du débit d'écoulement, et que le fuseau contenant les points de mesure dans le plan volume différentiel / débit surfacique est relativement resserré.

En ce qui concerne le fil de chanvre, les points de mesure ne s'intègrent pas dans la tendance observée pour les fils de verre puisque, comme on l'a vu précédemment, le débit d'écoulement dans le fil reste relativement indépendant du type de prétraitement.

Dans le cas des pores de diamètres compris entre 3 et 30  $\mu\text{m}$ , le volume différentiel et le débit surfacique ne présentent plus une corrélation aussi marquée, même si pour la majorité des fils on observe toujours la décroissance du volume différentiel de pores lorsque le débit d'écoulement augmente. Dans ce cas encore, le fil de chanvre présente un comportement très différent de celui des fils de verre.

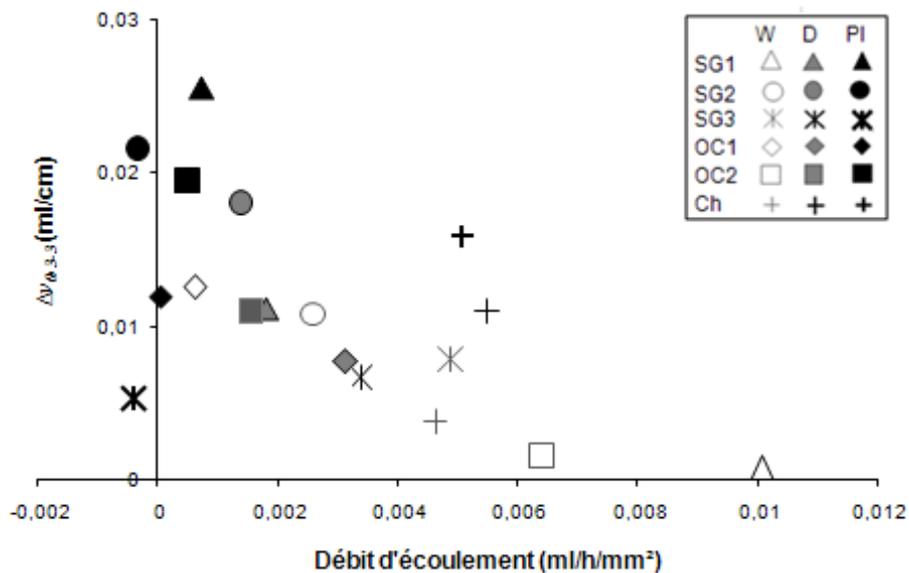
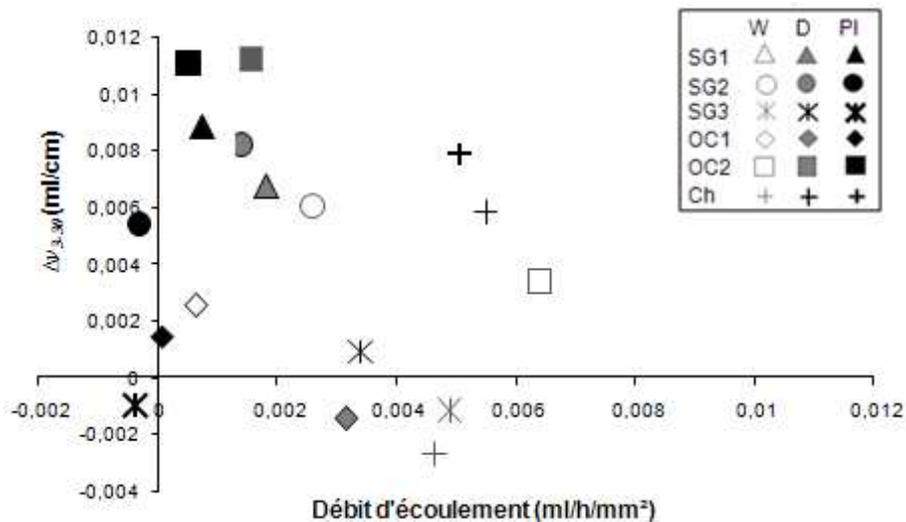
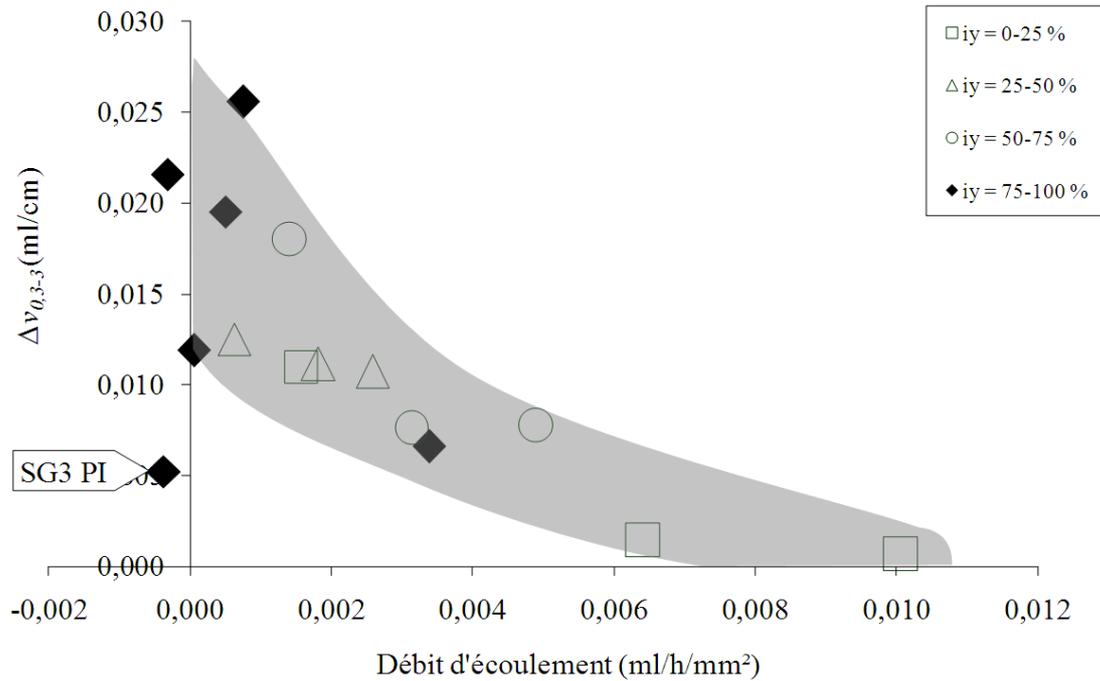


Figure 3.52. Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux  $\Delta v_{0,3-3}$ .



**Figure 3.53.** Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux  $\Delta V_{3,30}$ .

Enfin, il est intéressant d'examiner le lien qu'il y a entre l'indice d'imprégnation et les paramètres caractéristiques que sont le volume différentiel et le débit surfacique. La **figure 3.54** donne à nouveau le volume différentiel  $\Delta V_{0,3-3}$  en fonction du débit d'écoulement surfacique mais elle introduit par ailleurs les valeurs prises par l'indice d'imprégnation pour les différentes configurations fil / prétraitement testées. On constate que les valeurs prises par l'indice d'imprégnation, et donc la profondeur de pénétration de la matrice dans le fil, augmentent lorsque l'on se déplace de la droite vers la gauche sur la courbe écoulement / volume des pores (zone grisée de la **figure 3.54**). Ce constat confirme que les deux méthodes de caractérisation de l'imprégnation présentées dans ce chapitre sont bien deux points de vue différents sur le phénomène d'imprégnation du fil multi-filamentaire. Il montre par ailleurs que ces deux méthodes sont suffisantes à elles seules pour caractériser l'imprégnation du fil, au moins approximativement. Cela permet d'envisager de se passer des observations au microscope électronique, plus sujettes à l'interprétation de l'observateur pour caractériser l'imprégnation.



**Figure 3.54.** Relation entre le débit d'écoulement surfacique et le volume poreux  $\Delta V_{0,3-3}$  et lien avec l'index d'imprégnation.

### 3.6 Conclusion

Les observations de l'interface fil multi-filamentaire / matrice cimentaire, réalisées par microscopie électronique à balayage sur des sections de fil imprégné obtenues par clivage des éprouvettes de fils imprégnés, ont permis de visualiser la pénétration de la matrice cimentaire dans le réseau de vide inter-filamentaire, le long du fil multi-filamentaire. L'analyse des observations ainsi réalisées a permis de montrer la différence marquée de l'imprégnation en fonction du prétraitement utilisé. Notamment, il est montré que le prétraitement PI conduit à une imprégnation très différente de celles, plus comparables, obtenues pour les prétraitements W et D. L'influence du type de fils est également mise en évidence qualitativement.

Par ailleurs, deux méthodes quantitatives de caractérisation de l'imprégnation des fils multi-filamentaires ont été définies et utilisées pour caractériser les 5 fils de verre étudiés. Ces méthodes sont basées sur la mesure de paramètres dépendant du volume et de la taille des pores présents au sein du fil multi-filamentaire. La porosimétrie mercure différentielle est plutôt liée au volume des pores, tandis que l'essai d'écoulement est plus lié à la taille des pores.

La porosimétrie mercure différentielle consiste à déterminer le volume des pores compris entre 0,3 et 30  $\mu\text{m}$ . Par comparaison entre des échantillons avec fil et des échantillons sans fil, elle permet d'accéder au volume des pores situés à l'intérieur du fil multi-filamentaire.

Appliquée aux différentes combinaisons fil / prétraitement utilisés, cette méthode a permis de montrer que la pénétration de la matrice cimentaire dans le fil, au moment du coulage ou lors de la mise en œuvre du prétraitement du fil, est associée à la création de désordre dans

l'arrangement des filaments. Ces désordres induisent l'augmentation des vides inter-filamentaires, ce qui se traduit par l'augmentation du volume différentiel de pores lorsque la pénétration de la matrice cimentaire dans le fil augmente.

L'essai d'écoulement est un essai relativement simple à mettre en œuvre, qui caractérise l'imprégnation du fil par la mesure du débit d'un écoulement d'eau imposé le long du fil multi-filamentaire enrobé. Les résultats obtenus montrent que le prétraitement W favorise la mise en place de pores inter-filamentaires bien orientés vis-à-vis de l'écoulement et constitués par les vides laissés entre les filaments du fil. Les autres prétraitements, en favorisant de manière plus ou moins importante la pénétration de la matrice cimentaire, induisent une transformation de la porosité du fil qui conduit à l'apparition de pores plus tortueux, favorisant le contact de l'eau avec la matrice cimentaire, ce qui se traduit par des débits d'écoulement réduits par rapport à ceux mesurés pour les fils ayant été prétraité avec le prétraitement W.

Les résultats de ces deux méthodes de caractérisation ont été confrontés et ont été mis en parallèle avec les valeurs de l'indice d'imprégnation déterminé à partir des observations au microscope électronique à balayage présentées dans la première section de ce chapitre. On a ainsi pu mettre en évidence la corrélation du débit surfacique d'écoulement et du volume différentiel de pores et montrer que ces deux paramètres permettent un lien univoque avec l'indice d'imprégnation.

Ces deux paramètres vont donc pouvoir être confrontés aux paramètres caractéristiques du comportement à l'arrachement des fils multi-filamentaires enrobés, afin de faire le lien entre le comportement mécanique et l'état d'imprégnation. Ces aspects vont faire maintenant l'objet des deux chapitres suivants.



## **Chapitre 4**

### **Etude du comportement mécanique à l'arrachement des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire**

## 4.1 Introduction générale

L'un des objectifs de ce travail est d'étudier la relation qu'il y a entre l'imprégnation du fil multifilamentaire et le comportement mécanique à l'arrachement du fil enrobé.

Différents prétraitements des fils ont été utilisés dans ce travail (**chapitre 2**). On a vu (**chapitre 3**) qu'ils influençaient l'imprégnation du fil par la matrice cimentaire, notamment en générant des différences dans la profondeur de l'imprégnation.

Afin de caractériser le comportement mécanique de ces fils multifilamentaires diversement imprégnés par la matrice cimentaire d'enrobage, des essais d'arrachement ont été exécutés sur les éprouvettes présentées au **chapitre 2**. Ce chapitre présente les essais réalisés et les résultats obtenus en termes de description du comportement mécanique. La relation avec les paramètres d'imprégnation des fils fera, quant à elle, l'objet du chapitre suivant.

Au **chapitre 1** nous avons décrit l'essai d'arrachement et son utilisation dans le domaine des TRC. Pendant cet essai, un déplacement est imposé à l'extrémité libre du fil et continue à augmenter jusqu'à ce que le fil soit complètement séparé de la matrice cimentaire. Dans ce type d'essai, compte tenu de la nature multifilamentaire des fils, un paramètre majeur est la longueur de fil enrobée utilisée pour faire l'essai. L'effet de ce paramètre a été étudié dans nos essais en utilisant différentes longueurs d'enrobage. Ce paramètre s'ajoute aux autres paramètres de l'étude réalisée (type de fil, type de prétraitement du fil).

L'essai d'arrachement permet la caractérisation du processus complet d'arrachement de l'ensemble de filaments (roving) qu'il décrit sous forme de courbe charge-déplacement dont l'analyse permet la détermination des différents paramètres mécaniques comportementaux : résistance à la rupture, raideurs, ductilité, travail dissipé,...

Dans ce chapitre, après la présentation détaillée de la méthodologie utilisée pour la réalisation des essais d'arrachement, nous présentons d'abord les résultats obtenus en termes de comportement mécanique à l'arrachement pour les différents fils, les différents prétraitements et les différentes longueurs enrobées utilisées.

Nous nous intéressons ensuite au rôle spécifique de la longueur enrobée, pour mettre en évidence la longueur seuil au-delà de laquelle une partie des paramètres mécaniques deviennent invariants.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'interprétation des résultats obtenus, et notamment à l'étude de l'effet du type de fil et du type de prétraitement sur le comportement mécanique.

## 4.2 Méthode expérimentale

### 4.2.1 Description de l'essai d'arrachement

Dans cet essai un déplacement  $\delta$  est imposé à l'extrémité libre d'un fil dont l'autre extrémité est enrobée dans une matrice cimentaire sur une longueur  $L_e$ . On mesure l'effort de traction  $P$  imposé au fil. Une augmentation monotone du déplacement  $\delta$  conduit à la rupture progressive de la liaison fil / matrice, sous forme de ruptures locales des liaisons filaments / matrice et de ruptures de certains filaments le long de l'interface fil / matrice. La **figure 4.1** montre un fonctionnement de principe de l'essai d'arrachement. Une fois que la rupture de la liaison fil / matrice a atteint l'extrémité de la longueur enrobée, un mécanisme d'extraction est observé, avec éventuellement un déplacement de l'extrémité enrobée du fil [Naa91b]. Ce déplacement peut ne concerner qu'une partie du fil.

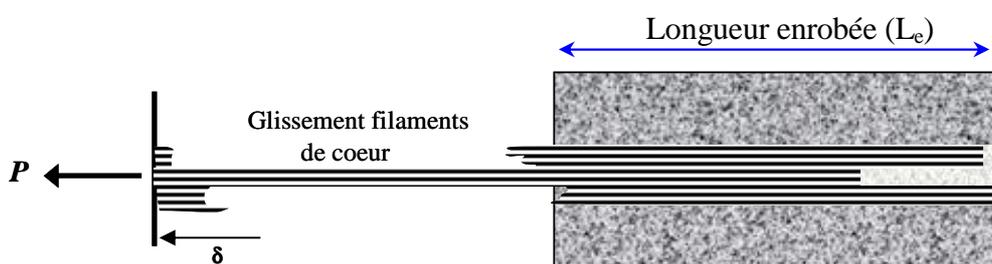


Figure 4.1. Glissement des filaments lors de l'arrachement.

### 4.2.2 Méthode de préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont constituées d'un fil multifilamentaire dont une extrémité (l'extrémité enrobée) est centrée dans un cylindre de mortier. L'autre extrémité (l'extrémité libre) est collée entre deux plaques d'époxy afin de permettre une mise en place facile dans la machine d'essai utilisée.

La mise en place de l'extrémité enrobée dans le mortier est réalisée conformément à la méthodologie décrite dans le **chapitre 2, partie 2.7**. L'imprégnation du fil au niveau de l'extrémité enrobée est variable, en fonction du prétraitement imposé à la partie enrobée du fil avant coulage du mortier. Pour les essais d'arrachement, toutes les configurations présentées au **chapitre 2** ont été utilisées. Par ailleurs, différentes longueurs enrobées ( $L_e$ ) ont été utilisées, comprises entre 1 et 25 cm. Cette dernière longueur correspond à la longueur maximale permise par le montage d'arrachement utilisé.

La maîtrise du process de fabrication des éprouvettes est un élément très important pour maîtriser la performance à l'arrachement des fils multifilamentaires puisqu'une multitude de paramètres liés à la fabrication peuvent influencer le comportement à l'arrachement. En particulier, il a fallu apporter un grand soin à la manipulation des fils multifilamentaires pour maîtriser au mieux la variabilité de la longueur des filaments constituant le fil.

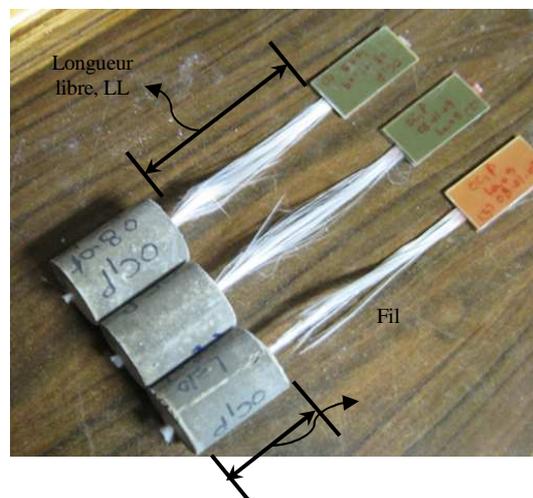
Pour cette raison, au moins 3 éprouvettes ont été réalisées pour chaque configuration testée, ce qui a représenté un total de 353 éprouvettes fabriquées pour les essais d'arrachement.

La cure des éprouvettes est celle détaillée au **chapitre 2, partie 2.9**. L'extrémité libre du fil est maintenue hors de l'eau pendant toute la cure. Les éprouvettes sont sorties de l'eau à 25 j (soit 3 jours avant l'essai d'arrachement). Ceci permet de sécher à l'air, à 20°C, l'extrémité libre du fil (pendant 1 jour) pour pouvoir ensuite réaliser le collage des deux plaques d'époxy 2 jours avant l'essai. La colle utilisée est une colle époxy. Un temps de séchage d'une journée est imposé avant réalisation de l'essai d'arrachement. Pendant ces trois jours, le cylindre de mortier dans lequel est enrobé le fil est conservé mouillé en le maintenant dans un sac plastique (**figure 4.2**) enlevé juste au moment de la réalisation de l'essai d'arrachement.



**Figure 4.2.** Protection des éprouvettes de la dessiccation lors de la préparation des éprouvettes d'arrachement.

Concernant la géométrie de l'éprouvette (**figure 4.3**), on appelle longueur libre ( $L_L$ ) la longueur de fil non enrobé comprise entre le collage dans les deux plaques d'époxy et le cylindre de mortier. Cette longueur est constante, égale à 10 cm. La longueur enrobée ( $L_e$ ) est variable.



**Figure 4.3.** Trois éprouvettes après l'arrachement,  $L_e = 5$  cm.

### 4.2.3 Mise en œuvre de l'essai

Les essais d'arrachement ont été effectués en utilisant une presse Instron 5567 de capacité 30 kN (**figure 4.4**). Le cylindre de mortier est positionné sur une platine d'appui qui permet le centrage du fil. Cette platine est fixée dans le mors supérieur de la presse (mors mobile). Un système de maintien spécifique (non visible sur la **figure 4.4**) permet de garantir la perpendicularité de l'axe du cylindre par rapport à la plaque d'appui. Une fois le cylindre de

mortier parfaitement axé et centré sur la presse, l'extrémité libre du fil est fixée par serrage des plaques d'époxy dans le mors inférieur (mors fixe).

Il est important de noter que l'axe du cylindre de mortier, la longueur libre du fil et l'axe de la presse doivent coïncider parfaitement pour garantir le bon déroulement de l'essai.

L'essai est conduit à vitesse de déplacement imposé (0,01 mm/min) du mors mobile par rapport au mors fixe. Le système d'acquisition enregistre effort et déplacement durant tout l'essai. L'essai est mené jusqu'à rupture complète de l'ancrage fil / mortier (retour de l'effort de traction à zéro, aux incertitudes de mesures près).

Il faut remarquer que le déplacement du mors mobile est la somme du déplacement d'extraction du fil et de l'allongement de la longueur libre.

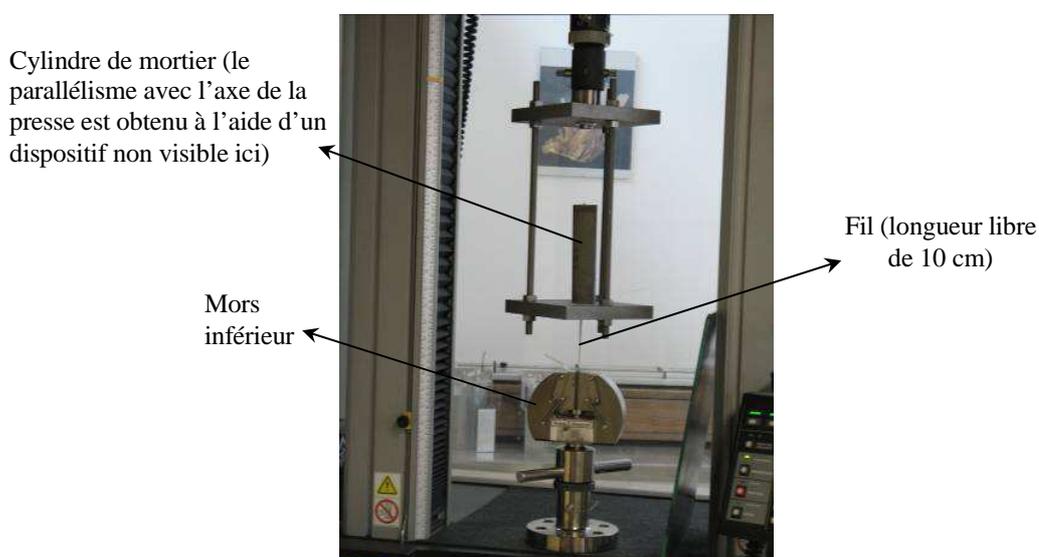


Figure 4.4. Essai d'arrachement: montage utilisé.

## 4.3 Comportement mécanique observé

### 4.3.1 Description qualitative du comportement

#### 4.3.1.1 Comportement observé – exemple du fil SG1

A titre d'exemple, nous décrivons dans ce paragraphe le comportement observé dans le cas du fil SG1. Les autres fils, tout en montrant des variations par rapport au comportement du fil SG1, se comportent qualitativement de manière similaire. Les différences entre les différents fils seront décrites dans le **paragraphe 4.3.1.2**.

La **figure 4.5** donne les courbes effort-déplacement obtenues dans le cas du fil SG1W, pour une longueur enrobée  $L_e$  de 15 cm. Le fil SG1 contient 5940 filaments répartis en 55 mèches.

On remarque d'abord une variabilité significative du comportement d'une éprouvette à l'autre. Cette variabilité est très caractéristique des fils multifilamentaires, dont la structure complexe ne permet pas une mise en œuvre parfaitement reproductible d'un essai à l'autre (disposition aléatoire des filaments dans le fil, pénétration localement non contrôlée de la pâte de ciment).

Cette variabilité est plus forte lorsque la longueur ancrée est faible (voir à titre d'exemple les courbes effort-déplacement obtenues pour trois éprouvettes réalisées avec une longueur enrobée de 1 cm, **figure 4.6**).

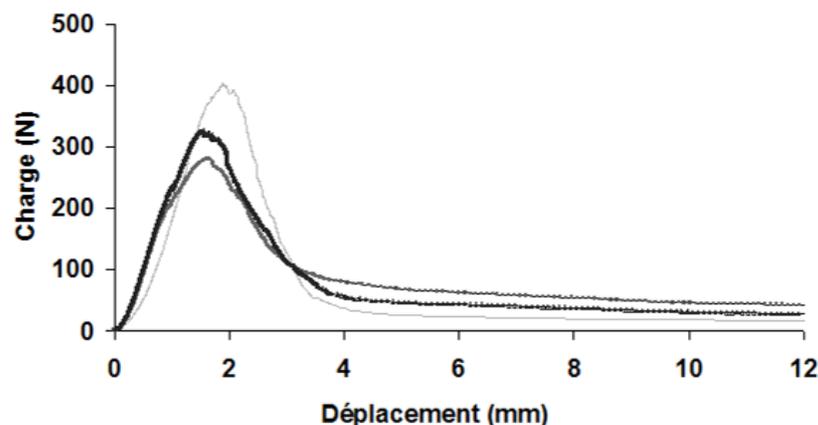
Au début de la mise en charge, la courbe effort-déplacement montre une courbure positive typique du phénomène d'activation retardée observable lors des essais de traction sur fils multifilamentaires. Ce phénomène correspond à la mise en tension progressive des filaments lors de l'allongement initial du fil (à cause des différences dans les longueurs initiales des différents filaments constituant le fil).

Une fois l'ensemble des filaments tendus, le comportement entre dans une phase élastique linéaire pendant laquelle la charge augmente de manière monotone. Cette phase se poursuit jusqu'à atteindre approximativement 60 à 90% de l'effort maximum appliqué, suivant les éprouvettes. Les liens filaments-matrice commencent alors à rompre. Comme expliqué au **chapitre 1**, la rupture du lien filament-matrice correspond soit à la rupture du filament en traction, soit à la rupture de l'adhérence filament-matrice puis au glissement du filament.

Lorsque l'effort s'approche de la charge de rupture, les ruptures des liaisons filaments-matrice deviennent de plus en plus nombreuses, ce qui conduit dans un premier temps à une diminution progressive de la pente de la courbe effort-déplacement, puis à l'atteinte de l'effort maximum  $P_{max}$ .

L'ensemble des phases décrites ci-dessus constituent la phase pré-pic du comportement. Au-delà du pic d'effort ( $P_{max}$ ), commence la phase post-pic du comportement : l'effort chute rapidement avec une pente de la courbe effort-déplacement sensiblement constante. Le taux de chute de l'effort est dans cette phase du même ordre de grandeur que la vitesse de mise en charge dans la phase pré-pic. Cette chute se poursuit jusqu'à atteindre un effort seuil, ici de l'ordre de 100N.

Après ce seuil, le taux de chute de l'effort diminue fortement (division par un facteur 10 à 100 du taux de chute de l'effort au passage du seuil). Dans cette phase, que nous nommerons phase post-pic résiduelle, toutes les liaisons filaments-matrice sont rompues. L'effort mesuré correspond au frottement résiduel des filaments entre eux et sur la matrice.



**Figure 4.5.** Variabilité du comportement d'un fil multifilamentaire. 3 fils SG1 W,  $L_e = 15$  cm.

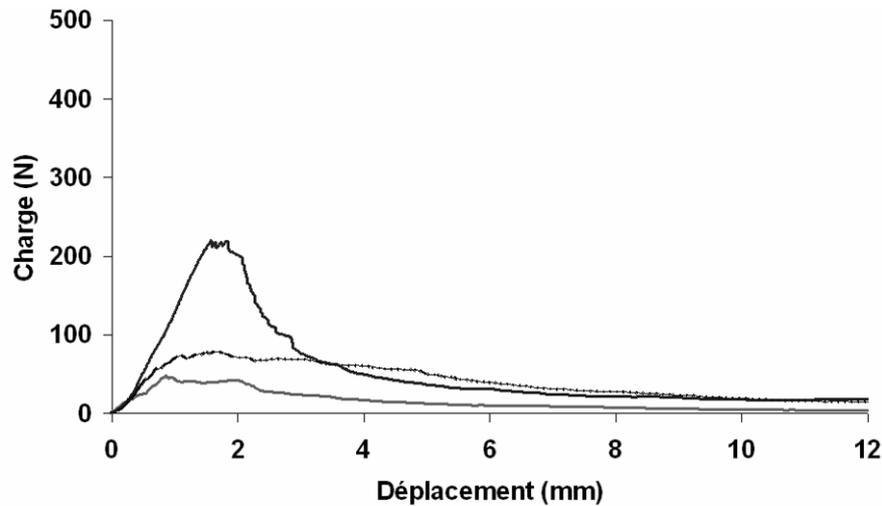


Figure 4.6. Variation remarquable du comportement. 3 fils SG1 W,  $L_e = 1$  cm.

Dans la suite nous allons détailler le comportement observé dans le cas du fil SG1, en nous intéressant en particulier à l'effet de la longueur enrobée et à celui du prétraitement du fil avant le coulage (W, D et PI).

- Sur un fil pré-mouillé (prétraitement W)

La **figure 4.7 a** montre les résultats obtenus pour les essais d'arrachement sur le fil SG1 W. On rappelle que dans ce cas le prétraitement apporté au fil avant coulage de la matrice cimentaire consiste en un pré-mouillage à l'eau dont la fonction est de réduire l'interaction du fil avec le mortier frais.

La charge de rupture augmente régulièrement lorsque la longueur enrobée augmente, jusqu'à ce que celle-ci atteigne 10 cm. On observe une chute de la résistance pour une longueur  $L_e$  de 25 cm. Les courbes correspondant à des longueurs  $L_e$  de 1 cm et 3 cm sont plates et décalées vers les grandes valeurs de déplacement. Cela correspond au fait que très peu de filaments sont effectivement ancrés et que l'effort mesuré correspond pour l'essentiel au frottement résiduel.

Comme on l'a expliqué auparavant, l'espace inter-filamentaire est saturé d'eau. Le fil mouillé dont les filaments sont compactés par les forces capillaires, ne permet pas la pénétration des particules de ciment entre les filaments, empêchant l'ancrage de la majorité d'entre eux dans la matrice. En conséquence, la quasi-totalité des filaments sont extraits de la matrice au cours de l'essai (voir **figure 4.8 a**, l'éprouvette après essai d'arrachement).

- fil sec (prétraitement D)

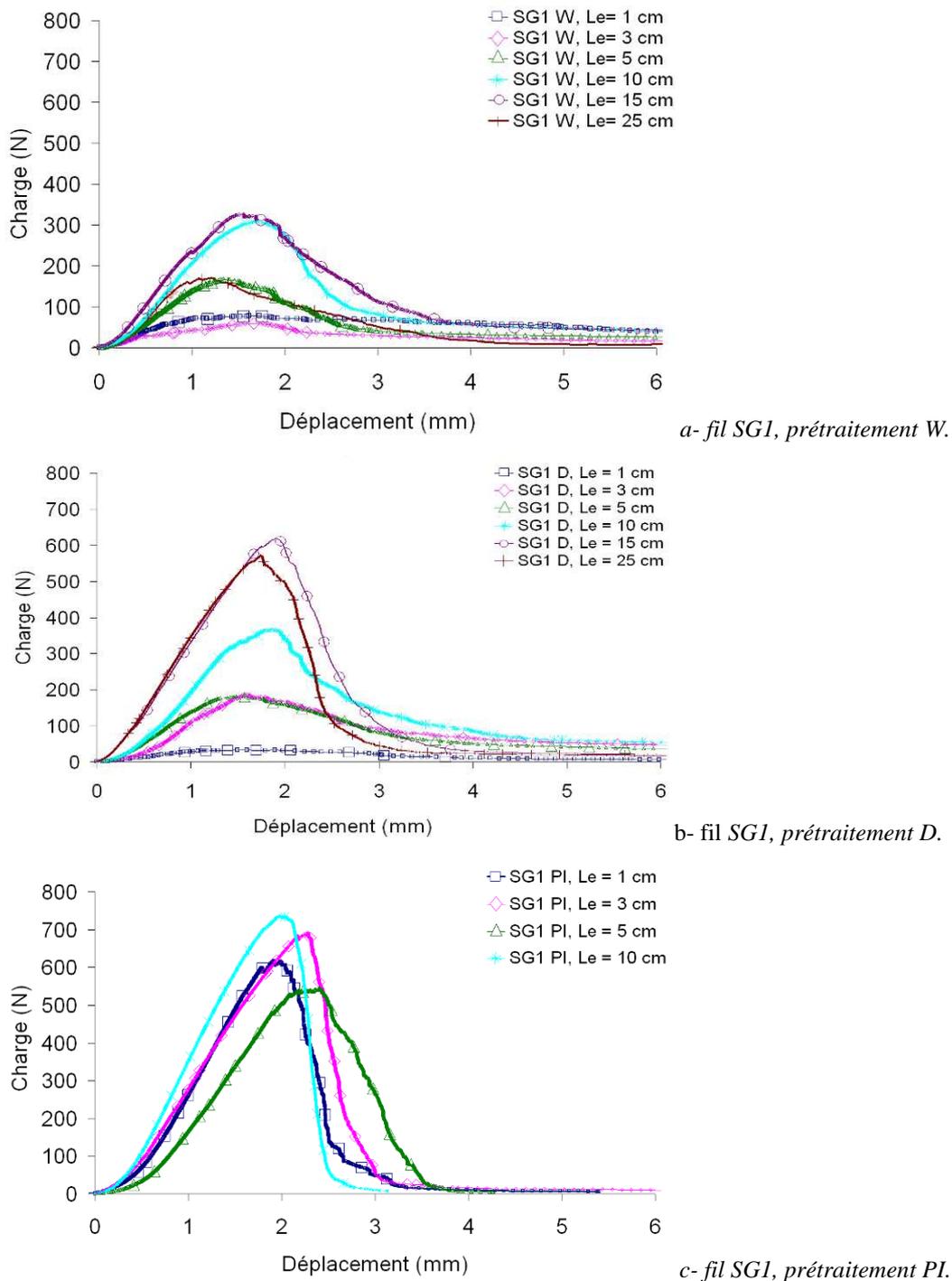
Les fils D sont des fils qui sont séchés avant mise en place dans le mortier. Cela permet d'améliorer la pénétration de la matrice cimentaire dans le fil au moment du coulage de l'éprouvette. Dans le cas de ces fils, le comportement observé est similaire à celui observé pour le fil W (**figure 4.8 b**). Notamment, les faibles longueurs enrobées conduisent à l'extraction quasi complète des filaments associée à un effort résultant correspondant aux frottements résiduels filaments-matrice et filaments-filaments.

Lorsque la longueur enrobée augmente, l'effort résistant augmente également, de manière plus importante que dans le cas du fil W. Ainsi, la résistance maximum mesurée, correspondant à  $L_e = 15$  cm, est presque double de celle mesurée pour SG1W. Dans ce cas, la pente post-pic de la courbe effort déplacement devient plus importante, en valeur absolue, que celle observée dans la phase pré-pic.

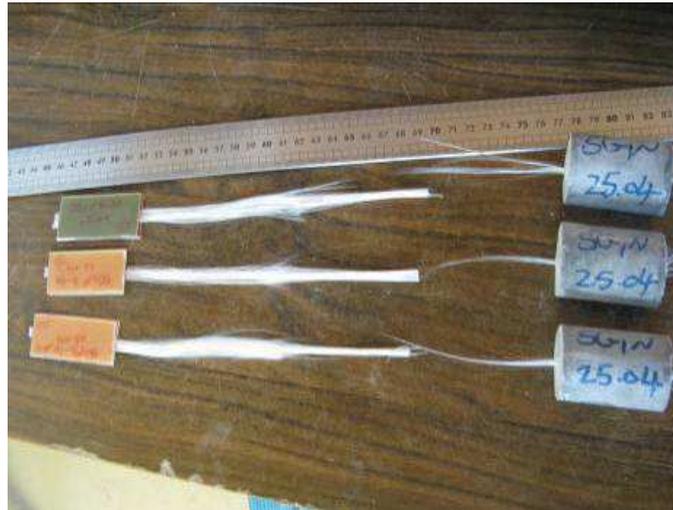
- fil pré-imprégné (prétraitement PI)

Dans le cas des fils PI (**figure 4.7 c**), le comportement semble peu influencé par la longueur enrobée (pour cette raison, les longueurs enrobées au-delà de  $L_e = 10$  cm n'ont pas été testées). Il est par ailleurs très similaire au comportement observé dans le cas des fils D, pour les longueurs enrobées importantes, correspondant à la résistance à l'arrachement maximum.

Avec les fils PI, La rupture de la liaison matrice-filament est obtenue uniquement par rupture des filaments, dans les premiers millimètres de fil enrobé. Aucun filament n'est extrait en totalité de l'éprouvette de mortier (**figure 4.8 c**).



**Figure 4.7.** Courbes charge - déplacement du fil SG1 (prétraitements W, D, PI).



*a- SG1 W*



*b- SG1 D*



*c- SG1 PI*

**Figure 4.8.** Éprouvettes après essai d'arrachement, cas SG1 W, D et PI,  $L_e = 5$  cm.

### 4.3.1.2 Autres fils

Les autres fils utilisés dans l'étude diffèrent du fil SG1 principalement par leur structure (nombre et taille des filaments, nombre ou absence de mèches) et par le type d'ensimage utilisé. Ces éléments influencent les propriétés de contact du fil, et donc génèrent des différences d'imprégnation du fil par la matrice cimentaire ainsi que des différences de comportement mécanique à l'arrachement.

Cependant, le comportement mécanique observé pour chaque type de fil reste qualitativement le même que celui décrit au paragraphe 4.3.1.1 pour le fil SG1. Les différences relevées concernent donc exclusivement les niveaux d'effort et de déplacement mis en jeu avec les différents types de fil.

En outre, la variabilité mesurée pour ces fils reste importante, à l'image de celle observée avec le fil SG1.

## 4.3.2 Paramètres caractéristiques du comportement à l'arrachement

### 4.3.2.1 Définition des paramètres caractéristiques retenus

Différents paramètres caractéristiques ont été déterminés à partir des relations efforts / déplacement déterminées expérimentalement. La **Figure 4.9** présente ces paramètres. Ils sont les suivants :

- Phase pré-pic : effort à la rupture  $P_{max}$ , déplacement à la rupture  $\delta_{max}$ , raideur à la mise en charge (ou raideur pré-pic)  $k_{bond}$ .
- Phase post-pic : raideur à la décharge (ou raideur post-pic)  $k_{debond}$ , effort à la transition phase post-pic / phase post-pic résiduelle  $P_{résiduel}$ , déplacement à l'entrée dans la phase post-pic résiduelle  $\delta_{résiduel}$ .
- Phase post-pic résiduelle : raideur résiduelle  $k_{frictional}$ .

La raideur à la mise en charge  $k_{bond}$  est déterminée comme la pente de la régression linéaire associée aux points de mesure de la branche ascendante de la courbe effort-déplacement correspondant aux efforts compris entre 50% et 80% de  $P_{max}$ . Il est important de noter que  $k_{bond}$  intègre la déformation de la longueur libre du fil (10 cm) et n'est donc pas une grandeur intrinsèquement caractéristique du comportement à l'arrachement.

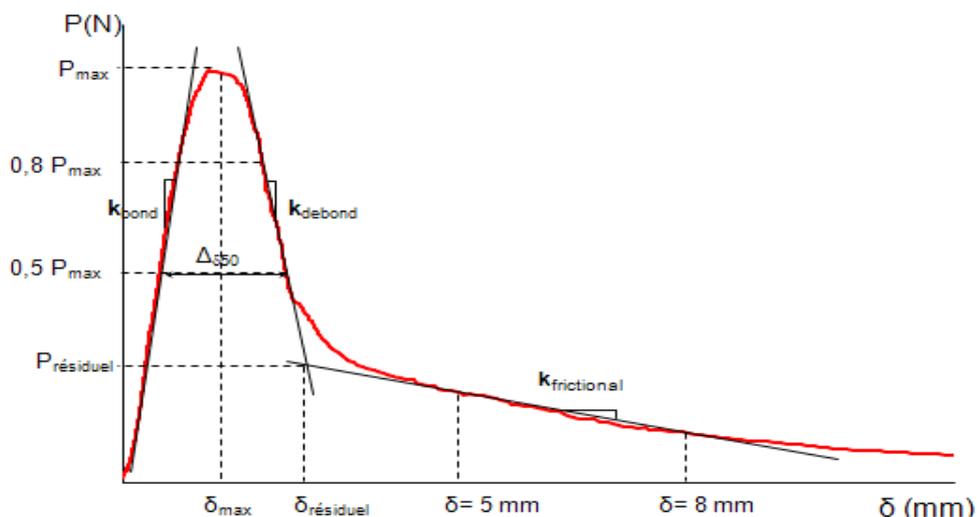


Figure 4.9. Paramètres caractéristiques du comportement à l'arrachement.

La raideur à la décharge  $k_{debond}$  est déterminée de manière analogue à la raideur à la mise en charge, en travaillant à partir de la partie décroissante de la courbe effort-déplacement.

$k_{frictional}$  est un paramètre caractéristique du frottement résiduel entre les filaments après rupture la liaison fil / matrice cimentaire. Il est déterminé comme  $k_{bond}$  et  $k_{debond}$  pour les points de mesure correspondant à des déplacements compris entre 5 et 8 mm. Ces valeurs ont été préalablement validées comme le plus petit intervalle de déplacement donnant une mesure stable de  $k_{frictional}$ .

L'intersection des droites de régression considérées pour le calcul de  $k_{debond}$  et  $k_{frictional}$  définit le point de transition entre la phase post-pic et la phase post-pic résiduelle. L'ordonnée et l'abscisse de ce point fournissent respectivement les valeurs de  $P_{résiduel}$  et  $\delta_{résiduel}$ .

En complément à ces paramètres, on détermine par ailleurs les paramètres énergétiques suivant :

- travail dissipé dans la phase pré-pic  $W_{pré-pic}$ , cette grandeur correspond au travail dissipé dans toute la phase pré-pic,
- travail dissipé dans la phase post-pic  $W_{post-pic}$ , cette grandeur correspond au travail dissipé dans la phase post-pic, pour les déplacements inférieurs à 8 mm (phases post-pic et post-pic résiduelle).
- travail total dissipé  $W_{total}$  (somme de  $W_{pré-pic}$  et  $W_{post-pic}$ ).

Ces grandeurs sont déterminées par intégration de la courbe effort-déplacement sur la partie ad-hoc.

Dans certains cas (en particulier avec le prétraitement PI), la phase post-pic résiduelle de l'essai d'arrachement est réduite à presque rien parce que la longueur des filaments rompus n'est plus suffisante pour donner un frottement résiduel significatif stable ou quasi-stable. Dans ce cas, les valeurs de  $k_{frictional}$ ,  $P_{résiduel}$  et  $\delta_{résiduel}$  ne sont pas calculées.

#### 4.3.2.2 Tableau de résultats

Les **tableaux 4.1, 4.2.** et **4.3.** donnent les valeurs moyennes des paramètres caractéristiques du comportement obtenues dans les différentes configurations testées. Sauf cas particuliers précisés dans les tableaux, chaque valeur correspond à la moyenne des mesures réalisées sur trois éprouvettes différentes.

On constate que les coefficients de variation des différentes grandeurs mesurées sont relativement élevés. Cela est caractéristique du comportement des fils multifilamentaires. On notera également que le coefficient de variation a tendance à diminuer lorsque la longueur ancrée augmente.

**Tableau 4.1.** Pic de résistance et rigidités.

Fil	Type de pré-traitement	Le	P <sub>max</sub>		δ <sub>max</sub>		k <sub>bond</sub>	
			Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation
			cm	N	%	mm	%	N/mm
SG1	W	1	115,44	79,3	1,35	31,3	102,49	63,2
		3	89,06	58,1	1,67	6,7	67,04	71,1
		5	187,83	28,6	1,54	6,2	148,01	31,0
		10	324,66	4,2	1,62	3,6	257,69	8,7
		15	336,44	20,0	1,69	2,1	249,85	4,1
		25	248,35	46,5	1,6	34,0	213,85	15,3
	D	1	30,88	19,5	2,17	53,8	20,03	80,3
		3	164,65	16,7	1,46	12,1	151,81	0,6
		5	155,54	22,4	1,54	6,0	140,73	37,4
		10	388,01	6,3	1,88	5,8	282,19	21,9
		15	583,33	7,3	1,93	13,4	376,31	15,6
		25	503,04	20,0	1,84	4,6	339,96	11,1
	PI	1	580,33	15,5	2	10,8	436,37	9,9
		3	630,99	13,6	2,25	6,8	367,21	8,7
		5	576,13	17,5	2,19	10,2	381,18	19,8
10		689,85	11,6	1,95	11,8	436,73	6,5	
SG2	W	1	49,65	63,0	1,36	14,4	33,9	43,3
		3	140,05	35,2	1,59	19,6	114,11	35,0
		5	259,61	38,3	1,66	35,4	179,26	5,7
		10	360,96	26,0	1,91	7,9	242,44	17,0
		15	395,23	30,9	2,25	0,6	266,34	76,0
		25	451,97	21,5	2,06	2,1	245,24	32,2
	D	1	47,28	*	1,14	*	54,38	*
		3	176,25	25,1	1,42	0,9	207,25	22,2
		5	192,39	4,7	1,68	10,6	150,12	0,0
		10	374,9	37,9	1,84	5,5	259,2	26,6
		15	452,31	33,3	2,37	11,3	267,69	18,1
		25	489,93	9,0	2,24	6,9	311,05	4,1
	PI	1	586,24	15,5	2,33	11,7	395,36	3,1
		3	748,49	23,2	2,34	6,7	444,26	7,8
		5	695,73	11,2	2,56	14,1	324,64	9,1
SG3	W	1	84,64	2,1	1,53	25,5	109,22	11,2
		3	196,51	72,3	1,38	24,5	191,53	74,6
		5	266,52	8,4	1,47	10,3	292,4	13,6
		10	496,85	28,3	1,87	6,4	326,06	21,2
		15	525,22	3,6	2,16	9,5	310,69	5,7
		25	605,04	21,3	1,94	2,1	377,76	8,5
	D	1	48,73	34,5	1,67	34,0	51,17	23,0
		3	230,08	35,5	1,86	13,6	235,61	15,1
		5	230,16	3,2	1,67	1,4	213,08	24,8
		10	519,97	10,6	1,94	10,2	364,73	12,4
		15	463,12	12,6	1,91	5,6	315,74	9,1
		25	571,16	14,1	2,18	7,1	345,62	13,9
	PI	1	570,14	3,3	2,72	11,8	330,96	5,3
		3	751,15	11,8	2,36	2,4	442,88	10,0

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

Fil	Type de pré-traitement	Le	P <sub>max</sub>		δ <sub>max</sub>		k <sub>bond</sub>	
			Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation
			cm	N	%	mm	%	N/mm
OC1	W	1	107,11	27,5	1,5	17,8	115,63	39,4
		3	193,35	35,2	1,21	17,7	222,4	28,3
		5	303,39	28,4	1,28	18,7	352,68	19,1
		10	333,15	5,0	1,27	21,8	366,66	13,5
		15	342,05	23,4	1,43	7,6	342,24	19,4
		23	421,15	7,3	1,59	12,6	386,53	13,2
		25	182,33	49,5	1,84	74,3	223,4	78,0
	D	1	114,07	16,5	1,99	54,3	74,88	8,8
		3	193,67	16,9	1,25	35,2	262,37	24,2
		5	292,34	23,4	1,34	10,3	299,94	29,4
		10	333,72	*	1,46	*	283,73	*
		15	337,59	7,0	1,28	21,0	423,79	15,0
	PI	1	297,23	26,1	1,52	11,9	315,89	33,7
		3	354,18	7,7	1,18	2,6	394,06	18,6
		5	285,31	54,9	1,36	17,5	285,25	58,4
10		489,85	*	1,29	*	498,34	*	
OC2	W	1	59,71	49,9	0,77	4,7	88,94	23,3
		3	78,07	54,0	0,88	11,9	93,12	26,0
		5	150,92	25,4	0,99	22,9	188,96	27,2
		10	205,85	13,2	1,26	13,8	211,77	12,5
		15	194,93	8,1	1,12	15,0	203,43	15,0
		25	208,47	22,8	0,99	7,4	286,15	29,8
	D	1	67,04	14,7	0,88	15,9	133,92	16,2
		3	92,52	39,3	1,27	46,6	143,52	53,3
		5	148,38	24,6	1,84	37,2	161,54	25,5
		10	331,43	29,6	1,18	6,3	326,63	29,2
		15	367,24	21,7	1,34	12,3	360,75	8,7
		25	275,26	17,1	1,43	41,1	291,85	31,1
	PI	1	162,87	16,1	0,97	11,1	206,19	25,2
		3	253,32	13,2	0,94	28,5	340,87	27,4
		5	483,89	2,1	1,56	3,5	393,11	3,4
10		362,71	16,2	1,66	21,5	313,5	31,6	
15		455,74	7,4	1,51	6,1	332,23	16,9	

(\*) : Une seule éprouvette.

**Tableau 4. 2.** Phase post-pic : rigidité ; phase résiduelle ; point de transition et ouverture de la courbe.

Fil	Type de pré-traitement	Le cm	k <sub>debond</sub>		k <sub>frictional</sub>		δ <sub>résiduel</sub>		P <sub>résiduel</sub>		Δδ50		
			Moyenne	cv	Moyenne	cv	Moyenne	cv	Moyenne	cv	Moyenne	cv	
			N/mm	%	N/mm	%	mm	%	N	%	mm	%	
SG1	W	1	56,34	133,6	4,92	97,5	4,14	35,3	33,96	68,8	3,22	62,3	
		3	65,14	130,6	2,75	49,5	3,39	19,6	29,73	29,5	2,25	16,8	
		5	111,98	45,7	2,47	21,5	3,05	13,2	37,39	28,4	1,87	6,8	
		10	278,72	12,1	3,13	13,1	2,64	0,9	55,46	6,1	1,49	5,7	
		15	223,78	8,4	3,08	160,5	3,17	34,5	51,64	91,4	1,85	6,5	
		25	106,73	67,2	1,88	65,6	3,94	10,9	23,63	52,5	2,16	12,7	
	D	1	2040,89	171,8	1,08	38,8	3,17	18,9	8,88	17,6	2,4	29,9	
		3	85,82	23,3	4,05	63,6	2,95	12,0	43,77	71,4	1,83	13,6	
		5	83,82	56,4	3,18	15,0	3,03	8,7	41,63	23,7	2,09	20,7	
		10	300,5	39,1	3,8	65,8	3,1	13,2	79,38	52,9	1,73	3,9	
		15	700,83	21,7	2,4	30,9	2,89	4,7	33,04	46,6	1,53	11,1	
		25	637,81	44,3	1,52	20,6	2,85	10,1	18,88	26,2	1,46	3,3	
	PI	1	734,6	41,3	4,99	134,0	2,96	13,9	30,29	104,5	1,32	18,3	
		3	1642,46	78,6	-	-	-	-	-	-	1,32	10,7	
		5	730,59	46,6	-	-	-	-	-	-	1,43	15,3	
		10	1980,03	47,6	-	-	-	-	-	-	1,33	3,8	
	SG2	W	1	31,1	0,6	1,94	54,3	3,78	46,3	14,96	22,5	1,09	140,8
			3	64,81	36,7	3,22	32,6	3,08	18,5	31,59	24,3	1,97	27,5
5			278,84	52,2	4,31	20,8	2,83	14,1	56,73	37,0	1,76	3,1	
10			292,22	32,5	3,79	33,6	2,88	6,1	69,92	15,5	1,61	10,8	
15			557,75	38,8	3,84	84,6	3,21	4,9	61,84	91,4	1,78	16,8	
25			391,36	77,3	1,49	33,8	3,44	17,1	16,58	29,5	1,73	6,3	
D		1	15,63	*	2,00	*	3,87	*	13,79	*	2,56	*	
		3	98,53	25,9	2,68	51,9	3,24	10,6	30,68	40,7	1,75	25,9	
		5	176,66	50,8	3,07	51,3	3,35	25,4	44,32	13,8	1,78	14,5	
		10	284,89	87,8	5,39	5,0	3,12	5,2	122,43	13,6	3,82	95,1	
		15	492,39	77,2	6,24	46,0	3,67	18,2	72,19	65,9	2,03	37,5	
		25	542,95	43,0	2,56	58,7	3,35	14,4	25,86	39,6	1,61	13,6	
PI		1	909,33	4,4	-	-	-	-	-	-	1,39	5,0	
		3	1441,06	35,6	-	-	-	-	-	-	1,38	10,1	
		5	2052,85	68,4	-	-	-	-	-	-	1,69	9,1	
SG3		W	1	98,21	76,8	1,56	113,9	2,47	0,0	14,53	92,9	1,63	5,4
			3	210,35	50,4	2,83	56,6	2,36	0,3	39,5	84,4	1,28	26,7
			5	275,23	29,5	1,5	430,1	2,89	0,1	68,17	32,6	1,79	6,0
	10		635,07	60,1	0,44	877,0	2,81	0,2	50,94	17,8	1,5	20,5	
	15		750,49	23,9	2,61	50,2	3,02	0,1	43,52	64,1	0,62	313,7	
	25		759,58	61,4	-	-	-	-	-	-	1,44	12,3	
	D	1	56,38	62,6	1,21	70,4	2,5	0,0	10,55	25,6	1,5	22,5	
		3	334,3	67,6	1,67	35,2	2,92	0,2	20,93	41,6	1,5	14,2	
		5	261,27	71,6	5,84	112,7	4,01	0,4	63,16	75,3	1,4	25,9	
		10	1013,05	36,6	4,6	92,1	2,65	0,2	60,49	85,3	1,35	13,6	
		15	593,24	75,3	2,16	45,6	3,1	0,1	32,11	77,9	1,68	5,5	
		25	500,82	8,4	2,19	10,3	3,4	0,0	20,04	7,7	1,56	6,7	
	PI	1	500,08	84,7	2,71	27,0	4,47	0,2	8,57	34,0	1,71	11,5	
		3	1431,75	19,5	-	-	-	-	-	-	1,44	15,0	

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

Fil	Type de pré-traitement	Le cm	k <sub>debond</sub>		k <sub>frictional</sub>		δ <sub>résiduel</sub>		P <sub>résiduel</sub>		Δδ50		
			Moyenne	cv	Moyenne	cv	Moyenne	cv	Moyenne	cv	Moyenne	cv	
			N/mm	%	N/mm	%	mm	%	N	%	mm	%	
OC1	W	1	53,47	68,8	1,76	71,0	3,19	8,3	18,89	58,0	1,27	23,8	
		3	414,23	62,5	2,17	23,0	1,88	7,7	27,86	23,4	0,99	21,8	
		5	999,57	66,8	1,3	57,0	1,92	19,5	23,27	11,6	1,04	27,1	
		10	390,11	32,7	5,06	83,5	2,04	11,8	73,38	57,8	1,16	2,7	
		15	378,47	45,2	0,83	82,3	2,43	9,1	23,78	153,4	1,25	16,4	
		23	609,65	41,5	0,54	58,6	2,52	17,0	4,77	55,1	1,2	20,2	
		25	534,26	153,6	-	-	-	-	-	-	-	1,21	46,6
	D	1	344	109,7	0,41	204,3	2,78	14,9	7,84	79,5	1	8,9	
		3	287,42	48,1	1,26	49,1	2	18,9	12,48	30,6	0,82	67,0	
		5	695,52	109,2	1,37	85,5	2,3	46,9	25,83	11,2	1,33	37,2	
		10	318,4	*	1,58	*	2,67	*	14,2	*	1,2	*	
		15	296,43	15,2	-	-	-	-	-	-	-	1,28	1,2
	PI	1	613,97	71,2	-	-	-	-	-	-	-	0,82	29,4
		3	1372,5	45,6	-	-	-	-	-	-	-	0,8	6,5
		5	739,87	36,5	-	-	-	-	-	-	-	0,98	4,8
		10	6000,07	*	-	-	-	-	-	-	-	0,71	*
	OC2	W	1	136,96	33,1	0,57	147,9	1,34	17,2	8,38	76,0	0,86	25,3
			3	114,74	79,9	1,72	24,5	1,68	11,5	17,97	30,9	1,18	13,4
5			288,68	42,6	2,09	54,2	1,6	14,8	26,29	47,2	1,02	5,4	
10			355,38	8,5	2,8	49,0	1,86	10,2	47,55	34,4	1,07	3,6	
15			214,03	11,6	0,86	45,7	1,84	4,8	35,86	12,8	1,12	8,6	
25			455,86	95,8	0,63	72,3	1,67	26,4	35,44	23,1	0,99	35,8	
D		1	104,14	17,1	0,76	27,1	1,62	11,1	11,66	13,5	0,93	8,0	
		3	124,54	39,9	1,96	28,4	2,08	26,8	24,66	33,2	1,1	7,0	
		5	277,63	35,9	2,36	25,3	1,89	20,9	29,53	39,5	0,99	19,0	
		10	592,32	39,7	4,54	38,8	1,82	5,2	64,07	31,4	1,08	2,1	
		15	851,03	48,1	-	-	-	-	-	-	-	1,08	3,7
		25	655,78	40,6	-	-	-	-	-	-	-	1,13	8,6
PI		1	417,54	31,8	1,15	18,1	1,5	10,0	9,03	29,3	0,89	5,0	
		3	593,08	49,9	3,73	63,0	1,59	17,8	28,94	32,7	1,02	12,2	
		5	3017,15	29,2	-	-	-	-	-	-	-	0,92	1,3
		10	705,43	30,0	-	-	-	-	-	-	-	1,1	13,2
		15	2773,47	56,9	-	-	-	-	-	-	-	1,02	2,3

cv : coefficient de variation

(\*) : Une seule éprouvette

(-) : pas de mesure (pas de phase résiduelle).

**Tableau 4.3.** Paramètres énergétiques.

Fil	Type de pré-traitement	Le	W <sub>pré pic</sub>		W <sub>post pic</sub>		W <sub>total</sub>	
			Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation
			cm	mJ	%	mJ	%	mJ
SG1	W	1	87,11	78,7	289,57	55,7	376,68	53,4
		3	97,93	75,7	182,96	46,0	280,89	48,9
		5	163,81	60,5	344,84	52,2	508,66	35,4
		10	262,91	1,9	491,26	4,0	754,18	2,6
		15	286,03	17,4	550,34	27,2	836,37	3,4
		25	234,21	81,9	404,21	28,9	638,42	58,9
	D	1	43,63	41,8	57,02	39,2	100,65	14,1
		3	117,28	19,2	347,86	70,0	465,14	24,5
		5	136,2	6,5	334,66	23,3	470,86	17,6
		10	356,18	8,6	688,66	50,1	1 044,85	15,0
		15	546,49	6,5	527,65	13,0	1 074,24	14,6
		25	436,44	20,2	396,36	17,9	832,8	12,4
	PI	1	484,81	6,3	429,41	15	914,21	17,5
		3	644,99	24,0	294,25	50	939,24	10,8
		5	565,08	14,9	298	13	863,07	14,7
10		649,17	23,0	297,19	14	946,36	10,6	
SG2	W	1	43,63	81,0	115,28	37,5	158,9	47,7
		3	121,49	67,1	263,33	10,3	384,82	22,7
		5	232,47	29,8	433,75	23,2	666,22	22,2
		10	349,06	30,5	543,74	9,6	892,8	14,8
		15	398,23	41,9	490,7	42,4	888,9	7,6
		25	467,32	27,8	386,38	7,1	853,7	18,4
	D	1	23,98	*	132,99	*	156,97	*
		3	127,94	6,1	305,39	57,3	433,33	42,2
		5	125,7	26,2	338,99	18,5	506,02	27,2
		10	336,11	33,8	874,44	6,5	1210,55	13,2
		15	485,91	46,3	601,19	45,0	1087,1	9,3
		25	491,09	14,3	434,76	20,5	925,85	5,7
	PI	1	541,06	22,1	308,57	26,9	849,63	12,9
		3	740,58	32,4	323,72	25,0	1064,3	22,2
		5	848,18	31,5	357,74	43,0	1205,92	9,4
SG3	W	1	52,17	78,1	109,26	69,5	161,43	57,9
		3	129,59	88,1	339,28	78,7	468,87	81,1
		5	218,32	20,8	571	5,1	789,32	2,4
		10	452,3	31,6	580,62	11,4	1032,91	19,8
		15	623,3	13,4	444,26	31,8	1067,56	5,4
		25	564,57	25,5	384,7	40,9	949,28	1,7
	D	1	43,26	44,9	75,24	69,3	118,5	40,2
		3	237,89	61,5	209,68	39,4	447,57	29,2
		5	227,46	37,8	491,77	61,2	719,23	53,6
		10	466,37	11,1	516,1	39,3	982,47	17,8
		15	462,35	14,7	431,31	43,3	893,67	25,1
		25	575,1	12,3	411,23	11,8	986,33	7,1
	PI	1	549,42	16,2	452,58	12,1	1 002,00	4,7
		3	754,27	20,8	385,1	23,8	1 139,37	21,7

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

Fil	Type de pré-traitement	Le	W <sub>pré-pic</sub>		W <sub>post-pic</sub>		W <sub>total</sub>	
			Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation
		cm	N.mJ	%	N.mJ	%	N.mJ	%
OC1	W	1	54,86	24,0	152,89	24,1	207,75	23,5
		3	117,42	42,9	226,8	17,9	344,22	22,2
		5	171,81	35,5	268,93	14,7	440,7	5,1
		10	209,6	28,9	529,48	32,4	739,08	22,5
		15	236,84	32,6	325,81	63,5	562,65	36,6
		23	303,58	11,5	262,21	20,8	565,8	11,6
		25	100,05	38,1	120,65	40,6	220,7	5,1
	D	1	74,91	38,6	84,25	10,6	159,16	23,8
		3	128,82	74,5	149,36	14,4	278,18	34,4
		5	213,69	21,3	303,65	11,3	517,34	14,0
		10	210,08	*	248,42	*	458,5	*
		15	177,3	26,2	289,97	59,4	467,25	48,1
	PI	1	150,25	16,1	119,97	40,1	270,23	13,2
		3	204,38	8,5	80,41	7,8	284,79	4,0
		5	174,82	53,0	118,06	31,9	292,88	42,2
10		299,00	*	88,72	*	387,72	*	
OC2	W	1	27,93	65,9	70,28	64,6	98,21	64,9
		3	45,76	65,1	127,91	33,8	173,67	40,1
		5	87,26	32,3	196,81	33,3	284,07	31,7
		10	124,81	15,0	327,53	23,6	452,34	21,0
		15	105,28	22,6	338,15	5,8	443,43	8,5
		25	105,78	8,0	313,19	13,0	418,97	7,7
	D	1	27,19	23,0	100,27	11,8	127,46	10,4
		3	54,88	22,2	177,32	42,6	232,2	37,2
		5	100,27	33,2	203,43	34,4	303,69	33,6
		10	210,53	26,1	460,89	28,0	671,42	25,6
		15	244,16	28,0	238,12	60,1	482,28	32,9
		25	174,75	8,3	175	25,6	349,75	11,4
	PI	1	86,63	15,3	107,39	25,6	194,03	17,0
		3	131,67	31,0	250,42	28,4	382,1	18,2
		5	357,57	3,7	89,85	12,3	447,41	4,4
10		257,91	20,8	142,88	44,1	400,79	25,2	
15		349,41	15,4	120,49	26,8	469,9	4,9	

(\*) : Une seule éprouvette.

## 4.4 Filaments de cœur / filaments périphériques

### 4.4.1 Problématique

Comme nous l'avons montré dans le **chapitre 2**, la structure spécifique des fils multifilamentaires conduit à une hétérogénéité de l'imprégnation du fil par la matrice cimentaire. Les filaments périphériques, proches de la matrice cimentaire, sont situés dans une zone du fil où la pâte de ciment pénètre. Ils sont généralement bien enrobés par la matrice cimentaire, ce qui signifie que la longueur enrobée des filaments est suffisante pour permettre le transfert de charge filament / matrice lorsque le filament est sollicité en traction [Lan04]. La quantité de filaments concernés par ce bon enrobage dépend de la profondeur de pénétration des particules de ciment entre les filaments, au moment de la mise en œuvre de la matrice cimentaire.

Plus en profondeur, les filaments de cœur ne bénéficient plus de ce bon enrobage et sont sans contact direct suffisant avec la matrice. Ils peuvent glisser, en engendrant des forces de frottement dans le fil. C'est aussi le cas des filaments périphériques, après qu'ils aient rompu sous l'effet d'un effort de traction excessif (voir **figure 4.10**, au centre du cliché). Après rupture, la longueur de filament comprise entre la surface de rupture et le point d'application de l'effort de traction se met à glisser et se comporte alors comme les filaments de cœur.

La part des filaments glissant dans le fil (filaments de cœur et filaments périphériques rompus) influe sur le comportement à l'arrachement de celui-ci. Ce sont ces filaments qui sont en particulier responsables de l'effort post-pic résiduel mesuré dans certaines situations.



**Figure 4.10.** Filaments extraits de la matrice au cours de l'arrachement, OC1 D,  $L_e = 3$  cm.

### 4.4.2 Grandeurs physiques caractéristiques

Afin d'évaluer la proportion des filaments glissants dans le fil, pour la mettre en relation avec les paramètres descriptifs du comportement mécanique, nous avons défini deux grandeurs caractéristiques de ces filaments :

- La longueur extraite relative des filaments ( $l_{er}$ ), qui donne une information sur la présence de filaments non rompus dans le fil ;
- La proportion massique de filaments extraits ( $p_{fc}$ ), qui donne une mesure de la quantité de filaments extraits de la matrice lors de l'arrachement.

#### 4.4.2.1 Détermination de la longueur extraite relative des filaments

La longueur extraite relative  $l_{er}$  est définie comme le rapport de la longueur totale  $L_{ex}$  de filaments extraits de la matrice cimentaire à l'issue de l'essai d'arrachement à la longueur enrobée du fil  $L_e$ .

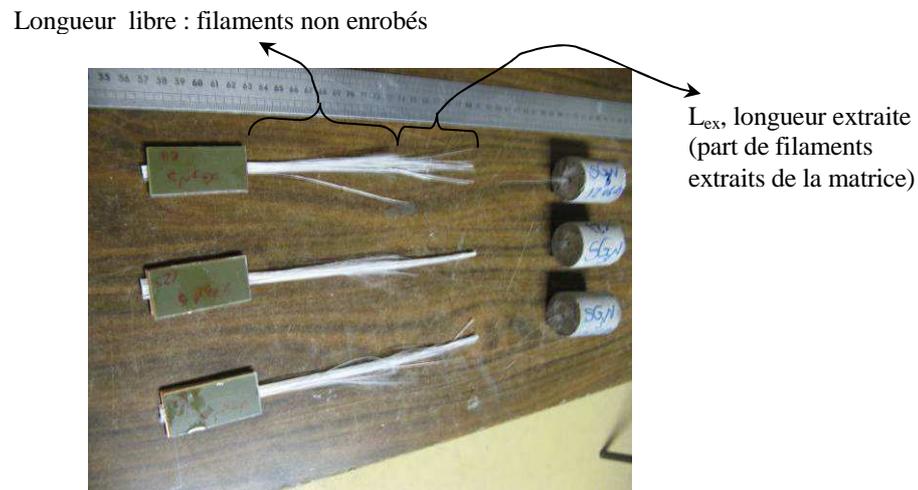
$$l_{er} = L_{ex} / L_e \quad (4.1)$$

$L_{ex}$  est mesurée à l'aide d'une règle, après l'essai d'arrachement (**figure 4.11**).  $L_e$  est définie par la méthode de fabrication au moment du coulage de la matrice cimentaire.

Il est à noter que la méthode de fabrication des éprouvettes d'arrachement (coupe de la longueur surabondante de fil au droit de la surface libre du mortier) induit la présence d'une petite sur-longueur de fil (0 à 1 mm).

Par ailleurs, les sollicitations appliquées au fil peuvent conduire à une légère élongation de celui-ci lors de l'extraction, dans le cas où des filaments rompent sans toutefois se séparer des filaments glissant. Cette situation n'a cependant jamais été franchement observée. Si elle s'est manifestée, ses conséquences auront été réduites.

Ces éléments conduisent à surestimer la longueur extraite relative (au maximum +10% pour les valeurs de  $L_e$  égales à 1 cm ; moins de 1% pour les valeurs de  $L_e$  les plus élevées).



**Figure 4.11.** Mesure de la longueur extraite et portion de filaments de cœur.

#### 4.4.2.2 Détermination de la proportion massique de filaments extraits

La proportion massique de filaments extraits  $p_{fc}$  est définie comme le rapport de la masse linéique moyenne  $m_{L_e}$  des filaments extraits de la matrice cimentaire à l'issue de l'essai d'arrachement à la masse linéique initial du fil  $m_f$ .

$$p_{fc} = \frac{m_{L_e}}{m_f} \quad (4.2)$$

$m_f$  est déterminée au cas par cas à partir d'un prélèvement, après essai, sur la longueur libre de fil. Cette méthode permet de s'affranchir de la variabilité de la masse linéique le long du fil généré par le process de fabrication du fil.

$m_{L_e}$  est déterminée par pesée d'un prélèvement de longueur déterminée le long de la longueur extraite de fil (cf. **figure 4.11**). Sauf dans le cas des éprouvettes de faible longueur (< 5 cm) qui ne le permettent pas, le prélèvement est fait dans la partie médiane de la longueur extraite, afin de s'affranchir d'éventuels effets de bord.

Cette méthode de détermination de  $p_{fc}$  présente l'intérêt d'être simple à mettre en œuvre. Par contre, elle conduit à une évaluation par excès de  $p_{fc}$  dans la mesure où la pesée du fil extrait peut intégrer des particules de ciment extraites qui subsistent dans le fil.

Cela ne pose pas de problème dans le cas des pré-traitements W et D (ces particules sont quasi-absentes). Cela peut par contre être sensible pour le pré-traitement PI lorsque des filaments enrobés sont extraits de la matrice (20 à 30% des cas). Dans ce cas, malgré les précautions prises (élimination des particules de ciment par sollicitations légères du fil),  $p_{fc}$  peut être surévaluée.

#### 4.4.2.3 Résultats et discussion

Le **tableau 4.4** donne les valeurs moyennes de  $l_{er}$  et  $p_{fc}$ , déterminées, sauf spécification contraire, sur la base de trois essais. Pour faciliter les comparaisons, ces valeurs sont reprises dans les **figures 4.12** ( $l_{er}$ ) et **4.13** ( $p_{fc}$ ).

La longueur extraite relative  $l_{er}$ , parce qu'elle correspond aux filaments les plus longs extraits de la matrice cimentaire, n'est pas directement liée à la quantité de filaments ancrés mais caractérise plutôt la longueur d'ancrage des filaments dont les conditions d'ancrage sont les moins favorables (ceux qui, du fait de leur position spécifique dans le fil, nécessiteront la longueur d'enrobage la plus importante pour être ancrés).

Dans le cas des prétraitements W et D, les valeurs de  $l_{er}$  sont très similaires, voisines de 100% tant que  $L_e < 10$  cm puis diminuent quand  $L_e$  augmente au-delà. Cette diminution est légèrement plus marquée dans le cas du prétraitement D que dans celui du prétraitement W, sauf pour les fibres SG2 et OC1 pour lesquelles la forte variabilité des mesures pour les grandes longueurs enrobées ne permet pas de conclure à une évolution inverse. Ces éléments montrent que, dans le cas des prétraitements W et D, la longueur enrobée à partir de laquelle l'ensemble des filaments du fil est ancré est voisine de 15 cm et que le pré-mouillage des fils conduit à augmenter cette longueur.

Dans le cas du prétraitement PI, la longueur extraite relative est généralement très inférieure aux valeurs mesurées pour les autres prétraitements. Elle devient nulle ou quasi nulle dès quelques centimètres de longueur enrobée. Cela est dû à la grande amélioration de l'enrobage des filaments dans le cas du prétraitement PI, en comparaison aux deux autres prétraitements utilisés. Le fil OC2 montre un comportement particulier, puisqu'il est le seul fil pour lequel le prétraitement PI conduit à des valeurs de  $l_{er}$  égales à 100% pour les faibles valeurs de  $L_e$ , ce qui peut s'expliquer par une plus faible pénétration de la matrice cimentaire dans le fil dans ce cas. Cela peut être la conséquence de l'absence de mèches dans le fil, qui doit permettre la formation d'amas de filaments non enrobés par absorption rapide d'eau au moment du coulage. A l'inverse, le fil OC1 donne des valeurs de  $l_{er}$  nulles pour toutes les valeurs de  $L_e$ .

La proportion massique de filaments  $p_{fc}$  complète les informations données par la longueur extraite relative. En particulier, lorsque la longueur extraite relative est égale à 100%, la mesure de  $p_{fc}$  permet d'évaluer l'importance de l'ancrage des filaments (cf. **figure 4.14**). On constate notamment que, même pour les longueurs enrobées les plus faibles, une partie des filaments n'est pas extraite de la matrice et que cette partie est d'autant plus grande que la longueur enrobée est grande. Cela montre qu'il y a toujours des filaments adhérents et que la probabilité qu'un filament soit en contact avec la matrice cimentaire augmente avec la longueur enrobée.

Globalement, les valeurs mesurées pour  $p_{fc}$  confirment les observations faites à partir de la longueur extraite relative. Les fils SG ont des comportements très proches. OC1 et OC2, comme pour la mesure de  $l_{er}$  donnent les comportements extrêmes.

**Tableau 4. 4.** Valeurs de la longueur extraite relative  $l_{er}$  et de la proportion massique  $p_{fc}$ .

Fil	Type de pré-traitement	Le	$l_{er}$		$P_{fc}$	
			Moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation
			cm	%	%	%
SG1	W	1	106,67	5,4	89,54	38,7
		3	98,89	5,1	84,33	11,5
		5	100,67	1,1	86,23	7,8
		10	96,33	5,2	59,05	19,5
		15	96,22	6,8	43,33	72,5
		25	77,60	40,3	8,99	73,2
	D	1	116,7	24,7	111,50	25,0
		3	104,3	7,3	78,86	8,8
		5	102,7	3,7	88,39	9,5
		10	96,7	6,3	40,55	1,4
		15	60,4	50,2	15,71	56,4
		25	34,4	9,9	10,13	35,0
	PI	1	76,67	83,9	157,25	*
		3	-	-	21,53	*
		5	15,33	30,1	-	-
10		3,67	56,8	-	-	
SG2	W	1	114,33	10,1	95,20	15,6
		3	100,00	3,5	96,36	14,7
		5	100,80	3,0	60,83	33,6
		10	98,67	1,5	48,04	37,5
		15	71,78	35,7	36,33	100,2
		25	21,40	25,1	17,13	36,4
	D	1	90,00	*	92,31	*
		3	103,33	5,6	94,91	16,5
		5	103,33	3,0	79,16	6,3
		10	83,67	14,0	50,09	48,0
		15	99,67	0,3	45,89	42,1
		25	48,40	33,9	36,05	63,5
	PI	1	43,33	53,3	7,76	14,7
		3	22,22	48,2	6,15	*
		5	38,00	55,5	3,44	116,6
SG3	W	1	115,00	30,7	114,90	0,2
		3	97,78	5,2	92,15	15,9
		5	98,7	1,17	73,33	26,5
		10	92,33	14,7	42,03	30,0
		15	84,22	29,5	36,69	33,0
		25	47,07	90,3	18,27	41,8
	D	1	111,33	27,4	97,56	3,6
		3	102,22	3,8	75,33	23,6
		5	101,00	1,4	66,59	18,1
		10	98,33	2,9	34,50	54,2
		15	60,22	28,1	30,31	47,4
		25	-	-	-	-
	PI	1	63,33	65,7	13,48	80,2
		3	8,89	108,3	-	-

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

Fil	Type de pré-traitement	Le	I <sub>er</sub>		P <sub>fc</sub>	
			Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation
		cm	%	%	%	%
OC1	W	1	113,33	28,4	79,74	6,9
		3	75,00	15,7	58,79	28,4
		5	119,00	5,9	35,11	22,5
		10	26,00	39,0	-	-
		15	12,33	49,7	-	-
		25	2,53	18,2	-	-
	D	1	110,20	12,8	78,94	12,6
		3	69,20	1,7	61,85	35,7
		5	108,67	1,1	36,07	9,7
		10	100,20	*	1,88	*
		15	61,67	49,7	17,05	47,5
	PI	1	0,00	0,00	0,00	0,00
		3	0,00	0,00	0,00	0,00
		5	0,00	0,00	0,00	0,00
		10	0,00	0,00	0,00	0,00
OC2	W	1	110,67	29,0	94,14	18,1
		3	106,67	5,4	89,08	8,7
		5	110,60	2,8	73,67	12,7
		10	100,23	2,5	66,61	2,3
		15	104,33	1,4	68,20	19,2
		25	93,00	1,5	41,72	76,4
	D	1	93,33	12,4	93,93	8,7
		3	85,00	2,8	96,16	35,5
		5	98,67	2,3	62,49	14,7
		10	94,33	11,4	59,66	22,5
		15	46,44	98,7	15,89	96,9
		25	12,40	85,5	45,64	120,4
	PI	1	103,33	5,6	81,10	4,5
		3	98,89	1,9	67,82	6,4
		5	14,00	*	-	-
10		15,50	50,2	10,93	34,8	
15		14,4	62,3	68,20	19,2	

(\*) Une seule éprouvette ; (-) pas de mesure ; (0)  $m_{Le}=0$ .

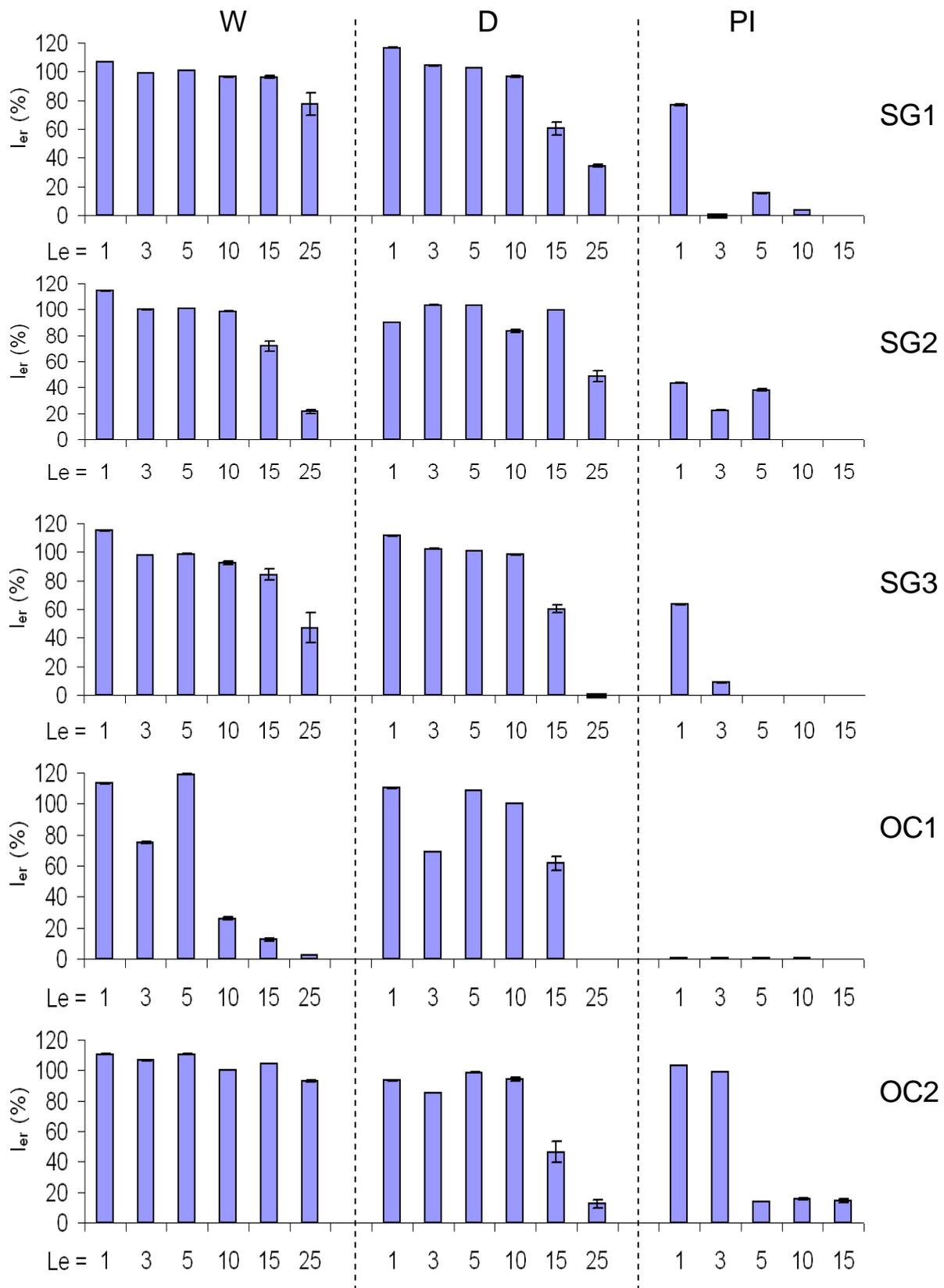


Figure 4.12. Valeurs de  $|e_r|$  en fonction de la longueur enrobée.

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

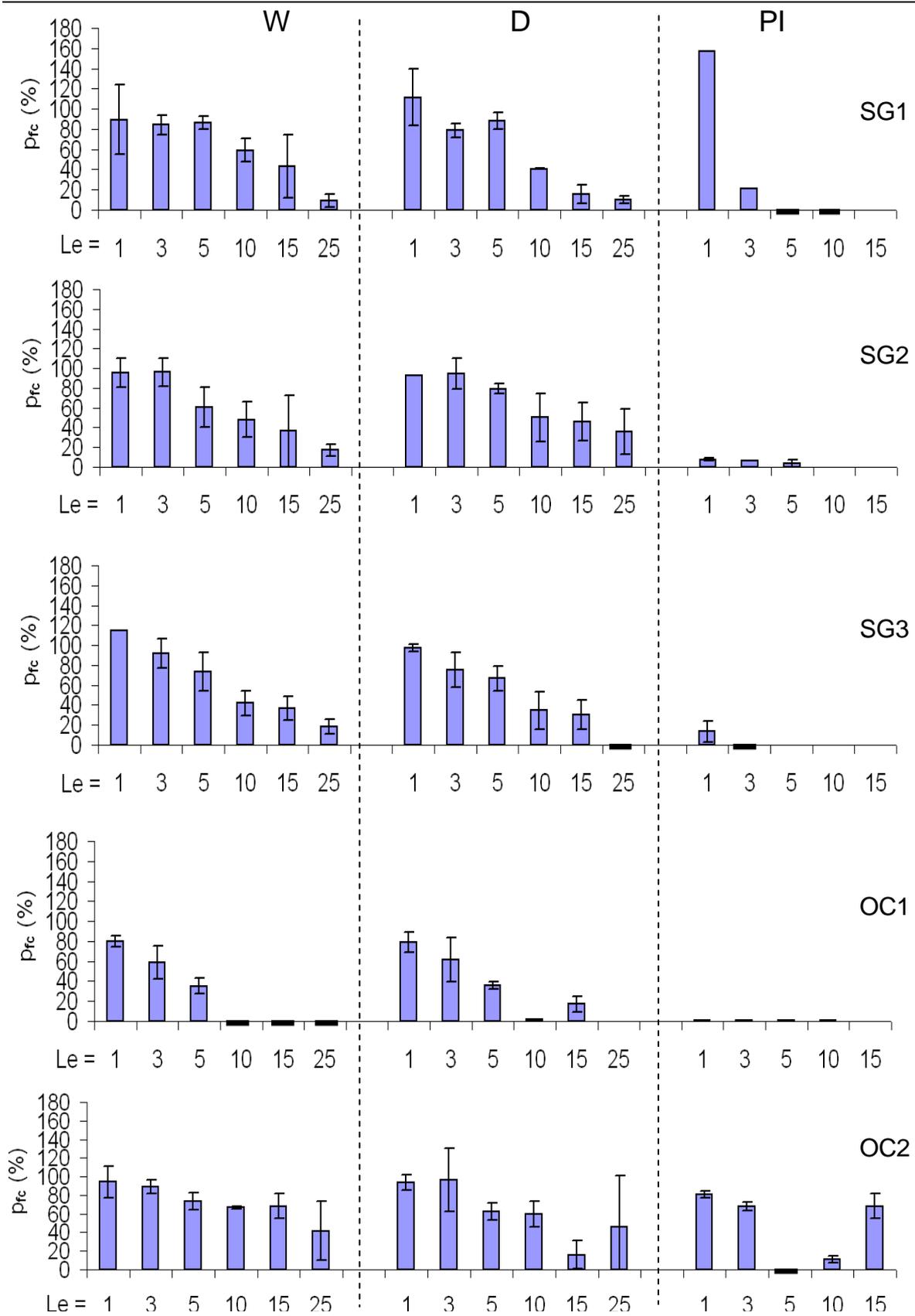


Figure 4.13. Valeurs de  $p_{fc}$  en fonction de la longueur enrobée.

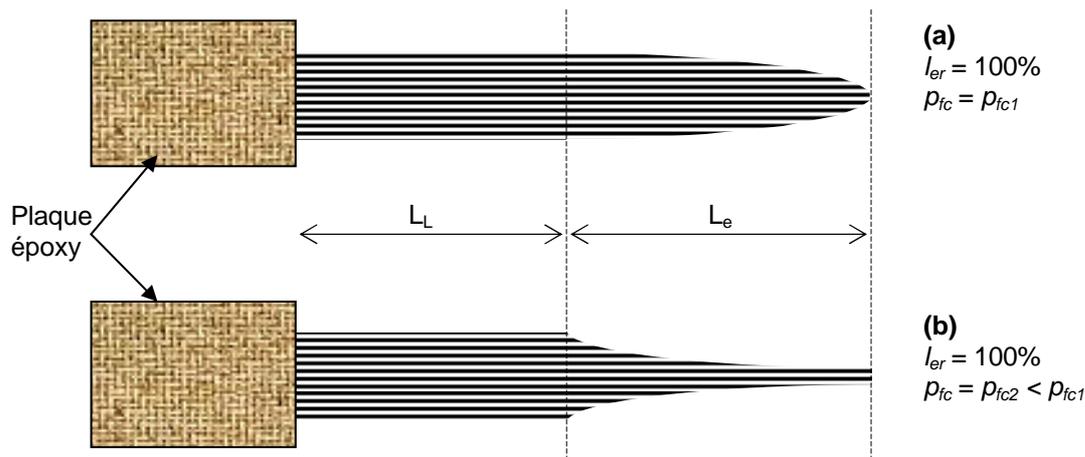


Figure 4. 14. Variation de  $p_{fc}$  pour une même longueur extraite relative  $l_{er}$ .

## 4.5 Influence de la longueur enrobée dans le micro béton sur les paramètres de comportement mécanique

### 4.5.1 Influence de la longueur enrobée sur les efforts résistants

#### 4.5.1.1 Résistance à l'arrachement $P_{max}$

La figure 4.15 présente les résistances maximales à l'arrachement  $P_{max}$  obtenues pour toutes les configurations testées. Les résistances des fils préparés avec les prétraitements W et D sont toutes fortement influencées par la longueur enrobée  $L_e$  du fil : la résistance obtenue pour les plus faibles valeurs de  $L_e$  ( $< 5$  cm) atteint au maximum 25% de la résistance en traction et reste inférieure à 200 N. Lorsque la longueur enrobée augmente, la résistance maximale à l'arrachement augmente jusqu'à ce que  $L_e$  atteigne un seuil (compris entre 10 et 15 cm et fonction du prétraitement et du type de fil) au-delà duquel la valeur de  $P_{max}$  n'évolue plus de manière sensible (voir figure 4.15, traits fins). La résistance maximale à l'arrachement atteinte ne dépasse pas 65% de la résistance à la traction du fil associé. Dans le cas des deux fils OC, elle reste même particulièrement faible (au plus 35% de la résistance à la traction du fil associé).

Pour des longueurs enrobées inférieures au seuil, l'augmentation de  $P_{max}$  lorsque  $L_e$  augmente peut s'expliquer par le nombre croissant de filaments ancrés lorsque  $L_e$  augmente. Lorsque  $L_e$  est très faible, seuls les filaments situés immédiatement en périphérie du fil sont en contact avec la matrice et la résistance à l'arrachement n'est donc qu'une fraction réduite de la résistance à la traction du fil (qui correspond à une sollicitation de l'ensemble des filaments). Lorsque  $L_e$  augmente, de nouveaux filaments vont se trouver également en contact avec la matrice (la position des filaments dans la section du fil varie le long du fil et des filaments situés au cœur du fil dans une section peuvent se retrouver en périphérie du fil dans une autre section). Ce phénomène est influencé par la manière dont la matrice pénètre le fil, ce qui explique le changement de seuil avec le prétraitement ou avec le type de fil.

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

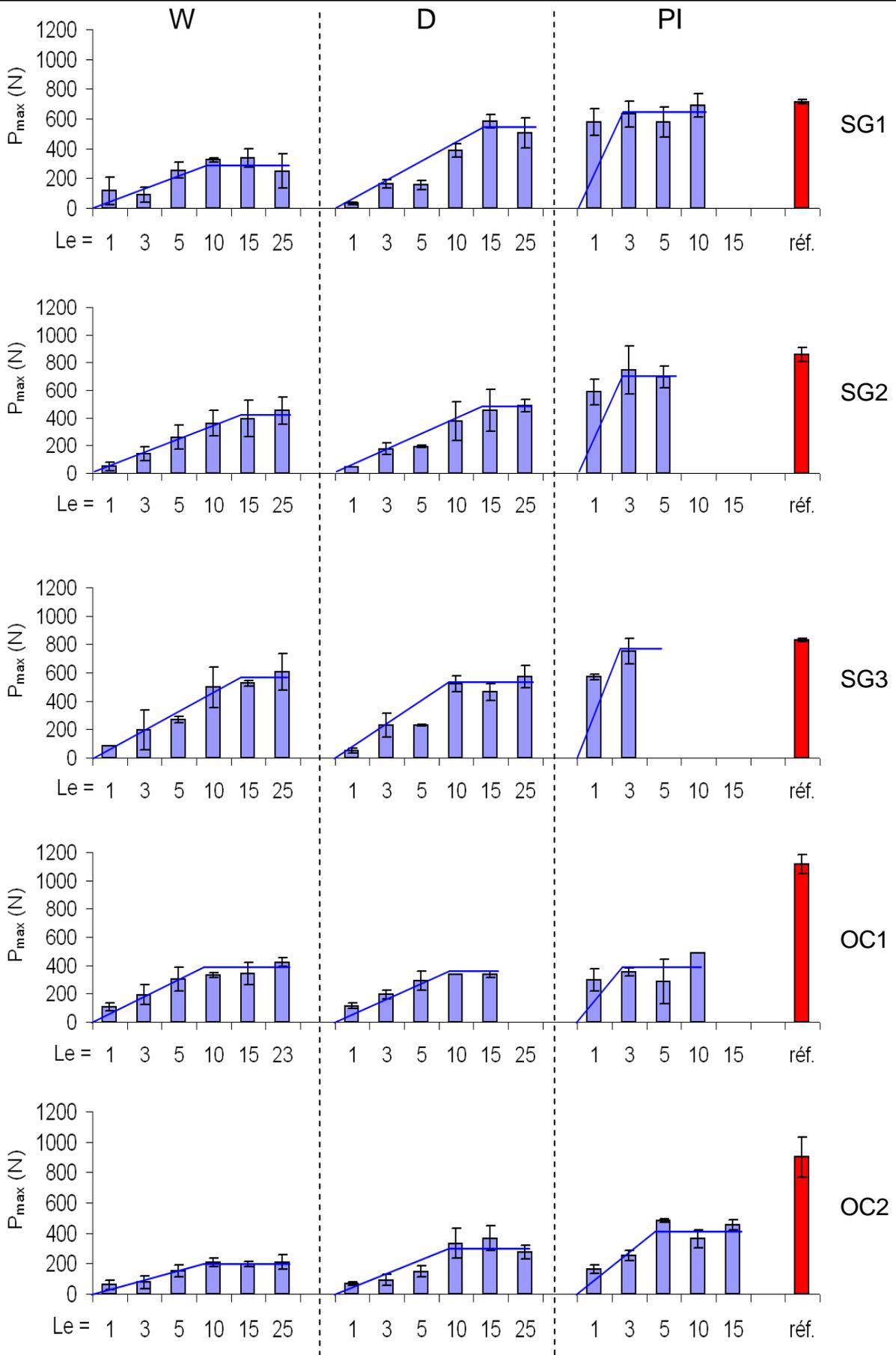


Figure 4.15. Evolution de  $P_{max}$  avec la longueur enrobée. Barre sombre : résistance en traction simple du fil.

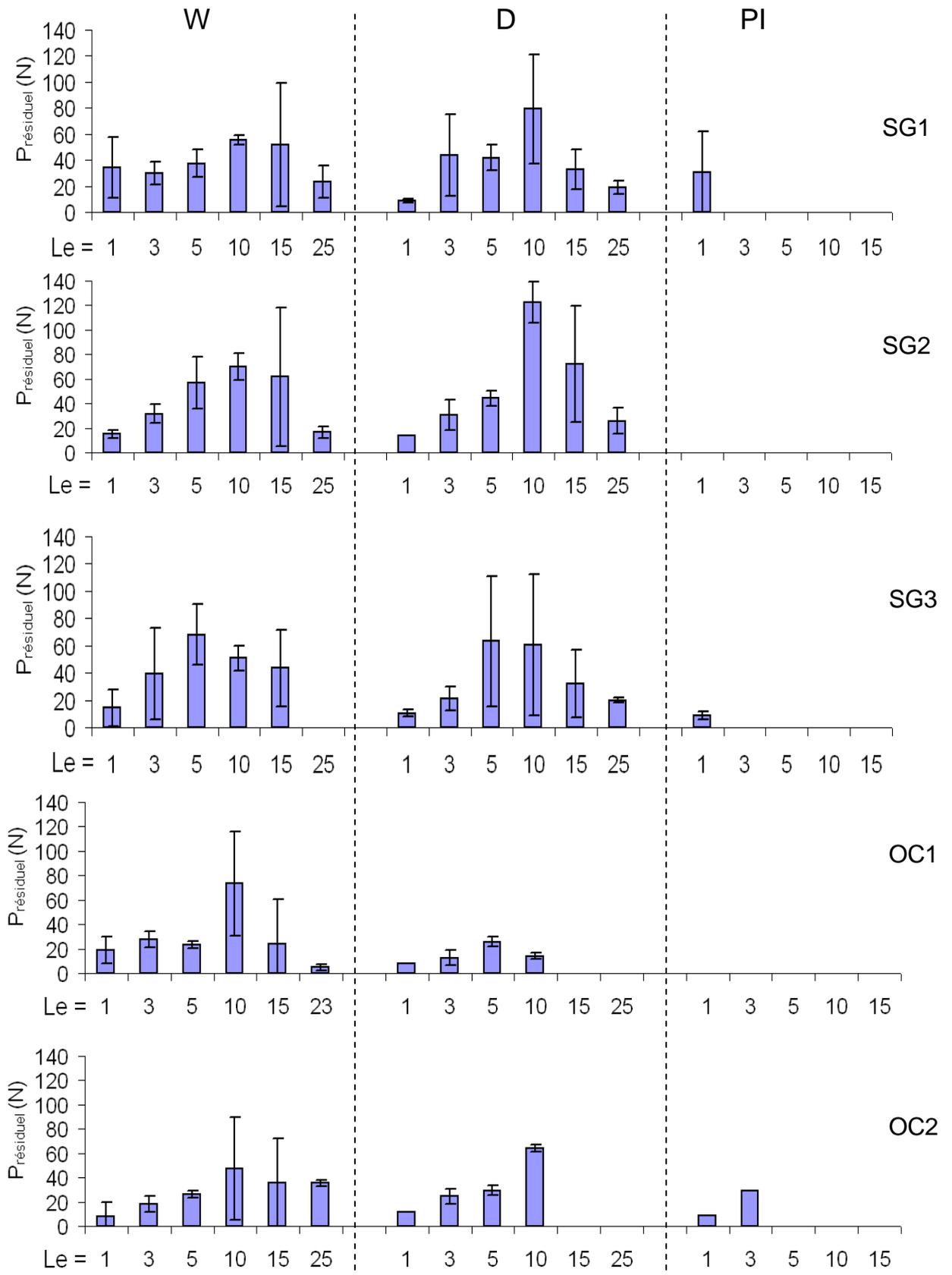


Figure 4.16. Evolution de  $P_{résiduel}$  avec la longueur enrobée.

En ce qui concerne la résistance maximale à l'arrachement, les conditions d'ancrage du fil, liées à l'imprégnation de celui-ci par la matrice, conduisent à une forte hétérogénéité des longueurs libres des filaments, ce qui induit une mise en charge non simultanée des différents filaments, associée à une diminution de la résistance maximale en comparaison du cas où tous les filaments sont sollicités ensemble.

Dans le cas du prétraitement PI, nous observons le même type de comportement, avec une longueur enrobée seuil beaucoup plus réduite (de l'ordre de 1 cm), sauf dans le cas du fil OC2 PI qui présente une longueur enrobée seuil voisine de 5 cm. Pour chaque fil, la résistance à l'arrachement est plus élevée que celle obtenue avec les prétraitements W et D. Elle reste cependant inférieure à la résistance en traction du fil associé (75 à 95% pour les fils SG, 35 à 45% pour les fils OC).

L'action mécanique mise en œuvre dans le cas du prétraitement PI favorise la pénétration au cœur du fil de la matrice cimentaire, ce qui fait que la quasi-totalité des filaments sont ancrés y compris dans le cas des faibles valeurs de  $L_e$  (sauf peut-être dans le cas de OC2 PI). La résistance maximale à l'arrachement se rapproche alors fortement de la résistance en traction. La matrice cimentaire ne permettant cependant pas un ancrage parfait, la résistance maximale mesurée en traction, avec un traitement spécifique de l'ancrage (résine époxy) n'est pas atteinte.

Les fils OC présentent globalement une résistance à l'arrachement qui reste faible, même avec le prétraitement PI. Dans le cas du fil OC2, cette faible résistance peut être attribuée à la structure spécifique du fil (absence de mèche), qui ne permet pas une imprégnation complète des vides inter-filamentaires lors du prétraitement. De ce fait, une partie des filaments n'est pas ancré et est extraite lors de l'essai d'arrachement, quel que soit la valeur de  $L_e$  (voir figure 4.13). La faible résistance à l'arrachement du fil OC1 ne peut quant à elle pas être attribuée au même phénomène, puisque ce fil est celui qui présente les meilleures conditions d'ancrage, au sens où les valeurs de  $p_{fc}$  sont globalement les plus faibles (voir figure 4.13). Dans ce cas, c'est vraisemblablement l'ensimage spécifique du fil qui doit être incriminé (on rappelle que les fils OC ne sont a priori pas conçus pour être associés avec une matrice cimentaire et que leur ensimage n'a pas pour rôle de faciliter l'enrobage avec la pâte de ciment).

#### 4.5.1.2 Effort de transition phase post-pic / phase post-pic résiduelle $P_{résiduel}$

Cet effort caractérise le niveau de frottement mesuré alors que l'ensemble des filaments ancrés ont rompus. La **figure 4.16** donne les valeurs obtenues pour l'ensemble des configurations testées. Dans le cas des fils ayant subi le prétraitement PI, l'absence de valeur correspond au cas où quasiment aucun filament n'est extrait de la matrice cimentaire après rupture (voir **figure 4.13** la proportion massique de fil extrait).

Les valeurs de  $P_{résiduel}$  sont de l'ordre de 10% des valeurs de  $P_{max}$  présentées dans le paragraphe précédent. Elles varient entre zéro et 60 à 80 N suivant les fils et les prétraitements. Les 3 fils SG donnent des valeurs sensiblement identiques. Les 2 fils OC présentent également une similitude l'un avec l'autre, mais donnent des valeurs de  $P_{résiduel}$  inférieures à celles données par les fils SG.

Contrairement à  $P_{max}$  qui croît avec  $L_e$  jusqu'à atteindre une valeur stable,  $P_{résiduel}$  présente un maximum pour des valeurs de  $L_e$  comprises entre 5 et 10 cm. Les grandes valeurs de  $L_e$ , en augmentant la longueur disponible pour l'ancrage des filaments, permettent la rupture de ceux-ci. La longueur extraite après rupture, qui génère du frottement dans la phase résiduelle, est

alors plus petite que la longueur glissant initialement pour les valeurs modérées de  $L_e$ . La **figure 4.12** montre cette tendance au raccourcissement de la longueur extraite pour les fortes valeurs de  $L_e$ .

## 4.5.2 Influence de la longueur enrobée sur les raideurs

### 4.5.2.1 Raideur pré-pic $k_{bond}$

Le paramètre de raideur  $k_{bond}$  est calculé comme indiqué dans la **section 4.3.2.1**. Les valeurs obtenues (voir **figure 4.17**) présentent une forte corrélation avec les valeurs obtenues pour la résistance maximale à l'arrachement. La raideur à la mise en charge augmente donc lorsque  $L_e$  augmente tant que  $L_e$  reste inférieure à la même valeur seuil que pour  $P_{max}$ . Au-delà de ce seuil, les valeurs de la raideur à la mise en charge sont globalement stables.

Comme pour la résistance à l'arrachement, les raideurs à la mise en charge obtenues pour les essais d'arrachement sont plus faibles que les raideurs à la mise en charge correspondant aux essais de traction directe (barres sombres de la **figure 4.17**). La chute de la raideur observée pour les fils OC (approximativement 60% de celles obtenues en traction directe) reste du même ordre de grandeur que pour les fils SG (approximativement 80% de celles obtenues en traction directe).

Comme pour la résistance à l'arrachement, l'augmentation de la raideur lorsque  $L_e$  augmente peut s'expliquer par l'augmentation du nombre de filaments ancrés consécutive à l'augmentation de  $L_e$  (augmentation de l'effort résistant à longueur extraite donnée).

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

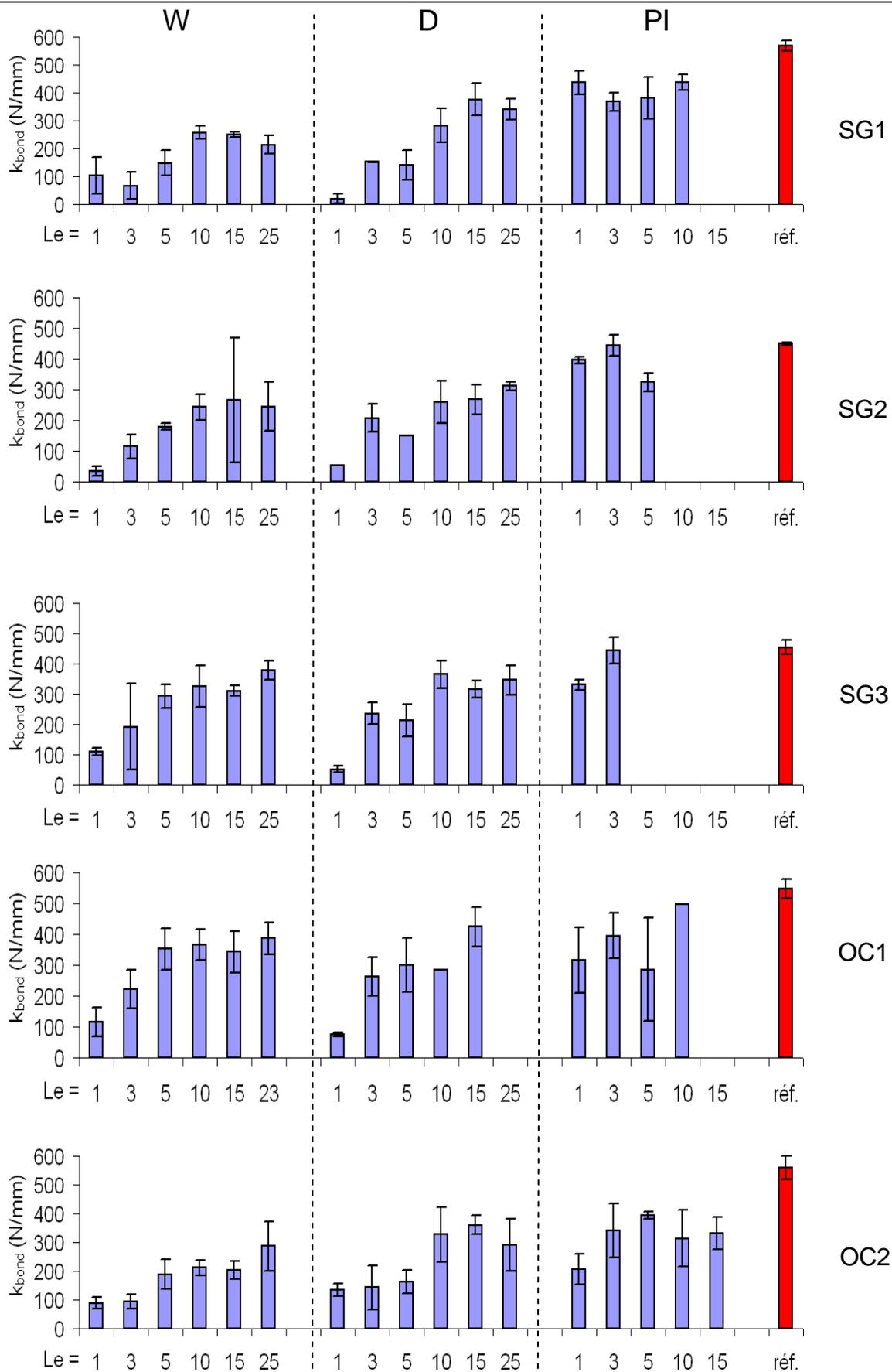


Figure 4.17. Evolution de  $k_{bond}$  avec la longueur enrobée. Barre sombre : raideur du fil en traction simple.

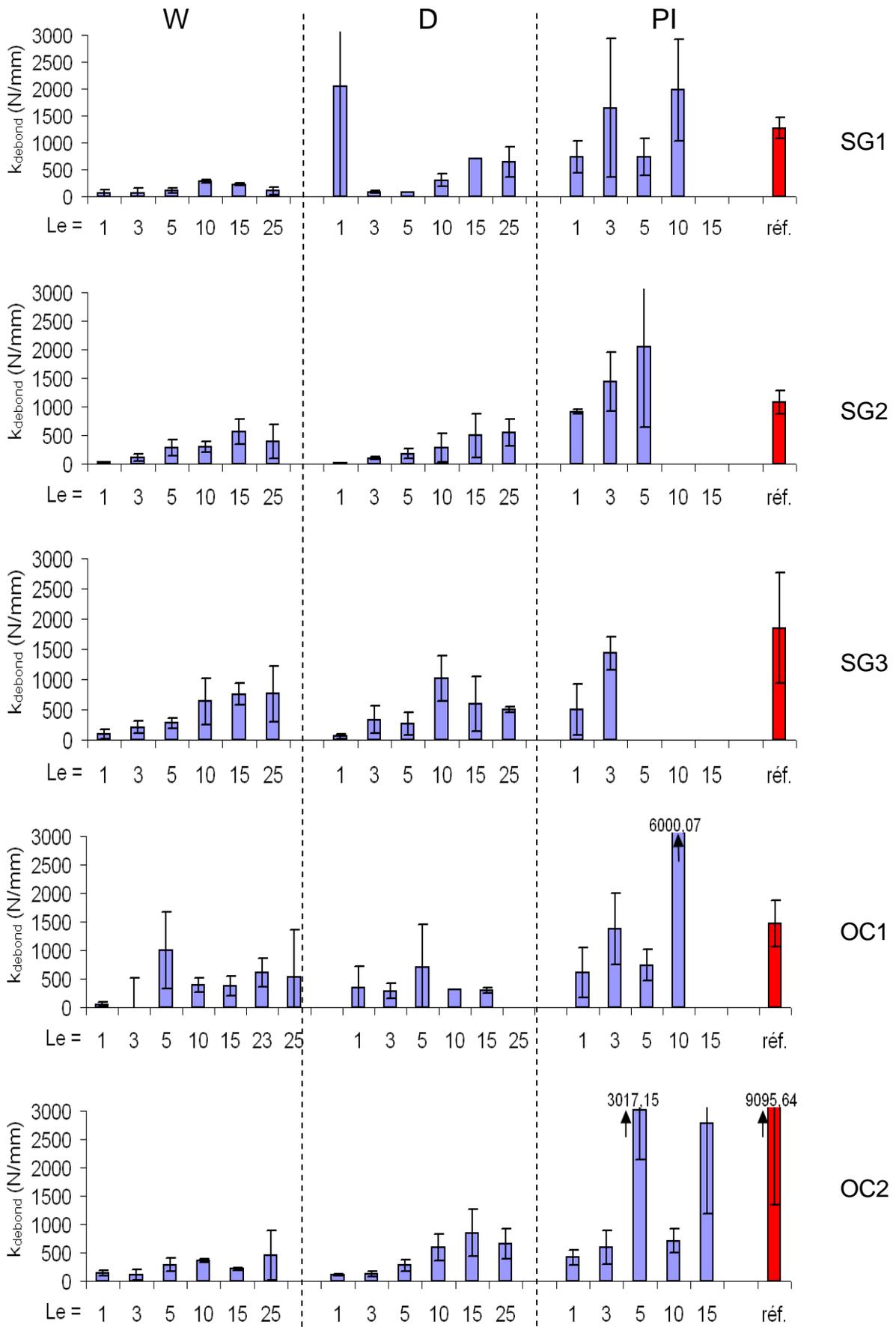


Figure 4.18. Evolution de  $k_{debond}$  avec la longueur enrobée. Barre sombre : raideur du fil en traction simple.

#### 4.5.2.2 Raideur post-pic $k_{debond}$

Les valeurs obtenues pour la raideur post-pic  $k_{debond}$  (**figure 4.18**) présentent une variabilité plus marquée que dans le cas de la raideur pré-pic. C'est en particulier le cas des fils préparés avec le prétraitement PI, mais on le constate également pour certains résultats obtenus avec les autres prétraitements. Cela est vraisemblablement dû à la variabilité supplémentaire induite par le séquençement des ruptures de filaments, propre à chaque éprouvette, qui conduit à des scénarios de rupture et de chute de charge qui peuvent diverger d'une éprouvette à l'autre.

Ce phénomène rend plus délicat l'interprétation des résultats. Cependant, il ressort d'une analyse globale que la tendance constatée pour la raideur pré-pic se retrouve dans le cas de la raideur post-pic pour les fils ayant subi les prétraitements W ou D : la raideur post-pic augmente lorsque  $L_e$  augmente tant que  $L_e$  reste inférieure à une valeur seuil au-delà de laquelle la raideur reste approximativement stable. Les raideurs maximales atteintes restent alors très inférieures à celle du fil en traction (25% à 50%).

Dans le cas des fils ayant subi le traitement PI, il semble que le seuil de longueur enrobée, au-delà duquel la raideur post-pic devient stable, est plus élevé que dans le cas des raideurs pré-pic. La raideur maximale atteinte dans ce cas est voisine de celle obtenue pour le fil en traction simple. Les très fortes raideurs atteintes dans certains cas sont le signe d'une rupture presque fragile du fil.

#### 4.5.2.3 Raideur résiduelle $k_{frictional}$

La **figure 4.19** donne les valeurs de  $k_{frictional}$  pour toutes les longueurs enrobées et pour toutes les configurations fils / prétraitement utilisées. Comme dans le cas de la raideur post-pic, la variabilité des mesures est plus forte que dans la phase pré-pic. En outre, dans la plupart des cas, le prétraitement PI conduit, comme pour les fils en traction simple, à l'absence de phase résiduelle dans le comportement, ce qui se traduit par l'absence de valeur mesurée dans les graphes de la **figure 4.19**.

Les résultats obtenus montrent que la raideur résiduelle a tendance à présenter un maximum pour les valeurs intermédiaires de  $L_e$  (5 à 15 cm). Les valeurs maximales obtenues sont sensiblement les mêmes pour les 3 fils SG. Elles sont plus réduites pour les 2 fils OC.

On remarque par ailleurs une relativement bonne corrélation entre ces valeurs et celles de l'effort de transition post-pic / résiduel  $P_{résiduel}$  (voir 4.5.1.2).

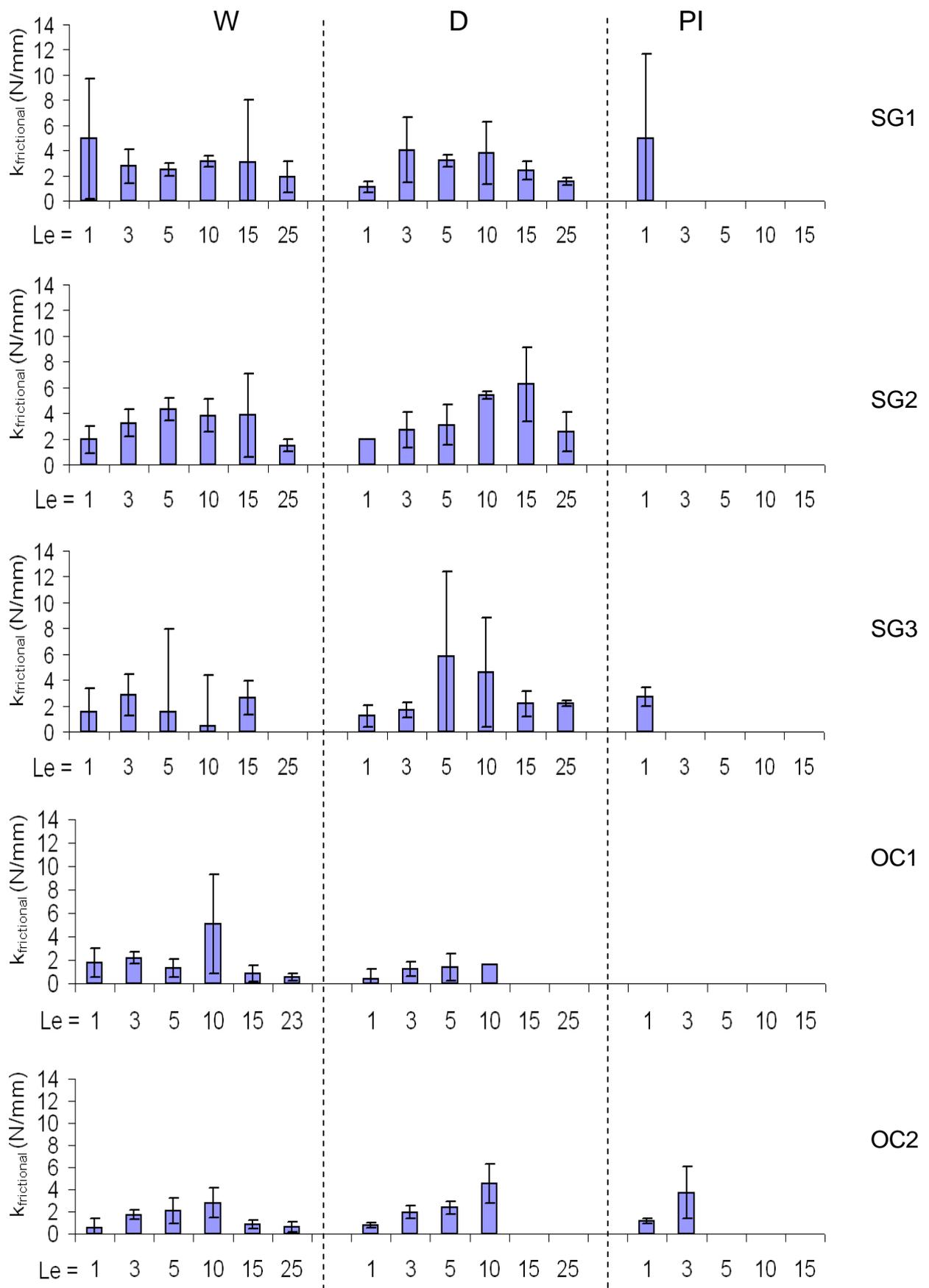


Figure 4.19. Evolution de  $k_{frictional}$  avec la longueur enrobée.

### 4.5.3 Influence de la longueur enrobée sur les paramètres énergétiques

#### 4.5.3.1 Travail total $W_{total}$

La **figure 4.20** donne les valeurs déterminées pour le travail dissipé au cours des essais d'arrachement (travail total jusqu'à obtention d'un déplacement de 8 mm). On rappelle que ce travail correspond à la somme :

- du travail dissipé au cours de l'arrachement au niveau de l'interface fil / matrice (rupture des filaments, micro-rupture de la matrice, frottement filament / filament, filament / matrice et matrice / matrice).
- du travail dissipé dans la longueur libre de fil sous l'effet de l'effort de traction. Dans le cas des prétraitements W et D, l'effort maximal supporté par le fil au cours de l'arrachement est relativement réduit par rapport à la résistance à la rupture du fil et ce travail est réduit par rapport au travail total (voir section 4.5.1.1 et **figure 4.15**). Dans le cas du prétraitement PI, l'effort d'arrachement est plus important et ce travail n'est plus négligeable. On verra dans la suite comment évaluer cette part du travail total.

On constate que pour les prétraitements W et D,  $W_{total}$  suit une évolution similaire à  $P_{max}$  :  $W_{total}$  augmente lorsque  $L_e$  augmente tant que  $L_e$  reste inférieure une valeur seuil du même ordre de grandeur que celle constatée pour  $P_{max}$ . Au-delà de ce seuil, les valeurs du travail total sont globalement stables, aux incertitudes de mesure près.

Pour le prétraitement PI, le travail total dissipé apparaît globalement non influencé par  $L_e$ .

Par ailleurs, on constate que les valeurs obtenues pour les fils OC correspondent approximativement à 50% des valeurs obtenus pour les fils SG. On ne constate pas de différences majeures entre les fils au sein d'une même famille.

#### 4.5.3.2 Travail pré-pic $W_{pré-pic}$ (ténacité)

A la différence du travail total, le travail dissipé dans la phase pré-pic  $W_{pré-pic}$  semble être une fonction croissante de  $L_e$ , quelque soit la valeur de  $L_e$  (**figure 4.21**). Ce constat concerne tous les prétraitements, même si pour certains (SG1, SG3) l'augmentation de  $W_{pré-pic}$  avec  $L_e$  devient moins marquée aux fortes valeurs de  $L_e$ .

Les prétraitements W et D donnent des résultats similaires. Les valeurs obtenues avec le prétraitement PI sont plus importantes que pour les deux autres prétraitements. Cela est cohérent avec le niveau d'imprégnation bien meilleur dans le cas PI et qui conduit à mobiliser plus de filaments dans le fil.

Comme pour le travail total, le travail pré-pic mesuré dans le cas des fils OC est de l'ordre de 50% de celui déterminé dans le cas des fils SG. Dans la mesure où les niveaux d'imprégnation des fils restent dans des ordres de grandeur proches, ces différences doivent être la conséquence de différences dans la nature de l'ensimage de ces fils.

#### 4.5.3.3 Travail post-pic $W_{post-pic}$

La **figure 4.22** donnent les valeurs obtenus pour le travail post-pic  $W_{post-pic}$ . On retrouve à nouveau les mêmes tendances générales que celles décrites dans les deux précédant paragraphes. La différence principale concerne l'évolution du travail post-pic avec

l'augmentation de  $L_e$ , qui présente un maximum pour des valeurs de  $L_e$  voisines de 10 cm. Comme dans le cas de l'effort résiduel (section **4.5.1.2**), la réduction de la longueur des filaments extraits, consécutive à leur rupture rendue possible par les grandes longueurs d'ancrage, doit être à l'origine de la diminution du travail post-pic, associé aux mécanismes de frottement mis en jeu le long du fil lors de l'extraction.

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

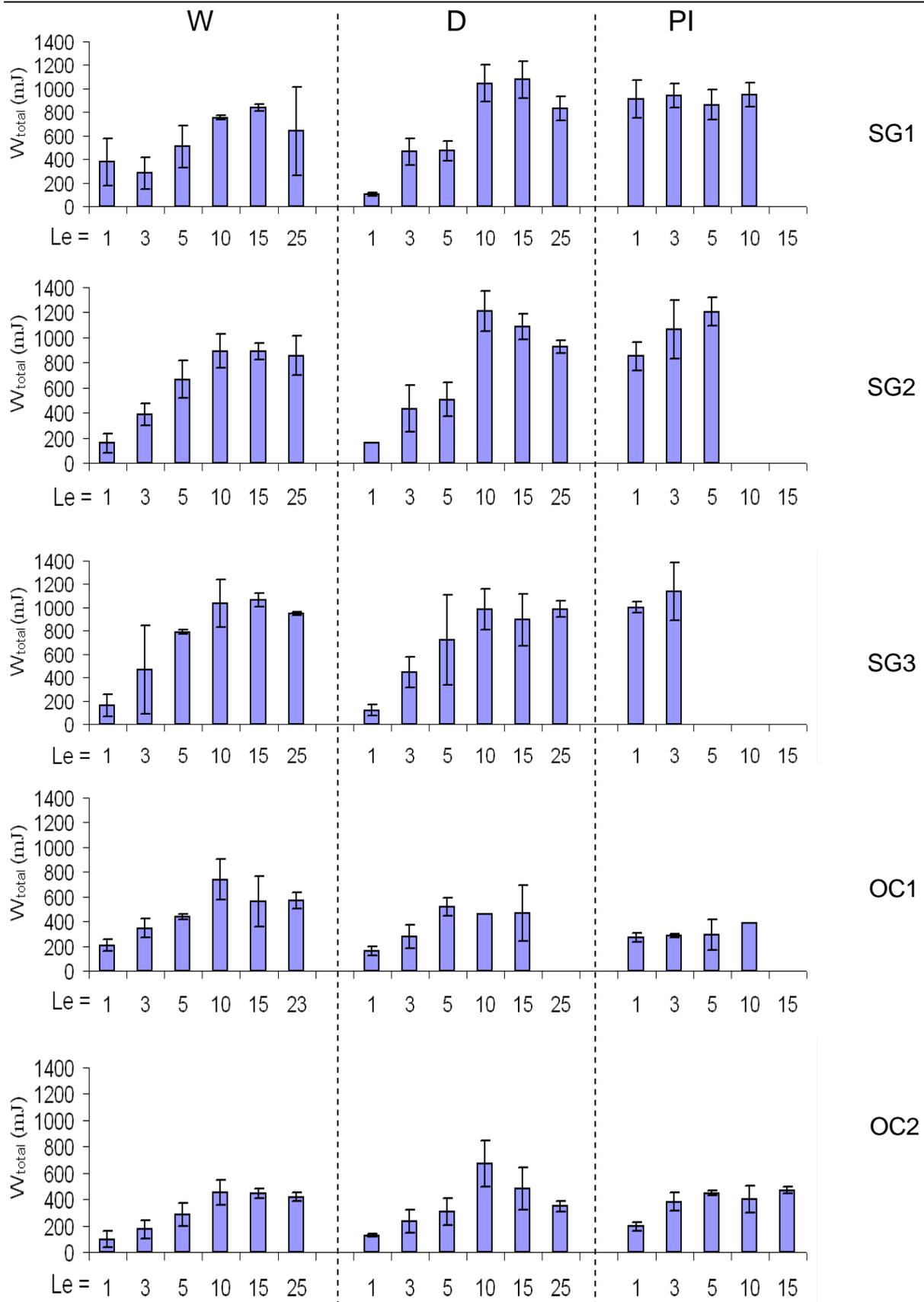


Figure 4.20. Travail total (jusqu'à déplacement d'arrachement de 8 mm)

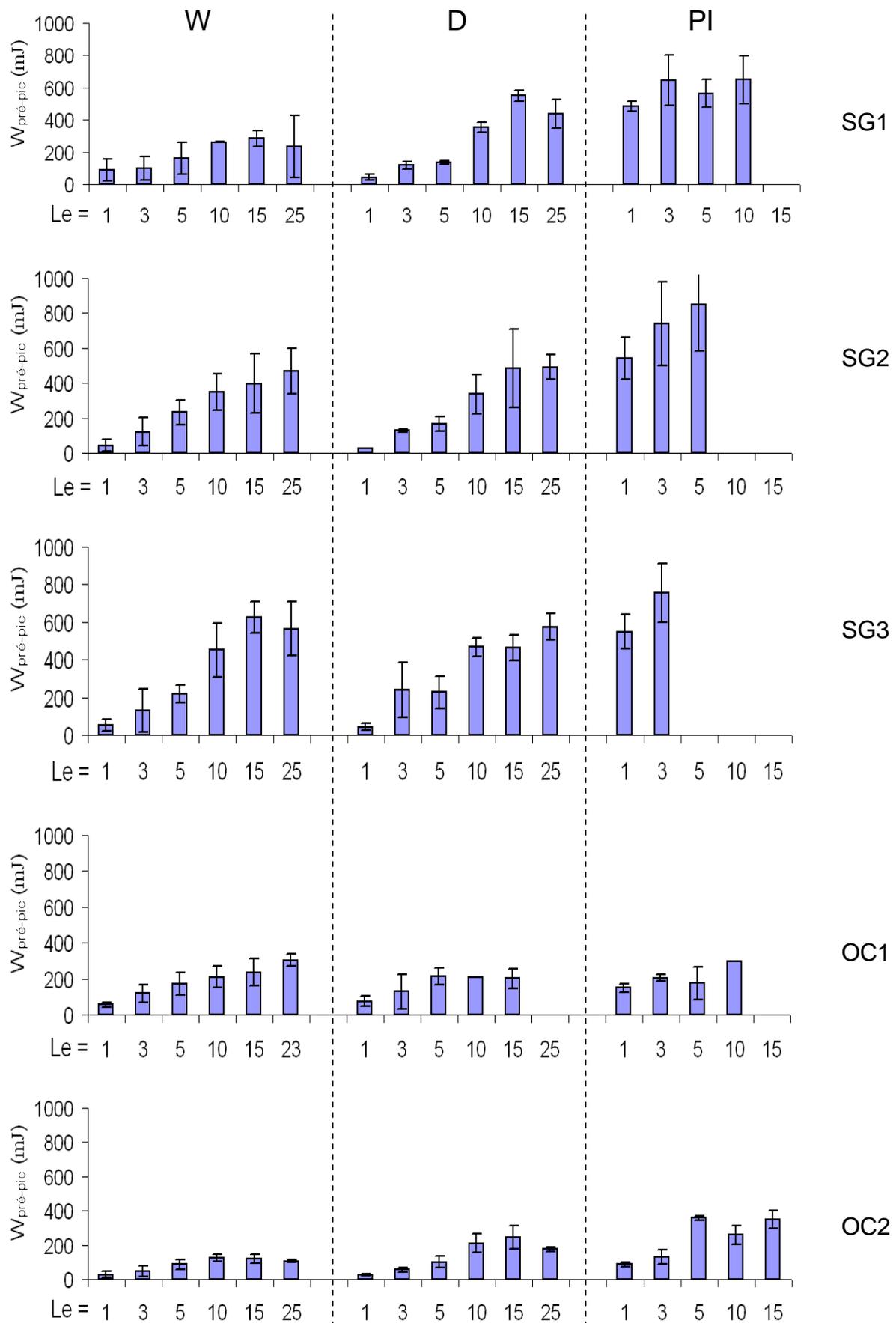


Figure 4.21. Travaux pré-pic.

Etude du comportement mécanique à l'arrachement  
des fils multi-filamentaires enrobés dans la matrice cimentaire

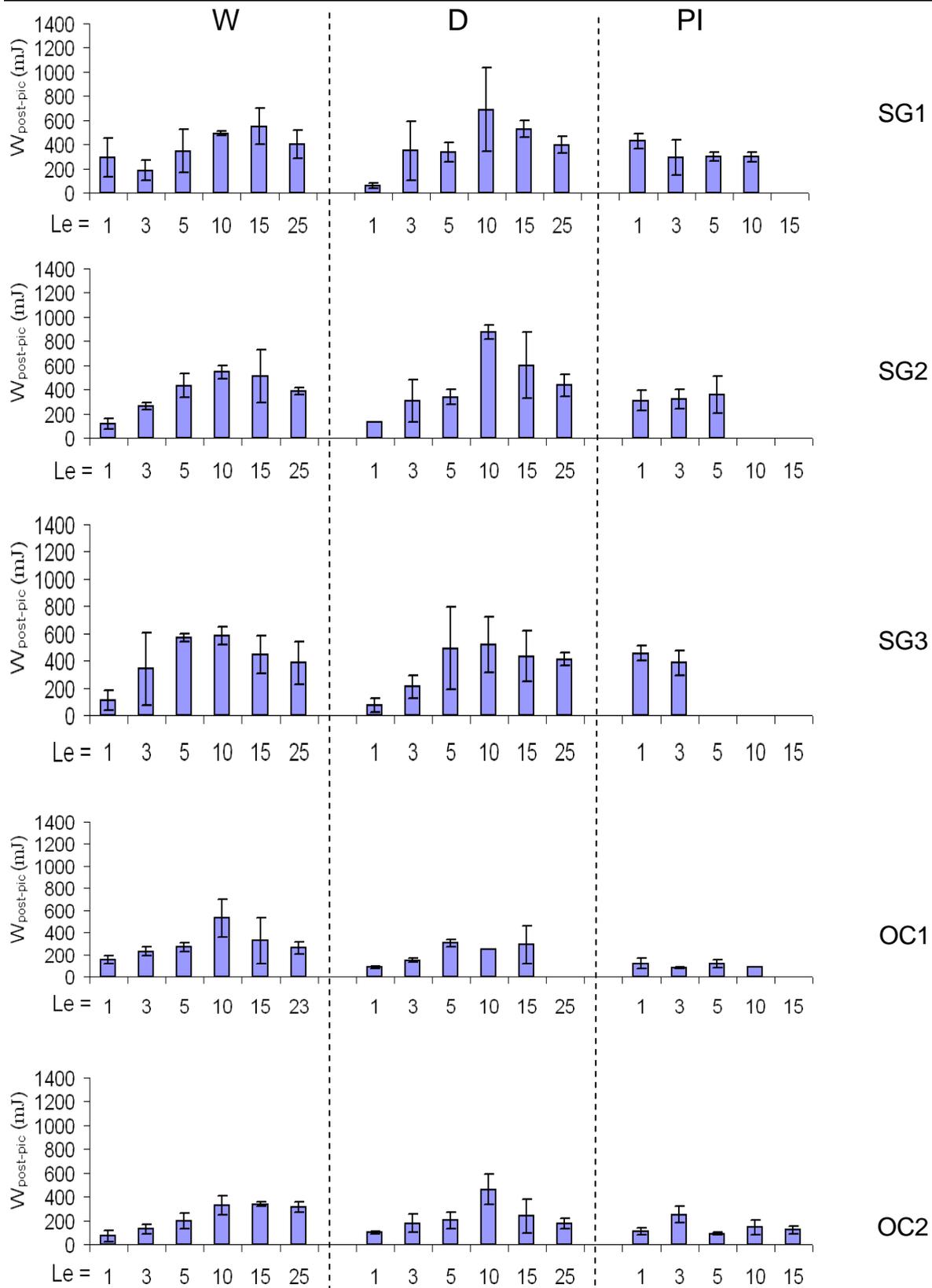


Figure 4.22. Travail post-pic (travail total dans les phases post-pic et post-pic résiduelle).

#### 4.5.4 Discussion

Les résultats présentés dans les paragraphes précédant ont permis d'examiner de manière détaillée l'influence de la longueur enrobée  $L_e$  sur les paramètres décrivant le comportement mécanique à l'arrachement des 5 fils de verre étudiés, pour les 3 prétraitements utilisés.

De manière générale, on a constaté que l'influence de la longueur enrobée sur le comportement mécanique est forte, que l'on s'intéresse à la phase pré-pic ( $k_{bond}$ ,  $P_{max}$ ) du comportement, à la phase post-pic ( $k_{debond}$ ) ou à la phase résiduelle ( $P_{résiduel}$ ,  $k_{frictional}$ ).

Notamment, on a constaté que les paramètres étudiés sont tous des fonctions croissantes de  $L_e$  lorsque les valeurs de  $L_e$  sont faibles. Lorsque la longueur enrobée augmente, il existe une valeur seuil de  $L_e$  au-delà de laquelle les paramètres mécaniques descriptifs du comportement à l'arrachement deviennent invariants, sauf peut être dans le cas de la phase résiduelle du comportement pour laquelle l'augmentation de la longueur enrobée au-delà du seuil conduit à la diminution des propriétés mécaniques associées ( $k_{frictional}$ ,  $W_{post-pic}$ ). La longueur seuil ne semble pas dépendre du type de paramètre envisagé.

La valeur seuil de  $L_e$  s'apparente à une longueur d'ancrage, au sens où une longueur au moins égale à ce seuil permet de disposer de la performance maximale du fil enrobé. Cependant, ce n'est pas à proprement parler une longueur d'enrobage, puisqu'elle ne permet pas nécessairement de retrouver la performance du fil en traction simple. Par exemple, en ce qui concerne la résistance maximale à l'arrachement  $P_{max}$ , les valeurs obtenues au-delà de la longueur seuil n'atteignent (presque) les performances en traction que dans le cas du fil SG1 préparé avec le prétraitement PI. Dans tous les autres cas, la résistance à l'arrachement reste inférieure à la résistance en traction simple du fil (elle atteint 20 à 80% de la résistance à la traction ; voir **figure 4.15**).

C'est la nature multifilamentaire des fils qui explique que les performances du fil en traction ne sont pas retrouvées au-delà de la longueur enrobée seuil. La structure du fil permet rarement une pénétration à cœur de la matrice cimentaire, ce qui ne permet pas d'ancrer l'ensemble des filaments au niveau du point d'entrée du fil libre dans la matrice cimentaire. Comme les filaments ne sont pas parfaitement alignés, il faut une longueur enrobée maximale (la longueur seuil évoquée plus haut) pour permettre à chaque filament constitutif du fil de trouver un point d'ancrage dans la matrice cimentaire. La répartition des points d'ancrage des filaments le long de cette longueur maximale crée une hétérogénéité dans les longueurs utiles des filaments (la longueur utile est la longueur sollicitée mécaniquement, i.e. la longueur comprise entre le point d'ancrage et le point d'application de l'effort de traction). L'hétérogénéité des longueurs utiles induit la non simultanée des mises en tensions des filaments, génère des taux de mise en charge variables dans les filaments et aboutit finalement à des ruptures non simultanées. Ces différents phénomènes dégradent les performances mécaniques des fils enrobés, en comparaison des performances obtenues en traction simple.

## 4.6 Longueur minimale d'enrobage et propriétés mécaniques associées

### 4.6.1 Détermination de la longueur minimale d'enrobage ( $L_{min}$ )

On définit comme longueur minimale d'enrobage la valeur maximale de  $L_e$  qui permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques invariantes avec  $L_e$ . On note dans la suite cette longueur  $L_{min}$ . Il s'agit de la longueur enrobée seuil mise en évidence à plusieurs reprises dans la section 4.5.

Cette longueur dépend du type de fil et du type de prétraitement appliqué au fil. Elle peut être déterminée à partir de l'étude de l'évolution des paramètres mécaniques en fonction de  $L_e$ .

En pratique, nous avons évalué  $L_{min}$  à partir des valeurs de  $P_{max}$  (figure 4.15), en considérant que  $L_{min}$  correspondait à la première valeur de  $L_e$  pour laquelle la valeur maximum était atteinte, compte tenu des écarts types mesurés expérimentalement (les valeurs de  $L_e$  sont considérées dans l'ordre croissant). Le tableau 4.5 donne les valeurs retenues pour  $L_{min}$ , pour les 5 fils et 3 prétraitements utilisés.

**Tableau 4.5.** Valeurs de la longueur minimale d'enrobage  $L_{min}$ .

Fil	SG1			SG2			SG3			OC1			OC2		
	W	D	PI												
$L_{min}$ (cm)	10	15	3	15	15	3	15	10	3	10	10	3	10	10	5

### 4.6.2 Propriétés mécaniques de références des fils lors de l'essai d'arrachement

Pour s'affranchir de la variation des propriétés mécaniques avec la longueur enrobée, nous définissons comme propriétés mécaniques de référence à l'arrachement les caractéristiques mécaniques obtenues lorsque la longueur de fil enrobée est suffisante pour que le comportement mécanique soit stabilisé. On détermine ces valeurs comme la moyenne des valeurs mesurées au cours des essais d'arrachement pour les longueurs d'enrobage  $L_e$  supérieures à  $L_{min}$ .

Dans la suite, on note ces grandeurs :

- $\delta_{max, lim}$  : allongement à la rupture, calculé à partir de  $\delta_{max}$ ,
- $P_{max, lim}$  : résistance à l'arrachement, calculée à partir de  $P_{max}$ ,
- $k_{bond, lim}$  : raideur pré-pic, calculée à partir de  $k_{bond}$ ,
- $k_{debond, lim}$  : raideur post-pic, calculée à partir de  $k_{debond}$ ,
- $k_{frictional, lim}$  : raideur résiduelle, calculée à partir de  $k_{frictional}$ ,
- $P_{résiduel, lim}$  : résistance résiduelle, calculée à partir de  $P_{résiduel}$ .

On définit également les trois paramètres énergétiques suivant, toujours à partir de la moyenne des valeurs mesurées pour  $L_e \geq L_{min}$  :

- $W_{total, lim}$  : travail total fourni au cours de l'essai d'arrachement, calculé à partir de  $W_{total}$ ,
- $W_{pré-pic, lim}$  : travail fourni au cours de l'essai d'arrachement, dans la phase pré-pic, calculé à partir de  $W_{pré-pic}$ ,
- $W_{post-pic, lim}$  : travail fourni au cours de l'essai d'arrachement, dans la phase post-pic, calculé à partir de  $W_{post-pic}$ .

Les **tableaux 4.6 et 4.7** donnent les valeurs des paramètres de références obtenus pour les différents fils et prétraitements utilisés. Ces paramètres représentent les valeurs stabilisées (i.e. mesurées lorsque la longueur enrobée est supérieure à la longueur minimale d'enrobage du fil) des paramètres caractéristiques du comportement observés au cours des essais d'arrachement tels qu'ils sont mis en œuvre dans ce travail.

Il est important de noter que ces paramètres ne caractérisent pas intrinsèquement le comportement à l'arrachement des fils, dans la mesure où ils intègrent également le comportement en traction simple des 10 cm de longueur libre de fil non enrobé. Il faut prendre en compte le comportement en flexion simple du fil pour déterminer les caractéristiques intrinsèques des fils à l'arrachement (voir section suivante).

**Tableau 4.6.** Comportement mécanique à l'arrachement de référence : paramètres mécaniques descriptifs.

Fil	Prétraitement	L <sub>min</sub> cm	δ <sub>max, lim</sub>		P <sub>max, lim</sub>		e (P <sub>max, lim</sub> ) %	k <sub>bond, lim</sub>		k <sub>debond, lim</sub>		k <sub>frictional, lim</sub>		P <sub>residuel, lim</sub>	
			moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation		moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation
			mm	%	N	%		N/mm	%	N/mm	%	N/mm	%	N	%
SG1	W	10	1,62	16,1	303,15	21,0	42,4	240,46	18,2	203,08	36,7	2,70	79,7	43,58	50,0
	D	15	1,93	3,3	543,18	13,5	76,0	358,14	10,4	669,32	32,5	1,96	25,8	25,96	36,4
	PI	3	2,25	9,0	632,32	14,0	88,5	395,04	11,5	1451,03	59,1	*	*	*	*
SG2	W	15	2,25	9,78	423,6	27,0	47,0	255,79	32,9	474,56	75,0	2,67	59,26	39,21	60,4
	D	15	2,37	8,9	471,12	20,7	55,0	289,37	10,6	517,67	59,3	4,40	52,4	49,03	52,8
	PI	3	2,34	11,1	722,11	17,4	81,5	384,45	8,3	1746,95	54,9	*	*	*	*
SG3	W	15	1,94	6,3	565,13	13,1	68,1	344,22	7,2	755,03	42,8	2,61	50,2	43,52	64,1
	D	10	1,94	7,9	518,08	12,5	62,4	342,03	11,9	702,37	40,8	2,98	49,3	37,54	57,0
	PI	3	2,36	2,4	751,15	11,8	90,5	442,88	10,0	1431,75	19,5	*	*	*	*
OC1	W	10	1,27	38,4	319,67	17,0	28,6	329,71	25,9	478,13	71,7	2,14	74,8	33,98	88,8
	D	10	1,46	9,2	335,66	3,5	30,1	353,76	9,0	307,41	7,3	1,58	-	14,20	-
	PI	3	1,18	7,6	376,45	16,3	33,7	392,55	76,0	2704,15	0,3	*	*	*	*
OC2	W	10	1,26	11,0	203,08	14,8	22,6	233,78	20,3	341,76	48,0	1,43	25,2	39,62	23,4
	D	10	1,34	20,6	324,64	23,1	36,1	326,41	22,2	699,71	43,4	4,54	38,8	64,07	31,4
	PI	5	1,56	10,7	434,11	7,9	48,2	346,28	16,2	2165,35	41,2	*	*	43,52	*

(\*) : pas de frottement résiduel.

**Tableau 4.7.** Comportement mécanique à l'arrachement de référence : paramètres énergétiques.

Fil	Prétraitement	L <sub>min</sub>	W <sub>total</sub>		W <sub>pré pic</sub>		W <sub>post pic</sub>	
			Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation	Moyenne	Coefficient de variation
		cm	mJ	%	mJ	%	mJ	%
SG1	W	10	742,99	31,0	261,05	31,5	481,94	24,7
	D	15	953,52	19,0	491,47	6,16	462,01	23,4
	PI	3	916,22	11,9	619,75	20,9	296,48	28,2
SG2	W	15	871,3	53,9	432,78	34,3	438,54	27,3
	D	15	1006,48	33,4	488,5	30,2	517,98	39,0
	PI	3	1135,11	15,4	794,38	31,9	340,73	32,7
SG3	W	15	1008,42	21,5	593,94	19,1	414,48	33,2
	D	10	954,16	28,3	501,27	12,7	452,88	32,7
	PI	3	1139,37	21,7	754,27	20,8	385,1	23,8
OC1	W	10	522,06	51,4	212,52	25,1	309,54	54,9
	D	10	462,88	5,8	193,69	12,9	269,2	10,9
	PI	3	321,8	13,9	226,07	16,2	95,73	20,7
OC2	W	10	438,25	23,2	111,96	15,5	326,29	3,8
	D	10	501,15	33,1	209,81	21,9	291,34	51,6
	PI	5	439,37	10,9	321,63	12,5	117,74	22,6

## 4.7 Caractéristiques intrinsèques à l'arrachement des fils enrobés

### 4.7.1 Caractérisation du comportement des fils en traction simple

Les propriétés mécaniques en traction simple des cinq fils étudiés ont été déterminées dans des conditions identiques à celles utilisées pour les essais d'arrachement : vitesse de déplacement imposée de 0,01 mm/min, longueur libre du fil de 10 cm, collage des extrémités du fils entre deux plaquettes époxy.

Ces propriétés sont définies à l'identique des propriétés équivalentes déterminées lors des essais d'arrachement (voir détails **section 4.3.1.3**). Elles sont données dans le **tableau 4.8** (l'indice « ,t » fait référence au propriété du fil en traction simple). On rappelle que le comportement du fil en traction ne présente pas de phase résiduelle (voir **chapitre 2**), d'où l'absence des paramètres  $P_{résiduel}$  et  $k_{frictional}$  spécifiques à l'essai d'arrachement.

**Tableau 4.8.** Comportement mécanique des fils en traction simple.

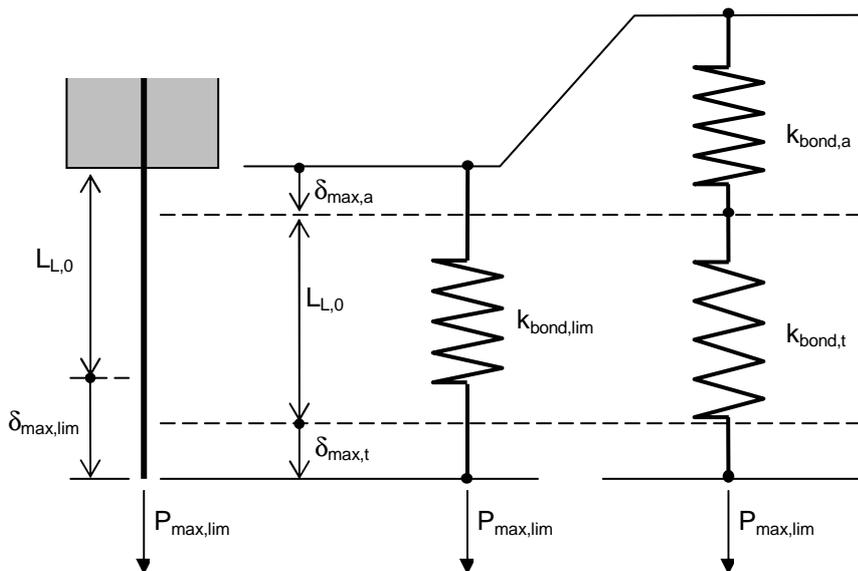
Fil	$\delta_{max,t}$		$P_{max,t}$		$k_{bond,t}$		$k_{debond,t}$		$W_{total,t}$		$W_{pré-pic,t}$		$W_{post-pic,t}$		$\frac{W_{post-pic,t}}{W_{total,t}}$
	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	moyenne	Coefficient de variation	
	mm	%	N	%	N/mm	%	N/mm	%	mJ	%	mJ	%	mJ	%	
SG1	1,52	5,56	714,40	1,78	569,04	3,32	1 248,72	14,72	848,41	9,97	559,85	5,57	288,56	21,84	34
SG2	2,43	5,61	856,59	5,86	449,13	1,17	1 072,46	18,83	1 638,21	11,22	1 179,69	10,28	458,52	15,53	28
SG3	2,26	6,41	830,37	1,50	454,46	4,96	1 847,95	49,67	1 568,79	8,00	1 052,81	7,88	515,98	16,77	33
OC1	2,80	8,77	1 116,31	6,14	547,69	5,61	1 464,93	27,64	2 463,33	14,30	1 721,20	14,51	742,13	20,99	30
OC2	2,13	9,06	900,53	8,82	558,82	7,24	9 095,64	85,25	1 587,18	14,85	1 106,03	17,57	481,15	26,03	30

### 4.7.2 Comportement intrinsèque à l'arrachement

#### 4.7.2.1 Evaluation des paramètres de comportement dans la phase pré-pic

Comme la résistance ultime à l'arrachement du fil reste inférieure à sa résistance ultime en traction, une évaluation des propriétés mécaniques intrinsèques à l'arrachement dans la phase pré-pic du comportement peut être faite en faisant l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire pour le fil en traction simple et pour le fil enrobé sollicité à l'arrachement.

Dans ce cas, le comportement du fil au cours de l'essai d'arrachement peut être modélisé par le comportement d'un ressort de raideur  $k_{bond,lim}$ , correspondant à la mise en série d'un ressort de raideur  $k_t$  modélisant le comportement de la longueur libre de fil (longueur initiale  $L_{L,0}$ ) sollicitée en traction simple et d'un ressort de raideur  $k_a$  modélisant l'arrachement du fil (voir **figure 4.23**). Sous l'action de l'effort d'arrachement, la longueur libre de fil s'allonge de  $\delta_{max,t}$  et une longueur de fil  $\delta_{max,a}$  est extraite de la zone enrobée. L'ensemble représente un déplacement  $\delta_{max,lim}$  de l'extrémité libre du fil par rapport au bloc de béton.



**Figure 4.23.** Modélisation du comportement pré-pic.

Ce modèle permet le calcul du déplacement et de l'effort à la rupture, de la raideur à l'arrachement et du travail dissipé dans la phase pré-pic. On obtient :

$$\delta_{max,a} = \delta_{max,lim} - k_{bond,t} \cdot P_{max,lim} \quad (4.3)$$

$$P_{max,a} = P_{max,lim} \quad (4.4)$$

$$k_{bond,a} = k_{bond,t} \cdot k_{bond,lim} / (k_{bond,t} - k_{bond,lim}) \quad (4.5)$$

$$W_{pré-pic,a} = W_{pré-pic} - W_{pré-pic,t}(P_{max,lim}) \quad (4.6)$$

Où  $W_{pré-pic,t}(P_{max,lim})$  est le travail dissipé en traction simple au niveau de la longueur libre de fil au cours de l'essai d'arrachement.  $W_{pré-pic,t}(P_{max,lim})$  est la fraction de  $W_{pré-pic,t}$  dissipé avant d'atteindre un effort appliqué égal à  $P_{max,lim}$ . Cette quantité est évaluée à partir d'une approximation de  $W_{pré-pic,t}(P) = f(P)$  sous forme d'un polynôme de degré 4 dont les constantes sont déterminées à partir des données expérimentales, à l'aide de la méthode des moindres carrés.

On définit également l'efficacité  $e(P_{max,a})$  de l'ancrage comme le rapport de la résistance ultime à l'arrachement du fil à la résistance ultime du fil en traction simple.

Le **tableau 4.9** donne les valeurs de ces différentes grandeurs pour les différentes configurations fil / prétraitements utilisés.

#### 4.7.2.2 Paramètres de comportement dans les phases post-pic et post-pic résiduelle

Lorsque l'arrachement entre dans la phase post-pic, la longueur libre du fil n'a pas encore atteint la résistance ultime en traction simple ( $P_{max,lim} < P_{max,t}$ ). De ce fait, le comportement global observé est alors pour l'essentiel le résultat de l'évolution du phénomène d'arrachement le long de la longueur enrobée. Seul le retour élastique des filaments de verre non rompus peut influencer en partie le comportement observé au cours de cette phase, mais sans toutefois influencer les niveaux d'efforts observés.

Comme l'influence du retour élastique de la longueur libre de fil reste relativement réduite, nous l'avons considéré comme négligeable dans la suite. En conséquence, les paramètres post-pic du comportement intrinsèque à l'arrachement sont ceux mesurés directement au cours de l'essai d'arrachement. Il en est de même pour ceux décrivant la phase post-pic résiduelle. En notant avec un indice « ,a » les paramètres intrinsèques de comportement à l'arrachement, on a donc :

$$k_{debond,a} = k_{debond,lim} \quad (4.7)$$

$$k_{frictional,a} = k_{frictional,lim} \quad (4.8)$$

$$P_{résiduel,a} = P_{résiduel,lim} \quad (4.9)$$

$$W_{post-pic,a} = W_{post-pic} \quad (4.10)$$

$$W_{total,a} = W_{pré-pic,a} + W_{post-pic,a} = W_{total} - W_{pré-pic,t}(P_{max,lim}) \quad (4.11)$$

Le **tableau 4.9** donne les valeurs de ces différentes grandeurs pour les différentes configurations fil / prétraitements utilisés. Il donne également la valeur du ratio  $W_{post-pic,a} / W_{total,a}$  qui permet de comparer la ductilité à l'arrachement des différentes configurations.

Dans le cas du fil SG3PI, les résultats obtenus en traction simple et ceux obtenus au cours de l'essai d'arrachement sont quasiment identiques, aux incertitudes de mesures près. Cela se traduit par des valeurs non cohérentes de  $k_{bond,a}$  et  $W_{pré-pic,a}$  dans le **tableau 4.9**.

**Tableau 4.9.** Comportement mécanique intrinsèque à l'arrachement : paramètres caractéristiques.

Fil	Prétraitement	$\delta_{max,a}$	$P_{max,a}$	$e (P_{max,a})$	$k_{bond,a}$	$k_{debond,a}$	$k_{frictional,a}$	$P_{résiduel,a}$	$W_{total,a}$	$W_{pré-pic,a}$	$W_{post-pic,a}$	$W_{post-pic,a} / W_{total,a}$
		mm	N	%	N/mm	N/mm	N/mm	N	mJ	mJ	mJ	%
SG1	W	0,97	303,15	42	416,43	203,08	2,70	43,58	660,11	178,17	481,94	73
	D	0,77	543,18	76	966,33	669,32	1,96	25,96	685,97	223,97	462,00	67
	PI	0,90	632,32	89	1 291,94	1 451,03	*	*	534,77	238,29	296,48	55
SG2	W	1,05	423,60	47	594,20	474,56	2,67	49,45	673,52	235,00	438,54	65
	D	1,03	471,12	55	813,49	517,67	4,40	49,03	757,81	239,83	517,98	68
	PI	0,29	722,11	82	2 669,44	1 746,95	*	*	460,71	119,98	340,73	74
SG3	W	0,40	565,13	68	1 419,01	755,03	2,61	21,76	633,62	219,14	414,48	65
	D	0,53	518,08	62	1 382,52	702,37	2,98	37,55	647,02	194,13	452,88	70
	PI	0,31	751,15	91	17 377,05	1 431,75	*	*	400,49	15,39	385,10	96
OC1	W	0,47	319,67	29	828,43	478,13	2,14	33,98	426,55	117,01	309,54	73
	D	0,62	335,66	30	999,09	307,41	1,58	7,10	358,22	89,03	269,20	75
	PI	0,24	376,45	34	1 385,85	2 704,15	*	*	191,76	96,03	95,73	50
OC2	W	0,78	203,08	23	401,92	341,76	1,43	39,62	401,42	75,13	326,29	81
	D	0,57	324,64	36	784,84	699,71	4,54	21,36	409,40	118,06	291,33	71
	PI	0,54	434,11	48	910,46	2 165,35	*	*	272,26	154,52	117,74	43

(\*) : pas de frottement résiduel.

## 4.8 Influence du type de fil et du prétraitement sur le comportement intrinsèque à l'arrachement

### 4.8.1 Influence du fil et du prétraitement sur les résistances

#### 4.8.1.1 Résistance à l'arrachement $P_{max,a}$

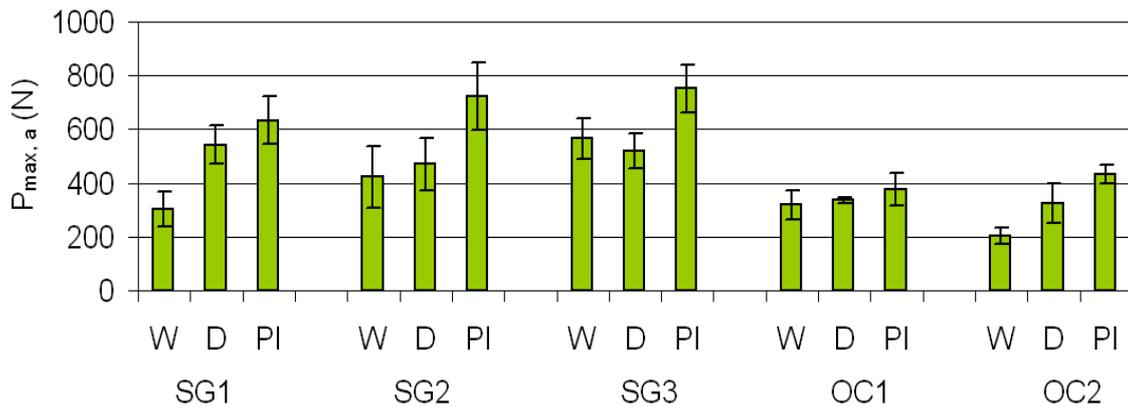
Les **figures 4.24** et **4.25** donnent respectivement les valeurs de la résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$  et de l'efficacité  $e(P_{max,a})$  en fonction du type de fil et du prétraitement.

Globalement, l'efficacité des fils SG est nettement supérieure à celle des fils OC (on constate approximativement un rapport de 1 à 2). Cela est la conséquence de différences dans l'ensimage des fils. En effet, les fils SG sont des fils destinés à un usage dans les bétons (sous forme de fibres courtes dispersées dans la matrice cimentaire). Leur ensimage est conçu pour favoriser l'adhérence filaments / matrice. Les fils OC ne sont pas destinés à un usage dans les bétons, mais sont destinés à renforcer des matrices polymères. Leur ensimage n'est donc pas conçu pour cet usage particulier ce qui explique les moindres performances constatées.

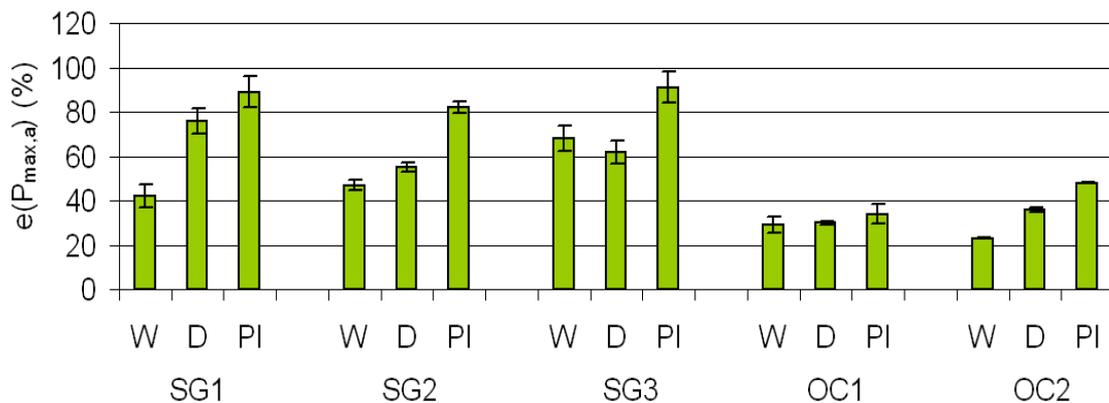
Quel que soit le type de fil, on constate que le prétraitement PI donne toujours les meilleures résistances à l'arrachement. Ce prétraitement, en favorisant très nettement la pénétration de la

matrice cimentaire dans le fil, permet d'obtenir de bonnes conditions d'ancrage des filaments, ce qui permet de se rapprocher au mieux de la résistance en traction du fil (efficacité de l'ordre de 80/90% dans les cas des fils SG).

Les résistances les plus faibles sont obtenues avec le prétraitement W, sauf dans le cas du fil SG3 (mais dans ce dernier cas, la marge d'erreur sur la mesure ne permet pas réellement de classer les résistances obtenues à partir des prétraitements W et D). Les prétraitements W et D donnent en général des résistances voisines, sauf dans le cas des fils OC2 et SG1 pour lesquels le prétraitement D se rapproche du prétraitement PI.



**Figure 4.24.** Influence du fil et du prétraitement sur la résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$ .



**Figure 4.25.** Influence du fil et du prétraitement sur l'efficacité  $e(P_{max,a})$ .

#### 4.8.1.2 Résistance résiduelle $P_{résiduel,a}$

La **figure 4.26** donne les valeurs de la résistance résiduelle obtenues dans les différentes configurations utilisées. Compte tenu de la variabilité des mesures dans la phase post-pic résiduelle (voir les coefficients de variation donnés dans le **tableau 4.6**), aucune tendance claire ne se dégage des résultats obtenus. En particulier, les prétraitements D et W semblent équivalents. Le fil OC2 est celui qui semble maximiser le frottement résiduel, ce qui pourrait être attribué à la géométrie spécifique de ce fil (pas de regroupement des filaments en mèches), plus favorable à la mise en place de contacts frottant entre filaments. Le fil OC1 est celui qui semble minimiser le frottement résiduel, ce qui est à rapprocher de l'efficacité réduite de ce fil comparé à celles des fils SG, conséquence de la qualité de l'ensimage.

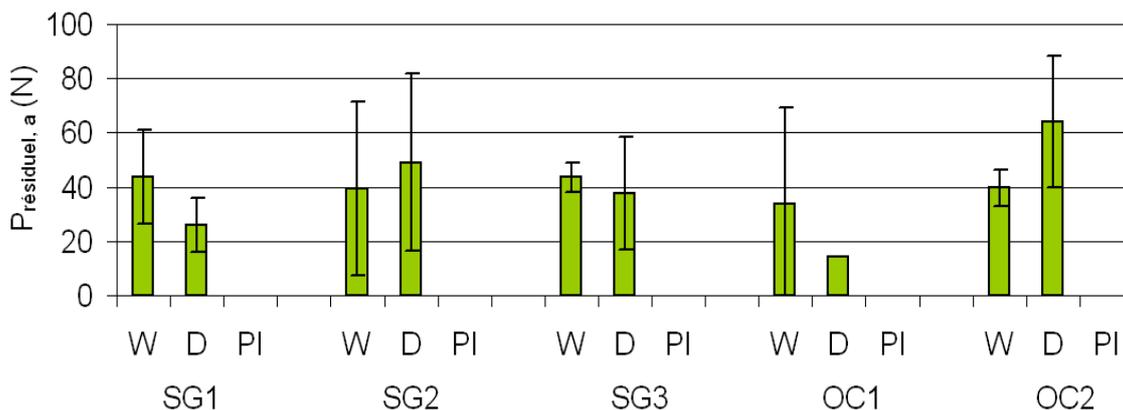


Figure 4.26. Influence du fil et du prétraitement sur l'effort résiduel  $P_{résiduel,a}$ .

## 4.8.2 Influence du fil et du prétraitement sur les raideurs

### 4.8.2.1 Raideur pré-pic $k_{bond,a}$

La raideur pré-pic  $k_{bond,a}$  étant, comme la résistance ultime, liée au nombre de filaments agissant simultanément, les valeurs de la raideur pré-pic présentent des évolutions relatives de même nature que celles observées pour la résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$  (figure 4.27).

Le prétraitement PI donne systématiquement la valeur maximale de la raideur pré-pic, tandis que la valeur minimale est obtenue avec le prétraitement W. Le prétraitement D donne des valeurs intermédiaires, très proches de celles obtenues avec le prétraitement W dans le cas des fils SG2, SG3 et OC1.

Contrairement à ce qui a été constaté pour la résistance maximale, on n'observe pas de différences significatives de comportement entre les fils SG et les fils OC. Seuls les fils SG2 et SG3 se différencient un peu des 3 autres dans la mesure où les raideurs pré-pic obtenues avec le prétraitement PI sont beaucoup plus importantes que celles obtenues avec les deux autres prétraitements.

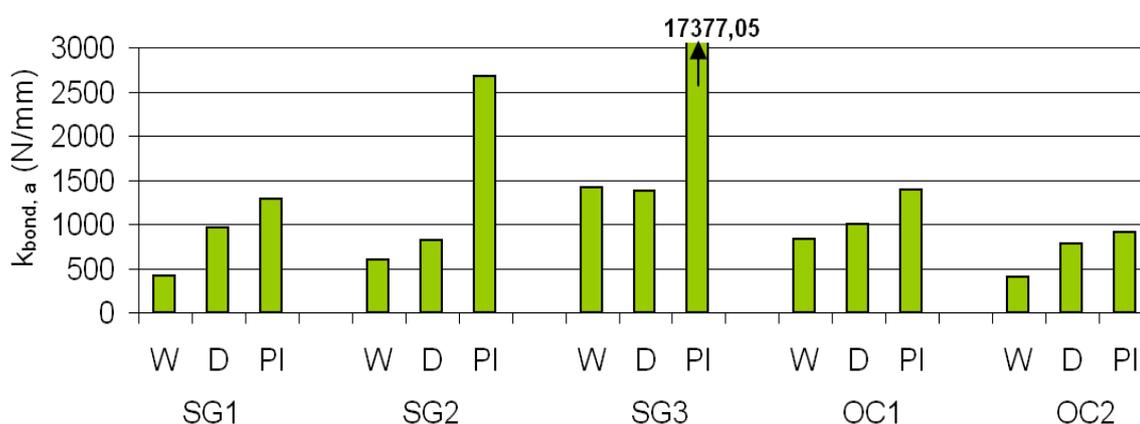
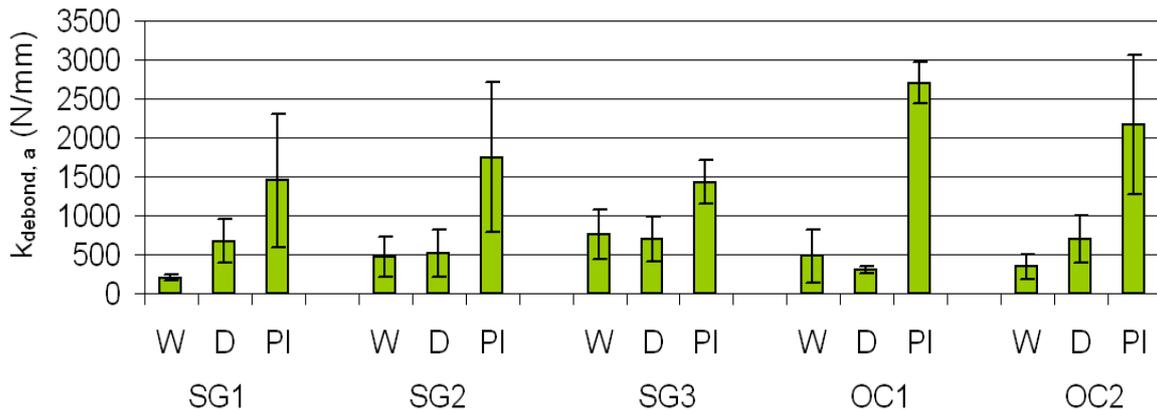


Figure 4.27. Influence du fil et du prétraitement sur la raideur pré-pic.

#### 4.8.2.2 Raideur post-pic $k_{debond,a}$

La **figure 4.28** donne les valeurs de la raideur post-pic pour les différentes configurations étudiées. Comme dans le cas de la raideur pré-pic, c'est le prétraitement PI qui donne les plus fortes valeurs à la raideur post-pic. Les deux autres prétraitements (W et D) ne se différencient pas en ce qui concerne ce paramètre (sauf peut être dans le cas du fil SG1).

Dans le cas des prétraitements W et D, il n'y a pas de différences significatives entre les cinq fils. Par contre, avec le prétraitement PI, les fils OC donnent des raideurs post-pic 1,5 à 1,8 fois plus élevées que les fils SG.

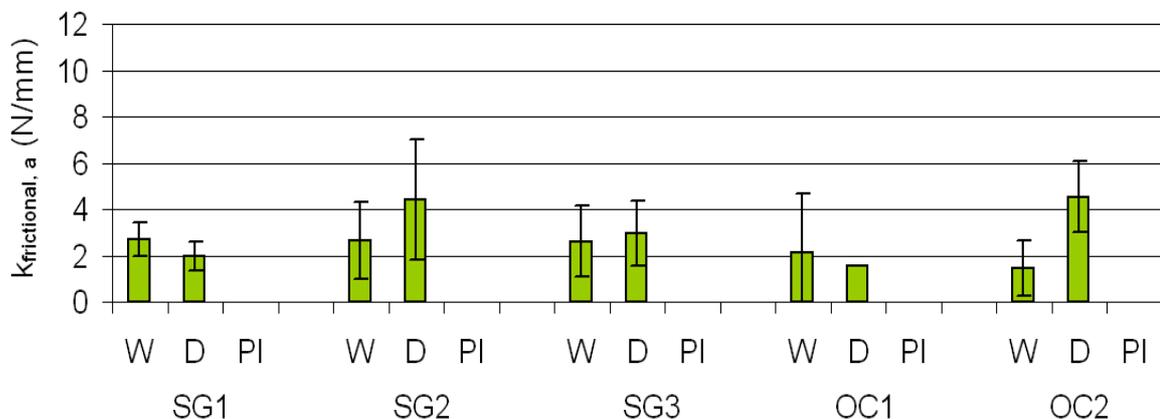


**Figure 4.28.** Influence du fil et du prétraitement sur la raideur post-pic.

#### 4.8.2.3 Raideur résiduelle $k_{frictional,a}$

Les raideurs résiduelles sont données dans la **figure 4.29**. Comme dans le cas de la résistance résiduelle, les incertitudes sur la mesure ne permettent pas de faire ressortir des variations significatives. Seul le fil OC2 donne une raideur supérieure dans le cas du prétraitement D. Dans les autres cas, les prétraitements W et D semblent donc globalement équivalents vis-à-vis de la raideur résiduelle.

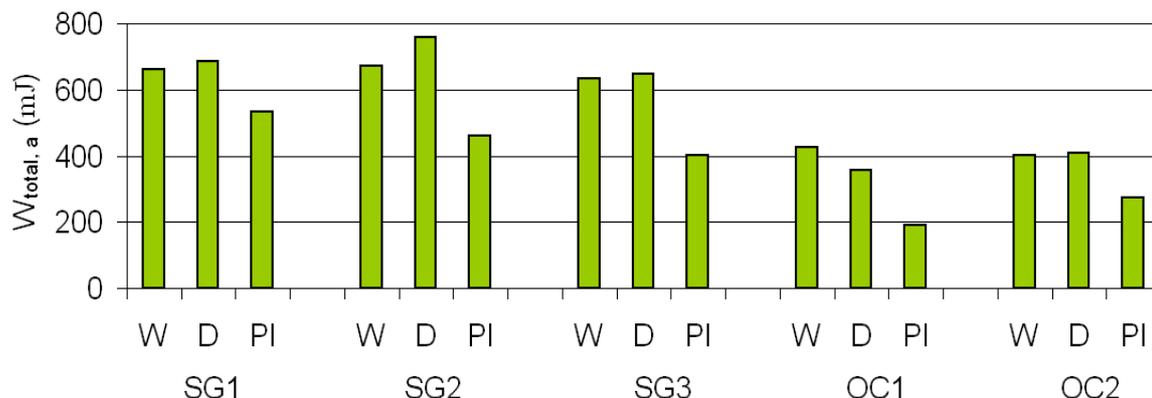
De la même manière, les différents types de fils ne modifient pas significativement les raideurs résiduelles dans le cas du prétraitement W. Dans le cas du prétraitement D, on observe deux groupes de fils : les fils SG1, SG3 et OC1 donnent des raideurs presque deux fois plus faibles que les fils SG2 et OC2.



**Figure 4.29.** Influence du fil et du prétraitement sur la raideur résiduelle.

### 4.8.3 Influence du fil et du prétraitement sur les paramètres énergétiques

#### 4.8.3.1 Travail total $W_{total,a}$



**Figure 4.30.** Influence du fil et du prétraitement sur le travail total dissipé au cours de l'arrachement.

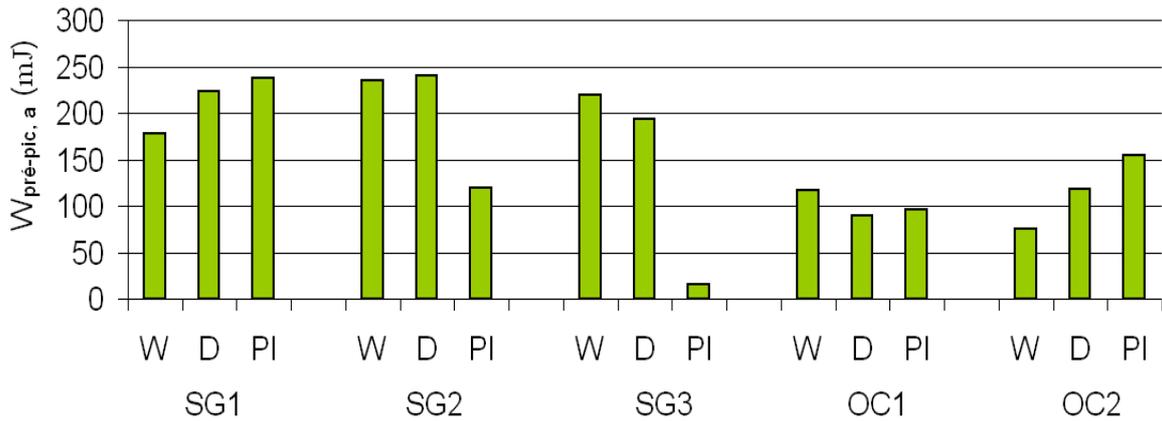
La **figure 4.30** présente le travail dissipé au cours de l'essai d'arrachement, du début de l'essai à l'obtention d'un déplacement de 8 mm de l'extrémité libre du fil. Ce travail est fonction du type de fil : les valeurs déterminées pour les fils SG sont plus élevées que celles obtenues pour les fils OC, ce qui est lié au type d'ensimage utilisé (voir **section 4.8.1.1**). Il n'y a par contre pas de différences marquées entre les fils de même famille.

En ce qui concerne l'influence du prétraitement, on ne constate pas de différence majeure entre les prétraitements W et D. Le prétraitement PI, quant à lui, donne des valeurs du travail total de 20 à 40% inférieures aux valeurs obtenues avec les autres prétraitements. Cela est le résultat d'une diminution importante du déplacement à la rupture, associé à une augmentation importante de la raideur, en particulier dans la phase post-pic (réduction importante de la longueur extraite responsable d'une réduction des frottements mis en jeu dans cette phase).

#### 4.8.3.2 Travail pré-pic $W_{pré-pic,a}$

La **figure 4.31** donne les valeurs du travail dissipé au cours de la phase pré-pic de l'essai d'arrachement. Ces valeurs sont cohérentes avec les niveaux d'effort ultime et de déplacement à la rupture constatés (un comportement linéaire donnerait  $W_{pré-pic,a} = \frac{1}{2} \delta_{max,a} \cdot P_{max,a}$ ). Notamment, les fils SG donnent globalement un travail pré-pic supérieur à celui des fils OC, conformément aux niveaux de résistance ultime observés (**figure 4.24**).

Dans le cas du prétraitement PI, les tendances constatées pour le travail pré-pic se différencient de celles observées pour la résistance ultime : le travail dissipé par SG1PI reste comparable à celui dissipé avec les autres prétraitements, tandis que le travail pré-pic dissipé par SG2PI ou SG3PI est nettement réduit. Dans le cas de SG3PI, la valeur obtenue est particulièrement faible et n'est pas cohérente avec le résultat que donnerait un calcul linéaire élastique ( $\frac{1}{2} \delta_{max,a} \cdot P_{max,a} = 116$  mJ dans le cas de SG3PI). Cela est une conséquence des incertitudes relativement fortes sur la mesure des travaux pré-pic (coefficient de variation avoisinant parfois 20%).



**Figure 4.31.** Influence du fil et du prétraitement sur le travail pré-pic dissipé au cours de l'arrachement.

#### 4.8.3.3 Travail post-pic $W_{post-pic,a}$

Comme déjà constaté précédemment pour d'autres paramètres descriptifs du comportement à l'arrachement, les prétraitements W et D donnent des résultats très proches en ce qui concerne le travail post-pic (voir **figure 4.32**), ce qui confirme que ces deux prétraitements ont des effets similaires sur l'imprégnation.

Le prétraitement PI donne des valeurs plus faibles du travail post-pic, sauf dans le cas du fil SG3 pour lequel le travail post-pic apparaît peu dépendant du type de prétraitement. C'est dans le cas des fils OC que les valeurs du travail post-pic obtenues avec le prétraitement PI diminuent le plus en comparaison des valeurs obtenues pour les autres prétraitements.

La **figure 4.33** donne la part du travail post-pic dans le travail total, exprimé sous la forme du rapport entre le travail post-pic et le travail total. Ce paramètre est une mesure de la non-fragilité du comportement à l'arrachement. Plus sa valeur est grande, plus l'interface peut continuer à dissiper de l'énergie après atteinte de l'effort ultime d'arrachement.

A l'exception de SG3PI, pour lequel la valeur obtenue (~100%) est aberrante du fait de la trop forte incertitude sur le calcul de  $W_{pré-pic,a}$ , les valeurs obtenues sont comprises entre 40 et 80%.

Dans le cas des fils SG, le fil SG1 présente une réponse au prétraitement différente de celle des fils SG2 et SG3 : l'imprégnation plus importante obtenue avec SG1PI fragilise le comportement à l'arrachement. On constate une évolution inverse avec les fils SG2 et SG3.

Dans les cas des fils OC, le prétraitement PI conduit toujours à une fragilisation significative du comportement à l'arrachement, mais les fils conservent cependant une capacité importante à absorber l'énergie mise en jeu dans l'arrachement puisque  $W_{post-pic,a}$  représente encore au moins 40% de l'énergie dissipée totale.

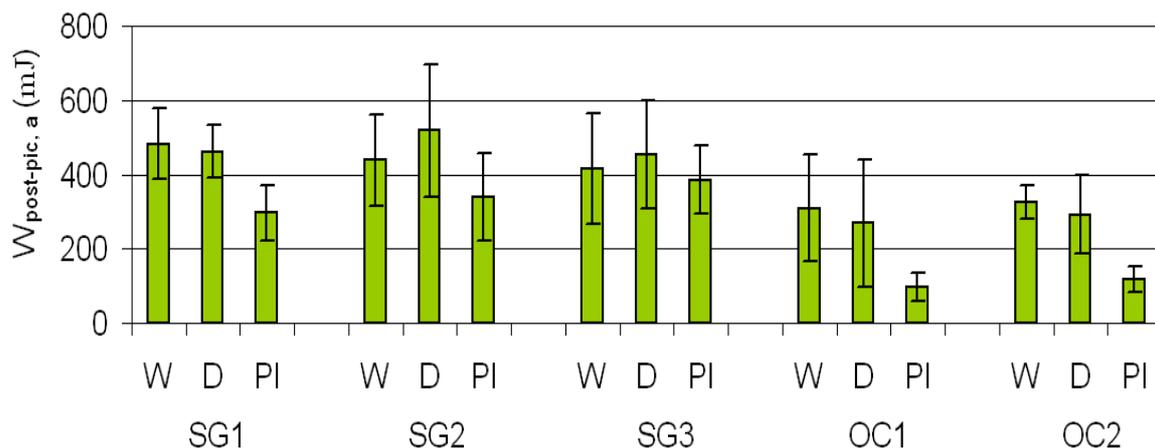


Figure 4.32. Influence du fil et du prétraitement sur le travail post-pic dissipé au cours de l'arrachement.

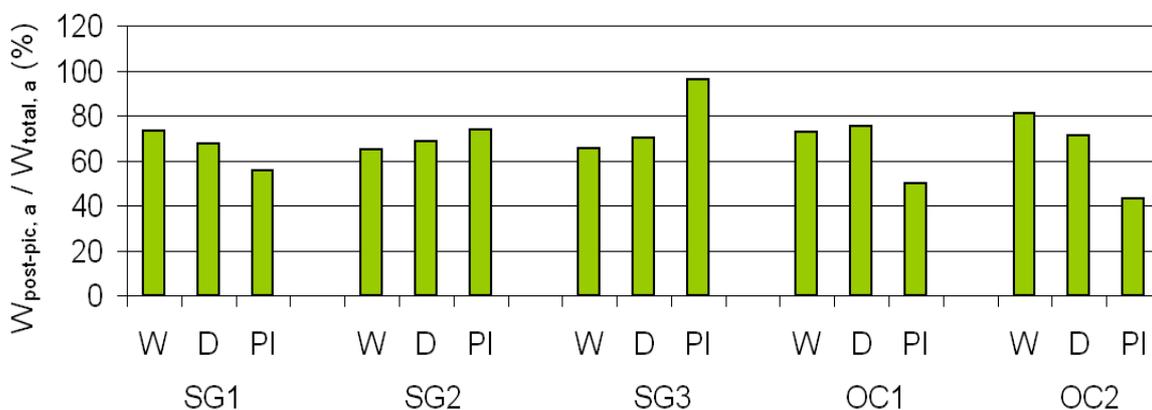


Figure 4.33. Influence du fil et du prétraitement sur la part du travail post-pic dans le travail total.

#### 4.8.4 Relation entre la répartition des filaments de cœur et le comportement mécanique

##### 4.8.4.1 Mesures de la quantité de filaments de cœur

On détermine deux valeurs de référence liées à la quantité de filaments de cœur extraits de la matrice à partir des résultats obtenus pour la longueur extraite relative et la proportion massique de fil extrait (voir **section 4.4**). Ces grandeurs sont la longueur extraite moyenne  $L_{ex,m}$  et la proportion massique moyenne de fil extrait  $p_{fc,m}$ .

la longueur extraite moyenne  $L_{ex,m}$  est la moyenne des longueurs extraites (produit de la longueur enrobée par la longueur extraite relative donnée au **tableau 4.4**) déterminée pour les longueurs enrobées supérieures ou égale à la longueur minimale d'enrobage définies **tableau 4.5**).

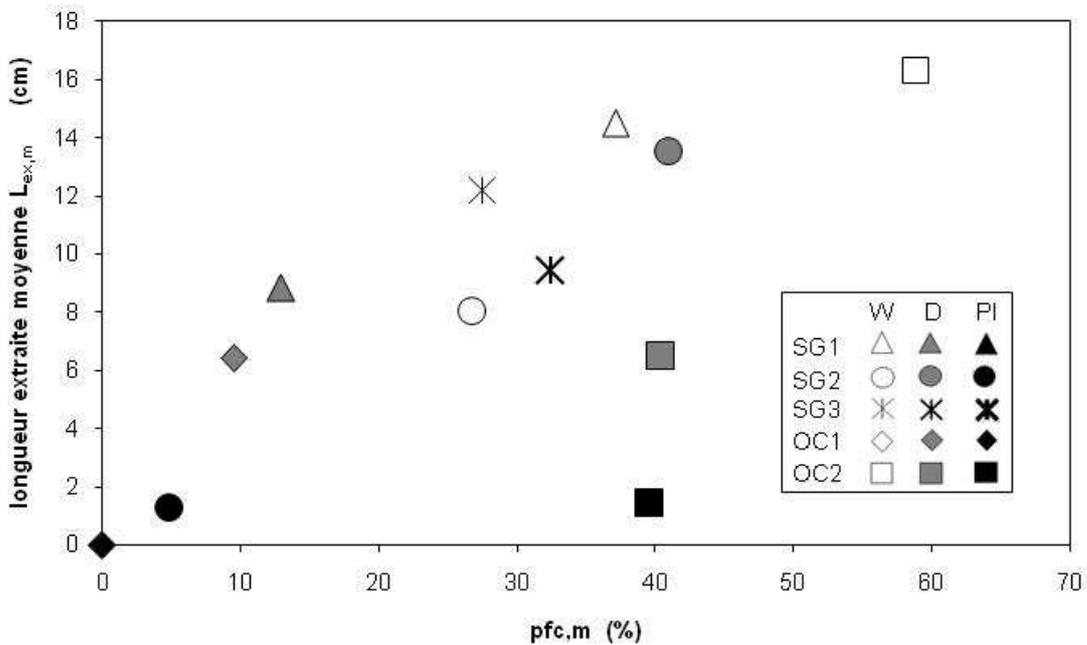
La proportion massique moyenne de filaments extraits  $p_{fc,m}$  est la moyenne des proportions massiques extraites données dans le **tableau 4.5** pour les longueurs enrobées supérieures ou égale à la longueur minimale d'enrobage associée à chaque configuration fils / prétraitement.

Le **tableau 4.10** donne les valeurs obtenues pour la longueur extraite moyenne  $L_{ex,m}$  et la proportion massique moyenne de fil extrait  $p_{fc,m}$ .

**Tableau 4.10.** Longueur extraite moyenne et proportion massique moyenne.

Fil	Prétraitement	$L_{ex,m}$	$p_{fc,m}$
		cm	%
SG1	W	14,49	37,12
	D	8,83	12,92
	PI	-	21,53
SG2	W	8,06	26,73
	D	13,53	40,97
	PI	1,28	4,80
SG3	W	12,20	27,48
	D	9,43	32,41
	PI	0,13	-
OC1	W	1,69	-
	D	6,42	9,47
	PI	0	0
OC2	W	16,31	58,84
	D	6,50	40,40
	PI	1,47	39,57

(-) pas de mesure ; (0)  $m_{Lz}=0$ .



**Figure 4.34.** Relation entre longueur extraite et proportion massique extraite.

Comme expliqué **section 4.4.2.2** et **figure 4.14**, la longueur extraite et la proportion massique de fil extrait ne sont a priori pas directement liées. Cependant, pour l'ensemble des fils présentant une structure en mèche (fils SG et fil OC1), on constate une relative proportionnalité entre ces deux grandeurs (voir **figure 4.34**). Pour le fil OC2, qui est un assemblage direct de filaments, la proportion massique extraite reste élevée (supérieure à 40%) même quand la

longueur extraite devient très faible (inférieure à 2 cm). Ce résultat est dû : soit au piégeage de particules de ciment dans le réseau de filaments (ce qui conduit à une surévaluation de la proportion massique extraite d'autant plus forte que le fil est fortement imprégné), soit au fait que l'absence de mèches favorise un comportement monolithique du fil imprégné.

4.8.4.2 Lien entre résistance à l'arrachement et filaments de cœur

La résistance à l'arrachement des fils multifilamentaires dépend entre autre de la quantité de filaments périphériques mis en traction simultanément. Cette quantité est d'autant plus importante que le nombre de filaments ancrés dans la matrice est important et donc que le nombre de filaments extraits est réduit.

On retrouve globalement cette tendance pour les fils SG en observant la relation entre l'efficacité du fil  $e(P_{max,a})$  et la proportion massique de filaments extraits (figure 4.35). Pour les fils OC, le fil OC2 reste dans la tendance générale observée pour les fils SG alors que le fil OC1 s'en écarte significativement puisque son efficacité ne semble pas dépendre de la proportion massique extraite. On remarque également que pour ce fil, l'efficacité n'est pas influencée par le prétraitement (figure 4.25) alors que la longueur extraite varie également fortement en fonction du prétraitement (tableau 4.10).

Ce phénomène peut s'expliquer par la mise en place de différences de longueur initiales importantes entre les filaments du fil OC1 lors de la fabrication de l'éprouvette. Ces différences de longueur induisent une mise en tension successive des filaments qui ne permet pas la mise en tension simultanée de tous les filaments ancrés (les filaments les plus courts rompant avant la mise en tension des filaments les plus longs). Lorsque la longueur ancrée du fil augmente, le nombre de filaments ancrés augmente également, ainsi que les différences de longueur entre filaments. Ces deux phénomènes agissent de manière opposée vis-à-vis de l'efficacité du fil, ce qui explique l'absence de lien entre l'efficacité du fil et la proportion massique extraite ou la longueur extraite de fil dans le cas du fil OC1.

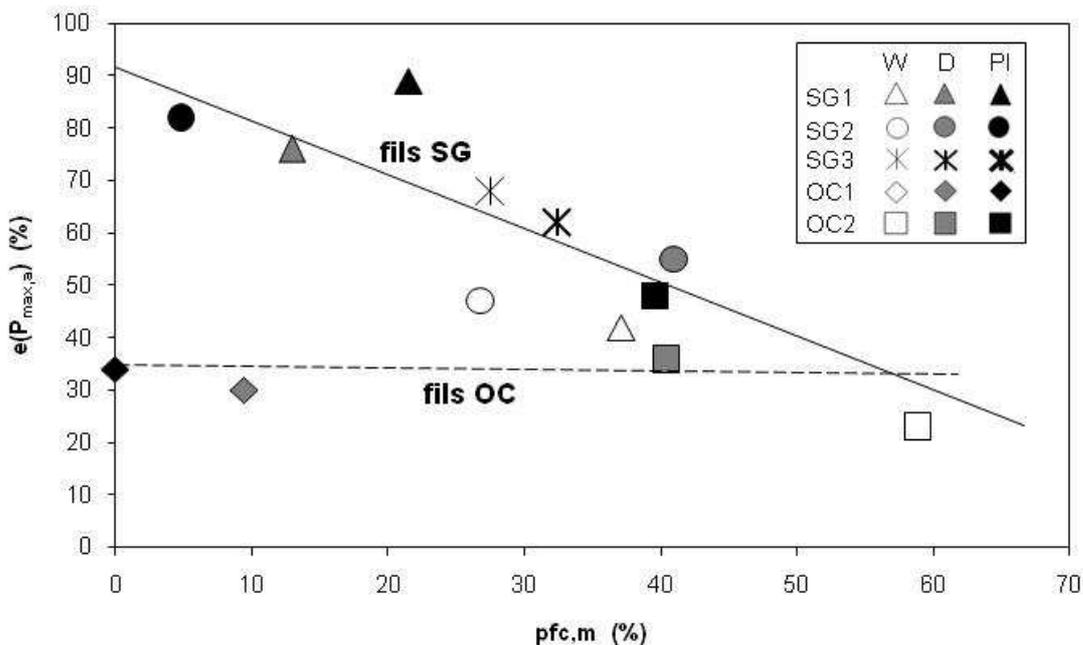


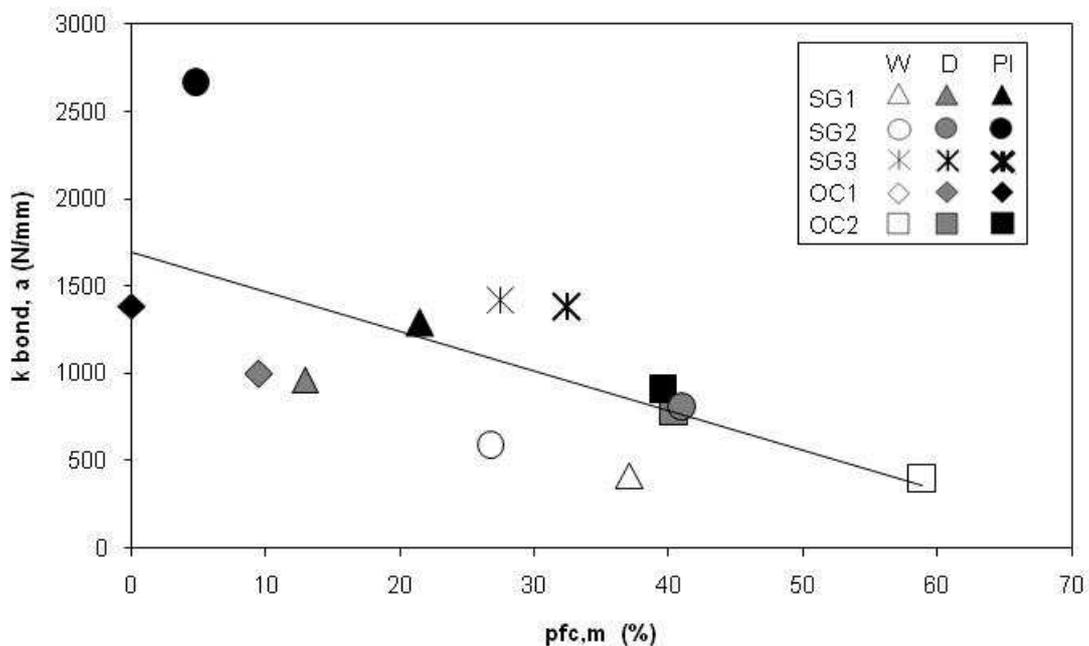
Figure 4.35. Efficacité des fils à l'arrachement en fonction de la proportion de fil extrait.

#### 4.8.4.3 Lien entre rigidités pré- et post-pic et filaments de cœur

Les **figures 4.36** et **4.37** donnent respectivement la raideur pré-pic  $k_{bond,a}$  et la raideur post-pic  $k_{debond,a}$  en fonction de la proportion massique de filaments extraits.

En ce qui concerne les raideurs pré-pic, qui sont relativement corrélées aux résistances ultimes parce que liées au niveau de l'interface fil / matrice aux mêmes phénomènes que les résistances ultimes, on retrouve la tendance observée pour l'efficacité à l'arrachement au paragraphe précédent : la raideur pré-pic tend à décroître lorsque la proportion massique de filaments extraits augmente.

Concernant la raideur post-pic, il faut distinguer le cas du prétraitement PI de celui des prétraitements W et D. Dans le cas des prétraitements W et D, la raideur post-pic ne varie pas avec la proportion massique extraite, à l'échelle de la gamme de raideur observée pour l'ensemble des configurations fil / prétraitement. Elle est par ailleurs peu influencée par le type de fil. La raideur post-pic est liée au séquençement de la rupture des différents filaments ancrés (filaments périphériques). Lorsque le nombre de filaments périphériques augmente (la proportion massique de filaments extraits diminue), la raideur post-pic doit augmenter. Or (voir **figure 4.34**), l'augmentation du nombre de filaments périphériques s'accompagne de la diminution de la longueur ancrée des filaments, ce qui induit l'accélération des ruptures de filaments lorsque le fil est extrait de la matrice. Ce mécanisme compense l'effet de l'augmentation du nombre de filaments et contribue ainsi à maintenir approximativement constante la raideur post-pic. Dans le cas du prétraitement PI, la variabilité de la raideur post-pic est plus marquée, probablement parce que les longueurs ancrées des filaments sont toujours très courtes (voisines de quelques millimètres) et indépendantes du type de fil.



**Figure 4.36.** Raideur pré-pic en fonction de la proportion de fil extrait.

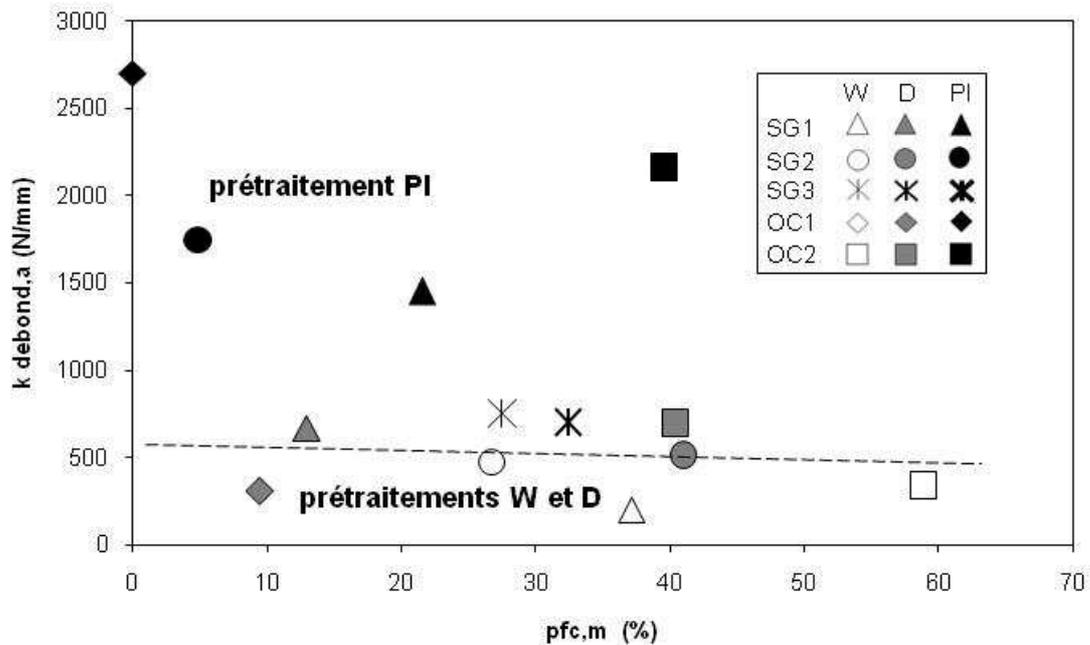


Figure 4.37. Raideur post-pic en fonction de la proportion de fil extrait.

#### 4.8.4.4 Lien entre phase résiduelle et filaments de cœur

La résistance résiduelle est liée aux frottements mis en jeu dans la phase finale d'extraction du fil de la matrice. Elle est d'autant plus importante que la liaison fil / matrice favorise les contacts matrice / filaments. En particulier, elle doit être directement liée à la quantité de filaments extraits de la matrice lors de l'arrachement. C'est ce qui est constaté expérimentalement pour les fils présentant une structure en mèches (fils SG et OC1 ; voir **figure 4.38**) qui se comportent globalement de manière similaire, même si les diamètres des filaments et les ensimages utilisés sont différents.

Le fil OC2, assemblage direct de filaments (pas de sous-structure mèches), ne respecte pas la tendance observée pour les autres fils. Le prétraitement W, en agglomérant les filaments par le jeu des forces capillaires, favorise pour ce fil l'alignement des filaments qui glissent plus facilement lors de l'extraction, conduisant à un effort résiduel nettement réduit par rapport au cas du fil ayant subi le prétraitement D.

En ce qui concerne les rigidités résiduelles, on retrouve les mêmes tendances que pour les résistances résiduelles (**figure 4.39**) puisque rigidités résiduelles et résistances résiduelles sont directement liées : la rigidité résiduelle est d'autant plus forte que la résistance résiduelle est forte.

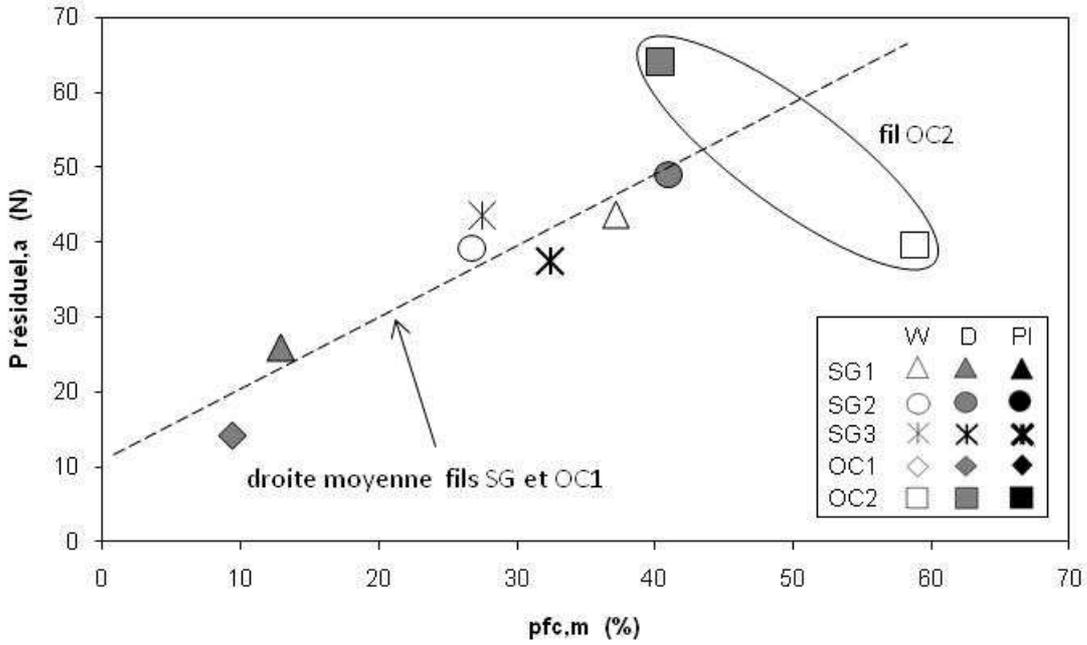


Figure 4.38. Résistance résiduelle en fonction de la proportion de fil extrait.

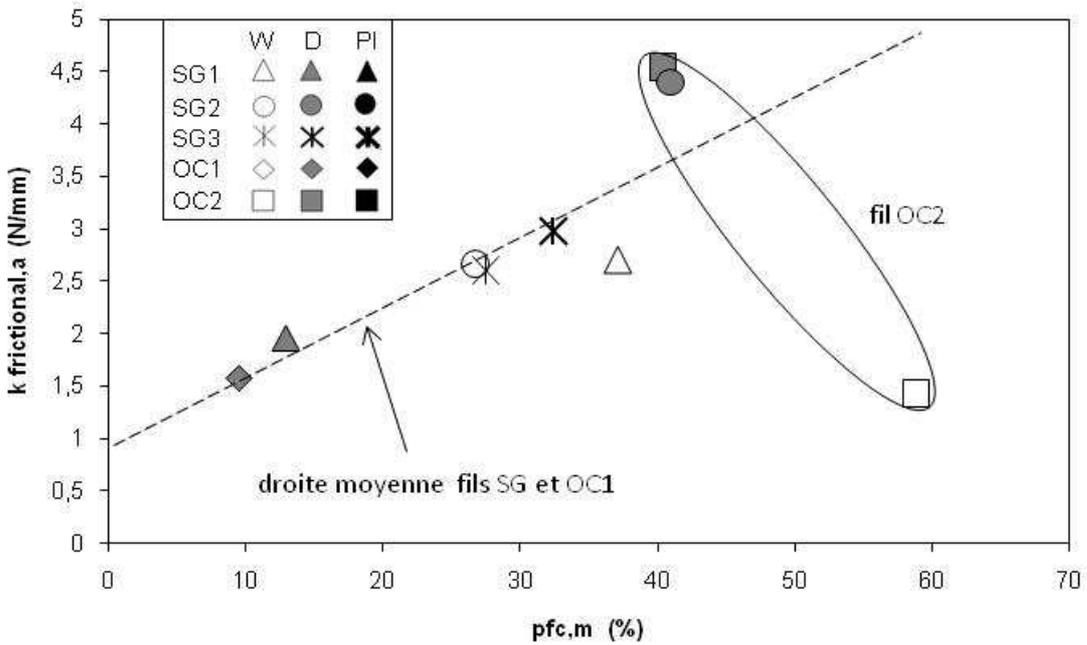


Figure 4.39. Raideur résiduelle en fonction de la proportion de fil extrait.

#### 4.8.4.5 Aspects énergétiques

Les figures 4.40 et 4.41 donnent respectivement le travail pré-pic  $W_{pré-pic,a}$  et le travail post-pic  $W_{post-pic,a}$  en fonction de la proportion massique de filaments extraits.

Concernant le travail pré-pic, dans le cas des fils OC, on retrouve la tendance observée pour la résistance ultime à l'arrachement (ou pour l'efficacité ; voir figure 4.35) : le travail pré-pic est très peu influencé par la proportion massique de filaments extraits.

Pour les fils SG, la forte influence du point de mesure correspondant à SG2 PI ne permet pas de considérer comme fiable la droite moyenne associée aux fils SG et il semble que le travail pré-pic soit également peu influencé par la proportion massique de filaments extraits.

Ces résultats, qui tendent à montrer que le travail pré-pic est indépendant de la proportion massique de filaments extraits, sont liés au fait que le travail pré-pic correspond à des actions exercées sur d'autres fils que les filaments extraits, ces derniers étant pour l'essentiel les filaments de cœur (non ancrés) et les filaments périphériques rompus dans la phase post-pic.

En ce qui concerne le travail post-pic (**figure 4.41**), on peut à nouveau distinguer le cas des fils SG de celui des fils OC. Dans les deux cas, on observe une tendance à l'augmentation du travail post-pic lorsque la proportion massique extraite augmente. Cette tendance est due au fait que les mécanismes mis en jeu dans la dissipation d'énergie après le pic de résistance concernent en premier lieu les filaments qui sont extraits (avant leur rupture, ou après leur rupture, dans la phase finale d'extraction). Les fils SG donnent des valeurs de travail post-pic supérieures à celles obtenues avec les fils OC, ce qui est probablement dû à des différences dans l'ensimage de ces deux groupes de fils.

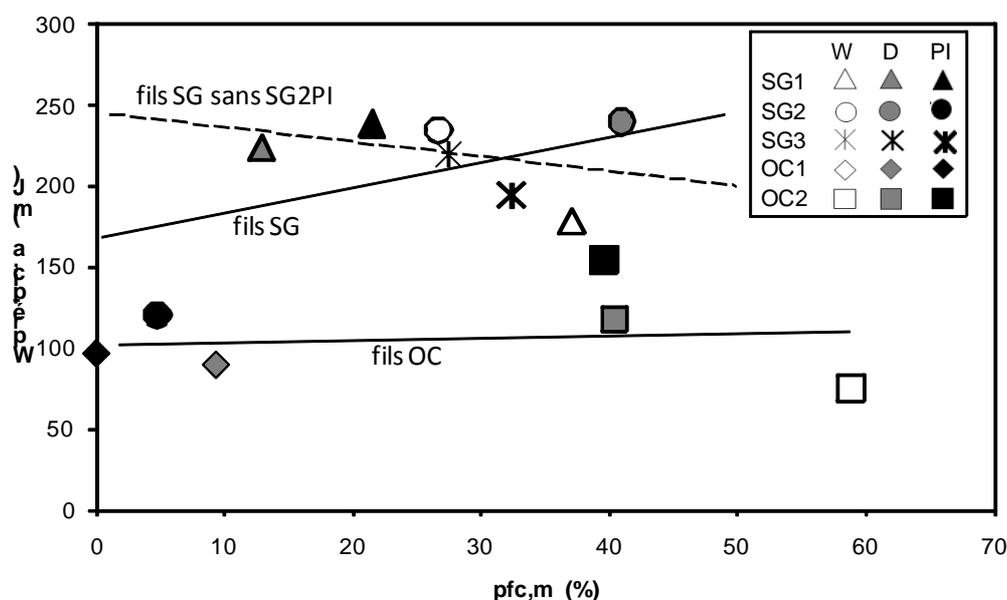


Figure 4.40. Travail pré-pic en fonction de la proportion de fil extrait.

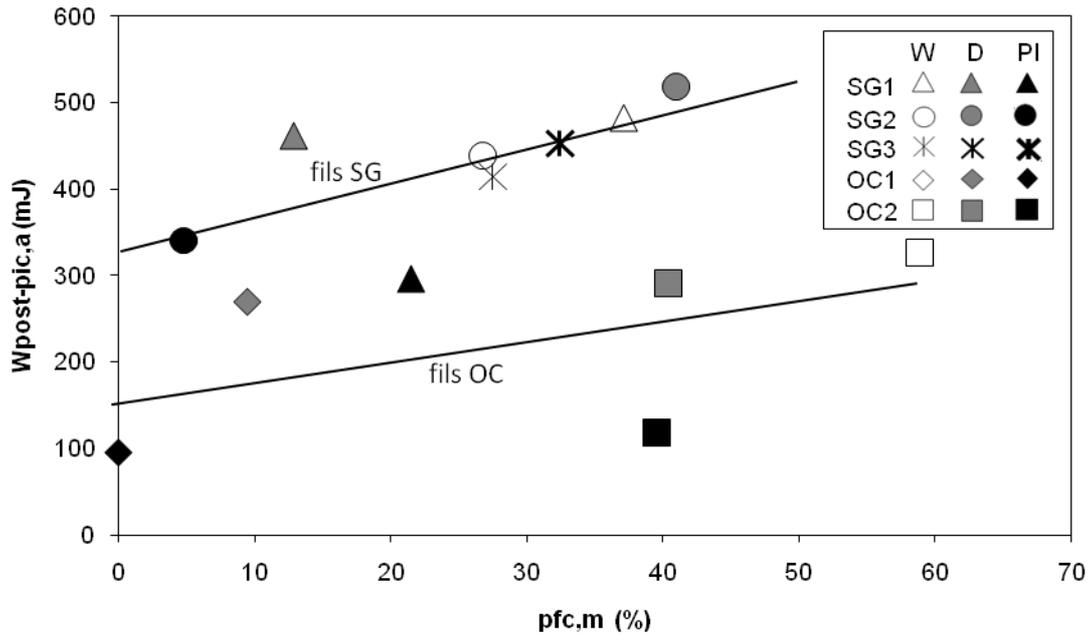


Figure 4.41. Travail post-pic en fonction de la proportion de fil extrait.

#### 4.8.5 Analyse

Différentes lectures sont utilisables pour tenter une approche globale des résultats présentés dans cette partie, et qui concernent le comportement intrinsèque à l'arrachement des fils multifilamentaires de verre. On peut examiner globalement ces résultats en comparant entre eux les types de prétraitements ou les types de fils. Chacune de ces lectures apportant un éclairage différent sur la problématique étudiée, nous nous proposons ci-dessous d'utiliser les deux approches pour résumer les résultats obtenus.

Concernant l'influence du prétraitement, les résultats obtenus, qu'ils concernent la phase pré-pic ou les phases post-pic et post-pic résiduelle du comportement, montrent que l'on doit distinguer le cas du prétraitement PI de celui des prétraitements W et D. En effet, le comportement mécanique des fils préparés avec le prétraitement PI présentent des niveaux de résistance ultime et de raideur plus élevés que ceux obtenus avec les autres prétraitements. Par ailleurs, on n'observe pas de phase post-pic résiduelle dans le cas de l'utilisation du prétraitement PI.

Les forts niveaux de résistance ultime à l'arrachement et de raideurs (pré-pic et post-pic) obtenus avec le prétraitement PI sont à relier à la pénétration importante de la matrice cimentaire entre les filaments, due à l'action mécanique exercée sur le fil lors de l'application du prétraitement. Ce phénomène se traduit par une maximisation du nombre de filaments ancrés, associé à des longueurs d'ancrage courtes des filaments, ce qui explique le comportement observé. A l'échelle du fil, les longueurs d'ancrage courtes des filaments induisent une longueur et une masse de fil extraites lors de l'arrachement qui restent faibles.

Par contre, à l'inverse de ce qui est observé pour les résistances et les raideurs, le prétraitement PI conduit à la diminution du travail total et du travail post-pic dissipé au cours de l'arrachement par rapport à ce qui est observé avec les prétraitements W et D. C'est le signe d'une fragilisation du matériau induite par le prétraitement PI et imputable à la forte réduction de la déformabilité du fait de longueurs d'ancrage des filaments très réduites.

En ce qui concerne les prétraitements W et D, ils apparaissent comme donnant des résultats similaires puisque les différences faibles constatées dans le comportement à l'arrachement ne permettent pas en toute rigueur de les distinguer, en tout cas si on se limite à une approche globale indépendante du fil utilisé. A l'inverse du prétraitement PI, ces deux prétraitements donnent les plus faibles niveaux de résistance et de raideurs et les valeurs les plus élevées du travail total et du travail post-pic. Par ailleurs, ces deux prétraitements conduisent à l'apparition d'une phase résiduelle qui se traduit, après une chute importante de l'effort dans la phase post-pic, par le maintien d'un effort résiduel significatif (de l'ordre de 10% de l'effort post-pic, parfois 20% comme dans le cas du fil SG2).

Ces résultats sont liés à l'augmentation des longueurs de filaments mis en jeu dans l'arrachement, qui se traduit par une longueur extraite et une masse de fil extraite augmentées par rapport aux essais réalisés avec le prétraitement PI. La conséquence en est une plus grande déformabilité lors de l'arrachement et se manifeste dans les résultats obtenus par un travail total et un travail post-pic augmenté par rapport aux niveaux obtenus avec le prétraitement PI.

L'augmentation du travail post-pic est également liée à l'apparition de la phase post-pic résiduelle, caractérisée par l'effort et la résistance résiduels. Ces deux paramètres caractérisent le niveau des frottements entre filaments et entre matrice et filaments lors de la phase finale d'extraction du fil. Ils semblent directement liés par une relation de proportionnalité à la quantité de filaments extraits lors de l'arrachement. Seul le fil OC2 semble ne pas respecter cette relation, ce qui met en évidence le rôle de l'organisation géométrique des filaments dans le fil (le fil OC2 est le seul fil constitué d'un assemblage direct de filaments, sans structures intermédiaires de type mèches comme dans les autres fils utilisés).

En complément aux deux groupes de prétraitements envisagés ci-dessus (prétraitement PI d'une part et prétraitements W et D d'autre part), dans un certain nombre de cas on observe une différenciation du comportement entre les fils SG et les fils OC. C'est le cas notamment de la résistance ultime à l'arrachement, du travail total, du travail pré-pic et du travail post-pic. Pour ces différents paramètres du comportement, les fils SG donnent globalement des valeurs plus élevées que celles obtenues avec les fils OC. Nous attribuons ces différences à des différences de nature dans l'ensimage des filaments, sans pouvoir en avoir la certitude absolue puisque la composition des ensimages n'est pas connue (c'est une donnée protégée par les fabricants de fils multifilamentaires). Cependant, les destinations d'usage des fils SG et OC étant similaires au sein de chaque famille, mais différentes d'une famille à l'autre, il est raisonnable de penser que les ensimages puissent avoir des propriétés proches au sein d'une famille mais éloignées d'une famille à l'autre, ce qui explique les différences de comportement entre fils SG et fils OC.

## 4.9 Conclusion

Ce chapitre a permis d'aborder le comportement mécanique à l'arrachement des cinq fils multifilamentaires de verre présentés au **chapitre 2** (fils SG1, SG2, SG3, OC1 et OC2). Ces fils, même s'ils sont relativement similaires, présentent des variations dans leur constitution (organisation géométrique des filaments, nombre et diamètre des filaments, ensimage). En complément, trois prétraitements des fils ont été utilisés (W, D et PI) pour moduler l'imprégnation des fils par la matrice cimentaire lors de la fabrication des éprouvettes de fil enrobé, ce qui permet au total d'obtenir quinze configurations fil / prétraitement pour les essais d'arrachement.

Les essais d'arrachement ont été réalisés de manière classique, par application d'un effort de traction directe à l'extrémité d'un fil dont l'autre extrémité était enrobée dans la matrice cimentaire. Différentes longueurs d'enrobage ont été utilisées, de 1 à 25 cm. En plus du comportement mécanique, la quantité de filaments extraite de la matrice a été caractérisée à l'issue des essais.

Les essais d'arrachement ont montré que, de manière générale, le comportement mécanique à l'arrachement, caractérisé par la relation entre l'effort de traction appliqué et le déplacement de l'extrémité libre du fil, présente trois phases successives :

- La phase pré-pic correspond à la mise en tension progressive des filaments ancrés du fil. Elle se caractérise par un raidissement initial, associé à l'activation progressive des filaments, qui précède une phase quasi-linéaire. L'effort ultime est atteint à l'issue de cette phase, alors qu'une petite partie des filaments a déjà atteint la rupture,
- La phase post-pic correspond à la chute progressive de l'effort résistant lorsque l'extraction du fil se poursuit. Dans cette phase, les filaments rompent successivement ce qui conduit à une chute d'effort progressive, conférant au matériau une certaine capacité de résistance post-pic.
- La phase post-pic résiduelle. Cette phase correspond à l'extraction de la matrice des filaments de cœur initialement non adhérents et des filaments périphériques rompus. Elle n'est observable qu'à la condition que les longueurs d'ancrage des filaments soient relativement importantes. Elle n'est pas observée dans le cas du prétraitement PI avec lequel les fils ne présentent pas cette caractéristique.

A partir des courbes de comportement obtenues, des grandeurs caractéristiques du comportement ont été déterminées pour chacune des phases du comportement. Il s'agit de la résistance et du déplacement à la rupture et de la raideur pré-pic pour la phase pré-pic, de la raideur post-pic pour la phase post-pic, de l'effort et de la raideur résiduels pour la phase post-pic résiduelle quand elle était observable. Ces grandeurs ont été complétées par la détermination du travail dissipé dans la phase pré-pic et du travail dissipé dans la phase post-pic (en toute rigueur dans l'ensemble des phases post-pic et post-pic résiduelle).

L'analyse des résultats obtenus montre que la longueur enrobée est un paramètre qui joue un rôle prépondérant sur le comportement obtenu, dans la mesure où cette longueur conditionne le partage entre filaments de cœur et filaments périphériques. Pour les petites longueurs enrobées, les filaments de cœur, non ancrés, sont prépondérants. Les performances mécaniques à l'arrachement sont alors réduites et une partie importante du fil est extraite complètement de la matrice à l'issue de l'essai. Lorsque la longueur enrobée augmente, le nombre de filaments périphériques augmente et la résistance à l'arrachement également. Ce phénomène est observable jusqu'à ce que la longueur enrobée atteigne une valeur seuil, que nous avons appelé longueur minimale d'enrobage, au-delà de laquelle les caractéristiques mécaniques se stabilisent et ne dépendent plus de la longueur enrobée. La longueur minimale d'enrobage peut s'assimiler à la longueur d'ancrage définie dans le cas des renforcements monolithiques, bien qu'elle n'en présente pas toutes les caractéristiques.

Une fois la longueur minimale d'enrobage déterminée pour chaque combinaison fil / prétraitement, les caractéristiques mécaniques de référence à l'arrachement des fils ont été

déterminées à partir du comportement moyen observé pour les longueurs enrobées supérieures ou égales à la longueur minimale d'enrobage. En prenant en compte le comportement en traction simple des fils, étudié spécifiquement (voir également **chapitre 2**), le comportement intrinsèque à l'arrachement des combinaisons fil / prétraitement a été déterminé, moyennant quelques hypothèses simplificatrices : phase pré-pic supposée élastique linéaire, phase post-pic supposé conditionnée exclusivement par l'arrachement au niveau de l'interface fil / matrice.

Les résultats obtenus permettent de caractériser le comportement mécanique intrinsèque à l'arrachement dans les différentes phases du comportement. L'analyse de ces résultats montre que parmi les trois prétraitements utilisés, les prétraitements W et D, même s'ils sont de nature différente, sont très proche en termes de conséquences sur le comportement mécanique. Le prétraitement PI, quant à lui, se distingue assez nettement des deux autres en termes de comportement mécanique. Il induit une augmentation de la résistance et des rigidités dans les phases pré- et post-pic et fait disparaître la phase post-pic résiduelle (il n'y a pas de filament de cœur et la longueur minimale d'ancrage du fil est très réduite). Par contre, ce prétraitement fragilise le comportement à l'arrachement puisqu'il réduit le travail dissipé au cours de l'essai d'arrachement, dans la phase pré-pic et dans la phase post-pic.

Les résultats obtenus permettent également d'aborder le lien entre le comportement mécanique et l'imprégnation du fil, en étudiant la relation entre le comportement mécanique et la quantité de filaments extrait de la matrice à l'issue de l'essai d'arrachement. Cette étude montre le lien direct qu'il y a entre les performances résiduelles et la quantité de filaments extraits, ce qui confirme le rôle des frottements filaments / filaments et filament / matrice dans cette phase.

Un lien a également été constaté entre la résistance ultime à l'arrachement et la quantité de filaments extraits. Il correspond au fait que le nombre de filaments extraits varie à l'inverse du nombre de filaments ancrés et de la longueur d'ancrage de ces filaments. Plus la quantité de filaments extraits est faible, plus le nombre de filaments ancrés est important et plus leur longueur est courte, ce qui favorise une activation simultanée des filaments et donc une résistance à l'arrachement importante.

Maintenant que les caractéristiques mécaniques à l'arrachement sont convenablement déterminées pour les différentes configurations fil / prétraitement utilisées, nous allons pouvoir étudier le lien entre ces propriétés et les paramètres caractéristiques de l'état d'imprégnation de l'interface fil / matrice, tels qu'ils ont été définis au **chapitre 3**. Cette étude fait l'objet du chapitre suivant.

## **Chapitre 5**

### **Relation entre microstructure de l'interface et comportement mécanique à l'arrachement**

## 5.1. Introduction

Les chapitres précédents ont présenté la méthodologie originale que nous avons mise en place pour étudier les liens qu'il y a entre l'imprégnation des fils multi-filamentaires par une matrice cimentaire, d'une part, et leur comportement mécanique à l'arrachement, d'autre part.

Cette méthodologie repose sur l'utilisation de 5 fils enrobés dans un même mortier et imprégnés plus ou moins complètement par la pâte de ciment de cette matrice cimentaire. Afin de faire varier, pour un fil donné, les conditions d'imprégnation du fil, chaque fil a été soumis à un prétraitement préalable au coulage du mortier. Trois prétraitements différents ont été utilisés, ce qui a permis in fine d'obtenir 15 couples fil / prétraitement différents.

Dans un premier temps, nous avons étudié séparément l'imprégnation et le comportement mécanique à l'arrachement de ces 15 couples fil / prétraitement. Le **chapitre 3** a présenté l'étude de la microstructure du fil imprégné, réalisée à partir de différents essais de caractérisation en partie développés spécifiquement pour cette recherche. Ces essais ont permis de définir des grandeurs physiques caractéristiques de l'imprégnation et d'en déterminer les valeurs pour les 15 situations étudiées. L'étude du comportement mécanique à l'arrachement a été présentée dans le **chapitre 4**. Cette étude a permis dans un premier temps de s'intéresser à la problématique de l'ancrage des fils multi-filamentaires imprégnés et a montré l'existence d'une longueur d'enrobage seuil, au-delà de laquelle les performances mécaniques à l'arrachement atteignent leurs valeurs maximales. Ensuite, le comportement intrinsèque à l'arrachement a été caractérisé pour les 15 couples fil / prétraitement, en considérant différents paramètres de comportement rendant compte du comportement pré-pic, du comportement post-pic, ainsi que du comportement résiduel correspondant à l'extraction des filaments rompus au cours de l'essai d'arrachement.

L'objet du présent chapitre est maintenant de rapprocher les résultats présentés aux **chapitres 3 et 4** pour comprendre les relations qu'il y a entre l'imprégnation du fil et le comportement mécanique à l'arrachement. Nous proposons dans la suite une analyse successive des trois phases définies pour le comportement à l'arrachement lors de l'étude de celui-ci. Cette analyse consiste d'abord à étudier, lorsque c'est pertinent, le lien qu'il y a entre chaque paramètre lié à l'imprégnation et chaque paramètre descriptif du comportement mécanique. Ces observations permettent ensuite une analyse plus globale susceptible d'expliquer l'influence de l'imprégnation sur le comportement d'arrachement.

Nous commencerons dans une première partie par étudier la relation entre les paramètres d'imprégnation du fil imprégné et le comportement à l'arrachement. Cette étude s'intéressera successivement au lien avec les propriétés d'écoulement le long du fil et au lien avec les paramètres descriptifs de la porosimétrie du fil. Elle distinguera les trois phases du comportement : la phase pré-pic, la phase post-pic et enfin la phase résiduelle, plus complexe à analyser du fait de la plus grande variabilité du comportement mécanique associée à cette phase du comportement d'arrachement. Une deuxième partie sera consacrée à l'étude des paramètres énergétiques. Elle apportera des éléments complémentaires concernant le lien entre l'imprégnation et le comportement à l'arrachement du fil.

Enfin, nous terminerons ce chapitre en nous intéressant au rôle de la capacité de rétention d'eau du fil sur le comportement mécanique. Ce paramètre n'est pas à proprement parler caractéristique de l'imprégnation du fil, même s'il y est lié. On verra au travers des résultats

obtenus qu'il n'en est pas moins un paramètre très pertinent pour comprendre le comportement à l'arrachement.

## 5.2. Principe de travail

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la relation entre l'imprégnation et le comportement mécanique à l'arrachement en rapprochant les paramètres d'imprégnation des paramètres de comportement.

Les paramètres d'imprégnation ont été présentés au **chapitre 3**. Il s'agit des volumes de pores différentielles  $\Delta V_{0,3-3}$ ,  $\Delta V_{3-30}$  et  $\Delta V_{0,3-30}$ , du débit surfacique d'écoulement le long du fil  $q_f$  et de l'index d'imprégnation  $i_Y$ . L'index d'imprégnation étant un paramètre qui garde une signification plutôt qualitative, nous ne le considérerons pas dans ce chapitre.

Les paramètres caractéristiques du comportement à l'arrachement sont ceux présentés au **chapitre 4**. En ce qui concerne le comportement pré-pic, il s'agit : du déplacement au pic de résistance  $\delta_{\max,a}$ , de la résistance à l'arrachement  $P_{\max,a}$  et de la rigidité pré-pic  $k_{\text{bond},a}$ . Le comportement post-pic est caractérisé par la rigidité post-pic  $k_{\text{debond},a}$ . Enfin, le comportement post-pic résiduel est caractérisé par la résistance résiduelle  $P_{\text{résiduel}}$  et par la rigidité résiduelle  $k_{\text{frictional},a}$ .

Dans la suite, nous rapprocherons deux à deux les paramètres d'imprégnation et les paramètres caractéristiques du comportement mécanique, en étudiant séparément le cas des trois phases du comportement (pré-pic, post-pic et phase résiduelle). A chaque fois, nous ne présenterons pas systématiquement la relation entre chacun des paramètres mécaniques correspondant et tous les paramètres caractérisant l'imprégnation. Seules les associations pertinentes seront présentées et discutées.

## 5.3. Etude des paramètres caractéristiques du comportement mécanique

### 5.3.1. Relation entre le débit d'écoulement et le comportement mécanique à l'arrachement

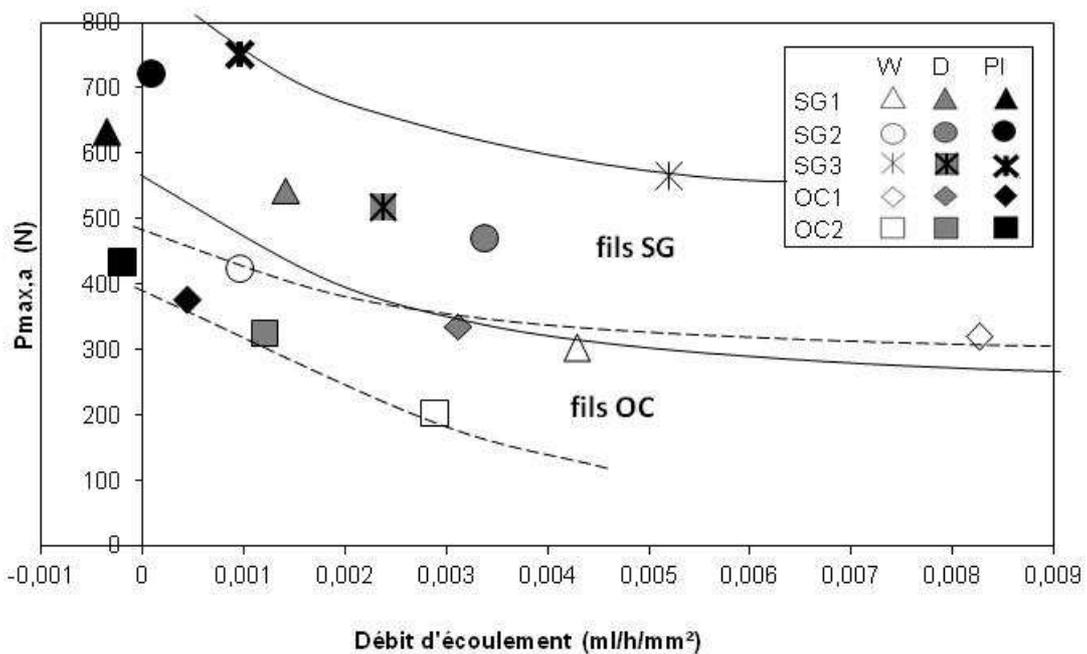
#### 5.3.1.1. Cas de la phase pré-pic du comportement à l'arrachement

La phase pré-pic du comportement à l'arrachement correspond à la mise en tension progressive des filaments constituant le fil jusqu'à atteindre un comportement charge / glissement quasi-linéaire caractérisé par la raideur pré-pic  $k_{\text{bond},a}$ . L'augmentation de la charge d'arrachement conduit alors à la rupture progressive des filaments et/ou des jonctions filaments / matrice cimentaire, ce qui a pour conséquence une réduction progressive de la raideur jusqu'à atteindre la résistance à l'arrachement  $P_{\max,a}$  qui marque la fin de la phase pré-pic.

La **figure 5.1** présente la relation entre la résistance à l'arrachement  $P_{\max,a}$  et le débit surfacique d'écoulement  $q_f$ . Le **chapitre 3** a montré que la pénétration de la matrice dans le fil réduit le débit d'écoulement surfacique. On sait par ailleurs qu'elle augmente le nombre de filaments ancrés. En conséquence, un accroissement du débit surfacique est associé à une réduction de la résistance à l'arrachement, ce que l'on constate effectivement **figure 5.1**. On constate que cette tendance est observée pour tous les types de fils, avec un taux de réduction qui semble

indépendant du type de fil, même si le niveau de résistance peut varier fortement d'un fil à l'autre. En particulier, les fils OC présentent des niveaux de résistance à l'arrachement réduit par rapport aux fils SG, quel que soit le débit d'écoulement mesuré le long du fil. Cela est particulièrement visible si on raisonne sur l'efficacité d'arrachement ( $e(P_{max,a})$  ; voir **figure 5.2**). Cela peut s'expliquer par la nature de l'ensimage utilisé pour ces deux types de fils. En effet, les fils SG sont produits pour un usage dans les bétons et leur ensimage a pour fonction de favoriser l'adhérence filament / mortier, ce qui n'est pas le cas de l'ensimage des fils OC, destinés à un usage comme renfort de matrices polymères et dont l'ensimage peut être moins compatible avec une matrice cimentaire que celui des fils SG.

Comme pour la résistance à l'arrachement, on observe une diminution de la raideur pré-pic lorsque le débit d'écoulement surfacique augmente (**figure 5.3**). Dans le cas de ce paramètre, la nature du fil, et en particulier son ensimage, apparaît comme peu influente et on constate que toutes les mesures se situent dans un même fuseau, à l'exception des fils SG2 et SG3 dont les valeurs de la raideur pré-pic deviennent très importantes lorsque le débit d'écoulement se rapproche de zéro. Cependant, ce résultat est une conséquence du mode de détermination de la raideur pré-pic (voir **paragraphe 4.7.2.1**, expression (4.5)), qui conduit à une divergence lorsque la raideur mesurée (due à la combinaison de l'arrachement et de la traction dans le fil) avoisine la raideur du fil en traction, ce qui est le cas des fils SG2 et SG3.



**Figure 5.1.** Relation entre la résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$  et débit surfacique d'écoulement  $q_f$  (traits pleins ou pointillés : enveloppe).

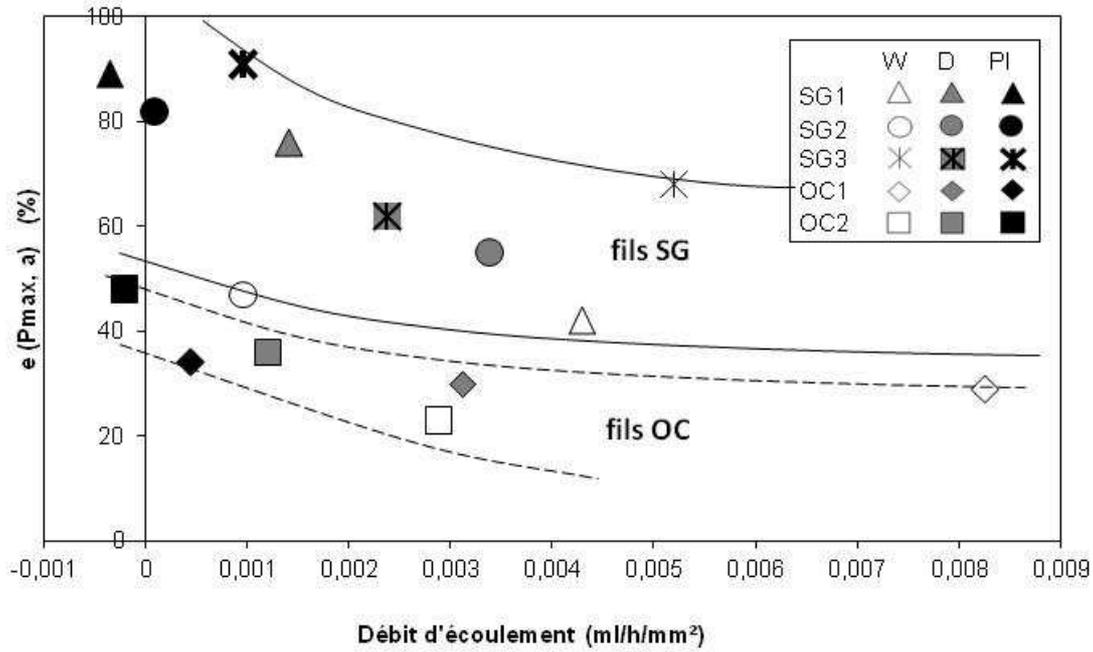


Figure 5.2. Relation entre  $e(P_{max,a})$  et débit surfacique d'écoulement  $q_f$  (traits pleins ou pointillés : enveloppe).

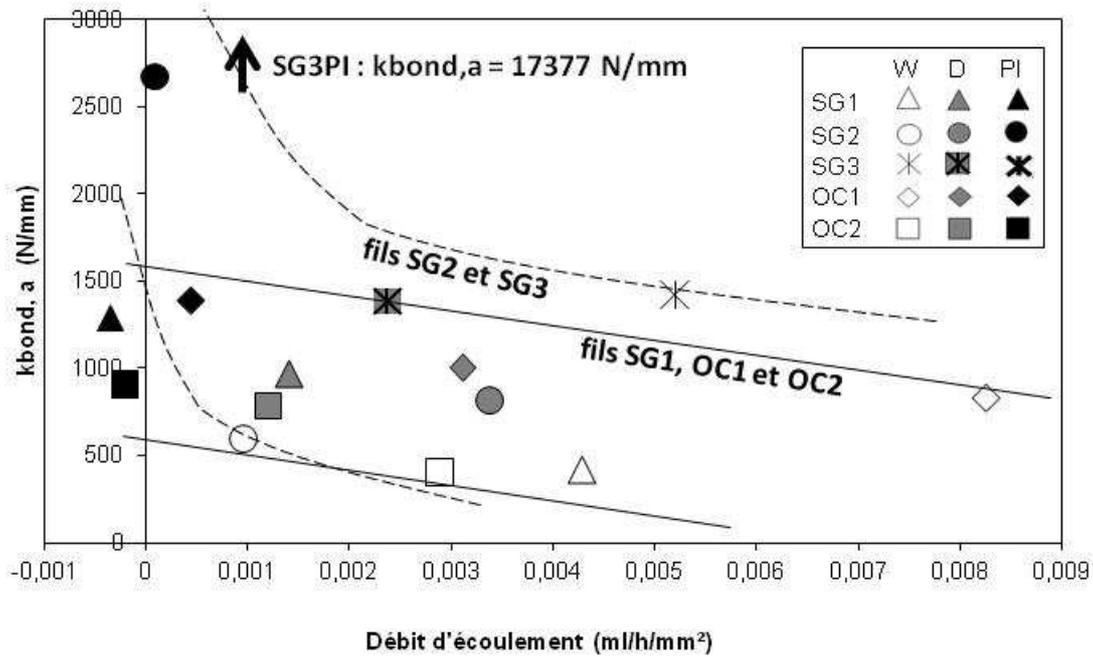


Figure 5.3. Relation entre la raideur pré-pic et le débit surfacique d'écoulement  $q_f$  (traits pleins ou pointillés : enveloppe).

### 5.3.1.2. Cas de la phase post-pic du comportement à l'arrachement

La phase post-pic du comportement à l'arrachement correspond à la rupture progressive de l'ensemble des filaments après atteinte de l'effort maximum d'arrachement. La rupture progressive des filaments se manifeste à l'échelle macroscopique par une diminution progressive de l'effort d'arrachement lorsque le déplacement d'arrachement continue d'augmenter. Cette diminution est caractérisée par la raideur post-pic  $k_{debond,a}$ .

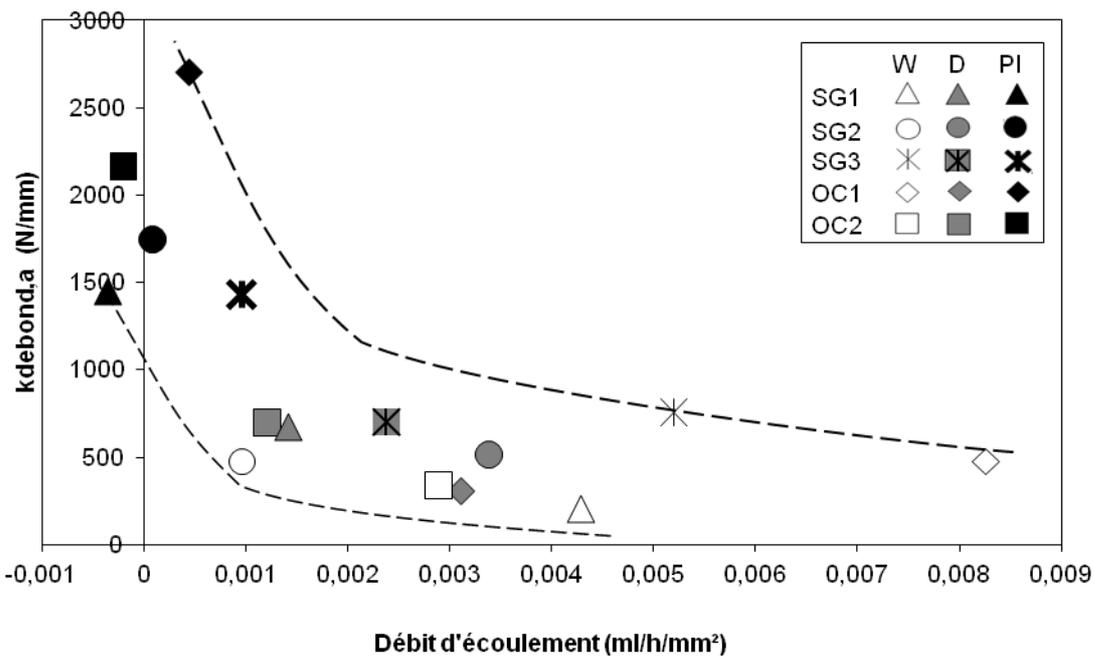


Figure 5.4. Relation entre la raideur post-pic et le débit surfacique d'écoulement  $q_f$ . (traits pointillés : enveloppe).

La figure 5.4 donne la raideur post-pic  $k_{debond,a}$  en fonction du débit d'écoulement surfacique. La variation de la raideur post-pic avec le débit d'écoulement est similaire à celle observée pour la raideur pré-pic  $k_{bond,a}$  (figure 5.3), mais avec une variation amplifiée, en particulier pour les faibles valeurs du débit d'écoulement surfacique.

Quel que soit le type de fil, les valeurs de  $k_{debond,a}$  sont faibles pour les prétraitements W et D, alors que dans le cas du prétraitement PI, le type de fil devient significativement influent.

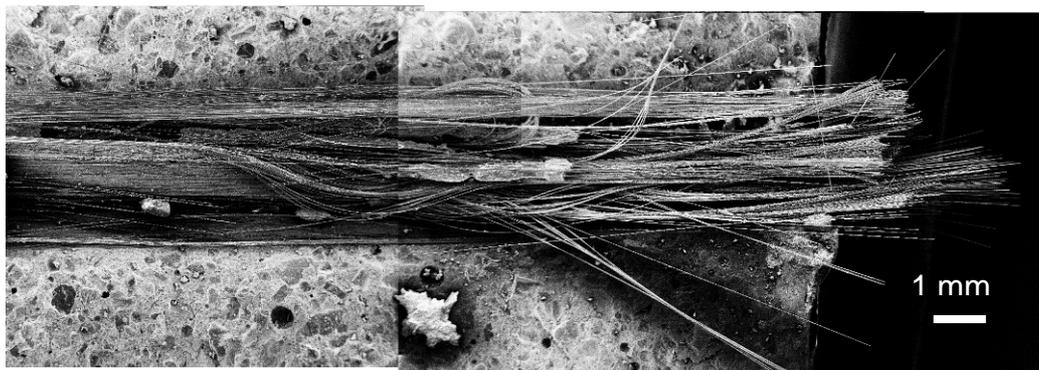
### 5.3.1.3. Cas de la phase résiduelle du comportement à l'arrachement

La phase résiduelle du comportement à l'arrachement correspond à la phase d'extraction de la matrice des filaments rompus dans les phases précédentes ou des filaments non ancrés (voir figure 5.5). Dans cette phase, les frottements filaments / filaments ou filaments / matrice génèrent un effort résiduel qui diminue progressivement avec l'extraction des filaments. Cette phase n'est observée que dans le cas des prétraitements W et D. Elle est caractérisée par deux paramètres comportementaux : l'effort d'arrachement  $P_{résiduel}$  correspondant à la transition entre la phase post-pic et la phase résiduelle et la raideur résiduelle  $k_{frictional,a}$  qui caractérise le taux de chute de l'effort résiduel avec l'extraction du fil.

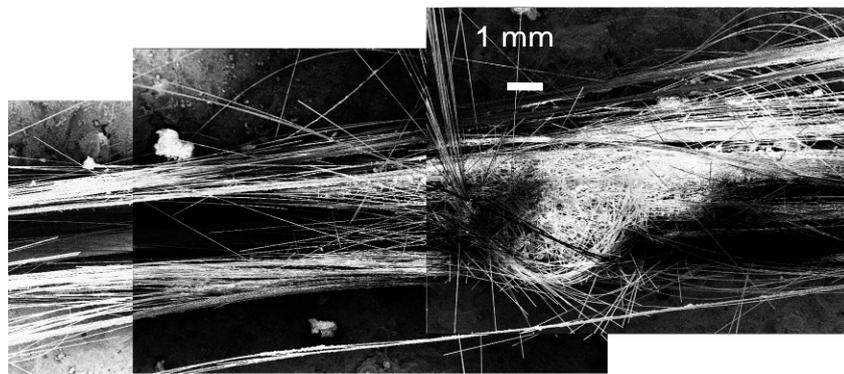
Le comportement observé au cours de la phase résiduelle dépend de la séquence des ruptures dans les phases précédentes. Cette séquence est spécifique à chaque fil testé et peut comporter des phénomènes spécifiques locaux comme la formation de boucles (figure 5.6) ou l'entraînement d'agglomérats de pâte de ciment et de filaments (figure 5.7). Le comportement à l'arrachement observé lors de la phase résiduelle est ainsi fortement variable d'une éprouvette à l'autre, même pour un type de fil et de prétraitement donné. Cela conduit à des coefficients de variation important pour les mesures de  $P_{résiduel}$  et  $k_{frictional,a}$ . En conséquence, il faut considérer avec prudence les résultats énoncés ici.



**Figure 5.5.** Fil OC1W après essai d'arrachement – glissement des filaments non ancrés au cours de la phase résiduelle (les filaments sont extraits vers la gauche).



**Figure 5.6.** Fil SG2W après essai d'arrachement – entrainement de filaments générant la formation d'une boucle (les filaments sont extraits vers la gauche).



**Figure 5.7.** Fil OC1D après essai d'arrachement – agglomérat de filaments (les filaments sont extraits vers la gauche).

Les **figures 5.8** et **5.9** donnent respectivement l'évolution de  $P_{résiduel}$  et  $k_{frictional,a}$  en fonction du débit d'écoulement surfacique le long du fil. Dans les deux cas, on ne constate aucune tendance générale particulière et l'évolution des paramètres mécaniques avec le débit est très dépendante du fil considéré. Ce constat semble corroborer les affirmations du paragraphe précédent et mettent en évidence la caractère très aléatoire du comportement résiduel.

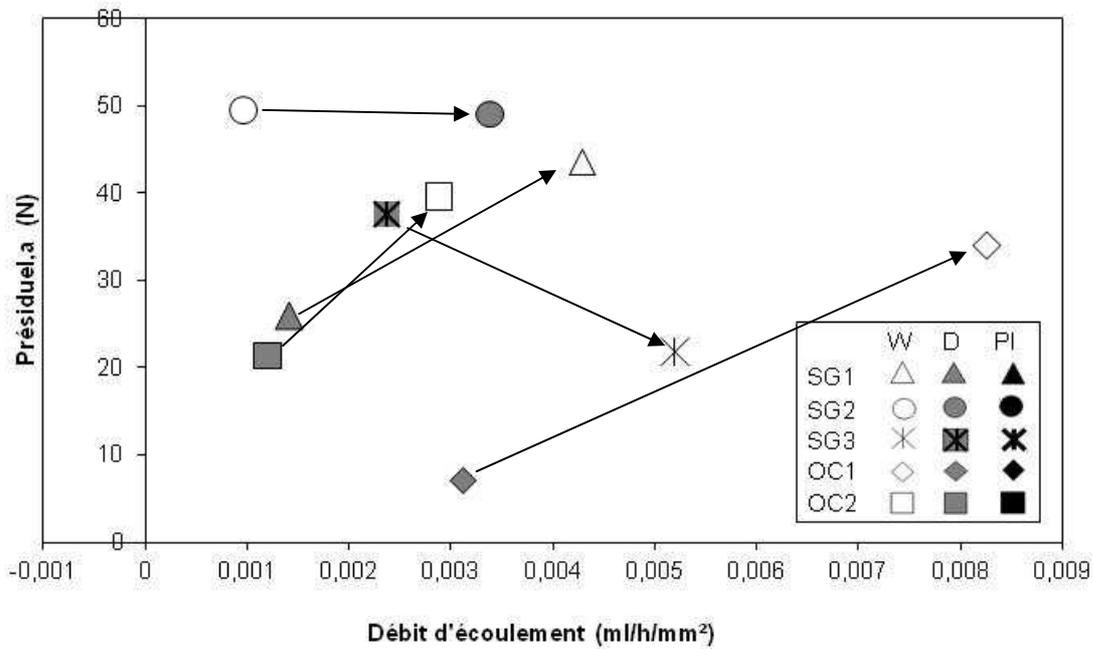


Figure 5.8. Relation entre l'effort  $P_{residuel,a}$  et le débit surfacique d'écoulement  $q_f$ .

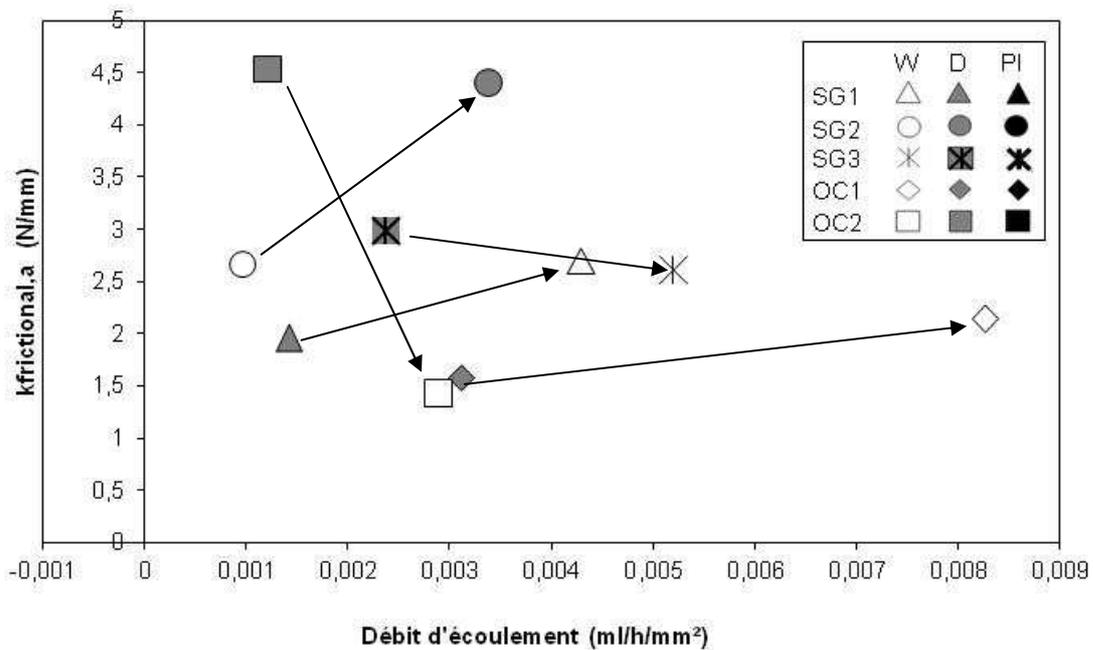


Figure 5.9. Relation entre la raideur résiduelle  $k_{frictional,a}$  et le débit surfacique d'écoulement  $q_f$ .

### 5.3.2. Relation entre les paramètres porosimétriques et le comportement mécanique à l'arrachement

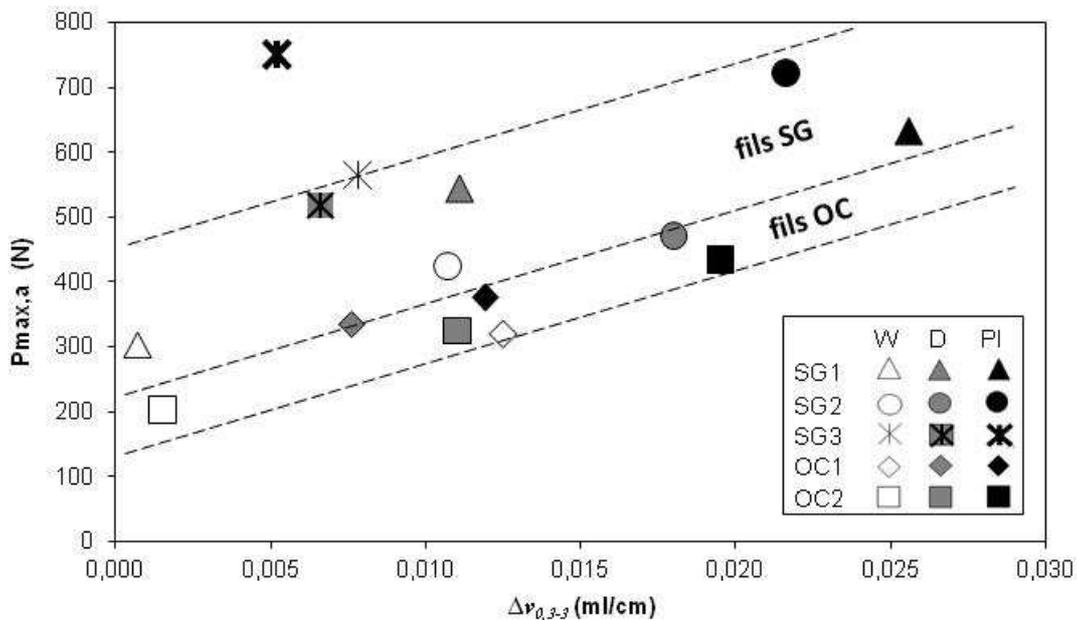
#### 5.3.2.1. Paramètres porosimétriques pertinents

Le chapitre 3 a détaillé les paramètres porosimétriques mis en place pour caractériser la porosité interne des fils imprégnés. Ces paramètres sont les trois volumes différentiels de pores

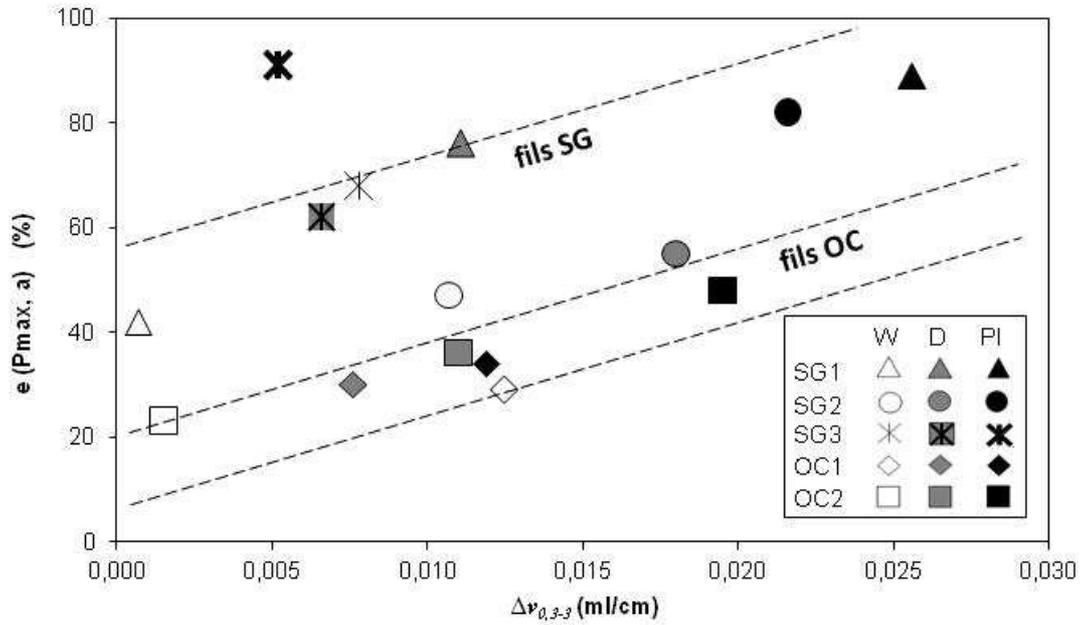
$\Delta V_{0,3-3}$ ,  $\Delta V_{3-30}$  et  $\Delta V_{0,3-30}$ . Ils correspondent au volume des pores accessibles du fil, dans les gammes de diamètre de pores suivantes : 0,3 à 3  $\mu\text{m}$ , 3 à 30  $\mu\text{m}$  et 0,3 à 30  $\mu\text{m}$ . Nous avons montré (**paragraphe 3.3.4.3**) que le volume différentiel de pore  $\Delta V_{0,3-3}$  variait significativement avec le type de fil et le prétraitement, alors que le volume différentiel de pore  $\Delta V_{3-30}$  ne varie pas significativement avec le prétraitement. Par ailleurs, comme le volume différentiel de pore  $\Delta V_{0,3-30}$  est le cumul des deux autres, et que  $\Delta V_{3-30}$  est relativement faible comparé à  $\Delta V_{0,3-3}$ , le volume différentiel de pore le plus pertinent pour faire le lien avec les propriétés mécaniques est le volume poreux  $\Delta V_{0,3-3}$ . Dans la suite, nous nous intéressons donc exclusivement, sauf rares exceptions, à ce volume poreux pour étudier le lien qu'il y a entre imprégnation et comportement à l'arrachement.

### 5.3.2.2. Cas de la phase pré-pic du comportement à l'arrachement

Le comportement pré-pic est caractérisé par la résistance à l'arrachement et la raideur pré-pic. Pour ce qui concerne la résistance à l'arrachement, les **figures 5.10** et **5.11** donnent respectivement la résistance à l'arrachement et l'efficacité à l'arrachement en fonction du volume différentiel de pore  $\Delta V_{0,3-3}$ , pour l'ensemble des configurations testées. Ces deux paramètres sont approximativement des fonctions linéaires croissantes du volume différentiel de pore. Seul le fil SG3 se distingue des autres, avec notamment le cas du prétraitement PI qui sort de la tendance générale observée pour l'ensemble des autres fils. Cela pourrait être une conséquence de la meilleure capacité de ce fil à être imprégné par la matrice cimentaire (le **tableau 3.1** montre que les valeurs de l'indice d'imprégnation sont assez nettement plus élevées pour SG3 que pour les autres fils, quel que soit la nature du prétraitement appliqué au fil). Comme les propriétés géométriques des fils SG2 et SG3 sont très proches (voir **tableau 2.1**), la seule explication envisageable est le rôle spécifique de l'ensimage qui changerait les propriétés d'imprégnation de ce fil par rapport aux autres.

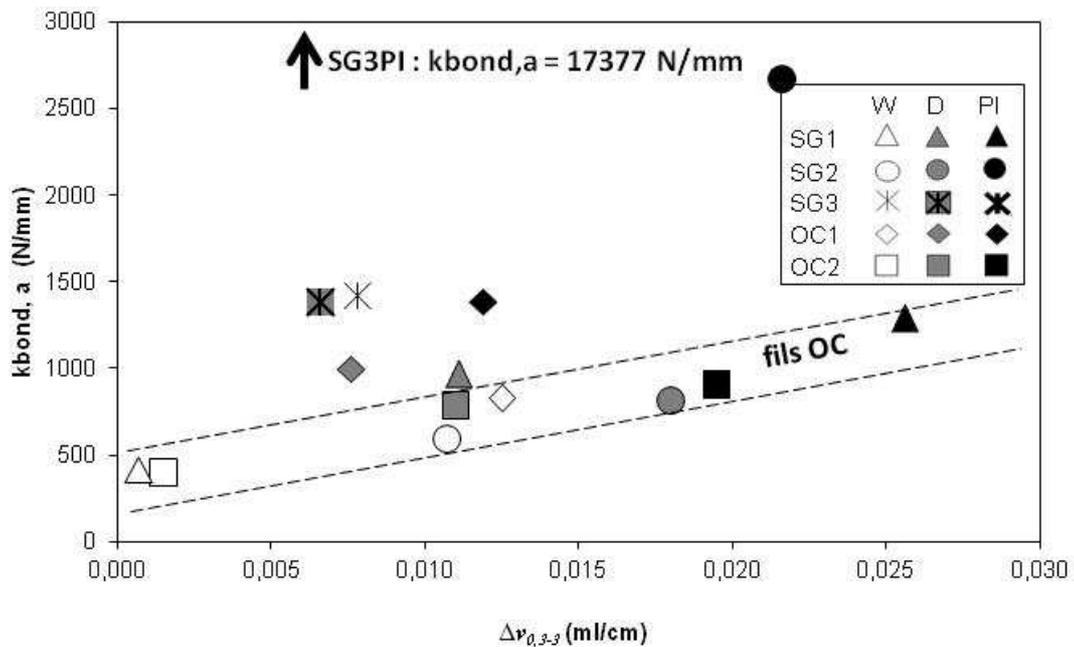


**Figure 5.10.** Relation entre la résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta V_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).



**Figure 5.11.** Relation entre l'efficacité d'arrachement  $e(P_{max,a})$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).

Le deuxième paramètre caractérisant la phase pré-pic du comportement à l'arrachement est la raideur pré-pic  $k_{bond,a}$ . La **figure 5.12** donne la variation de ce paramètre avec le volume différentiel. On constate que, comme pour la résistance à l'arrachement, la raideur pré-pic est fonction croissante du volume différentiel de pore. En ce qui concerne les fils OC, la relation est linéaire. Pour les fils SG, la surestimation probable de la raideur pré-pic dans le cas de SG2PI et surtout SG3PI ne permet pas de conclure avec autant de certitude sur la linéarité de la relation, mais globalement les valeurs obtenues pour ces fils sont un peu plus élevées que celles obtenues pour les fils OC.



**Figure 5.12.** Relation entre la raideur pré-pic  $k_{bond,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).

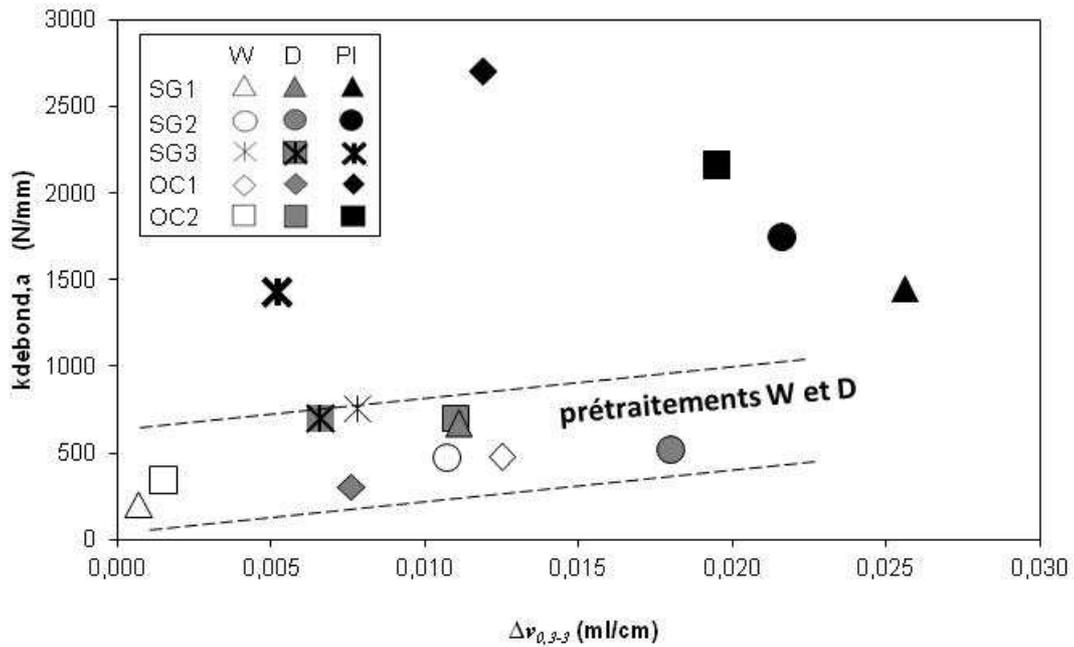


Figure 5.13. Relation entre la raideur post-pic  $k_{debond,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).

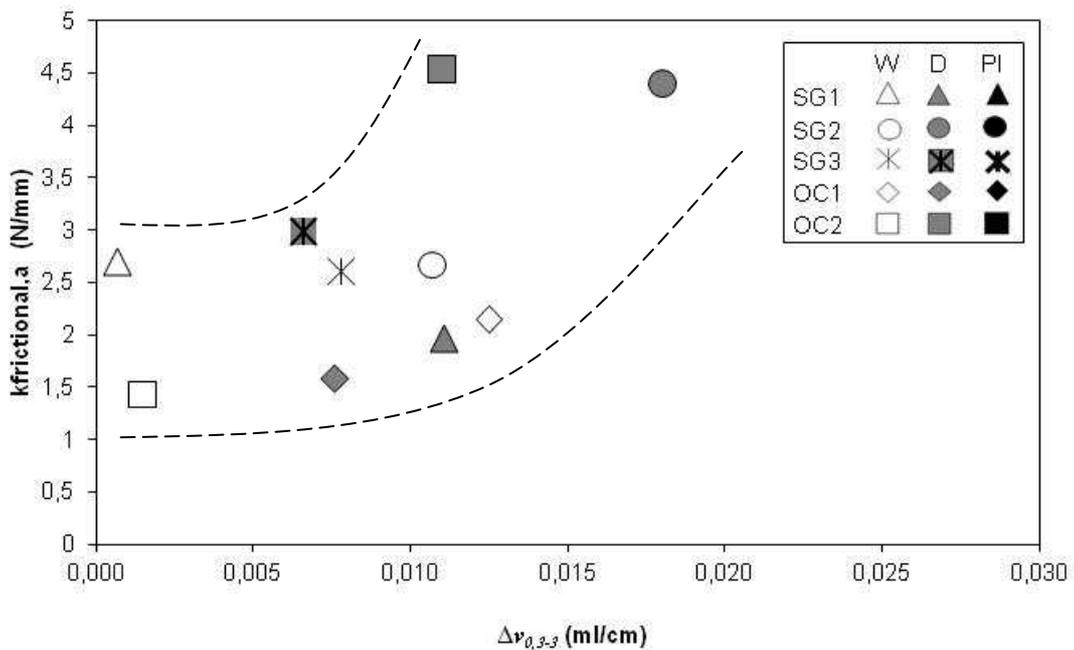


Figure 5.14. Relation entre la raideur résiduelle  $k_{frictional,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pointillés : enveloppe).

### 5.3.2.3. Cas de la phase post-pic du comportement à l'arrachement

La figure 5.13 donne les valeurs de la raideur post-pic  $k_{debond,a}$ , représentative du comportement post-pic, en fonction du volume différentiel de pore. Comme la raideur pré-pic, la raideur post-pic augmente quand le volume différentiel de pore augmente, mais le taux d'accroissement est dans ce cas réduit par rapport à ce qu'il est pour la raideur pré-pic. Dans ce cas, la tendance

générale correspondant à un accroissement linéaire de la raideur avec le volume différentiel de pore n'est observée que pour les prétraitements W et D et les fils ayant subi le prétraitement PI présentent des raideurs plus importantes que celles obtenues avec les autres prétraitements.

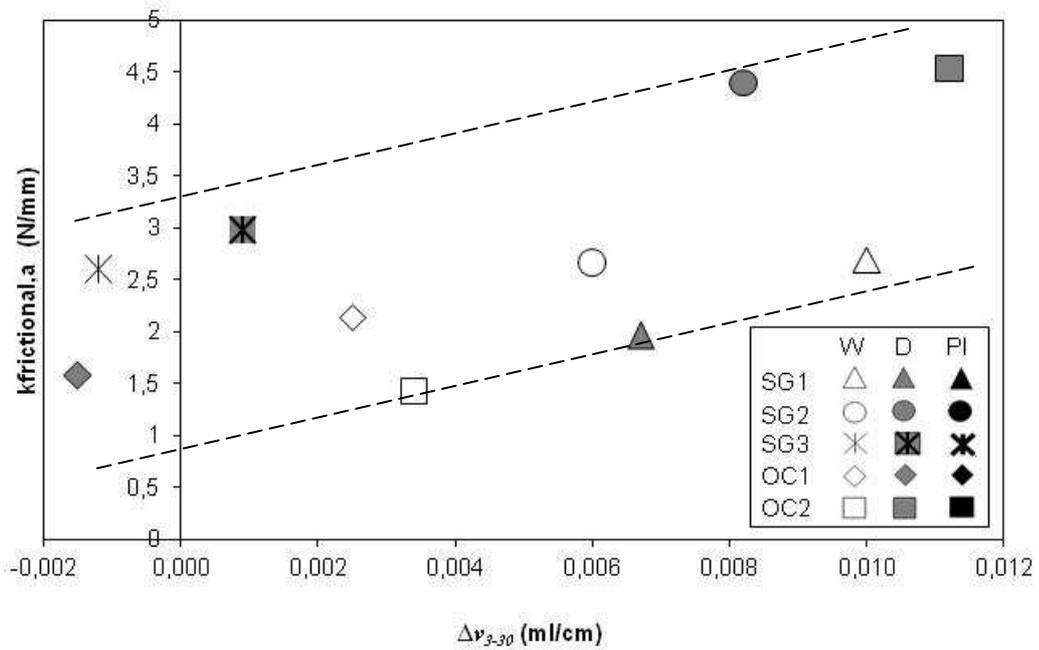


Figure 5.15. Relation entre la raideur résiduelle  $k_{frictional,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{3-30}$ . (traits pointillés : enveloppe).

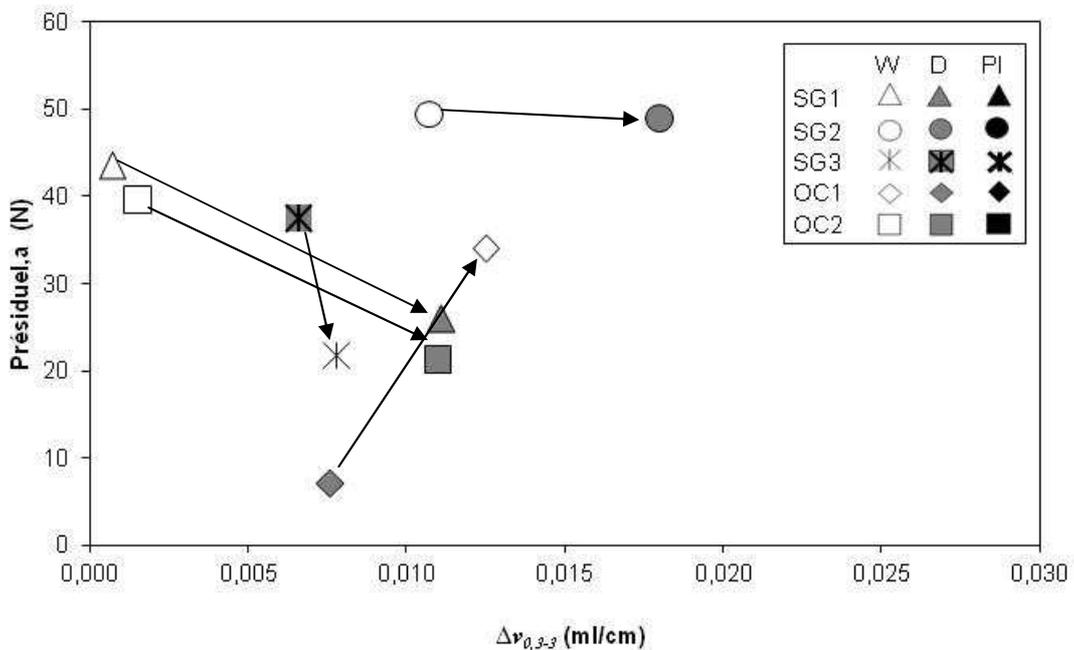


Figure 5.16. Relation entre l'effort  $P_{residuel,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0.3-3}$ .

#### 5.3.2.4. Cas de la phase résiduelle du comportement à l'arrachement

Cette phase du comportement, par son caractère plus aléatoire, ne permet pas de réaliser les mesures avec la même précision que pour les phases antérieures. En conséquence, les observations réalisées doivent être considérées avec prudence, et les conclusions que nous tirons devront donner lieu à des vérifications complémentaires pour pouvoir être considérées comme des certitudes.

La **figure 5.14** montre que la raideur résiduelle  $k_{frictional,a}$  a tendance à augmenter lorsque le volume différentiel de pore  $\Delta V_{0,3-3}$  augmente. Ce même constat est fait pour la variation de la raideur résiduelle avec le volume différentiel de pore  $\Delta V_{3-30}$  (**figure 5.15**). Il semble donc que, contrairement au débit d'écoulement qui ne semble pas lié à ce paramètre de comportement (voir **section 5.3.3**), le volume différentiel de pore est lié à la phase résiduelle du comportement à l'arrachement.

Par contre, en ce qui concerne la variation de l'effort  $P_{résiduel}$  avec le volume résiduel de pore (**figure 5.16**), aucune tendance globale n'est visible. Les variations observées sont très dépendantes du type de fil.

### 5.3.3. Discussion

Les deux sections précédentes ont montré que, dans certaines conditions, les paramètres liés à l'état d'imprégnation du fil par la matrice cimentaire étaient directement reliés aux propriétés mécaniques à l'arrachement. Les relations mises en évidence entre le comportement mécanique et les propriétés physiques de l'imprégnation montrent parfois un manque de précision, qui se manifeste par un coefficient de variation qui peut être important (c'est en particulier le cas pour la phase résiduelle du comportement à l'arrachement). Cependant, dans la majorité des situations étudiées, une tendance générale se dégage.

Concernant les mesures du débit d'écoulement le long du fil, les résultats présentés suggèrent que ce paramètre peut être utilisé pour faire une évaluation globale de la pénétration de la pâte de ciment dans le fil. Plus la pâte de ciment pénètre en profondeur dans le fil, plus le débit d'écoulement est réduit. En conséquence, une diminution du débit d'écoulement doit être associée à une augmentation de la résistance à l'arrachement et des raideurs pré- et post-pic (l'augmentation de la pénétration du mortier dans le fil induit une augmentation du nombre de filaments ancrés, ce qui augmente la résistance pour un déplacement d'extraction donné). Ces tendances sont effectivement mesurées (voir **figures 5.1, 5.3 et 5.4**).

Le débit d'écoulement semble également lié à l'alignement des filaments constituant le fil, et en particulier à l'alignement des filaments non enrobés par la matrice cimentaire. Un fil constitué de filaments parallèles peu imprégnés (cas de la majorité des fils utilisés avec le prétraitement W, car les forces capillaires liées à la présence d'eau dans le fil tendent à resserrer les filaments tout en limitant la pénétration de particules cimentaires) conduira à des débits d'écoulement élevés. Ce type de structure filamentaire doit aussi induire une augmentation de la longueur d'ancrage des filaments (donc une augmentation de la longueur mise en tension par l'arrachement). Cela conduira à une baisse de rigidité, en particulier dans le cas de la phase post-pic du comportement (des filaments alignés et peu imprégnés doivent également réduire le frottement appliqué sur les filaments rompus). Les **figures 5.3 et 5.4** donnent des tendances qui sont cohérentes avec ces mécanismes, en particulier, la diminution de la rigidité post-pic avec

l'augmentation du débit d'écoulement est nettement plus élevée que la diminution de la rigidité pré-pic dans les mêmes conditions.

Concernant le volume différentiel des pores, l'analyse faite dans la **section 5.4** montre que ce paramètre peut correspondre à une mesure quantitative de la pénétration de la pâte de ciment dans le fil. Le même mécanisme que celui décrit précédemment doit conduire la résistance à l'arrachement et les rigidités pré- et post-pic à augmenter lorsque le volume différentiel des pores augmente (ce qui correspond à une augmentation de la pénétration de la matrice cimentaire dans le fil). C'est ce que nous observons **figures 5.10, 5.12 et 5.13**.

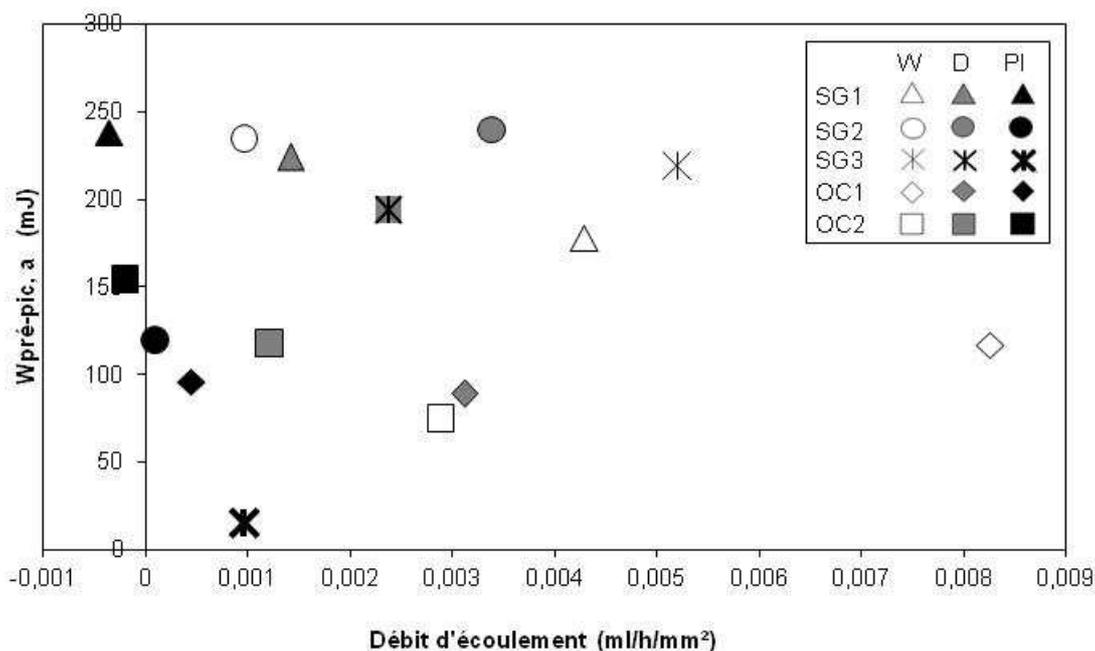


Figure 5.17. Relation entre  $W_{pré-pic,a}$  et débit surfacique d'écoulement  $q_f$ .

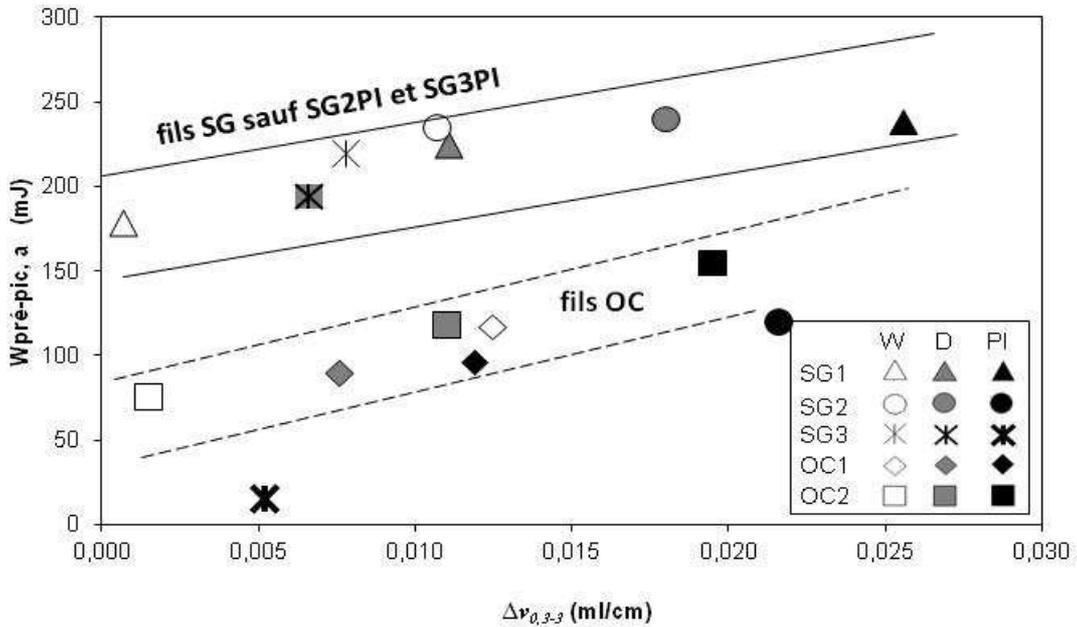
Le volume différentiel de pore donne aussi une indication sur la désorganisation de la structure du fil (voir **section 3.3.4.3**). En effet, l'augmentation du volume différentiel de pore correspond à l'augmentation des vides dans le fil multifilamentaire, du fait de l'écartement des filaments induit par les actions mécaniques appliquées au fil lors du prétraitement ou du coulage du mortier. La désorganisation du fil doit également impacter l'alignement des filaments et augmenter le nombre de contacts entre eux. La présence de pâte de ciment doit par ailleurs également augmenter le nombre de contacts, puisque les particules de ciment peuvent interagir entre les filaments en jouant le rôle d'un troisième corps. Le nombre de contacts plus important doit conduire à plus de frottement lorsque les filaments glissent, au cours de la phase résiduelle ou au cours de la phase post-pic. C'est ce phénomène qui peut expliquer les tendances constatées **figures 5.14 et 5.15**.

## 5.4. Etude des aspects énergétiques

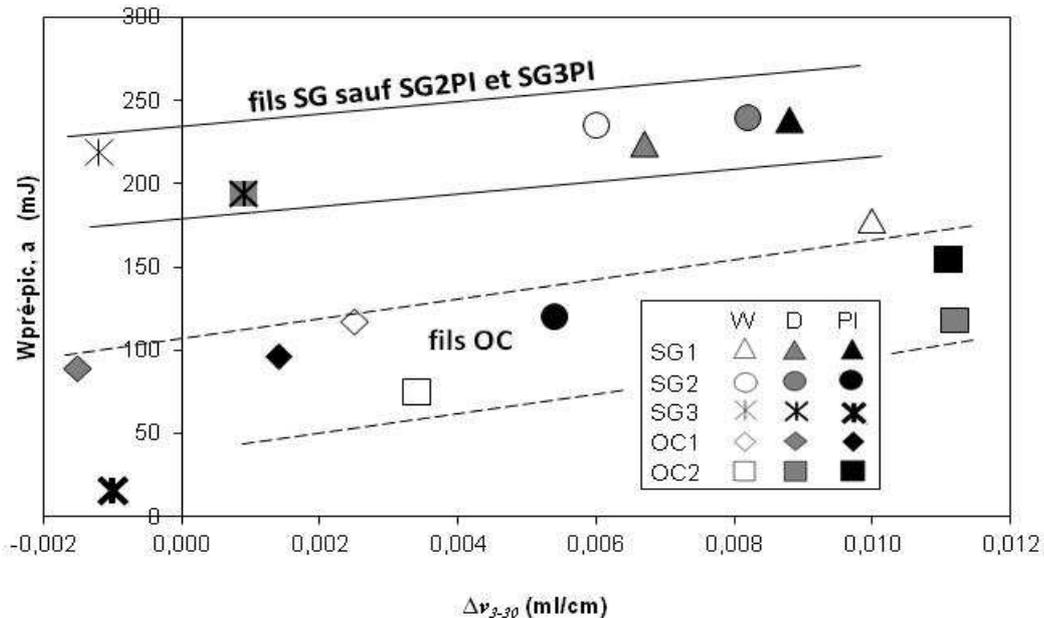
### 5.4.1. Cas de la phase pré-pic

En complément aux paramètres descriptifs du comportement à l'arrachement des fils, nous avons également examiné la relation des grandeurs énergétiques liées à l'arrachement avec les paramètres caractéristiques de l'état d'imprégnation du fil.

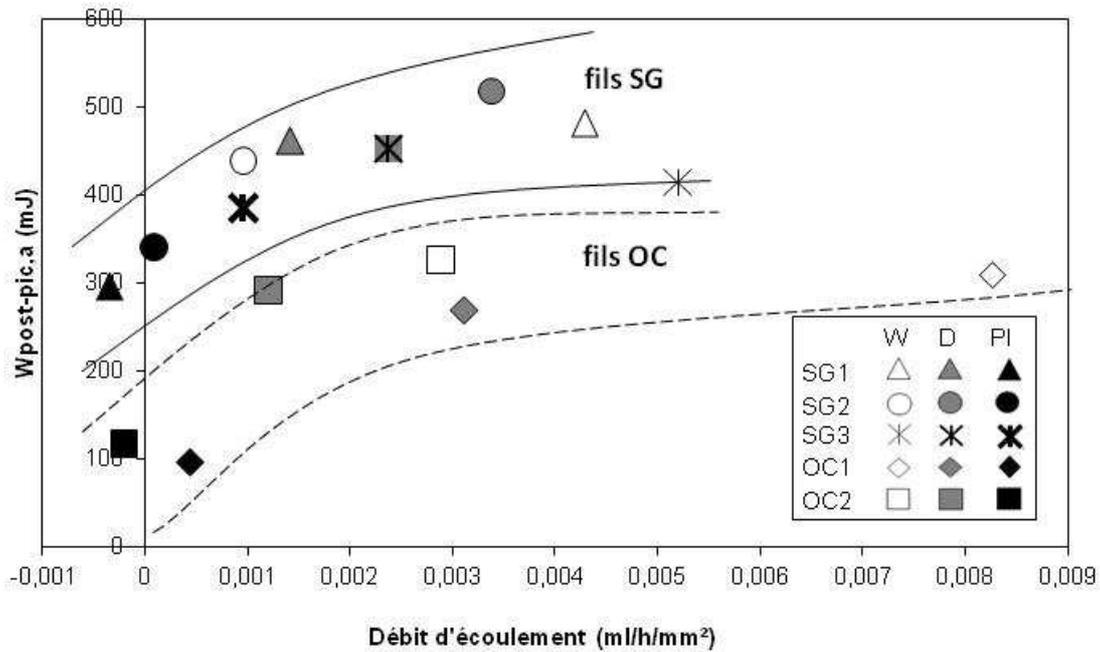
En ce qui concerne le comportement pré-pic, si on ne peut pas conclure quand à une tendance globale concernant le lien du travail dissipé dans la phase pré-pic  $W_{pré-pic,a}$  avec le débit d'écoulement (voir **figure 5.17**), l'étude de la variation du travail dissipé dans la phase pré-pic avec les volumes différentiels des pores  $\Delta v_{0,3-3}$  et  $\Delta v_{3-30}$  (**figures 5.18 et 5.19**) montre que le travail dissipé est une fonction linéaire croissante des volumes différentiels de pores. Par ailleurs, on constate que, à l'exception des points associés aux configurations SG2 et SG3, l'ensemble des points correspondants aux fils SG évoluent dans le même fuseau linéaire croissant. La sous évaluation du travail dissipé dans les configurations SG2 et SG3 s'explique par le mode de détermination de cette grandeur (voir **section 4.8.3**), c'est pourquoi nous ne considérons pas ces points comme significatif.



**Figure 5.18.** Relation entre  $W_{pré-pic,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).



**Figure 5.19.** Relation entre  $W_{pré-pic,a}$  et le volume différentiel des pores  $\Delta v_{3-30}$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).



**Figure 5.20.** Relation entre  $W_{post-pic,a}$  et débit surfacique d'écoulement  $q_f$  (traits pleins ou pointillés : enveloppe).

En ce qui concerne les points associés aux fils OC, la tendance est la même, avec une pente probablement un peu plus forte. Le niveau du travail pré-pic dissipé dans ce cas reste inférieur à celui dissipé dans le cas des fils SG.

Ces tendances sont tout à fait similaires à celles obtenues pour la variation de la résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$  en fonction des volume différentiels de pores et il semble donc raisonnable de penser que c'est la variation de l'énergie élastique stockée lors de l'allongement des filaments, associée à la dissipation de cette énergie lors de la rupture des filaments les plus tendus, qui explique la variation du travail pré-pic.

#### 5.4.2. Cas des phases post-pic et post-pic résiduelle

Du point de vue énergétique, nous n'avons pas distingué la phase post-pic, qui correspond à la chute de résistance à l'arrachement associé à la rupture de l'ensemble des filaments ancrés (ou à la rupture de la liaison des filaments ancrés), de la phase post-pic résiduelle, qui correspond à la phase d'extraction des filaments rompus. Le travail post-pic  $W_{post-pic,a}$  est ainsi la somme des travaux dissipés dans ces deux phases.

La **figure 5.20** donne l'évolution de  $W_{post-pic,a}$  en fonction du débit d'écoulement le long du fil. On constate que les fils SG et les fils OC s'organisent selon deux fuseaux distincts de nature similaire, les fils SG donnant systématiquement, pour un débit d'écoulement donné, un travail dissipé plus important.

Les résultats obtenus montrent que le travail dissipé augmente de manière non linéaire lorsque le débit d'écoulement augmente. L'augmentation est plus marquée pour les faibles débits d'écoulement, alors que dans le cas des débits d'écoulement les plus élevés le travail dissipé dans la phase post-pic de l'arrachement semble devenir indépendant du débit d'écoulement.

Les faibles débits d'écoulement sont le signe d'une imprégnation plus complète du fil par la matrice cimentaire (voir **section 3.5.1**). Dans ce cas, les résultats présentés au **paragraphe 4.8.2.2** ont montré que la raideur post-pic était très importante comparée à celle des fils moins imprégnés. Cela signifie que, lorsque l'imprégnation du fil est complète ou quasi-complète, ce qui est généralement le cas avec le prétraitement PI, la chute de résistance post-pic est très importante (le comportement se rapproche d'un comportement fragile). Dans ce cas, l'effort d'arrachement résiduel devient rapidement très faible et, même si le déplacement d'arrachement nécessaire pour arracher l'ensemble du fil est important, le travail dissipé associé reste faible. Ce phénomène explique le taux d'accroissement du travail dissipé dans la phase post-pic plus fort pour les faibles débits d'écoulement.

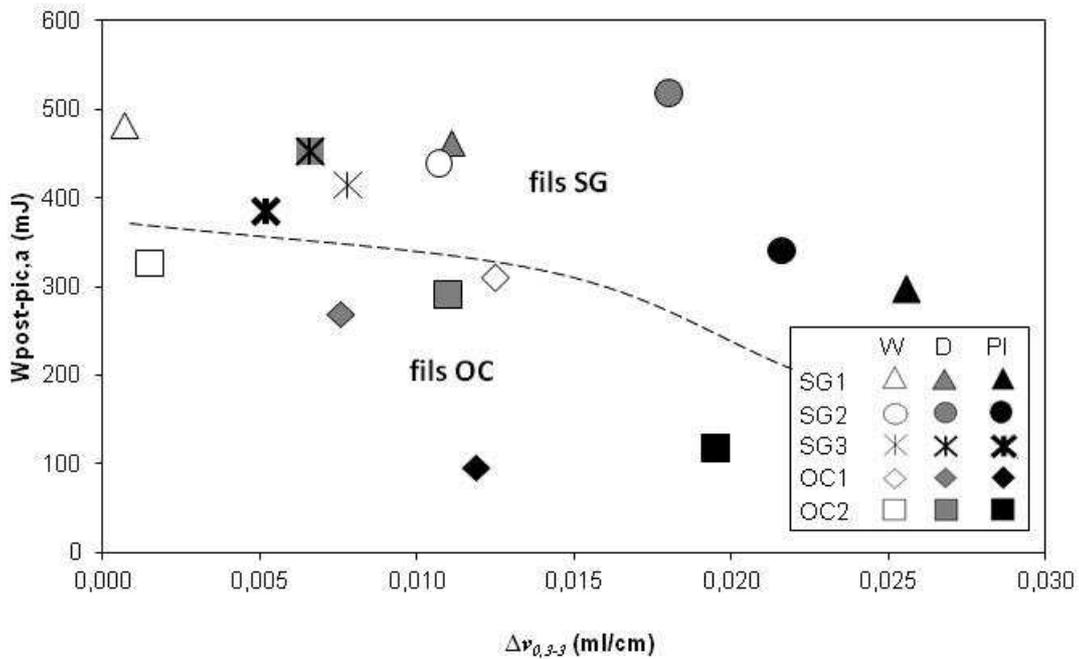


Figure 5.21. Relation entre  $W_{post-pic,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$  (trait pointillé : courbe moyenne).

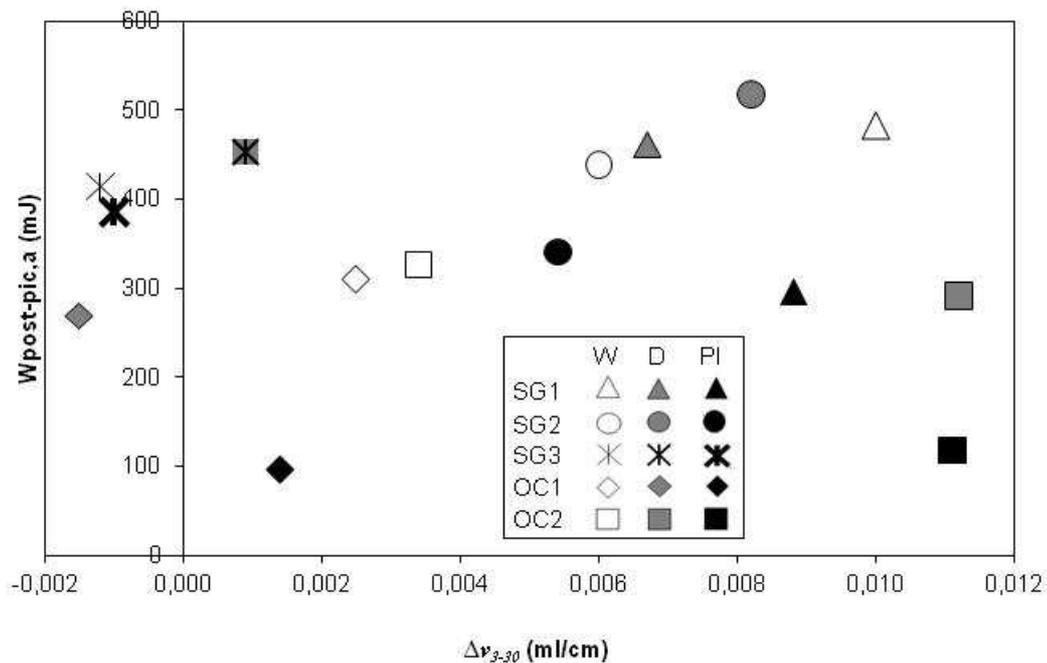


Figure 5.22. Relation entre  $W_{post-pic,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{3-30}$ .

La différence entre les deux familles de fils (SG et OC) peut quant à elle s'expliquer par la quantité de filaments sollicités lors de l'arrachement. Les fils OC, qui présentent une moins grande efficacité que les fils SG (voir **figure 5.11**) conduisent à avoir moins de filaments sollicités, donc un travail dissipé pour rompre l'ensemble de ces filaments moins important que dans le cas des fils SG. La nature de l'ensimage de ces deux familles de fil peut par ailleurs également jouer un rôle.

En ce qui concerne l'influence du volume différentiel de pores, seul la gamme de pores de 0,3 à 3  $\mu\text{m}$  de diamètre semble avoir une influence sur le travail dissipé dans la phase post-pic (voir **figures 5.21** et **5.22**). La tendance constatée (diminution du travail dissipé au-delà d'un volume différentiel de pores seuil – approximativement 0,015 ml/cm) s'explique de la même manière que dans le cas de l'influence du débit d'écoulement : les forts volumes différentiels sont associés à une imprégnation forte (prétraitement PI) et correspondent donc à un comportement à l'arrachement plus fragile. Dans le cas du volume différentiel de pores correspondant aux pores de diamètre 3 à 30  $\mu\text{m}$ , on ne constate pas de relation particulière avec le travail dissipé.

### 5.4.3. Analyse globale

Sous le vocable analyse global, nous nous intéressons aux deux paramètres suivants :

- Travail total  $W_{total,a}$  dissipé lors de l'effet d'arrachement. Ce paramètre est lié à la résilience du béton renforcé de fils multi-filamentaires, c'est-à-dire à sa capacité à absorber de l'énergie lorsqu'il est soumis à un chargement mécanique.
- Rapport du travail dissipé dans la phase post-pic au travail total dissipé au cours de l'essai d'arrachement :  $W_{post-pic,a} / W_{total,a}$ . Ce paramètre mesure la part de l'énergie dissipée après atteinte de la rupture de la liaison fil / matrice. C'est donc un paramètre en lien direct avec la ductilité du matériau

Les **figures 5.23** et **5.24** donnent respectivement l'évolution de ces deux paramètres en fonction du débit d'écoulement le long du fil. Concernant l'évolution de  $W_{total,a}$  avec le débit d'écoulement, on retrouve la tendance mise en évidence dans le cas de travail dissipé post-pic (**figure 5.20**), ce qui est normal dans la mesure où la majorité du travail dissipé correspond au travail dissipé dans la phase post-pic. Cela signifie donc que, dans le cas des fils parfaitement imprégnés, le comportement plus fragile du lien fil / matrice cimentaire conduit à une dissipation d'énergie moindre. Un fil partiellement imprégné, en permettant des déplacements d'arrachement plus grand permettra une dissipation énergétique plus importante et donnera in fine un matériau plus résilient.

Par ailleurs, un fil partiellement imprégné, en favorisant le frottement des filaments entre eux lors de l'arrachement, notamment dans la phase post-pic, conduira à une augmentation de l'énergie dissipée dans la phase post-pic, donc à une augmentation de ductilité. C'est effectivement ce que nous observons dans la **figure 5.24**, qui montre que la part de travail dissipé après avoir atteint la résistance à l'arrachement peut atteindre 80% de l'énergie dissipée totale si le fil est peu imprégné (débit d'écoulement important), alors que cette part n'est plus que d'environ 50% si le fil est complètement imprégné.

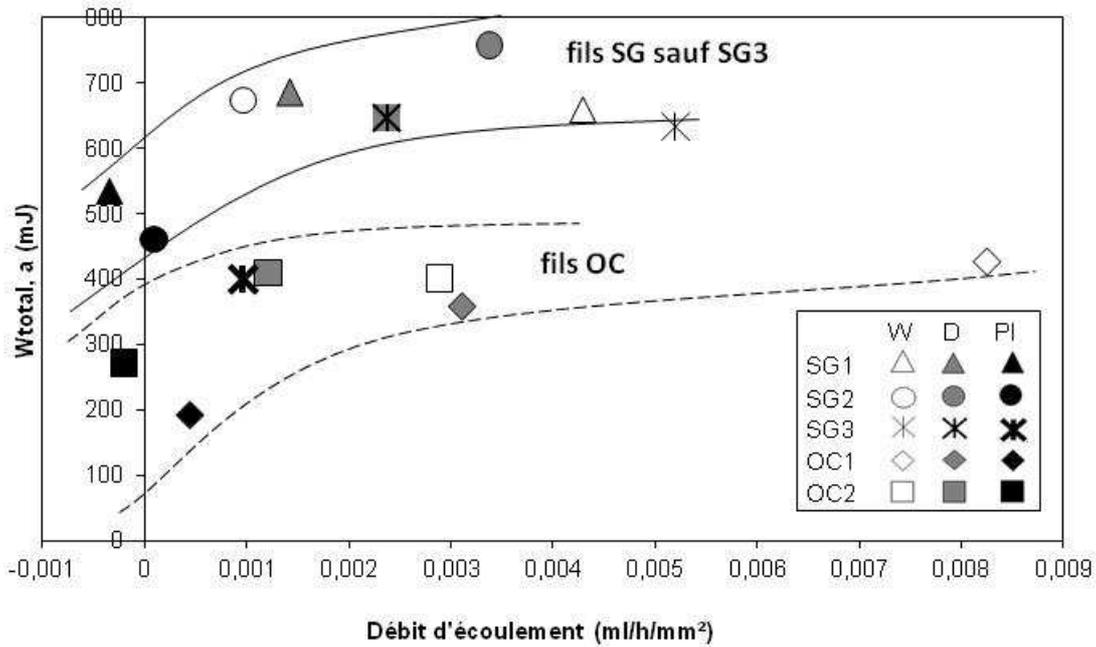


Figure 5.23. Relation entre  $W_{total,a}$  et débit surfacique d'écoulement  $q_f$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).

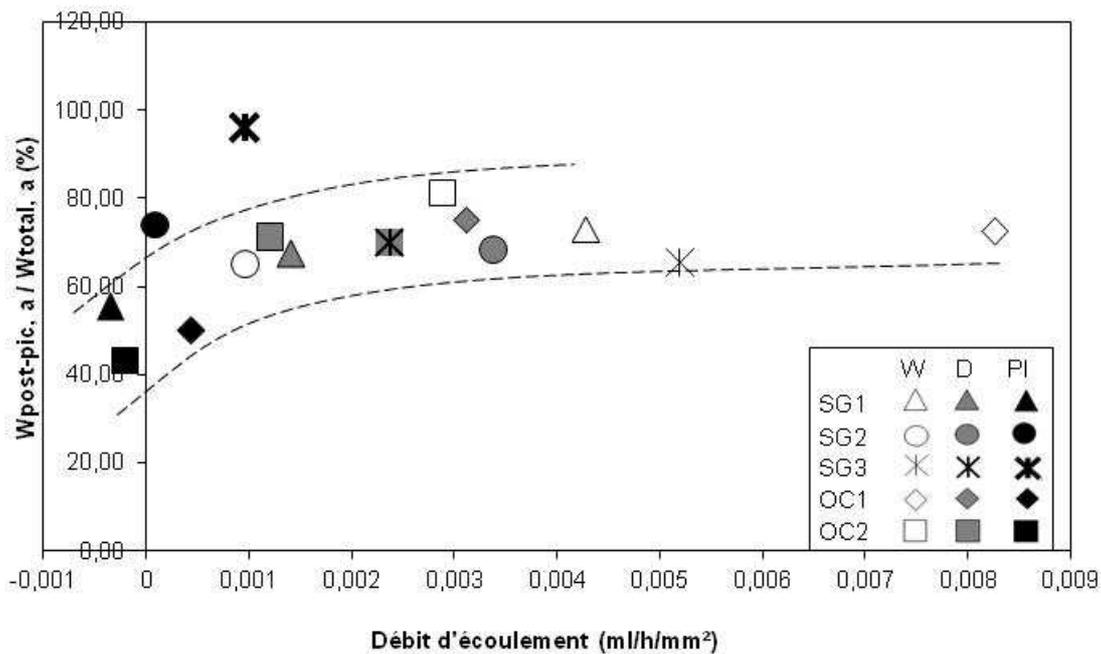


Figure 5.24. Part de  $W_{post-pic,a}$  dans l'énergie dissipée totale en fonction du débit surfacique d'écoulement  $q_f$ . (traits pointillés : enveloppe).

Si le débit d'écoulement montre un lien important avec la ténacité et la ductilité, il n'en est pas de même avec les paramètres porosimétriques. Ceux-ci semblent peu pertinents pour expliquer l'évolution du travail dissipé total à l'image de ce que l'on observe pour la relation entre travail dissipé total et volume différentiel des pores dans la gamme de diamètre compris entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$  (figure 5.25).

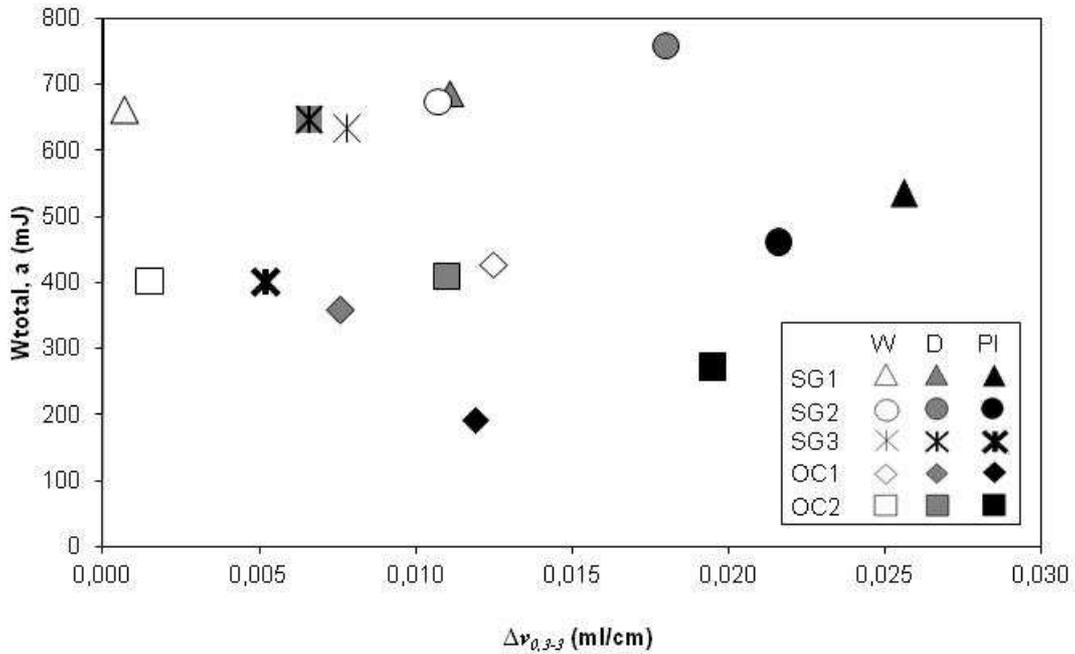


Figure 5.25. Relation entre  $W_{total,a}$  et le volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ .

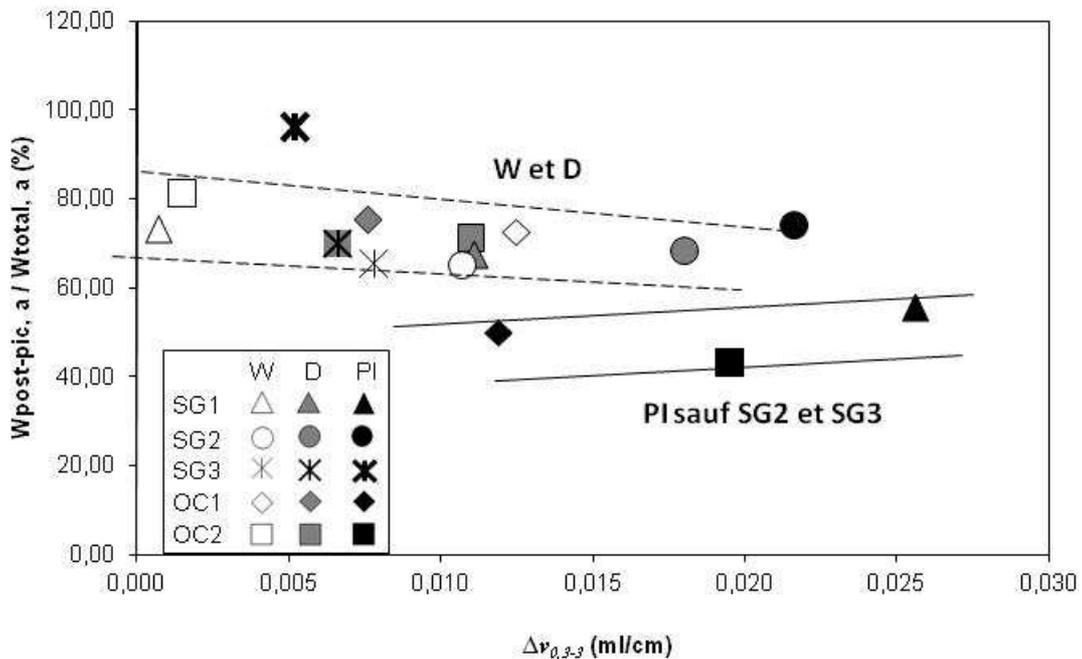
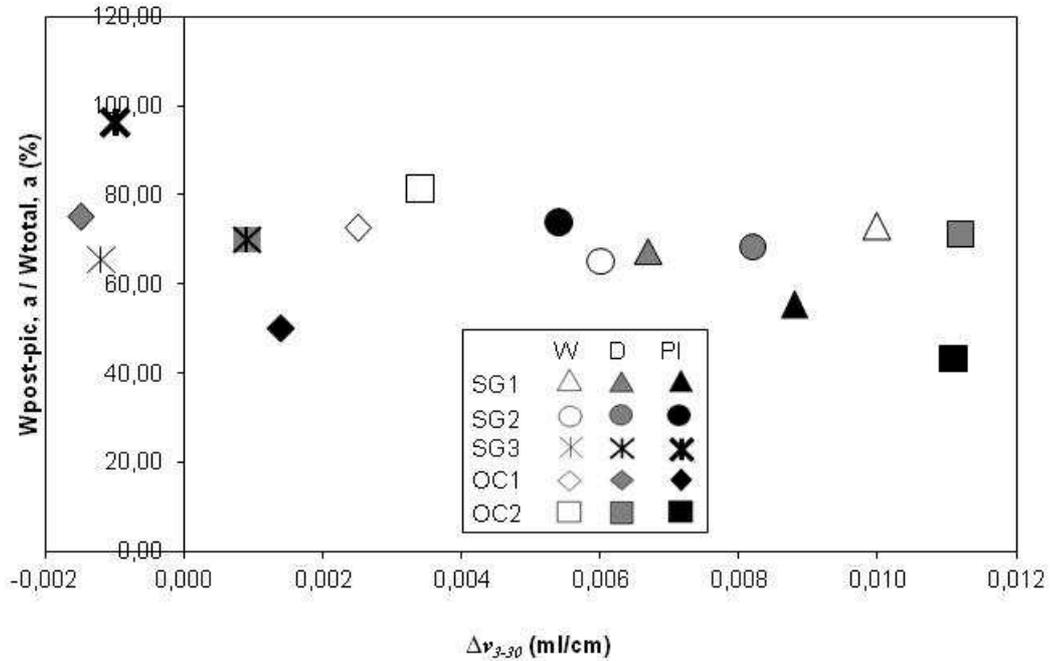


Figure 5.26. Part de  $W_{post-pic,a}$  dans l'énergie dissipée totale en fonction du volume différentiel de pores  $\Delta v_{0,3-3}$ . (traits pleins ou pointillés : enveloppe).

En ce qui concerne la part du travail post-pic dans le travail total, seul le volume différentiel de pores de diamètre compris entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$  semble avoir une légère influence puisque, dans le cas des prétraitements W et D, la part de travail dissipé dans la phase post-pic diminue légèrement lorsque le volume différentiel de pores augmente. On rappelle qu'un volume différentiel de pores qui augmente est le signe, dans le contexte de notre étude, d'une imprégnation plus importante du fil, donc d'un comportement un peu plus fragile. C'est ce phénomène qui explique la tendance constatée dans la **figure 5.26**.

Les vides du fil de tailles plus élevées (diamètre moyen compris entre 3 et 30  $\mu\text{m}$ ) n'ont pas plus d'influence sur le travail dissipé par le fil au cours de l'essai d'arrachement. On constate même (**figure 5.27**) que la part d'énergie dissipée dans les phases post-pic et post-pic résiduelle semble indépendante du volume différentiel de pores.



**Figure 5.27.** Part de  $W_{post-pic,a}$  dans l'énergie dissipée totale en fonction du volume différentiel de pores  $\Delta v_{3-30}$ .

## 5.5. Influence de l'aptitude au mouillage du fil

### 5.5.1. Problématique

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés à l'influence sur le comportement mécanique des paramètres caractérisant l'imprégnation du fil par la matrice cimentaire. L'imprégnation du fil est conditionnée par la manière dont l'eau et les particules de ciment qu'elle contient vont pénétrer le réseau de filaments constituant le fil. L'un des paramètres physiques majeurs dans ce process est la mouillabilité des filaments, liée entre autre aux forces de contact liquide / solide au niveau de la surface des filaments, ainsi qu'aux forces de tension de surface dans la porosité définie géométriquement par les filaments.

Afin de compléter l'étude du lien entre les paramètres caractéristiques de l'imprégnation du fil et ceux décrivant le comportement mécanique du fil à l'arrachement, nous avons étudié l'influence sur le comportement mécanique d'un paramètre lié à la mouillabilité du fil. Pour cela, nous avons retenu comme caractéristique de ce phénomène la capacité de rétention d'eau du fil, caractérisé par la mesure de la quantité d'eau que le fil est capable de retenir lorsqu'il est immergé puis sortie de l'eau.

La détermination de cette grandeur a été présentée au **chapitre 2**. Plus précisément, nous avons retenu comme caractéristique de la mouillabilité la teneur en eau mesurée suivant le 1<sup>er</sup> mode opératoire présenté **section 2.4.2**. Ce mode opératoire, en immergeant le fil et en le sortant de l'eau à l'horizontale, mesure la capacité du fil à absorber de l'eau puis à la conserver en son sein,

ce qui se rapproche du phénomène d'imprégnation par la pâte de ciment, pendant lequel le fil absorbe de l'eau et des particules de ciment au moment de la mise en contact avec la matrice cimentaire puis en perd éventuellement une partie sous l'effet des actions mécaniques appliquées au fil lors du coulage.

### 5.5.2. Influence sur les grandeurs caractéristiques du comportement mécanique

Les figures 5.28 et 5.29 présentent respectivement l'évolution de la résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$  et de l'efficacité du fil à l'arrachement  $e(P_{max,a})$  en fonction du paramètre retenu comme caractéristique de l'aptitude au mouillage du fil. On constate sur ces deux figures que la résistance et l'efficacité diminuent significativement lorsque la capacité de rétention d'eau du fil augmente. Dans les deux cas, on note une influence significative du prétraitement du fil que l'on peut attribuer aux sollicitations mécaniques différentes appliquées au fil lors de l'imprégnation par la matrice cimentaire et / ou lors du coulage du mortier. En effet, pour le prétraitement PI, ces sollicitations sont fortes (action mécanique manuelle lors de l'imprégnation par le coulis de ciment), elles sont plus réduites dans le cas du prétraitement D (forces capillaires) et vraisemblablement quasi nulles pour le prétraitement W (la saturation en eau du fil stoppe le processus d'imprégnation et limite les interactions du fil avec la matrice à la pression hydrostatique).

Ces résultats montrent une influence nette et systématique de la mouillabilité du fil dans la phase pré-pic du comportement. En ce qui concerne la phase post-pic (en toute rigueur, phase post-pic et phase résiduelle), l'influence de la mouillabilité est toujours sensible. La figure 5.30 donne en particulier l'évolution de la raideur post-pic en fonction de la capacité de rétention d'eau du fil. On constate à nouveau une influence de ce paramètre sur le comportement mécanique. Par contre, contrairement au cas de la phase post-pic, cette influence n'est pas systématique puisqu'elle ne concerne que les fils ayant subi le prétraitement PI (la raideur croit avec la capacité de rétention d'eau). Pour les deux autres prétraitements (W et D), l'influence de la mouillabilité semble inexistante.

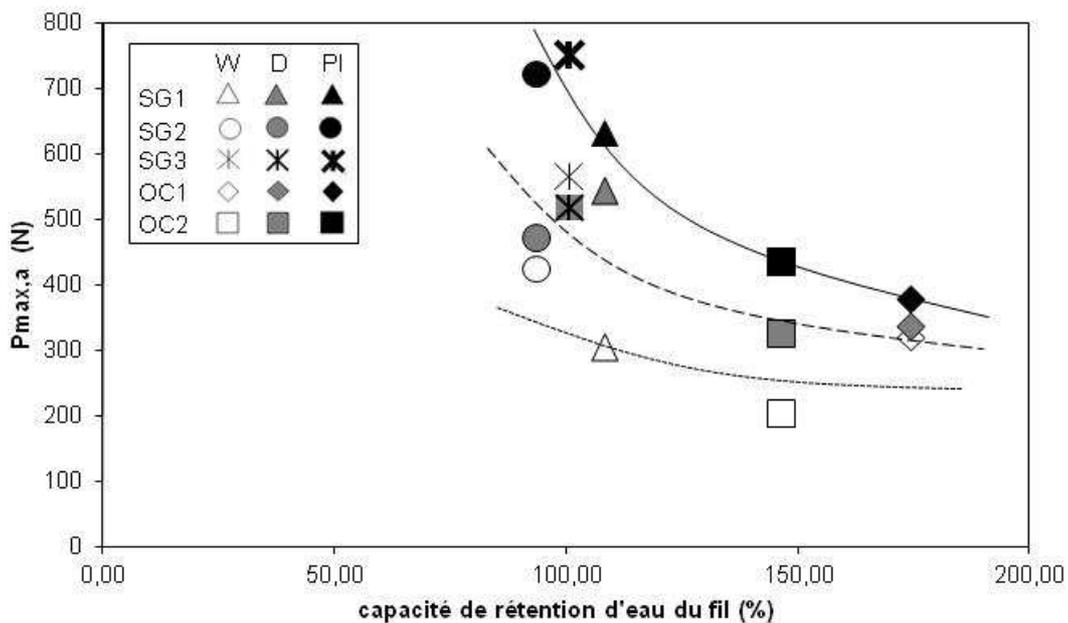


Figure 5.28. Relation entre  $P_{max,a}$  et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : courbes moyennes).

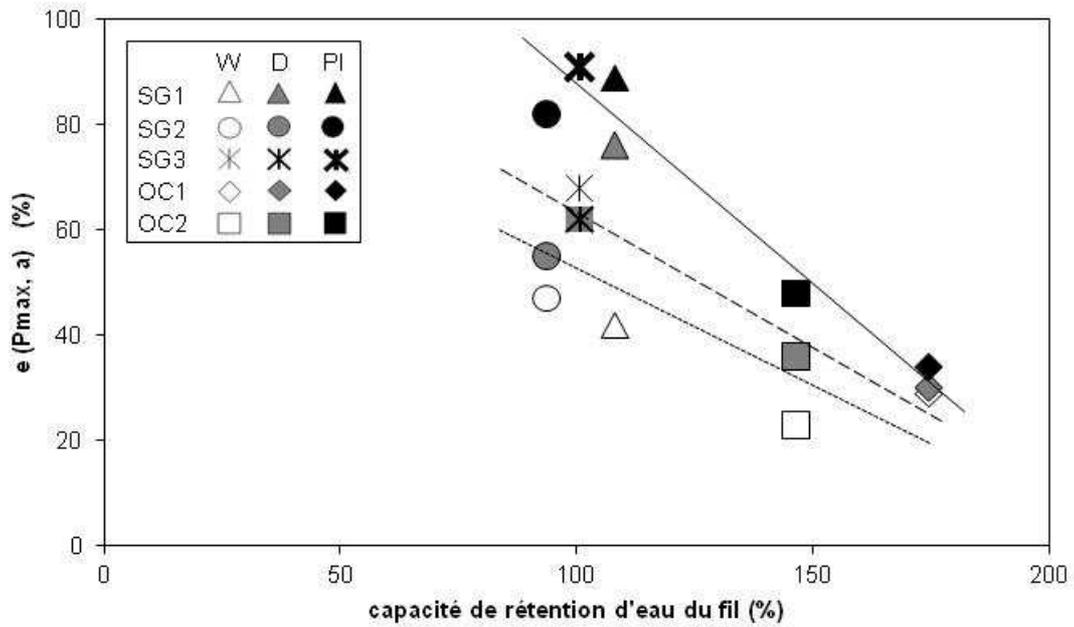


Figure 5.29. Relation entre  $e(P_{max,a})$  et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes).

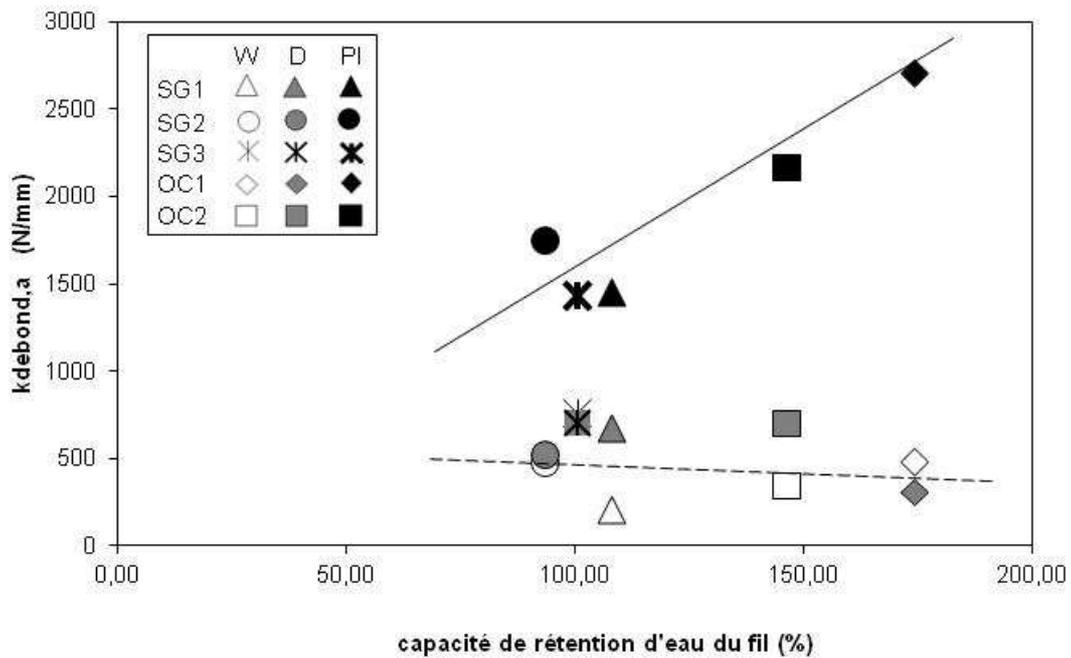


Figure 5.30. Relation entre  $k_{debond,a}$  et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes).

Dans la phase résiduelle, l'effet de la capacité de rétention d'eau se fait encore sentir puisqu'on constate, pour les fils ayant subi le prétraitement D, une variation forte de la raideur résiduelle avec la capacité de rétention d'eau (voir **figure 5.31**). Cette influence semble se réduire à presque rien dans le cas des fils ayant été préparés avec le prétraitement W.

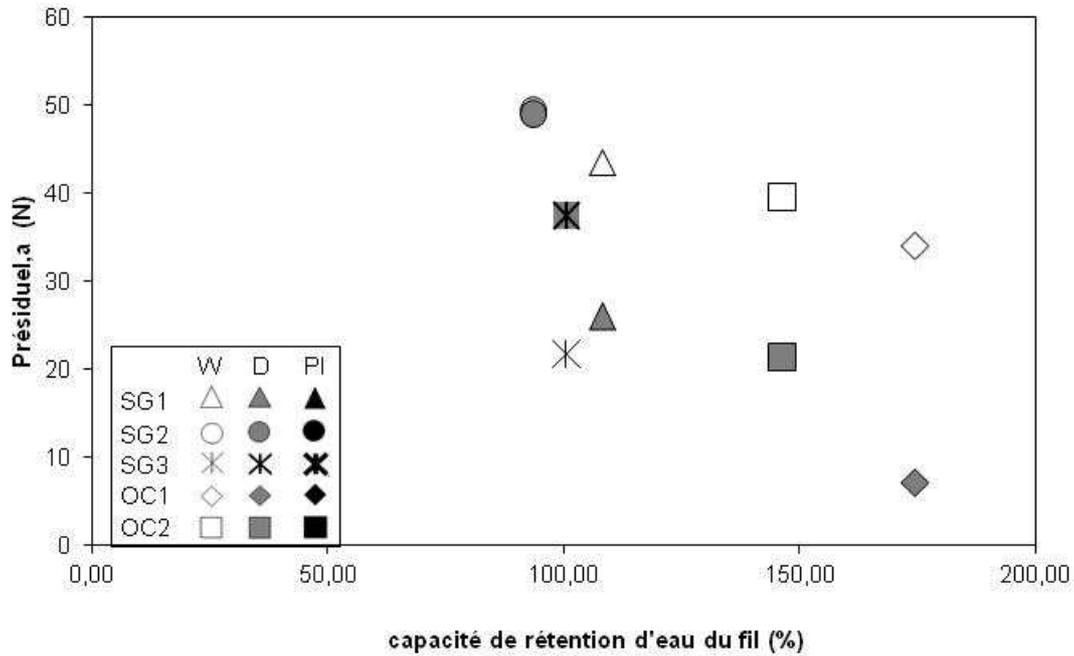


Figure 5.31. Relation entre  $P_{residuel,a}$  et la capacité de rétention d'eau du fil.

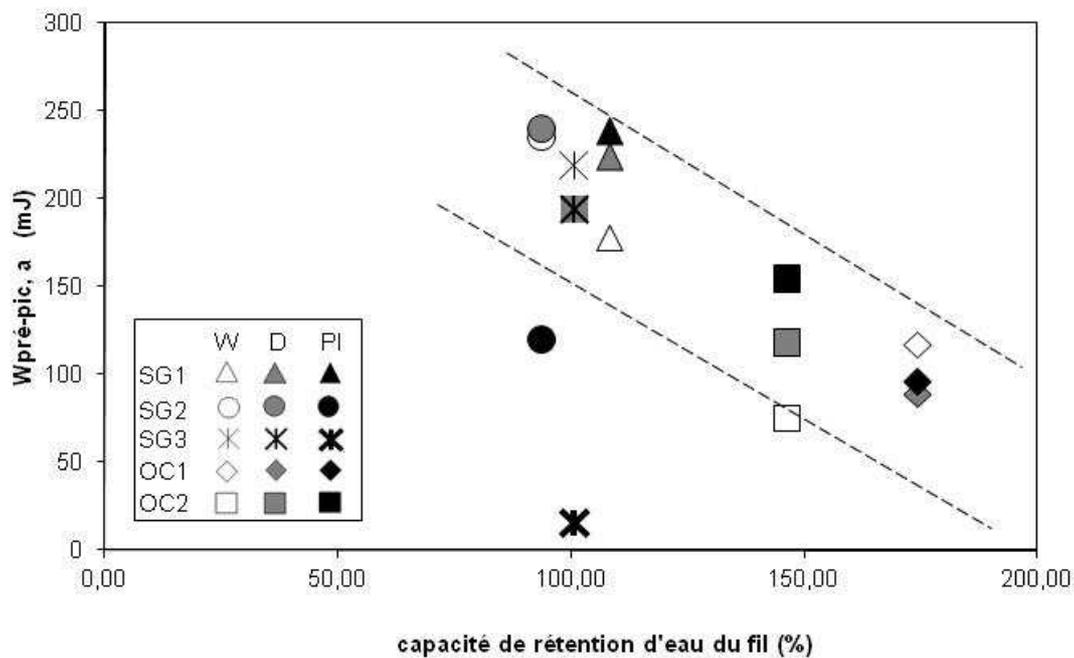


Figure 5.32. Relation entre  $W_{pré-pic,a}$  et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pointillés : enveloppe).

### 5.5.3. Influence sur les grandeurs énergétiques

L'étude de la relation entre les grandeurs énergétiques et l'aptitude au mouillage du fil montre que cette propriété conditionne de manière importante le travail dissipé au cours de l'arrachement, que l'on s'intéresse à la phase pré-pic ou à la phase post-pic (figure 5.32 et 5.33). Dans les deux cas, l'énergie dissipée est réduite d'au moins 50% lorsque la capacité de rétention d'eau du fil passe de 100% à 175%. La variation du travail dissipé est approximativement linéaire.

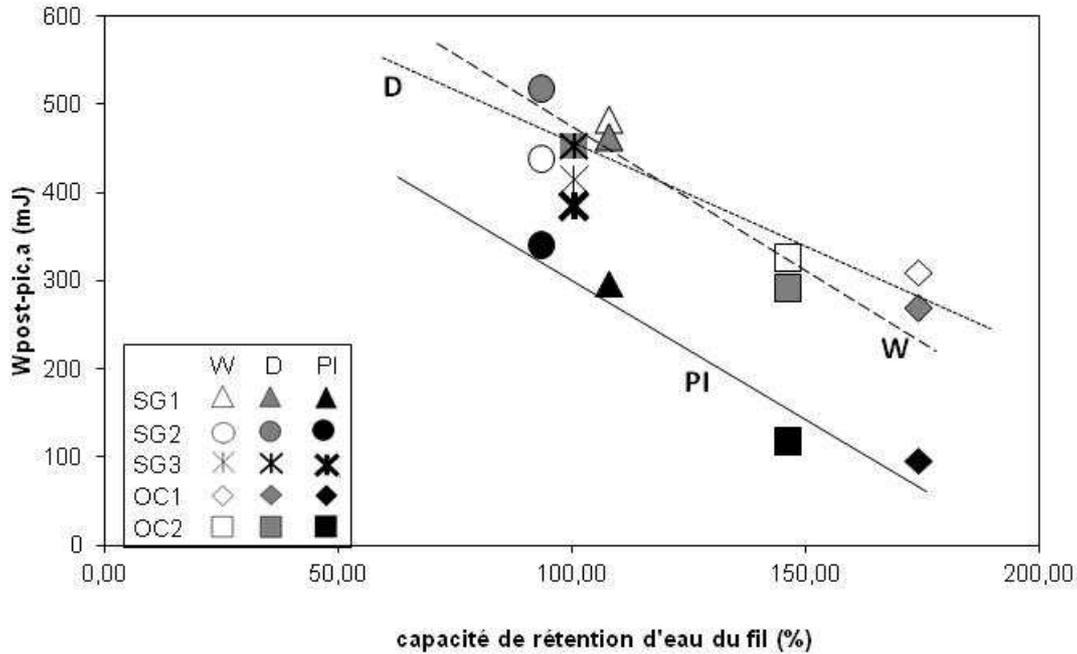


Figure 5.33. Relation entre  $W_{post-pic,a}$  et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes).

Dans le cas du travail dissipé dans la phase pré-pic, le type de prétraitement ne semble pas jouer un rôle majeur, même si le prétraitement PI semble conduire à une dissipation un peu plus marquée de l'énergie au cours de l'arrachement (les points associés sont dans la partie supérieure du fuseau présenté **figure 5.32**). Le comportement est à relier directement à la variation de la résistance à l'arrachement en fonction de la capacité de rétention d'eau, puisque, comme nous l'avons déjà évoqué au début de ce chapitre, c'est la dissipation de l'énergie élastique stockée dans les filaments qui est à l'origine de l'essentiel de l'énergie dissipée dans cette phase du comportement mécanique.

En ce qui concerne la phase post-pic (**figure 5.33**), la tendance est la même que précédemment mais les différences entre les prétraitements sont plus perceptibles parce que la corrélation des résultats est qualitativement meilleure. En particulier, les prétraitements W et D apparaissent comme similaires du point de vue du comportement post-pic, tandis que le prétraitement PI conduit à un travail dissipé plus faible. La bonne corrélation constatée entre  $W_{post-pic,a}$  et la capacité de rétention d'eau montre que les propriétés de mouillage du fil apparaissent comme très pertinentes pour expliquer le comportement observé. La méthode utilisée pour générer l'imprégnation du fil est également un paramètre important dont on peut supposer que l'aspect principal réside dans le niveau de sollicitation mécanique mis en œuvre pour faire pénétrer la pâte de ciment dans le réseau poreux inter-filamentaire.

Naturellement, du fait des tendances observées dans les phases pré-pic et post-pic, l'évolution du travail total dissipé pendant l'arrachement est similaire à celle constatée dans les phases pré- et post-pic (**figure 5.34**). Comme la dissipation principale correspond à la phase post-pic, c'est le prétraitement PI qui conduit à avoir la plus faible énergie dissipée totale, les prétraitements W et D conduisant à plus de dissipation énergétique, sans distinction possible entre les deux prétraitements. La meilleure ténacité est donc obtenue avec les fils dont la capacité de rétention d'eau est faible, associés aux prétraitements qui ne favorisent pas l'imprégnation complète du fil.

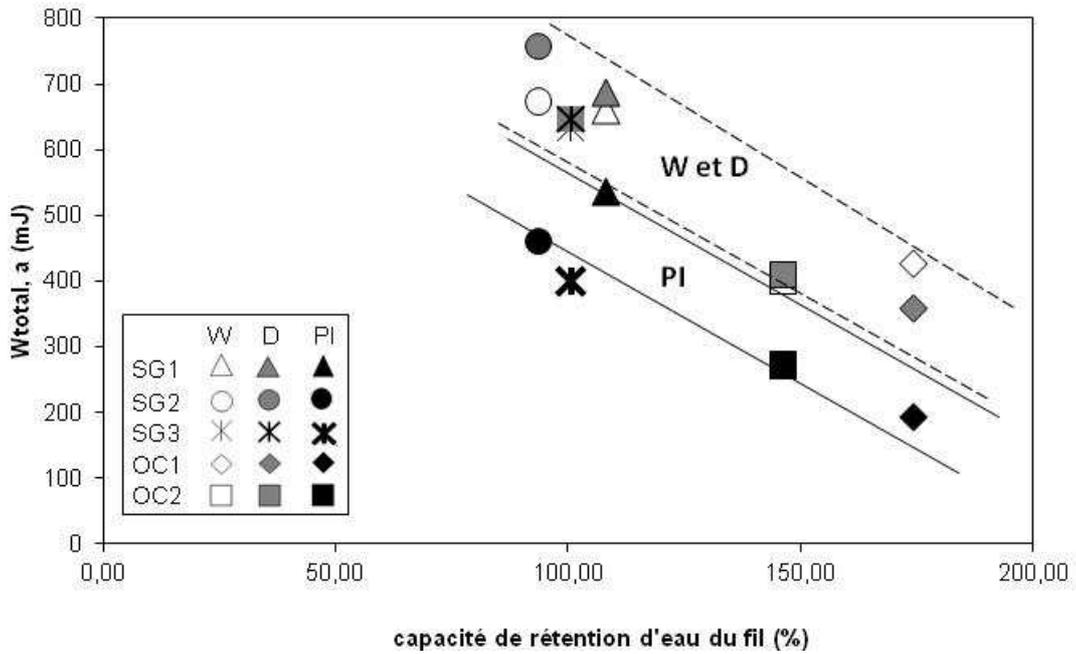


Figure 5.34. Relation entre  $W_{total,a}$  et la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : enveloppe).

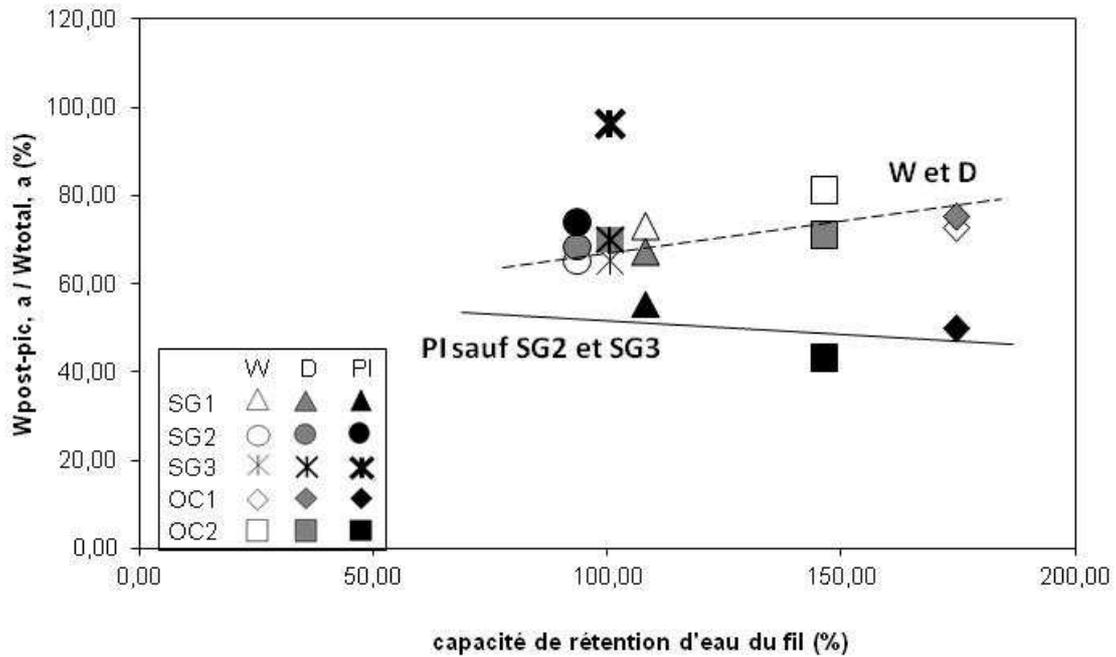


Figure 5.35. Part de  $W_{post-pic,a}$  dans l'énergie dissipée totale en fonction de la capacité de rétention d'eau du fil (traits pleins ou pointillés : droites moyennes).

En ce qui concerne l'influence de la capacité de rétention d'eau du fil sur la ductilité du comportement à l'arrachement, l'examen de la **figure 5.35** montre qu'elle est réduite, voir inexistante. Dans le cas du prétraitement PI, en laissant de coté les deux points de mesures associés aux configurations SG2PI et SG3PI dont on sait qu'ils sont peu fiables, l'influence de la capacité de rétention d'eau est négligeable. Dans les cas des deux autres prétraitements, les résultats obtenus montrent une légère influence : une augmentation de la capacité de rétention d'eau augmente la part du travail dissipé total correspondant au travail dissipé dans la phase post-pic. Il faut malgré tout rester particulièrement prudent sur cette tendance dans la mesure ou

cette analyse repose sur un nombre de points de mesure relativement réduit. En ce qui concerne ce paramètre, c'est surtout le type de prétraitement qui a une influence majeure. Les prétraitements qui ne favorisent pas une imprégnation complète du fil permettent des déplacements d'arrachement plus grands avant rupture des filaments, ce qui conduit à une énergie totale dissipée plus élevée.

## 5.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les liens qu'il y a entre les paramètres caractéristiques de l'imprégnation des fils, tels qu'ils ont été définis dans le **chapitre 3**, et les paramètres en lien avec le comportement mécanique des fils ancrés tels qu'ils ont été déterminés au **chapitre 4**.

L'analyse a d'abord porté sur les trois phases typiquement observées dans le cas de l'arrachement des fils multifilamentaires. Dans le cas de la phase pré-pic, nous avons montré que les paramètres associés au comportement mécanique (résistance à l'arrachement  $P_{max,a}$ , efficacité  $e(P_{max,a})$  et raideur pré-pic  $k_{bond,a}$ ) étaient tous des fonctions décroissantes du débit d'écoulement le long du fil  $q_f$  et des fonctions croissantes du volume différentielle des pores  $\Delta V_{0,3-3}$ . Dans le cas de la résistance à l'arrachement et de l'efficacité, le type de fil joue également un rôle important puisque les fils SG donnent quasi systématiquement des valeurs plus importantes que les fils OC. Le volume différentiel de pores  $\Delta V_{3-30}$  n'est pas apparu comme ayant un lien marqué avec cette phase du comportement. Ces relations sont expliquées par le lien entre l'imprégnation du fil, le débit d'écoulement et le volume différentiel de pores. Une augmentation du débit d'écoulement, tout comme une réduction du volume différentiel de pore, est associée à une réduction de la pénétration de la pâte de ciment dans le fil, ce qui induit une réduction du nombre de filaments ancrés, donc une réduction de la résistance à l'arrachement, et une augmentation de la longueur libre des filaments ancrés, ce qui induit une chute de la raideur.

En ce qui concerne la phase post-pic du comportement à l'arrachement, elle est décrite par un unique paramètre : la raideur post-pic  $k_{debond,a}$ . La relation de ce paramètre avec le débit d'écoulement  $q_f$  le long du fil et le volume différentielle des pores  $\Delta V_{0,3-3}$  est de même nature que pour les paramètres caractéristiques de la phase pré-pic. Nous n'observons pas d'influence significative du type de fil.

Les relations entre paramètres d'imprégnation et paramètres mécaniques dans la phase post-pic résiduelle du comportement à l'arrachement sont plus délicates à interpréter. Par exemple, nous n'avons pas pu mettre en évidence de tendances sérieuses en ce qui concerne les relations entre la résistance résiduelle  $P_{résiduelle,a}$  et les paramètres d'imprégnation. Cela est très probablement la cause de mécanisme d'interaction fil / filaments / matrice cimentaire qui se mettent en place de manière localisée, spatialement et/ou temporellement. Certains de ces mécanismes ont été identifiés par observation en microscopie optique. Finalement, seul un lien entre les volumes différentiels poreux  $\Delta V_{0,3-3}$  et  $\Delta V_{3-30}$  et la raideur résiduelle  $k_{frictional}$  a pu être mis en évidence grossièrement.

Les aspects énergétiques ont également été considérés et nous avons dans ce domaine mis en évidence les liens qu'il y a entre :

- le travail dissipé dans la phase pré-pic et les volumes différentiels de pores  $\Delta V_{0,3-3}$  et  $\Delta V_{3-30}$  :  
Le travail dissipé augmente quand le volume poreux augmente, ce qui s'explique par l'augmentation de l'imprégnation du fil,

- Le travail dissipé dans la phase post-pic et le travail total et le débit d'écoulement  $q_f$  le long du fil : le travail augmente lorsque le débit augmente, en particulier pour les débits faibles.

Pour compléter cette analyse, nous avons enrichi les éléments présentés dans ce chapitre par une analyse des liens potentiels entre les différents paramètres mécaniques évoqués précédemment et la capacité de rétention d'eau du fil. Cette analyse, très instructive, a été réalisée parce que la capacité de rétention d'eau du fil dépend des mêmes propriétés physiques qui pilotent le mécanisme d'imprégnation du fil par la pâte de ciment. Il s'agit donc d'un paramètre non caractéristique de l'imprégnation, mais très lié à elle. Les résultats obtenus montrent que ce paramètre est très pertinent pour comprendre les variations du comportement à l'arrachement, sauf peut-être dans le cas de la phase post-pic résiduelle. Ce paramètre permet également d'expliquer en grande partie les variations observées pour les grandeurs énergétiques associées au comportement à l'arrachement des fils enrobés.

## **Conclusion générale**

L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement mécanique à l'arrachement de fils multi-filamentaires à base de verre enrobés dans une matrice cimentaire et l'influence de l'imprégnation sur ce comportement afin d'identifier et d'évaluer les paramètres microstructuraux, physiques et mécaniques qui doivent être pris en compte dans la modélisation du comportement mécanique des matériaux cimentaires renforcés par ce type de renfort.

L'étude bibliographique a montré, en effet, que plusieurs lacunes subsistent dans ce domaine en raison de la complexité structurelle des fils multi-filamentaires et de la variabilité des caractéristiques géométriques de la section du fil sur la longueur. Par ailleurs, l'imprégnation des fils par la matrice cimentaire est le plus souvent partielle, limitée à la zone périphérique de la section et présente beaucoup d'imperfections locales en raison, d'une part, de la complexité et de la variabilité du fil évoquées précédemment et, d'autre part, de l'hétérogénéité propre de la matrice cimentaire à l'échelle des interstices inter-filamentaires (suspension de particules solides dans une phase liquide). De plus, le mode opératoire des essais mécaniques influe sur les résultats et la fragilité des filaments rend difficile la mesure directe des déformations du fil lors des sollicitations. Par conséquent, toute modélisation analytique du fil et de son comportement mécanique est plus ou moins compromise par le nombre considérable des facteurs influant sur le comportement du fil, par la forte dispersion des résultats et par la difficulté à caractériser et à quantifier certaines propriétés et caractéristiques du composite. Même les approches multi-échelles et stochastiques manquent souvent des données expérimentales tangibles pour valider et vérifier les modèles suggérés.

Dans ce contexte, il nous est apparu opportun de contribuer à ce vaste domaine de recherche, où beaucoup de choses restent à faire, par une approche expérimentale qui associe des essais mécaniques d'arrachement à plusieurs moyens de caractérisation de l'imprégnation du fil par la matrice cimentaire afin de comprendre les phénomènes qui déterminent le comportement micromécanique du fil et le rôle de l'imprégnation. Ainsi, 5 fils multi-filamentaires à base de verre ont été choisis pour l'étude de manière à couvrir au mieux le large domaine des propriétés structurelles des fils multi-filamentaires (type de verre, nature de l'ensimage, diamètre des filaments, nombre de filaments par mèche, nombre de mèches dans le fil) tout en ayant une aire de section comparable. Un fil torsadé de chanvre a été aussi caractérisé par différents essais à titre de comparaison.

La structure de ces fils multi-filamentaires a été caractérisée par microscopie électronique à balayage et la variabilité des caractéristiques géométriques de la section a été évaluée par des essais spécifiques simples, enfin, la capacité de rétention de l'eau dans les espaces inter-filamentaires sous différentes conditions de mouillage et d'égouttage a été évaluée. Ensuite, le comportement mécanique à la traction des fils a été étudié par des essais classiques en fonction de la longueur libre du fil, de la vitesse de déformation pendant l'essai et de la présence d'eau tant dans la phase de préparation et de conservation des éprouvettes avant l'essai que celle pendant l'essai. Un soin particulier a été porté à la maîtrise des conditions de préparation des éprouvettes d'essai et au suivi systématique de la dispersion des résultats.

Cette étape préliminaire a permis de constater que la complexité structurelle à plusieurs échelles (filaments et ensimage, mèches et fil) et la variabilité des caractéristiques géométriques de la section des fils multi-filamentaires (en raison de la forme aplatie des mèches, la possibilité de torsion et d'entremêlement des mèches, et la plus ou moins grande ondulation des mèches le long du fil) sont à l'origine des principales caractéristiques mécaniques spécifiques de ce type de renfort et, plus particulièrement, du phénomène de

l'activation retardée des filaments à faible taux de chargement, de la raideur pré-pic de la courbe effort-déformation et d'une plus ou moins grande ductilité post-pic. Pour la même raison, la longueur libre des éprouvettes et la vitesse de déformation influent significativement sur ces caractéristiques mécaniques spécifiques des fils. En revanche, la résistance en traction des fils semble peu sensible à la longueur libre et la vitesse de déformation. Par ailleurs, la présence d'eau ne semble pas avoir un rôle très influant sur les caractéristiques mécaniques précédentes. La variation induite par les différentes configurations expérimentales sur les valeurs des caractéristiques mécaniques mesurées reste généralement limitée dans une fourchette de  $\pm 10\%$  à l'exception de certains cas singuliers qui toutefois ne permettent pas de conclure sur une influence particulière de l'eau mais qui sont plutôt attribués à une dispersion plus importante des mesures dans ces cas.

Les 5 fils multi-filamentaires, ayant préalablement subi trois modes de prétraitement, ont été enrobés dans un mortier pour confectionner des éprouvettes cylindriques dans lesquelles le fil était placé selon l'axe longitudinal. La composition du mortier d'enrobage a été conçue de manière à faciliter l'imprégnation des fils et à obtenir des caractéristiques mécaniques élevées (fort dosage en ciment, faible granulométrie du sable, grande fluidité par addition de superplastifiant). Le mortier a été caractérisé du point de vue physique et mécanique. Les trois modes de prétraitement des fils ont été conçus de manière à moduler l'imprégnation des fils et consistaient soit à saturer le fil par l'eau avant l'enrobage (prétraitement W) afin de rendre plus difficile la pénétration de la matrice cimentaire, soit à conserver le fil à l'état sec jusqu'à l'enrobage (prétraitement D) pour que la matrice puisse pénétrer par capillarité, soit à faire pénétrer manuellement un coulis cimentaire correspondant à la phase liante du mortier (prétraitement PI) afin qu'une très grande partie des interstices entre les mèches et, dans un moindre degré, entre les filaments soit imprégnée avant l'enrobage par le mortier.

Les 15 configurations précédentes ont été systématiquement étudiées par microscopie électronique à balayage sur éprouvettes cylindriques fendues permettant d'évaluer qualitativement l'état du fil enrobé (diamètre apparent de la section du fil, parallélisme des mèches, caractérisation de l'interface matrice cimentaire – fil multi-filamentaire). Un indice d'imprégnation du fil a été établi sur l'hypothèse d'une section circulaire du fil enrobé qui, tout en n'étant pas a priori vérifiée, permet de donner une indication quantitative sur le degré de pénétration de matrice cimentaire dans les interstices du fil pour chaque configuration expérimentale.

Ensuite, les caractéristiques porométriques du fil et de la matrice cimentaire qui l'enrobe ont été étudiées par porosimétrie de mercure en comparaison avec plusieurs références sans fil permettant de démontrer que la présence du fil induit un volume différentiel additionnel de pores de diamètre entre 0,3 et 30  $\mu\text{m}$  en accord avec les estimations théoriques sur des dimensions des espaces inter-filamentaires. Ces espaces poreux se situent essentiellement entre les filaments dans les mèches et se constituent pour la plus grande partie de pores entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ . Dans la plupart des cas, le volume total de ces espaces poreux augmente avec le degré d'imprégnation du fil comme si, la pénétration des produits hydratés du ciment dans les interstices du fil provoquait un désordre sur l'arrangement des filaments et engendrait de nouveaux vides inter-filamentaire.

Enfin le degré d'imprégnation des fils a été caractérisé par un essai spécifique d'écoulement d'eau à travers le fil enrobé dans la matrice cimentaire. Comme attendu, l'écoulement à travers le fil est d'autant plus faible que son degré d'imprégnation est fort montrant ainsi qu'une forte imprégnation de la matrice cimentaire dans le fil perturbe la continuité des

espaces poreux inter-filamentaires et augmente la tortuosité le long du fil bien que le volume total des espaces inter-filamentaires augmente dans la plupart de cas. Ainsi, nous avons pu établir la relation quantitative univoque qui relie l'indice d'imprégnation, le débit de l'écoulement à travers le fil enrobe et le volume différentiel de l'espace poreux inter-filamentaire.

Par la suite, l'étude du comportement mécanique des cinq fils multi-filamentaires pour les trois prétraitements a été réalisée grâce à une série d'essais classiques d'arrachement par application d'un effort de traction à vitesse de déformation constante sur l'extrémité libre du fil alors que l'autre extrémité était enrobée dans la matrice cimentaire celle-ci maintenue fixe sur la presse. Différentes longueurs d'enrobage du fil entre 1 et 25 cm ont été testées. Lorsque l'imprégnation du fil est partielle (prétraitement W et D), la courbe effort-déformation du fil se caractérise généralement par une première phase pré-pic qui commence avec l'activation retardée des filaments sous faible taux de chargement et se poursuit par un raidissement quasi linéaire jusqu'à atteindre 60 à 90% de l'effort maximal supporté suivi de la rupture des filaments les plus sollicités de la zone périphérique de la section et l'atteinte de la valeur maximale de l'effort. Cette première phase est suivie par une deuxième phase post-pic correspondant à une chute progressive de l'effort (de raideur comparable à celle pré-pic) associée à la poursuite de la rupture des filaments ancrés dans la matrice. Cette deuxième phase est suivie par une troisième phase post-pic, désignée résiduelle, correspondant au glissement et à l'extraction de la matrice des filaments non rompus, et non ancrés dans la matrice cimentaire (filaments de la zone de cœur). Cette dernière phase est caractérisée par une déformation très importante sous un effort faible (moins de 20% de l'effort maximal, le plus souvent aux alentours de 10%) qui diminue très lentement avec la déformation. Afin d'étudier ce comportement mécanique complexe en détail et d'analyser l'influence des différents facteurs, plusieurs grandeurs caractéristiques en plus de l'effort maximal à l'arrachement et la déformation correspondante, ont été déterminées, telles que la raideur pré-pic (première phase), celle post pic (deuxième phase), l'effort résiduel et la raideur résiduelle (troisième phase) ainsi que le travail dissipé dans les phases pré- et post-pic.

Les résultats obtenus montrent que la longueur d'enrobage du fil est un paramètre prépondérant sur le comportement mécanique dans la mesure où celle-ci conditionne le nombre relatif de filaments ancrés dans la matrice cimentaire (filaments périphériques) par rapport au nombre de filaments peu ou pas ancrés dans la matrice (filaments de cœur) dans le cas des prétraitements W et D et dans un moindre degré pour le prétraitement PI. Au delà d'une valeur seuil de la longueur d'enrobage, désignée comme longueur minimale d'enrobage par la suite, le comportement mécanique n'est plus influencé par la longueur d'enrobage dans la mesure où le nombre relatif de filaments ancrés reste constant. Nous avons ainsi déterminé la valeur de cette longueur minimale d'enrobage pour chaque configuration expérimentale (entre 10 et 15 cm pour les prétraitements W et D et entre 3 et 5 cm pour le prétraitement PI) ainsi que la valeur de l'effort maximal à l'arrachement associée qui est plus faible pour les prétraitements W et D comparativement au prétraitement PI (sachant que celle-ci représente entre 45 et 95% de la valeur de l'effort maximal mesuré lors des l'essai de traction sur le fil non enrobé). Nous avons aussi démontré que l'énergie totale dissipée lors de l'essai ainsi que les raideurs pré- et post pic augmentaient avec la longueur d'enrobage jusqu'à la valeur de longueur minimale d'enrobage, en général, au détriment de la raideur de la phase résiduelle post-pic. En revanche la dispersion des résultats expérimentaux reste plus forte pour les faibles valeurs d'enrobage. Par ailleurs, les fils SG montrent une plus grande résistance à l'arrachement et un comportement mécanique globalement meilleur que les fils OC en raison probablement de la nature de l'ensimage, celui des fils SG serait mieux adapté aux liants

cimentaires alors que celui des fils OC serait mieux adapté aux liants polymériques et moins aux liants cimentaires.

En tenant compte du comportement mécanique à la traction des fils multi-filamentaires non enrobés et en supposant que le comportement pré-pic (première phase) est élastique linéaire et que le comportement post-pic (deuxième et troisième phase) dépend essentiellement de la liaison fil-matrice cimentaire, nous avons déterminé le comportement intrinsèque à l'arrachement de la partie enrobée du fil. Les résultats obtenus montrent que les prétraitements W et D conduisent à un comportement mécanique très proche. En revanche le prétraitement PI se différencie significativement des précédents et se caractérise par une augmentation de la résistance et des rigidités pré- et post-pic et par une disparition complète de la troisième phase résiduelle car quasiment tous les filaments restent ancrés dans la matrice cimentaire. De par ce fait, la valeur de la longueur minimale d'enrobage est très réduite. En contrepartie, le comportement global est beaucoup plus fragile, car l'énergie dissipée au cours de l'essai (énergie post-pic et aussi énergie totale) est beaucoup plus faible que dans les autres cas de prétraitement.

Nous avons aussi recherché de caractériser l'impact du degré d'imprégnation du fil sur le comportement mécanique à l'arrachement du fil enrobé en évaluant la proportion de filaments peu ou pas ancrés dans la matrice cimentaire (filaments de cœur), extraits de l'éprouvette à l'issue de l'essai d'arrachement. Nous avons ainsi démontré le lien direct qui existe entre cette proportion de filaments extraits et l'ampleur de la phase résiduelle post-pic du comportement mécanique. Et en considérant que tous les filaments non extraits à l'issue de l'essai d'arrachement sont ancrés dans la matrice cimentaire et sont rompus sous l'action de l'étirement, nous avons démontré la relation étroite qui existe entre leur proportion et la résistance à l'arrachement du fil enrobé.

A la fin de ce travail nous avons procédé à la confrontation des valeurs des caractéristiques mécaniques déterminées à partir des essais d'arrachement pour des longueurs d'enrobage supérieures ou égales à la valeur minimale et, d'une part, les paramètres utilisés pour caractériser le degré d'imprégnation du fil (débit d'écoulement à travers le fil et volume différentiel des espaces poreux entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ ) et, d'autre part, la capacité de rétention d'eau du fil dans la mesure où ce paramètre est déterminant vis-à-vis de la capacité de pénétration de la matrice cimentaire dans le fil et son imprégnation. Nous avons ainsi démontré que l'effort maximal à l'arrachement, la raideur pré-pic et celle post-pic de la courbe effort-déformation suivent une relation décroissante en fonction du débit d'écoulement à travers le fil indépendamment de la nature du fil, alors que le volume différentiel des espaces poreux inter-filamentaires entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$  semble beaucoup moins corrélé avec les caractéristiques mécaniques précédentes. Nous avons aussi constaté que le volume différentiel des espaces poreux inter-filamentaires entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$  et le débit d'écoulement le long du fil sont respectivement corrélés avec l'énergie dissipée dans la phase pré-pic et l'énergie dissipée dans la phase post-pic. En revanche, nous n'avons pas pu établir de relations claires entre les paramètres d'imprégnation et les caractéristiques de la phase résiduelle post-pic. Enfin, nous avons mis en évidence qu'une très satisfaisante corrélation existe entre la capacité de rétention d'eau des fils multi-filamentaires et les principales caractéristiques mécaniques et énergétiques pré- et post-pic (à l'exception des caractéristiques de la phase résiduelle) aussi bien dans le cas de l'imprégnation partielle du fil (prétraitements W et D) que dans le cas de l'imprégnation manuelle forcée (prétraitement PI). Ce qui rend ce paramètre, facile à mesurer, très pertinent pour appréhender les variations du comportement mécanique en fonction de la nature du fil.

Ce travail, tout en permettant de mieux comprendre le comportement mécanique à l'arrachement des fils-multi-filamentaires à base de verre enrobés dans une matrice cimentaire et l'influence de l'imprégnation, ouvre plusieurs perspectives dont les plus importantes sont les suivantes. Premièrement il nous paraît opportun de vérifier dans quelle mesure les conclusions tirées de ce travail sont valables pour d'autres fils avec des caractéristiques structurelles différentes (diamètre de filaments, type d'ensimage, nombre de filaments par mèche, nombre de mèches dans le fil, mèches torsadées ou tissées, aire de section du fil plus ou moins grande). Il faut vérifier aussi dans quelle mesure les constats sur des essais opérés avec des éprouvettes avec un seul fil comme renfort sont valables dans le cas de renfort multi-fil et a fortiori dans le cas de renfort avec de bandes tissées ou des textiles. Un autre volet non étudié dans ce travail est l'aspect durabilité des fils multi-filamentaires à long terme soit par l'éventuelle attaque du verre par l'alcalinité de la matrice cimentaire, soit aussi l'endommagement et la fragilisation du verre par des sollicitations cycliques. Enfin, les nombreux résultats expérimentaux de ce travail méritent d'être utilisés pour valider les modèles existants et le cas échéant introduire dans ces modèles les paramètres qui influent sur le comportement mécanique tels que la longueur minimale d'enrobage, la capacité de rétention d'eau des fils, le degré d'imprégnation du fil.

## **Références bibliographiques**

- [Abd03] Abdkader, A., Offermann, P., Jesse, F., Curbach, M.: “Textile reinforced concrete with AR glass filament yarns”, IFB Industrial Fabrics Bulletin, 2003.
- [Abr96] Abrishami, H. H., Mitchell, D.: “Analysis of bond stress distributions in pull-out specimens”. In: Journal of Structural Engineering 122(3), 255-261, 1996.
- [Alj09a] Aljewifi, H., Fiorio, B., Gallias, J.L.: “Quantitative methods used to characterize the impregnation of a glass multifilament yarn by a cementitious matrix”. 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4).3-5 June 2009. Dresden: Germany.
- [Alj09b] Aljewifi, H., Fiorio, B., Gallias, J.L.: “Méthodes quantitatives de caractérisation de l'imprégnation d'un fil multifilamentaire par une matrice cimentaire”, 27èmes rencontres de l'AUGC, 3-5 Juin 2009, Saint –Malo, France.
- [Alj10a] Aljewifi, H., Fiorio, B., Gallias, J.L.: ”Pull-out behaviour of a glass multi-filaments yarn embedded in a cementitious matrix”. EURO-C 2010, 15-18 March 2010, Austria.
- [Alj10b] Aljewifi, H., Fiorio, B., Gallias, J.L.: “Characterization of the impregnation by a cementitious matrix of five glass multi-filament yarns”. European Journal of Environmental and Civil Engineering, EJECE, 14(5), 529-544, 2010.
- [Alj11] Aljewifi, H., Fiorio, B., Gallias, J.L.: “Groups of physical parameters influencing the three stages pull-out behavior of multi-filaments glass yarns embedded in micro-concrete, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites”. HPRCC 6, Ann Arbor, 20-22 June 2011, Michigan, USA.
- [Ami05] Amiri, O., Ar`t-Mokhtar, A., and Sarhani, M.: “Tri-dimensional modelling of cementitious materials permeability from polymodal pore size distribution obtained by mercury intrusion porosimetry tests”. Advances in Cement Research journal, 17(1), 39–45, 2005.
- [And10] de Andrade Silva F., Dias Toledo Filho R., de Almeida Melo Filho J., de Moraes Rego Fairbairn E.: “Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites”. Construction and Building Materials journal, 24 (5), 777–785, 2010.
- [Ave71] Aveston, J., Cooper, G.A, Kelly, A.: “Single and multiple fracture: The properties of fiber composites”. Conference Proceedings of NPL Conference, IPC Science and Technology press, Ltd, 15-24, 1971.
- [Ban04] Banholzer, B.: “Bond Behaviour of a multi-filament yarn embedded in a Cementitious matrix“. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Nr. 12, (pdf file at: <http://www.bth.rwth-aachen.de> ), 2004.
- [Ban05] Banholzer, B., Brameshuber, W., Jung, W.: “Analytical simulation of pull-out-tests - the direct problem”. Cement and Concrete Composites journal, 27(1), 93-101, 2005.
- [Ban06a] Banholzer, B.: “Bond of a strand in a cementitious matrix”. Materials and structures journal, 39(10), 1015-1028, 2006.
- [Ban06b] Banholzer, B., Brockmann, T., Brameshuber, W.: “Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements”. Materials and Structures journal, 39(8), 749-763, 2006.
- [Ban06c] Banholzer, B., Brameshuber, W., Jung, W.: “Analytical evaluation of pull-out-tests - the inverse problem“. Cement and Concrete Composites journal, 28, 564-571, 2006.

- [Ban07] Banholzer, B., Brameshuber, W. : “Pull-Out characteristics of a glass yarn embedded in a cementitious matrix”. American Concrete Institute, ACI SP-244, SP-244, 17-38, 2007.
- [Bar87] Bartos, P.: “Brittle-matrix composites reinforced with bundles of fibres”. London: Chapman and Hall, In: Proceedings of the First International RILEM Congress from Materials Science to Construction Materials Engineering. Vol. 2: Combining Materials: Design, Production and Properties, 539-554, 1987.
- [Bas01] Basche, H.: “Carbon fibre as an Alternative Reinforcing Element”. In: Leipzig Annual Civil Engineering Report, 33-38, 2001.
- [Bas00] Basche, H.D., Freitag, N., Jauck, K., Schenck, G.: “Bond Behaviour of Carbon Fibres in Concrete”. LACER No. 5, 2000
- [Bea79] Beaudoin, J.J.: “Porosity measurements of some hydrated cementitious systems by high pressure mercury intrusion-microstructural limitations”. Cement and Concrete Research journal, 9(6), 771-781, 1979.
- [Ben87] Bentur, A., Diamond, S.: “Aging and microstructure of glass fiber cement composites reinforced with different types of glass fibres”. Durability of Building Materials, 4, 201-226, 1987.
- [Ben90] Bentur, A. and Mindess, S.: “Fibre Reinforced Cementitious Composite’s”. In Elsevier Science Publishing Ltd., New York, United State of America, 1990.
- [Bey97] Beyerlein, I. J., Phoenix, S. L. (1997), “Stress profiles and energy release rates around fiber breaks in a lamina with propagating zone of matrix yielding and debonding” In: Composites Science and Technology, 57, 869-885, 1997.
- [Ble96] Bledzki, A.K., Reihmane, S., Gassan, J.: “Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites”. Journal of Applied Polymer Science, 59 (8), 1329–1336, 1996.
- [Bon10] Bonnafous, C.: “Analyse multi echelle des mecanismes d’endommagement de composites chanvre/epoxy a renforts tisses. Caracterisation de l’interface fibre/matrice”. PhD thesis, ENSMA-Poitiers 2010.
- [Bra01] Brameshuber, W., Banholzer, B.: “Determination of area and perimeter of glass multifilament yarns embedded in a cementitious matrix”. Im Tagungsband: 5th International Conference on Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete, 1027 - 103, 2001.
- [Bra03] Brameshuber, W., Brockmann, T.: “Textile reinforced concrete (TRC) - durability aspects of fine grained binder systems Farmington Hill”. American Concrete Institute, ACI SP-212, In: Durability Concrete. Proceedings of the Sixth International Conference, Thessaloniki, June 1–7, (Malhotra, V.M. (Ed.), 93–111, 2003.
- [Chu05] Chudoba, R., Konrad, M., Vořechovský, M.; Roye, A.: “Numerical and experimental study of imperfections in the yarn and its bond to cementitious matrix”. ACI Spring Convention, New York, 2005.
- [Chu06a] Chudoba, R., Vořechovský, M., Jerabek, J., Konrad, M.: “TRC- specimens modelled as a chain of cracks bridged by bundles. Study of impact of local scatter on global tensile strength”. An International Symposium, Northwestern University, U.S.A, Part 8, 777-783, 2006.

- [Chu06b] Chudoba, R., Vorěchovský, M., Konrad, M.: “Stochastic modeling of multi-filament yarns. I. Random properties within the cross-section and size effect”. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 413–434, 2006.
- [Chu07] Chudoba, R., Konrad, M., Vořechovský, M., Roye, A.: “Numerical and experimental study of imperfections in the yarn and its bond to cementitious matrix”. *ACI Symposium Publication*, 244, 39-56, 2007.
- [Col58] Coleman, B.D.: “On the strength of classical fibres and fibre bundles”. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 7, 60–70, 1958.
- [Cur03a] Curbach, M. and Hegger, J.: “Strengthening of Concrete Column Stubs Through Resin Infused Composite Wraps”. 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures, ed. Dresden, Germany. Karbhari, V.M., Eckel, D.A., and Tunis, G.C. (1993). *J. of Thermoplastic Composite Materials*, 6, 92-107, 2003.
- [Cur03b] Curbach, M.; Jesse, F.: “Strength of textile concrete reinforced with AR-glass filament yarns“. Dresden : Lehrstuhl für Massivbau, In: *Textile Reinforced Structures, Proceedings of the 2nd Colloquium, Dresden, (Curbach, M. (Ed.)), 299-312, 2003.*
- [Cuy04] Cuypers, J., Wastiels, P., Van Itterbeek, E.: “Durability of glass fibre reinforced composites”. *De BolsterH. Bolster CompTest* 2004.
- [Cuy07] Cuypers, H., Orlowsky, J., Raupach, M., BÜttner, T.: “Durability aspects of AR-glass-reinforcement in textile reinforced concrete, part 1: Material behaviour”. *Advances in Construction Materials journal*, 381-388, 2007.
- [Del03] Deleporte, E.: “Ecoulements dans les milieux poreux – Loi de Darcy”. Proposition d’expérience”. 21-Mai 2003. In 16<sup>me</sup> congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement-Avignon 6-10 octobre 2008 - Communication ID-7.
- [Dan45] Daniels, H.: “The maximum of a Gaussian process whose mean path has a maximum, with an application to the strength of bundles of fibres”. *Advances in Applied Probability*, 21, 315–333, 1945.
- [Dil06] Dilthey, U., Schleser, M., Hanisch, V., Gries, T.: “Yarn tensile test of polymer impregnated textiles for the reinforcement of concrete”. *Technical Textiles*, 49(1), 48-50, 2006.
- [Dil07] Dilthey, U., Schleser, M.: “Investigation and improvement of concrete reinforced with epoxy impregnated fabrics”. 12<sup>th</sup> International congress on polymers in concrete, 2007, Korea.
- [Fis28] Fisher, R.A., Tippett, L.H.C.: “Limiting forms of the frequency distribution of the largest and smallest member of a sample”. *Proceedings, Cambridge Philosophical Society*, 24, 180–190, 1928.
- [Foc00] Focacci F., Nanni, A., Bakis, C.E.: “Local Bond-Slip Relationship for FRP Reinforcement in Concrete”. In: *Journal of Composites for Construction* 4, 24-32, 2000.
- [Gri01] Gries, T., Kolkmann, A.: “Garnstrukturen für den Einsatz in textilbewehrtem Beton“. In 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532, Aachen, 35-44, 2001.
- [Gri02] Gries T., Al-Masri, A., Kolkmann, A., Stockmann, P., Weck, M., and Kölzer, P.: “Added strengt”. *Textile Month, Band Januar*, 22-27, 2002.

- [Gri03] Gries, T and Kolkmann, A.: “Garnentwicklung zur zielgerichteten Beein\_ussung der mechanischen Garn-Charakteristik”. In Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), 29- 40, 2003, Dresden, Germany.
- [Gri06] Gries, T., Roye, A., Offermann, P., Engler, T., Peled, A.: “Textiles“. Chapter in Book State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee, Brameshuber, Wolfgang, 11-27, 2006.
- [Guy91] Guyon, E., Hulin, J.P., Petit, L.: “Hydrodynamique physique“. CNRS Editions - EDP Sciences, 1991.
- [Han05] Hanisch, V. Gries, T., Chudoba, R.: “Tensile tests on multifilament yarns-results and interactions”. Composites in construction -Third international Conference, July 11 – 13, 1-7, 2005, Lyon, France.
- [Han06] Hanisch, V., Kolkmann, A., Roye, A., and Gries T.: “Yarn and textile structures for concrete reinforcements”. In FERRO8, Bangkok, February 6<sup>th</sup>, 2006.
- [Har78] Harlow, D.G., Phoenix, S.L.: “The chain-of-bundles probability model for the strength of fibrous materials. II. A numerical study of convergence”. Journal of Composite Materials, 12, 314-335, 1978.
- [Häu07] Häußler-Combe, U., Hartig, J.: “Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading”. In: Cement and Concrete Composites, 29 (4), 279-289, 2007 – [doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.012)
- [Heg03] Hegger, J., Bruckermann, O., Will, N.: “Bond characteristics of multifilament yarns in a cementitious matrix: Pull-out tests and their numerical simulation”. 12. Intern. Techtexsil-Symposium, Frankfurt a.M., 7.-10. April 2003.
- [Heg04] Hegger, J., Bruckermann, O., Chudoba R.: “A smeared bond-slip relation for multifilament yarns embedded in fine concrete”. 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes, 2004.
- [Heg06] Hegger, J., Will, N., Bruckermann, O., and Voss. S.: “Load bearing behavior and simulation of textile reinforced concrete”. Materials and Structures (RILEM), 39(8), 765-776, 2006.
- [Heg07] Hegger, J., Will, N., Ruberg, K.: “Textile Reinforced Concrete –A new Composite Material”. Advances in Construction Materials, Part II, 147-156, 2007.
- [Hol04] Holler, S., Butenweg, C., Noh, S.-Y., Meskouris, K.: “Computational Model of Textile-Reinforced Concrete Structures”. Computer and Structures journal, 82, 1971-1979, 2004.
- [Ibn97] Ibnabdeljalil, M., Curtin, W.A.: “Strength and reliability of fiber-reinforced composites: localized load sharing and associated size-effects”. International Journal of Solids and Structures 34 (21), 2649-2668, 1997.
- [Jes01] Jesse, F., Curbach. M.: “The present and the future of textile reinforced concrete”. FRPRCS-5 Conference Cambridge, July 16th-18th, 2 (593), 2001.
- [Jes03] Jesse, F., Curbach. M.: “Strength of continuous AR-glass fibre reinforcement for cementitious composites”. RILEM International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, (12), 337 - 348, 2003.

- [Jes04a] Jesse, F., Curbach, M.: “A new approach for determining geometrical properties of glass fibre reinforcement in GRC composite”. In: di Prisco, M.; Felicetti, R.; Plizzari, G. A. (Hrsg.): *Fibre-Reinforced Concretes: Proceedings of the "Sixth International RILEM-Symposium – BEFIB, Varenna, 20.-22.9.2004*. Bagnaux : RILEM, S. 267-278 – ISBN 2-912143-51-9, 2004.
- [Jes04b] Jesse, F., Curbach, M., Ulrich Häußler-Combe, H., Brameshuber, W.: “Load Bearing Behaviour of Filament Yarns in a Cementitious matrix”. PhD thesis, Technische Universität Dresden, 2004.
- [Jes05] Jesse, F., Will, N., Curbach, M., Hegger, J.: “Load bearing behaviour of textile reinforced concrete”. In: Dubey, A. (Ed.): *Textile Reinforced Concrete. ACI Special Publication (SP)* - in review, 2005.
- [Jes06] Jesse, F.: “Efficiency of multi filament reinforcement in cementitious composites”. In: Brandt, A. M.; Li, V. C.; Marshall, I. H. (Ed.): *Brittle Matrix Composites 8 (BMC8). Proceedings of the 8th International Symposium*, Woodhead Publ. Ltd, Cambridge and ZTUREK Research-Scientific Institute, Warsaw, 275-284, 2006.
- [Kab06] Kabele, P., Novák, L., Nemecek, J., Kopecký, L.: “Effects of chemical exposure on bond between synthetic fiber and cementitious matrix”. *ICTRC - 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete* 10, 91-99, 2006.
- [Kes99] Kessler, R.W., Kohler, R., Tubach, M.: “Strategy for a sustainable future of fiber crops”. *Proceedings of the international conference on natural fibers performance*, Copenhagen, 1999, Denmark.
- [Kol05] Kolkman, A., Gries, T., Schleser, M., and Dilthey, U.: “Innovative yarn structures and coatings for textile reinforced concrete”. In *13th International Techtexil Symposium for Technical Textiles*, 6-9. Juni 2005, Frankfurt am Main, 2005.
- [Kon03a] Konrad, M., Chudoba, R., Butenweg, C., Bruckermann, O.: “Textile Reinforced Concrete Part II: Multi-Level Modeling Concept”. In *proceedings: Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen*, Weimar, 2003.
- [Kon03b] Konrad, M., Chudoba, R., Meskouris, K., Mombartz, M.: “Numerical Simulation of Yarn and Bond Behavior at Micro- and Meso-Level”. *2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2)*, 399- 410, 2003.
- [Kon04] Konrad, M., Chudoba, R.: “The Influence of Disorder in Multifilament Yarns on the Bond Performance in Textile Reinforced Concrete”. *Acta Polytechnica*, 44(5-6), 186-193, 2004.
- [Kon06a] Konrad, M., Chudoba, R., Kang, B.: “Numerical experimental evaluation of damage parameters for textile reinforced concrete under cyclic loading”. *III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering* C.A. Mota Soares et.al. (eds.) Lisbon, Portugal, 5–8 June 2006.
- [Kon06b] Konrad, M., Jerabek, J., Vorechovsky, M., Chudoba, R.: “Evaluation of mean performance of cracks bridged by multifilament yarns”. In *proceedings: EURO-C 2006: Computational Modelling of Concrete Structures*, 873-880, 2006.

- [Kon08] Konrad, M.O.A.: “Effect of multifilament yarn crack bridging on uniaxial behaviour of textile reinforced concrete”. PhD, Thesis, univ. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008.
- [Kre90] Kreller, H.: “Zum nichtlinearen Trag- und verformungsverhalten von stahlbetontragwerken unter Last- und zwangseinwirkung”. Heft 409, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1990.
- [Lan04] Langlois V. : “Etude du comportement mécanique des matériaux cimentaires à renforts synthétiques longs ou continues”. PhD, Université de Cergy-Pontoise, France, 2004.
- [Leu96] Leung, C. K. Y.: “Design criteria for pseudoductile fiber-reinforced composites”. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 22(1), 10–14, 1996.
- [Lit81] Litherland, K.L., Okley, D.R., Proctor, B.A.: “The use of accelerated ageing procedure to predict the long- term strength of GRC composites”. *Cement and concrete research*, 11, 455-466, 1981.
- [Lu99] Lu, X., Zhang, M.Q., Rong, M.Z., Shi, G., Yang, G.C., Zeng, H.M.: “Natural vegetable fiber/plasticized natural vegetable fiber-a candidate for low cost and fully biodegradable composite”. *Adv Compos Lett* 8 (5), 231–6, 1999.
- [Maj74] Majumdar, A. J.: “The Role of the Interface in Glass Fibre Reinforced Cement”. In: *Cement and Concrete Research*, 4(2), 247-266, 1974.
- [Mes02] Meskouris, K., Butenweg, C., Noh, S.-Y., Holler, S.: “Numerical Simulation of textile-reinforced concrete structures”. In proceedings: The 6<sup>th</sup> International Conference on Computational Structures Technology, 2002.
- [Mom06] Mombartz, M., Chudoba, R., Hegger, J., Peiffer, F.: “Simulation of textile reinforced concrete with 2D discrete crack and discrete crack bridges representation”. In proceeding: EURO-C 2006, Mayrhofen.
- [Naa91a] Naaman, A.E., Namure, G.G, Alwan, J.M., and Najm, H.S.: “Fiber pullout and bond slip. I: Analytical study”. *ASCE, Journal of Structural Engineering*. 1117(9): 2769- 2790, 1991.
- [Naa91b] Naaman, A.E., Namure, G.G, Alwan, J.M., and Najm, H.S.: “Fiber pullout and bond slip. II: Experimental validation”. *ASCE, Journal of Structural Engineering*. 1117(9): 2791-2800, 1991.
- [Nor00] Norme internationale ISO 3341: “Textile glass - Yarns - Determination of breaking force and breaking elongation”, 2000.
- [Ohn94] Ohno, S., Hannant, D.J.: “Modelling the stress-strain response of continuous fiber reinforced cement composites”, *ACI Materials Journal*, 91, 306-312, 1994.
- [Orl04] Orłowski, J., Raupach, M.: “Tensile tests on study the long -term of behaviour of textile reinforced concrete”. Im Tagungsband: IMTCR, 2004.
- [Orl05] Orłowski, J., Raupach, M., Cuypers, H., Wastiels, J.: “Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment”. *Materials and Structures (RILEM)*, 38(276), 155-162, 2005.

- [Oue07] Ouellet, S., Bussière, B., Aubertin, M., Benzaazoua, M.: “Microstructural evolution of cemented paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test results”. *Cement and Concrete Research*, 37, 1654-1665, 2007.
- [Pei08] Peiffer, F.: “Framework for adaptive multi-scale simulation of textile reinforced concrete”. PhD, Thesis, univ. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen 2008.
- [Pel00] Peled, A., Benture, A.: “Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites”. *Cement and Concrete Research journal*, 30, 781-790, 2000.
- [Pho78] Phoenix, S.L.: “The random strength of series-parallel structures with load sharing among members”. *Probabilistic Mechanics*, 91-95, 1978.
- [Pic01] Picandet, V. : “Influence d’un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des béton”. Thèse de doctorat, université de Nantes, 2001.
- [Poq09] Poquillon, D., Viguier, B., Andrieu, E.: “Experimental data about mechanical behaviour during compression tests for various matted fibres”. *Journal of Materials Science*, 40 (22), 5963 – 5970, 2005.
- [Pis01] Pisanova, E., Zhandarov, S., Mäder, E., Ahmad, I., Young, R.J.: “Three techniques of interfacial bond strength estimation from direct observation of crack initiation and propagation in polymer–fibre systems”. *Composites journal: Part A* 32, 435–443, 2001.
- [Pro80] Proctor, B.A., Yaleb, B.: “Glass fibres for cement reinforcement”. *Philosophical Transactions, Royal Society, London* A4294, 427- 436, 1980.
- [Pro82] Proctor, B.A., Oakley, D.R., and Litherland, K.L.: “Development in the assessment and performance of GRC over 10 years”. *Composites journal*, 13 (2), 173-179, 1982.
- [Rau97 ] Raupach, M., L. Wolff.: Durability of adhesion of epoxy coatings on concrete; causes of delamination and blistering
- [Rau06] Raupach, M., Orlowsky, J., Büttner, T., Dilthey, U., Schleser, M.: “Epoxy-impregnated textiles in concrete- load bearing capacity and durability in proceedings”. 1<sup>st</sup> International RILEM Conference on Textile Reinforced concrete (ICTRC), 6th-7th September 2006, Aachen, 77-88, 2006.
- [Rei06] Reinhardt, H.-W., Krüger, M., Bentur, A., Brameshuber, W., Banholzer, B., Curbach, M., Jesse, F., Mobasher, B., Peled, A., Schorn, H.: “Composite materials” - 6.1 Bond, in book (Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC), ISBN: 2-912143-99-3, 2006, 69, 83-131.
- [Ron01] Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., Zeng, H. M.: “The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites”. *Composites Science and Technology J*, 61 (10), 1437-1447, 2001.
- [Sed07] Sedan, D., Pagnoux C., Smith A., Chotard, T.: “Propriétés mécaniques de matériaux enchevêtrés à base de fibre de chanvre et matrice cimentaire”. 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007, France.
- [Sed04] Sedelnik, N.: “Properties of hemp Fibre cottonised by biological modification of hemp hackling noils”. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, No. 1 (45), 12, 2004.

- [Sej2002] Sejnoha, M., Zeman, J.: “Micromechanical Analysis of Random Composites”. In: CTU Reports 6, No. 1, Prague: Czech Technical University, 2002.
- [Set02] Setzer, M. J., Liebrecht, A.: “Forst dilatation and pore system of hardened cement paste under different storage conditions”. IBPM -Institute of Building Physics and Materials Science, University of Essen, Germany, 2002.
- [Sha76] Shah, S.P., Naaman, A.E.: “Mechanical Properties of Glass and Steel Fiber Reinforced Mortar”. ACI Journal Proceedings, 73, 50-53,1976.
- [Sha87] Shah ,S.P., Jenq, Y.S.: “Fractures mechanics of interfaces”. In: Symposium Proceeding Materials Research Society, 114, 205-216, 1987.
- [Sin04] Singh,S., Shukla, A., Brown, R.: “Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix”. In proceeding : Cement and Concrete Research 34, 1919–1925, 2004.
- [Smi81] Smith, R.L., Phoenix, S.L.: “Asymptotic distributions for the failure of fibrous materials under series-parallel structure and equal load-sharing”. Journal of Applied Mechanics, 48, 75-82, 1981.
- [Sor93] Soroushian, S., Tlili, A., Yohena M., Tilsen, Ben.L.: “Durability characteristics of polymer-modified glass fiber reinforced concrete”. ACI Materials Journal, 1993.
- [Voř06] Vořechovský, M., Chudoba, R.: “Stochastic modeling of multi-filament yarns: II. Random properties over the length and size effect”. International Journal of Solids and Structures, 43, 435–458, 2006.
- [Vér94] Véronique, B.B.: “Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons méthodes, analyse, interprétations”. Book- ISBN: 2-7208-5030-1, 1994.
- [Vos06] Voss, S., Hegger, J.: “Dimension of textile reinforced concrete structures”. 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete ICTRC, N°16, 151 - 160, 2006.
- [Wal94] Wallenberger, F.T.: “Melt viscosity and modulus of bulk glasses and bers: Challenges for the next decade”. In Present State and Future Prospects of Glass Science and Technology, Proc. of the Norbert Kreidl Symposium (Triesenberg, Liechtenstein), 63-78, 1994.
- [Wan87] Wang, Y, Li, V.C., Backer, S.: “Analysis of synthetic fiber pullout from a cement matrix”. Symposium Proceeding Materials Research Society, 114, 159-165, 1987.
- [Wei39] Weibull, W.: “The phenomenon of rupture in solids”. Royal Swedish Institute of Engineering Research (Ingenioersvetenskaps Akad. Handl.), Stockholm 153, 1–55.
- [Wei09] Weichold, O., Hojczyk, M.: “Size effects in multifilament glass-rovings: the influence of geometrical factors on their Performance in textile- reinforced concrete”. In Textile Research Journal, SAGE publications, 79(16), 1438-1445, 2009.
- [Won04] WONG, C.M.: “Use of short fibres in structural concrete to enhance mechanical properties”. Course ENG 4111 and ENG 4112 Research Project, 2004.
- [Wre08] Wretfors, C.: “Hemp fibre and reinforcements of wheat gluten plastics”. Lic. thesis. Dept. of Agriculture - farming systems, Technology and Product Quality, SLU, 2008.

- [Yan94] Yan Fu, Shamim A. Sheikh and Douglas Hooton, R.: "Microstructure of highly expansive cement pastes". In ACI Materials Journal, 91-1, 46-53, 1994.
- [Zas02] Zastrau, B., Lepenies, I., Richter, M.: "Development of constitutive material laws of fine grained concrete with textile reinforcement". In: Arbeits- und Ergebnisbericht des Sonderforschungsbereiches 528 "Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung", Periode II/1999-I/2002. Technische Universität Dresden, 121-164, 2002.
- [Zha09] Zhang, X.B., Fiorio, B., Aljewifi, H., Cabrillac, R., Li, J.: "Modeling the bond and failure behavior of continuous yarn reinforced cement composites". International Symposium on Concrete and Cementitious Materials, 14 July 2009. Canada.
- [Zha10] Zhang, X.B., Aljewifi, H., Li, J., Fiorio, B.: "Etude du comportement à l'arrachement des matériaux cimentaires renforcés par des fibres Synthétiques". In : 28èmes rencontres de l'AUGC 2010 – La Bourboule – 2 au 4 juin 2010, France.
- [Zha06] Zhandarov, S.; Gorbatkina, Yu. A.; Mäder, E.: "Adhesional pressure as a criterion for interfacial failure in fibrous microcomposites and its determination using a microbond test". In: Composites and Science Technology 66 S, 2610-2628, 2006.

## Site consultés

- [1] Bahlouli, N., IPST-ULP : Cours Matériaux Composites / DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle.
- [2] [http://ts-dep.web.cern.ch/ts-dep/groups/mme/mde/Caracteristiques\\_materiaux.pdf](http://ts-dep.web.cern.ch/ts-dep/groups/mme/mde/Caracteristiques_materiaux.pdf)
- [3] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_de\\_verre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_de_verre)
- [4] [http://gev.industrie.gouv.fr/gev-mecaflu/mecaflu/s8/p20\\_mecaflu\\_s8.htm](http://gev.industrie.gouv.fr/gev-mecaflu/mecaflu/s8/p20_mecaflu_s8.htm)