

# Influence de la maturité de la matrice et de la géométrie des fibres sur le comportement mécanique d'un composite cimentaire fibré ultra-performant

Édouard PARANT  
Pierre ROSSI \*

Laboratoire central des ponts et chaussées

## ■ RÉSUMÉ

L'influence de deux paramètres (maturité de la matrice cimentaire, géométrie de la plus grande fibre) sur le comportement en flexion d'éprouvettes en composite cimentaire fibré ultra-performant à renforts multi-échelles a été étudiée.

Malgré un traitement thermique, la matrice cimentaire ultra-performante à très faible rapport eau/liant poursuit sa maturation et voit sa compacité augmenter dans le temps. Cette augmentation se traduit par une augmentation non négligeable (20 %) du module de rupture du matériau quand l'âge du matériau passe de un mois à plus de dix mois.

Deux solutions sont pertinentes pour améliorer le comportement en flexion : choisir des dimensions de fibres qui permettent, à rapport longueur/diamètre similaire, d'augmenter la surface totale frottante entre les fibres et la matrice ; choisir une géométrie de fibre, toujours à rapport longueur/diamètre similaire, permettant d'augmenter les frottements entre la matrice et la fibre. Vis-à-vis de cet objectif, une fibre torsadée est plus efficace qu'une fibre lisse munie de crochets à ses extrémités.

## Influence of matrix maturity and fiber geometry on the mechanical behavior of an ultra high-performance fiber cement composite

### ■ ABSTRACT

*The influence of two parameters (cementitious matrix maturity and longest fiber geometry) on the bending behavior of specimens of an ultra high-performance fiber cement composite with multi-scale reinforcements has been studied herein. Despite being exposed to heat treatment, the ultra high-performance cementitious matrix with a very low water/binder ratio continues its maturation process with an increasing level of compactness over time. This increase is reflected by a significant rise (20%) in the material's rupture modulus as material age extends from one month to over ten months.*

*Two solutions prove pertinent in improving bending behavior:*

- *choosing fiber dimensions that enable, for a similar length-to-diameter ratio, increasing the total friction surface area between fibers and the matrix; and*
- *choosing a fiber geometry, once again with a similar length-to-diameter ratio, that enables increasing the level of friction between matrix and fiber. A twisted fiber fulfills this objective more effectively than a smooth fiber fitted with hooks at its ends.*

\* AUTEUR À CONTACTER :

Pierre ROSSI  
pierre.rossi@lcpc.fr

## INTRODUCTION

Depuis quelques années, le Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) travaille sur le développement de nouveaux composites cimentaires, dans le but d'obtenir des matériaux suffisamment résistants et ductiles permettant de concevoir des structures ou des éléments structuraux sans autres renforts que les fibres métalliques.

Ces matériaux constituent la mise en application directe du « Multi-Scale Concept » développé par Rossi [1]. L'idée de base consiste à mélanger des fibres courtes avec des fibres plus longues afin d'intervenir à la fois à l'échelle du matériau (augmentation de la résistance en traction) et à l'échelle de la structure (capacité portante et ductilité). On obtient ainsi un Multi-Scale Cement Composite (MSCC).

Le CEMTEC<sup>multiscale</sup>® fait partie des MSCC. Il a fait l'objet d'un dépôt de brevet mondial par le LCPC en mars 2001. Il contient trois géométries différentes de fibres métalliques, soit trois dimensions de renfort, ceci pour un pourcentage volumique total de fibres égal à 11 % :

- première dimension : fibres dont la longueur est inférieure à 2 mm ;
- deuxième dimension : fibres dont la longueur est comprise entre 2 et 6 mm ;
- troisième dimension : fibres dont la longueur est supérieure ou égale à 20 mm.

Le programme de recherche du LCPC sur ce matériau comporte des essais mécaniques pour caractériser les différents comportements mécaniques du composite (comportement statique, en fatigue, à grandes vitesses de sollicitation, etc.), des essais de durabilité [2], des essais à l'échelle 1 sur des éléments structuraux et des essais pour optimiser le procédé. Dans ce cadre, des essais de flexion en régime quasi-statique ont été réalisés en faisant varier la maturité du matériau et la géométrie de la fibre la plus grande. En effet, pour ce qui concerne la première et la deuxième dimension des fibres utilisées dans le composite cimentaire, il n'est guère possible d'un point de vue technologique de modifier la géométrie des fibres en leur adjoignant par exemple des crochets, des torsades ou des ondulations.

## FORMULATIONS ÉTUDIÉES

Trois formulations ont été étudiées qui se distinguent uniquement par la géométrie de la plus grande fibre, les autres fibres étant identiques et le pourcentage volumique relatif à chaque dimension de fibre étant également identique. La formulation de référence du matériau est indiquée dans le **tableau 1**.

**tableau 1**  
Formulation du  
CEMTEC<sup>multiscale</sup>® étudié.

Constituants		Quantité	Unité
Ciment		1 050	kg/m <sup>3</sup>
Sable		514	kg/m <sup>3</sup>
Fumée de silice		268	kg/m <sup>3</sup>
Superplastifiant		44	kg/m <sup>3</sup>
Eau totale		211	L/m <sup>3</sup>
<b>Fibres Métalliques</b>		<b>858</b>	kg/m <sup>3</sup>
Fumée de silice/Ciment	0,255	Superplastifiant/Liant : 1,02 %	
Sable/Ciment	0,49	Densité : 2,98	
<b>Eau Totale/Liant</b>	<b>0,16</b>		

La plus grande fibre est dans les trois formulations composée d'une fibre en acier tréfilé à haute limite élastique ( $f_e > 1\,500$  MPa). Les caractéristiques géométriques des trois types de fibres utilisées sont les suivantes :

- fibre 1 : fibre munie de crochets à ses extrémités dont la longueur est égale à 25 mm et le diamètre égal à 0,3 mm ;
- fibre 2 : fibre torsadée dont la longueur est égale à 25 mm et le diamètre égal à 0,3 mm ;
- fibre 3 : fibre tréfilée droite dont la longueur est égale à 20 mm et le diamètre égal à 0,25 mm.

L'élancement, défini comme le rapport *longueur/diamètre de la fibre* ( $L_f/\varnothing_f$ ), est sensiblement identique pour les trois fibres avec une valeur de 83,3 pour les deux premières fibres et de 80 pour la troisième. Il conditionne en partie l'efficacité mécanique du renfort fibré.

## ÂGE DES MATÉRIAUX AU MOMENT DES ESSAIS

Dans le cadre d'une première série d'essais, les deux composites cimentaires contenant respectivement la fibre 1 et la fibre 3 ont été testés à un âge identique de vingt-huit jours.

Dans le cadre d'une seconde série d'essais, les deux composites cimentaires contenant respectivement la fibre 1 et la fibre 2 ont été testés à des âges similaires, compris entre dix et quatorze mois.

Toutes les éprouvettes testées (toutes formulations confondues) ont fait l'objet d'un traitement thermique. Ce traitement consiste à placer les éprouvettes dans une étuve à 90 °C pendant quatre jours, ceci quarante-huit heures après leur démoulage.

## ESSAIS MÉCANIQUES RÉALISÉS

Les essais mécaniques réalisés ont été identiques quelle que soit la géométrie de la fibre longue utilisée ou la maturité du matériau. Il s'agit d'essais de flexion quatre points sur des dalles dont les dimensions sont les suivantes : longueur 600 mm, largeur 200 mm, épaisseur 40 mm. Lors de ces essais de flexion, la distance entre les appuis inférieurs est de 420 mm et la distance entre les appuis supérieurs de 140 mm. Le système des appuis permet un déplacement libre de l'éprouvette parallèlement à sa longueur. L'essai est réalisé à une vitesse de vérin imposée égale à 0,3 mm/min ; la mesure de la flèche est effectuée à l'aide d'un extensomètre spécial, placé sur l'éprouvette, conçu pour éliminer les déplacements parasites au niveau des appuis. Neuf dalles ont été testées par formulation et par niveau de maturité du matériau.

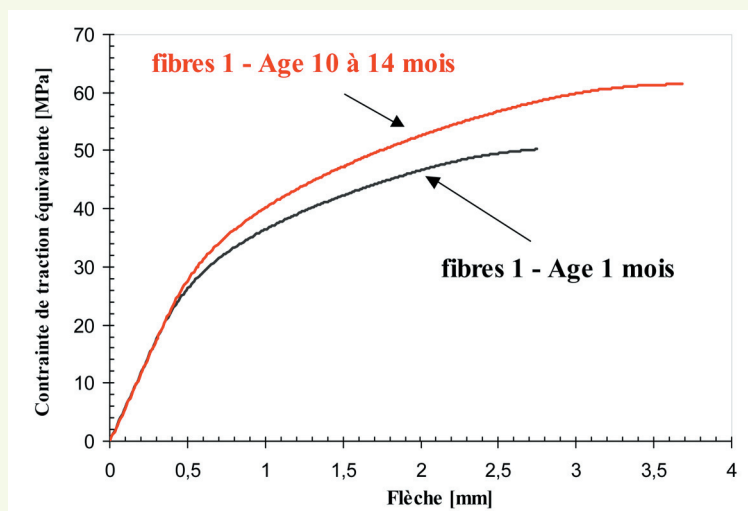
## INFLUENCE DE LA MATURITÉ DU MATÉRIAU

Sur la **figure 1** sont présentées les courbes moyennes *contrainte de traction par flexion-flèche* représentatives de la formulation utilisant la fibre 1. L'une des deux courbes est relative au matériau âgé de un mois au moment de l'essai, l'autre au matériau âgé de plus de dix mois. Les courbes se limitent à la partie précédant le pic d'effort, synonyme, pour les structures sollicitées, à la fin du comportement multi-fissurant du composite.

Sur cette figure, on constate que le matériau le plus âgé présente un meilleur comportement mécanique en flexion que le matériau plus jeune, que ce soit au regard du module de rupture (contrainte de traction par flexion maximale) qu'au regard de la flèche correspondant à ce module de rupture. Le gain relatif au module de rupture est de 20 %.

Seule l'évolution des caractéristiques mécaniques de la matrice, liée à une augmentation de sa compacité, permet d'expliquer ce résultat. En effet, l'augmentation de la résistance en traction de

**figure 1**  
Courbes moyennes  
contrainte de traction  
par flexion-flèche  
représentatives de  
deux états de maturité  
différents pour une même  
formulation.



la matrice et de l'interface matrice/fibre (qu'induit une augmentation de la compacité de la matrice) conduit inévitablement à un meilleur comportement en flexion du matériau composite. Il semble donc que le traitement thermique ne suffise pas pour activer l'ensemble des réactions d'hydratation, notamment celles faisant intervenir la fumée de silice. Ceci peut s'expliquer par la très forte teneur en silice amorphe (25,5 % du poids de ciment ; cf. **tableau 1**).

Afin de vérifier si cette explication est pertinente, il a été décidé de prélever au sein des éprouvettes de flexion des prismes permettant de réaliser des essais de compression. En effet, il est parfaitement connu [3] que la résistance en compression d'un composite fibré mis en place par coulage est essentiellement due à la résistance en compression de sa matrice et donc à sa compacité.

Pour les deux maturités, les éprouvettes de compression ont été prélevées par sciage dans les éprouvettes de flexion déjà testées, mais en dehors de la zone de moment constant. Les éprouvettes de compression sont donc prismatiques de dimensions 180 × 80 × 40 mm.

Les résistances moyennes en compression des éprouvettes sont respectivement de 225 MPa et de 268 MPa quand la maturité de la matrice passe de vingt-huit jours à plus de dix mois. On constate donc un gain d'environ 19 %, pas très éloigné de celui obtenu lors des essais de flexion. L'hypothèse formulée paraît donc pertinente.

## INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE DE LA PLUS GRANDE FIBRE

Sur la **figure 2** sont présentées les courbes moyennes *contrainte de traction par flexion-flèche* représentatives des deux formulations contenant respectivement les fibres 1 et 3. La maturité des deux matériaux est de vingt-huit jours.

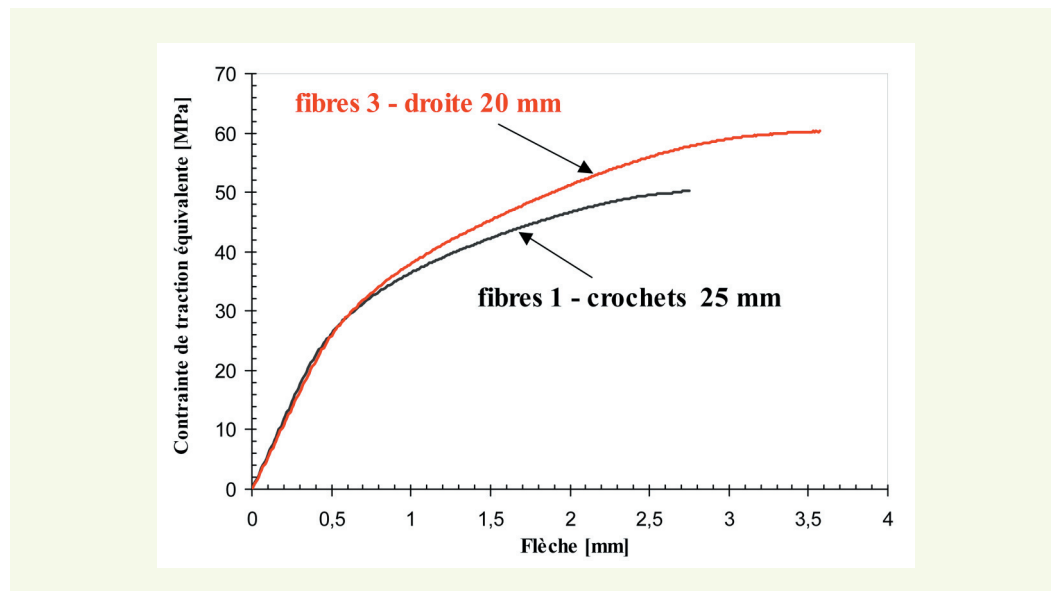
Sur la **figure 3** sont présentées les courbes moyennes *contrainte de traction par flexion-flèche* représentatives des deux formulations contenant respectivement les fibres 1 et 2. La maturité des deux matériaux est comprise entre dix et quatorze mois.

La **figure 2** montre que la formulation contenant la fibre 3 conduit à un comportement mécanique en flexion assez supérieur à celui relatif à la formulation contenant la fibre 1.

Les différences objectives entre les deux formulations sont les suivantes :

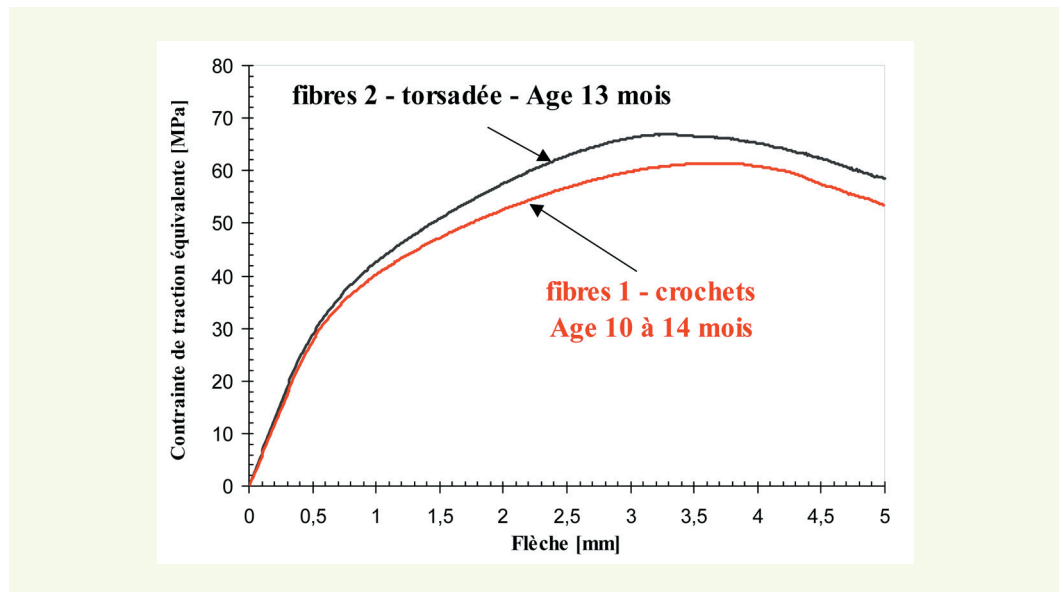
- la fibre 1 a un meilleur ancrage mécanique que la fibre 3 car elle est munie de crochets à ses extrémités ;
- les fibres 3 sont 1,8 fois plus nombreuses dans la matrice que les fibres 1, pour un même pourcentage volumique.

**figure 2**  
Courbes moyennes  
contrainte de traction  
par flexion-flèche  
représentatives des deux  
formulations contenant  
respectivement les fibres 1  
et 3. La maturité de la  
matrice est de vingt-huit  
jours.



**figure 3**

Courbes moyennes  
contrainte de traction  
par flexion-flèche  
représentatives des deux  
formulations contenant  
respectivement les fibres  
1 et 2. La maturité de la  
matrice est comprise entre  
dix et quatorze mois.



Une fibre métallique qui « pont » une fissure dissipe de l'énergie sous deux formes :

- par frottement le long de la fibre,
- par plastification au niveau des ancrages mécaniques.

Plus la matrice est de faible compacité, plus la plastification de la fibre (lors du travail de la fibre) a un poids important vis-à-vis de l'énergie totale dissipée durant la rupture du composite fibré ; *a contrario*, plus la matrice est compacte, plus c'est le frottement qui prime. Il est donc important de comparer la surface frottante totale générée par les deux dimensions de fibre.

Soient  $S_1$  et  $S_2$ , et  $l_1$  et  $l_2$ , la section et la longueur relatives respectivement à la fibre à crochet et à la fibre droite.

Le pourcentage de fibres incorporé étant identique pour les deux géométries de fibre, on peut écrire que :

$$n_1 \cdot S_1 \cdot l_1 = n_2 \cdot S_2 \cdot l_2$$

où  $n_1$  et  $n_2$  sont les nombres de fibres relatives respectivement aux deux géométries de fibre.

La relation ci-dessus devient alors :

$$n_1 \cdot r_1^2 \cdot l_1 = n_2 \cdot r_2^2 \cdot l_2$$

où  $r_1$  et  $r_2$  sont les rayons des fibres relatives respectivement aux deux géométries de fibre.

On a alors :  $n_1 = 0,56 n_2$ .

La surface totale frottante  $\Phi_1$  relative à la fibre à crochet est égale à  $n_1 \cdot s_1 \cdot l_1$ , où  $s_1$  est la surface frottante d'une fibre.

La surface totale frottante  $\Phi_2$  relative à la fibre droite est égale à  $n_2 \cdot s_2 \cdot l_2$ , où  $s_2$  est la surface frottante d'une fibre.

On a donc :  $\Phi_1 / \Phi_2 = 0,84$ .

La **figure 2** indiquant qu'il a un gain d'environ 20 % sur le module de rupture quand on passe de la fibre munie de crochets à la fibre droite (respectivement 50 et 60 MPa), la relation entre ce gain de résistance et l'augmentation de la surface frottante totale paraît pertinente.

Si l'on considère maintenant la **figure 3**, on constate que la formulation contenant la fibre 2 conduit à un comportement mécanique en flexion supérieur à celui relatif à la formulation contenant la fibre 1. La seule différence entre les deux fibres concerne leur géométrie. La fibre 1 est munie de

crochets à ses extrémités, alors que la fibre 2 est torsadée sur toute sa longueur. L'hypothèse la plus plausible pour expliquer cette différence, cohérente avec ce qui a été écrit précédemment, est que les frottements fibre-matrice générés par l'existence des torsades sont plus importants que ceux relatifs à la fibre lisse.

Enfin, il est intéressant de noter que, si l'on prend en compte le fait que le module de rupture du composite augmente de 20 % quand la maturité de la matrice passe de un mois à plus de dix mois, les matériaux constitués avec les fibres 1 et 3 ont des comportements en flexion similaires.

## CONCLUSIONS

Les principaux résultats de l'étude de l'influence de deux paramètres (maturité de la matrice cimentaire, géométrie de la plus grande fibre) sur le comportement en flexion d'éprouvettes en composite cimentaire fibré ultra-performant à renforts multi-échelles peuvent se résumer ainsi :

- malgré un traitement thermique, la matrice cimentaire ultra-performante à très faible rapport eau/liant poursuit sa maturation et voit sa compacité augmenter dans le temps. Cette augmentation se traduit par une augmentation non négligeable (20 %) du module de rupture du matériau quand l'âge du matériau passe de un mois à plus de dix mois (quatorze mois maximum dans le cadre de l'étude) ;
- deux solutions apparaissent comme pertinentes pour améliorer le comportement en flexion :
  - ① choisir des dimensions de fibres qui permettent, à rapport longueur/diamètre similaire, d'augmenter la surface totale frottante entre les fibres et la matrice ;
  - ② choisir une géométrie de fibre, toujours à rapport longueur/diamètre similaire, permettant d'augmenter les frottements entre la matrice et la fibre. Vis-à-vis de cet objectif, une fibre torsadée est plus efficace qu'une fibre lisse munie de crochets à ses extrémités.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **ROSSI P., ACKER P., MALIER Y.**, Effect of steel fibres at two stages : the material and the structure, *Materials and Structures*, vol. **20**, **1987**, pp. 436-439.
- 2 **PARANT É.**, *Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères : fatigue, choc, corrosion*, thèse de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, France, **2003**, 248 pages.
- 3 **ROSSI P.**, *Les Bétons de fibres métalliques*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, **1998**.