

Comportement post-fissuration en traction uniaxiale des Bétons de Fibres Métalliques (BFM)

Étude expérimentale des effets d'échelle

Abdelmalek ZERGUINI

Institut de Génie Civil de l'Université de Constantine (Algérie)

Pierre ROSSI

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Dans des recommandations française et internationale concernant le dimensionnement des structures comportant des Bétons de Fibres Métalliques (BFM), le comportement post-fissuration en traction uniaxiale des BFM constitue la caractéristique mécanique principale nécessaire pour les calculs. Cette caractéristique mécanique est obtenue à partir d'un essai faisant aussi l'objet de recommandations française et internationale. Une question se pose concernant cet essai et l'information qu'il fournit : il s'agit de l'existence d'un effet d'échelle possible.

Pour étudier ces effets d'échelle, trois types de BFM, différant par leurs résistances en compression, les dimensions des fibres et les pourcentages de fibres incorporés, trois diamètres d'éprouvette par BFM et, approximativement, dix éprouvettes par diamètre ont été testés.

Aucune dépendance significative de l'énergie moyenne post-fissuration en traction uniaxiale, ainsi que de la dispersion relative à cette caractéristique (par ailleurs très élevée), en fonction des dimensions de l'éprouvette n'a pas été mise en évidence.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

POST-CRACKING BEHAVIOR IN UNIAXIAL TENSION OF METALLIC FIBER-REINFORCED CONCRETE (MFRC): EXPERIMENTAL STUDY OF SCALE EFFECTS

Within both the French and international recommendations regarding the design of structures composed of Metallic Fiber-Reinforced Concrete (MFRC), the post-cracking behavior in uniaxial tension of this material constitutes the primary mechanical characteristic required to perform computations; this mechanical characteristic is obtained from results of a test that has also been addressed in French and international recommendations. The query stemming from this test and the information yielded therein pertains to whether a potential scale effect exists.

In order to study these scale effects, tests were conducted on three types of MFRC, each differing in terms of compressive strength, fiber dimensions and percentage of incorporated fiber, using three distinct specimen diameters per MFRC type and approximately ten specimens for each diameter.

No significant dependence could be detected for either the average post-cracking energy in uniaxial tension or the relative dispersion with respect to this characteristic (which happens to be quite high) as a function of specimen dimensions.

FIELD: Structural engineering.

Introduction

Dans des recommandations française [1] et internationale [2] concernant le dimensionnement des structures comportant des Bétons de Fibres Métalliques (BFM), le comportement post-fissuration en traction uniaxiale des BFM constitue la caractéristique mécanique principale nécessaire pour les calculs. Cette caractéristique mécanique est obtenue à partir d'un essai faisant aussi l'objet de recommandations française et internationale. Or, une question se pose encore concernant cet essai et l'information qu'il fournit ; il s'agit de l'existence d'un effet d'échelle possible. En d'autres termes, on ne sait pas, actuellement, si le diamètre de l'éprouvette de traction uniaxiale (l'essai de traction uniaxiale recommande l'utilisation d'une éprouvette cylindrique) influe sur la dispersion et la moyenne relatives au comportement post-fissuration en traction uniaxiale des BFM. C'est pour apporter des éléments de réponse à cette question que, dans le cadre d'une coopération internationale entre l'Institut de Génie Civil de l'Université de Constantine (Algérie) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), une importante étude expérimentale a été mise en œuvre au LCPC.

Conditions expérimentales

Pour étudier ces effets d'échelle, trois types de BFM, différant par leurs résistances en compression, les dimensions des fibres et les pourcentages de fibres incorporés, trois diamètres d'éprouvette par BFM et, approximativement, dix éprouvettes par diamètre ont été testés.

Les trois BFM sont les suivants :

- un BFM (BFM1) ayant une résistance moyenne en compression avoisinant 50 MPa, contenant 78 kg/m^3 de fibres cylindriques tréfilées munies de crochets à leurs extrémités, d'une longueur de 60 mm et d'un diamètre de 0,75 mm (fibre 60/75) ;
- un BFM (BFM2) ayant une résistance moyenne en compression avoisinant 90 MPa, contenant 100 kg/m^3 de fibres similaires à celles utilisées dans le BFM1, mais d'une longueur de 30 mm et d'un diamètre de 0,5 mm (fibre 30/50) ;
- un BFM (BFM3) ayant une résistance moyenne en compression avoisinant 65 MPa, contenant 54 kg/m^3 de fibres de fonte amorphe en forme de ruban, d'une longueur de 20 mm, d'une largeur de 1,6 mm et d'une épaisseur de 0,03 mm (fibre 20/3).

L'application industrielle visée dans l'étude concerne les dalles, les dallages ou les planchers, en d'autres termes ce que l'on appelle communément les structures 2D.

Afin de réaliser des essais de traction uniaxiale sur des éprouvettes représentatives du BFM dans la structure réelle, il est indispensable de prélever ces éprouvettes sur un élément de structure lui-même représentatif de cette structure réelle.

Dans le cas des structures 2D, il est parfaitement connu que l'orientation préférentielle des fibres est plutôt orthotrope. Par conséquent, l'élément en BFM dans lequel sont prélevées les éprouvettes doit avoir des dimensions suffisantes pour permettre à cette orthotropie de se créer. Il convient également de prélever un nombre important d'éprouvettes (il ne faut pas oublier, comme il a été indiqué dans l'introduction, que, pour chaque BFM, l'étude sur les effets d'échelle a nécessité le prélèvement d'au moins 30 éprouvettes).

Composition des BFM

Les compositions respectives du BFM1, du BFM2 et du BFM3 mentionnées dans l'introduction sont présentées dans les tableaux I, II et III. Le même superplastifiant, à 40 % d'extrait sec, a été utilisé pour les trois compositions.

Maniabilité des BFM

La maniabilité de deux BFM sur trois (BFM1 et BFM2) a été déterminée à l'aide de l'essai à la table à choc suivant la norme allemande et internationale [DIN ISO DP 9812].

Dans le tableau IV sont indiqués respectivement et pour les deux BFM le diamètre de la « galette » avant et après les 15 chocs normalisés.

TABLEAU I
Composition de BFM1 (renforcé de fibres métalliques à crochets 60/75 mm)

Nature des composants	Dosage (kg/m ³)
Fibres	78
Ciment CPA HP r	425
Eau	191
Superplastifiant	4,25
Sable silico-calcaire concassé 0/4 mm	894
Granulat silico-calcaire concassé 5/20 mm	832

TABLEAU II**Composition de BFM2 (renforcé de fibres métalliques à crochets 30/50 mm)**

Nature des composants	Dosage (kg/m ³)
Fibres	100
Ciment CPA HP	430
Eau	170
Fumée de silice	43
Superplastifiant	10,6
Sable (1) 0/5	497
Sable (2) silico-calcaire 0/4 mm	497
Granulat 4/12 mm	765

TABLEAU III**Composition de BFM3 (renforcé de fibres de fonte amorphe)**

Nature des composants	Dosage (kg/m ³)
Fibres	54
Ciment CPA 55	360
Eau	200
Superplastifiant	16
Sable 0,08/5 mm	1 275
Filler calcaire 0/100 µm	225
Micro-killer calcaire 0/10 µm	210

Au regard du tableau IV, on peut faire les constatations suivantes :

- les maniabilités des deux BFM sont voisines,
- cette maniabilité correspond à des bétons très plastiques ou fluides.

Il est à signaler que la maniabilité du BFM3, même si elle n'a pas fait l'objet de mesures comme pour le BFM1 et le BFM2, était visuellement similaire à celle de ces 2 derniers.

TABLEAU IV**Résultats de la table à choc pour les 2 BFM**

Rhéologie	Diamètre de la « galette » avant chocs (cm)	Diamètre de la « galette » après 15 coups (cm)	Observations
BFM1	48 à 50,5	53,5 à 57	– pas de ségrégation – affaissement au cône d'Abrams de 16 cm
BFM2	54 à 55	61 à 63	– pas de ségrégation – affaissement au cône d'Abrams de 14 cm

Fabrication des éprouvettes

L'élément de structure dans lequel sont prélevées les éprouvettes est une dalle parallélépipédique ayant des côtés respectivement égaux à 1 020 et 920 cm, et une épaisseur de 180 mm.

Les éprouvettes sont prélevées par carottage perpendiculairement aux plus grands côtés de la dalle, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction de coulage de celle-ci.

Les éprouvettes cylindriques carottées font respectivement :

- 150 mm de diamètre et 150 mm de hauteur,
- 100 mm de diamètre et 100 mm de hauteur,
- 68 mm de diamètre et 68 mm de hauteur.

Pour chaque géométrie, neuf éprouvettes sont carottées.

Une fois carottées, les éprouvettes sont entaillées en leur centre sur une profondeur respectivement égale à :

- 20 mm pour les éprouvettes de 150 mm de diamètre,
- 15 mm pour les éprouvettes de 100 mm de diamètre,
- 10 mm pour les éprouvettes de 68 mm de diamètre.

La largeur de l'entaille est de 2 mm.

Il faut signaler que, pour chaque BFM, des éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur ont été coulées en même temps que les dalles. Ces éprouvettes sont destinées à la détermination de la résistance en compression des BFM.

L'essai de traction uniaxiale

L'essai de traction uniaxiale qui a été mis en œuvre dans cette étude, a été tout d'abord conçu au LCPC [3], puis a été inclus dans des recommandations française [1] et internationale [4]. Nous allons ici en rappeler rapidement le principe.

L'éprouvette cylindrique est collée sur des casques de même diamètre vissés sur la presse. Les casques sont en alliage d'aluminium (AU4G), qui possède un rapport module d'Young/coefficient de Poisson proche de celui du béton, ce qui permet de réduire le frettage à l'interface casque/épreuve. Leur longueur a été optimisée par calcul aux éléments finis afin d'obtenir un champ de contrainte le plus homogène possible au sein de l'éprouvette.

Le comportement post-fissuration en traction se traduisant par la courbe contrainte de traction-ouverture de fissure, il faut mesurer cette ouverture de fissure. Cela est réalisé en utilisant un extensomètre J2P [5]. Celui-ci est constitué de 3 capteurs placés à 120° sur 2 anneaux en aluminium. Ces anneaux sont en contact avec l'éprouvette par l'intermédiaire de pointeaux montés sur lames élastiques et sont placés de part et d'autre de l'entaille réalisée sur l'éprouvette.

L'essai est conduit à vitesse d'ouverture de fissure imposée de 0,05 MPa/s jusqu'au pic de la matrice. Celle-ci est ensuite augmentée par palier jusqu'à une ouverture de la fissure de 3 mm.

Sur la figure 1 sont respectivement présentés un schéma et une photo relatifs au montage expérimental de l'essai de traction uniaxiale.

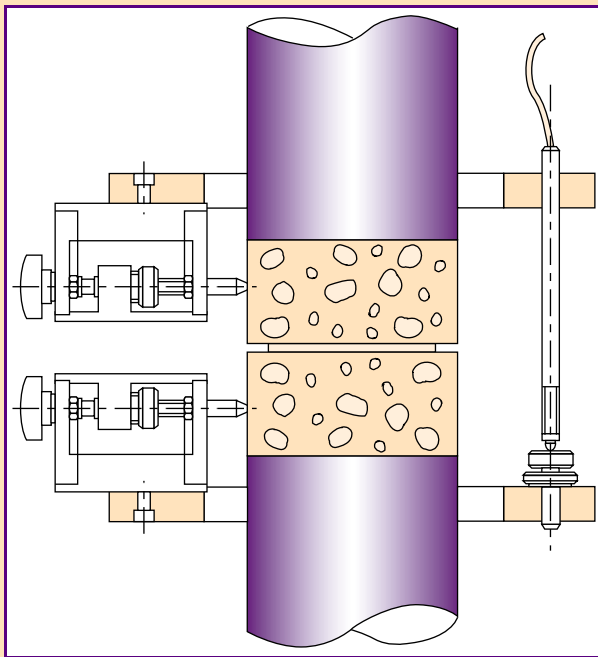
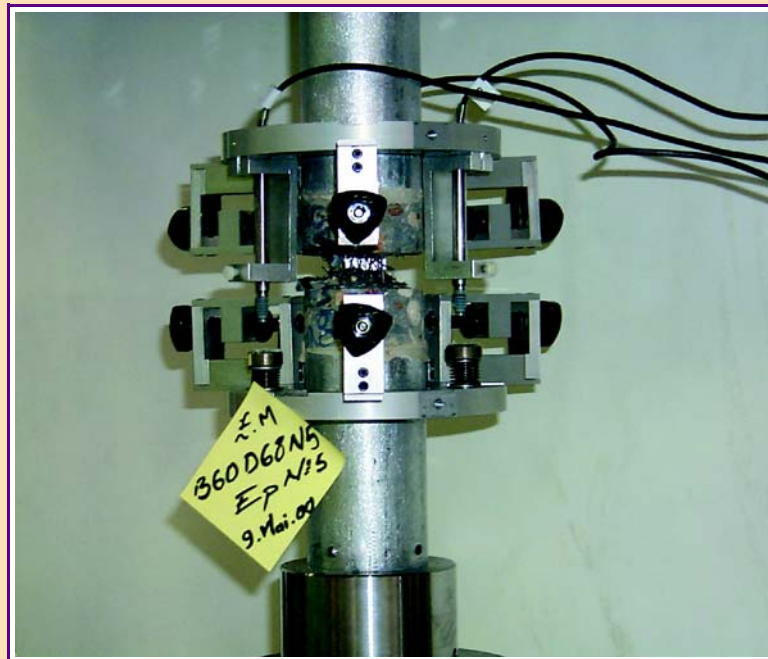


Fig. 1 - Schéma et photo relatifs au montage expérimental de l'essai de traction uniaxiale sur éprouvette entaillée.



Résultats

Les essais de compression réalisés sur les trois BFM ont donné les résultats suivants :

- BFM1 : résistance moyenne en compression égale à 54,5 Mpa,
- BFM2 : résistance moyenne en compression égale à 93,6 Mpa,
- BFM3 : résistance moyenne en compression égale à 65,3 Mpa.

Neuf éprouvettes par dimension d'éprouvette et par BFM ont été testées en traction uniaxiale, c'est-à-dire que 81 essais ont été réalisés.

À titre d'exemple, dans les figures 2, 3 et 4 sont présentées respectivement pour BFM1, BFM2 et BFM3 les neuf courbes contrainte de traction-ouverture de fissure relatives aux éprouvettes de diamètre 150 mm.

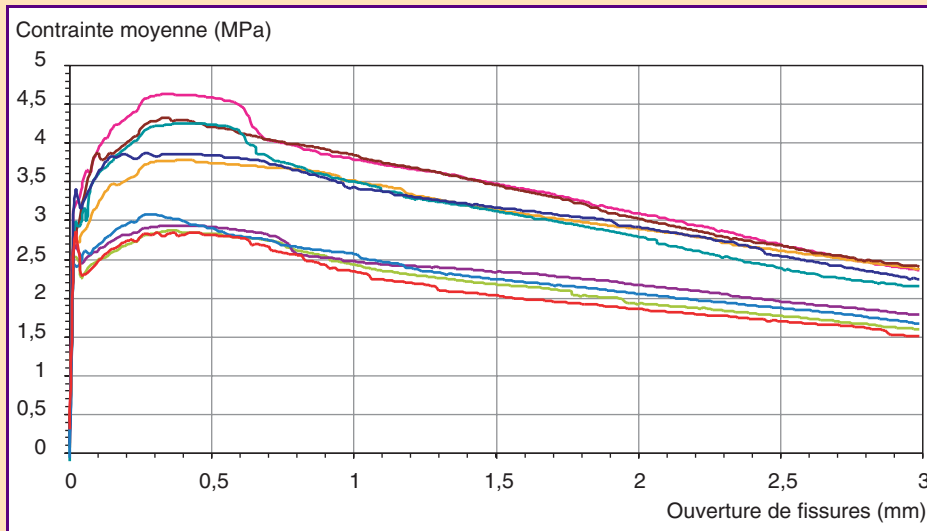


Fig. 2 - Courbe contrainte de traction-ouverture de fissure relative au BFM1 (épreuves de diamètre 150 mm).

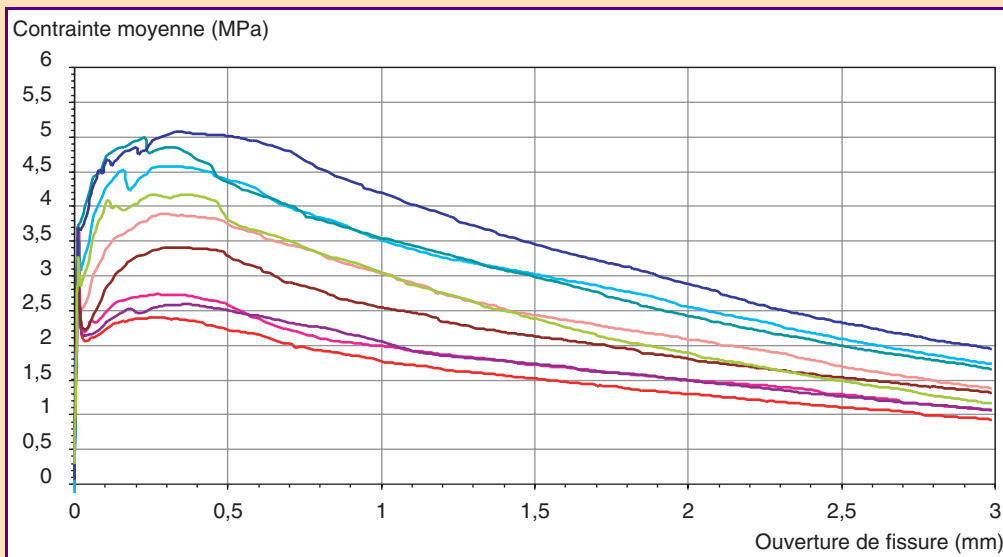


Fig. 3 - Courbe contrainte de traction-ouverture de fissure relative au BFM2 (épreuves de diamètre 150 mm).

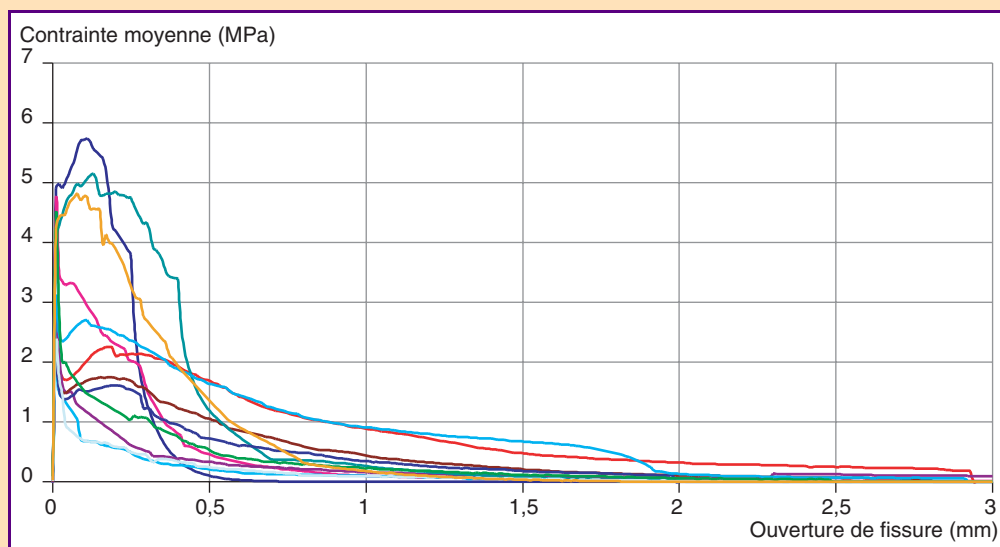


Fig. 4 - Courbe contrainte de traction-ouverture de fissure relative au BFM3 (épreuves de diamètre 150 mm).

Nous rappelons que la contrainte de traction est obtenue en divisant l'effort appliqué à l'éprouvette par la section de l'éprouvette au niveau de l'entaille (il s'agit donc d'une section réduite).

Analyse des résultats

À partir des essais de traction réalisés, l'objectif est de déterminer, d'une part une courbe moyenne contrainte de traction-ouverture de fissure relative, pour chaque BFM, à une dimension d'éprouvette et, d'autre part, d'évaluer la dispersion relative, pour chaque BFM et chaque dimension, au comportement post-fissuration en traction uniaxiale.

Il est difficile de caractériser la dispersion d'un ensemble de courbes, aussi a-t-on choisi d'étudier la variation d'une variable scalaire : l'aire située sous le diagramme contrainte-ouverture de fissure et mesurée entre deux bornes d'ouverture (w_i et w_m), qu'on appellera abusivement énergie E. On considère que la fissure est ouverte au niveau d'un capteur lorsque celui-ci fournit une mesure de déplacement égale à $w_0 = 10^{-4} L_b$, où L_b est la longueur de la base de mesure (10^{-4} correspond à une valeur conventionnelle de déformation de fissuration en traction des bétons). Lorsque les trois capteurs de déplacement utilisés pour la mesure de l'ouverture moyenne de la fissure indiquent une valeur de déplacement supérieure à w_0 , on considère que la fissure a traversé toute la section de l'éprouvette.

L'ouverture w_i correspond alors au déplacement moyen donné par les trois capteurs au moment où la fissure a traversé la section de l'éprouvette. L'ouverture w_m correspond à l'ouverture maximale définie pour l'application industrielle considérée.

L'énergie moyenne post-fissuration et la dispersion sur cette énergie sont respectivement appelées E_{moy} et $s(E)$. On peut calculer E_{moy} et $s(E)$ pour différentes ouvertures de fissure et cela pour chaque BFM et chaque dimension d'éprouvette. On a choisi de réaliser ces calculs pour les ouvertures de fissure suivantes : 0,1, 0,2, 0,3, 1, et 3 mm.

Les trois premières ouvertures de fissure correspondent aux ouvertures de service (fonction de l'agressivité de l'environnement) fixées par le règlement français relatif aux structures en béton armé, alors que les deux dernières peuvent être considérées comme des ouvertures de fissure ultimes correspondant à des structures de dimensions différentes.

Il faut également souligner que, pour ce qui concerne le BFM3, on a choisit de ne retenir, dans l'analyse, que les trois premières ouvertures de fissure, la résistance post-fissuration en traction devenant négligeable après 0,3 mm d'ouverture de fissure (fig. 4).

Dans les tableaux V, VI et VII sont synthétisés les résultats de l'analyse.

Avant de proposer une conclusion aux résultats présentés ci-dessus, il est utile de faire les commentaires suivants :

➤ lorsque l'on carotte une éprouvette en béton fibré, plus les fibres sont proches de la surface de la carotte, et inclinées par rapport à cette surface, plus la probabilité qu'elles soient coupées est grande. Cet artefact conduit nécessairement à une sous-estimation de l'énergie moyenne post-fissuration et

TABLEAU V

BFM1 – E_{moy} , $s(E)$ et $s(E)/E_{moy}$ en fonction du diamètre de l'éprouvette et de l'ouverture de fissure w_m

∅ (mm)	68			100			150		
	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$
0,1	0,21	0,05	0,24	0,21	0,09	0,43	0,28	0,04	0,14
0,2	0,45	0,10	0,22	0,50	0,15	0,30	0,62	0,10	0,16
0,3	0,69	0,15	0,22	0,82	0,23	0,28	0,98	0,17	0,17
1	2,28	0,49	0,21	2,76	0,66	0,24	3,35	0,63	0,19
3	5,36	1,50	0,28	6,60	1,76	0,27	8,38	1,62	0,19

TABLEAU VI

BFM2 – E_{moy} , $s(E)$ et $s(E)/E_{moy}$ en fonction du diamètre de l'éprouvette et l'ouverture de fissure w_m

\varnothing (mm)	68			100			150		
w_m (mm)	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$
0,1	0,27	0,11	0,41	0,26	0,07	0,27	0,30	0,07	0,23
0,2	0,59	0,26	0,44	0,57	0,18	0,31	0,61	0,26	0,43
0,3	0,94	0,41	0,44	0,91	0,31	0,34	0,97	0,42	0,43
1	2,82	1,16	0,41	2,82	1,00	0,35	3,36	0,92	0,27
3	6,06	2,29	0,38	6,39	2,25	0,35	7,38	2,00	0,27

TABLEAU VII

BFM3 – E_{moy} , $s(E)$ et $s(E)/E_{moy}$ en fonction du diamètre de l'éprouvette et l'ouverture de fissure w_m

\varnothing (mm)	68			100			150		
w_m (mm)	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$	E_{moy} (N/mm)	$s(E)$ (N/mm)	$s(E)/E_{moy}$
0,1	0,28	0,13	0,46	0,33	0,15	0,45	0,33	0,18	0,55
0,2	0,53	0,30	0,57	0,68	0,31	0,46	0,62	0,36	0,58
0,3	0,69	0,42	0,61	0,90	0,42	0,47	0,85	0,51	0,60

à une sur-estimation de la dispersion relative de cette énergie quand le diamètre de l'éprouvette diminue, le « poids » d'une fibre coupée sur le comportement post-fissuration d'une éprouvette diminuant quand son diamètre croît ;

➤ de même, lorsque l'on réalise l'entaille au milieu de l'éprouvette de traction afin de localiser la fissure, on coupe des fibres qui sont probablement bien orientées par rapport à la fissure. Plus la probabilité d'avoir, avant de réaliser l'entaille, un nombre de fibres bien orientées est faible, plus le poids de cet artefact sur l'énergie moyenne post-fissuration et sur la dispersion relative sur cette énergie est logiquement important. Or, la probabilité de rencontrer, au sein de l'éprouvette, des fibres bien orientées diminue avec le diamètre de cette éprouvette. En conséquence, l'énergie moyenne post-fissuration devrait logiquement diminuer et la dispersion relative sur cette énergie augmenter lorsque le diamètre de l'éprouvette diminue.

Si l'on tient compte de ce qui précède, on peut remarquer que les tableaux V, VI et VII ne mettent pas en évidence un effet d'échelle suffisamment significatif vis-à-vis du comportement post-fissuration des BFM étudiés.

En conséquence, d'un point de vue pratique, quand on doit déterminer le comportement post-fissuration en traction uniaxiale d'un BFM constitutif d'une structure donnée, il faut, quand cela est possible, réaliser des essais de traction uniaxiale sur des éprouvettes carottées ou sciées qui donnent des informations sur le comportement d'une section fissurée la plus représentative possible de la section fissurée considérée pour le dimensionnement ou la modélisation de la structure.

Dans le cas contraire, cette étude expérimentale montre que, plus la section fissurée de l'éprouvette testée est petite vis-à-vis de la section étudiée de la structure considérée, plus on se place du côté de la sécurité sans pour cela aboutir à un surdimensionnement excessif de cette structure.

Conclusion

Dans l'étude expérimentale présentée dans cet article, l'objectif était d'étudier si le comportement post-fissuration en traction uniaxiale des BFM était sensible ou non aux effets d'échelle ou, plus précisément, si ce comportement dépendait du diamètre de l'éprouvette testée.

Pour ce faire, trois types de BFM, très différents par leurs résistances en compression, ainsi que par leurs géométries et les pourcentages de fibres utilisés, ont fait l'objet d'essais de traction uniaxiale sur des éprouvettes cylindriques carottées et entaillées en leur milieu. Trois dimensions d'éprouvette ont été choisies par type de BFM, et neuf éprouvettes par dimension ont été testées.

Aucune dépendance significative de l'énergie moyenne post-fissuration en traction uniaxiale, ainsi que de la dispersion relative à cette caractéristique (par ailleurs très élevée), en fonction des dimensions de l'éprouvette n'a pu être mise en évidence.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier Joseph Serrano et son équipe ainsi que Claude Boulay, de la division « Bétons et Composites Cimentaires » du LCPC, pour leur aide importante dans l'étude expérimentale présentée dans le présent article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Les bétons de fibres métalliques. Méthodes de dimensionnement. Essais de caractérisation, de convenue et de contrôle, *Recommandations de l'AFGC sous la direction de P. Rossi*, **1995**.
- [2] Design of Steel Fibre Reinforced Concrete using the σ -w methods : principles and applications. Recommendations of RILEM TC 162-TDF, *Materials and Structures*, Vol. 35, **249**, **2002**, pp. 262-277.
- [3] LE MAOU F., Mise au point d'un essai de traction uniaxiale sur béton de fibres, *Note interne du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, **1992**.
- [4] Uniaxial tensile test for steel fibre reinforced concretes. Recommendations of RILEM TC 162-TDF, *Materials and Structures*, Vol. 34, **235**, **2001**, pp. 3-6,
- [5] BOULAY C., COLSON A., A concrete extensometer eliminating the influence of transverse strains on the measurement of longitudinal strains, *Materials and Structures*, Vol. 14, **1981**, pp. 35-38.