

Exemple d'étude expérimentale portant sur la formulation optimale d'un béton de fibres métalliques (BFM) pour dalle

Abdelmalek ZERGUINI

Institut de Génie civil
de l'université de Constantine (Algérie)

Pierre ROSSI

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

La recherche d'un compromis entre les performances mécaniques et le coût des bétons de fibres métalliques (BFM) reste la principale préoccupation pour réussir à imposer ce matériau dans le monde de la construction ainsi que dans de plus larges perspectives d'applications industrielles.

Lors d'une étude expérimentale menée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, la comparaison entre la réponse de deux BFM, en terme de comportement post-fissuration en traction uniaxiale, a paru intéressante.

En effet, le premier matériau, renforcé de 1 % (en volume) de fibres longues (60 mm) d'acier et présentant une résistance moyenne en compression de 54,5 MPa, a développé une énergie post-fissuration supérieure à celle du second, renforcé de 1,28 % de fibres plus courtes (30 mm) et présentant une résistance à la compression de 93,6 MPa.

Ce résultat *a priori* inattendu doit être lié à l'orientation préférentielle des fibres métalliques pour une application industrielle donnée ; ce phénomène a fait l'objet d'une étude quantitative.

DOMAINE : *Ouvrages d'art.*

ABSTRACT

In order for metallic-fibre concrete (MFC) to make inroads in the field of construction and broaden its range of industrial applications, the ability to strike a balance between mechanical performance and cost remains the paramount concern.

During an experimental study conducted at the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées research facility, the comparison between responses of two MFC samples, in terms of post-cracking behaviour under uniaxial tension, offered some interesting findings.

The first material, with a 1% (by volume) reinforcement in long (60-mm) steel fibers and displaying an average compressive strength of 54.5 MPa, generated a post-cracking energy greater than that of the second one, which was reinforced at 1.28% with shorter fibers (30 mm) and whose compressive strength came to 93.6 MPa.

This rather unexpected result is owed to the preferential direction of metallic fibers for a given industrial application ; the phenomenon at work herein has since been studied quantitatively.

Introduction

Dans des recommandations françaises [1] et internationales [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 françaises et internationales. 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, à l'heure actuelle, 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) réalisée au travers d'une thèse en cotutelle, une importante étude expérimentale a été effectuée au LCPC.

Dans cette étude, trois types de BFM (différant par la résistance en compression du béton, la dimension des fibres et le pourcentage de fibres incorporé), trois diamètres d'éprouvette par BFM, et approximativement dix éprouvettes par diamètre ont été testés.

Le présent article n'a pas pour objet de présenter tous les résultats obtenus lors de l'étude ainsi que leur analyse (ceci sera fait lors d'un article ultérieur), mais de se focaliser sur un des points très importants qui a émergé. Ce point concerne la dépendance très grande entre l'application industrielle visée pour l'utilisation d'un BFM, application qui se traduit notamment par des dimensions précises concernant la structure ou l'élément structurel concerné, la méthode de mise en œuvre du BFM adoptée, et la formulation du BFM qui va conduire au meilleur choix technico-économique.

Pour analyser ce « couplage » fort, les résultats comparatifs entre deux types de BFM obtenus sur une dimension d'éprouvette sont présentés. Les BFM en question sont :

- ① d'une part, un BFM (**BFM1**) ayant une résistance moyenne en compression avoisinant 50 MPa, contenant 78 kg/m³ de fibres cylindriques tréfilées munies de crochets à leurs extrémités, et ayant une longueur de 60 mm et un diamètre de 0,75 mm (*fibre 60/75*) ;
- ② d'autre part, un BFM (**BFM2**) ayant une résistance moyenne en compression avoisinant 90 MPa, contenant 100 kg/m³ de fibres similaires à celles utilisées dans le BFM1 mais ayant cette fois-ci une longueur de 30 mm et un diamètre de 0,5 mm (*fibre 30/50*).

Si l'on considère le comportement potentiel post-fissuration en traction de ces deux BFM, en faisant abstraction de toute orientation préférentielle des fibres, il a été montré dans des études antérieures [3] que l'on devrait aboutir à la constatation suivante : le BFM2 a un comportement très supérieur à celui du BFM1 pour une ouverture de fissure avoisinant 0,5 mm, alors que la tendance s'inverse pour des ouvertures de fissures supérieures à 1 millimètre.

La comparaison entre ces deux BFM est donc potentiellement très pertinente pour étudier l'effet de l'orientation préférentielle des fibres qui peut être générée par un type de structure et un procédé de mise en œuvre du BFM choisi.

Description de l'étude

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 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, d'une part, à cette orthotropie de se créer et, d'autre part, de prélever un nombre important d'éprouvettes (l'étude sur les effets d'échelle a nécessité le prélèvement d'au moins trente éprouvettes).

Composition des BFM

Les compositions respectives du BFM1 et du BFM2 évoquées dans l'introduction sont présentées dans les tableaux I et II.

Maniabilité des BFM

La maniabilité des deux BFM 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 III sont indiqués, respectivement et pour les deux BFM, les diamètres de la « galette » avant et après les quinze chocs normalisés.

Le tableau III, permet de faire les constatations suivantes :

- la maniabilité des deux BFM est voisine,
- cette maniabilité correspond à des bétons très plastiques ou fluides.

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

Nature des composants	Dosage (kg/m³)
Fibres Dramix à crochets (60/0,75 mm)	78
Ciment de Saint-Vigor CPA HP	425
Eau	191
Super plastifiant Chryso-Superplast THP	4,25
Sable silico-calcaire Concassé de Seine 0/4	894
Granulat silico-calcaire Concassé de Bernière 5/20	832
<i>Le plastifiant en solution contient 60 % d'eau.</i>	

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

Nature des composants	Dosage (kg/m³)
Fibres Dramix à crochets (30/0,50 mm)	100
Ciment de Saint-Vigor CPA HP CP2	430
Eau	170
Fumée de silice de Laudun	43
Superplastifiant Chryso- superplast THP	10,6
Sable (1) Boulonnais 0/5	497
Sable (2) silico-calcaire de seine 0/4	497
Granulat Boulonnais 4/12	765

TABLEAU II
Résultats de la table à choc pour les deux BFM

Rhéologie	Diamètre de la « galette » avant chocs (cm)	Diamètre de la « galette » après 15 coups (cm)	Observations
BFM1 (fibres 60/75)	48 à 50,5	53,5 à 57	pas de ségrégation affaissement au cône d' Abrams de 16 cm
BFM2 (fibres 30/50)	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 un massif parallélépipédique ayant des côtés respectivement égaux à 1 020 et 920 cm, et une épaisseur de 180 millimètres.

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

Les éprouvettes carottées font 150 mm de diamètre et 150 mm de hauteur.

Une fois carottées, les éprouvettes sont entaillées en leur centre sur une profondeur de 25 mm, la largeur de l'entaille étant de 2 millimètres.

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 massifs. 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 [4], puis a été inclus dans des recommandations françaises [1] et internationales [2]. 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 fretteage à l'interface casque/éprouvette.

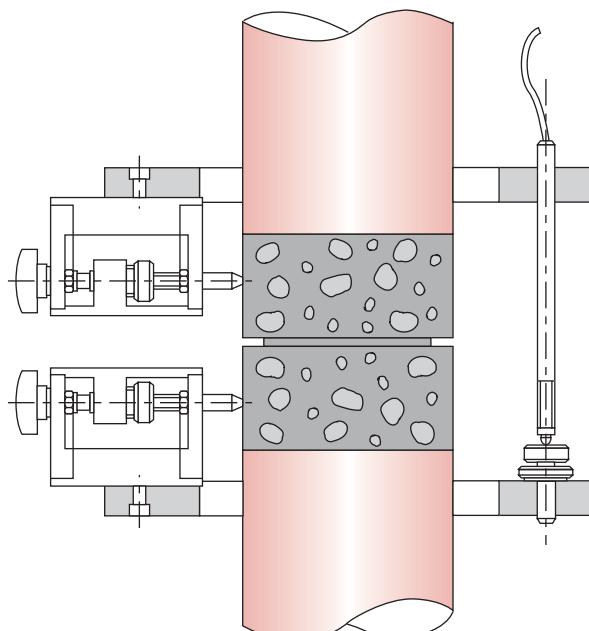
vette. Leur longueur a été optimisée par calcul aux éléments finis afin d'obtenir un champ de contrainte le plus homogène possible au sein de l'éprouvette.

Le comportement post-fissuration en traction se traduisant par la courbe *contrainte de traction-ouverture de fissure*, il faut mesurer cette ouverture de fissure. Ceci est réalisé en utilisant un extensomètre J2P [5], constitué de trois capteurs placés à 120° sur deux 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 une vitesse d'ouverture de fissure imposée prise égale à 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 millimètres.

Le montage expérimental de l'essai de traction uniaxiale est présenté sur la figure 1.

Fig. 1 - Montage expérimental de l'essai de traction uniaxiale.



a. Schéma.



b. Ensemble : éprouvette, casque et extensomètre.



c. Dispositif général d'essai.

Résultats expérimentaux

Pour ce qui concerne les essais de compression réalisés sur les deux BFM, ils 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.

Neuf éprouvettes pour chaque BFM ont été testées en traction uniaxiale.

Le premier résultat que l'on peut signaler concerne les faciès de rupture. On constate que, pour les deux BFM, la majorité des fibres qui se trouvent dans les sections rompues ne sont pas cassées, mais extraites de la matrice (fig. 2).

Ce résultat indique que le choix de la longueur de la fibre par rapport à la compacité de la matrice a été pertinent, sachant que, pour obtenir un BFM ductile en traction avec des ouvertures de fissure non négligeables, il faut éviter une rupture trop rapide des fibres.

Sur les figures 3a et b sont présentées respectivement, pour le BFM1 et pour le BFM2, les neuf courbes et la courbe moyenne *contrainte de traction-ouverture de fissure*. Les deux courbes moyennes *contrainte de traction-ouverture de fissure* relatives aux deux BFM sont représentées sur la figure 3c.

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).



Fig. 2 - État des faciès et des fibres après séparation des deux parties de l'éprouvette.

Analyse des résultats

Au regard des courbes (fig. 3), on peut faire les commentaires suivants.

- En terme de **comportement post-fissuration moyen en traction**, on constate que (fig. 3c) :
 - jusqu'à environ 0,5 mm d'ouverture, les deux BFM ont un comportement comparable ;
 - après 0,5 mm et jusqu'à 3 mm d'ouverture de fissure, le BFM1 présente un comportement plus ductile que le BFM2 dans la mesure où, dans cet intervalle d'ouverture de fissure, la contrainte de traction diminue moins pour le BFM1 que pour le BFM2.
- La **dispersion relative au comportement post-fissuration en traction** est moins importante pour le BFM1 que pour le BFM2 (fig. 3a. et b). En effet, au-delà de ce constat « visuel », on peut quantifier cette dispersion en considérant, pour les deux BFM, l'écart type (S) sur l'aire (E) calculée sous la courbe *contrainte-ouverture de fissure*. On trouve respectivement pour les deux BFM :
 - BFM1 : $S_1(E) = 1,6 \text{ N/mm}$,
 - BFM2 : $S_2(E) = 2,0 \text{ N/mm}$.

La synthèse des deux commentaires précédents peut donc se résumer ainsi : **le comportement post-fissuration en traction du BFM1 est un peu meilleur que celui du BFM2.**

Ce résultat peut en partie paraître étonnant car, comme nous l'avons signalé dans l'introduction, si l'on considère une *orientation* des fibres au sein du massif *similaire* pour les deux BFM, **on devrait aboutir aux résultats suivants.**

- Pour une ouverture de fissure inférieure ou égale à 0,5 mm, **le BFM2 devrait avoir un comportement post-fissuration en traction nettement supérieur à celui du BFM1**, et ceci pour deux raisons :
 - le nombre de fibres « actives » dans la fissure devrait être nettement plus important (du fait des dimensions de la fibre et du pourcentage de fibres introduit) dans le cas du BFM2 ;
 - l'adhérence de la fibre avec la matrice est meilleure dans le BFM2 (la matrice ayant une résistance en compression de 90 MPa étant plus compacte que celle ayant une résistance en compression de 50 MPa).

■ **La dispersion sur le comportement post-fissuration en traction devrait être plus faible dans le cas du BFM2 que dans celui du BFM1.** En effet, cette dispersion dépend de la probabilité d'avoir des fibres bien orientées par rapport à la fissure, et cette probabilité devrait donc être nettement supérieure dans le cas du BFM2 (le nombre de fibres y étant très supérieur).

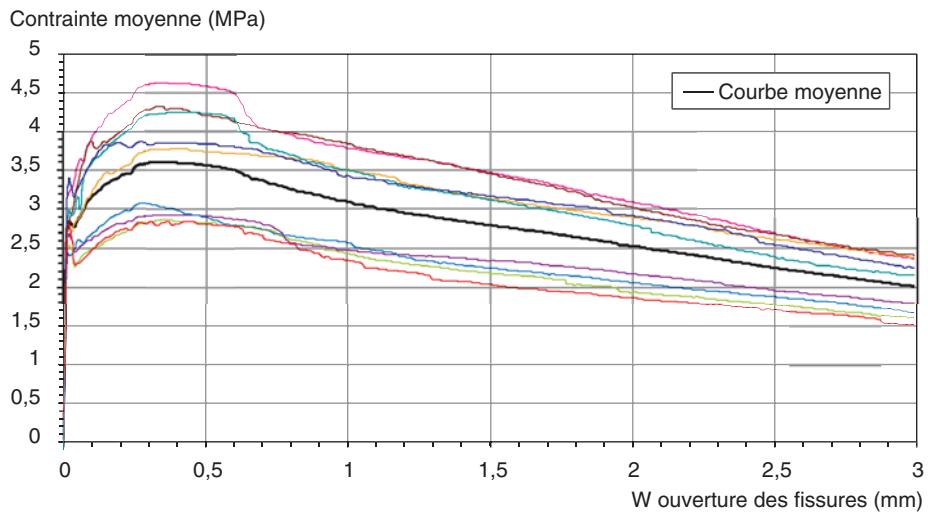
L'explication la plus plausible à ce résultat inattendu est donc que l'orientation des fibres dans le massif n'est pas la même pour les deux BFM.

Cette différence d'orientation peut s'expliquer si l'on considère les deux facteurs suivants :

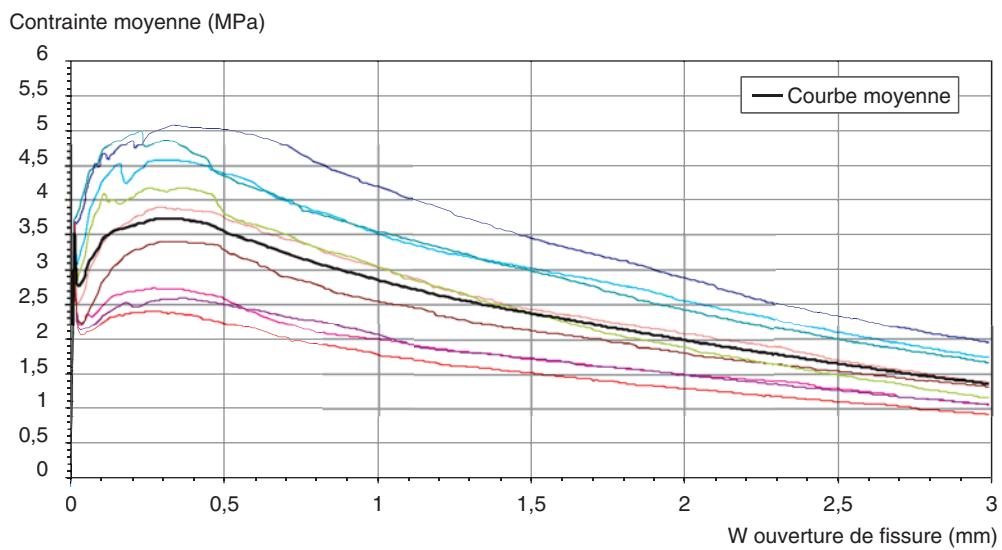
- la très grande fluidité des deux BFM ;
- le rapport entre la longueur de la fibre et l'épaisseur du massif.

En effet, du fait de leur très grande fluidité, les deux BFM remplissent le coffrage avec des trajets d'écoulement suffisamment importants pour permettre une orientation préférentielle des fibres sui-

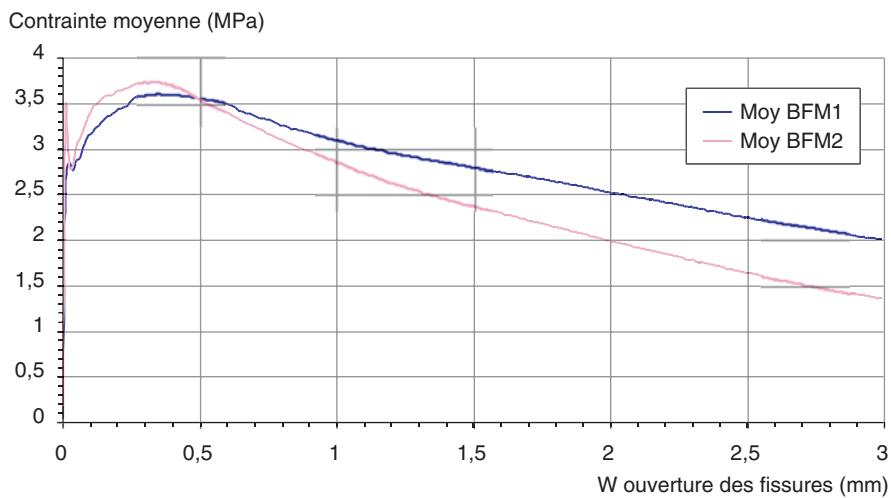
Fig. 3 - Contrainte de traction-ouverture de fissure



a. Les neuf courbes et la courbe moyenne relatives au BFM1.



b. Les neuf courbes et la courbe moyenne relatives au BFM2.



c. Les courbes moyennes relatives aux deux BFM.

tant les lignes de courant, ce qui se traduit par une isotropie d'orientation des fibres dans le plan horizontal. Or, lors de cet écoulement des BFM, va également intervenir un effet de paroi qui va tendre à orienter les fibres parallèlement à la surface inférieure du coffrage, c'est-à-dire celle qui est perpendiculaire au sens du coulage. Cet effet de paroi est d'autant plus important que le rapport *épaisseur du massif/longueur de la fibre* est petit. En conséquence, dans le cas du BFM1, l'orientation préférentielle des fibres doit être proche de l'orthotropie, et dans le cas du BFM2, l'orientation des fibres doit être plus « isotrope » dans la mesure où l'on peut trouver un certain nombre de fibres orientées parallèlement à l'épaisseur du massif.

Si l'explication que nous avançons est valide, il paraît évident qu'au regard du sens de carottage des éprouvettes adopté dans cette étude, les fibres sont mieux orientées vis-à-vis de l'essai de traction dans le BFM1 que dans le BFM2.

Afin de vérifier la pertinence de notre explication, un comptage des fibres à l'intérieur des surfaces de rupture des éprouvettes relatives aux deux BFM a été réalisé. Le nombre moyen de fibres par centimètre carré obtenu pour chaque BFM est le suivant :

- pour le BFM1 : $n_1 = 0,76 \text{ fibres/cm}^2$,
- pour le BFM2 : $n_2 = 1,14 \text{ fibres/cm}^2$.

Soit un rapport (n_2/n_1) de **1,5**.

Or, le rapport théorique entre le nombre total de fibres contenu dans le BFM2 et celui contenu dans le BFM1 est de **6,24**.

On en conclut aisément que, comme nous l'avons suggéré, les fibres du BFM1 sont mieux orientées que celles du BFM2 vis-à-vis d'une fissuration parallèle à l'épaisseur du massif.

Conclusions

Cette étude expérimentale avait pour objectif de mettre en évidence, de manière quantitative, l'influence de l'orientation préférentielle des fibres métalliques vis-à-vis d'une application industrielle donnée.

L'application industrielle visée concerne les structures dites 2D comme les dalles, les dallages, ou les planchers.

Dans ce cadre, nous avons montré que, pour une dalle de 18 cm d'épaisseur, un BFM ayant une résistance moyenne en compression de 54,5 MPa, contenant 78 kg/m³ de fibres (60/75), a un meilleur comportement post-fissuration en traction, vis-à-vis de fissures parallèles à l'épaisseur de la dalle qu'un BFM ayant une résistance moyenne en compression de 93,6 MPa, contenant 100 kg/m³ de fibres (30/50).

Ce résultat est probablement lié à une meilleure orientation préférentielle des fibres du premier BFM vis-à-vis du type de structure et du type de fissuration considéré. Cette orientation préférentielle est principalement liée dans le cas présent à la fluidité des BFM, et du rapport entre la longueur de la fibre et l'épaisseur de la dalle.

En conclusion, quand on veut optimiser la formulation d'un BFM au regard d'un optimum technico-économique, il n'est pas suffisant de considérer le comportement mécanique potentiel du BFM déconnecté de l'application industrielle visée. En effet, cette application industrielle, de part les dimensions de la structure visée et la technique de mise en œuvre choisie, va induire une orientation préférentielle des fibres qui va faire qu'un BFM *a priori* théoriquement moins performant qu'un autre sur le plan mécanique va se révéler plus intéressant dans la pratique.

Remerciements. *Les auteurs tiennent à remercier Jean-Joseph Serrano (LCP) et son équipe 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 convenance 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*, Recommendations of RILEM TC 162-TDF, à paraître.
- [3] ROSSI P., *Les bétons de fibres métalliques*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, **1998**.
- [4] LE MAOU, *Mise au point d'un essai de traction uniaxiale sur béton de fibres*. Note interne du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, **1992**.
- [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.