

Comportement mécanique d'un nouveau composite cimentaire à écrouissage positif

I. Comportement en flexion

Pierre ROSSI
Édouard PARANT
Olivier LAURENCE
Patricia FAKRI

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Antonio ARCA
Université de Cagliari (Italie)

RÉSUMÉ

Le présent article porte principalement sur l'étude du comportement en flexion d'un nouveau composite cimentaire, le CEMTEC[®]_{multiscale}, développé et breveté par le LCPC. L'une des applications industrielles visées pour ce type de matériau est les dalles de ponts mixtes. Au regard de son coût et de ses performances mécaniques escomptées, il est envisagé de concevoir des dalles nervurées sans autre renfort que les fibres métalliques constitutives du matériau (11 % en volume).

Le comportement en flexion de la dalle nervurée est étudié en séparant le fonctionnement de la partie dalle du fonctionnement de la partie nervure.

■ **Pour la fonction dalle**, la résistance moyenne en traction par flexion est égale à 50 MPa et la résistance caractéristique en traction par flexion est égale à 42 MPa.

■ **Pour la fonction nervure**, la résistance moyenne en traction par flexion est égale à 58 MPa et la résistance caractéristique en traction par flexion est égale 48 MPa.

La résistance et la déformation maximale moyennes en compression du CEMTEC[®]_{multiscale} sont respectivement égales à 220 MPa et $4,5 \cdot 10^{-3}$.

La résistance et la déformation maximale caractéristiques en compression du CEMTEC[®]_{multiscale} sont respectivement égales à 205 MPa et $4,0 \cdot 10^{-3}$.

Le module d'Young est égal à 55 GPa et son coefficient de Poisson est égal à 0,21.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

MECHANICAL BEHAVIOR OF A NEW CEMENTITIOUS COMPOSITE WITH STRAIN HARDENING – PART I: BENDING BEHAVIOR

The present article is primarily focused on studying the bending behavior of a new cementitious composite called "CEMTEC[®]_{multiscale}", which has been developed and patented by the LCPC laboratory. One target industrial application for this type of material would be mixed-bridge deck slabs. Given the composite's cost and projected mechanical performance, no additional reinforcement beyond its component metallic fibers (which constitute 11% by volume) is anticipated, as regards the design of ribbed slabs.

The bending behavior of ribbed slabs is studied by means of separating how the slab part and ribbed part function individually:

■ *For the slab function, average tensile strength in bending equals 50 MPa, and the characteristic tensile strength in bending amounts to 42 MPa.*

■ *As for the ribbed function, these same bending strength values stand at 58 MPa and 48 MPa, respectively.*

The average strength and maximum deformation in compression of the CEMTEC[®]_{multiscale} product are equal to 220 MPa and $4.5 \cdot 10^{-3}$, respectively, while the characteristic values have been determined at 205 MPa and $4.0 \cdot 10^{-3}$.

Young's modulus is equal to 55 GPa and Poisson's ratio to 0.21.

FIELD: Structural engineering.

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 pour concevoir des structures ou des éléments structuraux sans autre renfort que les fibres métalliques.

Ces matériaux résultent de la mise en application directe du « Multi-Scale Concept » développé par Rossi [1]. L'idée est de 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). On peut citer en exemple un MSCC, développé dans le passé par le LCPC [2], constitué d'un mélange de 5 % de fibres (en acier tréfilé) droites de 5 mm de long et 0,25 mm de diamètre et de 2 % de fibres (en acier tréfilé), munies de crochets à leurs extrémités, de 25 mm de long et 0,3 mm de diamètre. Le comportement en traction uniaxiale de ce MSCC s'est avéré écrouissant et la résistance en traction uniaxiale moyenne qu'il peut atteindre est de l'ordre de 15 MPa.

Un nouveau composite cimentaire : le CEMTEC[®]*multiscale*

Le CEMTEC[®]*multiscale*, qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet international par le LCPC en mars 2001, est conçu à partir de ce même concept. Cependant :

- alors que le MSCC contient deux géométries de fibres métalliques différentes, le CEMTEC[®]*multiscale* en contient trois ;
- le CEMTEC[®]*multiscale* contient 11 % par mètre cube de fibres métalliques alors que le MSCC en contient 7 %.

Le LCPC a lancé, en 2000, une vaste étude sur quatre ans sur le CEMTEC[®]*multiscale*, étude qui comporte des essais mécaniques pour caractériser les différents comportements mécaniques du composite (comportement en statique, en fatigue, à grandes vitesses de sollicitation, etc.), des essais de durabilité, des essais à l'échelle 1 sur des éléments structuraux et des essais pour optimiser le procédé de fabrication des éléments structuraux (malaxage et mise en œuvre). Dans cet article, sont présentés les premiers résultats relatifs à des essais statiques.

Il est à signaler que le MSCC a un comportement mécanique en traction uniaxiale fortement écrouissant et ductile (la ductilité étant ici définie à partir de la déformation non linéaire correspondant à la contrainte maximale) et qu'il ne présente aucune fissure localisée jusqu'à la contrainte maximale. On ne retrouve pas ce type de comportement chez les autres bétons fibrés ultra-performants (BFUP) qui ne sont pas ou sont peu écrouissants et ductiles.

En conséquence, les recommandations de l'Association française de génie civil (AFGC), portant entre autres sur les méthodes de dimensionnement des BFUP [3], ne sont pas abordées dans cet article, car principalement fondées sur l'existence d'une fissure localisée.

Formulation du CEMTEC[®]*multiscale*

La formulation CEMTEC[®]*multiscale* qui a fait l'objet de la présente étude est présentée dans le tableau I.

TABLEAU I
Formulation du CEMTEC[®]*multiscale* étudié (kg/m³)

Ciment HTS		1 050,1
Fumée de Silice SEPR		268,1
Sable de Fontainebleau 0/400 μm		514,3
Eau ajoutée		180,3
Superplastifiant OPTIMA175		44
Fibres métalliques		858
Total		2 914,8
	eau/ciment	0,201
	eau/liant	0,160
air occlus = 20 l		

Étude expérimentale

Procédures

Une des applications industrielles visées avec ce nouveau matériau composite concerne les dalles et les planchers fortement chargés, tels que les dalles de ponts mixtes par exemple. Or, au regard du coût potentiel d'un tel matériau (le matériau n'étant pas encore commercialisé, il est impossible d'en dire davantage sur le problème du coût) qui sera obligatoirement très élevé par rapport aux bétons « classiques » (y compris les bétons à hautes performances), il est indispensable d'optimiser le rapport performances mécaniques/coût. Pour ce faire, il faut économiser la matière et n'en mettre uniquement qu'aux endroits utiles du point de vue mécanique. Le matériau évitant (c'est le but à atteindre) l'utilisation de renforts traditionnels, et étant moulable à froid, cette économie de matière est parfaitement envisageable. Dans le cas d'une dalle de pont mixte, l'économie peut passer par le choix d'une forme à la fois simple et mécaniquement naturelle que constitue la dalle nervurée.

En effet, dans une dalle nervurée, la fonction « dalle » consiste à reprendre à la fois les flexions secondaires et les poinçonnements alors que la fonction « nervure » a pour rôle de prendre en charge les flexions principales et d'augmenter la rigidité globale de la structure.

Dans le cadre de l'étude menée au LCPC, il a été décidé de dissocier ces deux fonctions afin de les caractériser séparément. Des essais mécaniques ont ainsi été réalisés sur des éprouvettes représentatives du fonctionnement de la partie dalle et sur des éprouvettes représentatives de la fonction nervure. La jonction entre la dalle et la nervure qui constitue une zone délicate dans le fonctionnement de la dalle nervurée n'est pas abordée ici. Cela devra être examiné dans le cadre d'essais réalisés sur structure à l'échelle 1.

Dimensionner une structure ou un élément structurel composé uniquement de ce nouveau composite cimentaire implique nécessairement de le faire avec une maîtrise parfaite de la sécurité. Il est, par conséquent, indispensable d'accéder à des comportements mécaniques caractéristiques (au sens de la résistance caractéristique en compression, par exemple) qui intègrent les problèmes de dispersion inhérents à tous les matériaux. C'est ainsi que les essais évoqués ci-dessus ont été réalisés sur un nombre d'éprouvettes suffisant pour déterminer ces comportements caractéristiques (à partir d'une analyse statistique).

Les premiers essais présentés dans cette étude visent, d'une part, à déterminer les comportements caractéristiques en flexion de la partie dalle et de la partie nervure et, d'autre part, le comportement caractéristique en compression du CEMTEC[®]*multiscale* au sein de la dalle nervurée.

Afin, d'une part, d'optimiser les dimensions des éprouvettes vis-à-vis des effets d'échelle et d'orientation préférentielle des fibres et, d'autre part, d'aboutir à une utilisation qui pourrait être économiquement viable du CEMTEC[®]*multiscale*, il a été choisi de retenir les dimensions ci-après pour les éprouvettes représentatives :

- **fonctionnement en dalle.** L'éprouvette, qui est une dallette, a une longueur de 600 mm, une largeur de 200 mm et une épaisseur de 40 mm. La largeur de 200 mm permet une orientation orthotrope des fibres, dont la plus grande fait 25 mm de long, représentative de celle existant dans une dalle ;
- **fonctionnement en nervure.** L'éprouvette a une longueur de 600 mm, une hauteur de 200 mm et une épaisseur de 40 mm. La largeur de 40 mm doit permettre une orientation préférentielle des fibres parallèlement à la longueur de l'éprouvette. La hauteur de 200 mm doit permettre de rigidifier fortement une dalle nervurée et d'éviter d'importants effets d'échelle.

Pour les coulages, les dallettes sont coulées à plat et vibrées pendant le coulage sur une table vibrante. En revanche, les nervures sont coulées verticalement (c'est-à-dire parallèlement à la direction ultérieure de l'effort de flexion) à l'aide d'un dispositif présenté dans la figure 1 et vibrées également pendant le coulage sur une table vibrante.

Pour les essais de compression, il a été décidé de prélever les éprouvettes par sciage, au sein de dallettes supplémentaires, afin d'obtenir une orientation des fibres réaliste par rapport à celle qui existe dans la zone en compression de la dalle nervurée. Les éprouvettes de compression sont donc de forme prismatique.



Fig. 1 - Dispositif de coulage des nervures.

On sait qu'avec les BFUP, comme le CEMTEC[®]_{multiscale}, la mise en œuvre d'un traitement thermique permet d'accroître les performances mécaniques de la matrice [4]. Aussi, dans la présente étude, deux types de cure ont été appliqués :

- une cure à l'eau classique ;
- et un traitement thermique qui consiste à placer les éprouvettes dans une étuve à 90 °C pendant quatre jours, ceci 48 heures après leur démoulage. L'humidité relative n'était pas contrôlée.

Le traitement thermique a été mis en œuvre pour les trois types d'éprouvette, la dalle, la nervure et l'éprouvette de compression, alors que la cure à l'eau n'a été mise en œuvre que pour la dalle et l'éprouvette de compression.

On a ainsi fait l'hypothèse que, vis-à-vis du comportement en flexion, l'effet du type de cure est similaire pour le fonctionnement en dalle et pour le fonctionnement en nervure.

Il est important de préciser que la durée de la cure à l'eau a été d'un mois pour les dalles et de six mois pour les éprouvettes de compression.

Enfin, parallèlement aux essais de compression sur les éprouvettes prismatiques, des essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques coulées en même temps que les éprouvettes prismatiques. Ainsi, six éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm ont été coulées pour déterminer la résistance en compression du CEMTEC[®]_{multiscale}, et trois éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm ont été coulées pour déterminer son module d'Young et son coefficient de Poisson.

Essais de flexion quatre points – mode opératoire

• Dalles

Lors de ces essais de flexion, la distance entre les appuis inférieurs est de 420 mm, et la distance entre les appuis supérieurs est 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 se faisant à l'aide d'un extensomètre spécial, placé sur l'éprouvette, conçu pour éliminer les déplacements parasites au niveau des appuis. La figure 2a illustre le montage expérimental.

Neuf dalles ayant subi un traitement thermique et six éprouvettes ayant subi une cure à l'eau ont été testées.

Pour évaluer l'évolution des déformations dans la zone de moment constant (c'est-à-dire sur 14 cm), deux jauges de déformation de 7 cm de longueur ont été collées bout à bout au niveau de la fibre inférieure d'une des dalles.

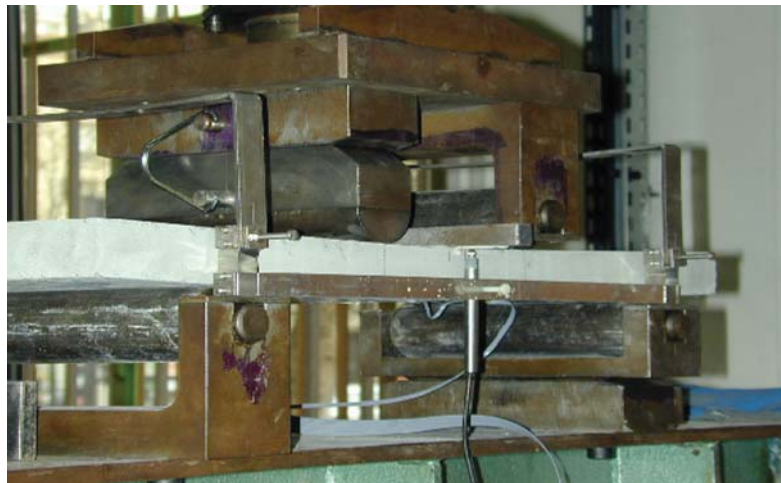
• Nervures

Le mode opératoire est identique à celui relatif aux dalles. La figure 2b illustre le montage expérimental. Les distances entre appuis sont les mêmes que pour les essais sur dalles.

Neuf nervures ayant subi un traitement thermique ont été testées.

Comme pour les dalles, deux jauges de 7 cm de longueur ont été collées bout à bout sur une des nervures.

Pour toutes les nervures, un capteur LVDT a été collé sur la face opposée à celle sur laquelle est fixé l'extensomètre servant à mesurer la flèche, ceci au niveau de la fibre inférieure de la nervure (fig. 3) dans la zone de moment constant (comme pour la mesure de déformation avec la jauge).



a. Dallettes.



b. Nervures.

Fig. 2 - Montage expérimental de l'essai de flexion quatre points.

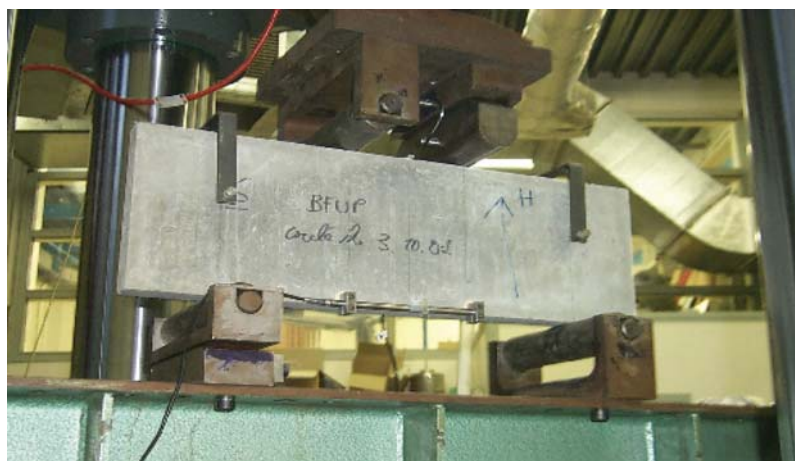


Fig. 3 - Montage expérimental de mesure de la déformation au niveau de la fibre inférieure de la nervure à l'aide d'un LVDT.

Essais de compression - mode opératoire

• Prismes

Six éprouvettes ayant subi un traitement thermique et six éprouvettes ayant subi une cure à l'eau ont été testées. Ce sont des éprouvettes prismatiques de dimensions $180 \times 80 \times 40$ mm. Sur chaque éprouvette, deux jauges de déformation de 7 cm de longueur sont collées au centre de chacune des faces, afin d'enregistrer les courbes effort-déformation longitudinale moyenne.

L'essai est contrôlé en vitesse de déplacement des plateaux de la presse à l'aide d'un LVDT placé entre ces plateaux.

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 4.

• Cylindres

Pour la détermination de la résistance en compression, les surfaces horizontales des éprouvettes de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm ont été préalablement rodées, et les essais ont été réalisés avec une vitesse de contrainte imposée de 0,5 MPa/s.

Pour la détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson, un extensomètre spécial, le J2P [5], a été utilisé.

Le dispositif expérimental relatif à la détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson est illustré sur la figure 5.

Résultats

Essais de flexion

Sur les figures 6a et 6b, sont présentés les résultats relatifs aux dalles et ceux concernant les nervures ayant subi un traitement thermique. Ces résultats sont présentés sous la forme de courbes contrainte équivalente de traction-flèche.

Sur la figure 7, sont représentées les courbes moyennes relatives aux deux types d'éprouvettes. Ces courbes moyennes sont déterminées jusqu'au pic d'effort.

Sur les figures 8a et 8b, sont représentées, respectivement pour la dalle et pour la nervure, les courbes déformations-temps données par les deux jauges.



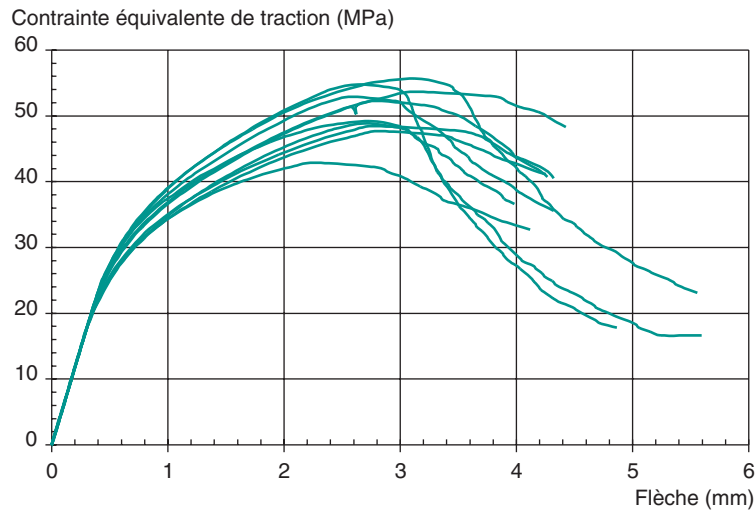
Fig. 4 - Dispositif expérimental adopté pour les essais de compression sur éprouvettes prismatiques.



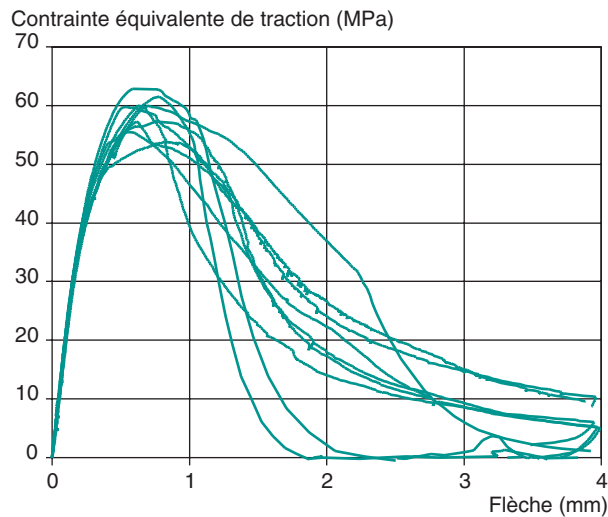
Fig. 5 - Dispositif expérimental adopté pour déterminer le module d'Young et le coefficient de Poisson sur des éprouvettes cylindriques.

■ Par rapport aux figures 6 et 7, on peut faire les commentaires suivants :
 Les résistances moyennes en traction par flexion, encore appelées modules de rupture moyens, atteignent respectivement :

- fonction dalle : 50 MPa ;
- fonction nervure : 58 MPa.



a. Dallettes.



b. Nervures.

Fig. 6 - Résultats relatifs aux essais de flexion.

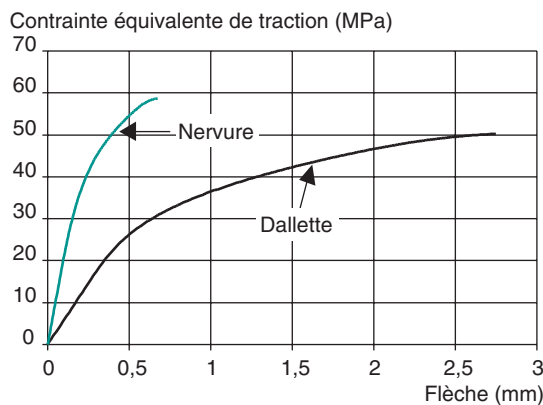
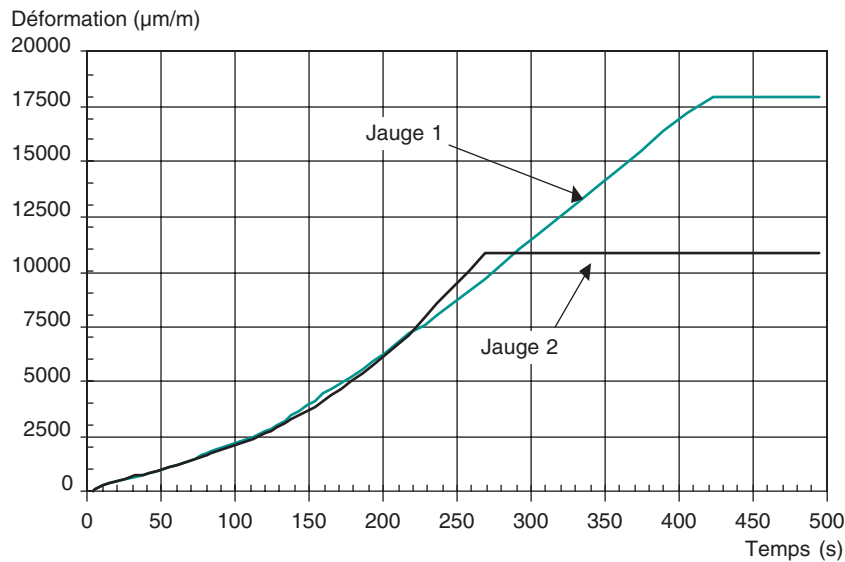
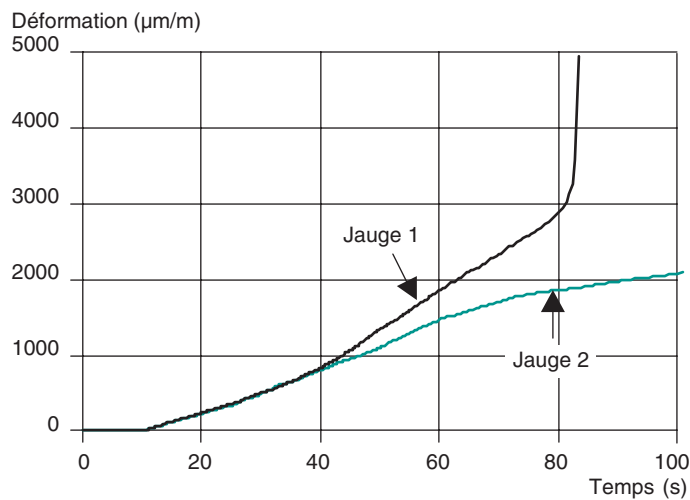


Fig. 7 - Courbes moyennes relatives aux dallettes et aux nervures.



a. Pour une des dalles testées.



b. Pour une des nervures testées.

Fig. 8 - Courbes déformations-temps données par les deux jauges.

La valeur plus importante pour les nervures est liée à une meilleure orientation des fibres par rapport à la direction de propagation des fissures. Elle indique donc que les nervures vont pouvoir remplir le rôle qui leur est dévolu du point de vue de la résistance mécanique.

■ De la figure 8, on peut tirer les commentaires suivants : que ce soit pour la dalle ou pour la nervure, les jauges de déformation indiquent des déformations de traction très importantes par rapport aux valeurs habituellement atteintes par les bétons. Pour les jauges de déformation relatives à la dalle, on constate que l'une d'elles « sature » à $1 \cdot 10^{-2}$ et l'autre à $1,75 \cdot 10^{-2}$. En revanche, pour la nervure, les deux jauges divergent à partir d'un certain moment, l'une indiquant une déformation qui augmente d'une manière très brutale jusqu'à atteindre $5 \cdot 10^{-3}$, l'autre indiquant une augmentation lente et continue de cette déformation jusqu'à $2 \cdot 10^{-3}$.

Il faut souligner que les valeurs de déformation indiquées par les jauges doivent être considérées avec prudence lorsque des fissures apparaissent, car une jauge d'extensométrie disfonctionne quand il y a une fissure, même d'ouverture très petite. La seule conclusion fiable que l'on peut tirer de ces résultats est qu'ils indiquent l'existence d'une multifissuration constituée de fissures de faibles ouvertures, car des ouvertures supérieures à $10 \mu\text{m}$ provoquent généralement la rupture des jauges.

Sur la figure 9 est présenté un exemple de courbe contrainte équivalente de traction-déformation obtenue avec les nervures, la déformation étant calculée à partir de la mesure de déplacement réalisée avec le LVDT placé au niveau de la fibre inférieure.

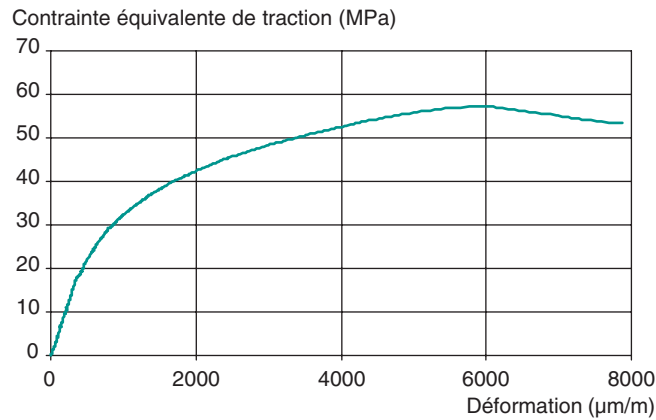


Fig. 9 - Exemple de courbe contrainte équivalente de traction-déformation obtenue lors d'un essai de flexion sur nervures.

Sur la figure 9, on constate que la déformation au pic de contrainte est d'environ $6 \cdot 10^{-3}$, valeur du même ordre de grandeur de celle indiquée par les jauges de déformation (cf. fig. 8).

Sur la figure 10 sont présentées les courbes effort-flèche relatives aux six essais de flexion sur les dallettes ayant subi une cure à l'eau et testées à 28 jours.

Sur la figure 11, sont présentées les courbes moyennes effort-flèche relatives aux dallettes ayant subi respectivement les deux types de cure.

Sur la figure 11, on constate que le passage du traitement thermique à la cure à l'eau conduit à une diminution de la résistance en traction par flexion de 20 % environ.

Cette diminution pourrait s'expliquer par une diminution de la compacité de la matrice qui induit une diminution générale de ses caractéristiques mécaniques et, dans le cas présent, celle de son adhérence avec les fibres.

Pour terminer avec les essais de flexion, il est important de signaler que pour toutes les éprouvettes, que ce soit pour les dallettes ou pour les nervures, aucune fissure localisée n'a pu être observée avant le pic d'effort.

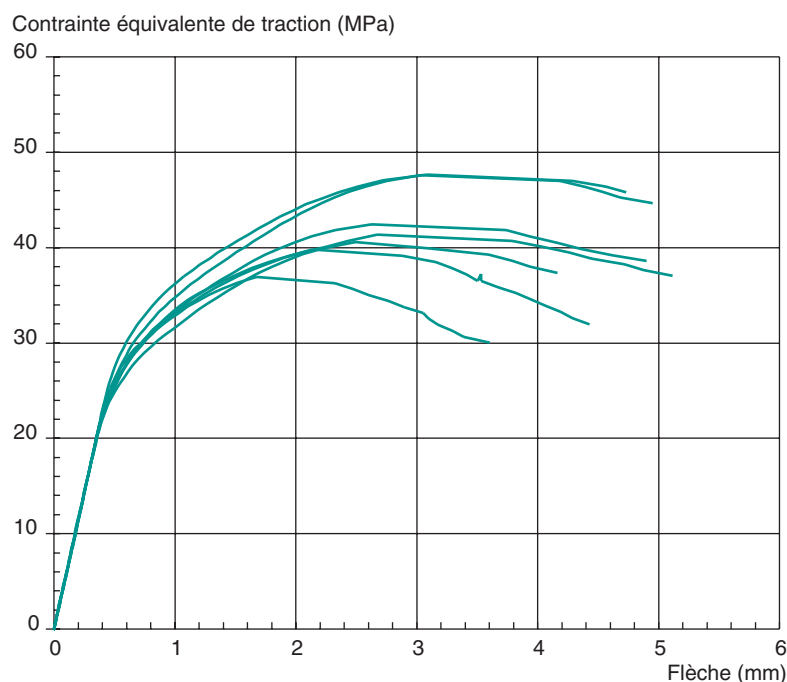


Fig. 10 - Courbes effort-flèche relatives aux dallettes ayant subi une cure à l'eau.

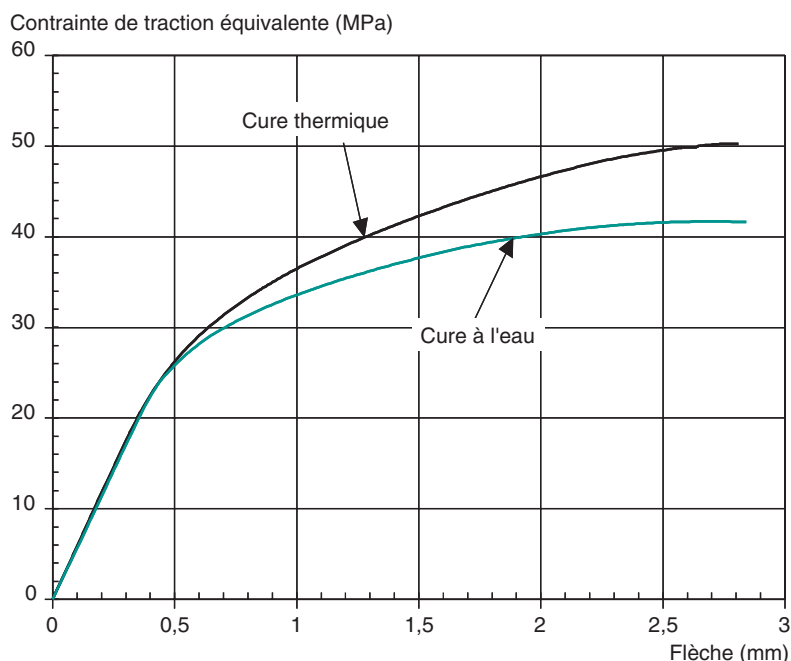


Fig. 11 - Courbes moyennes effort-flèche relatives aux dalles ayant subi un traitement thermique et une cure à l'eau.

Essais de compression

• Prismes

Sur les figures 12a et 12b sont présentées les courbes contrainte-déformation relatives aux éprouvettes traitées thermiquement et aux éprouvettes ayant subi la cure à l'eau.

Sur la figure 13 sont présentées les courbes moyennes contrainte-déformation relatives aux deux types de cure.

La résistance en compression moyenne relative à chaque type de cure est la suivante :

- traitement thermique : $R_c \text{ moy} = 220 \text{ MPa}$,
- cure à l'eau (six mois) : $R_c \text{ moy} = 230 \text{ MPa}$.

La déformation ultime moyenne relative à chaque type de cure est la suivante :

- traitement thermique : $\sum_u \text{ moy} = 4,5 \cdot 10^{-3}$,
- cure à l'eau (six mois) : $\sum_u \text{ moy} = 4,7 \cdot 10^{-3}$.

Le module d'Young (calculé à partir des jauges de déformation) relatif à chaque type de cure est le suivant :

- traitement thermique : $E = 54 \text{ GPa}$,
- cure à l'eau (six mois) : $E = 56 \text{ GPa}$.

• Cylindres

La résistance en compression moyenne déterminée à partir des essais réalisés sur les cylindres de hauteur 22 cm et de diamètre 11 cm et relative au matériau traité thermiquement est la suivante :

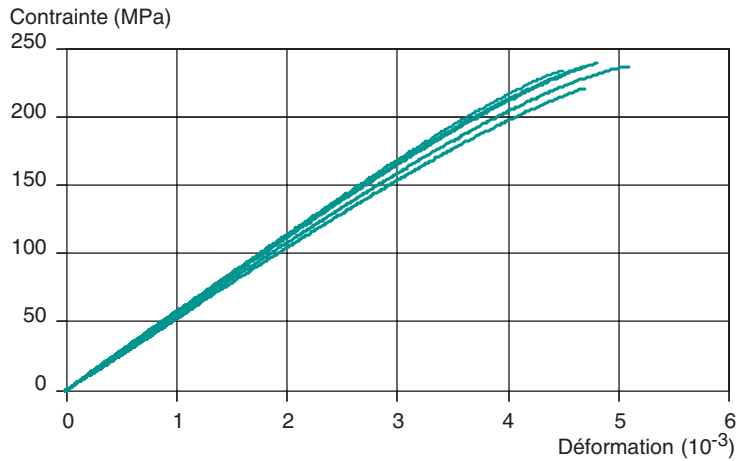
$$R_c \text{ moy} = 215 \text{ MPa}$$

Le module d'Young et le coefficient de Poisson déterminés à partir des essais réalisés sur les cylindres de hauteur 22 cm et de diamètre 11 cm et relatifs au matériau traité thermiquement sont les suivants :

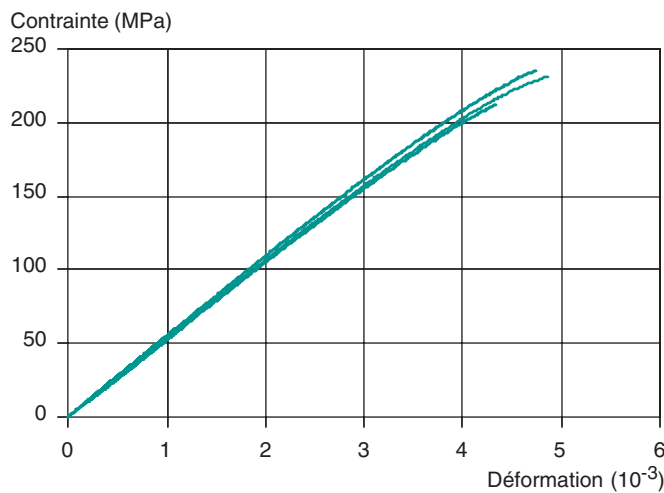
- $E = 55 \text{ GPa}$,
- $\nu = 0,21$.

Par rapport à ces résultats, on peut faire les commentaires suivants :

- alors que, pour les essais de flexion, on a observé qu'une cure à l'eau d'un mois conduit à une diminution de 20 %, par rapport à une cure thermique, de la résistance en traction par flexion du matériau, une cure à l'eau de six mois semble conduire à une résistance en compression du matériau similaire et même légèrement supérieure à celle relative à la cure thermique. Ce constat s'explique



a. *Éprouvettes ayant subi le traitement thermique.*



b. *Éprouvettes ayant subi la cure à l'eau.*

Fig. 12 - Courbes contrainte-déformation.

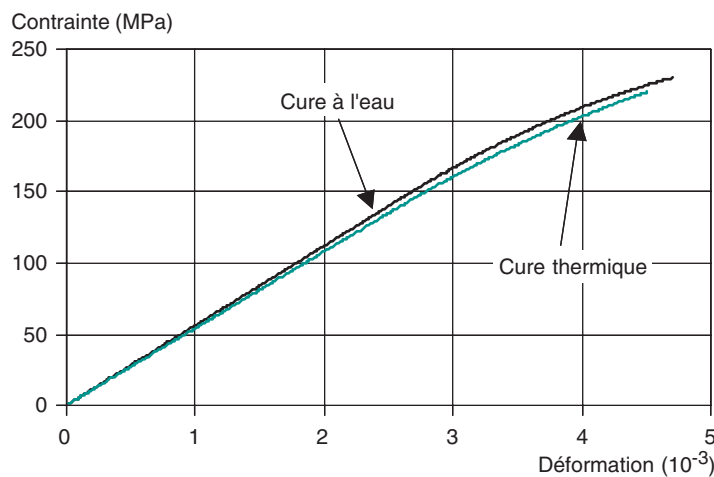


Fig. 13 - Courbes moyennes contrainte-déformation relatives aux deux types de cure.

par le fait que, d'une part, le CEMTEC^{multiscale}[®] non traité thermiquement a une porosité non négligeable et que, d'autre part, son degré d'hydratation est très faible (rapport eau/liant égal à 0,16). Ainsi, au bout de six mois dans l'eau, le CEMTEC^{multiscale}[®] a très bien pu, grâce à la pénétration de l'eau dans sa porosité, générer une quantité non négligeable de nouveaux hydrates qui viennent augmenter de manière importante la compacité du matériau et donc la résistance de la matrice ;

➤ les essais de compression sur prismes et sur cylindres conduisent à des résultats semblables pour la résistance en compression et le module d'Young. Les petites différences que l'on peut noter sont liées, d'une part, à des mécanismes de rupture en compression de l'éprouvette et, d'autre part, à des conditions d'interface éprouvette/plateaux de la presse qui sont différentes pour le cylindre et pour le prisme.

Analyses

À partir des courbes moyennes et des courbes individuelles, il est aisé de calculer des courbes caractéristiques. Ces courbes ne sont pas des courbes de dimensionnement car elles ne prennent en compte aucun coefficient de sécurité. Pour déterminer ces courbes caractéristiques, on procède comme ci-après.

❶ On distingue pour toutes les courbes, qu'elles soient relatives aux essais de flexion ou aux essais de compression, une partie linéaire élastique et une partie non linéaire.

Pour distinguer ces deux parties, on trace, pour toutes les courbes, moyennes et individuelles, leur dérivée par rapport à l'abscisse. On obtient ainsi des courbes constituées d'une portion de droite quasi constante, et d'une portion de courbe non constante en fonction de l'abscisse. La frontière entre ces deux portions de courbe constitue la limite du domaine linéaire élastique de la courbe primitive.

❷ On détermine ensuite la partie linéaire de la courbe caractéristique de la manière suivante :

➤ pour la pente de la courbe, on prend la pente moyenne,
 ➤ pour la limite de la partie linéaire, on prend la limite moyenne (obtenue avec la courbe moyenne), diminuée du produit de coefficient de Student $k(n)$ par l'écart type $s(R)$ sur cette limite (obtenue à partir des courbes individuelles).

❸ On détermine ensuite la partie non linéaire de la courbe caractéristique de la manière suivante :

➤ on calcule tout d'abord la valeur caractéristique de la résistance en compression ou de la résistance équivalente de traction R_{car} :

$$R_{car} = R_{moy} - k(n) \cdot s(R) \quad (1)$$

où

– R_{moy} est la valeur moyenne de la résistance en compression ou de la résistance équivalente de traction et $s(R)$ l'écart type estimé sur cette résistance,

– $k(n)$ est le coefficient de Student pour un fractile de 5 % qui dépend du nombre n d'essais réalisés ;

➤ on multiplie ensuite, pour chaque valeur de déformation verticale (comportement en compression) ou pour chaque valeur de flèche (comportement en flexion) de la courbe moyenne, la contrainte correspondant par le rapport R_{car}/R_{moy} . On trace ainsi une courbe caractéristique jusqu'à la valeur de déformation verticale caractéristique ou de flèche caractéristique.

Les courbes caractéristiques du CEMTEC[®]_{multiscale}, vis-à-vis du comportement en flexion d'une dalle et de celui d'une nervure, servent au dimensionnement à l'état limite ultime.

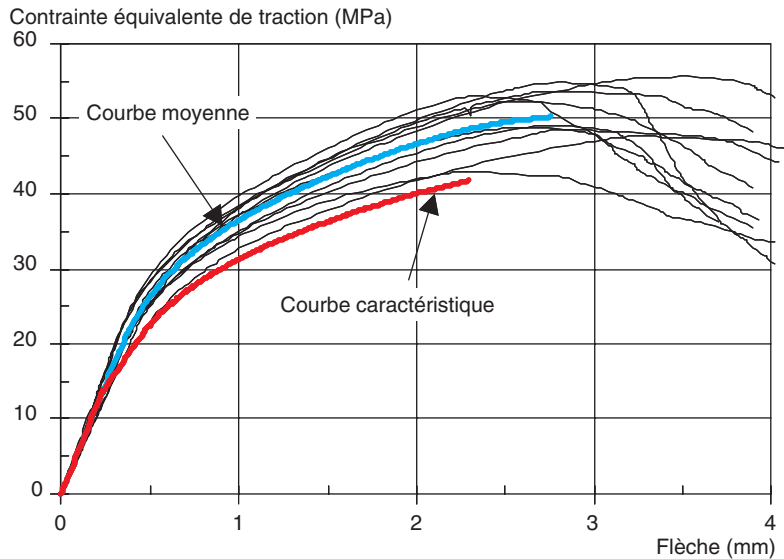
Sur les figures 14a et 14b sont présentées, pour le comportement en flexion de la dalle et pour celui de la nervure, l'ensemble des courbes contrainte équivalente de traction-flèche, la courbe moyenne et la courbe caractéristique.

Pour les essais de compression, des valeurs caractéristiques (calculées à partir des essais sur prismes) relatives à la résistance et à la déformation maximales ont été déterminées. On a ainsi :

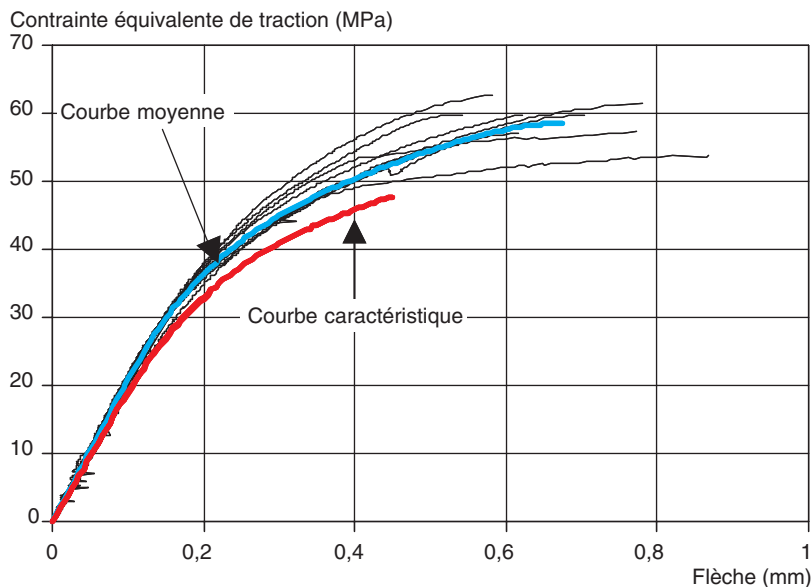
➤ traitement thermique : $R_c \text{ carac} = 205 \text{ MPa}$, $\sum_u \text{ carac} = 4,0 \cdot 10^{-3}$,
 ➤ cure à l'eau (six mois) : $R_c \text{ carac} = 215 \text{ MPa}$, $\sum_u \text{ carac} = 4,3 \cdot 10^{-3}$.

Conclusions

Le présent article porte sur le CEMTEC[®]_{multiscale} qui est un nouveau composite cimentaire récemment développé et breveté par le LCPC. Une étude expérimentale concernant, d'une part, le com-



a. En dalle.



b. En nervure.

Fig. 14 - Ensemble des courbes contrainte équivalente de traction-flèche, la courbe moyenne et la courbe caractéristique relatives au fonctionnement du CEMTEC[®]_{multiscale}.

portement en flexion de ce matériau dans les cas où il est utilisé dans une dalle et dans une nervure (cas de la dalle nervurée) et, d'autre part, son comportement en compression ont été présentés.

■ Les performances mécaniques obtenues lorsque le CEMTEC[®]_{multiscale} subit une cure thermique sont les suivantes :

➤ **pour la fonction dalle**

- la résistance moyenne en traction par flexion est égale à 50 MPa,
- la résistance caractéristique en traction par flexion est égale à 42 MPa ;

➤ **pour la fonction nervure**

- la résistance moyenne en traction par flexion est égale à 58 MPa,
- la résistance caractéristique en traction par flexion est égale à 48 MPa.

■ La résistance et la déformation maximale moyennes en compression du CEMTEC[®]_{multiscale} sont respectivement égales à 220 MPa et $4,5 \cdot 10^{-3}$.

- La résistance et la déformation maximale caractéristiques en compression du CEM-TEC^{multiscale}® sont respectivement égales à 205 MPa et $4,0 \cdot 10^{-3}$.
- Le module d'Young est égal à 55 GPa et son coefficient de Poisson est égal à 0,21.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier Jean-Joseph Serrano et son équipe pour leur importante contribution dans le bon déroulement de l'étude présentée dans cet article.

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] ROSSI P. High performance multimodal fiber reinforced cement composite (HPMFRCC) : the LCPC experience, *ACI Materials Journal*, vol. 94, **6**, **1997**, pp. 478-483.
- [3] Recommandations Provisoires de l'AFGC sur les bétons fibrés à ultra-hautes performances sous la direction de Jacques RESPLANDINO, AFGC-SETRA, janvier **2002**.
- [4] RICHARD P., CHEYREZY M., Les bétons de poudres réactives, *Annales de l'ITBTP*, **532**, **1995**, pp. 85-102.
- [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.