

Comportement mécanique d'un nouveau composite cimentaire à écrouissage positif

II. Caractérisation du comportement en traction uniaxiale

Claude BOULAY

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Antonio ARCA

Université de Cagliari Italie

Julien SANANES

IUT Saint-Denis

Jean Louis TAILHAN

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Pierre ROSSI

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Le LCPC a développé et breveté un nouveau composite cimentaire, formulé à partir de plusieurs types de fibres métalliques incluses dans une matrice ultraperformante. Cette étude expérimentale a pour objectifs d'étudier les comportements mécaniques de ce matériau composite sous différentes sollicitations. Les performances en traction directe du matériau étant très élevées, sa caractérisation expérimentale sous ce type de sollicitation ne peut être menée avec des techniques classiques. La mise au point d'un essai de traction directe, sur des éprouvettes en forme d'os, ainsi que les résultats obtenus sur ce nouveau composite cimentaire, sont présentés.

Ces résultats seront utilisés pour évaluer la pertinence d'une méthode numérique permettant de reconstruire la courbe contrainte/déformation en traction directe, jusqu'au pic de contrainte, à partir d'une expérimentation en flexion 4 points, menée en parallèle, beaucoup plus facile à mettre en œuvre.

Ce nouveau composite présente un comportement élastique suivi d'une zone ductile et écrouissante. En moyenne, sur quatre essais, le module élastique est égal à 55,5 GPa, la limite élastique à 17,3 MPa et la rupture intervient vers 20 MPa pour une déformation de $2 \cdot 10^{-3}$. Ces deux dernières valeurs, du fait d'une distribution préférentielle des fibres en fond de moule lors du coulage de poutres ou de dalles, constituent des bornes inférieures pour des essais de traction par flexion sur poutres ou dalles.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

MECHANICAL BEHAVIOR OF A NEW CEMENTITIOUS COMPOSITE WITH STRAIN HARDENING - II : CHARACTERIZATION OF THE BEHAVIOR IN UNIAXIAL TENSION

The LCPC laboratory developed and patented a new cementitious composite, based on several types of metallic fibers included within a very high-performance matrix. This experimental study is aimed at examining the mechanical behavior of this composite material submitted to various loadings. Since the performance of the material in direct tension turns out to be extremely high, its experimental characterization under this type of loading cannot be conducted with conventional techniques. The crafting of a direct tension test, carried out on bone-shaped specimens, along with the results obtained from this new material will be presented herein.

These results will then be used for evaluating the pertinence of a numerical method that enables recreating the stress/strain curve in direct tension up to peak stress on the basis of a complementary 4-point bending experiment, whose implementation proves much simpler.

The new composite displays an elastic behavior followed by a ductile and strain-hardening zone. Out of four tests, the averages show an elastic modulus equal to 55.5 GPa, a yield strength of 17.3 MPa and failure occurring around the 20 MPa level for a strain of $2 \cdot 10^{-3}$. Due to a preferential distribution of the fibers at the bottom of the mold during pouring of beams or slabs, these two latter values constitute the lower bounds for bending-based tensile testing on beams or slabs.

FIELD: Structural engineering.

Introduction

Depuis quelques années, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 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 celui de 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 par le passé par le LCPC [2], constitué d'un mélange de 5 % de fibres droites en acier tréfilé de 5 mm de long et de 0,25 mm de diamètre et de 2 % de fibres de 25 mm de long et de 0,3 mm de diamètre en acier tréfilé, munies de crochets à leurs extrémités. Le comportement en traction uniaxiale de ce MSCC est alors écrouissant (comme celui d'un acier) et la résistance en traction uniaxiale moyenne qu'il peut atteindre est de l'ordre de 15 MPa.

Une nouvelle formulation d'un MSCC (brevet mondial déposé par le LCPC en mars 2001 sous la dénomination CEMTEC_{multiscale}®), fait l'objet, depuis l'an 2000, d'une vaste étude sur quatre ans. Cette étude comprend 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 d'optimisation du procédé de fabrication des éléments structuraux (malaxage et mise en œuvre).

Par rapport au MSCC, ce nouveau composite comporte 3 géométries de fibres métalliques au lieu de 2 et la proportion volumique de fibres est de 11 % au lieu de 7 %.

Cette étude décrit la mise au point d'un essai de traction uniaxiale spécifique pour ce nouveau composite et présente les premiers résultats obtenus avec cet essai. Hors du champ de cette étude, il est envisagé d'utiliser les résultats des essais de flexion pour reconstruire, par approche inverse, la courbe de traction uniaxiale, l'essai de traction par flexion étant beaucoup plus facile à mettre en œuvre, dans une perspective industrielle.

Il faut souligner que l'application industrielle principalement visée par ce nouveau composite concerne les structures préfabriquées « 2D » du type dalles et coques minces. C'est donc plus précisément l'étude du comportement en traction uniaxiale d'un élément de structure fonctionnant en dalle qui est l'objet de la présente étude.

Formulation du composite étudié

Plusieurs variantes de ce composite ont en fait été développées au LCPC. La formulation employée dans cette étude est donnée dans le tableau I.

TABLEAU I
Formulation du composite (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 litres		

Les trois géométries de fibres métalliques utilisées sont les suivantes :

- fibre en acier tréfilé de longueur 25 mm et de diamètre 0,3 mm ;
- fibre en acier tréfilé de longueur 5 mm et de diamètre 0,15 mm ;
- laine d'acier dont la fibre la plus longue a 2 mm de longueur.

Effet de l'orientation préférentielle des fibres sur le comportement en traction des bétons de fibres

Avant de présenter l'essai, on peut souligner un aspect important qui conditionne la distribution des fibres dans une éprouvette.

Lors du remplissage d'un moule ou d'un coffrage, on observe généralement des zones dans lesquelles les fibres possèdent des orientations préférentielles et des zones où les orientations semblent quelconques. Ces directions sont évidemment corrélées aux directions des flux du béton dans le coffrage lors du coulage et de la vibration.

On peut supposer que les pivotements d'une fibre dans un béton sans armature apparaissent, lors de la mise en place et de la vibration, si des gradients de vitesses s'établissent. Une fibre longue sera plus sujette aux pivotements qu'une fibre courte. En effet, les fibres nettement plus longues que la taille des grains qui les entourent pivoteront facilement en raison d'un gradient de vitesse de ces particules alors que les fibres de la même taille que les grains qui les entourent n'auront pas de position préférentielle.

Cela explique que, lorsque l'on coule une poutre (coulée à plat) comme celle de cette étude, les fibres proches du fond de moule présentent une orientation moyenne parallèle au fond de moule et selon l'axe de la poutre. Le coulage ayant été effectué en avançant progressivement d'un bout à l'autre de la poutre, l'extrémité la plus proche du fond de moule d'une fibre quelconque est à vitesse quasiment nulle tandis que l'autre extrémité est entraînée par le flux horizontal de béton. Par contre, les fibres en partie supérieure de la poutre ne pivotent pas et leur orientation est quelconque. Il faut noter que, pour le béton de cette étude, les fibres les plus courtes sont nettement plus longues que les plus gros grains. De ce fait, on peut considérer que toutes les fibres de ce béton sont susceptibles de subir une orientation préférentielle.

À cela peut s'ajouter un effet de sédimentation des fibres métalliques, ce qui, au voisinage du fond de moule, achève la formation d'un lit horizontal de fibres longues.

La figure 1 illustre ce qui précède quant à l'orientation préférentielle des fibres dans l'épaisseur d'une poutre. La densité plus importante de fibres en fond de moule a pour conséquence une résistance en traction directe de la partie inférieure de la poutre (isolée du reste de la section) supérieure à celle de la section totale. La fibre inférieure étant plus résistante, la résistance en traction par flexion sera donc surestimée.

Un essai de traction uniaxiale conduira donc systématiquement à une sous-estimation de la résistance.

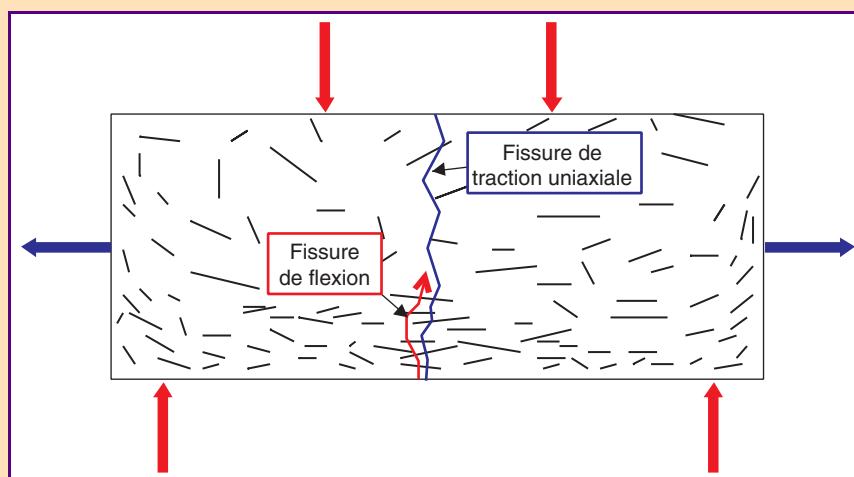


Fig. 1 - Orientation préférentielle des fibres dans l'épaisseur d'une poutre et initiation de la fissuration, soit par une sollicitation de traction uniaxiale, soit par une sollicitation de flexion.

Mise au point de l'essai de traction uniaxiale

L'objectif de cet essai est, comme mentionné dans l'introduction, de déterminer le comportement en traction uniaxiale du composite lorsqu'il est utilisé dans une dalle mince.

Le comportement en flexion et en compression du même matériau au sein de dalles minces dont l'épaisseur n'excède pas 5 cm ayant déjà fait l'objet d'une étude expérimentale [3], il a été décidé que l'épaisseur de l'éprouvette de traction ne devrait pas être supérieure à cette valeur.

Comme il est nécessaire que la répartition des fibres soit représentative de celle qui existe au sein d'une dalle, c'est-à-dire orthotrope (et, si possible, isotrope dans son plan), il a été décidé que la largeur de l'éprouvette, dans la zone de traction uniforme, devait être au moins quatre fois plus grande que la longueur de la plus grande fibre, et donc, en l'occurrence au moins égale à 10 cm.

D'autres critères sont également intervenus dans la définition de la géométrie de l'éprouvette :

- les champs de contrainte et de déformation dans la zone de l'éprouvette où les mesures de déformation sont réalisées doivent être le plus uniforme possible, et sur une longueur suffisante vis-à-vis de la longueur de la plus grande fibre : une base de mesure de 20 cm a été choisie ;
- l'éprouvette ne doit pas fissurer dans la zone située près de l'interface entre l'éprouvette et la presse, zone où les champs de contrainte et de déformation ne sont pas uniformes du fait d'un frettage inévitable de l'éprouvette. Or, des études antérieures [2], sur des composites cimentaires dont la matrice est voisine de celle du matériau étudié, ont indiqué que cette matrice commence à se fissurer pour une contrainte de traction avoisinant 8 MPa ;
- au regard toujours de ces études antérieures, on peut s'attendre à ce que la résistance en traction uniaxiale du composite utilisé dans des dalles avoisine les 25 MPa, c'est-à-dire environ trois fois la limite élastique.

Si l'on tient compte des critères et des remarques évoqués ci-dessus, on aboutit au cahier des charges suivant concernant les dimensions de l'éprouvette : elle doit avoir 5 cm d'épaisseur, 10 cm de largeur et 20 cm de longueur dans la zone où les champs de contrainte et de déformation doivent être les plus uniformes possible. De plus, elle doit avoir une largeur de 30 cm au niveau de l'interface avec la presse (pour que la contrainte y soit trois fois inférieure à celle de la zone où les mesures de déformation sont réalisées).

En s'inspirant des travaux de M.T. Do [4] [5] et de M. Behloul [6] [7], une éprouvette en forme d'os de 75 cm de longueur totale a été retenue à ce stade de l'étude. La géométrie de l'éprouvette, collée à une pièce d'adaptation à la presse, a été optimisée en utilisant le code aux éléments finis CESAR-LCPC (fig. 2).

Le but des calculs était de trouver le meilleur rayon de raccordement entre la partie centrale de l'éprouvette et la face en contact avec la pièce d'adaptation, sans qu'une concentration de contrainte trop importante apparaisse sur ce trajet, tout en conservant un champ de contrainte le plus uniforme possible en section centrale et une distribution de contrainte au droit de la face collée telle que la contrainte de rupture de la colle ne soit pas dépassée. Ces paramètres ont été respectés, à part une très légère surcontrainte au droit de la jonction de la partie rectiligne centrale de l'éprouvette et de l'arc de cercle la raccordant à la face supérieure.

L'aluminium a été choisi pour la réalisation des deux pièces d'adaptation parce que ce matériau possède un rapport module d'Young/coefficient de Poisson proche de celui des bétons en général, ce qui minimise les contraintes de cisaillement au niveau de l'interface casque/éprouvette et donc les risques de rupture à ce niveau. Ces casques étaient fixés à la presse par l'intermédiaire d'une queue fileté de 90 mm de diamètre.

Le choix de la colle utilisée pour la liaison entre l'éprouvette et les casques en aluminium, fondé sur l'expérience du LCPC dans le domaine des essais de traction directe sur les bétons de fibres « classiques », s'est porté sur une résine méthacrylate ayant une contrainte de rupture en traction d'environ 20 MPa.

Compte tenu de la forme de l'éprouvette, et pour éviter la génération de contraintes de traction liées au retrait gêné du matériau pendant son séjour dans le moule après le coulage, des précautions particulières, à l'instar de celles mentionnées par M. Behloul [7], ont été prises (fig. 3). Ces précautions ne sont pas superflues au regard du retrait endogène potentiel du matériau (plus de 1 000 kg/m³ de ciment !). La géométrie de l'éprouvette est également représentée sur la figure 3.

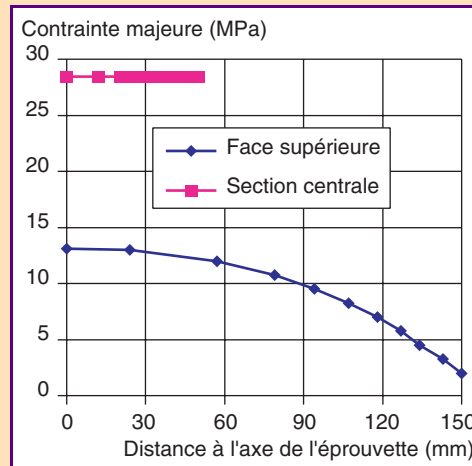
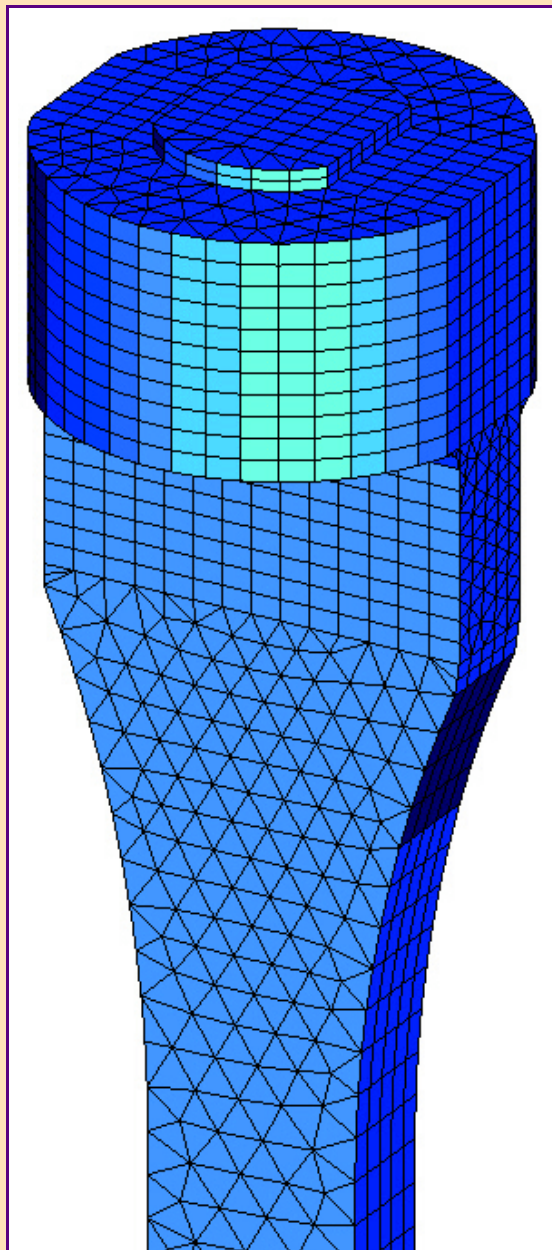


Fig. 2 - Demi-modèle 3D pour la détermination des formes de l'éprouvette et des casques de liaison à la presse. Le diagramme représente la distribution des contraintes majeures sur des coupes horizontales au droit de la section centrale et de la face supérieure de l'éprouvette. Ces contraintes majeures ont une direction verticale en tout point de la section centrale et au milieu de la face supérieure. La contrainte est constante en section centrale, mais elle présente un maximum au milieu de la face supérieure. Ce maximum est cependant inférieur à la contrainte de rupture de la colle (20 MPa).

Trois moules ont été fabriqués pour pouvoir couler neuf éprouvettes en trois gâchées (repérées TDxy TD comme traction directe, x étant le n° de gâchée et y le n° d'éprouvette). Ce coulage a été réalisé de manière identique à celui relatif aux éprouvettes qui ont permis, dans le cadre de l'étude évoquée précédemment [3], d'étudier le comportement de ce matériau au sein d'une dalle mince fonctionnant en flexion. Les faces supérieure et inférieure de chaque éprouvette ont ensuite été rectifiées à la meule.

Le premier essai a été réalisé avec des casques dont le diamètre du filetage s'adaptant à la presse n'était pas conforme aux tolérances imposées. Un jeu important existait, mais les casques semblaient pouvoir être utilisés. L'essai a donc été tenté, mais il a abouti à une rupture prématurée au niveau d'un des deux joints de colle (dans la matrice cimentaire). Cette rupture a été mise sur le compte de ce défaut des casques après avoir observé que les déformations, mesurées par 4 jauges de déformation de 120 mm de longueur collées sur chacune des faces de l'éprouvette, indiquaient une flexion importante pendant le chargement (la figure 4 montre la réponse de 2 jauges opposées). L'essai de traction était piloté à vitesse de vérin imposée égale à 0,1 mm/min.

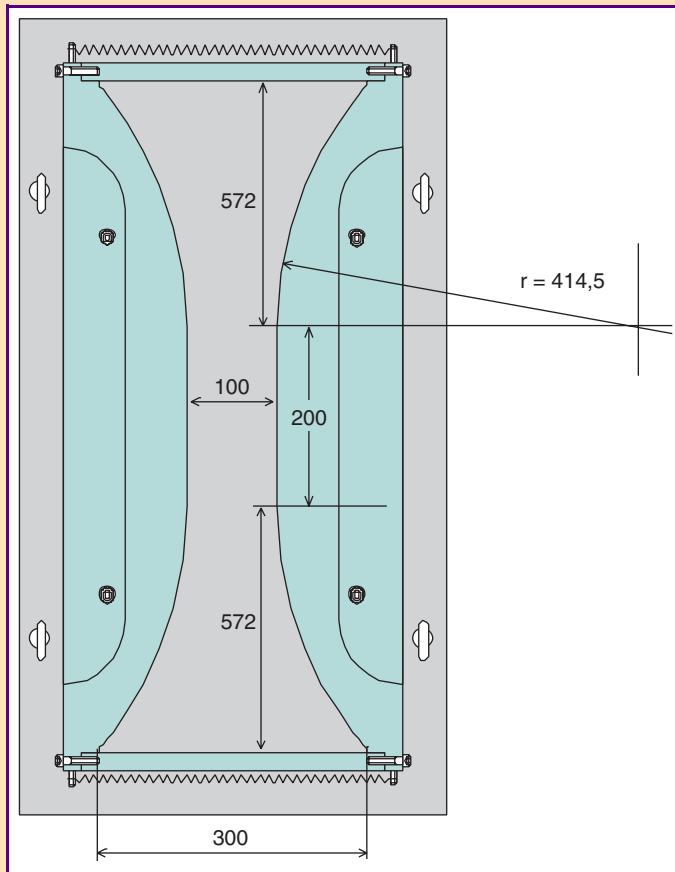


Fig. 3 - Le moule est constitué de flancs qui peuvent s'écarter latéralement lorsque l'éprouvette se rétracte. Au coulage, des vis plaquent ces flancs au fond de moule pendant la vibration. Par la suite, les vis sont retirées et des ressorts, rajoutés aux extrémités des flancs, assurent le maintien.

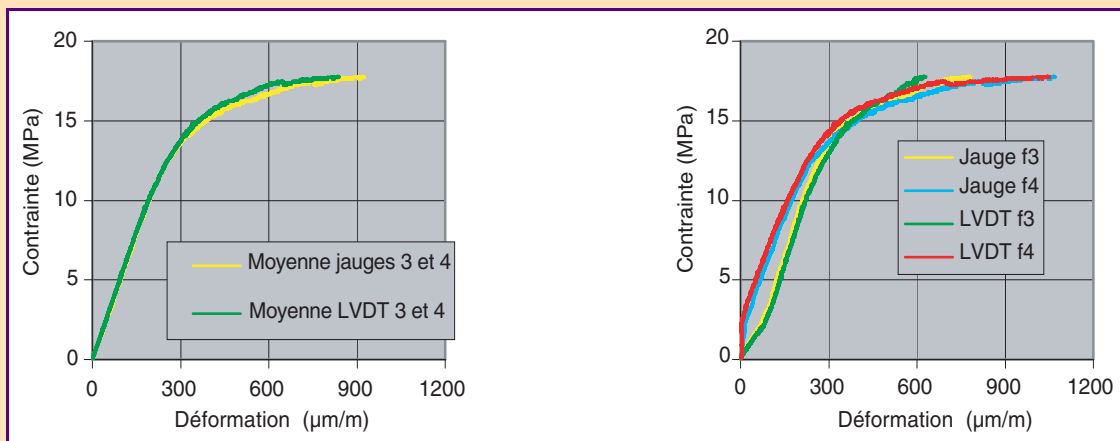


Fig. 4 - Comparaison des mesures de déformations effectuées avec des jauges de déformation de 120 mm de longueur et avec des LVDT sur une base de mesure de 200 mm (éprouvette TD21).

Ce premier essai a également permis de tester en parallèle des mesures de déformation à l'aide de capteurs de déplacement à transformateur différentiel (LVDT) maintenus par des supports collés sur une base de mesure de 200 mm (distance mesurée entre les faces en regard des supports qui avaient une épaisseur de 10 mm). Les deux faces opposées en forme d'os, notées 3 et 4, ont été instrumentées avec cette méthode.

Cette comparaison (fig. 4) montre un bon accord, dans la partie élastique de l'essai, entre les moyennes des jauges et les moyennes des LVDT. Les indications des deux moyens de mesure divergent ensuite. Les microfissures sous-jacentes conduisent alors à un fonctionnement douteux des jauges

de déformation tandis que les mesures par LVDT réalisent la somme de déplacements dus à des déformations élastiques et à des ouvertures de fissures. Les comparaisons individuelles des indications des deux moyens de mesure (déformation d'une jauge comparée à celle déduite du déplacement mesuré par le LVDT placé au-dessus) ne présentent pas un accord aussi bon dans la zone élastique. Dans ce cas, un écart pouvant aller jusqu'à 5 % a été constaté. Néanmoins, ce sont des mesures avec des LVDT qui ont été adoptées dans la suite de l'étude.

De nouveaux casques ayant été usinés, un deuxième essai a été mené selon le même protocole, les déformations des quatre faces de l'éprouvette étant déterminées à partir des mesures de quatre LVDT. Une rupture prématurée au droit du joint de colle, mais légèrement dans la matrice, s'est encore produite. Les déformations des quatre faces indiquaient encore une fois qu'une composante de flexion était présente (fig. 5).

Il a été décidé alors d'arrêter les essais simplement collés et de rajouter, pour les essais suivants, des appuis complémentaires placés sur les raccords concaves de l'éprouvette, ces appuis étant rendus solidaires de l'éprouvette et des casques en aluminium par l'intermédiaire de 4 tiges filetées précontraintes de 20 mm de diamètre (fig. 6). Ce choix a été fait pour deux raisons :

- pour être sûr de rompre l'éprouvette même en tolérant un peu de flexion ;

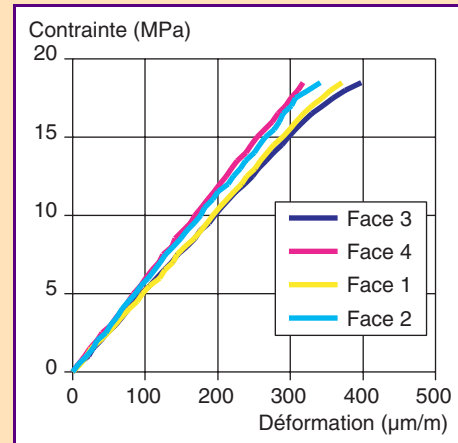


Fig. 5 - Deuxième essai de traction directe sur une éprouvette collée (TD22).

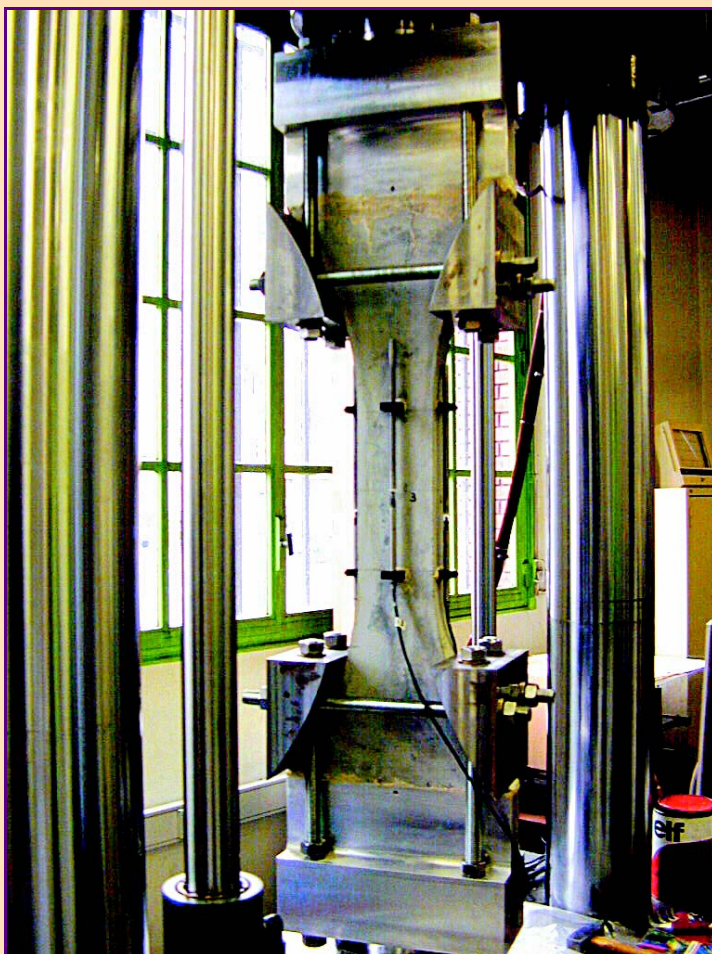


Fig. 6 - Montage expérimental de l'essai de traction uniaxiale utilisant des appuis complémentaires.

- pour diminuer la contrainte au centre de la surface collée qui, comme l'indique le calcul numérique évoqué plus haut, est environ égale à la moitié de la contrainte atteinte dans la partie à section constante de l'éprouvette. Pour les deux essais précédents, celle-ci a dû atteindre 9 MPa, ce qui est de l'ordre de grandeur de la résistance de la matrice. Or, au voisinage de la surface de collage, les fibres ne traversent pas l'interface, ce qui fait qu'elles ne participent pas à la reprise des efforts, engendrant ainsi des contraintes dans la matrice suffisantes pour amorcer une fissuration.

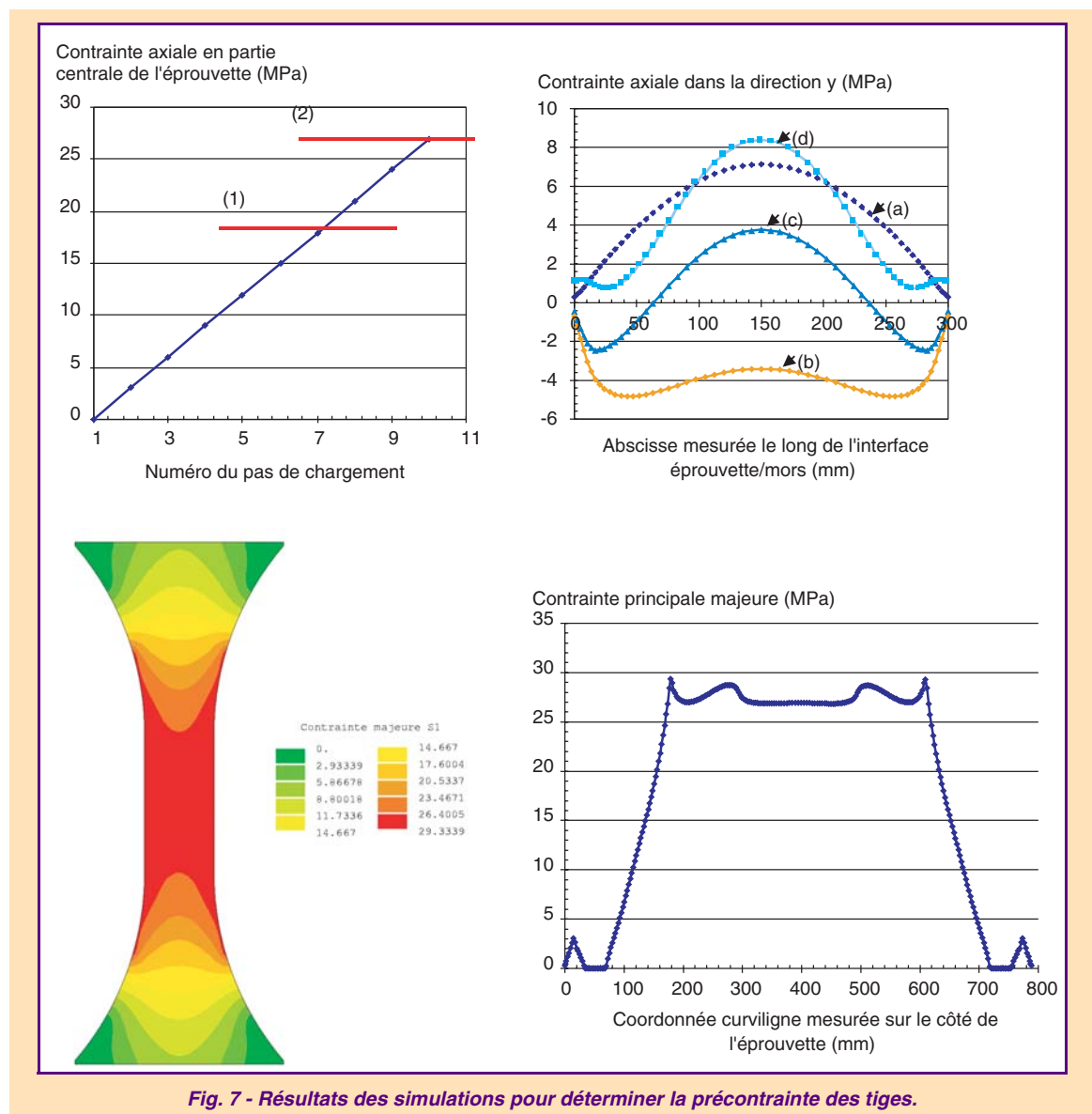
Afin de 1) vérifier l'état de contrainte dans la zone à section constante, 2) de s'assurer que le maximum de contrainte est atteint dans cette zone et 3) de trouver la valeur de la précontrainte à appliquer sur les tiges filetées pour éliminer les risques de fissuration au voisinage de la colle, il a été nécessaire de mener une seconde analyse numérique, toujours en utilisant le code aux éléments finis CESAR-LCPC.

Une série de calculs a été réalisée pour atteindre ces objectifs, en faisant varier certains paramètres du montage des appuis complémentaires. Pour analyser au mieux le comportement de l'ensemble des pièces impliquées, il a été choisi d'utiliser des éléments de contact simulant les phénomènes de frottement et de décollement aux différentes interfaces :

- éprouvette/casque, résistance en traction 8,5 MPa, cohésion 40 MPa, angle de frottement 30° ;
- appuis/éprouvette, résistance en traction et cohésion nulles, angle de frottement 30°.

Des simulations successives, dont les résultats sont illustrés sur la figure 7, ont été menées sur un modèle bidimensionnel en contraintes planes (épaisseur de 5 cm pour l'éprouvette) :

- une première simulation sans précontrainte des tiges d'acier montre que la valeur maximale de σ_{yy} (contrainte dans la direction du chargement) dans l'interface éprouvette/casque est proche de sa



valeur critique de 8,5 MPa (a) alors que la valeur maximale de σ_{yy} en partie centrale de l'éprouvette atteint tout juste 17 MPa (1) ;

- une deuxième simulation a consisté à appliquer une précontrainte dans les tiges d'acier (20 kN par tige verticale et horizontale), qui a pour effet de comprimer initialement l'interface de colle entre l'éprouvette et le casque (b). Dans cette interface, σ_{yy} atteint alors tout juste 4 MPa (c) pour un niveau de chargement identique au cas précédent (sans précontrainte) et 8,5 MPa (d) lorsque la contrainte en partie centrale de l'éprouvette est de 27 MPa (2).

Pour obtenir une précontrainte de 20 kN sur des tiges filetées de diamètre M20, le couple de serrage est de 65 Nm. Dans ces conditions, la contrainte de traction dans la partie centrale est homogène comme l'indique la figure 7 et la contrainte dans le joint de colle ne dépasse pas la résistance de la matrice ; par contre, on peut observer, le long d'une abscisse curviligne sur le côté de l'éprouvette, de légères surcontraintes de traction. Néanmoins, ces surcontraintes sont faibles, ce qui laisse un espoir d'obtenir une rupture en traction dans la partie centrale de l'éprouvette.

Résultats expérimentaux

La suite des éprouvettes TD32, 23, 33, 31, 11, 12 et 13 a ensuite été testée, dans cet ordre, à vitesse imposée de déplacement du vérin (0,1 mm/min).

La mise en place des éprouvettes suivait le protocole décrit ci-après. La face supérieure était collée (avec un effort de collage de l'ordre de 2 kN en compression). La face inférieure était collée après 10 min de durcissement du premier joint de colle (après l'éprouvette 31, une petite cale en acier de 5 × 5 mm de côté sur 0,5 mm d'épaisseur a été rajoutée dans le joint de colle au centre de la face inférieure pour que l'effort de collage soit parfaitement centré, ce qui n'était pas le cas pour les éprouvettes précédentes en raison du fait que les faces n'étaient pas tout à fait parallèles).

Dans cette série, quatre éprouvettes se sont rompues avec une fissuration dans la zone centrale instrumentée (éprouvettes TD23, 11, 12 et 13) tandis que, pour les trois autres éprouvettes, la fissuration s'est produite au niveau de la partie horizontale des appuis rajoutés, là où l'étude numérique a montré l'existence d'une sur-contrainte de traction.

La figure 8 regroupe les essais pour lesquels la zone centrale de l'éprouvette a été chargée jusqu'à un effort de rupture correspondant à l'ouverture complète d'une ou plusieurs fissures dans cette zone. Les autres essais ont vu le développement d'une ou plusieurs fissures à l'extérieur de la zone centrale, qui ont conduit à un déchargement sans que la zone centrale atteigne sa limite de rupture (fig. 9).

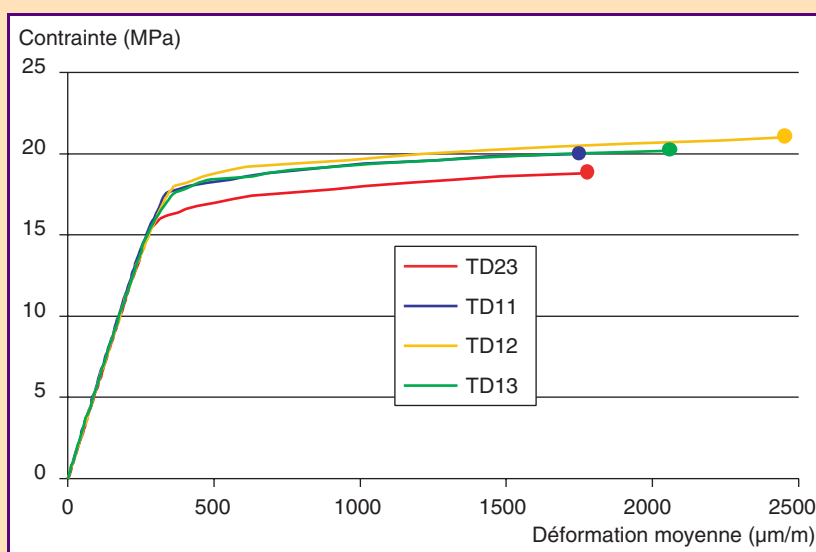


Fig. 8 - Courbes contrainte de traction-déformation moyenne des quatre essais pour lesquels la fissuration a eu lieu dans la zone à section constante.

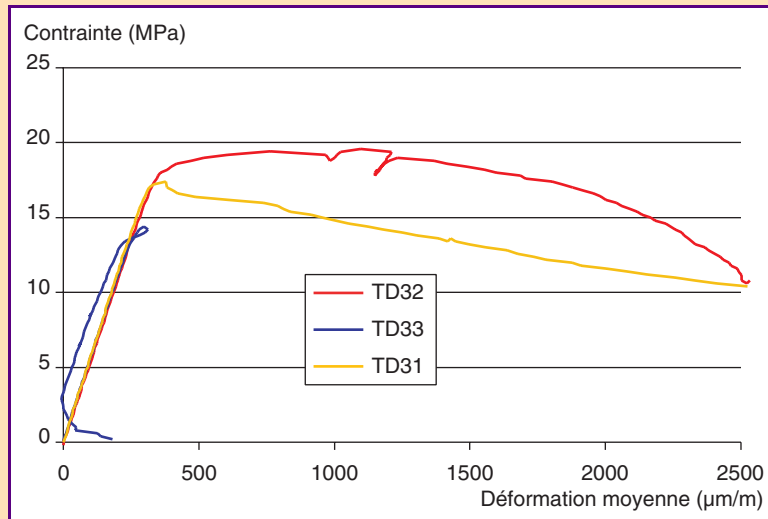


Fig. 9 - Courbes contrainte de traction-déformation moyenne des trois essais pour lesquels la fissuration a eu lieu en dehors de la zone à section constante. Les enregistrements de la déformation de la zone centrale après la fin de la partie linéaire indiquent un raccourcissement pour l'éprouvette 33, un allongement avec chute d'effort pour l'éprouvette 31 et un allongement avec une augmentation suivie d'une diminution d'effort pour l'éprouvette 32. Pour l'éprouvette 33, il n'existe aucune ambiguïté, la zone centrale n'ayant pas été chargée jusqu'à son maximum. Pour les deux autres, c'est l'examen de la position des fissures (extérieures à la zone instrumentée) qui conduit à écarter ces résultats.

L'analyse des enregistrements de la figure 8 conduit aux remarques suivantes :

- le comportement de ce matériau présente une zone élastique et une zone ductile et écrouissante (légère augmentation de la contrainte dans le palier anélastique) ;
- le module d'élasticité moyen obtenu en traction est de 55,5 GPa ($\pm 1,5$ GPa), c'est-à-dire identique à celui obtenu en compression [3] ;
- la limite d'élasticité (fin de la partie linéaire) est en moyenne de 17,3 MPa (coefficient de variation ou CV = 5 %) ;
- la résistance moyenne est de 20 MPa (CV = 5 %) ;
- la déformation à la rupture est en moyenne de $2 \cdot 10^{-3}$ (CV = 16 %).

Comme élément remarquable à souligner, on peut indiquer que, pour ces quatre essais, aucune fissuration visible (avoisinant les 50 microns d'ouverture) n'est apparue jusqu'à la contrainte maximale, et que l'apparition de macrofissures multiples (fig. 10) coïncide avec ce pic de contrainte.

Conclusions

Dans cette étude a été présentée la mise au point d'un essai de traction uniaxiale sur un nouveau composite cimentaire. Cet essai a été mené dans le cadre, plus général, d'une étude visant à trouver les outils permettant, par analyse inverse, de calculer la courbe contrainte/déformation jusqu'au pic d'effort du matériau en traction directe à partir d'un essai de flexion quatre points beaucoup plus simple à mettre en œuvre.

Du fait des performances élevées attendues pour ce matériau, c'est une géométrie en forme d'os qui a été retenue pour l'éprouvette de traction. Ses dimensions et son mode de fabrication ont été choisis pour être représentatifs du fonctionnement du matériau au sein d'une dalle mince.

Malgré les précautions prises lors de la conception de la géométrie des éprouvettes et des pièces d'adaptation à la presse, assistée par des calculs numériques, seuls quatre essais de traction uniaxiale sur neuf ont été retenus pour alimenter la base des données utiles pour l'analyse inverse. Ce sont soit des problèmes expérimentaux, soit des fissurations en dehors de la zone centrale de l'éprouvette, qui ont conduit à écarter certains essais.

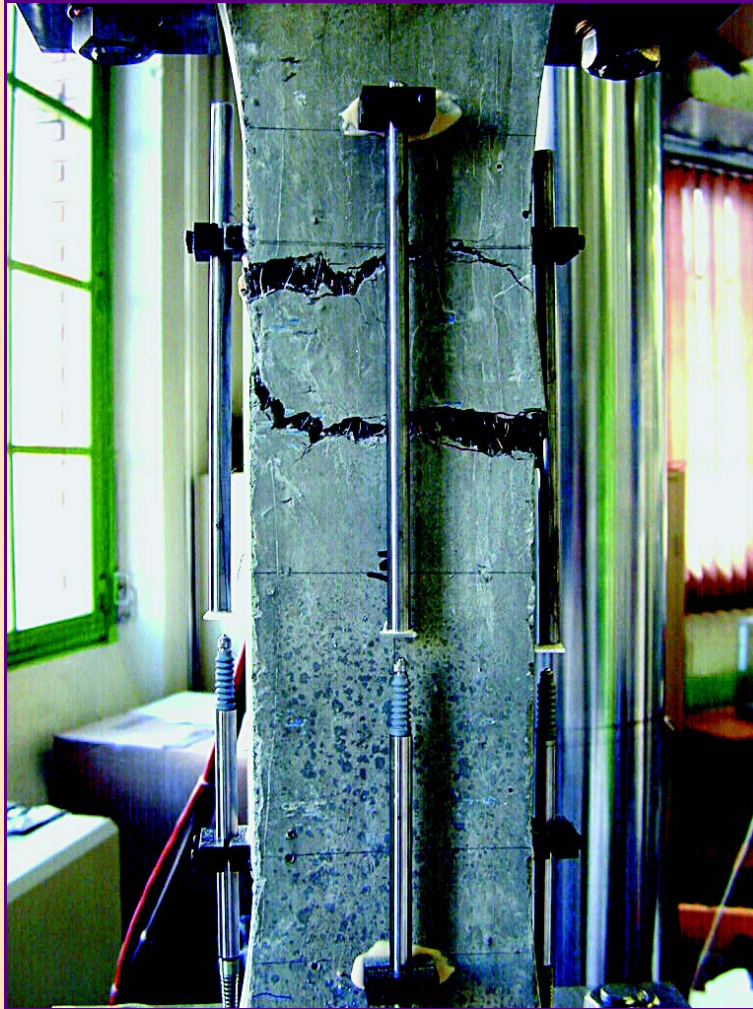


Fig. 10 - Macrofissures multiples du matériau étudié en traction uniaxiale. Cette fissuration est apparue après le pic de contrainte.

Les observations effectuées sur les essais retenus indiquent que :

- le comportement du composite étudié présente une zone élastique et une zone ductile et écouissante (augmentation de 15,6 % de la contrainte dans le palier anélastique après la limite élastique). Le module d'élasticité est de 55,5 GPa. La limite élastique est de 17,3 MPa. La contrainte de rupture est de 20 MPa. La déformation de rupture est de $2 \cdot 10^{-3}$. Ces deux dernières valeurs représentent une borne inférieure par rapport aux valeurs qui seraient obtenues lors d'essais de traction par flexion de poutres ou de dalles ;
- aucune fissuration visible n'est constatée jusqu'à la contrainte de rupture en traction. Après cette limite, une macrofissuration multiple est observée.

Les éprouvettes ont été coulées comme des dalles minces. Ce mode de coulage induit une orientation préférentielle des fibres qui s'alignent parallèlement au fond de moule. En flexion, le comportement de ce type d'éprouvette est plus performant qu'en traction directe. Le comportement en flexion de la dalle mince, obtenu par une simulation numérique fondée sur une loi de comportement expérimentale en traction directe, est donc sous-estimé. C'est la raison pour laquelle l'essai de traction uniaxial mis au point dans le cadre de cette étude n'avait pas pour vocation d'être systématiquement utilisé pour caractériser le comportement en traction des bétons fibrés ultra-performants. Il servira à évaluer la pertinence de la détermination, par approche inverse, du comportement en traction uniaxiale de ces matériaux à partir d'un essai de flexion.

La comparaison entre la détermination du comportement en traction uniaxiale du composite obtenue par la réalisation de l'essai de traction uniaxiale, et celle obtenue par approche inverse à partir de l'essai de flexion fera l'objet d'un prochain article.

- [1] ROSSI P., ACKER P. and 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] ROSSI P., PARANT E., LAURENCE O., FAKHRI P., ARCA A., Comportement mécanique d'un nouveau composite cimentaire à écrouissage positif. I. Comportement en flexion, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **238**, mai-juin **2002**, pp. 25-38.
- [4] DO M.T., *Fatigue des BHP*, Thèse de doctorat de l'Université de Sherbrooke, janvier **1994**, p. 79.
- [5] DO M.T., *Fatigue des BHP*, *Annales de l'ITBTP*, **536**, septembre **1995**, pp. 3-27.
- [6] BEHLOUL M., Définition d'une loi de comportement du BPR, *Annales de l'ITBTP*, **532**, mars-avril **1995**, pp. 122-127.
- [7] BEHLOUL M., *Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances – (béton de poudres réactives) – Du matériau à la structure*, Thèse de doctorat de l'ENS Cachan, 13 décembre **1996**, pp. 23 à 29 et annexe 3, pp. 166-167.