

Un composite cimentaire résistant à la fissuration : synergie « granulats en caoutchouc-renfort par des fibres »

Sandra BONNET

LMDC, Institut national des sciences appliquées - Université Paul Sabatier, Toulouse
Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

Anaclet TURATSINZE

LMDC, Institut national des sciences appliquées - Université Paul Sabatier, Toulouse

Jean-Louis GRANJU

LMDC, Institut national des sciences appliquées - Université Paul Sabatier, Toulouse

RÉSUMÉ

L'amélioration de la capacité de déformation des matériaux cimentaires, facteur de limitation de la fissuration, est un enjeu majeur. L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés, en substitution volumique des granulats naturels, est proposée. L'association de cette solution avec un renfort par des fibres métalliques a aussi été testée.

Malgré des chutes de résistances en compression et en traction, le composite obtenu a, en flexion, une capacité de déformation avant localisation de la macrofissure nettement améliorée par rapport à un mortier traditionnel. Cependant, ses variations dimensionnelles de retrait sont plus importantes. Des essais de retrait empêché à l'anneau permettent de mettre en compétition ces deux effets. Ils montrent l'efficacité des granulats en caoutchouc ainsi que leur synergie avec un renfort par des fibres contre la fissuration de retrait : celle-ci apparaît tardivement, sous forme d'un réseau de microfissures diffuses moins préjudiciables. Ces résultats permettent d'envisager des applications plus durables et offrent une voie de valorisation aux pneumatiques usagés.

DOMAINE : *Ouvrages d'art.*

ABSTRACT

A CRACK-RESISTANT CEMENTITIOUS COMPOSITE: THE SYNERGY EFFECT BETWEEN STEEL-FIBRES AND RUBBER AGGREGATES

Enhancing the straining capacity of cementitious materials, a factor improving their cracking resistance is an important challenge. It has been assumed that incorporation of rubber aggregates obtained from shredded used tyres, partly replacing natural aggregates, is a solution. The synergy effect of rubber aggregate substitution and of metal-fibre reinforcement has been also investigated.

Despite low compressive and tensile strengths of rubberized cementitious composites, flexure tests showed that such composites exhibit high straining capacity prior to macrocracking localization. Their shrinkage length changes however are even more pronounced. Ring-tests have been carried out to investigate restrained shrinkage cracking and to compare both of these effects. They demonstrate the effectiveness of rubber aggregates along with their synergistic effect when combined with fibre reinforcement to improve resistance to shrinkage cracking. Such cracking is delayed and when it occurs, less detrimental multiple cracking is observed. This behavior is promising for more durable applications and presents an opportunity to recycle rubber tyres.

FIELD: *Structural engineering.*

INTRODUCTION

Les matériaux cimentaires, par leur performance en termes de résistance mécanique et de durabilité, dominent le marché des matériaux de construction. Ils restent pourtant perfectibles : leur capacité de déformation très limitée ainsi que leur faible résistance à la traction les rendent sensibles à la fissuration, notamment à la fissuration de retrait gêné.

À titre d'exemple, les dallages, les chaussées et, plus généralement, les éléments mis en place sur des surfaces importantes se fissurent sous l'effet du retrait. De plus, le vieillissement des structures en béton pose le problème de leur réparation. Une des techniques utilisées est le rechargement mince adhérent. Sa fissuration, quelle que soit son origine, joue un rôle moteur dans son décollement [1-3] et limite sa durabilité. Dans tous les cas, au-delà du désagrément esthétique, cette fissuration peut

être préjudiciable au fonctionnement même des structures. L'amélioration de la capacité de déformation des matériaux cimentaires, facteur de limitation de la fissuration, est donc un enjeu majeur.

Pour atteindre cet objectif, l'incorporation de granulats déformables dans la matrice cimentaire a été envisagée. Concrètement, des granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés ont été utilisés. Il s'agit là d'un choix volontaire pour son intérêt écologique. Par ailleurs, depuis le décret ministériel n° 2002-1563 du 24 décembre 2002, il est interdit d'abandonner, de déposer dans le milieu naturel ou de brûler à l'air libre les pneumatiques. À titre d'information, le gisement de pneus usagés non réutilisables (PUNR) en France est chiffré à 405 000 tonnes par an, dont la moitié (190 000 t/an) reste inexploitée (décharge, ensilage), un bilan difficile à corriger sans promouvoir de nouvelles voies de valorisation.

Le renforcement par des fibres, solution traditionnellement mise en œuvre pour limiter les effets de la fissuration, a été aussi testé en association avec l'incorporation de granulats en caoutchouc.

Enfin, si de l'incorporation de granulats en caoutchouc est attendu un bénéfice en terme de déformabilité, en contrepartie, il est à craindre des variations dimensionnelles de retrait plus importantes. Des essais ont été réalisés pour approfondir ce point et pour évaluer la résultante de ces deux phénomènes dont les effets sont en opposition vis-à-vis de la fissuration.

Après la présentation des caractéristiques du composite en compression et en traction, sa capacité de déformation maximale sera évaluée à travers des essais de flexion quatre-points. Ensuite, l'évaluation des variations dimensionnelles de retrait, des essais de retrait empêché à l'anneau et le suivi de la fissuration induite apporteront des éléments pertinents permettant d'apprécier la résistance du composite à la fissuration de retrait.

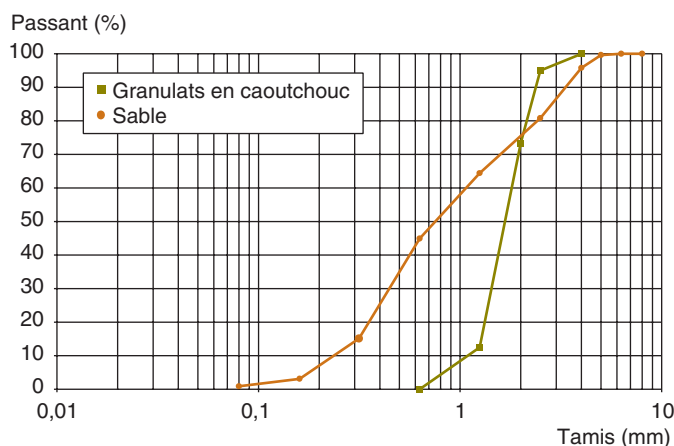
MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Les résultats présentés permettent de comparer les propriétés mécaniques d'un mortier de référence à celle d'un mortier incorporant 30 % de granulats en caoutchouc. Les effets d'un renfort par des fibres métalliques (40 kg/m^3) associé ou non à l'incorporation de granulats en caoutchouc ont aussi été évalués. Pour faciliter la lecture, la nomenclature adoptée est la suivante : le nombre précédant la lettre « C » représente la fraction volumique en granulats en caoutchouc (%) et celui précédant la lettre « F » indique le dosage en fibres (kg/m^3).

Le ciment utilisé est de type CEM I 52,5R. Du sable siliceux roulé de Garonne a été utilisé comme granulats. Les granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés sont utilisés en substitution volumique du sable. Leurs densités respectives sont 2,7 et 1,2 et leurs courbes granulaires sont représentées sur la figure 1. Dans les deux cas, la dimension du plus gros grain est de 4 mm. Dans le cas des compositions renforcées de fibres, des microfibrilles métalliques tréfilées droites, de 13 mm de longueur et 0,17 mm de diamètre ont été introduites dans le mélange lors du malaxage.

Pour faciliter la mise en place du matériau, en particulier lorsque les fibres sont ajoutées, un superplastifiant à base de polyméla mine-sulfonate a été utilisé et l'introduction d'un agent de texture (agent colloïdal) dans le mélange cimentaire a permis de limiter la remontée des granulats en caout-

■ Fig. 1
Courbes granulaires des agrégats utilisés.



chouc à la surface du mélange lors de la vibration des échantillons. Afin de s'affranchir de l'incidence des effets secondaires de cet adjuvant sur les propriétés du mortier, celui-ci a été aussi utilisé dans la composition de référence. Dans tous les cas, le temps d'écoulement mesuré grâce au maniabilimètre à mortier LCL est compris entre 3 et 8 s. La composition des mortiers est donnée dans le tableau I.

TABLEAU I
Compositions des mortiers (les quantités sont exprimées en kg/m³)

Compositions	Ciment	Sable	Eau	Granulats en caoutchouc	Agent colloïdal	Super-plastifiant	Fibres
MOC0F	500	1 600	250	0	0,8	3	0
MOC40F				40			
M30C0F		1 120		215			0
M30C40F				40			

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Compression et traction simple

Dispositif expérimental

Compression simple

Les mesures ont été effectuées sur six éprouvettes cylindriques de diamètre 11,8 cm et de hauteur 23,6 m. Après la mise en place du mortier, les éprouvettes ont été conservées dans une chambre à 20° C et à 100 % d'humidité relative. Elles ont été démoulées au bout de 24 h et conservées pendant 27 jours dans les mêmes conditions.

La résistance et le module d'élasticité ont été mesurés. La presse utilisée, à pilotage automatique, est d'une capacité de 3 000 kN. Le module d'élasticité a été déterminé suivant les recommandations RILEM [4]. Dans ce but, la déformation a été mesurée grâce à trois jauges extensométriques avec une base de mesure de 3 cm, collées longitudinalement sur la surface latérale de l'éprouvette cylindrique à 120° afin de tenir compte des effets d'une flexion éventuelle.

Traction simple

Pour chaque composition, les mesures ont été effectuées sur quatre éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur obtenues par carottage dans un prisme de 10 × 10 × 50 cm. Ce dernier a été démoulé au bout de 24 h et conservé dans une chambre à 20° C et à 100 % d'humidité relative pendant 27 jours. Pour limiter la dispersion, notamment dans le cas des éprouvettes renforcées par des fibres ou incorporant des granulats en caoutchouc, les carottages ont été tous réalisés à la même profondeur, et suivant une direction perpendiculaire à celle de la mise en place du matériau. La presse utilisée avait une capacité de 50 kN. Les essais ont été réalisés à force imposée à la vitesse de 0,05 MPa par minute.

Résultats et discussions

Les variations de la résistance et du module d'élasticité en compression et en traction, en fonction du taux d'incorporation en granulats en caoutchouc et du fibrage sont illustrées respectivement par les figures 2 et 3 ainsi que par les figures 4 et 5.

La figure 2 montre que l'incorporation de granulats en caoutchouc est très préjudiciable à la résistance à la compression. Les très faibles résistances (de l'ordre de 5 MPa pour une fraction volumique en granulats en caoutchouc de 50 %) non présentées dans cet article nous ont conduit à limiter le taux d'incorporation maximal à 30 %. Dans ce cas, nous avons enregistré une chute de résistance de 80 %

par rapport au mortier de référence (cf. Fig. 2). Toutanji [5], en incorporant des fragments de pneus de grande dimension dans les bétons, a constaté également de fortes chutes de la résistance en compression. Goulias [6] explique cette chute de résistance par le faible module d'élasticité des inclusions

Fig. 2
Résistance en compression à 28 jours.

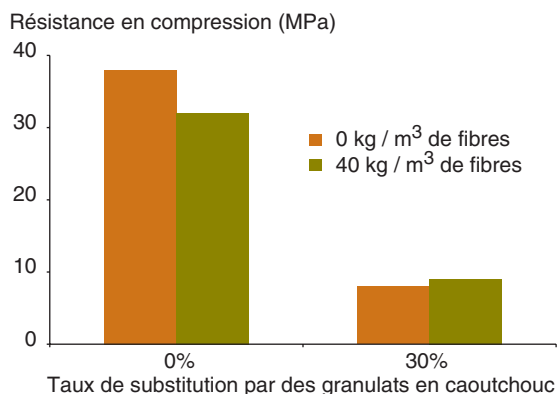


Fig. 3
Module d'élasticité en compression à 28 jours.

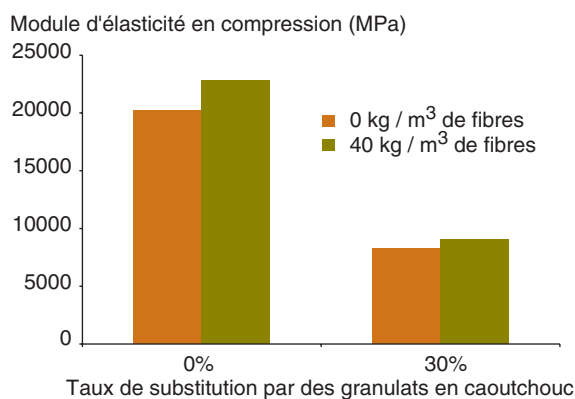


Fig. 4
Résistance en traction à 28 jours.

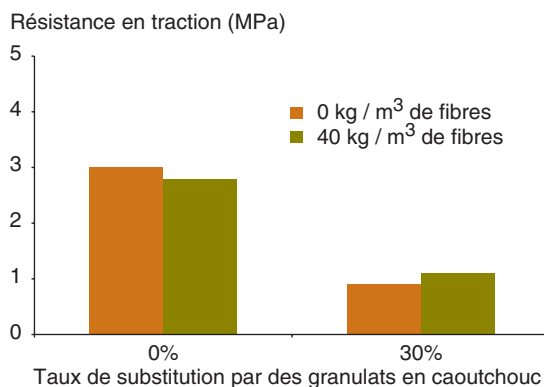
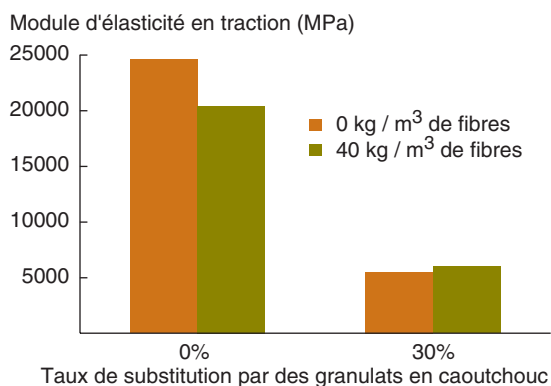


Fig. 5
Module d'élasticité en traction à 28 jours.



en caoutchouc auxquelles il attribue les effets de pores. On peut penser qu'une telle comparaison est inexacte puisque le module de compressibilité du caoutchouc est relativement élevé, de l'ordre de 1 GPa. Les inclusions en granulats en caoutchouc confinées dans la matrice cimentaire contribuent au transfert des contraintes lorsqu'une charge extérieure est appliquée au corps d'éprouvette. En revanche, la différence significative entre le coefficient de Poisson du caoutchouc et celui de la matrice cimentaire peut être néfaste et entraîner une fissuration prématurée du composite. Enfin, on peut s'attendre à des réponses différentes de la part du composite selon qu'il est sollicité en traction ou en compression, puisque les comportements du caoutchouc sont différents dans ces deux modes de sollicitation.

D'après certains auteurs [7-8], le traitement préalable de la surface des grains de caoutchouc avant leur introduction dans le mélange permettrait de pallier le défaut d'adhérence observé entre le caoutchouc et la matrice cimentaire et ainsi de limiter les chutes de résistance en compression. Les résultats d'une importante campagne d'essais montrent toutefois que la résistance en traction entre les granulats en caoutchouc et la matrice, bien qu'améliorée par un traitement chimique, reste trop faible (de l'ordre de 0,4 MPa) pour espérer une augmentation significative de la résistance en compression du composite. Par contre, le développement de cette adhérence est susceptible d'améliorer les propriétés physiques du composite, notamment en ce qui concerne les propriétés de transfert de l'interface caoutchouc-matrice.

S'agissant des effets du renfort par des fibres sur la résistance en compression, ils sont bien connus. Avec le type de fibres et avec le dosage utilisé, les courbes de la figure 2 montrent une incidence relativement négligeable de celles-ci devant l'effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc.

Les courbes de la figure 3 montrent que le module d'élasticité suit la même tendance que la résistance en compression : la rigidité du mortier diminue avec l'incorporation de granulats en caoutchouc.

En traction, on peut remarquer que les tendances relevées en compression sont encore valides. Par rapport au mortier de référence, une chute de résistance à la traction de l'ordre de 70 % (cf. Fig. 4) est observée pour une fraction volumique en granulats en caoutchouc de 30 %. Aux dosages utilisés, le renforcement par des fibres reste d'un effet relativement négligeable devant celui des granulats en caoutchouc.

Comme précédemment, on observe une grande sensibilité du module d'élasticité (cf. Fig. 5) à l'incorporation de granulats déformables.

Flexion quatre-points

Dispositif expérimental

Ces essais ont été pratiqués sur quatre éprouvettes prismatiques de dimensions $8,5 \times 5 \times 42$ cm. Ces dernières ont été démoulées au bout de 24 h et conservées dans les mêmes conditions que les éprouvettes de compression, pendant 27 jours. Pour réaliser les essais de flexion quatre-points, une presse hydraulique d'une capacité de 50 kN a été utilisée. Une barre de référence qui sous son poids propre repose sur deux supports solidaires de l'éprouvette et sur laquelle est monté un capteur de déplacement permet de mesurer la flèche vraie de l'éprouvette. L'essai est asservi à cette flèche, incrémentée à la vitesse imposée de 50 $\mu\text{m}/\text{min}$. L'ensemble du dispositif est représenté sur la figure 6.

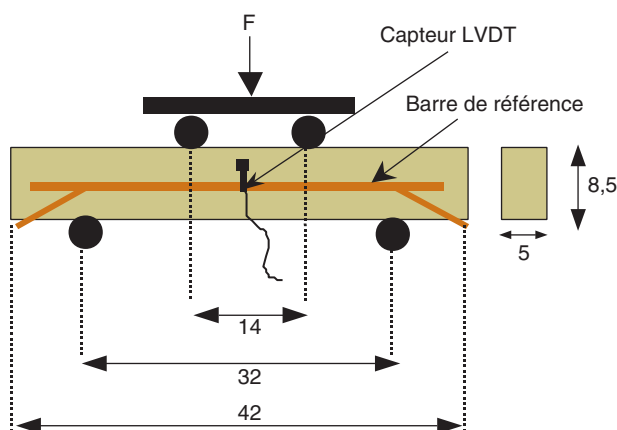
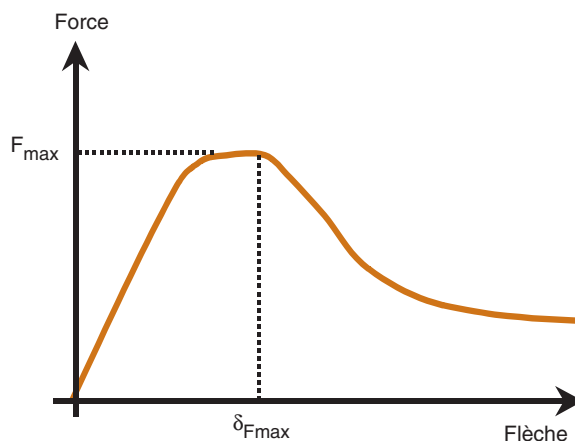


Fig. 6
Dispositif de l'essai de flexion quatre-points.

Les courbes « force-flèche » obtenues permettent de caractériser la réponse des matériaux par la charge maximale (F_{\max}) ainsi que par la flèche maximale ($\delta_{F_{\max}}$) associée à la charge maximale : cette flèche correspond à la capacité de déformation maximale avant localisation de la macrofissure (Fig. 7). Nous avons aussi mesuré la rigidité (k) du matériau définie par le rapport $\Delta F/\Delta \delta$ mesurée entre $F = 0$ kN et $F = 2$ kN.

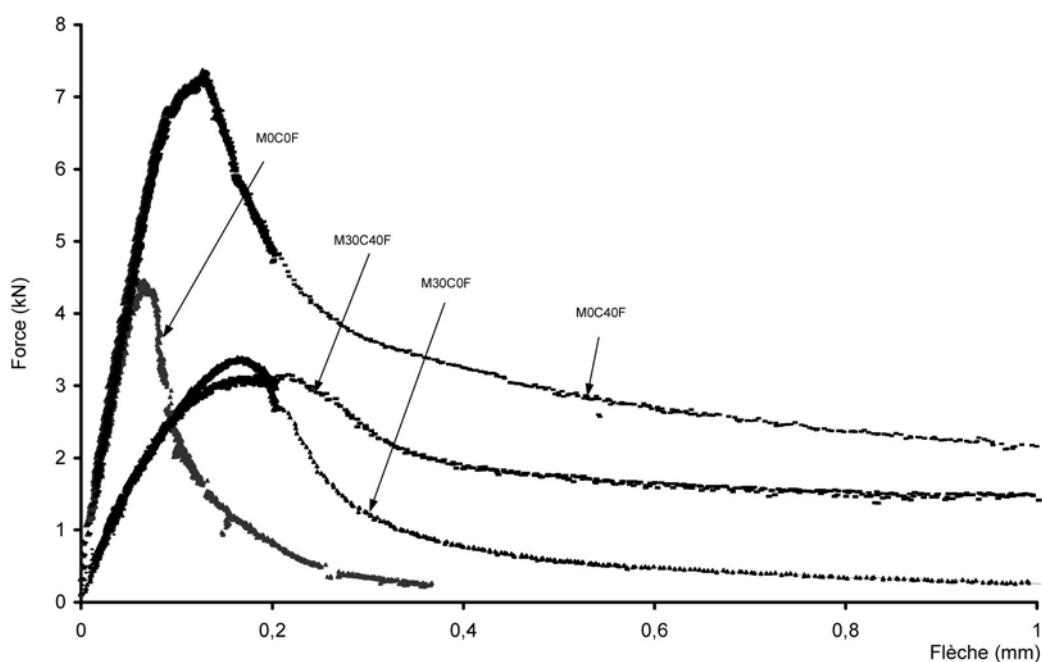
■ Fig. 7
Paramètres caractéristiques
en flexion quatre-points.



Résultats et discussion

Les courbes de la figure 8, qui sont représentatives de l'ensemble des résultats, montrent l'influence des granulats en caoutchouc et illustrent également les effets combinés du fibrage et de l'incorporation des granulats en caoutchouc sur le comportement en flexion quatre-points des composites étudiés.

Les paramètres retenus et définis sur la figure 7 sont répertoriés dans le tableau II, où chaque valeur est une moyenne sur quatre essais.



■ Fig. 8

Courbes « flèche-force », influence du taux de substitution par des granulats en caoutchouc et du renfort par des fibres.

TABLEAU II
Influence de l'incorporation de granulats en caoutchouc et du fibrage sur les paramètres caractéristiques du comportement en flexion quatre-points

Compositions	M0C0F	M0C40F	M30C0F	M30C40F
F_{max} (kN)	4,90	6,90	3,30	3,10
δ_{Fmax} (mm)	0,080	0,110	0,195	0,210
$k = \Delta F / \Delta \delta$ (kN/mm)	83	87	27	28

Charge maximale F_{max}

Les résultats obtenus montrent que la charge maximale diminue avec l'incorporation des granulats en caoutchouc et qu'un renfort par des fibres ne permet pas d'inverser cette tendance. Cependant, une augmentation de la capacité portante maximale (F_{max}) est observée dans le cas d'un renforcement par les fibres du mortier de référence (M0C40F).

Capacité de déformation maximale avant localisation de la macrofissure

En augmentant la charge maximale F_{max} , le renfort par les fibres permet aussi d'augmenter la capacité maximale de déformation.

En ce qui concerne l'incorporation de granulats en caoutchouc, on peut constater qu'elle permet aussi d'augmenter la capacité de déformation et cela malgré la chute de la charge maximale. Dans ce sens, un taux d'incorporation en granulats en caoutchouc de 30 % permet de multiplier la capacité de déformation avant localisation de la macrofissure par 2,5 et s'avère plus efficace qu'un renfort par des fibres à 40 kg/m³. On notera la synergie lorsque les granulats en caoutchouc et un renfort par les fibres sont associés.

Deux causes peuvent être avancées pour expliquer cette réponse :

- la faible rigidité k des composites incorporant des granulats en caoutchouc (cf. tableau II). Néanmoins, compte tenu de la chute de la charge maximale F_{max} , la faible rigidité ne peut à elle seule constituer une explication ;
- la cinétique de la fissuration, différente lorsque les granulats en caoutchouc sont ajoutés. Dans ce dernier cas, on peut expliquer en grande partie le comportement observé par une redistribution des contraintes qui freine la propagation de la fissuration. En effet, à chaque fois qu'une fissure débouche sur un granulat en caoutchouc, il se produit une relaxation des contraintes en défaveur du processus de propagation.

Enfin, les niveaux de contraintes résiduelles post-pic montrent que, même en présence de granulats en caoutchouc, un renfort par les fibres demeure bénéfique. Les effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc (retard de la localisation de la macrofissure) et du renfort par des fibres (capacité portante post-fissuration) peuvent donc se cumuler.

Variations dimensionnelles de retrait

Dispositif expérimental

Ces essais ont pour but de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur d'éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions 4 × 4 × 16 cm, conservées après démoulage dans une ambiance atmosphérique contrôlée (humidité relative : 50 %, température : 20 °C). Les éprouvettes sont munies de plots à leurs extrémités, afin d'assurer le contact avec les palpeurs de l'appareil de mesure (rétractomètre). L'incertitude des mesures est de ± 5 micromètres.

Résultats et discussion

Les courbes des figures 9 et 10 représentent les variations dimensionnelles de retrait des composites au cours du temps ainsi que les pertes de masse enregistrées. Pour chaque composition, la moyenne des valeurs obtenues sur trois essais a été reportée.

Fig. 9
Variations dimensionnelles de retrait en fonction du temps. Effets du taux de substitution par des granulats en caoutchouc et du fibrage.

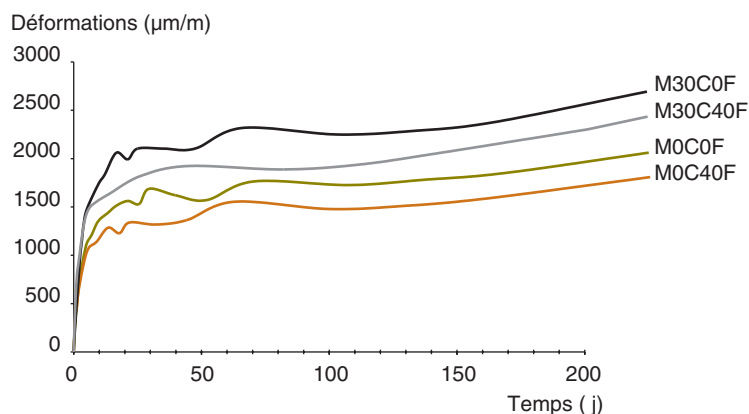
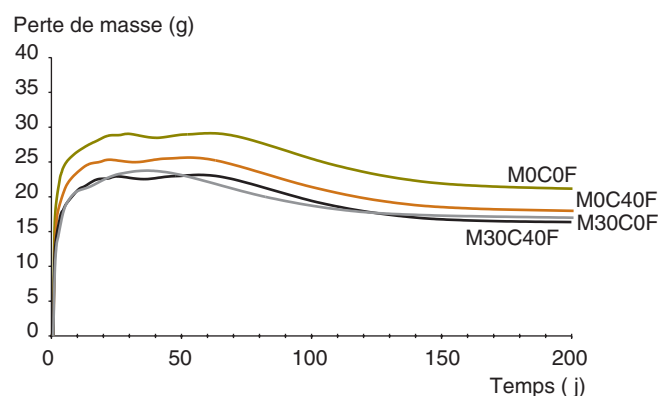


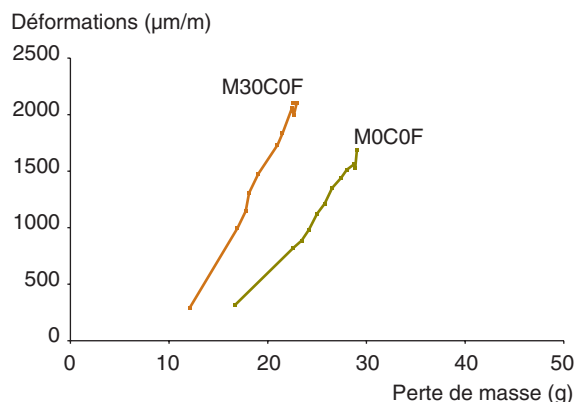
Fig. 10
Perte de masse en fonction du temps. Effets du taux de substitution par des granulats en caoutchouc et du fibrage.



Il est bien connu que le module de déformation des granulats a une influence sur les variations dimensionnelles de retrait [9-10] et, logiquement, les courbes obtenues montrent que le retrait total augmente en fonction du taux d'incorporation de granulats en caoutchouc. On peut aussi constater que l'incorporation de fibres métalliques produit un effet inverse. D'autres auteurs ont mis en évidence cet effet des fibres. On peut citer des travaux [11] dans lesquels les auteurs ont utilisé comme granulats un mortier concassé (recyclage des matériaux de construction) et comme fibres des fibres polypropylènes et des fibres métalliques.

Même si le retrait est un phénomène qui demeure complexe, il est largement admis qu'une partie prépondérante du retrait est liée à des échanges d'eau avec l'extérieur. Dans le cas des mortiers incorporant des granulats en caoutchouc, les pertes de masse en fonction du temps représentées sur la figure 10 montrent qu'un autre facteur joue un rôle important. En effet, la variation du retrait total en fonction de la perte de masse de la figure 11 montre qu'à même perte de masse, le composite incorporant des granulats en caoutchouc présente un retrait total plus important. La nature déformable des granulats en caoutchouc est donc la cause première de l'augmentation des variations dimensionnelles de retrait.

Fig. 11
Variations dimensionnelles de retrait en fonction de la perte de masse. Effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc.



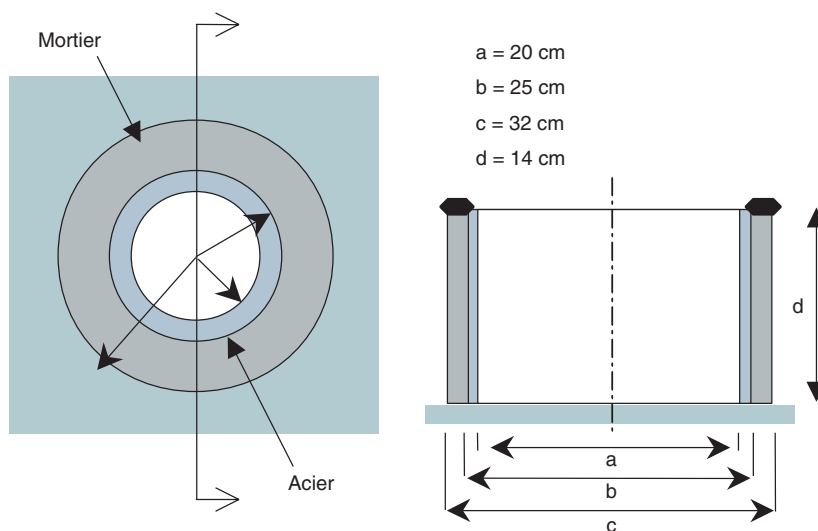
Néanmoins, ce surplus de retrait ne signifie pas forcément une plus grande sensibilité à la fissuration de retrait. En effet, la capacité de déformation des mortiers incorporant des granulats en caoutchouc est susceptible de contrebalancer et de compenser les effets du retrait. Il s'agit donc d'une compétition entre deux phénomènes dont les effets, vis-à-vis de la fissuration, sont en opposition.

Des essais de retrait empêché à l'anneau (ring-test) ont été réalisés pour établir un bilan et ainsi déterminer lequel des deux phénomènes est prépondérant. Ces essais ont ainsi permis d'apprécier la résistance à la fissuration de retrait des nouveaux composites.

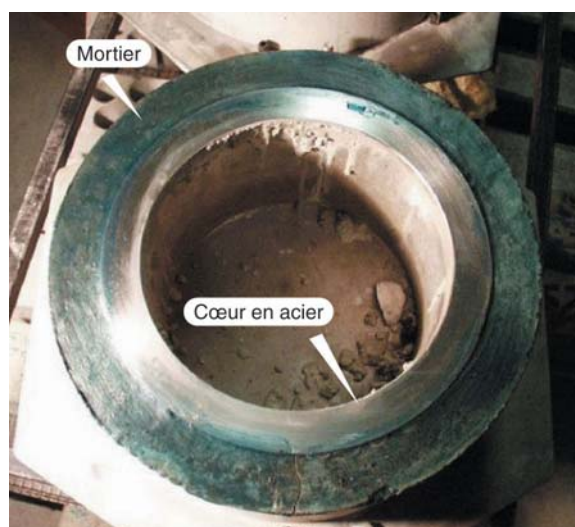
Essai à l'anneau (ring-test)

Dispositif expérimental

Malgré ses limites, notamment compte tenu du frottement engendré par l'étreinte radiale à l'interface mortier-acier, l'essai à l'anneau a été largement utilisé pour caractériser la sensibilité des mortiers de ciment à la fissuration de retrait [11-13]. Son principe, bien connu, consiste à déterminer l'échéance et la nature de la fissuration d'une éprouvette annulaire coulée autour d'un cœur en acier, suffisamment rigide, empêchant la déformation de retrait du matériau. Ainsi, des contraintes de traction se développent dans le matériau qui se fissure lorsque sa résistance en traction est dépassée. Le dispositif expérimental utilisé est représenté sur les figures 12 et 13.



■ Fig. 12
Essai de retrait empêché à l'anneau.
Dispositif expérimental.



■ Fig. 13
Photographie d'une éprouvette en cours d'essai. Vue de dessus.

Après le gâchage, les corps d'épreuve sont conservés pendant 24 h dans une chambre à 20° C et à 100 % d'humidité. Les anneaux, une fois démoulés sur leurs faces externes, sont entreposés dans une salle climatisée, à une température de 21°C et 50 % d'humidité relative. La partie supérieure de l'anneau de mortier est recouverte de graisse, assurant ainsi un séchage uniquement radial par la seule surface latérale de l'échantillon et de façon uniforme sur la hauteur de l'éprouvette.

Résultats et discussion

Le tableau III récapitule les résultats de l'observation des anneaux de mortier. Il indique l'échéance de l'initiation de la première fissure, le nombre de fissures après 55 jours (âge à partir duquel aucune évolution significative n'a été mise en évidence), la longueur projetée de chacune de ces fissures ainsi que l'ouverture maximale de la fissure principale.

TABLEAU III
Résultats de l'observation des anneaux de mortiers

Compositions	M0C0F	M30C0F	M0C40F	M30C40F
Initiation de la fissuration (jours)	6	17	17	18
Nombres de fissures, après 55 jours	1	4	3	7
Longueur maximale (mm) de fissure, après 55 jours	140	90	140	70
Ouverture maximale (mm) de fissure, après 55 jours	1,10	0,11	0,13	0,06

La figure 14 complète et illustre l'exposé des résultats. Les tracés des fissures après 55 jours y sont fidèlement reproduits. En médaillon, des photographies prises grâce à un vidéomicroscope au grossissement de 25 permettent d'apprécier l'emprise des fissures. On peut constater que la présence de granulats en caoutchouc dans la matrice cimentaire modifie considérablement la réponse du composite lorsque ce dernier est soumis au retrait empêché.

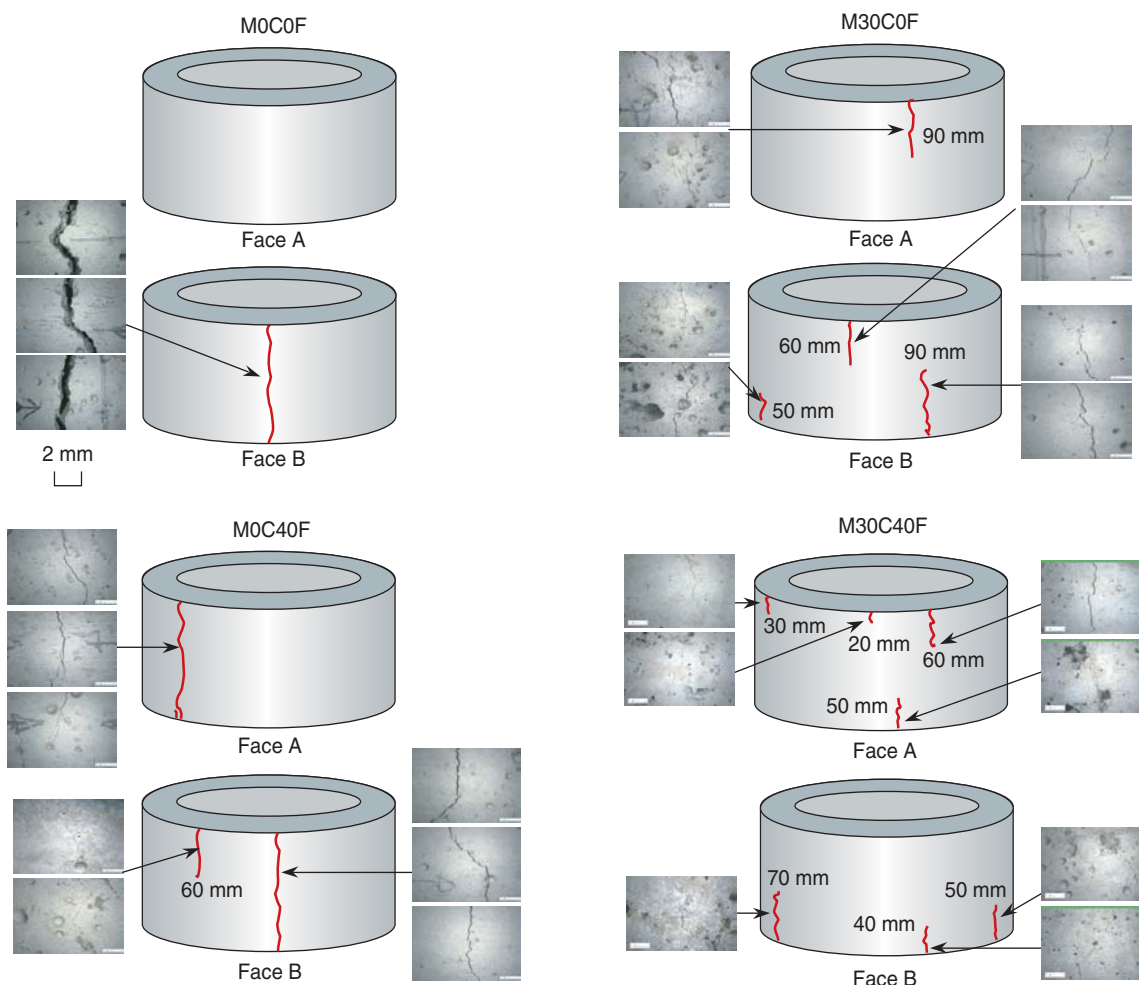
L'amorce de la fissuration est retardée : 17 jours pour le mortier incorporant 30 % de granulats en caoutchouc contre 6 jours pour le mortier de référence. Lorsqu'elle apparaît, elle est sous forme d'un réseau de fissures plus courtes et avec des ouvertures limitées et donc moins préjudiciables aux propriétés physiques et mécaniques, en contraste avec l'unique fissure, traversante, du mortier de référence. Dans ce sens, il apparaît qu'une fraction volumique de 30 % en granulats en caoutchouc est plus efficace qu'un renfort de fibres métalliques à 40 kg/m³, mais l'association granulats en caoutchouc et renfort par des fibres donne un meilleur résultat.

En conséquence, dans le cas de mortiers incorporant des granulats en caoutchouc, la capacité de déformation maximale avant localisation de la macrofissure prédomine sur les variations dimensionnelles de retrait. L'action des fibres sur la maîtrise de l'ouverture des fissures est confirmée.

Au regard des résultats présentés, l'association « granulats en caoutchouc et renforcement par des fibres » offre les meilleures performances vis-à-vis de la fissuration de retrait et s'avère être une solution prometteuse, notamment dans tous les cas où la résistance aux déformations imposées est une priorité.

CONCLUSION

Les résultats présentés dans cette étude montrent que l'incorporation dans un mortier de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés confère au composite un gain en capacité de déformation avant localisation de la macrofissure avec, en contrepartie, une baisse importante des résistances en compression. Ils montrent aussi que l'on peut cumuler les effets bénéfiques de l'incorporation des granulats en caoutchouc et ceux d'un renfort par des fibres pour limiter la fragilité du composite. En se contentant de la simple comparaison des différentes compositions et en faisant abstraction du frottement engendré par l'étreinte radiale à l'interface mortier-acier, les essais de retrait empêché à l'anneau démontrent que les effets de la grande déformabilité du composite incorporant



■ **Fig. 14**
 Illustration de la fissuration des mortiers sous retrait empêché après 55 jours d'essai.

des granulats en caoutchouc sont prépondérants par rapport à ceux des variations dimensionnelles de retrait. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une plus grande résistance à la fissuration de retrait que les mortiers dits traditionnels et que, par rapport à un simple renfort par les fibres, l'association des granulats en caoutchouc et des fibres s'avère être une alternative prometteuse. Le composite à base de granulats en caoutchouc est d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations imposées est une priorité. De plus, cette application offre une voie de valorisation aux pneumatiques usagés non réutilisables, répondant ainsi à une demande écologique pressante, compte tenu de la législation nouvellement en vigueur.

Il serait souhaitable d'étendre les investigations aux bétons et de valider les conditions permettant d'améliorer la déformabilité avec des granulats de plus grande dimension. Dans tous les cas, il est nécessaire de compléter ce travail par des investigations sur les valeurs optimales et sur les valeurs « seuil » du dosage en granulats en caoutchouc. Par ailleurs, les propriétés du caoutchouc incitent facilement à prêter d'autres vertus au composite incorporant des granulats en caoutchouc : des études devront mettre en évidence le potentiel du composite en terme de propriétés thermiques et acoustiques. Des applications antivibratiles peuvent aussi être envisagées, mais cette hypothèse reste à valider.

Dans chaque cas où la fonction du matériau est préalablement identifiée, il sera plus judicieux de comparer les composites incorporant des granulats en caoutchouc sur la base d'un même cahier des charges. Les tendances observées à teneurs en ciment et en eau constantes pourront être considérées comme des repères.

Remerciements : Les auteurs remercient l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et la Manufacture française des pneumatiques Michelin pour leurs soutiens financiers ainsi que pour leur expertise.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GRANJU J.-L., CHAUSSON H., Serviceability of fiber reinforced thin overlays : relation between cracking and debonding, Bruxelles, *ConChem International Exhibition and Conference*, Verlag, novembre 1995, pp. 133-142.
- [2] CHANVILLARD G., AITCIN P.-C., Thin bonded overlays of fiber-reinforced concrete as a method of rehabilitation of concrete roads, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 17, 1990, pp. 521-527.
- [3] TURATSINZE A., FARHAT H., GRANJU J.-L., Influence of autogenous cracking on the durability of repairs by cement-based overlays reinforced with metal fibres, *Materials and Structures*, vol. 36, 264, décembre 2003, pp. 673-677.
- [4] Recommandations RILEM, CPC8 Modulus of elasticity of concrete in compression, *Materials and Structures*, vol. 6, novembre-décembre 1972.
- [5] TOUTANJI H.A., The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates, *Cement and Concrete Composites*, vol. 18, 1996, pp. 135-139.
- [6] GOULIAS D.G., AL-HOSSAIN A., Evaluation of rubber-filled concrete and correlation between destructive and nondestructive testing results, *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 20, 1998, pp. 40-144.
- [7] LI Z., LI F., LI J.S.L., Properties of concrete incorporating rubber tyre particles, *Magazine of Concrete Research*, vol. 50, 4, décembre 1998, pp. 297-304.
- [8] ABDEL-WAHAB M.M., ABDEL-HAMEED M.E., *Concrete using rubber tyre particles as aggregates*, Dundee, *Recycling and Reuse of Used Tyres*, Thomas Telford Publ, mars 2001, pp. 251-259.
- [9] HOBBS D.W., The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration, *Materials and Structures*, vol. 4, 20, mars-avril 1971, pp. 107-114.
- [10] NEVILLE A.-M., *Propriétés des bétons*, Eyrolles, 806 pages.
- [11] MESBAH H.A., BUYLE-BODIN F., Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars, *Construction and Building Materials*, vol. 13, décembre 1999, pp. 439-447.
- [12] CARLSON R. W., READING T.J., Model of studying shrinkage cracking in concrete building walls, *ACI Structural Journal*, vol. 85, 4, juillet-août 1988, pp. 395-404.
- [13] GRZYBOWSKI M., SHAH S.P., Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, vol. 87, 2, mars-avril 1990, pp. 138-148.