

Incorporation de granulats en caoutchouc dans le béton

par Anacleto TURATSINZE

Dopage de la résistance à la fissuration des matériaux cimentaires par incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés.

Anacleto TURATSINZE est Maître de Conférences – Habilité à diriger des recherches (HDR), il enseigne au département de Génie Civil de l'IUT_A, Université Paul SABATIER (Toulouse III) et effectue ses travaux de recherche au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'Institut National des Sciences Appliquées et de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

1. Contexte

Peu coûteux et faciles à mettre en œuvre, les matériaux cimentaires dominent le marché des matériaux de construction. Néanmoins, leur faible résistance en traction conjuguée avec leur faible capacité de déformation les rendent très fragiles et sensibles à la fissuration. Le cas de la fissuration due aux déformations imposées est un exemple criant limitant la durabilité des applications. Des essais mécaniques ont confirmé que l'incorporation de granulats à faible module de déformation, en l'occurrence des granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés est préjudiciable de la résistance en compression et en traction des matériaux cimentaires. En contrepartie, en traction, le composite obtenu a une plus **grande capacité de déformation avant localisation de la macrofissuration**. Par ailleurs, et cela malgré des variations dimensionnelles de retrait plus importantes, il a été démontré que ce composite a une meilleure résistance à la fissuration de retrait, une pathologie récurrente des éléments à base cimentaire. Au-delà de cet intérêt d'ordre structural, ce composite offre une nouvelle voie de valorisation de pneumatiques usagés non réutilisables, un gisement qui en 2002 dans le cas de la France, était estimé à 390 000 tonnes dont environ 25 % se retrouvaient dans la nature.

Les matériaux cimentaires, par leur performance en termes de résistance mécanique et de durabilité constituent les matériaux de construction de référence. Ils restent pourtant perfectibles : leur capacité de déformation très limitée ainsi que leur faible

résistance en traction les rendent sensibles à la fissuration, notamment à la fissuration de retrait.

À titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface 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] [2] [3] [4] et limite sa durabilité. Quant aux joints de retrait, ils permettent seulement de limiter le désordre en localisant la fissuration. De ce fait, le joint constitue généralement le point de départ de futurs désordres. Ironie du sort, si les matériaux cimentaires ont, ces dernières décennies, connu un développement considérable, c'est essentiellement en terme de résistance en compression, puisque la formulation des bétons à hautes performances, voire des bétons à très hautes performances n'est plus réservée aux spécialistes. Malheureusement ces nouveaux matériaux sont encore plus fragiles et plus sensibles à la fissuration [5].

Dans tous les cas, cette fissuration est difficilement acceptée et au-delà du désagrément esthétique, elle peut être préjudiciable au fonctionnement même des structures.

L'amélioration de la capacité de déformation des matériaux cimentaires, facteur de limitation de la fissuration, n'est donc pas une question que l'on se pose mais une question qui s'impose.

Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi de perturber le processus de propagation des fissures dans le matériau par relaxation des contraintes lorsque la fissure débouche sur un granulats. Pour cette fin, nous avons envisagé d'**incorporer des granulats déformables dans la matrice cimentaire**. Concrètement, nous avons utilisé des **granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés**.

En soi, l'utilisation de ce type de granulats n'est pas originale. Cependant, la plupart des travaux de recherche ayant porté sur le sujet n'avaient pour motivation première que le recyclage du déchet industriel : de telles études n'ont pas connu des lendemains à la hauteur des ambitions initialement affichées, et ce pour deux raisons majeures.

D'une façon générale, se reporter aux dossiers *Bétons de fibres métalliques (BFM)* [C 2 214] de Pierre ROSSI et *Calfeutrement des joints dans le bâtiment. Généralités* [C 3 660] de Philippe GOGNARD.

— La première est inhérente à la fiabilité de la filière granulats issus du broyage de pneus usagés qui offrait peu de certitude sur la régularité d'approvisionnement et des garanties insuffisantes sur la qualité du produit. Toutefois, ces freins se sont effacés avec l'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en terme de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable.

— La deuxième raison, et elle est de loin prépondérante, est inhérente à la baisse de la **résistance en compression**, la caractéristique par excellence de dimensionnement des structures. L'amplitude du phénomène est telle que, à une époque où l'amélioration de la résistance en compression constituait un objectif consensuel dans les laboratoires, entretenir un quelconque espoir quant à l'intérêt du composite incorporant les granulats en caoutchouc devait a priori relever d'un anachronisme difficilement soutenable. Toutefois, même si on s'entête à caractériser le matériau par sa résistance en compression, dans de nombreuses applications comme celles précédemment citées, le **comportement en traction** s'avère d'une importance de premier ordre. En l'occurrence, améliorer la capacité de déformation du composite cimentaire confère une grande résistance à la fissuration due aux déformations imposées dont les causes sont multiples. S'agissant d'éléments à grandes surfaces, le retrait est à l'origine de cette fissuration, avec circonstances aggravantes si ce retrait est gêné. D'autres phénomènes comme les réactions alcali granulats, les réactions sulfatiques, le gel-dégel ou la corrosion des armatures peuvent générer ces déformations imposées.

Quant à l'**impact écologique** de ce programme initié en 1997, il n'est ni accidentel ni négligeable mais reste un bonus dans nos motivations initiales car nous avons gardé à l'esprit que la pénétration du composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc sur le marché des matériaux de construction dépendra d'abord de l'intérêt de ses propriétés et non de ses constituants. Néanmoins, nous sommes obligés de reconnaître que la législation a conforté ce volet dans ce sens où le décret ministériel n° 2002-1563 du 24 décembre 2002 interdit d'abandonner, de déposer dans le milieu naturel ou de brûler à l'air libre les pneumatiques. À cette même époque environ 25 % des 390 000 tonnes de pneus usagés produits en France échappent à tout contrôle ; un bilan est difficile à équilibrer sans promouvoir de nouvelles voies de valorisation.

Le renforcement par des **fibres** étant une solution traditionnellement mise en œuvre pour limiter les effets de la fissuration, nous l'avons aussi testé et avons comparé son efficacité avec celui de l'incorporation de granulats en caoutchouc.

2. 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/m³) associé ou non à l'incorporation de granulats en caoutchouc ont aussi été évalués.

Pour faciliter la lecture du document, nous avons adopté la nomenclature 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 (en kg/m³).

Le ciment utilisé est de **type CEM I 52.5R**. Comme granulats naturels, nous avons employé du **sable siliceux roulé de Garonne**. Les granulats en **caoutchouc issus du broyage de pneus usagés** sont utilisés en substitution volumique (absolue) du sable. Leurs densités respectives sont 2,7 et 1,2 et dans les deux cas, la dimension du plus gros grain est de 4 mm. Dans le cas des compositions renforcées de fibres, des **microfibres 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 mélamine formol sulfoné a été utilisé et l'introduction d'un agent de texture (agent colloïdal) dans le mélange cimentaire a permis de limiter la ségrégation des granulats en caoutchouc lors de la vibration des échantillons. Afin de s'affranchir de l'incidence des effets secondaires de cet adjuvant sur les propriétés du mortier, nous l'avons 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 1.

Tableau 1 – Compositions des mortiers, quantités exprimées en kg/m³

Composition	Ciment	Sable	Eau	Granulats en caoutchouc	Agent colloïdal	Super-plastifiant	Fibres
M0C0F	500	1 600	250	0	0,8	3	0
M0C40F				40			
M30C0F		1 120		215			0
M30C40F							40

Décret n° 2002-1563 du 24 décembre 2002 relatif à l'élimination des pneumatiques usagés, JO 303 du 29 décembre 2002.

3. Caractéristiques mécaniques

3.1 Résistances en compression et en traction simple

3.1.1 Dispositif expérimental

Pour chaque composition, la résistance en compression simple a été déterminée sur 6 éprouvettes cylindriques de diamètre 11,8 cm et de hauteur 23,6 cm. 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 presse utilisée, à pilotage automatique est d'une capacité de 3 000 kN. Le module d'élasticité a été déterminé suivant les recommandations RILEM [15]. 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 d'éprouvette cylindrique à 120° afin de tenir compte des effets d'une flexion éventuelle.

La résistance et le module d'élasticité en traction ont été mesurés sur quatre éprouvettes cylindriques (pour chaque composition) de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur obtenues par carottage dans un prisme de 10 × 10 × 50 cm³. 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/min. Les détails concernant le protocole expérimental ont été décrits par Turatsinze et al. [15].

3.1.2 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 dosage en fibres sont illustrées respectivement par les figures 1 et 2 ainsi que par les figures 3 et 4.

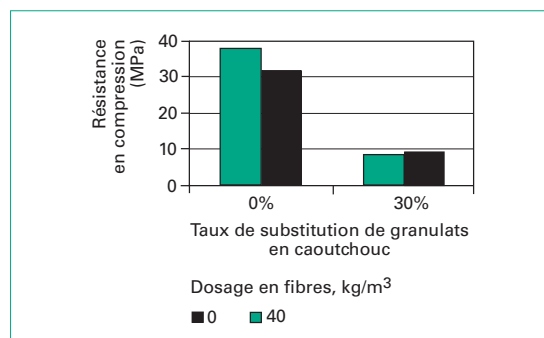


Figure 1 – Résistance en compression à 28 jours

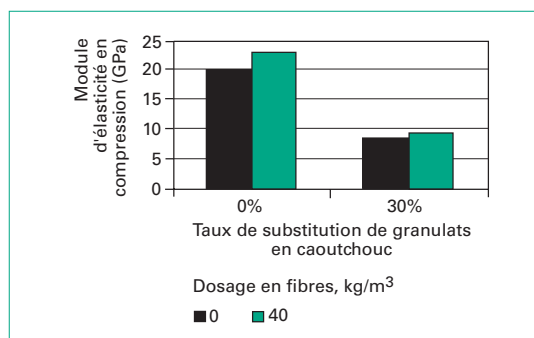


Figure 2 – Module d'élasticité en compression à 28 jours

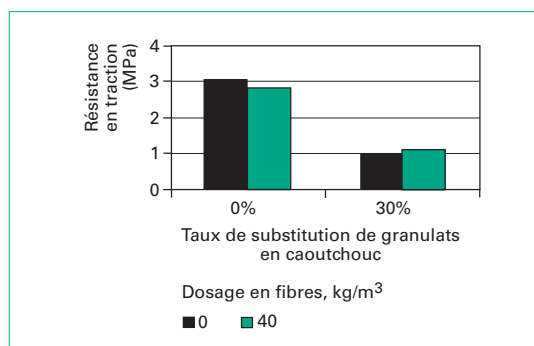


Figure 3 – Résistance en traction à 28 jours

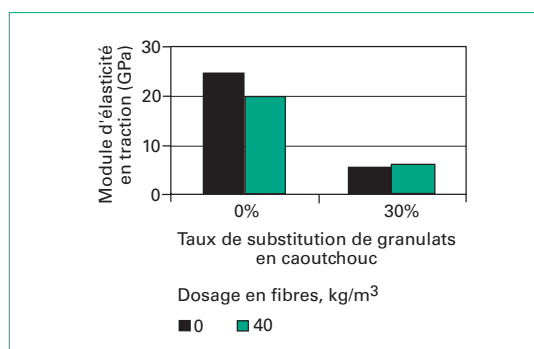


Figure 4 – Module d'élasticité en traction à 28 jours

La figure 1 montre que l'incorporation de granulats en caoutchouc est très préjudiciable à la **résistance en compression**. En réalité, nous avons étudié l'influence de l'incorporation des granulats en caoutchouc jusqu'à un taux de substitution de 50 % mais les très faibles résistances, inférieures à 5 MPa obtenues dans ce dernier cas nous ont conduit à limiter le taux maximal à 30 %. Pour ce taux, nous avons enregistré une chute de résistance de 80 % par rapport au mortier de référence (figure 1). Toutanji [6], en incorporant des fragments de pneus de grande

dimension dans les bétons, a constaté également des fortes chutes de la résistance en compression. Goulias et al. [7] explique cette chute de résistance par le faible module d'élasticité des inclusions en caoutchouc auxquelles il attribue les effets de pores. Nous pensons 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'épreuve. En revanche, la différence significative des coefficients de Poisson, du caoutchouc d'une part et de la matrice cimentaire d'autre part peut être néfaste et entraîner une fissuration prématurée du composite. Enfin, on peut s'attendre à des réponses différentes de la part du composite suivant si il est sollicité en traction ou en compression, puisque les comportements du caoutchouc sont différents dans ces deux modes de sollicitation.

D'après la littérature [8] [9], 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. Nous avons mené une importante campagne d'essais et les résultats montrent 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 1 montrent une incidence relativement négligeable devant l'effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc.

Les courbes de la figure 2 montrent un module d'élasticité qui suit la même tendance que la résis-

tance 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 70 % (cf. figure 3) 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. Encore une fois, on observe une grande sensibilité du module d'élasticité à l'incorporation de granulats en caoutchouc (figure 4).

3.2 Capacité de déformation en flexion quatre-points

3.2.1 Dispositif expérimental

Ces essais ont été pratiqués sur quatre éprouvettes prismatiques (pour chaque composition) de dimension $8,5 \times 5 \times 42 \text{ cm}^3$. Ces dernières ont été démoulées au bout de 24 heures 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 (LVDT) 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 illustré à la figure 5.

Les courbes « force-flèche » obtenues permettent de caractériser la réponse des matériaux par la charge maximale (F_{max}) ainsi que par la flèche ($\delta_{F_{\text{max}}}$) associée à la charge maximale : cette flèche correspond à la capacité de déformation maximale avant localisation de la macrofissure. Pour mettre en lumière l'effet bénéfique des granulats en caoutchouc sur cette capacité de déformation, nous avons opté pour une représentation de la force normalisée (F/F_{max}) en fonction de la flèche (δ).

LVDT *Linear Variable Displacement Transducer*

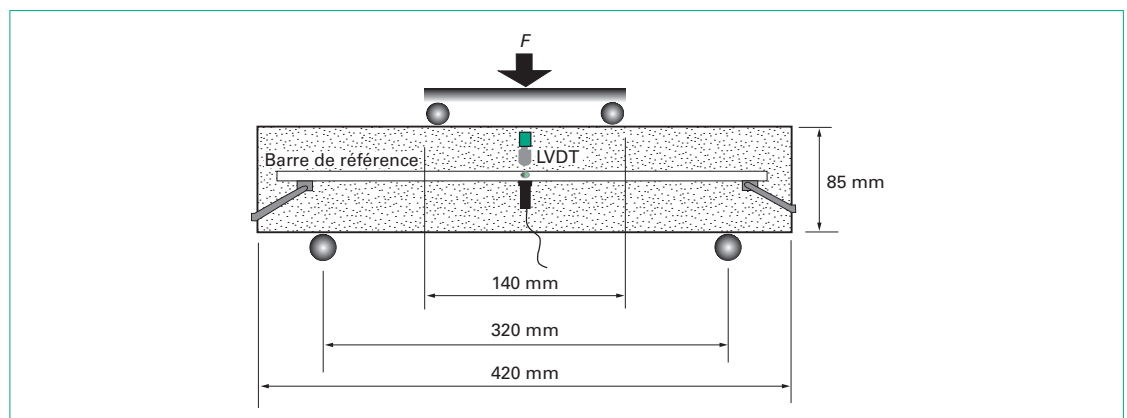


Figure 5 – Disposition de l'essai de flexion quatre points

Tableau 2 – Influence de l'incorporation de granulats en caoutchouc et du fibrage sur la force maximale (F_{\max}) et de la capacité de déformation ($\delta_{F_{\max}}$) en flexion quatre-points

Caractéristique	M0C0F	M0C40F	M30C0F	M30C40F
F_{\max} (kN)	4,90	6,90	3,30	3,10
$\delta_{F_{\max}}$ (mm)	0,080	0,110	0,195	0,210

Pour la composition des éprouvettes, cf. l'encadré du § 2.

3.2.2 Résultats et discussion

Les courbes typiques sont illustrées à la figure 6. Pour chaque composition, les valeurs moyennes de la force maximale (F_{\max}) et de la capacité de déformation ($\delta_{F_{\max}}$) sont données dans le tableau 2.

Les résultats obtenus montrent que la charge maximale F_{\max} 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 (M0C40F). 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 elle aussi d'augmenter substantiellement 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 de fibres à 40 kg/m³. On notera cependant la synergie lorsque l'incorporation de granulats en caoutchouc et le renfort par les fibres sont associés.

Deux causes peuvent être avancées pour expliquer une telle réponse mécanique :

- d'une part, la **faible rigidité des composites incorporant des granulats en caoutchouc** (faibles modules d'élasticité en traction et en compression). Néanmoins, compte tenu de la chute de la charge maximale F_{\max} , cette faible rigidité ne peut à elle seule constituer une explication suffisante ;

- d'autre part, 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 granulats en caoutchouc, il se produit une **relaxation des contraintes** en défaveur du processus de propagation.

Dans les métaux, la plus simple des méthodes pour réduire l'amplitude des contraintes en fond de fissure et pour arrêter la propagation consiste à effectuer un forage à la pointe de la fissure [16]. Le granulats en caoutchouc va jouer un rôle similaire dans un matériau cimentaire.

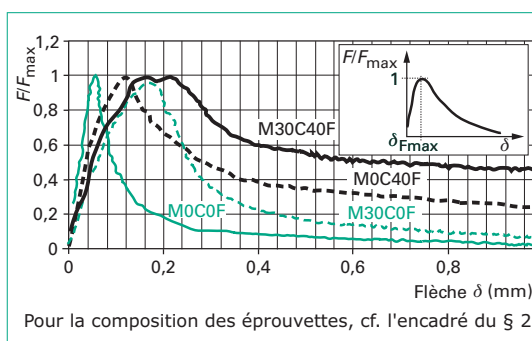


Figure 6 – Courbes « force normalisée - flèche », influence du taux de substitution en granulats en caoutchouc et du renfort par des fibres

Enfin, les niveaux de capacités portantes 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 être cumulés.

3.3 Variations dimensionnelles de retrait

3.3.1 Dispositif expérimental

Ces essais ont pour but de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur d'éprouvettes prismatiques de dimension 4 × 4 × 16 cm³ de mortier, conservées après démoulage dans une ambiance atmosphérique contrôlée (humidité relative : 50 %, température : 20 °C). Les éprouvettes sont munies sur leur surfaces extrêmes, de plots, afin d'assurer le contact de chaque extrémité de l'éprouvette avec les palpeurs de l'appareil de mesure (rétractomètre). L'incertitude des mesures est de ± 5 µm.

3.3.2 Résultats et discussion

Les courbes des figures 7 et 8 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 considérée.

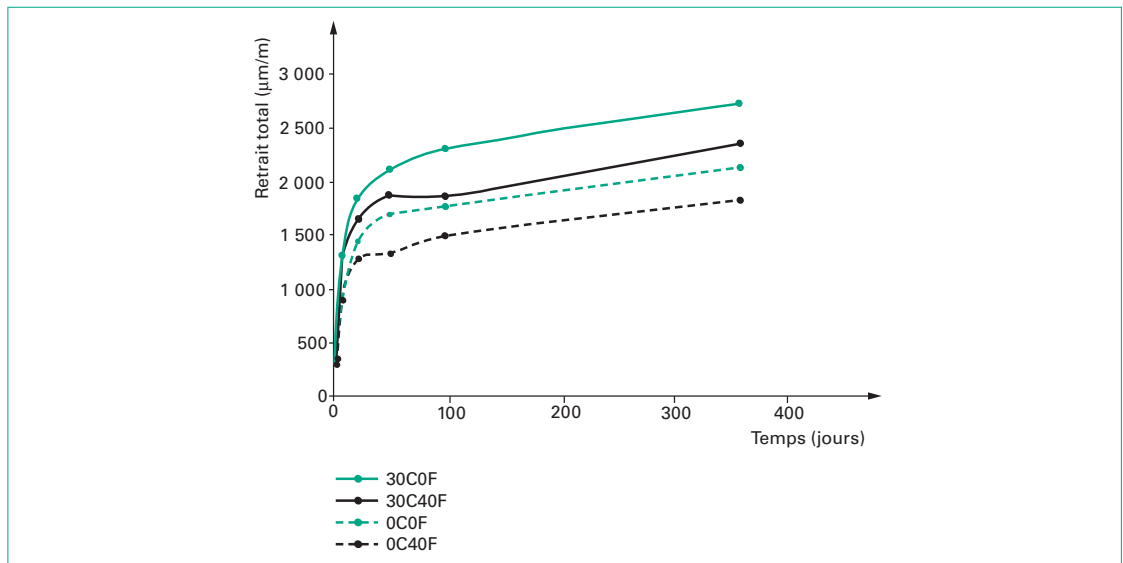


Figure 7 – Variations dimensionnelles de retrait en fonction du temps – effets du taux de substitution en granulats en caoutchouc et du fibrage

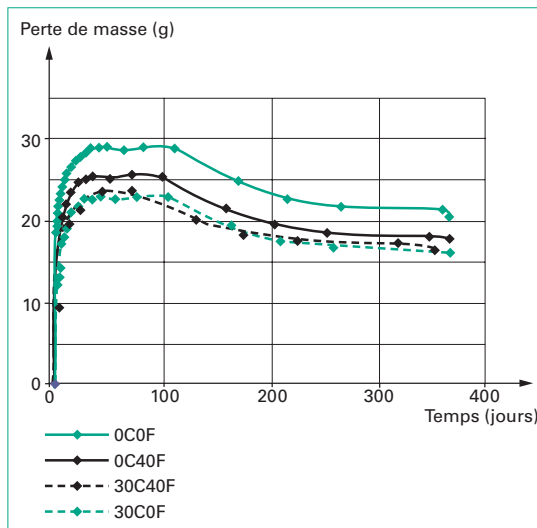


Figure 8 – Perte de masse en fonction du temps – Effets du taux de substitution en granulats en caoutchouc et du fibrage

Il est bien connu que la rigidité des granulats a une influence sur les variations dimensionnelles de retrait [10] [11] 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 [12] 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 à la figure 8 montrent qu'un autre facteur joue un rôle moteur. En effet, la variation du retrait total en fonction de la perte de masse de la figure 9 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.

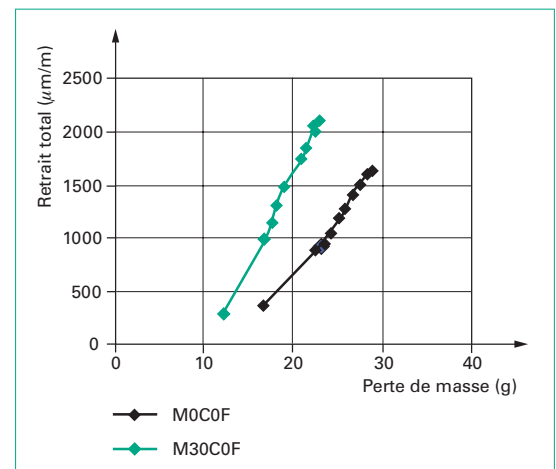


Figure 9 – Variations dimensionnelles de retrait en fonction de la perte de masse – Effet de l'incorporation de granulats en caoutchouc

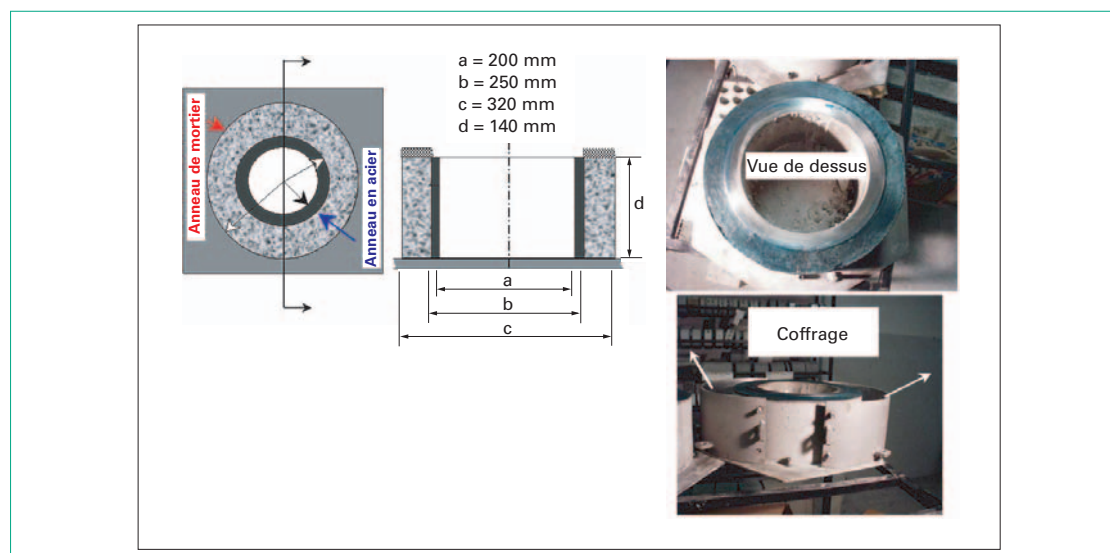


Figure 10 – Essais de retrait empêché à l’anneau : géométrie de l’éprouvette et photographies du dispositif expérimental

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 ont été réalisés pour tirer 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.

3.4 Résistance à la fissuration de retrait : essais de retrait empêché à l’anneau

3.4.1 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 [12] [13] [14]. 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, suf-

fisamment 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 à la figure 10.

Après le gâchage, les corps d’épreuve sont conservés pendant 24 h dans une chambre à 20 °C et à 100 % d’humidité relative. 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 d’une couche de silicone assurant ainsi un séchage uniquement radial, par la seule surface latérale de l’échantillon et de façon uniforme sur la hauteur de l’éprouvette.

3.4.2 Résultats et discussion

Le tableau 3 récapitule les résultats de l’observation des anneaux de mortier. Il rapporte 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 3 – Résultats de l’observation des anneaux de mortiers

Composition	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

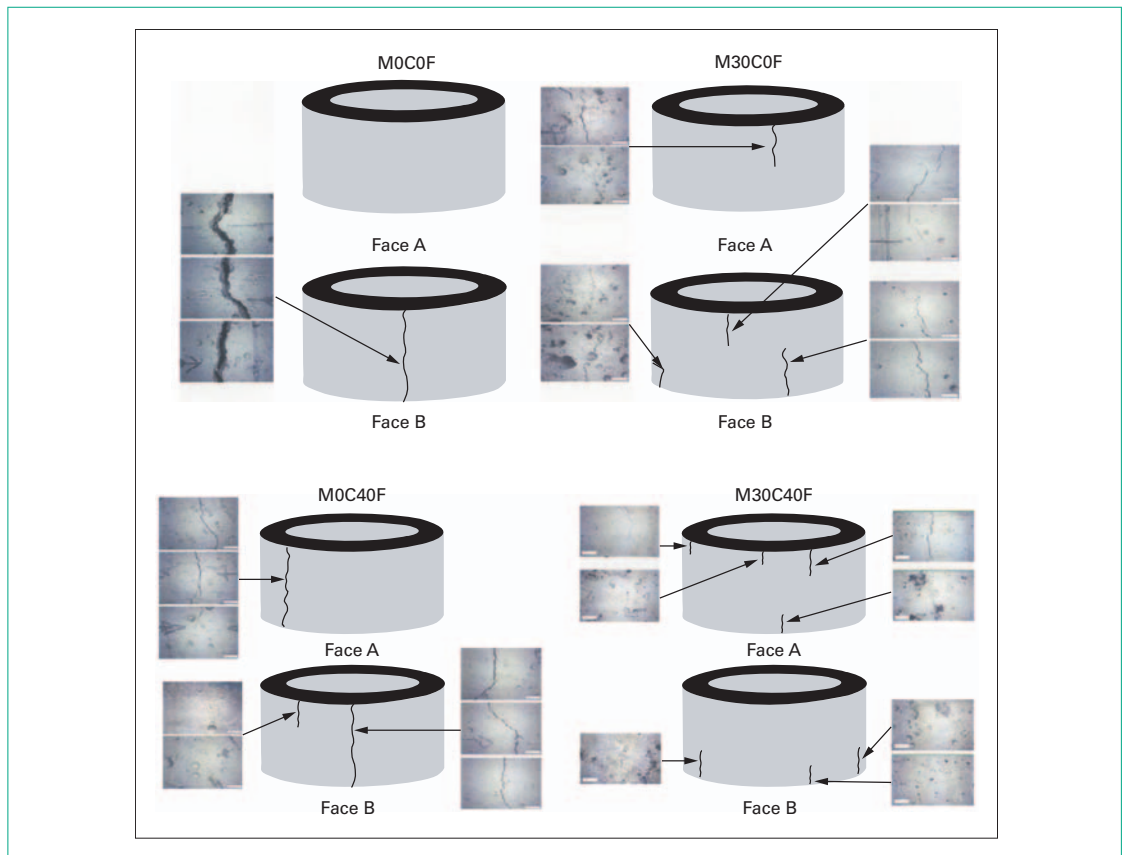


Figure 11 – Illustration de la fissuration des mortiers sous retrait empêché après 55 jours d'essai

La figure **11** 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 x25 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 qui traverse toute la hauteur de l'éprouvette en 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 montre 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 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 à la fissuration due aux déformations imposées est une priorité.

4. Conclusion

Les résultats présentés dans ce dossier montrent que l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite un gain en capacité de déformation avant localisation de la macrofissure avec, en contre partie, 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. Les essais de retrait empêché à l'anneau démontrent que les effets de la capacité de déformation améliorée du composite 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 cimentaire dopé par des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la résistance à la fissuration due aux déformations imposées est une priorité. De plus, cette application offre une voie de valorisation de pneumatiques usagés non réutilisables, répondant à une demande écologique pressante, compte tenu de la législation nouvellement en vigueur.

En perspective, nous recommandons d'étendre les investigations sur les 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 cette perspective et 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 de charge. Les tendances observées à teneurs en ciment et en eau constantes pouvant alors être considérées comme des repères.

Remerciements

L'auteur remercie l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et la Manufacture Française des Pneumatiques Michelin pour leur soutien financier qui a permis la réalisation de cette étude.

Références bibliographiques

- [1] CHANVILLARD (G.) et AİTCIN (P.-C.). – *Thin bonded overlays of fiber-reinforced concrete as a method of rehabilitation of concrete roads*. Canadian journal of civil Engineering, 17: 521-527, 1990.
- [2] GRANJU (J.-L.) et CHAUSSON (H.). – *Serviceability of fiber reinforced thin overlays : relation between crack*

king and debonding. ConChem International Exhibition and Conference, Bruxelles, Belgique, 133-142, 1995.

- [3] TURATSINZE (A.), GRANJU (J.-L.), SABATHIER (V.) et FARHAT (H.). – *Durability of bonded cement-based overlays : effect of metal fibre reinforcement*. Materials and structures, 38: 321-327, 2005.
- [4] TURATSINZE (A.), FARHAT (H.) et GRANJU (J.-L.). – *Influence of autogenous cracking on the durability of repairs by cement-based overlays reinforced with metal fibres*. Materials and Structures, 36: 673-677, 2003.
- [5] VAYSBURD (A.M.) et EMMONS (P.H.). – *How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair*. Construction and Building, 14: 189-197, 2000.
- [6] TOUTANJI (H.A.). – *The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates*. Cement and Concrete composites, 18: 135-139, 1996.
- [7] GOULIAS (D.G.) et AL-HOSSAIN (A.). – *Evaluation of rubber-filled concrete and correlation between destructive and nondestructive testing results*. Cement, Concrete and Aggregates, 20: 40-144, 1998.
- [8] LI (Z.), LI (F.) et LI (J.S.L.). – *Properties of concrete incorporating rubber tyre particles*. Magazine of Concrete Research, 50: 297-304, 1998.
- [9] ABDEL-WAHAB (M.M.) et ABDEL-HAMEED (M.E.). – *Concrete using rubber tyre particles as aggregates*. Int. symposium Recycling and Reuse of Used Tyres, Dundee, UK, 251-259, 2001.
- [10] 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, 4: 107-114, 1971.
- [11] NEVILLE (A.M.). – *Propriétés des bétons*. Édition française, Eyrolles, Paris, France, 2000.
- [12] MESBAH (A.) et BUYLE-BODIN (F.). – *Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars*. Construction and Building Materials, 13: 439-447, 1999.
- [13] CARLSON (R.W.) et READING (T.J.). – *Model study of shrinkage cracking in concrete building walls*. ACI structural journal, 85: 395-404, 1988.
- [14] GRZYBOWSKI (M.) et SHAH (S.P.). – *Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete*. ACI Materials journal, 87: 138-148, 1990.
- [15] TURATSINZE (A.), BONNET (S.) et GRANJU (J.-L.). – *Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars : improvement in cracking shrinkage resistance*. Construction and Building Materials, In Press, Corrected Proof, available on line 19 september 2005, à paraître.
- [16] CARON (I.), FIORI (G.), MESMACQUE (G.), PIRLING (T.) et SU (M.). – *Expanded hole method for arresting crack propagation : residual stress determination using neutron diffraction*. Physicab 350: 503-504, 2004.
- [17] Recommandations RILEM, CPC8. – *Modulus of elasticity of concrete in compression*. Materials and structures, 6: 404-406, 1972.