

Valorisation de déchets de caoutchouc dans les matériaux de construction : cas d'un composite cimentaire cellulaire

A. Benazzouk, O. Douzane, M. Quéneudec
Laboratoire des Technologies Innovantes (EA 3899)
Université de Picardie Jules-Verne, IUT, Département génie civil,
Avenue des Facultés - 80025 Amiens - France - Tel/Fax : 0 (33) 3 22 53 40 16
amar.benazzouk@u-picardie.fr, omar.douzane@u-picardie.fr, michele.tkint@u-picardie.fr

Cette étude concerne l'évaluation des propriétés du composite cellulaire ciment-caoutchouc, élaboré à base de poussières de caoutchouc pour des teneurs allant de 0 à 50 %. L'allègement a été effectué suivant un procédé d'allègement par moussage protéinique, mis au point au laboratoire, en vue de l'utilisation du composite dans le domaine d'application des bétons cellulaires. L'étude du composite à l'état frais a montré une amélioration de la maniabilité, avec une bonne stabilité des bulles d'air dans la matrice. L'étude du composite à l'état durci a montré une nette réduction de la masse volumique, avec des propriétés mécaniques compatibles avec l'utilisation en isolant porteur. L'effet de l'agent entraîneur d'air protéinique sur les liaisons matrice/caoutchouc dans la résistance du composite a été mis en évidence. L'étude de l'absorption par capillarité du composite a montré que l'ajout de poussières de caoutchouc réduit la sensibilité à l'eau du composite.

Mots-clefs

Déchets de caoutchouc, agent entraîneur d'air protéinique, composite cellulaire ciment-caoutchouc, propriétés physico-mécaniques, absorption capillaire, sorptivité.

In this work, the idea is to use rubber waste particles as a raw material, to develop a new lightweight construction materials. The objective of the research reported in this paper is to investigate the physico-mechanical properties of Aerated Cement-Rubber Composites (ACRC), based on rubber particles. The volume content ratio of the rubber particles ranged from 0 % to 50 %. The aerated composite was produced using a new type of proteinic air-entraining agent, in accordance with a specific aerating process derived in the laboratory. The aerated composite was produced to be used in cellular concrete applications. Results from tests performed on fresh aerated composites have demonstrated many attractive properties, such as improved workability and a high stability of air bubbles within the matrix. A study conducted on hardened composite properties has indicated a significant reduction in sample unit weight, thereby resulting in a level of compressive strength. The composite satisfies the basic requirement of construction materials, and could be used for insulated load-bearing wall. This study has also highlighted

the effect of the proteinic air-entraining agent on the cement-rubber interaction system, as regards the composite's compressive strength. However, an examination of the composite's water capillary absorption, reveals that the addition of rubber particles tends to restrict water propagation and reduce water absorption ; sorptivity values decrease with increasing rubber particles content.

Keywords

Rubber waste particles, aerated composite, proteinic air entrainment agent, physico-mechanical properties, capillary water absorption.

INTRODUCTION

Le secteur de la construction utilise depuis plusieurs années des déchets et des sous-produits comme matière première secondaire pour l'élaboration de nouveaux types de matériaux qui présentent des propriétés particulières ou améliorées par rapport aux matériaux classiques. Cette alternative permet d'une part de répondre au souci d'économie des ressources naturelles en granulats, et d'autre part de pallier les contraintes économiques et environnementales par le réemploi et le recyclage des déchets. En France, l'accumulation des déchets de caoutchouc, notamment les pneus hors d'usage, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques. Face aux évolutions de la législation en vigueur concernant le stockage de ces déchets, plusieurs actions de valorisation ont été menées, notamment dans le domaine des matériaux de construction^[1-3]. Dans cet objectif, des travaux récents utilisant plusieurs types de granulats de caoutchouc issus de différents secteurs ont été menés au laboratoire^[4, 5]. Ces derniers ont montré que l'incorporation de granulats de caoutchouc dans une matrice cimentaire confère au composite des propriétés physico-mécaniques et thermo-hydriques très intéressantes. L'effet de la nature du caoutchouc, notamment son élasticité et sa morphologie, a été mis en évidence. Des travaux antérieurs ont également montré l'importance du type de caoutchouc dans la réduction des variations dimensionnelles^[6], ainsi que la résistance du composite en conditions climatiques sévères, notamment aux cycles de gel/dégel^[7]. Par ailleurs, la granulation du caoutchouc génère des quantités importantes de poussières qui ne sont

pas valorisées à l'heure actuelle. Leur stockage à l'air libre constitue une gêne environnementale, notamment en raison de leur finesse. Dans le but de valoriser ce type de déchets, des travaux concernant la mise au point d'un composite cimentaire à base de ces poussières ont été réalisés. Les résultats ont montré que celui-ci présente des caractéristiques compatibles avec l'utilisation en isolants porteurs^[8,9]. Par exemple, pour une teneur volumique en poussières de caoutchouc de 50 %, le composite présente une masse volumique de 1 150 kg/m³, une résistance à la compression de 10,5 MPa, une résistance à la flexion de 3,25 MPa et une conductivité thermique de 0,47 W/mK.

En vue de l'utilisation de ce composite dans le domaine des bétons cellulaires, celui-ci a été allégé par moussage protéinique, à l'aide d'un agent entraîneur d'air; suivant un procédé mis au point et breveté au laboratoire^[10]. On rappelle que les bétons cellulaires sont des matériaux classés dans la catégorie des bétons légers, obtenus par création d'une structure cellulaire, dans la matrice, grâce à un agent moussant ou à une réaction provoquant un dégagement gazeux, ou encore à l'aide d'un agent entraîneur d'air. Leur intérêt réside dans leur légèreté, avec des caractéristiques mécaniques conformes aux exigences du domaine de leur emploi. Grâce à leur structure cellulaire, ces bétons présentent des caractéristiques thermiques très intéressantes. Ce sont également des matériaux très résistants au gel. En effet, les pores présents dans la matrice jouent le rôle de vase d'expansion où l'eau s'expande lors du cycle de gel, réduisant les contraintes dans la matrice^[11].

Il s'agit, dans ce travail, d'évaluer les propriétés du composite cellulaire ciment-caoutchouc, à l'état frais et à l'état durci, pour une teneur en caoutchouc allant de 0 à 50 %. Compte tenu de l'importance des propriétés hydrauliques pour la durabilité, notamment la capacité de transport de fluides, et particulièrement de l'eau chargée ou non d'ions agressifs dans la matrice, la sorptivité du composite, à différentes teneurs en caoutchouc, a également été évaluée suivant un test d'absorption capillaire.

MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Matériaux

Les poussières utilisées sont issues de la granulation des déchets de caoutchouc provenant de l'industrie automobile. Ces fines, de taille inférieure à 1 mm et contenant environ 20 % de fibres textiles, sont récupérées dans les dépoussiéreurs. La masse volumique absolue de ces poussières est de 430 kg/m³.

L'entraîneur d'air utilisé est de l'hémoglobine de boeuf stabilisée thermiquement, obtenue par atomisation et fractionnement. Il est commercialisé par la société Vapran sous le nom de *Vepro 95 BHF*. Le ciment utilisé est un CPJ CEM II 32,5, suivant la norme NFP 15-301. Les poussières de caoutchouc et le ciment sont mélangés à sec dans le malaxeur. La quantité d'eau de gâchage a été ajustée pour avoir un affaissement de 90-100 mm au cône d'Abrams. La teneur volumique en poussières de caoutchouc varie de 0 à 50 %. Après homogénéisation du mélange, l'agent entraîneur d'air est alors ajouté en poursuivant le malaxage pendant trois minutes. Le matériau résultant, à caractère mousseux, est tout

d'abord étudié à l'état frais. Pour les mesures à l'état durci, des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 160 mm ont été préparées et conservées, pendant 28 jours, avant et après démoulage, à température et hygrométrie contrôlées (20 ± 2 °C, HR = 98 %). Avant les essais, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 50 ± 2 °C.

Les matériaux élaborés sont des composites cellulaires ciment-caoutchouc (CCCC). Les propriétés physico-mécaniques du composite avant allègement (CCC) sont données par le tableau 1.

Teneur en caoutchouc (%)	Air entraîné (%)	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité dynamique (GPa)	Sorptivité (10 ⁻³ m/s ^{1/2})
0	2,00	1910,20	82,00	3,40	25,40	0,193
10	5,00	1751,80	49,70	3,80	18,68	0,071
20	8,70	1648,70	40,20	4,17	15,20	0,057
30	11,80	1472,75	23,25	4,04	12,10	0,050
40	14,00	1297,00	16,00	3,82	9,25	0,043
50	17,00	1150,00	10,50	3,25	6,20	0,037

Tableau 1. Propriétés du composite (CCC) [8].

Techniques expérimentales

Le comportement du composite à l'état frais a été étudié en évaluant l'entraînement d'air dans la matrice ainsi que la maniabilité, en fonction de la teneur en poussières de caoutchouc. L'entraînement d'air a été déterminé par mesure de la proportion d'air occlus à l'aide d'un aéromètre. La maniabilité du composite a été évaluée par des essais d'affaissement au cône d'Abrams. Pour le matériau durci, la masse volumique sèche a été évaluée par mesure géométrique et pesée. Le module d'élasticité dynamique majoré a été déterminé par auscultation ultrasonore suivant la norme NFP 18-406. Les essais mécaniques en compression et en flexion ont été conduits, respectivement, suivant les normes NFP 18-418 et NFP 18-401. Dans tous les cas, les résultats représentent la moyenne de trois mesures.

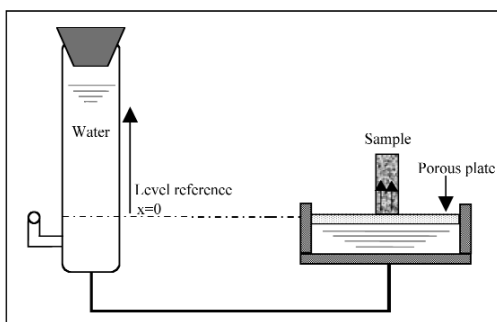


Figure 1. Dispositif expérimental de l'essai d'imbibition capillaire.

La sorptivité du composite a été évaluée suivant un test d'absorption d'eau par capillarité lorsque celui-ci est mis en contact avec une nappe d'eau^[12]. Le dispositif expérimental utilisé est donné par la figure 1. Pour assurer un écoulement unidirectionnel, les faces latérales du composite, préalablement séché, ont été scellées à l'aide d'un film thermorétractable. Le coefficient de sorptivité, qui caractérise la capacité d'un matériau à absorber de l'eau, est déterminé à partir du suivi de l'évolution du volume d'eau absorbé, rapporté à la surface de contact, en fonction du temps. La courbe d'évolution obtenue dans la première phase d'absorption permet de calculer la sorptivité du

matériau suivant l'expression 1, ci-dessous.

$$i = S \cdot (t)^{1/2} + i_0 \quad (1)$$

i (mm^3/mm^2) est le coefficient d'absorption capillaire, S ($\text{m/s}^{1/2}$) est la sorptivité du matériau et i_0 (mm^3/mm^2) est un coefficient empirique dépendant de la surface de contact de l'échantillon avec l'eau. Il correspond au remplissage instantané de pores ouverts sur la surface de l'échantillon en contact avec l'eau.

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

Propriétés du composite à l'état frais

Affaissement

L'action fluidifiante de l'hémoglobine peut en partie être reliée à la création de bulles d'air dans la matrice. Il était toutefois important de vérifier que la maniabilité de la mousse obtenue n'affecte pas la mise en moule. Un exemple de résultats de l'affaissement du composite contenant 40 % de caoutchouc montre que celui-ci augmente en fonction de l'entraînement d'air, en raison des micro-bulles d'air créées dans la matrice (figure 2).

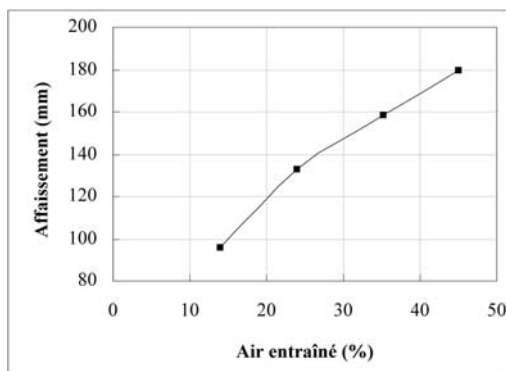


Figure 2. Effet de l'entraînement d'air sur l'affaissement du composite à l'état frais (40 % de caoutchouc).

Entraînement d'air

Les résultats des mesures de l'air entraîné, en fonction de la teneur en caoutchouc, sont donnés par la figure 3. Celle-ci montre que l'ajout de poussières de caoutchouc favorise l'entraînement d'air dans la matrice. Pour une teneur en caoutchouc allant de 0 % à 50 %, l'entraînement varie de

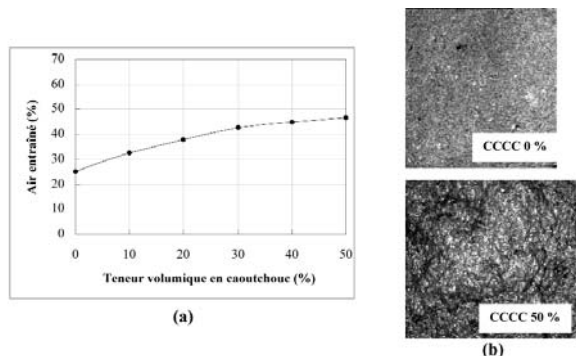


Figure 3. (a) Evolution de l'air entraîné en fonction de la teneur en caoutchouc. (b) Aspect du composite CCCC, à l'état frais, pour différentes teneurs en caoutchouc.

25,3 % à 46,5 %. Ceci est lié à la nature des poussières de caoutchouc, qui entraîneraient plus d'air dans la matrice grâce à leur texture et leur morphologie. La figure 3-b montre l'aspect mousseux du composite (CCCC) contenant respectivement 0 % et 50 % de caoutchouc.

Propriétés du composite à l'état durci

Masse volumique

L'évolution de la masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en poussières de caoutchouc, est donnée par la figure 4. Elle diminue de 1260 kg/m^3 à 600 kg/m^3 , pour une composition en caoutchouc allant de 0 % à 50 %, soit une réduction de l'ordre de 53 %. Si l'on compare la masse volumique du composite cellulaire CCCC à celle du composite CCC avant allègement, pour une teneur en caoutchouc de 50 %, on constate que le moussage protéinique permet d'avoir un allègement d'environ 48 %.

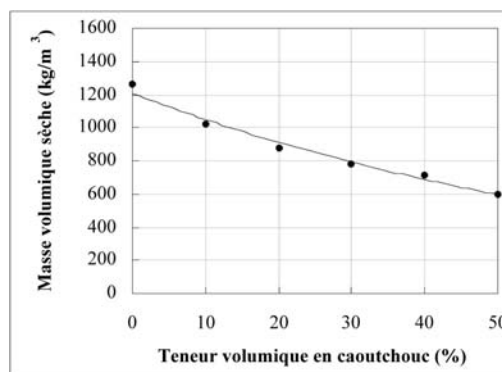


Figure 4. Evolution de la masse volumique sèche du composite CCCC en fonction de la teneur en caoutchouc.

On constate également que la réduction de la masse volumique du composite CCCC en fonction de la teneur en caoutchouc est régulière. Ceci montre la stabilité du réseau de bulles d'air créées dans la matrice, suite à l'entraînement d'air. Cette stabilité a été vérifiée en évaluant la relation entre les masses volumiques du composite CCCC à l'état frais et à l'état durci. La figure 5 montre une évolution linéaire, confirmant ainsi cette stabilité.

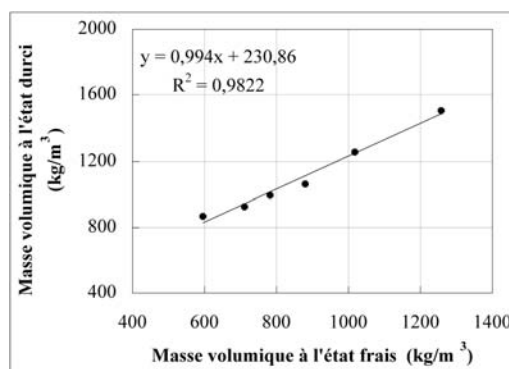


Figure 5. Relation entre les masses volumiques du composite CCCC à l'état frais et à l'état durci.

Module d'élasticité dynamique

L'évolution du module d'élasticité dynamique des composites en fonction de la teneur en poussières de caoutchouc est donnée par la figure 6. On constate une baisse significative du module d'élasticité dynamique. Celui-ci varie de 10,5 GPa à 1,9 GPa, pour une composition en caoutchouc allant de 0 % à 50 %. Pour cette dernière composition en caoutchouc, la création d'une structure cellulaire dans la matrice réduit le module d'élasticité dynamique d'environ 68,5 % par rapport au composite sans allègement CCC. Le caoutchouc favorise l'absorption des ondes ultrasonores. En effet, les mesures de la célérité des ondes ultrasonores dans le caoutchouc et dans la matrice cimentaire le montrent bien. Les valeurs obtenues sont respectivement de 175 et 3 700 m/s. Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Ceci met en évidence la capacité à atténuer les ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations.

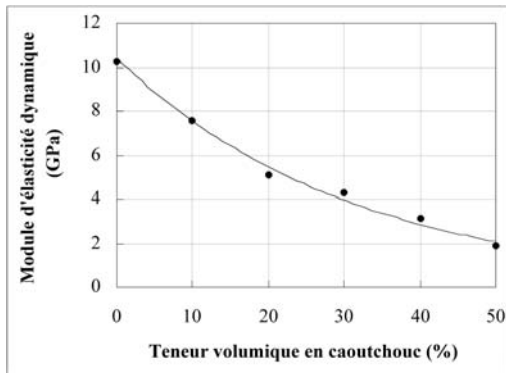


Figure 6. Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la teneur en caoutchouc.

Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression du composite, pour différentes teneurs en poussières de caoutchouc, est donnée par la figure 7. On constate une diminution considérable avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Pour une composition en caoutchouc allant de 0 % à 50 %, la résistance à la compression décroît de 22,5 MPa, à 1,4 MPa.

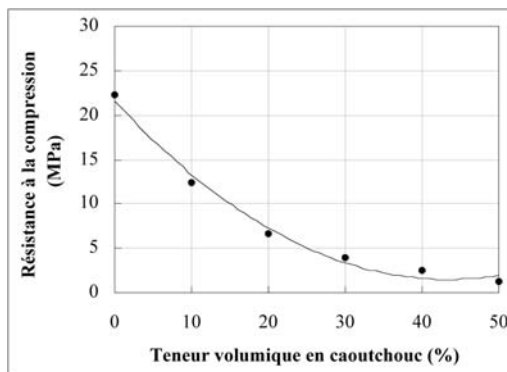
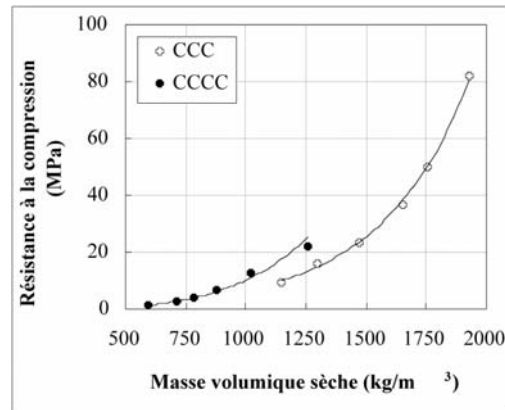


Figure 7. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en caoutchouc.

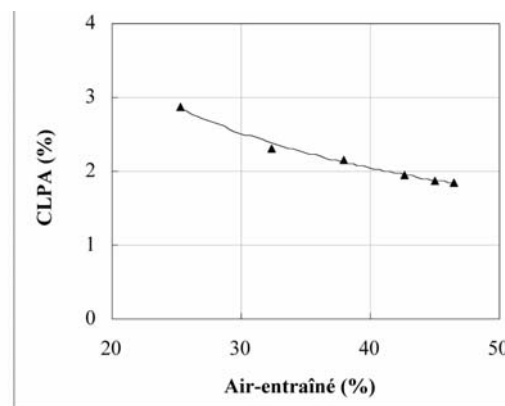
La figure 8-a montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la masse volumique sèche des composites CCCC, comparativement au composite CCC. On constate que pour une même masse volumique, le composite CCCC est plus résistant que le composite CCC sans allègement. Ceci est probablement dû à l'effet de l'agent entraîneur d'air protéinique sur la consolidation et la compacité de la matrice.



(a)

Figure 8. Caractérisation en compression du composite CCCC élaboré.

Pour vérifier ceci, nous avons évalué le CLPA (défini comme étant le rapport de la baisse de la résistance à la compression entre les composites CCC et CCCC, pour une même teneur en caoutchouc, à l'air entraîné), en fonction de l'entraînement, correspondant à chaque formulation [13]. La figure 8-b montre que le CLPA diminue avec l'augmentation de l'entraînement d'air. Il varie de 2,90 % à 1,86 %, pour une quantité d'air entraîné allant de 25,3 % à 46,5 %. On note que les valeurs du CLPA obtenues dans le cas de ces composites sont plus faibles que celle obtenue pour les bétons cellulaires classiques, qui est de l'ordre de 4 à 6 % [13]. Ceci confirme indirectement l'effet de l'agent entraîneur d'air protéinique sur le comportement mécanique du composite allégé. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par M. Ruzicka [14] lors des travaux concernant le moussage protéinique des pâtes argile-ciment. Les résistances à la compression du composite CCCC peuvent être améliorées.



(b)

Figure 8. Caractérisation en compression du composite CCCC élaboré.

Nous avons vu précédemment que l'affaissement augmente en fonction de l'air entraîné. La réduction de la quantité d'eau de gâchage permettrait d'avoir la même maniabilité et d'améliorer, en conséquence, les résistances à la compression.

Résistance à la flexion

L'évolution de la résistance à la flexion du composite, en fonction de la teneur en caoutchouc, est donnée par la figure 9. On constate une réduction très sensible de la résistance à la flexion du composite CCCC. Pour le cas du composite CCC, un optimum est observé pour des teneurs en caoutchouc comprises entre 20 % et 30 %, en raison de l'élasticité des granulats de caoutchouc. On peut alors supposer que l'effet de la structure poreuse, due à l'air entraîné, est prépondérante par rapport à l'élasticité des particules de caoutchouc.

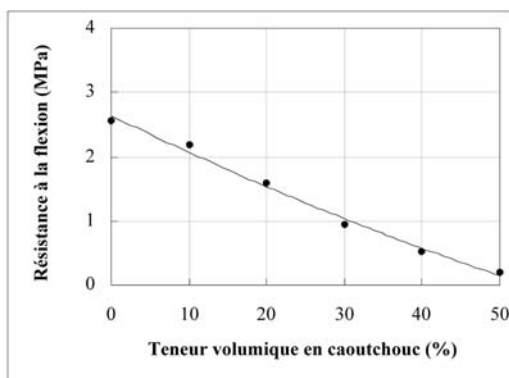
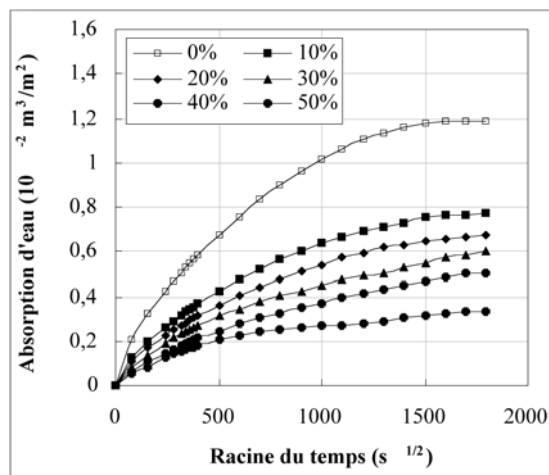


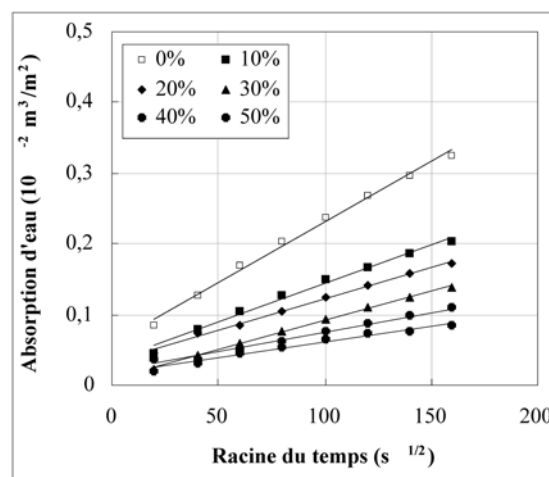
Figure 9. Evolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur volumique en caoutchouc

Absorption capillaire (sorptivité)

L'évolution de la hauteur d'absorption d'eau du composite CCCC, à différentes teneurs en caoutchouc, est donnée par la figure 10-a. Celle-ci montre que la présence de poussières de caoutchouc dans la matrice tend à diminuer la capacité d'absorption capillaire du composite et à ralentir considérablement la cinétique d'absorption. Ceci est dû, en plus de la nature non-sorpitive des inclusions, à la présence de l'entraînement d'air, constituant une porosité fermée qui augmente lorsque la teneur en caoutchouc augmente. Ce phénomène diminue encore le volume accessible à l'eau. L'ajout de particules de caoutchouc permet, ainsi, de réduire la propagation de l'eau dans la matrice. Les courbes correspondantes, durant la première phase d'absorption, sont données par la figure 10-b. Les valeurs de la sorptivité du composite CCCC, pour les différentes compositions, sont données par la figure 11. On constate que la sorptivité diminue avec l'ajout du caoutchouc. Pour une teneur allant de 0 à 50 %, elle varie de $0,064 \cdot 10^{-3}$ à $0,018 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^{1/2}$, soit environ quatre fois plus faible. Pour ces mêmes compositions, celle du composite avant allègement CCC varie de $0,193 \cdot 10^{-3}$ à $0,037 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^{1/2}$ [8]. La présence du caoutchouc tend donc à ralentir la progression du front d'imbibition capillaire et à diminuer la quantité d'eau absorbée.



(a)



(b)

Figure 10.. Evolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la teneur en poussières de caoutchouc.

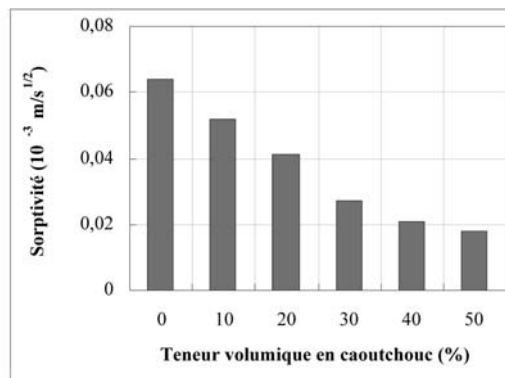


Figure 11. Valeurs de la sorptivité du composite CCCC à différentes teneurs en poussières de caoutchouc.

CONCLUSION

Les résultats présentés dans cette étude concernent les propriétés physico-mécaniques et hydriques du composite cellulaire ciment-caoutchouc. La réduction de la masse volumique du composite a été réalisée à l'aide d'un agent entraîneur d'air protéinique. L'étude du composite à l'état frais a montré que les bulles d'air présentes dans la matrice améliorent la maniabilité et augmentent l'affaissement. L'ajout de poussières de caoutchouc favorise l'entraînement d'air, avec une bonne stabilité du réseau poreux, grâce à leur texture et à leur plus grande surface spécifique. L'étude du comportement à l'état durci a montré que le composite peut atteindre une masse volumique de l'ordre de 600 kg/m³, avec des résistances à la compression compatibles avec l'utilisation en isolant porteurs, suivant la formulation. Les résultats ont également montré que, pour une même masse volumique, le composite cellulaire est plus résistant en compression que le composite ciment-caoutchouc, mettant en évidence l'efficacité de l'adjuvant protéinique sur les liaisons adjuvant/ciment/caoutchouc. L'étude de l'absorption par capillarité du composite a mis en évidence la réduction de la sensibilité à l'eau lors de l'ajout de poussières de caoutchouc dans la matrice. En effet, le composite est moins sorptif avec des valeurs de la sorptivité qui diminuent lorsque la quantité de poussières de caoutchouc augmente. La présence du caoutchouc tend donc à ralentir la progression du front d'imbibition capillaire et à diminuer la quantité d'eau absorbée. Ceci laisse présager une meilleure résistance du composite aux dégradations causées par la propagation d'agents agressifs dissous dans l'eau.

Ces résultats montrent l'intérêt de l'allègement du composite ciment-caoutchouc, qui conduit à des propriétés très intéressantes et laisse entrevoir une large gamme d'utilisation dans le domaine d'application des bétons cellulaires.

Références bibliographiques

- Eldin N.N., Senouci A.B., 1993, Rubber tire particles as concrete aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5 (4), 478-496.
- Fedroff D., Ahmad S., Savas B.Z., 1993, Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber, *Transportation Researches Record*, 1532, 66-72.
- Toutanji A.H., 1996, The use rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 18, 135-139.
- Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieux A., Quéneudec M., 2003, Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites—Influence of the alveolar texture of rubber aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 25, 711-720.
- Benazzouk A., Douzane O., Quéneudec M., 2004, Transport of fluids in cement-rubber composites, *Cement and Concrete Composites*, 26, 21-29.
- Benazzouk A., Douzane O., Dhrilly R.M., Quéneudec M., 2004, Dimensional variations of cement-rubber composites—Influence of the elastic propertie of rubber aggregates. *Cement and Concrete Research*. (sous presse)
- Benazzouk A., Quéneudec M., 2002, Durability of cement-rubber composites under freeze thaw cycles. *Sustainable Concrete Construction*, ISBN 072 77 3177 7, Edited by R.K. Dhir, T.H. Dyer, J.E. Halliday, published by Thomas Telford Publishing-Thomas Telford Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD, Dundee-Scotland, 355-362.
- Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Quéneudec M., 2004, Physico-mechanical properties and water-absorption of cement-rubber composites formulated with shredding operation waste, *Cement and Concrete Composites*. (sous presse)
- Benazzouk A., Douzane O., Laidoudi B., Mezreb K., Marmoret L., Quéneudec M., 2004,

Effect of rubber wastes particles on the thermal conductivity of cement composite, *Cement and Concrete Composites*. (accepté)

Benazzouk A., Quéneudec M., 2003, Procédé de fabrication par moussage protéinique d'un matériau composite de ciment et de caoutchouc. Matériau composite obtenu par la mise en œuvre du procédé et utilisation du matériau composite dans le domaine de la construction, Brevet numéro de référence 0490 DBR 001FR, numéro de dépôt 03 01016, Université de Picardie Jules-Verne.

Tikalsky P.J., Pospisil J., MacDonald W., 2003, A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete, *Cement and Concrete Research*. (sous presse)

Hall C., Kam-Ming Tse T., Water movement in porous building materials-VII. The sorptivity of mortars. *Buil. and Envir.* 1986, 21 (2), 113-118.

Yang Q., Zhu P., Wu X., Huang S., 2002, Properties of concrete with a new type of saponin air-entraining agent, *Cement and Concrete Research*, 30, 1313-1317.

Ruzicka M., 1998, Optimisation d'un procédé de moussage protéinique de pâtes argile-ciment. Conséquences sur le comportement physico-mécanique du matériau durci, Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, 187 p.