
Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment

Amar Benazzouk, Omar Douzane, Thierry Langlet, Katiba Mezreb, Fayçal Labbani, Jean-Marc Roucoult

*Laboratoire des Technologies Innovantes (EA 3899) - "Phénomènes de Transfert et Construction Durable" - Université de Picardie Jules Verne
IUT d'Amiens, Département génie civil. Avenue des Facultés, 80025 Amiens, cedex 01*

Amar.benazzouk@u-picardie.fr ; omar.douzane ; thierry.langlet@u-picardie.fr ; jean-marc.roucoult@u-picardie.fr

**Sections de rattachement : 60 & 62
Secteur : Secondaire**

RÉSUMÉ. *L'objectif de cette étude est d'examiner les potentialités de l'incorporation de particules de caoutchouc, de taille inférieure à 1 mm, dans une matrice cimentaire en vue de l'utilisation du composite élaboré dans le domaine d'application des bétons légers. Le matériau étudié est un mortier dans lequel le sable a été substitué par ces particules de caoutchouc à des teneurs volumiques de 0, 25, 50, 75 et 100%. Dans un premier temps, nous avons évalué l'effet des particules de caoutchouc sur les propriétés physico-mécaniques du composite. Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux variations dimensionnelles du matériau, lorsque celui-ci passe d'un état sec au contact accidentel de l'eau liquide. Ces dernières correspondent aux Variations Dimensionnelles Extrêmes (VDE). Les résultats ont montré que malgré une baisse significative des résistances mécaniques, correspondant à un allègement allant jusqu'à 42%, le composite est compatible avec l'utilisation en matériau léger de construction de "classe II", suivant les recommandations de la RILEM¹. L'examen des VDE a mis en évidence l'effet des particules de caoutchouc sur la réduction de la sensibilité à l'eau du matériau.*

MOTS-CLÉS : *Déchets de caoutchouc, Composite cimentaire, Mortier, Propriétés physico-mécaniques, Variations dimensionnelles et pondérales*

1. Introduction

L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond

¹. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux

simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats ainsi qu'à l'obligation de limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes. En France, l'accumulation de déchets de caoutchouc, tels que les pneus hors d'usage, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Afin de mieux préserver l'environnement, plusieurs actions de valorisation ont été entreprises, notamment dans le domaine des matériaux de construction. A ce sujet, plusieurs travaux concernant l'emploi de granulats de caoutchouc ont été réalisés. Ces derniers ont montré l'intérêt de l'association ciment/caoutchouc dans l'élaboration de composites cimentaires à haute déformabilité (Eldin et Senouci, 1993, Topçu 1995, Benazzouk et al., 2003, Benazzouk et al., 2004). D'autres travaux sur la durabilité de ces composites ont également montré l'importance du type de caoutchouc sur leur comportement en conditions climatiques sévères, notamment les cycles de gel/dégel (Benazzouk et al., 2002). Une étude récente sur l'élaboration de composites cimentaires, à base de particules de caoutchouc, a mis en évidence des propriétés compatibles avec l'utilisation en isolant porteur du matériau (Benazzouk et al., 2006, Benazzouk et al., 2008). Toutefois, la plupart des études précédentes se sont intéressées à la valorisation de granulats de caoutchouc, issus de pneus usagés ou de caoutchouc modifié, débarrassés des parties métalliques et textiles. Par ailleurs, la granulation des déchets de caoutchouc génère des quantités importantes de poussières qui ne sont pas valorisées. Il s'agit des fines récupérées dans les dépoussiéreurs (hottes d'aspiration). Ces déchets ne bénéficient d'aucune structure de valorisation et sont stockées dans des décharges. Leur stockage à l'air libre constitue une gêne environnementale en raison de leur finesse. Le présent travail a pour but de contribuer à leur valorisation par leur incorporation dans une matrice cimentaire, en vue de l'utilisation du composite élaboré dans le domaine d'application des bétons légers. Le composite élaboré est un mortier dans lequel le sable a été substitué par les particules de caoutchouc à des teneurs volumiques de 0, 25, 50, 75 et 100%. Il s'agit d'évaluer les propriétés à l'état durci tels que l'allègement, le module d'élasticité dynamique, les résistances mécaniques en compression et en flexion. En raison de l'importance des fissures, engendrées par les variations dimensionnelles, sur la durabilité du matériau, notamment la pénétration d'agents agressifs, nous avons évalué les variations dimensionnelles extrêmes (VDE) du composite en fonction de la teneur en particules de caoutchouc. Les variations pondérales extrêmes (VPE) correspondant ont également été prises en compte.

2. Matériaux et techniques expérimentales

Les particules de caoutchouc utilisées sont issues de la transformation par déchiquetage de déchets de l'industrie automobile. Il s'agit de fines particules récupérées dans les dépoussiéreurs, de taille inférieure à 1 mm, contenant des fibres textiles dans une proportion estimée à 20% volumique. La masse volumique apparente de ces particules est de 180 kg/m^3 . La figure 1 montre l'aspect de ces particules de caoutchouc. Le sable utilisé est un sable fin siliceux de granulométrie inférieure à

1 mm. Le ciment utilisé est du type CPA CEMI 52,5 CP2, suivant la norme NF P15-301 (Afnor, 1994). Pour la fabrication des composites, le dosage en ciment a été maintenu constant, avec un rapport eau/ciment = 0,5 correspondant à un affaissement normal compris entre 8 et 9 cm. Le sable a été substitué par les particules de caoutchouc à des teneurs volumiques de 0, 25, 50, 75 et 100%. Après homogénéisation du matériau frais, celui-ci est mis en place dans des moules de dimensions (40 mm x 40 mm x 160 mm). Pour les mesures des VDE, les échantillons ont été munis à leurs extrémités de plots métalliques. Pour chaque essai, trois échantillons ont été préparés et conservés en salle de conservation à température et hygrométrie contrôlées ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$, HR=98%), pendant 28 jours. Avant les essais, les échantillons ont été séchés dans une étuve à $70\pm 2^{\circ}\text{C}$. Les propriétés des matériaux à l'état frais sont données par le tableau 1.



Figure 1. Aspect des déchets de caoutchouc

Teneur en Caoutchouc (%)	Affaissement (cm)	Entraînement d'air (%)
0	8,5	2,8
25	9,4	4,2
50	11,6	6,4
75	12,2	7,7
100	12,8	8,6

Tableau 1. Propriétés à l'état frais des composites élaborés

Le matériau à l'état durci a été caractérisé suivant ses propriétés physico-mécaniques. La masse volumique sèche a été évaluée par mesure géométrique et pesée. Le module d'élasticité dynamique a été déterminé par auscultation ultrasonore suivant la norme NF P 18-418 (Afnor 1989). Les essais mécaniques en compression et en flexion ont été conduits suivant la Norme EN 196-1 (Afnor 1995). Dans tous les cas, les résultats représentent la moyenne de trois mesures. Les variations dimensionnelles extrêmes (VDE) d'un matériau représentent la différence entre ses dimensions longitudinales lors du passage de l'état sec à l'état saturé. En pratique, elles signifient l'écart de situation le plus extrême que peut subir le matériau, correspondantes au passage d'un climat sec à un contact accidentel avec l'eau. (Ledhem et al., 2000). Les variations pondérales extrêmes (VPE) correspondantes, expriment le taux d'eau absorbée par l'échantillon lors de l'immersion dans l'eau. Les mesures ont été réalisées sur des éprouvettes de dimensions (40 mm x 40 mm x 160 mm), munies de plots à leurs extrémités. Après 28 jours de cure en salle de conservation, les éprouvettes ont été séchées à l'étuve à $70\pm 2^{\circ}\text{C}$. Afin de simuler les variations climatiques extrêmes, nous avons procédé à un cycle de séchage-immersion dans l'eau jusqu'à saturation totale. Les variations dimensionnelles ont été mesurées à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage digital, capable d'apprécier des variations de l'ordre de 10^{-3} mm. Les variations pondérales ont été

déterminées à partir de la variation de leurs masses à l'aide d'une balance électronique.

3. Résultats expérimentaux et analyses

3.1. Allègement du matériau

La variation de la masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en particules de caoutchouc, est donnée par la figure 2. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Elle varie de 1950 à 1120 kg/m³, pour une teneur en particules de caoutchouc allant de 0 % (mortier de référence) à 100% ; Ce qui correspond à un allègement de l'ordre de 42,5%, particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et l'allègement des structures. Outre la faible densité du caoutchouc, l'allègement du composite est également liée à l'augmentation de l'entraînement d'air dans la matrice. En effet, les mesures de l'entraînement d'air ont montré que celui-ci varie de 2,8% (pour le mortier de référence) à 8,6% pour une composition de 100% en caoutchouc (tableau 1). Cette augmentation est liée à la nature non-polaire du caoutchouc, qui entraînerait de l'air dans la matrice. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par certains auteurs concernant les bétons à base de caoutchouc (Eldin et Senouci, 1993, Topçu, 1995).

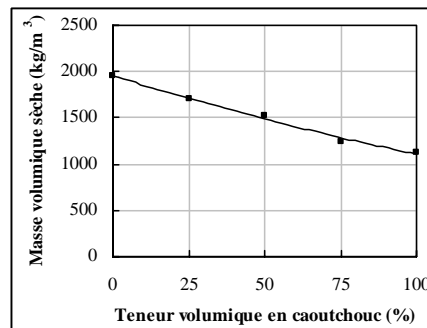


Figure 2. Masse volumique sèche des composites

3.2. Module d'élasticité dynamique

Les résultats, donnés par le la figure 3, montrent que l'ajout de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire, réduit le module d'élasticité dynamique de 23 à 3,2 GPa, pour une teneur en caoutchouc allant de 0 (mortier de référence) à 100%. Cette diminution est due à la nature du caoutchouc qui absorbe les ondes ultrasonores. En effet, les mesures de la célérité dans le caoutchouc ont donné lieu à une valeur de

l'ordre 175 m/s, alors que celle mesurée dans le mortier de référence est de 3600 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. Ce qui augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations.

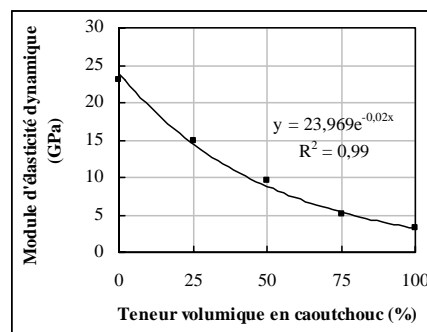


Figure 3. Module d'élasticité dynamique des composites

3.3. Résistances mécaniques (compression-flexion)

La variation de la résistance à la compression du composite, à 28 jours, à différentes formulations, est donnée par la figure 4a. La résistance diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en particules de caoutchouc. Pour une composition allant de 0 à 100%, la résistance à la compression varie de 36 MPa, pour le mortier de référence, à 6,5 MPa ; soit une réduction de l'ordre de 82%. La perte de résistance est liée, d'une part, à la nature élastique des particules de caoutchouc et d'autre part, à l'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en caoutchouc. Cette eau excédentaire est caractérisée par l'augmentation de l'affaissement, suivant le tableau 1. L'évaporation de cette eau, au cours du durcissement, engendre une porosité supplémentaire dans la matrice. Le phénomène est accentué en raison de l'entraînement d'air. D'après la figure 4b, la résistance à la compression $\sigma(MPa)$ varie en fonction de la masse volumique du matériau $\rho(kg/m^3)$ suivant l'expression $\sigma = 0,647 \exp(0,002 \rho)$, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,98$. Cette évolution est similaire à celles obtenues dans le cas des bétons légers (Khedari et al., 2001). Les résultats montrent que malgré une baisse significative de la résistance à la compression, la valeur obtenue pour une composition à 100% en caoutchouc, reste compatible avec l'utilisation du matériau dans le domaine d'application des bétons légers de construction de "classe II" (masse volumique inférieure à $1500 kg/m^3$ et une résistance à la compression supérieure à 3,5 MPa), suivant la classification fonctionnelle de la RILEM (RILEM LC2, 1978). La figure 5 montre que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en

caoutchouc. Elle varie de 4,1 MPa (pour le mortier de référence) à 2,6 MPa, pour une composition de 100% en caoutchouc. La baisse de la résistance à la compression est plus importante que celle de la résistance à la flexion (de l'ordre de 37%). Ceci est dû à la présence de fibres, qui interviennent dans la phase de microfissuration diffuse en empêchant l'apparition des microfissures actives et en retardant leur localisation (Rossi, 1998). Par ailleurs, une diminution de la quantité d'eau de gâchage permettrait de pallier en partie cette baisse de résistances et d'améliorer, en conséquences, les propriétés mécaniques du matériau puisque le dosage en eau est étroitement lié à la porosité.

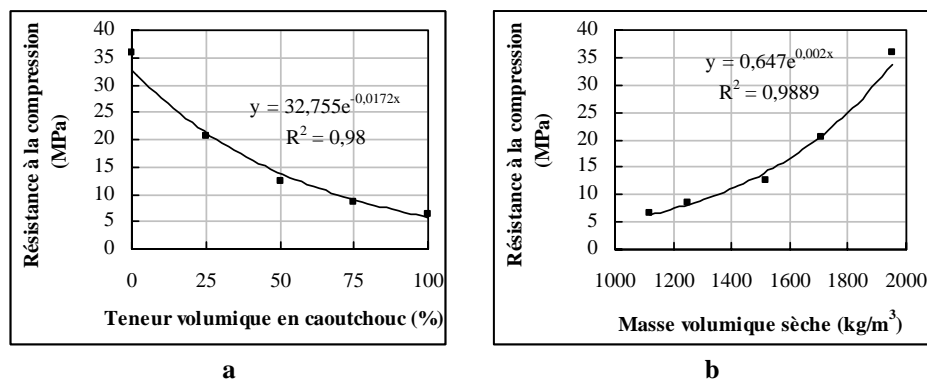


Figure 4. Evolution de la résistance à la compression des composites

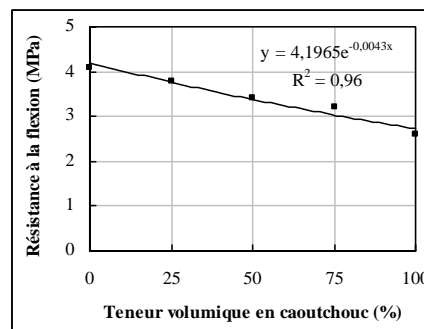


Figure 5. Evolution de la résistance à la flexion des composites

3.4. Variations dimensionnelles et pondérales extrêmes

L'évolution des variations dimensionnelles entre l'état sec et l'état saturé du composite, à différentes teneurs en caoutchouc, en fonction de la durée de cure est donnée par la figure 6a. Les résultats montrent que les déformations dépendent de la formulation du composite, avec une cinétique de gonflement très rapide dans les premiers jours. Les déformations se produisent principalement durant les trois premiers

jours. Au delà, elles se stabilisent progressivement. A saturation, correspondant à 30 jours d'immersion, les VDE varient de 0,966 mm/m, pour le mortier de référence à 0,256 mm/m pour une teneur en caoutchouc de 100% ; Soit une réduction de l'ordre de 73,5%. Cette réduction des VDE est probablement liée à la nature élastique des granulats qui amortit les contraintes exercées lors des déformations du matériau. Les valeurs des variations pondérales extrêmes (VPE), correspondant, sont données par la figure 6b. Celle-ci montre une diminution de la quantité d'eau absorbée en fonction de la teneur en caoutchouc. Ceci est dû à la différence de volume accessible à l'eau en raison de la nature non-sorptive du caoutchouc, mais aussi à la présence d'une porosité fermée supplémentaire, non accessible à l'eau, due à l'entraînement d'air.

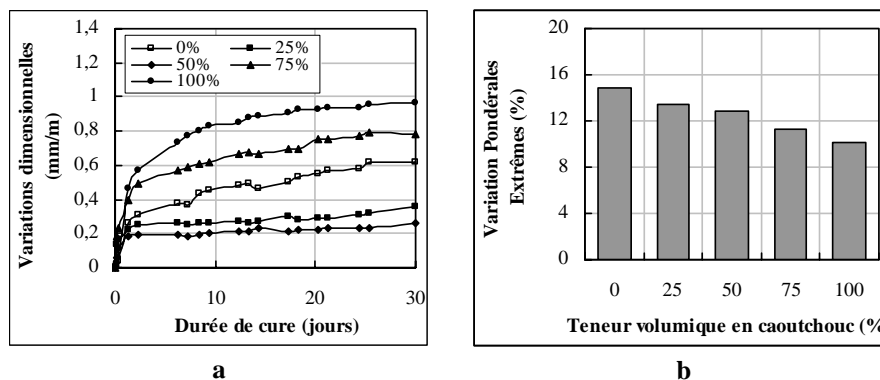


Figure 6. Evolution des VDE/VPE des composites

Des études sur la prévision des variations dimensionnelles du béton ont montré que celles-ci dépendent des variations dimensionnelles de la matrice cimentaire et de la teneur en granulats minéraux (Neville, 2000). Suivant la loi de Pickett (Neville, 2000), cette relation empirique est du type : $S_c = S_m - a g^n$, où S_c et S_m (mm/m) sont les variations dimensionnelles respectives du composite et de la matrice. g (%) représente la teneur volumique des granulats. a et n sont des coefficients qui varient en fonction des caractéristiques des granulats. Dans notre cas, en considérant le composite constitué d'une phase continue (ciment+sable) et d'une phase dispersée (particules de caoutchouc), la figure 7 montre que les VDE du composite peuvent s'exprimer en fonction de celles de la matrice (ciment+sable) suivant la relation : $VDE = 0,971 - 0,0088 g^{0,963}$, avec un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,98$. Selon l'expression obtenue, les valeurs estimées des VDE des composites, pour des teneurs en granulats de 0% et de 100%, sont de 0,971 et 0,231 mm/m, respectivement. Ces valeurs sont proches de celles obtenues expérimentalement. La baisse des VDE des composites est probablement liée à la différence d'élasticité entre la matrice et les granulats de caoutchouc. Par ailleurs, le module d'élasticité statique des granulats de caoutchouc, mesuré sur des échantillons avant l'opération de déchiquetage, et celui du mortier sont

de 68 MPa et 15 GPa, respectivement. La baisse des variations dimensionnelles peut être également liée à la diminution de l'absorption d'eau par les composites. Dans la réalisation d'un matériau de construction durable, résistant aux agents agressifs divers, l'action des fissures, liées aux variations dimensionnelles, sont préjudiciables. Elles présentent une voie supplémentaire de pénétration d'agents agressifs. La diminution des variations dimensionnelles permet de limiter la sensibilité à la pénétration d'agents agressifs, qui affecte la durabilité.

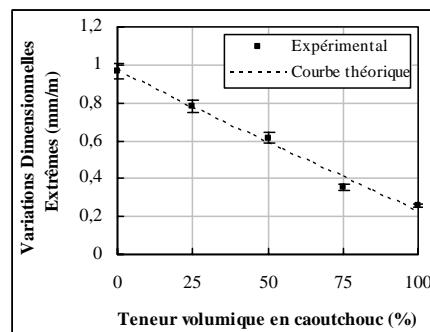


Figure 7. Relation VDE - teneur en caoutchouc des composites

4. Conclusion

Les travaux présentés concernent la faisabilité d'un nouveau composite cimentaire, à base de particules de caoutchouc. L'examen du comportement physico-mécanique a montré un allègement du composite allant jusqu'à 42,5%. Malgré une baisse significative de la résistance à la compression, les valeurs restent compatibles avec l'utilisation du composite dans le domaine des bétons légers de construction de "classe II". Par ailleurs, la baisse de la résistance à la flexion est moins importante que celle à la compression. De plus, les mesures du module d'élasticité dynamique ont mis en évidence des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations de ce composite. Les résultats ont également montré que l'ajout de particules de caoutchouc, permettait de réduire les variations dimensionnelles du matériau. La limitation de ces variations dimensionnelles est une caractéristique importante pour la durabilité des matériaux, notamment le contact accidentel avec l'eau qui génère des contraintes pouvant conduire à la fissuration. Ceci peut avoir des conséquences sur l'impact d'un environnement agressif, puisque la résistance vis à vis de la carbonatation, la diffusion des ions et l'action du gel dépendent de l'état de la structure du matériau.

Bibliographie

- AFNOR, "Auscultation sonore, mesure du temps de propagation d'onde ultrasonore dans le béton", 1989.
- AFNOR, "Liants hydrauliques, ciments courants—composition, spécification et critères de conformité", 1994.
- AFNOR, "Méthodes d'essai des ciments, Partie I: Détermination des résistances mécaniques", 1995.
- Benazzouk A., Queneudec M., "Durability of cement-rubber composites under freeze thaw cycles". Proceeding of International congress of Sustainable Concrete Construction, Dundee-Scotland, September 2002, p. 355-362.
- Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieux A., Quéneudec M., "Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites—influence of the alveolar texture of rubber aggregates". *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, 2003, p. 711-720
- Benazzouk A., Douzane O., Quéneudec M., Transport of fluids in cement-rubber composites. *Cement & Concrete Composites*, vol. 26, 2004, p. 21-29
- Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Quéneudec M., "Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste". *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, 2006, p. 650-657
- Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Laidoudi B., Quéneudec M., "Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling". *Construction and Building Materials*, vol. 22, 2008, p. 573-579.
- Eldin N.N., Senouci A.B., "Rubber tire particles as concrete aggregate". *Journal of Material in Civil Engineering*, vol.5, N°4, 1993, p. 478-496.
- Khedari J., Suttisonk B., pratinthong N., Hirunlabh J., "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity" *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, 2001, p. 65-70
- Ledhem A., Dheily R.M., Benmalek M.L., Queneudec M., "Minimisation de la sensibilité à l'eau de composites cimentaires argile-schiste-bois", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 27, 2000, N°1, p.101-111
- Neville A. M., "Propriétés des bétons". Edition Eyrolles. Paris, 2000, p. 410.
- RILEM LC2. "Functional classification of lightweight concrete". Vol. 11, 1978, p.281-283.
- Rossi P., "Les bétons de fibres métalliques". Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1998.
- Topçu U.B., "The properties of rubberized concrete". *Cement & Concrete Research*, vol. 25, N°2, 1995, p. 304-310.