

Comparison of short and long-term performances of lightweight aggregate mortars made with polyurethane foam waste and expanded polystyrene beads

Comparaison performantielle à court et à long termes de mortiers légers à base de déchets de mousse de polyuréthane rigide et de billes de polystyrène expansé

M. Kismi, et P. Mounanga

LUNAM Université, Université de Nantes – IUT Saint-Nazaire, GeM, CNRS UMR 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, France

Abstract. This article is part of a study on the valorization of rigid polyurethane foam (PUR) waste for the development of lightweight cementitious materials. Mortars were made with volume replacement rates of sand with plastic lightweight aggregates equal to 25 and 50%. To compare the benefits of the use of PUR foam in comparison with commercial lightweight aggregates, two types of aggregates were considered: PUR foam particles and expanded polystyrene beads. The workability, early-age hydration rate, mechanical properties (compressive strength and dynamic Young's modulus), thermophysical properties (thermal conductivity and specific heat), drying shrinkage and gas permeability were measured on the different mortars investigated. A comparative analysis of these properties was then proposed, which showed that it was possible to produce lightweight aggregate mortars for structural use using PUR foam waste and that PUR foam particles had a high potential for reducing the thermal conductivity mortars.

Résumé. Cet article s'intègre dans une étude menée sur la valorisation de déchets de mousse de polyuréthane rigide (PUR) pour l'élaboration de matériaux cimentaires légers. Dans ce but, des mortiers ont été fabriqués en remplaçant partiellement le sable par des particules fines de mousse PUR. Les taux de remplacement volumique considérés sont de 25 et 50%. Afin de comparer les bénéfices apportés par l'utilisation de mousse PUR par rapport à des granulats légers commerciaux, des mortiers légers à base de billes de polystyrène expansé (PSE) de diamètre compris entre 1,5 et 2,5 mm, ont également été fabriqués. L'ouvrabilité, la cinétique d'hydratation au jeune âge et les propriétés mécaniques (résistance à la compression et module d'Young dynamique), thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique), le retrait de séchage et la perméabilité au gaz ont été mesurés sur les différents mortiers mis en œuvre. Une analyse comparative de ces propriétés est alors proposée.

1 Introduction

L'utilisation des bétons de granulats légers dans la construction présente plusieurs avantages tels que la réduction du poids propre des structures et de meilleures performances en termes d'isolation thermique. Ces bétons sont cependant d'un coût sensiblement plus élevé que les bétons traditionnels, à base de granulats siliceux ou calcaires, en raison des granulats spéciaux (argile expansée ou billes de polystyrène expansé) utilisés pour leur fabrication. Afin de palier à ce surcoût, des recherches sont actuellement entreprises afin de mettre au point des compositions de bétons intégrant des granulats légers à faible coût, généralement issus de déchets ou de co-produits industriels [1].

Dans le domaine des matières plastiques, les déchets de mousses alvéolaires constituent un pourcentage non négligeable du volume de déchets plastiques produits annuellement. Ces déchets sont valorisés comme combustibles ou incorporés dans le process de fabrication de matériaux composites. Bien que de rares travaux aient été publiés sur le sujet, l'incorporation de ces copeaux pour la fabrication de bétons légers pourrait également constituer une alternative intéressante pour leur valorisation.

Cette étude s'intègre dans ce contexte, en proposant la fabrication de mortiers légers à base de particules fines de mousse de polyuréthane rigide (PUR) [2,3]. Pour cela, deux mortiers contenant 25 et 50% de mousse PUR en remplacement du volume de sable ont été fabriqués et caractérisés au jeune âge et à âge mature. Un mortier de contrôle (formulé sans granulat léger) et deux mortiers légers à base de billes de polystyrène expansé (PSE) ont également été élaborés afin de comparer les propriétés des différents mélanges (réactivité du liant en présence de granulats légers, performances mécaniques et thermiques, perméabilité au gaz, retrait et perte de masse par dessiccation) et de quantifier l'intérêt de l'utilisation de copeaux de mousse PUR pour la mise en œuvre de mortiers légers.

2 Programme expérimental

2.1 Matériaux et mélanges

Le ciment utilisé est de type CEM I 52,5 N (Lafarge®, usine de Saint-Pierre La Cour, France). Sa composition de Bogue est la suivante : 62% de C_3S ; 11% de C_2S ; 8% de C_3A ; 8% de C_4AF . Il contient 7% de gypse. Sa surface spécifique de Blaine est de 339 m^2/kg et sa densité absolue est égale à 3,16.

Le sable est un sable siliceux roulé alluvionnaire (sable de Loire) tamisé à 5 mm. Sa densité absolue est de 2,58 et son coefficient d'absorption en eau est de 0,90%.

Deux types de granulats plastiques ont été utilisés pour la fabrication des mortiers légers (Figure 1) : des déchets fins de mousse de polyuréthane rigide (PUR), provenant de panneaux d'isolation utilisés dans le secteur de la construction, broyée et tamisée à 1 mm, et des billes de polystyrène expansé (PSE) de diamètre compris entre 1,5 et 2,5 mm. La densité absolue de la mousse de PUR dans l'air a été évaluée, à environ 45 kg/m^3 [2], tandis que celle des billes de PSE est de 44 kg/m^3 , selon les indications du fournisseur.

Cinq mortiers ont été formulés avec différents teneurs en mousse PUR et en billes PSE. La composition des mortiers est détaillée dans le Tableau 1. Les constituants secs (ciment, sable et granulats légers) sont pré-mélangés pendant 30 secondes avant l'introduction de l'eau en une seule fois. Le mélange est alors malaxé pendant 90 secondes à vitesse lente (30 tr/min) et 90 secondes à vitesse rapide (60 tr/min) avec un malaxeur muni d'une cuve de 20 L. A la fin du malaxage, la densité apparente et l'affaissement au mini-cône des mortiers frais sont mesurés.

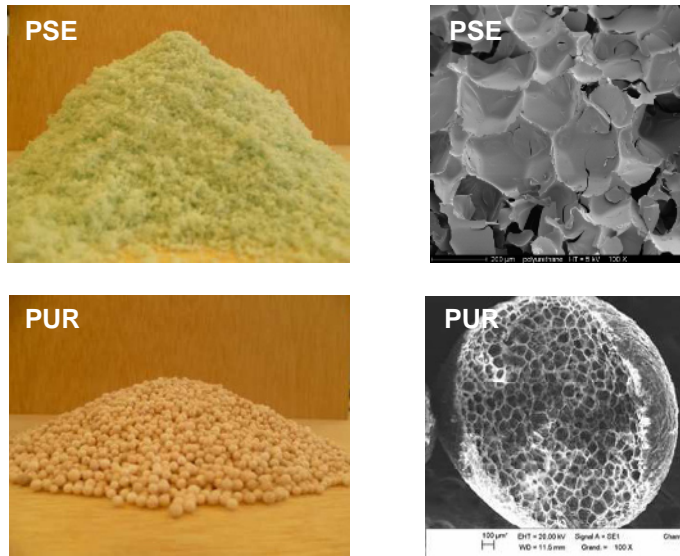


Fig. 1. Photographies et observations microstructurales ($\times 100$) des particules de mousse de polyuréthane extrudé rigide (PUR) et de polystyrène expansé (PSE – bille découpée) utilisées.

Tableau 1. Proportions massique et volumique des mortiers étudiés.

Nomenclature des mortiers	Réf.		PUR_25		PUR_50		PSE_25		PSE_50	
	Mass.	Vol.	Mass.	Vol.	Mass.	Vol.	Mass.	Vol.	Mass.	Vol.
Ciment	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau	0,50	1,58	0,50	1,58	0,50	1,58	0,50	1,58	0,50	1,58
Sable	2,20	2,69	1,65	2,02	1,10	1,35	1,65	2,02	1,10	1,35
Mousse PUR	0	0	0,01	0,67	0,02	1,34	0	0	0	0
Billes PSE	0	0	0	0	0	0	0,01	0,67	0,02	1,34
Affaissement au mini-cône (mm)	125		115		120		102		100	
Densité fraîche (-)	2,308		2,162		2,050		1,634		1,190	
Densité après 90 j de séchage (-)	2,219		2,077		1,915		1,551		1,141	

2.2 Méthodes et protocoles expérimentaux

Les mortiers fabriqués ont été caractérisés au jeune âge et à âge mature. Six techniques expérimentales ont été utilisées.

La cinétique d'hydratation a été mesurée par microcalorimétrie isotherme. Immédiatement après le malaxage, deux échantillons de 4 à 5 grammes sont prélevés au mélange, placés dans des flacons et pesés, avant d'être introduits dans le microcalorimètre. Le dégagement de chaleur des échantillons, caractéristique de la vitesse de réaction du liant, est mesuré automatiquement et permet de quantifier la réactivité du liant au jeune âge [4]. Les courbes de flux de chaleur, rapportées à la masse de ciment et présentées dans la suite de l'article, sont des courbes moyennes obtenues à partir de deux essais menés en parallèle.

Les propriétés mécaniques et thermiques, le retrait et la perte de masse par dessiccation ont été mesurés sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Pour la résistance en compression R_c et le module d'Young dynamique E_{dyn} , les éprouvettes de mortiers sont conservées en salle humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90% jusqu'au moment de l'essai. A 28 jours et pour chaque formulation, E_{dyn} est mesuré à l'aide d'un appareil Grindosonic® en enregistrant la fréquence moyenne de résonance d'une vibration créée par un choc léger sur trois éprouvettes [5]. Ces éprouvettes sont ensuite rompues en flexion trois points et les six morceaux d'éprouvettes obtenus sont testés en compression. Chaque valeur d' E_{dyn} et de R_c présentée dans cet article est une moyenne de six résultats expérimentaux.

Les propriétés thermiques ont été déterminées par la méthode du Hot Disk [6], avec un appareil de type TPS 1500, sur des éprouvettes prismatiques âgées d'un an, conservées dans une salle climatique ($20 \pm 1^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative). Pour chaque mortier, la sonde de mesure est placée entre deux éprouvettes issues de la même gâchée. Les faces en contact avec la sonde sont celles qui étaient en contact avec les parois latérales des moules au moment du coulage. Elles sont en effet planes et sans rugosité, et permettent ainsi d'assurer un meilleur contact avec la sonde. Les valeurs fournies dans la suite de l'article sont des valeurs moyennes calculées à partir d'au moins trois résultats expérimentaux.

Les éprouvettes de retrait et de perte de masse, munies à leurs extrémités de plots en laiton, sont également conservées à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative pendant toute la durée des essais. La masse est mesurée à $\pm 0,01 \text{ g}$ et le suivi des variations dimensionnelles est réalisé à l'aide d'un retractomètre équipé d'un comparateur d'une précision de $\pm 0,001 \text{ mm}$. Chaque courbe de perte de masse ou de retrait est une courbe moyenne calculée à partir de résultats obtenus sur trois éprouvettes.

La perméabilité au gaz a été mesurée avec un perméamètre à charge constante de type Cembureau en utilisant de l'azote comme gaz percolant [7]. Les éprouvettes sont tout d'abord séchées à 40°C pendant plusieurs semaines, jusqu'à masse constante ($< 0,01 \text{ g}$) puis refroidies 48 h dans un dessiccateur à $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Chaque éprouvette est ensuite placée dans la cellule de perméabilité et soumise à plusieurs pressions différentielles. La perméabilité intrinsèque K_V (m^2) peut alors être calculée en considérant un écoulement gazeux laminaire, un fluide compressible et un régime d'écoulement permanent.

3 Résultats et discussion

Les Figures 2 à 7 présentent l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au terme de cette étude sur les différents mortiers mis en œuvre.

Les courbes microcalorimétriques tracées à la Figure 2 montrent une évolution relativement commune aux matrices à base de ciment Portland. A la Figure 2.A, le pic principal correspond notamment à l'hydratation du C_3S , phase majeure du ciment Portland. On constate que le remplacement partiel du sable par des granulats légers, pour les taux de substitution considérés, ne modifie pas significativement l'évolution des courbes de flux de chaleur.

L'effet est plus sensible sur les courbes d'évolution de chaleur d'hydratation, particulièrement pour des taux de substitution volumique de 50% (Figure 2.B). En effet, les courbes PUR_50 et PSE_50 montrent une augmentation de la chaleur dégagée par g de ciment au jeune âge. Concernant les mortiers à base de billes PSE, on peut postuler que la diminution du dosage en sable et leur remplacement partiel par des billes non poreuses, s'accompagnent d'une diminution de la quantité d'eau absorbée sur les granulats, et donc d'une augmentation de l'eau disponible pour l'hydratation du ciment. L'effet des particules de mousse PUR est probablement plus complexe. Les copeaux de mousse PUR absorbent une partie de l'eau de gâchage lors du malaxage. Cependant, compte tenu de la largeur des pores ouverts de ces particules (Figure 1), on peut considérer que l'eau absorbée par la porosité de la mousse PUR reste largement disponible pour l'hydratation des grains de ciment, contrairement à celle absorbée dans la porosité beaucoup plus fine du sable.

Le remplacement du sable par des copeaux de mousse PUR ne provoque donc pas forcément une réduction de l'eau disponible pour l'hydratation du liant. Par ailleurs, il est possible que les particules de mousse PUR les plus fines jouent le rôle de site de nucléation/croissance des hydrates, favorisant ainsi l'hydratation du ciment et le dégagement de chaleur au jeune âge.

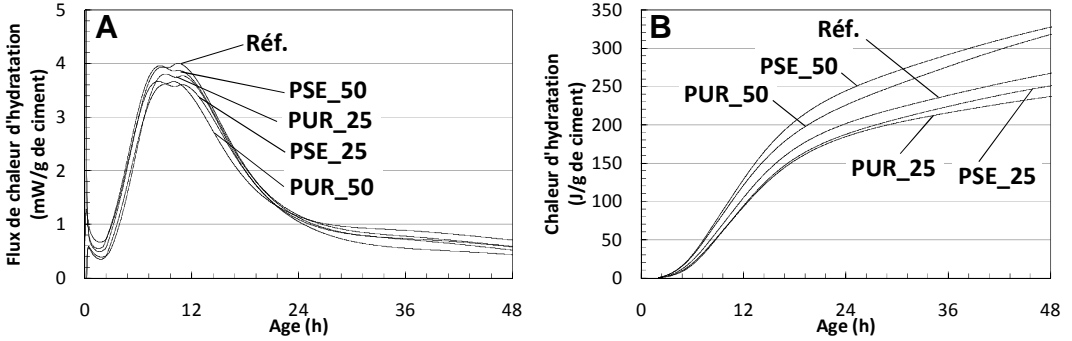


Fig. 2. Cinétique d'hydratation des mortiers au jeune âge. A) Flux de chaleur d'hydratation ; B) Chaleur d'hydratation.

Les performances mécaniques des mortiers sont présentées à la Figure 3. Le remplacement du sable par des granulats plastiques légers engendre une diminution attendue de la résistance à la compression (R_c) et du module d'Young dynamique (E_{dyn}), liée à l'augmentation de la porosité des mortiers. L'incorporation des billes PSE provoque la réduction la plus importante des propriétés mécaniques, et conjointement la plus forte diminution de la densité (Tableau 1). Pour les mortiers PSE, la diminution de 31 et de 45% de la densité sèche se traduit par une diminution de 75 à 76% de la résistance mécanique et de 48 à 59% du module d'Young. Pour les mortiers PUR, la réduction de 5 et de 11% de la densité sèche se traduit par une diminution de 2 à 19% de la résistance mécanique et de 14 à 28% du module d'Young. En comparant ces données, il apparaît qu'à densité égale, l'utilisation de la mousse PUR pourrait potentiellement permettre de conserver des résistances supérieures à celles des mortiers à base de billes PSE. Cela s'expliquerait par la meilleure qualité de l'interface pâte/granulats légers dans le cas de la mousse PUR, en comparaison des billes PSE.

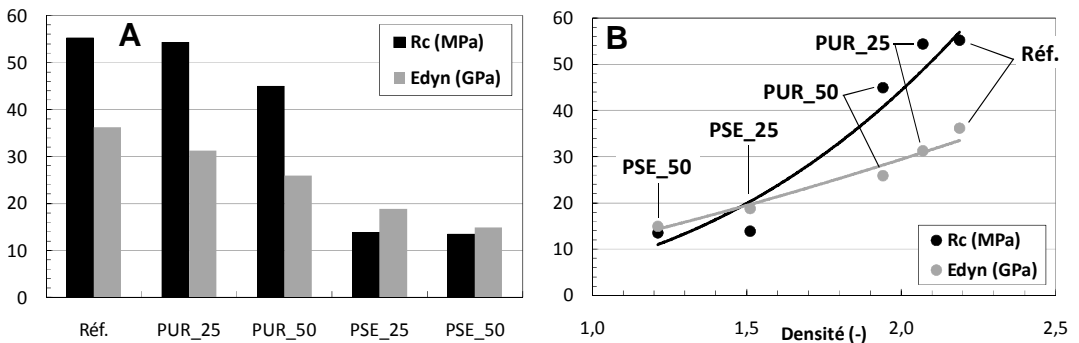


Fig. 3. Propriétés mécaniques (R_c : résistance à la compression ; E_{dyn} : module d'Young dynamique) des mortiers à 28 j. A) Histogramme des valeurs ; B) Propriétés mécaniques en fonction de la densité sèche.

Les Figures 4 et 5 présentent les résultats des essais de perte de masse et de retrait de séchage obtenus sur les différentes formulations de mortiers. Les cinétiques de perte de masse des mortiers Réf., PUR_50 et PSE_25 sont très proches, les courbes étant quasiment confondues sur la période d'investigation. La perte de masse du mortier PUR_25 est plus faible. Il faut noter que la masse d'eau de gâchage est la même pour les différents mortiers : on peut en conclure que le mortier PUR_25 possède des paramètres de transfert plus faibles que ceux des autres mortiers étudiés. Ce résultat est en accord avec les valeurs de perméabilité au gaz présentées à la Figure 6. Le mortier PUR_25 montre en effet la plus faible perméabilité au gaz parmi les différents mortiers mis en œuvre. Il est probable que la tortuosité plus élevée de ce mortier explique ses paramètres de transfert plus faibles, malgré une porosité supérieure à celle du mortier de référence. Au contraire, le mortier PSE_50 présente à la fois la perte de masse et la perméabilité les plus élevées.

Concernant les mesures de retrait de séchage, les mortiers les plus riches en granulats légers (PUR_50 et PSE_50) se caractérisent par des variations dimensionnelles plus importantes, liées à leur perte de masse par dessiccation et à leur module d'élasticité plus faible. Les cinétiques de déformations des mortiers Réf., PUR_25 et PSE_25 diffèrent l'une de l'autre mais les valeurs de retrait de séchage atteintes à 60 jours sont très proches.

La perméabilité au gaz des mortiers augmente avec le dosage en granulats légers, excepté pour le cas du mortier PUR_25 (Figure 6). L'ajout de mousse PUR à dosage modéré permet donc de diminuer de 5 à 6% la densité des mortiers tout en conservant des propriétés de transfert de masse du même ordre de grandeur voire inférieures à celles du mortier de référence. Au contraire, l'utilisation des billes PSE engendre une multiplication de 3,7 à 5,0 de la valeur de perméabilité au gaz par rapport à celle du mortier de référence.

La Figure 7 récapitule les propriétés thermophysiques des mortiers. La conductivité thermique diminue à mesure que le taux de substitution du sable par des granulats légers augmente : la conductivité des mortiers PUR_25, PUR_50, PSE_25 est respectivement 14%, 37%, 47% et 73% inférieure à celle du mortier de référence. Cette diminution est directement liée à l'augmentation de la porosité des mortiers légers. L'effet des granulats légers est moins important sur la capacité calorifique. On observe même que le mortier PUR_25 présente une valeur de capacité calorifique légèrement supérieure à celle du mortier de référence. Ceci peut s'expliquer par la perte en eau plus faible du mortier PUR_25. L'eau possède en effet une capacité calorifique particulièrement élevée. Globalement et à l'exception du mortier PUR_25, on note que l'ajout de granulats légers se traduit par une réduction de la capacité calorifique des mortiers légers, en raison de la fraction volumique en air plus élevée au sein de ces mortiers.

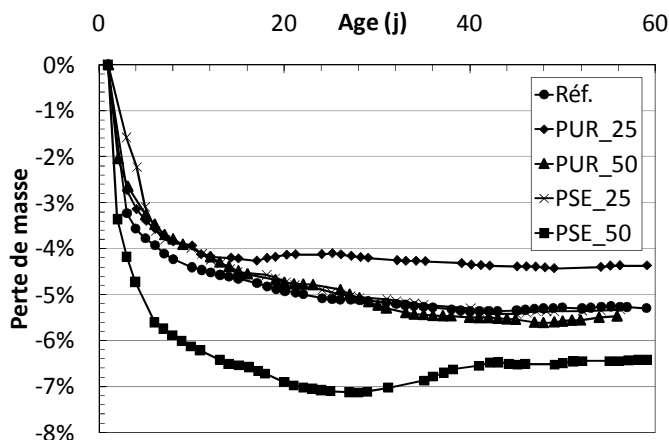


Fig. 4. Perte de masse par séchage des mortiers conservés à $20\pm 1^\circ\text{C}$ et à $50\pm 5\%$.

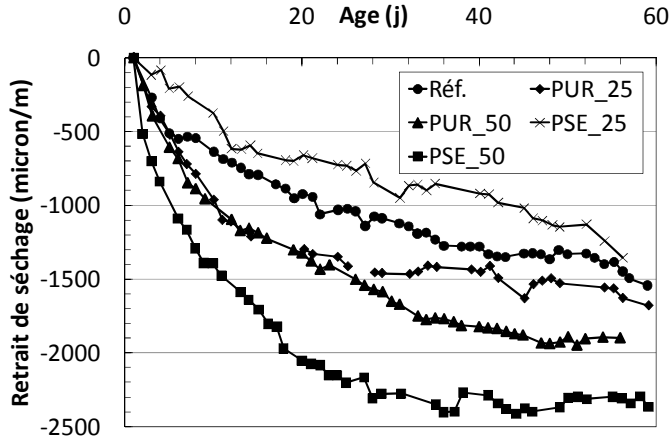


Fig. 5. Retrait de séchage des mortiers conservés à $20\pm 1^\circ\text{C}$ et à $50\pm 5\%$.

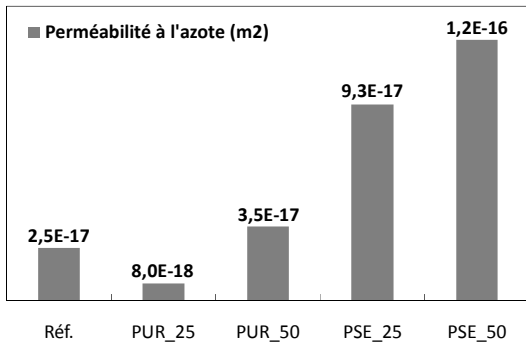


Fig. 6. Perméabilité au gaz des mortiers mesurée à long terme (âge > 90 jours).

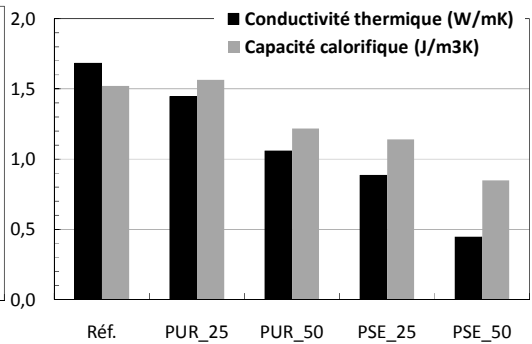


Fig. 7. Propriétés thermophysiques des mortiers mesurées à long terme (âge > 90 jours).

4 Conclusions

L'incorporation de fines de mousse de polyuréthane rigide (PUR) en substitution d'une partie du sable permet d'obtenir des mortiers plus légers tout en conservant des propriétés mécaniques élevées et une perméabilité au gaz du même ordre de grandeur, voire plus faible que celle du mortier de référence (sans granulat léger).

Les performances en termes d'isolation thermique sont également améliorées de 14 à 37%. Pour un même dosage volumique, l'utilisation de billes de PSE permet d'obtenir des densités plus faibles que les mortiers à base de mousse PUR, mais cette diminution de masse volumique s'accompagne d'une forte réduction des propriétés mécaniques et d'une multiplication de la perméabilité au gaz de 3,7 à 5,0 par rapport au mortier de référence.

En perspectives, une optimisation de la formulation des mortiers à base de mousse PUR devrait permettre de minimiser leur densité, et donc de maximiser leurs propriétés d'isolation thermique tout en maintenant des performances mécaniques acceptables.

Références

1. R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, *Waste Manag.* **28**, 10 (2008)
2. A. Ben Fraj, M. Kismi, P. Mounanga, *Constr. Build. Mater.* **24**, 6 (2010)
3. P. Mounanga, W. Gbongbon, P. Poullain, P. Turcry, *Cem. Concr. Compos.* **30**, 9 (2008)
4. P. Mounanga, M.I.A. Khokhar, R. El Hachem, A. Loukili, *Mater. Struct.* **44**, 2 (2011)
5. S. Spinner, W.E. Tefft, *Proceedings ASTM* **61** (1961)
6. Y. He, *Thermochim. Acta* **436**, 1-2 (2005)
7. V. Picandet, A. Khelidj, G. Bastian, *Cem. Concr. Res.* **31**, 11 (2001)