



HAL
open science

Effets thermique et mécanique de l'incorporation de déchets de mousse de polyuréthane dans un mortier

Pierre Mounanga, Ph Turcry, Philippe Poullain

► **To cite this version:**

Pierre Mounanga, Ph Turcry, Philippe Poullain. Effets thermique et mécanique de l'incorporation de déchets de mousse de polyuréthane dans un mortier. XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Construire : un nouveau défi, 2006, La Grande Motte, France. hal-01008121

HAL Id: hal-01008121

<https://hal.science/hal-01008121>

Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effets thermique et mécanique de l'incorporation de déchets de mousse de polyuréthane dans un mortier

Pierre Mounanga* — Philippe Turcry** — Philippe Poullain*

* *GeM – UMR CNRS 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique IUT de Saint-Nazaire, 58 Rue Michel Ange, 44606 Saint-Nazaire cedex*
Pierre.mounanga@univ-nantes.fr, Philippe.poullain@univ-nantes.fr

** *LEPTAB, Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment, Pôle Science et Technologie, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle cedex 01*
Philippe.turcry@univ-lr.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'utilisation de déchets de mousse de polyuréthane pour la fabrication de mortiers isolants. Cinq mortiers contenant différents dosages de mousse (0%, 51%, 54%, 61% et 69% du volume de mortier) ont été préparés et la détermination de leurs propriétés thermiques et mécaniques, de leur retrait et de leur perte de masse par dessiccation a permis de mesurer l'influence de l'incorporation des déchets de mousse. La conductivité thermique des mortiers avec mousse de polyuréthane est 2 à 3 fois inférieure à celle du mortier référence (sans mousse) tandis que la résistance en compression diminue dans un rapport de 2 à 6 selon le dosage en mousse utilisé. Par ailleurs, la présence de mousse de polyuréthane dans les mortiers se traduit par une augmentation importante du retrait et de la perte de masse par dessiccation. Ces résultats s'expliquent par la forte porosité et la faible résistance mécanique du polyuréthane alvéolaire.

ABSTRACT. This article presents the results of an experimental study on the use of polyurethane foam waste for the manufacture of insulating mortars. Five mortars containing various foam proportions (0%, 51%, 54%, 61% and 69% of the mortar volume) were prepared and the determination of thermal and mechanical properties, shrinkage and mass loss per desiccation made it possible to measure the influence of the foam incorporation. The thermal conductivity of the mortars with polyurethane foam is a half to a third as high as that of the reference mortar (without foam) while compressive strength decreases in a ratio from 2 to 6 according to the foam proportion. In addition, the presence of polyurethane foam in the mortars results in an important increase in shrinkage and in mass loss per desiccation.

MOTS-CLÉS : mousse de polyuréthane, déchets, mortier, propriétés thermiques, résistance mécanique, retrait.

KEYWORDS: polyurethane foam, waste, mortar, thermal properties, mechanical strength, shrinkage.

1. Introduction

Les industries de la plasturgie et de la construction modulaire génèrent chaque année un grand volume de déchets industriels lors de la mise en forme, du conditionnement et de l'utilisation des matières plastiques. Le traitement de ces déchets est aujourd'hui soumis à des contraintes liées aux principes du développement durable et nécessite la mise au point de méthodes de recyclage et de valorisation spécifiques. La fabrication, la mise en forme puis la destruction en fin de vie de panneaux en mousse de polyuréthane (PUR) utilisés comme paroi d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment produisent par exemple d'importantes quantités de fines et de copeaux de faible densité aux propriétés isolantes. L'intégration de cette matière, aujourd'hui inutilisée, dans un processus de fabrication de mortier isolant pourrait constituer une voie de valorisation envisageable.

Dans cette optique, une étude en laboratoire a été menée afin de mesurer l'effet de l'incorporation de mousse de polyuréthane, sous forme de poudre et de « granulats » légers, sur la conductivité thermique, la capacité calorifique, la résistance mécanique et le retrait de mortiers.

La première partie de cet article est consacrée à la caractérisation des déchets de mousse de polyuréthane. Puis nous présentons les matériaux utilisés pour la fabrication des mortiers et le plan expérimental mis en place pour mesurer leurs propriétés thermiques et mécaniques et leurs évolutions dimensionnelles et massiques entre 0 et 28 jours. Enfin, dans un troisième temps, les résultats obtenus sont analysés afin d'expliquer l'influence de la présence de la mousse de polyuréthane sur l'évolution du comportement des mortiers.

2. Propriétés de la mousse de polyuréthane

2.1. Masse volumique

La masse volumique de la mousse de polyuréthane (PUR) a été évaluée sur trois échantillons de forme cubique. La valeur obtenue, $45 \pm 2 \text{ kg/m}^3$, est du même ordre que celle affichée par le fournisseur (environ 40 kg/m^3).

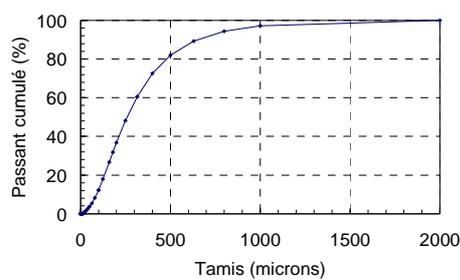
Il est important de noter que cette masse volumique est celle de la mousse non comprimée. Contrairement à un granulats minéraux (sable ou gravier), la mousse de polyuréthane est fortement compressible, car très poreuse. Sa densité augmente lors d'un chargement mécanique extérieur. Au sein d'un mortier par exemple, elle est comprimée par la pâte ou le mortier environnant, la pression exercée dépendant notamment de la hauteur de mortier situé au-dessus de la mousse. Cependant, nous avons choisi de formuler les mortiers en prenant la masse volumique de la mousse égale à 45 kg/m^3 . Nous avons fait l'hypothèse que les mortiers formulés seront utilisés sur de faibles épaisseurs (mortiers de réparation, etc.) et donc faiblement comprimés.

2.2. Granularité

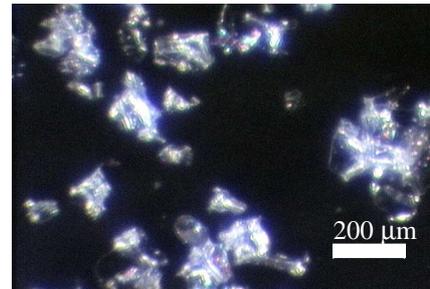
L'analyse granulométrique par tamisage des déchets de mousse de PUR (tableau 1) montre une grande étendue granulaire du matériau et une proportion importante de grains fins (< 2 mm), mesurée par granulométrie-laser (figure 1-a). La visualisation de ces éléments fins au vidéomicroscope révèle des formes anguleuses et très irrégulières (figure 1-b).

Tableau 1. *Granulométrie par tamisage*

| Tamis (mm) | 2 | 3.15 | 4 | 6.3 | 8 |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| Passant cumulé (%) | 68.6 | 87.7 | 94.4 | 96.9 | 97.5 |



a)



b)

Figure 1. *Distribution granulométrique des éléments fins (0-2mm) des déchets de mousse de PUR (a) et visualisation par vidéomicroscopie (b)*

3. Matériaux et programme expérimental

3.1. Formulation des mortiers

Le tableau 2 récapitule les constituants utilisés pour la fabrication des mortiers et les formulations mises en œuvre. La première formulation, sans mousse de PUR joue le rôle de référence. Les formulations P1 à P4 ont été élaborées avec une proportion croissante de mousse de PUR. Outre l'influence de la quantité de mousse incorporée, on a également étudié l'effet d'une variation du rapport E/C (formulation P2), du dosage en sable (formulation P3) et du dosage en ciment (formulation P4) sur le comportement thermique et mécanique des mortiers isolants.

Après le malaxage et le coulage, les éprouvettes 4x4x16 cm de mortiers sont conservées 24 h en chambre humide à $20\pm 2^\circ\text{C}$. Elles sont ensuite démoulées et immergées dans un bain d'eau à $20\pm 2^\circ\text{C}$, à l'exception des éprouvettes utilisées pour

le suivi du retrait et de la perte de masse conservées dans une salle à température et humidité relative (*HR*) contrôlées ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $HR = 50 \pm 5\%$). On remarque que l'écart entre la densité théorique des mortiers et leur densité réelle, mesurée après coulage (tableau 2), augmente avec le dosage en mousse de PUR : la compressibilité de la mousse évoquée plus haut et l'absorption probable d'eau et de pâte dans la porosité ouverte de la mousse peuvent expliquer ces différences importantes.

Tableau 2. Formulations des mortiers étudiés

| | <i>Référence</i> | <i>P1</i> | <i>P2</i> | <i>P3</i> | <i>P4</i> |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Constituants | Dosage en kg/m³ | | | | |
| Sable de Loire | 1625 | 285 | 285 | 0 | 0 |
| Ciment CEM II 32.5 | 380 | 380 | 380 | 380 | 300 |
| Eau d'ajout (réseau public) | 266 | 266 | 228 | 266 | 210 |
| Mousse de PUR | 0 | 22.95 | 24.50 | 27.45 | 31.26 |
| Fraction volumique de mortier (%) | 100 | 49 | 46 | 39 | 31 |
| Fraction volumique de PUR (%) | 0 | 51 | 54 | 61 | 69 |
| E/C | 0.70 | 0.70 | 0.60 | 0.70 | 0.70 |
| Affaissement au mini-cône (mm) | 7 | 80 | 16 | 39 | 6 |
| Densité calculée du mortier | 2.271 | 0.954 | 0.918 | 0.674 | 0.541 |
| Densité réelle du mortier | 2.165 | 1.583 | 1.655 | 1.349 | 1.261 |

3.2. Programme expérimental

Le tableau 3 récapitule l'ensemble des caractéristiques mesurées sur les mortiers ainsi que les méthodes d'essais utilisées. Les résultats présentés dans l'article sont des valeurs moyennes calculées à partir des 3 essais de répétabilité réalisés.

Tableau 3. Programme expérimental

| <i>Propriétés mesurées</i> | <i>Méthodes d'essais</i> | <i>Nombre d'éprouvettes (par mortier) et échéances des mesures</i> |
|--|-------------------------------|--|
| Conductivité thermique et capacité calorifique | Poullain <i>et al.</i> , 2005 | 3 éprouvettes testées à 28 jours |
| Résistance en compression | Norme NF EN 196-1 | 3 éprouvettes testées à 2, 15 et 28 jours |
| Retrait et perte de masse | Norme NF P 18-427 | 3 éprouvettes testées entre 1 et 28 jours |

4. Résultats et analyse

4.1. Compressibilité de la mousse

La densité théorique des mortiers contenant la mousse de PUR est inférieure à la densité réelle, contrairement à ce qui se passe pour un béton courant ; la densité réelle est toujours plus faible à cause du volume d'air entraîné dans le béton. En fait, les granulats sont vraisemblablement comprimés dans le mortier, ce qui signifie que leur masse volumique effective est supérieure à celle utilisée pour la formulation. En négligeant l'air entraîné, nous pouvons l'estimer à partir des densités mesurées des mortiers. La masse volumique effective ainsi calculée est de 4.5 à 6 fois supérieure à celle mesurée sur la mousse « à l'air libre » (tableau 4). Le tableau 4 donne également les compositions corrigées prenant en compte cette valeur de masse volumique ; on note que la proportion volumique de mousse dans le mélange est beaucoup moins élevée que celle supposée initialement (tableau 4).

Tableau 4. Formulations corrigées des mortiers étudiés

| | <i>Référence</i> | <i>P1</i> | <i>P2</i> | <i>P3</i> | <i>P4</i> |
|--|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Constituants</i> | <i>Dosage en kg/m³</i> | | | | |
| Sable | 1625 | 469 | 518 | 0 | 0 |
| Ciment | 380 | 625 | 691 | 767 | 710 |
| Eau d'ajout | 266 | 438 | 414 | 537 | 497 |
| Mousse de PUR | 0 | 38 | 44 | 55 | 73 |
| Fraction volumique réelle de mortier (%) | 100 | 81.3 | 82.9 | 78.1 | 72.3 |
| Fraction volumique réelle de PUR (%) | 0 | 18.7 | 17.1 | 21.9 | 27.7 |
| Masse volumique réelle de PUR (kg/m ³) | - | 204 | 259 | 250 | 263 |

4.2. Propriétés thermiques des mortiers isolants

La conductivité thermique et la capacité calorifique des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 28 jours sont présentées à la figure 2. La méthode de mesure utilisée est celle du « film chauffant » (Poullain *et al.*, 2005 ; Poullain *et al.*, 2006).

A mesure que la proportion en mousse augmente, on constate une importante diminution de la conductivité thermique (λ) des mortiers et, comparativement, une faible variation de leur capacité calorifique (ρC_p). L'effet de l'incorporation de la mousse de PUR sur λ s'explique par les faibles conductivités thermiques de la mousse ($\lambda_{mousse\ PUR} = 0.03$ W/m K) et de l'eau ($\lambda_{eau} = 0.6$ W/m K) qui sature l'importante porosité du polyuréthane alvéolaire (Aide-mémoire du Thermicien, 1982). L'effet est moindre sur la capacité calorifique car la faible valeur de la

capacité calorifique de la mousse (estimée à $0.04 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$) est contrebalancée par la capacité calorifique très élevée de l'eau ($\rho C_{P \text{ eau}} = 4.18 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$) saturant la porosité des mortiers.

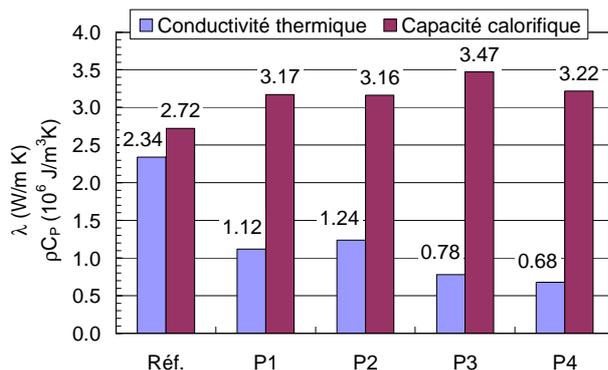


Figure 2. Propriétés thermiques des mortiers à 28 jours (éprouvettes saturées)

4.3. Résistance mécanique

L'évolution de la résistance en compression des éprouvettes de mortier est représentée à la figure 3. On note une forte diminution des propriétés mécaniques des mortiers lorsque le dosage en mousse de polyuréthane augmente. L'importante porosité de la mousse de PUR et ses faibles propriétés mécaniques sont autant de facteurs qui expliquent la faible résistance mécanique des mortiers isolants.

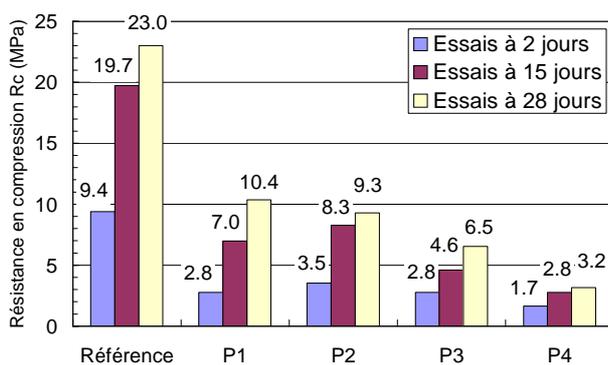


Figure 3. Résistance en compression des mortiers

4.4. Retrait et perte de masse

Placées dans une ambiance contrôlée à $20\pm 1^\circ\text{C}$ et $50\pm 5\%$ d'humidité relative, les éprouvettes subissent un séchage, mis en évidence par le suivi de leur masse (figure 4) et d'autant plus important que leur proportion en mousse de PUR est élevée. Sachant que le rapport E/C des compositions est supérieur à 0.60, il est légitime de supposer que le retrait présenté à la figure 4 trouve son origine principalement dans le séchage. L'effet de la mousse sur le retrait est aussi le résultat d'un effet sur la rigidité du mortier, inversement proportionnel au dosage de mousse dans le mélange.

On remarque que la mousse a également un effet sur la cinétique de la déformation. En effet, dans le cas des mélanges sans sable P3 et P4, la déformation mesurée lors de la première journée dans l'ambiance contrôlée est une dilatation. Deux hypothèses peuvent être formulées. Cet accroissement volumique résulte peut-être d'une dilatation de la mousse absorbant l'eau de gâchage. Il est cependant plus probable qu'elle soit d'origine thermique, car la quantité de ciment dans le mélange est élevée comme le montrent les formules corrigées du tableau 4.

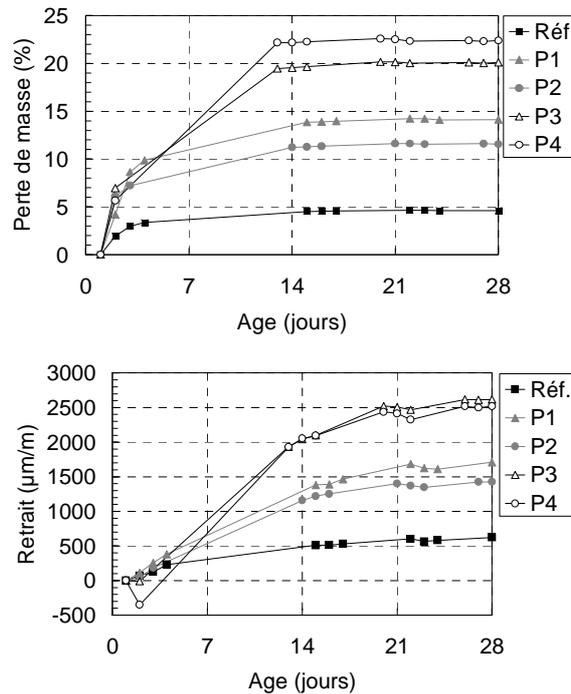


Figure 4. Perte de masse et retrait par dessiccation des mortiers en ambiance contrôlée ($T= 20\pm 1^\circ\text{C}$ et $HR= 50\pm 5\%$)

Précisons que toute conclusion sur les mesures de retrait de séchage doit être faite prudemment car la mesure englobe inévitablement une fissuration de peau de l'éprouvette due au gradient d'humidité entre le cœur et la peau de l'éprouvette (Turcry *et al.*, 2006). En outre, le retrait n'est qu'un des paramètres contrôlant le risque de fissuration par retrait ; la mesure du retrait doit notamment être complétée par la détermination des propriétés viscoélastiques.

5. Conclusions et perspectives

Cette étude montre qu'il est possible de fabriquer des mortiers isolants de consistance « plastique » avec des déchets de mousse de polyuréthane. On a ainsi obtenu une diminution d'un rapport de 2 à 3 de la conductivité thermique des mortiers isolants par rapport au mortier référence sans mousse.

La difficulté pour formuler de tels mortiers tient au fait que la masse volumique de la mousse de PUR est difficile à évaluer. Cette difficulté est due à la forte compressibilité de la mousse de polyuréthane (comparée aux constituants ordinaires d'un béton). En outre, les formulations préparées ont un dosage en ciment sans doute trop élevé d'un point de vue économique. Il sera donc intéressant de réaliser des essais supplémentaires pour optimiser ces mélanges. Par exemple, il est envisagé de réduire le volume de ciment au profit de celui du sable ou d'une addition.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier M. Léo Valon pour son aide dans la mise en œuvre des essais et le personnel technique de la division TGCE du LCPC pour la réalisation des mesures par granulométrie-laser.

6. Bibliographie

Aide-mémoire du thermicien, Paris, Editions Européennes Thermique et Industrie, 1982.

Poullain Ph., Mounanga P., Bastian G., Coué R., "Determination of the thermophysical properties of evolutive porous media: application to Civil Engineering materials", *European Physical Journal - Applied Physics*, vol. 33, 2006, p. 35-49.

Poullain Ph., Mounanga P., Bastian G., Khelidj A., « Propriétés de transfert thermique de pâtes de ciment durcissantes et de mortiers durcis - prise en compte du séchage », XXIIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Risque & Environnement, Grenoble, 26-27 mai 2005.

Turcry Ph., Loukili A., Rozière E., « Influence de la substitution du ciment par une addition sur le risque de fissuration des BAP - Discussion sur l'interprétation des mesures du retrait de séchage », *Congrès Transfert 2006*, Lille, 1-2 février 2006.