Vers l'optimisation des méthodes de moussage pour la production de mousses minérales

Phelipot-Mardelé Annabelle¹, Lanos Christophe²

¹LGCM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, Université de Rennes 1 <u>annabelle.phelipot@univ-rennes1.fr</u> ²LGCM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, Université de Rennes 1 <u>christophe.lanos@univ-rennes1.fr</u>

RÉSUMÉ. Une matrice minérale présentant une micro-structure très poreuse peut être obtenue en faisant mousser à l'état frais une suspension minérale. L'étude réalisée permet de montrer que, selon la nature du liant minéral, la méthode de moussage doit être adaptée. Deux liants hydrauliques sont étudiés : un ciment Portland et un liant gypseux. La suspension minérale est obtenue en mélangeant le liant et de l'eau en présence d'un tensio-actif et d'un fluidifiant. Le malaxeur utilisé correspond à un malaxeur de laboratoire. Trois méthodes de moussage sont comparées. Les paramètres techniques variables sont le temps et la vitesse de malaxage, le type d'outil utilisé (pâle ou fouet). Les paramètres de composition correspondent au type de tensio-actifs, son dosage et le rapport Eau/Liant. Les propriétés physiques et les propriétés d'usage (conductivité thermique et performances mécaniques) des mousses minérales ainsi générées sont exploitées pour interpréter les résultats. Il apparaît que les deux liants peuvent générer des mousses minérales aux propriétés intéressantes.

ABSTRACT. A mineral matrix with a very porous microstructure can be obtained by foaming a mineral suspension at fresh state. This study shows that, according to the nature of the mineral binder, the foaming method must be adjusted. Two hydraulic binders are studied: a Portland cement and a gypsum binder. The mineral suspension is obtained by mixing the binder and water with surfactant and plasticizer. The used mixer corresponds to a laboratory mixer. Three methods of foaming are compared. The variable technical parameters are the time and the speed of mixing, the type of tool used (pale or whip). The mix proportioning parameters correspond to the type of surfactant, its content and the water to binder ratio. The physical properties and the use properties (thermal conductivity and mechanical performances) of obtained mineral foams serve the results interpretation. It appears that the two binders can generate mineral foams with interesting properties.

MOTS-CLÉS: moussage direct, pré-moussage, densité, ciment, gypse, performances thermo-mécanique. KEY WORDS: Direct foaming, prefoaming, density, cement, gypsum, thermo-mechanical performances.

1. Introduction

Les matériaux de remplissage actuellement utilisés dans les applications bâtiments (béton cellulaire, brique monomur...) sont caractérisés par un bon compromis entre les performances thermiques et mécaniques, mais ces solutions constructives requièrent l'utilisation de constituants nobles, ou reposent sur des procédés de fabrication énergivores [NEV 11]. Ainsi, au vue des préoccupations environnementales actuelles, il apparaît nécessaire de développer un matériau peu impactant, offrant toujours un bon compromis entre performances thermiques et mécaniques, susceptible de se substituer aux solutions actuelles.

L'exploitation d'une micro structure très poreuse réalisée à partir d'une matrice minérale constitue une perspective pleine d'avenir pour le bâtiment [CAB 06], que ce soit d'un point de vue de la diminution de l'exploitation des ressources que peut engendrer une telle solution, que vis-à-vis des caractéristiques thermomécaniques [SAM 15 & 16] et de la résistance au feu que l'on peut obtenir.

Générer une telle structure poreuse à l'état durci est possible en faisant mousser une suspension minérale concentrée à l'état frais. L'étude proposée vise à montrer que la méthode de moussage utilisée doit être adaptée à chaque liant dans le but d'optimiser les performances des produits. Les formulations retenues dans le cadre de cette étude restent simples : le liant hydraulique est associé à de l'eau en présence d'un additif de type tensio-actif, et un fluidifiant si besoin. Deux liants hydrauliques commerciaux correspondant à deux familles courantes de liants sont étudiés : un liant cimentaire (de type ciment Portland) et un liant gypseux (hémi-hydrate). Les outils utilisés pour générer les mousses minérales sont des outils classiques de laboratoire : malaxeur de laboratoire (type Kitchen-Aid) équipé d'outils standards (pale ou fouet).

2. Production des mousses minérales

2.1 Méthodes de moussage

Trois méthodes de moussage sont exploitées : la « Prefoaming Method », la « Direct Foaming Method » et la « Mix then Foam method ». Dans tous les cas des malaxeurs de laboratoire de type Kitchen Aid (cuve de 5 l) sont utilisés pour générer des suspensions concentrées caractérisées par une forte teneur en air occlus, résultant du mélange du liant minéral, d'eau, de tensio-actifs et d'autres adjuvants. Les paramètres de production sont le temps et la vitesse de malaxage, le type d'outil utilisé (pale ou fouet). Différentes procédures de malaxage sont exploitées. Dans chaque cas les paramètres de formulation tels que le type de tensio-actif, son dosage et le rapport Eau/Liant sont également étudiés.

Prefoaming Method (PF): Cette méthode de moussage repose sur un mélangeage en trois étapes. Une suspension concentrée est produite en mélangeant le liant avec de l'eau, à l'aide d'un malaxeur, équipé d'une pale (vitesse lente). En parallèle, une mousse aqueuse composée d'eau et de tensio-actif est pré-formée à l'aide d'un second malaxeur équipé d'un fouet (vitesse rapide). La mousse aqueuse est ensuite introduite dans la pâte minérale pour former la mousse minérale (fouet, vitesse rapide). Cette technique est couramment utilisée dans la littérature [NAM 07] [YAN 15]. Les vitesses de malaxage pour la formation de la mousse aqueuse et la vitesse de mélangeage lors de l'incorporation de la mousse aqueuse dans la pâte minérale sont à ajuster. De même une pâte minérale trop peu fluide peut conduire à la destruction de la mousse aqueuse lors de leur mélange. Cette méthode de moussage conduit généralement à des teneurs en eau finales de la mousse minérale assez importantes.



Figure 1. Méthode de moussage DF – Evolution du volume de mousse aqueuse formé en fonction du temps de malaxage, pour différents dosages d en tensio-actif 1 et pour différentes quantités de fluide M dans le bol.

Direct Foaming Method (DF) : La méthode utilise un mélangeage en une seule étape, par malaxeur de type Kitchen Aid. Tous les composants sont mélangés ensemble pour obtenir une pâte minérale dans un malaxeur équipé d'un fouet (vitesse rapide). Le malaxage permet d'emprisonner des bulles d'air dans la suspension concentrée, modifiant de ce fait la rhéologie de l'ensemble et permettant à la mousse de se créer et de se stabiliser [BUY -] [JUS 09]. Le temps de malaxage nécessaire à la formation et à la stabilisation du volume de mousse minérale peut être assez long et est largement influencé par la vitesse de malaxage. Un calibrage de cette étape est nécessaire et le temps de malaxage peut être modifié par la quantité de matière présente dans le bol, les paramètres de formulation et la vitesse de malaxage (Figure 1). Cette méthode de moussage permet en général de former des mousses minérales avec des teneurs en eau assez basses, mais imposant des teneurs en tensio-actifs assez élevées.

Mix then Foam Method (MF) : La fabrication se fait par méthode dissociée [SAM 15]. Le mélangeage de la pâte se fait dans un premier temps avec un malaxeur équipé d'une pale (vitesse lente) puis la pâte subit un procédé de moussage propre au laboratoire GCGM de Rennes à faible taux de déformation. La méthode permet facilement d'ajuster la masse volumique du produit final sans devoir réviser sa composition. Elle permet, de plus, la fabrication à température ambiante et sans aucun dégagement de CO₂, H₂ ou O₂, contrairement aux méthodes de moussage par dégazage chimique utilisées pour le béton cellulaire classique [FEB -]. La méthode dissociée permet de produire des mousses minérales sur une large gamme de masses volumiques à partir d'une même composition de pâte.

2.2 Mousses de ciment (P)

Le ciment (noté P) utilisé est un ciment formulé à prise et durcissement rapides (Schretter & Cie®). Il associe principalement un ciment Portland, obtenu à partir d'un clinker spécial, à des adjuvants de type rétenteur d'eau. La masse volumique réelle de ce ciment est de 2,84 g/cm³. Le temps de prise est de 25 minutes, pour un rapport pondéral eau/liant (E/L) de 0,355 (à consistance normalisée) et de une heure pour E/L = 0,38.

Les mousses minérales réalisées avec ce liant sont obtenues en couplant le ciment à de l'eau, et en utilisant les méthodes de moussage DF et MF. Trois molécules tensioactives (notées 1 à 3) de structures différentes sont testées: Tensio-actif 1: 90% de sodium α -olefin sulfonate-AOS

Tensio-actif 2: Sodium Alkyl Ethoxy Sulphate

Tensio-actif 3: Trimethyl tetradecyl ammonium bromide

Les objectifs de formulation correspondent à l'obtention d'une mousse minérale de masse volumique durcie voisine de 500 kg/m³. Quelle que soit la méthode de moussage, l'ajout d'un fluidifiant (noté F) a permis d'ajuster la rhéologie du mélange : masterCast 205 MA, BASF. La Figure 2 présente l'évolution du dosage en fluidifiant F garantissant une rhéologie identique à la pâte fraîche en fonction du rapport E/L.

Dans le cas de la méthode DF, les formulations présentent deux paramètres libres : le rapport E/L et le dosage en tensio-actif. Pour chaque valeur de E/L, le dosage en tensio-actif permettant d'obtenir la masse volumique cible est recherché. La Figure 2 permet d'analyser l'évolution du dosage en fluidifiant permettant d'assurer une rhéologie constante (essai d'étalement à l'anneau) ainsi que l'évolution de la teneur en tensio-actif permettant de garantir la masse volumique cible de la mousse minérale. On constate que les différents tensio-actifs sont caractérisés par des réponses différentes, parfois opposées. Un rapport E/L permet de limiter le dosage du tensioactif 2 alors qui induit un dosage très élevé du tensio-actif 1. Un dosage en eau optimum apparaît pour le tensioactif 3.



Figure 2. Relation entre le dosage d en tensio-actif et le rapport E/L pour garantir une masse volumique de mousse P durcie identique. Jaune : Relation entre le dosage d en fluidifiant F et le rapport E/L nécessaire pour garantir une rhéologie identique à l'état frais des mousses P.

Dans le cas de la méthode MF, les dosages en tensio-actifs sont généralement faibles [SAM 15]. Cette méthode permet d'exploiter des pâtes dont le rapport E/L est bas. Le choix s'est porté sur E/L = 0,38 pour obtenir une matrice solide la plus compacte possible et réduire les temps de prise. Le dosage en fluidifiant a été calé à 0,2 % pour garantir la rhéologie à l'état frais (voir Figure 2). Les dosages en tensio-actif suivants sont identifiés pour chacun des tensio-actifs afin de d'obtenir la même masse volumique durcie des mousses : tensio-actif 1 - 0,025%, tensio-actif 2 - 0,1%, tensio-actif 3 - 0,05%. Ces dosages sont largement inférieurs à ceux nécessaires pour la méthode DF. Le tensio-actif 1 semble particulièrement adapté à la méthode MF, son dosage étant pratiquement divisé par 10 (3,5 et 4 respectivement pour les deux autres).

2.3 Mousses de gypse (G)

Le liant gypseux (noté G) utilisé est un plâtre commercial (Molda 3 Normal, Placo-St Gobain). Ce plâtre à mouler est produit à partir d'un gypse naturel (hemi-hydrate 91 %, CaCO₃ 9 %). Le début de prise intervient à 17 minutes pour un rapport E/L = 0.645.

Les mousses minérales réalisées avec ce liant sont obtenues en couplant le plâtre à de l'eau et en utilisant la méthode PF. Deux tensio-actifs (notés A et B) particulièrement performants pour former des mousses aqueuses sont exploités pour formuler les mousses minérales. Ils sont principalement composés d'un tensio-actif SLES (Sodium Laureth Sulfate) d'origine végétale. Dans un premier temps, les mousses aqueuses (eau + tensio-actif) ont été étudiées de façon à identifier un dosage minimum en tensio-actif permettant d'assurer leur stabilité. Ce dosage est ensuite maintenu constant pour générer systématiquement la même mousse aqueuse. Les mousses minérales ont été produites en couplant une masse donnée de pâte (mélange d'eau et de plâtre) à une masse donnée de mousse aqueuse ajoutée. Les paramètres de formulation sont le rapport E/L de la pâte et la quantité de mousse aqueuse ajoutée. Les formulations étudiées correspondent à des ajouts de mousse aqueuse différents dans une pâte de rapport E/L fixé à 0,6 (valeur basse permettant de garantir une homogénéité satisfaisante du mélange). En conséquence, les mousses minérales obtenues ne présentent pas le même rapport E/L (valeurs comprises entre 0,62 et 0,75) et sont caractérisées par des dosages en tensio-actif systématiquement différents (entre 0,004 % et 0,018 % de la masse de liant).

Les données bibliographiques [SAM 15] correspondant à l'étude de mousses de gypse, notées G', produites avec un mélange de 90 % de sulfate de calcium anhydre (Kerysten K&Co®) et 10 % de ciment Lafarge Le Theil (CEM I 52,5 N) couplé avec différents tensio-actifs selon les méthodes de moussage PF, DF et MF (E/L = 0,35) serviront de référence.

2.4 Réalisation des échantillons

Les différentes mousses produites (cf. Tableau 1) sont moulées à l'état frais dans des moules cylindriques (diamètre 80 mm). Le démoulage est généralement réalisé à une heure. Les échantillons P sont ensuite conservés en salle humide pendant 28 jours puis stabilisés à 20 °C et 50 % HR. Les échantillons G sont conservés à 20 °C et 50 % HR. Les échantillons sont ensuite sciés pour produire les éprouvettes cylindriques d'élancement 1 destinées aux différentes mesures et analyses. Les surfaces des échantillons sont poncées de façon à assurer leur planéité.

3. Caractérisation des mousses minérales

3.1 Méthodes de caractérisation

Les paramètres exploités pour interpréter les résultats des essais de moussage sont des mesures de masse volumique apparente de la pâte, de la mousse liquide (eau + tensio-actif), de la mousse minérale durcie, mais également des propriétés d'usage : conductivité thermique et résistance mécanique à la compression.

La caractérisation thermique se base sur la mesure de conductivité thermique à 20 °C, 50 %HR. Les mesures sont réalisées en régime transitoire avec une sonde fil de 50 mm. La sonde est placée entre deux éprouvettes planes. La conductivité thermique est évaluée par ajustement du modèle de transfert thermique sur l'enregistrement de l'élévation de température en fonction du temps. La puissance et le temps de chauffage sont ajustés de telle sorte qu'on obtienne une élévation de température suffisante (> 10 °C) et un coefficient de corrélation (R²) élevé. La précision de la mesure est de 5 %.

La caractérisation mécanique repose sur l'estimation du module élastique des mousses à partir de la mesure de la vitesse acoustique et sur l'estimation de la résistance mécanique à la compression. La mesure de vitesse acoustique est réalisée avec un appareil Pundit Lab plus, équipé d'un transducteur 54 kHz. Les essais de compression sont réalisés avec une presse universelle Instron d'une capacité de 450 kN. Les essais sont réalisés en imposant une vitesse de compression de 10 mm/minute. L'enregistrement de l'effort de compression est poursuivi jusqu'à une déformation de près de 20 %. La Figure 3 permet de constater, en présence de mousses P-2 (ciment P, tensio-actif 2) réalisées avec la méthode de moussage DF, que la modification du dosage E/L affecte considérablement la forme des courbes, sans trop modifier qualitativement la structure poreuse (voir les photos

présentées au bas de la Figure 3). Le pic de résistance apparaît plus marqué pour la valeur intermédiaire de E/L = 0,40. Il convient de rappeler que le dosage en tensio-actif évolue conjointement à E/L. On constate que ces mousses sont caractérisées par un comportement post-pic très marqué correspondant à un effondrement progressif de la structure poreuse. Une localisation des déformations durant l'essai de compression est visible, en particulier pour les mousses les moins denses.

La Figure 4 correspond aux résultats des essais de compression obtenus sur des mousses G-A (gypse G, tensio-actif A). La répétabilité de la mesure est assez satisfaisante (courbes superposées). Le pic de résistance apparaît plus marqué pour les mousses les plus denses (E/L = 0,62). La structure des mousses G-A permet de constater que les bulles restent fines, même pour les masses volumiques faibles. L'évolution de la masse volumique de ces mousses est plus à relier à la quantité de bulles qu'à leur taille.



Figure 3. Exemple de résultats d'essais de compression réalisés sur des mousses P-2, masse volumique voisine de 500 kg/m³, obtenues avec la méthode de moussage DF. Le dosage en tensio-actif évolue en fonction de E/L. Visualisation de la structure des mousses P-2 (coté du cliché = 21,5 mm).



Figure 4. Exemple de résultats d'essais de compression réalisés sur des mousses G-A, obtenues avec la méthode de moussage PF, pour différents ajouts de mousse aqueuse dans une même pâte. Le dosage en tensioactif évolue en fonction de E/L. Visualisation de la structure des mousses G-A (coté du cliché = 21,5 mm).

3.2 Caractérisation thermique

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des différentes mousses minérales réalisées est présentée Figure 5. Les résultats obtenus sur les deux types de matrices minérales (P et G) avec les différentes méthodes de moussage peuvent être comparés (cf ; Tableau 1).

Les points caractéristiques des mousses DF-P correspondent aux valeurs de conductivité thermique les plus basses. Pour des masses volumiques similaires, les mousses MF-P sont légèrement plus conductrices que les mousses DF-P. Ceci est directement lié au fait que le squelette solide des mousses DF est moins compact que celui des mousses MF, la matrice des mousses MF-P étant générée à partir d'une pâte de rapport E/L = 0,38 alors que les mousses DF-P sont obtenues avec des pâtes dont E/L varie de 0,38 à 0,485.

Les points caractéristiques des mousses PF-G sont groupés sur une même courbe de tendance. La matrice solide des mousses PF-G est légèrement plus conductrice que celle mesurée sur les mousses DF-P et équivalente à celle mesurée sur MF-P. Ces résultats peuvent être comparés à ceux de [SAM 15] obtenus sur la matrice G' avec la méthode MF. Curieusement la conductivité thermique mesurée sur les mousses PF-G' sont les plus élevées des séries alors que ces mousses sont produites avec E/L = 0,55.



Figure 5. Conductivité thermique des mousses minérales en fonction de la masse volumique pour les différentes méthodes de moussage utilisées PF, DF, MF et les deux types de liants P et G. Les résultats de [SAM 15] obtenus sur G' sont également indiqués.

3.3 Caractérisation mécanique

L'évolution de la résistance mécanique en compression Rc des différentes mousses minérales réalisées est présentée Figure 6 en fonction de la masse volumique durcie (Rc = pic des courbes présentées sur les Figures 3 et 4). Les résultats obtenus sur les deux types de matrices minérales (P et G) avec les différentes méthodes de moussage peuvent être comparés (cf. Tableau 1).

Les points caractéristiques des mousses DF-P sont groupés sur une même tendance alors que ces points correspondent à des dosages variables en tensio-actif. Il semble donc que la masse volumique soit le paramètre influent majeur vis-à-vis des résistances devant le dosage en tensio-actif. Le changement de tensio-actif (de 1 à 3) affecte cependant les résistances. La nature du tensio-actif conditionne probablement la cristallisation des hydrates comme évoqué par [SAM 15].

Pour une masse volumique ciblée autour de 500 kg/m³, les valeurs de Rc mesurées sur les mousses P obtenues avec la méthode de moussage MF sont bien supérieures à celles obtenus avec la méthode DF (rapport de 4). Un tel écart est justifié par deux éléments importants. D'une part la matrice des mousses MF-P est générée à partir d'une pâte de rapport E/L = 0,38 alors que les mousses DF-P sont obtenues avec des pâtes dont E/L varie de 0,38 à 0,485. Il est logique de constater qu'un squelette plus compact des mousses minérales conduise à des résistances plus importantes à masse volumique identique. Par ailleurs, les dosages en tensio-actifs sont largement réduits avec la méthode MF. La cristallisation des hydrates de ciment est donc probablement largement moins affectée par les tensio-actifs.

Les points caractéristiques des mousses PF-G sont groupés eux aussi sur une même courbe de tendance. Le tensio-actif A permet d'obtenir, dans les mêmes conditions de fabrication, des mousses légèrement moins denses. Ce tensio-actif, plus efficace pour former une mousse aqueuse, est également celui qui permet une meilleure stabilité de la mousse aqueuse lors de son incorporation dans la pâte. Ces résultats peuvent être comparés à ceux de [SAM 15] obtenus sur la matrice G' avec différentes méthodes de moussage. Pour un taux de gâchage de E/L = 0,35, la méthode DF n'est pas adaptée pour réaliser des mousses minérales de faibles masses volumiques

(pâte trop ferme et conditions de malaxage inadaptées). La méthode PF a été mise en œuvre sur G' avec E/L = 0,55. La courbe de tendance tracée sur la Figure 6 s'avère assez voisine des valeurs obtenues sur les mousses PF-G (E/L variant de 0,62 à 0,75). Les mousses MF-G' (E/L = 0,35) s'avèrent les plus performantes, certainement en raison d'un squelette solide des plus compact pour ces mousses. Le module élastique calculé à partir des vitesses acoustiques mesurées sur les mousses minérales s'avère globalement bien corrélé aux résistances mécaniques, comme il est fréquent de le constater dans le cas des matrices minérales.



Figure 6. Résistance en compression des mousses minérales en fonction de la masse volumique pour les différentes méthodes de moussage utilisées PF, DF, MF et les deux types de liants P et G. Les résultats de [SAM 15] obtenus sur G' sont également indiqués.



Figure 7. Module élastique en fonction de la résistance en compression des mousses minérales, pour les différentes méthodes de moussage utilisées PF, DF, MF et les deux types de liants P et G.

4. Conclusion

La comparaison des trois méthodes de moussage étudiées sur deux types de matrices minérales permet de dégager différentes conclusions :

Les trois méthodes de moussage permettent, par ajustement des compositions (dosage en tensio-actif et taux de gâchage E/L) de générer des mousses dans la gamme de masse volumique ciblée : > 450 kg/m³ pour le liant P et > 250 kg/m³ pour le liant G). Les dosages en tensio-actif sont globalement plus importants pour la méthode DF que pour les autres.

La conductivité thermique et la résistance mécanique des mousses minérales apparaissent directement affectées par la méthode de moussage utilisée. En fait, ces performances sont conditionnées par la compacité du squelette solide de la mousse (conséquence directe du taux de gâchage E/L minimum permis par la méthode de moussage utilisée) mais aussi par le dosage en tensio-actif qui perturbe vraisemblablement la cristallisation des hydrates. La connectivité au sein de la matrice solide en est affectée ce qui est favorable à la conductivité thermique (renforcement du caractère isolant) mais pénalise fortement les performances mécaniques.

Identifier la méthode de production d'une mousse minérale satisfaisant différents critères de performance relève ainsi d'une optimisation multiparamétrique et il n'y a visiblement pas unicité de la solution. Les résultats

obtenus ne permettent pas de montrer que des tensio-actifs sont plus adaptés à l'une ou l'autre des méthodes de moussage.

5. Bibliographie

- [BUY -] Buyn K., Song H., Sark S., Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent, Department of civil engineering, Seoul, n.d.
- [CAB 06] Cabrillac, R., Fiorio B., Beaucour A., Dumontet H., Ortola S., Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity, *Construction and building materials*, vol. 20, 2006, p. 286-95.
- [FEB -] Febecel.be, Le béton cellulaire: Matériau d'avenir. Belgique, n.d.
- [JUS 09] Just A., Middendorf B., Microstructure of high-strength foam concrete, *Material Characterisation*, vol. 60, 2009, p. 741–8.
- [NAM 07] Nambiar E.K.K., Ramamurthy K., Air-void characterisation of foam concrete, *Cement and concrete research*, vol. 37, 2007, p. 221–30.
- [NEV 11] Neville A.M., Properties of concrete, Edition: 5, Harlow, England, New York, Prentice Hall, 2011.
- [OTH 10] Othuman Mydin M.A., Lightweight foamed concrete (LFC) thermal and mechanical properties at elevated temperatures and its application to composite walling system, Thèse de doctorat, 2010, Manchester university.
- [SAM 15] Samson G, Synthèse et Propriétés des mousses minérales, thèse de doctorat, 2015, INSA de Rennes, France.
- [SAM 16] Samson G, Phelipot-Mardelé A., Lanos C., Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant, EJECE, DOI : 10.1080/19648189.2016.1177601
- [YAN 15] Yang K.-H., Lee K.-H., Tests on high-performance aerated concrete with a lower density, *Construction and building materials*, vol. 74, 2015, p. 109–17.

référence	% massique tensioactif	Eau/Liant	ρ , kg/m ³	Rc, MPa	E, MPa	λ, W/(m.K)
MF-P-1	0.1	0.380	445.00	0.88		0.142
	0.1	0.380	442.00	0.94		0.142
MF-P-2	0.025	0.380	418.00			0.128
	0.025	0.380	425.00	0.89		0.125
	0.025	0.380		0.53		
MF-P-3	0.05	0.380	440.00	0.70		0.138
	0.05	0.380	427.00	0.67		0.129
DF-P-1	0.35	0.38	385.15			0.096
	0.32	0.4	470.06	0.16		0.114
	0.29	0.42	495.13	0.30	372.95	0.123
	0.26	0.44	525.08	0.50	347.66	0.135
	0.22	0.485	510.00	0.23	174.90	0.120
DF-P-2	0.22	0.38	535.22	0.24	268.23	0.108
	0.23	0.42	493.01	0.18	125.73	0.109
	0.26	0.44	819.52	2.30	2089.97	0.225
	0.4	0.485	755.13	1.13	1750.92	0.186
DF-P-3	0.2	0.28	451.48	0.10	172.05	0.101
	0.2	0.38	438.74		204.92	0.101
	0.16	0.4	667.75	0.22	308.34	0.121
	0.15	0.42	494.72	0.25	214.98	0.104
	0.17	0.44	499.34	0.39	306.67	0.111
	0.19	0.485	470.01	0.20	242.54	0.107
PF-G-A	0.0179	0.70	350.36	0.46	650.98	0.107
	0.0179	0.70	350.36	0.48	669.88	
	0.0107	0.66	552.52	1.35	1687.02	0.175
	0.0071	0.64	661.97	2.19	2555.07	0.216
	0.0036	0.62			5045.18	
	0.0268	0.75	266.87	0.22	395.90	0.086
	0.0268	0.75	266.87		381.01	
	0.0036	0.72			2663.03	
	0.0071	0.74			1717.46	
	0.0107	0.76			1094.14	
	0.0036	0.82			2301.71	
	0.0071	0.84			1110.33	0.136
PF-G-B	0.0018	0.62	995.33		6193.31	0.371
	0.0035	0.64	893.07	4.64	4262.44	0.295
	0.0053	0.66	665.83	2.36	2443.33	0.204
	0.0089	0.70	470.33	0.97	1233.60	0.156
	0.0133	0.75	365.07	0.57	768.80	0.116

Tableau 1. Composition des mousses minérales présentées dans cet article et résultats obtenus