

# Mousses minérales : Développement et Propriétés d'usage

Nourhan Mortada<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ Rennes, LGCGM, 3 rue du Clos Courtel, BP 90422, 35704 Rennes, France.

**RESUME** Les mousses minérales constituent une alternative intéressante pour obtenir des produits constructifs allégés et isolants. Cinq tensioactifs (synthétiques et protéiniques) sont sélectionnés pour ce travail de thèse. Leur capacité à réduire la tension de surface et à produire des mousses aqueuses stables a été évaluée. Une classification des tensioactifs est proposée afin de comparer leur pouvoir moussant et leur stabilité. Les mousses minérales sont produites à base de gypse par moussage direct ou par pré-moussage en faisant varier le temps de malaxage, le type de tensioactif, le dosage et le taux de gâchage. Une modélisation considérant une mousse minérale comme un mélange d'une mousse aqueuse et d'une suspension concentrée est proposée. Elle permet d'interpréter les pertes de stabilité constatées ainsi que les réponses rhéologiques des mousses à l'état frais. Ces mousses sont caractérisées à l'état durci en distinguant les contributions des porosités associées aux bulles et à la matrice. Les performances thermiques, mécaniques, hygriques et les perméabilités à l'air et à la vapeur d'eau des mousses sont évaluées. Les interactions entre la formulation, les conditions de moussage et les propriétés d'usage des mousses sont discutées. Les différents résultats obtenus permettent d'identifier les meilleurs compromis de production au regard de performances ciblées.

**Mots-clefs** Mousse minérale, tensioactifs, Performances thermomécaniques et hygriques.

## I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est responsable de plus de 40% de la consommation énergétique mondiale (Huovila et al., 2009). Les pertes d'énergie à travers les murs des bâtiments restent la principale cause de cette forte consommation d'énergie (Dussud et al., 2009). Dans le cadre d'une réduction de l'impact environnemental, la France s'engage à diminuer la consommation énergétique du secteur du bâtiment et lutter contre le changement climatique par le biais de plusieurs réglementations : Négawatt, HQE, RT 2012 et RE 2020. Le secteur du bâtiment est également responsable de 33% des émissions mondiales de gaz à effet de serre chaque année (UNEP, 2015). Une réduction d'au moins 40% est donc recherchée d'ici 2030 et de 80 à 95% d'ici 2050, ce qui conduirait à une neutralité carbone par rapport à 1990 (Pachauri et al., 2014). Le secteur du bâtiment doit optimiser les performances énergétiques de ses constructions et mettre en avant de nouveaux matériaux. Dans cette perspective, l'innovation en termes de matériaux isolants et autoporteurs constitue un enjeu important. La recherche actuelle porte notamment sur les composites biosourcés et sur le béton léger. Ces matériaux présentent en effet un double intérêt quant aux performances d'isolation thermique et leur faible émission de carbone, tout en limitant le recours à des ressources minérales naturelles telles que les granulats.

Cette étude se concentre sur les mousses de gypse produites par moussage mécanique, direct et prémoussage, suite à l'ajout d'un agent moussant afin de créer et de piéger les bulles d'air dans la matrice. Une résistance à la compression acceptable ( $R_c > 1$  MPa), une conductivité thermique suffisamment faible ( $\lambda < 0.2$  W/(m.K)) et une capacité acceptable à réguler les variations d'humidité ( $MBV > 0,5$  g/(m<sup>2</sup>%RH)) sont les propriétés recherchées. L'objectif est de trouver un compromis entre les propriétés structurelles du matériau, ses propriétés thermohygriques et ses performances mécaniques. Des mousses de gypse sont donc produites en faisant varier différents paramètres : teneur en eau, temps de mélange et teneur en tensioactifs. Les masses volumiques durcies obtenues sont comprises entre 300 et 750 kg/m<sup>3</sup>. La conductivité thermique, la résistance à la compression, la valeur tampon de l'humidité (MBV), le module acoustique et la perméabilité intrinsèque sont mesurés et confrontés aux valeurs ciblées. Enfin, le lien entre les porosités des mousses et les performances est mis en évidence, conduisant à la sélection des meilleures formulations et des conditions de moussage appropriées.

## II. METHODES ET MATERIELS

Le liant sélectionné pour la production de mousses est un plâtre commercial (Molda® 3 Normal - St Gobain). Ce plâtre est un semi-hydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) produit à partir de gypse naturel de haute pureté. Sa masse volumique réelle est de 2600 kg/m<sup>3</sup> mesurée avec la méthode du pycnomètre Le Chatelier. La masse volumique réelle du gypse, obtenue après hydratation, est de 2320 kg/m<sup>3</sup>, mesurée avec un pycnomètre à gaz UltraPyc® 1200e. Le tensioactif Hostapur OSB® (Clariant) est choisi comme tensioactif de référence. Deux agents moussants à base de protéines sont utilisés : une protéine de blanc d'œuf (AlbuWhip - SOSA) et une protéine commerciale Eabassoc® (EAB Associates). Plus de 50 formulations de mousses de gypse ont été produites (100 échantillons moulés), en variant le rapport eau/liant de 0,6 à 0,8 et la teneur en tensioactif. Le temps de malaxage varie de 2 à 20 minutes, permettant d'avoir une diversité de masse volumique apparente et de structure porale associée. En raison du temps de prise rapide du plâtre (20 minutes), un retardateur de prise (retardan P® - Sika) est ajouté à la formulation (0,01% de la masse de liant) pour les temps de malaxage longs.

Les échantillons produits avec l'Hostapur OSB sont formulés avec une teneur en tensioactif égale à sa concentration micellaire critique (CMC), soit 0.08w% de l'eau, et également à CMC/2, CMC/4 et CMC/8 (Mortada et al., 2021a). Ces mousses sont obtenues par moussage direct : tous les composants sont mélangés afin d'obtenir une mousse minérale homogène avec un malaxeur (Heavy Duty - Kitchen Aid®) équipé d'un fouet. La vitesse de mélange correspond à 300 rpm. Les protéines étant des agents moussants qui n'ont pas de CMC, les mousses de gypse Eabassoc sont produites, par moussage direct, avec différentes teneurs en protéines : 1, 0,5, 0,25, 0,125 et 0,0625w% de l'eau. Pour les mousses de gypse albumine, une méthode de pré-moussage est nécessaire. Une mousse aqueuse est formée séparément de la pâte de gypse, la poudre d'albumine étant préalablement dissoute dans l'eau. La pâte est ensuite incorporée à la mousse aqueuse. Le mélange se poursuit pour former une mousse de gypse homogène, à 200 rpm. La teneur en albumine est égale à 1, 2 et 5w% de l'eau totale. D'autres mousses de gypse à base d'albumine (AB/OSB) ont été obtenues en utilisant la méthode de moussage direct en introduisant dans les formulations une teneur en Hostapur OSB égale à la CMC ou 0,75CMC.

L'identification des masses volumiques des mousses à l'état en frais et durci permet d'estimer pour chaque formulation la porosité de la matrice solide  $p_M$  (liée au rapport eau/liant) et la porosité induite par le moussage (air piégé à l'occasion du malaxage)  $p_{MA}$ . La somme des deux porosités conduit à la porosité totale de la mousse minérale à l'état durci  $p_T$ .

La conductivité thermique des échantillons a été mesurée à l'état sec (23°C, point sec) et dans des conditions ambiantes (23°C, 50%HR) en utilisant une méthode de caractérisation en régime transitoire à l'aide de l'appareil commercial CT-mètre® équipé d'un fil chaud de 5 cm d'une résistance de 5,68  $\Omega$ . La conductivité thermique est évaluée en analysant l'augmentation de la température  $\Delta T$  en fonction du temps de chauffage. Le flux de chaleur et le temps de chauffage sont choisis pour obtenir une augmentation de température suffisante, entre 10°C et 20°C, et un coefficient de corrélation élevé entre les données expérimentales et la courbe d'ajustement. La puissance imposée lors des différentes mesures varie entre 0,147 W et 0,478 W, en fonction de la masse volumique apparente de la mousse. Le temps de chauffage est de 120 s pour toutes les mesures. La valeur de conductivité thermique est la moyenne de six mesures, avec un coefficient de variation inférieur à 5 %.

La caractérisation du comportement mécanique est réalisée avec une presse Instron® d'une capacité de 400 kN. Les échantillons testés sont placés entre deux plateaux métalliques. La presse est contrôlée en imposant une vitesse de déplacement au plateau supérieur. Le protocole d'essai intègre des cycles de charge et de décharge. La contrainte de compression est calculée en rapportant la charge appliquée à la surface de l'échantillon cylindrique. La déformation est calculée en référence à la hauteur initiale de l'échantillon et en tenant compte de la déformation du bâti. Il est ainsi possible de tracer les courbes de déformation-contrainte et de déterminer la résistance à la compression  $R_c$  et d'évaluer un module mécanique élastique  $E_{m\acute{e}c}$ . Le module mécanique est identifié sur la branche descendante remarquablement linéaire du cycle de décharge précédant le pic de contrainte ( $R_c$ ).

La performance mécanique des mousses minérales peut aussi être analysée à partir de la mesure du temps de propagation des ultrasons dans l'échantillon. L'appareil utilisé est un Pundit®, composé de deux détecteurs piézoélectriques reliés à un boîtier d'alimentation donnant le temps de propagation des ondes. La mesure est effectuée sur les échantillons cylindriques de longueur 80 mm. La valeur obtenue est la moyenne de six mesures avec un coefficient de variation inférieure à 0,5%. La fréquence des ultrasons transmise est de 54 kHz et le coefficient de poisson  $\nu$  est fixé à 0,33 dans le cas du gypse étudié dans la littérature (Auvray et al., 2003).

La caractérisation hygrique des mousses réalisées est basée sur la mesure de la valeur tampon hygrique (MBV). Elle représente la capacité d'un matériau à réguler les variations d'humidité relative de l'air environnant le matériau. Cette aptitude sert la régulation passive de l'humidité à l'intérieur des bâtiments. (Rode et al., 2005) ont introduit le concept de la valeur tampon hygrique dans le projet NORDTEST. Plusieurs matériaux ont été testés afin de définir un classement selon la valeur MBV. La valeur tampon hygrique est une mesure directe de la quantité d'humidité absorbée et relarguée par un matériau hygroscopique quand il est exposé à des cycles quotidiens de 8 h d'humidité élevée de 75% HR, suivies de 16 h d'humidité basse de 33% HR, à température constante de 23°C. La valeur MBV est ainsi calculée selon l'Eq ( ) :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A \cdot (HR_{\text{haut}} - HR_{\text{bas}})} \quad \text{Eq (1)}$$

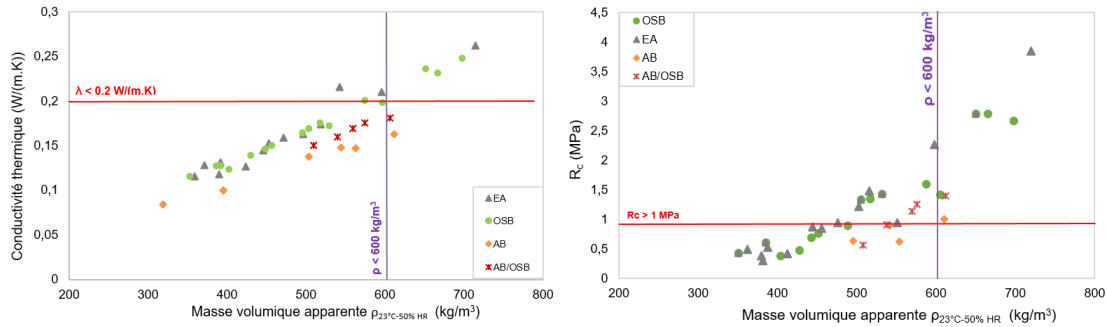
Avec MBV la valeur tampon hygrique ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ ),  $\Delta m$  la variation de masse (g) représentant l'absorption/désorption de l'humidité pendant les cycles, A la surface exposée ( $\text{m}^2$ ),  $\text{HR}_{\text{haut/bas}}$  : le niveau de l'humidité relative haut (ou bas). Les échantillons ont été scellés avec du papier aluminium pour étanchéifier le fond et les côtés, afin de garantir un échange de vapeur unidirectionnel sur la surface supérieure. Les échantillons initialement secs sont placés dans une chambre climatique Vötsch® VC4060 et stabilisés à 23°C et 50% HR puis soumis aux cycles de variation d'humidité relative. La température et l'humidité dans la chambre climatique sont mesurées durant l'essai avec des capteurs Sensirion SHT75. Selon les résultats du projet NORDTEST, la valeur MBV du gypse à 1100  $\text{kg}/\text{m}^3$  est de l'ordre de 0,5  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ .

La perméabilité à l'air des mousses de gypse est déterminée à l'état sec (en étuve à 40°C jusqu'à stabilisation de la masse). Le débit d'air a été mesuré à 23°C avec un compte-bulles E0651 placé en amont de l'échantillon. La mesure du débit consiste à évaluer le temps mis par une bulle de savon à remonter le long d'un tube capillaire calibré. L'échantillon cylindrique à tester est placé entre deux embases métalliques percées. Entre les embases et l'échantillon des feutres très perméables sont interposés pour répartir le flux d'air sur toute la surface de l'échantillon. Le tout est confiné par une membrane caoutchouc (comme pour un essai triaxial). L'embase amont est reliée au compte-bulles. L'embase aval est connectée à une chambre équipée d'un régulateur de pression VC521 ILMVAC. Le montage est visible sur la Fig.5 (gauche). La pression atmosphérique correspond à la pression amont,  $P_1$ . La pression de la chambre est la pression aval,  $P_2$ . La perméabilité intrinsèque est identifiée à partir du gradient de pression (Dranchuk et Kolada., 1968).

## II. RESULTATS

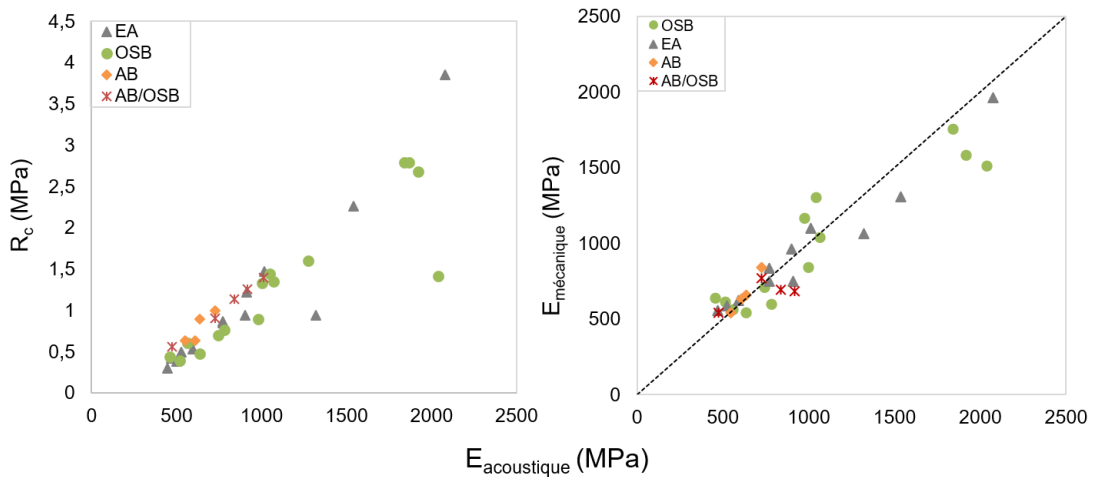
Comme le montre la Fig. 1 (gauche), la conductivité thermique est une fonction linéaire croissante de la masse volumique apparente des mousses durcies étudiées en conditions ambiantes. Les objectifs en termes de masse volumique ( $< 600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) et de conductivité thermique ( $< 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) sont atteints pour la plupart des mousses produites. Les courbes des mousses OSB et EA sont quasiment superposées. Le fait d'identifier une tendance unique alors que certains points correspondent à différents rapports Eau/Liant, ou différents dosages en tensioactif, signifie que la porosité de la matrice et la porosité induite par le malaxage ont le même rôle vis-à-vis de la conductivité thermique. La conductivité thermique est donc essentiellement affectée par la porosité totale de la mousse. Les mousses AB et AB/OSB présentent des conductivités thermiques légèrement inférieures aux mousses OSB et EA. Une altération de la structure minérale du gypse constatée par visualisation MEB explique probablement ce résultat.

Les performances mécaniques des mousses étudiées sont présentées dans la Fig. 1 (droite). Les résistances en compression des mousses de gypse sont comprises entre 0,28 et 4 MPa. La résistance en compression est une fonction croissante de la masse volumique apparente et donc une fonction décroissante de la porosité totale. Pour une masse volumique choisie, les mousses OSB et EA qui sont caractérisées par des microstructures assez semblables présentent le même comportement, comme observé vis-à-vis de la conductivité thermique. Les mousses AB et AB/OSB présentant une conductivité thermique plus basse, s'avèrent cependant moins performantes mécaniquement, l'albumine affectant la cristallisation. Seules quelques mousses présentant des masses volumiques inférieures à 600  $\text{kg}/\text{m}^3$  satisfont l'objectif visé ( $R_c > 1 \text{ MPa}$ ).



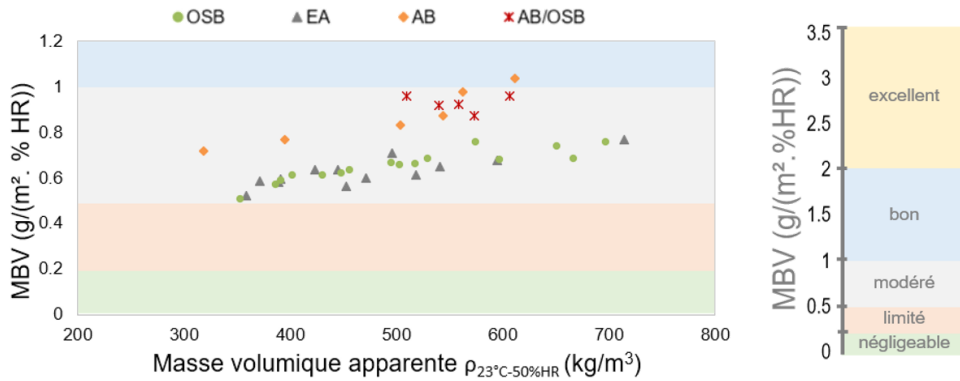
**FIGURE 1. Conductivités thermiques (gauche) et Résistances en compression (droite) des mousses de gypse en fonction de la masse volumique apparente.**

Les modules acoustiques ( $E_{\text{acoustique}}$ ) et mécaniques ( $E_{\text{mécanique}}$ ) permettent de compléter l'analyse et confirmer le lien établi entre la structure porale des mousses étudiées et leurs performances thermiques et mécaniques. L'évolution du module acoustique  $E_{\text{acoustique}}$  en fonction de la masse volumique apparente présente une certaine analogie à celle des résistances à la compression. La corrélation entre la résistance à la compression en fonction du module acoustique (Fig. 2 (gauche)) conduit à une même tendance, caractéristique du gypse. Une équivalence est également obtenue entre les modules acoustique et mécanique (Figure 2 (droite)). On peut donc constater que le module acoustique relevant d'une technique de mesure non destructive suffit à l'évaluation des performances mécaniques des mousses.



**FIGURE 2. Résistance à la compression et Module mécanique en fonction du Module acoustique.**

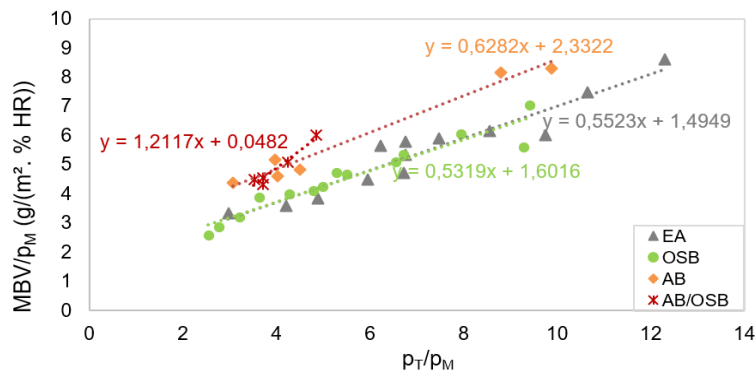
Les valeurs de MBV obtenues sur l'ensemble des mousses de gypse varient entre 0,5 et 1 g/(m<sup>2</sup>.% HR). Selon la classification du projet NORDTEST (Rode et al., 2005), ces mousses sont considérées comme des régulateurs d'humidité modérés. Au regard de la valeur MBV du gypse, le moutage du gypse apparaît bénéfique. Pour les mousses OSB, EA et AB, l'évolution du MBV en fonction de la masse volumique apparente est croissante et relativement linéaire (Fig. 3). Pour les mousses AB/OSB, les valeurs de MBV sont pratiquement inchangées. Comme constaté vis-à-vis des performances thermiques et mécaniques, les mousses OSB et EA présentent un comportement semblable. Les mousses AB conduisent aux meilleurs résultats. Celles produites avec des temps de malaxage longs (10 et 20 min) présentent des valeurs de MBV plus élevées : 0,98 et 1,02 g/(m<sup>2</sup>.% HR). Ces deux mousses se classent comme de bons régulateurs d'humidité.



**FIGURE 3.** MBV en fonction de la masse volumique des mousses de gypse ; classification MBV

En considérant les mousses minérales étudiées comme la combinaison d’une mousse aqueuse avec une suspension minérale (Mortada et al., 2021), il est possible de distinguer l’influence de la porosité de la matrice ( $p_M$ ) et l’influence de la porosité liée à la mousse aqueuse ( $p_{MA}$ ) sur la performance hygrique. Un modèle linéaire est proposé (Eq 2) :

$$MBV = A \cdot p_M + B \cdot p_{MA} \quad \text{or} \quad \frac{MBV}{p_M} = B \cdot \frac{p_T}{p_M} + A - B \tag{Eq 2}$$



**FIGURE 4.** MBV/ $p_M$  en fonction de  $p_T/p_M$  des mousses de gypse

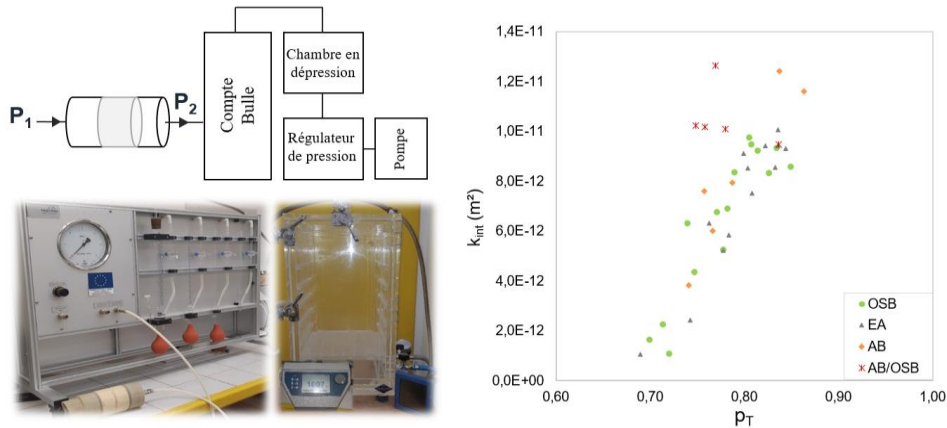
Le modèle proposé est validé en traçant, à partir des données expérimentales, l’évolution de  $MBV/p_M$  en fonction de  $p_T/p_M$  (Figure 4). Les points expérimentaux s’ajustent remarquablement sur ce modèle. Les mousses OSB et EA présentent des tendances presque identiques. La relation obtenue pour les mousses AB est parallèle à celle des mousses précédentes. A partir des droites d’ajustement, les paramètres du modèle A et B sont calculés (Tableau 1). Pour toutes les mousses, la contribution de la microporosité dans la matrice de gypse ( $p_M$ ) est plus grande que celle de la porosité de la mousse aqueuse ( $p_{MA}$ ). La similitude de la microstructure entre les mousses OSB et EA est une fois de plus constatée, les paramètres A et B obtenus étant voisins. L’influence de la porosité de la matrice est quatre fois plus grande que celle de la porosité de la mousse aqueuse pour ces mousses. Une contribution plus élevée de la porosité de matrice est constatée dans le cas des mousses AB ( $A = 2,96$ ). Sachant que cette protéine affecte notablement la prise (effet retardateur de prise), l’hydratation et la cristallisation du gypse, la texture de surface sont probablement modifiées et contribuent à mieux adsorber l’humidité. Pour les mousses réalisées avec un mélange d’OSB et AB, la contribution des deux types de porosité est presque identique ( $A = 1,26$  et  $B = 1,21$ ).



**TABLEAU 1. Paramètres A et B du modèle linéaire appliqué aux valeurs MBV**

	A	B	A/B
OSB	2,13	0,53	4,01
EA	2,08	0,55	3,71
AB	2,96	0,63	4,71
AB/OSB	1,26	1,21	1,04

Les valeurs de perméabilité intrinsèque obtenues varient de  $0,11 \times 10^{-11}$  à  $1,26 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ . Les mousses de gypse étudiées présentent ainsi des valeurs de perméabilité à l'air plus élevées que la pâte de ciment et le mortier, de l'ordre de  $10^{-14} \text{ m}^2$ . L'évolution de la perméabilité intrinsèque,  $k_{\text{int}}$ , des mousses de gypse en fonction de la porosité totale est présentée sur la Fig. 5 (droite). Globalement, la perméabilité intrinsèque croît avec la porosité totale en suivant la même tendance pour les mousses OSB, EA, et AB. Pour les mousses AB/OSB, les valeurs de perméabilité obtenues sont constantes et plus élevées que celles mesurées sur les autres mousses pour une même porosité. La porosité de ces mousses AB/OSB apparaît plus communicante, probablement en raison d'un réseau cristallin plus altéré.



**FIGURE 5. Montage expérimental pour la mesure de  $k_{\text{int}}$  (gauche) et  $k_{\text{int}}$  en fonction de la porosité totale (droite)**

### III. CONCLUSIONS

Des mousses de gypse ont été produites avec différents agents moussants dont des protéines. La nature du tensio-actif va conditionner le moussage. Un malaxage direct s'avère suffisant pour former les mousses OSB et EA alors qu'un prémoussage est nécessaire dans le cas des mousses AB (albumine). Le recours au couplage AB/OSB permet cependant d'éviter l'étape contraignante de prémoussage.

Les propriétés mécaniques et hygrothermiques des mousses de gypse ont été évaluées. La conductivité thermique et la résistance en compression des mousses de gypse sont des fonctions décroissantes de la porosité totale légèrement modifiée par l'état de la microstructure. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence une corrélation évidente entre module acoustique et résistance à la compression ainsi que l'équivalence entre modules mécaniques et acoustiques. Les tests acoustiques sont donc suffisants pour évaluer les performances mécaniques des mousses minérales. Ces tests présentent l'avantage d'être rapides et non destructifs.

Les mesures de MBV ont montré que les mousses de gypse sont classées comme régulateur d'humidité modéré. Ces mesures montrent également que la valeur MBV évolue en fonction de la masse volumique de la mousse mais également en fonction des teneurs en eau, des dosages en tensioactifs différents et des temps de malaxage. L'analyse de l'influence des différentes porosités montre que la porosité de la matrice a plus d'impact sur les valeurs MBV que la porosité de la mousse aqueuse associée au moussage. La perméabilité intrinsèque, mesurée à l'état sec, en considérant l'écoulement d'air laminaire visqueux sans effet de glissement contre les parois, varie de  $0,11 \cdot 10^{-11}$  à  $1,26 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup> pour toutes les mousses de gypse étudiées. Ce paramètre s'avère logiquement être une fonction croissante de la porosité totale.

Finalement, l'utilisation de protéines ayant des propriétés moussantes en remplacement d'un tensioactif anionique plus classique peut être considérée comme une approche réussie. Ces tensioactifs étant des agents moussant bio-sourcés à base de protéine apparaissent performants, en particulier l'Eabassoc à faible dosage. Ce dernier conduit à des performances hygrothermiques et mécaniques assez similaires à celles de l'Hostapur OSB sans modifier les conditions de fabrication. Certaines formulations permettent d'atteindre les cibles de performances visées. L'albumine, plus compliquée à utiliser, conduit à des résultats inattendus : une meilleure performance thermique et une meilleure capacité à réguler l'humidité pour une même densité mais en pénalisant les propriétés mécaniques. Ces différences de comportement s'avèrent directement liées à la structure porale des différentes mousses, sujet ayant fait par ailleurs, l'objet d'une étude spécifique.

## REFERENCES

- Auvray, C., Homand, F., Hoxha, D., Didier, C., (2003). Influence du temps sur le comportement du gypse. Colloque International Après-mine.
- Dussud, F.-X. et al., (2018) « Bilan énergétique de la France pour 2016 », Commissariat général au développement durable, Nancy.
- Dranchuk, P. M., & Kolada, L. J. (1968). Interpretation of steady linear visco-inertial gas flow data. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 7(01), 36-40.
- Huovila, P., Ala-Juusela, M., Melchert, L., Pouffary, S., Cheng, C.-C., Üрге-Vorsatz, D., et al, (2009). *Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
- Mortada, N., Phelipot-Mardelé, A., Lanos, C., (2021a). Effects of surfactants on aqueous foams properties: a step towards mineral foams. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 1–12. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1986139>
- Mortada, N., A. Phelipot-Mardelé, and C. Lanos (2021). "Lime Foams Structure Serves the Thermal and Hygric Performances". In: *ACI/RILEM International Conference On Cementitious Materials and Alternative Binders For Sustainable Concrete*, France.
- Pachauri, R., Meyer, L., Myles, R., 2014. IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Rode, C., Peuhkuri, R., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Svennberg, K., Ahonen, J., Arfuidsson, J., (2005). *Moisture Buffering of Building Materials*, Technical report (No. BYG Report, No. R-127). Technical University of Denmark.
- UNEP, « The Emissions Gap Report (2015). United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.