



34^{es} Rencontres Universitaires du Génie Civil
Liège, 24-27 mai 2016

FAISABILITÉ ET CARACTÉRISATION THERMIQUE ET HYDRIQUE DE COMPOSITES RÉALISÉS À PARTIR D'ÉCO-MATÉRIAUX

FEASIBILITY, AND THERMAL AND HYDRIC CHARACTERISATION OF ECO-MATERIALS BASED COMPOSITES

L. M. THIEBLESSON¹, F. COLLET¹, S. PRÉTOT¹, C. LANOS¹, H. KOUAKOU²

¹Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, Université de Rennes1, 3 rue du clos Courtel,
BP 90422, 35704 Rennes cedex 7, France

²STRM, Laboratoire de Géomatériaux, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire,
mail : honore_kouakou2@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Dans le contexte du développement durable, les éco-matériaux ont pour but de réduire l'impact des bâtiments sur l'environnement tout en assurant un bon confort intérieur à leurs occupants. Les matières premières végétales ou recyclées permettent de réduire l'impact en termes d'épuisement des ressources naturelles et offrent de nouvelles stratégies pour répondre aux problématiques énergétiques. Orienter le secteur du bâtiment vers l'utilisation de ces ressources constitue un enjeu majeur dans la perspective globale du développement durable. Le papier recyclé (ouate de cellulose ou granules produits à partir de papier usagé) et les fibres de bois permettent d'atteindre cet objectif.

Ce travail, en partenariat entre le Laboratoire de Génie Civil Génie Mécanique (Rennes, France) et le Laboratoire de

Géomatériaux et de Technologie de l'habitat (Abidjan, Côte d'Ivoire), s'intéresse à la faisabilité et à la caractérisation des composites réalisés à partir d'éco-matériaux et destinés à être utilisés comme faux plafond ou cloison intérieure. Les matières premières choisies sont issues de papier recyclé ou de fibre de bois. Le but de la conversion du papier dans le bâtiment est de proroger le cycle de vie du bois utilisé à cet effet. Le papier usagé est utilisé car c'est un déchet qui n'est pas recyclé en Côte d'Ivoire. La fibre de bois et la ouate de cellulose sont d'autres matériaux cellulosiques, considérés à titre comparatif.

Certains produits à base de liant minéral avec du papier recyclé existent déjà [FER 13] [ARM 16]. Ceux-ci sont souvent étudiés pour leur qualité de correction acoustique ou de protection incendie. Ainsi, Yeon *et al.* ont analysé les propriétés



physiques d'absorbeurs acoustiques cellulaires produits à partir de papier recyclé [YEO 14]. Le papier recyclé peut également être inclus dans la composition de mortiers [ACU 14]. Les granules de papier peuvent être produits industriellement et sont actuellement principalement disponibles comme litière pour animaux [PET 16]. La ouate de cellulose est obtenue à partir du recyclage de journaux et est principalement utilisée en vrac. Hurtado *et al.* ont étudié les propriétés d'isolation en fibre de cellulose [HUR 16]. La fibre de bois est un matériau bio-sourcé disponible sur le marché sous forme de panneaux d'isolation de conductivité d'environ 0,04 W/(m.K) et de masse volumique apparente de 110 kg/m³. Parmi les différents liants, l'amidon de manioc est bien adapté au contexte local en Afrique où il n'est pas valorisé suite à l'utilisation du manioc en alimentation. L'amidon est considéré comme l'un des matériaux les plus prometteurs pour les plastiques biodégradables, en raison de son abondance naturelle et son faible coût. Il peut également être utilisé comme liant comme dans l'étude de Tran Le [TRA 14], qui réalise des composites chanvre-amidon.

Dans cette étude, deux types de liants sont utilisés : l'amidon ressource locale abondante et peu chère en Côte d'Ivoire et le plâtre, liant usuel en France. Les formulations des composites sont basées sur la variation du rapport charge/liant et eau/liant. Le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments doit permettre de limiter les besoins énergétiques de ceux-ci tout en assurant un niveau de confort satisfaisant. Ce comportement est lié aux caractéristiques hydriques et thermiques des matériaux mis en œuvre. La caractérisation hydrique est réalisée en régime dynamique à travers la mesure de la valeur tampon hydrique (MBV - moisture buffer value). La

caractérisation thermique repose sur la mesure de la conductivité thermique après stabilisation à 23°C, 50%HR.

2. MATÉRIAUX

2.1. Les charges

Les matières premières utilisées dans cette étude sont la fibre de bois (FB), la ouate de cellulose (OC) et les granules de papier (GP).

Les fibres de bois (FB) sont issues de panneaux industriels qui servent généralement comme isolation thermique. Ces fibres sont ignifugées avec du phosphate d'ammonium. L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de ces fibres montre des fibres creuses de 20 à 50 µm (figure 1 a, b, c). La ouate de cellulose (OC) est un produit industriel issu du recyclage des journaux. La ouate de cellulose est traitée avec du sel de bore pour la rendre ignifuge. Observée au MEB, la ouate présente un enchevêtrement lâche de fibres de 15 à 45 µm (figure 1 d et e). Le papier usagé récupéré dans les bureaux subit plusieurs étapes de transformation au laboratoire afin d'obtenir des granules de papier (GP) qui sont utilisés comme matière première. Le papier est d'abord déchiqueté en lanières puis trempé dans l'eau. Il est ensuite réduit en pâte avec un mixeur plongeant et essoré grâce à une presse. Cette pâte est ensuite émiettée sur un tamis à mailles carrées de 3 mm de côté. Les granules de papier obtenus sont séchés à l'étuve à 40°C. Ces granules de papier, vus au MEB, présentent un enchevêtrement compact de fibres de 15 µm de large (figure 2).

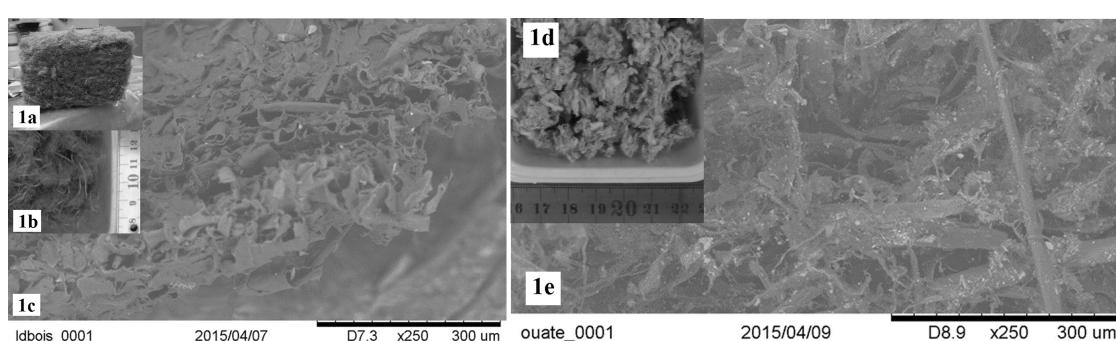


Figure 1. a) panneau de fibre de bois ; b) fibre de bois émiettée ; c) fibre de bois vue au MEB ; d) Ouate de cellulose ; e) ouate de cellulose vue au MEB

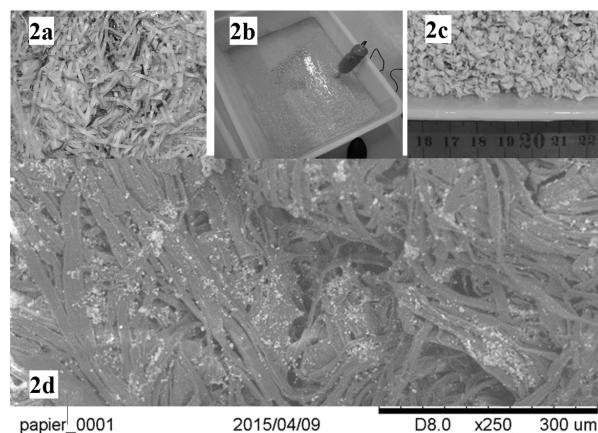


Figure 2. a) papier déchiqueté et trempé dans l'eau ; b) papier réduit en pâte ; c) granule de papier ; d) granule de papier vue au MEB



Figure 3. a) plâtre en poudre ; b) liant plâtre c) poudre d'amidon ; d) empois d'amidon

2.2. Liants

Les différentes charges sont liées soit avec un liant organique (l'amidon), soit avec un liant minéral (le plâtre) (figure 3). Le plâtre (sulfate de calcium) est un liant usuel en France. Il est choisi pour comparaison. Pour ces travaux, le plâtre (P) utilisé est le sulfate de calcium hémihydrate Molda 3 Normal, de St Gobain-France.

Le liant organique choisi est l'amidon (A). A terme, il s'agit d'utiliser de l'amidon de manioc, peu cher et abondamment disponible en Côte d'Ivoire. Pour cette étude, l'amidon utilisé est de l'amidon de pomme de terre vendu par Roquette France. L'amidon est utilisé sous forme de gel ou empois. Lorsque les grains d'amidon sont chauffés à une température suffisante ($> 70^{\circ}\text{C}$) en présence d'un excès d'eau, l'eau pénètre dans les grains et entraîne un gonflement de ceux-ci, il s'agit de la gélatinisation ou empesage (figure 3d).

type de liant. (P ou A) et le rapport eau/liant signalé entre parenthèses.

Pour éviter la compétition entre le liant et la charge pour l'eau, le liant est préparé en premier. Le plâtre est mixé à l'eau et l'empois d'amidon est obtenu en ajoutant de l'eau chaude à la poudre d'amidon. La charge est ensuite ajoutée progressivement au liant (P ou A). La quantité de charge est ajustée afin d'assurer une bonne consistance du mélange. Les échantillons sont ensuite produits par moulage dans des moules de $28 \times 23 \times 7 \text{ cm}^3$ (figure 4). Les échantillons sont ensuite compactés sous une pression de 0,03 MPa. Après le compactage, les échantillons à base d'amidon sont immédiatement démoulés et placés à la température ambiante du laboratoire. Ceux réalisés avec le plâtre sont démoulés après quelques heures afin de les laisser durcir.

Pour le liant plâtre, l'effet du rapport eau/plâtre est étudié. Les différents rapports eau/plâtre varient de 0,4 à 2,5 et le rapport charge/liant de 0,07 à 1,41. Les premiers essais à l'amidon sont réalisés avec un rapport eau/amidon de 2,86 et un rapport granules de papier/amidon de 4,17.

Après réalisation des composites (figure 5), leur séchage est suivi par pesées régulières jusqu'à stabilisation totale.

3. FORMULATION ET PRODUCTION DES COMPOSITES

Différents types de composites sont produits. Ils sont identifiés par leur type de charge (FB ; OC ou GP), le



Figure 4. Production des composites a) malaxage du liant ; b) ajout de la charge ; c) malaxage du mélange ; d) compactage

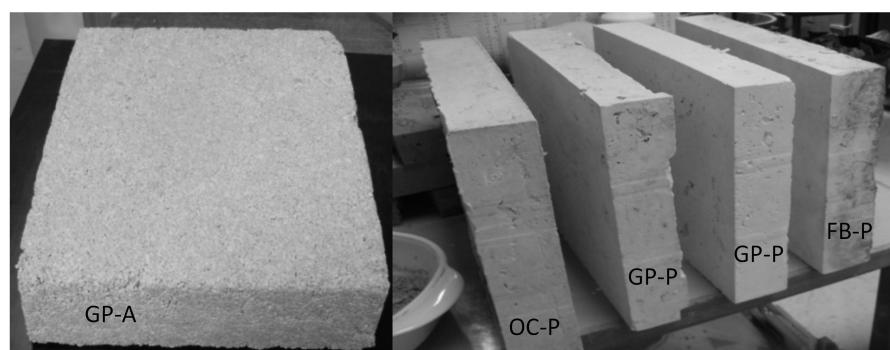


Figure 5. Composites produits



4. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION

4.1. Caractérisation thermique

La caractérisation thermique est basée sur la mesure de la conductivité thermique après stabilisation des composites à 23°C et 50%HR. Afin d'éviter la migration de l'eau au cours de la mesure, une méthode de mesure en régime transitoire est utilisée. La conductivité thermique λ (W/(m.K)) est mesurée à l'aide d'un CT-mètre équipé d'une sonde de type fil chaud longue de 5cm (figure 6). La mesure est basée sur l'analyse de l'élévation de la température en fonction du temps de chauffage. Le flux de chaleur et le temps de chauffage sont choisis pour atteindre une élévation suffisante de la température ($> 10^\circ\text{C}$) et un coefficient de corrélation élevé (R^2) entre les données expérimentales et la courbe théorique (2).

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} (\ln(t) + K) \quad [2]$$



Figure 6. CT-mètre

Où q est le flux de chaleur par mètre (W/m), K est une constante qui inclut la diffusivité thermique du matériau, t le temps de mesure et T la température ($^\circ\text{C}$). Selon le fabricant, le fil chaud est bien adapté pour la mesure de la conductivité thermique dans une gamme de valeurs comprise entre 0,02 et 5 W/(m.K) avec une précision de 5%. Dans cette étude, le temps de chauffage retenu est de 120 s et le flux thermique varie de 4,1 à 11,4 W/m.

4.2. Caractérisation hydrique

La valeur tampon hydrique caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative ambiantes. La définition de la valeur tampon hydrique d'un matériau (Moisture Buffer Value : MBV), ainsi qu'un protocole d'essai associé ont été proposés à l'issue du NORDTEST project [ROD 05]. Ainsi, la valeur tampon hydrique est définie par :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{haute} - HR_{basse})} \quad [1]$$

Où MBV est la valeur tampon hydrique ($\text{g}/(\text{m}^2.\%HR)$), Δm représente la variation de masse au cours de la phase d'absorption / de désorption (g), A la surface d'échange (m^2) et HR_{haute} / HR_{basse} les humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%).

Le protocole d'essai requiert des échantillons prismatiques, étanchés grâce à du scotch aluminium sur 5 de leurs six faces.

Après stabilisation à 23°C et 50%HR, les échantillons sont soumis à des cycles d'humidités relatives journaliers : 8 heures en absorption à 75%HR et 16 heures en désorption à 33%HR. Le suivi massique des échantillons permet alors de déterminer la valeur tampon hydrique des matériaux. Ce protocole a été testé lors d'un round robin test impliquant plusieurs laboratoires européens, sur différents matériaux de génie civil : béton, briques, béton cellulaire, plâtre, bois... Une classification des matériaux a alors été proposée (figure 7) [ROD 05]. Le banc d'essai utilisé est constitué d'une armoire climatique Vötsch VC4060 au sein de laquelle la température peut être régulée entre 10 et 95°C et l'humidité relative entre 10 et 98%. Les essais sont réalisés à 23°C. La consigne est changée manuellement au cours de l'essai selon le schéma 8/16 heures à 75/33%HR.

L'ambiance est enregistrée en continu avec des sondes Sensirion SHT 75 et par le capteur de l'enceinte. La vitesse d'air est mesurée au voisinage des échantillons : les composantes verticales sont de 0,07 à 0,14 m/s alors que les composantes horizontales sont de 0,1 à 0,4 m/s. Les échantillons sont préalablement stabilisés à 23°C, 50%. Le suivi massique des échantillons s'appuie sur 5 pesées durant les phases d'absorption et 2 pesées durant les phases de désorption. La précision de lecture de la balance est de 0,01 g et sa linéarité est de 0,01 g. La valeur tampon hydrique est donc obtenue avec une précision de l'ordre de 5%. Les cycles sont répétés jusqu'à ce que l'écart entre les variations de masse mesurées pour les cycles soit inférieur à 5% sur les trois derniers cycles.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Caractérisation physique

Pour assurer une bonne maniabilité du mélange charge-liant, la quantité d'eau utilisée augmente avec la quantité de charge (figure 8).

Après leur production, les différents composites sont séchés naturellement à 23°C, 50%HR. Le suivi massique réalisé durant la stabilisation montre que la durée de séchage est d'environ 15 jours quelle que soit la formulation considérée (figure 9). La masse volumique apparente, obtenue par mesure et pesée des échantillons, varie entre 400 et 1200 kg/m³ pour les échantillons réalisés avec du plâtre en lien avec la formulation

MBV [$\text{g}/(\text{m}^2.\%RH)$] @8/16h

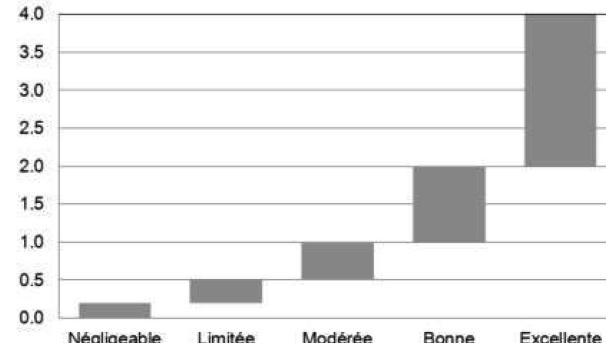


Figure 7. Classification des valeurs tampon hydrique (MBV) selon le Nordtest Project [ROD 05]

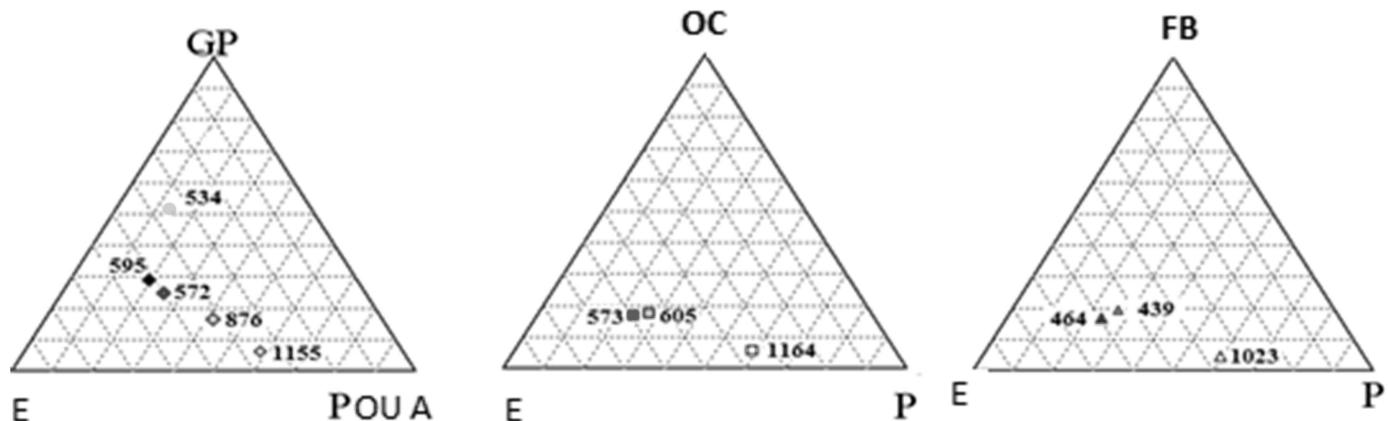


Figure 8. Diagramme ternaire montrant les différentes proportions et masses volumiques des composites

et avec le rapport eau/plâtre (figure 8). Le composite de granules de papier liés avec l'amidon a une masse volumique d'environ 500 kg/m^3 . Ainsi, la masse volumique diminue quand les dosages en eau et en charge augmentent. Pour les mêmes rapports, les masses volumiques des composites aux granules de papier et à la ouate de cellulose sont similaires alors que celles des composites à base de fibres de bois sont inférieures. Cela pourrait être lié à une plus grande quantité d'air emprisonnée lors du malaxage.

5.2. Caractérisation thermique

La conductivité thermique augmente proportionnellement avec la masse volumique (figure 10). Pour les composites à base de granules de papier ou de ouate de cellulose liés au plâtre avec un rapport eau/plâtre égal à 0,6, la masse volumique est comprise entre 1000 et 1200 kg/m^3 et la conductivité obtenue est de l'ordre de 0,45 W/(m.K). Pour un taux élevé de plâtre, le type de charge n'influence pas la conductivité qui est légèrement en dessous de celle du plâtre seul (0,48 W/(m.K) pour une masse volumique de 1100 kg/m^3 selon les données de la réglementation thermique française). Pour des masses volumiques comprises entre 550 et 610 kg/m^3 , les conductivités thermiques sont comprises entre 0,16 et 0,19 W/(m.K), comme attendu pour cette gamme de masses volumiques. Pour les composites en fibres de bois de masse volumique d'environ 450 kg/m^3 , la conductivité thermique obtenue est de l'ordre de 0,09 W/(m.K), ce qui peut être relié à la présence d'air emprisonné au cours du malaxage.

Le composite granules de papier-amidon a une conductivité thermique de 0,18 W/(m.K) qui correspond à celle de la conductivité thermique des composites à base de plâtre ayant la même masse volumique.

Parmi les composites développés dans cette étude, ceux qui présentent les plus faibles masses volumiques pourraient être utilisés en tant qu'isolation repartie.

5.3. Caractérisation hydrique

L'ensemble des composites réalisés est initialement stabilisé à 23°C 50%HR. Ils sont ensuite soumis à une phase d'adsorption.

La figure 11 donne la cinétique de masse au cours de l'essai qui suit une tendance décroissante avant stabilisation en liaison avec la première phase d'adsorption (passage de 50%HR à 75%HR). L'écart entre les variations de masse durant les cycles devient inférieur à 5 % entre le deuxième et le troisième cycle. Les valeurs MBV sont calculées en prenant en compte une valeur moyenne sur les cycles 3 à 5.

Les figures 12 et 13 donnent les valeurs tampon hygriques en absorption, désorption et moyenne, pour l'ensemble des composites. Quel que soit le composite, la valeur en désorption est plus élevée que celle en absorption, conformément à la cinétique de masse.

Les valeurs MBV moyennes obtenues sont comprises entre 0,63 et 2,85 g/(m².%RH) ce qui classe les composites comme régulateurs hygriques moyens à excellents.

Masse (g)

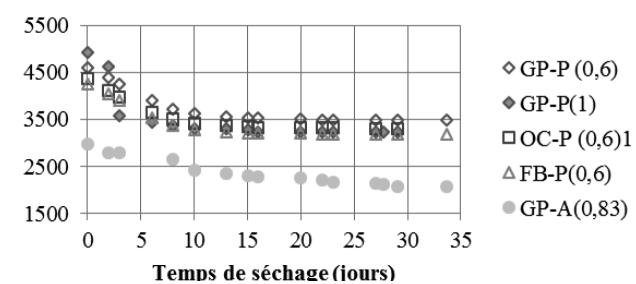


Figure 9. Masse des composites durant le séchage

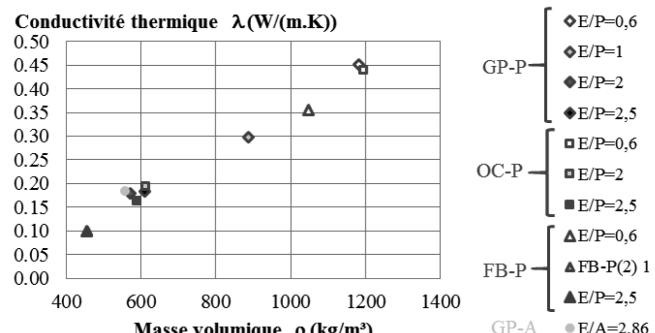


Figure 10. Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique

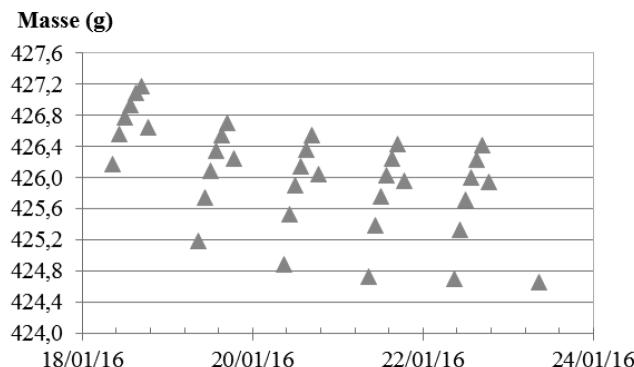


Figure 11. Evolution de la masse des composites au cours du test de valeur tampon hydrique

Les moins bonnes performances sont obtenues pour les composites dont les masses volumiques sont les plus fortes (au-delà de 1000 kg/m^3). Il s'agit des composites pour lesquels le dosage en charge et en eau sont les plus faibles. Ils sont légèrement meilleurs régulateurs hygriques que le plâtre seul qui a un MBV égal à $0,60 \text{ g/(m}^2.\%\text{RH)}$ [ROD 05].

Les meilleures performances sont obtenues pour des masses volumiques inférieures à 600 kg/m^3 , en lien avec des dosages en charges et en eau plus élevés. Pour un rapport eau/plâtre égal à 2 et un rapport charge/liant identique pour les trois types de charge, le composite fait avec des fibres de bois est le meilleur régulateur, certainement du fait d'un réseau poreux différent.

Enfin, le composite granules de papier-amidon est légèrement moins performant que des composites au plâtre de masse volumique comparable, il reste toutefois un excellent régulateur hygrique ($\text{MBV} = 2,33 \text{ g/(m}^2.\%\text{RH)}$).

5.4. Synthèse

La figure 14 donne une synthèse de la conductivité thermique en fonction de la valeur tampon hygrique pour les différents composites.

La tendance est linéaire décroissante. La courbe de tendance correspondant aux composites fibres de bois-plâtre s'avère décalée vers des valeurs inférieures de conductivité par rapport à celles obtenues pour les composites à base de papier

et de ouate de cellulose. La nature fibreuse de la charge est certainement à l'origine de ce phénomène.

Il est intéressant de constater que les composites au papier et à la ouate de cellulose sont similaires, ces charges étant très comparables dans leur composition.

Enfin, pour un même type de charge, le liant amidon permet d'optimiser les performances hygriques et thermiques, ce qui n'était pas évident à la lecture en fonction de la masse volumique.

6. CONCLUSION

Cette étude traite de la faisabilité des composites fabriqués à partir de papier (granules de papier, ouate de cellulose) ou de matériaux biosourcés (fibres de bois) liés soit à l'amidon soit au plâtre. La mise en œuvre de ces composites montre que pour avoir une bonne consistance, la quantité d'eau doit augmenter lorsque la quantité de charge introduite augmente. Quel que soit le type de charge, la masse volumique des composites diminue lorsque le rapport eau/liant augmente. La masse volumique des composites réalisés avec des fibres de bois est plus faible, en liaison avec une plus grande quantité d'air emprisonné lors du malaxage.

La conductivité thermique des composites est comprise entre 0,09 et $0,45 \text{ W/(m.K)}$, ce qui peut permettre l'utilisation des composites les plus légers en isolation répartie.

Les composites élaborés soit avec l'amidon soit avec le plâtre sont excellents régulateurs hydriques lorsque la masse volumique est inférieure à 600 kg/m^3 .

Le composite plâtre-fibre de bois, de masse volumique 400 kg/m^3 , est le composite le plus isolant et performant en terme de régulation hygrique. Toutefois, il peut être intéressant d'augmenter l'inertie thermique en ayant recours à des composites de masse volumique plus élevée, autour de 600 kg/m^3 , pour lesquels la valeur MBV reste pratiquement inchangée. Utiliser l'amidon comme liant peut permettre d'accéder à ces performances.

Pour compléter cette étude, la caractérisation mécanique des échantillons sera réalisée à travers la mesure de la résistance à la compression et de la flexion trois points. Ces résultats peuvent permettre de confirmer la sélection d'une formulation à privilégier pour une application de type faux-plafond.

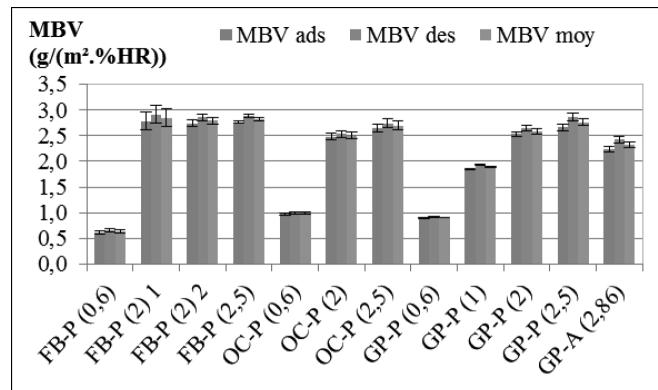


Figure 12. Valeur hydrique tampon en adsorption, désorption et moyenne des composites

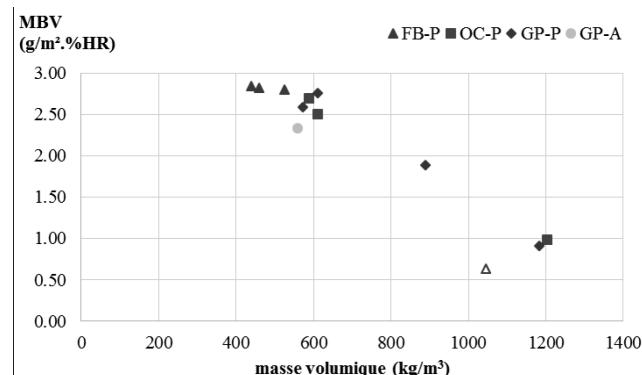


Figure 13. Evolution de la masse des composites au cours du test de valeur tampon hydrique

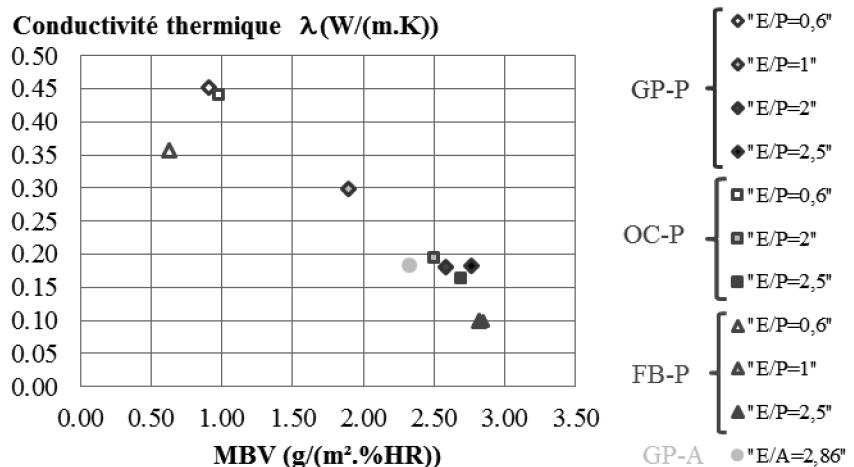


Figure 14. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la valeur tampon hydrique

7. BIBLIOGRAPHIE

- [ACI 14] Aciu *et al.*, Recycling of Paper Waste in the Composition of Plastering Mortars, *Procedia Technology*, 2014, Volume 12, pp. 295-300.
[ARM 16] www.armstrong.fr/plafonds
[FER 13] European technical advice, fermacel greenline, ATE-03/0050
[HUR 16] Hurtado PL *et al.*, A review on the properties of cellulose fibre insulation, *building and environment*, v96, 2016, pp. 170-177.
[PET 16] http://www.pettex.co.uk/

- [ROD 05] Rode C. Moisture buffering of Building Materials, Report BYG-DTU R-126, ISSN 1601-2917, 2005, ISBN 87-7877-195.
[TRA 14] Tran Le A.D. *et al.*, Experimental investigation on the mechanical performance of starch-hemp composite materials, *Construction and Building Materials*, 61, 2014, pp. 106-113.
[YEO 14] Yeon Jun-Oh *et al.*, Physical properties of cellulose sound absorbers produced using recycled paper, 2014, *Construction. Building Materials*, 70, pp. 494-500.