

# Elaboration et caractérisation thermohydrrique de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées.

L. M. Thiebleson <sup>1)</sup>, F. Collet <sup>2)</sup>, S. Prétot <sup>3)</sup>, C. Lanos <sup>4)</sup>, H. Kouakou <sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, Université de Rennes1, 3rue du clos courtel-BP 90422-35704 Rennes cedex 7-France, mail : lydie.thiebleson@univ-rennes1.fr

<sup>2)</sup> Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, Université de Rennes1, 3rue du clos courtel-BP 90422-35704 Rennes cedex 7-France, mail : florence.collet@univ-rennes1.fr

<sup>3)</sup> Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, Université de Rennes1, 3rue du clos courtel-BP 90422-35704 Rennes cedex 7-France, mail : sylvie.pretot@univ-rennes1.fr

<sup>4)</sup> Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, Université de Rennes1, 3rue du clos courtel-BP 90422-35704 Rennes cedex 7-France, mail : christophe.lanos@univ-rennes1.fr

<sup>5)</sup> STRM, Laboratoire de Géomatériaux, Université Felix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan, Côte D'Ivoire, mail : honore\_kouakou2@yahoo.fr

---

**RÉSUMÉ.** Les objectifs de ce travail sont de développer et caractériser des éco-matériaux pour la réalisation de faux plafonds ou de cloisons. Les charges utilisées sont issues de papier recyclé (granules produits à partir de déchets de papier ou ouate de cellulose) ou de fibre de bois. Les liants choisis sont l'amidon, pour sa disponibilité et son faible coût en Côte d'Ivoire, et le plâtre, liant usuel en France qui servira pour comparaison. Cette étude examine premièrement la faisabilité de tels composés. La masse volumique des composites produits avec le plâtre s'étend de 400 à 1200 kg/m<sup>3</sup>, selon la formulation. Celle des composites granules de papier, réalisés avec l'amidon, est d'environ 500 kg/m<sup>3</sup>. La conductivité thermique, mesurée à la sonde fil à 23°C, 50%HR, augmente avec la masse volumique et se situe entre 0.09 et 0.5 W/(m.K). Les valeurs tampon hygriques, mesurée selon la méthode du Nordtest project, sont comprises entre 0.61 et 2.85 g/(m<sup>2</sup>.%HR) selon les formulations testées, incluant plus ou moins de charge et plus ou moins d'eau.

**ABSTRACT.** The objectives of this work are to develop and characterize eco-friendly materials, designed to make suspended ceilings or interior partition walls. The loads are from recycled paper (granules from waste paper or cellulose wadding) and wood fibers. Aggregates or fibers are bonded with organic or mineral binder. One of the binder considered is starch, due to its availability and cheapness in Ivory Coast (cassava flour). The second binder is plaster which is a usual binder in France and is used for comparison. The density of produced composites ranges from 400 to 1200 kg/m<sup>3</sup> depending on formulation. The paper granules - starch composites density is about 500 kg/m<sup>3</sup>. Thermal conductivity is measured with a hot wire, after stabilisation at 23°C, 50%RH. The thermal conductivity increases with density and ranges from 0.09 to 0.5 W/ (m.K).The characterization of hygric behavior is based on the measurement of moisture buffer value (MBV), following the Nordtest project protocol. The obtained MBV range from 0.61 to 2.85 g/(m<sup>2</sup>.%RH), depending on formulations which include more or less load and more or less water.

**MOTS-CLÉS :** Amidon, plâtre, papier recyclé, fibre de bois, ouate de cellulose

**KEY WORDS:** starch, plaster, recycled paper, wood fiber, cellulose wadding

---

## 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]. Ils sont souvent étudiés du point de vue acoustique et de la protection incendie. Yeon et al. ont analysé les propriétés physiques d'absorbants acoustiques cellulosiques produits à partir de papier recyclé [YEO 14]. Des mortiers avec du papier recyclé sont également développés [ACU 14]. Les granules de papier sont actuellement produits industriellement et sont 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/m<sup>3</sup>. Parmi les différents liants, l'amidon de manioc est bien adapté au contexte local en Afrique où le plâtre est une ressource rare et chère. 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. Tran Le [TRA 14] a considéré ce liant pour produire 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.

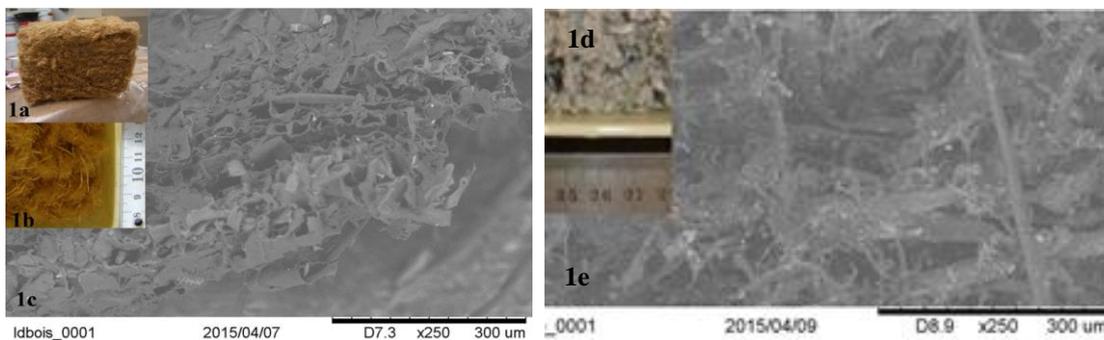
Les formulations des composites sont basées sur la variation du rapport charge/liant et eau/liant. Le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments doit permettre de limiter les besoins énergétiques de ceux-ci tout en assurant un niveau de confort satisfaisant. Ce comportement est lié aux caractéristiques 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

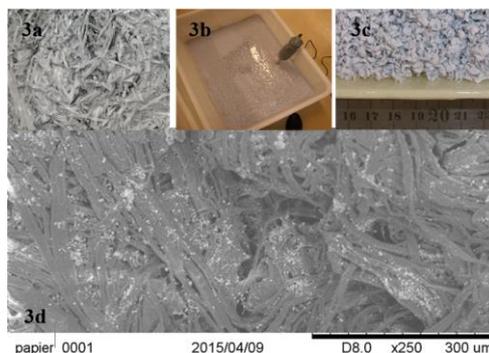
### 2.1 Les charges

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 émietlée 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 émietée ; 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

## 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).



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

## 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 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

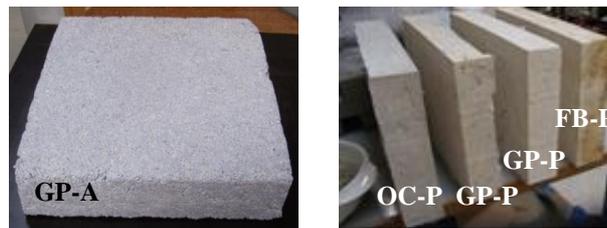
ensuite ajoutée progressivement au liant (P ou A). La quantité de charge est ajustée afin d'assurer une bonne consistance du mélange. Les échantillons sont ensuite produits par moulage dans des moules de 28\*23\*7 cm<sup>3</sup> (figure 4). Les échantillons sont ensuite compactés sous une pression de 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 0.83 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



**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  $\lambda$  (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 ° C) et un coefficient de corrélation élevé ( $R^2$ ) entre les données expérimentales et la courbe théorique (2).

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

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 (°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.



**Figure 6.** CT-mètre

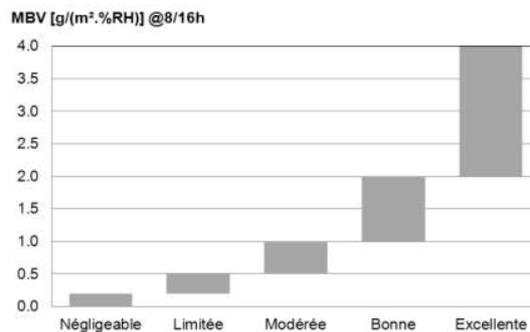
#### 4.2 Caractérisation hydrique

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 ( $g/m^2 \cdot \%HR$ ),  $\Delta m$  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].



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

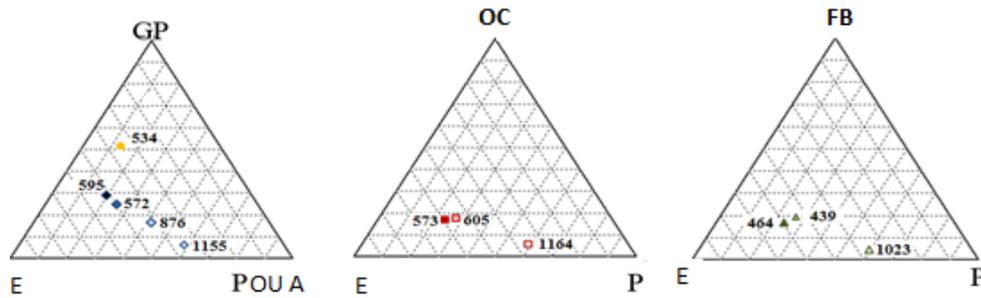
Le banc d'essai utilisé est constitué d'une armoire climatique Vötsch VC4060 au sein de laquelle la température peut être réglée entre 10 et 95 °C et l'humidité relative entre 10 et 98%. Les essais sont réalisés à 23°C. La consigne est changée manuellement au cours de l'essai selon le schéma 8/16 heures 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

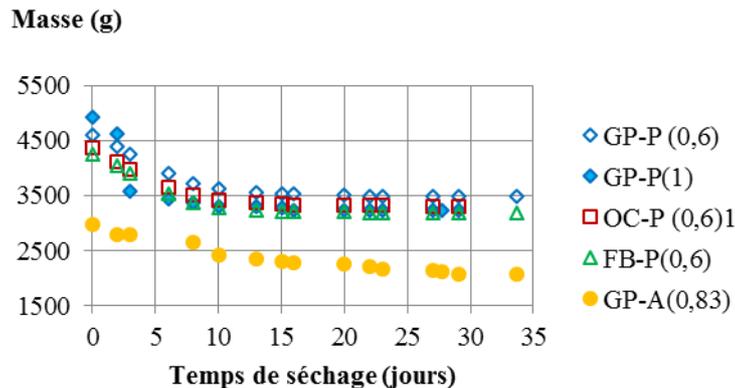
### 5.1 Caractérisation physique

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



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

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/m<sup>3</sup>, pour les échantillons réalisés avec du plâtre en lien avec la formulation et en particulier avec le rapport eau /plâtre. Le composite de granules de papier liés avec l'amidon a une masse volumique d'environ 500 kg/m<sup>3</sup>. 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.



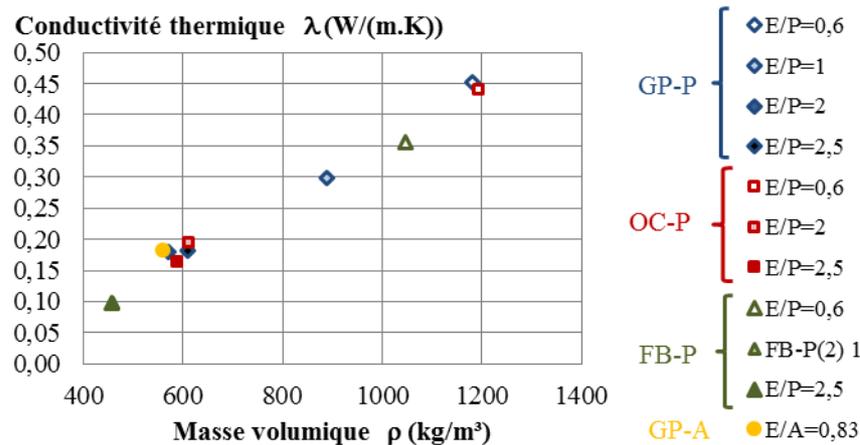
**Figure 9.** Masse des composites durant le séchage

### 5.2 Caractérisation thermique

La conductivité thermique augmente proportionnellement avec la masse volumique (figure10). 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<sup>3</sup> 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<sup>3</sup> selon les données de la réglementation thermique française). Pour des masses volumiques comprises entre 550 et 610 kg/m<sup>3</sup>, 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<sup>3</sup>, 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 répartie.

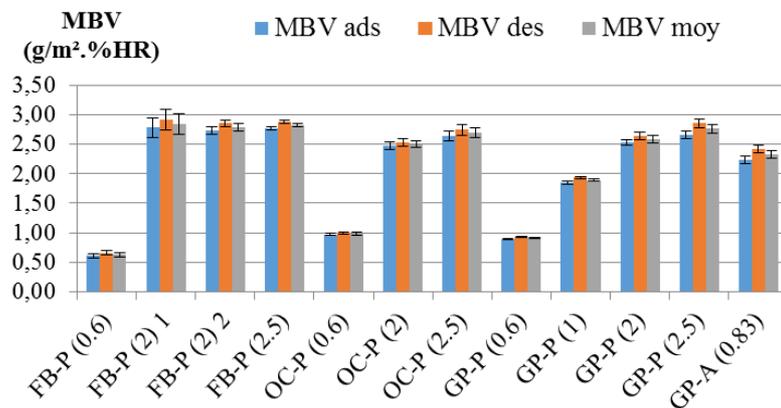


**Figure 10.** Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique

### 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. 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 donc calculées en prenant en compte une valeur moyenne sur les cycles 3 à 5.

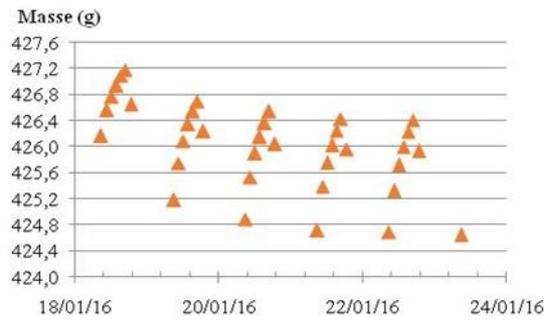
La figure 11 donne les valeurs MBV en adsorption, désorption et moyenne, pour l'ensemble des composites. Quel que soit le composite, la valeur en désorption est plus élevée que celle en adsorption (figure 11) en liaison avec la première phase d'adsorption (passage de 50%HR à 75%HR) qui se traduit par une tendance décroissante de la courbe de suivi massique des échantillons (Figure 12). Après plusieurs cycles, les prises et les pertes de masse deviennent identiques au cours de cycles successifs et se traduisent alors par des valeurs de MBV identiques en adsorption et en désorption convergeant vers la valeur moyenne obtenue lors des cycles stables.



**Figure 11.** Valeur hydrique tampon en adsorption, désorption et moyenne des composites

Les composites liés au plâtre, avec un rapport eau/plâtre égal à 0,6, ont un MBV compris entre 0,61 et 0,97 g/(m².%RH) quel que soit le type de charge (FB; OC; GP). Ces composites ont une capacité modérée à amortir les variations de l'humidité relative ambiante, ce qui peut être dû à leur faible porosité. Ils sont légèrement meilleurs régulateurs hydriques que le plâtre seul ayant un MBV égal à 0,60 g/(m².%RH) [ROD 05]. Lorsque le rapport eau/plâtre est égal à 1, le composite plâtre-granules de papier a un MBV de 1,89 g/(m².%RH)). Il est donc classé comme bon régulateur hydrique. Lorsque le rapport eau/plâtre est supérieur à 2, le MBV est supérieur à 2,50 g/(m².%RH)) quel que soit le composite. Tous ces composites sont donc classés comme excellents régulateurs hydriques. Quand on compare le MBV des composites avec un rapport charge/liant identique pour les trois composites et un rapport eau/plâtre égal à 2, on constate que le composite fait avec des fibres de bois est le

meilleur régulateur, certainement du fait d'un réseau poreux différent. Le composite granules de papier-amidon est aussi un excellent régulateur hydrique avec un MBV égal à 2.33 g/ (m<sup>2</sup>.%RH)).



**Figure 12.** Evolution de la masse des composites au cours du test de valeur tampon hydrique

## 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 montrent 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 obtenus est comprise entre 0.09 et 0.45 W/(m.K), ce qui peut permettre l'utilisation des composites les plus légers en tant qu'isolation répartie.

Les composites élaborés soit avec l'amidon soit avec le plâtre sont excellents régulateurs hydriques lorsque le rapport eau/plâtre est supérieur à 2 et eau /amidon est égal à 0.83.

Pour compléter cette étude, la caractérisation mécanique des échantillons devra être réalisée à travers la mesure de la résistance à la compression et de la flexion trois points.

## 7. Bibliographie

- [ACI 14] ACIU ET AL., Recycling of Paper Waste in the Composition of Plastering Mortars, *Procedia Technology*, 2014, Volume 12, Pages 295-300
- [ARM 16] [www.armstrong.fr/plafonds](http://www.armstrong.fr/plafonds)
- [FER 13] European technical advice, fermacel greenline, ATE-03/0050
- [HUR 16] HURTADO PL AND AL., A review on the properties of cellulose fibre insulation, *building and environment*, v96, 2016, pp170-177.
- [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, p106–113
- [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