

## **Caractérisation physique et hygrothermique des matières premières en vrac (granules de papier, ouate de cellulose et fibre de bois) pour l'élaboration d'éco-matériaux**

**Lydie Marcelle THIEBLESSON<sup>1\*</sup>, Agré Séraphin DJOMO<sup>1</sup>, Kouamé Alfred KOUASSI<sup>1</sup> et Edjikémé EMERUWA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Environnement, Laboratoire des Sciences de la Terre et de l'Environnement, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR STRM, Laboratoire des Géomatériaux et Technologie de l'Habitat, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 22 Août 2021 ; Accepté le 17 Novembre 2021)

---

\* Correspondance, courriel : [thieblesson@ujlg.edu.ci](mailto:thieblesson@ujlg.edu.ci)

### **Résumé**

L'objectif de ce travail est de caractériser des matières premières en vrac issues de déchets de papier et de fibres de bois afin de les utiliser pour la réalisation de matériaux de construction. La caractérisation physique consiste en la détermination de la masse volumique apparente et absolue, ainsi que la porosité. La méthode consiste à introduire d'abord les matières premières en vrac dans des pycnomètres ensuite d'y ajouter un liquide inerte (dans notre cas le toluène a été utilisé). Enfin, l'ensemble est agité régulièrement et pesé pendant quelques jours. La caractérisation hygrique permet de vérifier la capacité du matériau à réguler l'humidité du milieu dans lequel il est soumis. Cela revient à mettre les matières premières en vrac dans une boîte ouverte et de les laisser dans une armoire climatique au sein de laquelle la température peut être régulée entre 10 et 95 °C et l'humidité relative entre 10 et 98 %. A partir de pesées successives, l'évolution de la masse du matériau est déterminée. La caractérisation thermique consiste à déterminer la conductivité thermique des produits à l'aide d'un CT-mètre et une sonde. Les résultats obtenus montrent que les masses volumiques apparentes obtenues pour ces matières premières sont respectivement de 44,5 kg/m<sup>3</sup>, 35,8 kg/m<sup>3</sup> et 104 kg/m<sup>3</sup> pour la fibre de bois, la ouate de cellulose et les granules de papier. Les masses volumiques absolues sont dans le même ordre, 1458, 1481 et 1688 kg/m<sup>3</sup>. Ces matières premières ont une porosité élevée qui se situe entre 93,8 et 97,6 %. Les résultats de la caractérisation hygrique montrent que ces matériaux sont de bons à d'excellents régulateurs hygriques avec des valeurs tampons hygriques comprises entre 1,31 et 2,10 g/(m<sup>2</sup>. %HR). Les valeurs de la conductivité thermique obtenues comprises entre 0,04 W/(m.K) et 0,063 W/(m.K) montrent que ces matières peuvent servir pour une isolation répartie. Ces produits présentent des caractéristiques physiques et hygrothermiques intéressantes pour la réalisation de matériaux écologiques dans la construction.

**Mots-clés :** *granule de papier, fibre de bois, ouate de cellulose, valeur hygrique tampon (MBV).*

## Abstract

### **Physical and thermohygric characterization of raw materials in bulk (paper granules, cellulose wadding and wood fiber) for the development of eco-materials**

This work's objective is to characterize bulk raw materials from waste paper and wood fibers in order to use them for the production of building materials. The physical characterization consists in the determination of the apparent and absolute density, as well as the porosity. The method consists of first introducing the raw materials in bulk into pycnometers and then adding an inert liquid (in our case toluene was used). Finally, the whole is shaken regularly and weighed for a few days. Hygric characterization verifies the ability of the material to regulate the environment humidity in which it is subjected. This is achieved by placing the raw materials in an open box and leaving them in a climate cabinet where the temperature can be regulated between 10 and 95°C and the relative humidity between 10 and 98 %. From successive weighings, the material mass evolution is determined. Thermal characterization consists of determining the products's thermal conductivity using a CT-meter and a probe. The results obtained show that the apparent densities obtained for these raw materials are respectively 44.5 kg / m<sup>3</sup>, 35.8 kg / m<sup>3</sup> and 104 kg / m<sup>3</sup> for wood fiber, cellulose wadding and paper granules. The absolute densities are in the same order, 1458, 1481 and 1688 kg / m<sup>3</sup>. These raw materials have a high porosity which is between 93.8 and 97.6 %. The results of the hygric characterization show that these materials are good to excellent hygric regulators with hygienic buffer values between 1.31 and 2.10 g / (m<sup>2</sup>. % RH). Thermal conductivity values obtained between 0.04 W/(m.K) and 0.063W/(m.K) show that these materials can be used for distributed insulation. These products have interesting physical and thermohygric characteristics to be used for the realization of ecological building materials.

**Keywords :** *paper granule, wood fiber, cellulose wadding, moisture buffer value (MBV).*

## 1. Introduction

Selon un rapport publié par l'ONU, la population mondiale devrait augmenter de 2 milliards de personnes au cours des 30 prochaines années, passant de 7,7 milliards actuellement à 9,7 milliards en 2050 [1]. C'est une accélération démographique due au vieillissement et à la baisse de la mortalité infantile [2]. Cette augmentation rapide de la population est sujette à de nombreux problèmes. Il ya d'une part le manque d'habitat décent et accessible à cette population et d'autre part la gestion des déchets qu'elle produit [3]. La gestion des déchets est, et demeure une préoccupation constante de toutes les époques et de tous les lieux [4]. Ces déchets sont à la base du phénomène du changement climatique aujourd'hui validé par 98 % des chercheurs travaillant sur les sciences du climat et confirmé par la communauté scientifique [5]. L'impact des matériaux de construction sur le changement climatique est un enjeu majeur pour le secteur de la construction, ceux-ci étant à l'origine de plus de 50 % des émissions de gaz à effet de serre d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie [6]. Le constat est qu'aujourd'hui les énergies consommées par le chauffage, le rafraîchissement et l'électricité des maisons ont baissées grâce aux grandes quantités d'isolants et d'équipements utilisés, au détriment de l'augmentation de la quantité d'énergie nécessaire depuis l'extraction d'un produit, sa fabrication jusqu'à sa fin de vie [7]. Dans ce contexte, la réduction de l'empreinte environnementale des matériaux de construction est indispensable. L'utilisation de matériaux biosourcés (issus de la biomasse végétale ou animale) et géosourcés (c'est-à-dire à faible énergie incorporée car peu transformés) est donc aujourd'hui encouragée par les politiques nationales, notamment en vue de la future réglementation thermique 2020 « Bâtiment Responsable » [8]. La construction durable vise à limiter les impacts de la construction ou de la réhabilitation sur l'environnement tout en assurant à

l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables [9, 10]. Pour répondre à ce besoin, le choix des matières premières pour l'élaboration des matériaux de construction est important. 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. Dans ce travail, les produits étudiés sont en vrac. Ce sont les granules de papier (produit issu de la transformation des déchets de papier au laboratoire [11, 12], la ouate de cellulose (déchets de papier transformés en industrie et utilisés pour l'isolation des maisons) et les fibres de bois (produits industriels biologiques existant sous forme de panneau, utilisés pour l'isolation des maisons). L'étude consiste à déterminer les propriétés physiques et le comportement hygrothermique de ces produits [13] afin de les utiliser pour l'élaboration de matériaux composites écologiques qui pourront servir dans la construction [14].

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Matières premières en vrac

Les matières premières en vrac appelées charges, sont constituées de granules de papier (GP), de la ouate de cellulose (OC) et de la fibre de bois (FB).

#### 2-1-1. Granules de papier

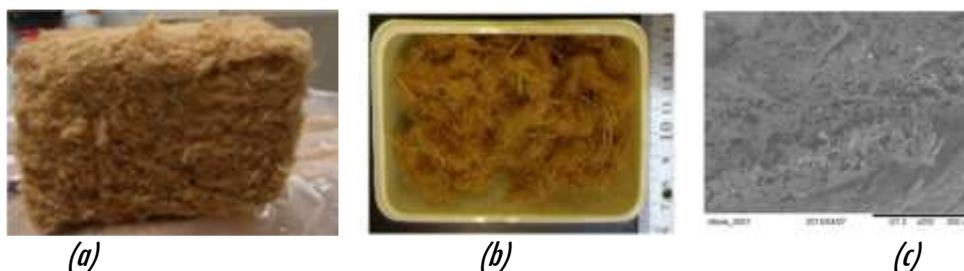
Les granules de papier sont issus de la transformation des déchets de papier collectés dans les écoles, les universités, les lieux de photocopie. C'est après plusieurs étapes de transformation au laboratoire que les déchets de papier deviennent des granules de papier (GP) [14] présentés sur la **Figure 1**. Ces granules de papier sont séchés à l'étuve à 60°C. Vus au MEB, ils présentent un enchevêtrement compact de fibres de 15 µm de large.



**Figure 1** : Images des déchets de papier (a), des granules de papier en vrac (b), des granules de papier vu au MEB (c)

#### 2-1-2. Fibre de bois (FB)

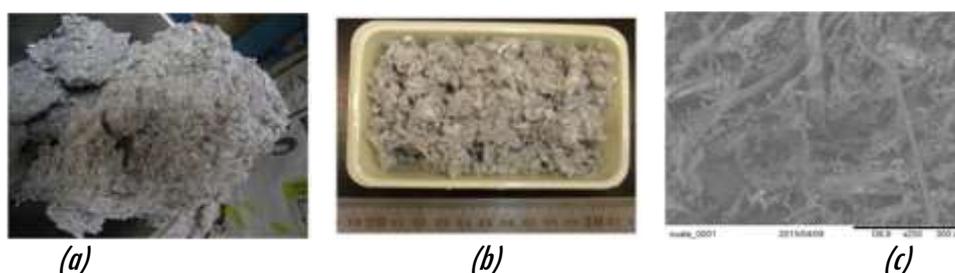
Les fibres de bois (FB) observées sur la **Figure 2** sont issues de panneaux industriels vendus par Steico en France. Elles servent généralement comme isolation thermique. Ces fibres sont ignifugées avec du phosphate d'ammonium [14]. Ces panneaux sont cardés avant utilisation. L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de ces fibres de bois montre des fibres creuses de 20 à 50 µm.



**Figure 2 :** Images du panneau de Fibre de bois (FB) (a), des Fibres de bois cardée (b) et des Fibres de bois vue au MEB (c)

### 2-1-3. Ouate de cellulose (OC)

La ouate de cellulose (OC) est un isolant thermique et acoustique de la gamme Univercell produite par Soprema en France (**Figure 3**). C'est un produit industriel issu du recyclage des journaux. La ouate de cellulose est traitée avec du sel de bore pour la rendre ignifuge et résistante aux rongeurs et aux moisissures [14]. La ouate de cellulose se présente sous forme de fibres aplaties et de très fine épaisseur compactée dans son emballage. La ouate de cellulose (OC) présente un enchevêtrement lâche de fibres de 15 à 45  $\mu\text{m}$  vu au MEB.



**Figure 3 :** Images de la ouate de cellulose compactée (a) de la ouate de cellulose émiettée (b) et de la ouate de cellulose vue au MEB (c)

## 2-2. Méthode de caractérisation

### 2-2-1. Caractérisation physique des matières premières en vrac : masse volumique apparente et réelle, porosité

Pour les charges en vrac, la mesure de la masse volumique apparente consiste à peser les échantillons et à mesurer le volume correspondant avec de l'eau à l'aide d'un tube cylindrique transparent de 10 à 20 cm de diamètre et au moins deux fois en hauteur son diamètre (**Figure 4**). La quantité de charge utilisée pour une mesure doit être ajustée à la moitié du volume du cylindre transparent destiné à être utilisé pour mesurer la densité apparente. Les différentes étapes de la réalisation de cet essai sont décrites dans le protocole Rilem TC 236- BBM [15]. La **Figure 4** ci-dessous présente la méthode de la détermination de la masse volumique apparente des matières en vrac.

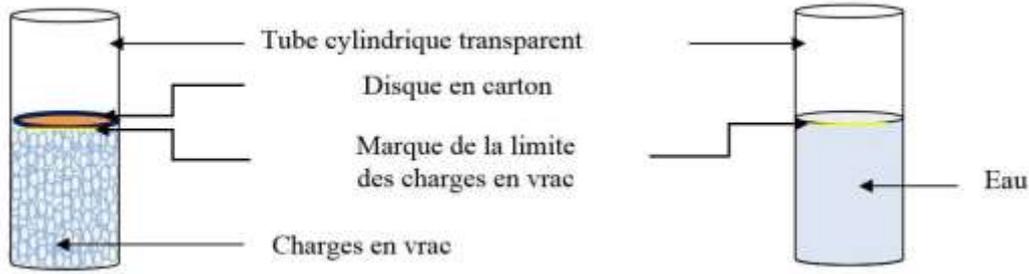


Figure 4 : Réalisation de la masse volumique apparente

A la suite de l'essai de la masse volumique apparente, la masse volumique réelle des granules de papier, fibre de bois et ouate de cellulose est mesurée après séchage à l'étuve à 40 °C par la méthode pycnométrique suivant l'Équation (1)

$$\rho_s(kg / m^3) = \frac{m_s}{V_s} \tag{1}$$

$m_s$  la masse à l'état sec de l'échantillon (kg) et  $V_s$  le volume à l'état sec de l'échantillon ( $m^3$ ).

L'échantillon est placé dans un pycnomètre dont le volume est ensuite complété par un liquide chimiquement inerte (dans notre cas le toluène a été utilisé). Afin de s'assurer que tous les vides sont comblés par le toluène, l'ensemble est agité et pesé régulièrement jusqu'à stabilisation de la masse à l'aide d'une balance Sartorius BP 301S de précision de lecture 0,01g. Pour calculer la masse volumique du toluène, on pèse ensuite le pycnomètre rempli de toluène, puis d'eau [16] (Figure 5). La relation qui donne accès à la masse volumique réelle de l'échantillon est donnée par la Formule (2)

$$\rho_s(kg / m^3) = \frac{(m_4 - m_2)(m_2 - m_1)\rho_w}{(m_5 - m_1)(m_4 - m_1 - m_3 + m_2)} \tag{2}$$

$m_1$  la masse du pycnomètre vide exprimé en kg ;  $m_2$  la masse en kg du pycnomètre + échantillon ;  $m_3$  la masse du pycnomètre + échantillon + toluène (kg) ;  $m_4$  la masse du pycnomètre + le toluène (kg) et  $m_5$  est la masse du pycnomètre + eau (kg).

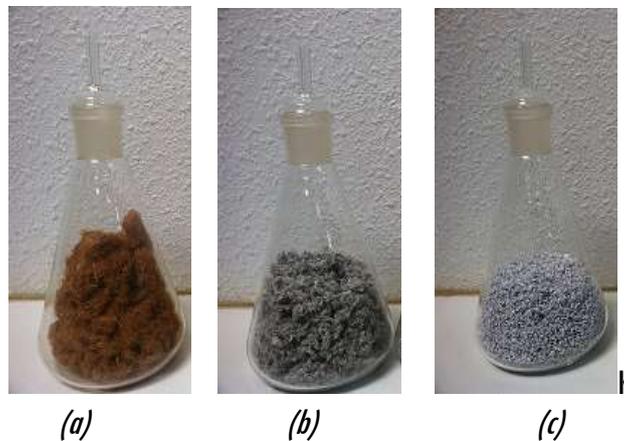


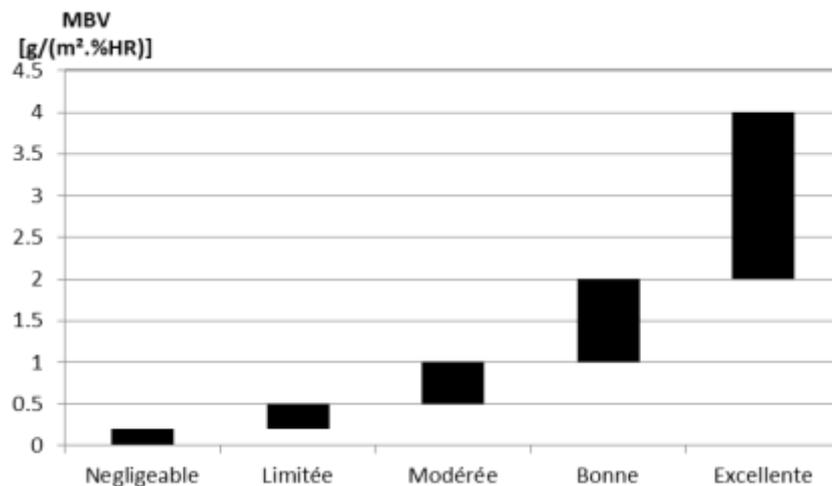
Figure 5 : Mesure à l'aide d'un pycnomètre de la masse volumique réelle des fibres de bois (a), de la ouate de cellulose (b) et des granules de papier (c)

Les volumes des pycnomètres utilisés sont de l'ordre de 500 mL. La taille des pycnomètres utilisée est fonction de la taille de l'échantillon et de la quantité nécessaire pour avoir des résultats fiables. La porosité totale est calculée à partir de la masse volumique apparente et de la masse volumique réelle, selon la **Relation (3)**.

$$n_{tot} = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_s} \quad (3)$$

### 2-2-2. Caractérisation hygrique des matières premières en vrac : valeur tampon hygrique (MBV-Moisture Buffer Value)

La caractérisation hygrique repose sur la mesure de la valeur hygrique tampon qui caractérise l'aptitude d'un matériau à réguler les variations d'humidité ambiante. L'humidité relative (HR) de l'air ambiant (aussi nommée hygrométrie ou degré hygrométrique) se définit comme le rapport de la pression vapeur ( $p_{vap}$ ) exercée par la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante ( $p_{sat}$ ) (T) à la température T donnée, correspondant au maximum de vapeur d'eau que l'air ambiant peut comporter à cette même température. En outre, bien que l'humidité absolue du milieu reste constante, le degré d'hygrométrie de l'air ambiant varie si la température ou la pression varie. La valeur tampon hygrique, appelée en anglais « Moisture buffer value » (MBV) [17], a été mesurée en suivant le protocole du projet NORDTEST Project. Une classification des matériaux a alors été proposée à l'issu de ce projet (**Figure 6**).



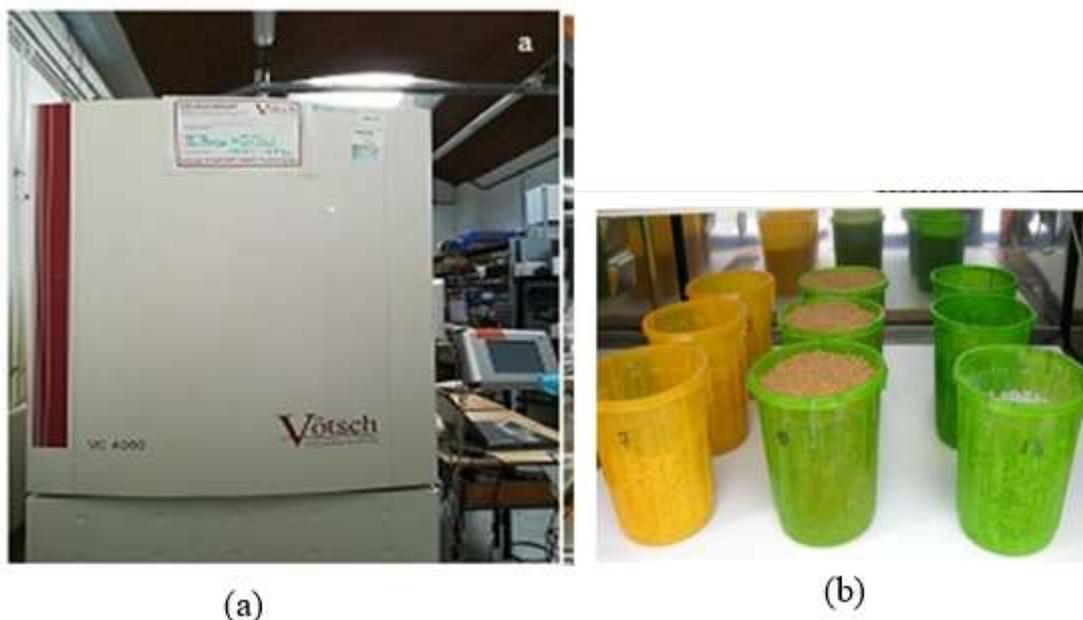
**Figure 6 :** Classification selon le Nordtest Project des valeurs tampons hygriques (MBV)

Après stabilisation des échantillons à 23°C, 50 % HR, ils sont soumis à des cycles d'humidité journaliers. La valeur MBV est déterminée à partir de la quantité d'eau adsorbée ou désorbée par une unité de surface lorsque l'échantillon est soumis à une variation de l'humidité relative ambiante en un temps donné. La valeur MBV est donnée par la **Formule (4)**

$$MBV = \frac{\Delta m}{A (HR_{haute} - HR_{basse})} \quad (4)$$

MBV représente la valeur tampon hydrique (g/ (m². %HR)),  $\Delta m$  est la variation de masse au cours de la phase d'absorption / de désorption (g), A est la surface d'échange (m²) et  $HR_{haute}$  et  $HR_{basse}$  les humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%).

Le banc d'essai utilisé est constitué d'une armoire climatique Vötsch VC4000 (**Figure 7**) au sein de laquelle la température peut être réglée entre 10 et 95 °C et l'humidité relative entre 10 et 98 %. La consigne est changée manuellement au cours de l'essai selon le schéma 8/16 heures à 75/33 % HR. Les échantillons sont pesés 5 fois pendant la phase d'adsorption à 75 % d'humidité relative et 2 fois pendant la phase de désorption correspondant à 33 % d'humidité relative. Le test est arrêté lorsque la variation de l'écart de masse entre la phase d'adsorption et de désorption est inférieure à 5 %, sur 3 jours consécutifs. L'ambiance est enregistrée toutes les 5 minutes avec des sondes Sensirion SHT 75 et en continu 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. La précision de lecture de la balance est de 0,01 g et sa linéarité est de 0,01 g. La valeur tampon hygrique est donc obtenue avec une précision de l'ordre de 5 %. Pour la réalisation de l'essai avec les matières premières, des grandes boîtes étanches ouvertes en face supérieure de diamètre 12 cm et de hauteur 14 cm sont utilisées. Les granules de papier (**Figures 1**) et la ouate de cellulose émiettés (**Figure 3**) sont placés dans ces boîtes et remplies jusqu'à environ 2 cm de la surface d'échange. Les hauteurs initiales et finales des matières sont relevées au cours de l'essai afin de déterminer la masse volumique apparente et vérifier le tassement. Le panneau de fibre de bois est recoupé de façon cylindrique et mis dans la boîte afin d'épouser sa forme.

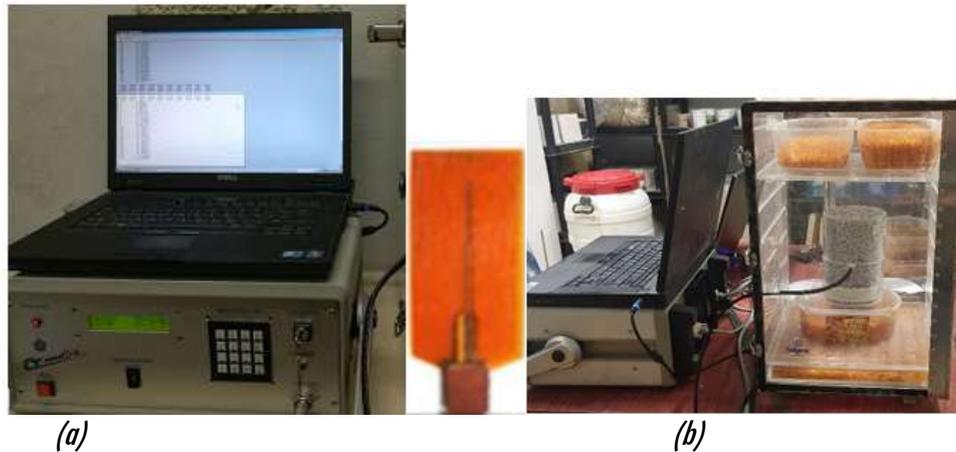


**Figure 7** : Présentation de l'armoire climatique Vötsch VC 4060 ( $P_1$ ) utilisée pour la mesure de la capacité tampon des matières premières ( $P_2$ )

### **2-2-3. Caractérisation thermique des matières premières en vrac : conductivité thermique**

La conduction thermique  $\lambda$  est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique  $\lambda$  est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure. La conductivité thermique  $\lambda$  (W/(m.K)) est mesurée en régime transitoire à l'aide d'un CT-mètre (**Figure 8**), qui est un appareil constitué :

- d'un organe de commande qui permet de régler les différents paramètres (puissance de chauffage, temps de chauffage, etc.) et d'interpréter les mesures. Cet organe est relié à un ordinateur afin d'acquérir les points de mesure ;
- d'une sonde de type fil souple chaud long de 5 cm destinée à être placée entre deux échantillons plans.



**Figure 8 :** Présentation du CT mètre (a) ; mesure de la conductivité thermique des charges (b)

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. La conductivité thermique est déterminée par la **Formule (5)**

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} (\ln(t) + K) \quad (5)$$

$q$  le flux de chaleur par mètre (W/m),  $K$  est une constante qui inclut la diffusivité thermique du matériau,  $t$  le temps de mesure (s), 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 2 à 11,4 W/m.

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Masses volumiques apparente, réelle et porosité totale

Préalablement à la mesure de la masse volumique apparente, les charges (granules de papier, ouate de cellulose et fibre de bois) sont stabilisées dans une enceinte climatique à  $23^{\circ}\text{C}$ , 50 % HR. Les résultats obtenus montrent que toutes les charges se caractérisent par une faible masse volumique et une porosité élevée. Les granules de papier ont une masse volumique apparente de  $104,9\text{ kg/m}^3$ . Cette masse volumique est plus élevée que celles des fibres de bois et de la ouate de cellulose qui ont des valeurs proches correspondants respectivement à  $44,5\text{ kg/m}^3$  et  $35,8\text{ kg/m}^3$ . Ces valeurs expérimentales obtenues pour la fibre de bois et la ouate de cellulose sont en accord avec celles données par les fabricants qui sont de  $50\text{ kg/m}^3$  pour la fibre de bois et autour de 28 et  $35\text{ kg/m}^3$  pour la ouate de cellulose. Les résultats de la

masse volumique réelles présentent des valeurs de 1688 kg/m<sup>3</sup>, 1481 kg/m<sup>3</sup>, 1458 kg/m<sup>3</sup> respectivement pour les granules de papier, la ouate de cellulose et la fibre de bois. Tout comme la masse volumique apparente, la masse volumique réelle des granules de papier est plus élevée que celles de la ouate de cellulose et de la fibre de bois. Ces valeurs élevées de la masse volumique apparente et réelle des granules de papier par rapport à la ouate de cellulose et aux fibres de bois pourraient s'expliquer de deux manières. En premier lieu à partir des observations faites au MEB ou l'empilement des particules des granules de papier semble plus compact (*Figure 1*) et en second lieu par les résultats obtenus de la porosité. En effet les granules de papier ont une porosité totale faible qui est de l'ordre de 93,8 % tandis qu'elle est d'environ 97 % pour les autres charges (ouate de cellulose et fibre de bois). Les résultats des masses volumiques apparente, réelle et de la porosité des granules de papier, de la ouate de cellulose et de la fibre de bois sont présentés dans le *Tableau 1* ci-dessous.

**Tableau 1 : Masses volumiques apparentes et réelles et porosité totale des charges**

	Fibre de bois	Ouate de cellulose	Granules de papier
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	44,5	35,8	104,9
Masse volumique réelle (kg/m <sup>3</sup> )	1458	1481	1688
Porosité totale ouverte (%)	96,9 %	97,6 %	93,8 %

Les masses volumiques réelles, apparentes et les porosités déterminées expérimentalement sont très proches de celles données dans la littérature. En effet, certains auteurs ont obtenu pour les squelettes des laines des densités comprises entre 1000 et 1550 kg/m<sup>3</sup> avec une porosité se situant entre 88 et 97 % [18, 20]. Sur la laine de chanvre, les valeurs obtenues pour la masse volumique apparente sont de 38 kg/m<sup>3</sup>, de 1498 kg/m<sup>3</sup> pour la masse volumique réelle et 97,5 % pour la porosité [16]. Les valeurs des masses volumiques apparente obtenues sur les chènevottes en vrac sont de 107,4 kg/m<sup>3</sup> avec une porosité totale de 92,2 % [21, 22]. Dinh [23] par contre, a obtenu pour la paille de blé, des valeurs de masses volumiques réelles allant de 865 à 871 kg/m<sup>3</sup>. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues alors que pour les mêmes charges de paille de blé les valeurs des porosités sont similaires et varie de 96 à 97 %. Ses valeurs de masses volumiques apparentes obtenu pour les rafles de maïs sont également plus élevées, soit 373 kg/m<sup>3</sup> comparées à 44,5 ; 35,8 et 104,9 kg/m<sup>3</sup> respectivement pour la fibre de bois, la ouate de cellulose et les granules de papier. Les matières premières en vrac telles que la laine, la laine de chanvre et les chènevottes ont des propriétés physiques proches de celles utilisées dans nos travaux, ce sont des produits légers et poreux tout comme les granules de papier, la ouate de cellulose et la fibre de bois. Ces derniers peuvent être utilisés pour la réalisation de matériaux de construction écologique. Leur porosité pourrait faire d'eux de bons isolants thermiques et hygriques.

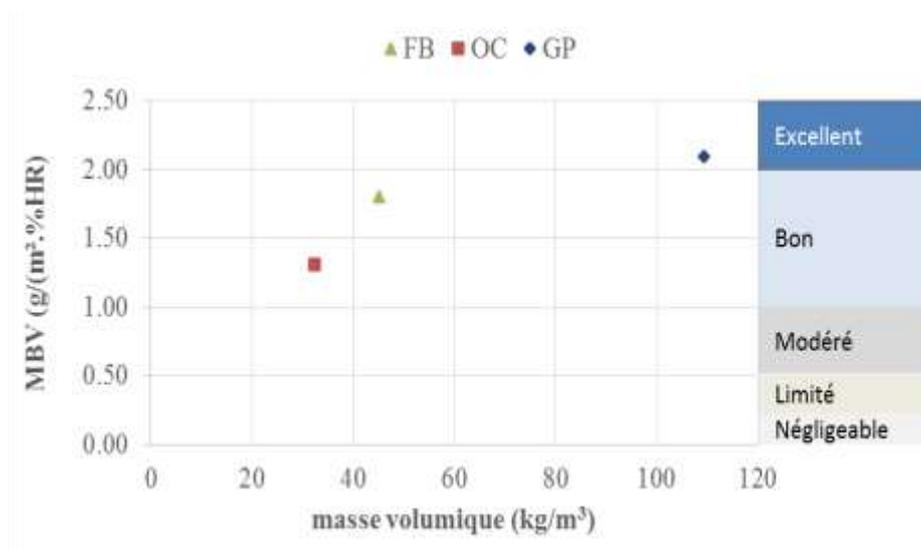
### 3-2. Valeur tampon hygrique (MBV)

Le *Tableau 2* résume les résultats obtenus des valeurs moyennes et les écarts-types de la valeur tampon hygrique des matières granules de papier (GP), ouate de cellulose (OC) et fibre de bois (FB). Ces valeurs sont calculées sur les cycles de 3 à 5 en adsorption, en désorption et en moyenne pour les différents échantillons. L'écart type est très faible entre deux mesures et conduit à un coefficient de variation inférieur à 2 %. Les valeurs MBV (Moisture Buffer Valeur) ou valeur tampon hygrique pour chaque charge en adsorption et désorption sont différentes avec des écarts faibles montrant que la stabilité est atteinte. Les résultats de la MBV obtenus présentent les valeurs de 1,81 (g/ (m<sup>2</sup>. %HR)), 1,31 (g/ (m<sup>2</sup>. %HR)) et 2,10 (g/ (m<sup>2</sup>. %HR)) respectivement pour la FB, OC et GP.

**Tableau 2 :** Valeur moyenne et écart-type de la valeur MBV des charges en adsorption (ads), en désorption (des) et en moyenne

Charges	MBV ads (g/ (m <sup>2</sup> . %HR))	MBV des (g/(m <sup>2</sup> .%HR))	MBV moyen (g/(m <sup>2</sup> .%HR))
FB	1,80 ± 0.06	1,81 ± 0.06	1,81 ± 0.06
OC	1,32 ± 0.02	1,31 ± 0.02	1,31 ± 0.02
GP	2,09 ± 0.02	2,11 ± 0.02	2,10 ± 0.02

La ouate de cellulose (OC) présente les moins bonnes performances de régulation hygrique avec une valeur MBV de 1,31 g/ (m<sup>2</sup>. %HR). Les fibres de bois ont une performance supérieure avec une valeur moyenne de MBV de 1,81 g/ (m<sup>2</sup>. %HR). Les granules de papier sont les charges les plus performantes avec une valeur MBV de 2,10 g/ (m<sup>2</sup>. %HR). Ainsi selon la classification du NORDTEST project, les fibres de bois et la ouate de cellulose sont classées comme de bons régulateurs hygriques (1 < MBV < 2 g/ (m<sup>2</sup>. %HR)) et les granules de papier comme d'excellents régulateurs hygriques. Cette affirmation est confirmée par la **Figure 9** ci-dessous.

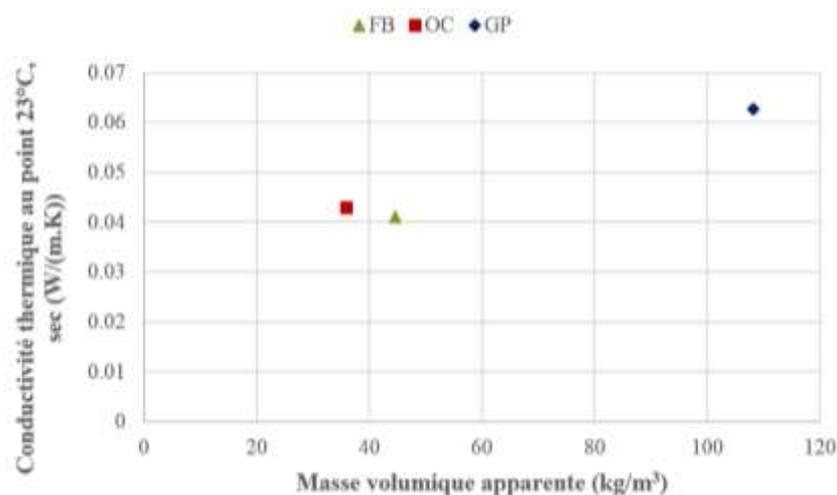
**Figure 9 :** Variation du MBV en fonction de la masse volumique pour chaque charge

La **Figure 9** donne la valeur MBV pour chaque type de charges en fonction de sa masse volumique apparente. La valeur MBV augmente avec la masse volumique apparente, mais pas de façon linéaire. Ainsi, la valeur MBV n'est pas uniquement due à la porosité totale des matériaux. Elle dépend de la surface spécifique, de la connectivité mais également de la nature des matériaux. Les valeurs MBV obtenues sur les fibres de bois sont légèrement inférieures à celles données par [24]. Selon eux, l'isolant de fibre en bois est classé comme excellent régulateur, son pouvoir tampon étant supérieur à 2 g/m<sup>2</sup>% HR. Les valeurs de MBV obtenues pour la fibre de bois et la ouate de cellulose sont en dessous de celles obtenues par [16] pour des chènevottes dont le MBV est de 2,24 g/ (m<sup>2</sup>. %HR) lorsqu'elles sont directement stabilisées à 23°C 50 % HR et de 2,05 g/ (m<sup>2</sup>. %HR) lorsqu'elles sont d'abord séchées à 60°C avant d'être stabilisées à 23°C 50 % HR. La valeur moyenne de MBV obtenus pour les granules de papier (GP) qui est 2,10 g/ (m<sup>2</sup>. %HR) se trouve dans la même gamme que celle obtenue avec les chènevottes. De même, les résultats de MBV des agro ressources tel que le lin, le colza, le blé, le chanvre et la chènevotte [25] sont voisines de celles obtenues pour la fibre de bois et les granules de papier et se situent entre 1,88 et 2,36 g/ (m<sup>2</sup>. % HR) mais supérieures à celles de la ouate de cellulose. Ces agro ressources sont de bons à excellents régulateurs

hygriques [22] et sont utilisés dans la construction. La ouate de cellulose, la fibre de bois et les granules de papier peuvent également être utilisés pour élaborer des matériaux de construction pour leur capacité à réguler l'humidité.

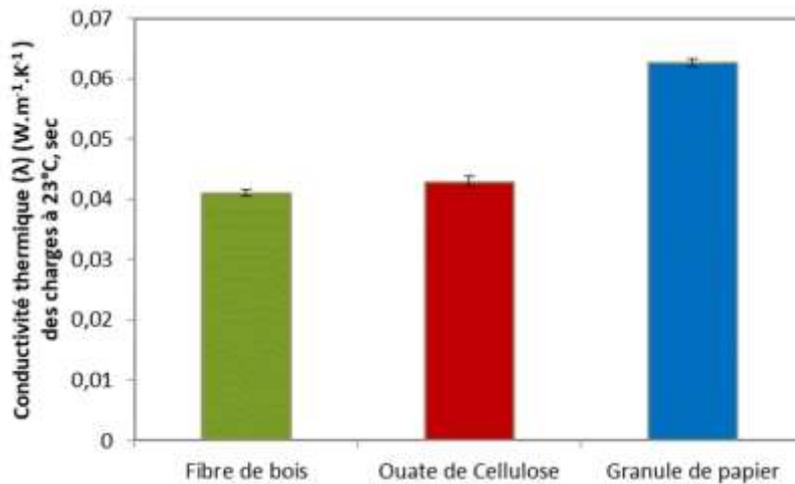
### 3-3. Conductivité thermique

La **Figure 10** ci-dessous présente l'évolution de la conductivité thermique des charges (granule de papier, ouate de cellulose et fibre de bois) en fonction de leur masse volumique apparente à l'état sec ( $20^{\circ}\text{C}$ ). La conductivité thermique varie de 0,04 à 0,068 W/(m.K) pour des masses volumiques apparentes comprises entre 30 et 110  $\text{kg}/\text{m}^3$ . De façon globale, la conductivité thermique augmente linéairement avec la masse volumique apparente. En effet, les conductivités thermiques des fibres de bois et de la ouate de cellulose se situent dans la même gamme et égales à environ 0,04 W/(m.K) pour des masses volumiques comprises entre 35 et 45  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Les granules de papier ont une conductivité thermique plus élevée en raison d'une masse volumique apparente plus élevée. Elle est autour de 0,063 W/(m.K) pour une masse volumique de 104,9  $\text{kg}/\text{m}^3$ .



**Figure 10 :** *Évolution de la conductivité thermique des charges (granule de papier, ouate de cellulose et fibre de bois) en fonction de la masse volumique apparente à  $23^{\circ}\text{C}$ , sec*

Ces résultats sont cohérents et en accord avec les travaux de [21]. Il a obtenu pour les chènevottes au point sec à  $23^{\circ}\text{C}$  une conductivité thermique de 0,056 W/(m.K) pour 100  $\text{kg}/\text{m}^3$ . De même, Viel et al ont obtenu sur les agro ressources des valeurs de conductivité comprises entre 0,045 et 0,093 W/(m.K) pour des masses volumiques allant de 30 à 392  $\text{kg}/\text{m}^3$  [25]. Pour la rafle de maïs Viel [22] a obtenu une conductivité thermique beaucoup plus élevée que les autres granulats étudiés pour une masse volumique apparente beaucoup plus grande (392,44  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). La conductivité thermique de la rafle de maïs est de 0,093 W/(m.K) lorsque pour les autres granulats (paille de blé G12 et fines de lin), qui ont des masses volumiques allant de 29,69 à 140,30  $\text{kg}/\text{m}^3$  elle varie de 0,045 à 0,058 W/(m.K). Ces valeurs de conductivité thermique sont similaires à celles obtenues dans ce travail.



**Figure 11 :** *Évolution de la conductivité thermique en fonction des charges (granule de papier, ouate de cellulose et fibre de bois) à 23°C, sec*

Pour les matières premières, fibre de bois et ouate de cellulose l'écart entre les conductivités thermiques est très faible alors que la masse volumique de la fibre de bois est plus élevée. Ainsi, la conductivité thermique dépend également de la matière première c'est à dire du type de charge. La fibre de bois présente la conductivité thermique la plus faible qui est environ 0,041 W/(m.K). La ouate de cellulose présente des valeurs légèrement supérieures à celles de la fibre de bois, soit environ 0,043 W/(m.K). Enfin, la conductivité thermique des granules de papier est supérieure (0,063 W/(m.K)) à celles de la fibre de bois et de la ouate de cellulose. Ces résultats obtenus sont en accord avec ceux de Viel [22]. Dans ces travaux, Viel a trouvé que, pour des masses volumiques presque similaires, la paille de blé présente la conductivité thermique la plus faible (0,045 W/(m.K)). La conductivité thermique de la paille de colza est environ 0,050 W/(m.K). Les anas de lin et les chènevottes ont des valeurs de conductivité thermique similaires (0,054 W/(m.K)) et la conductivité thermique des fines de lin est la plus élevée (0,058 W/(m.K)). Sur la base de la norme AFNOR NF P75-101 ( $\lambda < 65$  mW/(m.K)), toutes ces charges (granules de papier, fibre de bois et ouate de cellulose) peuvent être considérées comme des isolants thermiques.

#### 4. Conclusion

Dans le but de valoriser les déchets et trouver de nouveaux matériaux de construction qui répondent aux principes du développement durable, des matières premières issues de déchets de papier et de fibre de bois ont été caractérisés. Dans cette étude, ces matières premières sont, les granules de papier, la ouate de cellulose et les fibres de bois. Les résultats des caractérisations physiques menés sur ces matières premières donnent une masse volumique apparente comprise entre 35,8 et 104,9 kg/m<sup>3</sup> avec une porosité élevée qui est d'ordre de 93 à 97 %. Ces caractéristiques pourraient faire d'eux des matériaux légers facile à manipuler. Les valeurs hygriques tampons obtenues pour les échantillons ont également montré que les granules de papier sont d'excellents régulateurs hygriques avec 2,10 g/(m<sup>2</sup>.%HR). De même, la fibre de bois et la ouate de cellulose sont de bons régulateurs avec respectivement 1,81 et 1,31 g/(m<sup>2</sup>.%HR). Les fibres de bois et la ouate de cellulose ont des valeurs de conductivités thermiques similaires, égale à environ 0,04 W/(m.K). La conductivité thermique des granules de papier est plus élevée, et est de 0,063 W/(m.K). Les granules de papier, la fibre de bois et la ouate de cellulose sont des matières premières qui peuvent être utilisés pour fabriquer des matériaux de construction légers capables de réguler l'humidité intérieure et d'assurer une bonne isolation dans les bâtiments.

## Références

- [1] - Rapport de l'ONU, Sous embargo jusqu'au Lundi 17 juin 2019, 12 h HAE Croissant à un rythme plus lent, la population mondiale devrait atteindre 9,7 milliards d'habitants en 2050 et pourrait atteindre près de 11 milliards vers 2100, United Nations Department of Public Information, 405 East 42nd Street, New York, NY 10017 | www.un.org
- [2] - Y. DOIGNON, "le vieillissement démographique en méditerranée : convergences territoriales et spatiale", Thèse unique, Université d'AIX -Marseille, France, (2016) 620 p.
- [3] - A. DJOMO, "Valorisation des déchets non biodégradables : élaboration de produits à base de poudre et de tessons de bouteille en substitution du sable et stabilisés au ciment", Thèse unique, Université Félix Houphouet Boigny, Abidjan, (2017) 176 p.
- [4] - K. A. N. TOPANOU, "Gestion des déchets solides ménagers dans la ville d'Abomey-Cavali (Benin) : Caractérisation et essai de valorisation par compostage t", Thèse unique, en cotutelles entre l'Université d'Aix Marseille, France et l'Université d'Abomey-Calavi, Benin, (2012) 213 p.
- [5] - T. VINCESLAS, "Caractérisation d'éco-matériaux Terre-Chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement", These unique, Université de Lorient, France, (2019) 207 p.
- [6] - Construction et Bioressources (C&B), d'après une étude réalisée par l'association HQE sur 74 bâtiments basse consommation, (2013)
- [7] - CeRCAD (centre de ressources construction aménagement durable), "Les filières locales de matériaux bio et géosourcés : état des lieux et enjeux" Midi-Pyrénées, (2015)
- [8] - C. GÉRARD, "la réglementation bâtiment responsable 2020 (rbr 2020) ", un texte « schumpetérien » ! No 72. 2e TRIMESTRE Construction /Transition énergétique, (2015) 35 - 40 p.
- [9] - T. T. NGUYEN, " Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre" *Thèse unique*, Université de Bretagne Sud, France, (2010) 178 p.
- [10] - G. ESCADEILLAS, " Les éco - matériaux dans la construction : Enjeux et perspectives" Septième édition des journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton". 19 - 20 Juin, Toulouse, France, (2006) 56 - 65 p.
- [11] - J. YEON, K. WOOKIM K. SEOPYANG, J. MINKIM, M. JUNKIM, Physical properties of cellulose sound absorbers produced using recycled paper, *Construction. Building Materials*, 70 (2014) 494 - 500 p.
- [12] - C. ACIU, D. A. ILUTIU-VARVARA, N. COBIRZAN, A. BALOG, Recycling of Paper Waste in the Composition of Plastering Mortars, *Procedia Technology*, Vol. 12 (2014) 295 - 300 p.
- [13] - R. MOURAD, A. D. TRAN LE, O. DOUZANE, G. PROMIS et T. LANGLET, Capacité Tampon Hygrique des bétons de chanvre et de lin : expérimentation et application, Colloque international (CMMS14) UMMTO Tizi-Ouzou, Algérie 12 au 13 novembre, (2014)
- [14] - L. M. THIEBLESSON, " Élaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées ", Thèse unique, en cotutelle entre l'Université Félix Houphouet Boigny, (Côte d'Ivoire) et l'Université de Rennes 1, (France), (2018) 191 p.
- [15] - S. AMZIANE, F. COLLET, M. LAWRENCE, C. MAGNIONT, V. PICAND, Recommendation of the RILEM TC 236-BBM : characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures*, Springer Verlag, (2017)
- [16] - F. COLLET, " Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux", Thèse unique, Université de Rennes 1, France, (2004) 252 p.
- [17] - C. RODE, R. PEUHKURI, L. H. MORTENSEN, K. K. HANSEN, B. TIME, G. ARILD, T. OJANEN, J. AHONEN, K.

- SVENNERBERG, L. E. HARDERUP et J. ARFVIDSSON, " Moisture buffering of building materials ", rapport Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Report BYG-DTU R 126, ISSN 1601 - 2917, ISBN 87-7877-195, (2005)
- [18] - P. GLE, "Acoustique des Matériaux du Bâtiment a base de Fibres et Particules Végétales - 0 Modélisation et Optimisation" Thèse unique, 'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État., Ecole Doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique, spécialité Acoustique, (2014) 389
- [19] - V. NOZAHIC, S. AMZIANE, G. TORRENT, K. SAÏDI et H. DE BAYNAST, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, N° 2 (2012) 231 - 241 p., ISSN 0958-9465
- [20] - P. CHABRIAC, E. GOURDON, P. GLE, A. FABBRI et H. LENORMAND, Agricultural by-products for building insulation : Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters, *Construction and Building Materials*, Vol. 112, (2016) 158 - 167 p., ISSN 0950-0618
- [21] - B. MAZHOUD, "Elaboration et caractérisation mécanique, hydrique et thermique de composites biosourcés", *Thèse unique*, Université de Rennes 1, France, (2017) 175 p.
- [22] - M. VIEL, "Développement de composites bio-sourcés destinés à l'isolation des bâtiments "Thèse unique, Université de Rennes 1, France, (2018) 200 p.
- [23] - M. BOUASKER, N. BELAYACHI, D. HOXHA, M. AL-MUKHTAR, "Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications", *Materials*, Vol. 7, N° 4 (2014) 3034 - 3048 p, ISSN 1996-1944
- [24] - K. ABAHRI, R. BELARBI, C. EL HACHEM, Caractérisation macro-hydrique des matériaux biosourcés présenté lors du 33èmes Rencontres de l'AUGC, *ISABTP/UPPA*, Anglet, 27 au 29 mai, (2015)
- [25] - M. VIEL, F. COLLET, C. LANOS, "Chemical and hygrothermal characterization of agrosources' by-product as a possible raw building material" 2nd International Conference on Biobased Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and Fibrous materials, June 21th - 23 th Clermont-Ferrand, France, (2017)