
Etude Comparative du comportement hygrothermique des matériaux à base de fibres végétales

Naima Belayachi¹, Dashnor Hoxha¹, Iuliia Redikultseva¹

¹Université d'Orléans, INSA-CVL, PRISME, EA 4229, 8 Rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans cedex 2, France,

naima.belayachi@univ-orleans.fr; dashnor.hoxha@univ-orleans.fr; iuliia.redikultseva@etu.univ-orleans.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de cette investigation expérimentale est d'étudier les propriétés hygrothermiques via une comparaison du comportement de différents matériaux à base de fibres végétales. Il s'agit de matériaux d'isolation thermique à base de paille céréalière proposés pour l'isolation des bâtiments par extérieur et d'un mortier à base de sciure de bois qui sera utilisé comme enduit de protection. L'étude s'intéresse essentiellement à quatre bétons légers sélectionnés avec la formule optimale alliant performance thermique et résistance mécanique, en variant le type de paille blé ou orge et la nature du liant chaux ou plâtre. Les propriétés thermiques pour les différents composites ont été obtenues à partir des mesures de conductivité thermique après différents temps de séchage afin d'évaluer l'impact de la teneur en eau sur le comportement thermique. Concernant les propriétés hydriques, la méthode des solutions salines a été utilisée pour déterminer les isothermes sorption-désorption des matériaux. La loi de van Genuchten a été identifiée à partir des courbes expérimentales et a permis de comparer les paramètres de transfert hydriques des différents matériaux.

ABSTRACT. The aim of this experimental investigation is to study hygrothermal properties through a comparison of the behaviour of different materials based on natural fibers. This is thermal insulation materials based on cereal straw proposed for outside building insulation and a sawdust-mortar used as protective coating. The study mainly focuses on four lightweight concretes selected with optimal formulation combining thermal performance and mechanical strength by varying the straw variety wheat and barley, and binder lime or gypsum plaster. The thermal properties for the different composites were obtained from the thermal conductivity measurements after various drying times in order to evaluate the impact of water content on the thermal behaviour. Concerning the hydraulic properties the sorption-desorption isotherms for the materials are obtained by saline solutions method for the evolution of water content in function of capillary pressure. Van Genuchten law is identified from the experimental curves and allowed to compare the water transfers' parameters of different materials.

MOTS-CLÉS : Conductivité thermique, paille, Chaux, humidité relative, isolation, plâtre.

KEY WORDS: Thermal conductivity, straw, lime, relative humidity, insulation, gypsum plaster.

1. Introduction

L'avancée technologique dans la plupart des domaines industriels propose des matériaux avec des propriétés exceptionnelles pour les différentes applications auxquels ils sont destinés, sauf que, la performance n'est pas suffisante vis-à-vis des exigences environnementales, esthétiques, et de durabilité. Cependant, l'enjeu actuel c'est surtout d'en proposer des matériaux performants, plus économes, qui se dégradent d'une manière naturelle et rapide, se recyclent avec des méthodes faciles et moins énergivores. L'objectif principal notamment en génie civil est de diminuer la consommation d'énergie des bâtiments en utilisant des matériaux de construction avec des performances thermiques tout en réduisant, le cout, l'énergie de leur fabrication, et leur impact négatif sur l'environnement. Comme dans le domaine pharmaceutique, de l'énergie et des polymères, le retour vers la biomasse et l'utilisation des fibres végétales est une solution alliant performance technique et environnementale. Même si l'utilisation des fibres végétales dans la construction n'est pas nouvelle en soit, le juste compromis entre performance thermique, ambiance confortable et conception moderne à faible cout est un défi scientifique. En effet, plusieurs exemples de matériaux utilisant des fibres naturelles et différents liants sont présentés dans la littérature et montrent leurs avantages [BIL 08]-[SIL 11]-[HEJ 12].

Ces matériaux agro-sourcés sont en plus disponibles à faible coût, renouvelable et recyclable puisqu'ils sont issus généralement d'une activité agricole locale. Cependant, ils présentent quelques inconvénients comme la dispersion des propriétés, la mauvaise adhérence fibre liant et leur comportement vis-à-vis des ambiances humides. Par conséquent, le comportement hydrique de ce type de matériaux peut modifier considérablement leur comportement thermique. Des efforts de caractérisation expérimentale [BAR 13]-[COL 14] ou de simulation numérique [BAR 14]-[RYU 14] pour prendre en compte les transferts hydriques et leur influence sur le transfert de chaleur. Pour mieux montrer la performance énergétique des bâtiments utilisant les isolants à base de fibres végétales, des travaux à l'échelle des parois ont été réalisés [GUI 15]. En effet, les propriétés d'adsorption/désorption sont nécessaires pour montrer la relation des matériaux avec l'humidité relative de l'air ambiant dans le cadre des études de couplage hygrothermique [EVR 14]-[LEL 14].

Dans ce contexte, un matériau à base de paille céréalière a été proposé dans le cadre d'un projet région PROMETHE destiné à l'isolation thermique par extérieur des bâtiments. Le travail réalisé jusqu'à maintenant s'est intéressé à l'optimisation de la formulation, aux propriétés des différents matériaux élaborés en prenant deux variétés de paille et deux liants différents. L'utilisation de ce matériau isolant en pratique sera accompagnée par une utilisation systématique d'un enduit de protection dont les propriétés sont à optimiser. Il est donc important d'étudier la compatibilité d'un enduit avec le matériau d'isolation proposé. Outre les caractéristiques mécaniques, les propriétés hydriques et thermiques des matériaux isolant-enduit jouent un rôle important dans l'adhérence et la compatibilité enduit-support [MAU 11]. Cependant, afin de mieux appréhender la compréhension de l'influence des propriétés intrinsèques du matériau et optimiser sa formulation, une première étude comparative des propriétés hygrothermiques des matériaux isolants avec un enduit utilisé pour les constructions en bottes de paille à base de sciure de bois a été réalisée. De par les objectifs de cette étude, une première caractérisation thermique à différentes étapes de séchage des matériaux isolants et du mortier a été réalisée pour mettre en évidence l'impact de la quantité d'eau ou la teneur en eau sur la conductivité thermique. Les isothermes de sorption des différents matériaux sont également comparées pour les différents matériaux de l'étude. Les résultats de cette étude seront utilisés dans la modélisation hygrothermique du comportement du démonstrateur du projet PROMETHE à partir des mesures in-situ des conditions climatiques.

2. Caractérisation hygrothermique

Dans le contexte de cette étude, nous proposons de réaliser une caractérisation thermique et hydrique en comparant les différents matériaux d'isolation avec l'enduit extérieur. Ces comparaisons permettront à la fois de choisir le meilleur isolant pour les bâtiments et de préparer les données de modélisation numérique dans laquelle le couplage thermo-hydrique dans une paroi sera utilisé pour montrer la performance des isolants proposés en utilisant les mesures in-situ des conditions climatiques. Afin de mettre en évidence l'influence du caractère fortement hygroscopique de la paille [BOU 14] sur le comportement thermique du matériau final, on s'intéresse plus particulièrement à la mesure de la conductivité pour différentes teneur en eau des composites et à déterminer la courbe de rétention d'eau qui est un paramètre très important dans les couplages hygrothermiques afin de montrer la performance des isolants proposés.

2.1. Préparation des matériaux étudiés

Les composites de cette étude comparative se distinguent par la nature du liant (chaux et plâtre) et la variété de la paille (blé ou orge). Par conséquent, quatre isolants de béton paille (Blé Chaux -BC, Blé plâtre- BP, Orge chaux-OC et Orge plâtre-OP) sont comparés avec le mortier de l'enduit extérieur (Mortier sciure de bois- MSB). De par les objectifs du programme de recherche, des études précédentes ont été consacrées pour la sélection des fibres [BOU 14] et pour l'optimisation à la fois de la formulation et de la méthode de fabrication [BEL 13]. Nous présentons donc ici de façon succincte la préparation des échantillons utilisés pour la caractérisation.

L'optimisation a consisté à varier le rapport Eau/Liant et Fibre/liant pour trouver le meilleur compromis entre la performance thermique et la résistance mécanique. Deux formulations ont été retenues pour un rapport Fibre/Liant de 0.2 et 0.4 respectivement pour la chaux et le plâtre pour un même rapport Eau/Liant de 1.1. Les mélanges du béton paille sont préparés dans un malaxeur à béton horizontal d'une capacité de 35 litre. La paille est broyée préalablement en respectant la granulométrie adoptée pour optimiser la méthode de malaxage (90% des fibres ont une taille de 35 mm).

Brièvement, la méthode de fabrication consiste à ajouter 20 % d'eau pesée en respectant le rapport Eau/Liant, malaxer pendant 60s, ajouter un mélange de liant-eau et malaxer pendant 5 minutes. Pour les liants il s'agit du Tradical PF70 pour la chaux et un plâtre fin Dial à prise rapide de 15 min pour le gypse. Le Tradical PF70 est un pré-mélange de 75% de chaux aérienne, 15% de chaux hydraulique et 10% de pouzzolane. Après cette étape de malaxage, les échantillons sont confectionnés en blocs de (300 mm x300 mm x100 mm) en utilisant des moules en bois. Les échantillons à base de plâtre sont placés à l'étuve à 45° jusqu'à stabilité de la masse. Les échantillons de béton-paille de (150 mm x 150 mm x 100 mm) utilisés pour les mesures thermiques sont découpés à partir des blocs après 28 jours de maturation dans une chambre climatisée à température constante de 20° (Figure 1). Des échantillons d'une taille d'environ (75 mm x 50 mm x 50 mm) ont été utilisés pour le test d'adsorption-désorption afin de respecter la représentativité du matériau hétérogène.



Figure 1. Mortier à base de sciure de bois (à gauche) et du béton paille (orge plâtre, à droite).

Pour le mortier à base de sciure de bois (MSB), les blocs ont été confectionnés directement sur le chantier d'un bâtiment en botte de paille. La formulation utilisée est constituée de 40 % de sciure de bois, de 30 % de sable et de 10% de chaux et ciment. Une caractérisation expérimentale des propriétés hydromécanique de différents mortiers à base de sciure de bois a été également réalisée [HOX 12], afin de faciliter le choix de la formule optimale qui a été mise en place pour le démonstrateur du projet PROMETHE. Les échantillons de 100 mm x 100 mm x 50 mm) ont été utilisés (Figure 1) pour les mesures thermique et des cubes de 20 mm de coté pour l'isotherme de sorption. Les blocs ont été ensuite conservés également dans la chambre de cure dans les mêmes conditions que le béton paille.

2.2. Méthodes de caractérisation

Afin d'évaluer l'évolution de la conductivité en fonction de la teneur en eau, les échantillons sont immergés dans l'eau déminéralisée pendant 24h. Ils sont ensuite mis dans une étuve à 60° ou les échantillons subissent un séchage. La variation de masse est suivie et une mesure de conductivité est réalisée après 24h de saturation, et ensuite après 14h, 35h et 56h de séchage. La teneur en eau des échantillons est calculée en utilisant la masse après saturation et après les différents temps de séchage.

La mesure de la conductivité thermique a été réalisée par la technique du fil chaud suivant la norme ASTM D5930-97. Le conductivimètre NEOTIM FP2C utilisé est équipé d'une sonde fil chaud représenté sur la Figure 2 entre deux échantillons de béton paille ayant la même géométrie. L'hypothèse principale de cette méthode est de

considérer une géométrie cylindrique avec un transfert radial et une longueur infinie du fil chaud. La conductivité est identifiée à partir de l'évolution de la température en fonction du logarithme du temps.



Figure 2. *Mesure de la conductivité thermique en utilisant la méthode du fil chaud.*

Les isothermes en adsorption-désorption d'eau des différents matériaux sont déterminées par mesure gravimétrique en utilisant une balance avec une résolution 10^{-4} g. Le suivi de masse de l'échantillon pendant l'adsorption et la désorption est réalisé quotidiennement 3 fois par jour pour différentes humidités relatives (12, 33, 44, 55, 66, 76, 86, 93, 98 %) à l'aide des solutions salines saturées (Figure 3). Pour la saturation et le séchage à 100%, les échantillons sont immergés dans l'eau ou mis à l'étuve à 60°C pendant 24h respectivement. La saturation est calculée à partir de la variation de la masse après stabilisation de l'état hydrique des échantillons. Les échantillons de béton paille ont montré une difficulté à se stabiliser malgré leur très grande sensibilité à l'humidité. En effet, la quantité d'eau adsorbée est importante pour les premières heures pour une humidité donnée, mais la stabilité a été atteinte après plusieurs jours. Un temps de stabilité plus important (environ 1 mois) pour les humidités de 66, 76, et 86%.



Figure 3. *Détermination de l'isotherme de sorption par la méthode des solutions salines (suivi de prise ou de perte de masse).*

3. Résultats et discussion

L'évolution de la conductivité thermique du mortier à base de sciure de bois en fonction de la teneur en eau est présentée sur la Figure 4. On observe une diminution de 50 % pour la conductivité entre l'état saturé et l'état partiellement saturé après la première étape de séchage. La différence est plus faible après les autres étapes de séchage. La quantité d'eau dans le mortier influence d'une manière importante sa conductivité thermique. Il est donc important de prendre en compte cette sensibilité dans la modélisation hygrothermique de la paroi dans les périodes hivernales.

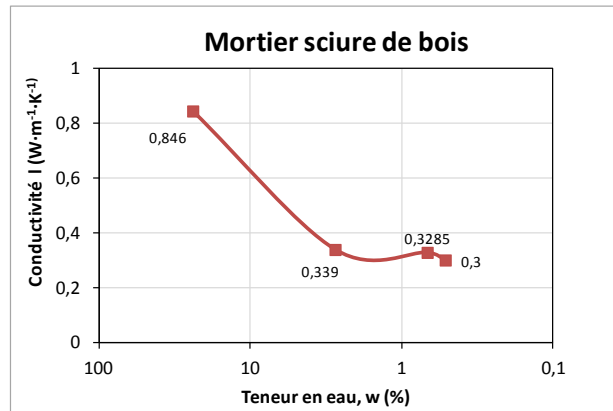


Figure 4. Evolution de la conductivité thermique du mortier en fonction de la teneur en eau (Echelle logarithmique).

De la même manière, la Figure 5 illustre la conductivité thermique des matériaux isolants en fonction des différentes étapes de séchage. On peut voir que la différence entre la première valeur et la dernière valeur après séchage est d'environ 17 % pour la chaux qu'il s'agit de paille de blé ou d'orge. Toutefois, cette différence est de 12 % dans le cas du blé plâtre et orge plâtre. La teneur en eau est par contre plus importante dans le cas de l'orge pour le même liant que le blé. Cette propriété d'adsorption d'eau importante pour l'orge a été mise en évidence dans les études précédentes [BOU 14]. Pour tous ces résultats, la valeur de la conductivité est une moyenne de 5 mesures espacées de 10 minutes avec un écart type de 0,0022.

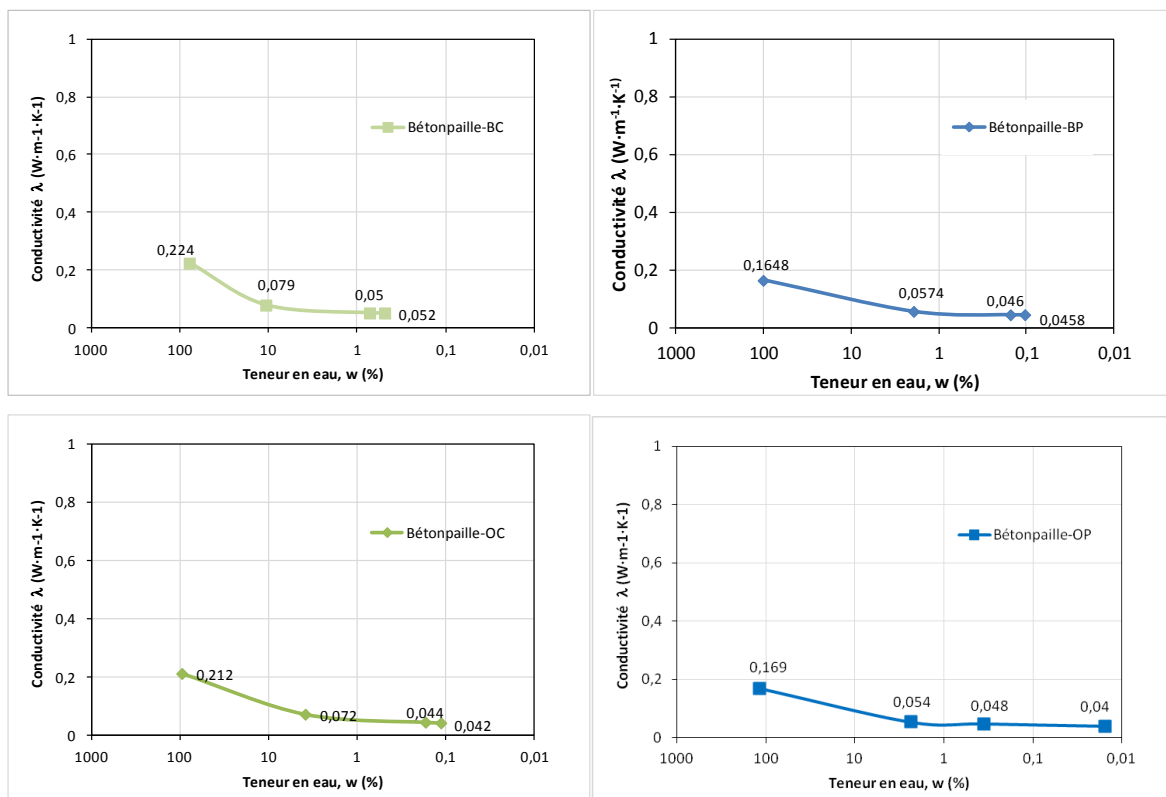


Figure 5. Evolution de la conductivité thermique des différents isolants en fonction de la teneur en eau (Echelle logarithmique).

A partir de ces résultats, il semble que la plus faible conductivité thermique même en présence d'une quantité d'eau est celle du béton paille plâtre. Une différence très faible d'environ 0.3 % est observée entre le blé et l'orge.

Souvent, à l'échelle de la paroi le matériau isolant est accompagné par la mise en place d'un enduit de protection, il est intéressant de comparer l'évolution de la conductivité des différents composites proposés avec celle de l'enduit en sciure de bois comme le montre la Figure 6. Globalement, la différence du comportement du mortier et les différents isolants est la même qu'il s'agit de blé, d'orge, de plâtre ou de chaux. Ceci est dû principalement à la grande quantité de fibres utilisée pour les isolants et donc de leur forte porosité par rapport à l'enduit. Cependant, comme la différence entre le blé et l'orge est très faible, on pourra choisir le meilleur isolant à base de blé surtout que la production de la paille de blé est trois fois plus importante que l'orge.

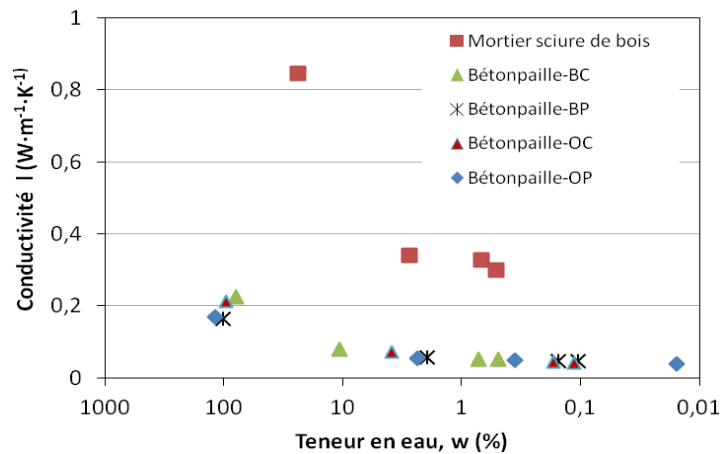


Figure 6. Comparaison du comportement thermique de l'enduit avec les différents isolants en fonction de la teneur en eau (échelle logarithmique).

Les courbes des isothermes de sorption-désorption du mortier sciure de bois sont comparées avec celles du béton paille à base de chaux (blé-chaux et orge-chaux) sur la Figure 7. Les courbes d'adsorption et de désorption montrent une hystérésis pour tous les matériaux. Néanmoins, cette hystérésis est plus importante pour le mortier sciure de bois pour toutes les humidités alors qu'elle reste faible pour le béton paille chaux jusqu'à 60% d'humidité. On peut observer aussi que pour la courbe d'adsorption le béton paille a une saturation plus importante que le mortier pour toutes les humidités. Pour les humidités de 56%, 66% et 86% il existe une différence plus marquée entre la désorption du mortier et celle du béton paille. La différence entre le blé et l'orge n'est pas significative malgré le fait qu'il y'avait une influence importante sur les propriétés mécaniques du béton paille [BEL 13].

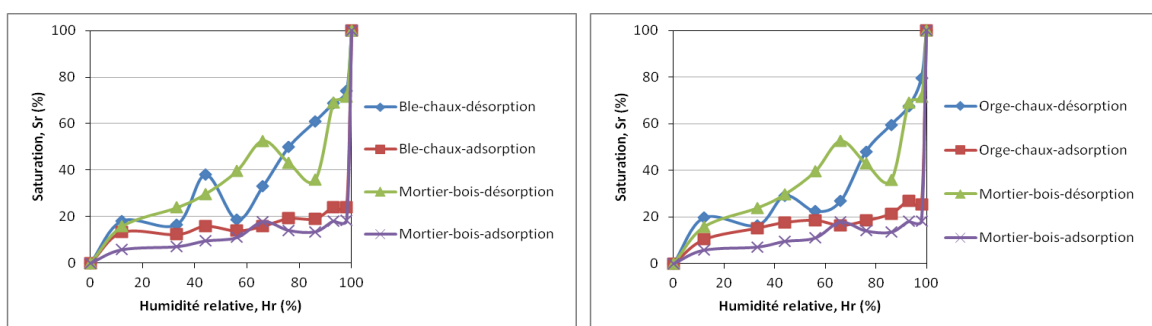


Figure 7. Isothermes d'adsorption-désorption du mortier à base de sciure de bois comparées à celles du béton paille à base de chaux.

La même comparaison est illustrée sur la Figure 8 avec les courbes du béton paille à base de plâtre. L'hystérésis est présente à partir de 56% et elle est plus faible pour le béton paille plâtre par rapport au béton paille chaux et le mortier sciure de bois. On constate également une courbe d'adsorption avec des quantités plus faible pour toutes les humidités par rapport au mortier sciure de bois. La différence entre les deux courbes de désorption est plus importante ici jusqu'à 86% d'humidité. Le mortier sciure de bois à un séchage plus important que l'isolant.

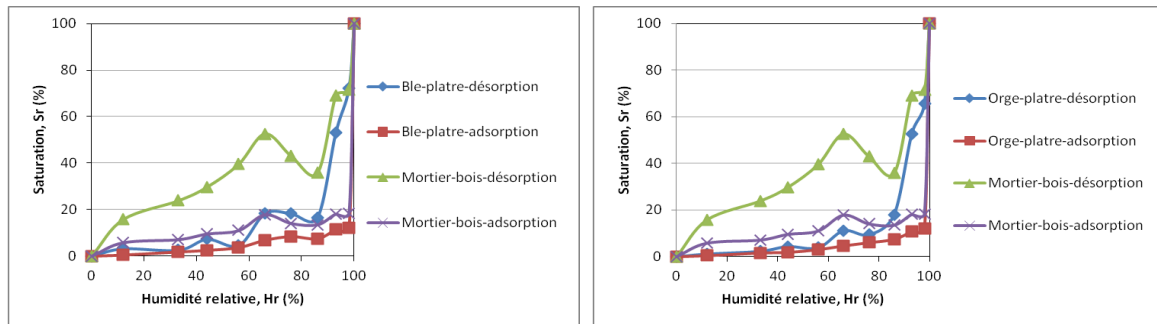


Figure 8. Isothermes d'adsorption-désorption du mortier à base de sciure de bois comparées à celles du béton paille à base de plâtre.

A partir de ces isothermes, la loi de van Genuchten [GEN 80] a été identifiée en minimisant l'erreur entre la courbe expérimentale et théorique de la saturation en fonction de la pression capillaire. La pression capillaire est calculée à partir de la relation de Kelvin à partir des différentes humidités relatives. Les paramètres P_r (pression d'entrée d'air) et n de la loi de van Genuchten résultant sont donnés dans le Tableau 1. On peut voir que le paramètre n n'est pas sensible à la nature du matériau, une différence faible (12%) est constatée entre le liant chaux et plâtre. Le paramètre P_r montre une différence significative en comparant un béton paille avec le mortier sciure de bois qui a la plus faible valeur. Ceci se traduit par un séchage plus rapide pour le mortier que le béton paille. La différence entre le béton à base de blé est très faible, elle est d'environ 0.8 % et 0.16 % respectivement dans le cas du plâtre et chaux. L'examen de cette comparaison donne une idée claire sur la différence du comportement hydrique du mortier et du béton paille mais ne permet pas de différencier les isolants.

Tableau 1. Paramètres de van Genuchten déterminés à partir des isothermes des différents matériaux

| | P_r | n |
|------------------------|----------|------|
| Mortier sciure de bois | 3,40E-04 | 1,17 |
| Orge chaux (OC) | 3,83E-03 | 1,17 |
| Blé chaux (BC) | 5,40E-03 | 1,2 |
| Blé plâtre (BP) | 6,0E-03 | 1,32 |
| Orge plâtre (OP) | 1,4E-02 | 1,38 |

4. Conclusion

Les résultats présentés dans cet article ont permis de montrer la forte sensibilité du comportement thermique des différents isolants et de l'enduit à la teneur en eau. Cette étude constitue une première étape importante pour la prise en compte de l'influence de l'humidité sur les propriétés de transfert de chaleur dans la modélisation du couplage hygrothermique à l'échelle d'une paroi ou d'un bâtiment. La comparaison des propriétés hydriques via les isothermes de sorption a mis en évidence une hystérésis importante pour les différents matériaux sauf pour le composite à base de plâtre. Les paramètres de Van Genuchten confirment un séchage rapide de l'enduit contrairement aux différents isolants. Cependant c'est un paramètre à prendre en compte lors de la mise en œuvre de l'enduit pour éviter son séchage avant son adhérence à son support. La variété de la paille n'a pas une influence significative sur le comportement hygrothermique des matériaux composites.

5. Bibliographie

- [BAR 14] Barclay M., Holcroft N., Shea A.D. « Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp-lime buildings », *Building and environment*, vol. 80, 2014, p. 204-212.
- [BAR 13] Barreira E., De Freitas V. P., « Experimental study of the hygrothermal behaviour of external thermal insulation composite system (ETICS) », *Building and environment*, vol. 63, 2013, p. 31-39.
- [BEL 13] Belayachi N., Bouasker M., Hoxha D., Al-Mukhtar M., « Thermo-Mechanical behaviour of an innovant straw lime composite for thermal insulation applications », *Applied Mechanics and Materials*, vol. 390, 2013, p. 542-546.
- [BIL 08] Bilba K., Arsene M. A., « Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites », *Composites: Part A*, vol. 39, 2008, p. 1488-1495.
- [BOU 14] Bouasker M., Belayachi N., Hoxha D., Al-Mukhtar M., « Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications », *Materials*, vol. 7, 2014, p. 3034-3048.
- [COL 14] Collet F., Pretot S., « Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall », *Building and environment*, vol. 82, 2014, p. 459-466.
- [EVR 14] Evrard A., Flory-Celini C., Claeys-Bruno M., De Herde A. « Influence of liquid absorption coefficient on hygrothermal behaviour of an existing brick wall with lime-Hemp plaster », *Building and environment*, vol. 79, 2014, p. 90-100.
- [GEN 80] Van Genuchten M. Th., « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils », *Soil Science society of America Journal*, vol. 44, 1980, p. 892-898.
- [GUI 15] Guizzardi M., Derome D., Vonbank R., Carmeliet J. « Hygrothermal behaviour of a massive wall with interior insulation during wetting », *Building and environment*, vol. 89, 2015, p. 59-71.
- [HEJ 12] Hejazi S. M., Sheikhzadeh M., Abtahi S. M., Zadhoush A. « A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers », *Construction and building materials*, vol. 30, 2012, p. 100-116.
- [HOX 12] Hoxha D., Ungureanu V. N., Belayachi N., D D-P., Thevard J-B. « Hydromechanical properties of some mortars used in some ecologic construction techniques », *Advanced Materials Research*, vol. 587, 2012, p. 6-10.
- [LEL 14] Lelievre D., Colinart T., Glouannec P., « Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses », *Energy and Buildings*, vol. 84, 2014, p. 617-627.
- [MAU 11] Mauroux T., Impact du séchage sur les propriétés d'adhérence entre un mortier et un support-Influence de l'adjuvantation par des éthers cellulose, Thèse de doctorat, Université de la rochelle, 2011.
- [RYU 14] Ryu S. H., Moon H. J., Kim J. T., « Evaluation of the influence of hygric properties of wallpapers on mould growth rates using hygrothermal simulation », *Energy and Buildings*, vol. xx, 2014, p. xx-xx.
- [SIL 11] Silva de Andrade F., Mobasher B., Soranakom C., Toledo Filho R. D., « Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites », *Cement & Concrete composites*, vol. 33, 2011, p. 814-823.