

Matériaux

DE L'EXPÉRIMENTATION À LA MODÉLISATION DES PROPRIÉTÉS HYGROTHERMIQUES DE PAROIS ISOLÉES EN PAILLE

Arnaud LOUIS¹, Arnaud EVRARD², Benjamin BIOT³, Luc COURARD¹, Frédéric LEBEAU¹
¹ Université de Liège, ArGenCo, GeMMe, Liège, Belgique & Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech,
 Unité de mécanique et construction, Gembloux, Belgique
² Université catholique de Louvain, Architecture et Climat, Louvain-la-Neuve, Belgique
³ Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable, Namur, Belgique

1. INTRODUCTION

Le marché de la construction en paille est en plein essor mais reste pénalisé par les préjugés et le manque de connaissances sur le matériau. Actuellement, ce mode constructif est plus souvent le fait d'une auto-construction non recensée, rendant difficile la tâche d'une estimation du nombre de bâtiments en paille. Entre 2007 et 2010, l'association française « Empreintes » annonce, suite à l'aboutissement d'une vaste enquête, l'existence de 691 bâtiments construits en paille dans le patrimoine bâti français¹. D'autres acteurs de la construction en paille annoncent de 2000 à 3000 bâtiments en paille à la fin 2012 [BOU 09]. Bien que ces chiffres s'avèrent difficilement

vérifiables, ils pourraient être justifiés par l'engouement pour ce mode constructif en France ; en témoignent, entre autres, le récent test de résistance au feu d'une paroi en paille par le CSTB² et la publication des règles professionnelles de la construction en paille visant à renforcer et à réglementer l'usage du ballot de paille dans la construction [FLO 12].

En Belgique, la construction en paille est à ses premiers pas. Des projets de recherche régionaux voient le jour, notamment le projet aPROpaille qui vise à améliorer, par une approche scientifique, les connaissances générales sur le comportement hygrothermique de mur dont l'isolation est principalement réalisée en paille. Dans ce projet, outre une phase de caractérisation des propriétés hygrother-

¹ <http://empreinte.asso.fr/lenquête-paille>. Consulté le 02 mars 2013.

² http://www.lemoniteur.fr/media/FICHIER/2010/02/22/FICHIER_2010_02_22_1059781.pdf Consulté le 02 mars 2013.

miques de matériaux naturels, des modélisations sont réalisées et comparées à des monitorings complets réalisés sur 3 bâtiments. L'ensemble de ces données sont analysées et compilées pour permettre, *in fine*, d'élaborer des vadémécums qui devraient permettre à toute personne intéressée – agriculteur, maître d'ouvrage, architecte ou particulier – de mieux comprendre les exigences de ce type de constructions en termes de matériaux.

D'un point de vue économique, à niveau d'isolation équivalent, le coût de fabrication des parois à base de paille est inférieur au coût moyen du marché. Il faut cependant parler de prix équivalent à performance égale. Le prix devient encore plus intéressant lorsque l'on prend en compte l'inertie thermique, le bilan CO₂, le taux de COV,... C'est l'usage de matériaux naturels locaux qui est à l'origine de cet écart. En effet, on constate aujourd'hui que, dans le cas de bâtiments très bien isolés voire passifs, c'est l'énergie grise du matériau qui prend un poids important dans l'évaluation de l'impact environnemental global de la construction. Par rapport à un bâtiment utilisant des matériaux classiques, l'utilisation de matériaux naturels locaux permet de diminuer l'énergie grise de celui-ci [ESC 11].

À l'échelle régionale, les solutions de parois préfabriquées à base de paille présentent deux enjeux économiques majeurs :

- le standard de performance énergétique de ce type de paroi permet d'envisager des constructions et/ou rénovations proches du standard passif et, en tout cas, nettement supérieures aux exigences énergétiques actuelles. Le recours à ces parois permet une réduction importante de la facture énergétique des bâtiments. Cela se traduit par une augmentation du pouvoir d'achat et/ou un accroissement des capacités financières des acteurs ;
- le caractère local et renouvelable des matériaux utilisés signifie que l'essentiel de la valeur marchande est une valeur ajoutée locale et donc une retombée économique en termes de main d'œuvre/expertise. À titre d'exemple, en France, la valorisation de la paille de céréale en construction est une réelle opportunité pour les agriculteurs. Ils vendent la paille à destination de la construction 3 à 5 fois plus cher que la paille à usage agricole. L'agriculture devient productrice d'agro-matériaux.

Ce projet, d'une durée totale de 24 mois, réunit l'Université de Liège, l'Université catholique de Louvain, la jeune entreprise « Paille-Tech » et l'Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable.

Les résultats de la campagne d'essais réalisée sur la paille et sur les enduits utilisés par la société Paille-Tech, ainsi que les tous premiers résultats de simulations effectuées sur base de ces paramètres hygrothermiques sont présentés ci-après.

2. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES MATERIAUX

Deux enduits, habituellement utilisés par la société Paille-Tech, ont été testés. Le premier, nommé enduit manufacturé, est composé de sable, de fibres de paille et d'une

argile provenant d'une argilière en Belgique. Le second est un mélange industriel composé de granulats et d'un mélange de sable et d'argiles fourni en sac. Des analyses minéralogiques et physiques ont été pratiquées sur ces deux enduits. Des compléments d'informations sur ces propriétés sont disponibles dans le document d'Evrard [EVR 12]. Les ballots de paille testés ont quant à eux été fournis par un agriculteur local spécialisé dans la fabrication de ballot pour la construction.

2.1. Enduits

La Figure 1 illustre les courbes granulométriques reconstituées à partir des résultats obtenus par tamisage en voie humide de la fraction grossière (>63µm) et par diffraction laser de la fraction fine (<63µm). On peut observer que la fraction fine de l'enduit manufacturé (30%) est plus importante que celle de l'enduit industriel (10%). Par ailleurs, la masse volumique sèche de l'enduit manufacturé est de 1752 kg/m³ contre 2051 kg/m³ pour l'enduit industriel.

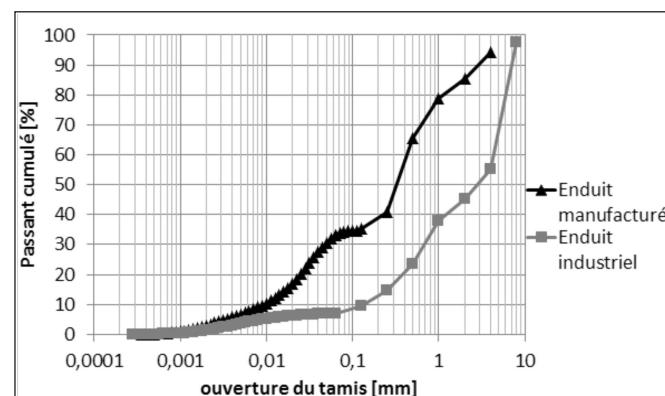


Figure 1. Courbe granulométrique cumulé de l'enduit industriel et de l'enduit manufacturé.

L'étude minéralogique de la fraction fine (<63µm) a été réalisée par diffraction au rayon X (DRX) après décarbonatation. L'analyse semi quantitative réalisée par la méthode de Rietveld (ordre de précision de 5%) indique que la partie fine de l'enduit manufacturé est composée de 35% de quartz, de 50% d'argile minéralogique et de 15% de plagioclase. Les argiles se présentent sous forme de kaolinite (13%), d'illite (42%) et de smectite (45%), cette dernière étant connue pour ses capacités « gonflante » en présence d'eau. La fraction fine de l'enduit industriel est quant à elle constituée de quartz (10%), de plagioclase (10%) et d'argiles (80%) dont la kaolinite (30%), l'illite (40%), et la chlorite ou vermiculite (10%). Seuls 10% de la fraction fine de cet enduit sont composés d'argile gonflante (chlorite ou vermiculite).

2.2. Ballot de paille

Les ballots testés sont des petits ballots de froment d'environ (36 x 46 x 80) cm³ caractérisés par une masse volumique sèche de 100 kg/m³. Ils ont été récoltés au moyen d'une presse roulante à cheval sur l'andain. Tous les ballots dont la teneur en eau après récolte était supérieure à 20% ont été écartés de cette étude.



3. PROPRIÉTÉS HYGROTHERMHIQUES

Les propriétés hygrothermiques ont été déterminées sur les matières brutes, dans la forme la plus proche possible de celle utilisée dans la construction. La majorité des paramètres définissant les propriétés hygrothermiques de la paille sont donc issus d'essais réalisés sur des ballots et non sur des brins isolés. La caractérisation des enduits a été réalisée sur des échantillons prélevés sur des murs existants réalisés par la firme Paille-Tech.

3.1. Porosité

La porosité totale est déterminée de manière indirecte à partir des mesures de masses volumiques apparente et réelle des échantillons. La masse volumique apparente a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à gaz sur des échantillons séchés et finement broyés.

La porosité totale de l'enduit manufacturé est de 34,2%, celle de l'enduit industriel de 24,8% et celle de la paille de 93%. Cette dernière valeur est légèrement supérieure à la valeur de 90% citée par Wihan [WIH 07]. La différence résulte d'une inévitable dispersion des propriétés des matériaux biosourcés (variétés différentes, milieu de culture différent,...) et des incertitudes de mesures (mesure exact du volume, représentativité de l'échantillon prélevé,...).

3.2. Isothermes d'adsorption

L'isotherme de sorption est une courbe donnant, pour une température donnée, la teneur en eau à l'équilibre d'un matériau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. Elle est obtenue en mesurant la masse à l'équilibre d'échantillons, préalablement séchés, placés dans un environnement dont l'humidité relative est stabilisée au moyen de solutions salines (par exemple saturées).

La Figure 2 illustre les isothermes d'adsorption des deux enduits à 23°C. On observe une différence significative entre les deux produits : l'enduit qui possède le plus de fines particules et qui est le plus riche en argile gonflante à une capacité de rétention d'eau plus importante que le second enduit. L'isotherme d'adsorption de la paille est présentée quant à elle à la Figure 3. On constate directe-

ment un rapport de 1 à 10 entre les isothermes d'adsorption de la paille et celles des enduits. Pour des raisons de stockage et de temps, il n'a pas été possible de déterminer l'isotherme sur des ballots entiers ; l'essai a donc été effectué sur des petits fagots d'environ 100 g. Globalement, cette isotherme est plus basse que celles montrées par Wihan mais reste proche des modèles relatifs aux matériaux naturels tel que le bois [WIH 07].

3.3. Perméabilité à la vapeur d'eau

L'essai consiste à déterminer la quantité de vapeur d'eau transmise à travers une surface par unité de temps, de pression et d'épaisseur.

Deux valeurs de perméabilité à la vapeur ont été déterminées : la première correspond à une humidité moyenne sèche (36% HR) et la seconde à une humidité moyenne humide (76,5% HR). Pour chaque enduit, quatre échantillons de (15 x 15) cm² ont été préparés. Après séchage et étanchéification des faces extérieures, ceux-ci ont été scellés sur des récipients en plastique contenant les solutions salines (Figure 4). Dans le cas de la paille, un ballot a été scellé dans un caisson au moyen d'une mousse polyuréthane qui est beaucoup plus étanche à la vapeur d'eau (Figure 5). La variation de masse de la solution saline est enregistrée en continu afin de connaître à tout moment la quantité d'humidité échangée entre l'air extérieur et l'air intérieur. La seule surface d'échange est le ballot de paille et la mousse polyuréthane. L'expérimentation est terminée et la valeur du R_0 de la paille est 1,34.

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau « sèche » de l'enduit manufacturé (10,2) est inférieur à celui de l'enduit industriel (18,5). La même tendance est observée pour le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau « humide » (13,1 pour l'enduit manufacturé et 18,4 pour l'industriel). La résistance à la diffusion de l'enduit manufacturé est, de plus, variable avec l'humidité moyenne, contrairement au second enduit. Cela corrobore les résultats mis en évidence par l'isotherme d'absorption. L'enduit manufacturé possède des pores plus fins que l'enduit industriel, pores qui se saturent à de plus faibles humidités relatives, modifiant ainsi sa perméabilité dans la gamme d'humidités étudiées.

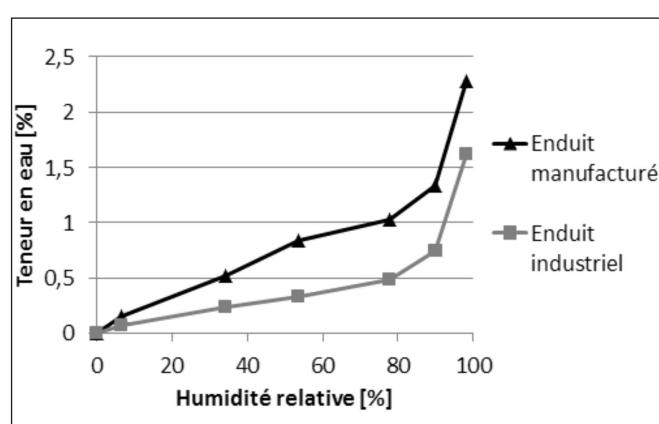


Figure 2. Isotherme d'adsorption à 23°C des enduits.

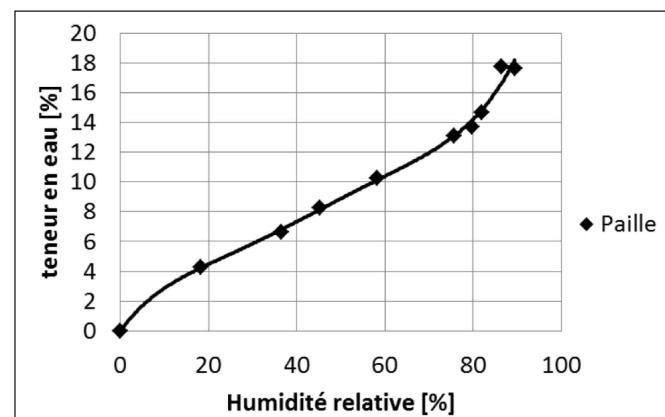


Figure 3. Isotherme d'adsorption à 23°C de la paille.



Figure 4. Essais de perméabilité à la vapeur sur enduits.



Figure 5. Essais de perméabilité à la vapeur sur un ballot de paille.

3.4. Absorption capillaire et absorption totale

L'absorption capillaire des enduits a été déterminée sur des échantillons secs, dont les faces latérales ont préalablement été rendues imperméables. Dans le cas des ballots, l'absorption capillaire a été évaluée sur la face inférieure et la face « chant », de manière à mettre en évidence une potentielle anisotropie.

L'absorption d'eau totale a été déterminée par immersion dans l'eau à pression atmosphérique jusqu'à masse constante. La valeur est utilisée pour estimer la teneur en eau du matériau à 100% d'humidité relative. Le Tableau 1 fournit les résultats des essais.

Les résultats obtenus lors de l'essai d'absorption capillaire sur l'enduit manufacturé sont très proches de ceux donnés par Straube [STR 03].

3.5. Chaleur massique

La chaleur massique de la paille a été déterminée par analyse thermodifférentielle (équipement : 2920 MDSC V2.6A) sur un échantillon broyé et séché. Dans le cas des enduits, un système de mesure alternatif a été utilisé. Après avoir broyé et séché à 105°C un échantillon, on le laisse reposer dans un incubateur contenant du gel de silice pour que l'échantillon reste sec jusqu'à ce que le corps soit à température ambiante. On l'introduit ensuite dans un thermo rempli d'eau chaude dont la température est mesurée au moyen de thermocouples. Par échange de chaleur,

après une durée très courte, l'eau et la matière solide atteignent la même température. Vu que le milieu est pratiquement adiabatique, la quantité de chaleur absorbée par le corps est égale à la quantité de chaleur cédée par l'eau. Connaissant la chaleur massique de l'eau, la masse et la température de celle-ci, la masse d'échantillon introduit, la température initiale de l'échantillon et finalement la température du mélange, nous trouvons facilement la chaleur massique du corps testé. La chaleur massique trouvée pour la paille est de 2426 J.kg⁻¹.K⁻¹. Cette valeur est légèrement supérieure à celle fournie par Wihan qui annonce 2000 J.kg⁻¹.K⁻¹ [WIH 07]. La chaleur massique de l'enduit manufacturé est de 820 J.kg⁻¹.K⁻¹ contre 750 J.kg⁻¹.K⁻¹ pour l'enduit industriel.

3.6. Conductivité thermique

La conductivité thermique des matériaux a été évaluée sur le produit dans sa forme finie au moyen d'une plaque chaude gardée de grande dimension, capable de tester des matériaux allant jusqu'à 45 cm d'épaisseur, mise au point à l'Unité de Mécanique et Construction de l'Université de Liège sur base des recommandations de la norme ISO 8302 (Figure 6).

Les essais sur la paille ont été effectués sur un ensemble de ballots séchés, provenant d'un même lot, mis en place dans un cadre d'1 m² (Figure 7). Vu l'anisotropie des ballots de paille, l'essai a été effectué selon les trois directions possibles (Figure 8). Dans le sens de la longueur du ballot, seules quelques galettes ont été prélevées et testées.

Paramètre	Absorption capillaire	Ballot (face chant)	Ballot (face inférieure)	Enduit manufacturé	Enduit industriel
Absorption capillaire	[kg.m ⁻² .s ^{-1/2}]	0,0125	0,0175	0,072	Essais en cours
Absorption totale	[%]	203	21,1	8,8	

Tableau 1. Résultats des essais d'absorption



Figure 6. Plaque chaude gardée à une éprouvette.



Figure 7. Cadre de paille testé sur la plaque chaude (1m x 1m).

L'épaisseur de l'échantillon est donc beaucoup plus faible que dans les deux autres directions. Les résultats présentés dans le Tableau 2 ont été mesurés à une température moyenne de 20°C, qui correspond à la température moyenne du local. Vu les épaisseurs importantes, toute autre température pourrait induire de trop grandes erreurs de mesure.

Orientation du flux	Epaisseur [cm]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
1	46 cm	0,0651
2	38 cm	0,082
3	10 cm	0,0461

Tableau 2. Conductivité thermique la paille en fonction de l'orientation du flux thermique.

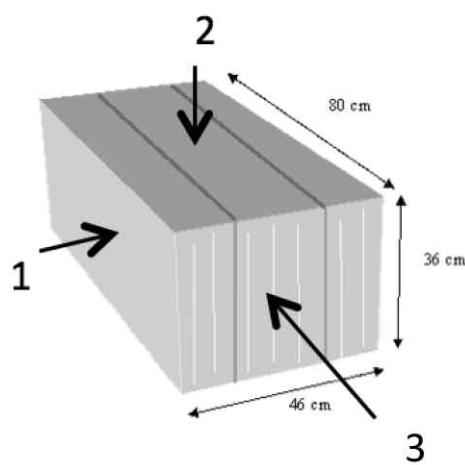


Figure 8. Orientation des flux thermiques.

La conductivité thermique la plus intéressante est obtenue sur les galettes de paille pour lesquelles tous les brins de pailles sont orientés perpendiculairement au flux de chaleur. Il s'agit du cas le plus favorable décrit dans l'agrément technique allemand [INS 06]. La très faible différence de conductivité obtenue dans les deux autres

directions peut s'expliquer par l'orientation aléatoire des fibres dans ce plan.

4. SIMULATION

La simulation a été réalisée au moyen du logiciel WUFI Pro 4.2 (Wärme Und Feuchtetransport Instationär) développé dans le cadre de la thèse de Künzel [KUN 95]. L'étude des parois en paille a été réalisée sur base des caractéristiques mesurées expérimentalement sur les matériaux (Tableau 3).

Trois types de parois ont été comparés :

- la paroi classique, commercialisée par la société Paille-Tech qui est composée, de l'extérieur à l'intérieur, de 16 mm d'Agepan, 46 cm de paille, 4 cm d'enduit industriel et 15 mm d'une couche de finition à la chaux,
- une paroi en parpaing de béton isolée par l'extérieur avec du polystyrène expansé graphité ayant le même coefficient de transfert thermique que la paroi en paille ($U=0,149 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}$),
- une seconde paroi en parpaing de béton isolée par l'extérieur avec du polystyrène expansé graphité, ayant cette fois un coefficient de transfert thermique réglementaire en Wallonie ($U=0,336 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}$).

Afin de faciliter la comparaison et étant donné que les parois Paille-Tech sont recouvertes d'un bardage, le soleil et la pluie ne sont pas considérés dans les diverses simulations.

Le climat belge d'Uccle (proposé par le logiciel) est utilisé comme condition extérieure. Le climat « normal » défini dans la norme EN 15026 est considéré comme condition intérieure. Les coefficients de surface pris en compte sont ceux imposés par la norme belge sur la performance énergétique des bâtiments [PEB 08].

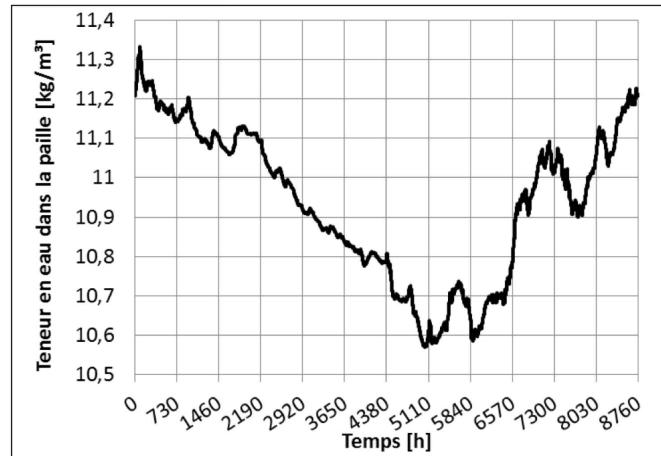
Pour s'assurer d'un comportement stable à long terme de la paroi en paille, il faut s'assurer que la teneur en humidité de la paille ne dépasse jamais 25 kg/m^3 , humidité pour laquelle une dégradation microbienne s'entame [WIH 07]. Le graphique de la Figure 9 permet de valider la paroi en paille de ce point de vue.



Paramètre	Unité	Ballot de Paille	Enduit industriel	Panneau de fibre de bois	Enduit à la chaux	PS expansé	Parping en béton
Masse volumique	[kg.m ⁻³]	100	2051	570*	1600**	17**	1450**
Porosité	[%]	93	24,8	50**	30**	95**	24**
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	[·]	2***	18,5	11*	10**	60**	10**
Absorption capillaire	[kg.m ⁻² .s ^{-1/2}]	0,0155	0,068*	0**	0,047**	0**	0,003**
Absorption totale	[%]	203,9	8,8	17,5**	15,6**	0**	13**
Chaleur massique	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	2426	750	2100**	850**	1500**	850**
Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,065	1*	0,09*	0,7**	0,032**	0,6**

Tableau 3 : Paramètres hygrothermiques utilisés lors des simulations.

* Données renseignées par des fournisseurs ; ** Données extraites de la banque de données Wufi ; *** [WIH 07]

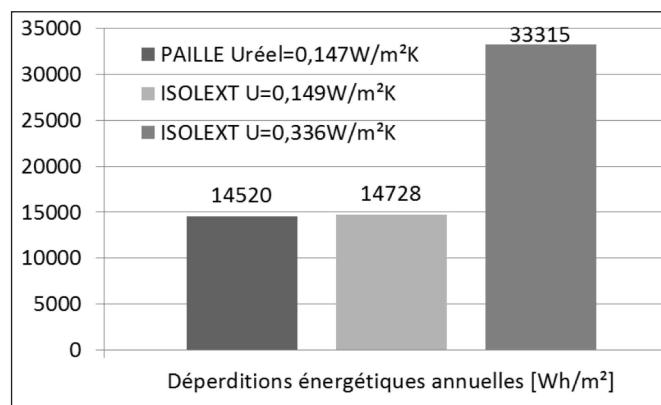
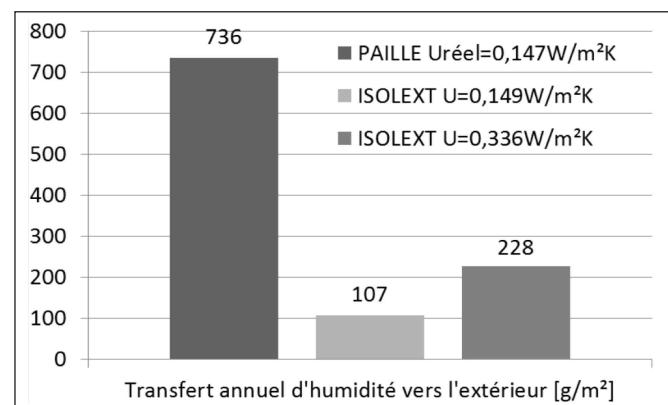
**Figure 9. Evolution annuelle de l'humidité dans la paille (paroi Paille-Tech).**

On peut ensuite comparer les déperditions de chaleur des 3 parois étudiées pour constater, qu'avec un $U_{réel}$ identique, ces déperditions de chaleur sont globalement identiques (Figure 10). Par contre, elles sont beaucoup plus importantes pour la troisième paroi. Ces constatations sont évidentes

mais permettent de conclure qu'une paroi en paille de ce type conduit à des économies d'énergie importantes qui vont bien au-delà de la réglementation en vigueur en Belgique. Enfin, il faut encore remarquer que l'analyse du flux d'humidité à travers la paroi montre que la paroi en paille permet d'évacuer une grande quantité d'humidité vers l'extérieur (Figure 11). Cette caractéristique est un avantage non négligeable des parois en paille, surtout dans le cadre de bâtiments à basse consommation énergétique pour lesquels la gestion de l'humidité représente un défi.

5. CONCLUSIONS

Ce document présente les résultats d'une campagne d'essais réalisés sur deux enduits à base d'argile et sur des ballots de paille issus d'une culture de froment. La campagne d'essais a mis en évidence une différence assez importante entre les deux enduits. Cette différence se marque sur leur composition minéralogique (20% d'argile gonflante pour l'enduit manufacturé contre 10% pour l'enduit industriel) mais aussi sur la quantité de fine composant l'enduit (30% dans le premier enduit contre 10% dans le second). Cette

**Figure 10. Déperditions énergétiques annuelles à travers les parois.****Figure 11. Flux d'humidité à travers les parois.**



différence de composition a une influence sur les propriétés hydriques des enduits (isotherme de sorption et perméabilité à la vapeur).

En ce qui concerne la paille, la majorité des paramètres définissant les propriétés hygrothermiques sont issus d'essais réalisés sur des petits ballots. Les résultats des essais de conductivité thermique réalisés sur une plaque chaude gardée, entièrement construite dans les laboratoires de l'ULg, dans le but de réaliser des essais sur des isolants de grandes dimensions, a permis de tester la conductivité thermique dans les 3 sens du ballots. La valeur la plus intéressante est obtenue lorsque le flux thermique est perpendiculaire aux galettes de paille. En procédant de la sorte, tous les brins de pailles sont perpendiculaires au flux de chaleur. Par contre, la différence de conductivité dans les deux autres directions est quasi nulle. Il apparaît donc que dans ce plan l'orientation des fibres au cœur du ballot est relativement aléatoire.

Finalement, les premières modélisations ont déjà montré que la construction en paille est une alternative compétitive qui conduit à des économies d'énergie importantes qui vont bien au-delà de la règlementation en vigueur en Belgique.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [BOU 09] DE BOUTER A., *Concevoir des bâtiments en bottes de paille*, Editions la Maison en paille, Eyrolles, 2009.
- [ESC 11] ESCADEILLA, G. *Matériaux de construction pour un développement durable*, Métamorphoses, Liège, 2011.

[EVR 12] EVRARD A., LOUIS A., BIOT B., DUBOIS S., « Moisture Equilibrium in Straw Bale Walls », *PLEA2012 – 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*, Lima, Pérou, 7-8 novembre 2012.

[FLO 12] FLOISSAC L., *Règles professionnelles de la construction en paille*, Réseau Français de la Construction en Paille, Editions Le Moniteur, 2012.

[INS 06] INSTITUT ALLEMAND DES TECHNIQUES DE LA CONSTRUCTION. « Agrément technique général : Isolant thermique en bottes de paille », Berlin, Allemagne, 2006.

[KUN 95] KÜNZEL H.M, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components – One- and Two-dimensional calculation using simple parameters, Thèse de doctorat, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Allemagne, 1995.

[PEB 08] PERFORMANCE ENERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS. [Internet], Portail de l'énergie en Wallonie, <http://energie.wallonie.be/fr/la-reglementation-peb.html?IDC=6232>

[STR 03] STRAUBE J., Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings, [Internet], EBNet. http://homegrownhome.co.uk/pdfs/Straube_Moisture_Tests.pdf

[WHI 07] WIHAN J., Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw, Thèse de doctorat, University of East London School, 2007.

REMERCIEMENTS

Ce projet est financé par le gouvernement de Wallonie (Belgique) dans le cadre programme mobilisateur 2011-2013 ERable (Efficacité Energétique et Energies Renouvelables).