

La paille parois performantes

Recherche **APROPAILLE**

*Vers une reconnaissance de la paille
comme matériau isolant dans la construction*

- Vadémécum 2 -



Avec le soutien de



Wallonie

APROPAILLE

*vers une reconnaissance de l'usage de la paille
comme matériau isolant dans la construction*

La paille - parois performantes

Vadémécum issu de la recherche « aPROpaille » - Appel à projet « ERable »,
sur base d'une subvention de la Région Wallonne dans le cadre d'un pro-
gramme de recherche d'intérêt général.

PARTENAIRES



UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN ARCHITECTURE & CLIMAT

DE HERDE André, Professeur
EVRARD Arnaud, Dr. Ingénieur Architecte
ROUCHE Sylvie, Infographiste



INSTITUT DE CONSEIL ET D'ÉTUDES EN DÉVELOPPEMENT DURABLE (ICEDD)

BIOT Benjamin, Architecte
KEUTGEN Gauthier, Ingénieur Civil Électricien



UNIVERSITÉ DE LIEGE (GeMME)

COURARD Luc, Professeur
LOUIS Arnaud, Ingénieur Civil des constructions



UNIVERSITÉ DE LIÈGE - GEMBLOUX (GxABT - UMC)

LEBEAU Frédéric, Professeur
LOUIS Arnaud, Ingénieur Civil des constructions



PAILLE-TECH SCRL

BONNERT Antoine, Architecte

AVEC LE SOUTIEN DE :



Wallonie

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
LE MONDE INFINIMENT PETIT DE LA PAILLE.....	11
NOTION DE BASE.....	12
PARAMÈTRES HYGROTHERMIQUES DES MATÉRIAUX	25
CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES.....	27
PROTOCOLE DE MESURES.....	37
CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BALLOT DE PAILLE	79
CONCLUSION.....	108
COMPOTEMENT HYGROTHERMIQUE DES PAROIS	111
DESCRIPTION DES PAROIS ÉTUDIÉES	112
CRITÈRES DE VALIDITÉ D'UN MUR EN PAILLE	115
EXPOSITION AUX PLUIES BATTANTES.....	116
TRANSFERT DE VAPEUR.....	121
PERFORMANCES THERMIQUES.....	125
CAPACITÉ DE RÉGULATION DE L'HUMIDITÉ INTÉRIEURE	126
CONFORT D'UN LOCAL	131
DESCRIPTION DES CAS ÉTUDIÉS	132
ÉVOLUTION DU TAUX DE CO ₂ À L'INTÉRIEUR.....	139
ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE.....	140
BESOIN EN CHAUFFAGE.....	145
INERTIE THERMIQUE ET CONFORT	147
CONCLUSION.....	150
MONITORINGS	153
DESCRIPTION DES PROJETS ANALYSES.....	154
SIMULATIONS ET ANALYSES	171
CONCLUSION.....	183

ANALYSE DE NŒUDS CONSTRUCTIFS.....	187
INTRODUCTION	188
IDENTIFICATION DES CAS	191
ANALYSE DES NŒUDS CONSTRUCTIFS.....	192
 ANALYSE DE CYCLE DE VIE.....	 247
CONCEPT ET DÉFINITIONS.....	248
LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA PRODUCTION D'UN BALLOT DE PAILLE UTILISÉ COMME CONSTITUANT DE PAROI DE CONSTRUCTION	251
ANALYSE DES RÉSULTATS DE COMPARAISON DE MATÉRIAUX ISOLANTS	254
ANALYSE DES RÉSULTATS DE COMPARAISON DE PAROIS	256
COMPARAISON INTERNATIONALE	263
CONCLUSION.....	264
FOCUS : L'EFFET « TAMPON » DE LA PAILLE	265
 APPROCHE ÉCONOMIQUE	 269
INTRODUCTION	270
HYPOTHÈSES	270
RÉSULTATS.....	272
CONCLUSION.....	276

Source photo de couverture : « Maison Van Soom, 2002 ».

Nous invitons le titulaire des droits d'auteur qui se reconnaîtrait –et qui n'a pu être identifié à ce stade malgré les meilleurs efforts déployés à cette fin– à prendre immédiatement contact avec l'utilisateur de façon à régulariser la situation (climat@uclouvain.be).

INTRODUCTION

En novembre 2011, un consortium rassemblant l'Université catholique de Louvain (Architecture et Climat), l'Université de Liège (GeMMe et UMC), l'Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable (ICEDD) et la jeune entreprise Paille-Tech est formé autour du projet de recherche «aPROpaille» financé par la DGO4 (Direction générale opérationnelle de l'Aménagement du territoire, du Logement, du Patrimoine et de l'Énergie) dans le cadre du programme ERable, organisé par le Service Public de Wallonie (DGO4 et DGO6, Direction Générale Opérationnelle de l'Économie, de l'Emploi et de la Recherche). Ce projet très complet a permis de déterminer les caractéristiques et performances des matériaux «terre» et «paille», de réaliser des simulations de comportement hygrothermique des parois en paille, de les comparer à des monitorings de bâtiments existants en paille, de réaliser une analyse de cycle de vie (ACV) de ce type de paroi... Outre la réalisation d'une plateforme Internet (www.apropaille.be) sur la filière belge, les principaux résultats de cette recherche ont été rassemblés fin 2015 dans trois vadémécums à destination d'un public large et varié. Ces vadémécums, dont le présent document en est la deuxième partie, ont pour but d'offrir à tout un chacun une information rigoureuse, claire et compréhensible, des avancées récentes de ce domaine pour favoriser le développement de la filière de la paille utilisée comme matériau isolant dans la construction.

Afin de permettre aux acteurs du monde de la construction de s'approprier les connaissances relatives à ce matériau, ce vadémécum s'intéressera aux parois que les ballots de paille permettent de réaliser et à leurs performances. C'est le vadémécum le plus technique. Il commence par l'analyse microscopique des brins de paille pour ensuite décrire l'ensemble de propriétés hygrothermiques des ballots et des enduits en terre qui leur sont souvent associés. Une attention particulière est donnée à l'analyse de la conductivité thermique des ballots de paille. Un troisième chapitre analyse le comportement hygrothermique dynamique de différentes parois en paille et identifier les points clefs de leur performances en terme d'isolation, d'inertie thermique, de régulation de l'humidité et de leur validité à longs termes.

Le quatrième chapitre aborde ces thématiques, mais du point de vue du confort des occupants, de l'évolution de l'ambiance intérieure et des consommations d'énergie. Le cinquième chapitre détaille l'analyse du résultat des trois monitorings effectués dans le cadre de la recherche. Le sixième chapitre présente un ensemble de nœuds constructifs et donne la valeur à utiliser pour le calcul des ponts thermiques. Le septième chapitre présente l'analyse du cycle de vie réalisée dans le cadre de la recherche en identifiant l'influence de différents scénarios. Le dernier chapitre fait une brève analyse économique de différents systèmes constructifs.

LE MONDE INFINIMENT PETIT DE LA PAILLE

L'histologie végétale est définie comme étant la partie de la biologie végétale qui étudie la structure microscopique des tissus végétaux. Loin d'être complet, le chapitre suivant fournit quelques notions d'organisation cellulaire au sein des tissus végétaux. Il est important de bien comprendre comment s'organisent les cellules au sein d'un brin de paille pour, in fine, bien comprendre et expliquer les propriétés hygrothermiques d'un ballot de paille puisque, bien entendu, les deux échelles sont intimement liés.

Même si les rappels théoriques sont génériques, l'étude microscopique s'intéresse à l'organisation cellulaire de plantes appartenant à la famille des graminées et plus particulièrement à trois variétés de céréale (le froment normal et bio, l'escourgeon et le seigle). Il permet, entre autre, de se faire une idée de la variation de l'organisation des cellules et des capillaires d'un brin de paille avec la variété. Il permet également de se faire une idée de l'évolution de l'organisation cellulaire sur la hauteur de ce brin.

NOTION DE BASE

Sur le plan microscopique, la paille est constituée par un assemblage de cellules de nature différente selon leur localisation. Lorsque l'on observe chaque type de cellule, on constate qu'elles ont subi des adaptations structurales qui leurs permettent de réaliser des fonctions spécifiques. Dans certaines cellules, les traits distinctifs se trouvent dans la matière que contient la cellule végétale (le protoplasme), dans d'autres, ce sont les modifications de la paroi cellulaire elle-même qui déterminent le type de fonctionnement. On rencontre principalement 5 types de cellules :

Les cellules parenchymateuses : Ce sont les moins différenciées de toutes les cellules végétales. La plupart de ces cellules ne possèdent pas de paroi cellulaire secondaire ; leur paroi cellulaire primaire demeure mince et flexible, même lorsque la cellule a atteint la maturité. La majeure partie du métabolisme de la plante s'effectue dans ces cellules.

Les cellules du collenchyme : Elles fournissent un support, une structure, aux jeunes parties de la plante. Comme les cellules de parenchyme, les cellules du collenchyme ne possèdent pas de paroi cellulaire secondaire. Par contre, la paroi cellulaire primaire d'épaisseur variable offre plus de robustesse que celle des cellules parenchymateuses grâce à un supplément de cellulose (et non grâce à un agent durcisseur tel que la lignine). Elles assurent dès lors un soutien à la plante tout en permettant sa croissance, elles s'allongent en même temps que les tiges et les feuilles.

Les cellules du sclérenchyme : Elles concourent également au soutien de la plante. Leur paroi secondaire épaisse constituée de lignine leur assure une plus grande rigidité que les cellules du collenchyme. Elles apparaissent dans des régions de la plante où la croissance a cessé, car elles ne peuvent s'allonger après leur maturité. Un grand nombre d'entre elles perdent leur protoplasme à maturité. La cellule meurt alors et lègue sa paroi rigidifiée comme charpente pour la plante.

Les trachéides et éléments de vaisseau : Il s'agit de cellules spécialisées dans la circulation de la sève brute (eau + ions). Ces cellules allongées composent les longues chaînes d'éléments qui forment les vaisseaux du xylème. Les trachéides sont de longues cellules minces aux extrémités fuselées et en cul-de-sac. La sève brute circule d'une cellule à l'autre par l'intermédiaire de ponctuations qui traversent la paroi. Les trachéides

possèdent une paroi secondaire durcie par la lignine qui participe au soutien de la plante. Les éléments de vaisseau sont généralement plus larges et plus courts que les trachéides. Ils ont également une paroi plus mince et des extrémités moins fuselées. Comme pour les trachéides, les éléments de vaisseau comportent des ponctuations qui sont ouvertes pour permettre à la sève brute de circuler librement.

Les cellules criblées : Il s'agit de cellules spécialisées dans la circulation de la sève élaborée (saccharose, acides aminés, hormone, ions...). Le phloème des Angiospermes transporte la sève à travers une succession de cellules criblées formant un tube. Contrairement aux cellules qui assurent la circulation de la sève brute, les cellules criblées restent vivantes à leur maturité.

Les différentes cellules peuvent se classer en trois catégories : les tissus de revêtements, les tissus conducteurs (qui nous intéresse particulièrement) et les tissus fondamentaux. Les tissus de **revêtement ou épidermes**, se composent normalement d'une seule couche de cellules serrées qui recouvrent et protègent toutes les parties d'un jeune plant en contact avec le milieu extérieur. L'épiderme des feuilles et de la plupart des tiges s'est adapté à la vie terrestre en sécrétant une couche de substance cireuse appelée **cuticule**, ce qui permet à la plante de conserver l'eau. Cette barrière n'est interrompue que par des complexes pluricellulaires épidermiques, **les stomates**, dont le centre montre une ouverture, **l'ostiole**. Un stomate permet les échanges gazeux entre l'air ambiant et les cellules photosynthétiques. Il ouvre aussi un passage pour l'élimination d'un trop-plein d'eau.

Le xylème et le phloème répartis dans toute la plante constituent **les tissus conducteurs** qui assurent le transport des nutriments et le soutien de la plante. Ces tissus se prolongent dans toute la tige et forment plusieurs îlots de conduit appelés **faisceaux libéroligneux**. Ils peuvent être situés en périphérie de la tige ou distribués inégalement dans toute la tige. Un faisceau libéroligneux indique la présence du phloème et la présence du xylème (contenant de la lignine). Chaque faisceau libéroligneux est entouré de tissus fondamentaux (figure 1). En effet, **les tissus fondamentaux** comblent l'espace entre les tissus de revêtement et les tissus conducteurs. Au nombre de ces tissus figurent le parenchyme, le collenchyme et le sclérenchyme. La photosynthèse, l'entreposage et le soutien font partie des fonctions assurées par les tissus fondamentaux.

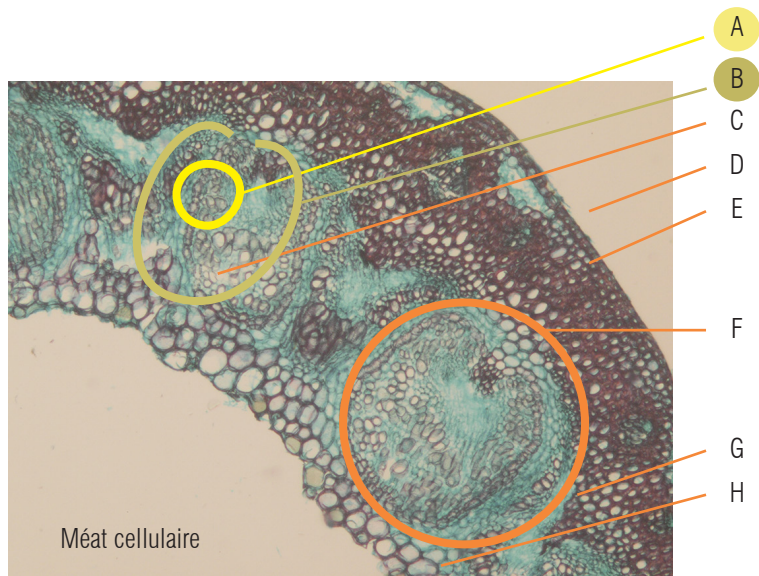


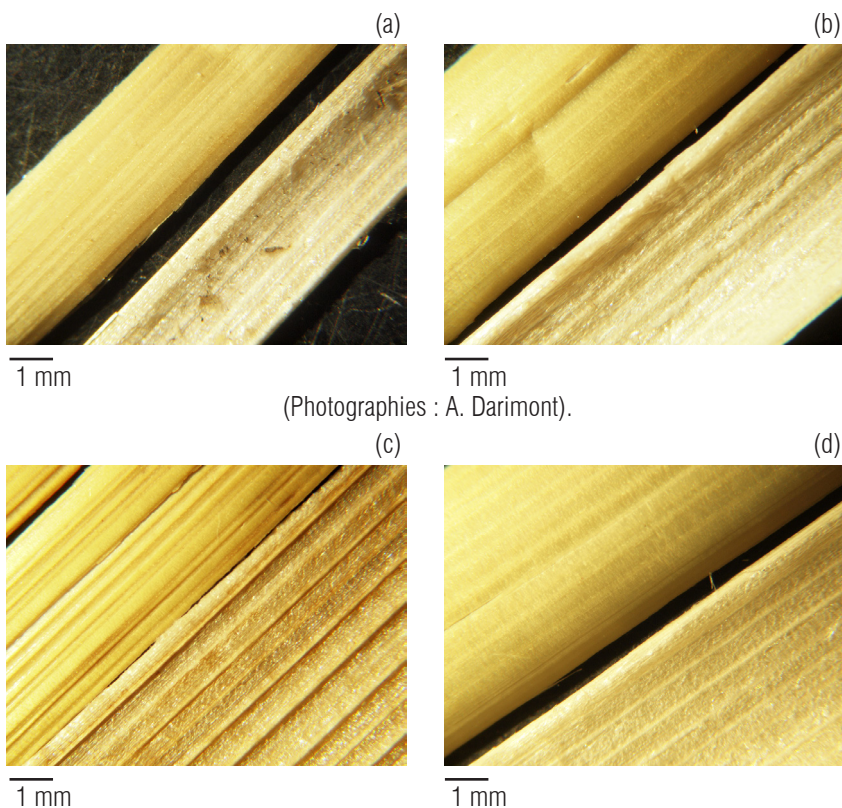
Fig. 1 : Organisation des tissus primaires d'une tige de seigle, coloration safranine-vert lumière.

- A : phloème (tissu conducteur de la sève élaborée) ;
- B : xylème (tissu conducteur de la sève brute) ;
- C : vaisseau ;
- D : épiderme ;
- E : cellule du sclérenchyme (coloré en rouge) ;
- F : faisceau libéroligneux contenant le xylème et le phloème ;
- G : cellule parenchymateuse (coloré en vert) ;
- H : cellule du collenchyme).

Analyse longitudinale

Pour rappel, la paille est constituée par la tige et l'épi (ou rachis) à son sommet ; elle a pour rôle de porter les organes reproducteurs et les feuilles, ainsi que le système de transport de l'eau et des nutriments. La tige est un cylindre creux, constituée de couches concentriques et divisée en nœuds et entre-nœuds sur lesquels se développent les feuilles. Dans un premier temps des images longitudinales de brins de paille ont été prises au microscope classique. Vu que le terme « paille » est

généralement utilisé pour désigner les tiges et les feuilles sèches, coproduits de la récolte du grain, nous avons veillé, pour chaque variété, à prendre des images des tiges (figure 2) et des feuilles (figure 3).



(Photographies : A. Darimont).

Fig. 2 : vue longitudinale de la face interne et externe de brins de paille :

(a) : froment normal, (b) : froment bio, (c) : seigle, (d) : escourgeon

(Photographies : A. Darimont).

Comme on peut le constater, il est difficile sur base de ces simples images de distinguer les différentes espèces analysées. Seul le brin de seigle semble se distinguer des deux autres par la présence de lignes verticales plus foncées sur la face interne et externe du brin. Pour toutes les variétés, il est possible d'observer que le rendu externe des brins est relativement lisse comparé à la surface intérieure qui elle est beaucoup plus rugueuse.

Cette constatation est également valable pour les feuilles (figure 3) même si globalement elles apparaissent comme étant plus rugueuse.

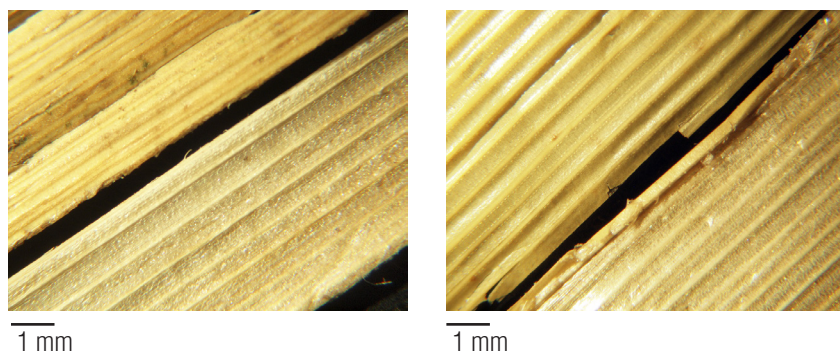
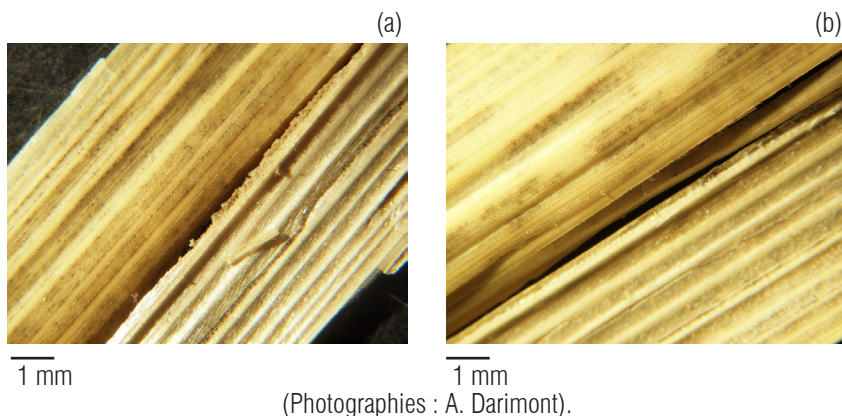


Fig. 3 : vue longitudinale de la face interne et externe de feuilles : (a) : froment normal, (b) : froment bio, (c) : seigle, (d) : escourgeon.
(Photographies : A. Darimont).

Analyse de coupes transversales

Afin de mettre en évidence l'organisation cellulaire des différentes variétés de céréales, des coupes transversales à différents niveaux de la tige ont été réalisées sur les 3 variétés céréalières disponibles. Les microtomes obtenus par cryostat ont une épaisseur moyenne de $30\ \mu\text{m}$. Les différents échantillons ont subi une double coloration «safranine - vert lumière».

La double coloration a été réalisée dans le but de faciliter la différenciation des éléments anatomiques. La safranine colore les tissus lignifiés et cutinisés en rouge et le vert-lumière colore la cellulose des parois cellulaires en vert. Cette coloration permet de facilement différencier les cellules parenchymateuses (cellules vivantes apparaissant en vert) des cellules du collenchyme et du sclérenchyme (cellules mortes qui apparaissent en rouge). Des coupes ont été réalisées sous le nœud (zone terminale d'un entre-nœud) et au-dessus du nœud (zone initiale d'un entre-nœud) afin de mettre en évidence l'évolution organisationnelle des cellules sur la hauteur d'un brin.

Vue générale

La figure 4 illustre une vue générale de coupes réalisées dans la partie initiale d'un entre-nœud. Volontairement, les trois variétés céréalières sont analysées en parallèle afin de pouvoir mettre en évidence une éventuelle différence.

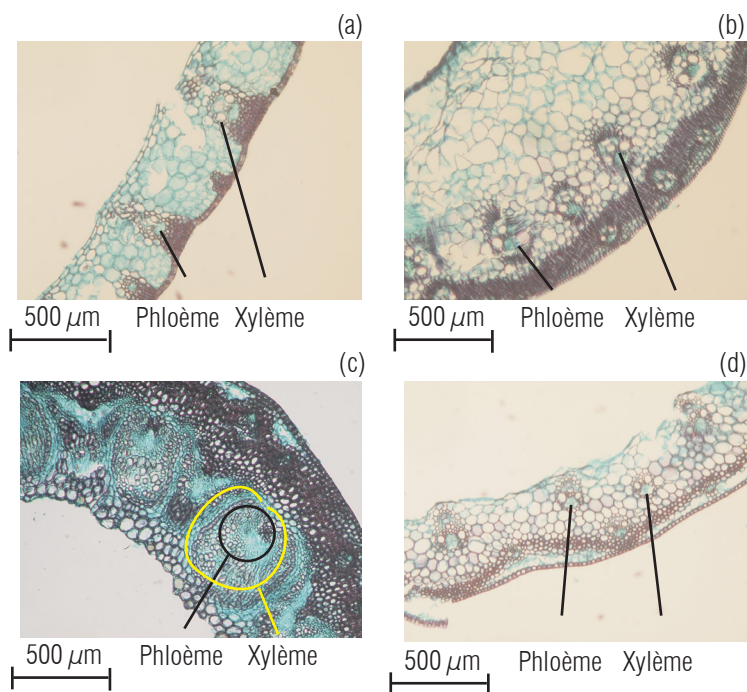


Fig. 4. Coupe générale d'une tige de céréale (coupe au-dessus d'un nœud) :
(a) : froment normal, (b) : froment bio, (c) : seigle, (d) : escourgeon.

Sur chaque image de la figure 4, on remarque un ensemble de faisceaux libéroligneux se démarquant assez facilement des autres tissus fondamentaux. Le xylème de ces faisceaux a généralement la forme d'un fer à cheval qui vient entourer le phloème (ceci est plus flagrant pour la coupe réalisée sur la tige de seigle). On peut noter que pour les trois variétés, les faisceaux sont pauvres en sclérenchyme, il ne joue donc pas le rôle de soutien. Celui-ci est assuré par un long tissu de sclérenchyme situé sur le bord extérieur des coupes, plus précisément dans le cortex.

Dans un second temps, il est intéressant de regarder comment évolue l'organisation cellulaire sur la hauteur de l'entre nœud. Pour ce faire, la figure 5 présente les coupes réalisées sur la partie terminale d'un entre-nœud.

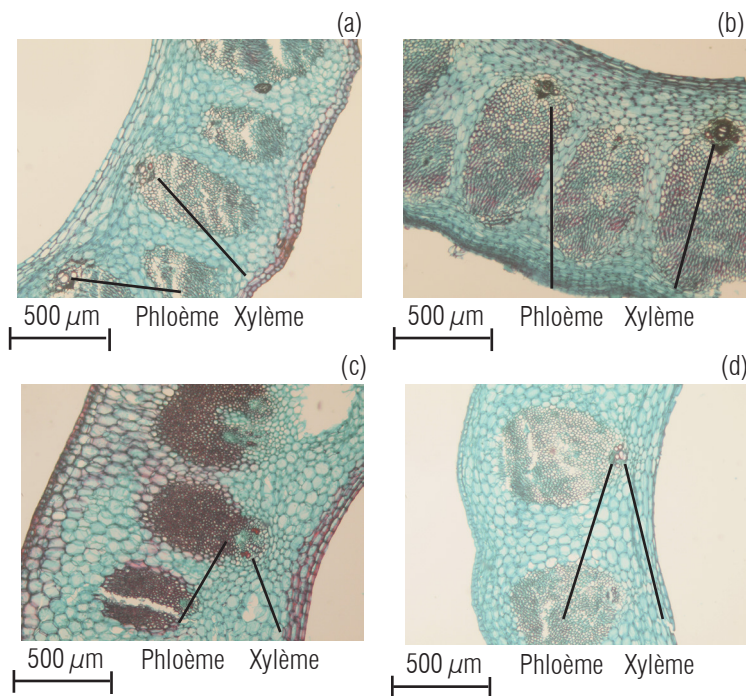
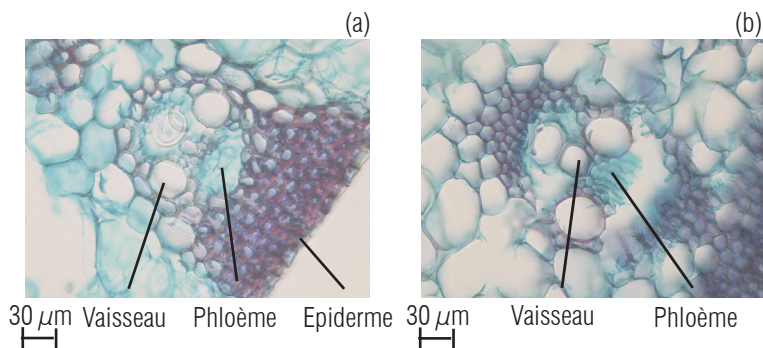


Fig. 5. Coupe générale d'une tige de céréale (coupe au-dessous d'un nœud) :
 (a) : froment normal, (b) : froment bio, (c) : seigle, (d) : escourgeon.

Sur toutes les images de la figure 5, on constate que l'organisation des tissus au sein de la tige s'est fortement modifiée par rapport à l'organisation initiale de la figure 4. Dans la partie naissante de l'entre-nœud, le soutien de la tige était assuré par un long tissu de sclérenchyme situé dans le cortex de la tige c'est-à-dire sur le pourtour extérieur. Ici ce tissu a disparu. Par contre, sur chaque coupe, on peut observer un grand tissu de sclérenchyme situé sur le bord extérieur de chaque faisceau (cellules mortes fortement serrées apparaissant en rouge). Désormais c'est donc les faisceaux-libéroligneux qui jouent le rôle de soutien en plus du rôle de transport.

D'une manière générale, on remarque une grande similitude dans l'organisation des cellules au sein des diverses variétés. On peut toutefois noter que, suite à l'analyse des diverses coupes disponibles, nous avons dénombré une quantité moins importante de faisceaux libéroligneux sur les coupes réalisées à partir d'escourgeon.

De par leur rôle de transporteur de sève, on pourrait assimiler les vaisseaux à de longues pailles traversant de part en part une tige. Le nombre et le diamètre de ces vaisseaux vont clairement avoir une influence sur les propriétés hygrothermiques des ballots de paille. Pour chaque variété, des agrandissements de faisceaux libéroligneux ont donc été réalisés. Comme précédemment, la figure 6 reprend les images des faisceaux situés sur la partie initiale d'un entre-nœud et la figure 7 reprend les images réalisées sur la partie terminale de celui-ci.



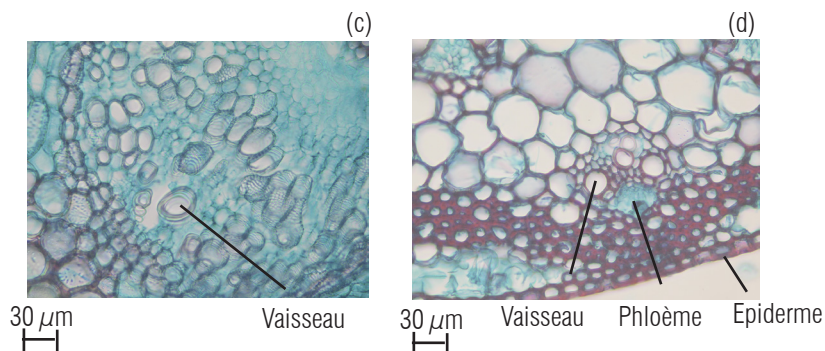


Fig. 6. Agrandissement sur un faisceau libéroligneux (coupe au-dessus d'un nœud) :
(a) : froment normal, (b) : froment bio, (c) : seigle, (d) : escourgeon.

Grâce aux agrandissements, on peut noter que le xylème du froment (normal et bio) est composé de vaisseaux de diamètres proches de 30 μm . Les diamètres des vaisseaux de l'escourgeon apparaissent, quant à eux, comme étant plus faibles. Finalement, le seigle se différencie par le nombre élevé de vaisseaux dont certains approchent les 30 μm de diamètre.

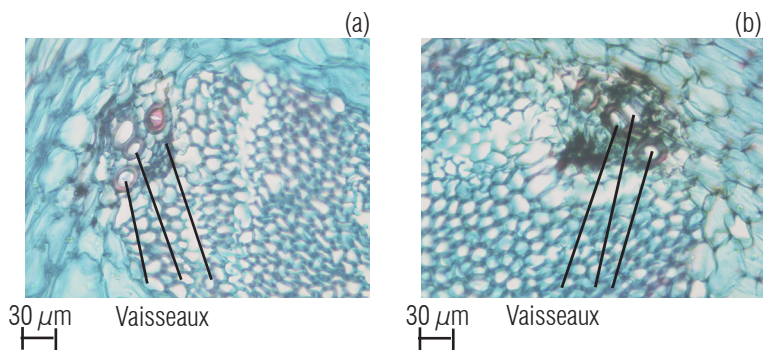


Fig. 7. Agrandissement sur un faisceau libéroligneux (coupe au-dessous d'un nœud) :
(a) : froment normal, (b) : froment bio.

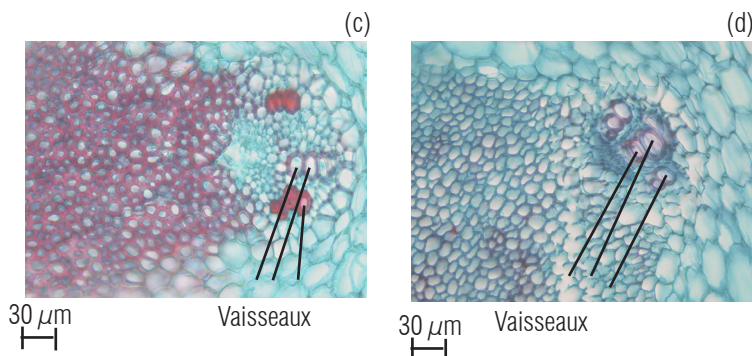


Fig. 8. Agrandissement sur un faisceau libéroligneux (coupe au-dessous d'un nœud) : (c) : seigle, (d) : escourgeon.

D'une manière générale, sur les figures 7 et 8, les cellules plus petites et serrées apparaissant sur les bords des images sont des cellules de sclérenchyme. Les tâches vertes claires ou vertes foncées au centre des images mettent en évidence le phloème. Le reste du faisceau libéroligneux est constitué par le xylème qui comprend les éléments de vaisseau et quelques cellules parenchymateuses. En comparant les figures 6 et figures 7 et 8, on constate directement une évolution dans le diamètre moyen des vaisseaux. Plus les coupes se rapprochent de la partie terminale d'un entre-nœud, plus le diamètre des vaisseaux diminue. En effet dans les coupes sous le nœud, on observe des vaisseaux de diamètre globalement plus petit que 30 µm.

Conclusion

La comparaison des coupes longitudinales et des coupes transversales réalisée à deux niveaux sur des brins de paille provenant de 3 variétés céréalières (seigle, escourgeon, froment normal et bio) a permis de constater que l'organisation cellulaire au sein de ces diverses variétés était fortement semblable. En dessous du nœud (partie terminale d'un entre-nœud), les sections étaient caractérisées par un nombre important de faisceaux libéroligneux riches en tissus du sclérenchyme. Ces tissus apportent la rigidité aux tiges. Au-dessus du nœud (début de l'entre-nœud), les faisceaux libéroligneux sont beaucoup plus petits et pauvres en sclérenchyme. Le soutien est principalement apporté par des cellules sclérenchymateuses appartenant au cortex. On constate également une évolution dans le diamètre des vaisseaux sur la hauteur des tiges.

Dans les nouvelles parties (coupe au-dessus d'un nœud), il n'est pas rare d'observer des vaisseaux d'un diamètre proche de 30 μm . Par contre plus on s'éloigne du nœud plus le diamètre diminue. En effet dans les coupes sous le nœud, on observe des vaisseaux dont le diamètre est globalement plus petit.

Dans le cadre de l'étude thermique des ballots de paille, c'est principalement le nombre et la taille des vaisseaux qui vont être importants. En effet, de par leur rôle de transporteur de sève, ces longues cellules continues forment des tuyaux traversant de part en part des sections de brins de paille dans le sens de leur longueur. Les autres cellules quant à elles ont un volume fini. Des parois cellulaires délimitent parfaitement leur volume. On peut donc les assimiler à des pores occlus. Plus le nombre de vaisseaux et/ou la taille de ceux-ci est important, plus les propriétés thermiques d'un ballot de paille risquent d'être anisotropes (différentes dans chaque direction). En effet, considérons des brins de paille parfaitement alignés et parallèles au flux de chaleur, en plus d'un transfert par conduction presque rectiligne dans la matière des vaisseaux, un phénomène de convection peut y apparaître. Par contre, si le flux de chaleur est parfaitement perpendiculaire aux vaisseaux, la chaleur transmise par conduction devra parcourir un chemin beaucoup plus long, ce qui engendre une meilleure performance thermique.

Sur base des diverses photos analysées lors de cet étude, il semblerait que l'escourgeon ait un peu moins de faisceaux libéroligneux que les deux autres variétés céréalières. De plus, celui-ci possède des vaisseaux de diamètres globalement inférieurs aux diamètres des vaisseaux des autres variétés. Il se pourrait donc que les propriétés thermiques d'un ballot d'escourgeon soient plus constantes. Les ballots de seigle et/ou de froment par contre devraient être plus anisotropes et leurs propriétés fonction de l'orientation de la paille (anisotropie plus marquée pour le ballot de seigle que pour le ballot de froment). Il faut cependant faire attention au fait que les différences restent minimes et l'échantillonnage est très restreint. L'analyse de la conductivité thermique apparente des ballots est détaillée dans le chapitre suivant.

PARAMÈTRES HYGROTHERMIQUES DES MATÉRIAUX

Le marché de la construction en paille est en plein essor mais reste malheureusement pénalisé par les préjugés et le manque de connaissance sur le matériau. L'objet de ce chapitre est d'apporter des réponses concrètes sur les propriétés hygrothermiques des matériaux étudiés dans le cadre du projet aPROpaille ainsi que sur les techniques employées pour les déterminer.

Volontairement, pour rendre ces diverses informations rapidement accessibles, les protocoles d'essais ainsi que les résultats des campagnes de mesures sont présentés sous forme de fiches. En effet, l'étude étant limitée aux matériaux utilisés par Paille Tech et, conscient de l'infinité de recettes d'enduit ou de ballots différents qu'il existe au monde, les protocoles utilisés pour la détermination de chacune des propriétés ont été explicités. En plus de rendre les résultats de mesure plus transparents, ces fiches pourraient profiter à toute personne cherchant des informations ou des techniques pour caractériser d'autres enduits ou d'autres ballots. Ce chapitre débute par trois fiches synthétiques qui synthétisent l'ensemble des propriétés nécessaires à la modélisation du comportement hygrothermique de ces matériaux naturels.

CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES

Description générale



Ce premier enduit est constitué d'un mélange de fibres végétales (brins de paille), d'argile provenant de l'argillère Hins et de sable à raison de 3 volumes d'argile pour 5 volumes de sable et 3 volumes de paille. Cet enduit est réalisé de manière artisanale, il a été utilisé dans les premières parois Paille-Tech.

La figure 8 illustre les courbes granulométriques reconstituées à partir des résultats obtenus par tamisage en voie humide de la fraction grossière ($> 63 \mu\text{m}$) et par diffraction laser de la fraction fine ($< 63 \mu\text{m}$). On peut observer une importante fraction de fines particules (30 %).

L'étude minéralogique de la fraction fine ($< 63 \mu\text{m}$) 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 cet enduit est composée de 35 % de quartz, de 50 % d'argiles minéralogiques 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 « gonflantes » en présence d'eau.

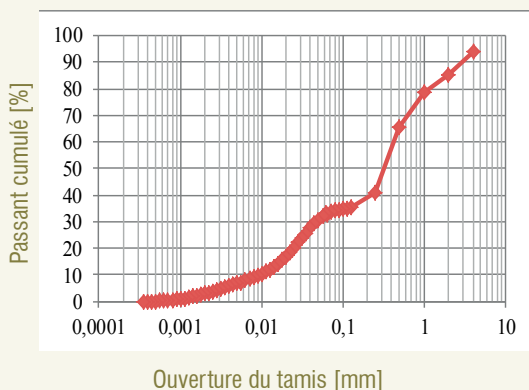


Fig. 9 : Courbe granulométrique complète de l'enduit n° 1.

Propriétés hygrothermiques

Masse volumique sèche	ρ_s	[kg.m ⁻³]	1 752
Porosité sèche	ξ_s	[%]	34,2
Teneur en eau à la saturation libre	w_f	[% _{masse}] / [kg/m ³]	21,1/ 369,7
Teneur en eau de référence (80 % HR)	w_{80}	[% _{masse}] / [kg/m ³]	1,22 / 21,4
Chaleur massique sèche	c_s	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	820
Conductivité thermique sèche	λ_s	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1*
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau sèche (60 % HR - 12 % HR)	μ_{sec}	[-]	10,2
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau humide (60 % HR - 93 % HR)	μ_{hum}	[-]	13,1
Coefficient d'absorption	A	[kg.m ⁻² .s ^{-1/2}]	0,072

* Données issues de la littérature.

Données numériques de la courbe de sorption à 23 °C.

Solution saline		Pressure plate	
Humid.relative [%]	Teneur en eau [% _{masse}]	Humid. relative [%]	Teneur en eau [% _{masse}]
0	0	98,91	4,30
7	0,172	99,638	5,33
34	0,571	99,928	6,97
54	0,886	99,949	7,77
78	1,165	99,978	10,07
90	1,496	99,993	12,57
98	2,303	99,995	12,77
		99,997	15,67
		99,999	17,80

Description générale



Ce second enduit est un mélange industriel fourni en sac (sable + argile) auquel il faut rajouter des granulats quartzeux 4/8. La quantité d'eau à ajouter est très faible : 4-5 litres d'eau, pour 35 + 35 kg de mélange (sac + granulats). Ce mélange n'est en fait pas destiné à une utilisation en enduit et certains de ses paramètres sont peu avantageux (la teneur en eau en sorption est par exemple très faible comparée aux valeurs classiques des enduits). Un autre mélange est utilisé aujourd'hui par Paille-Tech.

La figure 9 illustre les courbes granulométriques obtenues par tamisage en voie humide de la fraction grossière ($> 63 \mu\text{m}$) et par diffraction laser de la fraction fine ($< 63 \mu\text{m}$), qui est ici très faible ($< 10 \%$).

L'étude minéralogique de la fraction fine ($< 63 \mu\text{m}$) 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 fraction fine de l'enduit est constituée de quartz (10 %), de plagioclase (10 %) et d'argiles minéralogiques (80 %). Les argiles se présentent sous forme de kaolinite (30 %), d'illite (40 %) et la chlorite ou vermiculite (10 %), seule cette dernière fraction (10 %) possède des propriétés « gonflantes » en présence d'eau.

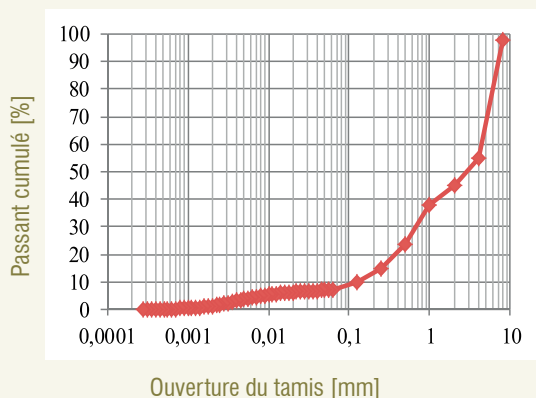


Fig. 10: Courbe granulométrique complète de l'enduit n° 2.

Propriétés hygrothermiques

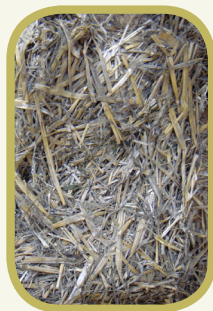
Masse volumique sèche	ρ_s	[kg.m ⁻³]	2 051
Porosité sèche	ξ_s	[%]	24,8
Teneur en eau à la saturation libre	w_l	[% _{masse}] / [kg/m ³]	8,8 / 180,5
Teneur en eau de référence (80 % HR)	w_{80}	[% _{masse}] / [kg/m ³]	0,53 / 10,9
Chaleur massique sèche	c_s	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	751
Conductivité thermique sèche	λ_s	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1 *
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau humide (60 % HR - 93 % HR)	μ_{hum}	[-]	18,4
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau sèche (60 % HR - 12 % HR)	μ_{sec}	[-]	18,5
Coefficient d'absorption	A	[kg.m ⁻² .s ^{-1/2}]	0,059

* Données renseignées par le fournisseur.

Données numériques de la courbe de sorption à 23 °C.

Solution saline		Pressure plate	
Humidité rela- tive [%]	Teneur en eau [% _{masse}]	Humidité relative [%]	Teneur en eau [% _{masse}]
0	0	98,91	3,50
7	0,075	99,638	3,67
34	0,233	99,928	4,10
54	0,333	99,949	4,23
78	0,487	99,978	4,67
90	0,747	99,993	4,87
98	1,619	99,995	4,87
		99,997	5,33
		99,999	5,33

Description générale



Les ballots testés sont des petits ballots de froment d'environ $(36 \times 46 \times 80)$ cm³ caractérisés par une masse volumique sèche de 100 kg/m³. Ils ont été récoltés au moyen d'une presse roulant 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.

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 figure 11 nous montre

les résultats de l'essai de détermination de l'orientation des brins. Sur 5 galettes issues d'un même ballot, 50 brins de minimum 8 cm de long ont été prélevés. L'orientation de ces 50 brins a été notée. On peut constater une légère dominance verticale des brins lorsque le ballot est posé à plat.

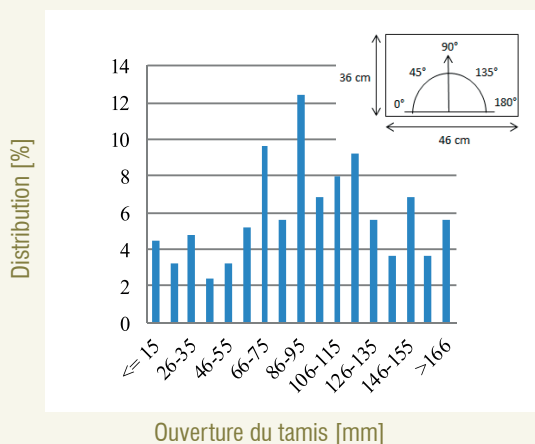


Fig. 11 : Orientation des fibres au sein d'un ballot.

Propriétés hygrothermiques

Masse volumique sèche		ρ_s	[kg.m ⁻³]	100
Porosité sèche		ξ_s	[%]	93
Teneur en eau à la saturation libre		w_f	[% _{masse}]	231
Teneur en eau de référence (80 % HR) à 23 C°		$w_{80,23}$	[% _{masse}]	13,76
Teneur en eau de référence (80 % HR) à 35 C°		$w_{80,35}$	[% _{masse}]	12,29
Chaleur massique sèche		c_s	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	2 426
Conductivité thermique (humidité du ballot < 5 % HR)	Flux 1 (fig. 2) (ép = 46 cm)	λ_s	[W/m.K]	0,0632
	Flux 2 (fig. 2) (ép = 38 cm)	λ_s	[W/m.K]	0,0682
	Flux 3 (fig. 2) (ép = 10 cm)	λ_s	[W/m.K]	0,0461
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau humide (60 % HR - 93 % HR)		μ_{hum}	[-]	1,34
Coefficient d'absorption	face inférieure contre l'eau (direction 2 (fig.2))	A	[kg/m ² .s ^{1/2}]	0,017
	face latérale contre l'eau (direction 1 (fig. 2))		[kg/m ² .s ^{1/2}]	0,0125

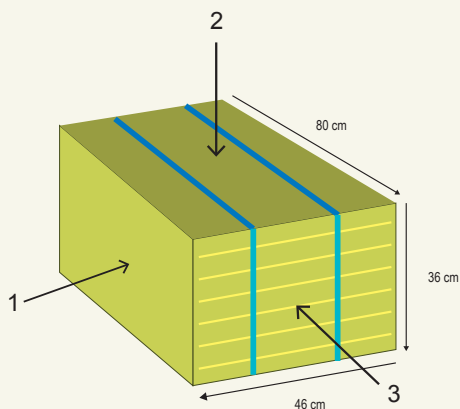


Fig. 12 : Orientation des flux thermiques lors de l'essai de conductivité thermique.

Données numériques des courbes de sorption à 23 °C et à 35 °C*.

Courbe à 23 °C (solution saline)		Courbe à 35 °C (solution saline)	
Humidité relative [%]	Teneur en eau [% _{masse}]	Humidité relative [%]	Teneur en eau [% _{masse}]
0	0	0	0
18	4,27	40	5,41
37	6,65	56	7,76
45	8,25	79	11,91
58	10,25	83	13,41
76	13,12	84	13,88
80	13,71	89	15,51
82	14,66		
87	17,76		
89	17,61		
98	50*		

*Données non mesurée, rajoutée pour atténuer l'erreur d'approximation de l'évolution de la teneur en eau dans la zone capillaire.

Remarque : La teneur en eau obtenue est relativement peu élevée comparée à celles rencontrée dans la littérature. Dans sa thèse, J. Wihan (2007) parle par exemple d'une teneur en eau à 90 % d'HR de 30 kg/m³. Cela montre la large gamme de valeur qui peut être obtenue selon le type de paille, les conditions de préparation des échantillons et le protocole de mesure.

PROTOCOLE DE MESURES

Définition de la grandeur physique



La masse volumique d'un corps est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle s'obtient selon la formule suivante :

$$\text{Masse volumique} = \frac{\text{Masse}_{\text{échantillon}}}{\text{Volume}_{\text{échantillon}}}$$

Principe de l'essai et protocole

> Enduit

La mesure se réalise par pesée hydrostatique sur base du principe d'Archimède. Par diverses pesées successives de l'échantillon, on peut trouver le volume de celui-ci. La masse sèche étant facilement connue, il est possible de déduire la masse volumique. Il faut juste faire attention au fait que l'échantillon est poreux, il doit donc être enveloppé d'un volume déterminé de paraffine qu'il faudra venir soustraire au volume final.

La procédure utilisée pour déterminer la masse volumique apparente du matériau est la suivante :

- Séchage à 105 °C des échantillons jusqu'à masse constante.
- Mesure de la masse sèche (M_1).
- Mise en place de paraffine sur toutes les surfaces des échantillons (densité de la paraffine : 0,88).
- Mesure de la masse de l'échantillon avec paraffine (M_2).
- Mesure de la masse sous eau (M_3).

A l'aide de ces trois masses et connaissant la masse volumique de la paraffine, on peut déduire la masse volumique du corps :

$$MV = \frac{M_1}{\left(\frac{M_2 - M_3}{1}\right) - \left(\frac{M_2 - M_1}{0,88}\right)}$$

> Paille

Vu la forme simpliste et la régularité des dimensions des ballots et vu la difficulté qui résulterait de la mise en place de paraffine autour de ceux-ci, la détermination du volume des ballots est réalisée par simple mesure au mètre ruban.

La détermination de la masse sèche se fait après avoir séché le ballot un certain temps dans une enceinte à plus de 75 °C.

La procédure utilisée pour déterminer la masse volumique apparente du matériau est donc la suivante :

- Séchage à 75 °C des échantillons jusqu'à masse constante.
- Mesure de la masse sèche (M_1).
- Mesure du volume des ballots (V).

La masse volumique du corps peut être déduite au moyen de ces deux données :

$$MV = \frac{M_1}{V}$$

Résultats

> Enduit

Une mesure de la masse volumique apparente a été réalisée sur 4 échantillons de l'enduit n° 1 et n° 2. Le tableau suivant montre les résultats.

Masse volumique apparente des enduits.

Échantillons	Masse volumique [kg/m³]	Moyenne [kg/m³]	Écart-type [kg/m³]
Enduit 1-1	1 786	1 752	29
Enduit 1-2	1 766		
Enduit 1-3	1 721		
Enduit 1-4	1 735		
Enduit 2-1	2 071	2 051	31
Enduit 2-2	2 005		
Enduit 2-3	2 060		
Enduit 2-4	2 069		

> Paille

Une mesure de la masse moyenne ainsi que des dimensions moyennes ont pu être réalisées sur un ensemble de 5 ballots. Le tableau de la page suivante montre les résultats.

Masse volumique apparente de la paille.

	Éch.1	Éch.2	Éch.3	Éch.4	Éch.5	
Épaisseur [cm]	36,5	36	36	36,5	37	
Largeur [cm]	47,5	45,5	46	46	45	
Longueur [cm]	86	76,5	76,5	80	75,5	
Masse [kg]	14,79	12,64	12,44	13,92	12,33	Moy.
Masse volumique [kg/m³]	99	101	98	104	98	100

Discussion

On constate que la masse volumique théorique des ballots de paille est identique à la masse volumique réelle mesurée. L'agrément général allemand de contrôle des constructions (Z-23.11-1595 annexe 10) préconise une densité brute des ballots comprise entre 90 kg/m³ et 110 kg/m³. Les ballots sélectionnés pour cette étude répondent donc à ce critère.

En ce qui concerne les enduits, on constate que la masse volumique sèche de l'enduit n° 1 est légèrement supérieure à celle de l'enduit n° 2 qui est de 2 051 kg/m³.



MV paille = 100 kg/m³.
MV enduit n° 1 = 1 752 kg/m³.
MV enduit n° 2 = 2 051 kg/m³.

Fig. 13: Echantillons d'enduit paraffinés.

Définition de la grandeur physique



La porosité est une grandeur physique qui caractérise l'ensemble des interstices (connectés ou non) d'un corps. Il s'agit donc du rapport du volume des vides du matériau divisé par le volume total.

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois les vides au sein des particules ainsi que les vides entre particules. La masse volumique réelle par contre est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite des vides. La connaissance de ces deux masses volumiques permet facilement de déduire la porosité du matériau :

$$n = \frac{V_{vide}}{V_{tot}} = \frac{V_{tot} - V_{matière}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{matière}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{matière}}{V_{tot}} * \frac{M_{matière}}{M_{matière}} = 1 - \frac{MV_{apparent}}{MV_{réelle}}$$

Principe de l'essai et protocole

Cette fiche reprend la procédure utilisée pour déterminer la masse volumique réelle des échantillons. Dans les deux cas, celle-ci a été déterminée par pycnomètre à gaz (figure 2).

Le principe de la mesure est relativement simple. Tout l'art de la technique réside dans la mesure du volume de l'échantillon. Le pycnomètre à gaz est muni de deux chambres de volumes connus. Pour déterminer la masse volumique réelle d'un échantillon, il suffit d'injecter un gaz à une pression donnée dans l'enceinte de mesure contenant une petite masse connue d'échantillon broyé (quelques grammes). Il faut ensuite détendre ce gaz dans une enceinte de référence et mesurer la nouvelle pression du gaz. Connaissant ces deux pressions et les volumes des enceintes, par la loi de Boyle-Mariotte, il est possible de trouver le volume de l'échantillon (Aishe Belkadi, 2009).

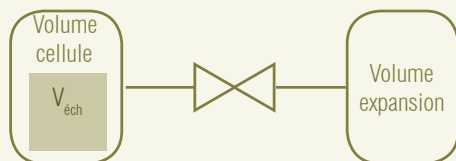


Fig. 14 : Principe de fonctionnement du pycnomètre à gaz.

En effet, considérons qu'à température ambiante (T_a) une masse M connue d'un échantillon de volume V_{ech} est introduite dans une cellule de volume V_{cell} .

Dans un premier temps, la vanne est fermée et une pression P_1 est appliquée dans le volume V_{cell} . L'équation des gaz parfaits pour ce volume s'écrit alors :

$$P_1(V_{cell} - V_{ech}) = n_c RT_a$$

Dans le volume d'expansion V_{exp} , qui est à pression atmosphérique, on a :

$$P_a V_{exp} = n_e RT_a$$

A l'ouverture de la vanne, il s'établit une pression intermédiaire P_2 dans l'ensemble des deux volumes :

$$P_2(V_{cell} - V_{ech} + V_{exp}) = n_c RT_a + n_e RT_a$$

La combinaison des équations précédentes permet d'obtenir le volume de l'échantillon en fonction de paramètres connus :

$$V_{ech} = V_{cell} - \frac{V_{exp}}{\frac{P_1 - P_a}{P_2 - P_a} - 1}$$

En connaissant la masse de l'échantillon introduit, on obtient la masse volumique :

$$MV = \frac{M_{ech}}{V_{ech}}$$

> Enduit

Pour la réalisation de la mesure, une masse définie d'échantillon à tester est séchée à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. Après refroidissement dans un dessiccateur, les agglomérats sont pulvérisés à l'aide d'un broyeur à disque. Le broyat est ensuite tamisé sur un tamis de $125\mu\text{m}$: seul le passant est exploité. En ce qui concerne le gaz injecté, de l'azote a été utilisé. La petite taille des atomes d'azote permet d'accéder aux pores les plus fins, rendant la mesure de la masse volumique très précise en cas de matériau poreux.

> Paille

Pour cet essai, des brins de paille ont été séchés à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. Après refroidissement dans une enceinte contenant un dessiccant, les fibres de pailles sont broyées à l'aide d'un broyeur à disque jusqu'à obtenir une poudre fine. De l'azote a également été utilisé pour cet essai.

Résultats

> Enduit

Le Tableau ci-dessous montre les résultats de l'essai :

Masse volumique réelle et porosité des enduits.

Échantillons	Pycnométrie à l'azote	
	Masse volumique réelle [kg/m³]	Porosité [%]
Enduit 1	2 662	34,2
Enduit 2	2 728	24,8

> Paille

Le Tableau suivant montre les résultats de l'essai :

Masse volumique réelle et porosité de la paille.

Échantillons	Masse volumique réelle [kg/m³]	Porosité [%]
Paille	1 501	93 %

Discussion

On constate que l'enduit n° 1 à une plus grande porosité que l'enduit n° 2 alors qu'à première vue, la porosité macroscopique du second enduit à l'air plus importante. Cette différence est liée à la teneur en argile plus élevée du premier enduit. En effet, une fois séchés, les argiles (phyllosilicates d'aluminium) ont une porosité importante dû à leur constitution en feuillet.

Comme on pouvait s'y attendre, la paille apparait comme étant très poreuse. Vu que cette porosité est constituée d'interstices peu connectés, cela en fait un bon candidat pour l'isolation.



Porosité paille = 93 %.
Porosité enduit n° 1 = 34,2 %.
Porosité enduit n° 2 = 24,8 %.



Fig. 15 : Echantillon d'enduit broyé et séché et de paille broyée et séchée.

Définition de la grandeur physique



L'essai de perméabilité à la vapeur a pour objectif principal de déterminer la quantité de vapeur d'eau traversant par unité de surface une épaisseur donnée d'un échantillon en un intervalle de temps déterminé dans des conditions opératoires précises.

Cette propriété est souvent caractérisée par le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur qui indique dans quelle mesure la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau que l'air :

$$\mu = \frac{\delta}{\delta_a}$$

Principe de l'essai et protocole

Pour déterminer la quantité de vapeur d'eau qui traverse par unité de surface une épaisseur donnée d'un échantillon en un intervalle de temps déterminé dans des conditions opératoires précises, il faut créer de part et d'autre de l'échantillon deux conditions différentes d'un point de vue hygrométrique. Si l'échantillon est la seule surface d'échange entre les deux milieux et si les conditions d'humidité sont créées à l'aide de solutions salines, la quantité de vapeur d'eau passant au travers de l'échantillon peut être déduite par pesée des solutions.

> Enduit

La pièce climatisée du laboratoire GeMMe (Université de Liège) a été utilisée comme condition extérieure : celle-ci est constamment maintenue à $(60 \pm 10) \% \text{ HR}$. La seconde condition hygrométrique est réalisée à l'aide de solutions salines. Deux conditions ont été retenues, une très humide (93 % HR) à l'aide d'une solution de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ et une plus sèche (12 % HR) à l'aide d'une solution de CaCl_2 . Deux valeurs de perméabilité à la vapeur seront donc disponibles : une correspondant à une humidité moyenne sèche (36 % HR) et une correspondant à une humidité moyenne humide (76,5 % HR). Pour chaque enduit, quatre échantillons de $(15 \times 15) \text{ cm}^2$ 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 5).

Pour chaque enduit, deux échantillons ont été utilisés pour déterminer la perméabilité à la vapeur sèche et deux ont été utilisés pour la perméabilité à la vapeur humide. Le protocole suivant a été utilisé :

- Sécher les échantillons à 75 °C jusqu'à masse constante et déterminer la masse sèche (M_s).
- Isoler les surfaces latérales à l'aide d'un matériau totalement étanche (ici une résine époxy).
- Mesurer leurs épaisseurs (e) et leurs surfaces libres supérieures et inférieures (A).
- Préparer les solutions salines dans le récipient en plastique de 15 cm par 15 cm.



Fig. 16 : Essai de perméabilité à la vapeur sur enduits.

- Sceller les échantillons sur ce récipient à l'aide de colle chaude.
- Placer le montage dans le laboratoire conditionné à 60 % HR et à 21 °C.
- Mesurer l'évolution de la masse de l'ensemble « solution + récipient + « enduit » en fonction du temps. Attendre que l'évolution soit linéaire et calculer la pente (b).
- Vérifier l'humidité relative extérieure et mesurer la pression atmosphérique.
- Mesurer le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air, aussi appelé perméabilité à la vapeur (δ_a) à l'aide de la formule suivante :

$$\delta_a = \frac{0,083}{RT} * \frac{P_o}{P_i} * \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}$$

Avec :

- R : constante des gaz parfait : 462 N.m/(kg °K) ;
- T : température de l'essai en °K ;
- P_o : Pression atmosphérique en situation normalisée (101 325 N/m²) ;
- P_i : Pression atmosphérique moyenne durant l'essai.

- Calculer les pressions partielles de vapeur relative aux conditions extérieure (P_1) et intérieure (P_2).
- Déterminer le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau de l'échantillon par la formule suivante :

$$\mu = \frac{\delta}{\delta_a} = \frac{\frac{b * e}{\Delta P * A}}{\delta_a} = \frac{\frac{b * e}{(P_1 - P_2) * A}}{\delta_a}$$

> Paille

Afin de caractériser le matériau dans la forme sous laquelle il sera mis en place, l'essai a été réalisé sur un ballot en entier et non sur une galette de paille.

Un ballot de paille a été scellé dans un caisson au moyen d'une mousse polyuréthane beaucoup plus étanche à la vapeur d'eau. Au moyen de plaques en plexiglass et de joints en néoprène, l'ensemble du caisson peut-être isolé de l'ambiance extérieure. Un petit espace a été aménagé afin de permettre d'insérer une solution saline de di-hydrogéné-phosphate d'ammonium ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) donnant une humidité relative de 93 % HR. Lors de l'essai, la solution saline est mise en place sur une balance à l'intérieur du caisson. Le plexiglass, côté opposé au ballot, est alors ouvert. L'ensemble est placé dans le laboratoire GeMMe (Université de Liège) conditionné à (60 ± 10) % HR. La balance permet de mesurer en continu la vitesse des échanges d'humidité qui se produisent entre l'air extérieur et l'air intérieur. La seule surface d'échange étant le ballot de paille et la mousse polyuréthane (figure 17).

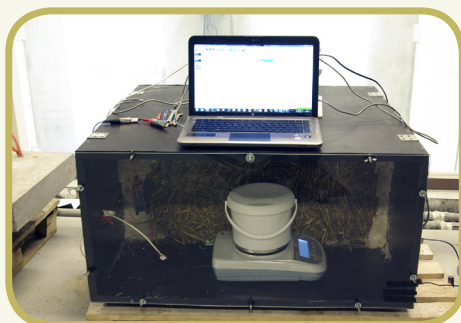


Fig. 17 : Essai de perméabilité à la vapeur d'eau sur ballot.

Avant essai, le ballot a été conditionné à un taux d'humidité supérieur au taux d'humidité de 93 % HR afin d'éviter une condensation d'eau dans le ballot lors de l'essai. En effet, cette condensation augmenterait virtuellement la perméabilité à l'air.

Les principales étapes nécessaires à la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau du ballot sont résumées ci-dessous :

- Mesurer l'épaisseur (e) et la surface d'échange du ballot (A).
- Préparer la solution saline dans un récipient de grande dimension afin de favoriser l'échange d'humidité entre l'air intérieur et la solution saline.
- Placer le montage dans le laboratoire conditionné à 60 % HR et à 21 °C.
- au moyen d'une balance, mesurer l'évolution de la masse de la solution saline intérieure en fonction du temps. Attendre que l'évolution soit linéaire et calculer la pente (b).
- Vérifier l'humidité relative extérieure et intérieure au moyen de capteurs.
- Mesurer tous les jours la pression atmosphérique.
- Mesurer le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air, aussi appelé perméabilité à la vapeur (δ_a) à l'aide de la formule suivante :

$$\delta_a = \frac{0,083}{RT} * \frac{P_o}{P_i} * \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}$$

Avec :

- R : constante des gaz parfait : 462 N.m/(kg°K) ;
 - T : température de l'essai en °K ;
 - P_o : Pression atmosphérique en situation normalisée (101 325 N/m²) ;
 - P_i : Pression atmosphérique moyenne durant l'essai.
- Calculer les pressions partielles de vapeur relative aux conditions extérieure (P_1) et intérieure (P_2).
 - Déterminer le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau de l'échantillon par la formule suivante :

$$\mu = \frac{\delta}{\delta_a} = \frac{\frac{b * e}{\Delta P * A}}{\delta_a} = \frac{\frac{b * e}{([P_1 - P_2]) * A}}{\delta_a}$$

Résultats

> Enduit

Le Tableau ci-dessous montre les résultats obtenus sur les différents échantillons testés :

Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur des enduits.

	Échantillons	μ	μ moyen
Perméabilité à la vapeur humide	Enduit n° 1-1	13,08	13,07
	Enduit n° 1-2	13,05	
	Enduit n° 2-1	18,82	18,4
	Enduit n° 2-2	17,98	
Perméabilité à la vapeur sèche	Enduit n° 1-3	10,37	10,15
	Enduit n° 1-4	9,92	
	Enduit n° 2-3	18,55	18,55
	Enduit n° 2-4	11,54	

> Paille

Le Tableau ci-dessous montre les résultats obtenus sur le ballot testé :

Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur de la paille.

	Échantillons	μ
Perméabilité à la vapeur humide	Paille	1,34

Discussion

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau « sèche » de l'enduit n° 1 (10,15) est inférieur à celui de l'enduit n° 2 (18,55). La même tendance est observée pour le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau « humide » (13,07 pour l'enduit n°1 et 18,4 pour l'enduit n° 2). La résistance à la diffusion de l'enduit n° 1 est, de plus, variable avec l'humidité moyenne, contrairement au second enduit. Cette tendance est liée à la structure même de l'enduit n° 1 qui possède des pores plus fins que le second enduit, pores qui seaturent à de plus faibles humidités relatives, modifiant ainsi sa perméabilité dans la gamme d'humidités étudiées.

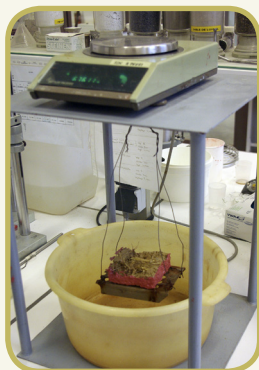
La résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un ballot de paille est quant à elle très faible. Elle est très proche de celle de l'air (seulement 34 % plus élevée), ce qui est logique vu sa constitution et sa grande porosité (93 %).



Fig. 18 : Echantillon d'enduit avant essai.

μ_{sec} enduit 1 = 13,1.
 μ_{sec} enduit 2 = 18,4.
 μ_{humide} enduit 1 = 10,2.
 μ_{humide} enduit 2 = 18,6.
 μ_{humide} paille = 1,34.

Définition de la grandeur physique



L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux à cause des tensions superficielles et interfaciales. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau (celle de l'eau qui est absorbée). L'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle de porosité connectée.

Divers modèles existent pour exprimer l'évolution de la masse d'un échantillon plongé dans l'eau en fonction du temps. Le modèle le plus simple propose une modélisation du phénomène d'absorption d'eau sous la forme d'une relation linéaire entre la masse d'eau absorbée et la racine carrée du temps. Chaque matériau est alors caractérisé par la pente de cette droite :

$$m(t) = A \sqrt{t}$$

Avec

- A : coefficient d'absorption [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$];
- t : temps en contact avec l'eau (sec);
- $m(t)$: eau absorbée par unité de surface pour une période t [kg/m^2].

Principe de l'essai et protocole

> Enduit

L'absorption d'eau des enduits est déterminée par mesure de l'augmentation de masse d'un échantillon sec plongé dans l'eau. Les échantillons sont suspendus au-dessus du récipient contenant de l'eau et relié à une balance (figure 8). Cette dernière permettra d'étudier la variation de masse de l'échantillon en fonction du temps. Conformément à la norme EN 13057, pour chaque enduit, l'essai a été réalisé sur au moins 3 échantillons préalablement séchés à 40 °C jusqu'à masse constante. Les bords latéraux des échantillons ont été rendus imperméables grâce à de la résine époxy.

Pour cet essai, le protocole suivant a été appliqué :

- Mesure de la masse sèche et de la surface de contact.
- Mise en place de l'échantillon sous la balance (échantillon suspendu).

- Mise à niveau de l'eau jusqu'à recouvrir 2 mm de l'échantillon.
- Mesure de la variation de masse après (30'', 1', 2', 4', 6', 8', 10', 15', 20', 30', 60' et 120').
- Réalisation de la courbe masse en fonction du temps.
- Réalisation d'une régression linéaire et mesure de la pente.

> Paille

Les échantillons sont suspendus au-dessus d'un récipient contenant de l'eau au moyen d'un dynamomètre (figure 9). Ce dernier permettra d'étudier la variation de masse de l'échantillon en fonction du temps. Le niveau d'eau dans le récipient est maintenu constant grâce à un système de distancemètre à ultrasons couplé à une pompe, elle-même plongée dans une réserve d'eau. Lorsque le niveau d'eau descend de 2 mm sous le niveau de consigne, la pompe se met en marche et alimente en eau le récipient jusqu'à ce que la hauteur dans celui-ci remonte de 2 mm au-dessus du niveau de consigne. Le niveau d'eau est donc stable à ± 2 mm.

Les essais ont été réalisés, non pas sur des ballots entiers, trop encombrants, mais plutôt sur des tiers de ballots. Les ballots étant susceptible d'être anisotropes, chaque face susceptible d'être en contact avec de l'eau dans la réalité a été étudiée : la face latérale, la face inférieure et la face supérieure. Les faces inférieure et supérieure se distinguent car, suite au procédé de mise en forme du ballot, sur une de celles-ci, les brins de paille sont coupés au moyen d'un couteau tandis que, sur l'autre, les brins sont écrasés. Il pourrait donc en résulter une différence au niveau des propriétés d'absorption capillaire.

Pour chacune des faces, deux échantillons ont été testés. Les échantillons ont chaque fois été plongés dans 3 - 4 cm d'eau.

Résultat

> Enduit

Le tableau suivant donne les coefficients d'absorption obtenus sur base de l'essai. Les échantillons de l'enduit n° 2 présentaient une absorption importante et vu leur faible épaisseur, il était impossible de déterminer précisément leur absorption. Des échantillons d'une plus grande hauteur ont donc été réalisés. Dans ce cas particulier, on s'éloigne donc légèrement du produit mis en place par Paille-Tech.

Coefficient d'absorption des enduits.

Échantillons	Coefficient d'absorption [kg/m ² .s ^{-0,5}]	Moy.	Écart-Type
Enduit n° 1-1	0,077	0,072	0,004
Enduit n° 1-2	0,072		
Enduit n° 1-3	0,072		
Enduit n° 1-4	0,068	0,59	0,0075
Enduit n° 2-1	0,060		
Enduit n° 2-2	0,065		
Enduit n° 2-3	0,051		

> Paille

Connaissant les courbes d'évolution de la masse en fonction de la racine carrée du temps et connaissant les surfaces en contact avec l'eau, on peut déterminer le coefficient d'absorption. Le tableau ci-dessous donne les différents coefficients trouvés en fonction de la surface en contact avec l'eau.

Coefficient d'absorption de la paille.

Échantillons	Coefficient d'absorption [kg/m ² .s ^{-0,5}]
Face latérale contre l'eau (face n°1)	0,0111
Face latérale contre l'eau (face n°1)	0,0139
Face comprimée contre l'eau (face n°2)	0,0162
Face comprimée contre l'eau (face n°2)	0,0167
Face coupée contre l'eau (face n°2')	0,0168
Face coupée contre l'eau (face n°2')	0,0183

Discussion

Le tableau ci-dessus ne met pas en évidence une grande différence d'absorption entre la face supérieure et la face inférieure du ballot. La face latérale du ballot présente, quant à elle, une absorption plus faible que les deux autres faces. Ceci peut se justifier par le fait que, dans cette configuration, les premiers brins de paille sont couchés sur l'eau.

Les absorptions capillaires mesurées des enduits sont quant à elle très proches de la valeur de référence de $0,068 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0.5}$ donnée par Straube (Straube J., 2007).



Fig. 19 : Absorption capillaire sur des échantillons de ballot de paille.

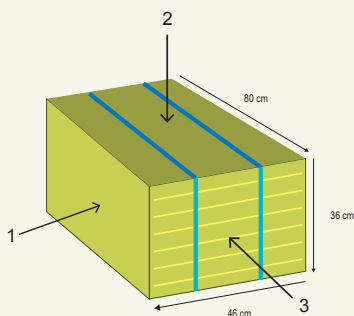


Fig. 20 : Orientation des essais d'absorption réalisés sur ballot.

$$\begin{aligned} A_{\text{enduit 1}} &= 0,072 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0.5} \\ A_{\text{enduit 2}} &= 0,059 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0.5} \\ A_{\text{paille}} &= 0,0158 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0.5} \end{aligned}$$

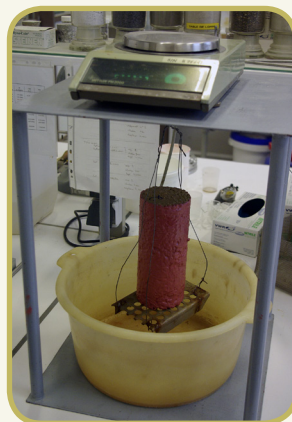


Fig. 21 : Essai d'absorption capillaire sur les enduits n° 2.

Définition de la grandeur physique



L'absorption capillaire permet de mettre en évidence le coefficient d'absorption mais n'indique pas la quantité d'eau que le matériau peut stocker. Pour la connaître, il faut déterminer la teneur en eau à la saturation libre, noté w_f qui est le résultat des mouvements capillaires dans les pores qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'un échantillon dans de l'eau jusqu'à masse constante. L'absorption totale peut être exprimée en pourcentage de la masse initiale de l'éprouvette ou exprimée en masse d'eau contenue dans 1 m^3 d'échantillon. La valeur est utilisée pour estimer la teneur en eau du matériau à 100 % d'humidité relative.

Principe de l'essai et protocole

> Enduit

Des échantillons d'enduits, préalablement séchés en étuve à 40°C , sont immergés entièrement dans l'eau jusqu'à masse constante. Dans le cas de l'enduit n° 1, un bas nylon a dû être utilisé. Celui-ci assure une cohésion et empêche la matière de se mettre en solution tout en laissant passer l'eau.

Le protocole suivant a été utilisé :

- Par enduit, réalisation de 4 échantillons de 8 cm par 8 cm.
- Séchage à 40°C jusqu'à masse constante (EN 13057).
- Mesure de la masse sèche (M_1).
- Mise en place d'un bas nylon autour de l'échantillon pour assurer une cohésion lors des manipulations (uniquement pour l'enduit n° 1).
- Immersion totale de l'échantillon jusqu'à masse constante.
- Mesure de la masse de l'échantillon après immersion et épongeage de l'eau excédentaire (M_2).
- Déduction de l'absorption à l'aide de la formule suivante :

$$absorption = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100$$

> Paille

Comme pour l'absorption capillaire, les essais ont été réalisés, non pas sur des ballots entiers, trop encombrants, mais plutôt sur des tiers de ballots. Vu les dimensions de ces échantillons et le nombre d'essais à réaliser, des ballots non séchés en étuve ont été utilisés. Cependant, ceux-ci ont été stockés plusieurs mois dans le laboratoire de Mécanique et Construction à Gembloux qui se trouve à une humidité relative moyenne de 50 % HR; au vu de la courbe de sorption, la teneur en eau initiale de ceux-ci peut-être estimée à 10%. Cette valeur a été déduite des résultats afin de pouvoir simuler des essais sur ballots secs. Avant essai, chaque ballot est pesé puis suspendu à un capteur de force. Le ballot est ensuite descendu dans un récipient contenant de l'eau. A l'aide de poids, on s'assure que le ballot reste totalement immergé.

Après minimum 24 h d'immersion, on surélève rapidement le ballot et le capteur de force au-dessus du bac d'eau et on mesure en continu la masse. Un drainage naturel va avoir lieu. On obtient ainsi une masse maximale et une masse après équilibre et drainage. La teneur en eau à la saturation libre est mesurée à l'aide de cette dernière valeur.

Résultats

> Enduit

Le Tableau suivant résume les résultats obtenus sur les 4 échantillons de chaque enduit.

Teneur en eau à la saturation libre des échantillons d'enduit.

Éch.	M1 [g]	M2 [g]	w_t [%]	Moy. [%]	Moy. [kg/m ³]
Enduit n° 1-1	304,8	373	22,4	21,1	369,7
Enduit n° 1-2	349,5	414,7	18,7		
Enduit n° 1-3	329,5	395,2	19,9		
Enduit n° 1-4	283	349,8	23,6	8,8	180,5
Enduit n° 2-1	663,1	713,3	7,8		
Enduit n° 2-2	449,8	494,7	10		
Enduit n° 2-3	692,9	747,4	7,9		
Enduit n° 2-4	465,5	510,2	9,6		

> Paille

L'essai d'absorption a été réalisé sur deux échantillons. Le tableau ci-dessous reprend la masse initiale et la masse après équilibre et drainage du ballot. Avec ces masses, connaissant le volume des échantillons immergés et connaissant la porosité totale du ballot qui est de 93 %, il est possible d'estimer le pourcentage de vide rempli par de l'eau après drainage.

Teneur en eau à la saturation libre des échantillons de paille.

Éch.	Masse initiale sèche [kg]	Après drainage		
		Masse [kg]	Teneur en eau à la saturation libre W_f [%]	% de porosité remplie
FD1	3,89	13,01	234,2	33
FD2	4,67	15,37	229,2	32

Discussion

Lors des essais sur l'enduit n° 2, un drainage important de l'eau contenue dans les éprouvettes a été constaté à la fin de l'essai lors du soulèvement de celles-ci. Le fait que cette eau puisse s'écouler sous l'effet de la gravité est le signe que cet enduit est constitué par des pores capillaires de grandes dimensions.

La teneur en eau à la saturation libre de la paille est beaucoup plus importante que celle des enduits, on constate directement un rapport 1 à 10 entre les deux.

$$\begin{aligned} W_{f \text{ enduit } 1} &= 21,1 \% \\ W_{f \text{ enduit } 2} &= 8,8 \% \\ W_{f \text{ paille}} &= 231,7 \%. \end{aligned}$$



Fig. 22 : Essais de la teneur en eau à saturation libre sur 1/3 de ballot de paille.

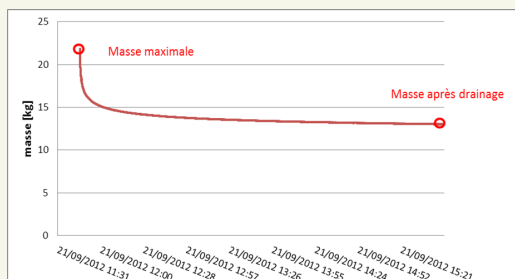


Fig. 23 : Evolution de la masse d'1/3 de ballot en fonction du temps par drainage gravitaire après immersion.

Définition de la grandeur physique



La courbe de sorption est une courbe représentant, pour une température donnée, la variation de la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau du produit ou de l'humidité relative du milieu à l'équilibre. Il existe deux types de courbes en fonction de la situation de départ des échantillons. On parle de courbe de désorption si on part d'un produit saturé en eau et de courbe de sorption si on part d'un produit sec. Les deux courbes sont en général différentes puisque dans la plupart des cas, on observe un phénomène d'hystérèse. Ici, seule la courbe de sorption est étudiée.

Principe de l'essai et protocole

> Enduit

Pour réaliser cette étude, des petits incubateurs dans lesquels règnent des conditions hygrothermiques contrôlées ont été utilisés. La technique la plus couramment utilisée pour contrôler l'humidité relative dans une large gamme de valeur consiste à utiliser des solutions salines. En effet, toute solution saline à une concentration définie et à une température fixée est en équilibre avec une pression partielle de vapeur d'eau. Cet équilibre se traduit par une valeur d'humidité relative bien spécifique. Si la température est stable, l'utilisation de solution saline saturée permet de conserver une humidité relative constante (Young J.F., 1967).

Les essais sur enduit ayant été réalisés au service GeMMe (Université de Liège), les solutions utilisées sont quelques peu différentes de celles utilisées à l'UMC (GxABT) dans le cadre de l'étude sur la paille. Pour l'étude sur enduit, six points de mesure, correctement répartis entre 0 et 100 % HR, ont été retenus. Les essais ont été réalisés dans une pièce climatisée à une température moyenne de 23 °C.

Des échantillons d'enduit d'une centaine de gramme ont été découpés en tranche afin de fournir une surface spécifique importante par rapport à leur volume. Avant essai, ceux-ci ont été séchés à une température ne dépassant pas 75 °C afin de ne pas les altérer. Une fois sec, les échantillons ont été placés dans des petites enceintes climatiques contenant les solutions salines jusqu'à masse constante (figure 13).

Afin de vérifier les conditions climatiques au sein des chambres, des capteurs hygrométriques y ont été installés. Ces capteurs (Sensirion SHT75) permettent d'enregistrer les conditions d'humidité réelles.

Connaissant ces conditions d'humidité, connaissant la masse sèche à 75 °C et la masse après équilibre des échantillons, il est possible de tracer les courbes de sorption.



Fig. 24 : Enceintes climatiques utilisées pour les essais sur enduits.

> Paille

Dans le cadre de l'étude de la courbe de sorption de la paille, des petits incubateurs contenant des solutions salines ont également été utilisés. Des échantillons d'une cinquantaine de grammes ont donc été séchés à 70 °C afin d'éviter toutes dégradations et dégagement de volatils. Une fois séché, chaque échantillon a été placé dans un des incubateurs contenant des solutions salines différentes.

Duggal et Muir (Duggal A., Muir W., 1981) ont mis en évidence une variation de la courbe de sorption de la paille avec la température. Au vu des résultats de leurs essais, pour une même humidité relative extérieure, la teneur en eau de la paille semble diminuer lorsque la température augmente. L'évolution de la courbe de sorption avec la température peut avoir une influence assez importante sur la bonne modélisation du comportement de ces matériaux naturels fortement hygroscopiques. Cette particularité sera étudiée grâce à la détermination de la courbe de sorption à 2 températures différentes : 23 et 35 °C.

Courbe à 23 °C

Pour cette première courbe, neuf points de mesure ont été retenus. Huit utilisaient des solutions salines et un utilisait la capacité de régulation de l'enceinte climatique de l'UMC (Université de Liège, GxABT). Les incubateurs ont été placés dans cette même enceinte consignée à une température de 23 °C.

Les solutions ont été choisies afin d'avoir des points de mesure correctement répartis entre 0 et 100 % HR : cela permettra d'obtenir une courbe assez précise de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative.

Afin de s'assurer du bon fonctionnement des solutions salines, des capteurs hygrométriques (Sensirion SHT75) ont également été placés dans les incubateurs. Ceux-ci permettent l'enregistrement des conditions d'humidité réelles. Après équilibre, les échantillons ont été séchés jusqu'à masse constante à 105 °C afin d'avoir connaissance de leur masse sèche. Connaissant ces conditions d'humidité, la masse sèche et la masse après équilibre des échantillons, il est possible de tracer la courbe de sorption.

Courbe à 35 °C

Pour cette seconde courbe, six points de mesure ont été retenus. Cinq utilisaient des solutions salines et un utilisait la capacité de régulation de l'enceinte climatique de l'UMC. Les mêmes échantillons que ceux utilisés précédemment pour réaliser la courbe à 23 °C ont été repris. Une fois les échantillons placés dans les incubateurs respectifs, ceux-ci ont été placés dans l'enceinte consignée à une température de 35 °C.

Résultats

> Enduit

Pour chaque valeur d'humidité relative retenue, une mesure de la teneur en eau à l'équilibre a été réalisée sur 2 échantillons de l'enduit n° 1 et n° 2. Le tableau suivant montre les résultats.

Courbe de sorption des enduits à 23 °C.

Solution	HR _{mes.} [%]	Enduit 1 Teneur en eau à l'équilibre		Enduit 2 Teneur en eau à l'équilibre	
		[% _{masse}]	[kg/m³]	[% _{masse}]	[kg/m³]
NaCl	7	0,172	3,01	0,075	1,53
MgCl ₂	34	0,571	10,01	0,233	4,77
Ca(NO ₃) ₂	54	0,886	15,52	0,333	6,83
NaCl	78	1,165	20,41	0,487	9,99
ZnSO ₄	90	1,496	26,20	0,747	15,30
K ₂ SO ₄	98	2,303	40,35	1,619	33,19

La figure 25 illustre sous forme de graphique les résultats présentés par le tableau de la page précédente. L'enveloppe des résultats y est reprise.

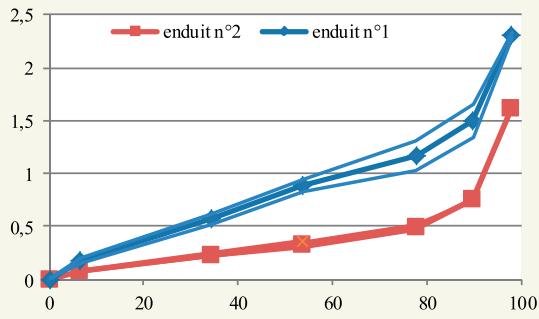


Fig. 25 : Courbe de sorption des enduits d'argiles étudiés lors du projet aPROpaille.

W_{80} paille (23 °C) = 13,7 kg/m³.
 W_{80} paille (35 °C) = 13 kg/m³.
 W_{50} enduit n° 1 (23 °C) = 20,5 kg/m³.
 W_{50} enduit n° 2 (23 °C) = 10 kg/m³.

Paille

Le Tableau suivant donne les valeurs numériques de la courbe de sorption à 23 °C trouvées pour la paille.

Courbe de sorption de la paille à 23 °C.

Solution	A 23 °C			
	HR _{théo.} [%]	HR _{mes.} [%]	Teneur en eau à l'équilibre [% _{masse}]	Teneur en eau à l'équilibre [kg/m³]
LiCl	11	18	4,27	4,27
MgCl ₂	33	37	6,65	6,65
Etuve	45	45	8,25	8,25
NaBr	58	58	10,25	10,25
NaCl	75	80	13,71	13,71

Solution	A 23 °C			
	HR _{théo.} [%]	HR _{mes.} [%]	Teneur en eau à l'équilibre [% _{masse}]	Teneur en eau à l'équilibre [kg/m ³]
KCl	85	82	14,66	14,66
ZnSO ₄	90	76	13,12	13,12
KNO ₃	94	89	17,61	17,61
K ₂ SO ₄	97	87	17,76	17,76

Le Tableau ci-dessous quant à lui donne les valeurs numériques de la courbe de sorption à 35 °C.

Courbe de sorption à 35 °C de la paille.

Solution	A 35 °C			
	HR _{théo.} [%]	HR _{mes.} [%]	Teneur en eau à l'équilibre [% _{masse}]	Teneur en eau à l'équilibre [kg/m ³]
MgCl ₂	32	40	5,4	5,4
Etuve	55	56	7,8	7,8
NaCl	75	79	11,9	11,9
KCl	83	83	13,4	13,4
KNO ₃	91	84	13,9	13,9
K ₂ SO ₄	97	89	15,5	15,5

La figure 26 illustre les résultats sous forme graphique et permet plus facilement la comparaison des courbes à 23 et à 35 °C.

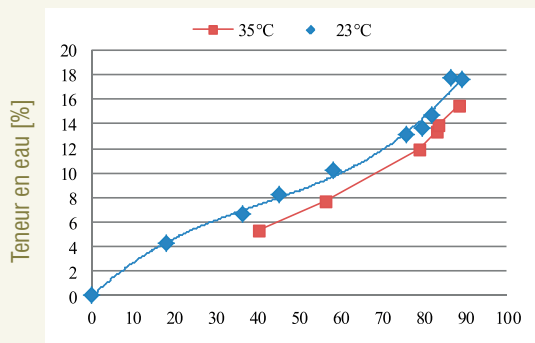


Fig. 26 : Humidité relative [%]

Comparaison des courbes de sorption à 23 °C et à 35 °C (masse sèche à 105 °C).

Discussion

On constate sur la figure 14, que la courbe d'absorption du second enduit est plus basse que celle du premier. De plus, les valeurs récoltées dans la littérature sont aussi globalement plus élevées : à 80 % d'humidité relative par exemple, il n'est pas rare de trouver une teneur en eau proche de 55 kg/m³ (11 kg/m³ pour l'enduit 2). Cette différence s'explique notamment par le fait que le mélange de l'enduit 2 n'est pas destiné à un usage en enduit. Si celui-ci était utilisé par Paille-Tech lors du choix des échantillons à caractériser, un autre mélange plus approprié est utilisé aujourd'hui (dont les paramètres ne sont pas encore caractérisés).

En ce qui concerne la paille, les valeurs obtenues sont aussi moins élevées que celles qui sont rencontrées dans la littérature : le doctorat de J. Wihan (2007) annonce par exemple une teneur en eau de 22,5 kg/m³ à 80 % d'humidité relative alors qu'une valeur de 13,76 kg/m³ a été mesurée sur les échantillons provenant de la paille utilisée par Paille-Tech. Une telle variation n'est pas étonnante et est liée au type de paille, au choix des échantillons et au protocole de mesure. Enfin, comme annoncé par Duggal et Muir (Duggal A., Muir W., 1981), on a pu constater, pour une même humidité relative, une diminution de la teneur en eau de la paille avec la température.

Définition de la grandeur physique



La fin de la courbe de sorption peut-être déterminée au moyen d'une technique tirée de l'analyse des sols, à savoir l'essai à la table à succion ou pressure plate. Cet essai n'a pu être réalisé que pour les enduits.

En cas d'excédent d'eau dans un enduit ou plus généralement dans un sol, celle-ci tend à s'évaporer. Plus la quantité d'eau retenue dans le sol diminue plus il est difficile pour celle-ci de s'évaporer puisque les forces capillaires s'opposent à son départ et l'énergie nécessaire pour extraire l'eau est d'autant plus grande que le sol s'appauvrit en eau. Les forces capillaires entre les grains et la tension superficielle du film d'eau autour des grains déterminent un potentiel de matrice qui tend à retenir l'eau et qui peut être

mesuré à l'aide d'une plaque à pression. En milieu non saturé, la charge matricielle (h) est toujours négative, on la remplacera fréquemment par la succion (ψ) qui n'est rien d'autre que la valeur absolue de la charge matricielle. La succion du sol dépend de sa texture, de la taille des pores et de la quantité d'eau contenue dans le sol par rapport à sa capacité maximale d'absorption. La succion peut atteindre des valeurs très élevées ; aussi utilise-t-on la notion de pF défini comme le logarithme en base 10 de la succion exprimé en centimètre (Mermoud A., 2006 ; Beauchamp J. 2006).

$$pF = \log (\psi) = \log |h|$$

Principe de l'essai et protocole

Les courbes pF ont été déterminées au service « Systèmes Sol – Eau » de l'université de Liège (Gembloux Agro-Bio tech) conformément à la norme ISO 11274 : 1998 en tenant compte de la correction n° 1 datant de 2009.

Les mesures ont été réalisées au moyen d'une plaque de succion. Les enduits ont été coulés dans des anneaux métalliques de volume connu. Avant essai, ceux-ci ont été saturés et ensuite placés sur une plaque poreuse, elle-même mise en place dans une marmite à pression. Pour déterminer les courbes pF , on réalise une désaturation progressive de l'échantillon par le biais d'une pression constante. Une fois qu'on a atteint l'équilibre hydraulique, on réalise une mesure de la masse de l'échantillon afin de pouvoir déterminer ultérieurement la teneur en eau correspondant à la pression appliquée. On replace l'échantillon dans la

marmite et on recommence une mesure à une pression supérieure à l'ancienne mesure et ainsi de suite jusqu'à obtenir plusieurs points (pression-masse). Les essais sont réalisés à des pressions comprises entre 0 et 15 bars. Une fois les essais terminés, ceux-ci sont séchés en étuve afin de pouvoir calculer les couples teneur en eau-pression.

Résultats

Pour chaque enduit, les essais ont été réalisés sur un ensemble de trois échantillons. La figure 27 illustre les teneurs en eau obtenues en fonction des pF appliqués.

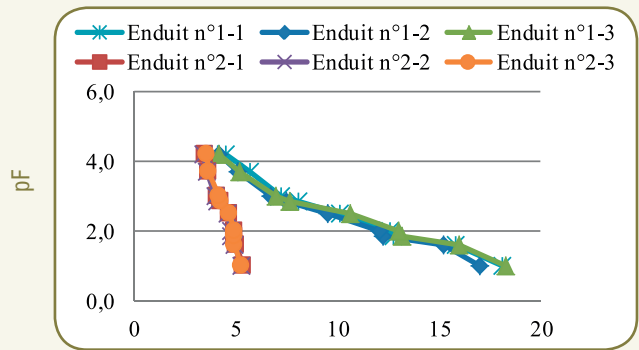


Fig. 27 : Teneur en eau pondérale [%].
Courbes pF des enduits n° 1 et n° 2.

Le tableau suivant reprend l'ensemble des valeurs numériques correspondant au graphique de la figure 27.

Teneur en eau pondérale en pourcent des enduits en fonction des pF.

Teneur en eau pondérale [%]										
		pF=1,00	pF=1,60	pF=1,85	pF=2,00	pF=2,48	pF=2,85	pF=3,00	pF=3,70	pF=4,18
Enduit n° 1	1	18,1	15,8	12,8	12,6	10,1	8,1	7,2	5,7	4,5
	2	17,0	15,2	12,3	12,1	9,5	7,5	6,7	5,1	4,2
	3	18,3	16,0	13,2	13,0	10,6	7,7	7,0	5,2	4,2

Teneur en eau pondérale [%]										
		pF=1,00	pF=1,60	pF=1,85	pF=2,00	pF=2,48	pF=2,85	pF=3,00	pF=3,70	pF=4,18
Enduit n° 2	1	5,4	5,0	4,9	4,9	4,7	4,3	4,1	3,7	3,5
	2	5,3	4,9	4,8	4,8	4,6	4,1	4,0	3,6	3,4
	3	5,3	4,9	4,9	4,9	4,7	4,3	4,2	3,7	3,6

Travailler avec des pF peut s'avérer assez difficile. Cependant, à l'aide du principe de Pascal et de la loi de Kelvin, il est possible d'exprimer les teneurs en eau en fonction de l'humidité relative, notion qui est bien plus facilement assimilée.

$$HR = e^{\frac{-g}{100} \frac{10^{pF}}{R_v T}}$$

Avec

- *R_v* : Constante des gaz parfait [462 N.m/(kg °K)] ;
- *ρ* : masse volumique de l'eau ≈ 1 000 kg/m³ ;
- *T* : température de l'essai [°K] ;
- *P* : pression [Pa].

Le Tableau suivant donne les teneurs en eau pondérale en fonction de l'humidité relative obtenue après transformation des pF en humidité relative.

Teneur en eau pondérale en pourcent des enduits en fonction de l'humidité relative.

Teneur en eau pondérale [%]										
		HR = 99,999 %	HR = 99,997 %	HR = 99,995 %	HR = 99,993 %	HR = 99,978 %	HR = 99,949 %	HR = 99,928 %	HR = 99,638 %	HR = 98,91 %
Enduit n° 1	1	18,1	15,8	12,8	12,6	10,1	8,1	7,2	5,7	4,5
	2	17,0	15,2	12,3	12,1	9,5	7,5	6,7	5,1	4,2
	3	18,3	16,0	13,2	13,0	10,6	7,7	7,0	5,2	4,2

Teneur en eau pondérale [%]										
		HR = 99,999 %	HR = 99,997 %	HR = 99,995 %	HR = 99,993 %	HR = 99,978 %	HR = 99,949 %	HR = 99,928 %	HR = 99,638 %	HR = 98,91 %
Enduit n° 2	1	5,4	5,0	4,9	4,9	4,7	4,3	4,1	3,7	3,5
	2	5,3	4,9	4,8	4,8	4,6	4,1	4,0	3,6	3,4
	3	5,3	4,9	4,9	4,9	4,7	4,3	4,2	3,7	3,6

Discussion

Il est intéressant de comparer les résultats donnés par la technique de la plaque à succion aux résultats obtenus au moyen des solutions salines. Le dernier point de mesure de celles-ci à 97 % HR montrait une teneur en eau pondérale pour l'enduit n° 1 égale à 2,3 % et une teneur en eau pondérale égale à 1,6 % pour l'enduit n° 2. Si on regarde le point le plus bas en humidité relative obtenu par pression plate (HR de 98,9 %), la teneur en eau pondérale est égale à 4,3 % pour l'enduit n° 1 contre 3,5 % pour l'enduit n° 2. Il existe donc une bonne corrélation et une bonne continuité des courbes.

L'essai d'absorption totale est une manière fréquemment utilisée pour déterminer la teneur en eau pondérale à 100 % HR. Il est donc intéressant de comparer la valeur obtenue lors de cet essai à la teneur en eau obtenue pour le pF le plus faible (humidité relative la plus élevée). Par absorption, une teneur en eau à saturation libre égale à 21,1 % pour l'enduit n° 1 et égale à 8,8 % pour l'enduit n° 2 avait été trouvée. De nouveau, il est possible d'observer une bonne corrélation puisque par la technique « pression plate » une teneur en eau pondérale égale à 17,8 % pour le premier enduit et égale à 5,3 % pour le second a été mesurée.

$$W_{99,999} \text{ enduit n°1} = 312 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{99,999} \text{ enduit n°2} = 109 \text{ kg/m}^3$$

Définition de la grandeur physique



La chaleur massique ou chaleur spécifique (symbole c ou s), qu'il convient d'appeler capacité thermique massique, est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température d'un kilogramme de substance. Si une quantité de chaleur ΔQ produit un écart de température ΔT pour une masse m d'une substance, alors la chaleur spécifique c de la substance est donnée par :

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}$$

L'unité de la chaleur spécifique est le J/(kg.K) ou bien le kJ/(kg.K). Chaque substance a sa propre chaleur spécifique qui varie un peu avec la température.

Principe de l'essai et protocole

> Enduit

Vu que les enduits ont une masse volumique assez importante, tout du moins supérieure à 1 000 kg/m³, il est possible d'étudier les échanges de chaleur entre de l'eau et le matériau testé, lorsque ce dernier est plongé dans un récipient adiabatique contenant une quantité connue d'eau à une température connue, différente de celle de l'échantillon.

Pour déterminer la chaleur massique du corps, on prélève environ 50 g de matière mc. Afin d'assurer une surface d'échange optimale, les échantillons seront broyés et passés au tamis. Seule la fraction granulométrie comprise entre 2 et 8 mm sera conservée. En deçà, les particules risquent de rester en suspension au-dessus de l'eau et, au-delà, la surface spécifique devient trop faible par rapport au volume. L'échange de chaleur risque d'être trop long.

Après avoir broyé, tamisé et séché les échantillons à 105 °C jusqu'à masse constante, on les laisse reposer dans un incubateur contenant un dessiccant jusqu'à ce que le corps soit à température ambiante (T_c). On les introduit ensuite le plus rapidement possible dans un thermos contenant de l'eau chaude (T_e) et on mélange vigoureusement. Par échange de chaleur, après une durée très courte, l'eau et la matière solide atteignent la même température (T_m).

Vu que le milieu est pratiquement adiabatique, on peut faire l'hypothèse que la quantité de chaleur absorbée par le corps est égale à la quantité de chaleur cédée par l'eau. Les différentes températures sont mesurées au moyen de thermocouples. Afin de minimiser les erreurs, la quantité d'eau utilisée (m_e) est adaptée à la quantité de matière disponible pour l'expérience. Un rapport 2/1 ou 3/1 (eau/matière) est préférable afin d'avoir une différence de température du mélange facilement interprétable pour les résultats. Suite aux diverses hypothèses, l'équation de détermination de la chaleur massique du corps est la suivante:

$$c_c = c_e \frac{m_e(T_M - T_e)}{m_c(T_M - T_c)}$$

Avec C_e , la chaleur massique de l'eau [4 180 J/(kg.K.)]

> Paille

Vu la faible masse volumique de la paille, la technique développée pour l'analyse de la chaleur massique de l'enduit n'a pas pu être utilisée.

Cependant, il ne s'agit pas de la seule technique disponible. La capacité thermique massique d'un solide peut être mesurée en utilisant un appareil de type ATD (Analyse thermodifférentielle). Cet essai consiste à suivre l'évolution de la différence de température entre un échantillon du corps étudié et un corps témoin inerte, c'est-à-dire dépourvu d'effets thermiques dans le domaine de température étudié.

L'appareil est constitué de deux « plots » indépendants et d'un four. Des thermocouples permettent de mesurer la température des plots en contact avec l'échantillon, ainsi que la température du four. Celle-ci correspond à la température de mesure. Toutes les mesures sont effectuées en utilisant un porte-échantillon d'aluminium vide sur l'un des plots. Une première mesure d'un autre porte-échantillon d'aluminium vide permet d'obtenir une ligne de base (dépendant de la mesure de température par les thermocouples). Puis une mesure d'un échantillon de référence de chaleur massique connue permet d'étalonner l'appareil. Finalement, l'échantillon sous forme de poudre est inséré et testé. Sa chaleur massique est obtenue par comparaison avec celle de l'échantillon de référence.

Les analyses ont été réalisées au service « Chimie et bio-industries » de l'université de Liège (Gembloux Agro-Bio tec) sur un échantillon de paille broyé à un diamètre inférieur à 63 μm . Les essais ont été réalisés à différentes températures de mesure, après réalisation d'une nouvelle valeur de référence au saphir. Vu le temps nécessaire pour réaliser ces courbes, un seul échantillon a été caractérisé.

Résultats

> Enduit

Le Tableau suivant fournit les valeurs trouvées pour les deux types d'enduits préalablement broyés et séchés à 105 °C.

Chaleur massique expérimentale des deux enduits étudiés.

Échantillons	Chaleur massique [J/(kg. K)]	Moyenne [J/(kg. K)]	Écart-Type [J/(kg. K)]
Enduit n° 1-1	798	819	15,6
Enduit n° 1-2	834		
Enduit n° 1-3	831		
Enduit n° 1-4	824		
Enduit n° 1-5	808		
Enduit n° 2-1	730	751	18,1
Enduit n° 2-2	765		
Enduit n° 2-3	758		
Enduit n° 2-4	746		
Enduit n° 2-5	762		

> Paille

Le tableau ci-dessous donne le résultat de l'essai de détermination de la chaleur massique sur la paille, essai réalisé en mode modulé.

Chaleur massique d'un échantillon de paille (ATD).

Échantillons	Condition	Chaleur massique [J/(kg. K)]
Paille	À 20 °C	2 426

Discussion

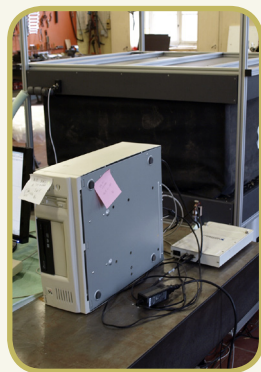
Il est possible de constater que la chaleur massique de la paille, comme celle de tout végétaux, est très importante. Celle des enduits est plus faible mais cela ne signifie aucunement que leur rôle inertielle est négligeable devant celui de la paille. En effet, tout l'intérêt des enduits provient de la combinaison de leur masse volumique importante et de leur chaleur massique non négligeable.

$$C_{\text{enduit 1}} = 819 \text{ J/(kg.K)}.$$

$$C_{\text{enduit 2}} = 751 \text{ J/(kg.K)}.$$

$$C_{\text{Paille}} = 2\,426 \text{ J/(kg.K)}.$$

Définition de la grandeur physique



Par définition, la conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur par conduction. On suppose que la chaleur se propage donc à l'intérieur du matériau de particule à particule. De manière pratique on définit la conductivité thermique d'un corps grâce à son coefficient λ qui représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est donc exprimée en watts par mètre par kelvin (W/m.K).

Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. La conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau et de la température mais d'autres paramètres tels que l'humidité et la pression interviennent également.

Principe de l'essai et protocole

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la conductivité thermique des matériaux, autant en régime stationnaire que transitoire. Les méthodes transitoires permettent d'obtenir rapidement des résultats sur des petits échantillons mais pèchent par une erreur plus grande sur la mesure. Les méthodes stationnaires, comme celle dite de « la plaque chaude gardée », nécessitent l'équilibre thermique et donc un temps de mesure important ainsi qu'une grande maîtrise des conditions aux limites imposées à l'échantillon. Cependant, si ces conditions aux limites sont bien imposées, les résultats obtenus par cette méthode seront plus précis. Les plaques chaudes gardées disponibles sur le marché ne peuvent que très rarement accepter des éprouvettes plus épaisses que 10 cm, or, les ballots de paille ont une épaisseur plus importante que la majorité des isolants du marché. Afin de pouvoir travailler sur un produit dans sa forme finie, il a été décidé de mettre au point à l'UMC une plaque chaude gardée de grande dimension donnant des résultats fiables et capable de tester des matériaux de grandes épaisseurs. Un document complet relatant les grandes lignes qui ont servi de guide lors de la réalisation de cette plaque a été publié (Dubois S., 2013).

De manière concrète, la conductivité thermique d'un matériau peut être déduite de l'équation de Fourier à une dimension :

$$\lambda = \frac{Qd}{A(T_c - T_f)}$$

Où

- T_c est la température moyenne de la plaque chaude ;
- T_f est la température moyenne de la plaque froide ;
- A est la surface de la zone de mesure ;
- Q est le flux thermique qui traverse la zone de mesure A . Dans notre cas $Q=P_e$ où P_e est la puissance électrique dissipée ;
- d correspond à l'épaisseur de l'échantillon.

La valeur de la conductivité thermique déduite peut être liée à la température moyenne de l'essai soit $T_m = (T_f + T_c)/2$. Le dispositif est prévu pour faire des essais sur des épaisseurs d'isolant compris entre 4 et 46 cm (la limitation inférieure est dictée par l'épaisseur du joint entre la zone de mesure et la zone de garde l'épaisseur maximale est donnée par la largeur de la zone de garde).

Les essais réalisés sur les enduits n'ont pas été concluants. Ils ont permis de mettre en évidence le fait qu'il faut apporter un soin particulier aux faces du matériau qui sont en contact avec la plaque. Il est important que celles-ci soient parfaitement planes et lisses afin d'éviter qu'une couche d'air se crée entre le matériau et la plaque. Ceci est primordial lorsque le matériau est très conducteur puisque cette couche d'air aussi mince soit elle, augmente considérablement la résistance thermique. Seuls les essais sur ballot de paille seront repris dans cette fiche.

Première campagne

Les essais de conductivité thermique sur la paille ont été effectués sur un ensemble de ballot, provenant d'un même lot, mis en place dans un cadre d'1 m sur 1 m (figure 28). Vu l'anisotropie des ballots de paille, les essais ont été effectués selon les trois directions possibles (figure 29). Dans le sens de la longueur du ballot, seul quelques galettes ont été prélevées et testées. L'épaisseur de l'échantillon est donc beaucoup plus faible que dans les deux autres directions. Les cadres ont été testés une première fois après un stockage de plus ou moins un mois dans le laboratoire à environs 50 % HR. Ils ont ensuite été séchés à plus de 60 °C et ont été de nouveau testés. Avant l'essai, l'humidité relative moyenne au cœur du ballot a été vérifiée à l'aide de capteurs de température et d'humidité relative (Sensirion SHT75) placés dans l'épaisseur du cadre. Celle-ci était chaque fois inférieure à 2 % HR avant ce second essai.

Vu les épaisseurs importantes des cadres, les essais ont été réalisés à une température moyenne de 20 °C avec un ΔT entre les plaques égal à 10 °C. Toute autre

température moyenne pourrait induire de trop grandes erreurs de mesure. Il est donc impossible d'exprimer la conductivité thermique de référence (conductivité correspondant à une température de 10 °C). Cette constatation a été réalisée sur base de diverses modélisations.



Fig. 28 : Cadre de paille testé sur la plaque chaude gardée.

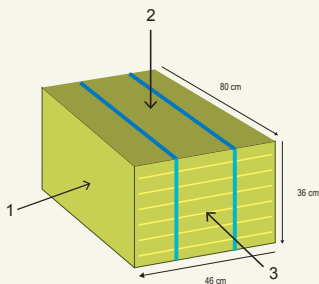


Fig. 29 : Orientation des flux de chaleur pour l'étude de la conductivité thermique de la paille.

Seconde campagne

Afin de mettre en évidence l'influence des espèces et des modes de culture sur les propriétés hygrothermiques de la paille, un ensemble de ballots venant de différents producteurs wallons (aux techniques culturales et aux équipements variés) ont été prélevés. Ceux-ci ont été testés du point de leur conductivité thermique. Pour chaque type de ballot, un cadre d'1 m² a été réalisé. Après séchage ceux-ci ont été testés sur la plaque chaude gardée à une température moyenne proche de 20 °C.

Résultats

Première campagne

Les résultats présentés dans le tableau suivant sont une moyenne de 3 essais réalisés à des températures moyennes différentes mais toutes proches de la température du local c'est-à-dire 20 °C. Pour les cadres de 38 et de 10 cm, les essais ont été réalisés sur ceux-ci lorsqu'ils étaient à 50 % HR et ils ont été recommencés après séchage. La direction des flux de chaleur lors des essais est donnée par la figure 29.

Conductivité thermique de la paille issue de la première campagne (t° moyenne 20 °C).

Orientation du flux	Ep. [cm]	λ sec brut [W/m.K]	λ humide [W/m.K]
1	46	0,0635 (1ère mesure) 0,0611 (2ème mesure)	
2	38	0,0682	0,0766
3	10	0,0461	0,499

Seconde campagne

Le tableau ci-dessous fournit les résultats des essais de conductivité thermique réalisés sur les différents ballots retenus pour la seconde étude. Hormis les ballots AL, tous les autres ont été testés dans leur dimension la plus épaisse c'est-à-dire ± 46 cm. La masse volumique sèche de chaque ballot y est également reprise.

Conductivité thermique à 20 °C de la paille issue de diverses variétés et modes de culture.

N° identification	Largeur [m]	Hauteur [m]	MV sèche [kg/m³]	Variété de céréale	λ sec [W/m.K]
Cadre composé de GG1 ; GG2 ; GG3	115	0,48	106	Froment	0,0615
Cadre composé de FD1 ; FD2 ; FD3	119	0,457	100	Froment	0,0615 0,0598 (λ à 40 % HR : 0,0693)
Cadre composé de FD 4 ; FD5 ; FD6	119	0,462	100	Froment	0,062
Cadre composé de FD7 ; FD8 ; FD9	119	0,465	98	Froment	0,0454 (2ème essai 0,0448)

N° identification	Largeur [m]	Hauteur [m]	MV sèche [kg/m³]	Variété de céréale	λ sec [W/m.K]
Cadre composé de GF1 (centré sur la zone de mesure)	119	0,464	94	Seigle	0,0549
Cadre composé de AL1 ; AL2 ; AL3 ; AL4			74	Orge	0,0584

Discussion

Sur le tableau le premier tableau de la page précédente, il est possible de constater l'influence de l'orientation du flux de chaleur sur la conductivité thermique du ballot. La valeur la plus intéressante étant de loin celle trouvée lorsque le flux de chaleur est perpendiculaire aux galettes de paille. L'influence de l'humidité est également mise en avant puisque sur le même cadre, on constate une augmentation de plus de 10 % de la conductivité lorsque celui-ci passe d'un état « sec » à un état standard à 50 % HR. Ces résultats sont confirmés dans le tableau le deuxième tableau de la page précédente puisque là aussi, pour un des cadres, un essai à 40 % HR et un essai à l'état sec ont été effectués. Ceux-ci ont mis en évidence une différence significative de performance.

En ce qui concerne l'influence des variétés ou de la masse volumique des ballots sur la conductivité thermique de ceux-ci, aucune tendance ne semble s'échapper. Les conductivités thermiques obtenues sont comprises entre 0,055 et 0,062 W/(m.K.). Un seul des cadres semble se détacher du lot et possède des performances très intéressantes, il s'agit du cadre composé de FD7,FD8 FD9. Cependant, en ce qui concerne le mode de récolte des ballots et leurs variétés, ce cadre se rapproche en tout point du cadre FD1; FD2; FD3.

λ Paille sèche = 0,045 à 0,0628 W/(m.K.)
 λ Paille 50 % HR = λ Paille sèche *1.12

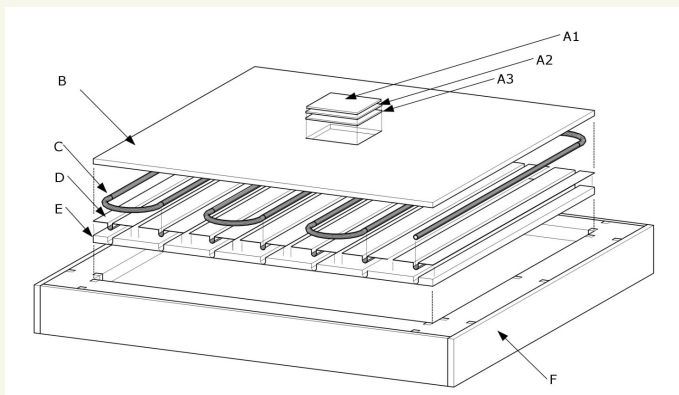


Fig. 30 : Composition de la plaque chaude (A1 : fine plaque d'aluminium; A2 : circuit résistif sur plaque de cuivre; A3 : pelletier; B : plaque d'aluminium; C : circuit hydraulique (chaud ou froid); D : ailette servant à la répartition de la chaleur; E : plaque de MDF ; F : isolation latérale du montage).

CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BALLOT DE PAILLE

Introduction

La conductivité thermique d'un ballot de paille est une notion très discutée dans le monde de la construction en paille, tant à l'échelle nationale qu'internationale. Comme décrit dans les fiches essais de ce vadémécum, la conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur par conduction. On suppose donc que la chaleur se propage à l'intérieur du matériau de particule à particule. De manière pratique on définit la conductivité thermique d'un corps grâce à son coefficient λ (λ , **exprimé en W/m.K**) qui représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré pour un mètre d'épaisseur. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. La conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau, de la température et de l'humidité. Quand l'humidité augmente, la conductivité thermique augmente en général, et un matériau isolant perd une partie de sa capacité d'isolation. En ce qui concerne la température, quand celle-ci augmente, un isolant perd de sa capacité d'isolation et, à l'inverse, un conducteur perd de sa capacité de conduction.

Le ballot de paille est de par sa nature relativement hétérogène, il est difficile pour un maître d'ouvrage ou un auteur de projet de sélectionner une valeur de conductivité thermique représentative du comportement global du matériau particulier qu'il utilise. Ceci est d'autant plus difficile que les données disponibles dans la littérature sont très variées et sont le fruit de techniques de mesure souvent empiriques. Pourquoi une telle divergence ? Tout simplement parce que les ballots de paille ont une épaisseur plus importante que la majorité des isolants disponibles sur le marché. En effet, même s'il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la conductivité thermique des matériaux, les outils disponibles pour mesurer directement la conductivité thermique d'isolant de grande épaisseur (> 25 cm) ne sont pas légion. Beaucoup d'essais ont donc été réalisés sur des épaisseurs plus faibles de matériaux ou au moyen de technique empirique. Sur base d'un petit tour de l'état de l'art actuel et des diverses expériences réalisés dans le projet aPROPaille, des valeurs de conductivités thermiques sécuritaires et représentatives du comportement de la paille seront proposées. Outre l'épaisseur du ballot de paille, son comportement hygrothermique est également à considérer. Ainsi, selon le taux d'humidité relative dans la paroi (pouvant varier de 40 à 60% voire 90% dans certains cas critiques) la conductivité thermique du ballot de paille évoluera sensiblement.

Historique des résultats internationaux

Lorsque l'on regarde les données disponibles dans la littérature, il n'est pas rare de retrouver deux données de conductivité thermique ; une donnée nous indiquant la conductivité thermique lorsque le flux de chaleur est perpendiculaire aux brins

de paille et une seconde valeur pour laquelle le flux de chaleur est parallèle aux brins de paille. Nous reviendrons sur ce point ci-après, mais il convient d'observer que cette distinction a été réalisée depuis le début des études thermiques sur ballots. En effet, dans le document de McCabe (1993), qui apparaît comme étant la première étude largement référencée sur la conductivité thermique de la paille, on retrouve déjà cette distinction. Grâce à un dispositif s'apparentant à une plaque chaude, il montra que la conductivité thermique d'un ballot de paille était de 0,061 W/m.K avec un flux parallèle aux fibres et de 0,048 W/m.K avec un flux perpendiculaire aux fibres. Dans la foulée des études similaires ont été conduites par un grand nombre d'auteurs dont notamment Andersen (2001) et Shea (2013). Dans son étude, Andersen (2001) a demandé à l'institut technologique danois d'étudier l'influence de la densité des échantillons de paille sur la conductivité thermique. Plus particulièrement, ils ont étudié deux lots d'échantillons, des échantillons dont la densité était de 75 kg/m³ et un second lot dont la densité était de 90kg/m³. Pour le premier lot à 75 kg/m³, ils ont mesuré une conductivité thermique de 0,052 W/m.K pour un flux perpendiculaire aux fibres et 0,056 W/m.K pour un flux parallèle. Pour le second lot, ils ont mesuré des valeurs légèrement supérieures puisqu'ils ont obtenu 0,056 W/m.K avec un flux perpendiculaire aux fibres et 0,06 W/m.K lorsque celui-ci était parallèle. Plus récemment, Shea (2013) a étudié au moyen d'un fluxmètre thermique divers échantillons de paille de 25 cm d'épaisseur compressés à diverses densités sans organisation particulière des fibres. Les conductivités thermiques trouvées variaient entre 0,059 W/m.K pour une densité de 63 kg/m³ à 0,064 W/m.K pour une densité de 123 kg/m³. Une autre étude réalisée par la FASBA, sur des échantillons de plus faible épaisseur (10 cm), met en évidence de meilleures performances, puisqu'ils ont mesuré une conductivité thermique de l'ordre de 0,045 W/m.K pour un flux perpendiculaire aux fibres. Le tableau ci-dessous résume les valeurs décrites dans ce premier chapitre.

Conductivités thermiques d'un ballot de paille définies par divers auteurs.

Auteur	Densité	Orientation	Conductivité [W/m.K]
McCabe, 1993	130	Perpendiculaire	0,0487
		Parallèle	0,0605
Andersen, 2001	75	Perpendiculaire	0,052
		Parallèle	0,056
	90	Perpendiculaire	0,056
		Parallèle	0,06

Auteur	Densité	Orientation	Conductivité [W/m.K]
Shea , 2013	63	Sans arrangement	0,0594
	76		0,0621
	85		0,0619
	107		0,0642
	114		0,0642
	123		0,0636
Fasba, 2003	90-110	Perpendiculaire	0,045
Institut Allemand pour les techniques de construction, 2006	90-110	Parallèle	0,08
		Perpendiculaire	0,052

A côté de ces valeurs disponibles sur les sites internet ou dans certains articles scientifiques, on peut retrouver des valeurs un peu plus officielles disponibles dans un agrément général de contrôle des constructions édité par l'institut allemand pour les techniques de construction¹. Encore une fois, dans cet agrément, une distinction est réalisée entre flux perpendiculaire aux fibres et flux parallèle aux fibres ($\lambda = 0,080$ W/m.K dans le sens des brins de paille ; $\lambda = 0,052$ W/m.K transversalement au sens des brins de paille).

L'orientation de la fibre

Comme discuté ci-dessus, l'orientation de la fibre par rapport au flux de chaleur semble jouer un rôle majeur dans la détermination de la conductivité thermique du ballot de paille. Cette constatation émane des premiers tests et est toujours valable à ce jour, comme le démontrent les résultats de la recherche aPROpaille.

Cependant, à travers la littérature, les rapports de recherches internationales ou simplement dans le discours des professionnels du domaine, le vocabulaire employé peut poser problème. En effet, dans le but d'exprimer les 3 sens de pose du ballot de paille dans la paroi, différentes appellations ont vu le jour ; sur champ, sur face, sur côté, sur sa tranche, sur sa plus grande face, sur son plus grand côté... La diversité des appellations complique davantage la compréhension de contenu scientifique à l'échelle internationale. La notion d'orientation de la fibre par

1. Agrément technique générale n°Z-23.11-1595 du 10/02/2006 - INSTITUT ALLEMAND DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION pour le compte de FASBA.

rapport au flux de chaleur devient alors plus floue et des valeurs de conductivité thermique semblent utilisées de manière erronée. Afin d'éclaircir la situation et de ne laisser aucune ambiguïté dans l'interprétation des résultats de la recherche, le présent chapitre vise à présenter le plus clairement possible les 3 sens de pose du ballot de paille et, donc, les 3 directions possibles pour la mesure de la conductivité thermique.

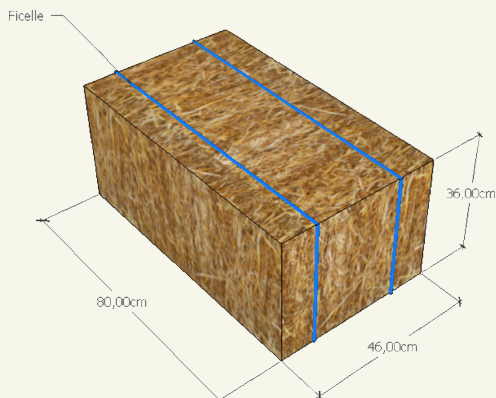


Fig. 31 : Dimensions du ballot de paille considéré dans la recherche «aPROpaille».

La figure 31 illustre les dimensions considérées comme «standards» pour chaque ballot de paille dans le cadre de la recherche. Le ballot est ainsi décrit comme aillant une largeur de 46 cm, une hauteur de 36 cm et une longueur de 80 cm. La hauteur et la largeur sont fixes et ne varient que dans de rares occasions (modèles de presses particuliers). Les dimensions du canal de compression déterminent la section du ballot et sont généralement de 46 cm x 36 cm. A la sortie de la presse, le ballot se «relâche» quelque peu ; on peut donc assister à une légère variation de la section du ballot (ex : 47 cm x 37 cm). La longueur, elle, est totalement variable et peut être adaptée selon les besoins. Selon le constructeur, les longueurs de ballots peuvent varier de 36 cm à 120-150 cm. A noter que la réduction de la longueur entraîne une manutention beaucoup plus importante et, à l'inverse, des longueurs trop importantes génèrent des problèmes de cohésion du ballot et de manutention (trop encombrant et/ou trop lourd).

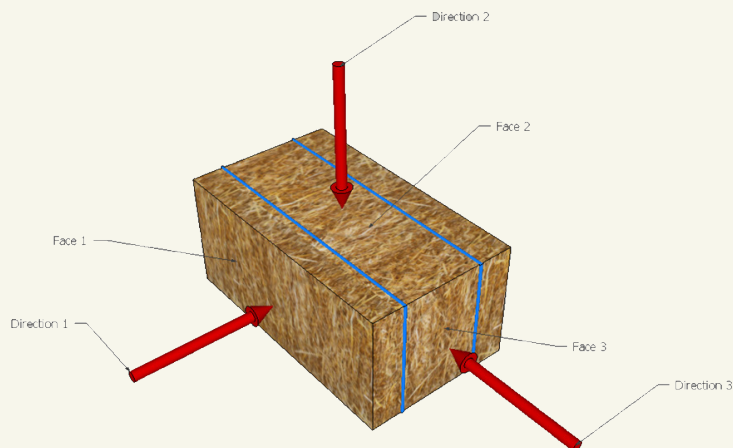


Fig. 32 : Illustration des 3 directions possibles pour la mesure de la conductivité thermique. Les trois flèches rouges représentent le sens du flux de chaleur.

Sur base de la description apportée par la figure page précédente, la figure 32 introduit la notion de « direction » du flux de chaleur. Ainsi, les flèches rouges représentent un flux de chaleur (déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment) traversant le ballot de paille (fibres et vide).

A chaque direction, on associe la « face » du ballot correspondante. Cette face est celle qui sera visible, depuis l'intérieur, une fois le ballot mis en œuvre dans la paroi. On note ainsi la **face 1** représentée par le côté du ballot. Sur les modèles de presse « décentré » par rapport à l'andain², cette face peut présenter des sections de paille apparentes résultant de l'action du couteau et contre-couteau de la presse. La **face 2** est ici représentée par la plus grande face sur laquelle les ficelles sont présentes. Plus communément, et dans une configuration identique à celle présentée sur la Figure 1, on parlera de « dessus du ballot » ou dessous pour la face opposée. Reste enfin la **face 3** qui représente la section du ballot et l'ensemble des « galettes » qui composent ce dernier. Dans une approche vulgarisée, on peut considérer que le ballot est ici composé d'une succession de « face 3 » maintenues ensembles par deux ficelles. Cette face est rarement discutée dans la littérature car le sens de pose qui lui est associé (la direction 3) est rarement rencontré dans la pratique.

Afin de visualiser au mieux les 3 sens de pose possibles pour l'usage du ballot de paille comme matériau isolant en remplissage d'une ossature bois, les 3 figures page suivante donnent un exemple de mise en œuvre ainsi que les faces apparentes et la direction du flux de chaleur qui en résultent.

2. Voir le Vademecum n°1 pour les explications sur les différents types de presses.

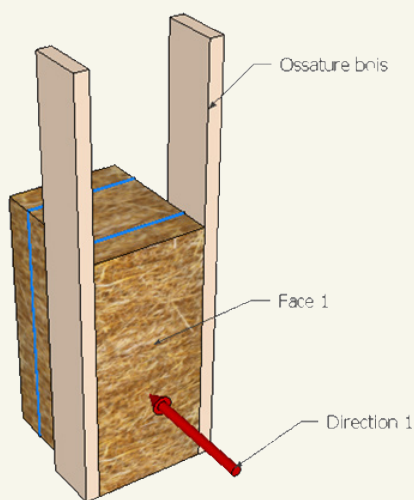


Fig. 33 : Mise en œuvre du ballot - Face 1 apparente.

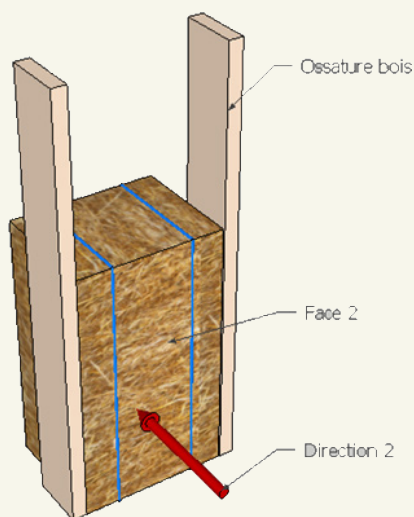


Fig. 34 : Mise en œuvre du ballot - Face 2 apparente.

La figure 33 illustre le premier sens de pose du ballot dans l'ossature, ici, «semi-traversante. Dans ce cas précis, le ballot **est posé sur la face 3, la face 1 est donc apparente**. L'épaisseur de l'isolation en paille est alors de 46 cm et la largeur entre chaque élément de l'ossature est de 36 cm.

Dans le cas d'une ossature non- traversante (ex: technique GREB), le ballot peut être posé à l'horizontale sur sa face 2 (appelé également «pose à plat»), contrairement à la pose verticale ci-contre. Dans cette configuration, la face 1 est toujours apparente.

Ce mode de pose est généralement privilégié lorsque le ballot sert de support pour un enduit de terre, les pailles sectionnées offrant une meilleure accroche en complément de l'éventuelle barbotine.

Le second sens de pose est représenté par la figure 34. Dans cette version, le ballot est également **posé sur la face 3** mais la **face 2 est apparente**. L'épaisseur de l'isolation en paille est de 36 cm et la largeur entre chaque élément de l'ossature est de 46 cm.

A nouveau, dans une technique de construction sans ossature traversante (GREB), les ballots peuvent être posés à l'horizontale sur leur face 1 (appelé également «pose sur champ»). La face 2 est toujours apparente.

Ce mode de pose est moins rencontré car il conditionne l'entraxe des éléments de l'ossature à un espace trop important (plus de 46 cm).

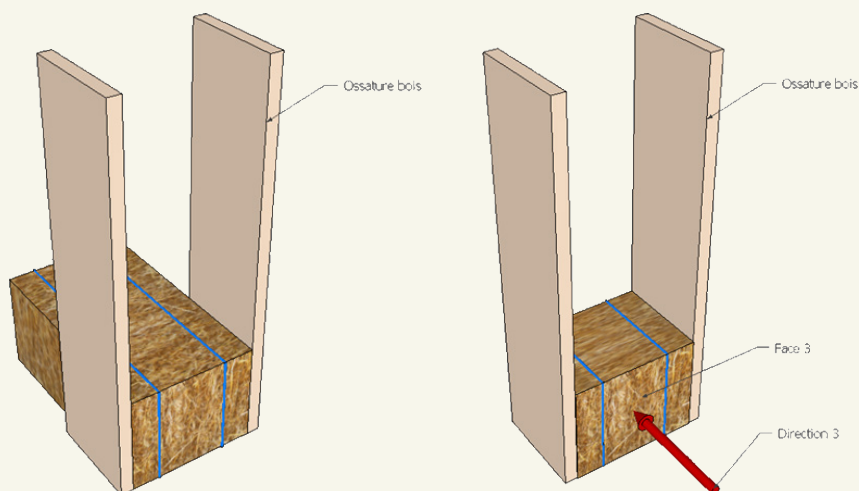


Fig. 35: Mise en œuvre du ballot - face 3 apparente.

Ce troisième exemple de sens de pose, émane de la recherche aPROpaille. Il s'agit d'une proposition de mise en œuvre théorique qui tire parti des résultats des mesures de conductivité thermique. Dans ce mode de mise en œuvre, le ballot est uniquement utilisé comme matériau isolant de remplissage, généralement associé à des caissons en bois avec ossature traversante. Le ballot peut alors être placé dans la paroi dans le sens de sa longueur. Cela reviendrait à considérer des parois d'épaisseur égale à la longueur du ballot (soit 80 cm). Une telle hypothèse est peu réaliste, il est plutôt considéré que la longueur du ballot est revue à la baisse afin de correspondre à l'épaisseur réelle de l'ossature bois (ex: 36 cm). Dans une telle configuration, le ballot peut être **posé au choix sur la face 2 ou sur la face 1** ; la **face 3 est celle qui sera apparente**.

Ce rappel sur le sens de pose d'un ballot de paille dans une ossature bois permet d'expliquer et représenter clairement la raison pour laquelle il est important d'être précis quand on en vient à parler de la conductivité thermique d'un ballot de paille qui présente des propriétés anisotropiques de par la multitude de fibres qui le composent. Les points suivants présenteront les recherches et mesures réalisées selon ces trois sens de pose et trois directions du flux de chaleur.

Rappel des premières mesures «aPROpaille»

Dans la première biennale de la recherche aPROpaille (2012-2013), une campagne de mesures a été mise en place. Un groupe d'agriculteurs a été identifié selon

leur méthode culturale, le type de machine employée et leur situation géographique. Durant l'été 2012, une récolte de ballots de moyenne densité a eu lieu, les agriculteurs ayant été préalablement sensibilisés aux critères de sélection des dits ballots, à savoir ;

- Une longueur de +/- 100 cm .
- Une densité moyenne de 100 kg/m³.
- Un taux d'humidité inférieur à 15 %.
- Une paille issue d'une ligne droite en milieu de champ afin d'éviter l'altération de la qualité de la paille issue des bords de champs et de garantir une alimentation constante de la presse (meilleure maîtrise de la qualité du ballot produit).

Chacun des ballots récoltés a alors été mesuré, pesé et étiqueté afin de garantir son suivi jusqu'à leur mise en œuvre dans un cadre de mesure. Ce cadre en bois, de dimensions approximatives de 100 x 100 x 47 cm, maintient les ballots en place en simulant leur mise en œuvre dans la paroi du bâtiment. Ils sont entourés d'une membrane bitumineuse garantissant qu'au moment de la mesure, aucun échange d'eau ou de vapeur d'eau n'a lieu entre l'échantillon, conditionné à 23 °C et 50 % d'humidité relative, et l'environnement de test, c.-à-d. le local dans lequel est situé l'appareil de mesure, à une température moyenne de 20 °C et une humidité relative entre 40 % à 60 %.



Fig. 36 : Echantillon type : 3 ballots de caractéristiques identiques sont placés dans un cadre en bois, lui-même entouré d'une membrane d'étanchéité.

Par la suite, chacun de ces cadres furent séchés de manière à pouvoir effectuer la mesure de la conductivité thermique sèche (requis pour des logiciels de simulation dynamique comme «WUFI Pro»). Ces mesures s'effectuent via la «plaque chaude gardée», outil développé spécifiquement pour les ballots de

paille dans le cadre de la recherche³. Le présent chapitre ne repassera pas en revue le principe de cette mesure ou de l'appareil en lui-même. Les fiches essais, consultables en début d'ouvrage, détaillent, entre autres, le principe de la mesure de la conductivité thermique.

Les résultats des premières mesures de conductivité thermique à l'état sec sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Synthèse des résultats de mesures à 20 °C sur des échantillons séchés à 0 % d'HR.

Céréales	Densité moyenne [kg/m ³]	Presse	Épaisseur [m]	Direction du flux de chaleur	Conductivité thermique sèche mesurée à 20°C ($\lambda_{20,dry}$) [W/m.K]
Escourgeon	85,72	Claas	0,3	2	0,0584
Froment	105,87	New-Holland	0,36	2	0,062
Froment	115,47	John-Deere	0,36	2	0,0778
Seigle	87,66	Inconnue	0,36	2	0,055
Froment	100	Massey-Ferguson	0.46	1	0.06
Froment	100	Massey-Ferguson	0.36	2	0.045
Froment (en « galettes » à plat)	100	Inconnue	0.1	3	0.0461
Froment	105	Inconnue	0.32	3	0.044

3. Dubois S., Lebeau F., *Design, Construction and Validation of a Guarded Hot Plate Apparatus for Thermal Conductivity Measurement of High Thickness Crop-Based Specimens, Materials and Structures*, RILEM, Springer, October 2013.

A l'issue de cette première campagne de mesure, le souhait de la recherche fut de pouvoir isoler une (ou plusieurs) valeur(s) « standard » pour un ballot de paille afin de l'intégrer dans le cadre réglementaire national. Toutefois, cette approche réglementaire nécessite la mise en œuvre de protocoles de mesure bien particuliers, du conditionnement des échantillons jusqu'à la température moyenne à laquelle s'effectue la mesure.

Ce dernier paramètre fut le plus problématique ; placée dans un local à température ambiante, la plaque chaude gardée fonctionnait à une température moyenne de 20°C (plaque froide à 15°C, plaque chaude à 25°C) afin d'éviter les erreurs de mesures dues à la perturbation du flux thermique entre plaque chaude et plaque froide et l'ambiance du local (~20°C également). Dans le cadre réglementaire défini par la « PEB » (Performance Énergétique des Bâtiments) belge (NBN B62-002), la mesure de la conductivité thermique d'un matériau isolant doit se faire à une température moyenne de 10°C, selon les recommandations émises dans la norme EN ISO 10456.

Afin de répondre à cet impératif technique et à cerner au mieux les valeurs attendues pour obtenir la conductivité thermique « déclarée » (= celle à afficher sur un éventuel agrément technique), de nouveaux protocoles de test furent mis au point pour la seconde campagne de mesure. Le résultat de ce travail figure dans les deux points suivants.

Seconde campagne de mesures

Protocole & valeurs recherchées

Objectifs

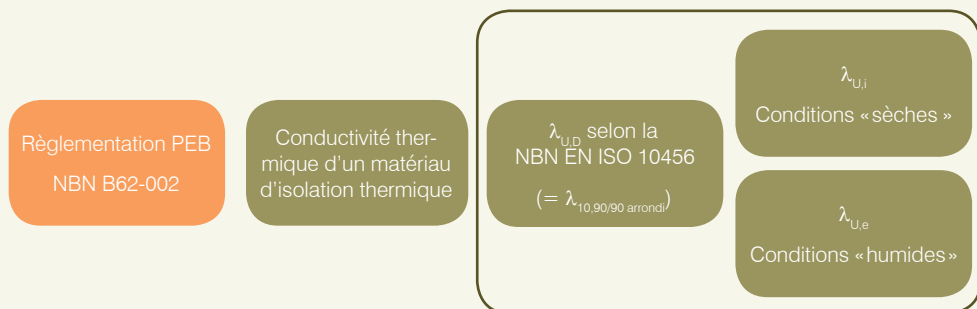
Le présent sous-chapitre vise à présenter de manière synthétique le protocole de tests utilisés dans le cadre de la seconde campagne de mesure de la recherche. Ce protocole permet l'obtention de conditions de tests et de résultats compatibles avec les conditions décrites dans la NBN B62-002 (qui fait également appel à la EN ISO 10456), ainsi que dans les procédures spécifiques⁴ à l'introduction d'un matériau dans la base de données EPBD. Cette première partie vise donc à détailler l'équipement et le protocole de mesure utilisé pour obtenir les valeurs de conductivité thermique annoncées à l'issue de la recherche.

Dans la seconde partie, une brève description des diverses formes de conductivité thermique est présentée. En effet, à travers les normes, mais également dans les documents réglementaires qui en découlent, il est souvent fait notion de λ_d , $\lambda_{U,i}$, $\lambda_{10,90/90}$, etc. Afin de faciliter la compréhension de chacune de ces valeurs et les relations qui les relient, le Tableau 2 reprend chacun des intitulés et leur signification. L'objectif, ici, est de permettre à tout producteur de comprendre et/

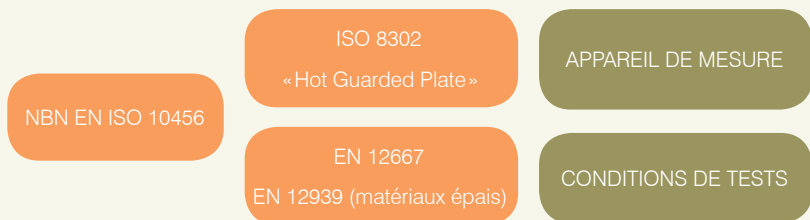
4. Doc_1.1_S.FR_isolant thermique_v2.2_20090804.doc – www.epbd.be.

ou déterminer la conductivité thermique déclarée, c'est à dire la valeur « commerciale » d'une conductivité thermique, sur base de résultats de tests qu'il aura à disposition ou qu'il voudrait réaliser.

Le schéma suivant présente la structure menant aux normes de références utilisées dans le cadre de ce travail. Ces normes ont été consultées afin de cibler les valeurs de mesures à obtenir pour la reconnaissance réglementaire du matériau « ballot de paille » ainsi que les conditions de tests nécessaires à l'obtention de résultats fiables et acceptables par un organisme de contrôle indépendant.



La norme de référence pour les valeurs utiles et tabulées ainsi que les procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles de matériaux et produits pour le bâtiments est la « **ISO 10456 :2007** ». Cette même norme, transposée à l'échelle de la Belgique (**NBN EN ISO 10456**), est utilisée dans le cadre de cette tâche. Ce document de référence stipule les techniques valables pour la mesure de la conductivité thermique ainsi que les normes de référence à utiliser selon le type de matériau testé.



Données recherchées

Récapitulatif des différentes formes de conductivité thermiques.

Don- nées	Description	Obten- tion
$\lambda_{10,dry}$	Correspond à la conductivité thermique mesurée à une température moyenne d'essai de 10° C sur un échantillon à l'état « sec » (séché pendant minimum 72 h jusqu'à ce que sa masse ne varie pas de plus de 0,1 % en 24 h).	Mesure
$\lambda_{10,(23,50)}$	Correspond à la conductivité thermique mesurée à une température moyenne d'essai de 10 °C sur un échantillon considéré à l'état « humide ». Cet échantillon est conditionné à une ambiance dont le taux d'humidité est celui à 23 °C et pour une HR de 50 %.	Mesure
$\lambda_{10,90/90}$	Correspond à une conductivité thermique statistique, laquelle permet de fixer un seuil maximal représentant 90 % de la production avec une probabilité de 90 % que la conductivité thermique de cette production soit inférieure ou égale à la valeur lambda déclarée. Est calculé sur base d'une formule statistique détaillée plus loin dans ce document.	Calcul
λ_D	Correspond à la valeur « déclarée » de conductivité thermique telle qu'annoncée sur les fiches techniques des fabricants. Elle est déterminée selon les conditions décrites dans le document des procédures spécifiques à l'introduction d'un matériau dans la base de données EPBD. Selon ces mêmes conditions, il est possible de constater que $\lambda_D = \lambda_{10,90/90}$ arrondi selon les règles décrites dans la norme EN ISO 10456 et dans la suite du document.	

Don- nées	Description	Obten- tion
$\lambda_{u,i}$	Est utilisée dans les logiciels de calculs énergétiques (PEB, PHPP, ...). Pour les matériaux d'isolation thermique, sauf cas particulier, elle est identique à la valeur de la conductivité « déclarée » et correspond à la conductivité thermique en conditions intérieures. Elle est à considérer lorsque le matériau est mis en œuvre dans des parois intérieures et dans des parois extérieures, pour autant qu'ils ne puissent être mouillés ni par l'eau de pluie, ni par condensation permanente interne ou superficielle, ni par remontée des eaux du sol. Cette valeur ne peut être utilisée pour des matériaux qui sont enfermés d'une manière étanche à la vapeur d'eau et qui peuvent contenir de l'humidité (ex : eau de construction ou eau pluviale). Les conditions de tests pour cette conductivité sont exprimées dans la valeur « u23,50 » et correspondent à un taux d'humidité d'équilibre à 23 °C et une humidité relative de 50 %.	Mesure
$\lambda_{u,e}$	Peut également être utilisée dans des logiciels de calculs énergétiques. Correspond à la conductivité thermique en conditions humides. Elle est à considérer lorsque le matériau est mis en œuvre dans des parois extérieures, qui peuvent être mouillés par la pluie, par condensation permanente ou superficielle, ou par remontée des eaux du sol. Ceci vaut également pour les parois extérieures qui sont pourvues d'un enduit extérieur, à moins qu'il ne soit démontré que cet enduit soit suffisamment durable et étanche à l'eau de pluie. Cette valeur doit également être utilisée pour des matériaux enfermés d'une manière étanche à la vapeur d'eau qui contiennent de l'humidité. Le $\lambda_{u,e}$ est obtenu soit par mesure, soit sur base d'une conversion de la valeur λ_D . Cette conversion est effectuée à l'aide des formules indiquées dans la NBN EN ISO 10456 et tient compte d'un facteur de conversion pour l'humidité « fu » et de taux d'humidité « u ». Ce facteur fait lui-même appel à une constante qui dépend du type de matériau et est renseigné dans les annexes de la NBN EN ISO 10456. Cependant, il ne semble exister actuellement aucun facteur de ce type pour la paille.	Calcul

Dans l'approche réglementaire mise en œuvre à travers la 2ème biennale de la recherche, les valeurs mesurées correspondent à $\lambda_{10(23,50)}$. La valeur déclarée (λ_D ou λ_{Uf}) n'est ici pas déterminée car elle relève d'un caractère « commercial » et statistique dépendant d'un nombre important de tests et de nombreuses variables intermédiaires. Le souhait des chercheurs est davantage d'étudier l'influence de certains paramètres sur la conductivité thermique plutôt que de se concentrer sur un seul d'entre eux afin d'en déterminer cette valeur « commerciale » qui nécessiterait l'organisation d'une campagne de mesures spécifiques.

Toutefois, l'objectif de la recherche étant également d'accompagner le secteur dans ses propres démarches de recherche & développement, le point 1.5.3 du présent document permettra à tout producteur de prendre connaissance de la méthode de calcul nécessaire à la détermination d'une valeur de conductivité thermique « déclarée ».

Protocole & conditions de tests

Le protocole complet mis au point pour la seconde campagne de mesure de la conductivité thermique « initiale » ($\lambda_{10(23,50)}$) est ici présenté de manière condensée afin d'en simplifier la compréhension. Ce nouveau protocole est structuré selon les points suivants ;

- Réception des ballots et mise en cadre de ceux-ci.
- Prise de mesure de la masse totale du cadre et de la masse de bois afin de déterminer la densité et la masse de la paille mise en œuvre .
- Conditionnement du cadre complet à une ambiance de 23 °C et 50 % d'humidité relative jusqu'à obtention d'une teneur en eau à l'équilibre.
- Mesure de la conductivité thermique du cadre dans une ambiance stabilisée à 10 °C (température moyenne de la mesure = 10 °C – Plaque chaude à 15 °C, plaque froide à 5 °C).

Ce protocole sera respecté pour la mesure des ballots en 46 cm (direction 1) puis en 36 cm (direction 2) après reconditionnement de l'échantillon dans un second cadre moins épais.

La chambre climatique

Durant la première biennale de la recherche, les tests de conductivité thermique réalisés via la plaque chaude gardée réalisée à l'ULg Agro Bio-Tech à Gembloux étaient effectués à une température moyenne de l'essai de 20 °C. Ce choix fut porté de manière à ce que la mesure ne soit pas influencée par les transferts de chaleur entre l'appareil de mesure et l'ambiance du local de test.



Fig. 37. Chambre climatique destinée à accueillir la plaque chaude gardée dans une ambiance contrôlée à 10 °C.



Fig. 38: La plaque chaude gardée et l'écran de contrôle.

Note : le cadre en cours de mesure est entouré d'un film plastique transparent en lieu et place de la membrane noire précédemment utilisée.

Selon les recommandations de la NBN B62-002 et les conditions de tests détaillées dans la NBN EN ISO 10456, et dans l'optique où la recherche vise une meilleure approche de la conductivité thermique utile du ballot de paille, il est impératif d'effectuer l'ensemble des mesures à une température moyenne de l'essai de 10 °C. Cette constatation implique de conditionner l'appareil de mesure en lui-même dans une ambiance contrôlée et garantissant une température constante de $(10 \pm 0,1)$ °C tout au long de la mesure. Pour ce faire, une chambre climatique de grande dimension fut utilisée. Celle-ci se présente sous la forme d'un container frigorifique dont l'équipement permettant de conditionner l'ambiance intérieure est calibré de manière à respecter les exigences du document de référence.

La conductivité thermique « déclarée »

Les mesures effectuées au cours de la recherche aPROpaille visent à déterminer la conductivité thermique « initiale », notée ici $\lambda_{10(23,50)}$. Ces valeurs sont issues de mesures réalisées à une température moyenne de 10 °C sur des échantillons conditionnés à une température de 23 °C et une humidité relative de 50 %. Ce sont donc des valeurs « brutes » sortant tout droit d'un appareil de mesure travaillant sur un échantillon spécifique qui n'est pas nécessairement représentatif de la production dans son ensemble. En effet, si une campagne de mesure devait être réalisée sur chaque panneau ou rouleau d'un même type d'isolant chez un même fabricant, on constaterait une légère variabilité des valeurs relevées. Afin de tenir compte de cette fluctuation, une valeur statistique de la conductivité thermique est calculée de manière à garantir que, dans 90% des cas, 90% de la production aura une valeur inférieure ou égale à la conductivité thermique déclarée. Cette valeur statistique est notée $\lambda_{10,90/90}$ et est calculée selon les procédures détaillées à l'annexe A de la norme EN 13162, reprises ci-dessous ;

$$\lambda_{(10,90/90)} = \lambda_{\text{moyenne}} + k * S_{\lambda}$$

Dans laquelle :

λ_{moyenne} est la conductivité thermique moyenne de l'ensemble des mesures

k est un coefficient issu du tableau C.1 de l'annexe C de la norme NBN EN ISO 10456 et est fonction du nombre de tests effectués.

S_{λ} est calculé comme suit :

$$S_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_{\text{moyenne}})^2}{n - 1}}$$

Une fois la valeur $\lambda_{10,90/90}$ obtenue, une règle d'arrondi est appliquée afin de déterminer la conductivité thermique « déclarée », notée λ_D . Cette règle, issue du point 5.a de la norme EN ISO 10456, est détaillée comme suit :

- Si $\lambda \leq 0,08$: arrondir à l'excès à 0,001 W/(m.K) près
Ex : 0,0437 W/(m.K) devient 0,044 W/(m.K)
- Si $0,08 < \lambda \leq 0,20$: arrondir à l'excès à 0,005 W/(m.K) près
Ex : 0,0954 W/(m.K) devient 0,100 W/(m.K)
- Si $0,20 < \lambda \leq 2,00$: arrondir à l'excès à 0,01 W/(m.K) près
Ex : 0,3765 W/(m.K) devient 0,38 W/(m.K)
- Si $2,00 < \lambda$: arrondir à l'excès à 0,1 W/(m.K) près
Ex : 3,45 W/(m.K) devient 3,5 W/(m.K)

En résumé :

Mesures	Calcul statistique	Arrondi
$\lambda_{10(23,50)}$	$\lambda_{10,90/90}$	$\lambda_D (= \lambda_{ui})$

Exemple :

La société Dupont sprl (fictive) produit des ballots de paille à destination de la construction. Afin d'en garantir la reconnaissance réglementaire, un laboratoire agréé est sollicité pour la réalisation des mesures de conductivité thermique sur différents échantillons issus de la production de l'entreprise. A l'issue de ce travail, le laboratoire remet un rapport dans lequel sont repris les résultats suivants ;

Mesures	$\lambda_{10(23,50)}$ [W/m.K]
1	0,066
2	0,067
3	0,065
4	0,064
5	0,063
6	0,063
7	0,062
8	0,067
9	0,065
10	0,064
Moyenne	0,0646

Sur base de ces résultats, la conductivité thermique « statistique », notée $\lambda_{10,90/90}$ peut être déterminée :

$$S_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\lambda_i - 0,0646)^2}{10 - 1}}$$

$$S_{\lambda} = 0,0017$$

$$\lambda_{(10,90/90)} = 0,0646 + 2,07 * 0,0017$$

$$\lambda_{(10,90/90)} = 0,069$$

Note : pour un total de 10 mesures, le tableau C.1 de l'annexe C de la norme NBN EN ISO 10456 renseigne une valeur k de 2,07.

Enfin, pour déterminer la conductivité thermique déclarée recherchée par l'entreprise Dupont, les règles d'arrondi décrites ci-dessus sont appliquées sur la valeur de 0,069 W/m.K.

$$\lambda_D = 0,069 + 0,001$$

$$\lambda_D = 0,070 \text{ W/(m.K)}$$

Sur base de ce résultat, Dupont sprl peut, en toute confiance, afficher une conductivité thermique déclarée de 0,070 W/(m.K) sur leur ATG de même que dans la base de données du logiciel réglementaire «PEB».

A ce stade, il est intéressant d'observer l'écart significatif entre les conductivités thermiques moyennes réellement mesurées ($\sim 0,0646 \text{ W/(m.K)}$) et la valeur déclarée en bout de processus (0,070 W/(m.K)).

Analyse des nouveaux résultats

D'avril 2015 à novembre 2015, une vingtaine de mesures ont été effectuées via la plaque chaude gardée placée dans la chambre climatique. Ces mesures ont majoritairement été réalisées sur des échantillons de 46 cm d'épaisseur présentant des caractéristiques différentes au niveau du type de céréales, de la densité des ballots ou du type de presse utilisé. Les résultats sont présentés ci-après.

Le tableau, page suivante, reprend l'ensemble des mesures réalisées sur les mêmes échantillons que ceux considérés dans le tableau page 88, plus haut dans ce chapitre et ayant servi de premiers tests pour les mesures de la première biennale de la recherche. Certains de ces échantillons furent cependant reconditionnés (changement du sens de pose dans le cadre en bois) pour la mesure à 10 °C. Les valeurs présentées ci-dessous sont donc issues de mesures plus récentes et plus précises effectuées à 10 °C sur des échantillons conditionnés à 23 °C et 50 % d'humidité relative comme le recommande la norme EN ISO10456. Les deux derniers échantillons présentant un type de presse « inconnue » sont des produits développés par des entreprises hors du cadre de la recherche mais qui ont la caractéristique de démontrer les meilleures performances pour la paille dans la direction 3.

Synthèse des résultats de mesures à 10 °C sur des échantillons conditionnés à 23 °C et 50 % d'HR- Campagne de mesures 2012-2013.

Céréales	Densité moyenne (après conditionnement dans cadre de test) [kg/m³]	Presse	Épaisseur [m]	Direction du flux de chaleur	Conductivité thermique mesurée à 10 °C ($\lambda_{10,23/50}$) [W/m.K]
Escourgeon	74	Claas	0,3	2	0,0655
Froment	111,8	New-Holland	0,470	1	0,0786
Froment	114,6	John-Deere	0,488	1	0,067
Seigle	91,9	Inconnue	0,485	1	0,075
Froment	107,8	Massey-Fergusson	0.386	2	0,077
Froment	104,7	Massey-Fergusson	0.462	1	0,064
Froment	142,5	Inconnue	0,327	3	0,0538
Froment	111,1	Inconnue	0,09	3	0,0464

Le Tableau 5 présente quant à lui les résultats de la deuxième campagne de tests. Les échantillons furent tous produits sur base de deux presses; une Massey Fergusson annoncée comme favorable pour l'organisation de la fibre à l'intérieur du ballot et une New-Holland, reflet d'une presse « standard », similaire à beaucoup d'autres sur le marché.

Une assistance fut procurée à l'agriculteur lors de la production des ballots afin de définir clairement les attentes de la recherche du point de vue des échantillons ; des dimensions précises et trois types de densités, haute (150 kg/m³), moyenne (100 kg/m³) et faible (51 kg/m³). Seule la presse New-Holland ne fut pas en mesure de produire des ballots de haute densité en raison d'un problème mécanique après la production des échantillons de plus faibles densités.

Deux types de céréales sont présentes dans l'ensemble des échantillons; du froment et de l'épeautre BIO. Le seigle, attendu par la recherche, fut produit courant 2015 et pressé en été de cette même année. Malheureusement, les valeurs résultant de ces mesures ne furent pas exploitables.

Comme pour les mesures précédentes, et afin de respecter la norme EN ISO 10456, les échantillons ont été conditionnés à 23 °C et 50 % d'humidité relative, puis mesurés à une température moyenne de test de 10 °C dans une chambre climatique stabilisée, elle aussi, à 10 °C. Tous les échantillons sont placés en 47 cm d'épaisseur (flux de chaleur dans la direction 1 du ballot), ce mode de pose étant privilégié par Paille-Tech, partenaire industriel de la recherche.

Synthèse des résultats de mesures à 10 °C sur des échantillons conditionnés à 23 °C et 50 % d'HR - Campagne de mesures 2014-2015.

Céréales	Densité moyenne (après conditionnement dans cadre de test) [kg/m³]	Presse	Épaisseur [m]	Direction du flux de chaleur	Conductivité thermique mesurée à 10 °C ($\lambda_{10,23/50}$) [W/m.K]
Epeautre BIO	122,7	Massey Fergusson	0,485	1	0,0792
Epeautre BIO	95,8	Massey Fergusson	0,485	1	0,0692
Froment	87,7	New-Holland	0,486	1	0,068
Froment	103,2	New-Holland	0,495	1	0,0766
Froment	90,6	Massey Fergusson	0,484	1	0,0668
Froment	68,1	Massey Fergusson	0,481	1	0,0613
Froment	112,7	Massey Fergusson	0,476	1	0,0778

Comme le montrent les résultats des 2 tableaux ci-dessus, les conductivités thermiques mesurées varient fortement d'un échantillon à l'autre, mais certaines tendances peuvent se démarquer. Ces tendances trouvent, d'une manière ou d'une autre, une explication dans l'influence tantôt importante, tantôt faible, de certains paramètres clés.

La **direction du flux de chaleur**, se caractérisant par le **sens de pose** du ballot dans la paroi, est sans aucun doute le paramètre clé à considérer pour la recherche

de la meilleure performance isolante du ballot de paille. Comme le démontrent les mesures sur les échantillons des entreprises extérieures au projet ou sur les galettes de paille prélevées sur les premiers échantillons de la recherche, l'organisation de la fibre dans la direction 3 peut être caractérisée, sans ambiguïté, de direction **perpendiculaire à la fibre**. Cette caractéristique importante n'a pas pu être identifiée pour les directions 1 et 2.

Le second paramètre à ne pas négliger est la **densité** qui intervient tant au niveau de la **production** (réglage sur la presse) qu'au moment de la **mise en œuvre** (mise sous pression ou non lors de la pose du ballot). Les derniers tests réalisés et présentés dans le tableau page précédente expriment l'influence de cette densité sur l'évolution de la conductivité thermique, indépendamment d'autres paramètres comme le type de presse ou le type de céréales. Pour une facilité de lecture accrue, la figure 39 présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité des échantillons.

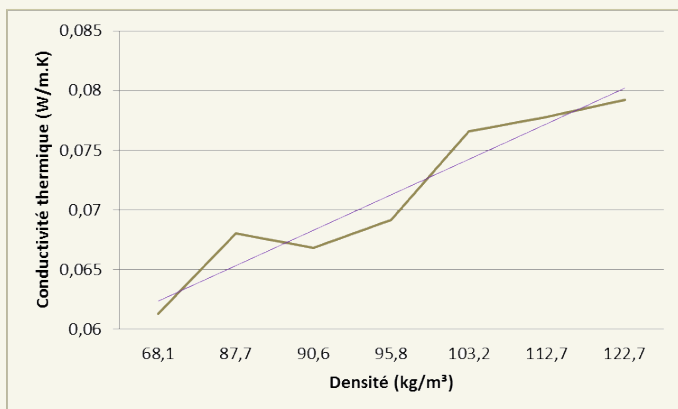


Fig. 39 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité.
Le trait fin de couleur rouge exprime la tendance linéaire des valeurs.

Le troisième paramètre, et pas des moindres, est la **qualité de la fibre** obtenue au sein du ballot et après production de celui-ci. Ce paramètre étant nettement moins quantifiable ou facile à déterminer, la Figure 10 page suivante permet de visualiser les différences possibles entre deux ballots annoncés comme étant «100 de qualité».



Fig. 39 : Comparaison de deux échantillons de paille de qualité significativement différente.

L'échantillon situé sur la partie gauche de l'image présente des fibres de très petites tailles, de très faibles épaisseurs, mais également beaucoup de poussières, d'épis vides ou d'enveloppes de grains. A l'inverse, l'échantillon de droite présente une paille très propre, de longues fibres intactes et épaisses et très peu d'éléments non-souhaités. Ce dernier échantillon en question est celui pour lequel une des meilleures mesures a été enregistrée; $0,064 \text{ W/m.K}$ pour une densité de $104,7 \text{ kg/m}^3$. La qualité de la fibre se préserve dans chacun des travaux mécaniques qu'elle subira. Il convient donc de veiller au **type et aux réglages de la moissonneuse batteuse**, à l'absence de travaux intermédiaire comme le fait de retourner les pailles après une période de pluie (paramètre dépendant du climat) et au **soin** apporté lors de l'utilisation de la presse agricole. Pour plus de précision quant à ces différents aspects, le lecteur peut se référer au vademécum n°1 de la recherche.

D'autres paramètres comme le type de céréales ont également été annoncés comme des pistes valables pour une influence sur la conductivité thermique du ballot de paille. Les questionnements et mesures complémentaires réalisés dans le cadre de la recherche, ne permirent cependant pas d'émettre un avis quant à ces observations.

Le point de vue international

La question de la conductivité thermique étant très sensible et très discutée à l'échelle internationale, il a été souhaité de confronter les résultats de mesure de la recherche «aPROpaille» à ceux utilisés plus largement dans la communauté internationale de la construction en paille. A cette fin, un condensé des premiers résultats de la recherche a été réalisé et envoyé à une série d'experts internationaux préalablement identifiés. Suite à leur(s) retour(s), il est remarquable de constater que le travail de l'association allemande pour la construction en paille (FASBA) est considéré comme une référence et utilisé par un grand nombre de pays (France,

Allemagne, Autriche, Suisse, Belgique,...). Outre ce travail, le retour de Pete Walker de l'université de Bath en Angleterre s'est avéré également intéressant de par les approches et résultats similaires à ceux obtenus dans «aPROpaille».

Compte tenu de l'importance des travaux de FASBA, une rencontre a eu lieu à Verden, en Allemagne, afin de discuter, entre autres, du point sensible qu'est la conductivité thermique de la paille. Les différentes approches, procédures, protocoles, échantillons,...voire philosophies ont été présentées et discutées. Une des différences notables entre les deux méthodes de travail est la nature de l'échantillon servant de base pour les mesures. Dans le cadre d'«aPROpaille», celui-ci est constitué d'un ballot entier mis en œuvre dans un cadre en bois. Dans le cadre des travaux de FASBA, l'échantillon de référence est une fraction d'un ballot de paille considérée comme représentative du ballot étudié et compatible avec les procédures et hypothèses utilisées pour les tests officiels d'autres matériaux de construction. Bien que des résultats similaires soient observables entre l'approche «aPROpaille» et celle de FASBA, il ne fut pas possible d'identifier les paramètres clés qui permettent à FASBA d'obtenir de meilleurs valeurs de conductivité thermique dans la direction 2. Il ressort de cette rencontre que davantage de recherches et échanges pourraient mener à la compréhension et la comparaison des résultats obtenus dans chaque pays.

Du côté de l'Angleterre, une rencontre avec l'équipe du professeur Pete Walker s'est également déroulée à l'université de Bath. La comparaison des travaux fut plus aisée considérant les approches similaires pour les protocoles de mesures et la nature des échantillons. Des résultats comparables à ceux générés dans le cadre d'«aPROpaille» ont été observés et les conclusions à l'issue des deux recherches menées en Angleterre et en Belgique s'avèrent également se rejoindre sur plusieurs points.

Les différentes approches quant à la nature des échantillons et l'équipement utilisé pour les mesures peuvent s'expliquer par le cadre dans lequel s'inscrit la démarche visant à mesurer la conductivité thermique du ballot de paille. A des fins de compréhension à l'échelle internationale, nous identifierons deux approches différentes ; le «dimensionnement» et la «réglementation».

L'approche «dimensionnement» vise à obtenir des valeurs de calcul approchant au maximum la réalité de la situation. Cette situation étant une mise en œuvre sur chantier, l'échantillon utilisé pour les tests sera un ballot entier, tel qu'il sera mis en œuvre dans la paroi. C'est donc un échantillon à taille réelle (~46 cm d'épaisseur) qui doit être analysé. Les équipements traditionnellement utilisés pour la mesure de la conductivité thermique de matériaux ne permettent pas de mesurer des échantillons d'une telle épaisseur. L'approche «dimensionnement» que la recherche «aPROpaille» a souhaité mettre en avant a donc nécessité de concevoir un appareil de mesure répondant spécifiquement à des

matériaux isolants de grande épaisseur (plaque chaude gardée développée à l'ULg-Gembloux). Le protocole de test, quant à lui, est strictement identique à celui utilisé dans les approches réglementaires. Nous avons donc bien une base commune entre les deux approches. Les résultats générés par l'approche « dimensionnement » sont difficilement comparables à ceux générés par l'approche « réglementation » en raison de la nature différente de l'échantillon. En effet, il se pourrait que d'autres phénomènes physiques participent à l'obtention d'une conductivité thermique moins intéressante que celle mesurée par un organisme de certification. Nous noterons par exemple un risque plus important de voir le flux thermique entre plaque chaude et plaque froide être perturbé par une température du local trop fluctuante par rapport à la température moyenne de l'essai. Il est également possible que des effets de convection à l'intérieur du ballot puissent se développer étant donné la nature hétérogène et l'épaisseur importante de l'échantillon.

L'approche « réglementation » est, quant à elle, une manière biaisée de mesurer le comportement réel de matériau d'épaisseur plus importante (dans ce cas, il est clairement fait référence au ballot de paille), mais elle présente l'avantage d'utiliser la même procédure, le même équipement et des échantillons de dimensions similaires peu importe la nature du matériau étudié. Il ressort de cette approche la possibilité de comparer les performances des matériaux sur une base commune, ce qui est un aspect essentiel d'un cadre réglementaire. Dans cette approche, les échantillons sont généralement de faibles épaisseurs (de 4-5 à une dizaine de centimètres). Dans le cas d'un ballot de paille, celui-ci est donc fractionné, découpé et/ou retravaillé afin d'obtenir un échantillon compatible avec l'équipement utilisé. La figure 39 illustre l'aspect « fractionné » de l'échantillon utilisé pour les mesures de conductivité thermique en Allemagne (FIW-Abschlussbericht DBU- Projekt Az.22430, 2008).



Fig. 40 : Echantillon utilisé pour les mesures de conductivité thermique en Allemagne (FIW).

Il est dès lors plus facile de comprendre que, bien que les deux méthodes soient riches en enseignement, elles ne peuvent être considérées comme des approches similaires et ne peuvent donc faire l'objet de comparaison en ce qui concerne les résultats qu'elles engendrent.

Dans une tentative de simplification de la compréhension des différentes valeurs de conductivité thermique utilisées dans le secteur de la construction en paille, la présente recherche synthétiserait la situation actuelle de la manière suivante :

- L'approche «réglementaire» permettant l'obtention de valeurs de conductivité thermique plus intéressante semblerait être celle adoptée par des organismes comme le CSTC/BBRI, FASBA, le FIW.
- L'approche «dimensionnement» permettant l'obtention de valeurs de conductivité thermique plus élevée est celle choisie dans le cadre de la présente recherche, mais également dans le cadre des recherches menées par le professeur Pete Walker à l'Université de Bath.

Conclusion & Discussions

Ce chapitre a présenté la réponse de la recherche à la question de la conductivité thermique du ballot de paille, très controversée dans le milieu de la construction paille à l'échelle internationale. Tout l'argumentaire de cette réponse repose sur le matériel utilisé, à savoir la plaque chaude gardée et la chambre climatique présentées dans les points précédents, de même que sur les protocoles et conditions de tests énumérés dans les normes de référence (EN ISO 10456). De nombreux agriculteurs se sont joints aux réflexions et ont participé aux campagnes de tests en produisant des échantillons variant tant les dimensions que la densité et le type de céréale. Les efforts et techniques déployés n'ont pas permis de mettre en avant une différence significative de la conductivité thermique entre les directions 1 et 2. Cependant, les nombreuses discussions et tests réalisés ont permis de mettre en avant une nouvelle façon de percevoir cette vision de «flux de chaleur perpendiculaire aux fibres», et ce en considérant une troisième direction dans le ballot de paille ; celle de sa longueur. Cette nouvelle approche a renvoyé des résultats très intéressants et prometteurs pour une filière en évolution permanente.

L'approche présentée par la recherche «aPROpaille» vise à étudier un matériau très particulier, de nature hétérogène et disposant de nombreux paramètres capables d'influencer sa conductivité thermique. Cette approche se voulant réaliste par rapport à une utilisation sur chantier, il fut nécessaire d'étudier le ballot dans sa globalité (échantillon de taille réelle), ce qui a motivé la mise au point d'un équipement unique et l'établissement de nouvelles hypothèses, compte tenu de la nature du matériau. Cette approche ne peut donc être comparée à celles, plus

strictes, d'autres organismes dont le but principal est la reconnaissance du ballot de paille dans un cadre exclusivement réglementaire.

Au final, quelle conductivité thermique considérer pour un ballot de paille ?

La recherche a mis en avant le caractère hétérogène d'un ballot de paille et l'influence que trois paramètres, le sens de pose du ballot, sa densité et la qualité des fibres le constituant, peuvent avoir sur la mesure de la conductivité thermique. Pour cerner au mieux le comportement hygrothermique réel de ce ballot et l'influence que d'autres paramètres, comme le type de céréale, pourraient avoir, il s'avère nécessaire de poursuivre les campagnes de mesure en tirant parti des résultats générés dans le cadre de cette recherche et des questions qui ont été soulevées.

En mettant l'aspect évolutif de la recherche de côté et afin d'apporter une réponse aux architectes et bureaux d'études quant à la valeur de conductivité thermique à utiliser, les approches suivantes sont proposées.

Dans un cadre purement «**réglementaire**» (ex : PEB), une valeur de **0,06 W/m.K** apparaît comme acceptable compte tenu que de telles valeurs ont pu être approchées dans le cadre des campagnes de mesures de la recherche. Cette valeur se retrouve dans le logiciel PEB sous la dénomination «Panneaux d'isolant à base de fibres végétales ou animales d'une densité comprise entre 50 et 150 kg/m³». Cette définition apparaît à la fois sous la catégorie «Isolant fabriqué en usine» et «Isolant non fabriqué en usine». Toutefois, dans le cas particulier du ballot de paille, que la presse soit placée dans ou hors usine, la qualité de la production reste inchangée.

Dans un cadre plus orienté vers le «**dimensionnement**» ou l'étude du comportement réel du bâtiment, la recherche recommande l'usage des valeurs moyennes du tableau ci-dessous lesquelles reposent sur la logique illustrée par la Figure 12. Attention, ces valeurs correspondent à des conductivités thermiques dites «humides» (23 °C et 50 % d'HR).

Synthèse des résultats des mesures de conductivités thermiques.

Direction	Min (W/m.K)	Max (W/m.K)	Moyenne
1	0,061	0,079	0,071
2	0,065	0,077	0,071
3	0,046	0,056	0,050

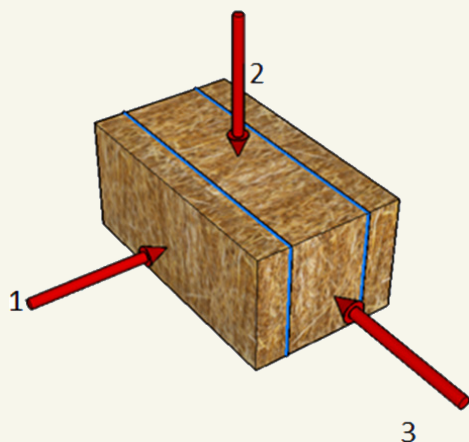


Fig. 41 : Illustration de la logique relative aux « directions » considérées pour le flux de chaleur lors des mesures.

Peut-on comparer les résultats de mesures de la recherche à un résultat de test sur ballot de paille du CSTC ou de tout autre organisme agréé ?

Non ! Bien que le protocole soit identique, l'équipement relativement similaire (faible vs grande épaisseur), l'échantillon en lui-même n'a rien de comparable. La recherche a mesuré un ballot complet afin d'approcher au maximum le comportement du matériau mis en œuvre sur chantier. Les organismes agréés pour des tests dans un cadre réglementaire réalisent généralement leurs tests sur des échantillons plus petits (épaisseur plus faibles) en raison d'un équipement de taille réduite. Avec un échantillon plus grand, des problématiques supplémentaires (ex : possibilité d'un effet de convection à l'intérieur du ballot en fonction de sa densité) peuvent se présenter. Bien que la recherche cherche à étudier le ballot de paille tel qu'on le retrouve sur chantier, les résultats générés ne peuvent donc être comparés à des mesures au CSTC. Ces dernières peuvent s'avérer plus « restrictives » dans leur approche, mais elles correspondent exactement aux hypothèses et conditions dans lesquelles d'autres matériaux sont testés ce qui, au final, est la base même d'une comparaison fiable.

Pourquoi ne pas avoir réalisé de mesures de conductivité thermique « réglementaire » sur les ballots de paille ?

La recherche « aPROPaille » est financée en majeure partie par la Région Wallonne et a pour objectif la reconnaissance de l'utilisation des ballots de paille dans la construction. Réaliser des mesures « réglementaires » sur les ballots mis à notre disposition par l'agriculteur collaborateur du projet reviendrait à certifier les ballots

produits par cet agriculteur en question. Un projet de recherche d'intérêt collectif ne peut viser la reconnaissance réglementaire d'un produit en particulier et servir ainsi des intérêts privés. Cependant, afin de comprendre le cadre réglementaire et d'approcher celui-ci de manière théorique, le point 1.5.3 consacré à la «conductivité thermique déclarée» présente le détail des traitements de données post-mesures dans un scénario de certification fictif.

Conclusion

Ce qui précède 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 fines particules composant l'enduit (30 % dans le premier enduit contre 10 % dans le second). Cette différence de composition a une influence sur les propriétés hydriques des enduits et principalement sur les courbes de sorption et sur leur perméabilité à la vapeur (mais aussi sur leur fissuration, etc.).

En ce qui concerne la paille, comme expliqué dans les différentes fiches essais, la majorité des paramètres définissant les propriétés hygrothermiques sont issus d'essais réalisés sur des ballots recomposés, et de plus petite taille que le ballot initial. Les résultats des essais de conductivité thermique réalisés sur une plaque chaude gardée, entièrement construite dans les laboratoires de l'ULg à Gembloux, 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 ballot. La valeur la plus intéressante est obtenue lorsque le flux thermique est perpendiculaire aux galettes de paille. C'est dans cette configuration que la plus part des brins de pailles sont perpendiculaires au flux de chaleur. Par contre, la différence de conductivité dans les deux autres directions est faible. Il apparaît donc que dans ce plan l'orientation des fibres au cœur du ballot est relativement aléatoire. Enfin, une évolution de l'ordre de 10 % de la conductivité thermique avec l'humidité moyenne du ballot a pu être constatée entre un essai réalisé sur ballot sec et un essai réalisé sur ballot stabilisé à 50 % HR.

COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DES PAROIS

Ce chapitre a pour but d'étudier les flux de chaleur et d'humidité ainsi que la répartition de la température et de la teneur en eau au sein des parois en paille étudiées. Cela nous permettra de valider certains modes constructifs et d'en critiquer d'autres, en donnant les limites de leur utilisation et les risques encourus si certains critères ne sont pas remplis. Pour la paille et les enduits d'argile, les paramètres des matériaux utilisés sont ceux mesurés pendant la recherche. Pour les autres paramètres, les valeurs utilisées proviennent soit des fabricants, soit d'une interprétation raisonnée des bases de données disponibles et de la littérature. Les conditions initiales sont fixées à 20 °C et 50 % d'humidité relative à travers l'ensemble des couches de la paroi. Le climat extérieur est le climat moyen de Uccle et le climat intérieur est à une humidité normale (classe 2). Les simulations sont réalisées sur une période de trois ans, mais seul les résultats pour la troisième année sont analysés.

Description des parois étudiées

La paroi illustrée ci-dessous est prise comme référence dans la suite. C'est la paroi classique proposée par Paille-Tech. Comme on le voit sur la figure 4, elle est composée de ballots de paille **(1)** d'une épaisseur de 46 cm serrés dans une ossature en bois massif. L'ossature est solidaire d'un panneau contreventant **(2)** ouvert à la vapeur qui est placé du côté extérieur. Un bardage **(3)** est fixé sur des lattes **(4)** elles-mêmes fixées sur le panneau. Du côté intérieur, un enduit d'argile **(5)** de 4 cm est appliqué sur la paille. Une finition complémentaire peut être appliquée, mais n'a pas été considérée ici. Par convention, on ne considère pas la lame d'air et le bardage dans les simulations et on considère des conditions d'exposition spécifiques pour le panneau contreventant situé derrière ceux-ci (coefficient de surface, pas de soleil, pas de pluie). On l'appellera la paroi PT-Bardage.

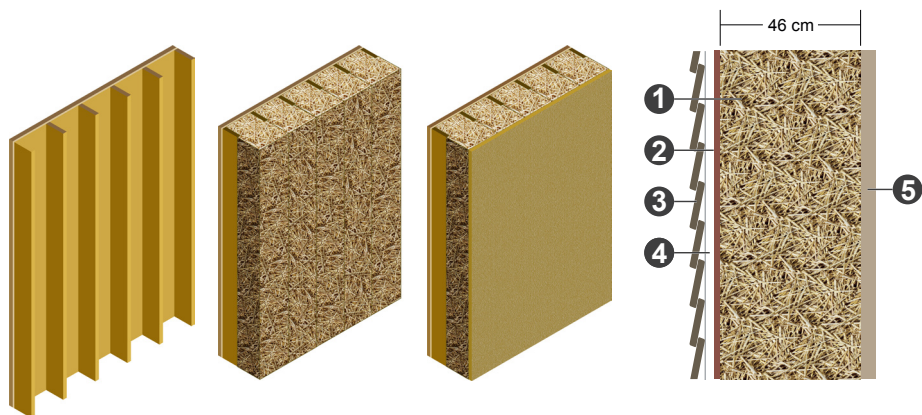


Fig. 42 : Mur de référence PT-Bardage.

De nombreuses variantes ont été imaginées au cours de la recherche afin de comparer leur comportement hygrothermique dynamique et leurs performances au cas de référence et de déterminer dans quels cas elles peuvent être considérées comme valides.

Une première variante, appelée PT-Enduit, est presque identique au mur de référence PT-Bardage, sauf que le bardage est remplacé par une couche d'isolant en fibre de bois (4 cm) **(6)** recouvert d'un enduit performant **(7)**. C'est une solution parfois proposée par Paille-Tech pour permettre une finition

extérieure autre que le bardage afin de diversifier les textures des façades ou de répondre à certaines exigences urbanistiques ou patrimoniales.

Dans la deuxième variante, le panneau contreventant du cas de référence est remplacé par un enduit simple à la chaux **(8)**. La question du contreventement doit alors être résolue différemment. Ce type de mur est rencontré en autoconstruction ou dans les techniques Nebraska, GREB, CST... On l'appellera variante AUTO. Les paramètres hygrothermiques des matériaux et notamment des enduits de finitions sont variables selon la composition, la mise en œuvre ou le type de finition (taloché, ferré, recoupé, épongé...).

Une dernière variante, appelée ALTAR, correspond à la technique utilisée par la société ALTAR Architecture. Elle est composée de 30 cm de paille **(9)** remplissant des caissons fermés à l'intérieur par un panneau OSB **(10)** (ρ : 595 kg/m³ ; c : 1 500 J/kgK ; λ : 0,13 W/mK ; μ : 165) et à l'extérieur par un panneau de fibres de bois compressées **(11)** (ρ : 270 kg/m³ ; c : 2 070 J/kgK ; λ : 0,048 W/mK ; μ : 5). La finition extérieure **(12)** est libre (bardage ou enduit), mais c'est la solution avec bardage qui est choisie ici pour les simulations (où on ne considère pas la lame d'air et le bardage).

Variante 1 : PT-Enduit

Variante 2 : AUTO

Variante 3 : ALTAR

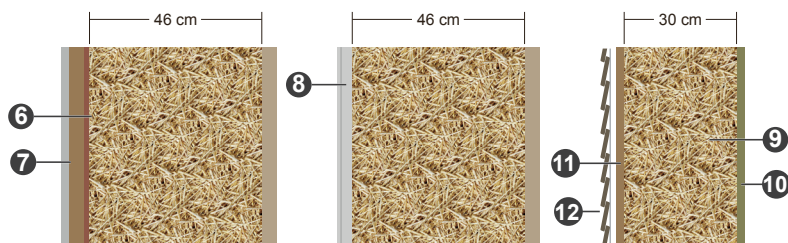


Fig 43 : Variantes de murs étudiées.

Les flux de chaleur et d'humidité ainsi que la répartition de la température et de la teneur en eau au sein de ces parois ont été étudié grâce au logiciel WUFI Pro 5.2 (www.wufi-pro.com). Les paramètres hygrothermiques de la paille et des enduits d'argile sont ceux mesurés pendant la recherche (voir « paille » et « enduit 2 » au chapitre précédent). Pour les autres paramètres, les valeurs utilisées proviennent soit des fabricants, soit d'une interprétation

raisonnée des valeurs de la base de données du logiciel et de la littérature. Les conditions initiales sont fixées à 20 °C et 50 % d'humidité relative à travers l'ensemble des couches de la paroi. Le climat extérieur est le climat moyen de Uccle et le climat intérieur est à une humidité normale (classe 2). Les simulations sont réalisées sur une période de trois ans, mais seul les résultats pour la troisième année sont analysés. La figure 44 ci-dessous montre la vision instantanée de l'animation que permet le logiciel. Dans le cadran supérieur, on observe la répartition de la température à travers la paroi (ligne continue rouge), ainsi que les flux aux interfaces entre chaque couche (flèches horizontales rouges au-dessus de la ligne représentant la température). Une trace rouge claire transparente permet de visualiser la gamme de valeur prise par la température au cours de la période de simulation. Dans le cadran inférieur, la courbe verte représente la répartition de l'humidité relative et la courbe bleue la répartition de la teneur en eau. Ces deux courbes sont fortement corrélées (à travers la courbe de sorption) mais les variations sont plus lisibles sur la courbe verte jusqu'à une humidité relative de ~80 %, alors qu'elles sont en général plus perceptibles sur la courbe bleue entre 80 % et 100 %. Les flèches horizontales bleues au-dessus des courbes donnent les flux d'humidité (eau et vapeur) et la zone plus claire autour des courbes donnent la gamme de valeur prise par la teneur en eau et l'humidité relative au travers de la paroi.

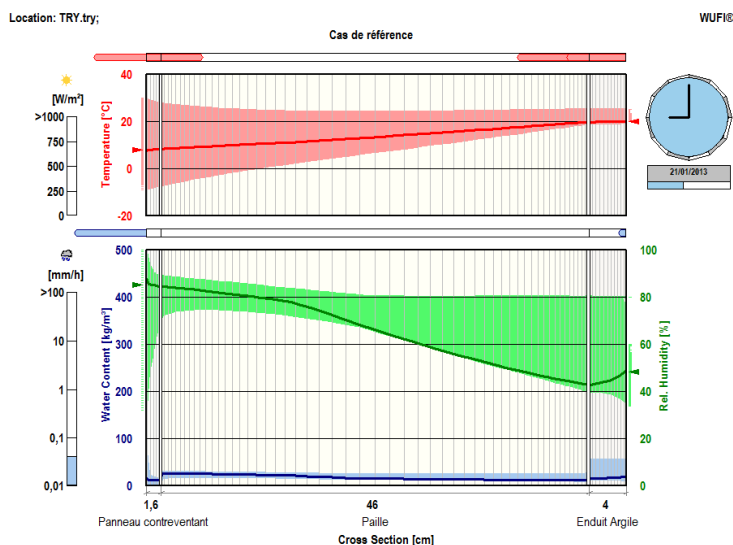


Fig 44. Visualisation dynamique des résultats du logiciel WUFI Pro.

Dans tous les cas, les nœuds constructifs et l'étanchéité à l'air peuvent engendrer des phénomènes locaux qui ne sont pas pris en compte par ce logiciel mais qui doivent pourtant faire l'objet d'une attention particulière (transfert de chaleur, de vapeur ou d'air). Ces aspects seront discutés dans les chapitres suivants.

CRITÈRES DE VALIDITÉ D'UN MUR EN PAILLE

Sur base d'une analyse de la littérature, la teneur en eau maximale dans la paille a été choisie comme critère principal de validité des murs étudiés. D'après les études les plus sérieuses sur le sujet ([Wihan, 2007] et [Minke, 2006]), aucune dégradation chimique des pailles n'intervient si la teneur en eau de la paille ne dépasse pas 25 % en masse. Il faut faire remarquer que cette limite est donnée pour la paille de riz et non pour la paille de froment. Il y aurait un intérêt à faire des recherches complémentaires pour déterminer si ces valeurs sont bien appropriées aux cas étudiés. Sur base des valeurs de sorption mesurées durant la recherche aPROpaille, cette teneur en eau est atteinte, à l'équilibre (après un certain temps), dans un air ayant une humidité relative dans l'air de 91,5 %. Il faut noter ici la grande influence des valeurs utilisées pour caractériser la sorption de la paille (il existe parfois des variations de près de 30 % selon les sources).

D'après les mêmes auteurs (et donc toujours pour la paille de riz), quand l'humidité de la paille se situe entre 25 % et 39 % en masse, le taux de décomposition reste relativement faible : 0,009 % par jour. Quand le matériau atteint la saturation libre (i.e. dans un air saturé en humidité), le taux de décomposition passe à 1,8 % et peut monter à 2,5 % par jour si la paille est détrempée. La température influence aussi le taux de décomposition. La décomposition s'arrête presque totalement en dessous 5 °C et elle est maximum autour de 30 °C.

Taux de décomposition en fonction de la teneur en eau.

Humidité relative Air [%]	Teneur en eau Paille [%]	Taux de décomposition Paille [%/]
0 - 91,5	0-25	0
91,5 - 95	25-39	0,009
100	222	1,8
(Sursaturation max)	930	2,5

D'autres critères ont été analysés mais ne seront pas développés ici :

- La teneur en eau de l'isolant en fibre de bois dans la variante PT-Enduit et celle d'un panneau de fibres de bois compressés de la variante ALTAR ne devaient pas dépasser 20 % en masse (limite des produits dérivés du bois sans colle). Cette teneur en eau est atteinte, à l'équilibre, dans un air ayant une humidité relative respectivement de 95 % et de 97 % pour ces deux cas.
- La teneur en eau dans le panneau contreventant ou le panneau OSB.
- La température et l'humidité relative aux interfaces.

EXPOSITION AUX PLUIES BATTANTES

Lors des simulations, l'exposition aux pluies battantes est apparue comme étant un facteur déterminant dans le comportement des murs. Pour l'ensemble de ceux-ci, la teneur en eau à chaque endroit de la paroi a été contrôlée. C'est la paille située du côté extérieur, sous le panneau contreventant ou sous l'enduit, qui est la plus sollicitée (humidité plus élevée).

Mur de référence - PT-Bardage

Le graphique suivant (fig. 45) montre la teneur en eau obtenue à différents endroits dans la paille au cours de la 3ème année pour le cas de référence, PT-Bardage. Il faut rappeler qu'il y a dans ce cas un bardage qui protège le mur des intempéries. On voit que la paille dans les premiers millimètres derrière le panneau contreventant est très proche des conditions qui pourraient lui faire subir une légère décomposition mi-janvier. Il n'y a toutefois aucun risque à prévoir car la durée est trop courte et la température à ce moment est faible ($< 10^{\circ}\text{C}$). Néanmoins, si la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau du panneau contreventant était de 22 comme cela a été mesuré sur les échantillons utilisés pendant la recherche (et pas de 11 comme l'annonce le fabricant), il pourrait y avoir une légère dégradation pendant une dizaine de jour par an. Notons que cela n'est toutefois pas significatif puisque cela impliquerait que moins de 5 % de la paille dans cette zone très limitée serait dégradée après 50 ans pour une température de 20°C .

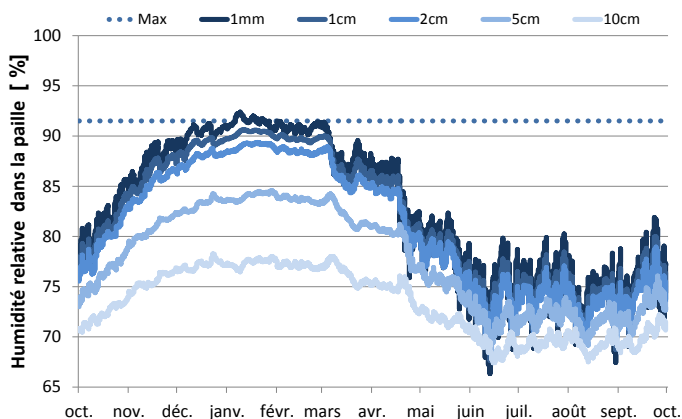


Fig 45 : Evolution de la teneur en eau dans la paille à différentes profondeurs
– Mur PT-Bardage.

Variante 1 - PT-Enduit

Pour simuler la variante 1, PT-Enduit, un enduit extérieur performant issu de la base de données du logiciel a été choisi. Il s'agit d'un enduit en quatre couches dont l'épaisseur et le coefficient d'absorption sont, de l'extérieur vers l'intérieur : 4 mm avec $A \approx 0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0,5}$; 1 mm avec $A \approx 0,0002 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0,5}$; 14 mm avec $A \approx 0,02 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0,5}$; et 1 mm avec $A \approx 0,0001 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0,5}$ (total : 2 cm). Globalement, cet enduit est très peu absorbant et la figure suivante montre qu'aucune décomposition de la paille n'est à prévoir. Le résultat serait équivalent si cet enduit était remplacé par un enduit à la chaux homogène de 2 cm dont le coefficient d'absorption serait de $A = 0,003 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0,5}$. Par contre, on peut montrer que l'isolant extérieur (fibres de bois) atteint une teneur en eau de plus de 20 % en masse pendant moins de 2 mois par ans, mais ceci dépasse le cadre de cette étude.

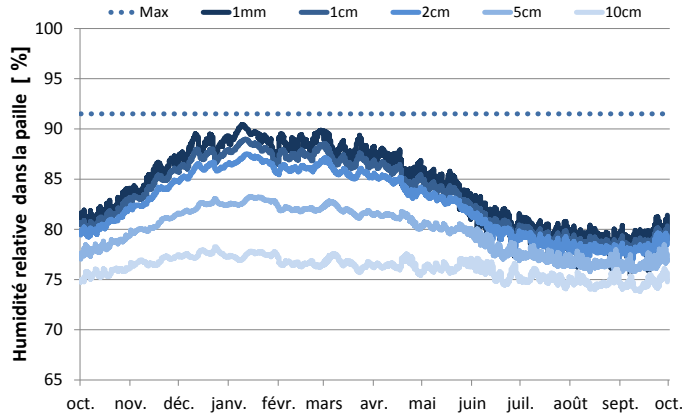


Fig 46 : Evolution de la teneur en eau dans la paille à différentes profondeurs
– Mur PT-Enduit.

Variante 2 – AUTO

Pour les cas où un enduit extérieur est exposé à la pluie, comme dans la variante 2, le coefficient d'absorption de l'enduit extérieur, A_{surf} [$\text{kg/m}^2.\text{s}^{-0,5}$], a un effet majeur. La norme NF EN 1062-1 classe la perméabilité à l'eau liquide en trois catégories reprise dans le tableau ci-dessous.

Taux de décomposition en fonction de la teneur en eau.

	Valeur du coefficient A_{surf} [$\text{kg/m}^2.\text{s}^{-0,5}$]
W3 (classe III)	$> 0,0083$
W2 (classe II)	$> 0,0017 \text{ et } < 0,0083$
W1 (classe I)	$< 0,0017$

Variante 2.1 – AUTO-1

Dans le cas de base de la variante 2, AUTO-1, l'enduit à la chaux placé à l'extérieur est un des enduits à la chaux proposés dans la base de données du logiciel. Son coefficient A est relativement élevé (matériau absorbant), de $A_{\text{surf}} = 0,05 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{-0,5}$ (catégorie W1). On voit que cette variante ne peut être acceptée en l'état puisque la teneur en eau dans la paille peut subir une décomposition lente pendant plus de 6 mois par

ans sur une épaisseur de 5 cm derrière l'enduit extérieur. D'après la figure 47, on voit l'importance d'utiliser des matériaux (et surtout des enduits extérieurs) dont on connaît les paramètres hygrothermiques (fiche technique du producteur, mesure...). Si aucune valeur n'est disponible, une mesure simplifiée du coefficient Asurf peut être réalisée grâce à la pipe de Carsten.

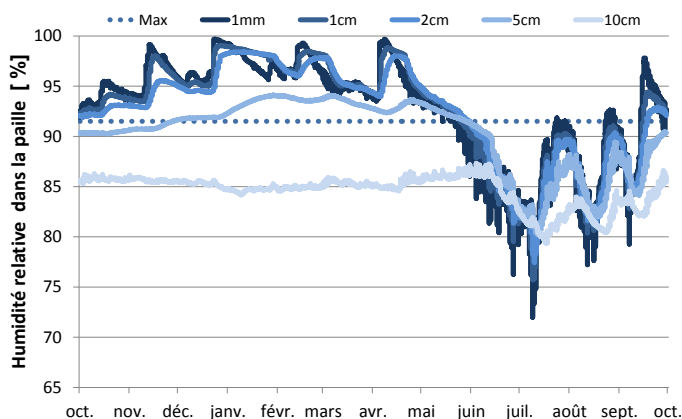


Fig 47 : Evolution de la teneur en eau dans la paille à différentes profondeurs
– Mur AUTO-1.

Variante 2.2 – AUTO-2

Des simulations complémentaires ont montré que pour que cette variante soit validée, l'absorption de surface de l'enduit extérieur doit être diminuée. Cela peut être fait de différentes manières. La figure ci-dessous montre que les cas où le mur, appelé AUTO-2, a été simulé comme s'il avait été imprégné d'un produit hydrofuge de qualité (i.e. qui ne modifie pas la perméabilité à la vapeur de la couche imprégnée), tel que le coefficient A_{surf} soit inférieur ou égal à $0,003 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$, le mur est parfaitement valide (variante 2.2). Un enduit de catégorie W3 est donc idéal, mais ceux de catégorie W2 (et a fortiori W1) ne donneront pas toujours la garantie d'éviter toute dégradation de la paille.

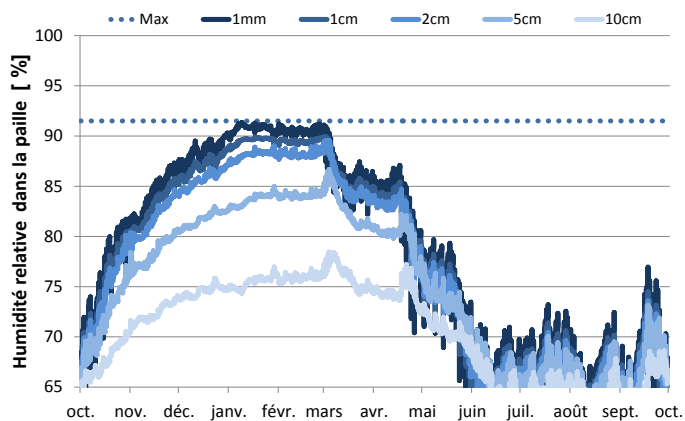


Fig 48 : Evolution de la teneur en eau dans la paille à différentes profondeurs
– Mur AUTO-2.

Variante 3 – ALTAR

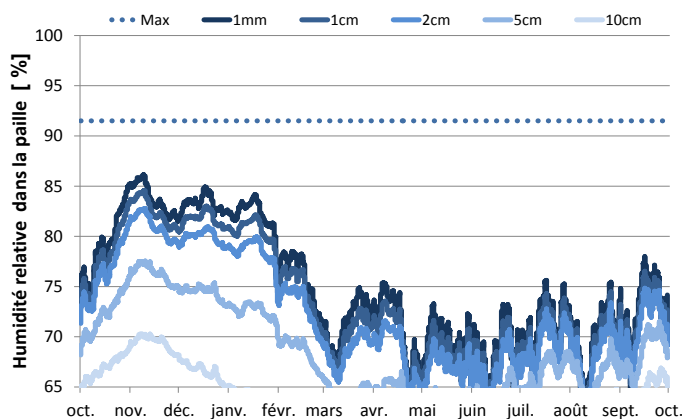


Fig 49 : Evolution de la teneur en eau dans la paille à différentes profondeurs
– Variante ALTAR.

Dans la variante 3, appelée ALTAR, il est important que le panneau en face extérieure soit ouvert à la vapeur. Si l'on prend un panneau de fibre de bois

de $\mu = 5$, on peut voir sur la figure 49 qu'il n'y aura aucun risque de dégradation de la paille sous le panneau extérieur. Comme pour le mur de référence. Il n'y a par ailleurs pas non plus de décomposition prévue dans le panneau en fibre de bois extérieur.

Conclusion

Les cas qui ne sont pas exposés aux pluies battantes grâce à un bardage, les murs PT-Bardage et ALTAR, sont valides (avec les perméabilités à la vapeur des matériaux tels qu'elles ont été définies, voir point suivant). Les murs où un enduit est exposé aux pluies battantes ne sont par contre valides que si leur enduit possède des propriétés d'absorption d'eau liquide suffisamment basse : pour le mur AUTO, un traitement de surface qui donne au premier centimètre d'enduit un coefficient d'absorption de $A_{\text{surf}} \leq 0,003 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0,5}$; et pour le mur PT-Enduit, un enduit formulé pour cet usage et garanti par son fabricant (ou un enduit de 2 cm avec un $A_{\text{surf}} \leq 0,003 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-0,5}$).

TRANSFERT DE VAPEUR

Par le paragraphe précédent, on peut déjà remarquer que le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, μ [-], des différentes couches et particulièrement des surfaces, peut influencer les résultats. En effet, il n'y a pas de dégradation pour le cas de référence si le panneau extérieur a bien un μ de 11, alors qu'on a observé un risque très léger de dégradation si le μ est de 22.

Les simulations ont montré que le niveau de perméabilité à la vapeur des surfaces a moins d'influence que l'absorption d'eau de pluie par la surface extérieure. De plus, il ressort aussi que l'effet sur la teneur en eau de la paille sous la couche extérieure est beaucoup plus marqué quand on modifie la perméabilité de la surface à l'extérieur que quand on modifie celle de la surface intérieure.

Dans ce paragraphe, on fait varier "l'épaisseur lame d'air", notée S_d [m], des couches de surface en rajoutant un S_d complémentaire à l'intérieur ou à l'extérieur (i.e. couche de peinture ou membrane de régulation de la vapeur). Cette valeur se calcule par le produit de μ [-] et de l'épaisseur de la couche d [m] : $S_d = \mu \cdot d$. La norme NF EN 1062-1 définit un système général de description des produits de peinture et des systèmes de revêtement pour la préservation, la décoration et la protection des supports

en maçonnerie et en béton neufs ou anciens, nus ou déjà revêtus. Elle classe la perméabilité à la vapeur d'eau des finitions en 3 catégories : V1 (faible transmission de vapeur) avec $S_d > 1,4 \text{ m}$; V2 (transmission moyenne) avec S_d entre $0,14 \text{ m}$ et $1,4 \text{ m}$; et V3 (forte transmission) avec $S_d < 0,14 \text{ m}$.

Mur de référence - PT-Bardage

Le graphique ci-dessous montre l'effet de l'ajout d'un S_d complémentaire sur la surface extérieure (sur le panneau contreventant) du mur de référence, PT-Bardage. Cette situation pourrait être rencontrée si un pare-pluie ou une étanchéité à l'air mal choisi était placé à cet endroit. De ce côté, l'ajout d'un S_d complémentaire de 1 m (catégorie V2) provoque l'apparition d'une période de risque de 4 mois. Même un S_d complémentaire de $0,14 \text{ m}$ (limite catégorie V3) provoque une période de risque de 6 semaines. Un S_d complémentaire de 10 m (ou plus) engendre aussi une accumulation annuelle d'humidité dans la paille. Il est donc important de veiller à ne pas modifier la perméabilité à la vapeur de la couche extérieure dans ce cas.

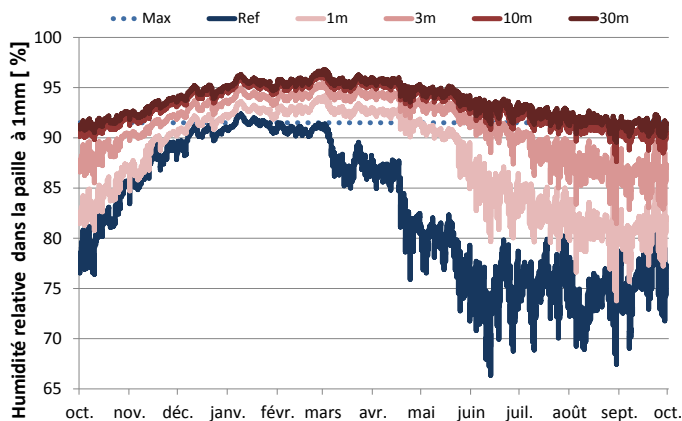


Fig 50 : Influence de la perméabilité à la vapeur à l'extérieur
— Mur de référence.

A l'intérieur par contre, l'augmentation de la perméabilité ne change que peu les conditions d'humidité de la paille. Elle réduit néanmoins légèrement le risque de décomposition de la paille. Avec un S_d complémentaire de 5 m à l'intérieur par exemple, le risque (négligeable) observé pour le cas de référence où le μ du panneau était de 22 est complètement résolu.

Variante 1 - PT-Enduit

Pour la variante 1, PT-Enduit, les conclusions sont similaires : faire varier la perméabilité de la surface extérieure à beaucoup plus d'influence que de modifier la perméabilité de la surface intérieure. Avec un Sd complémentaire de 3 m à l'intérieur, les conditions d'humidité de la paille ne sont pour ainsi dire pas modifiées alors qu'avec une faible variation à l'extérieur, les conditions de validité du mur peuvent rapidement basculer. Avec un Sd complémentaire de 0,14 m (correspondant à la limite de la catégorie V3) par exemple, le mur n'est plus valide car un risque de dégradation de la paille apparaît 4 mois par an. De plus, la teneur en eau dans l'isolant en fibre de bois se trouve constamment au-dessus de 20 % en masse et on observe une accumulation de l'humidité moyenne dans la paille (de 200 g/m³ chaque année).

Variante 2 - AUTO

Le cas de base de la variante 2, AUTO-1, n'était déjà pas valide. En rajoutant un Sd complémentaire de 0,14 m à la surface extérieure, une accumulation de l'humidité importante apparaît dans la paille, et la teneur en eau de celle-ci atteint presque 80 kg/m³ en 3 ans. Cela confirme à nouveau qu'il faut donc rester attentif à utiliser à l'extérieur un enduit fortement ouvert à la vapeur.

Pour le cas où le coefficient d'absorption de surface de la variante 2 était de 0,03 kg/m².s-1/2, AUTO-2, il n'y avait pas de décomposition de la paille. En appliquant un Sd complémentaire à la surface intérieure, aucune modification significative n'a pu être observée. Par contre, la figure 10 montre qu'en appliquant un Sd complémentaire de 0,14 m ou de 1 m à la surface extérieure, l'humidité relative dans la paille située derrière l'enduit extérieur monte et reste au-dessus de la valeur critique toute l'année, provoquant une décomposition probablement grave. De plus, une accumulation annuelle dans la paille de plus de 1 kg/m³ apparaît et aggrave le problème d'année en année.

Il faut faire remarquer qu'on a considéré dans ce cas que l'enduit extérieur a été imprégné d'un produit hydrofuge de qualité (c.-à-d. qu'il ne modifie pas la perméabilité à la vapeur de la couche imprégnée). Si celui-ci modifiait la perméabilité à la vapeur de la couche imprégnée, un risque de dégradation pourrait apparaître, mais il est moins marqué que dans le cas

du rajout d'un Sd complémentaire en surface. Si l'on considère que l'enduit imprégné a un μ de 24 (plutôt que 10 pour l'enduit choisi dans la base de données du logiciel), soit un Sd complémentaire de 0,14 m réparti sur le premier centimètre, une décomposition légère pourrait apparaître, mais seulement pendant une vingtaine de jour par an (et aucun problème d'accumulation annuelle n'est observé). Si le μ de cette couche imprégnée est de 110 (Sd complémentaire de 1m, mais réparti sur le premier centimètre), la décomposition pour alors avoir lieu près de 6 mois par an (pas d'accumulation d'année en année). La grande différence entre ces résultats a priori équivalents (« 0,14 m » et « μ 24 », ainsi que « 1 m » et « μ 110 ») montre la complexité des phénomènes en jeu et la difficulté d'interpréter le résultat de ces simulations. L'important est de retenir que la surface extérieure ne doit pas être couverte d'une couche (membrane, peinture...) qui en réduirait la perméabilité à la vapeur.

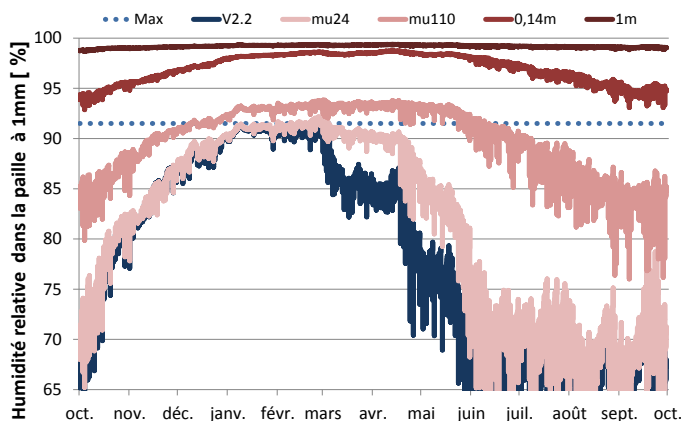


Fig 51 : Influence de la perméabilité à la vapeur à l'extérieur
– Variante 2.2.

Variante 3 - ALTAR

Pour la variante 3, ALTAR, la modification du Sd de la surface intérieure n'a pas d'effet significatif. Un résultat différent des autres cas est par contre apparu avec un Sd complémentaire à l'extérieur. En effet, en ajoutant un Sd complémentaire à l'extérieur de 0,14 m (limite catégorie V3) et même de 1 m, cette variante, qui présentait un risque de dégradation négligeable,

n'en présente plus du tout. Cette amélioration est vraisemblablement due au fait que la surface intérieure (panneau OSB) est relativement fermée au passage de la vapeur ($\mu = 165$). Avec un Sd complémentaire plus important, on retrouve les mêmes résultats que les cas précédents et la dégradation de la paille devient risqué (près de 6 semaines avec un Sd complémentaire de 3 m). La figure 52 illustre ces résultats.

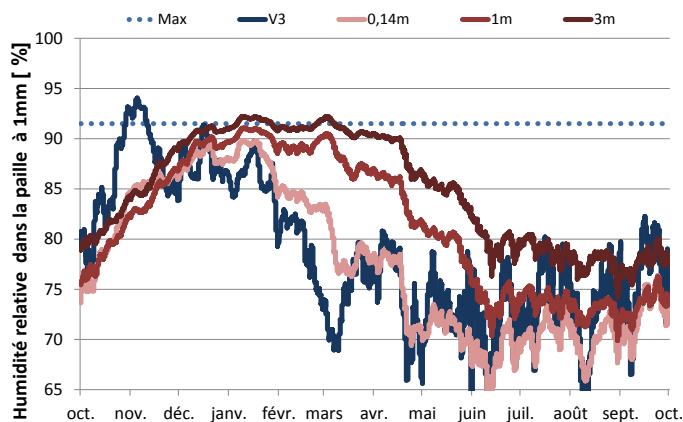


Fig 52 : Influence de la perméabilité à la vapeur à l'extérieur – Variante 3.

Conclusions

On remarque donc l'importance de bien choisir ses matériaux selon leur position dans la paroi. Le principe général à la base des normes BS 5250 et DIN 4108 (où la perméabilité à la vapeur des couches doit être croissante de l'intérieur vers l'extérieur) est donc d'application dans les cas qui nous occupent. Il faut en fait toujours chercher à minimiser la résistance à la vapeur des couches extérieures pour éviter des teneurs en eau trop élevée (particulièrement sous la couche de finition) et d'éventuels problèmes d'accumulation d'humidité annuelle dans la paille.

PERFORMANCES THERMIQUES

Les différentes variantes ont toutes d'excellentes performances thermiques. C'est la paille qui apporte l'essentiel du pouvoir isolant. Néanmoins, dans certains cas (variante 2), une couche isolante complémentaire de 4 cm d'isolant permet d'améliorer encore la performance.

Pour finir, le chapitre précédent ne présente que la conductivité thermique de la paille et non des enduits utilisés dans les murs Paille-Tech, on a pu remarquer que celle-ci dépend de l'humidité (elle dépend en fait aussi de la température, mais cela sort du cadre de cette étude).

En principe, on calcule le coefficient de transmission thermique des parois, U [W/m^2K] sur base d'une valeur correspondant à l'état sec. La paroi de référence à une valeur U_{sec} de 0,134 W/m^2K

Cette valeur est vraisemblablement peu réaliste, puisque l'humidité présente dans la paroi n'est pas considérée. La difficulté est de savoir quelle est l'humidité moyenne des différentes couches de la paroi. Pour ce faire, une série de simulations sur trois années a été réalisée. Pour le cas de référence, l'humidité relative moyenne dans la paille est de 65 % ($\lambda_{paille,63\%} = 0,072$ W/mK). Le coefficient de transmission thermique apparente est alors de $U_{app} = 0,15$ W/m^2K . Le U_{app} des variantes est présenté dans le tableau suivant. Il faut faire remarquer que ce type de réflexion est aussi valable pour de nombreux matériaux hygroscopiques disponibles sur le marché: les valeurs de conductivité thermique généralement données sont des valeurs sèches et sont donc a priori légèrement sous-évaluées.

Valeurs U_{sec} et U_{app} du cas de réf et des 3 variantes.

[W/m^2K]	U_{sec}	U_{app}
Reference case	0,134	0,148
Variante 1	0,118	0,129
Variante 2	0,136	0,156 / 0,15
Variante 3	0,181	0,199

CAPACITÉ DE RÉGULATION DE L'HUMIDITÉ INTÉRIEURE

Pour quantifier la capacité de régulation de l'humidité intérieure d'une parois, la seule connaissance des paramètres de stockage (courbe de sorption) et de transfert (perméabilité à la vapeur et coefficient de redistribution de l'eau liquide) de la couche en contact avec l'ambiance ne suffit pas. En effet, en conditions dynamique, elle dépend de la combinaison de ces paramètres. Un paramètre unique qui qualifie le matériau qui est en contact avec l'ambiance intérieure du point de vue de sa capacité à réguler

l'humidité de cette ambiance a été définie dans le cadre de l'Annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie (AIE41). Il est noté MBV (signifiant en anglais « Moisture Buffer Value ») et s'exprime en $[g/m^2.\% \text{ HR}]$. Pour le mesurer, on soumet une couche « suffisamment » épaisse d'un matériau (généralement de plusieurs centimètres) à une humidité relative de 35 % pendant 16 h et de 75 % pendant 8 h. Cette évolution a été définie pour représenter les cycles jour/nuit dans nos habitations, en hiver. Contrairement à ce qui est proposé dans les travaux de l'AIE41, on a considéré ici une évolution de la température qui suit celle de l'humidité : 20 °C le jour et 18 °C la nuit (climat moyen d'Uccle à l'extérieur). Ces sollicitations ont un caractère très théorique et les valeurs obtenues sont utilisées pour comparer les matériaux entre eux et pas pour prédire les échanges d'humidité qui auront lieu dans la réalité. Une analyse vraisemblablement plus réaliste est présentée dans le chapitre suivant grâce aux simulations effectuées avec le logiciel WUFI Plus.

L'illustration page suivante (fig. 53) montre les résultats obtenus pour le mur de référence (cas 1) et une série de variantes : le cas 2 correspond au mur de référence avec un enduit à la chaux à l'intérieur (épaisseur 1,5 cm) ; le cas 3 correspond au mur de référence avec un enduit au plâtre à l'intérieur (épaisseur 1,5 cm) ; le cas 4 correspond au mur de référence sans enduit à l'argile (paille apparente à l'intérieur) ; le cas 5 correspond à la variante 3 (OSB à l'intérieur). Le cas « 1* » est identique au cas 1 sauf qu'une autre courbe de sorption a été utilisée pour l'enduit d'argile : cette courbe a été approximée par le logiciel à partir de la teneur en eau à la saturation libre mesurée (enduit 2) et d'une teneur en eau de 60 kg/m³ à 80 % d'humidité relative (au lieu de 10,9 kg/m³ comme cela a été mesuré en laboratoire). Cette courbe de sorption est proche de celle que l'on rencontre dans la littérature pour certains enduits d'argile et permet de constater l'effet important qu'ont les valeurs de sorption utilisées sur la valeur du MBV. Des simulations complémentaires ont montré qu'entre 2 et 8 cm, l'épaisseur de l'enduit d'argile du cas de référence n'a pas une influence significative sur les résultats. La paille apparente (cas 4) donne un résultat élevé mais ce choix paraît peu réaliste en pratique.

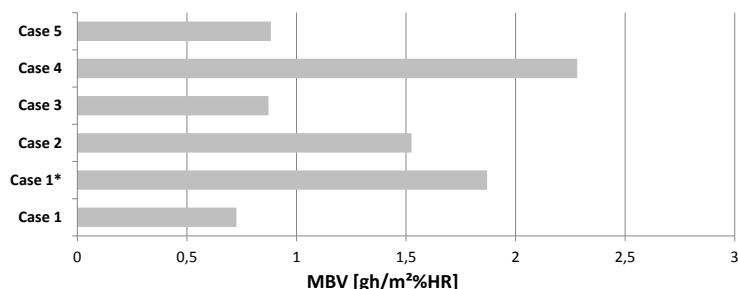


Fig 53 : Capacité de régulation de l'humidité intérieure (MBV).

CAPACITÉ DE REGULATION DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE

Comme pour l'humidité, pour quantifier la capacité de régulation de la température intérieure d'une paroi, la seule connaissance des paramètres de stockage (densité, chaleur spécifique) et de transfert (conductivité thermique) de la couche en contact avec l'ambiance ne suffit pas. Le paramètre « Thermal Buffer Value », noté TBV [Wh/m².K] (Evrard, 2008), est inspiré de son équivalent hydrique, le MBV. Pour le calculer, on utilise les mêmes sollicitations que dans le paragraphe précédent : 20 °C et 35 % d'HR pendant 16 h, le jour ; 18 °C et 75 % d'HR pendant 8h, la nuit (climat moyen de Uccle à l'extérieur). A nouveau, les valeurs obtenues sont utilisées pour comparer les matériaux entre eux et pas pour prédire les échanges de chaleur qui auront lieu dans la réalité. Une analyse vraisemblablement plus réaliste est présentée dans le chapitre suivant grâce aux simulations effectuées avec le logiciel WUFI Plus.

L'illustration page suivante (fig. 54) montre les résultats obtenus pour les mêmes cas que le paragraphe précédent : cas 1 : mur de référence ; cas 1* : mur de référence où l'enduit d'argile est défini avec une autre courbe de sorption (ce qui explique la différence de valeur obtenue avec le cas 1) ; cas 2 : mur de référence avec un enduit à la chaux à l'intérieur ; cas 3 : mur de référence avec un enduit au plâtre à l'intérieur ; cas 4 : mur de référence sans enduit à l'argile (paille apparente à l'intérieur) ; cas 5 : correspond à la variante 3 (OSB à l'intérieur).

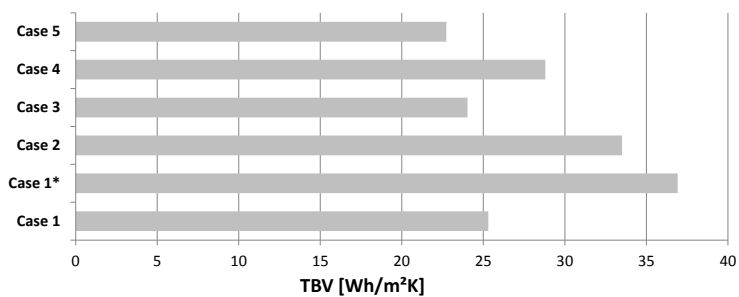


Fig 54 : Capacité d'échange de chaleur (TBV).

CONFORT D'UN LOCAL

Les résultats présentés dans ce chapitre sont basés sur des simulations réalisées avec le logiciel WUFI Plus (version 2) qui permet de modéliser un bâtiment composé de plusieurs locaux (www.wufi-wiki.com). Les parois des locaux sont définies couche par couche, mais le climat intérieur est un résultat de la simulation (en plus des résultats équivalents à ceux obtenus par WUFI Pro). Le logiciel permet donc de modéliser l'évolution de l'ambiance intérieure dans chacune des zones définies (température, humidité et CO₂). Il permet donc d'étudier différentes variantes d'un même système constructif ou de comparer les résultats à ceux obtenu pour un bâtiment équivalent construit avec d'autres parois ou placé dans d'autres climats.

DESCRIPTION DES CAS ÉTUDIÉS

Le bâtiment choisi ici est celui qui abrite les nouveaux bureaux de la société Paille-Tech, Rue de la glacerie à Franière. Celui-ci fait 2 étages, avec une surface au sol de $\sim 40 \text{ m}^2$. Il est construit dans l'atelier de préfabrication, c-à-d. à l'abri de la pluie et sans rayonnement direct du soleil. Ces conditions sont peu représentatives de la réalité mais permettent d'étudier l'impact du choix des parois sur les conditions de confort indépendamment du soleil et de la pluie. Un monitoring complet du bâtiment a été installé pendant la recherche aPROpaille et les mesures permettront de calibrer les simulations. L'impact du climat si le bâtiment était construit à l'extérieur sera toutefois évalué à travers une simulation complémentaire utilisant le même fichier climatique qu'au chapitre précédent (climat moyen de Uccle). La figure 55 ci-dessous donne les principales dimensions du bâtiment étudié et identifie la zone 1 ($6,26 \text{ m}^2$) qui fait l'objet d'un monitoring complet (voir chapitre suivant).

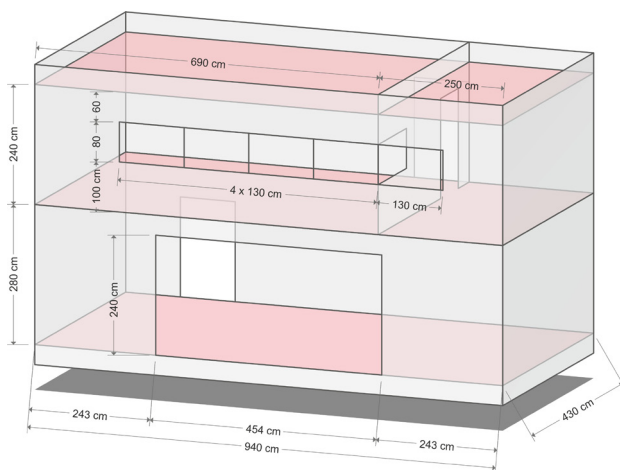


Fig 55 : Dimensions du bâtiment choisi pour l'analyse.

Profil d'occupation

Le local qui sera monitoré est le petit bureau situé à l'étage (zone 1). Il sera occupé par une personne (+1 ordi + éclairage). Le reste de l'étage (zone 2) sera un bureau occupé par 3 personnes (+3 ordi + éclairage) et le rez-de-chaussée (zone 3) sera réservé à des réunions et au lunch à midi.

On considère que les ordinateurs sont allumés de 9 h à 18 h tous les jours sauf le week-end. Les bureaux à l'étage sont occupés de 9 h à 13 h et de 14 h à 18 h. Sur le temps de midi (13 h-14 h) 7 personnes se rassemblent dans la salle de réunion pour manger (On n'a pas considéré d'occupation liée à des réunions dans cette salle).

Profil d'occupation d'un jour de semaine de la Zone 1.

Hour	Heat conv. W	Heat radiant W	Moisture g/h	CO ₂ g/h
0	0	0	0	0
9	270	81	59	36,3
13	150	0	0	0
14	270	81	59	36,3
18	0	0	0	0

Détail pour les tranches horaires de 9 h à 13 h et de 14 h à 18 h de la zone 1.

	Heat convectiv [W]	Heat radiant "W*	Moisture [g/h]	CO ₂ [g/h]
Adult, sitting person, working	80	41	59	36,3
Lightning (8W/m ²)	40	40	0	0
Computer	150	0	0	0

Profil d'occupation d'un jour de semaine de la Zone 2.

Hour	Heat conv. W	Heat radiant W	Moisture g/h	CO ₂ g/h
0	0	0	0	0
9	810	243	177	108,9
13	450	0	0	0
14	810	243	177	108,9
18	0	0	0	0

Profil d'occupation d'un jour de semaine de la Zone 3.

Hour	Heat conv. W	Heat radiant W	Moisture g/h	CO ₂ g/h
0	0	0	0	0
13	615	412	301	212,1
14	0	0	0	0

Composition des parois

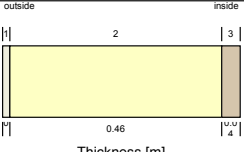
Les paramètres utilisés dans les simulations pour la paille et pour l’enduit d’argile (enduit 2) sont présentés dans les chapitres précédents. Les tableaux suivants donnent les valeurs principales (lambda, rho, c et mu) pour les autres matériaux intervenants dans les simulations (agepan/plâtre/bois).

On considère que l’ensemble des baies est fermé avec des portes/fenêtres avec des châssis en bois et du double vitrage ($U = 1,6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).

Composition des murs

Cas avec des murs en paille « S »

Pour tous les cas qui comprennent des parois en paille, la composition des parois est la suivante (sauf mention contraire).

Assembly (Id.1): Murs verticaux						
Homogenous layers						
Thermal resistance: 7,312 m²K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0,13 W/m²K						
Thickness: 0,516 m						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Agepan DWD	570	2100	0,09	0.016	
2	Paille (aPROpaille)	100	2426	0,065	0.46	
3	Enduit Terre 2 (aPROpaille)	2050	750	0,7	0.04	

Cas où les parois sont adaptées : Maçonnerie isolée par l'intérieur « X »

Pour certains cas, les murs verticaux en paille ont été remplacés par des murs maçonnés en blocs béton avec une couche isolante en polystyrène extrudé (XPS) située du côté intérieur, sous une plaque de plâtre cartonnée. Ces murs sont définis tels que le coefficient de transfert thermique U_{sec} reste inchangé. Ils offrent a priori une faible inertie thermique et peu d'échange d'humidité avec l'ambiance intérieure. Les autres parois restent inchangées.

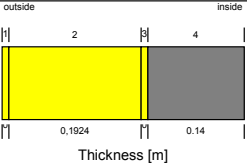
Assembly (Id.1): Murs verticaux

Homogenous layers						
Thermal resistance: 7,373 m²K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0,13 W/m²K						
Thickness: 0,365 m						
outside inside Thickness [m]						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Breeze Blocks	1450	850	0,6	0,14	
2	XPS Surface Skin (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,01	
3	XPS Core (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,1923	
4	XPS Surface Skin (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,01	
5	Gypsum Board	850	850	0,2	0,0125	

Cas où les parois sont adaptées : Maçonnerie isolée par l'extérieur « C »

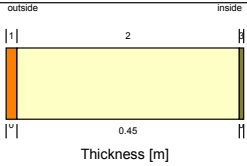
Pour d'autres cas, les murs verticaux en paille ont été remplacés par des murs maçonnés en blocs béton (recouvert d'un enduit au plâtre du côté intérieur) avec une couche isolante en polystyrène extrudé (XPS) située du côté extérieur. En pratique, ce mur serait recouvert d'un bardage ou d'un enduit. Ces murs sont définis tels que le coefficient de transfert thermique U_{sec} reste inchangé. Ils offrent a priori une forte inertie thermique et un échange d'humidité avec l'ambiance intérieure moyen. Les autres parois restent inchangées.

Assembly (Id.1): Murs verticaux

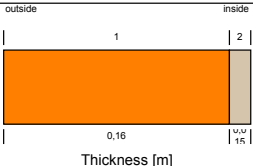
Homogenous layers						
Thermal resistance: 7,313 m²K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0,13 W/m²K						
Thickness: 0,352 m						
						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	XPS Surface Skin (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,01	Yellow
2	XPS Core (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,1924	Yellow
3	XPS Surface Skin (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,01	Yellow
4	Breeze Blocks	1450	850	0,6	0,14	Grey

Composition des autres parois

Assembly (Id.3): Toit

Homogenous layers						
Thermal resistance: 5,629 m²K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0,17 W/m²K						
Thickness: 0,481 m						
						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Spruce, radial	455	1500	0,09	0.022	Orange
2	Paille (0,05)	100	2000	0,085	0.45	Yellow
3	Pavaplan	800	2500	0,1	0,009	Dark Green

Assembly (Id.5): Cloison

Homogenous layers						
Thermal resistance: 1,799 m²K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0,49 W/m²K						
Thickness: 0,175 m						
						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Spruce, radial	455	1500	0,09	0,16	Orange
2	Enduit Terre 2 (aPROpaille)	2050	750	0,7	0,015	Grey

Assembly (Id.4): Plancher Etage

Homogenous layers						
Thermal resistance: 2,06 m²K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0,42 W/m²K						
Thickness: 0,227 m						
outside inside 0.165 0.04 0.022 Thickness [m]						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Spruce, radial	455	1500	0,09	0.165	Orange
2	Enduit Argile (Claytec)	1600	850	0,7	0.04	Tan
3	Oak, radial	685	1500	0,13	0.022	Orange

Assembly (Id.2): Sol

Homogenous layers						
Thermal resistance: 4,89 m²K/W						
Heat Transfer Coefficient(U-value): 0,19 W/m²K						
Thickness: 0,476 m						
outside inside 0.022 0.36 0.022 0.05 0.022 Thickness [m]						
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Spruce, radial	455	1500	0,09	0,022	Orange
2	Paille (0,05)	100	2000	0,085	0.36	Yellow
3	Oriented Strand Board (density 595 kg/m³)	595	1500	0,13	0,022	Tan
4	Enduit Terre 2 (aPROpaille)	2050	750	0,7	0,05	Tan
5	Oak, radial	685	1500	0,13	0.022	Orange

Systèmes installés

Quatre cas de systèmes de chauffage et de ventilation ont été considérés. Pour tous les cas, l'ouverture des portes et fenêtres conduit à un renouvellement naturel de l'ensemble du volume d'air deux fois sur la journée (1 vol/h entre 9 h et 10 h et entre 13 h et 14 h). Les apports internes liés à l'occupation, à l'éclairage et aux ordinateurs est pris en compte dans les calculs. Pour les cas «2», «3» et «4», le système de chauffage se déclenche si la température n'atteint pas 20 °C pendant les heures d'occupation.

Cas «1»

Aucun système de ventilation et aucun système de chauffage ne sont installés. La température évolue librement au cours des saisons.

Cas «2»

Aucun système de ventilation n'est installé. Le système de chauffage considéré correspond à l'installation de cinq chaufferettes électriques de 1 kW chacune : deux au rez-de-chaussée, une dans le local monitoré (zone 1) et deux pour le reste de l'étage.

Cas «3»

Une extraction d'air mécanique est considérée pendant les heures d'occupation (la semaine, de 9 h à 18 h) permettant d'évacuer dans chaque zone 30 m³/h.personne. Le système de chauffage est identique au cas «2» (cinq chaufferettes électriques de 1 kW chacune).

Cas «4»

Un système de ventilation double-flux est considéré pour ce cas. Il permet de renouveler dans chaque zone 30 m³/h.personne pendant les heures d'occupation (la semaine, de 9 h à 18 h). Un récupérateur de chaleur (rendement chaleur de 85 %) complète ce système (pas de récupération de l'humidité). Le système de chauffage considéré correspond dans ce cas à l'installation d'une batterie de chauffe de 5 kW (distribué comme suit : 20 % pour la zone 1, 40 % pour la zone 2 et pour la zone 3).

Variantes analysées et critères de comparaison

Douze variantes principales sont comparées ci-après. De nombreux autres cas ont été analysés mais ne seront pas développés en détail dans ce document : effets des conditions de consigne, du type ou de l'épaisseur de l'enduit intérieur, des courbes de sorption des matériaux de finitions intérieurs, de l'exposition au soleil ou à la pluie.

Les 4 premiers cas correspondent au bâtiment tel qu'il est construit c.-à-d. avec des parois extérieures construites en paille («S» comme «Straw»). Ces cas serviront de base au calibrage qui suivra l'analyse des données du monitoring selon le système qui sera effectivement mis en place («S-1», «S-2», «S-3» ou «S-4»).

Viennent ensuite les variantes qui répliquent les conditions des cas «1», «2», «3» et «4» avec des parois extérieures adaptées : «X-...» pour celles dont les murs maçonnés sont isolés par l'intérieur («x» pour XPS à

l'intérieur); et « C -... » pour celles dont les murs maçonnés sont isolés par l'extérieur (« C » pour « Concrete », c.-à-d. béton, à l'intérieur).

Les résultats sont comparés sur base des critères suivants :

- l'évolution de la concentration en CO₂ au cours de l'année et d'une journée;
- le nombre d'heure de chauffage sur l'année;
- le besoin de chauffage annuel;
- les extrema rencontrés pour la température et l'humidité sur l'année;
- l'évolution de la température et de l'humidité au cours de l'année;
- l'évolution de la température pendant une semaine d'été;
- l'évolution de la température pendant une semaine d'été;
- le pourcentage d'heures d'occupation où les conditions intérieures de :
 - température et d'humidité relative sont dans la zone de confort élevé;
 - température et d'humidité relative sont dans la zone de confort moyen;
 - température correspondent à une surchauffe légère (T > 25 °C);
 - température correspondent à une surchauffe plus importante (T > 28 °C);
 - température correspondent à une température trop faible (T > 16 °C).

ÉVOLUTION DU TAUX DE CO₂ À L'INTÉRIEUR

Comme le montrent les graphiques ci-dessous, le niveau de CO₂ atteint chaque jour d'occupation pour les cas « 1 » et « 2 » n'est pas acceptable (le niveau maximal toléré par le RGPT en Belgique est de 1 000 ppm). La figure suivante montre que cela est dû au fait qu'aucune ventilation n'est prévue pour ces cas car le niveau ne dépasse pas les 1 000 ppmv avec une ventilation de 30 m³/h.pers. Ceci nous amène à écarter les cas « 1 » et « 2 », malgré que la consommation de chauffage puisse paraître intéressante. Le type de parois (« S », « X » ou « C ») n'a pas d'influence sur ce résultat.

Il faut faire remarquer que le taux de ventilation utilisé ($30 \text{ m}^3/\text{h.pers}$) peut peut-être être adapté dans le cas de locaux où le rapport entre volume habité et nombre d'occupant est très différent. Cette analyse dépasse le cadre de cette recherche.

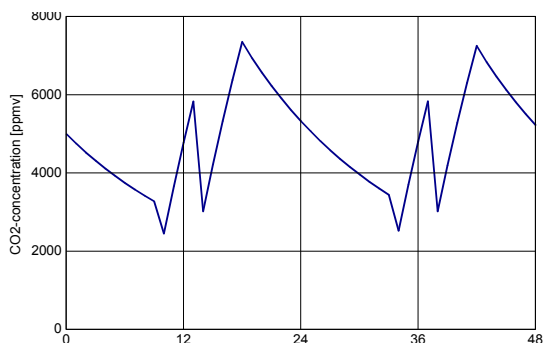


Fig 56 : Évolution de la concentration en CO2 pour les cas « 1 » et « 2 » pendant une journée en semaine.

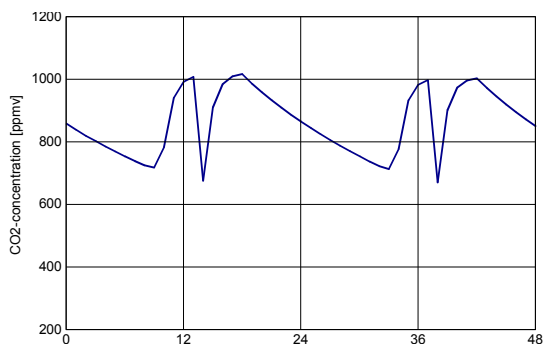


Fig 57 : Évolution de la concentration en CO2 pour les cas « 3 » et « 4 » pendant une journée en semaine.

ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE

Quand on observe les températures extrêmes rencontrées dans les différents cas, on constate que les cas « C » ont des maxima légèrement moins élevés (entre 28°C et 30°C) que les cas « S » (de l'ordre de 30°C). La différence est plus marquée avec les cas « X » (dont les maxima sont de

32 à 33 °C). Le même constat peut être fait pour les minima, qui sont plus bas pour les cas «X» que pour les cas «C» et «P». Ces valeurs sont un premier indicateur qui permet de dire que les cas «C» offrent une plus grande inertie que les cas «X». Les cas «S» se situent entre les deux, mais ils ont des extrema de température plus proche des cas «C».

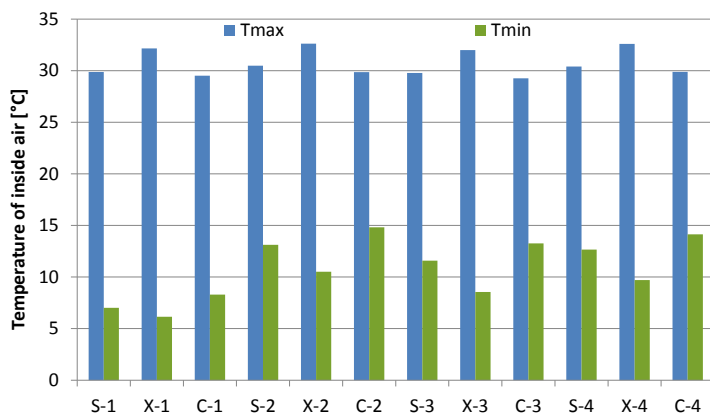


Fig 58 : Extrema de la température intérieure.

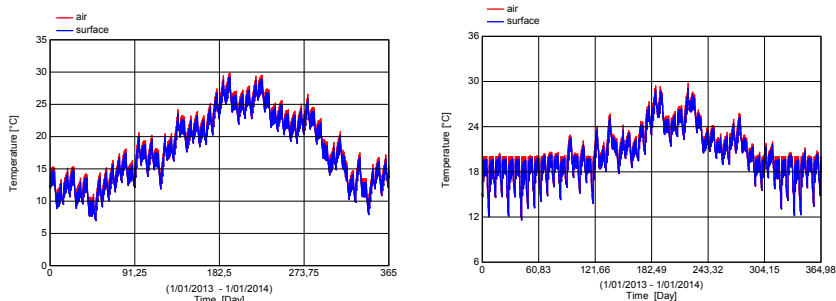


Fig 59 : Évolution de la température intérieure et de la température de surface intérieure pour le cas «S-1» (et «S-3»).

Il est intéressant d'analyser de plus près l'évolution de la température de surface. Le graphique de la page suivante (fig. 60) montre l'évolution des températures de surface des cas «3» pendant une semaine d'hiver : du 29 janvier au 6 février. On y constate que la température de surface à 8 heures le lundi matin, heure à partir de laquelle la consigne est fixée à 20 °C,

est très différente d'un cas à l'autre : elle est de moins de 10 °C dans le cas «X-3», alors qu'elle ne descend pas en dessous de 12 °C pour «S-3» et 14 °C pour «C-3». Des simulations complémentaires ont montrées que lorsque la couche d'enduit à l'argile s'épaissit, cette valeur se rapproche progressivement de la chaleur obtenue pour le cas «C-3». On constate aussi que dès 10 h du matin, la température de surface du cas «X-3» a rattrapé celle des autres cas et est plus élevée que ceux-ci le reste de la journée (la différence diminue au cours de la journée et est négligeable en fin de journée). Les cas «S» et «C» ont des températures de surface très proche pendant la semaine.

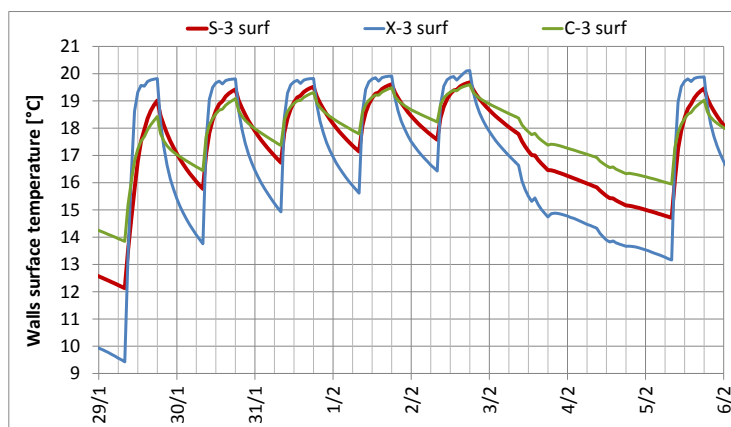


Fig 60 : Évolution de la température de surface pendant une semaine d'hiver.

Le graphique suivant (fig. 61) montre l'évolution de la température de surface en été cette fois : du 27 juillet au 7 août. On voit que si la température du cas «X-3» est parfois légèrement plus basse le matin, elle dépasse très vite celle rencontrées pour les autres cas. On peut même constater que la température monte à près de 28 °C dans ce cas pendant l'après-midi, alors que la température de surface dépasse à peine 26 °C dans les autres cas. On peut constater à nouveau que les cas «S» et «C» ont un comportement presque similaire, même si le cas «S-3» offre des températures légèrement plus fraîches le matin, et que les températures sont légèrement plus basses le soir.

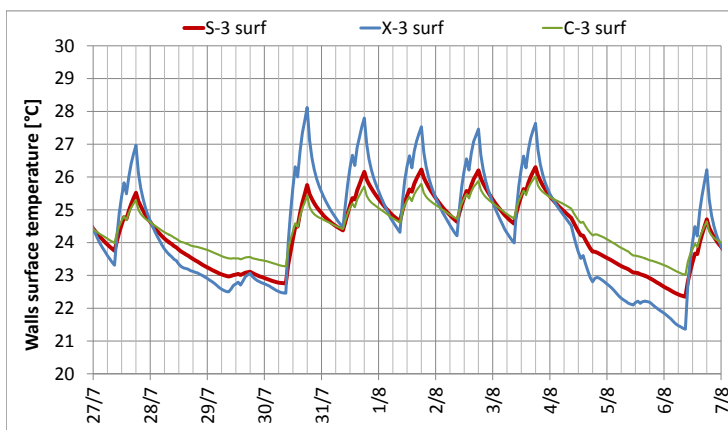


Fig 61 : Évolution de la température de surface pendant une semaine d'été.

ÉVOLUTION DE L'HUMIDITÉ RELATIVE INTÉRIEURE

Si l'on compare les extrema en termes d'humidité relative, on constate que les cas « 1 » et « 2 » présentent toute l'année une humidité relative élevée (entre 70 % et 90 %). Cela est dû au fait qu'aucune ventilation ne permet d'évacuer l'humidité apportée par l'occupation. La gamme de valeur prise par l'humidité est plus intéressante dans les cas « 3 » et « 4 » grâce à la ventilation. Sans ventilation, on voit que la capacité de régulation de l'enduit d'argile est relativement efficace, mais qu'il n'y a pas de différence significative dans les cas où une ventilation est mise en place.

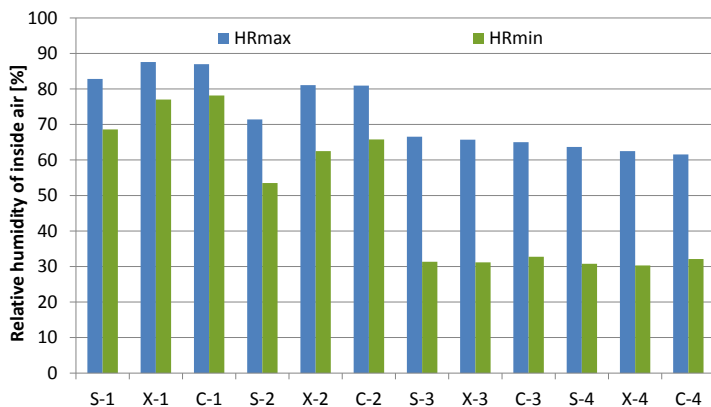


Fig 62 : Extrema de l'humidité relative intérieure.

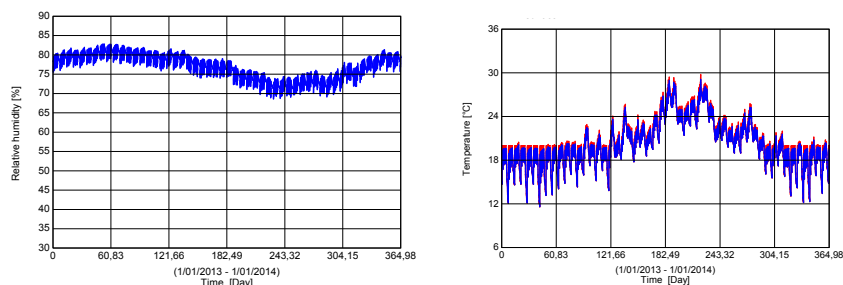


Fig 63 : Évolution de l'humidité relative intérieure pour le cas « S-1 » (et « S-3 »).

Pour comprendre ce résultat relativement étonnant et plutôt décevant pour les constructions en paille et celles intégrant des enduits d'argile, il est intéressant d'analyser la quantité d'humidité qui transfère au travers des parois, tel que représenté dans la figure ci-dessous (valeur positive quand le flux est orienté de l'intérieur vers l'extérieur).

Les cas « 1 » et « 2 » (sans ventilation), montrent que les parois de paille couvertes d'enduit à l'argile, « S », sont capables d'extraire plus d'humidité de l'ambiance intérieure que leur équivalent « X » et « C » (ce qui explique les différences obtenues pour ces cas en termes d'humidité relative). Pour les cas « 3 » et « 4 », on remarque que les parois « S » continuent de drainer plus d'humidité hors de l'ambiance intérieure, même si les différences sont moins marquées.

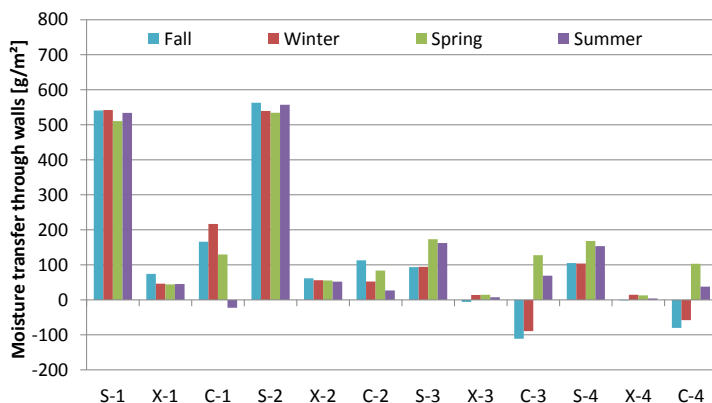


Fig 64 : Quantité d'humidité extraite à travers les murs.

Si l'on considère qu'il y a 25 m² de parois dans la zone 1 et que, dans le cas « S-3 », il y a à peu près 100 grammes par mètre carré d'humidité extrait de l'ambiance intérieur à travers celles-ci au cours de l'hiver, on constate que la quantité d'humidité que cela représente est de 2,5 kg. Avec un calcul simplifié, on peut estimer qu'il y a à peu près 4 grammes d'humidité par m³ d'air dans les conditions intérieures rencontrées et que la ventilation conduit à extraire, au cours de l'hiver, de l'ordre de 14 500 m³ d'air dans ce cas. On peut donc estimer la quantité d'humidité extraite par la ventilation à 70 kg ! Cela représente donc 28 fois plus d'humidité que ce que les parois ont transférées. On comprend donc mieux pourquoi, malgré la différence qui existe entre les parois, on n'observe pas de différence significative au niveau de l'humidité relative intérieure pour les cas « 3 » et « 4 ».

BESOIN EN CHAUFFAGE

Le graphique suivant (fig. 65) présente la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage de la zone 1 dans les différentes variantes sélectionnées. Les cas « 1 » (sans chauffage ni ventilation) ont une consommation de chauffage nulle et n'y sont donc pas repris. Si l'on compare les cas « 3 » aux cas « 4 », on observe que l'installation d'un récupérateur de chaleur sur l'air extrait permet de récupérer la quasi-totalité de l'énergie perdue par la ventilation. En effet, les consommations annuelles des cas « 2 » et « 4 » sont relativement proches.

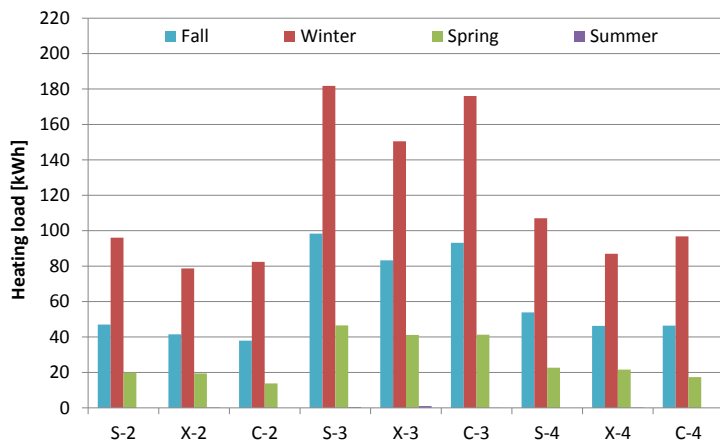


Fig 65 : Besoin en chauffage pour les cas de base.

Il est intéressant de faire remarquer que les cas «X» présentent une consommation globale plus faible que les cas «C» et «S». Ces résultats ne peuvent être interprétés sans préciser l'importance du profil d'occupation sur ceux-ci. En effet, le fait que le bâtiment de bureau ne sera pas occupé le soir et le week-end, demande, au début de chaque journée d'occupation et surtout le lundi matin de remettre les locaux à température. L'énergie utilisée comprend donc systématiquement une part qui sert à « recharger » la masse thermique des murs. Plus l'inertie des murs est élevée, plus cette part est importante. Ce résultat est confirmé par une série de simulations complémentaires. Les résultats montrent que pour une occupation constante jour et nuit, les cas «X» et «C» ont alors les mêmes consommations d'énergie annuelles (voir cas «X-3_sp» et «C-3_sp» sur le graphique ci-dessous, fig. ?).

Pour expliquer pourquoi les cas «S» ont systématiquement une consommation plus élevée que les cas équivalents avec les parois «X» ou «C», il faut considérer que les transferts d'humidité provoquent une humidité d'équilibre dans la paille de l'ordre de 65 % (voir ce qui est dit sur le «U_{app}» au chapitre précédent). Le coefficient U des parois «S» calculé par le logiciel (qui a servi de base à la détermination de l'épaisseur d'isolant des parois «C» et «X») ne tient pas compte de cette teneur en humidité. La valeur U des murs «S» serait donc de 0,15 W/m²K au lieu de 0,13 W/m²K. Si l'on adapte en conséquence l'épaisseur d'isolant des parois «C» et «X», on constate (voir cas X-3_U» et «C-3_U» si le graphique ci-dessus) que les consommations du cas «S» correspondant («S-3») sont légèrement inférieures à celle du cas «C», mais reste supérieures à celle du cas «X». Ce résultat confirme ce qui a été dit sur la différence de consommation liée à la différence d'inertie thermique.

Deux autres cas complémentaires ont été simulés : «S-3_8» et «S-3_15». Ils correspondent au cas «S-3», mais l'épaisseur de l'enduit d'argile est modifié et est fixé respectivement à 8 cm et 15 cm. La consommation d'énergie qui y est associée est présentée dans le graphique ci-dessous. On remarque que l'augmentation de l'épaisseur d'enduit, qui augmente l'inertie thermique des parois, rapproche les résultats obtenus du point de vue de la consommation énergétique des cas «S» et «C».

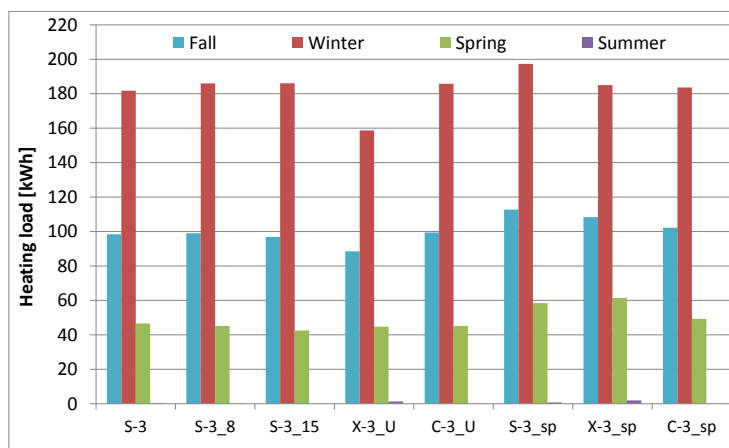


Fig 66 : Besoin en chauffage pour les cas complémentaires.

INERTIE THERMIQUE ET CONFORT

Une autre manière de comparer les différentes configurations est d'observer le nombre d'heure pour lesquelles certaines conditions sont rencontrées. En général, on exprime ce nombre d'heure en pourcentage d'heure où ces conditions sont rencontrées, soit par rapport au nombre d'heure total d'une année (8 760 h), soit par rapport au nombre d'heure d'occupation. Vu l'occupation intermittente du bâtiment étudié (occupé 2 610 h/an), on a choisi d'exprimer les résultats en pourcentage d'heure d'occupation. On peut comparer les variantes sur base du pourcentage d'heure où :

- la température et l'humidité relative sont dans la zone de confort élevé ;
- la température et l'humidité relative sont dans la zone de confort moyen ;
- la température correspond à une surchauffe légère ($T > 25^{\circ}\text{C}$) ;
- la température correspond à une surchauffe plus importante ($T > 28^{\circ}\text{C}$) ;
- la température correspond à une température trop faible ($T < 16^{\circ}\text{C}$).

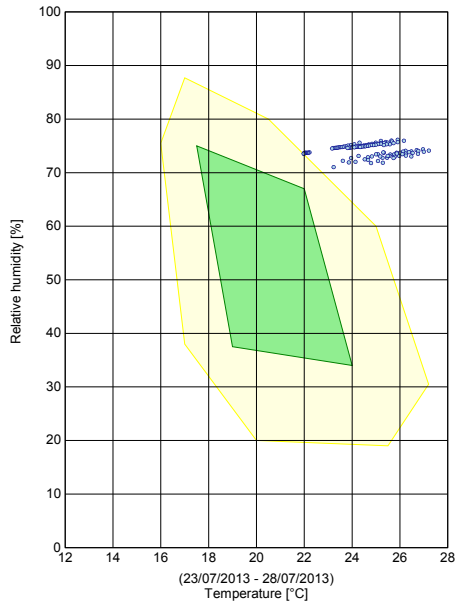
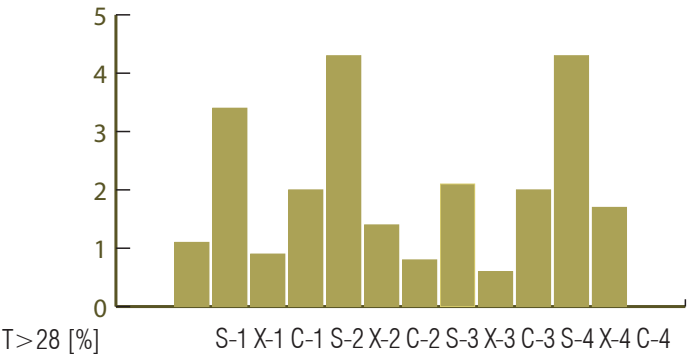


Fig 67 : Distribution des résultats sur un diagramme de confort.



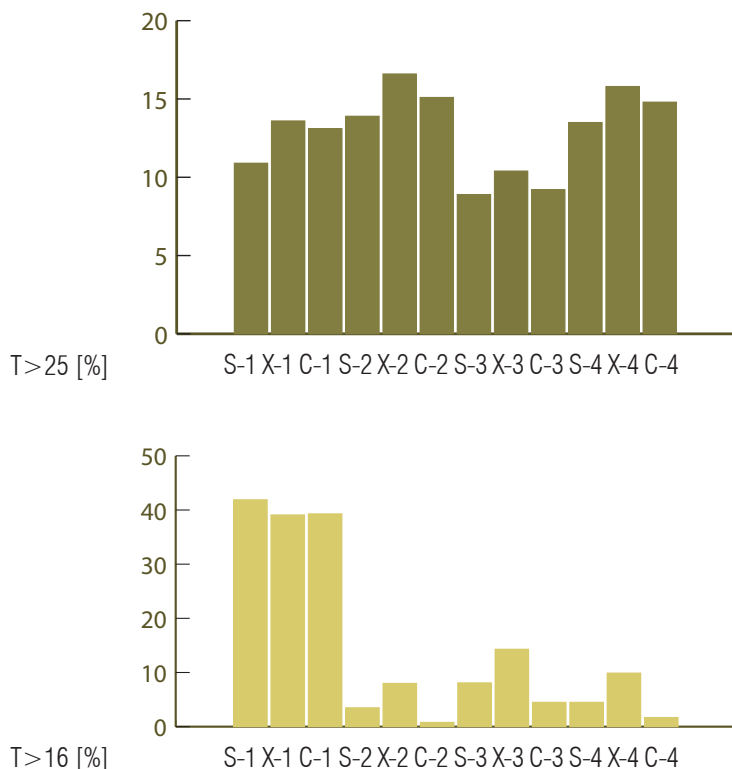


Fig 68 : Besoin en chauffage.

On constate que les cas «X» dépassent beaucoup plus souvent ces températures inconfortables que les autres cas. Aucun cas ne répond aux préconisations de la Plateforme Maison Passive pour la limite de 25 °C (max 5 % du temps). La limite à 28 °C (max 1 % du temps) est dépassée pour les cas « X » (~ 3 %), mais pas pour les cas « C » et « S ». Il n'existe pas de préconisation sur le nombre d'heures trop fraîches, mais on peut observer que les cas «X» présentent des températures inférieures à 16 °C pendant ~ 4 % des heures d'occupation alors que cela n'arrive pas aussi souvent pour les cas «S» et les cas «C» (~ 1 % du temps ou moins). Les cas 1 par contre atteignent des températures inférieures à 16 °C pendant approximativement 40 % du temps.

CONCLUSION

Le logiciel WUFI Plus a permis de faire une analyse approfondie d'une construction qui sert de bureau pour l'entreprise Paille-Tech. Le bâtiment étant situé à l'abri de la pluie et du soleil direct, ces deux facteurs ne sont pas discutés ici.

Pour le bâtiment tel qu'il est construit, quatre cas de base ont été imaginés. Les deux premiers (sans ventilation) doivent être rejetés car les niveaux de CO_2 obtenus sont beaucoup plus élevés que ce que la réglementation impose (RGPT). C'est évidemment dommage du point de vue énergétique, car la ventilation « coûte » cher en énergie. Les deux derniers cas sont plus réalistes : l'un est défini avec un système de ventilation type C (extraction mécanique), et l'autre avec système de ventilation type D (extraction et pulsion mécanique + échangeur de chaleur). Ce dernier cas (ventilation type D) est celui qui présente les consommations d'énergie les plus faibles, mais il demande un investissement initial plus important.

Le bâtiment tel qu'il est construit (cas « S ») est comparé à des variantes où on remplace les murs en paille par des murs ayant le même coefficient de transfert thermique sec U_{sec} . Il s'agit de murs en maçonnerie lourde isolés soit par l'extérieur, notés « C », soit par l'intérieur, notés « X ». Les cas « C » présentent une forte inertie thermique, alors que pour les cas « X », l'inertie est très faible.

La comparaison avec les cas « X » et « C » montre très clairement que, pour le profil d'occupation utilisé, les consommations d'énergie annuelle sont moins élevées pour les cas « X ». Par contre, les conditions de confort sont nettement meilleures pour les cas « S » et « C » (stabilité de la température intérieure, surchauffe...). Pour ce qui est de l'évolution de l'humidité relative intérieure et de la capacité d'échange d'humidité entre les parois et l'ambiance intérieure, les cas « S » donnent les meilleurs résultats, bien que les différences ne soient pas très marquées dès que l'on met en place un système de ventilation.

Il apparait donc qu'en plus d'offrir de très bonnes performances thermiques, les murs en paille couverts d'un enduit d'argile de 4 cm offrent un excellent confort en hiver comme en été. Ce constat est à considérer en parallèle de leur faible impact environnemental.

MONITORINGS

Trois bâtiments ont été instrumentés durant la recherche aPROpaille. Deux d'entre eux sont des maisons unifamiliales et le troisième est un bâtiment de bureaux. La volonté a été d'analyser en particulier la manière dont la température et l'humidité évoluait au sein des parois. Des murs extérieurs possédants différents types de finitions et soumis à différents climats intérieurs et extérieurs ont donc été choisis. L'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure ont aussi fait l'objet de mesures de la température et de humidité, et, selon les cas, des mesures complémentaires (évolution du CO₂ à l'intérieur, pluie battante, rayonnement solaire) ont aussi été réalisées. Un matériel relativement classique a été utilisé, sauf pour le suivi de l'évolution de la température et de l'humidité au sein des parois, où une chaîne de capteurs spécifiques a été développée. Enfin, une série de simulations a été réalisée et les résultats de celles-ci ont été comparés aux résultats des mesures avec différents logiciels. Si les résultats sont particulièrement proches du point de vue de la température, on a pu observer une certaine divergence dans l'évaluation du point de vue de l'humidité, surtout lorsqu'il existe une incertitude au niveau de l'évaluation du transfert de l'eau liquide à travers les couches exposées à la pluie battante. Si les logiciels utilisés donnent en général des résultats sécuritaires, le risque est d'avoir une sous-évaluation des risques liés à l'humidité quand il existe une trop grande marge d'erreur sur les propriétés des matériaux ce qui confirme ce qui ressort des chapitres précédents.

DESCRIPTION DES PROJETS ANALYSES

Maison unifamiliale à Uccle

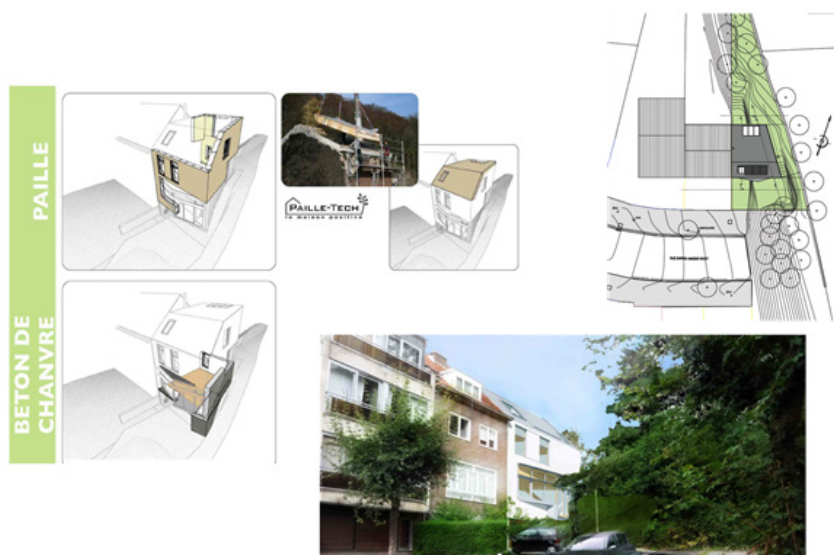


Fig. 69 : Maison unifamiliale à Uccle.

La maison est située à Uccle, elle a été conçue par le bureau d'architecture Karbon' architecture et urbanisme et construite en 2012 (voir fiche « Un brin de paille » dans le Vadémécum n°3 pour des informations plus détaillées sur ce projet). Ce projet a remporté le concours des bâtiments exemplaires (BATEX) bruxellois en 2012.

Les murs extérieurs au niveau de la rue et des pièces de vie du premier niveau intègrent un mélange de chaux et de chanvre. Les murs des chambres et sanitaires des deux niveaux suivants, utilisent le système de l'entreprise Paille-Tech (36 cm). Ces murs n'ont pas de finition particulière du côté intérieur (en plus des 4 cm d'enduit en terre) et sont couverts d'un enduit chaux-plâtre sur isolant en fibre de bois du côté extérieur. La toiture est aussi construite en éléments préfabriqués en paille produits par Paille-Tech.

Cinq différents points de mesures ont été installés : mur nord dans la salle de bain et dans un local technique au 2ème niveau, mur sud de la chambre

au 3ème niveau, toiture du versant sud, mur ouest du salon au 1er niveau (chaux-chaivre). De plus, la température intérieure dans les locaux attenants aux parois analysées, ainsi que la température extérieure au nord et l'ensoleillement de la façade sud ont été mesurés.

Maison unifamiliale à Tongrinne

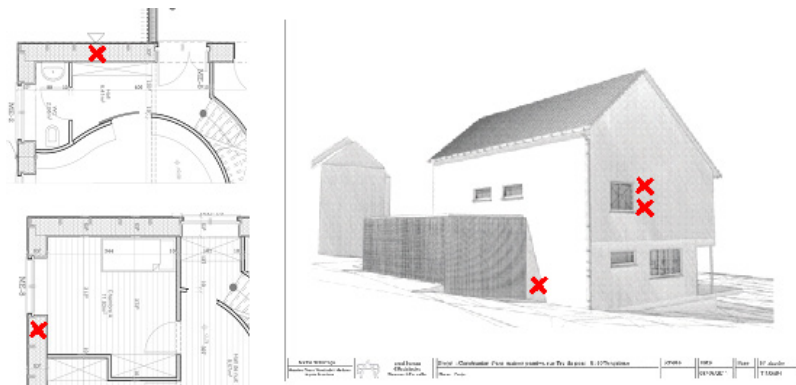


Fig. 70 : Maison unifamiliale à Tongrinne.

La maison est située à Tongrinne, elle a été conçue par le bureau d'architecture Desmedt-Prunelle et construite en 2012 (voir fiche correspondante dans le Vadémécum n°3 pour des informations plus détaillées sur ce projet). Ce projet a presque obtenu le label passif, mais n'a pas passé les tests d'étanchéité à l'air.

Les murs extérieurs utilisent le système de l'entreprise Paille-Tech (46 cm de paille). Ils sont recouverts à l'intérieur d'une finition en terre (en plus des 4 cm d'enduit en terre placé sur le mur en atelier) et, à l'extérieur, d'un système de panneaux isolants (Aquapanel) lesquels sont recouverts d'un enduit minéral. Le mur contre terre (qui ne devait pas l'être à l'origine du projet) a été réalisé avec la même paroi, mais complété du côté extérieur par une rupture capillaire classique (drainage, membrane étanche légèrement ventilée et peinture goudronnée sur l'AGEPAN).

Trois différents points de mesures ont été installés : deux dans le mur ouest dans la chambre au 1er niveau et un dans le mur contre terre sur la façade

nord. De plus, la température intérieure dans les locaux attenants aux parois analysées, ainsi que la température extérieure, l'ensoleillement vertical et la pluie battante à l'ouest ont été mesurés.

Bureaux de Paille-Tech à Franière

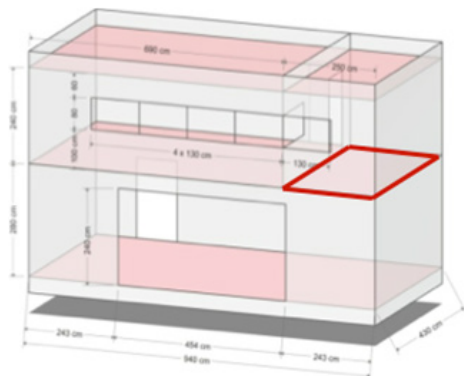


Fig. 71a: Implantation des bureaux de Paille-Tech à Franière.

Fig. 71b: Volumétrie et dimensions principales des bureaux de Paille-Tech à Franière..

Le bâtiment est situé à Franière, dans un hangar industriel. Il a été conçu et réalisé par l'entreprise Paille-Tech en 2012 (voir fiche correspondante dans le Vadémécum n°3 pour des informations plus détaillées sur ce projet). Ce projet a la particularité d'être protégé de la pluie et du soleil, ce qui a permis de porter une attention plus grande à l'occupation et au rôle de la ventilation.

Les murs extérieurs utilisent le système Paille-Tech (46 cm). Ils n'ont pas de finition autre que l'enduit de terre du côté intérieur et sont recouverts d'un bardage ventilé à l'extérieur.

Six différents points de mesures ont été installés, tous dans le mur sud-est (l'orientation n'a pas d'influence), à l'étage, dans le petit bureau d'Antoine Bonnert : trois sont placés dans un mur avec une couche de terre (4 cm) réalisée avec un premier mélange (celui utilisé par Paille-Tech avant le début de la recherche), et trois autres sont placés dans un mur avec une couche de terre (4 cm) réalisée avec un deuxième mélange (celui utilisé par Paille-Tech au moment où la recherche a débuté et qui s'est révélé être peu

intéressant par la suite). Il faut faire remarquer qu'aujourd'hui Paille-Tech utilise un troisième mélange, développé dans le cadre d'un autre projet ERAble (ZEROOCO), mais dont les propriétés hygrothermiques n'ont pas été mesurées.

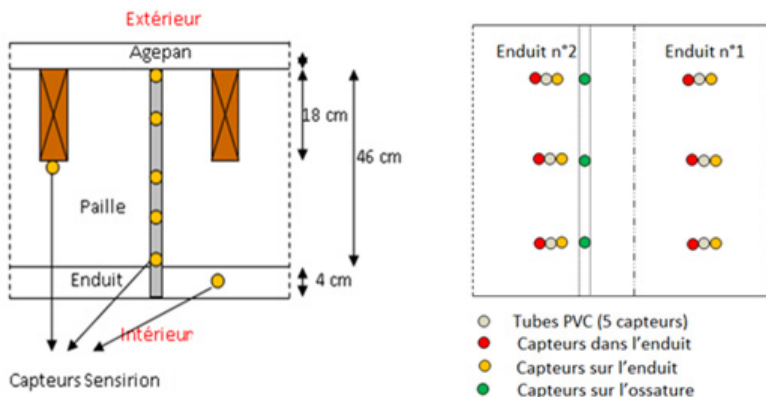


Fig. 72 : Positions des capteurs au sein des parois dans les bureaux de Paille-Tech à Franière.

De plus, la température, l'humidité et la pression de vapeur dans le bureau d'Antoine Bonnert attenants aux parois analysées, ont été analysées. A l'intérieur, un suivi de la concentration en CO₂ et un suivi de l'occupation ont aussi fait l'objet d'une attention particulière. Par contre, la porte qui devait isoler le bureau de l'autre local à ce niveau n'a jamais été installée et le test d'étanchéité à l'air (blower-door) n'a jamais été réalisé, ce qui implique plus d'incertitudes sur les hypothèses à utiliser dans les simulations.

MESURES EFFECTUEES

Matériel utilisé et remarques



Fig. 73 : Chaine de capteurs développée et installée au sein des parois en paille.

Dans toutes les parois analysées, une chaîne de capteurs spécifiques aux parois en paille a été développée. Les capteurs utilisés dans la thèse d'A. Evrard⁵ ont été mis en série (SENSIRION SHT75) et l'acquisition des mesures est centralisée sur un CAMPBELL CR1000 qui permet aussi d'enregistrer les mesures provenant des autres capteurs d'ambiance. L'ensemble des données (sauf celles de Uccle) sont envoyées sur un serveur hébergé à Gembloux et sont disponibles via Internet (accès restreint par mot de passe).



Fig. 74a: Station météo et acquisition des mesures à Tongrinne, avant les enduits extérieurs.



Fig. 74b: Mesure de l'ensoleillement vertical à Uccle.

5. Evrard A. *Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials*, prom. : De Herde, André, 2008-05-21. <http://hdl.handle.net/2078.1/19675>.

A Franière, le CO₂ est mesuré avec un capteur Gascard NG (max 3 000 ppmv) et la détection de la présence d'occupants est complétée par une webcam classique.

Pour la mesure de la pluie battante à Tongrinne, un équipement spécial a été construit (en Corian). Le rayonnement global est mesuré (à Uccle et à Tongrinne) dans le plan de la façade par un capteur classique.

Il faut remarquer que dans les paragraphes qui suivent, les graphiques présentent des périodes où il n'y a pas de valeur. Elles sont dues à des coupures de l'alimentation ou d'autres problèmes techniques. Pour les simulations, il a fallu faire en sorte que les valeurs utilisées soient les plus représentatives possibles de la réalité et certaines hypothèses ont donc dû être définies. Par soucis de clarté et pour rester synthétique, seuls les points de mesures les plus significatifs sont présentés.

Température

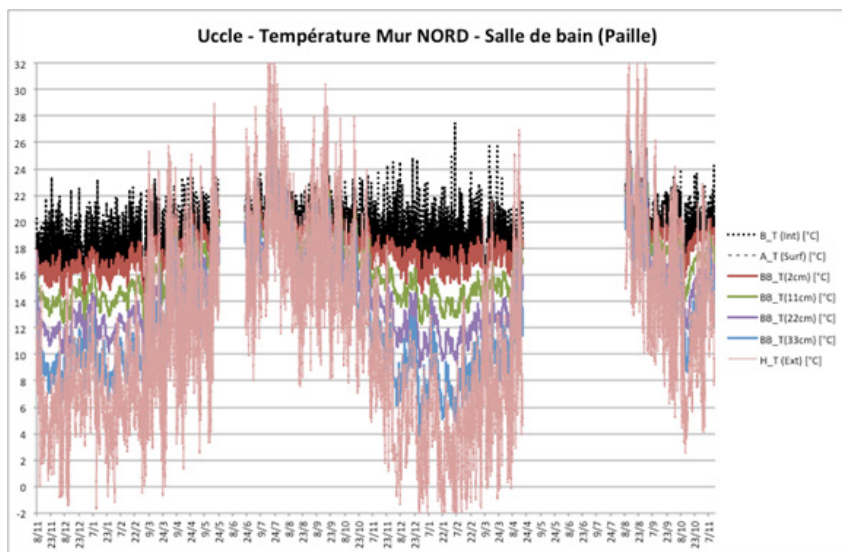


Fig. 75 : Température dans le mur nord à Uccle.

A Uccle, de novembre 2013 à novembre 2015, la température au nord a varié entre 0 °C et parfois 30 °C, et entre 18 et 22 °C presque toute l'année

dans la salle de bain. Dans la paroi, la température sous le panneau contreventant, du côté extérieur, est la plus basse et descend, en hiver, jusqu'à moins de 8°. La température de surface et des premiers centimètres, du côté intérieur, sont proches de la température intérieure, ce qui favorise un excellent niveau de confort puisque la température de confort est la moyenne entre la température de l'air intérieur et la température de surface. La chambre a une température intérieure légèrement plus faible, mais les occupants sont très satisfaits du niveau de confort atteint dans celle-ci.

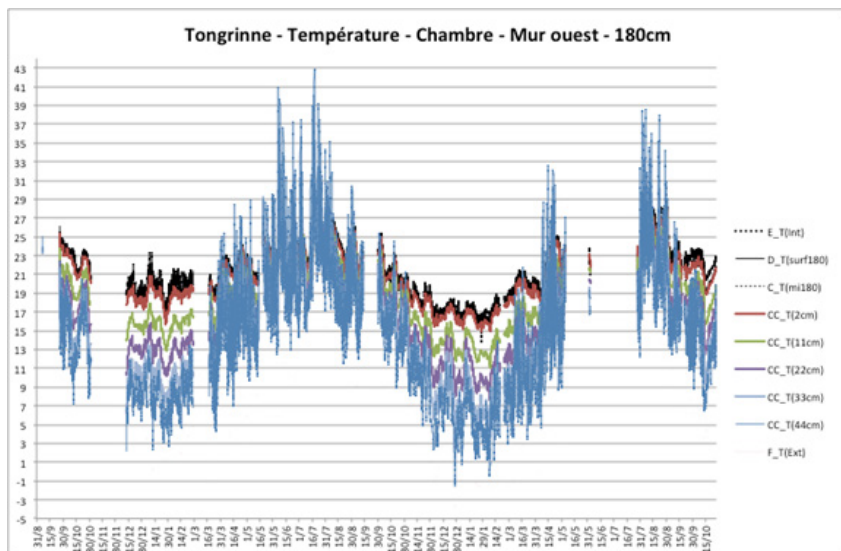


Fig. 76 : Température dans le mur ouest à Tongrinne..

A Tongrinne, de septembre 2013 à octobre 2015, la température à l'ouest a varié entre 0 °C et parfois 40 °C. La courbe de la température extérieure n'est pas reprise sur l'illustration pour la lisibilité des autres points de mesure. La température intérieure monte jusqu'à 25 °C et descend à 16 °C en hiver, dans la chambre (à une hauteur de 180 cm). Dans la paroi, la température sous le panneau contreventant est la plus basse et descend, en hiver, jusqu'à moins de 8 °C. La température de surface et des premiers centimètres, du côté intérieur, restent proches de la température intérieure, ce qui favorise, encore une fois, un excellent niveau de confort.

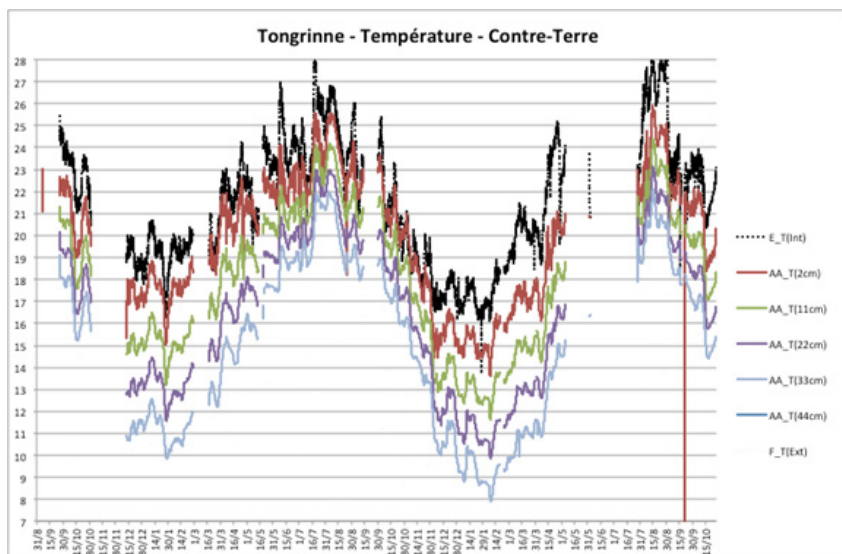


Fig. 77 : Température dans le mur contre terre à Tongrinne.

A Tongrinne, de septembre 2013 à octobre 2015, la température dans le mur contre terre semble ne pas descendre en-dessous de 8 °C. On remarque toutefois que le capteur sous le panneau contreventant n'envoie plus de signal et c'est à cet endroit que la température devrait être la moins élevée⁶.

6. Il faut faire remarquer que la température intérieure illustrée sur le graphique est celle de la chambre, à l'ouest, et pas celle du hall d'entrée où ce mur est situé. La température dans le sol, quant à elle, n'a pas été mesurée.

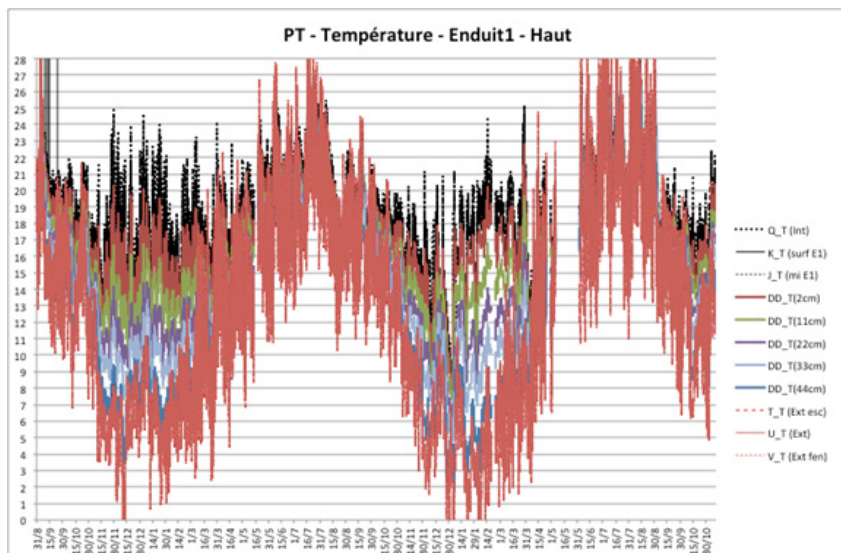


Fig. 78 : Température dans le mur ouest à Franière..

A Franière, de août 2013 à novembre 2015, la température dans le hall de production varie légèrement moins que la température extérieure des autres sites. La température intérieure dans le bureau analysé monte rarement au dessus de 25 °C, et descend parfois à moins de 10 °C en hiver. Rappelons qu'il n'y a pas de réel système de chauffage et que la principale source de chauffage est un spot halogène de 500 W. Sous le panneau contreventant (où il y aura une humidité plus élevée), la température se répartit et descend, en hiver et pendant plusieurs mois, sous 8 °C. La température de surface et les premiers centimètres, du côté intérieur, restent proches de la température intérieure. Étant donné les températures parfois assez basses à l'intérieur, le niveau de confort standard n'est ici pas garanti pendant la journée en hiver.

Humidité relative

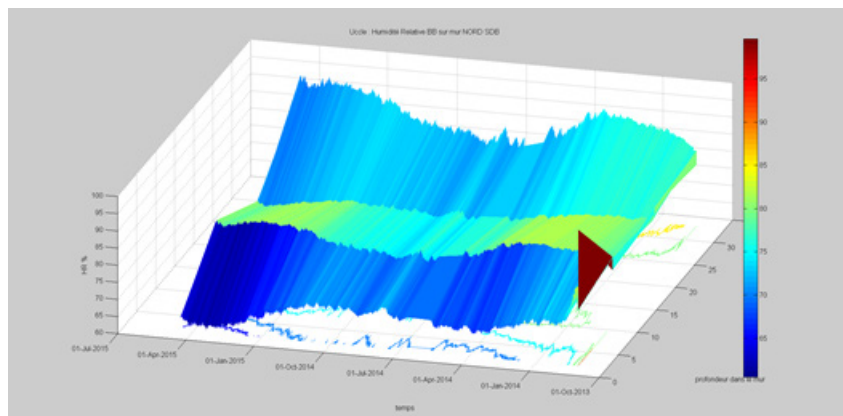


Fig. 79 : Répartition de l'humidité relative dans la salle de bain au nord à Uccle.

Sur le schéma ci-dessus, on observe que dans la salle de bain du mur nord à Uccle, de novembre 2013 à novembre 2015 (date de droite à gauche), la position la plus humide de la paroi se situe vers l'extérieur, sous le panneau contreventant (capteur à 33 cm de la face intérieure du mur à Uccle). Ce sera aussi le cas dans tous les murs qui ont fait l'objet de mesures.

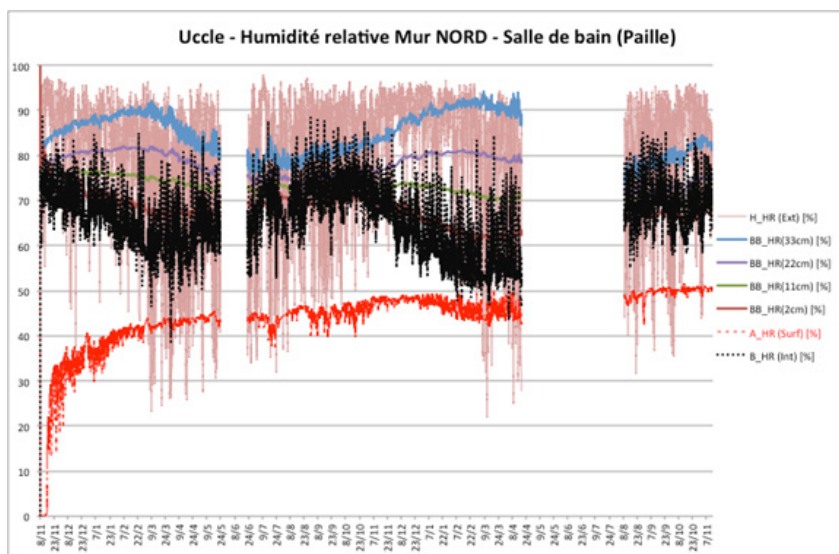


Fig. 80 : Humidité relative dans la salle de bain au nord à Uccle..

L'illustration ci-dessus montre que, sous le panneau contreventant, du côté extérieur, l'humidité relative monte, en hiver, jusqu'à des valeurs proches (voire «supérieures à») 90 %. A cet endroit, on atteint donc les valeurs limites pour la durabilité dans le temps de la paille (voir les chapitres précédents). Dans la zone technique, une humidité proche de 90 % est aussi observée pendant quelques heures par an. Néanmoins, dans le sous-chapitre suivant, «Simulation et analyses», on considérera que cette situation n'est pas critique (les températures sont faibles lorsque l'humidité relative est élevée). La paroi au nord devrait toutefois faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir. Dans la salle de bain, l'humidité relative intérieure descend rarement à moins de 50 %⁷. Renforcer la ventilation de la salle de bain pourrait avoir un effet positif sur les équilibres hygrothermiques de ce mur. Les capteurs du mur au sud et du toit atteignent tous une humidité relative nettement moins élevée (max. 80 %), ce qui garantira leur durabilité dans le temps.

7. La courbe en rouge (surface intérieure) est vraisemblablement due à un capteur défectueux et n'a pas été considérée ici.

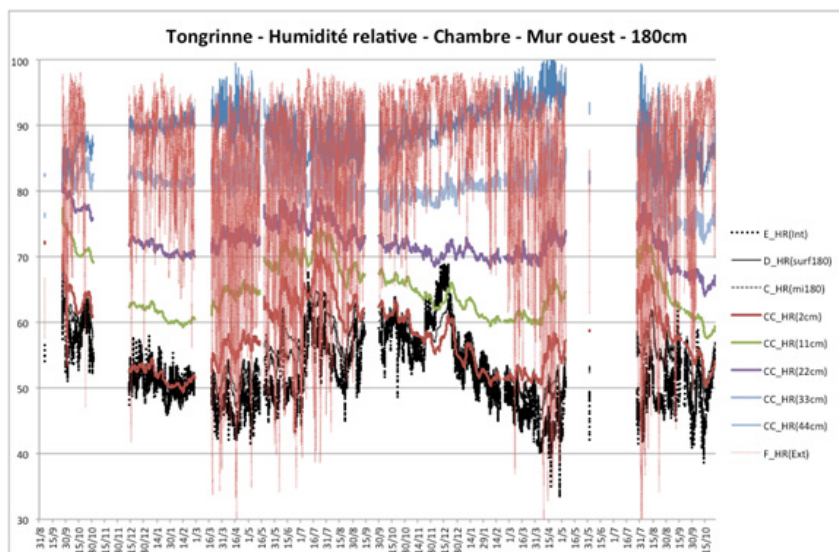


Fig. 81 : Humidité relative du mur ouest à Tongrinne.

A Tongrinne, de septembre 2013 à octobre 2015, l'humidité relative extérieure, à l'ouest, a varié entre 40 % et 95 %. L'humidité relative sous le panneau contreventant (à une hauteur de 180 cm) ne descend jamais en-dessous de 80 % et elle est parfois montée à plus de 95 %. A cet endroit, on serait donc dans des conditions critiques pour la durabilité dans le temps de la paille (voir les chapitres précédents). Ces niveaux élevés semblent être liés à une fuite de l'étanchéité à l'eau au niveau de l'appui de fenêtre (à 1,5 m du point de mesure). Après avoir observé que la zone semblait reprendre un comportement normal peu de temps après que le problème ait été réglé (nouveau joint de silicone à l'endroit de l'infiltration). Cette situation semble donc accidentelle, mais le mur devrait faire l'objet d'une attention particulière dans les années à venir. A l'intérieur, l'humidité a assez peu varié (de 40 à 70 % environ dans la chambre) et est donc resté dans la gamme de valeurs nécessaires à un bon confort de ce point de vue.

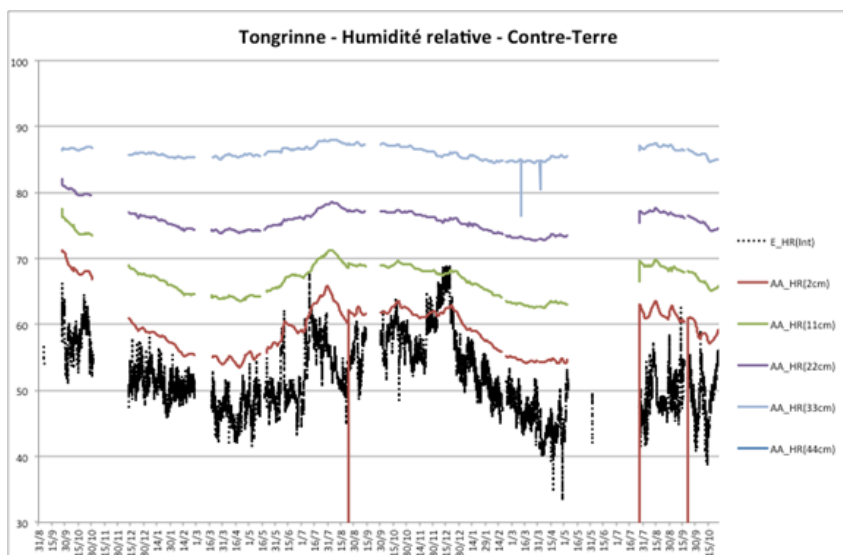


Fig. 82 : Humidité relative dans le mur contre terre à Tongrinne.

A Tongrinne, de septembre 2013 à octobre 2015, l'humidité relative dans le mur contre terre, est constamment entre 83 % et 87 % à 11 cm de la surface extérieure⁸. Étant donné que le capteur sous le panneau contreventant n'envoie plus de signal, on peut considérer que les premiers centimètres sous le panneau contreventant sont dans une situation critique. Ce constat sera discuté dans le sous-chapitre suivant, « Simulation et analyses ».

8. L'humidité relative intérieure illustrée sur le graphique est celle de la chambre, à l'ouest, et pas celle du hall d'entrée où ce mur est situé. L'humidité relative dans le sol n'a pas été mesurée. Elle est vraisemblablement proche de la saturation toute l'année.

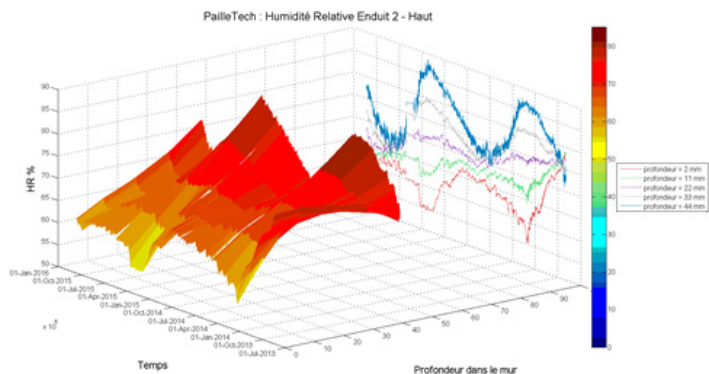


Fig. 83 : Humidité relative à l'ouest à Franière (enduit 2).

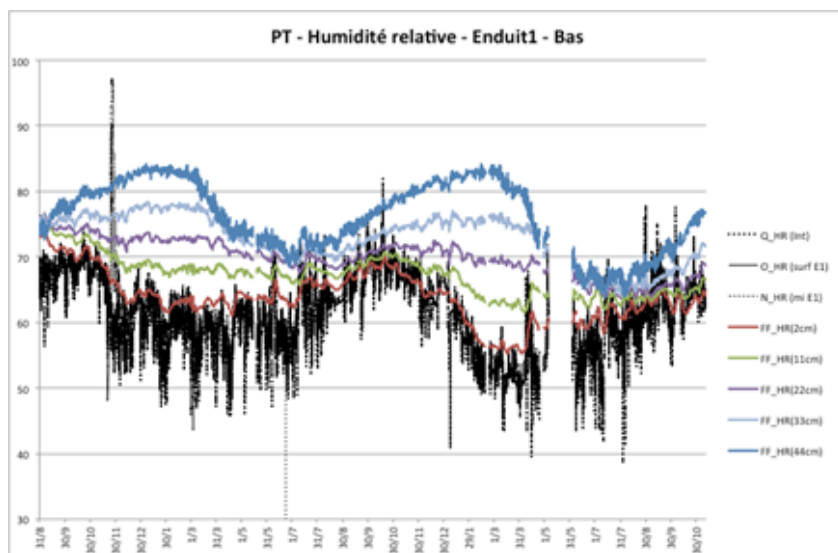


Fig. 84 : Humidité relative sous panneau contreventant à l'ouest à Franière (enduit 1).

À Franière, de août 2013 à novembre 2015, l'humidité relative sous panneau contreventant à l'ouest (le mur est protégé, dans le hall de production) est toujours resté inférieure à 85 % pour l'enduit 1 et à 80 % pour l'enduit 2, ce qui confirme qu'en situation normale l'utilisation d'un bardage protège de la pluie (sans introduire de couche étanche à la vapeur), et permet ainsi

d'obtenir, dans ces conditions, un mur parfaitement valide du point de vue de son comportement à longs termes. A l'intérieur, l'humidité a peu varié (de 40 à 70 % environ) et est resté dans la gamme de valeurs nécessaires à un bon confort de ce point de vue (rappelons que la température à Franière est, elle, souvent trop basse pendant la journée en hiver).

Autres mesures

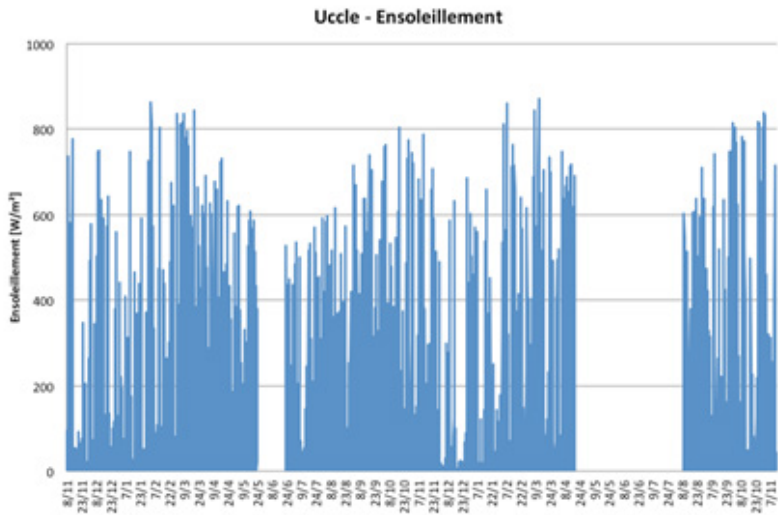


Fig. 85 : Ensoleillement au sud à Uccle.

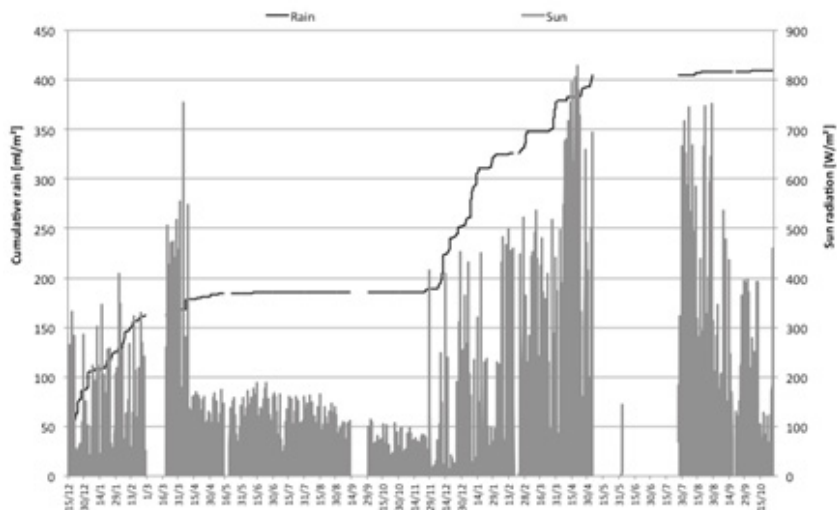


Fig. 86 : Ensoleillement et pluie battante à l'ouest à Tongrinne.

A Uccle, l'ensoleillement au sud ne dépasse pas 850 W/m^2 .

A Tongrinne, la mesure de l'ensoleillement et de la pluie battante à l'ouest a été perturbée par le déplacement du mat de mesure (station météo) et par plusieurs interruptions de l'alimentation électrique.

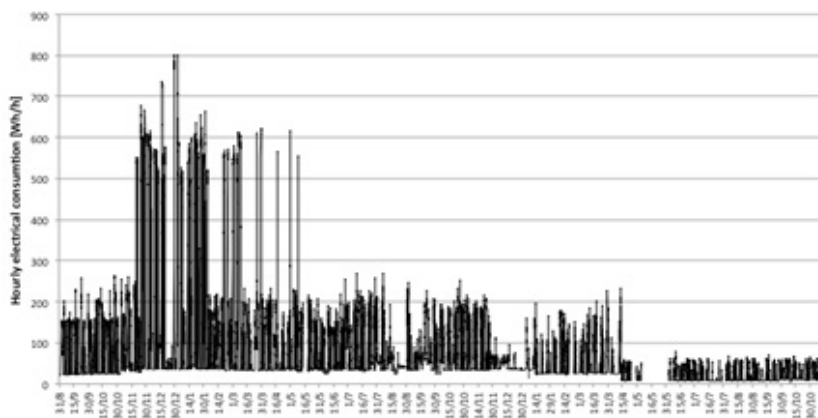


Fig. 87 : Consommation électrique à Franière.

A Franière, l'évolution de la consommation électrique du bureau qui a fait l'objet de mesures permet d'observer qu'un spot halogène de 500 W (principal source de chauffage du local) a été allumé entre le 15 novembre et le 15 mai 2013 (première année de mesure). Il a vraisemblablement été connecté sur une autre prise l'hiver suivant (2014). Depuis avril 2015, seul l'ordinateur est connecté sur cette prise.

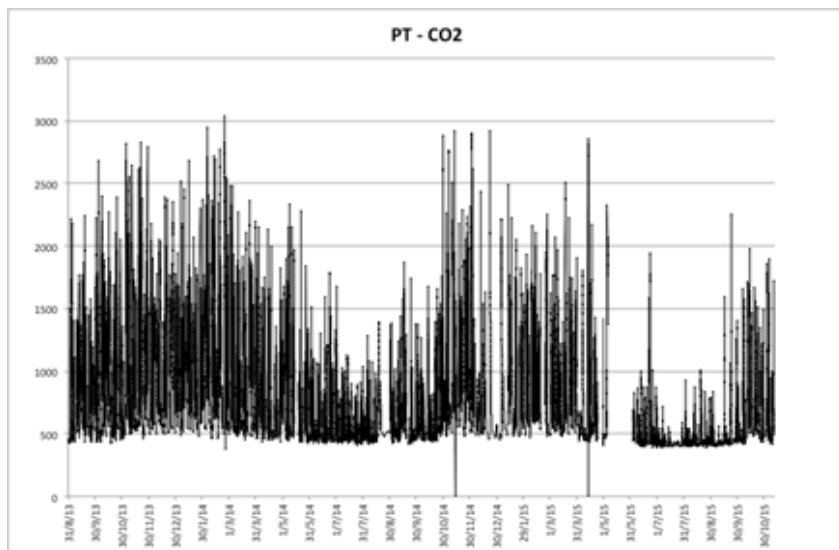


Fig. 88 : Concentration en CO₂ à Franière.

A Franière, la concentration en CO₂ a fréquemment atteint des valeurs largement supérieures à 1 000 ppmv. La fenêtre oscillo-battante (disposant de capteur d'ouverture) n'a pour ainsi dire jamais été ouverte et la ventilation était dès lors limitée aux infiltrations naturelles vers l'atelier et aux flux d'air entre les deux bureaux à cet étage. Rappelons que la porte entre ces deux bureaux n'a pas été installée (le grand bureau est ventilé par l'ouverture de la porte qui donne dans l'atelier).

SIMULATIONS ET ANALYSES

Simulations WUFI Pro

Heat Balance

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_c \nabla \cdot (\delta_f \nabla (p_{sat}))$$

Moisture Balance

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_v \nabla \phi + \delta_f \nabla (p_{sat}))$$

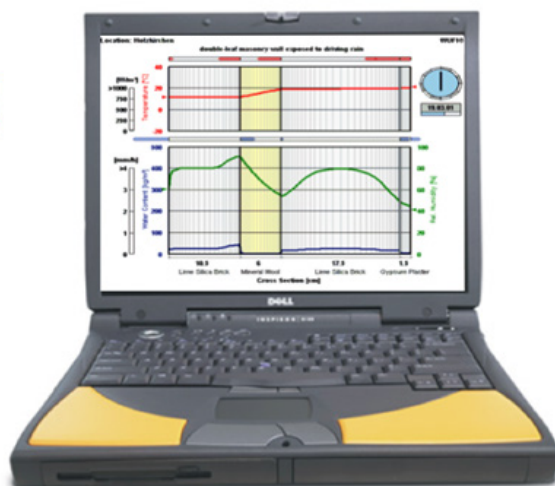


Fig. 89 : Modèle et interface film du logiciel WUFI Pro (source : Fraunhofer IBP).

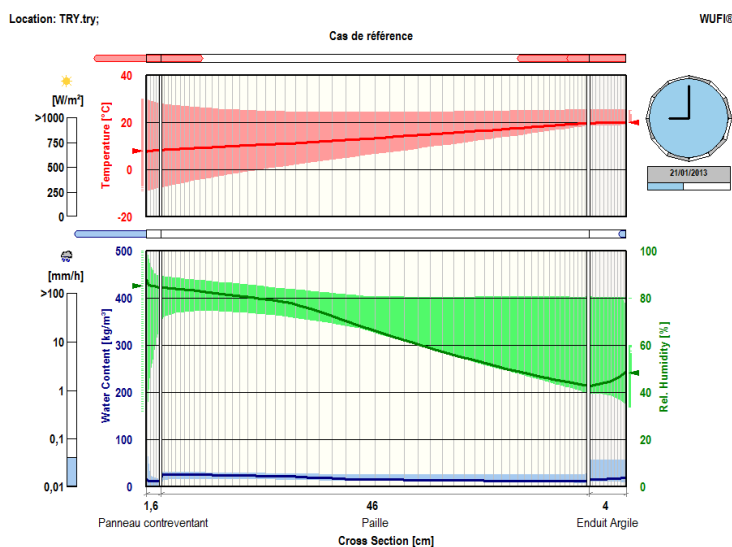


Fig. 90 : Visualisation dynamique des résultats du logiciel WUFI Pro

Les mesures réalisées, sur les trois sites, dans l'épaisseur du mur, par les chaînes de capteurs, ont été comparées à des simulations reproduisant au mieux les conditions de la mesure grâce au logiciel WUFI Pro. Seuls les résultats de quelques unes d'entre-elles sont illustrées ici, mais les principaux éléments de l'analyse sont présentés dans le texte.

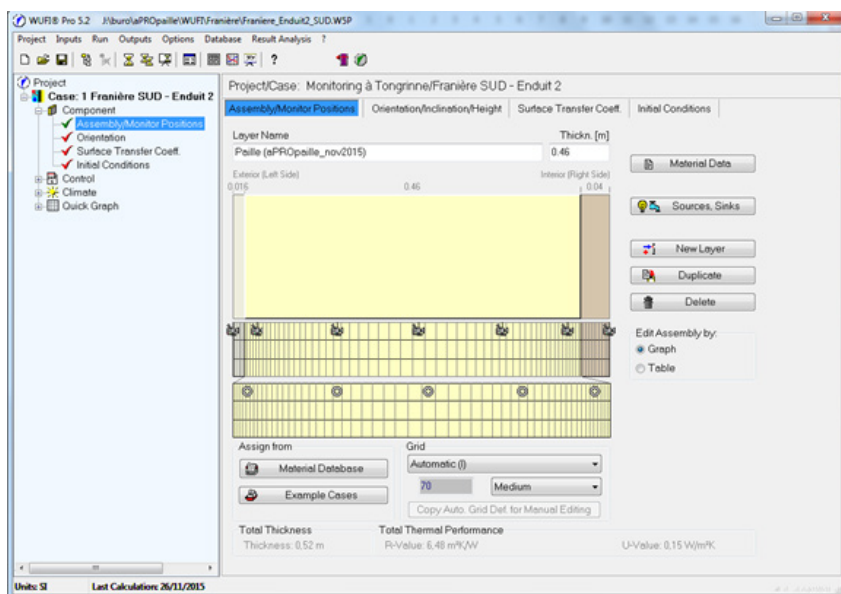


Fig. 91 : Modélisation du mur sud à Franière (source : WUFI 5.2 Pro).

Comme le montre la figure 91, les murs sont définis en caractérisant chacune de leurs couches et des « moniteurs » sont placés aux positions correspondantes à celles des capteurs installés. Pour rappel, à Franière, les murs sont couverts d'un bardage à l'extérieur (pas considérés dans la simulation), d'un panneau Agepan, d'une épaisseur de 46 cm de paille (insérée dans une ossature en bois), suivis de 4 cm d'enduit de terre. La température et l'humidité relative des climats intérieur et extérieur issues des mesures ont été utilisées dans les simulations. Pour les trois sites de mesure, les périodes où aucune valeur n'est disponible pour la température et l'humidité relative ont été comblées par une évolution linéaire entre les deux bornes de celles-ci. A Tongrinne, où les mesures d'ensoleillement et la pluie battante n'étaient pas représentatives, les données correspondantes

au climat typique en Belgique (TRY à Uccle) ont été utilisées dans les simulations. A Uccle, les valeurs obtenues par la mesure de l'ensoleillement ont été utilisées sans remplacer les valeurs manquantes. De plus, les pluies battantes du climat typique (TRY à Uccle) ont été utilisées car elles n'ont pas été mesurées sur ce site. Dans tous les cas, les conditions initiales des simulations sont de 20 °C et de 80 % à travers toute la paroi. Il est à noter qu'une humidité relative de 80 % correspondant à une teneur en eau de près de 15 kg/m³ pour la paille.

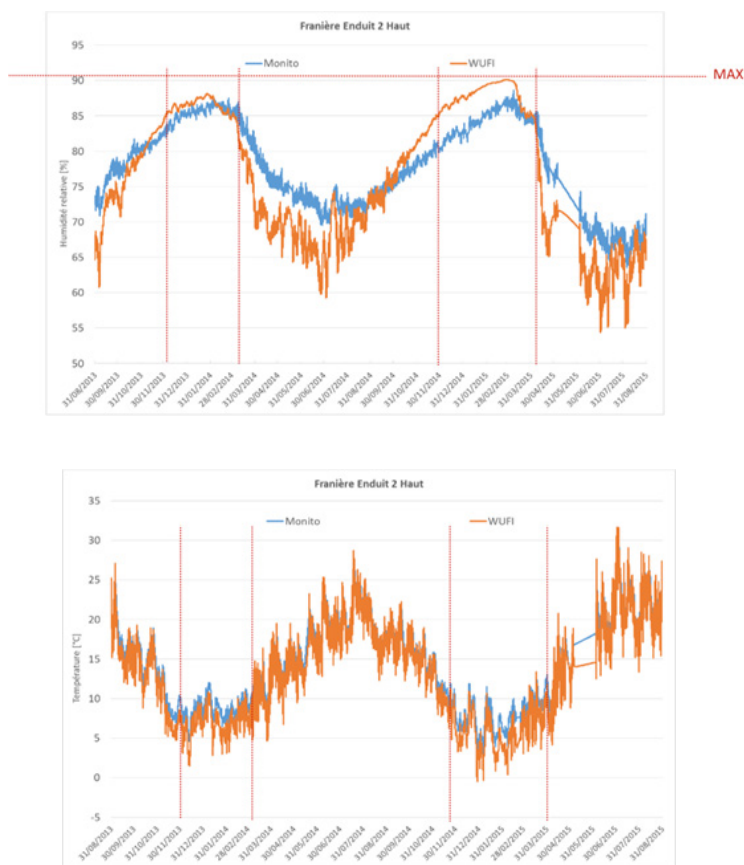


Fig. 92 : Comparaison de la mesure aux simulations sous le panneau contreventant à Franière pour l'humidité et la température (mur au sud).

A Franière, où le mur n'est pas exposé à la pluie (et au soleil) la simulation permet d'obtenir des résultats très proches de la réalité pour la température. Pour l'humidité relative, on observe qu'à la position la plus critique du point de vue de l'humidité, la simulation donne des résultats dont l'écart avec la mesure est en général de maximum 5 %. L'écart est encore plus faible pour les autres positions dans ce mur. De plus, la valeur maximale est atteinte au même moment, et la valeur simulée est légèrement plus élevée que la mesure, ce qui permet d'affirmer que dans des cas équivalents, le logiciel donne des résultats qui sont du côté de la sécurité. On peut considérer que les murs à Franière sont valides et, par extension, que ce sera souvent le cas quand la paroi est couverte d'un bardage.

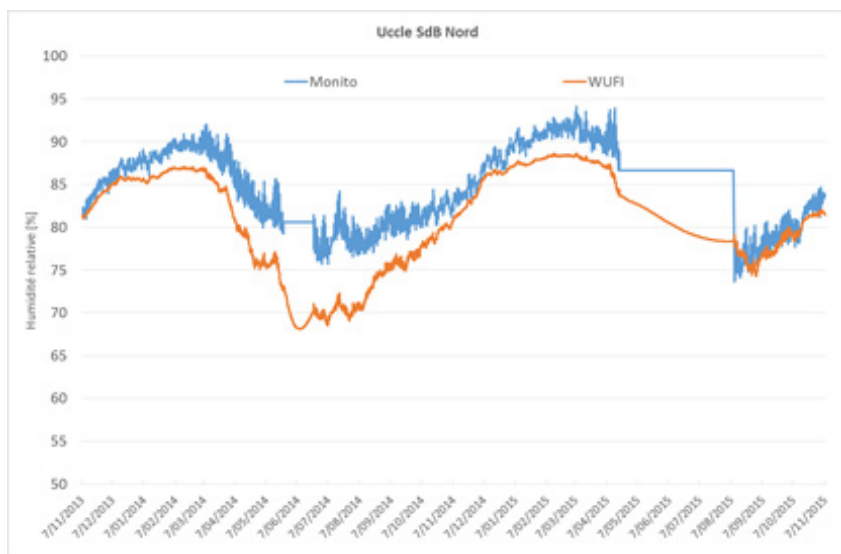


Fig. 93 : Comparaison de la mesure aux simulations sous le panneau contreventant du mur nord à Uccle

Sur les deux autres sites par contre, des écarts plus importants entre le résultat des simulations et des mesures ont parfois été observés. Pour certains points de mesure, l'humidité mesurée sous le panneau contreventant (la position critique définie dans les chapitres précédents) est plus élevée que celle que fournit la simulation. Quand le mur est recouvert d'un enduit est qu'il est dès lors exposé à l'absorption de l'eau de pluie, le logiciel ne donne pas toujours des résultats du côté de la sécurité. Cela

est principalement dû aux incertitudes sur les données utilisées dans la simulation (climats et matériaux). Une étude sur ces incertitudes a montré que la simulation peut s'avérer très sensible à la valeur du coefficient d'absorption du matériau de la paroi exposée. Il faut dès lors être prudent dans ce type de configuration, pour ne pas émettre de fausses interprétations si seuls des résultats de simulations sont disponibles.

La figure 93 illustre bien ce résultat important. A Uccle, l'humidité relative mesurée dans la salle de bain, au nord, est plus élevée que ce que prédit la simulation. Le système d'enduit extérieur a été modélisé sur base des valeurs disponibles pour ces matériaux. L'épaisseur d'air équivalente (Sd) du complexe est alors considéré comme étant de 30 cm. A défaut de valeur précise pour l'absorption d'eau de pluie, l'enduit extérieur est considéré comme étant parfaitement hydrofuge dans les simulations. Ces hypothèses expliquent certainement en partie la différence observée entre les résultats des simulations et des mesures. Il faut néanmoins faire remarquer que le mur étant orienté vers le nord, il ne subit que peu les pluies battantes, et les différences entre mesures et simulations sont vraisemblablement plus liées à la modélisation des transferts de vapeur et de la redistribution de l'eau liquide, qu'à celle de l'absorption d'eau à la surface extérieure.

Cette situation ne semble toutefois pas critique puisque les valeurs mesurées ne dépassent le seuil critique de 91,4 % que pendant quelques semaines à la fin du deuxième hiver. Cette situation n'est peut-être que passagère. De plus, durant ces mêmes semaines, les températures sont faibles à cet endroit (moins de 10 °C) et la dégradation organique de la paille dans ces conditions est vraisemblablement négligeable (voir chapitre précédent). L'idéal serait toutefois de suivre le comportement de ce mur dans les années à venir.

Les autres parois à Uccle (mur au sud et toit) ont une humidité relative qui ne dépasse que rarement 80% aux endroits les plus humides (mesures et simulations) et peuvent donc être validées après 2 ans de mesure.

A Tongrinne, le système d'enduit extérieur hydrofugé a été modélisé en utilisant la densité, la conductivité thermique et la résistance à la diffusion de vapeur fournies par les fabricants. La résistance à la diffusion de vapeur a été fixée à $\mu = 500$, ce qui correspond à la valeur Sd annoncée par

le fabricant comme étant supérieure à 0,5 m. Les autres paramètres de ces enduits correspondent au matériau « Cement Plaster » (enduit au ciment) de la base de données WUFI, sauf pour l'absorption d'eau liquide, qui est fixée à $A = 0,0017 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ pour les enduits et à $0,0083 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ pour les panneaux support d'enduit (classe W2 annoncée par le fabricant). Le résultat des simulations n'annonce pas de situation problématique à longs termes. Il semble toutefois intéressant de faire remarquer que les variations journalières de température et d'humidité sont d'une amplitude plus faible que celles qui ont été mesurées. A nouveau, ceci est vraisemblablement dû à l'incertitude relative qui existe sur les paramètres hygrothermique des différentes couches du système d'enduit extérieur ou sur les données climatiques. Rappelons qu'une fuite accidentelle s'est produite proche des capteurs (1 m 50). La différence observée entre les résultats de la mesure et de la simulation n'apporte donc pas d'information utile. Comme annoncé précédemment, l'humidité relativement élevée mesurée dans cette zone après la fuite semble s'être résorber dans les mois qui ont suivi, mais on peut conseiller que le mur fasse l'objet d'une attention particulière dans les années à venir.

Pour simuler le comportement du mur contre terre, le climat extérieur (dans la terre) a été approximé par une variation sinusoïdale de la température : moyenne 15°C et amplitude 3°C , avec un maximum au 1er août et une fréquence annuelle. Une humidité relative constante de 99 % a été choisie. Aucune absorption d'eau n'est modélisée et une couche très étanche à la vapeur est encodée ($S_d = 1\,500 \text{ m}$). Les simulations font apparaître des niveaux d'humidité quasi constant à travers le composant. Sous le panneau contreventant, l'humidité relative atteint une valeur de 90 %, presque toute l'année. On observe même une très légère augmentation la deuxième année. Suite aux mesures et aux simulations, on peut considérer que les 5 premiers centimètres sous le panneau contreventant sont dans une situation critique toute l'année et une certaine décomposition de la paille semble inévitable. La conception du mur ne semble donc pas appropriée pour réaliser un mur contre terre. Un prélèvement de la paille derrière le panneau contreventant devrait être réalisé à moyens termes.

Simulations WUFI Bio

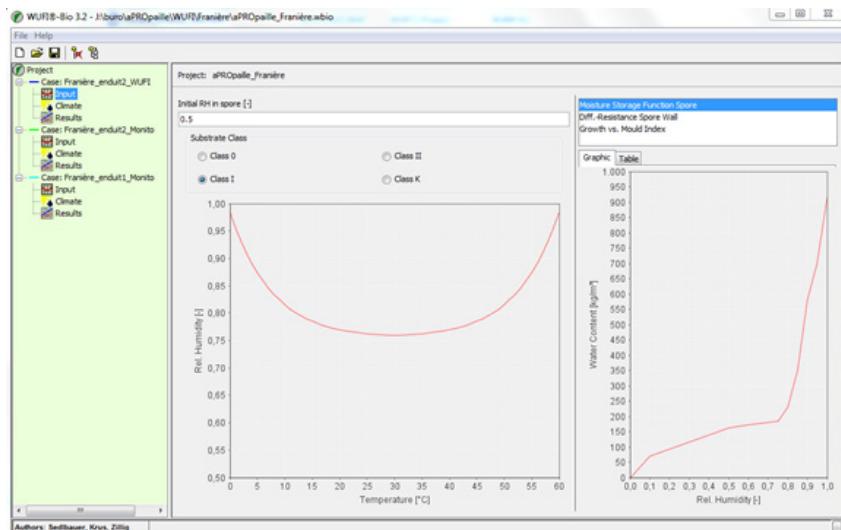


Fig. 94 : Modèle de développement des spores (source : WUFI Bio 3.2).

Dans les chapitres précédents, on a analysé et validé des parois sur base du taux de dégradation de la matière végétale (la paille) dans certaines conditions d'humidité et de température. Dans ce paragraphe, on présente une autre méthode, plus complète, mais aussi plus sévère. Cette autre méthode utilise le logiciel WUFI Bio. Ce modèle a été initialement développé pour évaluer les risques de développement de moisissures en surface alors qu'il est utilisé ici pour analyser les risques au sein de la paroi (sous le panneau contreventant). Son grand avantage est de coupler automatiquement les résultats de température et d'humidité obtenu par WUFI Pro et, à partir d'un modèle de développement de spores types (qui ont besoin de certaines conditions d'humidité et de température pendant un certain temps pour ce développer), le logiciel donne le nombre de centimètres de croissance des spores pendant une année. Si la croissance est supérieure à 50 mm/an le logiciel annonce un risque (feu orange), et si elle est supérieure à 200 mm/an, le mur ne devrait pas être construit (feu rouge). Le modèle de développement du spore, ainsi que les limites de croissance annuelle de celui-ci, pourraient être adaptés pour mieux correspondre à ce qui se produit au cœur de la paroi (disponibilité en oxygène pour la croissance

du spore plus réduite qu'en surface, type de microorganisme présent dans la paille). Le modèle pourrait aussi être utilisé pour calculer un pourcentage de dégradation de la matière organique. Ces deux propositions devraient faire l'objet de recherches complémentaires pour faire avancer les connaissances du comportement des parois en matériau bio-sourcés et améliorer l'évaluation de leur validité à longs termes.

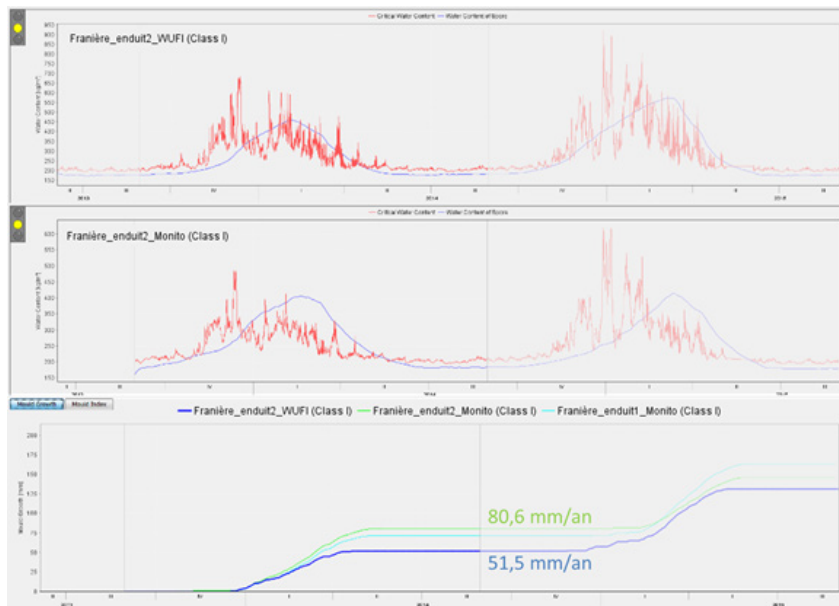


Fig. 95 : Résultats WUFI Bio pour le mur sud à Franière.

Sur la figure 95, on peut voir que le mur sud à Franière (avec bardage), qui a été validé avec l'autre méthode, se retrouve ici dans la zone « à risque » (feu orange). Les résultats de la simulation WUFI sont donc ici plus favorables avec cette méthode (de l'ordre de 50 mm/an pour la simulation et de 80 mm/an pour les mesures), comme cela avait été observé avec l'autre méthode pour le mur nord de la salle-de-bain à Uccle et pour le mur ouest dans la chambre à Tongrinne. Ces deux murs, pour lesquels il a été recommandé qu'ils fassent l'objet d'une attention particulière dans les années à venir, atteignent d'ailleurs avec cette méthode des valeurs d'exclusion (feu rouge). Cette méthode semble trop sévère et n'est pas plus réaliste que la précédente. Des recherches pour

adapter le modèle utilisé par WUFI Bio à l'usage qui en est fait ici seraient utiles pour affiner les critères de validité des murs de paille.

Simulations WUFI Plus

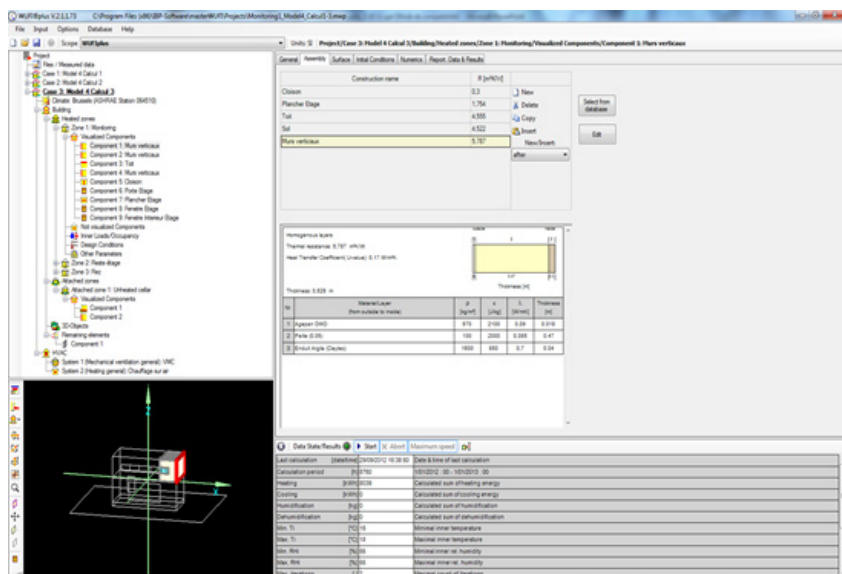


Fig. 96 : Modélisation du bâtiment à Franière (source : WUFI Plus 2.5.1).

WUFI Plus est un logiciel plus complexe que WUFI Pro. En effet, il demande d'encoder, en plus de chaque paroi (couche par couche, comme dans WUFI Pro) et du climat extérieur d'un bâtiment, l'ensemble des conditions d'occupation (production de chaleur, d'humidité et de CO_2 liés à la présence d'occupant), ainsi que le type de ventilation (naturelle, mécanique ou hybride) et l'ensemble des systèmes installés (équipements électriques et régulation HVAC). De plus, s'il faut définir les conditions aux limites et l'étanchéité à l'air entre l'intérieur et l'extérieur, il faut aussi décider la manière dont les locaux (zones thermiques) sont interconnectés entre eux. A moins de connaître précisément l'ensemble de ces paramètres pour le cas étudié, un grand nombre d'hypothèse doit donc être défini pour réaliser une simulation.

Les données utilisées dans les simulations (parois, occupation et systèmes) sont décrites dans le chapitre précédent « Confort d'un local ». Parmi les

12 cas analysés, la réalité (parois en paille) correspond à un cas intermédiaire entre le cas S-1 (pas de système de ventilation, ni de chauffage) et le cas S-2 (pas de système de ventilation, un chauffage électrique de 1 kW dans le local étudié). Un cas complémentaire a donc été défini en utilisant les données issues de la première année de mesure : d'une part les valeurs issues de la mesure de la puissance électrique et d'autre part les données mesurées pour la température et l'humidité relative extérieures (dans ce cas le mur n'est pas soumis au rayonnement solaire ou à la pluie).

Au niveau de l'occupation, on a considéré qu'une personne était présente dans le bureau de 9 h à 18 h durant la semaine, avec une pause de 13 h à 14 h. Aucun autre apport interne n'a été considéré puisqu'ils sont globalisés dans la puissance électrique mesurée, encodée pour modéliser le chauffage.

Aucun système de ventilation n'a été modélisé, puisqu'aucun système n'est installé. On a toutefois considéré une ventilation naturelle (par l'ouverture des portes) de 1 vol/h de 9 h à 10 h et de 13 h à 14 h. Cette hypothèse est très approximative puisque la porte du local monitoré n'a jamais été installée (il existe donc une ventilation entre locaux impossible à déterminer). De plus, un taux d'infiltration de 0.024 vol/h a été considéré, tel qu'il serait obtenu avec une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de 2 Pa et un niveau d'étanchéité à l'air de $n_{50} = 0,6$ vol/h (qui est le niveau imposé par le label «passif», mais qui n'a jamais été mesuré ici).

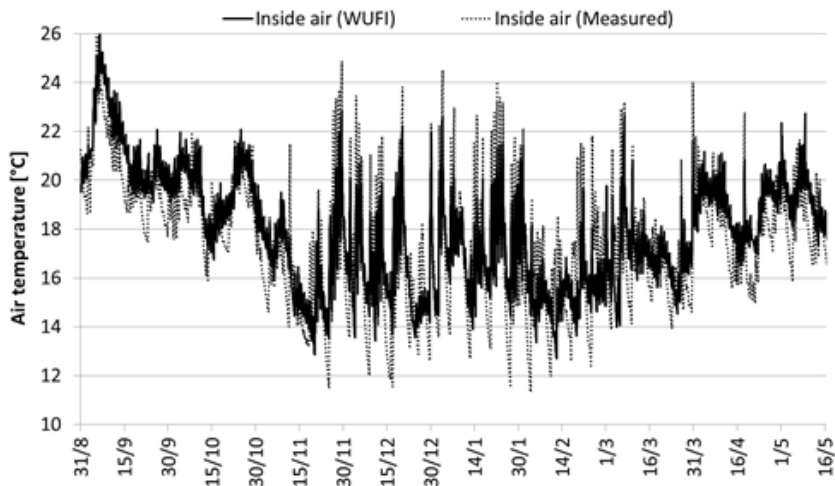


Fig. 97 : Température de l'air intérieur mesuré et simulé à Franière.

La figure 97 montre que la température intérieure résultante de la simulation suit la même tendance que les valeurs mesurées. La température maximale atteinte chaque jour est similaire dans les deux cas, mais les minimums de la mesure (après chaque week-end) sont supérieurs à ceux issus de la simulation. Comme on l'a constaté aux paragraphes précédents, la température intérieure est souvent trop basse en hiver et un système de chauffage devrait être installé pour atteindre des températures plus confortables.

S'il n'y avait pas autant d'inconnues sur la ventilation réelle du local (niveau d'infiltration, ventilation entre locaux), le niveau de CO_2 mesuré dans l'ambiance intérieure aurait pu être utilisé dans les simulations pour définir l'occupation. La concentration maximale en CO_2 obtenue par simulation (avec l'occupation théorique définie ci-dessus) est autour de 3 700 ppmv, ce qui est encore plus élevé que ce qui a été mesuré (3 000 ppmv). Rappelons que la norme belge NBN EN 1377-2007 demande de limiter la concentration à un maximum de 1 000 ppmv et un système de ventilation permettant d'y arriver devrait être installé.

Les différences observées ici entre les mesures et les résultats des simulations sont vraisemblablement dues aux nombreuses hypothèses prises pour réaliser la simulation. Quand un niveau d'infiltration supérieur

du local est introduit dans la simulation, la température intérieure qui en résulte est plus proche de celle qui a été mesurée. Il en est de même pour la concentration en CO₂. Ce travail de calibration n'apporte pas d'informations significatives dans ce cas. En effet, il ne serait intéressant d'affiner l'encodage de la simulation que si la paroi étudiée semblait avoir un comportement à risque, ce qui n'est pas le cas ici.

CONCLUSION

En se basant sur les critères de validité énoncés aux chapitres précédents, on n'a observé qu'un seul mur préoccupant du point de vue de son comportement hygrothermique à longs termes. Il s'agit du mur contre terre à Tongrinne dont la conception n'est pas à recommander (il ne devait pas être un mur contre terre à l'origine du projet). On a aussi identifié deux murs dont le comportement n'est pas très préoccupant, mais qui devrait être surveillé dans les années à venir : le mur au nord dans la salle-de-bain à Uccle et le mur à l'ouest dans la chambre à Tongrinne.

Les autres murs et particulièrement ceux à l'abri de la pluie ou couvert d'un bardage ont un comportement très intéressant et les risques de dégradations à longs termes sont négligeables pour les cas étudiés.

Dans tous les cas, les écarts entre les simulations et les mesures sont d'abord dus à des incertitudes sur les données à introduire dans les simulations (paramètres des matériaux, données climatiques, occupation, taux de ventilation, utilisation des systèmes installés). S'il est fréquent de devoir faire certaines hypothèses pour réaliser ce type de simulations, on a montré qu'il est souvent aussi nécessaire de faire des hypothèses pour interpréter les résultats de mesure (coupure électrique, fuite d'eau, capteurs défectueux).

Ce chapitre présente les résultats d'un monitoring de trois bâtiments en paille. Il illustre une méthodologie d'analyse des parois en paille construites dans ceux-ci. Il évalue la validité des murs sur base des critères énoncés aux chapitres précédents et montre comment interpréter ce type de résultats. Les résultats montrent qu'on peut construire des parois performantes en paille et qu'ils existent des outils pour évaluer leur comportement à longs termes.

Malgré les tendances générales qui ressortent de cette analyse et les principes de conception à favoriser qui en découlent, il n'est pas

possible de donner des garanties sur le comportement de toutes les parois qui pourraient être conçues. Si le concepteur est dans les conditions où un risque peut être rencontré, il est fortement conseillé de réaliser des simulations de validation. S'il existe trop d'inconnues sur les données à introduire dans le logiciel, une série de mesure devraient être envisagées pour compléter les informations. Ces opérations ont un coût qui doit être mis en balance avec les risques et l'investissement. Par sécurité, si une validation ne peut être garantie en suivant la méthodologie proposée, il est conseillé d'adapter la conception du projet.

ANALYSE DE NŒUDS CONSTRUCTIFS

A l'image d'une tirette dans un pull, le raccord entre deux éléments d'une construction peut présenter une faiblesse d'un point de vue énergétique. Ces points faibles, appelés « nœuds constructifs », peuvent, en plus d'impacter la consommation en énergie du bâtiment et le confort des habitants, avoir un impact sur la durabilité des matériaux mis en œuvre. Il convient donc de veiller à la mise en œuvre de raccords étudiés en cohérence avec l'objectif énergétique recherché mais également, et surtout, avec les matériaux utilisés.

Le chapitre suivant étudie une série de nœuds constructifs issus de différents modes de construction en paille en simulant leur comportement thermique. Sa finalité est d'observer les températures de surfaces côté intérieur et d'émettre un avis sur sa « performance énergétique ».

INTRODUCTION

Au centre des attentions lors de la conception d'un bâtiment, les nœuds constructifs se présentent sous la forme de détails techniques mettant généralement en œuvre le raccord entre deux composants. Qu'il s'agisse de l'ancrage d'un matériau ou d'un objet dans une paroi, de la continuité d'une étanchéité à l'air ou à l'eau lors d'un changement de matériau dans la paroi, la présence d'une isolation thermique continue dans chaque raccord entre deux parois, etc., ils nécessitent un point d'attention particulier et une étude plus poussée de la part du concepteur pour ne pas faire de ces nœuds constructifs les futurs points faibles du bâtiment.

Cette attention est d'autant plus requise dans le cas de la construction en paille où l'utilisation d'un matériau naturel sujet à la décomposition en présence de conditions particulièrement défavorables peut nécessiter une approche différente et un soin particulier à la conception du détail technique.

Dans ce chapitre, un ensemble de nœuds constructifs sera analysé d'un point de vue thermique. La difficulté de réaliser une telle étude en conditions dynamiques (en tenant compte des flux de vapeur et d'eau à travers le nœud constructif) par le manque d'outils disponibles a contraint les chercheurs à faire usage d'outils disponibles plus largement mais opérant en conditions statiques. L'outil sélectionné pour cette étude est le logiciel « THERM ». Le résultat est alors moins précis car n'est le reflet que d'une situation donnée à un moment donné et non une moyenne sur le comportement hygrothermique et dynamique de la paroi sur une période plus longue. Néanmoins, ces méthodes de calcul sont couramment employées par les bureaux d'études et experts au sens large.

Chaque nœud constructif analysé dispose d'une fiche type sur laquelle figure une description de la situation du nœud dans le bâtiment ainsi qu'une liste des matériaux le composant. Par la suite, une simulation sous le logiciel « THERM » est réalisée afin d'en extraire deux informations.

La première permet de visualiser le gradient de température via une représentation infrarouge et des isothermes. Un zoom sur ces isothermes, et plus particulièrement sur le point sensible du nœud constructif étudié, permet la lecture de la **température de surface intérieure**. Il est généralement admis que pour une température extérieure de - 10 °C et une température

intérieure de 20 °C, cette température de surface intérieure ne doit pas descendre en dessous de 12 °C, température sous laquelle une condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air pourrait avoir lieu. Cette condensation en surface des matériaux de revêtements peut entraîner l'apparition de champignons et la dégradation du matériau en lui-même.

La seconde information est le « Ψ » («Psi») du **pont thermique linéaire** formé par le détail technique. Le « Ψ » d'un pont thermique linéaire est à l'image de ce qu'un « λ » (conductivité thermique) est pour un matériau. Cette donnée est obtenue par calcul sur base du « U_{factor} » (valeur U équivalente du pont thermique) et de la longueur de ce « U_{factor} », toutes deux définies dans le logiciel «THERM». Une feuille de calcul intermédiaire permet de calculer le « Ψ » du pont-thermique linéaire⁹. Cette valeur « Ψ », exprimée en W/m.K, est largement utilisée dans le milieu de la construction pour exprimer la quantité de chaleur qui transite directement à travers le pont thermique. Une valeur positive (ex: 0,05 W/m.K) exprime une perte d'énergie linéaire, complémentaire aux déperditions surfaciques de la paroi, tandis qu'une valeur négative (ex: - 0,05 W/m.K) exprime le fait que les déperditions calculées pour les parois qui entourent le raccord ont été surestimées par rapport à la réalité. On retrouve par exemple ces valeurs négatives pour des angles sortants au coin d'un bâtiment.

Les valeurs « Ψ » ainsi calculées doivent permettre au lecteur de situer la performance d'un nœud constructif dans une construction en paille par rapport aux valeurs $\Psi_{e,limite}$ imposées par la réglementation PEB. Ces valeurs sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : valeurs limites des coefficients de conductivité linéiques Ψ_e - Prise en compte des nœuds constructifs dans la PEB - Energie Wallonie - Février 2012.

Type de raccord	$\Psi_{e,limite}$
1. Angle sortant (1) (2)	
a. 2 murs	- 0.10 W/m.K
b. Autres angles sortants	0.00 W/m.K
2. Angle rentrant (3)	0.15 W/m.K
3. Raccords aux fenêtres et aux portes	0.10 W/m.K

9. La feuille de calcul utilisée dans le cadre de la recherche est l'outil « PT_Ψ » de la plateforme « ConnecTools » de la pmp asbl. www.pmp-connectools.be.

Type de raccord	$\Psi_{e,limite}$
4. Appui de fondation	0.05 W/m.K
5. Balcons – Auvents	0.10 W/m.K
6. Raccords de parois d'un même volume protégé ou 2 volumes protégés différents avec une paroi de la surface de déperdition	0.05 W/m.K
7. Tous les nœuds qui n'entrent pas dans les catégories 1 à 6	0.00 W/m.K

(1) A l'exception d'appui de fondation.

(2) Pour un « angle sortant », l'angle α (mesuré entre les deux faces extérieures de la paroi de la surface de déperdition) doit satisfaire à : $180^\circ < \alpha < 360^\circ$.

(3) Pour un « angle rentrant », l'angle α (mesuré entre les deux faces extérieures de la paroi de la surface de déperdition) doit satisfaire à : $0^\circ < \alpha < 180^\circ$.

Autre référence, le PHI (Passiv Haus Institut) stipule dans le manuel de leur outil «PHPP» que «pour des coefficients linéaires de déperdition thermique due aux ponts thermiques Ψ supérieurs à 0,01 W/(m.K), les déperditions devront être prises en considération». Les ponts thermiques linéaires inférieurs à cette valeur cible sont donc négligés dans le calcul du bilan énergétique d'un bâtiment passif.

Sans avoir la prétention de présenter une liste exhaustive de l'ensemble des nœuds constructifs rencontrés dans une construction en paille, les fiches disponibles ci-dessous rassemblent des analyses de cas mis en œuvre dans certains projets du catalogue (voir Vadémécum n° 3) par l'entreprise Paille-Tech ainsi que par ALTAR Architecture, contactées dans le cadre de la recherche. Il est possible que, dans certains cas, le détail diffère légèrement de la situation réellement mise en œuvre, ces entreprises adaptant leurs détails d'un projet à l'autre¹⁰. Ces analyses permettent de se représenter l'impact du choix d'un détail technique particulier sur la durabilité des finitions intérieures ou sur les performances énergétiques globales du bâtiment.

10. Ndlr : à noter également que certaines informations (origine des matériaux) n'étant pas disponibles au moment de l'étude, la recherche a adapté le nœud suivant une logique thermique (càd : usage de matériaux similaires à celui qui est mis en œuvre).

IDENTIFICATION DES CAS

Le schéma ci-dessous reprend la localisation de l'ensemble des nœuds constructifs analysés dans ce chapitre. Chacun d'entre eux peut être identifié par son logo, visible également en bordure de page pour une navigation plus rapide à travers les fiches.

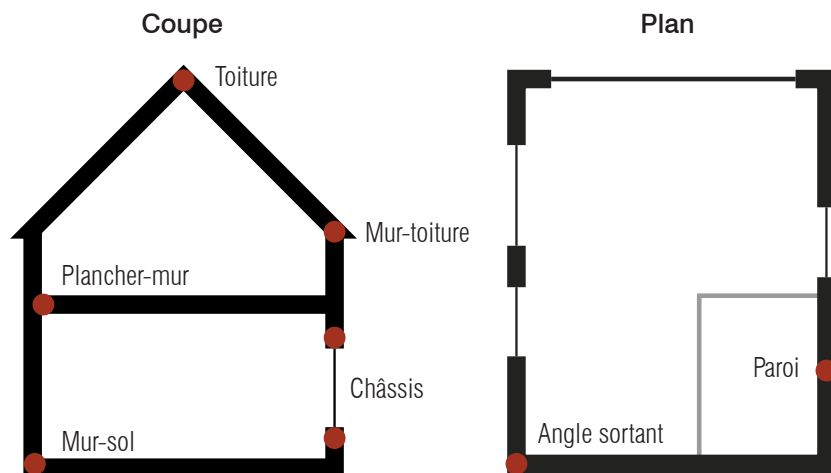


Fig. 98 : Localisation de l'ensemble des nœuds constructifs analysés dans ce chapitre.

Les fiches « nœuds-constructifs » sont présentées ci-dessous selon la structure suivante :

- angle sortant ;
- raccord entre deux modules dans une paroi verticale ;
- raccord « mur-sol » ;
- raccord entre le châssis et la paroi verticale ;
 - variantes de la position du châssis dans l'épaisseur de la paroi ;
- raccord « plancher-mur » ;
- raccord « mur-toiture » ;
- raccord au faite entre deux modules composant la toiture ;
- cas particulier du mode de construction « GREB » ;
 - variante du cas particulier.

ANALYSE DES NŒUDS CONSTRUCTIFS

Remarques préliminaires

L'ensemble des données encodées dans le logiciel « THERM » se base sur les informations communiquées dans les fiches techniques des matériaux ou, si la donnée est disponible, sur les mesures effectuées dans le cadre de la recherche.

Il est cependant nécessaire de souligner que l'élément le plus important de la paroi (c.à.d : celui qui assure toute la performance thermique de la paroi) est la paille. Bien que la valeur de sa conductivité thermique soit largement discutée dans la littérature, il a été choisi de suivre les mesures effectuées dans le cadre de la recherche aPROpaille¹¹. Ainsi, aux vues des ballots de paille utilisés et de leur configuration lors de la mise en œuvre, une conductivité thermique de 0,06 W/(m.K) doit être choisie. Afin de coller un maximum à la réalité et d'analyser le comportement thermique de la paroi dans des conditions réelles, une humidité relative moyenne de 60 % est considérée, ce qui modifie la conductivité thermique du ballot de paille de 0,06 W/(m.K) à 0,072 W/(m.K), valeur encodée dans le logiciel « THERM » pour la paille seule.

Enfin, dans le cas d'une ossature bois remplie d'isolant, il convient de considérer cette paroi comme un tout homogène afin que le logiciel ne mette en évidence que la perturbation du flux de chaleur au droit du raccord réellement étudié. Une ossature bois isolée en ballot de paille sera donc dessinée dans le logiciel comme une paroi homogène dont la conductivité thermique équivalente tiendra compte de la proportion de bois et de paille. Pour chaque paroi étudiée dans ce chapitre, ce « λ équivalent » a donc été calculé.

De même, les finitions sont négligées dans l'analyse thermique du détail, excepté lorsque celles-ci font partie intégrante de la paroi ou présentent une épaisseur ou un matériau pouvant impacter l'aspect énergétique du nœud constructif. Ce choix se justifie par la volonté de rendre le détail technique reproductible sans pour autant contraindre le maître d'ouvrage dans ses choix relatifs aux matériaux de finition.

11. Voir chapitre Propriétés hygrothermiques des matériaux.

ANGLE SORTANT AU COIN D'UN BÂTIMENT - 1

- DÉNOMINATION : Angle sortant au coin d'un bâtiment.
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Situé à l'angle sortant d'un bâtiment en paille, ce nœud constructif présente le raccord effectué entre deux modules préfabriqués de l'entreprise « Paille-Tech ». L'analyse du nœud repose sur le raccord des éléments de l'ossature et l'influence que ce groupement d'éléments peut avoir sur le comportement thermique de la paroi.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,075 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

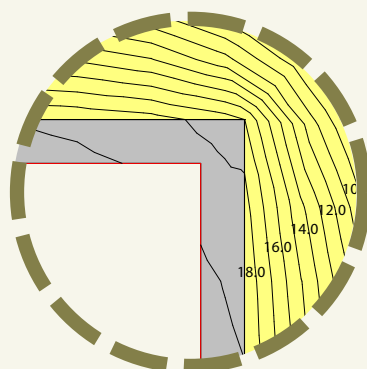
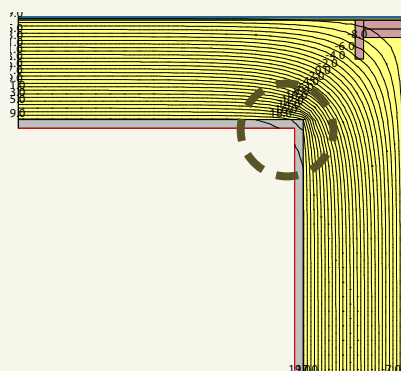
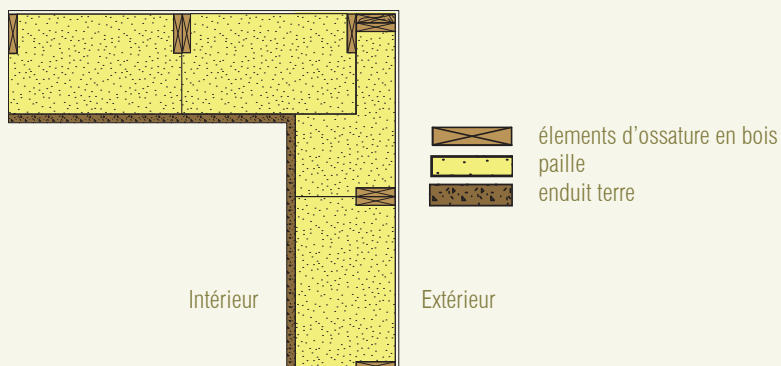
Valeur U de la paroi : 0,150 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : - 0,052 \text{ W/m.K}$$

Observations

La configuration de l'angle sortant implique un « Ψ » négatif de par la sures-timation des déperditions thermiques à travers les deux parois concernées par le nœud constructif.

Du point de vue des isothermes et de la température de surface, la per-turbation résultante du raccord des éléments de l'ossature bois est peu perceptible côté intérieur de par l'importante épaisseur de paille. Sur la face intérieure de la paroi, une température de ~18 °C est indiquée. Tout risque de condensation de surface est donc écarté.



- *DÉNOMINATION* : Angle sortant au coin d'un bâtiment;
- *ORIGINE DU DÉTAIL* : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Situé à l'angle sortant d'un bâtiment en paille, ce nœud constructif présente le raccord effectué entre deux modules préfabriqués de l'entreprise « Paille-Tech ». La différence notable par rapport à l'exemple précédent est l'emploi d'un nouveau type de modules. Ceux-ci présentent un entraxe des éléments de l'ossature plus réduit s'adaptant à une mise en œuvre du ballot à la verticale. Les modules sont ainsi plus facilement adaptables au plan de l'habitation, chacun pouvant être allongé ou rétréci d'une ou plusieurs colonnes de ballots supplémentaires. L'ensemble du module est repris dans un cadre traversant en bois. Ce nœud correspond donc au raccord des éléments de ce cadre traversant et l'influence que celui-ci peut avoir sur le comportement thermique de la paroi.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K.

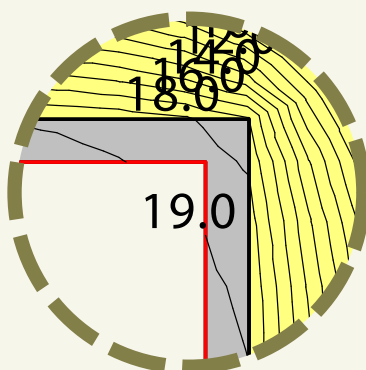
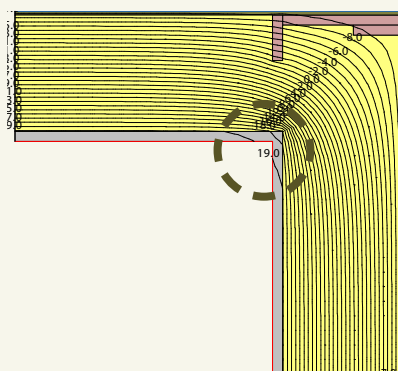
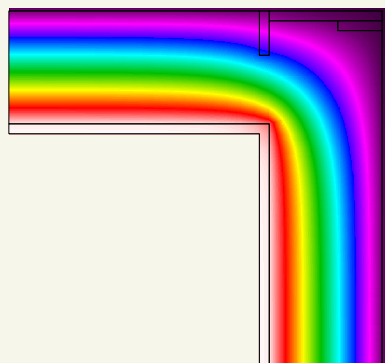
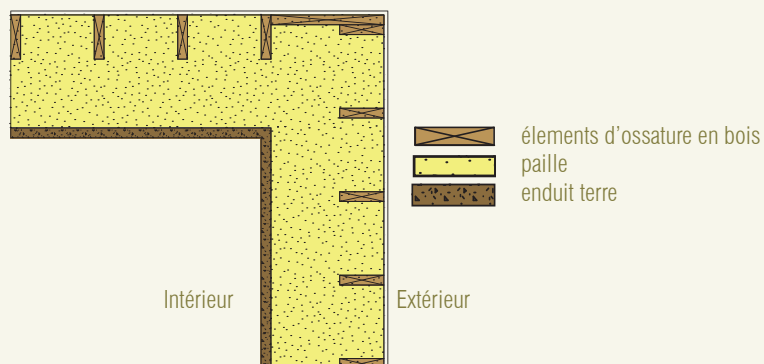
$$\Psi_{\text{calculé}} : - 0,124 \text{ W/m.K}$$

Observations

Comme dans l'exemple précédent, la configuration de l'angle sortant implique un « Ψ » négatif de par la surestimation des déperditions thermiques à travers les deux parois concernées par le nœud constructif.

Dans ce cas d'analyse, les éléments de bois les plus importants se situent principalement en surface extérieure du raccord. Dans le coin sortant, la pénétration du bois vers le cœur de la paroi est légèrement moins importante que dans le cas précédent, ce qui pourrait expliquer le meilleur résultat obtenu après calcul de la valeur « Ψ ».

Du point de vue des isothermes dans leur ensemble, l'épaisseur de paille étant toujours aussi importante, elles s'en retrouvent peu affectées au fur et à mesure de leur avancement dans la paroi. Sur la face intérieure de la paroi, une température de $\sim 18^\circ\text{C}$ est indiquée comme dans le cas précédent. Du point de vue de la température sur la face intérieure de la paroi, le choix d'une technique par rapport à une autre ne provoque aucun changement majeur.



- DÉNOMINATION : Raccord entre deux modules Paille-Tech.
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Chaque module ayant une longueur maximale, les raccords entre ceux-ci sont inévitables dans la continuité d'une paroi extérieure. Ces interruptions dans la paroi peuvent représenter un affaiblissement de sa performance thermique. Le détail analysé dans ce cas est un exemple de raccord entre deux modules tels que définis dans la première fiche de ce chapitre.

La particularité de ce nœud repose sur la présence de deux éléments d'ossature (type poteaux-poutres) de dimensions 10 x 30 cm. Dans ce projet, les modules Paille-Tech remplissaient très probablement le rôle de parois isolantes non structurales. A la jonction entre ces deux poutres et les modules en paille, un isolant supplémentaire ($\lambda = 0,04 \text{ W/(m.K)}$, type panneau de liège) est intercalé entre les poutres et les éléments de finition en bois.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,075 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,150 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,045 \text{ W/m.K}$$

Observations

La présence des poutres et du complément d'isolation côté intérieur de celles-ci forment une perturbation caractérisée par un déplacement et un resserrage des isothermes. Cette configuration type se traduit par un Ψ positif, synonyme de déperdition thermique.

Du point de vue de la température de surface, l'épaisseur totale de paille et le complément d'isolation contre les poutres permettent de conserver une température tout à fait acceptable de $\sim 19^\circ\text{C}$ en surface intérieure.

Il est laissé à l'appréciation de l'auteur de projet de considérer ce raccord comme un pont-thermique problématique ou négligeable. Dans certains projets, le cumul des valeurs Ψ des différents ponts thermiques linéaires peut s'avérer être significatif pour le projet. Il conviendra alors d'étudier plus attentivement chacun d'entre eux afin d'en améliorer la performance. Dans l'exemple ci-dessus, une possibilité pourrait être de placer un complément d'isolant en face extérieure des poutres. De cette manière, le comportement des isothermes au droit des parois et du raccord serait plus constant, atténuant l'effet de perturbation du flux et donc les déperditions thermiques.

- DÉNOMINATION : Raccord « Mur-Sol ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Ce cas d'étude met en avant un raccord entre le module Paille-Tech et une dalle de sol composée d'un béton armé et d'une couche isolante constituée de 20 cm de PUR. Au pied du module en paille, un isolant de type vermiculite en vrac est versé sur l'étanchéité à l'eau.

Comme pour tout calcul de pont thermique type « mur-sol » une masse de terre définie selon les normes EN ISO 13370:1998 et EN ISO 10211 est considérée comme participant à la résistance du plancher.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K.

De l'intérieur vers l'extérieur, la dalle de sol considérée pour l'analyse du cas est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/(m.K)]	Épaisseur
Béton Armé	2,2 W/m.K	150 mm
Isolant PUR	0,025 W/m.K	200 mm
Masse de terre		
		350 mm

Valeur U de la paroi : 0,119 W/m².K.

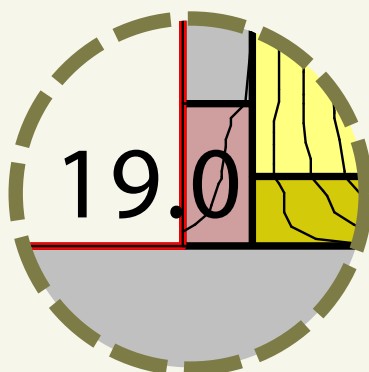
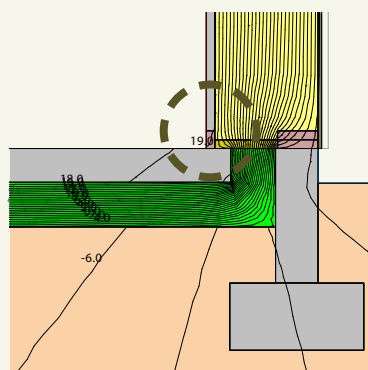
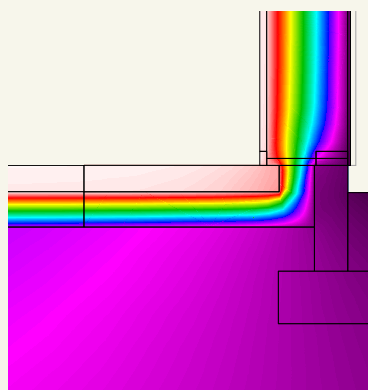
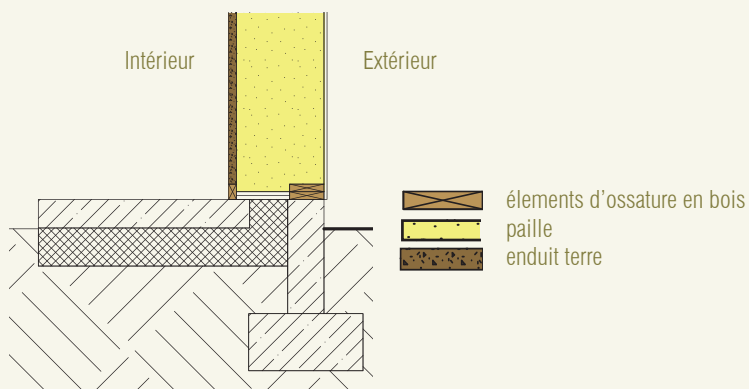
$$\Psi_{\text{calculé}} : - 0,012 \text{ W/m.K}$$

Observations

Le raccord « mur-sol » de cet exemple est comparable à l'angle sortant du bâtiment étudié dans les cas précédent. Les déperditions calculées pour la paroi en paille et la dalle béton sont surestimées, rendant la valeur Ψ du pont thermique négative.

Du point de vue de la température intérieure, ce détail technique est tout à fait fonctionnel en présentant une température de surface de $\sim 19^\circ\text{C}$.

Un point d'attention pourrait être porté sur le décrochement du module en paille par rapport au sol fini. En effet, en cas de fuite d'eau à l'intérieur de l'habitation (ex: fuite d'une machine à laver), le liquide pourrait s'infiltrer au pied de la paroi et être absorbée par la paille. L'usage de la vermiculite en vrac dans cet exemple est très probablement une première barrière face à cette problématique.



- DÉNOMINATION : Raccord « Mur-Sol ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Cas similaire à l'exemple précédent, ce raccord du module en paille sur la dalle de sol est à présent complété par une isolation plus importante du sol. Une couche de « TECHNOPOR » (75 cm) est mise en œuvre sous et en périphérie de la dalle de sol. Un isolant périphérique en PUR (8 cm) est placé à la verticale contre la dalle et en périphérie de celle-ci. Cet isolant remonte également au-delà de la dalle béton afin de couvrir les lisses basses de l'ossature bois.

Une épaisseur plus importante de vermiculite (8 cm) est également mise en œuvre au pied du module en paille.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K.

De l'intérieur vers l'extérieur, la dalle de sol considérée pour l'analyse du cas est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Béton Armé	2,2 W/m.K	150 mm
Isolant « TECHNOPOR »	0,085 W/m.K	750 mm
Masse de terre	0,09 W/m.K	16 mm
		916 mm

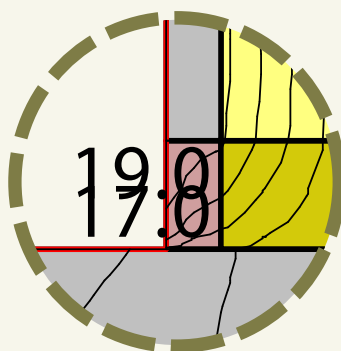
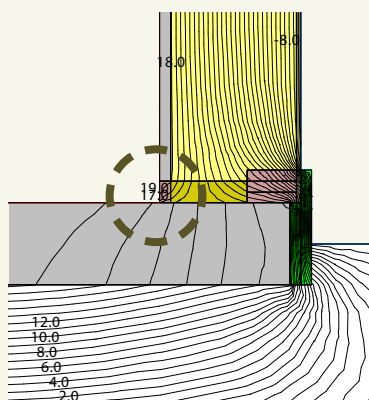
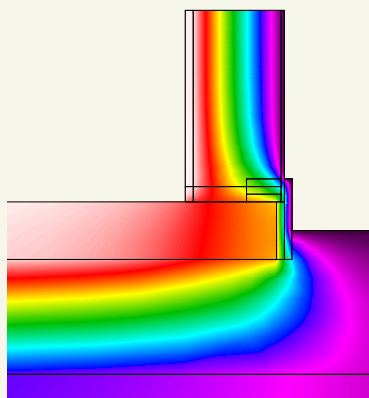
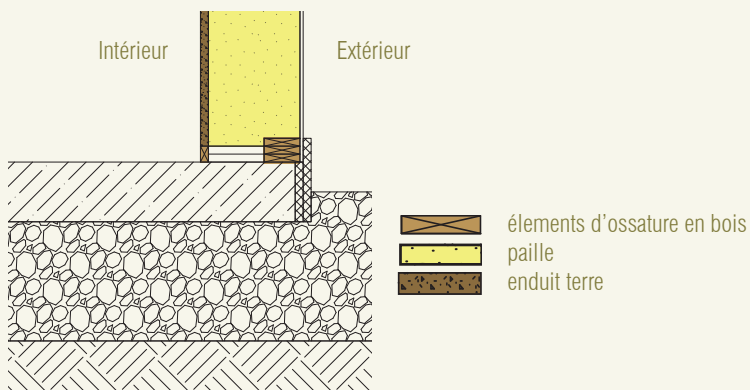
Valeur U de la paroi : 0,133 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,011 \text{ W/m.K}$$

Observations

Le nœud constructif étudié se révèle être également fonctionnel du point de vue de la température de surface intérieure avec un minimum de $\sim 17^{\circ}\text{C}$.

Malgré la vue infrarouge du gradient de température qui suggère une forte perturbation des isothermes, la valeur Ψ calculée ne s'avère pas être fortement pénalisante. Le rôle de l'isolation périphérique est ici clairement mis en avant et contraste, en termes de performance thermique, avec le reste des matériaux.



- *DÉNOMINATION* : Raccord « Mur-Sol ».
- *ORIGINE DU DÉTAIL*: Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Ce cas d'étude présente un décrochage du sol nettement plus important. Le sous-bassement est réalisé en bloc de béton cellulaire sans complément d'isolation. Seul le pouvoir isolant du bloc est employé vu le caractère particulier de celui-ci (bloc « low energy » de Xella).

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/(m².K).

De l'intérieur vers l'extérieur, la dalle de sol considérée pour l'analyse du cas est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Béton Armé	2,2 W/m.K	300 mm
Isolant « TECHNOPOR »	0,085 W/m.K	600 mm
Masse de terre		
(Présence d'un isolant en PUR en guise de coffrage perdu dont l'utilité est d'assurer la continuité de la couche isolante).		
		900 mm

Valeur U de la paroi : 0,133 W/m².K.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi du soubassement est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Béton cellulaire « Low Energy » (Xella)	0,08 W/m.K	500 mm
Enduit minéral	0,7 W/m.K	30 mm
		530 mm

Valeur U de la paroi : 0,155 W/m².K.

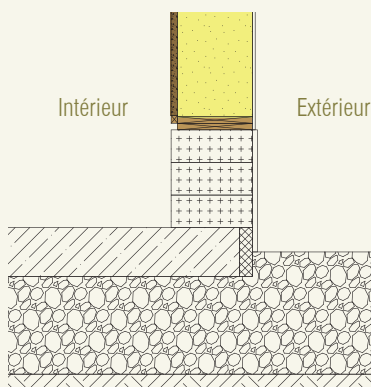
$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,019 \text{ W/m.K}$$

Observations

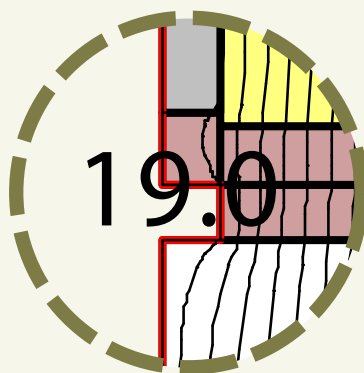
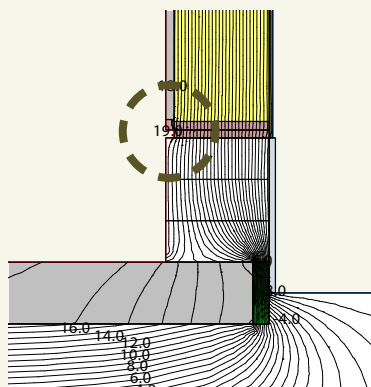
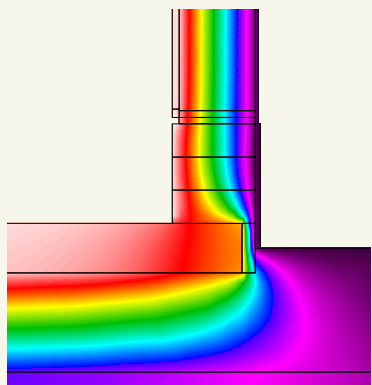
Le point le plus bas des températures de surface est ~ 17 °C ; aucun problème de condensation de surface.

Avec des valeurs U inférieures ou égales à 0,15 W/(m².K) pour les parois délimitant le nœud constructif et la présence d'un isolant PUR au droit de l'épaisseur de la dalle en béton assurant la continuité de la couche isolante, la situation est favorable à l'obtention d'un pont thermique de faible valeur, en témoigne la valeur Ψ calculée, bien que pour un angle sortant il est plus fréquent de rencontrer des valeurs de pont thermique linéaire négatives.

L'usage d'un bloc d'assise en béton cellulaire est ici un choix réfléchi pour la performance du pont-thermique. En effet, l'usage d'un bloc de même type aux performances plus traditionnellement rencontrées ($\lambda = 0,9$ W/(m.K)) modifierait de manière importante la valeur Ψ calculée ($\Psi = 0,143$ W/(m/K) !).



-  éléments d'ossature en bois
-  paille
-  enduit terre



- DÉNOMINATION : Raccord « Paroi-Châssis ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Premier d'une série de 5 variantes, ce nœud constructif met en avant l'importance du choix de la position du châssis dans l'épaisseur de la paroi. Dans les 5 prochains cas, le châssis sera positionné en bord de paroi ou au centre de celle-ci et se verra encadré de matériaux divers, allant du simple panneau de contreventement au cadre en panneau de liège. Pour chacun des cas, un châssis dont la valeur $U_f = 0,85 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ sera utilisé. Sur base de ses dimensions (dépendant des choix de l'auteur du détail technique), un λ équivalent sera calculé et attribué au matériau dans le logiciel « THERM ».

Ce premier exemple illustre un châssis positionné en bordure de paroi, côté extérieur, contre un panneau de type « DWD Agepan ».

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

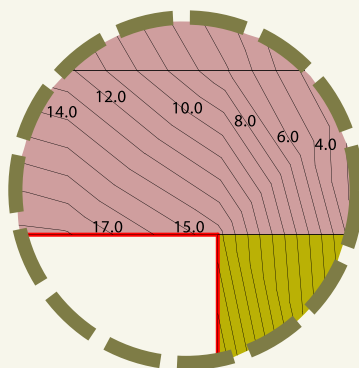
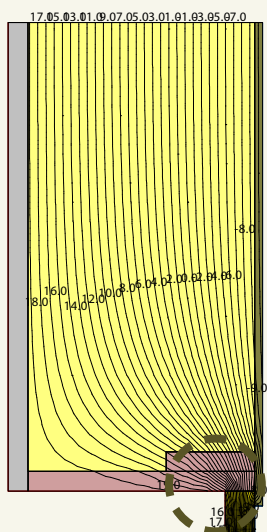
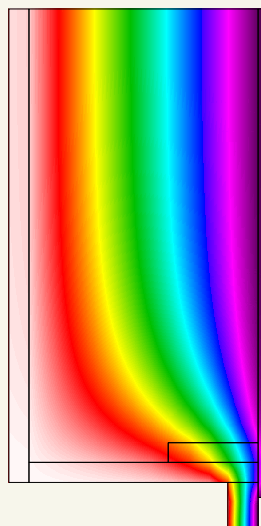
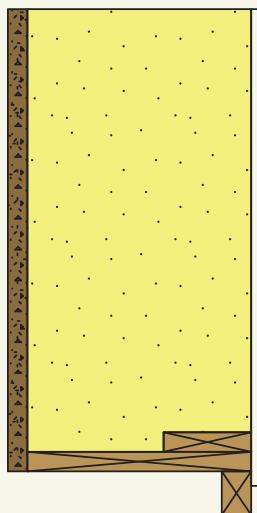
Valeur U de la paroi : $0,152 \text{ W/m}^2\text{.K}$.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,082 \text{ W/m.K}$$

Observations

Du point de vue de la température de surface intérieure, une valeur de 15 °C est atteinte dans le coin supérieur du châssis. Bien que celle-ci ne soit pas encore réellement problématique, elle se rapproche plus de la température limite des 12 °C. Dans l'éventualité ou apparaîtrait un défaut de l'étanchéité à l'air, un courant d'air froid pourrait provoquer un abaissement de la température de surface et provoquer des problèmes de condensation.

La valeur Ψ calculée de 0,082 W/(m.K) se justifie par le déplacement des isothermes au droit du châssis. Pour rappel, au plus les isothermes dévient de leur axe, au plus la déperdition thermique est importante. Ce type de pont thermique linéaire étant directement dépendant de la longueur sur laquelle il s'applique, un raccord de ce type sur une baie de grande dimension pourrait très vite représenter une part non négligeable des déperditions de l'enveloppe du bâtiment.



- *DÉNOMINATION* : Raccord « Paroi-Châssis ».
- *ORIGINE DU DÉTAIL* : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Dans cette variante, la position du châssis est conservée mais un panneau isolant en fibres de bois de 60 mm est ajouté du côté extérieur, sur le panneau de contreventement.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
Panneau de fibres de bois isolant	0,04 W/m.K	60 mm
		576 mm

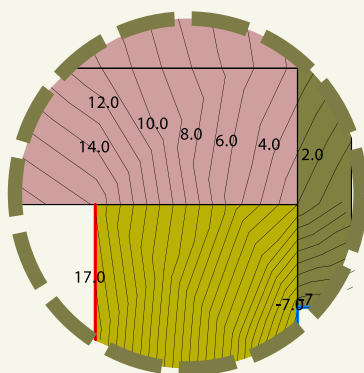
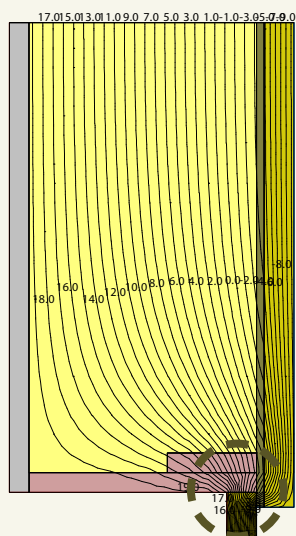
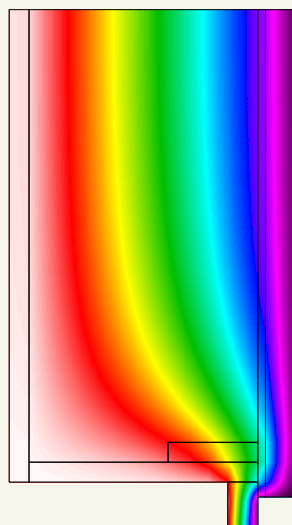
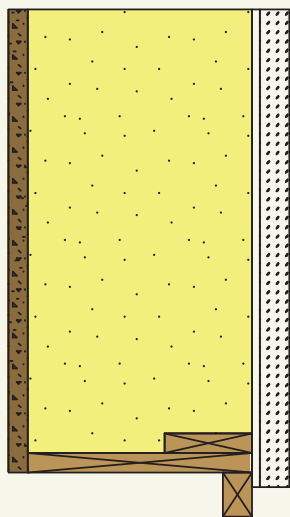
Valeur U de la paroi : 0,125 W/m².K.

$\Psi_{\text{calculé}}$: 0,041 W/m.K

Observations

Le panneau de fibre de bois offrant une protection thermique supplémentaire, la température de surface intérieure se voit légèrement améliorée, atteignant un minimum de 16 °C.

L'ajout de ce complément isolant permet cependant de diminuer de moitié les déperditions au droit du raccord entre le châssis et la paroi.



- DÉNOMINATION : Raccord « Paroi-Châssis ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Dans cette variante, le panneau de fibres de bois de 60 mm est conservé, mais le châssis est placé au centre de la paroi (dans son épaisseur) et contre un cadre en bois de type charpente. Côté intérieur, des panneaux de liège rigides encadrent le châssis.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
Panneau de fibres de bois isolant	0,04 W/m.K	60 mm
		576 mm

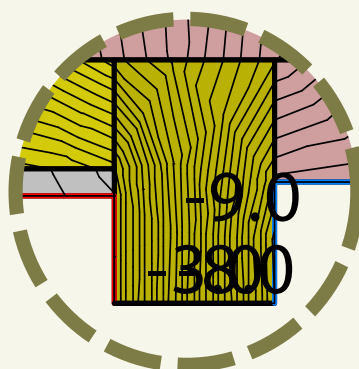
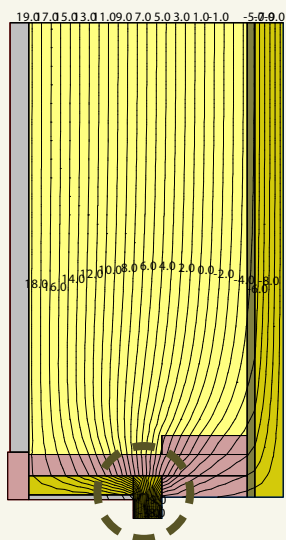
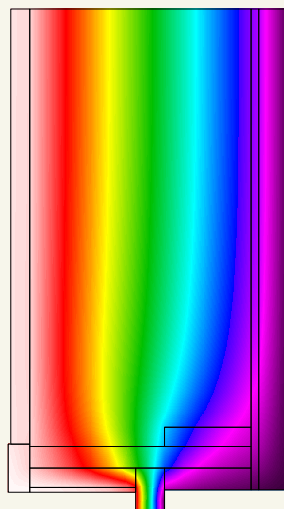
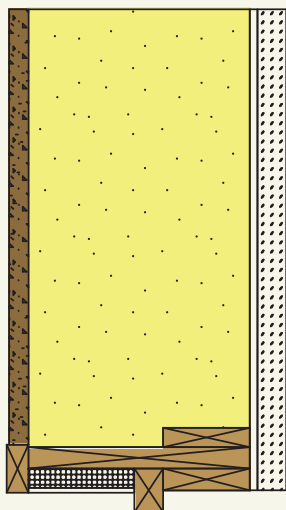
Valeur U de la paroi : 0,125 W/m².K.

$\Psi_{\text{calculé}} : 0,009 \text{ W/m.K}$

Observations

La température de surface se trouve encore améliorée avec un minimum de 17 °C.

Le positionnement du châssis au centre de la paroi et entre un cadre en bois du côté extérieur et un cadre en panneaux de liège rigides côtés intérieur permet d'allonger le chemin de moindre résistance (ndlr : chemin qui présente la résistance thermique la plus faible). Bien que le bois ne soit pas un isolant en tant que tel, sa faible conductivité thermique ($\lambda = 0,13 \text{ W/(m.K)}$) comparée à celle d'autres matériaux de construction le rend plus isolant qu'un béton, par exemple. Le recouvrement d'une partie du châssis par le cadre en bois participe donc à la réduction de la valeur Ψ calculée, rendant l'impact de ce raccord négligeable d'un point de vue énergétique.



- DÉNOMINATION : Raccord « Paroi-Châssis ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

La variante suivante est un cas identique au cas précédent, si ce n'est que le cadre en bois extérieur contre lequel repose le châssis est remplacé par un cadre réalisé à base de panneaux de liège rigides.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
Panneau de fibres de bois isolant	0,04 W/m.K	60 mm
		576 mm

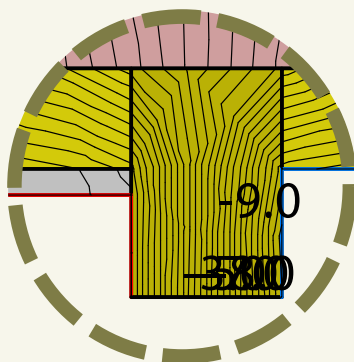
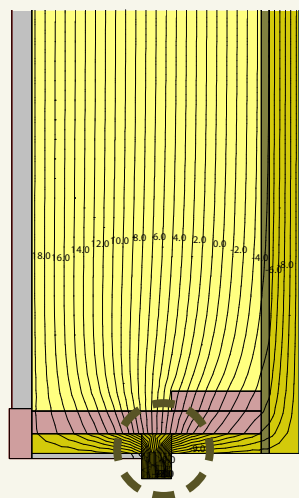
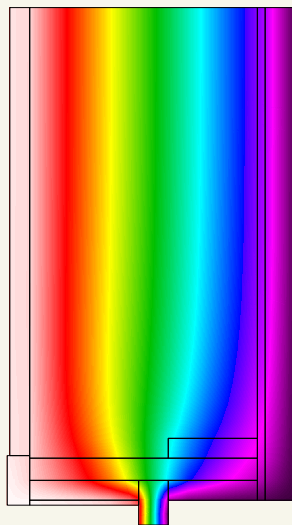
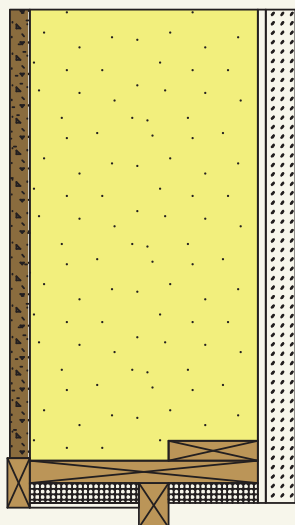
Valeur U de la paroi : 0,125 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,003 \text{ W/m.K}$$

Observations

La température de surface conserve un minimum de 17 °C.

Le choix du cadre extérieur en panneaux de liège rigides ne permet qu'une faible réduction de la valeur Ψ du pont thermique. De par la variante actuelle et précédente, il est possible d'observer que la position du châssis dans l'épaisseur de la paroi est très certainement une composante non négligeable du point de vue des performances thermiques du nœud constructif.



- *DÉNOMINATION* : Raccord « Paroi-Châssis ».
- *ORIGINE DU DÉTAIL* : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Une dernière variante par rapport au cas précédent étudie un faible déplacement du châssis vers l'extérieur de la paroi lorsque celui-ci est posé contre un cadre en bois directement en contact avec l'extérieur. Dans ce cas, le panneau de fibre de bois est absent de la simulation.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
Enduit extérieur minéral	0,7 W/m.K	30 mm
		546 mm

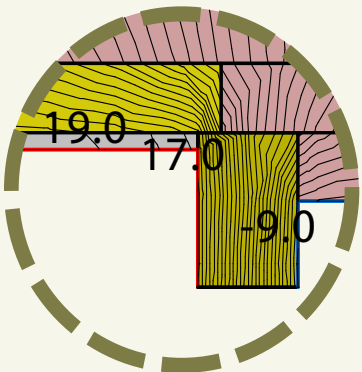
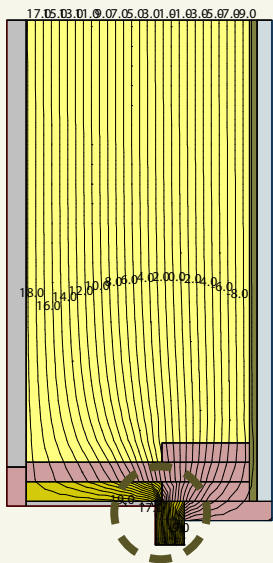
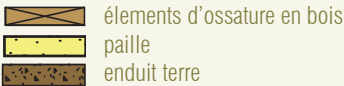
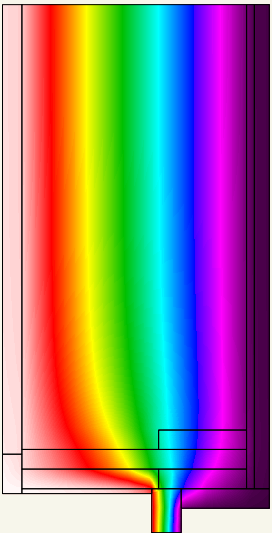
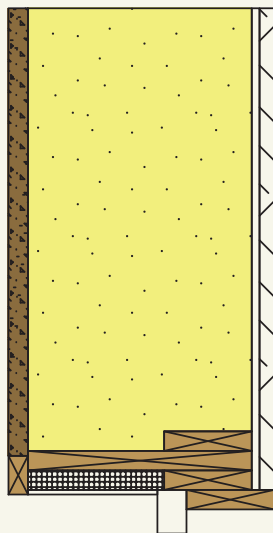
Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,031 \text{ W/m.K}$$

Observations

La température de surface conserve un minimum de 17 °C.

Le déplacement du châssis vers l'extérieur et l'absence de matériau isolant après celui-ci tend à diminuer la performance thermique du nœud constructif. Dès lors, il sera laissé à l'appréciation de l'auteur de projet l'impact que pourrait avoir ce pont thermique linéaire sur le bilan énergétique du bâtiment.



- DÉNOMINATION : Raccord « Paroi-Châssis ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Adelin Leclef (ALTAR).

Description et composition du nœud constructif

Ce cas particulier est un nœud constructif complet du point de vue des matériaux et tel que réellement mis en œuvre par l'entreprise ALTAR dans ses projets de construction en paille. La paroi repose sur une ossature bois dont le remplissage isolant est assuré par des ballots de paille. La paroi est contreventée par un panneau OSB placée côté intérieur et est complétée par un panneau isolant en fibre de bois de 80 mm d'épaisseur. En finition, des plaques de type « FERMACELL » sont placées côté intérieur et un enduit minéral termine la paroi en face extérieure.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Plafonnage sec de type « FERMACELL »	0,4 W/m.K	15 mm
Panneau de contreventement	0,13 W/m.K	15 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,077 W/m.K	
Panneau de fibres de bois isolant	0,04 W/m.K	80 mm
Enduit extérieur minéral	0,07 W/m.K	10 mm
		120 mm

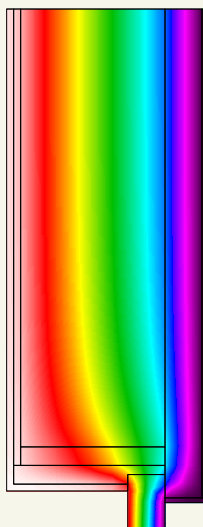
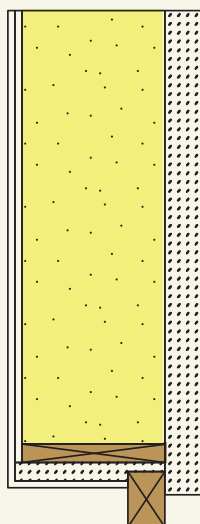
Valeur U de la paroi : 0,157 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,002 \text{ W/m.K}$$

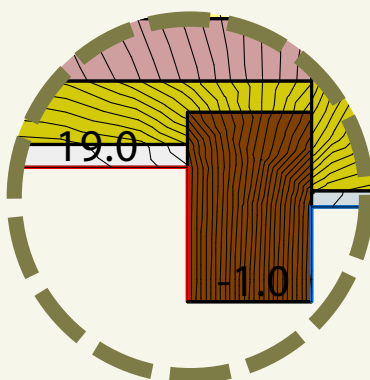
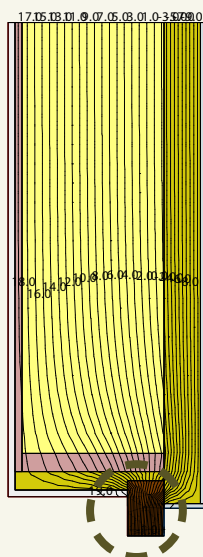
Observations

Comme dans les cas précédent, la température de surface intérieure atteint un seuil minimum acceptable de 17 °C.

Le recouvrement du châssis par un matériau isolant d'épaisseur conséquente permet de bien mettre en valeur l'impact de ce paramètre clés sur les performances thermiques du nœud constructif. Dans ce cas précis, la position du châssis (presque extérieure) ne semble pas poser préjudice au résultat calculé. Avec un Ψ calculé de 0,002 W/(m.K), le pont thermique de mise en œuvre du châssis est négligeable à l'échelle de l'enveloppe du bâtiment.



-  éléments d'ossature en bois
-  paille
-  enduit terre



- DÉNOMINATION : Raccord « Paroi-Châssis ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Adelin Leclef (ALTAR).

Description et composition du nœud constructif

Complément du cas précédent, l'analyse suivante est le détail identique mais au niveau du bas du châssis.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Plafonnage sec de type « FERMACELL »	0,4 W/m.K	15 mm
Panneau de contreventement	0,13 W/m.K	15 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,077 W/m.K	
Panneau de fibres de bois isolant	0,04 W/m.K	80 mm
Enduit extérieur minéral	0,07 W/m.K	10 mm
		120 mm

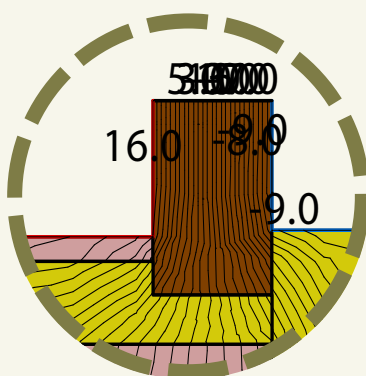
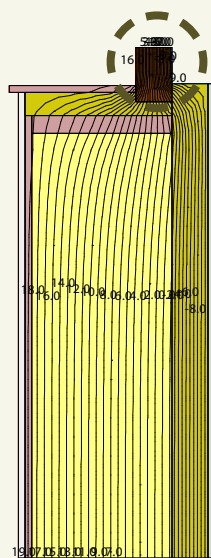
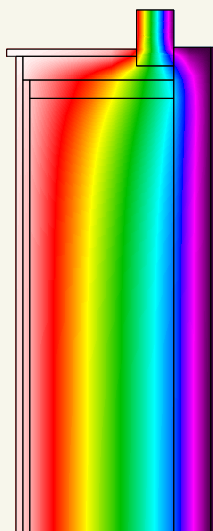
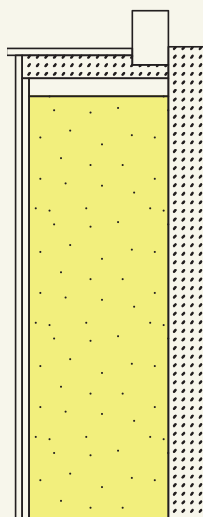
Valeur U de la paroi : 0,157 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,000 \text{ W/m.K}$$

Observations

La température de surface intérieure atteint un seuil minimum acceptable de 16 °C.

Les observations relatives à ce nœud constructif sont similaires au cas précédent. La différence minime entre les deux valeurs Ψ calculées pourrait provenir d'un recouvrement du châssis, côté intérieur, légèrement plus important de par la présence de la tablette en bois.



- DÉNOMINATION : Raccord « Paroi-Châssis ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Dans un détail similaire à celui de l'entreprise ALTAR, Paille-Tech propose sa version en intégrant un seuil de fenêtre en bois.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
Enduit minéral extérieur	0,7 W/m.K	30 mm
		546 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K.

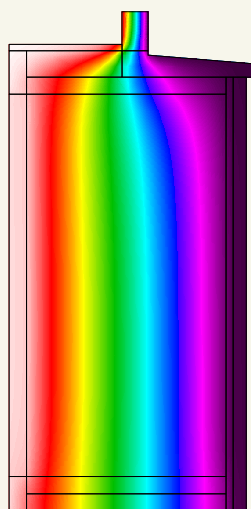
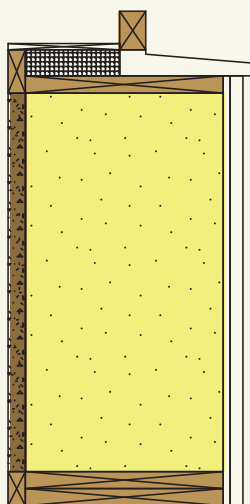
$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,049 \text{ W/m.K}$$

Observations

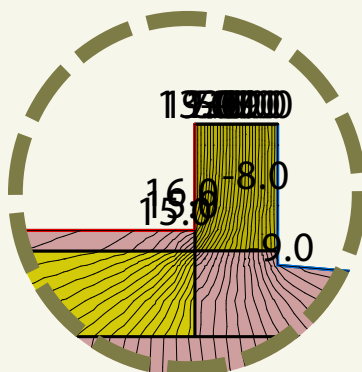
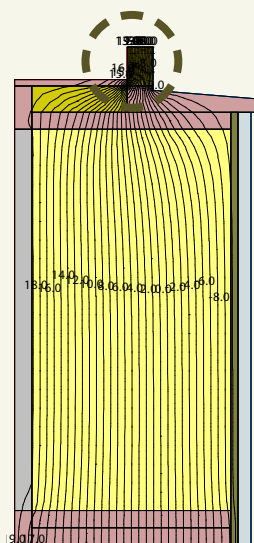
La température de surface intérieure atteint un seuil minimum acceptable de 14 °C. Cette température étant relativement faible, il conviendra de veiller à la bonne mise en œuvre de l'étanchéité à l'air afin de ne pas l'abaisser davantage.

L'absence de recouvrement du châssis de part et d'autre de celui-ci avec un matériau isolant peut-être la raison de la valeur Ψ calculée plus élevée que dans le cas précédent.

A noter également que le seuil de fenêtre extérieur est en bois et ne peut être remplacé par un élément similaire en pierre naturelle, par exemple. Dans un tel cas, la faible résistance thermique de ce matériau porterait la valeur Ψ du pont thermique à 0,143 W/(m.K) et la température de surface intérieure à 10 °C.



éléments d'ossature en bois
paille
enduit terre



- DÉNOMINATION : Raccord « Plancher-Mur ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Dans ce cas d'analyse, le raccord d'un plancher en bois massif avec un module en paille présente un contact direct avec les lisses hautes du module inférieur. Ces dernières étant en contact avec l'extérieur, un chemin direct entre l'ambiance extérieure et intérieure sans matériau isolant en tant que tel est identifiable.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K.

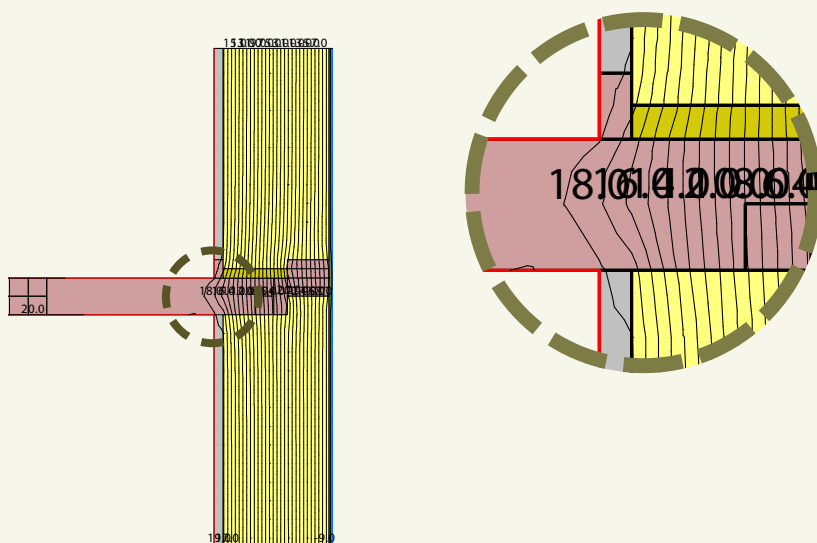
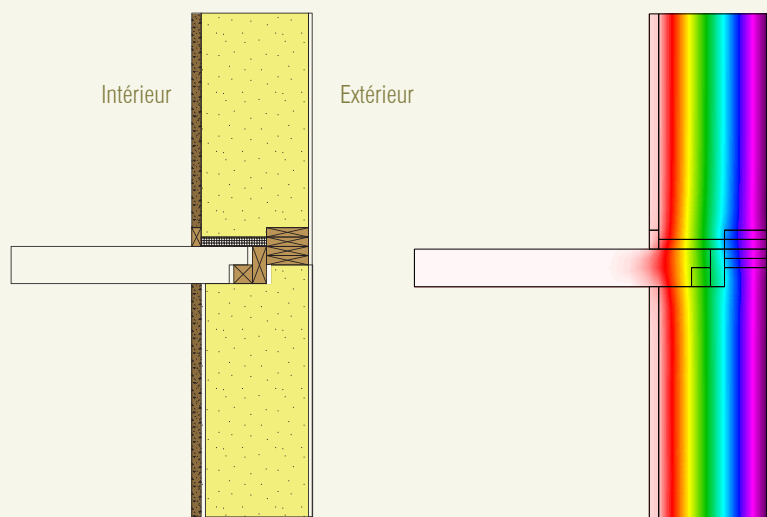
$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,047 \text{ W/m.K}$$

Observations

Du point de vue de la température de surface, aucun problème ne se pose. La température minimale calculée est de 19 °C.

Bien qu'il ne soit pas considéré comme un matériau isolant, le bois utilisé, qui plus est en épaisseur importante, ne représente pas une réelle faiblesse par rapport à la quantité de paille qui l'entoure.

Il en résulte une valeur Ψ calculée de 0,047 W/(m.K) qui, selon le projet, représentera un pont thermique négligeable ou à traiter, par exemple, par l'ajout d'un isolant en face extérieure (ex : un panneau de fibre de bois).



- DÉNOMINATION : Raccord « Plancher-Mur ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Variante du cas précédent, le détail actuel présente une pénétration plus franche des éléments en bois dans la paroi. Un isolant de type laine de chanvre, placé en périphérie du plancher est utilisé dans le but d'atténuer un éventuel pont thermique.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K

$\Psi_{\text{calculé}}$: 0,081 W/m.K

Observations

Du point de vue de la température de surface, aucun problème ne se pose. La température minimale calculée est de 18 °C.

La présence de l'isolant en périphérie du plancher ne se révèle pas être l'élément d'amélioration majeur du pont thermique. En effet, le remplacement de cet isolant par un élément en bois de même nature que le plancher corrige la valeur Ψ du pont thermique de 0,081 W/(m.K) à 0,090 W/(m.K). La variation n'est donc pas importante.

En opposition au cas précédent, les éléments du plancher se retrouvent cette fois entourés de pièces de bois de même nature réduisant davantage la proximité du matériau isolant et, localement, l'épaisseur totale de la paroi.

La valeur Ψ calculée, supérieure au cas précédent, s'exprime par le cumul de ces deux paramètres.

RACCORD « MUR-TOITURE

- DÉNOMINATION : Raccord « Mur-Toiture ».
- ORIGINE DU DÉTAIL : Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Cas typique du raccord entre un mur et une toiture. Les deux parois sont isolées en ballots de paille mais disposent d'une proportion de bois différente.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi verticale est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit terre	0,7 W/m.K	40 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,076 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,152 W/m².K.

De l'intérieur vers l'extérieur, la toiture est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,080 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,159 W/m².K.

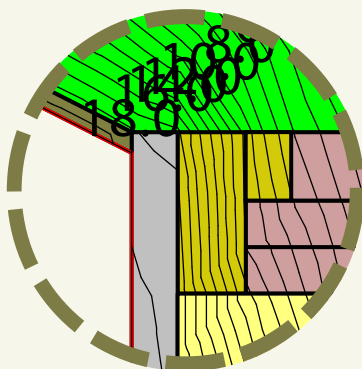
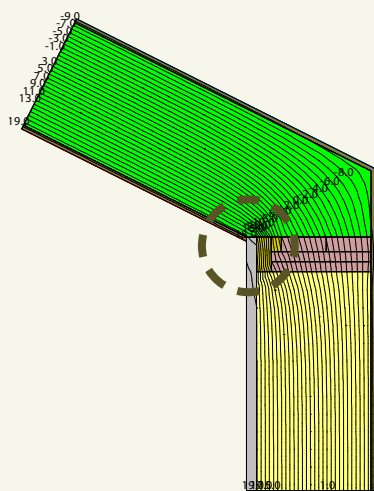
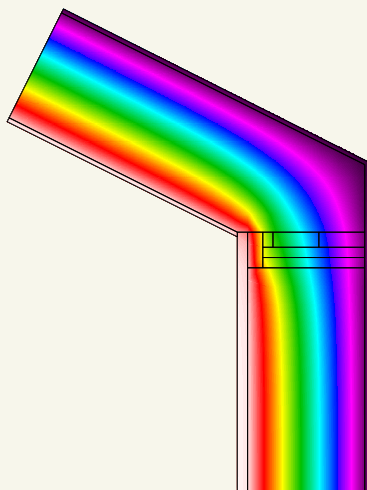
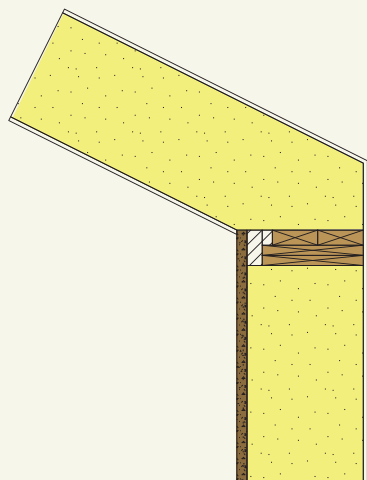
Au droit du raccord entre la toiture et la paroi verticale, un isolant d'origine végétale ($\lambda = 0,04$ W/(m.K)) complète le détail côté intérieur.

$$\Psi_{\text{calculé}} : -0,054 \text{ W/m.K}$$

Observations

Du point de vue de la température de surface, aucun problème ne se pose. La température minimale calculée est de $\sim 18^\circ\text{C}$.

La valeur Ψ négative se justifie en partie par une interruption très réduite de l'isolant au droit du raccord mais surtout par la géométrie du nœud constructif. En effet, ce type de configuration implique que le calcul des déperditions des parois entourant le pont thermique est surestimé. Dès lors, le calcul du Ψ implique une correction de ces déperditions par une valeur négative.



- DÉNOMINATION : Raccord « Toiture ».
- ORIGINE DU DÉTAIL: Paille-Tech SCRL.

Description et composition du nœud constructif

Détail propre à la mise en œuvre des modules Paille-Tech, les parois de la toiture se rejoignent au faîte et reposent sur un ensemble d'éléments structurels en bois. Un matériau isolant en fibres végétales est mis en œuvre en compression entre chaque module et est également inséré pour combler les éventuels vides au faîte.

De l'intérieur vers l'extérieur, la toiture est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,080 W/m.K	460 mm
Panneau de contreventement	0,09 W/m.K	16 mm
		492 mm

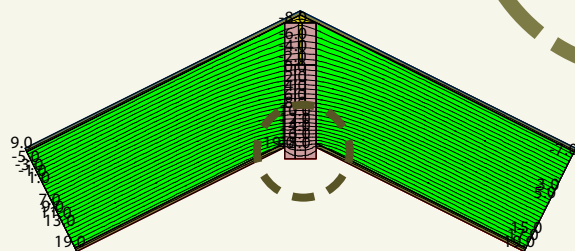
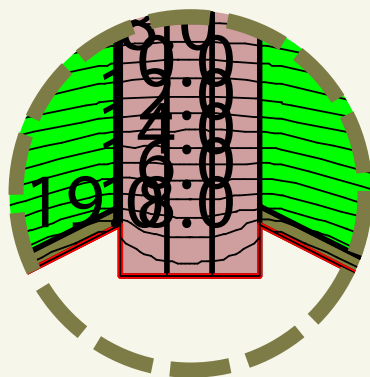
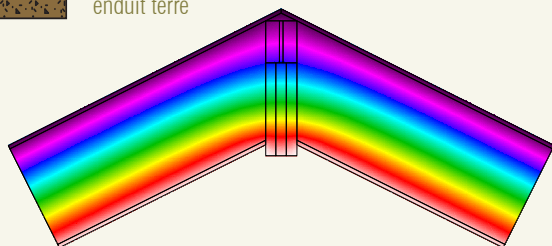
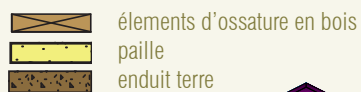
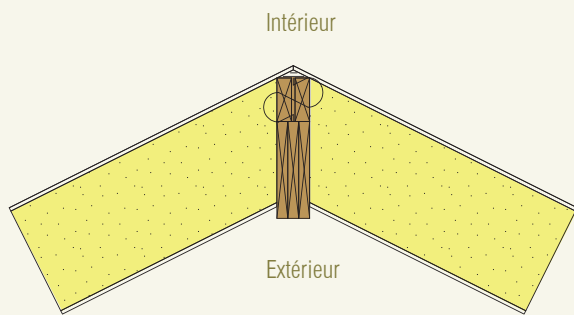
Valeur U de la paroi : 0,159 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : - 0,042 \text{ W/m.K}$$

Observations

Du point de vue de la température de surface, aucun problème ne se pose. La température minimale calculée est de $\sim 18^\circ\text{C}$.

Le nœud constructif est ici géré comme il se doit. La couche isolante n'est interrompue que du côté intérieur par des éléments en bois. La géométrie du détail participe une fois de plus à l'obtention d'une valeur Ψ favorable.



- *DÉNOMINATION* : Construction GREB Cas 1.
- *ORIGINE DU DÉTAIL* : aPROpaille.

Description et composition du nœud constructif

Les trois variantes suivantes représentent un cas particulier du système constructif « GREB ». Dans ce mode de construction, les ballots de paille sont insérés les uns contre les autres dans une double ossature bois constituées de montants ponctuels de part et d'autres de la paroi en paille. La particularité de ce système repose sur la mise en œuvre d'un enduit de terre-paille des deux côtés de la paroi, dans l'épaisseur des éléments de l'ossature.

La littérature met parfois en garde sur les risques de ponts thermiques liés à ce système¹. Dans le cadre de la recherche, il est apparu intéressant de vérifier les risques encourus par une mauvaise mise en œuvre des ballots et des enduits de corps, le tout dans une approche thermique uniquement.

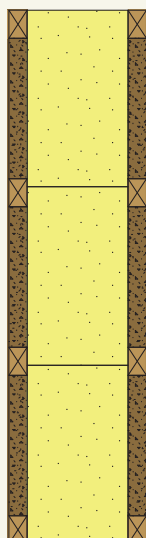
Ce premier cas présente la technique «GREB» telle qu'elle doit être mise en œuvre. Les ballots sont jointifs et l'enduit ne pénètre pas la couche isolante. Aucun pont thermique n'est calculé, la simulation «THERM» est uniquement réalisée pour visualiser le gradient de température originale, à comparer avec les cas suivants.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

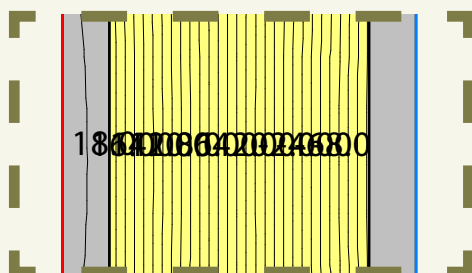
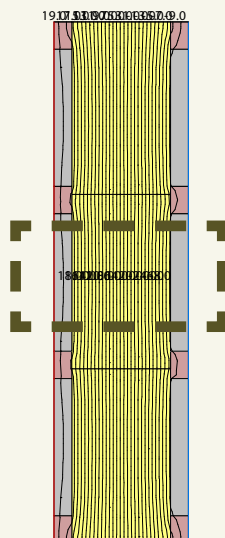
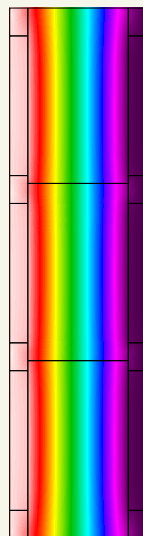
Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit de terre entre éléments de l'ossature bois	0,7 W/m.K	65 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,072 W/m.K	360 mm
Enduit de terre entre éléments de l'ossature bois	0,7 W/m.K	65 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,185 W/m².K.

1. 2009, Bruce King et André de Bouter, *Concevoir des bâtiments en bottes de paille*, Édition Eyrolles,



éléments d'ossature en bois
paille
enduit terre



- DÉNOMINATION : Construction GREB Cas 2.
- ORIGINE DU DÉTAIL : aPROpaille.

Description et composition du nœud constructif

Le cas présent suppose une mauvaise mise en œuvre des ballots impliquant un vide de 3 cm entre deux d'entre eux. L'enduit de terre, coulé derrière un coffrage, est supposé assez liquide que pour pénétrer la couche isolante de 10 cm de part et d'autre de la paroi.

La zone d'air emprisonné entre le ballot et l'enduit est considérée comme étant une lame d'air faiblement ventilée. Un $\lambda_{\text{équivalent}}$ est obtenu via le document de référence NBN B 62-002.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit de terre entre éléments de l'ossature bois	0,7 W/m.K	65 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,072 W/m.K	360 mm
Enduit de terre entre éléments de l'ossature bois	0,7 W/m.K	65 mm
		516 mm

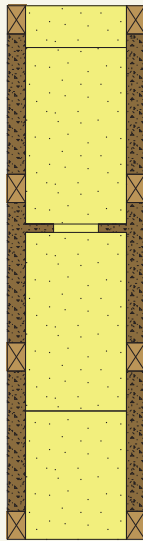
Valeur U de la paroi : 0,185 W/m².K.

$$\Psi_{\text{calculé}} : 0,034 \text{ W/m.K}$$

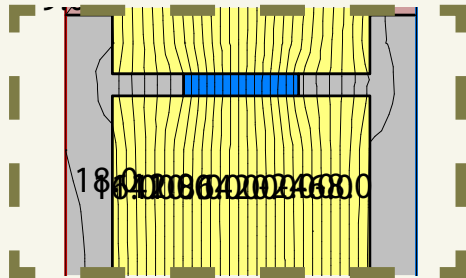
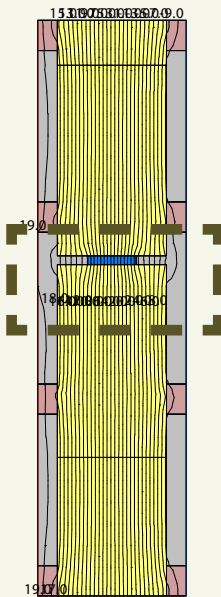
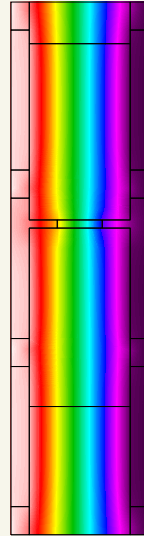
Observations

La valeur Ψ est ici donnée uniquement à titre indicatif. La configuration du nœud constructif ne permettant pas de réellement considérer celui-ci comme un pont thermique.

Du point de vue des températures de surface, on observe une diminution de la température à peine perceptible par rapport au cas de base. Du point de vue thermique, cette configuration ne pose donc pas problème.



 éléments d'ossature en bois
 paille
 enduit terre



- *DÉNOMINATION* : Construction GREB Cas 3.
- *ORIGINE DU DÉTAIL* : aPROpaille.

Description et composition du nœud constructif

Dans ce cas, la situation considérée comme problématique est représentée. L'enduit est appliqué en plus grande quantité impliquant un remplissage total de la cavité créée entre les deux ballots de paille. Un contact direct entre l'ambiance extérieure et intérieure est dès lors possible par cette tranche d'enduit.

De l'intérieur vers l'extérieur, la paroi est composée comme suit :

Composition des parois	λ [W/m.K]	Épaisseur
Enduit de terre entre éléments de l'ossature bois	0,7 W/m.K	65 mm
Ossature bois et remplissage paille	0,072 W/m.K	360 mm
Enduit de terre entre éléments de l'ossature bois	0,7 W/m.K	65 mm
		516 mm

Valeur U de la paroi : 0,185 W/m².K.

$\Psi_{\text{calculé}}$: 0,046 W/m.K

Observations

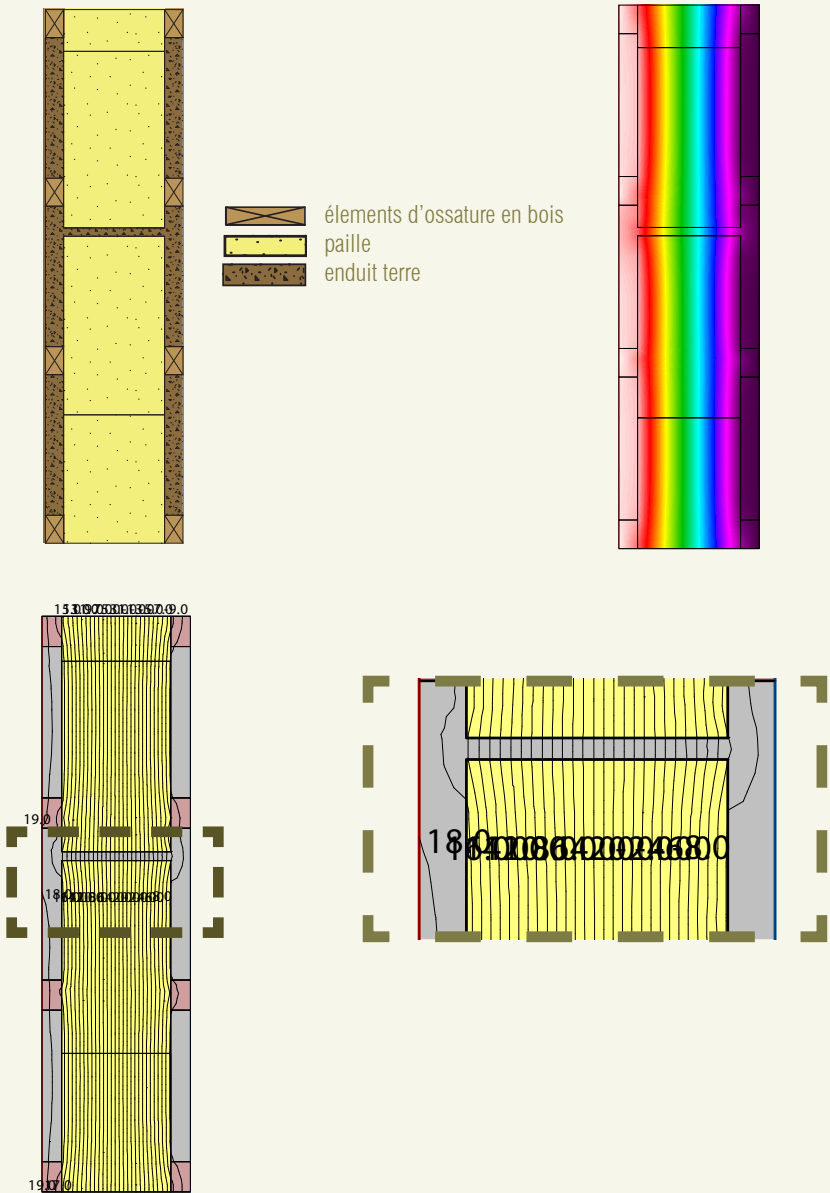
La valeur Ψ est ici donnée uniquement à titre indicatif. La configuration du pont thermique pourrait permettre à ce dernier d'être plutôt considéré comme un pont thermique ponctuel et non linéaire. Un calcul 3D est recommandé pour la personne qui désire réellement connaître la performance thermique de ce détail.

Une diminution de la température de surface est toujours perceptible mais ne provoque pas pour autant de problème de condensation en surface. Un écart de 3 cm entre deux ballots, comblé par de l'enduit, ne semble donc pas être un réel problème pour la paroi.

Si cette observation est valable d'un point de vue thermique, elle se doit d'être également considérée et étudiée d'un point de vue hygroscopique.

En effet, selon la perméabilité à la vapeur de l'enduit et son coefficient d'absorption d'eau, un phénomène de transfert d'eau à l'état gazeux ou liquide pourrait avoir lieu. Dans le premier cas, le gradient de température ne semble pas suggérer qu'une condensation est possible en surface. Mais le logiciel « THERM » ne tient pas compte de l'évolution de la conductivité thermique des matériaux en fonction de leur teneur en eau. Ce point reste donc encore à éclaircir.

Seul le transfert d'eau à l'état liquide pourrait représenter un réel risque pour la paroi si la quantité d'eau côté extérieur se révélait être conséquente. Une fois de plus, « THERM » n'est pas un logiciel adapté à l'étude de ce type de cas.



Conclusion

Un ensemble de raccords les plus courants dans la construction a été analysé d'un point de vue thermique via le logiciel « THERM ». Chacun d'entre eux présente un bon résultat en ce qui concerne la température de surface intérieure, celle-ci évoluant entre 15 °C et 19 °C selon les cas et pour des températures intérieure et extérieure de respectivement 20 °C et - 10 °C. Un manque à combler est très certainement l'impossibilité de réaliser ces calculs dans des conditions dynamiques, où les températures de surface intérieures pourraient varier plus sensiblement. Cependant, vu les résultats obtenus dans des conditions statiques déjà très défavorables (- 10 °C en extérieur), il est prudent de considérer que les résultats annoncés dans cette étude permettent de se situer du côté de la sécurité.

Les valeurs Ψ calculées le sont à titre informatif et dépendent de la configuration précise des nœuds constructifs illustrés ainsi que des matériaux considérés pour les simulations. Selon l'objectif énergétique recherché, l'auteur de projet décidera de reproduire les détails techniques présentés ci-dessous ou d'améliorer ceux-ci afin d'atteindre une meilleure performance thermique. Il convient en effet de conserver à l'esprit que les ponts thermiques analysés étant de type « linéaires », certaines valeurs Ψ paraissent dérisoires à l'échelle d'un bilan énergétique, mais peuvent tout de même peser dans la balance lorsque celles-ci sont multipliées par la distance sur laquelle elles s'appliquent. L'exemple typique d'un pont thermique périmétrique (raccord « mur-dalle de sol » sur tout le périmètre du bâtiment) ou d'un pont thermique de mise en œuvre du châssis (sur la totalité du périmètre de celui-ci) peuvent représenter plusieurs Wh/(m².an) s'ils sont mal étudiés. Un résultat handicapant pour certains projets qui viseraient une performance énergétique élevée.

Un des grands avantages de la construction en paille mis en avant par cette étude est la faible différence de performances thermiques entre les matériaux principaux mis en œuvre. Le bois et la paille représentent plus de 90 % de la composition de la paroi sur une épaisseur importante et leur conductivité thermique relativement proche (bois : 0,13 W/(m.K), paille : 0,072 W/(m.K)) à l'échelle des autres matériaux généralement utilisés dans la construction permet l'obtention d'une paroi dans laquelle des différences de température locales ne se marquent pas de manière significative lorsqu'un des matériaux effectue une percée dans le second (ex : un élément en bois traversant la totalité de la paroi).

ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Quel(s) impact(s) un matériau de construction peut-il avoir sur l'environnement ? Les éléments de réponse à cette question proviennent généralement d'études approfondies tenant compte des processus d'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication du matériau, des étapes de fabrication en elles-mêmes, mais également du transport, de la mise en œuvre et des hypothèses relatives à la fin de vie de ce matériau. Ces études sont appelées des « analyses de cycle de vie (ACV) » et permettent, pour chacune des étapes de vie du matériau (du « berceau à la tombe »), de quantifier les impacts environnementaux qui en découlent.

Ce chapitre tend à suivre cette voie pour les matériaux « paille » et « enduit » sur base d'une paroi type produite par l'entreprise Paille-Tech, partenaire de la recherche, et d'un monitoring complet de leur processus de fabrication.

CONCEPT ET DÉFINITIONS

Une évaluation environnementale d'un produit doit, dans la mesure du possible, tenir compte de toutes les étapes de son cycle de vie. Dans ce domaine, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est l'outil le plus abouti et le plus largement utilisé. Sa pratique et sa diffusion actuelles contribuent à en faire un instrument de plus en plus performant et reconnu.

Le cycle de vie reprend les phases consécutives et liées d'un système de produits, de l'extraction de matières premières à la fin de vie en passant par la fabrication, le transport, les achats, l'utilisation et le tri et l'élimination finale. Pour chaque étape du cycle de vie, il faut réaliser un bilan matière et énergie.



Fig. 99 : Schéma du cycle de vie d'un matériau.

Ces entrants et ces sortants sont ramenés par calcul à l'«unité fonctionnelle» du produit. L'unité fonctionnelle (UF) représente le service offert par le produit dont l'analyse du cycle de vie est réalisée. Des produits répondant à une même fonction peuvent donc être comparés selon cette UF.

Le cycle de vie d'un produit de construction se déroule en 5 étapes : sa production, son transport, sa mise en œuvre, sa vie en œuvre, sa fin de vie.

Le bilan environnemental d'un produit, dans une perspective de cycle de vie, repose premièrement sur l'inventaire et la quantification de tous les flux entrants et sortants du système considéré. Après, la deuxième étape

consiste à agréger et caractériser les flux sous formes d'indicateurs d'impacts environnementaux.

Au travers des indicateurs, les impacts des différentes substances émises sont exprimés en fonction de l'impact d'une substance dite de référence, spécifique à l'indicateur analysé. 7 seront utilisés dans le cadre de cette étude¹¹ :

- *La disparition/raréfaction des ressources abiotiques*
(unité représentative : le kg d'antimoine équivalent).
Cet indicateur représente l'épuisement des ressources naturelles non vivantes telles que le minerai de fer, le pétrole,... en fonction des réserves disponibles et consommées.
- *Le changement climatique*
(unité représentative : le kg de CO₂ équivalent).
Les émissions résultantes d'activités humaines ont un impact sur l'absorption des radiations thermiques par l'atmosphère. En résulte l'effet de serre et donc une modification de la température au niveau de la surface terrestre.
- *La destruction de la couche d'ozone*
(unité représentative : le kg de CFC-11 (CCl₃F) équivalent).
Cet indicateur mesure l'impact des émissions découlant des activités humaines sur la couche d'ozone qui s'amincit. Or, la couche d'ozone agit comme un filtre solaire. Son amincissement induit donc une proportion plus élevée de rayon UV-B atteignant le sol.
- *Formation de photo-oxydant*
(unité représentative : le kg d'éthylène équivalent).
Il s'agit de la formation de composés oxydants tels que l'ozone troposphérique par réaction photochimique, ceux-ci pouvant avoir un impact sur l'homme (irritation et problème respiratoire) et sur l'environnement (formation de smog).
- *L'acidification*
(unité représentative : le kg de SO₂ équivalent).
L'émission de composés acidifiants a un impact aussi bien sur l'écosystème que sur les bâtiments. Il s'agit des pluies acides qui

11. L'indicateur relatif à la toxicité humaine fait encore l'objet de discussions. Etant donné ce manque de consensus scientifique, nous avons choisi de ne pas le présenter dans le cadre de cette étude.

apparaissent lorsque les oxydes d'azote et de soufre s'associent à l'humidité de l'air. Transportés loin de leur source, ils peuvent être précipités sous forme de pluie mais aussi de neige, de brouillard ou encore sous forme sèche. Ces précipitations détruisent la végétation, acidifient les lacs, détériorent les édifices en pierre et corrodent les métaux.

- *L'eutrophisation*
(unité représentative : le kg de PO₄³⁻ équivalent).
Une richesse trop importante en éléments nutritifs (azote et phosphore) entraîne des répercussions néfastes sur le milieu aquatique et terrestre. En effet, l'accumulation de ces nutriments dans les eaux stagnantes provoque une prolifération des algues et une désoxygénation des eaux profondes.
- *L'écotoxicité*
(unité représentative : le kg de 1,4-dichlorobenzène équivalent).
Cet indicateur rend compte du risque d'impact des substances toxiques sur l'écosystème. Cette catégorie est toutefois subdivisée en sous-catégories distinctes dont 3 seront analysées dans ce rapport : l'écotoxicité en eau douce, l'écotoxicité marine et l'écotoxicité terrestre.

Et l'énergie grise ?

Certains logiciels d'analyse de cycle de vie compilent leurs résultats en un indicateur appelé « Energie grise » et correspondant à l'ensemble de l'énergie consommée par les différents processus de production d'un matériau. Ces analyses dites « monocritère » se focalisent sur un seul type d'impact environnemental et ne permettent pas de visualiser les transferts de pollution d'un impact environnemental vers un autre. Le logiciel « Simapro » utilisé dans le cadre de cette étude est un outil qui exploite plusieurs méthodes de calcul. La méthode de calcul utilisée dans le cas présent est la méthode « CML » dite multicritères. Cette méthode permet l'évaluation de l'incidence du produit (sur sa durée de vie) sur l'environnement au sens large : impact sur la couche d'ozone, eutrophisation, acidification, la santé humaine, la pollution terrestre ou maritime, etc.

Toutefois, parmi les indicateurs environnementaux détaillés on retrouve l'impact « Changement Climatique », exprimé en CO₂eq. Cet impact est directement lié à la consommation d'énergie des différentes étapes du cycle

de vie. Il s'agit généralement d'une image de l'énergie grise d'un matériau si on en exclut les phases d'utilisation et de fin de vie. Attention toutefois à l'interprétation de cet impact et de son lien direct avec l'énergie grise; il convient de déterminer comment sont considérés certains aspects, comme par exemple pour le cas qui nous intéresse, les puits de carbone (voir encart «le carbone biogénique des matériaux organiques») ci-après.

LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA PRODUCTION D'UN BALLOT DE PAILLE UTILISÉ COMME CONSTITUANT DE PAROI DE CONSTRUCTION

La paille : un déchet ?

Par convention, la paille n'est pas considérée comme un déchet de l'agriculture mais comme un co-produit. Le procédé de fabrication d'un cultivateur est en effet utile pour la production de paille mais aussi de grains. La paille ne peut donc être considérée comme un déchet de l'agriculture. Un déchet est, par définition, un résidu de processus de production, transformation ou utilisation que son détenteur destine à l'abandon. Or, outre ses fonctions en élevage, la paille est, pour l'agriculteur, un élément essentiel pour le maintien de la teneur initiale en matière organique et la structure du sol.

C'est ce point de vue qui avait été retenu lors de la première approche de la recherche portant sur l'analyse du cycle de vie d'une paroi en paille. L'objectif de la présente analyse est de comparer les résultats en termes d'impacts environnementaux selon les différentes façons de délimiter le système d'analyse de la paille. Plusieurs hypothèses ont ainsi été établies créant un panel de cas plus ou moins pressurants pour la paille en tant que matière première d'un produit de construction.

Ce qui caractérise les données relatives à la paille dans une analyse de cycle de vie, ce sont les allocations des entrants (engrais, pesticides, etc.) et sortants (émissions atmosphériques, émissions dans l'eau ou le sol, etc.) liés à la partie culturale de la paille. Les différentes délimitations du système qui seront analysées dans le cadre de cette étude considèrent que :

- La paille est un pur déchet de l'agriculture : aucun impact de la partie culturale n'est alloué à la paille puisque ceux-ci sont entièrement imputés au grain. Le système démarre dans ce cas au stade de

la paille à l'andain et donc juste avant les étapes de ballotage et de transport vers le hangar. Cette paille peut donc être utilisée par ailleurs sans devoir considérer sa valeur nutritive pour le sol agricole.

- La paille est un sous-produit résiduel de l'agriculture valorisable par ailleurs pour autant que sa valeur nutritive soit compensée par des apports alternatifs d'azote, phosphore et potassium. Aucun impact de la partie culturale, hors quantités d'engrais compensatoires et le passage des machines servant à les épandre, n'est alloué à la paille puisque ceux-ci sont entièrement imputés au grain. Le système démarre dans ce cas au stade de la paille à l'andain et donc juste avant les étapes de ballotage et de transport vers le hangar.
- La paille est un co-produit de l'agriculture : les impacts de la partie culturale doivent donc être imputés, en partie, à cette quantité de paille issue de l'itinéraire agricole. Les coefficients d'allocation sont établis, par convention, selon les rendements agricoles et les prix de vente respectifs du grain et de la paille.

Si bon nombre d'ACV basent leur travail sur les informations disponibles dans des bases de données internationales (ex : KBOB, Ecolinvent, ...), ces données dépendent des études réalisées dans le pays d'origine et ne sont pas toujours cohérentes avec les méthodes pratiquées dans d'autres pays. C'est notamment le cas pour la paille ; les méthodes de production pratiquées en Suisse ou en France peuvent différer de celles pratiquées en Belgique.

Pour faire face à cette réalité, un inventaire de données complet spécifiquement pour la production de paille en Wallonie avait été réalisé en 2014 en collaboration avec le projet «ALT-4-CER» du Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) et la présente recherche «aPROpaille».

L'analyse a donc été réalisée en privilégiant les données primaires, collectées auprès des producteurs et grossistes. Les données manquantes ou non facilement accessibles ont été complétées par des hypothèses et des données secondaires, c'est-à-dire des données génériques ou théoriques disponibles dans la littérature ou des bases de données.

En ce qui concerne les quantités d'engrais compensatoires, celles-ci ont été estimées, proportionnellement aux rendements wallons, sur base des hypothèses de l'UNIFA (Union des Industries de la Fertilisation),

hypothèses utilisées également au travers de la Fiche de Déclaration Environnementale française d'un remplissage isolant en botte de paille. Il a donc été considéré l'apport d'un engrais vert venant compenser l'azote sur la superficie de culture et permettant de maintenir la structure du sol en limitant l'érosion notamment. Il a également été ajouté du P2O5 et du K2O.

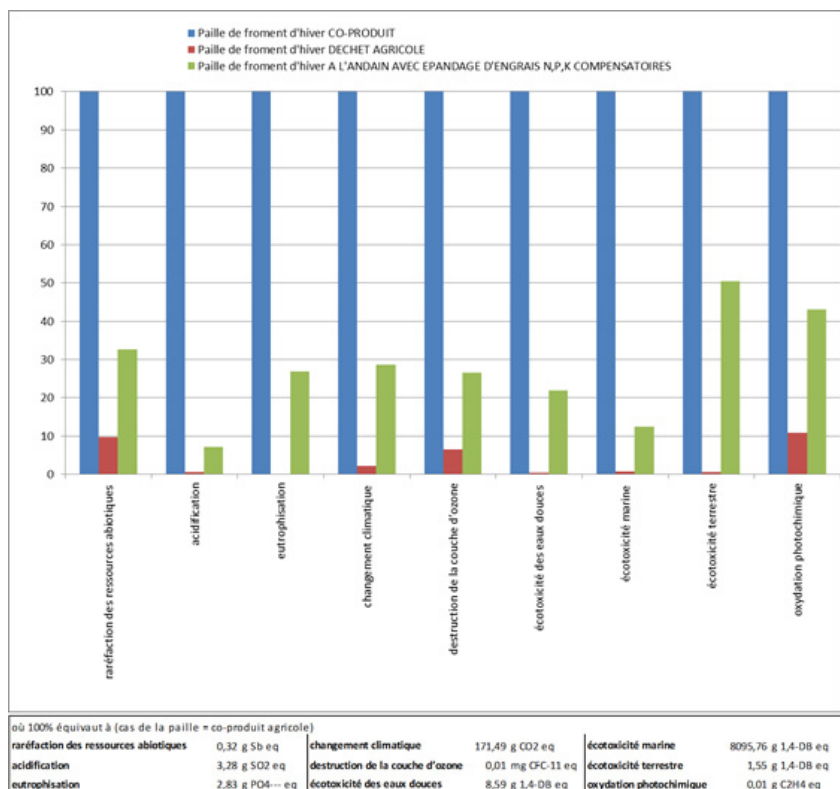


Fig. 100 : Caractérisation des impacts de la production d'un kilo de paille selon différentes options de statut de la paille.

La lecture de la figure 100 montre que les impacts de la fabrication d'un ballot de paille pour la construction sont pratiquement annihilés si aucune allocation précise des émissions liées à la partie culturale n'est réalisée. L'apport d'engrais compensatoires (avec considération de passage de machine agricole pour l'épandage) ne représente qu'environ un tiers des impacts globaux (la moitié en ce qui concerne l'écotoxicité terrestre).

Cela illustre l'importance des divers passages de tracteurs et autres machines agricoles, du travail préparatoires au travers des énergies fossiles nécessaires pour chacune des étapes de cultures et de fabrication des intrants, en particulier les engrais chimiques.

ANALYSE DES RÉSULTATS DE COMPARAISON DE MATÉRIAUX ISOLANTS

Le carbone biogénique des matériaux organiques

L'avantage des matériaux de construction d'origine agricole ou sylvicole réside dans le stockage du carbone biogénique dans la plante/arbre, qui va être mobilisé au sein de la paroi, ce qui génère un puits de carbone. Cependant, la totalité de ce carbone stocké est réémis dans l'atmosphère lors de la fin de vie du matériau (lors de sa décomposition, en compost ou en enfouissement par exemple, ou de son incinération) si celui-ci n'est pas recyclé.

En incinération, les scénarios modélisés par la communauté scientifique (incinération mixte, incinération de bois, incinération de textile) intègrent une certaine quantité de CO₂ parmi les émissions atmosphériques. Lors des processus d'incinération, en effet, il peut facilement être considéré que la totalité du carbone est relâché dans l'atmosphère sous forme de CO₂.

Il est cependant important de souligner que, actuellement, ce type de carbone (biogénique) n'a pas de facteur de caractérisation et n'est donc pas comptabilisé dans les impacts. Cela signifie que, en ce qui concerne les quantités de carbone biogénique émises par les scénarios, aucun impact n'y est donc lié. Le carbone fossile ou carbone considéré de manière générique, eux, sont bien caractérisés et ainsi pris en compte parmi les impacts. Les différents types de scénarios de déchets sont donc bien sur un même pied d'égalité.

Outre l'aspect « neutre » de ce puit de carbone (ce qui est stocké est réémis dans l'atmosphère en fin de vie du matériau), il existe une approche, peu mise en avant dans les analyses de cycle de vie, qui consiste à valoriser « l'effet tampon » du stockage de CO₂ dans la plante tout au long de sa durée de vie. Cette approche est discutée dans le « FOCUS » en fin de chapitre.

Les comparaisons qui suivent ont été établies en ne prenant en compte que la partie «production» du matériau et non les étapes de vie dès sa mise en œuvre.

Afin de placer les isolants sur un même pied d'égalité, la quantité de XPS, de ouate de cellulose et de paille nécessaire pour couvrir 1 m² de paroi et atteindre un U équivalent de 0.153 W/m²K a été évaluée. Ce sont les impacts liés à la production de ces quantités qui ont été comparés dans la Figure 3.

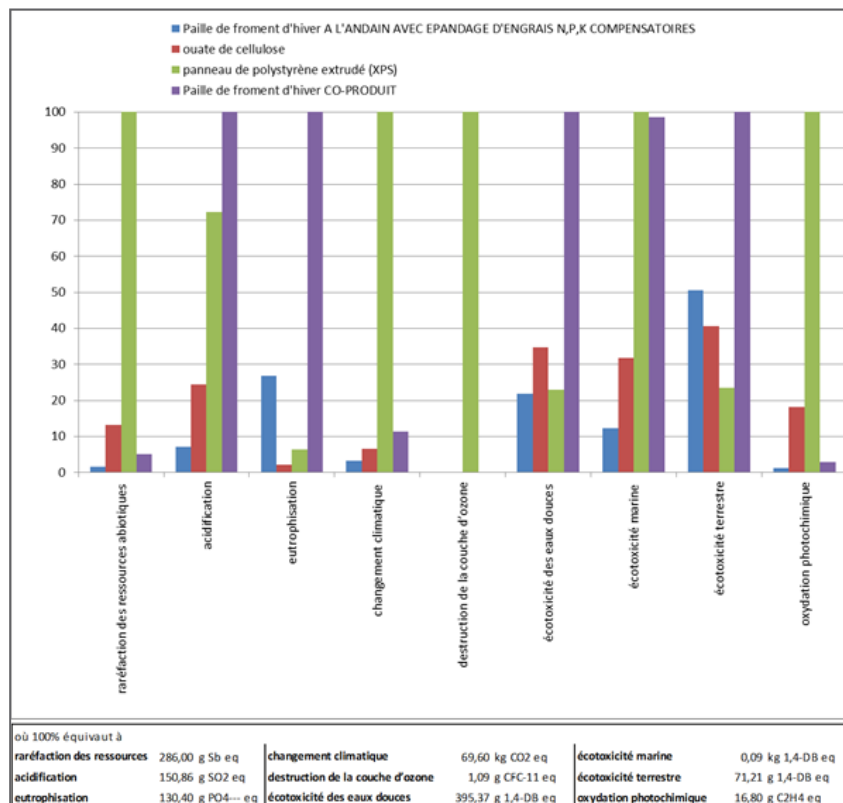


Figure 101 : Caractérisation des impacts de la production d'isolants nécessaires pour atteindre un facteur U de 0.153 W/m²K.

La figure 101 montre que la production de panneau de polystyrène extrudé est plus impactante au travers des émissions atmosphériques (participant

ainsi aux changements climatiques, à la destruction de la couche d'ozone et aux émissions photochimiques) et de l'épuisement des ressources naturelles dont les ressources fossiles principalement.

Comparativement, la production de ballot de paille affecte plus les ressources sol et eau en générant de l'eutrophisation et de l'écotoxicité au sein des milieux aquatiques et terrestres. Ce mauvais score est dû notamment à la production de la céréale en elle-même dès l'étape de génération des semences et de fabrication et apport d'engrais (engrais vert dans le cas de compensation de la perte nutritive).

Il est intéressant de souligner que, en ce qui concerne les isolants fabriqués à partir de cellulose ou de paille dont on n'a considéré comme étapes culturelles que celles liées à la compensation au travers d'engrais de substitution, les impacts s'élèvent au maximum à environ 50 % des impacts des autres isolants.

ANALYSE DES RÉSULTATS DE COMPARAISON DE PAROIS

Cette analyse plus approfondie est établie pour les parois suivantes :

- La paroi « Paille-Tech », intégrant la paille considérée soit comme co-produit soit comme résidu agricole valorisable ailleurs qu'en agriculture moyennant compensation nutritive.
- La paroi « ossature bois et ouate de cellulose », intégrant la cellulose telle que reprise dans la base de données génériques.
- La paroi « polystyrène extrudé et blocs de béton », intégrant le polystyrène extrudé tel que repris dans la base de données génériques.

L'unité fonctionnelle identifiée est constituée d'une paroi d'habitation de 5,3 mètres carrés, de performance d'isolation U de 0,153 W/m²K¹² pendant 50 ans.

Pour toute analyse de cycle de vie, il s'avère nécessaire d'exclure certaines catégories d'opérations dont la contribution au bilan complet

12. Calculé via le logiciel PEB 3.5.2.

est jugée mineure¹³. Dans le cas présent il s'agit entre autre : des infrastructures et biens d'équipements de Paille-Tech, des opérations de recherche et développement ayant conduit à la mise au point de la paroi, du transport des employés, des emballages, ...

Au niveau des hypothèses, celles-ci ont été établies pour plusieurs étapes de cycle de vie, pointons quelques points importants en lien avec la fin de vie.

- Il a été considéré un comportement du propriétaire du bâtiment menant à 50 % de matériaux triés, séparés et traités adéquatement alors que les 50 % restants partent vers un scénario classique de traitement de déchets, à savoir 73 % en incinération avec valorisation énergétique et 27 % en vrac en centres d'enfouissement technique.
- L'incinération avec valorisation énergétique permet de produire de la chaleur et de l'électricité (cogénération) qui ne doit pas être produite par ailleurs.
- L'acier suit une filière de recyclage spécifique.
- Le processus de valorisation agricole de la paille suit une filière de valorisation en litière puis sous forme d'effluents d'élevage épandus sur champs. Il tient compte des produits évités (les engrais qu'il n'est pas nécessaire d'épandre suite à la valorisation de la paille sur champs).

Description de la paroi à base de paille

Composition de la paroi à base de paille :

- Un panneau de contreventement en fibres de bois compressées de type « Agepan » de 16 mm d'épaisseur.
- Une ossature semi-traversante centrale en douglas de 180 mm d'épaisseur.
- 6 colonnes de ballots de froment placés de manière à obtenir une épaisseur d'isolation totale de la paroi de 460 mm d'épaisseur.
- Un cadre en bois lamellé-collé de type « Glulam » de 460 mm d'épaisseur.
- Un cadre servant de coffrage amovible pour l'enduit terre de 48 mm d'épaisseur.

13. En concordance avec la norme NF P01-010.

- Un enduit terre de masse de 50 mm d'épaisseur.
- Un enduit terre de finition de 20 mm d'épaisseur.

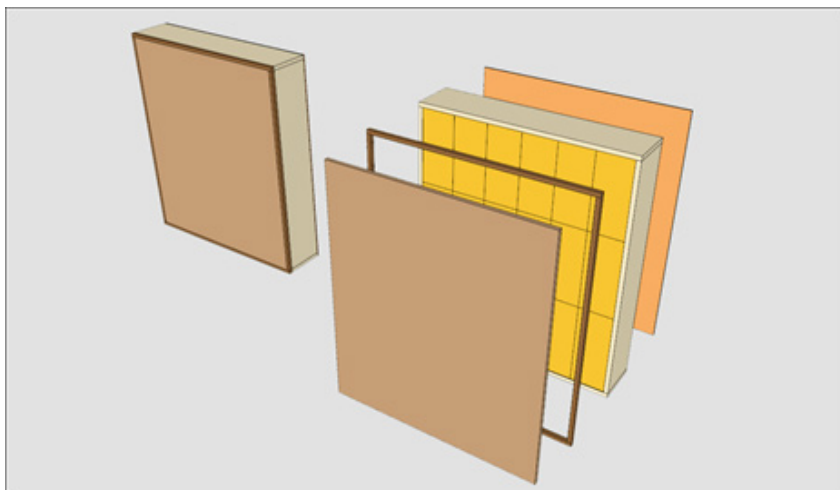


Figure 102 : Schéma d'une paroi à base de paille, type Paille-Tech.

Description de la paroi alternative « béton - XPS »

La première paroi alternative utilisée dans le cadre des comparaisons de système constructif de parois présente des caractéristiques équivalentes d'unité fonctionnelle, à savoir une paroi de 5,3 mètres carrés et de performance d'isolation U de 0,158 W/m²K¹⁴ pendant 50 ans.

La composition est la suivante :

- Un enduit de plâtre de 0,015 mètres d'épaisseur.
- Des blocs béton creux de 0,19 mètres d'épaisseur.
- Un joint de mortier de ciment sur la totalité de la paroi (16 % de joint) d'épaisseur de 0,19 mètres.
- Un isolant XPS de 0,18 mètres d'épaisseur.
- Des fixations de l'isolant en acier inoxydable, de densité équivalente à 7 900 kg/m³, de 50 mm et utilisées de manière à avoir 3 fixations par mètre carré d'isolant.

14. Calculé via le logiciel PEB 3.5.2.

Description de la paroi alternative « bois - cellulose »

La deuxième paroi alternative utilisée dans le cadre des comparaisons de système constructif de parois présente également des caractéristiques équivalentes en termes d'unité fonctionnelle, à savoir une paroi de 5,3 mètres carrés et de performance d'isolation U de 0,157 W/m²K¹⁵ pendant 50 ans.

La composition est la suivante :

- Des plaques de plâtre sur 0,015 mètres d'épaisseur.
- Un lattage de bois résineux de 0,02 mètres d'épaisseur.
- Une bande autocollante pour l'étanchéité à l'air de 7,11 mètres courants.
- Des panneaux OSB de 0,025 mètres d'épaisseur.
- Une ossature en bois de charpente résineux de 0,30 mètres d'épaisseur.
- Une isolation en flocons de cellulose de 0,30 mètres d'épaisseur.
- Des panneaux de fibres de bois (MDF) de 0,016 mètres d'épaisseur.

Comparaison des impacts liés au cycle de vie de ces parois alternatives

Les cycles de vie de ces parois tels que considérés ici n'intègrent pas l'étape de mise en œuvre. La fin de vie des parois est, elle, intégrée mais de manière à pouvoir être isolée du reste des résultats car sujette à discussion puisqu'elles sont basées sur des hypothèses globales de filière et de comportement des agents démantelant et se débarrassant des parois qui sont établies selon la situation actuelle technique et technologique de tri et traitement des déchets et les comportements moyens actuels des acteurs de la filière de construction.

15. Calculé via le logiciel PEB 3.5.2.

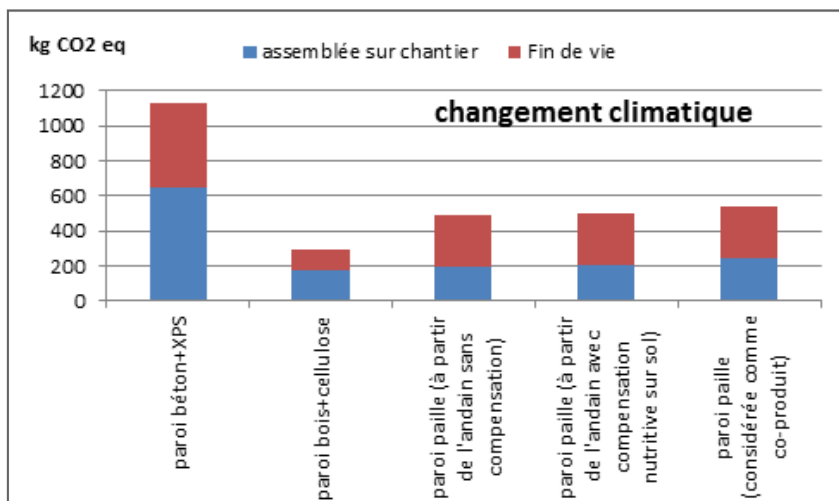


Figure 103 : Comparaison des impacts sur le réchauffement climatique de la production des différents types de parois.

Dans le cadre de l'indicateur relatif aux changements climatiques (figure 103), la paroi composée de blocs de béton et de polystyrène affiche le score le plus élevé en termes d'impacts. Ce niveau élevé provient essentiellement du polystyrène extrudé (176 kg de CO₂ éq.), des blocs de béton et, dans une moindre mesure, de la fabrication du mortier de ciment. Ces deux derniers éléments nécessitant la fabrication de ciment issu de clinker, fortement émettrice de gaz à effet de serre (153 kg CO₂ éq.) malgré les politiques environnementales de ce secteur industriel.

Dans le cas de parois à base de paille et de ouate de cellulose c'est principalement la fraction de bois (poutres en lamellé-collé, etc.) qui participent aux émissions néfastes en gaz à effet de serre et non la paille ou la cellulose. C'est ainsi que les impacts des parois à base de paille sont similaires, quelle que soit la façon de considérer celle-ci (co-produit ou non).

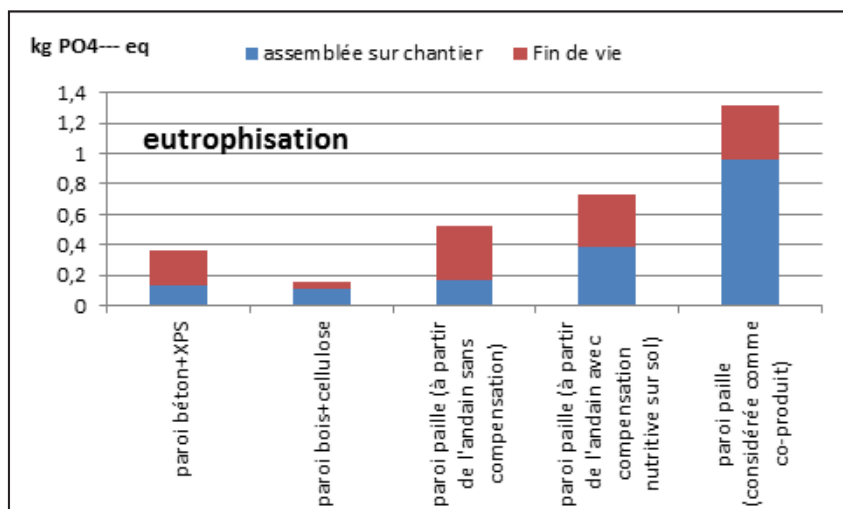


Fig. 104 : Comparaison des impacts sur l'eutrophisation de la production des différents types de parois.

En ce qui concerne l'indicateur «eutrophisation» (figure 104), illustrant l'impact en termes d'apports en éléments nutritifs (azote et phosphore) au sein des milieux aquatiques et terrestres, la paroi en paille est nettement plus dommageable que les parois alternatives. Ce mauvais score est dû à la production de la céréale en elle-même dès l'étape de génération des semences et, dans le cas de la compensation nutritive, au recours d'engrais vert. La valorisation de la paille sur champ en fin de vie participe également à cette valeur plus élevée en termes d'eutrophisation potentielle.

Toutes ces étapes agricoles consistent en effet à un dépôt direct sur le sol de matières contenant de l'azote et du phosphore. Contrairement aux autres matières pour lesquelles ce dépôt se fait de manière plus diluée au travers du cycle de l'eau (par les pluies, etc.).

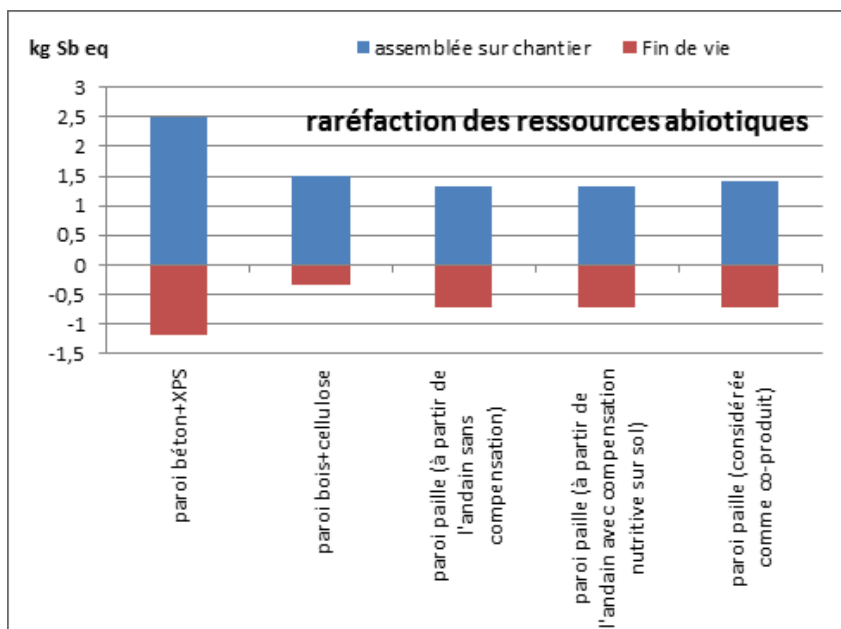


Fig. 105 : Comparaison des impacts sur la raréfaction des ressources abiotiques de la production des différents types de parois.

En ce qui concerne la raréfaction des ressources abiotiques (figure 105), la paroi à base de polystyrène extrudé est relativement plus impactante en raison de l'étape de fabrication du polystyrène en lui-même. La fabrication d'XPS est en effet fortement consommatrice de ressources fossiles (en tant que matière première mais aussi durant le procédé de fabrication).

Les valeurs négatives en termes d'impacts permettent de visualiser l'intérêt des valorisations des matériaux en fin de vie. Une valorisation énergétique, par exemple, permet d'éviter la production d'électricité par ailleurs selon le mix énergétique local.

Les autres parois, composées, entre autres, de bois, sont relativement similaires en termes d'épuisement des ressources naturelles non vivantes. Leurs impacts sont issus de la fabrication des colles et autres composants tels que les résines des panneaux MDF ou OSB notamment.

COMPARAISON INTERNATIONALE

Les analyses d'impacts environnementaux de la fabrication de ballots de paille servant d'éléments constructifs se réalisent de plus en plus. Cependant, le constat qui peut être fait à la lecture des résultats est que, à l'image des analyses de cycle de vie d'autres matériaux, celles-ci sont difficilement comparables.

D'une part, les délimitations du système et donc le statut attribué à la paille (co-produit ou non) influence fortement les résultats en termes d'indicateurs. Cette divergence est illustrée, par exemple, par l'écart entre les indicateurs de la FDES française (dans laquelle le système commence à la paille à l'andain, avec compensation nutritive, comme pour une des cas wallons étudiés dans le cadre de cette étude) et de l'ACV de la paille considérée comme un co-produit.

D'autre part, à délimitation de système similaire, les pratiques culturales influencent également fortement les résultats. En effet, le travail préparatoire du sol, le nombre de passage de machines agricoles et le type de machine utilisée ainsi que les semences et engrais sont spécifiques aux régions agricoles. De même, les vecteurs énergétiques utilisés varient d'un pays à l'autre (certains se tournent plus vers des énergies renouvelables, d'autres ont toujours recours à des énergies fossiles, d'autres encore à des énergies nucléaires). Et la production et utilisation de ces vecteurs énergétiques différents génèrent des impacts plus ou moins divergents selon l'indicateur considéré (raréfaction des ressources fossiles, changement climatique, etc.). Ces écarts sont illustrés, par exemple, par les différences entre les résultats de l'Allemagne et de cette étude (dans le cas de la paille considérée comme co-produit puisque c'est cette option qui est utilisée par l'Allemagne).

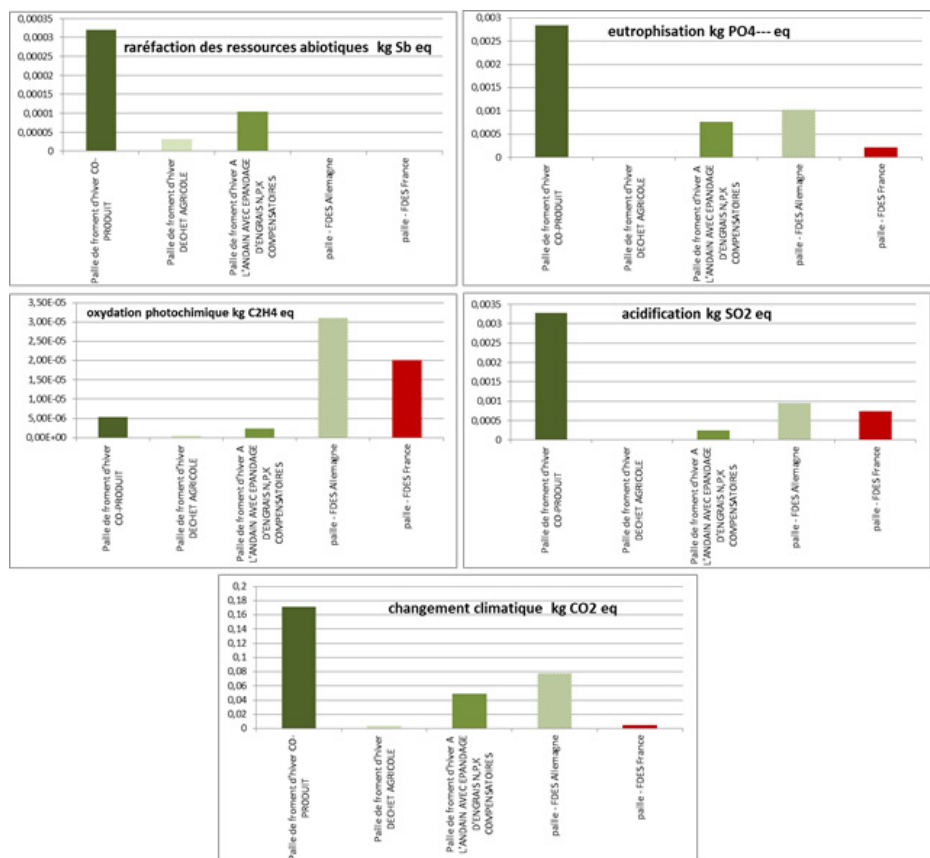


Fig. 106 : Comparaison des impacts d'un ballot de paille pour la construction selon différentes approches d'ACV.

CONCLUSION

Il avait déjà été constaté que la mixité des sources de données apportait des divergences de précision engendrant un biais dans les résultats de comparaison ainsi que d'analyse du module paille en lui-même.

Cette fois, l'analyse a montré que la comparaison des résultats d'analyse de cycle de vie d'un ballot de paille utilisé comme élément constructif et, par conséquent, les résultats en termes d'impacts environnementaux d'une paroi à base de paille n'était pas pertinente. En effet, les résultats

sont trop dépendants des hypothèses de départ et d'allocation des impacts liés à la partie culturelle. Ils sont également spécifiques à des pratiques culturelles et donc à la localisation de la production de la paille.

Deuxième constatation, les résultats de chacune des parois divergent selon le milieu récepteur des impacts environnementaux. Si la paroi à base de paille émet plus de polluants éco-toxiques ou eutrophisants dans sa phase de fabrication et mise en œuvre sur chantier que les parois alternatives (environnement local), la fabrication de la paroi à base de polystyrène extrudé et blocs de béton est nettement plus émettrice de gaz à effet de serre (environnement global). A ce stade d'étude, la justification du choix pour un type de construction ou un autre ne peut donc se faire qu'au regard d'un indicateur spécifique mais pas de manière globale.

Face à ces constats, quelques pistes d'amélioration peuvent être identifiées, visant à préciser les analyses de cycles de vie d'une paroi à base de paille. Nous pointerons tout particulièrement :

- L'ajout des étapes de manutention et de mise en œuvre de chacune des parois.
- La prise en compte du carbone biogénique en intrant et en sortant est une source de discussions au sein de la communauté des ACV. Il faudrait réfléchir à l'intégration de ce carbone et identifier les modifications des impacts qui y sont liés. Ce carbone est en effet important lorsqu'il s'agit de matériaux organiques tels que la paille ou le bois.
- Les procédés de fins de vie, tels que l'incinération, ne sont pas spécifiques dans la plupart des scénarios. Il serait intéressant de s'interroger sur la possibilité de créer des procédés propres à la paille ou aux autres matériaux.

FOCUS : L'EFFET « TAMPON » DE LA PAILLE

Dans le domaine des analyses de cycle de vie (ACV), il est fréquemment fait référence au carbone biogénique (voir ci-dessus), ce fameux «CO₂» stocké dans la plante lors de sa croissance et restitué dans l'atmosphère lors de sa fin de vie (via incinération ou décomposition). Il est souvent admis que ce bilan ne soit pas mis en avant dans l'analyse, ce dernier étant finalement neutre.

Ce mode de calcul n'est pas faux en soi, mais il a tendance à négliger l'effet «tampon» que la paille, ou tout autre matériau de nature similaire, peut apporter dans son rôle de stockage de CO₂. Bien que cette propriété de la paille ne soit pas la solution aux problèmes d'émission de CO₂ à l'origine, elle permet néanmoins de mettre en avant une solution de stockage de ce CO₂ sur le long terme, si elle est valorisée dans la construction.

L'explication vient de la durée de vie des bâtiments actuels ; 50 années sont considérées dans l'approche théorique d'une ACV, mais la réalité du terrain peut pousser cette durée bien au-delà. Pendant 50 ans au minimum, du CO₂ sera stockés dans les ballots de paille utilisés pour isoler le bâtiment en question. En bout de course, ce CO₂ sera, restitué dans l'atmosphère mais de manière lissée dans le temps, la durée de vie de chacun des bâtiments étant variables.

La petite étude ci-dessous tend à chiffrer de manière approximative cet effet tampon afin de mieux cerner l'importance de celui-ci. Les hypothèses sont soit issues du cadre défini pour les études similaires dans le vadémécum 1, soit issues de l'étude ACV réalisée pour le présent vadémécum. Pour rappel, pour le lecteur, ces hypothèses sont les suivantes :

- 1,34 kg de CO₂ sont stockés par kg de paille¹⁶.
- 14 060 kg de paille sont nécessaires pour isoler une maison type.
- Cette maison type présente 234 m² de parois à isoler (murs et toiture compris).
- Les ballots sont placés de telle manière qu'ils représentent une couche isolante de 46 cm d'épaisseur (face apparente de 0,36*0,8 m²).

Compte tenu des hypothèses ci-dessus, il est déjà possible de calculer que **18 840,4 kg de CO₂** (18,84 Tonnes) sont stockés dans une habitation type et ce sur une durée de **50 ans**, soit **376,8 kg de CO₂/an**.

Si l'on se réfère aux hypothèses de l'analyse «Le potentiel «paille pour la construction» en Belgique» du Vadémécum n°1, et que l'on considère deux scénarios dans lesquels respectivement 5 % et 40 % de la paille disponible sont alloués à la construction, il est possible de chiffrer un effet «tampon» «pessimiste» (5%) et «optimiste» (40 %).

16. Source : EPD *Baustroh* - FASBA – 10/10/2014 selon l'ISO 14025 et EN 15804.

Quantité d'habitations réalisables en fonction du « coefficient paille ».

« Coefficient Paille »	Nbre d'habitations réalisables
5 %	1 200
40 %	9 815

En croisant les chiffres du Tableau 1 ci-dessus avec les quantités de CO₂ calculées auparavant, il est possible de déterminer qu'un effet tampon « **pessimiste** » permettrait de stocker **452 Tonnes de CO₂/an** ou **22 608 Tonnes sur 50 ans**. Un effet tampon « **optimiste** » quant à lui peut stocker jusqu'à **3 698 Tonnes de CO₂/an** ou **184 918 Tonnes sur 50 ans**.

Les statistiques du « Bilan énergétique wallon » (ICEDD-2005) nous apprennent qu'une habitation moyenne en Wallonie est responsable de l'émission de +/- 5,2 Tonnes d'équivalent CO₂ chaque année. L'usage de la paille comme matériau d'isolation thermique dans une habitation moyenne (234 m² de parois isolées par 46 cm de paille), permettrait donc une économie annuelle de 7,2 % d'équivalent CO₂ par habitation, sans tenir compte du matériau bois utilisé également dans la paroi de référence et qui, lui aussi, stocke du carbone.

APPROCHE ÉCONOMIQUE

« Combien coûte une maison en paille ? »

La question, inévitable, du coût de la construction en paille est ici évaluée grâce à un modèle comparatif de parois à performance thermique équivalente. Le coût de la construction en paille, sous diverses formes, est ainsi comparé à celui d'autres systèmes constructifs, plus répandus, tout en se basant sur des documents de références pour les architectes, tel que le bordereau de prix unitaires (BPU).

INTRODUCTION

L'introduction d'un système constructif particulier dans un secteur déjà abondamment fourni se traduit irrémédiablement par une question redondante : « quel est le coût de ce système ? ». Cette question est d'autant plus pertinente lorsque l'on constate que la construction en paille peut se résumer, sur certains chantiers, à l'utilisation de matériaux d'origine essentiellement locale (ex : terre, paille).

Afin d'apporter un début de réponse à une question très fréquemment posée, le chapitre suivant portera sur l'analyse du coût au m^2 de deux parois standards différentes en comparaison à une paroi en paille d'origine « industrielle » (préfabrication en entreprise), une seconde de type « auto construction » (GREB) et une troisième d'origine « industrielle » également (préfabrication en entreprise). Les parois standards reflètent deux modes constructifs rencontrés assez souvent dans les constructions neuves d'aujourd'hui.

Les prix pratiqués dans le secteur de la construction étant très différents d'une entreprise à l'autre, il a été souhaité faire usage, chaque fois que cela était possible, de documents de référence qui sont une source importante pour de nombreux auteurs de projet.

Il convient cependant de garder à l'esprit que ces prix sont soumis à certaines hypothèses, sont mentionnés à titre indicatif et reflètent des prix HTVA pour la fourniture et la mise en œuvre des matériaux. Ils doivent donc uniquement permettre au lecteur de cibler les différences de coûts et les postes sur lesquels il pourrait agir pour gérer au mieux son budget.

HYPOTHÈSES

Afin de définir une base de comparaison quasi similaire pour chacune des parois, celles-ci ont été composées de manière à approcher une valeur « U » fixée à $0,150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (en Belgique, pour atteindre le standard passif, il est recommandé de disposer d'une valeur U de parois inférieure ou égale à $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Certaines parois ne peuvent être modifiées dans leur composition (exemple : paroi Paille-Tech ou ALTAR) car elles dépendent d'éléments finis dont les dimensions ne peuvent être adaptées (ex : ballot de paille). Pour chacun des calculs, le logiciel « PEB 4.0 » a été utilisé. Les données relatives à la paille sont celles issues des tests réalisés à

Gembloux (ULg-UMC) dans le cadre de la recherche aPROpaille, à savoir une valeur de 0,063 W/(m.K) comme conductivité thermique pour la paille. Ce lambda « sec » est utilisé afin de rester cohérent par rapport aux données d'autres matériaux issus de la base de donnée du logiciel PEB (ex : cellulose).

Les parois étudiées sont les suivantes :

Paroi « Béton et XPS » (polystyrène extrudé) : système « traditionnel », une structure lourde dotée d'un isolant en face extérieure. La finition intérieure est assurée par un enduit de plâtre et extérieure par un enduit extérieur sur isolant.

Paroi « Ossature bois et cellulose » : système constructif souvent rencontré dans les habitations passives, il se compose d'une ossature bois dans laquelle sont insufflés des flocons de cellulose. La paroi est fermée côté intérieur par un panneau OSB et côté extérieur par un panneau de fibres de bois de type haute densité. La finition intérieure est assurée par des plaques de carton-plâtre sur lattage tandis que la finition extérieure est, elle, constituée d'un enduit sur panneaux.

Paroi « Paille-Tech »¹⁷ : issue d'une série d'évolutions au sein de la SCRL Paille-Tech, la paroi « Paille-Tech » se compose de modules constitués de colonnes de ballots de paille. Une ossature semi-traversante sépare chacune des colonnes et un cadre traversant entoure la totalité du module. Un panneau en fibres de bois de type haute densité ferme le module côté extérieur et assure le rôle de contreventement de l'ensemble. La finition intérieure et l'étanchéité à l'air sont assurées par un enduit d'argile et la finition extérieure par un enduit extérieur sur panneaux (ex : « diffutherm »).

Paroi « GREB »¹⁸ : technique héritée du Canada, elle consiste en la mise en œuvre de ballots de paille entre des montants de bois structurels formant une ossature intérieure et une seconde côté extérieur. L'espace compris entre les ballots et la face extérieure des montants en bois est comblé par un enduit constitué de chaux, de sable, de ciment et de sciure de bois (mortier de bois cordé). La finition intérieure est assurée par un enduit d'argile et la finition extérieure par un enduit extérieur.

17. Voir le vademécum n° 3 pour plus d'informations relatives à cette paroi.

18. Voir le vademécum n° 3 pour plus d'informations relatives à cette paroi..

Paroi «ALTAR»: L'«ALTAR Architecture» a développé un module en paille préfabriqué reposant sur la technique «Autrichienne». Composé d'une ossature bois traversante et isolé grâce au ballot de paille, ce module est contreventé par un panneau OSB en face intérieure qui est recouvert d'un fermacell enduit comme finition. En face extérieure, le module est fermé par un panneau isolant en fibres de bois destiné à atténuer l'éventuelle présence de pont-thermique. La finition extérieure est assurée par un enduit extérieur.

Pour chacune de ces parois, des prix maximums ont été déterminés pour l'ensemble des matériaux qui les composent. Ces prix proviennent de deux sources différentes et comprennent la fourniture et la pose du matériau.

- La base de données en ligne : www.batitel.com.
- Le bordereau des prix unitaires (BPU) 2014 de l'Union Wallonne des Architectes (prix maximum).
- Les fournisseurs/ producteurs lorsque les sources précédentes ne contiennent pas l'information.

Le matériau exact et/ou l'épaisseur de ce dernier n'étant pas toujours disponible(s), les données les plus proches ont été considérées. Il est important de garder à l'esprit que ces prix sont donnés à titre indicatif et qu'ils n'englobent pas le coût des raccords entre les différents éléments de la paroi, ceux-ci pouvant sensiblement gonfler le prix selon l'architecture employée.

RÉSULTATS

Paroi « Béton et XPS »

COMPOSITION	Épaisseur (m)	Coût Batitel	Coût BPU	Unité
Enduit intérieur (plafonnage)	0,015	17,53 €	18,98 €	€/m ²
Bloc béton + joint en mortier de ciment	0,190	74,20 €	60,89 €	€/m ²
Isolant XPS (polystyrène extrudé)	0,220	55,14 €	63,88 €	€/m ²
Enduit extérieur	0,010	119,40 €	119,40 €	€/m ²
TOTAL	0,435	266,27	263,15	€/m²

L'analyse renseigne un prix approximatif de **266,27 €/m²** selon la BD « **Batitel** » et de **263,15 €/m²** selon le **BPU**. La performance thermique de la paroi, calculée selon le logiciel PEB 4.0, est de **0,155 W/(m².K)**.

Paroi « Ossature bois et cellulose »

COMPOSITION	Épaisseur (m)	Coût Batitel	Coût BPU	Unité
Carton-plâtre 12 mm sur lattage	0,015	53,13 €	53,13 €	€/m ²
Panneau OSB	0,022	34,24 €	83,71 €	€/m ²
Ossature en bois de charpente (résineux)	0,300	61,50 €	63,88 €	€/m ²
Remplissage flocon de cellulose (ISOFLC)	0,300	33,05 € ¹⁶	26,18 €	€/m ²
Panneau de fibres de bois haute densité	0,018	22,16	25,16	€/m ²
Enduit extérieur	0,010	34,45	39,94	€/m ²
TOTAL	0,665	241,53	228,12	€/m²

L'analyse renseigne un prix approximatif de **214,53 €/m²** selon la BD « **Batitel** » et de **228,12 €/m²** selon le **BPU**. La performance thermique de la paroi, calculée selon le logiciel PEB 4.0, est de **0,157 W/(m².K)**.

A noter que, dans le BPU, le prix renseigné pour l'ossature bois comprend la fourniture et le placement des panneaux OSB. De même, le prix de la cellulose est renseigné à 87,27 €/m³ contre 20,15 €/m³ dans la BD « Batitel » (uniquement pour la fourniture du matériau. Un prix « fourniture + pose » a donc été estimé)¹⁹.

Paroi « Paille-Tech »

La paroi « Paille-Tech » étant définie par l'entreprise du même nom et non soumise aux prix des sources considérées dans cette analyse, le prix au m² utilisé est celui communiqué par la SCRL, à savoir 260 €/m² (avec étanchéité à l'air et hors enduit extérieur). En considérant le coût de ce dernier, on obtient un prix de 294,45 €/m² selon les prix de la BD « Batitel ».

19. Prix pour la fourniture du matériau uniquement disponible. Un prix matériau + pose a été estimé sur base d'un prix au placement de 90 €/m³.

La performance thermique de la paroi, calculée selon le logiciel PEB 4.0, est de 0,136 W/(m².K). Cette dernière ne peut être « affaiblie » dans le but de respecter la valeur de référence car la totalité de la résistance thermique de la paroi est assurée par le ballot de paille dont les dimensions ne peuvent être adaptées.

Paroi « GREB »

COMPOSITION	Épaisseur (m)	Coût BPU	Unité
Enduit intérieur de finition	0,010	30,00 €	€/m²
Enduit à l'argile	0,06	15,00 €	€/m²
Ossature bois intérieure (CLS)		33,83 €	€/m²
Remplissage ballots de paille	0,460	8,68 €	€/m²
Ossature bois extérieure (CLS)	0,060	33,83 €	€/m²
Mortier « bois cordé »		15,00 €	€/m²
Enduit extérieur	0,010	39,94 €	
TOTAL	0,600	176,28	€/m²

L'analyse renseigne un prix approximatif de **176,28 €/m²** selon le BPU (l'analyse n'a pas été possible selon la BD « Batitel » par manque de données) et des données issues de la SCRL Paille-Tech (en gras dans le tableau). La performance thermique de la paroi, calculée selon le logiciel PEB 4.0, est de **0,130 W/(m².K)**.

Cette analyse en particulier est soumise à un nombre d'hypothèses important, reflétant le côté « traditionnel » du système. En effet, bons nombres de matériaux peuvent être obtenus localement et ne disposent pas de coût pour leur mise en œuvre (la technique « GREB » est très souvent utilisée sur des chantiers en autoconstruction). Ainsi :

La double ossature bois n'étant pas renseignée dans les documents de référence, elle a été assimilée aux montants type « CLS » utilisés pour réaliser des cloisons. Le prix renseigné est celui de la dimension la plus proche de celle généralement utilisée. Cette paroi étant double (intérieur et extérieur), le prix a été multiplié par deux.

Le remplissage en ballot de paille tient compte d'une hypothèse prise pour respecter la valeur « U » cible. En effet, dans un système constructif de type « GREB » le ballot est posé à l'horizontale et sur champ (ficelles vers l'intérieur). Cette mise en œuvre induit que l'épaisseur du ballot est de 36 cm. Dans cette configuration, la paroi n'atteint pas la valeur « U » cible. Il est donc supposé que le ballot est posé sur face (côté du ballot vers l'intérieur) offrant ainsi une épaisseur d'isolant de 46 cm. Dans cette configuration, la valeur « U » cible est plus fidèlement approchée avec une valeur de 0,150 W/(m².K). Posé sur face, le ballot offre une surface intérieure de 0,29 m² (0,36 m x 0,80 m). 3,5 ballots sont donc nécessaires pour couvrir 1 m² de paroi. A coût estimé de 2,5 €/ballot, le coût total pour le poste « isolant » est estimé à 8,68 €/m² (prix hors pose).

Afin d'offrir une alternative plus cohérente à ces hypothèses, une seconde analyse a été réalisée. Dans celle-ci, le mortier « bois cordé » a été assimilé à un enduit extérieur et les prix de ce dernier ont été obtenus de Paille-Tech SCRL. En effet, aux vues de la composition d'un mortier de ce type, il est difficile de chiffrer le coût de sa fourniture. A titre d'information, un big bag « prêt au mélange » d'un enduit intérieur à l'argile de type « Claytec » coûterait 220 €. La quantité présente dans ce big bag permet d'enduire 65 m² de paroi en 10 mm d'épaisseur. Pour un enduit fourni et mis en œuvre sur chantier, Paille-Tech SCRL propose 60 €/m² en 40 mm d'épaisseur. C'est sur base de ces chiffres que les prix ci-dessous ont été adaptés.

COMPOSITION	Épaisseur (m)	Coût BPU	Unité
Enduit intérieur de finition	0,010	49,50 €	€/m²
Enduit à l'argile	0,06	66,30 €	€/m²
Ossature bois intérieure (CLS)		33,83 €	€/m²
Remplissage ballots de paille	0,460	8,68 €	€/m²
Ossature bois extérieure (CLS)	0,060	33,83 €	€/m²
Mortier « bois cordé »		66,30 €	€/m²
Enduit extérieur	0,010	39,94 €	€/m²
TOTAL	0,600	298,38 □	□/m²

Dans cette approche, le prix d'une paroi « GREB » mise en œuvre à 75 % par une entreprise et 25 % en autoconstruction (remplissage de la paroi avec les ballots de paille) revient à **298,38 €/m²**.

Paroi « ALTAR »

COMPOSITION	Épaisseur (m)	Coût ALTAR	Unité
Finition intérieure «Fermacell enduit»	0,015	30,00 €	€/m²
Panneau OSB	0,325	120,00 €	€/m²
Ossature bois			€/m²
Remplissage ballots de paille			€/m²
Panneau fibres de bois			€/m²
Enduit extérieur	0,010	60,00 €	€/m²
TOTAL	0,410	255,00	€/m²

Les prix fournis, poste par poste, par l'entreprise « ALTAR Architecture » permettent de définir un coût au m² de **255,00 €**. La performance thermique de la paroi, calculée selon le logiciel PEB 4.0, est de **0,155 W/(m².K)**.

CONCLUSION

À travers ce chapitre, 5 parois différentes ont été analysées d'un point de vue économique. Chaque fois que cela était possible, les coûts au m² de ces parois ont été évalués sur base de documents de référence (BD « Bati-tel » et BPU 2014) ou d'entreprises.

TYPE DE PAROI	COÛTmoyen [€/m²]	VALEUR « U » [W/(m².K)]
Béton & XPS	261,50	0,155
Bois & cellulose	221,32	0,157
« Paille-Tech »	295	0,136
« GREB »	176,28 à 298,38	0,130
« ALTAR »	255	0,155

Le tableau ci-dessus présente les résultats de cette étude sommaire. On constate ainsi que, comme pour toute paroi, le coût d'une paroi en paille

varie très sensiblement selon si elle est réalisée par le maître d'ouvrage ou par une entreprise qualifiée. Pour une performance thermique égale, une paroi préfabriquée en paille se situe à cheval entre le coût d'une paroi isolée par de la cellulose et une paroi en bloc de béton isolée grâce à des panneaux d'XPS. Le coût de la paroi « Paille-Tech » se démarque quelque peu avec 295 €/m², mais il convient de considérer également sa performance thermique bien plus intéressante ($U : 0,136 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) pour une paroi entièrement préfabriquée par une entreprise.

Les performances thermiques les plus intéressantes sont atteintes lors de l'utilisation de 46 cm de paille. Pour atteindre des performances identiques, les parois de type « Béton & XPS », « Bois & Cellulose » ou encore « ALTAR » devraient augmenter leur épaisseur d'isolant. Leur coût au m² se rapprocherait alors du coût actuel de la paroi « Paille-Tech » ou « GREB » par entreprise. Une des pistes d'amélioration de cette étude serait de disposer de prix d'entreprise pour la mise en œuvre de la paille dans le cadre d'une ossature bois²⁰. Celle-ci pourrait alors être utilisée de manière « standard » dans les ossatures, à l'image de la cellulose, et ne pas nécessairement dépendre d'un système constructif particulier. La technique « GREB », dans la première approche, présente une réduction de près de 50 % par rapport aux autres parois. La principale raison de cette différence réside dans le type de mise en œuvre. En effet, pour chacune des parois, la mise en œuvre est réalisée par un professionnel et non par le maître d'ouvrage. La paroi « GREB » dispose donc plutôt d'une approche « autoconstruction ». La seconde approche pour cette même paroi permet de situer le coût de ce système constructif s'il était réalisé en grande partie par une entreprise. Le manque de donnée pour ce dernier point ne permet cependant pas d'obtenir un coût au m² pour une paroi « GREB » réalisée dans son entièreté par une entreprise.

Enfin, il convient de garder à l'esprit que pour comparer des choses comparables, il faut pouvoir considérer un ensemble de facteurs qui ne sont pas nécessairement traduits dans les prix ci-dessus. Par exemple, la préfabrication offre des avantages liés à la rapidité d'exécution, à une maîtrise plus aisée de la qualité de mise en œuvre des matériaux, à une protection contre les intempéries, etc. En contrepartie, l'utilisation de parois modulables préfabriquées ne permet pas nécessairement de traiter de grandes parties de mur d'une seule traite. Cela pourrait s'avérer problématique pour la qualité des raccords de l'étanchéité à l'air.

20. Information non disponible à ce jour.

Ces considérations sont importantes dans le choix et la gestion d'un chantier mais ne transparaissent pas dans les prix annoncés. Il est donc important, après avoir pris connaissances des prix renseignés, de considérer les avantages et inconvénients de chaque type de paroi et de leurs caractéristiques de mise en œuvre.

En conclusion, pour une performance thermique répondant aux recommandations du standard passif, le coût d'une paroi en paille peut, selon le type de mise en œuvre choisi, s'avérer être plus intéressant qu'une paroi en béton et XPS ou une ossature bois insufflée de cellulose. Il convient cependant de vérifier les prix annoncés pour l'ensemble de ces parois, ceux-ci dépendant de documents de référence qui ne reflètent pas nécessairement la réalité d'un devis d'entreprise ou d'une région. Enfin, outre le coût financier des différentes parois, le maître d'ouvrage devrait être amené à intégrer le choix des matériaux sur base de leur coût sur l'environnement. Une notion qui n'est pas toujours assez mise en avant par les entreprises, mais qui représente pourtant un enjeu véritable pour les générations futures.

