

Document Technique C&B 2012

Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Liste des Figures..... | 4 |
| Liste des Tableaux..... | 5 |
| 1 Préface | 6 |
| 2 Introduction..... | 7 |
| 2.1 Les matériaux et produits de construction biosourcés..... | 7 |
| 2.1.1 Définition | 7 |
| 2.1.2 Matériaux à l'étude | 7 |
| 2.2 Définition du comportement hygrothermique | 7 |
| 3 Définitions et grandeurs caractéristiques..... | 9 |
| 3.1 Humidité relative | 9 |
| 3.2 Changement de phase..... | 9 |
| 3.3 Transfert d'humidité..... | 10 |
| 3.4 Ambiance environnante | 10 |
| 3.5 Porosité | 10 |
| 3.6 Conductivité thermique | 11 |
| 3.7 Capacité thermique..... | 12 |
| 3.8 Teneur en eau | 12 |
| 3.9 Courbe isotherme de sorption-désorption | 13 |
| 3.10 Valeur du tampon hydrique (MBV)..... | 14 |
| 3.11 Perméabilité et Perméance à la vapeur d'eau | 15 |
| 3.11.1 Perméabilité à la vapeur d'eau | 15 |
| 3.11.2 Perméance à la vapeur d'eau | 15 |
| 3.11.3 Epaisseur de couche d'air de diffusion équivalente | 16 |
| 3.12 Tableau récapitulatif des valeurs caractéristiques | 16 |
| 4 Modèles et logiciels utilisés pour l'étude | 17 |
| 4.1 Modèles les plus souvent rencontrés et données nécessaires | 17 |
| 4.2 Logiciels de simulation | 18 |
| 5 Synthèses sur les études déjà réalisées | 19 |
| 5.1 Définitions..... | 19 |
| 5.1.1 Echelle Composant | 19 |
| 5.1.2 Echelle Bâtiment | 20 |
| 5.2 Bétons végétaux | 20 |
| 5.2.1 Echelle Composant | 20 |
| 5.2.1.1 Dispositifs expérimentaux | 20 |
| 5.2.1.2 Types de composants testés | 21 |
| 5.2.1.3 Sollicitations climatiques..... | 21 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.2.1.4 | Phénomènes mis en évidence | 21 |
| 5.2.1.5 | Comparaison simulation – expérimentation et paramètres d’influence des modèles ... | 22 |
| 5.2.1.6 | Grandeurs de caractérisation..... | 24 |
| 5.2.1.7 | Optimisation du comportement hygrothermique | 25 |
| 5.2.2 | Echelle Bâtiment | 27 |
| 5.2.2.1 | Variation de température et d’humidité – Confort hygrothermique | 27 |
| 5.2.2.2 | Variation de température et d’humidité – Confort hygrothermique – Consommation d’énergie..... | 29 |
| 5.3 | Construction en paille | 31 |
| 5.3.1 | Echelle Composant | 31 |
| 5.3.1.1 | Système de mur : | 31 |
| 5.3.2 | Echelle Bâtiment | 32 |
| 5.3.2.1 | Variation de température et d’humidité – Confort hygrothermique : | 32 |
| 5.3.2.2 | Consommation d’énergie : | 33 |
| 5.4 | Bois massif | 34 |
| 5.4.1 | Echelle Composant | 34 |
| 5.4.1.1 | Paroi Simple : | 34 |
| 5.4.2 | Echelle Bâtiment | 36 |
| 5.4.2.1 | Variation de température et d’humidité – Confort hygrothermique : | 36 |
| 5.4.2.2 | Variation de température et d’humidité – Confort hygrothermique : | 40 |
| 5.4.2.3 | Consommation d’énergie : | 42 |
| 5.5 | Isolant vrac ou en panneaux..... | 43 |
| 5.5.1 | Echelle Composant | 43 |
| 5.5.2 | Echelle Bâtiment | 46 |
| 6 | Conclusion..... | 47 |
| 7 | Références | 48 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Zones de confort définies par différentes normes [8] | 8 |
| Figure 2: Classification des valeurs de capacité tampon hydrique (MBV) [42] | 15 |
| Figure 3 : Trois classes de pores observées au sein du béton de chanvre [4]..... | 11 |
| Figure 4 : Forme générale de la courbe de l'isotherme de sorption [7] | 13 |
| Figure 5 : Forme générale de l'isotherme d'absorption de la paille [44] | 13 |
| Figure 6 : Simulation de l'isotherme de sorption du pin nordique à 20 °C [8] | 14 |
| Figure 7 : Courbes de sorption-désorption d'un béton de chanvre à T=20 °C CERZO V. (ENTPE) [5]..... | 14 |
| Figure 8: Superposition de différentes couches dans un mur paille/ossature bois | 19 |
| Figure 9 : Coupe d'un mur en béton de chanvre | 19 |
| Figure 10: Représentation schématique du dispositif expérimental d'étude du comportement hygrothermique d'un composant | 21 |
| Figure 11 : Evolution de la température et de l'humidité relative au centre de murs en béton de chanvre (HLC2), blocs perforé terre cuite (VPB), béton cellulaire (AAC30), sous sollicitation statique..... | 22 |
| Figure 12 a et b : Profils de T et de pression de vapeur au sein d'une paroi en béton de chanvre, à différents instants t en jours..... | 22 |
| Figure 13: Sollicitations climatiques intérieures (en rouge) et extérieures (en noir) | 23 |
| Figure 14 : Résultats expérimentaux (en pointillés) et simulés (trait continu) pour l'humidité relative (à gauche) et la température (à droite) pour différentes profondeurs x = 0.08m, 0.12m, 0.18m et 0.22m | 23 |
| Figure 15 : Photographie (a) et dimension (b) des particules de chanvre des 3 granulométries | 26 |
| Figure 16 : L'évolution de T et d'HR en C et E en fonction du temps pour BC1, BC2 et BC3 | 26 |
| Figure 17 : Evolution des températures de surfaces intérieures et extérieures des murs | 28 |
| Figure 18 : Evolution de l'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur | 28 |
| Figure 19: Comparaison des températures à l'intérieure et sur la surface intérieure des murs | 28 |
| Figure 20: Cellule étudiée par TRAN LE A.D. et al..... | 29 |
| Figure 21 : Variation de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de la cellule pour les deux cas et les deux modèles | 30 |
| Figure 22 : L'évolution d'humidité relative à l'intérieur de la cellule en béton de chanvre et celle en béton cellulaire | 31 |
| Figure 23 : L'énergie de chauffage de la cellule en béton de chanvre et celle en béton cellulaire TRAN LE A.D. et al [xx] | 31 |
| Figure 24 : Le système de mur en paille et les positions des capteurs..... | 31 |
| Figure 25 : L'évolution de température et d'humidité relative à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b) du 19 février 2006 au 12 mars 2006 | 32 |
| Figure 26 : L'évolution de température et d'humidité relative des simulations (les courbes rouges) et des mesures (les courbes bleues) du 19 février 2006 au 12 mars 2006..... | 32 |
| Figure 27 : Les positions des capteurs de température et d'humidité relative..... | 33 |
| Figure 28 : Paroi contrecollée avec joints de feutre en bois massif | 35 |
| Figure 29 : Evolution au cours du temps de la température aux points (x = 25mm, 55mm, 75mm et 105mm), mesures (Tm) et simulations (Ts)..... | 35 |
| Figure 30 : Evolution au cours du temps de l'humidité relative aux points (x = 25mm, 55mm, 75mm et 105mm), mesures (HRm) et simulations (HRs)..... | 36 |
| Figure 31 : Zone de confort thermique dans la maison : (a) Coin jour (b) Coin nuit..... | 38 |
| Figure 32 : Zone de confort thermique dans le bâtiment de bureaux | 38 |
| Figure 33 : Zones de confort pour le bâtiment d'habitation (Coin jour et Coin nuit) et pour le bâtiment de bureaux (Salle de réunion et Bureau 1) | 40 |
| Figure 34 : La consommation d'énergie mesurée par rapport à celle calculée selon la RT2000 | 42 |
| Figure 35: Représentation schématique de la paroi- Configuration 2..... | 45 |
| Figure 36: Représentation schématique de la paroi - Configuration 3 | 45 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Valeurs caractéristiques pour chaque famille de matériaux..... | 16 |
| Tableau 2 : Systèmes de murs étudiés..... | 24 |
| Tableau 3 : Grandeurs caractéristiques du comportement hygrothermique | 24 |
| Tableau 4 : Les valeurs calculées de t_{s-s} et de Q_{24} pour les différents systèmes de mur | 25 |
| Tableau 5 : Les valeurs calculées de $ph_{s,th}$ et de dmp_{th} pour les 7 systèmes de mur | 25 |
| Tableau 6 : MBV simulée des systèmes de mur..... | 25 |
| Tableau 7 : Longueur et largeur moyenne des particules de chanvre..... | 26 |
| Tableau 8 : Paramètres principaux des composants de la cellule..... | 27 |
| Tableau 9 : Information principales de la cellule étudiée par Tran Le et al [x] | 29 |
| Tableau 10 : Détails des 2 modèles et 2 cas de la simulation | 30 |
| Tableau 11 : Les températures moyennes sur les différents points..... | 33 |
| Tableau 12 : Les humidités relatives moyennes sur les différents points..... | 33 |
| Tableau 13 : La consommation d'énergie et les détails des 11 maisons..... | 34 |
| Tableau 14 : Humidités relatives mesurées dans les 2 bâtiments et à l'extérieur en période Hiver et Eté .. | 39 |
| Tableau 15 : Humidité absolue [g/kg] calculée dans les 2 bâtiments et à l'extérieur pendant la période Hiver et Eté..... | 39 |
| Tableau 16 : Récapitulatif des informations de chaque maison..... | 41 |
| Tableau 17 : Taux d'inconfort sur les 20 maisons pendant la période d'hiver et la période d'été | 42 |
| Tableau 18 : Définitions des risques d'humidification et de condensation [1]..... | 44 |
| Tableau 19 : Valeurs des variables des caractéristiques des parois pour la configuration 2 | 46 |

Nous tenons à remercier particulièrement Laurent Arnaud, Florence Collet, Julien Lamoulié et Mike Lawrence pour leur relecture attentive de ce document et leurs commentaires.

1 Préface

Mis en œuvre dans un ouvrage, tout matériau et produit de construction fonctionne dans un environnement dans lequel la température et l'humidité sont soumis à des gradients (valeurs différentes entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment). Dans cet environnement et malgré ces variations, le matériau doit être en mesure d'assurer, de façon durable, les fonctions pour lesquelles il a été mis en œuvre (thermique, mécanique, acoustique...).

Le comportement hygrothermique d'un matériau est fortement lié à sa nature (matière qui le constitue) et à sa porosité, par conséquent, tous les matériaux n'ont pas les mêmes caractéristiques par rapport aux variations hygrométriques, hydriques et thermiques. Les travaux menés soulignent en fait la difficulté du sujet étudié. En effet, la physique des transferts de vapeur d'eau et d'eau liquide au sein d'un matériau est complexe. Toutefois, il convient de bien caractériser le comportement d'un matériau par rapport à ces phénomènes afin d'optimiser son utilisation.

Sur ce sujet, les matériaux biosourcés font l'objet depuis plusieurs années, d'études visant à comprendre et à caractériser leur comportement hygrothermique. Ces études montrent que les matériaux biosourcés présentent des performances spécifiques par rapport aux phénomènes hygrothermique. Ces performances particulières jouent un rôle important dans le confort intérieur d'un bâtiment.

Certains travaux de recherche évaluent la capacité des matériaux biosourcés à stocker et déstocker la vapeur d'eau ou encore estime l'influence des phénomènes hygrothermiques sur leurs caractéristiques et leur durabilité. D'autres études encore, sont consacrées à la caractérisation et à la modélisation du comportement hygrothermique des matériaux biosourcés et montrent que ce comportement spécifique a une influence sur les performances énergétiques d'un bâtiment (consommation d'énergie).

L'objet de ce document est de faire un état des lieux des publications sur le comportement hygrothermique des matériaux et produits de construction biosourcés et d'en présenter, sous forme de synthèse, les principaux résultats. Il est important de noter que les rédacteurs de ce document ne font pas d'analyse critique des résultats présentés. Toutes les analyses présentées sont celles faites par les chercheurs sur leurs propres résultats.

Nous espérons que ce document puisse permettre, d'une part, aux acteurs de la recherche, d'orienter leurs futurs travaux et d'autres part, aux acteurs des matériaux et produits de construction biosourcés de valoriser une caractéristique spécifique à ces produits en s'appuyant sur un argumentaire scientifique et technique.

Cette synthèse est établie sur la base de publications scientifiques disponibles à la date de rédaction du document, or nous sommes conscients qu'il existe, aujourd'hui, de nombreux travaux de recherche en cours sur le sujet, une mise à jour sera donc réalisée.

2 Introduction

2.1 Les matériaux et produits de construction biosourcés

2.1.1 Définition

Un matériau ou un produit de construction est dit biosourcé, s'il intègre dans sa composition une part de biomasse¹. Dans cette synthèse, on s'intéresse particulièrement aux produits de construction biosourcés. Les matériaux biosourcés les plus utilisés pour la construction comprennent le bois d'œuvre, les panneaux de bois, les isolants rigides et semi-rigides à base de fibres végétales, la ouate de cellulose, la paille et le béton de chanvre.

2.1.2 Matériaux à l'étude

En termes de recherche scientifique, les documents principalement trouvés traitent de trois produits et matériaux biosourcés différents : le béton de chanvre, le bois massif et la paille. La synthèse s'organisera donc autour de ces trois éléments mais s'intéressera aussi aux isolants biosourcés vrac ou en panneaux ou en rouleaux.

2.2 Définition du comportement hygrothermique

On parle généralement d'hygrothermie pour caractériser, la température et le taux d'humidité de l'air ambiant à l'intérieur d'un local. C'est maintenant une mesure fréquente dans le bâtiment où l'on recherche un confort hygrothermique idéal pour la santé des habitants et la durabilité des infrastructures.

Plus particulièrement le comportement hygrothermique d'un matériau représente le comportement d'un matériau au sein d'un environnement dans lequel la température et le taux d'humidité relative varient.

Nos recherches nous ont permis de réaliser un classement des études rencontrées suivant trois échelles :

- Échelle Matériau ;
- Échelle Système ou Composant ;
- Échelle Bâtiment.

Selon les recherches faites à ces 3 niveaux d'étude, le terme Comportement Hygrothermique peut alors prendre plusieurs définitions :

- A l'échelle Matériau, on évoque le transfert d'humidité et de chaleur et les valeurs des caractéristiques intrinsèques du matériau étudié.
- A l'échelle Composant on s'intéresse à la variation de température et d'humidité sur un côté ou au milieu du composant lors d'un changement de condition du côté opposé du composant.
- Enfin à l'échelle Bâtiment on étudie la variation de température et d'humidité à l'intérieur du bâtiment et la consommation d'énergie sous certaines conditions climatiques

A chaque échelle, les méthodes utilisées pour étudier le comportement hygrothermique des matériaux biosourcés sont différentes.

Premièrement, le niveau *Matériau* permet la caractérisation du comportement hygrothermique d'un matériau étudié grâce à différents essais réalisés à une échelle macroscopique. A ce niveau on peut donc, d'une part, mesurer les coefficients intrinsèques des matériaux (porosité et morphologie des pores, conductivité thermique, isotherme de sorption, valeur de la capacité tampon hydrique, etc.); et d'autre part construire des modèles mathématiques afin de comprendre le transfert couplé d'humidité et de

¹ Biomasse : Matière d'origine biologique à l'exception des matières de formation géologique ou fossile.

² Matériaux à changement de phase : matériaux dont l'utilité pratique repose sur l'existence d'une ou plusieurs transitions de phase (transformation du système étudié provoqué par la variation d'un paramètre extérieur) au sein

chaleur au sein des matériaux. Les modèles sont établis à partir des équations différentielles de la conservation de la masse et de l'énergie.

Ensuite, on rencontre l'échelle *Système* qui concerne les enveloppes d'un bâtiment : les systèmes de mur, les toits, etc. La simulation et l'expérimentation sont menées à cette échelle. La plupart du temps, on observe la variation de température et d'humidité à la surface ou au sein du composant lors de la variation hygrothermique de l'environnement (intérieur ou extérieur). Cette échelle intègre en général plusieurs matériaux qui peuvent interagir lors des phénomènes de transferts hygrothermiques.

Enfin, des simulations et des expériences peuvent être réalisées au niveau d'un *Bâtiment*. Le but de ces études est alors d'évaluer le confort hygrothermique et la consommation d'énergie des bâtiments en matériaux biosourcés. Par ailleurs, il existe plusieurs normes qui définissent le critère de confort hygrothermique à cet échelle : la norme américaine 55 (ASHRAE, 1992), la norme canadienne CSA Z412-F00 et la norme internationale de l'OIN 7730 (ISO, 1994). Une zone de température et d'humidité relative satisfaisant hygrothermiquement au moins 80% d'occupants dans un local intérieur est alors définie comme une zone de confort. [8]

Figure 1 : Zones de confort définies par différentes normes [8]

| Norme | Conditions | Température °C | HR% |
|------------------------------------|------------|----------------|----------|
| CSA Z412-F00 (Canada) | Hiver | 20 – 35 | 50% |
| | Été | 23 - 26 | 50% |
| 55-2004 de l'ASHRAE (USA) | Hiver | 20,5 - 25,5 | 30% |
| | Hiver | 20 - 24 | 60% |
| | Été | 24,5 - 28 | 30% |
| NF ISO 7730 (Afnor NF X 35-121) | Été | 23 - 25,5 | 60% |
| | Hiver | 20 – 24 | 30 – 60% |
| | Été | 23 – 26 | 30 – 60% |

Certaines simulations à l'échelle *Systèmes* et *Bâtiment* sont réalisées à partir des modèles mathématiques établis à l'échelle *Matériau* : en partant des modèles de l'échelle *Matériau*, on ajoute des conditions aux limites qui décrivent en détails un modèle physique au niveau d'un *système* ou d'un *bâtiment*. Ainsi, en utilisant des logiciels de simulation, on peut connaître le comportement hygrothermiques d'un *Système* ou d'un *Bâtiment*. Mais la plupart des simulations partent de lois physiques de conduction et utilisent des grandeurs thermo physiques relatives aux matériaux constitutifs.

Dans une première partie nous définirons et donnerons des valeurs concernant les grandeurs nécessaires à la caractérisation de l'échelle *matériau*. Dans un deuxième temps nous reviendrons sur plusieurs études réalisées aux échelles *Système* et *Bâtiment*. Cela nous permettra de faire une conclusion générale à propos du comportement hygrothermique des matériaux biosourcés.

3 Définitions et grandeurs caractéristiques

Dans cette partie nous rappelons un certain nombre de définitions et nous donnons des valeurs intrinsèques nécessaires pour caractériser l'échelle matériaux. Après les définitions, un tableau récapitulatif de ces valeurs, pour chaque matériau à l'étude a été établi. L'ensemble de ces définitions est en partie basée sur l'étude comparative de parois à ossature bois [1] rédigée par le CSTB et le FCBA.

3.1 Humidité relative

L'humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie) couramment notée ϕ correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

Pour une étude comparative de parois à ossature bois [1], le CSTB et le FCBA, ont défini cette notion plus précisément :

Le contenu en vapeur d'eau de l'air est aussi appelé humidité absolue de l'air et est noté W . Elle est exprimée en kg/m^3 :

$$W = \frac{mv}{V}$$

Où : V est le volume de l'échantillon de l'air humide et mv la masse de vapeur d'eau.

Si l'air n'est pas saturé d'humidité alors l'humidité absolue de l'air est inférieure à celle obtenue à la saturation. On peut de ce fait définir la grandeur ϕ correspondant au rapport entre l'humidité absolue et sa valeur à la saturation :

$$\phi = 100 \cdot \frac{W}{W_s} (\%)$$

Cette grandeur ϕ définissant l'humidité relative est également fréquemment notée HR.

3.2 Changement de phase

Dans l'étude du comportement hygrothermique des matériaux biosourcés, le changement de phase de l'eau contenue au sein de ces matériaux va jouer un rôle intéressant. En effet, quand ce changement de phase se produit, il y a alors absorption ou dégagement d'énergie dans le matériau biosourcé. L'énergie ainsi dégagée par le changement de phase de l'eau est alors jusqu'à 10 fois supérieure à l'énergie dégagée au sein d'un matériau à changement de phase² (en effet l'énergie nécessaire pour le changement de phase de l'eau est relativement élevée, elle est égale à 2257 kJ/kg).

Pour le moment, on retrouve deux approches pour intégrer le changement de phase dans les études :

- L'une est qualitative : explications de certains phénomènes observés dans les expériences par l'évaporation et la condensation ;
- L'autre est quantitative : utilisé pour la modélisation du transfert de masse et de l'énergie, le changement de phase est alors considéré comme une source de chaleur.

Cette deuxième approche s'appuie sur une méthode utilisée pour les matériaux dits « poreux » sur lesquels on peut trouver un grand nombre de publications scientifiques.

² Matériaux à changement de phase : matériaux dont l'utilité pratique repose sur l'existence d'une ou plusieurs transitions de phase (transformation du système étudié provoqué par la variation d'un paramètre extérieur) au sein de leur microstructure.

3.3 Transfert d'humidité

Le transfert d'humidité au sein des matériaux a été une notion abondamment caractérisée par de nombreux travaux de recherche :

Le transport d'humidité en milieux poreux résulte d'une composition de différents phénomènes à l'origine du mouvement de chacune des phases présentes (liquide et vapeur). La part de chacun de ces mécanismes sur la quantité d'eau fixée dépend particulièrement des propriétés du matériau (porosité, morphologies des pores, état de surface des pores, nature chimique des composés,...), des conditions climatiques dans lequel il est placé (pression et température) et enfin de la nature de la phase aqueuse (liquide ou vapeur).

Les phénomènes physiques de transferts couplés de chaleur et d'humidité sont à l'heure actuelle assez largement connus. Ils résultent du transport simultané des phases liquide et gazeuse présentes dans le milieu poreux.

3.4 Ambiance environnante

Cette définition de l'ambiance environnante se base en partie sur le paragraphe « Climats » rédigé par le CSTB et le FCBA pour l'étude comparative de paroi à ossature bois [1].

L'évaluation du comportement hygrothermique d'un matériau en conditions réelles nécessite une bonne connaissance de l'ambiance environnante.

Pour l'ambiance extérieure, l'humidité relative, la température, les conditions pluviométriques, le vent et l'ensoleillement sont autant de paramètres qui vont avoir une influence directe sur le comportement hygrothermique d'un matériau. Des climats métropolitains défavorables sont alors définis pour caractériser l'ambiance extérieure : océanique (Brest), continental (Nancy), montagnard (La Pesse) et méditerranéen humide (Nice).

Pour l'ambiance intérieure l'humidité relative correspond à la quantité d'eau contenue dans l'air extérieur qui entre dans le local auquel est ajoutée la quantité d'eau produite à l'intérieur du local (cuisson, production humaine, etc...).

La production de vapeur est définie par :

$$\Delta v = \frac{G}{nV} = v_i - v_e = W / n$$

Avec : G : taux de production d'humidité intérieure en kg/h

n : taux de renouvellement d'air en nombre de changement d'air/ h

V : volume intérieur du bâtiment en m³

W : Humidité absolue en kg/m³

v_x : Excédent d'humidité (intérieur ou extérieur) en kg/m³

3.5 Porosité

La porosité ϵ d'un matériau est le rapport du volume des vides sur le volume total. La porosité est une caractéristique importante des matériaux biosourcés. Le transfert d'humidité et de chaleur dans les matériaux ont un lien avec cette caractéristique et toutes les modélisations des comportements hygrothermiques des matériaux biosourcés s'appuient sur cette donnée.

Concernant le béton de chanvre, SAMRI D. [4] a distingué 3 classes de pores (Cf. figure ci-dessous) :

- les pores macroscopiques (ordre de taille : 1mm), dues à l'arrangement imparfait des particules dans la matrice solide ;
- les pores mésoscopiques (ordre de taille : 100 μ m) dans le liant, dues à l'action de l'entraineur d'air et dans les particules capillaires intra-particulaires notamment pour le chanvre;
- les pores microscopiques (ordre de taille : 0.01 μ m) regroupant notamment les pores inter hydrates créés pendant la formation de carbonate de calcium.

La porosité totale dans le béton de chanvre étudié par SAMRI D. atteint 72% - 79% suivant le dosage en liant. Des méthodes d'évaluation de la porosité des particules de chanvre et des bétons de chanvre ont été développées à partir de mesure de perméabilité à l'air ([46] et [50]).

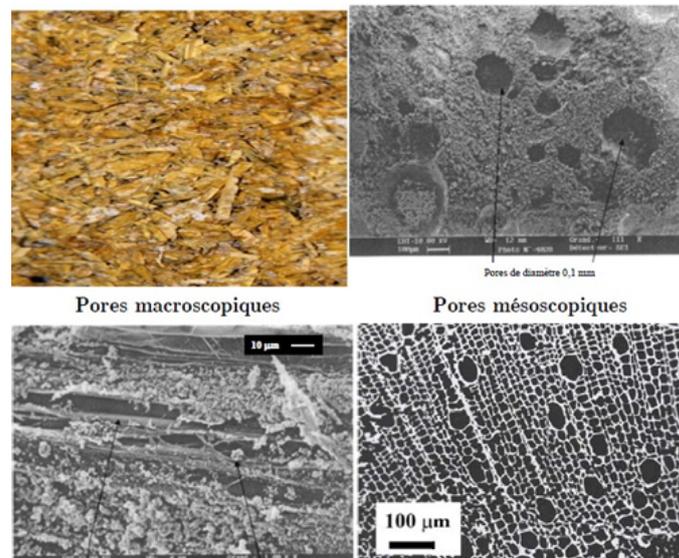


Figure 2 : Trois classes de pores observées au sein du béton de chanvre [4]

En revanche, concernant les autres matières biosourcées, on ne trouve que très peu de publications scientifiques qui traitent en détail de la porosité, on peut toutefois imaginer que l'on a une macroporosité (par exemple, arrangement des fibres ou des faisceaux de fibres dans un isolant à base de fibres végétales) et une microporosité (porosité des fibres végétales elle-même). Outre la valeur de la porosité, on trouve encore moins d'information sur la morphologie des pores et sur la surface des pores (surface spécifique).

3.6 Conductivité thermique

La conductivité thermique caractérise la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction.

Pour le béton de chanvre elle dépend des paramètres suivants [5]:

- Nature et dosage des matières premières
- Mode de fabrication de l'échantillon (force de compactage, distance de projection)
- Teneur en eau du matériau)

Différentes études ont été menées pour caractériser cette conductivité thermique, les mesures expérimentales sont comprises entre 0.06 W/(mK) et 0.21 W/ (mK) [5] .

Pour la paille, une étude du CEBTP en partenariat avec le FFB et l'ADEME [6] a permis de rencontrer des valeurs de la conductivité thermique :

- Pour le remplissage de la toiture, avec une masse volumique de 80 kg/m³, les bottes de paille utilisées pour la construction ont une conductivité thermique utile de : $\lambda_{\text{utile}} = 0,07 \text{ W/m.K}$.
- Pour les murs, compte tenu de la présence de l'ossature et du remplissage des joints au mélange chanvre-chaux, la conductivité thermique équivalente obtenue par un essai de transmission thermique sur un modèle de mur est de : $\lambda_{\text{eq}} = 0,10 \text{ W/m.K}$ soit un coefficient de transmission thermique moyen des murs de : $U = 0,25 \text{ W/m}^2.\text{K}$

3.7 Capacité thermique

La capacité thermique est une grandeur qui permet de quantifier la capacité qu'a un corps à absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique. En d'autres termes, la capacité thermique du matériau caractérise la capacité du matériau à stocker de la chaleur.

La capacité thermique massique se définit avec la formule suivante :

$$c = \frac{\lambda}{\rho a}$$

Avec :

λ : capacité thermique

c : chaleur massique ou spécifique

ρ : masse volumique

a : diffusivité

3.8 Teneur en eau

En physique des milieux poreux, on désigne par teneur en eau la quantité d'eau contenue dans un échantillon de matière, la quantité étant évaluée par un rapport pondéral ou volumétrique.

Teneur massique en eau : u

La teneur en eau massique d'un matériau est le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau sur la masse du matériau sec. Elle est exprimée en kg/kg : $u = \frac{m_e}{m_s}$

Où m_e est la masse d'eau contenue dans le matériau et m_s la masse de matériau à l'état sec

Teneur massique en eau par volume: w

La teneur massique en eau par volume est le rapport de la masse d'eau sur le volume du matériau sec. Elle est exprimée en kg/m³. Il existe une relation entre la teneur en eau massique et la teneur massique en eau par volume : $w = \rho_0 \cdot u$

Où ρ_0 est la masse volumique du matériau sec.

Teneur volumique en eau : ψ

La teneur en eau volumique est le rapport du volume d'eau sur le volume du matériau sec. Elle peut être déterminée à partir de la teneur en eau massique à l'aide de la formule suivante :

$$\Psi = \frac{\rho_0}{\rho_w} \cdot u$$

Où ρ_0 est la masse volumique du matériau sec et ρ_w celle de l'eau (997,6 kg/m³ à 23°C).

Lorsque la teneur en eau varie au sein du matériau, les autres caractéristiques (notamment la conductivité thermique) peuvent varier légèrement.

De plus lorsque l'humidité relative varie, la teneur en eau elle aussi varie au sein du matériau.

Ainsi pour la paille [6], par exemple, on a pour une humidité relative de 50 %, une teneur en eau de l'ordre de 15% en masse. Elle atteint 25 % pour HR = 90%.

3.9 Courbe isotherme de sorption-désorption

Courbe traduisant l'accroissement de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour un matériau donnée à une température donnée.

L'isotherme de sorption est souvent présentée par une courbe qui décrit la teneur en eau d'un matériau en équilibre avec l'humidité relative de l'ambiance dans une certaine température. La forme générale de la courbe est donnée par la figure ci-dessous. Si la variation de teneur en eau du matériau part d'un état saturé en eau, la courbe est appelée l'isotherme de désorption ; si la variation part d'un état sec, la courbe est appelée l'isotherme d'adsorption. [7] et [5] dans le cas de la chènevotte. Pour des matériaux poreux, ce phénomène est aussi nommé l'effet d'adsorption-désorption. Il est important de noter qu'il existe une hystérésis entre ces deux courbes qui est souvent négligé.

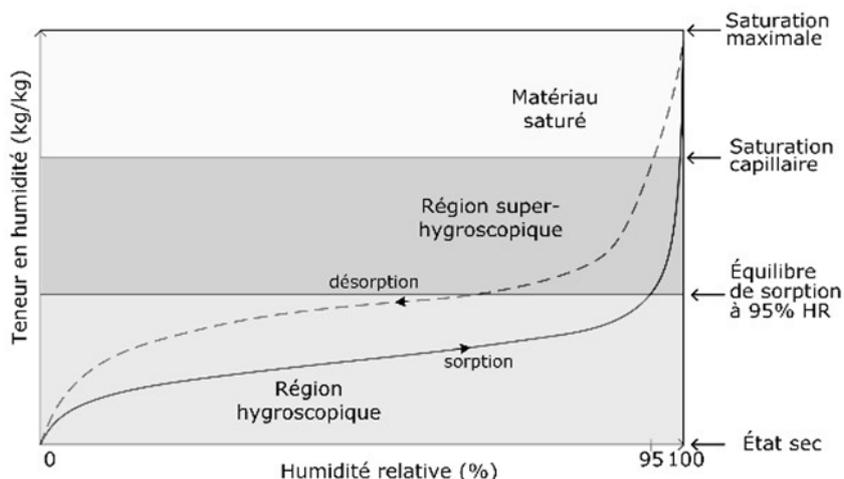


Figure 3 : Forme générale de la courbe de l'isotherme de sorption [7]

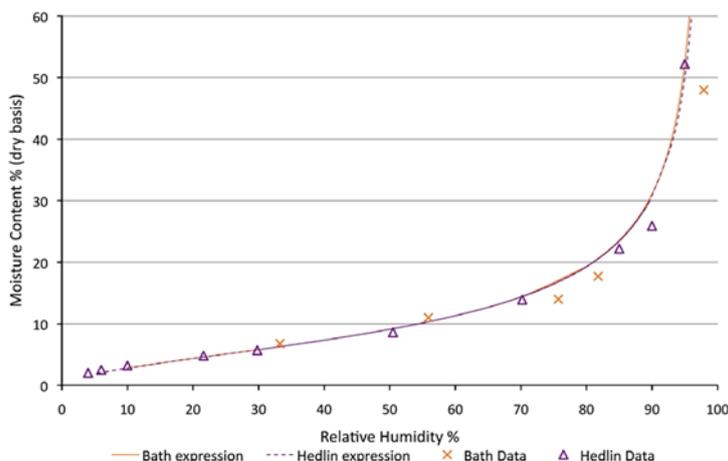


Figure 4 : Forme générale de l'isotherme d'absorption de la paille [44]

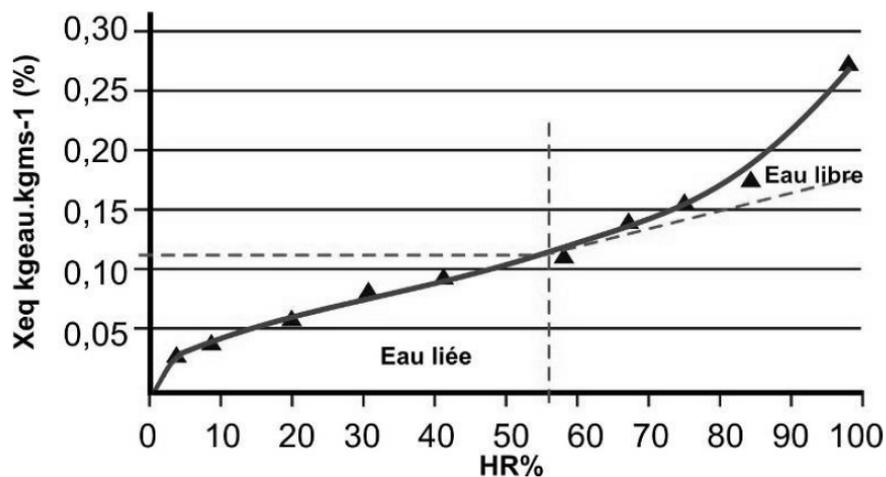


Figure 5 : Simulation de l'isotherme de sorption du pin nordique à 20°C [8]

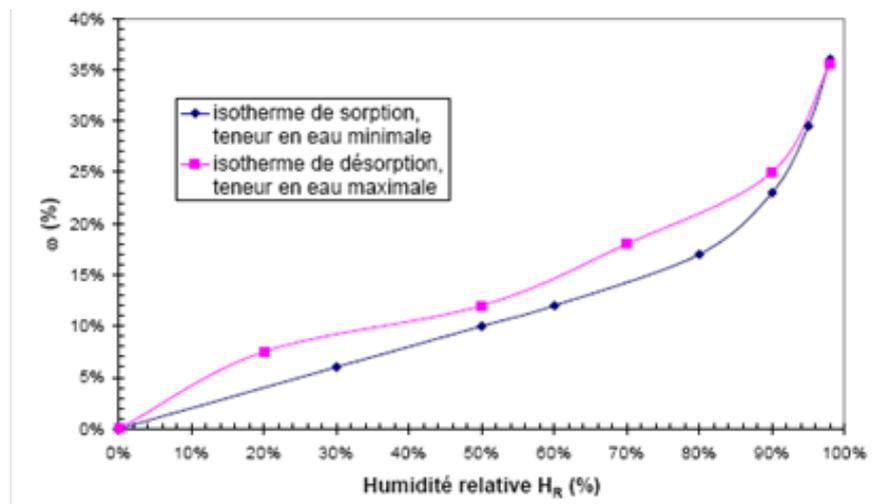


Figure 6 : Courbes de sorption-désorption d'un béton de chanvre à T=20°C CEREZO V. (ENTPE) [5]

3.10 Valeur du tampon hydrique (MBV).

Dans les études trouvées, la notion de « Moisture Buffer value » ou « Valeur du tampon hydriques » est souvent rencontrée. Dans sa thèse TRAN LE A.D. [2] en propose la définition suivante :

Né d'un terme anglais «Moisture buffer value - MBV», la valeur de la capacité tampon hydrique (VCTH) indique la quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à une variation de l'humidité relative extérieure et pour un temps donné. Sa valeur est exprimée en $kg.m^{-2}.\%HR^{-1}$. La capacité tampon hydrique caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant.

Le projet NORDTEST [3] a été mis en place afin de déterminer la valeur de la capacité tampon hydrique des matériaux. Il définit un cycle dynamique, de période 24h, dans lequel l'humidité relative est fixée à 75% pour 8 h ensuite à 33% pour les 16 h suivantes. La valeur de la capacité tampon hydrique est déterminée par la quantité d'humidité adsorbée ou désorbée par une unité de surface lorsque le matériau est soumis à un changement de 1 % d'humidité relative. Lorsque l'épaisseur du matériau est supérieure à la profondeur de pénétration hydrique sous les conditions diurnes, la VCTH est indépendante de l'épaisseur du matériau et de l'amplitude de variation de l'humidité relative.

MBV [g/(m².%RH)] @8/16h

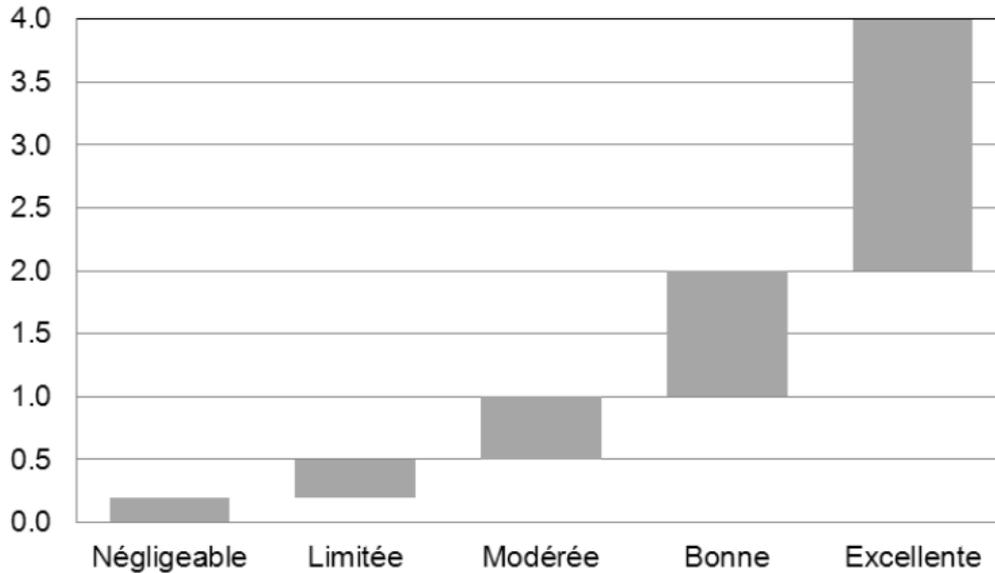


Figure 7: Classification des valeurs de capacité tampon hydrique (MBV) [42]

Dans le cadre du projet ANR Betonchanvre, COLLET F. et PRETOT S. [42], ont vérifiées les caractéristiques hygrothermiques de différentes formulations de bétons de chanvre. Pour l'ensemble des formulations, les valeurs moyennes de MBV trouvées sont comprises entre 1,99 et 2,53 g/(m².%HR) ce qui classe ces bétons de chanvre comme bons (1<MBV<2) ou excellents (2<MBV) régulateurs hydriques .

3.11 Perméabilité et Perméance à la vapeur d'eau

3.11.1 Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité d'un matériau δp définit sa capacité à se laisser traverser par un fluide sous l'action d'une pression entre ses deux faces opposées. La perméabilité à la vapeur d'eau désigne donc le rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, de temps et par unité de différence de pression de vapeur régnant de part et d'autre du matériau.

Cette grandeur dépend des caractéristiques physiques du fluide considéré (air, vapeur d'eau ou eau) et du matériau telles que le diamètre des pores, la géométrie des vides, l'épaisseur...

3.11.2 Perméance à la vapeur d'eau

La perméance d'un matériau homogène est le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau et de son épaisseur. Soit : $Wp = \frac{\delta p}{d}$ [kg/(m².s.Pa)]

On peut aussi définir un coefficient de perméance à la vapeur d'eau. Le facteur de résistance à la diffusion d'un matériau est le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sur sa propre perméabilité.

On a : $\mu = \frac{\delta_0}{\delta p}$

Avec la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air : $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{T^{0.81}}{P_0}$ [kg/(m.s.Pa)]

Où P_0 est la pression atmosphérique en Pa.

3.11.3 Epaisseur de couche d'air de diffusion équivalente

Il s'agit de l'épaisseur d'une couche d'air telle qu'elle ait la même perméance qu'une couche de matériau d'épaisseur donnée.

On a : $S_d = \mu \cdot d$ [m]

3.12 Tableau récapitulatif des valeurs caractéristiques

Tableau 1 : Valeurs caractéristiques pour chaque famille de matériaux

| | Références | Densité [kg/m ³] | Porosité [%] | Conductivité thermique [W/(m.K)] | Perméabilité à la vapeur d'eau | Commentaires |
|--------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Béton de chanvre | [5] | | 60 à 80 % (moy 70%) | 0,06 à 0,21 (moy 0,13) | | |
| | | | | | $\mu = 3-5$ | Chanvre |
| Laine de chanvre | Site internet de l'ASIV | 25 à 80 | | 0,038 à 0,042 | | |
| Fibre de bois | Site internet de l'ASIV | 40 à 250 | | 0,037 à 0,005 | | |
| | [1] | 55 | 98% | 0,045 | | |
| Bois massif | [1] | 600 | 72% | 0,13 | | Sapin |
| | | | | | $\mu = 5$ | |
| Paille | [6] | 66 à 85 | | 0,064 à 0,072 | | |
| | | | | | $\mu = 1$ | |
| Ouate de cellulose | Site internet de l'ASIV | | | 0,04 | | |
| | [1] | 50 | 95% | 0,041 | | |
| Laine de lin | Site internet de l'ASIV | 20 à 35 | | 0,037 à 0,047 | | |
| | | | | | $\mu = 1$ | Lin |

4 Modèles et logiciels utilisés pour l'étude

4.1 Modèles les plus souvent rencontrés et données nécessaires

L'eau existe sous deux formes au sein des matériaux : l'eau liquide et la vapeur d'eau [8]. Les mécanismes de transfert de ces deux formes de l'eau sont différents. L'eau liquide peut se transférer des manières suivantes :

- Sous l'effet d'un gradient de pression capillaire : différence de pression entre la phase liquide et la phase gazeuse dans les pores des matériaux provoquée par les ménisques des pores ;
- Sous l'effet d'adsorption-désorption ;
- Sous l'effet de la pesanteur ;

Dans le cas de la vapeur d'eau, la migration est réalisée par les gradients de la pression partielle de vapeur qui se présentent sous deux formes :

- Gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment ;
- Différences de concentration au sein d'un matériau impliquant la variation des pressions partielles.

Ainsi à partir des effets dominants montrés ci-dessus, la conservation d'humidité (ou conservation de la masse) peut être modélisée par des équations différentielles.

Le transfert de chaleur est quant à lui réalisé dans les matériaux par :

- Conduction
- Convection
- Rayonnement thermique
- Changement de phase (évaporation/condensation)

De la même manière on peut établir l'équation de la conservation de chaleur (ou conservation de l'énergie) selon ces différents effets.

En s'intéressant aux moteurs des transferts, on note que le transfert d'humidité et de chaleur dans les matériaux sont toujours couplés. Donc les deux parties concernant respectivement la conservation d'humidité et celle de chaleur sont indispensables

Comme expliquées dans la thèse de SAMRI D. [4] ainsi que dans la présentation de COLLET F. et al. [9], les équations qui régissent les transports couplés de chaleur et de masse sont basées sur le modèle de Künzle et peuvent s'écrire de la manière suivante :

→ Conservation de la masse :

$$\underbrace{\frac{\partial w}{\partial HR} \cdot \frac{\partial HR}{\partial t}}_{\text{Inertie Hydrique}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\underbrace{D_{\varphi} \cdot \frac{\partial HR}{\partial x}}_{\text{Diffusion liquide}} + \underbrace{\delta_p \cdot \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat})}_{\text{Diffusion vapeur}} \right)$$

→ Conservation de la chaleur :

$$\underbrace{\rho_0 \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Inertie thermique}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\underbrace{\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}}_{\text{Conduction thermique}} + \underbrace{L_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \cdot \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat}) \right)}_{\text{Convection liquide et convection vapeur}} \right)$$

Avec :

HR : humidité relative,

ρ_0 : masse volumique apparente sèche (Kg.m^{-3}),

c : Chaleur massique du matériau [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$],

w : teneur en eau du matériau [kg.m^{-3}],

p_{sat} : pression de vapeur saturante [Pa],

λ : conductivité thermique du matériau [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$],

D_{\square} : Conductivité liquide [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$] (= $\xi_w * D_w$, avec D_w : diffusivité hydrique du matériau [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]),

δ_p : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$),

L_v : chaleur latente de changement de phase [J.kg^{-1}].

En outre, les conditions aux limites sont nécessaires pour décrire et simuler une situation spécifique à un problème hygrothermique. Il est important de noter que chaque situation a ses propres conditions aux limites et que les conditions appliquées ont un impact significatif sur la simulation.

Par ailleurs la méthode de Glaser, qui permet de calculer la diffusion de la vapeur d'eau, néglige les propriétés d'hygroscopicité des matériaux et n'est donc pas vraiment adapté aux matériaux biosourcés. C'est pourquoi il vaut mieux privilégier la simulation numérique ou l'expérimentation aux Echelles paroi et Bâtiment.

4.2 Logiciels de simulation

Les logiciels de simulation sont des outils très importants pour la recherche en hygrothermie à l'échelle du composant et du bâtiment. En utilisant ces logiciels, on peut prévoir non seulement l'évolution de température et d'humidité au sein du matériau et du bâtiment sous des conditions simples ou des données climatiques réelles, mais aussi la consommation d'énergie.

Parmi les logiciels les plus utilisés, on peut établir deux groupes distincts.

Le premier groupe inclut WUFI, hygIRC, DELPHIN et MOIST. Ces logiciels sont basés sur un certain modèle de transfert d'humidité et de chaleur. L'utilisateur, doit alors simplement établir un modèle physique (les murs, les toits, les plafonds etc.), appliquer les conditions aux limites (les conditions sont souvent les données climatiques : la température, l'humidité à l'extérieur du bâtiment...), et lancer le calcul de la réponse hygrothermique du composant ou du bâtiment. Le logiciel est simple d'utilisation et peut être manipulé à la fois par des chercheurs et par des maîtres d'œuvre.

Le logiciel COMSOL est à ranger dans une catégorie différente des autres logiciels. Il peut simuler les phénomènes couplés par la méthode des Eléments finis. Pour simuler le comportement hygrothermique d'un composant ou d'un bâtiment, les modèles mathématiques établis par les chercheurs doivent être implantés dans le logiciel. Ensuite, la méthode de calcul reste la même que dans les logiciels précédents.

5 Synthèses sur les études déjà réalisées

Cette partie va constituer la synthèse des recherches, déjà réalisées à ce jour, aux échelles composant et bâtiment. Pour chaque famille de matériaux sélectionnée, il y aura d'abord une description des travaux effectués à l'échelle composant puis ensuite une explication de ceux réalisés à l'échelle bâtiment. Pour la compréhension des différents travaux choisis dans cette synthèse, des définitions concernant les éléments étudiés ainsi que les résultats attendus, aux échelles composant et bâtiment, sont présentées en première partie de ce chapitre.

5.1 Définitions

5.1.1 Echelle Composant

L'échelle composant représente le deuxième niveau de recherche sur l'hygrothermie des matériaux biosourcés. Les composants étudiés sont soit des parois simples, soit des systèmes de mur. La paroi simple concerne une paroi sans revêtement alors que le système de mur est une paroi recouverte d'une ou plusieurs couches de revêtement, il s'agit d'un système complexe. Des exemples de systèmes de mur sont montrés comme suit.

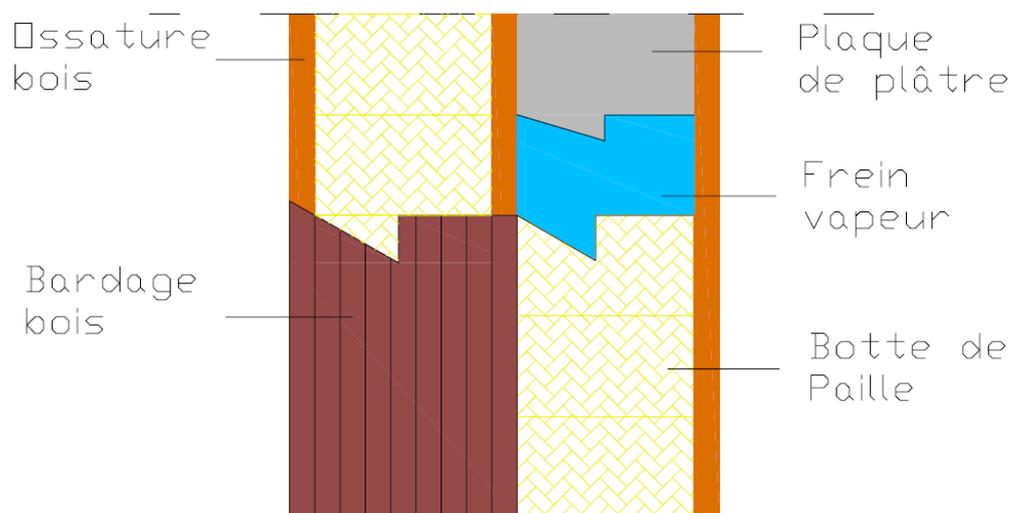


Figure 8: Superposition de différentes couches dans un mur paille/ossature bois

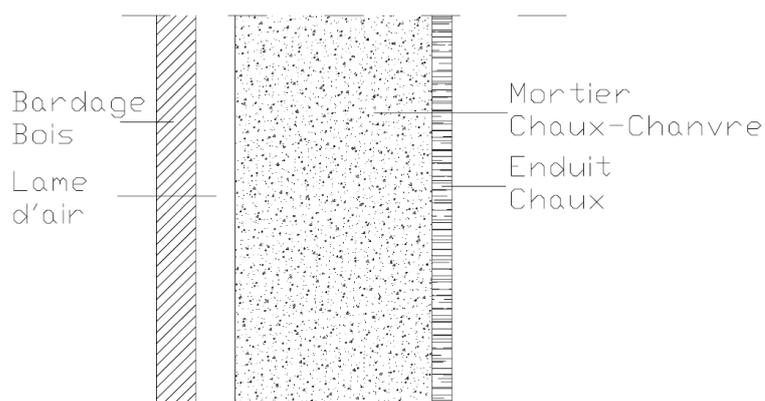


Figure 9 : Coupe d'un mur en béton de chanvre

L'enduit et les autres couches extérieures vont jouer un rôle important dans le comportement hygrothermique de la paroi. En effet, les couches extérieures limitent le flux d'air et d'humidité à travers les murs en matériaux biosourcés et ont un impact sur la conduction de chaleur. Par conséquent, il y a une différence importante en termes de comportement hygrothermique entre des parois simples et des murs avec des couches extérieures.

Par ailleurs, à ce niveau d'étude on retrouve deux types de recherche: la simulation numérique et l'expérimentation. L'expérimentation est vraiment importante pour connaître le comportement réel d'un composant du bâtiment. Les simulations sont réalisées en choisissant un modèle mathématique associé à un logiciel de simulation. L'avantage majeur de la simulation sur logiciel est le gain de temps réalisé. Cependant, on remarque bien souvent que les simulations et les expérimentations sont réalisées en même temps. Cela permet d'établir une comparaison et donc de valider le modèle sur lequel la simulation est basée. Après la validation par l'expérimentation on peut prévoir correctement le comportement hygrothermique d'un composant du bâtiment, si la physique des phénomènes est bien conservée, sans avoir à faire de campagnes expérimentales systématiques.

5.1.2 Echelle Bâtiment

A l'échelle Bâtiment, on peut faire un lien entre les propriétés des matériaux et les performances énergétiques des bâtiments. Les études à cette échelle sont donc significatives, particulièrement pour le développement de l'ensemble de la filière et l'application des matériaux biosourcés à une plus grande échelle.

A ce niveau, les expérimentations et les simulations peuvent être réalisées de la même manière qu'à l'échelle Composant. Pour les simulations les calculs sont toujours basés sur des modèles établis à l'échelle Matériau. Les conditions aux limites sont établies aux interfaces entre le bâtiment et l'ambiance intérieure ou extérieure et à certaines situations complémentaires à l'intérieur du bâtiment : (flux d'air, sources de chaleur, etc). En ce qui concerne les expérimentations elles peuvent se faire dans des bâtiments réels occupés ou dans des cellules construites particulièrement pour la recherche.

5.2 Bétons végétaux

5.2.1 Echelle Composant

Pour le cas des bétons végétaux de nombreux travaux ont été trouvés. Le béton de chanvre est notamment un matériau très documenté concernant la recherche sur le comportement hygrothermique. Un certain nombre d'équipes de recherche ont travaillé sur ces matériaux : ENTPE, Université de Rennes 1, Université de Bath en Angleterre, Université de Louvain en Belgique, Université de Reims...

5.2.1.1 Dispositifs expérimentaux

La plupart des études menées afin de caractériser le comportement hygrothermique des bétons végétaux ont été réalisées à partir d'un dispositif expérimental dont le schéma de principe est présenté fig 8 ci-après.

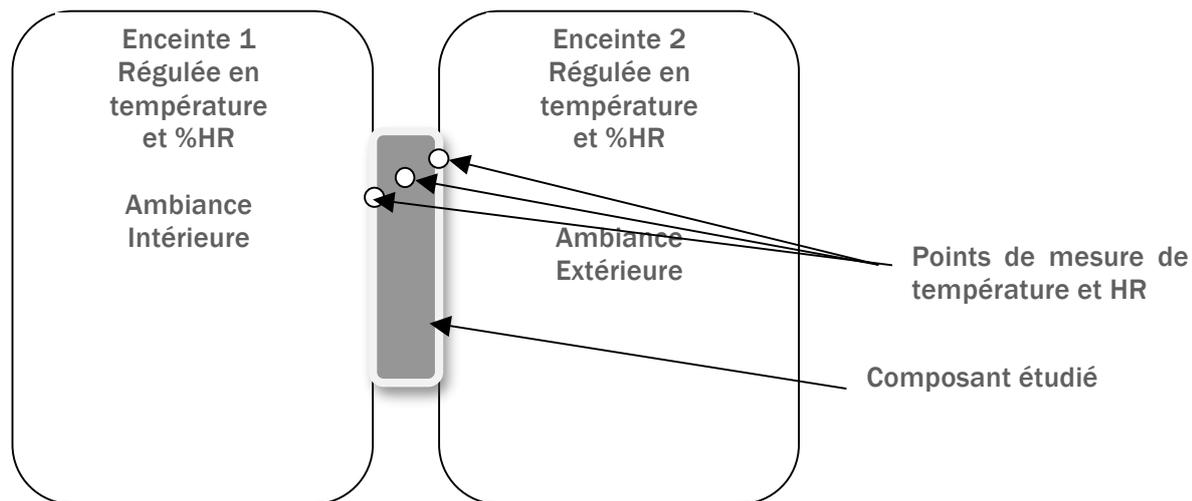


Figure 10 : Représentation schématique du dispositif expérimental d'étude du comportement hygrothermique d'un composant

Le principe des essais réalisés pour étudier le comportement hygrothermique d'un composant en biosourcé est le suivant : on positionne le composant à étudier (éprouvette) entre deux enceintes climatiques que l'on pilote en température et hygrométrie afin de recréer les conditions intérieures / extérieures d'une habitation et notamment les variations de température et d'hygrométrie que l'on peut rencontrer en conditions réelles. On mesure, à l'aide de capteurs, les températures et l'humidité relative en surface et à l'intérieur du composant, ainsi qu'au sein des enceintes climatiques.

Les essais ainsi réalisés sont souvent comparés à des simulations.

5.2.1.2 Types de composants testés

Les composants testés sont principalement des bétons de chanvre sans revêtement sous forme de blocs maçonnés ou de béton banché.

Quelques essais ont toutefois été menés sur des bétons de chanvre avec enduit [4], [37].

5.2.1.3 Sollicitations climatiques

Afin de reproduire différentes conditions climatiques plusieurs sollicitations climatiques ont été effectuées. Ces sollicitations ont permis d'obtenir :

- Un gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur et une température constante
- Un gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur et une pression de vapeur constante
- Un gradient de température et de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur.

5.2.1.4 Phénomènes mis en évidence

En 2005 Arnaud L. et al [36] [37] ont mis en évidence les phénomènes d'évaporation-condensation de l'eau au sein d'un béton de chanvre soumis à des gradients de température. En effet lors d'une montée en température de 10°C à 40°C dans l'enceinte représentant les conditions climatiques extérieures, Arnaud L. et al observent une augmentation de la pression de vapeur au sein du mur en béton de chanvre traduisant un phénomène d'évaporation. Ce phénomène d'évaporation s'accompagne d'une absorption de chaleur permettant d'amortir la variation de température au sein du mur (cf. figure ci-dessous).

Arnaud L. et al ont aussi montré que ces phénomènes restent très limités dans le cas de matériaux terre cuite ou béton cellulaire et en conséquence, n'influencent pas de manière significative les transferts thermiques.

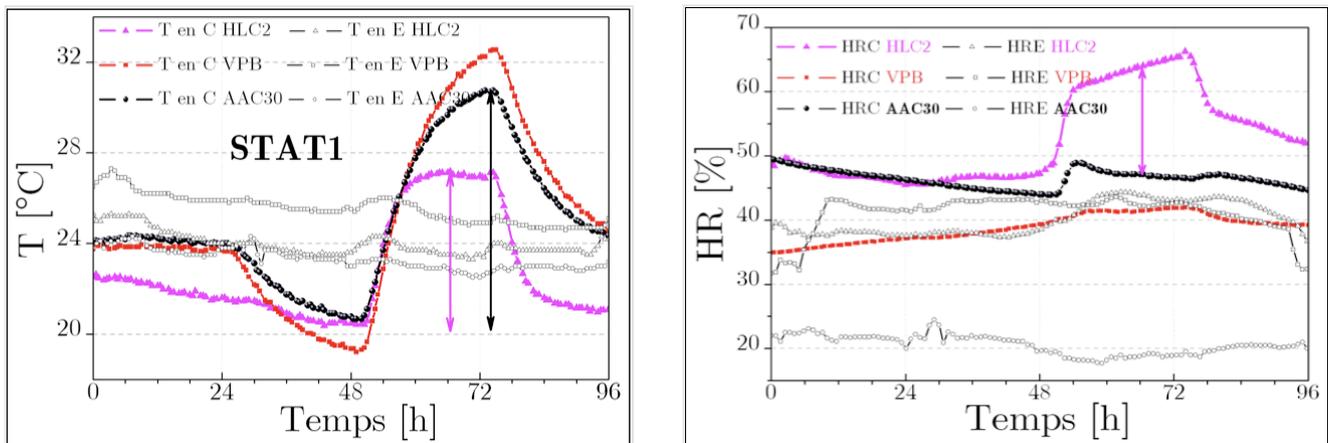


Figure 11 : Evolution de la température et de l'humidité relative au centre de murs en béton de chanvre (HLC2), blocs perforé terre cuite (VPB), béton cellulaire (AAC30), sous sollicitation statique

Les mêmes types de phénomènes ont également été constatés par Collet F. et al [15] au sein d'une paroi en béton de chanvre de 30 cm. En effet, lors d'une variation de température de 15°C à 28°C de l'ambiance extérieure (et pression de vapeur constante), Collet F. a mis en évidence, d'une part une inversion du flux de chaleur au sein du mur entre l'intérieure et extérieure entre l'instant initial (t=0) et final (t=10 jours) de l'essai (Cf. fig 12a) et d'autre part un pic de pression de vapeur traduisant le phénomène d'évaporation-condensation de l'eau adsorbée dans la paroi(Cf. fig 12b).

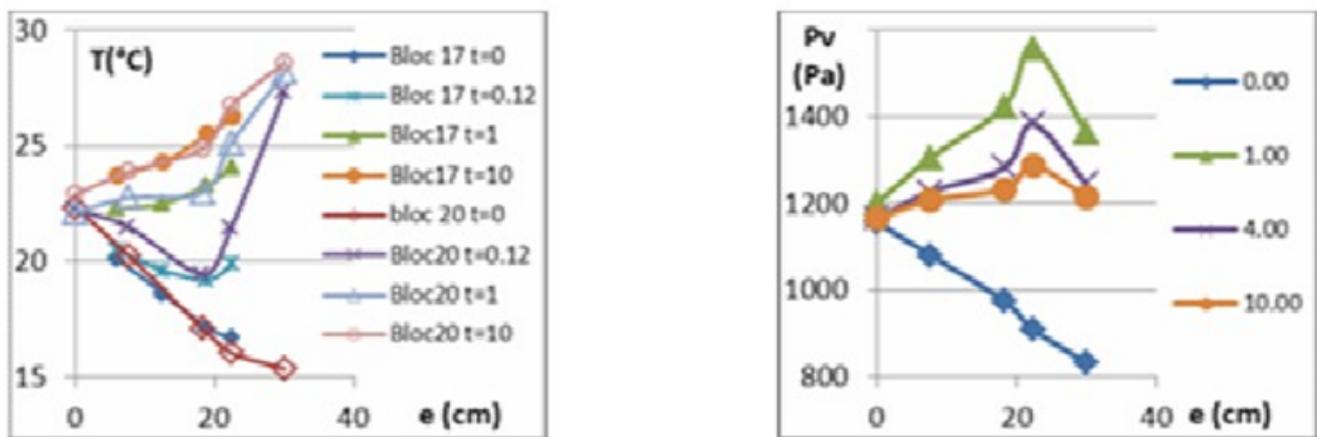


Figure 12 a et b : Profils de T et de pression de vapeur au sein d'une paroi en béton de chanvre, à différents instants t en jours.

Par ailleurs, dans le cadre de leurs travaux COLLET F. et al [15] ont montré que la diffusion de vapeur se produisait de façon homogène dans toute l'épaisseur du matériau et que l'ossature ne perturbait pas le comportement hygrothermique de la paroi.

Dans le cas de béton de chanvre avec enduit, SAMRI D. [4] a montré que la présence d'enduits modifiait les transferts de vapeur d'eau et qu'ils agissaient comme un filtre hydrique.

5.2.1.5 Comparaison simulation – expérimentation et paramètres d'influence des modèles

AIT OUMEZIANE Y. et al [12] ont réalisés des comparaisons entre des simulations et des expériences sur

une paroi en béton de chanvre. Les expériences ont été faites dans une enceinte biclimatique telle que présentée au § 5.2.1.1.

La condition initiale de la paroi a été stabilisée à 40% d'humidité relative et 23°C de température. La variation des conditions sur les côtés intérieurs et extérieurs est représentée sur les figures ci-dessous.

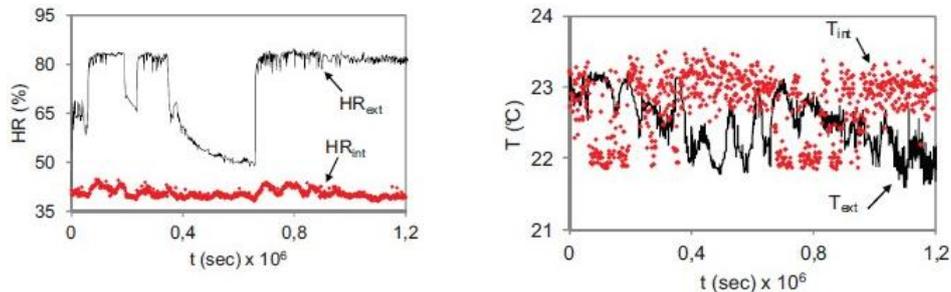


Figure 13: Sollicitations climatiques Intérieures (en rouge) et extérieures (en noir)

Les simulations sont fondées sur un modèle numérique unidimensionnel de transfert de masse et de chaleur basé sur les travaux de Künzeli prenant en compte l'hystérésis de l'isotherme de sorption et le transfert d'air au milieu du béton de chanvre. Pour les simulations, les données climatiques ont été établies à partir des conditions extérieures.

Dans un premier temps, les simulations n'ont pas pris en compte le transfert d'air à l'intérieur de la paroi et l'hystérésis de l'isotherme de sorption-désorption. Seule la branche de sorption était concernée.

Les résultats expérimentaux et simulés pour différentes profondeurs sont montrés sur la figure ci-après.

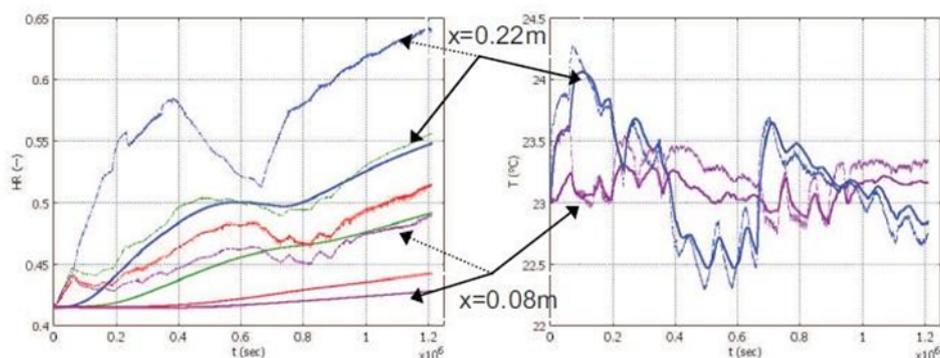


Figure 14 : Résultats expérimentaux (en pointillés) et simulés (trait continu) pour l'humidité relative (à gauche) et la température (à droite) pour différentes profondeurs $x = 0.08m, 0.12m, 0.18m$ et $0.22m$

En ce qui concerne la température, les courbes de simulation et d'expérimentation sont similaires (courbes simulées toujours légèrement supérieures aux courbes expérimentales). Cependant, au regard des variations d'humidité relative, il existe un écart important entre la simulation et l'expérimentation (courbes simulées largement supérieures aux courbes expérimentales). Les amplitudes de variation d'humidité relative sont sous estimées, la différence atteint jusqu'à 10%.

AIT OUMEZIANE Y. et al [12], tout comme SAMRI D. [4] proposent la prise en compte des transferts d'air et de l'hystérésis de sorption-désorption. En effet, la prise en compte du transfert d'air conduit à une meilleure diffusion de la vapeur d'eau au sein du béton de chanvre et celle de la courbe complète de sorption-désorption améliore la représentation du stockage effectif de l'humidité dans le matériau. Par ailleurs le changement de phase a aussi un rôle important puisqu'il peut modifier les performances du matériau étudié. Ce changement de phase est pris en compte dans les équations de Künzeli, utilisées dans ces deux études.

Selon la simulation, une faible différence de pression totale entre les deux côtés de la paroi, va être le

moteur du transfert d'air et va augmenter considérablement la répartition de l'humidité avec une perméabilité absolue élevée. Par ailleurs, la branche de sorption ne représente pas exactement le comportement réel de la teneur en eau dans le matériau. Il existe des cycles intermédiaires³, qui conduisent à la diminution de la capacité de stockage du matériau.

AIT OUMEZIANE Y. et al [12] montrent que les variations d'humidité relative obtenus par une modélisation simplifiée sont beaucoup plus satisfaisants que ceux de la simulation sans considérer l'hystérésis de l'isotherme de sorption- désorption.

5.2.1.6 Grandeurs de caractérisation

EVARD A. et DE HERDE A. [14] ont étudié par simulation avec le logiciel WUFI, les réponses hygrothermiques de différents systèmes de mur soumis à des variations de température et ont évalué différentes grandeurs permettant de caractériser ces réponses. (cf. les deux tableaux ci-après).

Tableau 2 : Systèmes de murs étudiés

| Système de mur | Nature du système |
|----------------|---|
| A | Béton de chanvre avec enduits intérieur et extérieur |
| B | Béton de chanvre avec enduit intérieur et bardage extérieur |
| C | Béton cellulaire |
| D | Parpaings, briques d'argile, et polystyrène extrudé |
| E et F | Briques d'argile |
| G | Laine minérale |

Tableau 3 : Grandeurs caractéristiques du comportement hygrothermique

| Grandeurs caractéristiques | Définition |
|----------------------------|--|
| t_{s-s} | Temps nécessaire pour atteindre 95% du flux thermique à l'état stationnaire (en heure) |
| Q_{24} | Rapport de l'énergie effectivement transférée pendant 24 heures. Montre l'effort que l'on doit appliquer pour maintenir la condition intérieure à un niveau constant lors du changement brusque de température extérieure |
| $ph_{th}(h)$ | Correspond au déphasage thermique. Il décrit le temps qu'il faut pour atteindre des valeurs extrêmes sur la surface intérieure en considérant les mêmes extrêmes sur la surface extérieure |
| $dmp_{th}(\%)$ | correspond à l'amortissement thermique. C'est la différence d'amplitude de température entre les |

³ Document [12] p 230 : « Les isothermes de sorption/désorption du béton de chanvre [...] sont des courbes « extrêmes » qui ne représentent pas les évolutions réelles de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative. Ce cycle principal permet néanmoins d'encadrer correctement la valeur de l'humidité stockée au sein du matériau. Pour des matériaux hygroscopiques présentant un hystérésis, des études ont mis en évidence l'existence de cycles intermédiaires ((Roels et al, 2008) pour du plâtre, (Cameliet et al, 2005) pour du bois) »

| | |
|-----|--|
| | surfaces intérieure et extérieure, calculé à partir des données du 3ème jour. |
| MBV | La valeur de la capacité tampon hydrique ou « Moisture Buffer Value » en Anglais, indique la quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à une variation de l'humidité relative extérieure et pour un temps donné |

Concernant les grandeurs, t_{s-s} et Q_{24} , les résultats sont présentés dans le tableau 4, ci-dessous.

Tableau 4 : Les valeurs calculées de t_{s-s} et de Q_{24} pour les différents systèmes de mur

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---------------|----|----|----|----|-----|----|----|
| t_{s-s} (h) | 68 | 64 | 33 | 74 | 118 | 77 | 15 |
| Q_{24h} (%) | 17 | 19 | 46 | 21 | 13 | 23 | 75 |

Pour les murs en béton de chanvre, les états stationnaires apparaissent 68 heures et 64 heures après la chute de température. Par ailleurs, le fait que le paramètre Q_{24} du mur A est inférieur à celui de G montre que le mur A a une meilleure résistance à la variation de température extérieure.

Les résultats de grandeurs phs_{th} et de dmp_{th} à partir de WUFI sont affichés dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Les valeurs calculées de phs_{th} et de dmp_{th} pour les 7 systèmes de mur

| | A | B | C | D | E | F | G |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|
| phs_{th} (h) | 15 | 14 | 9 | 12 | 12 | 11 | 5 |
| dmp (%) | 92 | 91 | 72 | 91 | 95 | 90 | 38 |

Les résultats mettent en évidence, pour les bétons de chanvre un déphasage d'environ 15 h et un amortissement thermique élevé.

Concernant la grandeur MBV (Moisture Buffer Value), les simulations pour la calculer sont fondées sur le protocole présenté par RODE et al. [17]. Les résultats sont représentés pour les différents systèmes de mur dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : MBV simulée des systèmes de mur

| | A | B | C | D | E | F | G |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| MBV_{simul} (g/m ² %RH) | 2.11 | 2.11 | 1.02 | 1.04 | 1.01 | 0.96 | 0.93 |

Les résultats montrent que les murs en béton de chanvre A et B présentent les meilleures capacités de « tampon hydrique ». On peut relier cette caractéristique aux aspects thermique. En effet, le changement de phase de l'eau s'accompagne de dégagement ou d'absorption d'énergie. EVRARD A. et DE HERDE A. ont calculé que les murs en béton de chanvre pouvaient dégager une énergie de 43kWh/m² pendant la nuit.

5.2.1.7 Optimisation du comportement hygrothermique

GOURLAY E. et al [16] ont travaillé sur l'optimisation du comportement hygrothermique d'un béton de chanvre en s'intéressant à l'influence de la taille des granulats sur les transferts hygrothermiques au sein

du matériau. Pour cela trois parois carrées ont été testées, elles ont été réalisées avec des bétons de chanvre composés de granulats ayant des tailles de particules différentes. (Cf. Tableau 7 et Fig. 15)

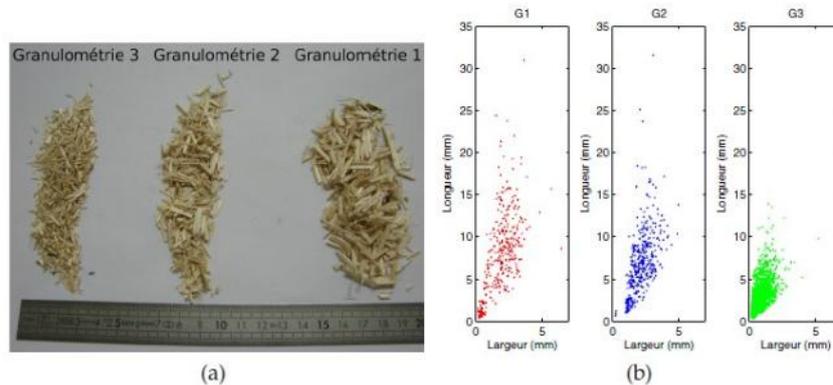


Figure 15 : Photographie (a) et dimension (b) des particules de chanvre des 3 granulométries

GOURLAY E. et al ont imposé sur le côté intérieur de la paroi des sollicitations de type créneau, où T et HR restent constantes par paliers de 24h, avec le 1er palier (20 °C, 50%), le 2ème palier (10 °C, 80%) et le 3ème palier (40 °C, 45%).

Tableau 7 : Longueur et largeur moyenne des particules de chanvre

| Nom de particules de chanvre | Longueur moyenne | Largeur moyenne |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| G1 | 8,9 mm | 2,0 mm |
| G2 | 7,6 mm | 1,8 mm |
| G3 | 3,1 mm | 1,0 mm |

Cinq sondes ont été utilisées pour mesurer la température et l’humidité à l’intérieur de la paroi (A), à l’extérieur de la paroi (E), sur les deux surfaces (B et D) et au milieu du mur (C). Les résultats sont représentés sur la Fig.4.15.

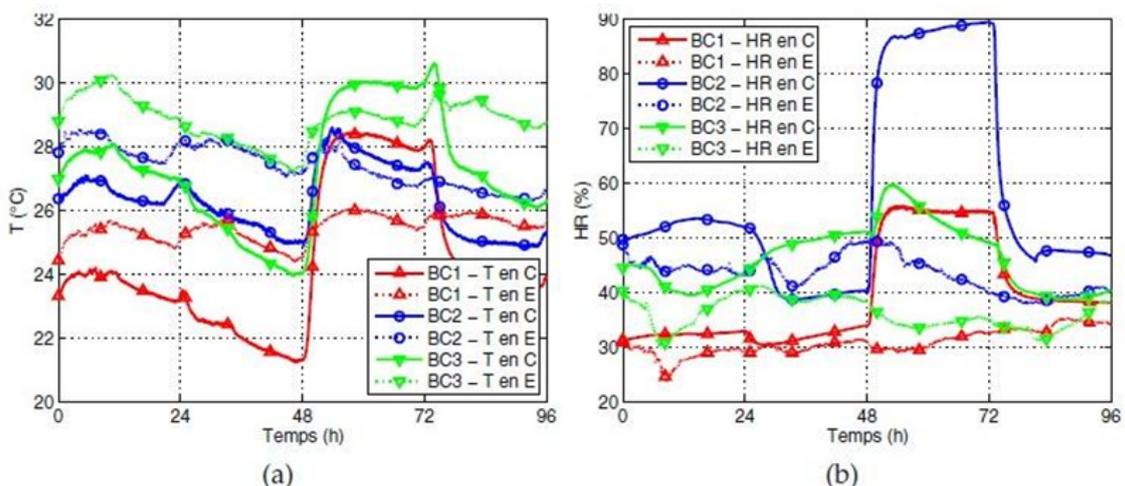


Figure 16 : L'évolution de T et d'HR en C et E en fonction du temps pour BC1, BC2 et BC3

GOURLAY E et al constatent les phénomènes suivants :

- Au milieu du mur BC2, HR augmente rapidement, la variation de T est faible. Le changement de phase amortit la variation de T, puisque l'évaporation est endothermique.
- Au milieu du mur BC3, l'augmentation de T est plus importante que celle du mur BC2 et l'augmentation de HR plus faible. La porosité du mur BC3 étant plus faible la vaporisation et les transferts convectifs sont

moins importants, l'augmentation de température est donc moins freinée au sein du mur.

- Au milieu du mur BC1, les augmentations de T et de pression de vapeur sont plus importantes que celles du mur BC2. Même si la forte porosité favorise les changements de phase et implique aussi une plus faible inertie.

Ces travaux montrent que le choix d'une granulométrie adaptée permet d'optimiser le comportement hygrothermique du matériau et ainsi atténuer les variations de température extérieure.

5.2.2 Echelle Bâtiment

5.2.2.1 Variation de température et d'humidité – Confort hygrothermique

SHEA A. et al [18] ont étudié expérimentalement une cellule avec des murs en béton de chanvre. La cellule, composée d'une seule pièce de 27m², a été construite pour l'expérience à l'université de Bath en Grande-Bretagne. Les matériaux, les composants et les paramètres utilisés pour caractériser la cellule sont listés dans le tableau 8 ci-dessous. Les expérimentations ont été réalisées après séchage du mur et application d'un mortier, lorsque l'équilibre de l'humidité entre le bâtiment et l'ambiance extérieure était atteint.

Tableau 8 : Paramètres principaux des composants de la cellule

| Composant | Matériau(x) | Paramètre(s) |
|-----------------------|--|--|
| Murs | Béton de chanvre | Épaisseur = 200 mm Densité de matériau sec = 275 kg/m ³ Résistance thermique totale = 3.20m ² K/W Coefficient de transmission thermique = 0.42 W/m ² K |
| Plafond | Plaque de plâtre | Épaisseur = 9 mm |
| Isolation du plafond | Matériau à cellules fermées | Épaisseur = 200 mm Conductivité thermique = 0.023 W/m·K |
| Plancher | Panneau de particules | Surface = 27 m ² |
| Isolation du plancher | Matériau à cellules fermées | Épaisseur = 200 mm Conductivité thermique = 0.023 W/m·K |
| Porte face au sud | Pans de bois avec triple vitrage à faible émissivité et rempli à l'argon | U-value = 0.79 W/m ² K |
| Fenêtres face au nord | | U-value = 0.97 W/m ² K |
| Fenêtres face au sud | | U-value = 1.05 W/m ² K |

Les capteurs de température sont placés sur les surfaces intérieures et extérieures des murs et ceux mesurant l'humidité relative, au centre des murs. La température et l'humidité relative de l'air intérieur et extérieur sont aussi mesurées. L'évolution des températures de surfaces intérieures et extérieures des murs pendant 11 jours du mois de mai 2011 est montrée sur la figure ci-dessous; l'évolution d'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur pendant la même période est aussi montrée ci-dessous. Enfin une dernière figure permet de comparer la température de l'air à l'intérieur et celle des surfaces intérieures des murs.

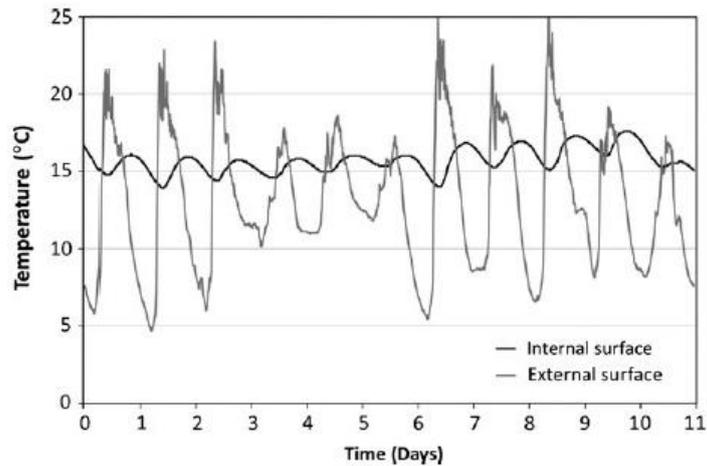


Figure 17 : Evolution des températures de surfaces intérieures et extérieures des murs

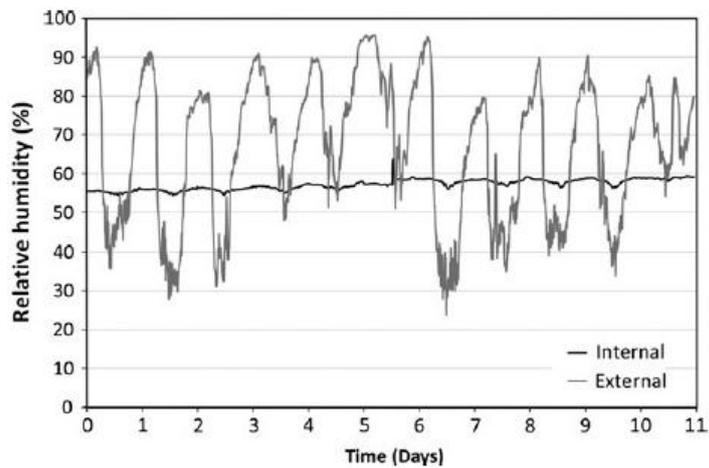


Figure 18 : Evolution de l'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur

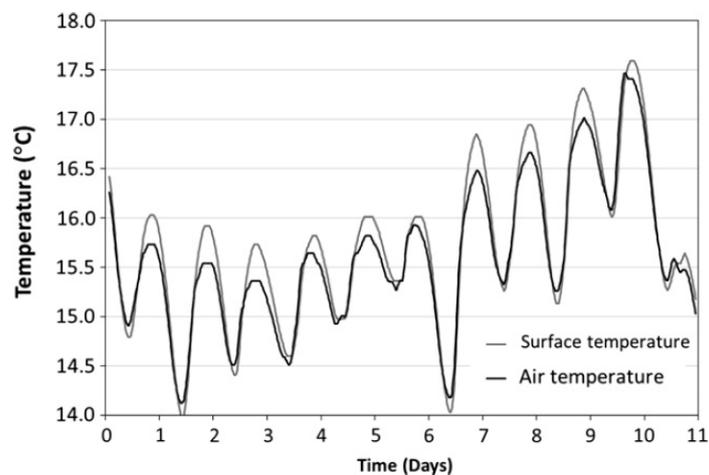


Figure 19: Comparaison des températures à l'intérieur et sur la surface intérieure des murs

La variation de la température extérieure pendant le mois de mai a été de 6.5°C alors que celle à l'intérieur a été de 0.9°C. De même, l'humidité relative à l'intérieur a été stable par rapport aux conditions extérieures. Ce qui signifie que la cellule a une forte capacité à amortir à la fois les oscillations de température et d'humidité relative.

5.2.2.2 Variation de température et d'humidité – Confort hygrothermique – Consommation d'énergie

TRAN LE A.D. et al [11] ont réalisé la simulation du comportement hygrothermique d'un bâtiment en béton de chanvre. Dans leur étude, un modèle basé sur les travaux de N. Mendes et al [51] a été utilisé.

Les informations principales sont précisées dans le tableau 9 ci-dessous. La diffusion d'humidité dans le plancher n'est pas considérée ; un dissipateur thermique et un régulateur de pression ont été installés dans la cellule. Pour la simulation, la température et l'humidité relative mesurées à Nancy au mois de janvier ont été appliquées sur les murs sud et ouest. Pour les murs au nord et est, la température et l'humidité relative sont restées constantes, respectivement 20 °C et 60%.

Tableau 9 : Information principales de la cellule étudiée par Tran Le et al [x]

| | |
|-----------------|---|
| Surface | 15 m ² |
| Volume | 42.75m ³ |
| Murs extérieurs | Epaisseur = 30 cm |
| Murs intérieurs | Epaisseur = 20 cm |
| Plafond | Epaisseur = 30 cm |
| Ventilation | taux de renouvellement d'air= 0.5 changement d'air par heure |

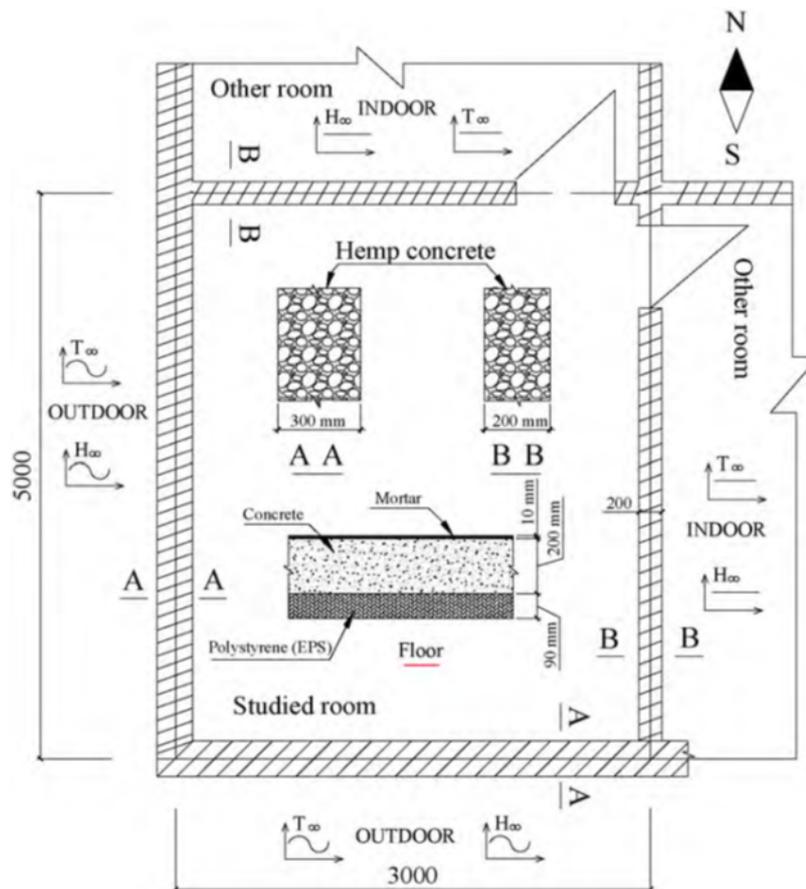


Figure 20: Cellule étudiée par TRAN LE A.D. et al.

Deux modèles sont utilisés pour simuler deux cas d'étude différents. Les deux modèles et les deux cas sont expliqués dans le tableau ci-après.

Tableau 10 : Détails des 2 modèles et 2 cas de la simulation

| | |
|------------|--|
| Modèle Th | Modèle qui ne tient pas compte du transfert de masse dans l'ensemble du bâtiment |
| Modèle HAM | Modèle prenant en compte le transfert de masse et de chaleur dans l'ensemble du bâtiment |
| Cas 0 | Cellule inoccupée |
| Cas 1 | Cellule occupée entre 22h et 8h (la production d'humidité et de chaleur augmente) |

L'évolution de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de la cellule pour ces deux cas est montrée sur la figure ci-après :

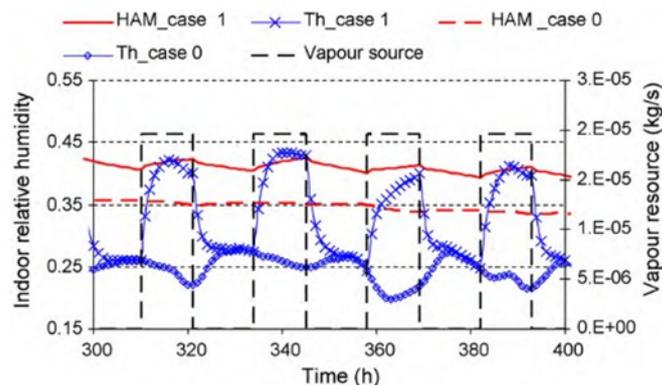


Figure 21 : Variation de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de la cellule pour les deux cas et les deux modèles.

On peut noter que la capacité d'absorption d'humidité de béton de chanvre modère la variation de l'humidité à l'intérieur de la pièce.

TRAN LE A.D. et al ont ensuite réalisé une analyse de sensibilité de ces résultats et ont noté que l'isotherme de sorption et la conductivité thermique avaient un léger effet sur la variation de l'humidité relative.

Par ailleurs, concernant la consommation d'énergie de la cellule, TRAN LE A.D. et al ont montré qu'il existait un lien entre la performance énergétique de la cellule et le comportement hygrothermique du matériau.

Par une analyse de sensibilité, ils ont trouvé que :

- Les coefficients de transport de masse avaient un léger effet sur la variation de la consommation énergétique ;
- L'isotherme de sorption avait un léger effet sur la variation de la consommation énergétique ;
- Le taux de ventilation avait un fort effet sur la variation de la consommation énergétique ;

Ils ont aussi montré qu'une bonne stratégie de ventilation avec la capacité tampon hydrique du béton de chanvre permettait de diminuer la consommation énergétique d'un bâtiment.

Enfin, TRAN LE A.D. et al ont souhaité comparer le comportement hygrothermique de la cellule en béton de chanvre à celui d'une cellule en béton cellulaire. L'évolution de l'humidité relative de ces deux cas est montrée sur la Fig.5.9 ci-dessous.

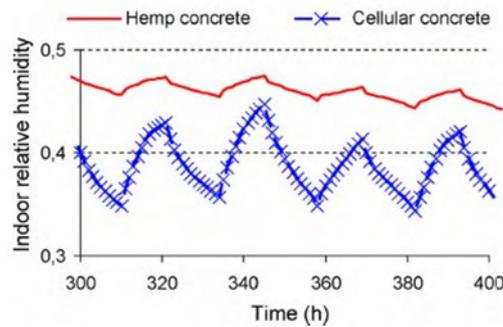


Figure 22 : L'évolution d'humidité relative à l'intérieur de la cellule en béton de chanvre et celle en béton cellulaire

On peut voir nettement que la cellule en béton de chanvre a une meilleure capacité de tampon hydrique que la cellule en béton cellulaire.

De la même façon, ils ont calculé que la cellule en béton de chanvre consommait moins d'énergie que celle en béton cellulaire (Cf. figure 20). Ces calculs sont basés sur les consommations énergétiques durant un mois de Janvier avec les conditions météorologiques hivernales de Nancy.

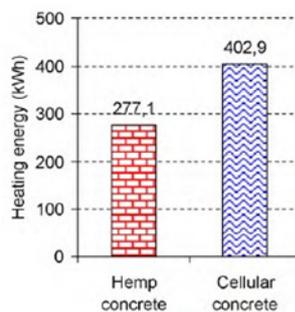


Figure 23 : L'énergie de chauffage de la cellule en béton de chanvre et celle en béton cellulaire TRAN LE A.D. et al [xx]

5.3 Construction en paille

5.3.1 Echelle Composant

5.3.1.1 Système de mur :

WIHAN J. [13] a simulé le comportement hygrothermique d'un système de mur en paille en utilisant le logiciel WUFI. Les résultats des simulations ont été comparés avec ceux des mesures réelles.

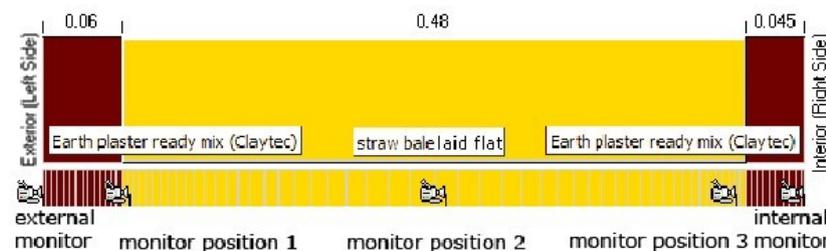


Figure 24 : Le système de mur en paille et les positions des capteurs

Le système de mur en paille et les positions des capteurs sont montrés sur la figure 21 ci-dessus. Le mur est composé d'une partie principale en paille couverte d'un enduit de terre appliqué sur les faces intérieures et extérieures. Trois capteurs sont implantés dans le mur pour mesurer la température et

l'humidité relative. Deux autres capteurs mesurent ces valeurs sur les surfaces intérieures et extérieures du mur.

Les mesures ont été réalisées sur une période s'étendant du 7 décembre 2005 au 1er mai 2006. (Cf. la figure 22 ci-dessous). La température et l'humidité relative à l'extérieur ont été considérées comme des sollicitations pour les simulations dans le logiciel WUFI.

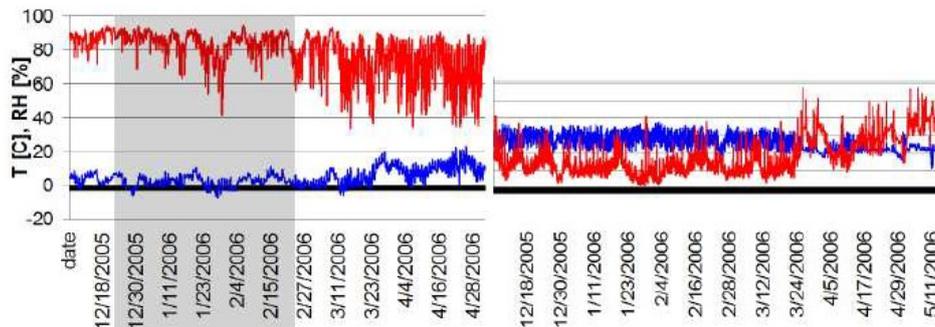


Figure 25 : L'évolution de température et d'humidité relative à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b) du 19 février 2006 au 12 mars 2006

L'évolution de la température et de l'humidité relative des simulations (les courbes rouges) et des mesures (les courbes bleues) sont affichées sur la figure 23 ci-dessous :

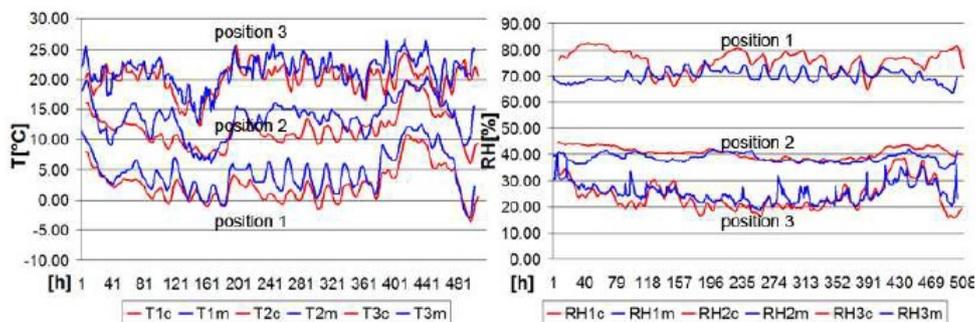


Figure 26 : L'évolution de température et d'humidité relative des simulations (les courbes rouges) et des mesures (les courbes bleues) du 19 février 2006 au 12 mars 2006

Globalement, les résultats simulés par WUFI présentent les mêmes tendances et valeurs que les résultats mesurés. Les seules différences notables sont pour les valeurs de l'humidité relative au point 1. L'écart d'humidité important entre les résultats simulés et mesurés sur cette position 1 peut être dû à l'inexactitude des données d'entrée. En réalité, l'humidité relative à l'extérieur a été mesurée dans un endroit très éloigné du mur étudié, et donc a sans doute été surestimée.

Ces travaux permettent de conclure que, même si l'infiltration d'air et la convection de flux d'air ne sont pas pris en compte par la modélisation, les résultats sont assez satisfaisants car ils correspondent plutôt bien à la réalité. Dans cette étude la conductivité du matériau joue un rôle prépondérant pour simuler l'évolution de la température et de l'humidité relative.

5.3.2 Echelle Bâtiment

5.3.2.1 Variation de température et d'humidité – Confort hygrothermique :

ASHOUR T. et al [19] ont mesuré l'évolution de température et d'humidité relative au sein des murs en paille d'une maison d'habitation de deux étages, déjà existante, située en Allemagne (non habitée au

moment des mesures).

Plusieurs capteurs ont été installés sur les murs comme indiqués sur la figure 24 :

- sur la surface d'enduit à l'extérieur (T),
- entre l'enduit à l'extérieur et le mur en paille (T),
- dans le mur à 10cm de l'extérieur (T+HR),
- dans le mur à 20cm de l'extérieur (T+HR),
- entre le mur en paille et l'enduit à l'intérieur (T),
- sur la surface d'enduit à l'intérieure (T).

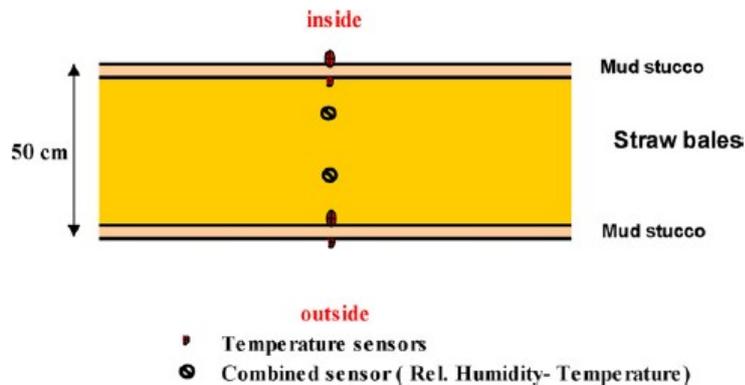


Figure 27 : Les positions des capteurs de température et d'humidité relative

L'évolution de la température de l'ambiance extérieure a aussi été mesurée. Sur le tableau 11, on montre la variation de température sur les différents points.

Tableau 11 : Les températures moyennes sur les différents points

| Time (h) | Outside temp. (°C) | Outside plaster surface | Between outside plaster and straw | 10 cm | 20 cm | Between straw and inside plaster | Inside plaster surface |
|----------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|------------------------|
| 0 | 12.70 | 12.10 | 12.50 | 13.73 | 13.43 | 13.50 | 13.70 |
| 24 | 11.78 | 11.82 | 11.97 | 13.89 | 13.72 | 12.40 | 12.04 |
| 24-96 | 9.69 | 10.87 | 11.24 | 12.51 | 12.57 | 10.78 | 11.62 |
| 96-261 | 11.84 | 12.53 | 12.62 | 14.31 | 14.17 | 12.96 | 13.26 |

Les résultats montrent que la température intérieure est restée stable malgré la forte variation des températures extérieures. L'étude montre aussi que les températures au sein du mur en paille (à 10cm et à 20cm de l'extérieur) étaient supérieures à la température de l'enduit la plupart du temps.

Tableau 12 : Les humidités relatives moyennes sur les différents points

| Time (h) | Outside relative humidity (%) | 10 cm from outside | 20 cm from outside |
|----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 78.77 | 71.76 | 68.82 |
| 24 | 61.58 | 70.25 | 67.94 |
| 24-96 | 62.33 | 69.72 | 67.50 |
| 96-261 | 67.39 | 71.26 | 69.16 |

De la même manière que pour la température, l'étude prouve que l'humidité relative mesurée au sein du mur est resté stable même s'il y a eu une variation forte de l'humidité relative à l'extérieur. Par ailleurs, ASHOUR T. et al ont aussi noté que le transfert d'humidité dans ce mur en ballots de paille était lent.

5.3.2.2 Consommation d'énergie :

La consommation d'énergie pour le chauffage dans les maisons en ballots de paille a été mesurée par la SCHL [10] (Société canadienne d'hypothèques et de logement) et comparée à la consommation de

maisons conventionnelles, évaluée par une simulation.

Les 11 maisons mesurées en ballots de paille ont des murs d'une épaisseur de 450mm environ. Les simulations ont été faites avec le logiciel HOT2000. Des maisons simulées ont été construites conformément au code du bâtiment de la Colombie-Britannique. L'aire du plancher, l'isolant du plancher, l'isolant des combles, l'exposition solaire, etc dans les maisons conventionnelles simulées ont été pris identiques à ceux des maisons en ballots de paille. De plus, les maisons simulées avaient des fenêtres renforcées en PVC à double vitrage avec lame d'air et intercalaires isolants.

Tableau 13 : La consommation d'énergie et les détails des 11 maisons

| Maison BP n° | Consommation d'énergie mesurée (maisons en ballots de paille) [GJ] | Consommation d'énergie simulée (maisons conventionnelles) [GJ] | % d'énergie consommée par maisons BP / aux maisons modélisés | Aire de plancher totale [m ²] | Année de construction | Type de murs en ballots | Observations sur maison BP |
|--------------|--|--|--|---|-----------------------|-------------------------------|--|
| 1 | 115,6 | 100,9 | 12,7 | 133 | 1996 | Poutres et poteaux | 30% de la surface murale vitrée ; 78% en simple vitrage |
| 2 | 52,9 | 48,6 | 8,1 | 108 | 1998 | Poutres et poteaux | 20% de la surface murale vitrée ; 100% en simple vitrage; chauffage à l'eau chaude |
| 3 | 98,6 | 103,5 | -4,7 | 156 | 1998 | Poutres et poteaux | Chauffage à l'eau chaude; travaux intérieurs non terminés |
| 4 | 24,6 | 31,9 | -22,9 | 48 | 1997 | Porteurs | Appartement et local de rangement |
| 5 | 96,7 | 129,7 | -25,4 | 210 | 2000 | Poutres et poteaux en rondins | Deux étages; Chauffage à l'eau chaude; système de ventilation non utilisé |
| 6 | 104,7 | 129,4 | -19,1 | 189 | 2001 | Poutres et poteaux modifiés | Chauffage à l'eau chaude; travaux intérieurs non terminés |
| 7 | 56,4 | 81,7 | -31,0 | 218 | 1999 | Poutres et poteaux modifiés | Pompe géothermique |
| 8 | 152,9 | 249,5 | -38,7 | 267 | 1998 | Ossature en gros bois d'œuvre | Appartement de deux étages |
| 9 | 142,1 | 186,3 | -23,7 | 209 | 2000 | Ossature en gros bois d'œuvre | Deux étages; Chauffage à l'eau chaude |
| 10 | 105,7 | 137,4 | -23,1 | 153 | 1999 | Poutres et poteaux | VRC utilisé |
| 11 | 73,4 | 95,7 | -23,3 | 91 | 1998 | Porteurs | Système de ventilation non utilisé |
| Moyenne | 93,1 | 117,7 | -20,9 | 162 | | | |

Ces résultats montrent quand même une nette amélioration de l'efficacité énergétique des maisons en ballots de paille par rapport à des maisons conventionnelles. En effet, on peut voir que les maisons en ballots de paille où les mesures ont été réalisées, ont consommé en moyenne 20% moins d'énergie pour le chauffage que les maisons conventionnelles modélisées. L'auteur du rapport explique partiellement ce résultat par la sous-ventilation des maisons dont on a mesuré les consommations.

5.4 Bois massif

5.4.1 Echelle Composant

5.4.1.1 Paroi Simple :

RAJI S. [8] a détaillé les caractéristiques de transferts thermique et hydrique de parois formées de madriers «Bois Massif contre-collé verticalement » avec joint feutrine entre madriers. Il a étudié en particulier, l'effet du joint de colle sur les propriétés hydriques du madrier, ainsi que l'effet des joints

feutrine entre madriers sur la perméabilité totale du mur.

Les madriers considérés dans cette étude sont en bois massif contre-collé verticalement avec des joints de feutre entre madriers. Le bois utilisé est le pin Silvestre importé de Finlande. Les joints de feutre sont en polypropylène, de 90 mm de largeur et de 8 mm d'épaisseur. Le profil du mur est représenté sur la figure 25 ci-dessous :

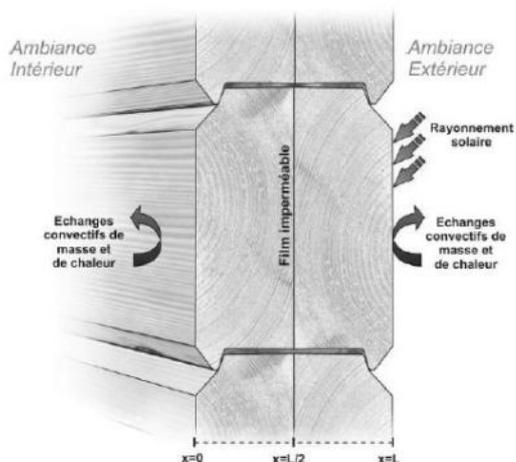


Figure 28 : Paroi contrecollée avec joints de feutre en bois massif

Le modèle utilisé pour simuler numériquement le comportement hygrothermique de la paroi, est un modèle simplifié. La condition d'imperméabilité du film n'est pas toujours retenue. Un film perméable est possible, donc avec une résistance aux transferts hydriques.

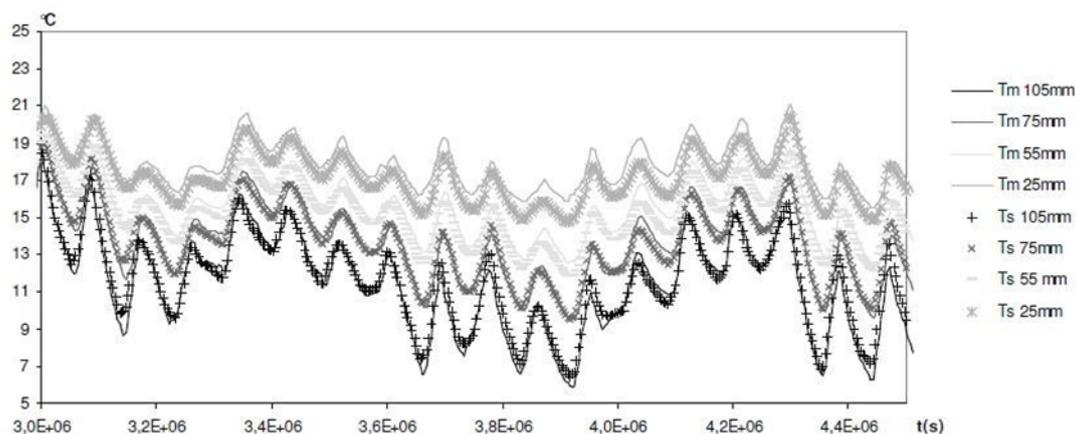


Figure 29 : Evolution au cours du temps de la température aux points ($x = 25\text{mm}, 55\text{mm}, 75\text{mm}$ et 105mm), mesures (Tm) et simulations (Ts)

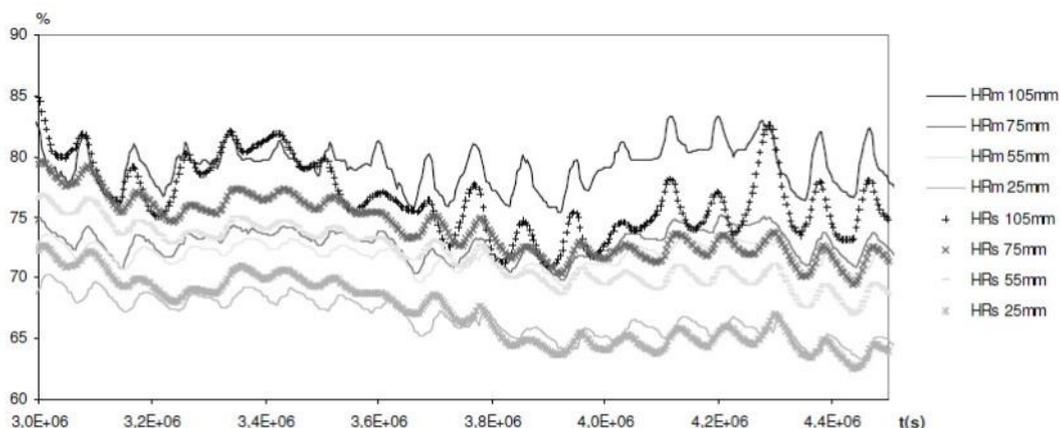


Figure 30 : Evolution au cours du temps de l'humidité relative aux points ($x = 25\text{mm}$, 55mm , 75mm et 105mm), mesures (HRm) et simulations (HRs)

Les conditions aux limites sur les deux cotés sont implémentées dans le logiciel COMSOL grâce aux mesures de température et d'humidité relative réalisées sur site. Toutes les valeurs des paramètres du bois utilisés pour la simulation ont été mesurées en laboratoire : conductivité thermique (λ), diffusivité thermique (a), épaisseur du mur (e), perméabilité (k), densité (ρ), diffusivité effective de la vapeur d'eau dans l'espace poreux (D_e), isotherme de sorption.

L'évolution de la température et de l'humidité relative des simulations sont représentées sur les figures 26 et 27 pour les différentes profondeurs $x = 25\text{mm}$, 55mm , 75mm et 105mm . Les résultats des mesures réelles sont affichés sur les mêmes figures.

Par rapport à la température, les mesures et la simulation s'accordent bien. Les écarts sont contenus dans l'erreur de mesure de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

D'autre part, les simulations de l'humidité relative reproduisent correctement la tendance et l'ordre de grandeur des mesures, mais il existe des écarts importants au point $x = 105\text{mm}$. Il est indiqué que la différence est probablement due à une faute d'étanchéité par rapport à l'ambiance intérieure.

Il est montré à la fois par la simulation et la mesure que la température du bois est inférieure à celle du joint entre madriers.

L'expérimentation montre que le joint de colle présente une résistance hydrique aux transferts de vapeur d'eau en régime stationnaire, alors qu'il est moins important en régime variable.

5.4.2 Echelle Bâtiment

RAJI S. [8] a effectué des travaux pour caractériser le confort hygrothermique de bâtiment en bois massif. Pour cela il a réalisé des mesures de l'évolution de la température et de l'humidité relative dans des bâtiments réels. Deux études ont été menées en parallèle :

- Comparaison d'un bâtiment d'habitation et d'un bâtiment de bureaux : cas n° 1 ;
- Et plus largement, comportement hygrothermique de 20 maisons en bois massif : cas n° 2.

5.4.2.1 Variation de température et d'humidité – Confort hygrothermique :

Deux bâtiments en bois massif respectivement à usage d'habitation (noté B. HA) et de bureaux (noté B.BU) ont été construits à Jugazan, en France. Les murs intérieurs et extérieurs sont formés de madriers de bois

massif contrecollés verticalement. B.HA est un logement pour une famille de 4 personnes avec une surface totale de 147m² (pour un volume de 303m³). B.BU est un bâtiment, qui sert à la fois de bureaux pour 7 personnes et aussi de pavillon témoin pour la société Confort Bois. Il possède une surface totale de 110m² (pour un volume de 350m³). L'épaisseur des murs est respectivement de 113mm pour le bâtiment d'habitation et de 134mm pour le bâtiment de bureau.

Les températures mesurées sont celles de l'air, obtenues par des capteurs installés contre les murs. Un capteur placé dans la salle de séjour de B.HA est noté *Coin jour* et un dans la chambre est noté *Coin nuit*.

Les températures et les humidités relatives ont été enregistrées pour deux périodes :

- La période « Hiver », représente la période de chauffage : du 1er octobre au 31 mars ;
- La période « Eté » : du 22 juin au 21 septembre.

Pour caractériser le confort hygrothermique, RAJI S. a choisi une zone de confort d'hiver différente de celle de la norme française et de la norme ASHRAE (les maisons étudiées sont équipées de thermostats d'ambiance qui permettent d'adapter la quantité de chaleur émise aux besoins instantanés de chauffage). Par conséquent, la zone choisie a été déterminé pour une température comprise entre 18°C et 23°C pendant la période d'hiver et entre 19°C et 27°C pendant la période d'été, l'humidité relative variant entre 30% et 60%.

Les analyses des mesures de température et d'humidité relative seront présentées dans les paragraphes suivants.

I. Mesures et analyse de la température

RAJI S. observe de ses mesures les deux cas suivants :

- Sur les deux périodes, les températures minimales dans le bâtiment de bureaux étaient toujours inférieures à celles du bâtiment d'habitations
- Pendant la période Eté, les températures moyennes dans le bâtiment de bureaux étaient supérieures à celles du bâtiment d'habitations.

La forte variation de la température dans le bâtiment de bâtiment est directement liée à l'usage du bâtiment. RAJI S. remarque que la température a été maintenue à 16°C pendant la nuit ; que la température est montée régulièrement jusqu'à 21°C à partir de 7h du matin et que l'arrivée des 7 personnes dans les bureaux, à partir de 9h, a entraîné une augmentation de la température jusqu'à atteindre 24°C et parfois même 26°C.

Sur la figure 28 ci-dessous, les températures intérieures dans le bâtiment d'habitation sont représentées pendant les périodes Hiver et Eté avec une zone de confort thermique.

En période hiver, 93% des points sont situés entre les 2 limites; 3% des points sont supérieurs à 22°C pour le coin jour, et 5% inférieurs à 17°C pour le coin nuit.

En période été, 100% des points de mesures sont inférieurs à la limite supérieure, et 50% des points mesurés sont inférieurs à la limite basse.

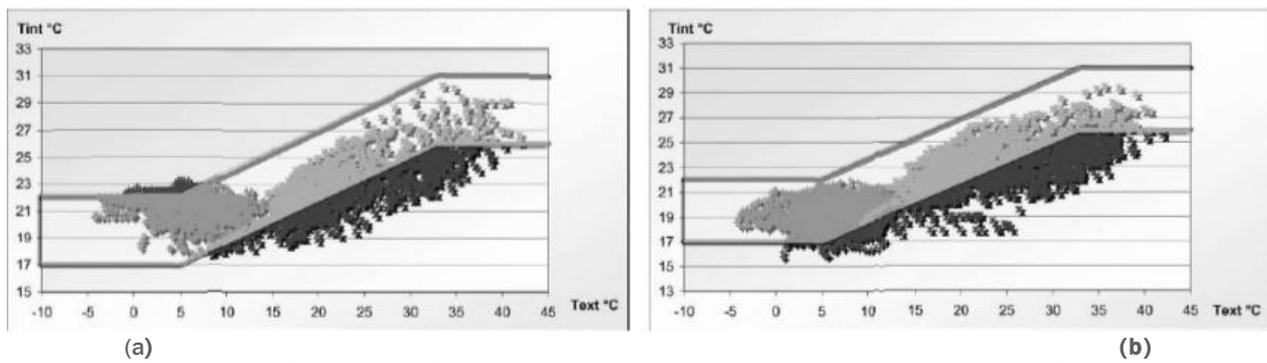


Figure 31 : Zone de confort thermique dans la maison : (a) Coin jour (b) Coin nuit

Pour le bâtiment de bureaux, les températures intérieures sont affichées sur la figure 29 avec les périodes Hiver et Eté, et une zone de confort thermique. On remarque que 11% des points des mesures sont au-dessus de la limite supérieure.

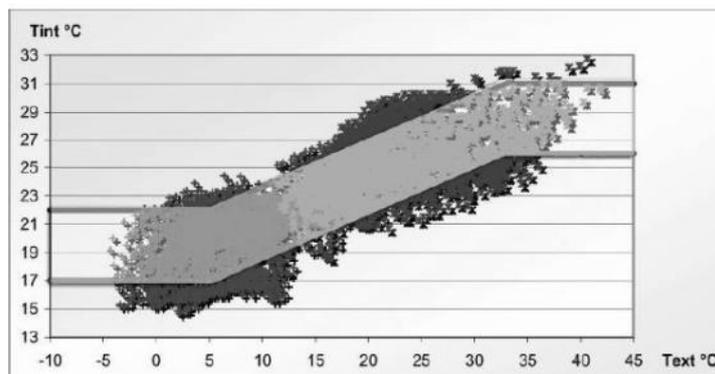


Figure 32 : Zone de confort thermique dans le bâtiment de bureaux

On peut noter que le bâtiment d'habitation a un bon fonctionnement thermique (température dans la zone de confort) que ce soit en période Eté où Hiver. Les résultats concernant le bâtiment de bureaux sont légèrement moins bons que ceux du bâtiment d'habitation. Mais dans l'ensemble, les températures se situent toujours dans la zone de confort hygrothermique.

II. Mesure et analyse de l'humidité relative

La moyenne des humidités relatives relevées dans les deux bâtiments est montrée dans le tableau 14 .

On peut noter que :

- En période Eté et Hiver, le bâtiment d'habitation avait une valeur moyenne d'humidité relative plus élevée que celle du bâtiment de bureaux.
- En période Hiver, le bâtiment d'habitation avait une valeur moyenne d'humidité relative supérieure dans le coin nuit à celle du coin jour.

En analysant les valeurs de l'humidité relative, RAJI S. conclut que les taux d'humidité relative pendant la période Hiver étaient acceptables et que l'humidité relative était plus élevée dans le bâtiment d'habitation que celle dans le bâtiment de bureaux.

Tableau 14 : Humidités relatives mesurées dans les 2 bâtiments et à l'extérieur en période Hiver et Eté

| | Période Hiver | | | Période Eté | | |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | HR _{min} | HR _{moy} | HR _{max} | HR _{min} | HR _{moy} | HR _{max} |
| Bât. Habitation CJ | 32% | 52% | 76% | 31% | 51% | 80% |
| Bât. Habitation CN | 39% | 60% | 67% | 28% | 51% | 70% |
| Bât. Bureaux | 22% | 42% | 70% | 22% | 44% | 76% |
| Extérieur | 50% | 88% | 100% | 22% | 52% | 100% |

RAJI S. a calculé et analysé l'humidité absolue à l'intérieur des deux bâtiments et à l'extérieur. (Cf. Tableau 15). L'humidité absolue correspond à la masse de vapeur d'eau contenue dans 1kg d'air sec. Elle indique la charge d'humidité dans le bâtiment.

On peut voir que pendant la période Eté, la charge d'humidité était plus importante dans le bâtiment d'habitation que dans le bâtiment de bureaux alors que le nombre de personnes résidant dans le bâtiment d'habitation est inférieur à celui du bâtiment de bureaux. Ce qui peut être expliqué par une forte fréquence d'ouverture des portes dans le bâtiment de bureaux en période d'occupation.

Tableau 15 : Humidité absolue [g/kg] calculée dans les 2 bâtiments et à l'extérieur pendant la période Hiver et Eté.

| | Période d'hiver | | | Période d'été | | |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | X _{min} | X _{moy} | X _{max} | X _{min} | X _{moy} | X _{max} |
| Bât. Habitation CJ | 7,58 | 9,40 | 11,79 | 7,01 | 10,80 | 16,54 |
| Bât. Habitation CN | 6,67 | 9,96 | 12,92 | 6,17 | 11,12 | 16,51 |
| Bât. Bureaux | 2,67 | 6,11 | 10,96 | 5,74 | 10,83 | 16,58 |
| Extérieur | 3,86 | 7,18 | 12,74 | 5,63 | 11,58 | 19,53 |

Par l'analyse des résultats de mesures de l'humidité absolue, on peut voir que :

- les valeurs de l'humidité absolue dans le bâtiment de bureaux étaient très proches de celle de l'extérieur en hiver ;
- l'humidité absolue des deux bâtiments était très proche de celle de l'extérieur en été ;
- la charge d'humidité dans le bâtiment d'habitation était supérieure dans le coin nuit à celle du coin jour pour les deux périodes.

Enfin, RAJI S. souligne dans son analyse le rôle important joué par l'activité des personnes pour l'évolution du comportement hygrothermique à l'intérieur d'un bâtiment.

III. Confort hygrothermique

Le confort hygrothermique du bâtiment d'habitation dans le coin jour et dans le coin nuit ainsi que celui du bâtiment de bureaux sont montrés sur la figure 30 ci-après pour la période Hiver et la période Eté.

Sur la figure 33 ci-dessous, sont représentées les zones de confort pendant la période d'hiver et la période d'été dans les 2 bâtiments, les points de mesure sont bien placés dans les zones de confort pour le bâtiment d'habitation. Les graphes C et D confirment les résultats de confort obtenus dans le bâtiment de bureaux. Les graphes E à H représentent un cas de surchauffe et de forte humidité dans la maison, et une forte surchauffe dans le bâtiment de bureaux.

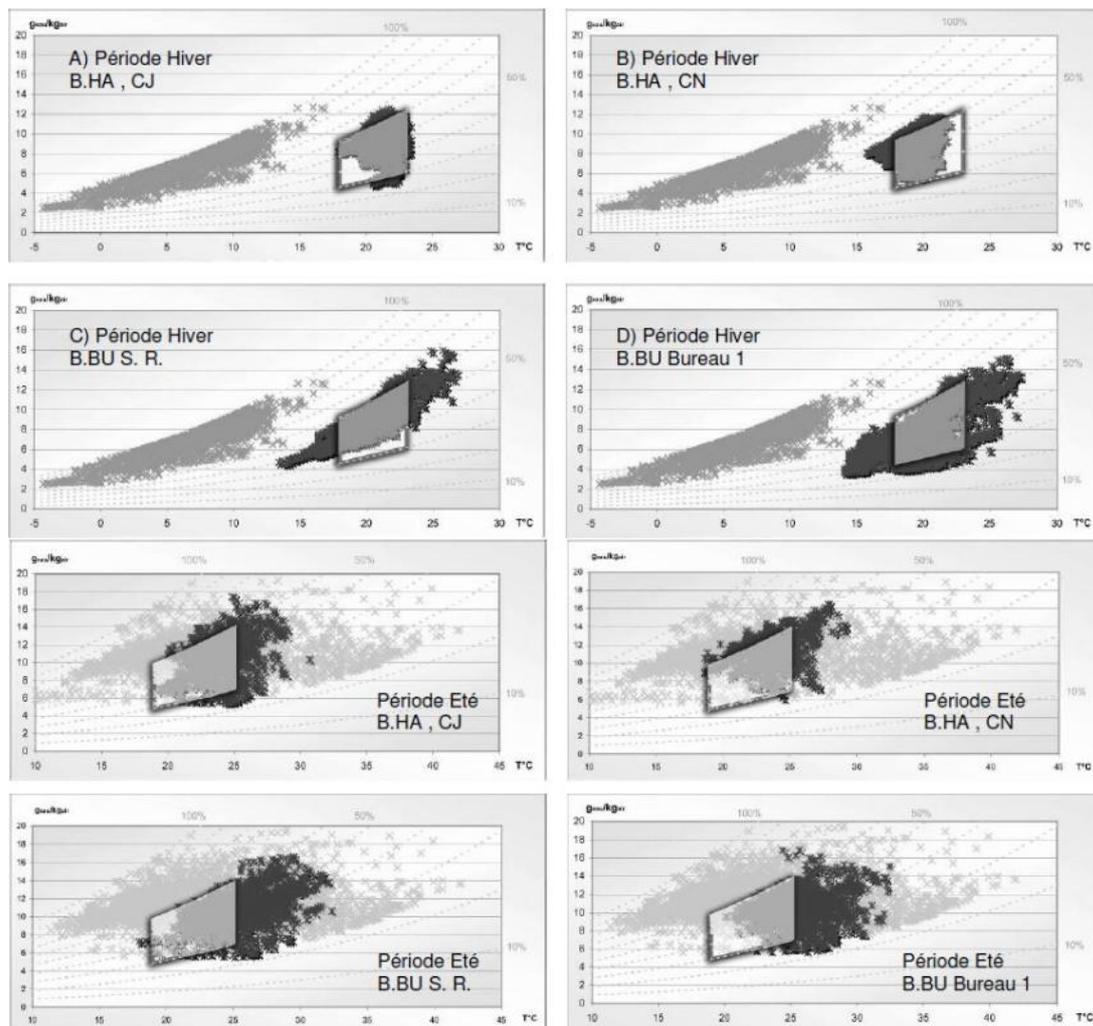


Figure 33 : Zones de confort pour le bâtiment d'habitation (Coin jour et Coin nuit) et pour le bâtiment de bureaux (Salle de réunion et Bureau 1)

Pendant l'hiver, le bâtiment d'habitation montre un bon confort hygrothermique : seulement 17% des mesures de T sont inférieures à 18 °C et 20% des mesures de HR sont un peu élevées. Le bâtiment de bureaux montre aussi un assez bon confort hygrothermique mais 25% des mesures de T sont inférieurs à 18 °C.

Pendant l'été, la température est très élevée dans les deux bâtiments et de fortes humidités relatives sont mesurées.

5.4.2.2 Variation de température et d'humidité – Confort hygrothermique :

Pour ce deuxième cas, RAJI S. a choisi 20 maisons en bois massif ayant une surface moyenne de 160m² (un minimum de 80m² et maximum de 280m²) et y a réalisé des mesures de la température et de l'humidité relative. Les maisons sont situées dans 12 départements différents en France.

Les maisons ont été construites avec des pièces différentes de bois massif : en « Madrier » noté M ou en « Rondin » noté R. Ces pièces de bois avaient des dimensions différentes selon les maisons.

Par ailleurs un récapitulatif des différents modes de chauffage utilisés dans les maisons a été réalisé grâce à un questionnaire remis aux habitants, soit : 40% de chauffage électrique, 10% de chauffage au gaz, 30% de chauffage au fuel et 20% de chauffage au bois. Ce questionnaire permettait aussi de connaître un autre élément essentiel, le type de ventilation (naturelle, VMC, simple ou double flux...).

Cependant cette information n'a pas été exploitée dans la suite de l'étude.

Les caractéristiques principales des maisons en bois massif sont présentées dans le tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16 : Récapitulatif des informations de chaque maison

| N° | Constructeur | C. Postal | Altitude (m) | Surface habitable (m²) | Profil paroi | Epaisseur paroi | TYPE CHAUFFAGE/ECS |
|-----|--------------|-----------|--------------|------------------------|--------------|-----------------|-------------------------|
| M01 | 1 | 18 | 150 | 103 | Madrier | 100 | Gaz/Gaz |
| M02 | 5 | 25 | 900 | 215 | Madrier | 100 | Fuel/Fuel |
| M03 | 5 | 39 | 229 | 286 | Madrier | 100 | Fuel/Elec |
| M04 | 5 | 39 | 300 | 156 | Madrier | 100 | Fuel/Fuel |
| M10 | 3 | 25 | 970 | 92 | Madrier | 100 | Fuel/Fuel |
| M13 | 3 | 39 | 269 | 170 | Madrier | 120 | PAC/PAC&Elec |
| M14 | 2 | 39 | 650 | 158 | Rondin | 280 | PAC/PAC&Elec |
| M15 | 2 | 01 | 550 | 103 | Rondin | 280 | Gaz/Gaz |
| M21 | 8 | 63 | 830 | 162 | Madrier | 134 | Bois+Elec/Elec |
| M22 | 8 | 33 | 10 | 149 | Madrier | 134 | Bois+Elec/Elec |
| M23 | 8 | 89 | 78 | 102 | Madrier | 110 | Elec/Elec |
| M25 | 7 | 64 | 176 | 96 | Madrier | 110 | Elec+ ap. Gaz/Elec |
| M27 | 7 | 87 | 221 | 129 | Madrier | 110 | Bois+Elec/Elec |
| M28 | 7 | 60 | 181 | 254 | Madrier | 134 | Fuel/Elec |
| M29 | 7 | 16 | 112 | 153 | Madrier | 110 | Elec/Elec |
| M31 | 4 | 67 | 500 | 82 | Rondin | 300 | P. Granulé /ECS Solaire |
| M35 | 8 | 16 | 112 | 248 | Madrier | 134 | Elec/Elec |
| M36 | 8 | 87 | 301 | 147 | Madrier | 134 | Elec/Elec |
| M37 | 6 | 87 | 550 | 190 | Rondin | 300 | Elec/Elec |
| M39 | 8 | 33 | 50 | 224 | Madrier | 113 | Fuel/Fuel |

Deux capteurs ont été installés à l'intérieur de chaque maison. Le premier était dans la salle de séjour, noté Coin jour ; le deuxième dans une chambre, noté Coin nuit. Les deux capteurs étaient sur un mur à une hauteur supérieur à 1m50 du sol afin d'éviter le rayonnement solaire direct. Un autre capteur a été mis à l'extérieur sous abri sur la façade nord.

Les mesures se sont passées pendant deux périodes : du 1er octobre jusqu'au 20 avril, noté Période Hiver, et du 21 juin jusqu'au 20 septembre, noté Période Eté.

Les mesures montrent que, pendant la période hiver, la température moyenne à l'intérieur reste toujours entre 18 et 22°C. Et la température maximum reste toujours inférieure à 25°C pour 65% des maisons.

Concernant la période Eté, la température moyenne est inférieure à 25°C pour 95% des maisons et la température maximale reste inférieure à 28°C pour 85% des maisons.

RAJI S. a adopté les mêmes critères que ceux du cas N° 1 pour analyser le confort hygrothermique des 20 maisons. Dans son analyse, 4 situations d'inconfort sont concernées et notées respectivement :

- Tint - pour « sous chauffe »
- Tint + pour « sur chauffe »
- DH - pour « trop sec »
- DH + pour « trop humide »

Tableau 17 : Taux d'inconfort sur les 20 maisons pendant la période d'hiver et la période d'été

| Maison | Période HIVER | | | | | Période ETE | | | | |
|--------|--------------------|--------------------|------|-----|-----------|--------------------|--------------------|-----|------|-----------|
| | T _{int} - | T _{int} + | DH- | DH+ | Inconfort | T _{int} - | T _{int} + | DH- | DH+ | Inconfort |
| 1 | 0 % | 5 % | 0 % | 2 % | 6 % | 0 % | 20 % | 0 % | 23 % | 25 % |
| 2 | 0 % | 1 % | 2 % | 1 % | 4 % | 0 % | 1 % | 0 % | 0 % | 2 % |
| 3 | 4 % | 21 % | 1 % | 1 % | 25 % | 0 % | 8 % | 0 % | 10 % | 16 % |
| 4 | 1 % | 2 % | 1 % | 1 % | 3 % | 0 % | 8 % | 0 % | 20 % | 25 % |
| 10 | 20 % | 1 % | 36 % | 1 % | 45 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 1 % |
| 13 | 0 % | 3 % | 1 % | 0 % | 5 % | 0 % | 7 % | 0 % | 9 % | 12 % |
| 14 | 9 % | 3 % | 2 % | 0 % | 12 % | 0 % | 3 % | 0 % | 2 % | 5 % |
| 15 | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 3 % | 0 % | 10 % | 11 % |
| 21 | 11 % | 26 % | 8 % | 0 % | 38 % | 0 % | 8 % | 0 % | 1 % | 8 % |
| 22 | 3 % | 0 % | 0 % | 0 % | 3 % | 0 % | 11 % | 0 % | 21 % | 21 % |
| 23 | 3 % | 14 % | 0 % | 0 % | 17 % | 0 % | 5 % | 0 % | 13 % | 14 % |
| 25 | 68 % | 0 % | 0 % | 1 % | 69 % | 0 % | 6 % | 0 % | 51 % | 52 % |
| 27 | 24 % | 44 % | 0 % | 3 % | 68 % | 0 % | 37 % | 0 % | 20 % | 42 % |
| 28 | 0 % | 1 % | 0 % | 0 % | 2 % | 0 % | 2 % | 0 % | 5 % | 5 % |
| 29 | 0 % | 1 % | 1 % | 0 % | 2 % | 0 % | 9 % | 0 % | 16 % | 18 % |
| 31 | 38 % | 4 % | 27 % | 0 % | 55 % | 0 % | 6 % | 0 % | 2 % | 6 % |
| 35 | 3 % | 0 % | 0 % | 0 % | 3 % | 0 % | 18 % | 0 % | 13 % | 18 % |
| 36 | 5 % | 1 % | 2 % | 0 % | 7 % | 0 % | 19 % | 0 % | 17 % | 19 % |
| 37 | 0 % | 1 % | 0 % | 0 % | 1 % | 0 % | 5 % | 0 % | 8 % | 9 % |
| 39 | 17 % | 0 % | 0 % | 0 % | 18 % | 0 % | 11 % | 0 % | 11 % | 13 % |

Pendant la période hiver, le taux de sous-chauffe est inférieur à 10% pour 14 des 20 maisons et le ratio d'inconfort est aussi inférieur à 20% pour 14 des 20 maisons.

Pendant la période d'été, le taux de sur chauffe est aussi inférieur à 10% pour 14 des 20 maisons.

Le confort hygrothermique des maisons en bois massif est donc satisfaisant que ce soit en période d'été ou d'hiver.

5.4.2.3 Consommation d'énergie :

RAJI S. [8] a poursuivi son étude en mesurant les consommations énergétiques dues au chauffage de ces 20 maisons en bois massif. La consommation d'énergie mesurée par rapport à la valeur calculée est représentée sur la Fig.5.26.

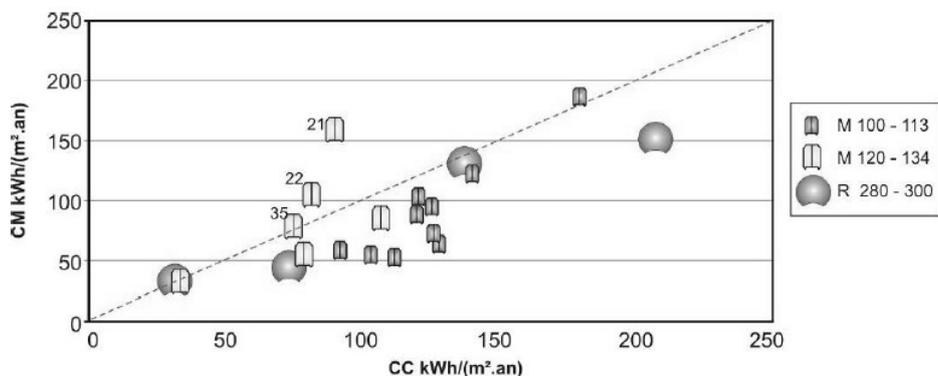


Figure 34 : La consommation d'énergie mesurée par rapport à celle calculée selon la RT2000

15 maisons mesurées sur 20 présentent une consommation d'énergie pour le chauffage inférieure à celle calculée. La consommation d'énergie élevée des 5 autres maisons est due à des problèmes de chauffage ou d'isolation.

En moyenne, la consommation d'énergie mesurée pour le chauffage est de 85 kWh/(m².an), soit 18% en

dessous de la valeur calculée.

Une relation entre l'épaisseur de la paroi et la consommation énergétique est difficile à établir.

L'analyse de RAJI S. montre que des maisons en bois massif, bien isolées et ayant un rendement de chauffage normal, ont une consommation d'énergie normale à faible.

Par ailleurs les ratios de consommations et de besoins pour le chauffage, indiquent que le choix du système de chauffage et la gestion jouent un rôle plus important que l'épaisseur de la paroi pour une baisse de la consommation énergétique.

5.5 Isolant vrac ou en panneaux

5.5.1 Echelle Composant

Le CSTB et le FCBA [1] ont mené une étude sur les transferts hygrothermiques à travers des parois de maisons ossature bois. Dans le cadre de cette étude le CSTB et le FCBA soulignent l'importance de ces transferts et l'influence qu'ils peuvent avoir sur les performances des produits et leur durabilité (corrosion, croissance fongique...).

L'objectif de cette étude était d'identifier l'influence de certains paramètres sur ces transferts hygrothermiques à travers les parois à ossature bois.

Les paramètres d'influence qui ont été étudiés sont les suivants :

- Le climat ;
- La perméabilité à la vapeur d'eau du pare vapeur
- Le type d'isolant
- La perméabilité à la vapeur d'eau de la barrière
- La perméabilité à la vapeur d'eau du panneau de contreventement

L'un des paramètres importants pouvant influencer les transferts est le type d'isolant thermique utilisé entre montants. Trois types d'isolants ont été étudiés dans le cadre de ces travaux:

- La laine minérale
- La ouate de cellulose
- La fibre de bois

Les climats des ambiances extérieures utilisés dans les calculs sont les suivants :

- Un climat de plaine défavorable
- Un climat de zone côtière
- Un climat de montagne
- Un climat méditerranéen

Les calculs sont effectués pour une paroi verticale exposée au nord.

Les transferts ont été étudiés par simulation avec WUFI.

Un certain nombre de données sur les produits et matériaux constituant la paroi sont nécessaires aux modèles de calculs. Il s'agit par exemple de :

- La résistance à la diffusion de la vapeur d'eau
- La courbe de sorption
- La conductivité thermique
- La chaleur spécifique ou chaleur massique
- La porosité
- La masse volumique

A l'issue des différentes configurations simulées, le CSTB et le FCBA considèrent que parmi tous les cas de figures et toutes les configurations de parois soumis à l'étude, seuls ne devraient être retenus ceux qui :

- Présentent des effets acceptables⁴ sur la santé des occupants en limitant la production des spores de moisissures entrant dans le milieu intérieur.
- Ne présentent pas de perte de résistance mécanique au cours du temps, qui générerait des problèmes de sécurité pour les occupants des bâtiments.

Des niveaux de risque ont donc été définis comme suit :

Tableau 18 : Définitions des risques d'humidification et de condensation [1]

| |
|---|
| <p>Le niveau "pas de risque" correspond à des cas de figure où l'humidité globale de la paroi n'augmente pas au cours du temps, et où les matériaux n'entrant pas dans la stabilité du bâtiment de la paroi (isolants, plâtre, tasseaux...) ne dépasse jamais 23% d'humidité et où les éléments structuraux (montants, traverses, panneaux...) ne dépasse jamais 20% d'humidité. Ces cas de figures classés "pas de risque" ne présentent pas non plus de fortes humidités surfaciques pouvant générer des moisissures ou impacter la santé des utilisateurs du bâtiment.</p> |
| <p>Le niveau "risque maîtrisable" correspond à des cas de figures qui dans un premier temps ne remplissent pas les conditions du niveau "pas de risque" mais qui avec des aménagements dans les hypothèses de calcul par rapport à l'utilisation du bâtiment peuvent bénéficier du classement dans la catégorie "pas de risque". Une hypothèse de calcul modifiable est par exemple la réduction de l'hygrothermie du local : d'un W/n de 5 g/m³ (hypothèse de calcul initiale), on passe à un W/n de 2,5 g/m³.</p> <p><i>Il est à noter que le maître d'ouvrage devra alors s'engager sur un taux de renouvellement d'air permettant de respecter la condition $W/n \leq 2,5 \text{ g/m}^3$.</i></p> |
| <p>Le niveau "risque permanent" ne remplit ni les conditions du niveau "pas de risque", ni les conditions du niveau "risque maîtrisable".</p> |

Par ailleurs une propriété influant le comportement du matériau bois à l'humidité est sa capacité à pouvoir contenir à la fois de l'eau libre et/ ou de l'eau liée. L'eau est dite liée ou hygroscopique quand elle est retenue chimiquement (liaisons hydrogènes) par le matériau. Les molécules d'eau sont alors fixées dans le matériau lui-même. Dans le cas du bois, l'eau libre ou capillaire donc liquide apparaît lorsque le taux d'humidité (en % en masse) dépasse le point de saturation des fibres. Le point de saturation des fibres est pour les principales essences résineuses utilisées en structure, atteint lorsque l'humidité du bois dépasse 30% en masse.

Les cas de calcul où l'humidité du bois ou des matériaux à base de bois (panneaux isolants) dépasse 30% sera donc également un critère rédhibitoire, la présence d'eau liquide dans une paroi fermée étant très difficile à évacuer.

Les influences du type d'isolant ont été étudiées à partir de calculs effectués sur la configuration 2 et sur la configuration 3 montrées ci- après.

La configuration 2 est une configuration classique à laquelle il a été rajouté un isolant du côté intérieur. Cette isolation est donc placée entre la plaque de plâtre et la barrière à la vapeur d'eau.

⁴ [1] p14 : « Concernant les effets sur la santé et la qualité de l'air, l'évaluation des cas de figures calculés sera faite au cas par cas et ceux présentant des humidités de surfaces élevées (supérieures à 30% en masse, pendant plusieurs semaines) seront écartés.

La configuration 3 correspond à la configuration 2 avec le voile travaillant de contreventement cette fois placé du côté intérieur entre les deux couches d'isolant et avec le rajout d'une isolation complémentaire du côté extérieur.

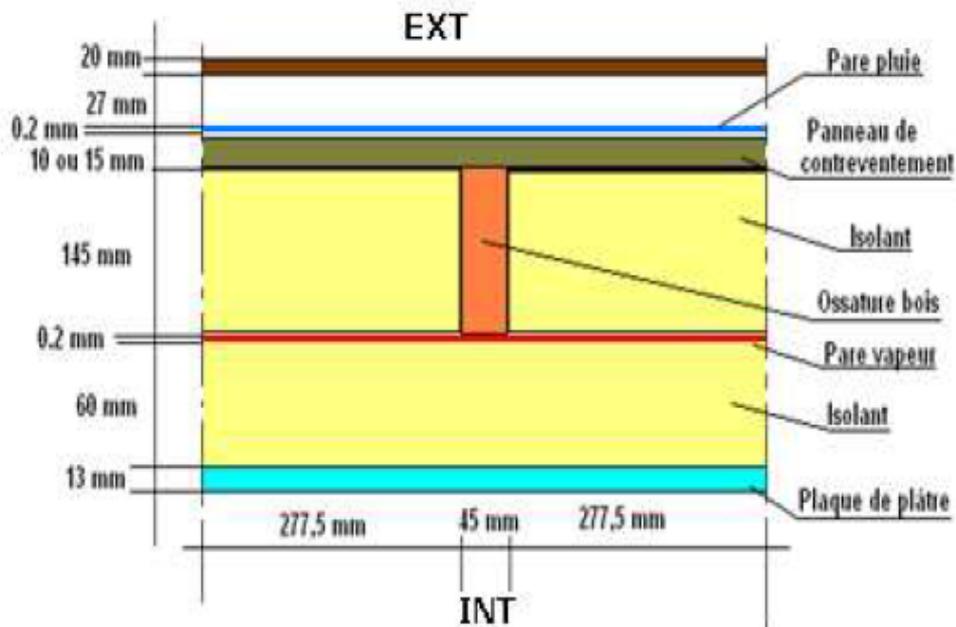


Figure 35: Représentation schématique de la paroi- Configuration 2

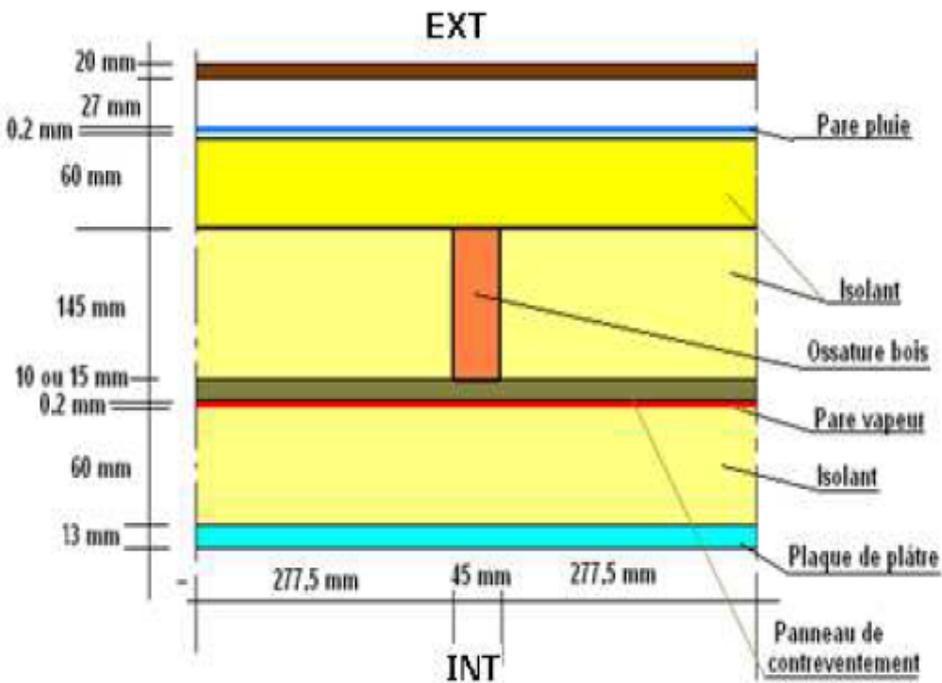


Figure 36: Représentation schématique de la paroi - Configuration 3

Dans la configuration 2, les douze premiers cas de figure (1 à 12) permettent de mettre en évidence, la différence entre les types d'isolant et la barrière à la vapeur d'eau.

Tableau 19 : Valeurs des variables des caractéristiques des parois pour la configuration 2

| N° | Cas | Climat | Pare pluie | | Type isolant | | | Barrière à la vapeur d'eau | | | | Voile travaillant de contreventement | | | | | |
|----|-----|--------|------------|------|--------------|----|----|----------------------------|----|---|------|--------------------------------------|-----|---|---|----|--|
| | | | Sd | | MW | WF | CF | Sd | | | | Sd | | | | | |
| | | | 0.1 | 0.18 | | | | 18 | 10 | 5 | Sans | 0.2 | 0.5 | 1 | 5 | 10 | |
| 1 | 1 | N | X | X | X | | | X | | | | | | X | | | |
| 2 | 1 | N | X | | | X | | X | | | | | | X | | | |
| 3 | 1 | N | X | | | | X | X | | | | | | X | | | |
| 4 | 1 | N | X | X | X | | | | X | | | | | X | | | |
| 5 | 1 | N | X | | | X | | | X | | | | | X | | | |
| 6 | 1 | N | X | | | | X | | X | | | | | X | | | |
| 7 | 1 | N | X | X | X | | | | | X | | | | X | | | |
| 8 | 1 | N | X | | | X | | | | X | | | | X | | | |
| 9 | 1 | N | X | | | | X | | X | | | | | X | | | |
| 10 | 1 | N | X | X | X | | | | | | X | | | X | | | |
| 11 | 1 | N | X | | | X | | | | | X | | | X | | | |
| 12 | 1 | N | X | | | | X | | | | X | | | X | | | |

MW(laine minérale) ; WF (fibre de bois) ; CF (Ouate de cellulose) ; N (Nancy) ; Sd (valeur Sd)

Concernant l'influence du type d'isolant, le CSTB et le FCBA établissent les conclusions suivantes:

« Les isolants de type végétal (fibre de bois, ouate de cellulose, etc...) sont des isolants à base de produit absorbant la vapeur d'eau.

De ce fait quand les niveaux de teneur en eau sont proches des limites de condensation, ces isolants absorbent l'humidité et permettent de retarder voir empêcher dans certains cas ces condensations.

Pour un produit très absorbant, ce déphasage sera plus important.

Ce mécanisme de déphasage se produit également lors de la désorption. Le produit reste plus longtemps humide.

Dans ces conditions la teneur en eau de l'isolant, et notamment de l'isolant coté intérieur testé dans les configuration é et 3, peut atteindre pour une fibre de bois, 58 kg/m³ ce qui correspond à une conductivité thermique de 0.43 W/(m.K) ce qui réduirait les performances thermiques de la paroi. »

5.5.2 Echelle Bâtiment

Pas de document publié sur ce sujet.

6 Conclusion

Comme ces études diverses et variées le montrent, le terme comportement hygrothermique représente en fait plusieurs phénomènes. Il faut donc dans un premier temps bien s'accorder sur la définition de ce terme. Et cette définition est liée aux 3 échelles concernées dont il est fait état dans cette synthèse : l'échelle matériau, l'échelle composant et l'échelle bâtiment.

A l'échelle de Matériau, on présente simplement plusieurs propriétés intrinsèques des matériaux, surtout la porosité, et les modélisations du transfert de masse et d'énergie au sein des matériaux.

Aux échelles Composant et Bâtiment, les cas d'études concernent les expérimentations et les simulations par rapport au comportement hygrothermique et à la consommation d'énergie.

La plupart des études s'intéresse au rôle joué par le changement de phase et par l'évaporation et la condensation de l'eau.

Dans certaines études ces phénomènes sont caractérisés expérimentalement ou par simulation afin d'évaluer leur influence sur la durabilité des systèmes constructifs (influence sur la croissance fongique, influence sur la durabilité des propriétés mécanique...).

Dans d'autres études ces phénomènes sont caractérisés expérimentalement ou par simulation afin d'évaluer leur rôle dans la performance thermique d'une paroi. En effet, les changements de phase de l'eau au sein du mur s'accompagnant de dégagement ou d'absorption d'énergie, ils peuvent avoir une influence sur la consommation d'énergie d'un bâtiment.

On remarque d'ailleurs que le changement de phase et son influence sur la performance thermique d'une paroi est déjà bien mis en évidence dans le cas du béton de chanvre. Des études similaires pourraient être menées sur les isolants fibres végétales et sur la construction paille.

Il faut donc quantifier le changement de phase au sein des matériaux et faire une liaison entre ce phénomène et la consommation d'énergie au niveau du bâtiment.

La consommation d'énergie des bâtiments construits en matériaux biosourcés est donc un sujet très intéressant. Plusieurs études ont déjà permis de réaliser des mesures dans des bâtiments réels. Cependant ces études n'établissent pas le lien entre le comportement hygrothermique et la consommation d'énergie qui permettrait d'intégrer le comportement hygrothermique dans les moteurs de calcul de la consommation énergétique d'un bâtiment.

Pour mieux utiliser et valoriser les matériaux biosourcés et développer l'ensemble de la filière, il est nécessaire aujourd'hui de quantifier le changement de phase au sein des matériaux et de faire un lien entre le changement de phase dans les matériaux, le confort hygrothermique du bâtiment, et la consommation d'énergie.

7 Références

Publications

- [1] CSTB, & FCBA. (2011). Synthèse de l'étude hygrothermique des parois à ossature bois. (p. 25).
- [2] A.D. Tran Le. (2010). Thèse : Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment. Université de Reims Champagne-Ardenne. (p.221)
- [3] Department of Civil Engineering - Technical University of Denmark. (2005). Moisture Buffering of Building Materials.
- [4] D. Samri. (2008) Thèse: Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique. ENTPE. (p.284). N° d'ordre :2008-ISAL-0067
- [5] Y. Hustache (2008). Synthèses des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre. (p.104)
- [6] CEBTP, FFB, & ADEME. (2004). Utilisation de la paille en parois de maisons individuelles à ossature bois. (p.32)
- [7] A. Piot. (2009). Thèse: Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. INSA Lyon. (p.174)
- [8] S. Raji. (2006). Thèse: Caractérisation hygrothermique, par une approche multi échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale. Université Bordeaux 1. (p. 226)
- [9] F. Collet, S. Prétot, Y. Aït Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, C. Lanos.. Comportement hygrothermique de parois en béton de chanvre. Présentation Powerpoint : Journée technique Construction en Chanvre. (14 Juin 2012).
- [10] D. Fugler, HJ Gonzalez.. SCHL La consommation d'énergie dans les maisons en ballots de paille. Le Point en recherche.(Mai 2002). Série technique 02-115.
- [11] A.D. Tran Le, C. Maalouf, T.H. Mai, E. Wurtz, F. Collet. Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. Energy and Building 42. (2010). (pp 1797-1806). Disponible sur ScienceDirect.
- [12] Y. Ait Oumeziane. Modélisation du transfert de chaleur et de masse : impact de la perméabilité à l'air et de l'hystérésis pour le béton de chanvre. 29ème rencontres universitaires de génie civil. (2011)
- [13] J. Wihan. (2007). Thèse: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. University of East London. (p.271)
- [14] A. Evrard, A. De Herde. Hygrothermal Performance of Lime–Hemp Wall Assemblies. Journal of Building Physics OnlineFirst. (November 26, 2009)
- [15] F. Collet, S. Prétot, C. Lanos.. Etude expérimentale du comportement hygrothermique d'une paroi en blocs de béton de chanvre avec ossature en bois. 29ème rencontres universitaires de génie civil. (2011). (pp 258-267)

- [16] E. Gourlay, P. Glé, L. Arnaud, E. Gourdon, « Propriétés multiphysiques des bétons de chanvre », *Matériaux et techniques*, 2011, doi :10.1051/mattech/2011021.
- [17] C. Rode, R. Peuhkuri, L.H. Mortensen, K.K. Hansen, B. Time, A. Gustavsen, T. Ojanen, J. Ahonen, K. Svennberg, L-E. Harderup and J. Arfvidsson (2005). *Moisture Buffering of Building Materials*, Final Report, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark. BYG-DTU R-126. ISBN 87-7877-195-1.
- [18] A. Shea, M. Lawrence, P. Walker (2012). *Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building*. *Construction and Building Materials* 36. (pp. 270-275). Disponible sur ScienceDirect
- [19] T. Ashour , H. Georg, W. Wu (2011). *Performance of straw bale wall: A case of study*. *Energy and Buildings* 43. (pp. 1960-1967). Disponible sur ScienceDirect
- [20] C. Maalouf, A. D. Tran Le, M. Lachi, E. Wurtz, & T. H. Mai. (2011). *Effect of moisture transfer on thermal inertia in simple layer walls: case of a vegetal fibre material*.
- [21] S. Dubois, A. Evrard, & F. Lebeau (2008). *Hygrothermal modelling of Lime-Hemp concrete used as building material and indoor climate buffering characterization*.
- [22] C. Maalouf; A.D. Tran Le; T.H. Mai; E. Wurtz; K. C. Mendonça. (2008). *Simulation des transferts hygrothermiques d'une paroi en béton de chanvre en régime dynamique* (pp. 1-8).
- [23] J. Straube & C. Schumacher. (n.d.). *Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls*.
- [24] K.J. Dick & T. Krahn (2009). *Strawbale building system research and ongoing research at the alternative village*. University of Manitoba. (September). (pp. 6-9).
- [25] N. Stone (2003). *Thermal Performance of Straw Bale Wall Systems*, (October). (pp. 1-7).
- [26] K.G. Larson, K. Riesner, G-W. Mainka & R. Erikson (2006). *A Comparative Analysis of Hygrothermal Behavior in Wood Construction Walls from Two Different Geographical Perspectives in the USA*. (p. 8).
- [27] J. Eriksson, S. Ormarsson & H. Petersson (2006): *Finite-Element Analysis of Coupled Nonlinear Heat and Moisture Transfer in Wood*, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, 50:9, (pp. 851-864).
- [28] R.R. Zarr, D.M. Burch & A.H. Fanney (1995). *Heat and Moisture Transfer in Wood-Based Wall Construction: Measured Versus Predicted*. Nist Building Science. (p. 83).
- [29] S. Hameury (2006). *The hygrothermal inertia of massive timber constructions*. KTH Architecture and the Built Environment.
- [30] C.J. Schumacher (2008). *Hygrothermal Performance of Insulated, Sloped, Wood-Framed Roof Assemblies*.
- [31] S. Geving, A.N. Karagiozis & M. Salonvaara, M (1997). *Measurements and two-dimensional computer simulations of the hygrothermal performance of a wood frame wall*. *Journal of thermal insulation and building envelopes*. (pp. 301-319).
- [32] S. Merakeb, F. Dubois & C. Petit (2009). *Modeling of the sorption hysteresis for wood*. *Wood Science*

and Technology, 43(7-8), 575–589. doi:10.1007/s00226-009-0249-2

- [33] S. Raji, Y. Jannot, P. Lagièrè & J.R. Puiggali (2009). Thermophysical characterization of a laminated solid-wood pine wall. *Construction and Building Materials*, 23(10). (pp. 3189–3195). doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.015
- [34] R. Younsi, D. Kocaefe, & Y. Kocaefe (2006). Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood. *Applied Thermal Engineering*, 26(11-12). (pp. 1274–1285). doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.10.029
- [35] P. Mukhopadhyaya, R. El Khanagary, D. Van Reenen, C. Copeland, K. Kumaran, P.J. Newman & E. Zalok, (2009). Use of simulation tool to assess hygrothermal response of wood frame building envelopes in Taiwan. (pp. 1–12).
- [36] L. Arnaud, D. Samri (2005). Hygro-thermal behaviour of building porous materials, in Proc. Third Int. Biot Conference, Oklahoma (USA)
- [37] D. Samri, L. Arnaud (2006). Assessment of heat and mass transfers in building porous materials., Proceedings of the 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings, November 2006, Lyon.
- [38] F. Collet, S. Prétot (2012). Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete., *Construction and Building Materials*, 36.(pp 58-65).
- [39] F. Collet, M. Bart, L. Serres, J. Miriel (2008). Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials., *Construction and Building Materials*, 22. (pp 1271-1280).
- [40] S. Prétot, F. Collet. Experimental Study of Hygrothermal Behavior of a Hemp Concrete Wall (without and with coating), 2nd International conference on building energy and environment, Boulder, Colorado, 1er au 4 août 2012.
- [41] S. Prétot, F. Collet, C. Lanos (2012). Caractérisation hydrique d'un béton de chanvre moulé - Mesure de la capacité hydrique tampon, *Transfert 2012*, Lille.
- [42] F. Collet, S. Prétot. Variation de la capacité hydrique tampon de bétons de chanvre en fonction de la formulation, *Ecobat Sciences et techniques 1ère édition*, Paris, 7 et 8 mars 2012.
- [43] J. Chamoin, F. Collet , S. Prétot. Perméabilité à l'humidité de matériaux à base de chaux et de chanvre, XXVIIIèmes rencontres universitaires de Génie Civil, 2010, La Bourboule.
- [44] M. Lawrence, A. Heath, P. Walker (2009). Determining moisture levels in straw bale construction, *Construction and Building Materials*, 23. (pp.2763-2768).
- [45] L. Arnaud, Y. Hustache, B. Boyeux(2006). Le chanvre industriel, production et utilisations, chap. 11-7 : Construire en chanvre, Editions France Agricole, ISBN 2-85557-130-8. (pp347-372).
- [46] P. Glé, E. Gourdon, L. Arnaud (2011). « Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity », *Applied Acoustics* 72 (pp. 249 – 259). doi:10.1016/j.apacoust.2010.11.003
- [47] L. Arnaud, E. Gourlay (2011). « Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes », *Construction and Building Materials*, 28 (pp. 50-56). doi : 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.

- [48] E. Gourlay, L. Arnaud. "Optimisation des propriétés mécaniques et thermiques des bétons de chanvre - Impact des matières premières", Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, N° 1-2, Mars 2012.
- [49] P. Glé, E. Gourdon, L. Arnaud (2012). « Modelling of the acoustical properties of hemp particles », Construction and Building Materials, 37 (pp. 801-811). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.008
- [50] N. Mendes, I. Ridley, R. Lamberts, P.C. Philippi, K. Budag (1999). UMIDUS: A PC program for the prediction of heat and moisture transfer in porous building elements, in: Building Simulation'99 Conference, Kyoto, Japan. (pp. 1-7).

Sites internet

- [51] WIKIPEDIA
- [52] Site officiel WUFI : http://www.wufi.de/index_f.html
- [53] Site internet de l'ASIV: <http://www.votreisolation.com/a-propos/qui-sommes-nous.html>

La « durabilité » est au cœur du développement de l'utilisation des bioressources. Au-delà de l'intérêt environnemental, c'est aussi une réelle opportunité économique et sociale.

Pour le secteur de la construction, qui détient un part significative du potentiel d'amélioration de la « durabilité », les produits bio-sourcés sont une réponse aux besoins exponentiels de matériaux de construction et à l'accroissement de l'ensemble de leurs impacts sur le développement durable.

Avec le soutien de :



C&B Constructions et Bioressources - 8, Impasse de l'Europe - 89100 MAILLOT
Tél : +33 3 86 64 88 54 – cb@constructions-bioressources.org
<http://www.constructions-bioressources.org/>