
Prévision du comportement hygrothermique de maisons en bois massif

Saed Raji* - Philippe Lagière* - Elena Palomo* - Jean Rodolphe Puiggali*

**Laboratoire TREFLE Université Bordeaux 1, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence*
s.raji@trefle.u-bordeaux1.fr

RÉSUMÉ : Le développement de la construction bois est un enjeu important et une réponse efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment. Les maisons Bois Massif réalisées à partir de madriers empilés constituent la seule solution de construction « mono matériau » et par filière « sèche » sur le marché. Ces techniques de construction se sont aujourd'hui grandement améliorées et industrialisées mais une ambiguïté demeure toutefois sur l'efficacité énergétique et sur la prise en compte de leurs qualités thermiques réelles dans les calculs d'ingénierie et dans les réglementations. Ce travail a donc consisté en premier lieu, à détailler en laboratoire, les performances thermiques des madriers bois. Ensuite, et à partir des mesures sur site à grande échelle, un modèle de transfert couplé de masse et de chaleur applicable aux parois formées de madriers bois massif contrecollés a été développé. Enfin, on montre que la simulation de comportement hygrothermique proposée en utilisant le logiciel COMSOL® permet de reproduire convenablement l'évolution hygrothermique réelle de la paroi en bois massif contrecollé verticalement avec joint de feutre entre madriers.

ABSTRACT: The development of the wood construction sector is an important stake and an efficient response to a need for reduction of the environmental impacts related to the building sector. Massive timber structures made of piled beams are the only solutions based on "mono material" construction and "dry construction" in this sector. These construction techniques have improved and are largely industrialized today, however an ambiguity remains as for their energetic efficiency as well as for their real thermal qualities in the context of official calculations. This experimental study contains an in-situ measurement campaign that consists in detailing the thermal and energetic performances of wood logs in relation with the wooden building sector experts. Starting from these "in-situ" measurements and based on the hydrothermal characteristics of the wood logs determined in laboratory, a model of coupled heat and mass transfer applicable to the walls made of pasted massive beams was developed. At last, numerical simulations were carried out by the means of COMSOL® software. The obtained results show how to improve the hydrothermal behaviour and energetic performances of this type of construction.

MOTS-CLÉS : Construction, Bois, Madrier, Contre collé, Mur, transfert hygrothermique, Propriété physique, modèle couplé.

KEYWORDS: Building, Wood, Massive timber constructions, Log, Laminated, Physical Property, Improve energy performance.

1. Introduction

Le développement de la construction bois constitue une réponse efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment tant au niveau de la construction que de l'exploitation des bâtiments réalisés. En particulier, les techniques de parois dites à « ossature massive » ou « Bois Massif » par madriers empilés, fustes ou panneaux contrecollés constituent la seule solution de construction « mono matériau » et par filière « sèche » sur le marché. Si ces techniques se sont grandement améliorées au cours des 20 dernières années, grâce notamment aux industriels d'Europe du Nord, une ambiguïté demeure toutefois sur l'efficacité énergétique et sur la prise en compte de leurs qualités thermiques réelles dans les modèles de calculs utilisés à des fins réglementaires (RT2000/RT2005) ou par l'ingénierie en conception.

Des études à grande échelle (AFCOBOIS, 2006), (Raji, 2006), (Hamoury, 2006) sur la consommation, l'efficacité énergétique, le comportement hygrothermique et l'inertie du bâtiment Bois Massif « BM » montrent que les performances réelles de ce type de construction sont mal prises en compte dans les calculs thermiques usuels utilisés par l'ingénierie. Les outils de simulations existants considèrent le mur en bois massif comme une paroi pleine formée d'un matériau homogène, et utilisent un modèle de transfert simplifié. Les particularités et les spécificités du mur en bois massif ne sont alors pas prises en compte dans les calculs.

Pour répondre à cette problématique, et à partir de mesures « in situ » et des caractéristiques hygrothermiques des madriers « Bois Massif contre collé verticalement » avec joint feutrine entre madriers déterminées en laboratoire, on a construit une démarche intégrant à la fois, la modélisation multi-flux, l'observation « in-situ » à grande échelle en lien avec les constructeurs et la caractérisation hygrothermique en laboratoire présenté par (Raji, 2006).

Cet article est centré sur la validation et la simplification du modèle couplé de transfert de masse et de chaleur dans une paroi BM en utilisant les logiciels MATLAB[®] et COMSOL[®]; l'objectif final étant d'intégrer une formulation réduite dans un modèle de simulation dynamique global de bâtiment développé dans l'environnement SimSPARK (Wurtz *et al.* 2006).

2. Matériels et méthodes

La paroi présentée dans cette étude fait partie d'un bâtiment en bois massif, les madriers considérés sont en bois massif contre-collé verticalement avec des joints de feutre entre madriers. Le bois utilisé est le Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) 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 1.

Tout d'abord, nous avons montré expérimentalement (Raji *et al*, 2006) que la colle joue le rôle de résistance hydrique vis-à-vis des transferts de vapeur d'eau. Des joints de feutre posés entre les madriers assurent l'« étanchéité » de la paroi. La paroi orientée au nord a une épaisseur de 130 mm. Six capteurs de température et d'humidité relative de type SENSIRION® SHT7x ont été placés à l'intérieur de la paroi afin de suivre son évolution thermo hydrique au cours du temps (Fig. 1.A). De plus des capteurs de mesure du flux solaire global incident sur la paroi, de la température et de l'humidité relative de l'air de part et d'autre de la paroi ont été installés.

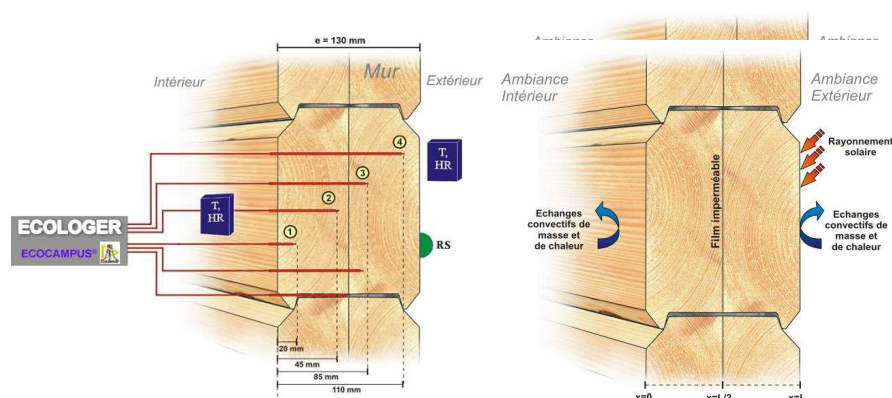


Figure 1 : A) Instrumentation de la paroi, B) Échanges d'énergie et de vapeur d'eau de part et d'autre de la paroi

L'évolution thermo hydrique de la paroi a été suivie pendant plus d'un an. Nous présentons ici les résultats qui feront l'objet de l'étude. Ils correspondent à la période du octobre au décembre 2004. Les grandeurs physiques mesurées sont comme déjà indiqué : la température et l'humidité relative sur quatre points à l'intérieur de la paroi (Fig. 1.B), la densité de flux solaire global sur la paroi, la température et l'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de mur. La période d'échantillonnage est de 10 min.

Afin de déterminer les grandeurs caractérisant les transferts thermo physiques et les propriétés d'équilibre du matériau bois utilisé, des mesures en laboratoire ont été effectuées sur des échantillons prélevés dans les madriers. Les résultats de ces travaux ont été présentés par (Raji *et al*. 2006).

On considère une paroi verticale infinie d'épaisseur L (Fig. 1.B). Elle sépare deux ambiances, intérieure et extérieure, avec lesquels elle échange de l'énergie (convection, rayonnement) et de la vapeur d'eau (convection), un film de colle est placé au milieu de la paroi et divise son épaisseur en deux domaines.

La paroi est un milieu constitué par une phase solide (matrice bois), une phase liquide (eau liquide libre et liée) et une phase gazeuse (air et vapeur d'eau) discontinues. Néanmoins, elle peut être assimilée à un milieu fictif continu dont l'état des éléments différentiels de volume est défini par une température et une teneur en eau (ou grandeur équivalente). La pertinence d'une telle hypothèse a été formellement justifiée par Whitaker en (1977) et elle aboutit aux modèles de transferts couplés de masse et de chaleur proposés par De Vries en (1957), puis par Luikov en (1966). Dans tout ce qui suit, on supposera que les transferts de masse et d'énergie dans la paroi sont unidimensionnels. Les différents rappels qui sont faits pour construire les équations de conservation sont assez généraux et acquis pour ne pas nécessiter de démonstrations, le lecteur pourra se référer, si nécessaire, aux articles déjà cités.

On peut écrire le modèle de transferts couplés de masse et d'humidité (modèle de référence) comme suivant (modèle de référence):

$$\begin{aligned}\rho_o c^* \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda_o + \rho_l L_v D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \right) \\ \rho_o \frac{\partial w_l}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

Où ρ_o et ρ_l [kg.m⁻³] sont respectivement la masse volumique apparente de la matrice solide et de l'eau liquide, c^* [J.kg⁻¹.K⁻¹] est la chaleur massique apparente du milieu, T [K] est la température, λ_o [W.m⁻¹.K⁻¹] est la conductivité thermique effective du milieu, L_v [J.kg⁻¹] est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, D_{Tv} [m².s⁻¹.K⁻¹] et D_{wv} [m².s⁻¹] sont respectivement les coefficients de diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient thermique et d'un gradient en teneur d'eau, w_l [kg/kg] est le teneur en eau liquide

Ce modèle va être réexaminé ici en vue d'identifier l'ensemble des simplifications qui peuvent s'opérer sur lui sans dégrader significativement sa précision. Bien entendu, l'objectif à terme est de trouver des structures mathématiques parcimonieuses et justes adaptées à la caractérisation « in situ » des parois en bois massif en supposant des conditions aux limites de troisième espèce de part et d'autre de la paroi, décrit par (Battaglia, 1995).

Pour réaliser les simulations bidimensionnelles, nous avons utilisé COMSOL Multiphysics™, logiciel avancé pour la modélisation et la simulation de tout processus physique décrit par des équations aux dérivées partielles. Un des principaux avantages de ce logiciel est sa capacité de coupler et de résoudre simultanément les équations.

3. Résultats et discussions

L'étude hygro-thermique d'une paroi en bois massif contre-collé verticalement met en évidence trois flux traversant une telle paroi : flux de chaleur, flux d'air humide et flux (diffusif) de vapeur d'eau. Ces trois flux traversent la paroi par deux chemins parallèles en considérant des transferts unidirectionnels (Fig. 2). Les propriétés physiques de chacun des éléments constitutifs de la paroi ont été déterminées.

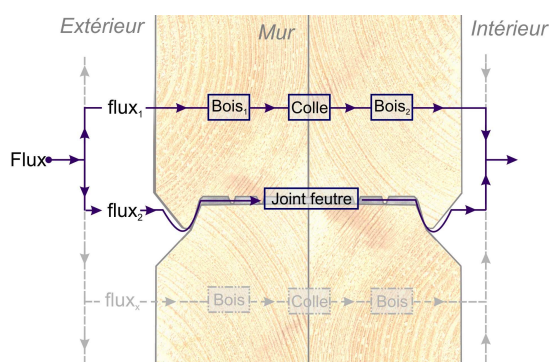


Figure 2 : Schématisation des flux traversant la paroi

L'isotherme de sorption est obtenue à l'utilisation de la méthode isostatique des solutions salines saturées. Nous avons trouvé une forte variation de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} avec l'humidité relative de l'air ϕ . Ensuite, la méthode du volumétre à mercure a été utilisée pour estimer la masse volumique humide ρ_{humide} et la masse volumique sèche ρ_{sec} .

Les propriétés thermiques du pin nordique ont été estimées dans la direction des fibres et dans la direction perpendiculaire par les méthodes du fil chaud et du ruban chaud respectivement. Il est ressorti de cette étude expérimentale la forte dépendance des propriétés thermiques du bois avec l'humidité.

Nous avons utilisé la méthode gravimétrique statique pour estimer le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau à travers la paroi, le coefficient de diffusion moyen du pin massif D_{wv} est de $5,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. On remarque une forte résistance au transfert de vapeur d'eau au niveau du joint de colle. Nous pouvons retenir que la présence d'un joint de colle ralentit fortement le passage de vapeur d'eau dans le bois, cette résistance peut avoir comme effet négatif la formation de « zones humides » au centre de la paroi.

La perméabilité à l'air a été mesurée à l'aide du perméamètre TREFLE, plusieurs profils de madriers et des types de joints entre madrier sont testés, les mesures sont effectuées sur trois éléments (bois, bois-colle-bois, et joint entre madriers). Les résultats montrent que le débit d'air à travers les joints entre madrier est 10 fois supérieur à celui traversant le bois contre collé.

3.1. Modèle à découplage faible « MDF »

En première temps, et à partir des mesures « in situ » présentées sur la figure 1 nous avons validé le modèle de transferts décrit par l'équations (1). Le modèle de référence a été ensuite, soumis à différents types de dégradations en vue d'une éventuelle simplification du processus ultérieur de caractérisation « in situ » des parois en bois, un découplage partiel entre les équations de conservation de l'énergie et de la masse a été opéré. Les transferts d'enthalpie liés aux transferts de vapeur et provoqués par les gradients en teneur en eau ont été négligés face aux transferts induits par des gradients de température. L'équation (1) devient alors :

$$\begin{aligned} \rho_o c^* \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda_o + \rho_l L_v D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ \rho_o \frac{\partial w_l}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Les gradients thermiques restent le seul moteur des transferts dans l'équation de conservation de l'énergie du modèle noté MDF, le couplage avec la teneur en eau se faisant uniquement à travers les coefficients de transferts (conductivité thermique apparente et capacité thermique effective du milieu). L'équation de conservation de la masse reste intacte.

Le modèle de référence et le modèle MDF ont été comparés entre eux et confrontés aux mesures. Les résultats obtenus indiquent que la simplification contenue dans le modèle MDF est tout à fait pertinente.

3.2. Modèle de simulation du comportement hygrothermique réel

La simulation du comportement hygrothermique réel « réalisée en utilisant le logiciel COMSOL » permet, d'une part d'appliquer des conditions aux limites mixtes sur les deux cotés de la paroi, et d'autre part d'évaluer le transfert de masse et d'énergie sur une paroi en bois massif contre collé, il prend en compte le profil de madrier et la présence du feutre propylène entre madrier.

En premier temps et à partir de l'interface graphique interactive de COMSOL, nous avons dessiné la paroi « madriers contrecollés avec joints de feutre » en 2D à l'échelle réelle. Ensuite, nous avons décrit les équations de transfert de masse et d'énergie du modèle MDF pour chaque partie de paroi. Nous avons quantifié également les conditions aux limites mixtes sur les deux cotés du mur en utilisant les fichiers de mesures réalisés sur site pour la température et l'humidité relative. La température et la teneur en eau initiales sont également appliquées sur les quatre points de mesure au début de la simulation numérique

Sur la figure 3 est représentée, l'évolution au cours du temps des températures mesurées et simulées aux points ($x = 25 \text{ mm}$, $x = 55 \text{ mm}$, $x = 75 \text{ mm}$ et $x = 105 \text{ mm}$). On constate une excellente concordance entre les mesures et la simulation, les écarts observés entre mesures et simulations sont la plupart du temps contenus dans l'erreur de mesure ($\pm 0.5^\circ\text{C}$).

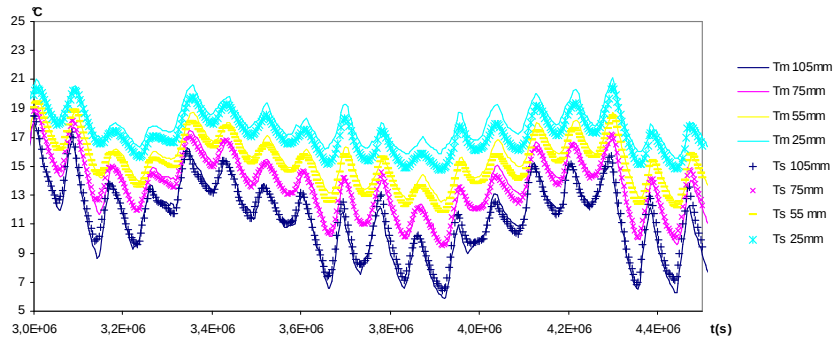


Figure 3 : Evolution au cours du temps de la température aux points $x=25 \text{ mm}$, $x=55 \text{ mm}$, $x=75 \text{ mm}$ et $x=105 \text{ mm}$, Mesures (lignes continues) et Simulations (croix).

Pareillement, l'évolution au cours du temps de l'humidité relative mesurée et simulée aux mêmes points est représentée sur la figure 4, on trouve que les simulations reproduisent correctement la tendance et l'ordre de grandeur des mesures.

Surtout, sur le point le plus proche de l'intérieur ($x=25\text{mm}$). Les écarts entre mesures et simulations sur les points $x=55\text{mm}$ et $x=75\text{mm}$ sont la plupart du temps contenus dans l'erreur de mesure ($\pm 3\%$). En valeur absolue, l'écart maximal rencontré sur le point $x = 105\text{mm}$ est néanmoins de 7%. Cette différence est probablement due à une fuite d'étanchéité par rapport à l'ambiance intérieure.

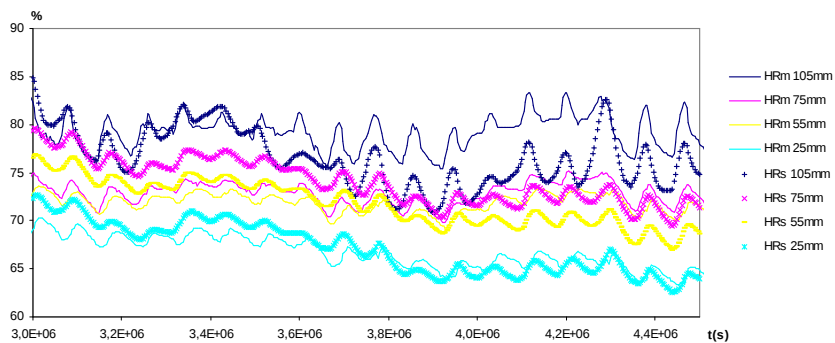


Figure 4 : Evolution au cours du temps de l'humidité relative aux points ($x = 25 \text{ mm}$, $x = 55 \text{ mm}$, $x = 75 \text{ mm}$ et $x = 105 \text{ mm}$), Mesures (lignes continues) et Simulations (croix).

4. Conclusions et perspectives

On a montré que la simulation de comportement hygrothermique permet de reproduire convenablement l'évolution hygrothermique réelle de la paroi en bois massif contrecollé verticalement avec joint de feutre entre madriers. Les différences entre mesures et simulations sont contenues la plupart du temps dans les intervalles d'incertitude des mesures.

Pour aller plus loin dans l'étude thermique d'un bâtiment en bois massif, nous avons intégré le modèle de comportement hydro thermique de la paroi BM dans un environnement de simulation bâtiment (SIMSPARK) bien adapté à la comparaison de différents modèles afin de déterminer et optimiser l'influence réelle du transfert couplé (chaleur, air, vapeur) sur la performance énergétique de MBM.

Le modèle complet sera appliqué à un bâtiment type, représentatif des maisons en bois massif et soumis à des charges climatiques réelles sur la période de chauffe. Les résultats mettront en évidence les effets de la prise en compte des transferts d'humidité dans un tel matériau de construction sur l'analyse du comportement énergétique du bâtiment par la comparaison des prévisions de consommation de chauffage et des conditions de confort intérieur au moyen de deux modèles : l'un, intégrant seulement les transferts de chaleur, et l'autre, intégrant les transferts couplés de masse et de chaleur.

5. Références

- AFCOBOIS 2006, Raji S., Lagièrre P., Puiggali JR.: Rapport d'étude expérimentale sur 10 maisons du réseau AFCOBOIS (financement Fédération Française du Bâtiment, TREFLE 2005/2006).
- Battaglia J. L. 1995 : Recherche de modèles simplifiés pour le comportement thermique et hygrothermique d'un bâtiment viticole, thèse présenté à l'Université Bordeaux 1.
- Hameury S., 2005: Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study, Building and Environment, (40)10: 1400-1412.
- Raji S., Jannot Y., Lagièrre P., Puiggali JR. 2006 : Multiscale thermo-physical characterization of a laminated solid-wood wall. Article in press, Building and Environment.
- Raji, 2006 : Caractérisation hygro thermique, par une approche multi échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale. Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université bordeaux1.
- Wurtz, E., Mora, L., Inard C., 2006 : An Equation-Based Simulation Environment to Investigate Fast Building Simulation, Building and Environment (41): 1571-1583