
Comportement thermo hydrique des murs en rondins de douglas écorcés

Frédéric Dubois, Laurent Ulmet, Seddik Merakeb, Nicolas Sauvat

Laboratoire de Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil, Université de Limoges, Centre Universitaire d'Egletons, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons

frederic.dubois@unilim.fr

RÉSUMÉ. Ce travail présente une approche numérique du comportement thermo hydrique des murs en bois massif. L'objectif de ce travail est de valoriser et quantifier les performances thermiques des maisons en rondins écorcés en saison hivernale et estivale. Cette étude nécessite de mettre en œuvre un calcul de déperdition par conduction, rayonnement et convection adapté au matériau. Le calcul doit être mené en régime permanent (détermination des déperditions réglementaires) et en régime transitoire afin de mesurer l'inertie thermique et hydrique de la paroi. Le comportement vis-à-vis de l'humidité est pris en compte en employant un algorithme de transfert de chaleur et de masse couplé.

ABSTRACT. This work presents a numerical approach about the thermo hydro behaviour of massive wood walls. The objective of this work is to develop and quantify the thermal performances of the houses in cabane barked in winter and summer season. This study requires performing a calculation of energy state by conduction, radiation and convection adapted to material. Calculation must be carried out in steady operation (determination of the regulatory losses) and in transient state in order to measure the thermal and hydrous inertia of the wall.

MOTS-CLÉS : Transfert de chaleur et de masse, éléments finis, matériau bois.

KEYWORDS : Heat and mass transfer, finite element, wood material.

1. Introduction

Au cours des dernières années, l'emploi du bois « seul matériau de construction renouvelable et biologiquement dégradable » a été encouragé par la reconnaissance au niveau international de la nécessité de protéger les ressources naturelles de la planète. La construction de maison en rondins de douglas écorcés représente une partie de cette diversification des usages du bois en proposant un mode constructif dépensant le strict minimum d'énergie de transformation en employant des essences durables ne nécessitant qu'un traitement de surface fongicide pour protéger l'aubier de douglas. Enfin, ce type de construction présente un coût énergétique de fonctionnement modéré.

En effet, malgré la faible isolation thermique d'une maison en rondins, les occupants de ce style de maison sont très satisfaits de leurs confort quelque soit la saison. Or, les règles de dimensionnement thermique RT2005 (CSTB 2005), adaptées à la construction dite traditionnelle à base de béton structurel, ne permet pas de prendre en compte, de façon satisfaisante, les propriétés intrinsèques de ce type d'enveloppe tant en confort d'hiver (ponts thermiques forfaitaires, échanges par convection, etc.) qu'en confort d'été (sous estimation de l'inertie thermique, non prise en compte des couplages hydriques, etc.). De ce fait, ce type de construction se trouve systématiquement défavorisé par manque de connaissances scientifiques sur le comportement thermo hydrique de l'enveloppe.

Le travail proposé concerne une approche numérique, par la méthode des éléments finis, pour étudier le comportement hygro thermique d'un mur en rondin. Cette étude nécessite de mettre en œuvre un calcul de déperdition par conduction, rayonnement et convection adapté au matériau. Le calcul doit être mené en régime permanent (détermination des déperditions réglementaires) et en régime transitoire afin de mesurer l'inertie thermique et hydrique de la paroi. Le comportement vis-à-vis de l'humidité est pris en compte en employant un algorithme de transfert de chaleur et de masse couplé. L'ensemble de la modélisation numérique est mené pour des conditions climatiques d'hiver et d'été.

2. Régime permanent

L'étude du comportement thermique en régime permanent permet de mettre en évidence les caractéristiques matériau (essence) et géométrique (diamètre) vis-à-vis du flux de chaleur induit par un gradient de température. Nous proposons donc, dans un premier temps, une étude paramétrique afin de replacer les performances thermiques du mur en rondin vis-à-vis de la réglementation thermique actuelle. Les paramètres retenus sont l'essence (feuillus, pin du nord et douglas) et le diamètre moyen des rondins. Les murs sont formés de fûts ajustés les uns aux autres ; ni clous, ni colle ne sont nécessaires. Chaque tronc est travaillé sur toute la longueur pour épouser la forme du fût précédent. La gorge ainsi formée est remplie de laine de

mouton ou de laine de verre. Pour des raisons de résistance à la fissuration, la taille de la gorge est limitée au tiers du diamètre des fûts. Afin d'obtenir des conditions aux limites en terme de température et de flux de chaleur, trois rondins sont modélisés, Figure 1. Les résultats numériques sont exploités pour le rondin central afin d'éviter les effets de bord. Les conditions convectives sont reprises de la réglementation en imposant les résistances de surface extérieure et intérieure, respectivement $R_{si} = 0,13 m^2 K / W$ et $R_{se} = 0,04 m^2 K / W$. Ces valeurs sont largement sous évaluées car la surface irrégulière du mur limite les effets convectifs. Expérimentalement, il sera nécessaire de mesurer la température de surface à l'intérieur et à l'extérieur afin d'en déduire une résistance équivalente superficielle.

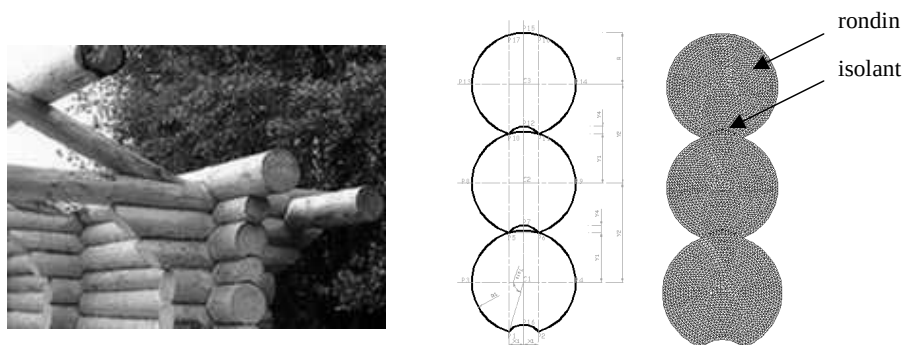


Figure 1. Discretisation éléments finis du domaine d'étude

L'étude du régime permanent est limitée au comportement statique vis-à-vis du transfert de chaleur. En fonction des essences étudiées, il s'agit de définir le diamètre optimal des rondins afin de respecter, dans un premier temps, la valeur « garde fou » du coefficient de déperdition U ($0,47 W / m^2 K$) et de référence ($0,40 W / m^2 K$). L'ensemble des résultats est comparé à une référence représentée par un mur en maçonnerie classique composé d'une plaque de plâtre de 1cm d'épaisseur ($\lambda = 0,25 W / m K$), de la laine minérale ($\lambda = 0,047 W / m K$) d'épaisseur paramétrée, de 20cm de parpaing ($\lambda = 1,1 W / m K$) et de 2cm enduit extérieur ($\lambda = 1,3 W / m K$). Si ce calcul est réalisé habituellement sans outil numérique, la complexité de la géométrie nous incite à mettre en œuvre une discrétisation par éléments finis. Le tableau 1 présente la conductivité thermique des essences employées (Guitard 1987).

Tableau 1. Conductivité thermique

	feuillus	douglas	Pin du nord	laine
$\lambda (W / m K)$	0,2	0,15	0,12	0,047

La présence de la laine de mouton dans la gorge et ses qualités thermiques n'influent pas sur les performances de transfert de chaleur dans le mur. Son rôle est limité à des préoccupations d'étanchéité à l'air.

Tableau 2. Diamètre optimisé

	feuillus	douglas	Pin du nord
Diamètre (cm)	42-52	32-40	26-32

Des calculs successifs permettent de déterminer l'évolution du coefficient de déperdition en fonction du diamètre, Figure 2. En prenant en compte les coefficients de référence et de garde fou de la réglementation, nous pouvons déterminer le diamètre optimum des rondins en fonction de l'essence. Les valeurs obtenues sont comparées à un mur maçonné avec 10cm de laine minérale, tableau 2.

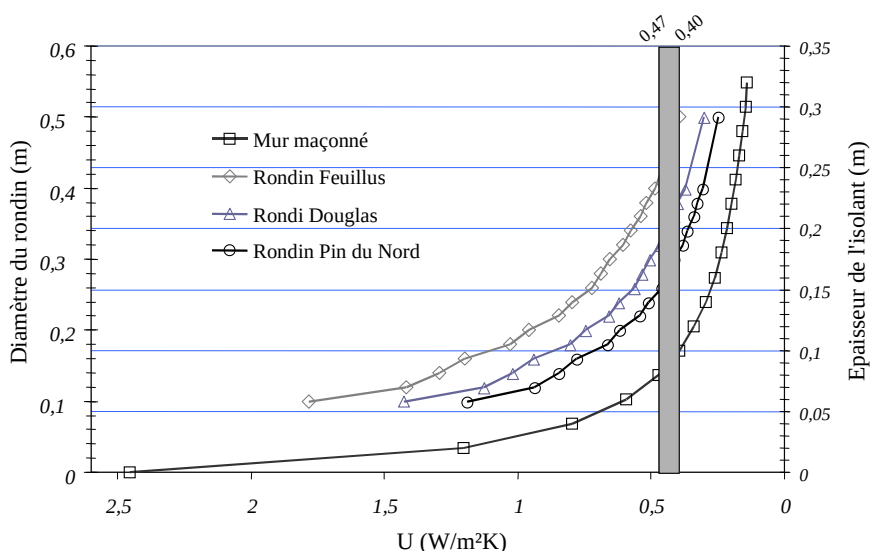


Figure 2. Coefficient de déperdition en fonction du diamètre des fûts

Nous observons que pour une essence de type feuillu, les diamètres recommandés sont trop importants. De croissance lente, le feuillu devient une solution non économique. Par contre, en ce qui concerne le pin du nord, les diamètres autorisés sont tout à fait réalistes. Toutefois, le transport de ces essences d'Europe du nord est en contradiction vis-à-vis du coût économique et écologique du transport. Dans le cadre d'une construction en France, nous observons que le douglas présente un très bon compromis. Bien que les diamètres de fût restent

importants (40cm), sa croissance rapide doit permettre le développement de son utilisation dans ce type de construction. Nous nous concentrerons plus particulièrement sur cette essence dans la suite de notre étude.

3. Régime transitoire

Dans le cadre de l'étude thermique de l'enveloppe d'un bâtiment, si le comportement statique garanti des performances énergétiques minimales, il ne permet pas de quantifier la notion de confort lié à la capacité qu'à le mur à autoréguler et de répartir les pics de chaleur induits principalement par le rayonnement solaire et l'humidité interne. Cette notion d'inertie thermo hydrique est largement présente dans la thermique des murs en rondin mais et malheureusement mal prise en compte dans la réglementation. Pour des raisons de chauffage d'hiver ou de confort d'été, l'inertie thermique doit se traduire par un déphasage temporel (l'optimum étant un déphasage de 12 heures) ainsi qu'un amortissement permettant une redistribution 'étalée' de la chaleur dans le temps. En ce qui concerne l'inertie hydrique, l'ambiance traditionnelle se caractérise par un air humide en été et sec en hiver. Les propriétés hydrique du bois et accentuées par la masse employée doivent permettre une régulation annuelle avec un déphasage optimum de six mois. Le mur restitue l'humidité stockée en hiver et capte le surplus en été. L'ensemble des simulations présentées repose sur les travaux de Merakeb et al. (Merakeb 2006) vis-à-vis de la modélisation par éléments finis de phénomène de transfert de masse et de chaleur dans le matériau bois.

3.1 Comportement thermo hydrique

Le comportement thermo hydrique du matériau bois est caractérisé par une loi de transfert de chaleur couplée à un processus de diffusion hydrique. Le comportement différé sous cycles étant principalement dépendant de la teneur en eau, le transfert de chaleur est géré par une loi de type Fourier plus conventionnelle reliant le gradient de température $\vec{\nabla}T$ à sa variation temporelle:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\mathbf{D}_T \vec{\nabla} T) \quad [1]$$

$\mathbf{D}_T$ représente le tenseur de conduction thermique. Le processus de diffusion peut être appréhendé à travers une approche analytique et expérimentale en utilisant l'équation de Fick définie dans le cas tridimensionnel par l'expression suivante :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\mathbf{D}_w \vec{\nabla} w + \mathbf{D}_{wT} \vec{\nabla} T) \quad [2]$$

$\mathbf{D}_w$ représente le tenseur de diffusion dont les composantes peuvent dépendre de l'anisotropie des propriétés de diffusion dans le matériau, de la teneur en eau, de la température. $\mathbf{D}_{wT}$ est également un tenseur de couplage thermo hydrique

permettant de prendre en compte l'effet de thermo migration. Ce phénomène peut également être introduit en considérant les hystérésis de sorption caractérisant les échanges surfaciques d'humidité et de température entre l'air humide et les premières fibres de bois :

$$-(\mathbf{D}_w \vec{\nabla} w + \mathbf{D}_{wT} \vec{\nabla} T) \cdot \vec{n} = h_w (w_{surf} - w_{eq}) \quad [3]$$

w_{surf} et w_{eq} représentent respectivement l'humidité interne sur les premières fibres en surface et l'humidité interne d'équilibre du matériau soumis à une ambiance extérieure caractérisée par sa température et son humidité relative. Les conditions aux limites en température sont données selon l'équation à venir :

$$-(\mathbf{D}_{wT} \vec{\nabla} T) \cdot \vec{n} = h_T (T_{surf} - T_{eq}) + (h_v - \Delta h_b) h_w (w_{surf} - w_{eq}) \quad [4]$$

Les températures T_{eq} et T_{surf} désignent la température de la couche limite d'air en contact avec le matériau et la température de surface. Cette dernière intègre l'effet du rayonnement solaire en y superposant un flux de chaleur supplémentaire. Ce flux est déterminé en calculant la position relative du soleil et du rayon d'incidence par rapport à la normale sortante de chaque rondin (direction variable induite par la forme circulaire des rondins). Le calcul a été mené pour un site géographique limousin (Egletons) en été et en hiver. La couleur des bois évoluant dans le temps (vieillesse d'aspect), nous avons opté pour un coefficient d'absorption solaire de 100% (teinte très sombre), valeur largement préjudiciable vis-à-vis du comportement thermique estival. L'ensemble du modèle est implémenté dans le code aux éléments finis castem. Le calcul est réalisé avec un diamètre de rondins de 34cm induisant une valeur du coefficient de déperdition de 0,44W/m²K . La façade est supposée être orientée plein sud avec des conditions de réflexion au voisinage correspondant à un sol sableux. Nous supposons enfin que le flux direct n'est capté que par la moitié supérieure du rondin tandis que le flux diffus frappe la totalité de la surface.

3.2 Comportement thermique

Dans le cas de l'étude du comportement thermique d'été, nous nous fixons la date du 21 juillet (ciel complètement dégagé) avec une température intérieure imposée à 18°C. Il ne s'agit pas, dans ce cas, d'imposer un système de climatisation mais de se fixer une référence afin d'étudier le flux de chaleur à travers la paroi. La température de l'air varie entre 19°C et 32°C. La figure 3 met en évidence la concentration du champ de température au niveau de la zone atteinte par le flux solaire directe (12h) qui diffuse petit à petit pour s'homogénéiser par la suite (20h) ; signe de l'effet d'inertie thermique.



Figure 3. Concentration et homogénéisation du champ de température

Enfin, le phénomène de déphasage et d'amortissement se calcule par rapport au flux de chaleur réel comparé au flux statique calculé à partir de l'écart de température instantané et le coefficient de déperdition. En accord avec la figure 4, nous observons un déphasage de 13 heures et une stabilisation du flux de chaleur dans le sens où l'amplitude est beaucoup moins marquée (amortissement de 32%). Par contre, le décalage de valeur moyenne (0.36W/m^2) s'explique par la prise en compte des apports solaires en régime variable, ce qui n'est pas le cas pour le comportement statique. Dans ce cas, il faudrait prendre un décalage équivalent pour le régime statique !

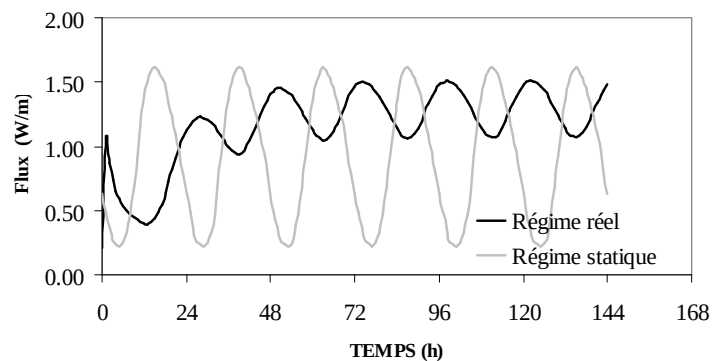


Figure 4. Déphasage et amortissement en conditions estivales

En ce qui concerne le comportement en saison froide, nous observons un déphasage de l'ordre de douze heures. L'évolution temporelle du flux de chaleur est encore plus marquée qu'en été car les apports par rayonnement sont beaucoup plus prédominants par rapport à la conduction, Figure 5.

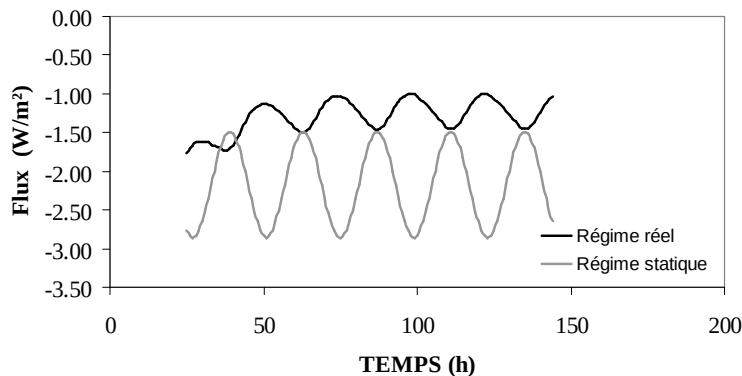


Figure 5. *Déphasage et amortissement en conditions hivernales*

La prise en compte du flux solaire induit un décalage de flux moyen de l'ordre de 0.95 W/m^2 . L'amortissement, calculé sur les amplitudes, est de 32%.

3.3 Comportement hydrique

Les premières simulations, en terme de diffusion hydrique, effectuées dans le cadre de cette étude nous permet d'observer que les échelles de temps sont largement supérieures à celles rencontrées en transfert de chaleur. En effet, si le flux de chaleur est sensible aux variations journalières, ce n'est pas le cas du comportement à la diffusion. Le matériau cherche à se stabiliser à une valeur d'équilibre qui variera lentement durant une année complète. En configuration hivernale, une simulation prenant en compte une variation de température journalière de 5°C à 15°C et une variation d'humidité relative de l'air de 35%HR à 70%HR, l'humidité du bois va se stabiliser à une valeur de 16% au bout de trois mois. Ce déphasage, à confirmer par une simulation prenant en compte des profils annuels de température et d'humidité mesurés sur site, permet de conforter le processus d'autorégulation en humidité du mur en rondin durant l'année.

4. Conclusions et perspectives

Cette première étude numérique a permis de repositionner le mur en rondin par rapport à une construction conventionnelle. Nous observons un très bon comportement thermique, d'une part, et, d'autre part, une bonne inertie thermique garante d'économies d'énergie en hiver et de confort en été. De plus, la forte inertie hydrique observée permet de confirmer le rôle auto-régulateur du mur en rondin vis-à-vis de l'hygrométrie dans le volume intérieur. Bien entendu, cette étude n'aborde pas le comportement thermo hydrique de l'ensemble de l'enveloppe. Dans ce contexte, une étude expérimentale est en cours de développement sur le site

d'Egletons. Elle met en œuvre une maquette de 12m² de surface au sol composée de murs à l'échelle 1 et d'une couverture végétalisée. Des mesures temporelles du climat extérieur, intérieur, des températures de surface et de consommation énergétique seront réalisées. Egalement, les approches expérimentale et numérique des ponts thermiques seront abordées.

4. Références

CSTB, *Réglementation Thermique 2005*, éditions CSTB, 2005

Guitard D., *Mécanique du matériau bois et composites*, éd. Cépaduès, 1987

Merakeb S., Dubois F., Sauvat N., Petit Ch., *Hydro-mechanic coupling in the mass transfer process in timber elements*, European Society of Wood Mechanic, Florence, 2006

Merakeb S., Dubois F., Petit C., Sauvat N., *Couplage hydromecanique dans le processus de diffusion dans le bois*, *Revue Européenne de Génie Civil*, Vol. 10/2, pp. 225-251, 2006