

# Etude du comportement thermique dynamique de l'enveloppe non isolée du bâtiment : cas des murs inertes

Julien Borderon<sup>1</sup>, Richard Cantin<sup>1</sup>, Joseph Virgone<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ENTPE, Université de Lyon, DGCB CNRS URA 1652 : rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin Cedex, julien.borderon@entpe.fr, richard.cantin@entpe.fr

<sup>2</sup> Université Lyon 1, IUT A génie Civil, 43 Bd du 11 nov., 69622 Villeurbanne Cedex, joseph.virgone@entpe.fr

---

## RESUME.

Les bâtiments anciens sont régis par un fonctionnement physique relativement méconnu et très différent de celui des bâtiments d'après guerre. Les procédés constructifs ont évolué au fil des siècles ainsi que les matériaux utilisés. Le logiciel HEAT 3, utilisé pour cette étude, permet d'analyser le comportement dynamique d'un mur, le transfert de chaleur étant tridimensionnel. L'objectif de la simulation numérique présentée dans cet article est d'évaluer, pour différents types de parois de bâtiments anciens, hétérogènes et très inertes, dans un premier temps, le coefficient U de la paroi non isolée, et ensuite de déterminer les effets de déphasage et d'amortissement de cette paroi en régime dynamique. Les effets liés au transfert tridimensionnel sont montrés par comparaison à un transfert unidimensionnel.

MOTS-CLÉS : thermique, mur, inertie, bâtiments anciens

---

## ABSTRACT.

The old buildings are governed by a physical functioning relatively unknown and very different from that of post-war buildings. The constructive processes have evolved over the centuries as well as the materials used. HEAT 3 software, used in this study allows us to analyse the dynamic behaviour of a wall, the heat transfer being three-dimensional. The objective of the numerical simulation presented in this article is to evaluate, for different types of walls of old buildings, heterogeneous and very inert, as a first step, the U-value of the non-insulated wall, and then determine the phase shift effects of the wall in dynamic regime. The three-dimensional effects of the real heat transfer are shown by comparison to the one-dimensional transfer.

KEYWORDS : thermal, wall, inertia, old buildings

---

## 1. INTRODUCTION

Afin de réduire les consommations énergétiques, il est urgent de se concentrer sur les bâtiments existants. Leur consommation est estimée à 60% supérieure par rapport aux bâtiments récents. Ces consommations peuvent être réduites en intervenant sur différents composants de l'enveloppe tels que les fenêtres, la toiture, le plancher et les murs. (DGUHC, 2007)

Il est bien connu que les bâtiments anciens ont généralement une forte inertie thermique. De plus les gains dus à l'absorption du flux solaire par la paroi lourde sur la face intérieure et extérieure peuvent participer positivement au bilan thermique du bâtiment grâce au stockage de l'énergie dans la masse. Ce stockage peut être complexe à évaluer en raison de l'hétérogénéité des parois anciennes.

L'étude de simulation tridimensionnelle va permettre de bien identifier les effets des transferts thermiques liés à ces hétérogénéités ainsi que de caractériser des parois sur le plan des valeurs utilisées dans les outils réglementaires (coefficients U) mais aussi sur les transferts en régime dynamique (amortissement et déphasage).

## 2. CARACTERISTIQUES THERMO PHYSIQUES DES MURS INERTES

### 2.1. COMPOSITION DES MURS ANCIENS

Les murs anciens sont régis par un fonctionnement physique relativement méconnu et très différent de celui des murs des bâtiments d'après guerre. Les procédés constructifs ont évolué au fil des années ainsi que les matériaux utilisés. Généralement, les modes constructifs utilisent des matériaux locaux. Des éléments à forte inertie thermique sont utilisés en façade ou en refend intérieur. Il n'y a pas de standardisation des éléments : les maçonneries ont des épaisseurs différentes suivant les étages et les charges des planchers. Les parois opaques de l'enveloppe sont souvent hétérogènes et composées de matériaux très sensibles à l'humidité (Graulière, 2005).

Parmi les modes constructifs les plus anciens et les plus universels, il y a les structures en pans de bois. Il existe en France des maisons en pans de bois avec une densité de poutres variable. Les espaces entre les pièces de bois de l'ossature sont fermés par le hourdi qui, quand il est maçonné, contribue à la rigidité du pan de bois. La composition des hourdis est variable et va du simple torchis à de véritables murs minces appareillés. Le torchis est un mélange de terre argileuse, d'eau, de chaux et de paille. Il est mis en place sur un lattis installé entre les rainures dans les poteaux verticaux. La teneur en paille volumique pouvait varier suivant les artisans mais il semble que 60 ou 70% soit des valeurs qui reviennent souvent. Le hourdi pouvait également être constitué de briques ou de pierres maçonnées. Les briques, posées à plat ou composées en chevrons alternés constituent des murs minces dont la présence contribue à la stabilité du pan de bois. Pour la maçonnerie de pierre, le hourdis est fait de véritables moellons de pierre. (Coignet, 2006)

### 2.2. IDENTIFICATION DES PHENOMENES PHYSIQUES

La conductivité thermique d'un matériau utilisé dans la construction est directement liée aux surfaces de contact entre les particules constituant le matériau. Ainsi, plus ces surfaces de contact sont importantes plus la conductivité thermique est élevée.

Les surfaces dépendent de la taille des particules et de leur agencement. Lors de la mise en œuvre du matériau, les bâtisseurs compactent la terre donc donnent un certain agencement aux particules. Lorsque les murs vieillissent, sous l'effet de la gravité, les parties basses continuent de se compacter. La densité sèche est un facteur déterminant pour la conductivité thermique des matériaux à base de terre, terre crue, pisé ou torchis. (Hall, 2008)

Les travaux sur les propriétés du matériau terre (Kersten, 1949) définissent une loi empirique permettant d'obtenir la conductivité thermique à sec d'une terre mise en œuvre en fonction de sa densité sèche.

Pour le différentiel de température utilisé dans le domaine du bâtiment, maximum 50°C, nous considérons que la conductivité thermique des matériaux ne dépend pas de la température.

Toutes les terres ne réagissent pas de la même façon à l'augmentation de la teneur en eau. De plus la teneur en eau d'équilibre pour les différentes terres peut varier de manière significative. Ceci est dû en partie à la teneur en argile de la terre considérée. (Laurent, 1987)

### 2.3. TRANSFERTS THERMIQUES TRIDIMENSIONNELS

Le caractère tridimensionnel des transferts thermiques doit être pris en compte dans les parois hétérogènes (Kosny *et al.*, 2002). Le logiciel HEAT 3 (Blomberg, 2001) permet de modéliser la géométrie de la paroi examinée en 3 dimensions à l'aide de petits parallélépipèdes ou cellules de matériau. La limite du logiciel est d'1 million de cellules. Un schéma aux différences finies est utilisé pour traiter l'équation de la chaleur. Les conditions aux limites choisies sont définies comme étant une température constante égale à 20°C dans l'ambiance intérieure et une température fonction sinusoïdale du temps, d'amplitude 10°C, de valeur moyenne 20°C et avec un maximum à 12h dans l'ambiance extérieure. Les faces périphériques de la paroi (de dimensions 1m20 fois 2m) sont prises avec un flux thermique imposé nul. Les résistances surfaciques sont celles de la réglementation thermique pour les parois verticales, 0,04 m<sup>2</sup>.K/W pour l'extérieur et 0,13 m<sup>2</sup>.K/W pour l'intérieur. Les simulations sont réalisées sur une période de 10 jours avec un enregistrement des flux thermiques et des températures toutes les heures.

Dans le cas du pan de bois et torchis, des échanges importants ont bien lieu entre le torchis et le bois. L'intensité de ces flux est de type périodique, sinusoïdale ; donc pendant un temps les échanges se font dans le sens torchis bois, puis pendant le temps suivant dans le sens bois torchis, la figure 1 illustre ces échanges à un instant donné. Des transferts thermiques dans le plan de la paroi modélisée d'intensité pouvant atteindre 50% de la valeur de ceux dans la direction principale de propagation ont été identifiés lors de cette simulation.

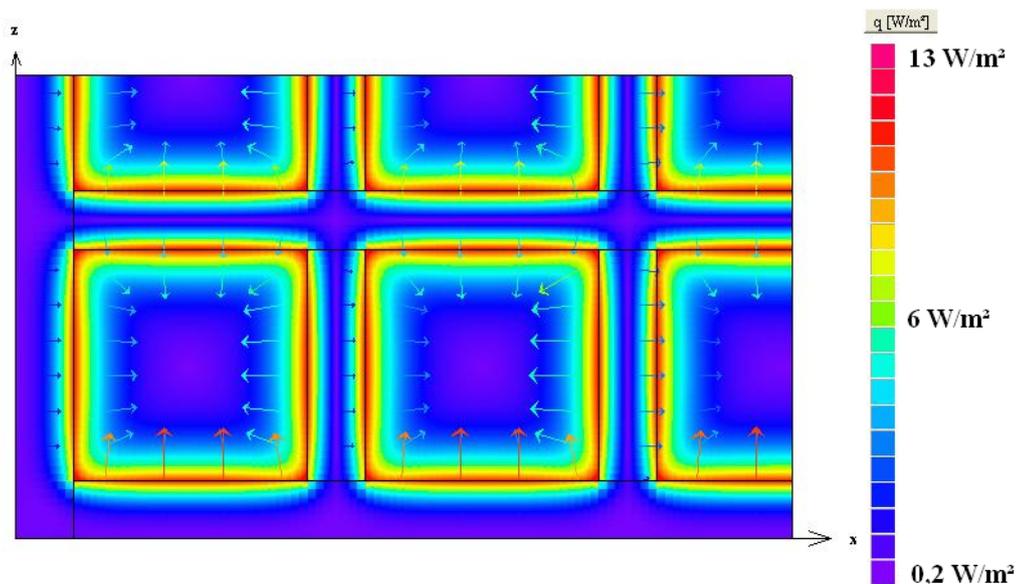


Figure 1 : Tridimensionnalité des transferts thermiques dans un mur en pan de bois

L'impact de ce caractère tridimensionnel des parois étudiées est important sur les simulations dynamiques, par contre sur les simulations en statique, la différence sur les valeurs U obtenues entre

simulations 3-Dimensions et simulations avec flux thermiques unidirectionnels est inférieure à 2%. Elle est égale à 1,4% pour le pan de bois et torchis.

### 3. HYPOTHESES RETENUES POUR LES SIMULATIONS AVEC HEAT 3

#### 3.1. GRANDEURS SIGNIFICATIVES

Le déphasage en heures et l'amortissement sont déterminés en comparant les courbes de flux thermique sur la face extérieure et sur la face intérieure. Ce déphasage temporel représente le temps que met une variation de la température sur une face de la paroi pour atteindre l'autre face. Il s'agit ici de repérer un maximum sur la courbe temporelle du flux thermique sur la face extérieure et de mesurer le temps qui le sépare du minimum correspondant sur la face intérieure. L'amortissement correspond au facteur de variation d'amplitude entre la sinusoïde des variations du flux sur la face extérieure et celle des variations du flux sur la face intérieure. (Sacadura, 1980)

#### 3.2. MURS EN PAN DE BOIS

Les paramètres sélectionnés pour constituer un panel de parois pan de bois à modéliser sous Heat 3 sont l'épaisseur de la paroi, variable sur le parc de bâtiments anciens, le hourdi utilisé entre les pièces de bois, torchis, briques ou pierres et pour le torchis sa teneur massique en eau.

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux des murs en pan de bois, retenues pour les simulations

| Désignation     | Densité sèche en kg/m <sup>3</sup> | Conductivité thermique $\lambda$ en W/(m.K) | Capacité calorifique C en MJ/(m <sup>3</sup> .K) | Diffusivité thermique en 10 <sup>7</sup> m <sup>2</sup> /s |
|-----------------|------------------------------------|---|--|--|
| Bois « lourd »  | 800                                | 0,2   | 1,92   | 1,04   |
| Enduit de chaud | 1600                               | 1,2   | 1,36   | 8,82   |
| Torchis         | 1300                               | 0,62  | 1,11   | 5,58   |
| Briques         | 1850                               | 1,0   | 1,85   | 5,41   |
| Pierres         | 1890                               | 1,44  | 1,89   | 7,62   |
| Mortier         | 1600                               | 1,2   | 1,36   | 8,82   |

Egalement, deux géométries différentes ont été modélisées, la différence entre elles étant la quantité de bois utilisée par rapport à la quantité de matériaux pour le hourdis. La première est constituée de 40% de bois et de 60% de hourdis et la seconde de 70% de bois et de 30% de hourdi.

Concernant les hourdis en pierres ou en briques, une seule épaisseur de briques en maçonnerie ordinaire a été modélisée avec une épaisseur de mortier entre chaque élément. Cette épaisseur est égale à 1 ou 2 cm, respectivement pour les joints horizontaux et verticaux. Pour le hourdi pierre, dans la largeur de la paroi, 2 pierres séparées par 2cm de mortier ont été modélisées. Le paramètre de

l'épaisseur du mur peut prendre 2 valeurs : 15 et 20 cm. Toutes deux se retrouvent fréquemment en France. L'épaisseur de l'enduit de chaux intérieur est de 3cm.

#### 4. RESULTATS ISSUS DES SIMULATIONS

##### 4.1. RESULTATS POUR LES MURS EN PAN DE BOIS

Le tableau 2 récapitule les résultats des simulations en mode stationnaire et en régime variable pour les parois en pan de bois à 40% de bois (Pourcentage par rapport à la surface).

Tableau 2 : Résultats issus de HEAT3 pour le pan de bois (40%)

| Pan de bois 40% bois | U (W/(m <sup>2</sup> .K)) | Déphasage (h) | Amortissement |
|----------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| Torchis 15cm         | 1,81                      | 7             | 0,18          |
| Torchis 20cm         | 1,5                       | 9             | 0,10          |
| Pierres 15cm         | 2,44                      | 7             | 0,18          |
| Pierres 20cm         | 2,14                      | 8             | 0,12          |
| Briques 15cm         | 2,32                      | 7             | 0,18          |
| Briques 20cm         | 1,99                      | 9             | 0,11          |

Le tableau 3 récapitule les résultats concernant cette fois-ci les murs en pan de bois à 70% de bois.

Tableau 3 : Résultats issus de HEAT3 pour le pan de bois (70%)

| Pan de bois 70% bois | U (W/(m <sup>2</sup> .K)) | Déphasage (h) | Amortissement |
|----------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| Torchis 15cm         | 1,63                      | 8             | 0,14          |
| Torchis 20cm         | 1,34                      | 10            | 0,071         |
| Pierres 15cm         | 2,17                      | 7             | 0,15          |
| Pierres 20cm         | 1,87                      | 9             | 0,095         |
| Briques 15cm         | 2,01                      | 8             | 0,14          |
| Briques 20cm         | 1,71                      | 9             | 0,083         |

Il apparaît que le pourcentage surfacique de bois dans la composition du mur a un impact non négligeable sur le coefficient U, le déphasage temporel et l'amortissement de l'onde de température. Le meilleur coefficient U est obtenu par le pan de bois à 70% de bois avec un hourdi de torchis et d'épaisseur 20cm, la valeur est U=1,34 W/(m<sup>2</sup>.K). A l'opposé le coefficient de déperdition thermique U le plus élevé est obtenu par le pan de bois à 40% de bois associé à un hourdi de pierres d'épaisseur 15cm, la valeur est alors U=2,44 W/(m<sup>2</sup>.K). Le déphasage évolue entre 7 et 10 heures tandis que l'amortissement prend des valeurs comprises entre 0,071 et 0,19.

##### 4.2. INERTIE THERMIQUE

La figure 2 regroupe les résultats de simulations pour des murs pan de bois et pisé.

Les murs inertes qui apparaissent avoir les capacités inertielles les plus faibles sont dans la catégorie des parois à forte inertie thermique au regard des règles de calcul TH-U de la Réglementation Thermique 2005. En effet, le mur en pan de bois de 15 cm d'épaisseur, à 40% de bois et avec un hourdis de torchis est caractérisé par un déphasage temporel de 7h sur les variations ondulatoires quotidiennes de la température et d'un amortissement de 18% sur l'amplitude de variation. Généralement, les parois avec plus de bois ont une meilleure inertie. Le hourdi brique et le hourdi pierre ont une meilleure inertie en paroi de 20 cm qu'en paroi de 15 cm tandis que pour le torchis, 15 cm ou 20 cm d'épaisseur est un facteur qui a une incidence moindre. Le torchis à l'équilibre est le hourdi qui apporte le maximum d'inertie, notamment avec le grand pourcentage de bois en façade.

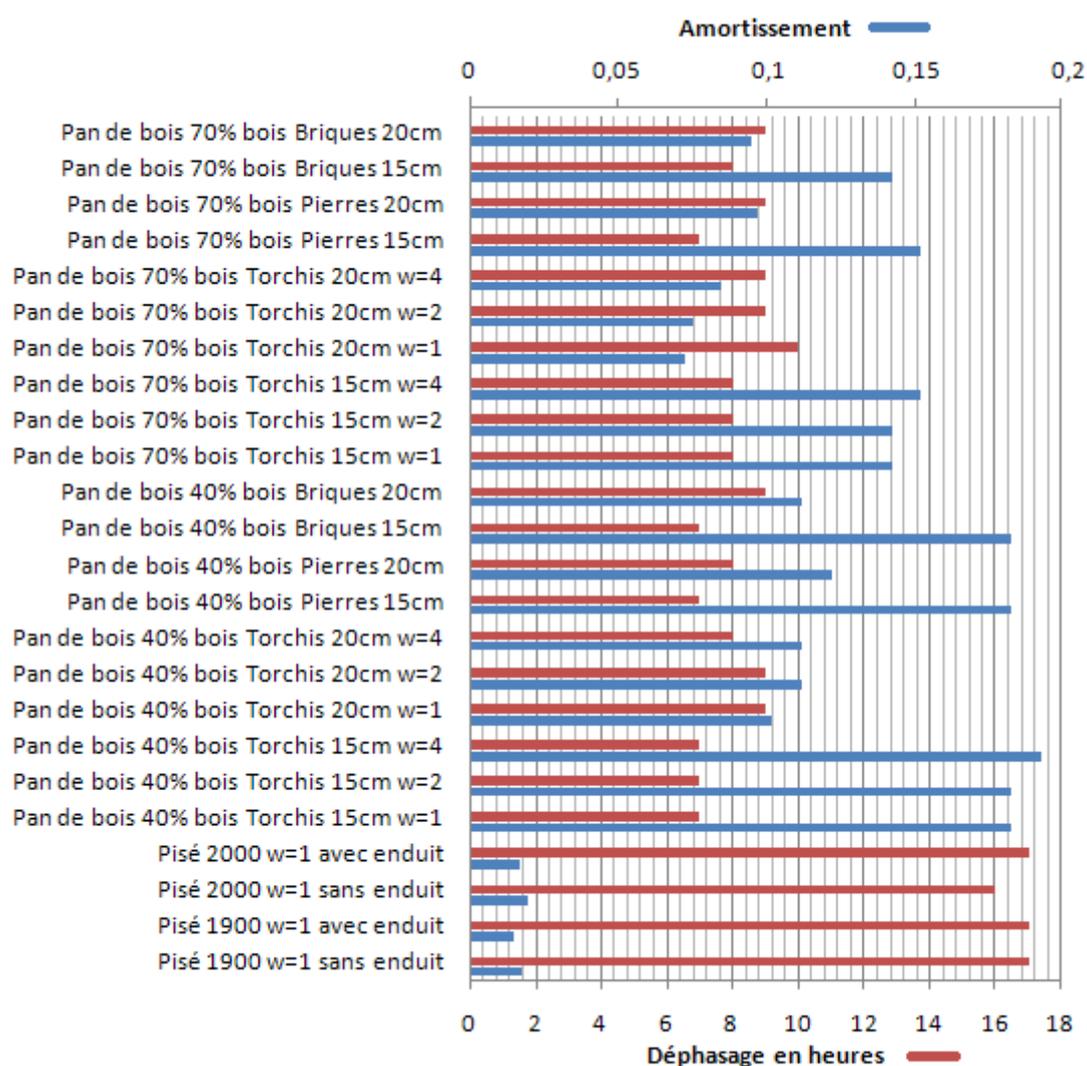


Figure 2 : Déphasage en heures calculé pour différents murs ; w : teneur massique en eau (%)

Le déphasage et l'amortissement caractéristique de la paroi pan de bois et torchis (w=1), d'épaisseur 15cm plus 3cm d'enduit de chaux sont 7h et 18%. Si cette paroi n'est constituée que de torchis et d'enduit, alors les valeurs obtenues sont 7h et 28% tandis que l'ensemble bois et enduit donne 12h et 6,4%. La conclusion de ces simulations est que le bois n'apporte pas de déphasage temporel supplémentaire mais contribue à l'amortissement sur l'amplitude de l'onde de température

quotidienne. Enfin la différence entre simulation avec transferts thermiques tridimensionnels et simulation avec transferts thermiques unidimensionnels pour le pan de bois et torchis est de 33% pour la valeur d'amortissement et d'1h pour le décalage temporel. Dans ce cas, travailler avec un modèle de transferts thermiques unidirectionnels sous-évalue les performances inertielles du mur.

#### 4.3. DEPERDITION THERMIQUE PAR CONDUCTION

Les coefficients de déperdition thermique par conduction  $U$  pour le panel de murs étudiés sont donnés sur la figure 3.

Les coefficients de déperdition thermique sont tous au-dessus des garde-fou de la Réglementation Thermique 2005 concernant les parois opaques verticales en construction neuve :  $U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . L'ensemble des valeurs obtenues est assez homogène, la plupart d'entre elles sont autour de  $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  et comprises dans l'intervalle  $[1,4 ; 2,45]$  en  $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$  sauf le mur constitué de 46 cm de carreaux de terre crue et d'enduit de plâtre qui domine l'ensemble avec  $U=0,85 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ .

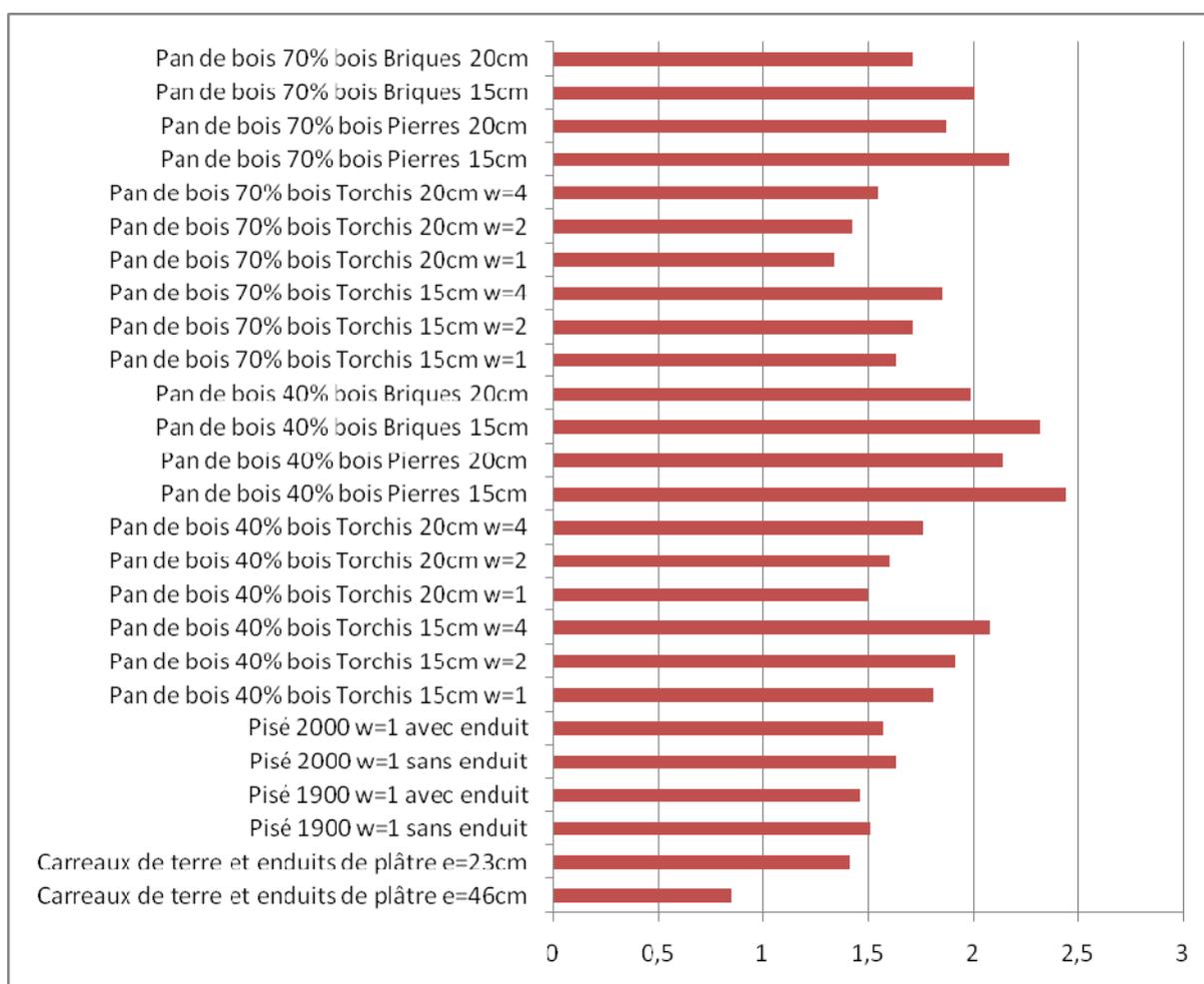


Figure 3 : Coefficients  $U$  en  $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$  calculés pour différentes parois ;  $w$  : teneur massique en eau (%)

Les murs en pan de bois étudiés ont un coefficient  $U$  qui se situe entre  $1,34$  et  $2,44 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . Ceci donne une valeur moyenne de  $1,89 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  mais avec une variation possible de plus ou moins 30% suivant les conditions et la structure. Le pan de bois avec une quantité de bois plus importante est plus

isolant, le passage de 40% de bois à 70% de bois permet de diminuer  $U$  d'environ 11%. Les hourdis briques et pierres sont nettement moins isolants et donnent des  $U$  plus importants, au delà de 2  $W/(m^2.K)$  pour une épaisseur de 15 cm.

## 5. CONCLUSION

Les murs de bâtiments anciens souvent hétérogènes sont le siège de phénomènes physiques difficiles à évaluer comme les phénomènes d'inertie.

Cette étude a montré que les caractéristiques thermiques des murs en pan de bois dépendent de plusieurs paramètres. Travailler uniquement avec des valeurs moyennes engendre des erreurs qui peuvent être importantes, la différence maximale constatée entre les parois étudiées pour le coefficient  $U$  est de 1,1  $W/(m^2.K)$ , ce qui correspond à un écart relatif de 60%.

Les parois étudiées ont des coefficients de déperdition thermique par conduction plus importants que les parois type RT 2005. Elles ont toutes une inertie thermique lourde, voir super lourde pour les familles des murs en carreaux de terre crue et pisé. Cette caractéristique assure un meilleur confort thermique d'été dans les logements anciens. Dans le contexte du réchauffement climatique, on ne saurait insister sur le besoin de préserver ce confort lors de travaux de réhabilitation dans ces logements. De plus, au niveau des réglementations futures, il serait nécessaire de prendre en compte le comportement dynamique de l'enveloppe et non pas uniquement la valeur du coefficient de déperdition  $U$  comme c'est souvent le cas actuellement.

## BIBLIOGRAPHIE

- Blomberg T. (2001). HEAT 3 A PC-program for heat transfer in three dimensions. Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics.
- Coignet J. et L. (2006). La maison ancienne, construction, diagnostic, interventions. Paris : Eyrolles.
- DGUHC-CETE de l'EST-MPF-LASH. (2007). Connaissance des bâtiments anciens et économie d'énergie, rapport de synthèse.
- Grauliere P. (2005). Typologie des bâtiments d'habitation existants en France, synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique. Paris : Rapport de synthèse du ministère de l'équipement.
- Hall M., Allison D. (2008). Assessing the effects of Soil Grading on the Moisture Content-Dependent Thermal Conductivity of Stabilised Rammed Earth Materials. Applied Thermal Engineering.
- Kersten M.-S. (1949). Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Engineering Experiment Station, University of Minnesota, USA.
- Kosny Y., Kossecka E. (2002). Multidimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs. Energy and Building, 34, 445-454.
- Laurent J-P. (1987). Propriétés thermique du matériau terre. Grenoble : Cahier du centre scientifique et technique du bâtiment.
- Sacadura J.F. (1980). Initiation aux transferts thermiques. Techniques et documentation.