

OPTIMISATION DE L'ENVELOPPE D'UN BATIMENT A TRAVERS L'ETUDE DE L'INERTIE THERMIQUE

C. Maalouf^{1*}, L. Chahwane², A.D. Tran¹ Le, T.H. Mai¹, E. Wurtz²

1-Laboratoire de Thermomécanique – GRESPI EA, Faculté des Sciences, BP. 1039, Moulin de la Housse, 51687 Reims Cedex 2

chadi.maalouf@univ-reims.fr, tran-001@etudiant.univ-reims.fr, ton-hoang.mai@univ-reims.fr

2-INES-RDI, Savoie Technolac, BP332, 73377, Le Bourget du Lac

layal.chahwane@univ-savoie.fr, etienne.wurtz@univ-savoie.fr

RESUME

Dans la conception optimisée de bâtiment, la prise en compte de l'inertie est une des mesures passives du confort thermique d'été et d'hiver en particulier pour les climats à forte amplitude thermique. La propriété des bâtiments à forte inertie est d'amortir la diffusion de la chaleur extérieure et de conserver une température stable dans les environnements intérieurs. Afin de mieux comprendre les phénomènes de diffusion et de stockage de chaleur, on présente deux études : l'une qui s'intéresse à l'étude du comportement d'une paroi soumise à une sollicitation périodique de température extérieure et l'autre s'intéresse au comportement d'une paroi soumise à une variation de la température intérieure. Le modèle implémenté dans l'environnement orienté objet SPARK a permis de comparer plusieurs matériaux utilisés dans la construction ainsi que de montrer l'importance des notions de diffusivité thermique et effusivité thermique d'un matériau.

1. INTRODUCTION

En France, le secteur du bâtiment représente 46% de la consommation totale en énergie et 25% des émissions de gaz à effet de serre. Afin de réduire ces consommations énergétiques, il est nécessaire d'optimiser l'enveloppe du bâtiment puisque c'est la barrière qui protège les occupants des conditions extérieures. L'optimisation énergétique de l'enveloppe passe par l'étude détaillée de l'inertie thermique dont la notion est complexe. En fait, il y a plusieurs types d'inertie selon la nature de l'action thermique. On distingue:

Inertie thermique par une action thermique extérieure : Il s'agit là du cas le plus simple. L'enveloppe de la construction est soumise à des variations de température journalières ou saisonnières selon un régime périodique. L'inertie peut être caractérisée en fonction de la période par le déphasage et l'amortissement. Plusieurs méthodes de calcul permettent de déterminer les valeurs de déphasage (retard) et la quantité de flux qui passe à travers la paroi (gains ou amortissement).

Inertie thermique pour des actions thermiques intérieures : ces actions sont considérées comme permanentes (chauffage du logement) ou aléatoires (surchauffe due à l'ensoleillement par exemple). L'inertie thermique consiste alors en une accumulation de chaleur dans l'enveloppe pour une restitution ultérieure par radiation.

L'inertie latente : Il s'agit des propriétés de chaleur latente des matériaux lors d'un changement d'état. Le passage d'un état liquide à un état gazeux (ou solide-liquide) absorbe une grande quantité d'énergie. L'énergie absorbée sera restituée lorsque le matériau revient à son état initial. Nous proposons dans ce papier, d'étudier et d'analyser les 2 premiers types d'inertie à travers deux études:

La première consiste à étudier le comportement dynamique d'une paroi sollicitée par des conditions extérieures périodiques (étude et comparaison du déphasage et de l'amortissement pour des parois classiques).

La seconde consiste à étudier l'interaction de la paroi avec les charges intérieures du bâtiment. Afin de réaliser ces études, on utilise l'environnement de simulation SPARK adapté aux études complexes [1]. C'est un environnement orienté objet basé sur les équations. Ce logiciel prend en compte toutes les phases de la simulation, depuis la traduction des modèles équationnels fournis par l'utilisateur jusqu'à l'obtention des résultats, en passant par l'établissement d'un algorithme de résolution et son implémentation. D'abord on présente le modèle d'une paroi simple implémentée dans cet environnement ensuite on présente les résultats des deux études.

2. MODELE PHYSIQUE

Le problème consiste donc à étudier, dans le cas d'un seul matériau d'épaisseur L, l'équation de la diffusion unidimensionnelle (Ω étant le domaine $[0,L]$) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Où $a = k / (\rho * C)$ est la diffusivité thermique. ρ , C et k sont respectivement la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique du matériau. Pour que le problème soit mathématiquement bien posé, il faut en général spécifier une condition initiale ($\forall x \in \Omega, T(x,0) = T_0(x)$) et une condition aux limites sur le bord du domaine, dans le cas général c'est une condition de type Fourier $\forall x \in \partial\Omega$:

$$-k * \frac{\partial T(x,t)}{\partial n} = \vec{n}(x) \cdot \overrightarrow{grad} T(x,t) = h(Ta - T) \quad (2)$$

Afin d'étudier cette équation, on a utilisé la méthode des différences finies (schéma implicite) dans laquelle la paroi a été discrétisée en 5 nœuds. Pour résoudre le système obtenu, les équations ont été implémentées dans l'environnement de simulation SPARK, un environnement orienté objet permettant de résoudre de façon efficace les systèmes d'équations différentielles [1]. Ceci nous a permis d'effectuer 2 études avec différents matériaux (Table 1) et en particulier un matériau à base végétal : le béton de chanvre. Dans la suite on présentera ces études.

Table 1 : Les propriétés physiques des matériaux étudiés.

Matériau	Masse volumique Kg/m ³	Conductivité thermique W/m K	Chaleur massique J/(kg.K)
Béton de chanvre	450	0.11	1000
Béton cellulaire	650	0.2	1000
Brique pleine	1850	1	1000
Brique de terre	1950	0.87	850
Béton plein	2300	1.75	960

3. SIMULATION D'UNE PAROI SIMPLE SOUMISE A UNE SOLLICITATION PERIODIQUE DE TEMPERATURE EXTERIEURE

Dans cette partie, on étudie le comportement d'un mur simple soumis à une sollicitation périodique de température. La paroi est soumise à des conditions de type Fourier avec $T_{int}=20^\circ\text{C}$ et $h_{ci}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ et à l'extérieur (en $x=L$), $h_{ce} = 16 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ et $T_{ext} = 5 * \cos(w*t)$ avec $w=2*\pi/T$ où $T= 24$ heures.

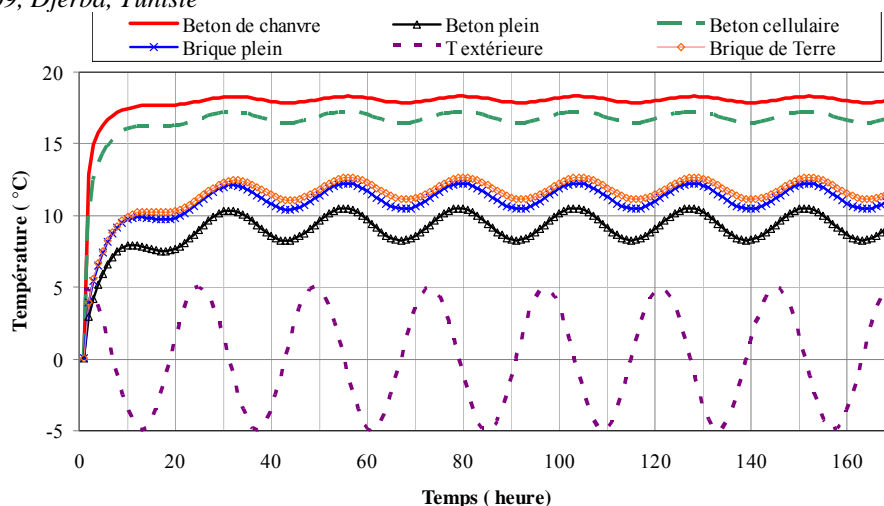


Figure 1 : La variation de la température de surface intérieure de la paroi selon le temps.

La température initiale de la paroi est de 0°C. La durée de la simulation est d'une semaine. La figure 1 montre l'évolution de la température de surface intérieure pour différents matériaux. Lorsque le régime devient établi, la variation de cette température est aussi périodique, amortie et déphasée. La température de la paroi en béton de chanvre est plus élevée et plus amortie que les autres parois. Par exemple, dans le régime périodique établi, la température extérieure varie de -5 °C à 5°C, la température de surface intérieure de la paroi en béton de chanvre varie de 17,68°C à 18,31 °C. Donc, l'amplitude du régime quasi stationnaire est de 0,31 °C tandis que pour une paroi en béton plein elle est de 1,13°C (l'amplitude de la température du régime quasi stationnaire est calculée suivant: $\theta = (T_{\max} - T_{\min})/ 2$). Pour le déphasage il augmente aussi lorsque la diffusivité diminue. Pour les parois étudiées, sa valeur varie entre 6h et 7h.

Table 2 : Température moyenne, gradient de température et amplitude du régime quasi stationnaire dans la paroi.

Matériau	Diff. Therm. (m2/s)	Ts_int moyenne (°C)	GradT (°C/cm)	Amplitude du régime stationnaire (°C)
Béton de chanvre	2.43E-07	18.08	0.873	0.31
Béton cellulaire	3.08E-07	16.83	0.791	0.40
Brique de terres	5.24E-07	11.85	0.465	0.83
Briques pleines	5.41E-07	11.33	0.431	0.91
Béton plein	7.93E-07	9.36	0.302	1.13

La table 2 montre la diffusivité thermique, l'amplitude, le gradient de la température et la température moyenne pour les différents matériaux. Plus la diffusivité thermique du matériau augmente et plus la chaleur diffuse rapidement, l'amplitude du régime quasi stationnaire devient plus grande et la température moyenne de surface intérieure devient plus faible.

Ces résultats s'appliquent aussi pour des conditions estivales, si la paroi est soumise à une température extérieure élevée. Dans ce cas, plus la diffusivité est élevée et plus la température de surface intérieure est élevée et le déphasage est plus faible. Ces résultats sont en accord avec les résultats de Tsilingiris [2]. Dans le paragraphe suivant on s'intéresse à l'étude de l'interaction paroi –charge intérieure.

4. CALCUL DE LA CAPACITE THERMIQUE ET DE L'ENERGIE ACCUMULEE

Afin d'étudier les interactions entre l'inertie et l'ambiance intérieure, on va considérer une paroi monocouche, adiabatique de l'extérieur et soumise à des fluctuations sinusoïdales de la température intérieure. Ces fluctuations sinusoïdales varient entre $\pm 1^\circ\text{C}$ sur une période de 24h. Nous allons prendre le cas où l'épaisseur de la paroi est respectivement égale à 2.5, 5, 10 et 15cm. Pour mieux initialiser le problème, on simule le modèle pour une durée de 15 jours. A partir du 5^{ème} jour, on atteint un régime stable des températures et du flux. La couche la plus intérieure de la paroi étant la plus influencée par les transferts thermiques, on s'intéresse aux échanges au niveau de l'interface entre la paroi et l'ambiance.

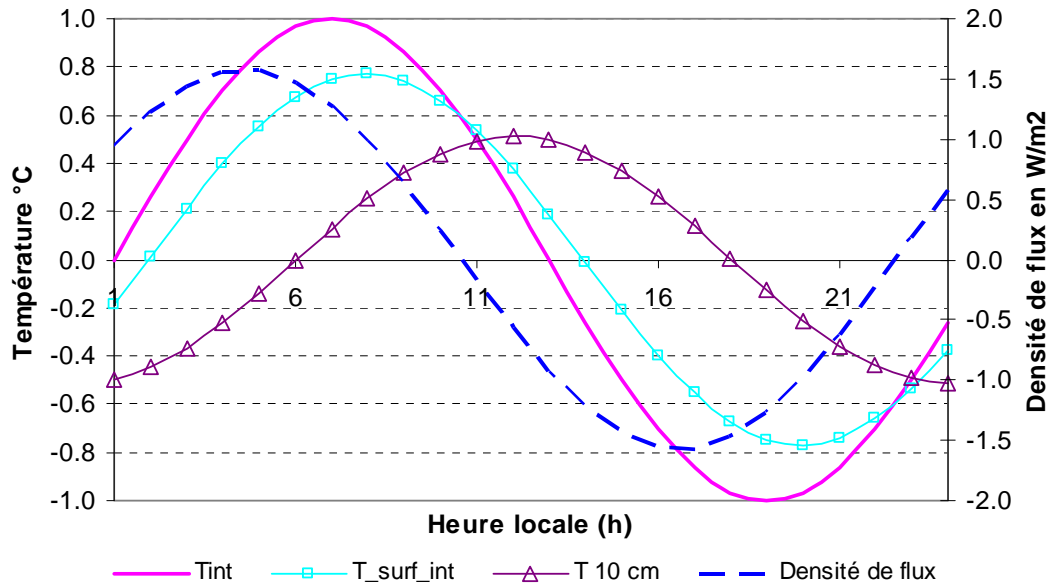


Figure 2 : Evolution de la température de surface, de la température intérieure, de la température à 10cm de profondeur et du flux stocké dans une paroi monocouche en béton de chanvre.

La figure 2 montre l'évolution de la température de surface d'une paroi en béton de chanvre, de la température à 10cm de profondeur et du flux de chaleur stocké lorsque la température intérieure subit une variation entre -1 et 1°C pour une période de 24h. Ce flux est stocké lorsque la température de surface $T_{\text{surf_i}}$ est inférieure à la température intérieure ; le flux est alors positif. On remarque sur la figure 2 que le flux s'annule quasiment au moment où les températures deviennent presque égales et reste négatif lorsque la température de surface devient supérieure à la température intérieure.

Dans ce cas, l'inertie thermique se caractérise par la capacité thermique surfacique CT qui se calcule par le produit $C_p \cdot \rho \cdot E$ en $\text{Wh/m}^2\text{K}$ où C_p , ρ et E sont respectivement la chaleur massique, la masse volumique et l'épaisseur du matériau. Elle définit la capacité maximale du matériau à stocker de l'énergie pour une variation de la température du matériau de 1°C [3]. D'autre part, avec notre modèle, il est possible de calculer l'énergie réellement stockée, Q_{calc} évaluée en $\text{Wh/m}^2\text{K}$. La différence décelable entre la capacité thermique surfacique et l'énergie stockée calculée permet de définir un rapport qui exprime le pourcentage de la capacité thermique effectivement utilisée.

Le tableau 2 montre les valeurs de la capacité thermique obtenues pour différents matériaux de construction ainsi que les valeurs de l'énergie accumulée dans la paroi pour des épaisseurs allant de 2.5 et 10 cm.

Table 3 : Calcul de la capacité thermique et de la fraction de capacité thermique utilisée (ou capacité thermique effective) pour des épaisseurs de 0.025 m et 0.1 m .

E = 0.025m	Capacité thermique surfacique Wh/m²K	Energie stockée calculée pour une variation sinusoïdale (±1C) Wh/m²K	Capacité thermique effective %
Béton de chanvre	3.1	6.09	98
Béton cellulaire	4.5	8.7	97
Brique pleine	12.8	21.04	82
Brique de terre	11.5	21.74	95
Béton plein	15.3	23.7	77
E=0.1 m			
Béton de chanvre	12.50	12.6	50
Béton cellulaire	17.33	17.7	51
Brique pleine	51.39	31.2	30
Brique de terre	46.04	30.7	33
Béton plein	63.89	33.6	26

Tout comme la capacité thermique surfacique d'un matériau, on peut aussi utiliser l'effusivité thermique ($\sqrt{\lambda\rho C_p}$) qui indique l'aptitude d'un matériau à absorber et à restituer de l'énergie. La figure 3 illustre l'influence de l'effusivité sur la quantité d'énergie stockée en Wh/m²K ainsi que l'influence de l'épaisseur. Au dessous de 1500 J/m²Ks^{1/2}, lorsque l'on double l'effusivité, l'énergie cumulée va quasiment être doublée elle aussi. Au-delà de cette valeur, elle augmente moins rapidement mais peut accroître de façon importante avec la variation de l'épaisseur de la paroi. Cette influence de l'épaisseur va tantôt augmenter la capacité thermique et donc la quantité d'énergie cumulée.

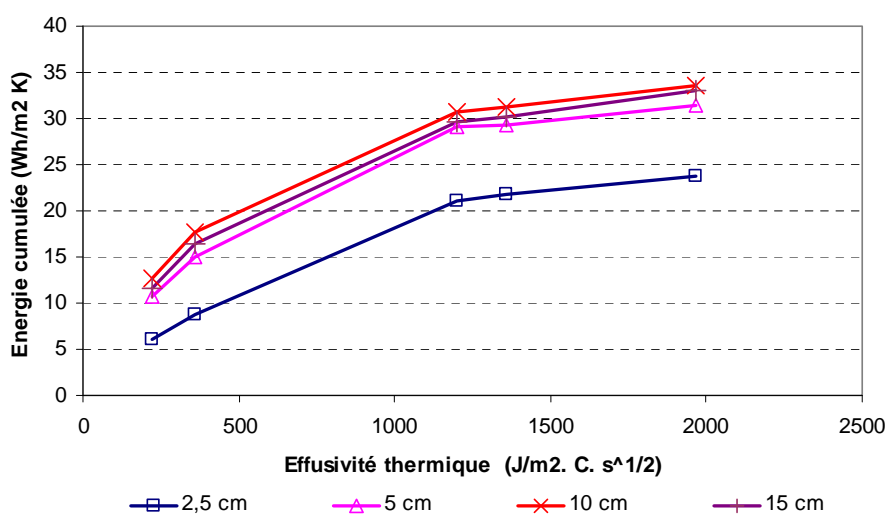


Figure 3: Evolution de l'énergie cumulée dans la paroi en fonction de l'effusivité du matériau et de l'épaisseur

Lorsque l'épaisseur de la paroi passe de 2.5 à 10cm, l'énergie cumulée est multiplié par 1.5. Seulement lorsque l'épaisseur varie de 10 à 15cm, l'énergie reste pratiquement constante voire diminuée. On pourrait expliquer ceci par le fait que, au-delà d'une certaine épaisseur que prend la couche influencée par les transferts thermiques ne dépassant pas les 10cm, les températures des couches en aval deviennent constantes et égales et donc le flux de stockage nul. L'épaisseur de la couche d'influence pourrait augmenter d'une part avec la période des sollicitations intérieures et d'autre part avec le phénomène de ventilation, en augmentant le facteur de convection intérieur.

5. CONCLUSION

Dans ce papier, on a traité deux des principaux aspects de l'inertie thermique : l'amortissement de la chaleur (pour la chaleur extérieure) et son stockage dans la paroi (pour les charges internes) et ceci pour des murs simples monocouches. Un modèle de simulation a été implémenté dans l'environnement orienté objet SPARK. Les résultats de simulation ont montré l'importance de la diffusivité thermique du matériau (phénomène de diffusion de chaleur) et de son effusivité (pour le stockage). Afin d'amortir la diffusion de la chaleur extérieur, il faut avoir une diffusivité thermique faible et afin d'augmenter la quantité d'énergie stockée il faut avoir une effusivité thermique élevée. Comme il est quasi rare de trouver un matériau qui vérifie ces deux critères, il faut utiliser des parois multicouches. Donc il serait intéressant d'étudier les 2 phénomènes pour des parois doubles. De même il faut considérer le phénomène de transfert d'humidité dans la paroi qui peut augmenter sa capacité de stockage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] E.F. Sowell, P. Haves, 2001, Efficient solution strategies for building energy system simulation, *Energy and Buildings*, vol. 33, pp. 309-317.
- [2] P.T. Tsilingiris, 2003, Thermal flywheel effects on te time varying conduction heat transfer structural walls, *Energy and Buildings*, Volume 35, Issue 10, pp. 1037-1047.
- [3] L. Olsen, Heat capacity in relation to the Danish building regulations, 2008, 8th *Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Copenhagen, Juin 2008, pp. 1449-1356.