

Modélisation d'une façade active comportant un Matériau à Changement de Phase

Marcella VEGGI¹, Joseph VIRGONE¹, Stéphanie GIROUX-JULIEN¹

¹Université de Lyon, CNRS, Université Lyon 1, CETHIL, UMR5008, F-69622, INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

Résumé - Le mur Trombe est une technologie connue depuis longtemps pour exploiter les gains solaires et stocker l'énergie thermique dans l'enveloppe du bâtiment, afin de réduire les besoins énergétiques de l'édifice en garantissant un niveau de confort aux occupants. Pour l'inertie thermique de cette structure il est possible d'introduire, à la place du mur massif, des matériaux à changement de phase (MCP), qui permettent d'augmenter les performances du mur, en réduisant l'épaisseur, ce qui représente en outre un avantage au niveau architectural. Cet article présente un code numérique pour la simulation du comportement d'un mur Trombe intégrant une ou deux couches de MCP. Pour cela nous sommes partis d'un modèle existant de l'environnement de calcul TRNSYS (le Type36) représentant un mur Trombe classique et nous l'avons modifié afin de permettre l'introduction des matériaux à changement de phase. Nous avons réalisé une validation relative à la prise en compte des MCP en comparant les résultats simulés avec des résultats de la littérature et à des essais expérimentaux. Des études paramétriques sont ensuite présentées afin d'analyser, pour un climat donné, l'intérêt d'utiliser ce type de matériaux. L'utilisation d'un code numérique de ce genre peut être intéressante pour l'optimisation des projets des enveloppes du bâtiment qui intègrent une technologie évoluée comme les MCP.

Nomenclature

A	surface du mur, m^2	σ	constante de Stefan-Boltzmann, $Wm^{-2}K^{-4}$
C	capacité calorifique MCP, $J kg^{-1} K^{-1}$	ε	émissivité, -
e	épaisseur du mur, m	Indices	
h	coefficient d'échange, $Wm^{-2}K^{-1}$	abs	absorbé
Q	flux thermique, W	ae	air extérieur
R	résistance thermique, m^2KW^{-1}	c	ciel
T	température, $^{\circ}C$	$conv$	convectif
t	temps, s	i	local
V	vitesse du vent, $m s^{-1}$	f	air dans la lame d'air
x	abscisse, m	m	mur
Δx	épaisseur d'une maille, m	r	radiatif
ρ	masse volumique du MCP, $kg m^{-3}$	S	sortie de la lame d'air
λ	conductivité du MCP, $W m^{-1} K^{-1}$	st	stocké dans le MCP
		v	verre

1. Introduction

Aujourd'hui il existe plusieurs technologies pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Une des méthodes les plus utilisées est d'intervenir au niveau de l'isolation thermique de l'enveloppe, ce qui permet de réduire les pertes de chaleur en hiver ou les gains en été. Une technique plus évoluée est la conception d'une enveloppe permettant d'exploiter au mieux les apports solaires, mais aussi active (couplée au système de ventilation) afin de garantir une «gestion optimale» des gains et pertes (selon la période: été ou hiver, jour ou nuit). Cela implique des phénomènes physiques et thermiques complexes, capables de stocker l'énergie solaire et ensuite la transformer dans la forme souhaitée. Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent être considérés comme une technique très intéressante

pour le stockage d'énergie thermique, car ils permettent d'absorber et déstocker la chaleur à une température relativement constante proche de la température de fusion. Grâce à cette qualité et à leur capacité calorifique élevée (de 5 à 14 fois supérieure à celle des matériaux de construction classiques) les MCP sont de plus en plus employés dans les bâtiments. Le couplage de ces matériaux à des structures plus classiques, comme le mur Trombe, peut être une solution efficace pour l'amélioration des performances énergétiques du bâtiment. Pendant les vingt dernières années plusieurs études sur les MCP, couplés au bâtiment, ont été menées afin d'en évaluer les performances. En 1996 Stritih et Novak [1] ont réalisé des études expérimentales et paramétriques sur le comportement thermique du prototype d'un mur solaire, intégrant une couche de MCP (cire de paraffine) ; les résultats ont démontré que, par rapport au mur Trombe classique, le modèle avec matériaux à changement de phase garantit une réduction des pertes de chaleur, en augmentant les performances thermiques de la façade.

En 2003 Stritih [2] a développé un modèle mathématique en 2D du mur solaire, afin d'évaluer les processus de stockage de la chaleur dans les matériaux à changement de phase, en utilisant la méthode de l'enthalpie pour la solidification et la fusion. Des simulations ont été menées pour évaluer l'influence des différents paramètres et les résultats ont démontré que le facteur le plus influent est la distance entre les ailettes, utilisées pour favoriser le transfert de chaleur de la paraffine. En 2003 Faggembauu [3] et al. ont développé un code numérique qui permet d'effectuer des simulations temporelles du comportement thermique des façades conventionnelles ou ventilées, en permettant de coupler des technologies évoluées, comme les surfaces sélectives, les vitrages à haute performance et les matériaux à changement de phase. Ce modèle est basé sur une discrétisation unidimensionnelle afin de réduire le temps d'élaboration du logiciel et il a été validé grâce à la comparaison avec les résultats des modèles analytiques et des mesures expérimentales. Une étude expérimentale effectuée en 2012 par Zalewski et al. [4] a démontré les performances d'un mur solaire à petite échelle, intégrant des matériaux à changement de phase (sels hydratés), conditionnés en petites briques. Par rapport à une structure classique, il a été prouvé que cette typologie de mur permet de déstocker la chaleur avec un déphasage en temps maximal, ce qui peut être un avantage pour les bâtiments occupés uniquement pendant la journée. Toutefois les études ont démontré que des phénomènes de surfusion sont toujours présents et il est donc nécessaire de les prendre en compte dans l'évaluation du comportement thermique de ce genre de structure.

Dans cet article nous allons décrire un nouveau Type TRNSYS (Type 361) qui a été créé pour modéliser un mur Trombe intégrant des MCP. Ce modèle est la modification du Type 36 existant, sans matériau à changement de phase. Il est également en 1D, comme le type originel, et permet malgré tout une évaluation correcte des gains énergétiques liés à cette structure, ce qui est suffisant quand on veut coupler ce type d'enveloppe active à un modèle de bâtiment (tel que le Type 56 de TRNSYS), ce qui sera fait dans un travail ultérieur. Premièrement nous présenterons les équations utilisées, ensuite nous présenterons la validation du modèle en le comparant avec des données expérimentales (ce qui confirme qu'un modèle 1D peut être suffisant) et des études paramétriques seront effectuées.

2. Description du modèle

Le logiciel TRNSYS comprend déjà dans sa bibliothèque un modèle qui représente un mur Trombe classique, constitué d'un mur massif, d'une lame d'air et d'un vitrage extérieur. Afin de permettre la modélisation d'un mur de ce genre, mais intégrant des MCP, nous avons créé, à partir du type originel, deux autres modèles, qui remplacent le mur massif par une ou deux couches de MCP de nature distinctes. L'implémentation de ces modèles, écrits en Fortran, est basée sur un schéma explicite et une discrétisation en différences finies ; le mur est donc divisé en un nombre entier de nœuds où sont évaluées les températures à chaque pas de

temps. Le modèle est à une dimension, seuls les échanges dans la direction orthogonale à la façade sont évalués. Ce composant, comme l'originel, offre quatre combinaisons de fonctionnement : ventilation forcée avec un débit imposé en entrée ou ventilation naturelle avec un débit calculé, coefficient de transmission du vitrage imposé par l'utilisateur ou calculé à partir des propriétés de vitrage et de corrélations implémentées dans le code. Ce modèle permet également de sélectionner la stratégie de ventilation : lame d'air fermée, ouverte vers l'environnement ou couplée à la pièce.

2.1. Equations

Dans un mur solaire (ou mur Trombe) le rayonnement solaire atteignant le vitrage extérieur peut être exploité pour le chauffage du local de deux façons : conduction à travers le mur ou convection par la lame d'air qui s'échauffe.

Le schéma analogique qui est employé pour modéliser le mur est le suivant :

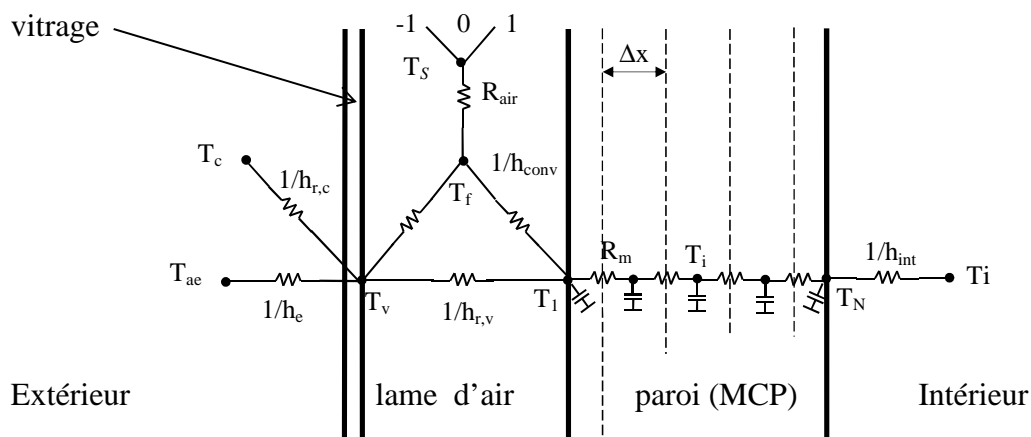


Figure 1 : Schéma analogique du modèle

Selon la stratégie utilisée, l'air circulant dans la lame peut être rejeté vers l'environnement extérieur (-1), injecté dans le local (+1) ou le débit peut être arrêté (0).

En ce qui concerne l'environnement il est possible d'introduire les conditions climatiques extérieures à partir d'un fichier météo externe, afin d'étudier le comportement dynamique de la façade au cours du temps. Toutefois le type originel (type36) de TRNSYS effectue certaines simplifications, en particulier pour le bilan du rayonnement grandes longueurs d'onde. Le logiciel, en effet, ne considère pas la température du ciel, mais uniquement la température ambiante. Nous avons modifié le modèle, afin de pouvoir introduire le nouveau paramètre de la température du ciel et avons dû réécrire, en conséquence, les équations de bilan. Ces équations introduites dans le modèle sont :

- Coefficient d'échange convectif

$$h_{c,e} = 5,7 + 3,8 V \quad (1)$$

- Coefficient d'échange radiatif avec la voute céleste :

$$h_{r,c} = \sigma \cdot \varepsilon (T_v^2 + T_c^2) \cdot (T_v + T_c) \quad (2)$$

- Coefficient d'échanges radiatifs diffusifs avec le sol :

$$h_{r,sol} = \sigma \cdot \varepsilon (T_v^2 + T_{ae}^2) \cdot (T_v + T_{ae}) \quad (3)$$

Si l'on considère que les échanges au niveau de la paroi vitrée sont également repartis entre le ciel et le sol, il est possible d'utiliser un facteur de forme de 1/2 pour les deux termes radiatifs. De cette façon le coefficient d'échange global avec l'environnement sera :

$$h_e = h_{conv,e} + \frac{1}{2} h_{r,sol} \quad (4)$$

Les flux sont évalués à partir de ces coefficients.

- Le flux d'énergie transporté par ventilation dans la lame d'air :

$$Q_{ventilation} = \frac{1}{R_{air}} \cdot (T_f - T_s) \cdot A \quad (5)$$

- Le flux perdu par convection et rayonnement vers l'environnement:

$$Q_{ve} = \left[h_e \cdot (T_v - T_{ae}) + \frac{1}{2} h_{r,c} \cdot (T_v - T_c) \right] \cdot A \quad (6)$$

- Le flux d'énergie thermique transférée du mur vers la pièce :

$$Q_{mi} = h_{int} \cdot (T_N - T_i) \cdot A \quad (7)$$

- Le flux perdu lorsque la lame d'air est ouverte vers l'extérieur :

$$Q_{perdu \text{ par la lame d'air}} = Q_{ve} + Q_{ventilation} \cdot E_m \quad (8)$$

E_m est égal à 1 si l'air échange avec l'environnement et égal à 0 dans les autres cas.

- Le flux total entrant dans la pièce (ventilation + mur stockeur) :

$$Q_i = Q_{mi} + Q_{ventilation} \cdot R_m \quad (9)$$

Où R_m est égal à 1 si l'air échange avec la pièce et égal à 0 dans les autres cas.

Afin d'évaluer la quantité d'énergie stockée dans le mur il faut d'abord calculer la variation de température dans les nœuds de la paroi, grâce à l'équation de la chaleur :

$$\rho \cdot C \cdot \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \right) \quad (10)$$

L'évolution de la capacité calorifique du mur C fonction de la température en présence de matériaux à changement de phase est la suivante [5] :

$$\begin{cases} C(T) = C_0 + (C_M - C_0) \cdot e^{-((T_M - T)/\Delta_1)^2} & \text{si } T \leq T_M \\ C(T) = C_\infty + (C_M - C_\infty) \cdot e^{-((T_M - T)/\Delta_2)^2} & \text{si } T > T_M \end{cases} \quad (11)$$

Où C_0 , C_∞ et C_M représentent respectivement la capacité calorifique à l'état solide, liquide et à la température de fusion du MCP notée T_M , Δ_1 et Δ_2 sont des écarts de température relatifs à la largeur du pic de capacité calorifique, avant et après la température de fusion.

Cette grandeur est calculée en chaque nœud et de manière itérative.

Pour les nœuds externes (vers la lame d'air et vers la pièce) les conditions aux limites prennent en compte les phénomènes convectifs et radiatifs. Pour le nœud extérieur on aura donc :

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = Q_{abs} + 1/R_m (T_2 - T_1) + h_{r,vm} (T_v - T_1) + h_{conv} (T_f - T_1) \quad (12)$$

Où R_m [$m^2 \text{ K W}^{-1}$] représente la résistance thermique dans le mur et $h_{r,vm}$ [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$] est le coefficient radiatif entre le vitrage et le mur.

Et pour le nœud intérieur :

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e} = 1/R_m (T_{N-1} - T_N) + h_{int} (T_i - T_N) \quad (13)$$

La quantité d'énergie stockée dans la paroi est calculée à chaque pas de temps et donc il est nécessaire de l'intégrer pour effectuer un bilan énergétique. Pour chaque nœud i on aura :

$$Q_{st,i} = Q_{st,i-1} + \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i \cdot \rho \cdot C_i \cdot \Delta x \quad [W] \quad (14)$$

Dans le modèle à deux couches de MCP (type 362) il est en plus nécessaire d'examiner les phénomènes qui ont lieu à l'interface entre les deux matériaux. Les échanges de chaleur sont toujours de nature conductive, mais il faut considérer les caractéristiques différentes des deux milieux. On assure ainsi la continuité du flux à travers l'interface, sans considérer de résistance de contact.

2.2. Validation

Les modèles numériques créés ont pu être validés par comparaison avec des études numériques de la littérature et avec des essais expérimentaux. En particulier, on a pu confronter le modèle modifié tenant compte de la température de la voute céleste avec l'étude numérique de référence réalisée par Shen et al. en 2007 [6] sur le comportement thermique d'un mur de Trombe classique situé à Carpentras (France). On obtient un écart maximum d'environ 15% qui s'expliquent par les différents fichiers météo utilisés. L'évolution des résultats est cependant similaire dans les deux cas. Les deux modèles avec introduction des MCP (type 361 à une couche et type 362 à deux couches) ont été validés par rapport à des essais expérimentaux effectués sur un échangeur de chaleur [7], constitué de plaques d'EnergainTM, qui présentent les caractéristiques dimensionnelles et thermiques indiquées dans le tableau 1.

Température de fusion	22.6 °C
Capacité calorifique à l'état solide	4250 J/kg/K
Capacité calorifique à l'état liquide	4250 J/kg/K
Capacité calorifique à la température de fusion	15000 J/kg/K
Densité	900 kg/m ³
Conductivité thermique	0.18 W/m/K
Epaisseur de la plaque	3 cm
Dimension de la plaque	1.2 m x 1.2 m
Epaisseur des lames d'air	18 mm

Tableau 1 : caractéristiques de l'EnergainTM utilisé pour la validation expérimentale

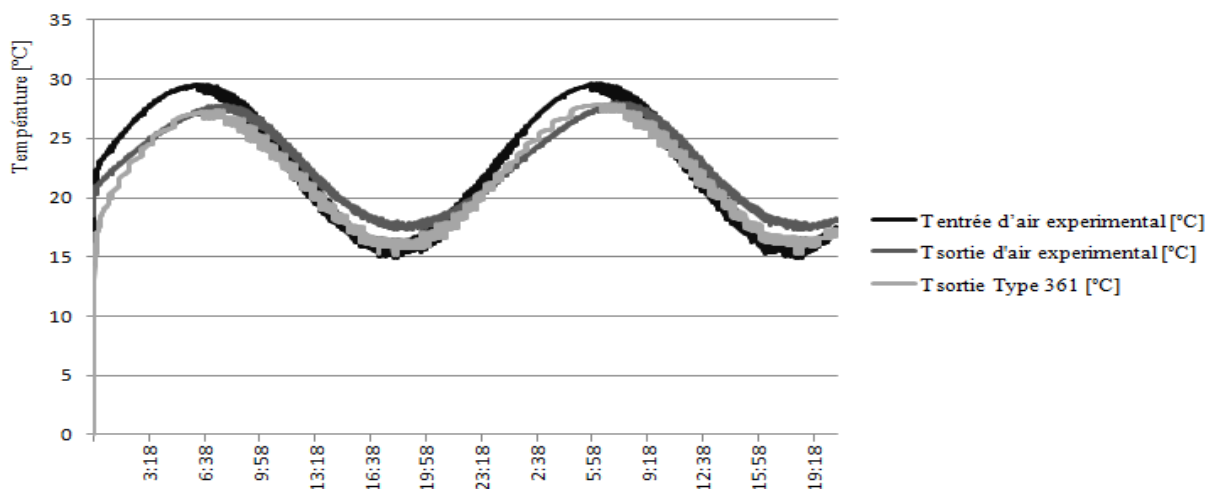


Figure 2 : Evolution des températures dans l'échangeur

Le débit d'air total n'est pas constant et son évolution dans le temps est connue comme donnée d'entrée. Même si ces essais ne correspondent pas à un mur solaire, ils ont été utilisés afin de valider la partie nouvelle introduite relative aux MCP. Sur le type 362 à deux couches, les mêmes caractéristiques thermiques ont été introduites sur chacune d'entre elle constituant ainsi un ensemble homogène. Les résultats obtenus avec les deux types concordent avec les données expérimentales comme le montre la figure 2. L'écart entre les deux résultats est raisonnable, surtout pour le deuxième cycle. Pour les premiers instants on observe que les simulations sont influencées par la condition initiale prise par défaut à 0°C.

3. Résultats

Des études paramétriques ont ensuite été effectuées afin de comparer le comportement du mur Trombe à MCP avec une structure classique en béton de 20 cm d'épaisseur, en période hivernale, à Turin. Le MCP utilisé est l'EnergainTM employé pour la validation décrite précédemment. Dans ce cas nous avons considéré un mur de 3m de hauteur, 2m de largeur, avec une lame d'air de 10 cm. Le vitrage est caractérisé par une émissivité de 0.8 et un coefficient de transmission de 0.8. Les conditions aux limites vers l'extérieur sont celles imposées par le fichier météo pris en compte (Turin). La température de la pièce est fixée à 20 °C. Les études ont été réalisées pendant la première semaine de Janvier, mais les résultats sont analysés sur les trois derniers jours lorsque la simulation a atteint le régime établi. Nous considérons un système avec ventilation forcée ; les débits d'air dans la lame sont donc imposés. Les paramètres que l'on a fait varier sont le débit d'air et l'épaisseur de la couche de MCP. En particulier nous avons considéré 6 cas de débit (0, 120, 240, 360, 480, 600 kg h⁻¹) et 4 épaisseurs (2, 4, 6, 8 cm).

Premièrement nous avons analysé l'évolution des températures de la façade avec MCP, en imposant un débit (360 kg h⁻¹) et une épaisseur (6 cm), par rapport aux conditions extérieures. La configuration de ventilation choisie consiste à prendre l'air de la pièce à 20°C et le faire circuler, en continu dans la lame d'air.

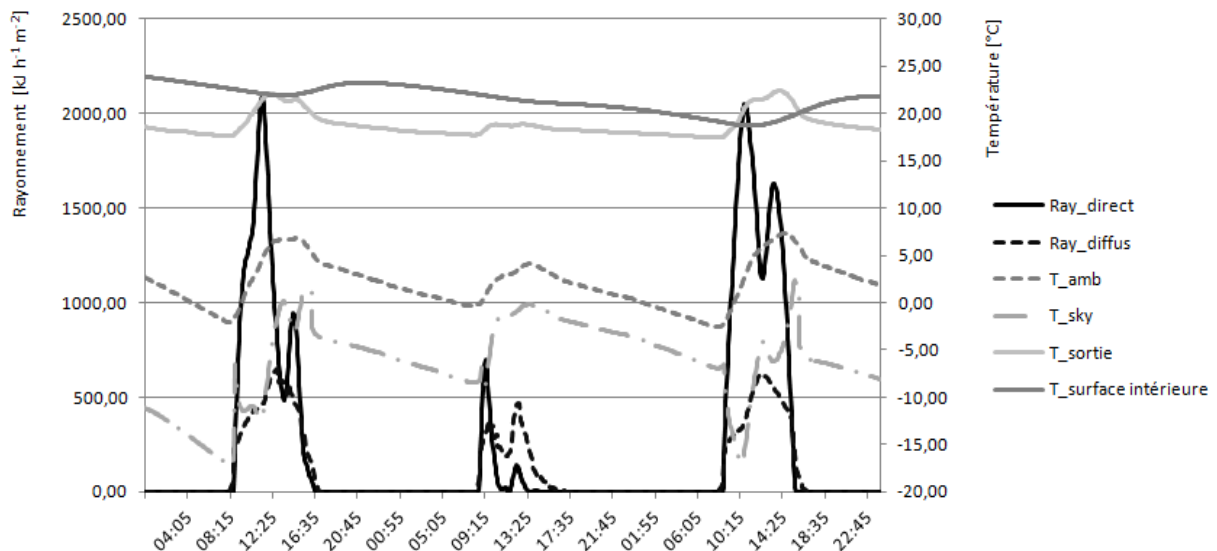


Figure 3 : Evolution des températures en fonction des conditions extérieures

On peut remarquer qu'un déphasage d'environ 6 heures se manifeste entre le pic de la température extérieure et celle de la surface intérieure du mur avec MCP.

Ensuite nous avons analysé comment l'épaisseur de la couche de MCP influence les flux thermiques vers l'intérieur, en séparant les apports de la ventilation des transferts thermiques à travers la paroi. En particulier on remarque lors de l'étude un écart important entre les résultats pour les épaisseurs de MCP variant entre 2cm et 4cm, alors qu'entre 4cm et 8cm l'évolution des flux ne varie plus; pour cette raison nous avons choisi de montrer uniquement les valeurs obtenues pour 2 et 4 cm, comparées à celles du mur classique en béton.

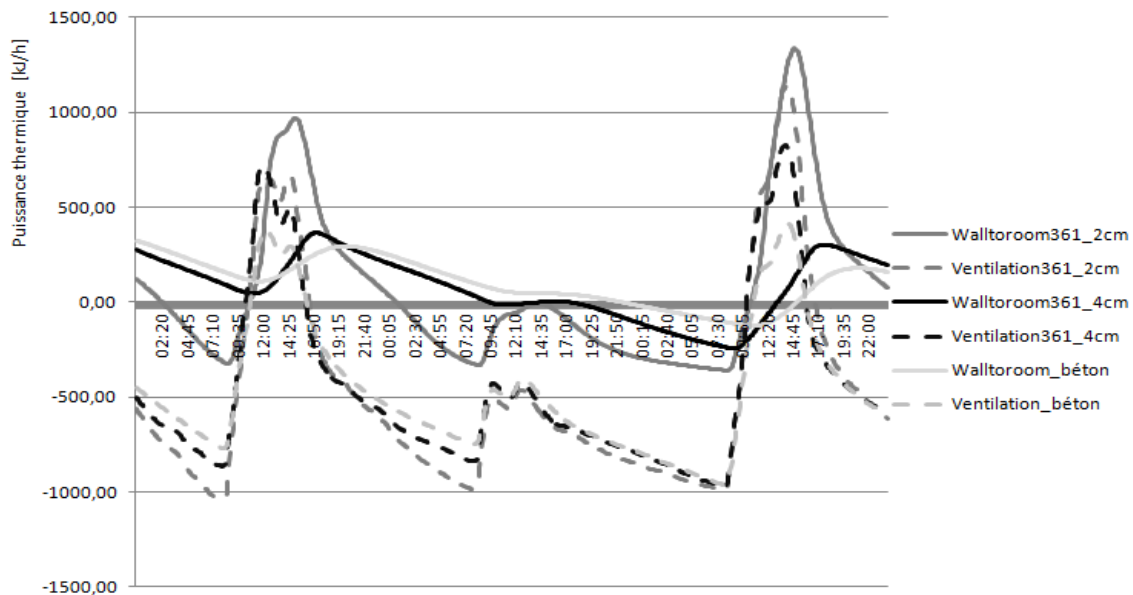


Figure 4 : Puissance thermique pour différentes épaisseurs de l'MCP

On peut remarquer que pour une faible épaisseur (2 cm) l'influence des transferts à travers la paroi est élevée, alors que déjà pour 4 cm de MCP les apports par la ventilation prévalent. Parallèlement, lorsqu'on augmente l'épaisseur, un décalage temporel des transferts de chaleur à travers la paroi se manifeste.

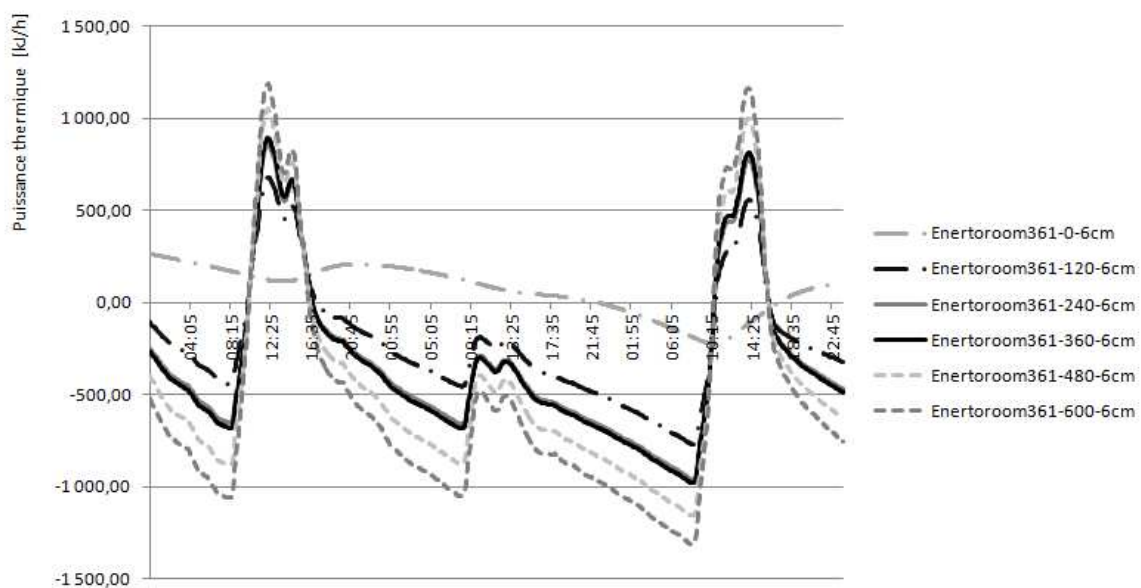


Figure 5 : Puissance thermique pour différents débits d'air

Finalement nous avons comparé les résultats obtenus en faisant varier les débits d'air dans la lame, pour une épaisseur donnée de la couche de MCP (6 cm) ; la puissance thermique entrant dans la pièce, grandeur significative pour l'évaluation du comportement thermique du système, est à nouveau présentée figure 5.

En augmentant le débit d'air les transferts de chaleur augmentent, ainsi que les pertes, ce qui montre l'influence de la quantité d'énergie récupérée par l'air de ventilation. Dans le cas de ventilation nulle le flux est plus uniforme, n'atteignant jamais des valeurs de pointe. Cela s'explique par le seul phénomène qui a lieu qui est la conduction à travers le mur, ce qui détermine aussi un décalage temporel dans les transferts de chaleur vers la pièce beaucoup plus visible.

4. Conclusion

Les résultats présentés ne sont que les premières applications de notre modèle.

Il est clair que la ventilation amène le plus d'énergie au local (par rapport aux apports à travers la paroi) au cours des périodes ensoleillées. Cependant, il est nécessaire de couper la ventilation si l'on ne veut pas avoir de pertes thermiques en période non ensoleillée et la nuit.

Pour les cas qui ont été traités avec notre modèle, la paroi ne contient pas d'isolation thermique derrière le MCP et donc les valeurs de pertes obtenues sont plutôt élevées. Il faudrait faire évoluer le modèle afin de traiter aussi des murs isolés.

De plus, il sera utile, pour la poursuite du travail, de connecter ce modèle au modèle du bâtiment, d'introduire également les bonnes stratégies de contrôle afin de limiter les pertes thermiques. De nombreuses autres configurations seront également possibles : ventilation naturelle, ajout d'isolant, utilisation de deux MCP de températures de fusions différentes, ...

Références

- [1] U. Stritih, P. Novak, Solar heat storage wall for building ventilation, *WREC*, (1996), 268-271.
- [2] U. Stritih, Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings, *Energy and Buildings* 35 (2003) 1097-1104.
- [3] D. Faggembauu, M. Costa, M. Soria, A. Oliva, Numerical analysis of the thermal behaviour of ventilated glazed facades in Mediterranean climates. Part I: development and validation of a numerical model, *Solar Energy* 75 (2003) 217-228.
- [4] Laurent Zalewski, Annabelle Joulin, Stephane Lassue, Yvan Dutil, Daniel Rousse, Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material, *Solar Energy* 86 (2012) 208-219.
- [5] Joseph Virgone, Jean Noel, Raymond Reisdorf, Etude numérique de l'influence de l'épaisseur et du point de fusion sur l'efficacité des matériaux à changement de phase : application à la rénovation d'un bâtiment scolaire de faible inertie, *IX^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes*, 18-20 mai 2009, Lille
- [6] Jibao Shen, Stéphane Lassue, Laurent Zalewski, Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, *Energy and Buildings* 39 (2007) 962-974
- [7] Julien Borderon, Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique, thèse de doctorat, ENTPE, Lyon, 2012.