

Couplage des transferts de chaleur par convection, chaleur sensible et latente dans un système solaire intégré

Xavier Faure¹, Kévy Johannes¹, Florence Jousse², Patrick Pierson³
& Daniel Quenard¹

Centre scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Saint Martin d'Hères, FRANCE
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), UJF-Grenoble, FRANCE
Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), UJF-Grenoble,
FRANCE

Contact : xavier.faure@cstb.fr

Résumé :

Les besoins en chauffage et climatisation ont été fortement réduits dans les constructions dites passives (label PassivHaus en Allemagne ou Minergie en Suisse). Un des moyens d'améliorer encore les performances énergétiques de l'enveloppe est de développer des enveloppes hybrides, utilisées pour la protection, l'isolation, comme capteur d'énergie, capable de la stocker et de la distribuer tout autour de l'enveloppe. Une cellule test a été construite à l'échelle 1:1 et est présentée ici. Il s'agit d'une enceinte de 40m³ délimitée par une enveloppe entièrement ventilée et intégrant des matériaux à changement de phase (MCP). La comparaison des premiers résultats expérimentaux et numériques obtenus grâce à l'outil de simulation développé dans l'environnement TRNSys montre une bonne concordance du modèle pour des configurations en convection forcée. Des améliorations restent à apporter en convection naturelle ainsi que sur les dynamiques de transition de phase des MCP.

Abstract :

The energy demand in passive building has been strongly reduced and most of traditional heating systems are oversized for such needs. A way to enhance the envelope performance and therefore to reduce the energy demand to small sized HVAC system is to develop hybrid envelopes used for protection, insulation, solar heat collection and storage and for heat transfer from one side to an other one. A full scale experiment test has been held on outdoor site and is presented here: it consists in a 40m³ volume delimited by an entirely ventilated envelop integrating phase change materials (PCMs). Simulations with a numerical model integrated in the TRNSys environment are compared to the measurements. Despite some good results in forced convection, some improvements need to be done to simulate more precisely the PCMs behaviour and natural convection effects.

Mots-clefs :

Enveloppe, convection, matériaux à changement de phase

1 Introduction

Les performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment atteignables aujourd'hui sont telles que les besoins en chauffage et climatisation peuvent être fortement réduits. Le label PassivHaus en Allemagne, par exemple, impose des consommations inférieures à 42kWh/an/m² d'énergie finale (Passiv, web). Dans ce contexte, les systèmes HVAC sont pour la plupart surdimensionnés et des

améliorations sont encore à apporter à l'enveloppe pour réduire les besoins à de simples systèmes d'appoints. L'enveloppe statique a déjà fait l'objet de nombreuses études tant d'un point de vue scientifique (Al-Homoud, 2005) qu'architectural (Koclar, 2004). Un des moyens d'atteindre les objectifs fixés est de définir des enveloppes hybrides, capables de capter, distribuer et gérer les énergies gratuites et solaires notamment. L'idée principale n'est pas nouvelle, il s'agit de stocker les flux de chaleur et de les redistribuer lentement dans le volume intérieur. Les systèmes type mur Trombe, Barra-Costantini, mur ventilé, cheminée solaire et façade double peau ont montré un intérêt certain dans la réduction des besoins énergétiques et ce pour beaucoup de climats. Malheureusement, ces systèmes n'impactent qu'une façade de l'enveloppe et ne réduisent pas les asymétries thermiques sur les faces internes au volume. De plus, l'air intérieur passe généralement dans le système pour collecter une partie de l'énergie captée, créant ainsi des problèmes potentiels de qualité de l'air. Enfin, des systèmes de ventilation tout autour de l'enveloppe et intégrant un confort annuel (problématiques d'été et d'hiver) n'ont pas été jusqu'ici recensés.

L'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) a beaucoup été étudiée pour améliorer le confort thermique des bâtiments. Bien que l'intégration passive dans l'enveloppe ait donné de bons résultats (Ahmad, 2006), les faibles conductivités thermiques des phases solide et liquide restent un problème majeur de ce type de matériau. Les quantités de chaleur stockées sont d'autant plus limitées que les échanges convectifs naturels avec l'ambiance intérieure sont faibles. Le couplage des MCP avec les systèmes de ventilation a également été étudié. Kuroki et al. (2002) montrent que suivant le type d'intégration des MCP dans l'enveloppe ou le système de ventilation, les effets varient entre un amortissement ponctuel (pic journalier de température) ou un stockage plus étalé (plusieurs jours).

L'idée du présent travail est un couplage entre les systèmes ventilés et le stockage par chaleur latente dans l'enveloppe du bâtiment. Les gradients de température de surface intérieure sont réduits par advection des quantités de chaleur captées au Sud et l'utilisation de chaleur latente est plus effective du fait des échanges convectifs forcés entre le MCP et les cavités d'air. Le fonctionnement du circuit d'air peut être soit en boucle fermée ou ouverte selon l'effet souhaité : amortissement ponctuel ou plus étalé.

Dans la suite est présentée la configuration de la cellule test ainsi que son instrumentation. Des résultats de simulation numérique sont également confrontés avec les premières campagnes de mesures.

2 La cellule test

2.1 Objectif

Trois systèmes d'enveloppes ventilées définissent l'enveloppe d'un volume de 40m³. Les circuits de ventilation peuvent être soit en boucle fermée, soit en boucle ouverte (fig.1).

Des capteurs solaires thermiques à air permettent de collecter l'énergie pour le confort d'hiver et peuvent être masqués pour le confort d'été. Un régime en convection forcée permet de distribuer l'énergie d'un côté à l'autre de l'enveloppe. La présence de MCP permet de stocker une partie de l'énergie transportée et de la redistribuer en l'absence de source. Les configurations boucle ouverte/fermée permettent de jouer avec les dynamiques intérieures (inertie et isolation) et extérieures (la température extérieure peut pénétrer directement sous l'isolant).

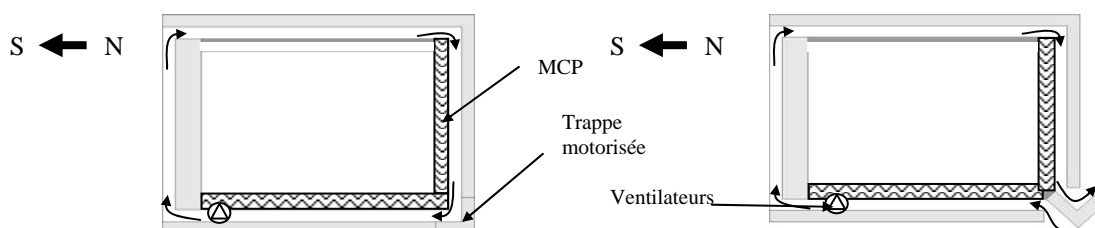


Figure 1 : Configurations en boucle ouverte (à droite) et fermée (à gauche) de la cellule test.

Les vitesses d'écoulement ainsi que la configuration peuvent être asservies avec les températures intérieures, extérieures, l'ensoleillement et l'état des MCP. Un logiciel a été développé permettant de contrôler les trappes et les ventilateurs.

2.2 Conception

L'ensemble des caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux utilisés, ainsi que les géométries et compositions des différentes parois sont présentés dans Faure et al., 2007. Dans cette partie, n'est présentée que la définition de l'ossature ainsi que le type de matériaux à changement de phase utilisés.

Structure

La surface au sol est de 16m² avec un plafond à 2.5m. La cellule test est surélevée de 80cm pour la découpler du sol. Les poutres de 20x22.5cm² sont réalisées en OSB 6mm (deux couches collées) entourant 20x17.5cm² de polyuréthane (PU) pour limiter les ponts thermiques. La cellule est composée de trois systèmes ventilés indépendants. Deux sont équipés de capteurs solaires thermiques à air en façade Sud et un avec une façade type double peau (autorisant ainsi les gains solaires directs dans le volume) (fig.2).



Façade Nord



Façade Sud

Figure 2 : Cellule test en site extérieur

Matériaux à changement de phase

Les MCP utilisés sont conditionnés dans des briquettes en polyoléfine de 16.5x13.5x2.5cm³. 285 briquettes ont été installées au nord et au sol, couvrant ainsi 30% des surfaces (fig.3). Il s'agit d'un eutectique avec une température de fusion annoncée par le fabricant de 21°C et un point « onset » de 20.3°C. Des mesures faites en micro calorimétrie à balayage différentiel avec une pente de 0.05°C.min⁻¹ montrent un écart par rapport aux données du fabricant. Une température de fusion de 24.6°C avec un point de « onset » de 22.4°C et une température de cristallisation de 20.2°C avec un point de « onset » à 21°C ont été mesurées. Ces écarts peuvent être

expliqués par les masses d'échantillons utilisées ainsi que les pentes de chauffage et de refroidissement choisies pour la caractérisation du matériau (IEA-A17, 2005).



Figure 3: vue intérieure de la cellule test : 30% de la surface est occupée par des MCP pour les trois systèmes (à gauche) et pour un système (à droite).

Les propriétés d'absorption, sur l'ensemble du spectre énergétique, des matériaux et revêtements utilisés ont été mesurées par la méthode spectrométrique définie par la norme NSEN410. Sachant qu'aucun revêtement ne contient de particule métallique, l'émissivité grande longueur d'onde peut raisonnablement être estimée à 0.9. Les caractéristiques des verres utilisés sont données par le fabricant.

2.3 Instrumentation & acquisition

La cellule test est équipée de 93 thermocouples, de 10 fluxmètres et d'un hygromètre. Les thermocouples sont de type K et ont été calibrés dans des bains thermostatés. Les fluxmètres ont été calibrés avec un isolant étalon. Les thermocouples ont été placés par l'intérieur des panneaux (lors de la fabrication) et de façon à ce que le point de soudure se trouve à fleur de la surface. Ils ont ensuite été recouverts d'une pâte thermique et du même revêtement que la surface globale.

L'acquisition des données se fait de manière autonome par une centrale d'acquisition CR23X Campbell scientifique installée dans la cellule test. 5 multiplexeur AM25T permettent l'acquisition de l'ensemble des capteurs. Les données sont directement converties par le programme de la centrale d'acquisition et sauvegardées sur le réseau via le logiciel PC208W installé sur un PC dans les locaux du laboratoire. Une station météo située à proximité de la cellule test (environ 30 m) sauvegarde l'ensoleillement direct et diffus, la température extérieure, le vent et l'humidité.

3 Approche numérique

Un outil de simulation a été développé et intégré à l'environnement TRNSys (logiciel de simulation dynamique en thermique du bâtiment) (Faure et al., 2006). Les échanges conductifs sont représentés par des modèles 3R4C (analogie électrique). Les échanges convectifs sont réduits à des corrélations tirées de la littérature et fonction de la géométrie et du type d'écoulement en jeu (Miranville, 2002). Les échanges radiatifs internes sont approximés par des facteurs de formes dépendants des rapports surfaciques et incluant un terme de correction suivant les principes de réciprocité et de complémentarité. Le système global peut se représenter sous la forme :

$$C.\dot{T}(t) = M.T(t) + A.S(t) \quad (1)$$

Avec $T(t)$ le vecteur d'état (température en chaque nœud), M la matrice des paramètres (conductance entre chaque nœud), C la matrice diagonal des capacités, A la matrice des conductances avec les sollicitations et $S(t)$ le vecteur des sollicitations. Le schéma numérique est totalement implicite. Une procédure de sous-échantillonnage assure la définition des coefficients d'échanges avec les températures de l'état courant.

4 Résultats

Les données climatiques enregistrées (température, vent, ensoleillement) constituent les entrées du modèle pour les simulations.

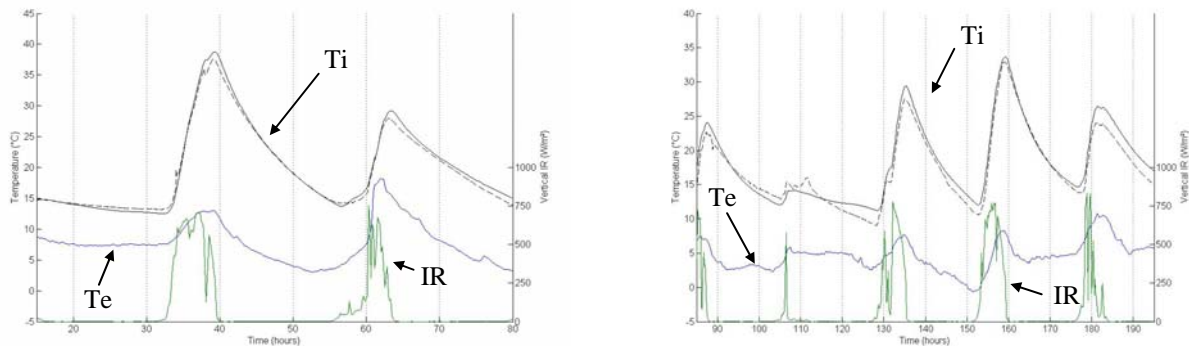


Figure 5: Température intérieure mesurée (trait pointillé) et simulée (trait plein). Configuration en convection forcée (à gauche) et convection naturelle (à droite).

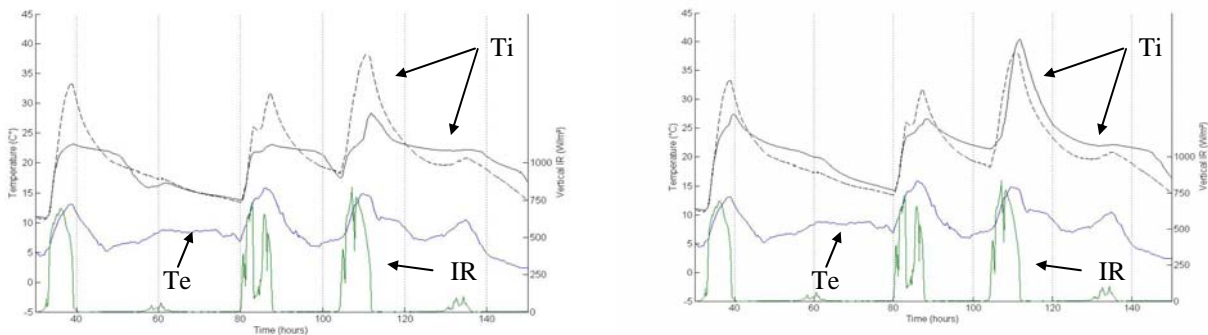


Figure 6: Température intérieure mesurée (trait pointillé) et simulée (trait plein). Simulations avec les données fabricant pour le MCP (à gauche) et les données corrigées (à droite).

4.1 Sans MCP

Les configurations en convection naturelle et forcée ont été confrontées avec des résultats de simulations. Les résultats sont présentés en figure 5. Le modèle donne de bons résultats en convection forcée et montre quelques écarts en convection naturelle. Ces écarts peuvent s'expliquer par le choix des corrélations utilisées pour représenter les échanges convectifs. En effet, les échanges en convection forcée sont nettement mieux connus qu'en convection naturelle où la géométrie et l'environnement des cavités ont une grande influence sur les transferts de chaleur.

4.2 Avec MCP

Des simulations ont été faites en intégrant les MCP sur les faces nord et sol. Les confrontations avec les mesures ne sont présentées qu'en convection forcée (le modèle présentant de meilleurs résultats dans cette configuration). La figure 6 présente, pour une même campagne de mesures, deux simulations : à droite, les données fabricant sont intégrées comme caractéristiques pour les MCP et à gauche, les données corrigées (mesurés en micro calorimétrie à balayage différentiel) sont intégrées (cf.2.2.). On note de forts écarts entre les deux simulations, montrant l'influence significative des caractéristiques des MCP. Des améliorations sont encore à apporter sur la modélisation des transitions de phase. La dynamique et la masse des échantillons ayant une influence sur les transitions, les modèles numériques doivent intégrer ces aspects.

5 Conclusions

Une cellule test à l'échelle 1:1 a été construite en site extérieur. Les résultats préliminaires des campagnes de mesures ont été confrontés avec un outil simulation développé. Bien que les résultats en convection forcée soient encourageants, des améliorations restent à apporter sur la réduction des échanges convectifs en convection naturelle ainsi que sur les transitions de phase des MCP en intégrant notamment les dynamiques des sollicitations. Après d'autres campagnes de mesures en marche « forcée » de la cellule pour calibrer totalement le modèle, des études sur les algorithmes de gestion des flux seront menées.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ADEME pour son support financier, l'IUT1 Génie Civil de l'UJF pour son support technique dans la construction de la cellule test ainsi que le Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG) pour le développement des outils de gestion des actionneurs.

Références

- Ahmad M., Bontemps A., Sallée H., Quenard D., 2006, Testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Buildings*, 38, 673-681
- Al-Homoud M., 2005, Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building & Environment*, 40, 351-364.
- Koçlar G., Koknel A., Tamer N., 2004, Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions, *Building & Environment*, 39, 281-287
- IEA-A17, 2005, final report, *Energy Conservation through Energy Storage*, 136p.
- Faure X., Jousseilin F., Pierson P., Quenard D., 2006, RC Network approach for Hybrid envelops in Positive Energy Building, *EPIC 2006 HIVE proceedings*, FRANCE, 3,473-478
- Faure X., Johannes K., Jousseilin F., Pierson P., Quenard D., 2007, Integrated PCMs solar system within the building envelop, HEAT SET conférence, 18-20 avril 2007, Chambéry, FRANCE, à paraître.
- Kuroki T., M.Higuchi, M.Nakamuri, 2002, Application of phase change material to passive cooling of apartment house, IEA, *ECES IA Annex 17, 3rd workshop*, Tokyo, Japan
- Miranville F., 2002, Contribution à l'étude des parois complexes en physique du bâtiment, Ph.D. thesis, Génie Civil et physique du bâtiment, Université de la Réunion. 255p.
- Passiv, web : www.passiv.de