

Amélioration du confort d'été et réduction des besoins de chauffage dans les maisons à ossature bois

Gilles Fraisse, Valentin Trillat-Berdal et Bernard Souyri

¹Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE)
Université de Savoie, ESIGEC, Campus Scientifique Savoie Technolac, 73376 Bourget du Lac
email: fraisse@univ-savoie.fr

Résumé : En France, les maisons à ossature en bois représentent environ 5 % des maisons individuelles. Pourtant, la construction bois présente de nombreux atouts sur le plan environnemental. Les enveloppes des maisons à ossature bois ont comme caractéristique de posséder des lames d'air. Nous souhaitons les utiliser dans des systèmes visant à réduire les besoins énergétiques en hiver et à améliorer le confort thermique en été. Nous avons ainsi décidé de coupler un capteur solaire à air intégré en façade avec un mur interne inerte et ventilé. L'enveloppe de ces maisons étant légère, il est indispensable de pouvoir stocker l'énergie solaire dans les parois internes. La présence du mur interne se justifie également vis à vis du confort d'été. En effet, nous avons jugé pertinent d'augmenter l'inertie thermique de la maison de façon sensible. De plus, le refroidissement de la maison peut être obtenu grâce à une ventilation nocturne du mur interne. Cette étude présente une étude numérique comparative de l'amélioration du confort thermique obtenu grâce à la paroi interne. Cette étude a été financée dans le cadre de l'appel d'offre ADEME-PUCA 'préparer le bâtiment à l'horizon 2010'.

Mots-clés : confort thermique, paroi ventilée, modélisation

1. Introduction

En France, les maisons à ossature en bois représentent environ 5 % des maisons individuelles. La filière bois est pénalisée par le manque d'offres des constructeurs. Pourtant, la construction bois présente de nombreux atouts sur le plan environnemental : fixation du CO₂, matière première renouvelable, déchets de chantier réduits, énergie grise faible ... Les enveloppes des maisons à ossature bois ont comme caractéristique de posséder des lames d'air. L'idée initiale de ce travail est de les utiliser dans des systèmes visant à réduire les besoins énergétiques et à améliorer le confort thermique en été. Nous avons dans un premier temps étudié l'isolation paroi-dynamique (Fraisse, 2004). Il s'agit dans ce cas de valoriser les déperditions surfaciques grâce à la circulation de l'air neuf de ventilation dans une ou deux lames d'air au sein des parois opaques (Cadiergues, 1986) ou des fenêtres (Pazaud, 1997) (Baker, 1999) (Schmidt 2002). L'air neuf étant ainsi préchauffé, les déperditions globales du bâtiment sont réduites. Nous avons mis en évidence à l'aide de simulations numériques que le potentiel de récupération des apports solaires est beaucoup plus important que celui d'un système paroi-dynamique lorsqu'il s'agit de bâtiments neufs (Fraisse, 2004). En effet, les nouvelles exigences réglementaires (CSTB, 2001) visent à fortement réduire les déperditions surfaciques. Par ailleurs, la mise en place d'un système paroi-dynamique ou perméo-dynamique (circulation de l'air à travers l'isolant) nécessite une qualité de mise en œuvre particulièrement soignée (d'où un surcoût) si l'on souhaite atteindre les performances théoriques (Wallentén, 1996). La maîtrise de débits circulant dans des lames d'air sur l'ensemble des parois opaques est dans la réalité

très délicate en raison des infiltrations d'air. De plus, la qualité de l'air neuf à la sortie du système paroi-dynamique n'est pas garantie puisque les lames d'air vont très certainement accumuler des poussières au cours du temps (nettoyage des lames d'air quasi impossible). Le surcoût et les performances aléatoires liées à la qualité de réalisation font que ce système ne s'est pas développé en France.

Partant du constat qu'il est plus simple de valoriser les apports solaires, nous avons donc décidé d'intégrer un capteur à air vitré en façade. Cette intégration est facilitée par la présence d'une lame d'air, de l'isolant et de la structure modulaire des maisons en bois. L'utilisation d'une surface réduite facilite la maîtrise des débits et le nettoyage des lames d'air. L'enveloppe de ces maisons étant légère, il est indispensable de pouvoir stocker l'énergie solaire dans les parois internes. Par ailleurs, nous avons jugé pertinent, pour des raisons de confort thermique en été, d'augmenter l'inertie thermique de la maison de façon sensible. En effet, un des problèmes souvent évoqués pour les maisons à ossature bois sont les sur-chauffes liées à leur faible inertie. Nous avons ainsi décidé de mettre en place un mur interne inerte et ventilé (MI-V) à la place de certaines cloisons existantes. Ce mur est composé de deux parois préfabriquées en béton entre lesquelles circule, en hiver, l'air chaud en provenance du capteur solaire. Le MI-V constitue un émetteur de chaleur de grande surface à basse température ; ce qui est idéal pour le confort thermique. En été, une ventilation nocturne de la paroi avec de l'air extérieur permet d'abaisser la température intérieure. L'air ainsi réchauffé est rejeté directement à l'extérieur.

2. Utilisation de parois ventilées pour le stockage de l'énergie solaire

La captation et le stockage de l'énergie solaire dans une paroi peuvent être réalisés simultanément. C'est le principe du mur Trombe qui est un mur extérieur à la fois inerte et vitré permettant de chauffer directement l'air intérieur (Trombe, 1971). Pour cela, l'air intérieur pénètre en partie basse du mur, se réchauffe entre le vitrage et le mur, monte par convection naturelle puis est rejeté à l'intérieur. L'inertie de la paroi permet de restituer l'énergie solaire en soirée. Une variante avec isolation renforcée (vitrage et paroi inerte) permet d'améliorer les performances du système sur le plan énergétique et du confort en été (Zalewski, 1997) (Guiavarch, 2003).

Le capteur solaire (dans ce cas sans inertie) et l'élément de stockage sont généralement des composants différents appartenant à l'enveloppe. L'intégration du capteur solaire dans l'enveloppe du bâtiment permet de réaliser des économies financières par substitution, comparativement à un produit industriel qui serait rajouté en façade ou en toiture (Pottler, 1999) (Ubertini, 2003). Le capteur est très souvent vitré pour des raisons de performance énergétique. Néanmoins, un capteur non vitré (Solarwall) a été développé avec succès au Canada (Hollick, 1996). Il s'agit d'un bardage métallique présentant une multitude de petits trous par lesquels l'air neuf de ventilation entre dans une lame d'air puis à l'intérieur du bâtiment, souvent de type industriel.

Le stockage de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment n'est pas nouveau puisque les romains faisaient circuler de l'air chaud dans les parois selon le principe du chauffage hypocauste. Les fumées issues des chambres de chauffe circulaient dans les parois. Des vestiges subsistent encore comme les maisons individuelles à St Romain-en-Gal datant du 1^{er} et 3^{ème} siècle après J-C ou les Thermes de Constantin en Arles, datés du 4^{ème} siècle après J-C (Potier, 1999). Des systèmes analogues ont été utilisés pendant des siècles au Népal, en Corée et au Japon (Bansal, 1998) (Howard, 1999).

Des produits industriels sont actuellement disponibles pour le stockage de l'énergie solaire : circulation d'air dans des murs en maçonnerie (Ontario, web) ou des planchers (Barton, 2002) (Brun, web) (Harbola, web).

La littérature présente de nombreux bâtiments couplant un capteur solaire à air avec des planchers, des murs (internes et externes) ou les deux simultanément (Bansal, 1998) (Howard, 1999), (Imessad, 2004) (Gütermann, web) (Lee, web) (Nordstrom, web) (Rahbek, 2001) (Schuler, web) (Takase, web). La complexité de certains systèmes proposés n'est certainement pas à la hauteur des économies énergétiques. D'autres éléments de

stockage, comme des lits de galets, sont parfois utilisés en complément.

Il est très difficile de comparer les performances énergétiques des exemples proposés dans la mesure où les chiffres avancés sont souvent des notions très différentes

De plus, les conditions météorologiques sont elles aussi très variables. Enfin, plusieurs systèmes réduisant les besoins énergétiques sont souvent couplés et il est difficile de connaître la contribution de chacun.

3. Etude numérique

3.a. Principes de modélisation

Il est évidemment nécessaire de considérer l'inertie des parois (notamment celle du mur interne inerte et ventilé) dans les simulations en régime dynamique. Dans le cas d'une seule lame d'air, le modèle analogique d'une paroi ventilée est représenté sur la figure 1 (Fraisie, 2004). La température d'air à la sortie de la paroi ventilée peut être calculée à partir de la relation :

$$T_{out} = (\alpha_1 \cdot T_4 + \alpha_2 \cdot T_6) \cdot [1 - \exp(-\alpha_3 \cdot H)] + T_{in} \cdot \exp(-\alpha_3 \cdot H)$$

avec :

T_{out} : température à la sortie de la lame d'air

T_{in} : température à l'entrée de la lame d'air

T_4, T_6 : température moyenne de surface

H : hauteur de la lame d'air

α_{1-2-3} : paramètres liés aux échanges convectifs et radiatifs, au débit et à la chaleur massique de l'air

Les échanges conductifs sont modélisés grâce à l'analogie électrique basée sur un modèle 3R2C (3 résistances et 2 capacités) plus 2 capacités en surface afin de mieux prendre en compte les phénomènes conductifs en surface. La modélisation du capteur solaire et de l'enveloppe du bâtiment a été présentée dans (Fraisie, 2002) et (Plantier, 2003).

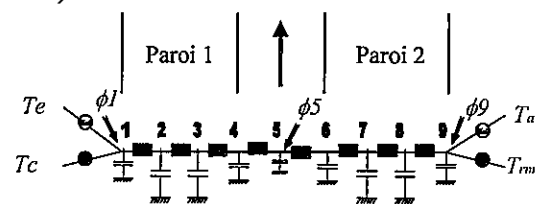


Figure 1 : modèle analogique d'un mur ventilé (une lame d'air entre 2 parois)

Nous distinguons à l'extérieur les températures d'air T_a et de la voûte céleste T_c afin de mieux prendre en compte les échanges convectifs et par rayonnement GLO (refroidissement lié à la voûte céleste). De même, l'ambiance intérieure est caractérisée par une température d'air T_a et une température radiante moyenne T_{rm} .

L'étude est réalisée à l'aide du logiciel TRNSYS (Klein, 1996). Ce logiciel est largement

utilisé par la communauté scientifique internationale dans le domaine énergétique et thermique. Ce logiciel est basé sur la connexion de modules élémentaires désignés 'TYPE', qui sont soit des composants du système (capteur solaire...), soit des fonctions particulières (lecteur de fichier météo...).

3.b. Configurations retenues

Les configurations retenues visent à apporter à la fois une baisse de la consommation énergétique en hiver et une amélioration du confort thermique en été. En été (figure 2), le refroidissement du bâtiment est obtenu en injectant l'air extérieur dans le MI-V pendant la nuit. A la sortie du MI-V, l'air est rejeté à l'extérieur.

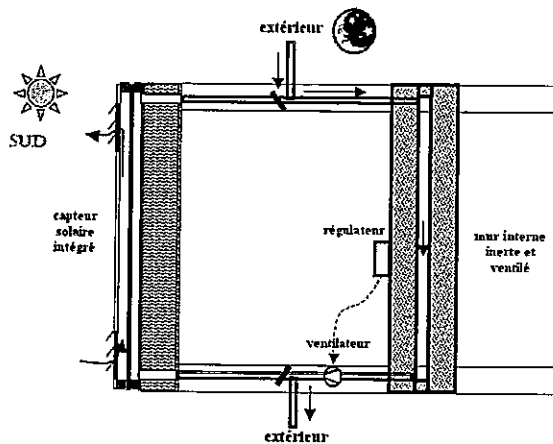


Figure 2 : Principe de fonctionnement en été (refroidissement du bâtiment)

3.c. Cas étudiés

Il s'agit d'une maison individuelle de 120 m² (R+1) située à Mâcon (France). L'inertie est très faible puisque la maison est à ossature bois (constante de temps principale 23 h). Les parois extérieures comportent 12 cm d'isolation, 13 cm dans le plancher bas sur vide sanitaire et 17 cm dans le plafond situé sous comble non aménagé. La conductance des vitrages vaut 2.0 W/m².K.

Deux cas n'intègrent pas la sur-ventilation nocturne en été : STAND (sans mur interne à forte inertie) et MI-nV (mur à forte inertie non ventilé). Les autres cas reprennent le principe de la sur-ventilation nocturne avec un débit de 1000 m³/h (environ 3.5 vol/h) :

- STAND-SV : sans mur interne à inertie, sur-ventilation du local entre 0h et 6h (pas de mur ventilé)

- MI-nV-SV : mur interne à inertie non ventilé, sur-ventilation du local entre 0h et 6h

- MI-V-0/6h et MI-V- $T_e < T_i$: sur-ventilation du mur interne à forte inertie entre 0h et 6h et entre 22h et 8h si $T_e < T_i$

cas étudiés	description
STAND	<u>Cas avec mur intérieur traditionnel</u> Maison standard (faible inertie)
STAND-SV	Sur-ventilation : 1000 m ³ /h (0h-6h)
MI-nV	<u>Mur intérieur à forte inertie (50 m²)</u> (non ventilé - 2 * 10 cm de béton) Mur à forte inertie non ventilé
MI-nV-SV	Sur-ventilation : 1000 m ³ /h
MI-V-0/6h	<u>Mur intérieur à forte inertie (50 m²)</u> (ventilé - 2 * 10 cm de béton) Mur ventilé (1000 m ³ /h - 0h à 6h)
MI-V- $T_e < T_i$	Mur à forte Inertie Ventilé (1000 m ³ /h - si $T_e < T_i$)

Tableau 1 : Résumé des différents cas étudiés

4. Résultats numériques

4.a. Inertie du bâtiment

Le mur interne inerte permet d'augmenter la constante de temps du bâtiment. Sans cette paroi (STAND), la maison à ossature bois présente une constante de temps de seulement 23 h. Avec la paroi interne lourde non ventilée de 50 m² (MI-nV), la constante de temps principale est de 56 h. La contribution de la paroi interne n'est donc pas négligeable puisque l'inerte passe de 'légère' à 'moyenne'. Le confort thermique en été est amélioré grâce à la réduction des valeurs maximales de température. La figure 3 montre une réduction de la température résultante intérieure Trs pouvant atteindre 2 °C en journée. La nuit, la température est en revanche un peu plus faible dans la configuration sans paroi interne STAND (baisse plus rapide de la température intérieure la nuit du fait de l'inertie).

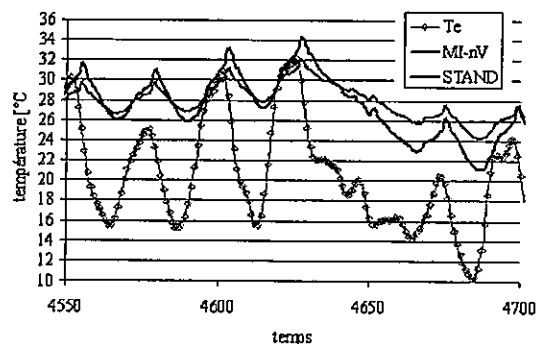


Figure 3 : Evolution des températures résultantes avec et sans paroi interne lourde

4.b. Amélioration du confort thermique en été

La Figure 4 montre le nombre d'heures pour lesquelles la température intérieure T_i excède une valeur donnée.

En ce qui concerne les cas sans sur-ventilation, le cas MI-nV est plus intéressant car il réduit les pics de températures (au delà de 29°C). Ceci est lié à l'inertie thermique plus importante du mur interne qui limite les valeurs maximales tandis que les baisses de température sont plus importantes au cours de la nuit dans la configuration standard STAND. Toutes les autres solutions avec sur-ventilation nocturne (du local ou au sein du mur interne à inertie) offrent un rafraîchissement sensible comparativement à ces deux cas (entre 2 et 4°C).

Evidemment, la sur-ventilation nocturne des locaux conduit à un meilleur rafraîchissement lorsque la maison comporte un mur interne à forte inertie (STAND-SV comparé à MI-nV-SV). La masse interne au bâtiment est néanmoins mieux valorisée lorsque la sur-ventilation se fait au sein de la paroi interne (mur à forte inertie ventilé). La figure 4 montre que cette solution (MI-V 0/6h et MI-V Te<Ti) est la plus performante en terme de rafraîchissement. L'optimisation de la gestion de la sur-ventilation (activée si $T_e < T_i$) conduit au meilleur confort. Un autre intérêt d'optimiser le fonctionnement du ventilateur est de réduire sa consommation énergétique. Par ailleurs, la sur-ventilation de la paroi interne constitue un avantage important sur le plan acoustique (comparativement à la sur-ventilation des pièces) puisque l'air n'entre pas directement dans les locaux.

La figure 5 montre la répartition de la température intérieure T_i au delà de 26°. Les deux solutions sans sur-ventilation présentent un nombre d'heures supérieur pour toutes les gammes de température.

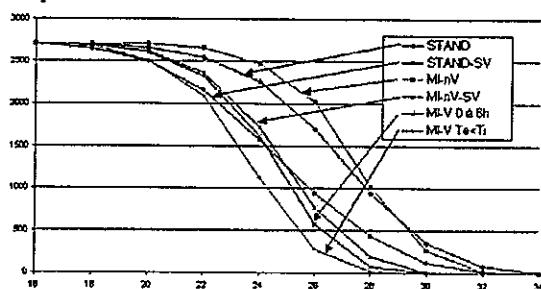


Figure 4 : Evolution des températures résultantes avec et sans paroi interne lourde

La sur-ventilation du local est plus performante avec le mur interne (MI-nV-SV : 195h au delà de 28°C et 11h supérieures à 30°C), comparé au cas standard STAND-SV (437h et 105h).

La solution optimisée MI-V-Te<Ti offre les meilleurs résultats : seulement 21 h au delà de 28°C (STAND : 940 h). Les températures sont suffisamment basses pour préserver le confort des occupants et ne pas utiliser de système de climatisation.

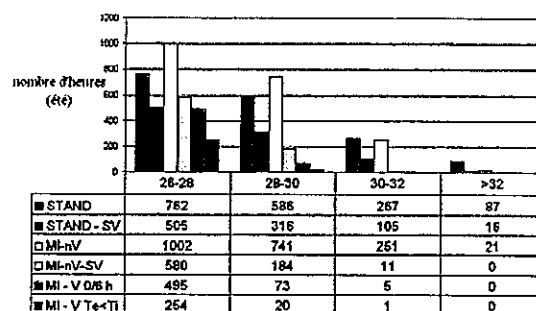


Figure 5 : Distribution des températures pendant la période d'été (3600h-6300h)

5. Etude expérimentale du système « capteur intégré couplé à un mur interne inerte et ventilé »

Une cellule expérimentale a été réalisée au CTBA à Bordeaux (Fraise, 2006). Les caractéristiques de la cellule sont les suivantes : volume de la cellule de 80 m³, 3,3 m² de capteurs intégrés en façade (3 capteurs) et 10 m² de paroi interne (double paroi composée de parpaings pleins de 10 cm d'épaisseur). Des écarteurs en bois tous les 710 mm délimitent des chicanes pour optimiser la circulation et les échanges au sein de la paroi. Les données expérimentales actuellement disponibles concernent uniquement l'utilisation du système en mode « hiver ». Ces premiers résultats expérimentaux ont permis de valider les modèles développés sous TRNSYS.

Les photos 1 et 2 présentent le mur interne inerte pendant la phase de construction et le système complet avec les capteurs.

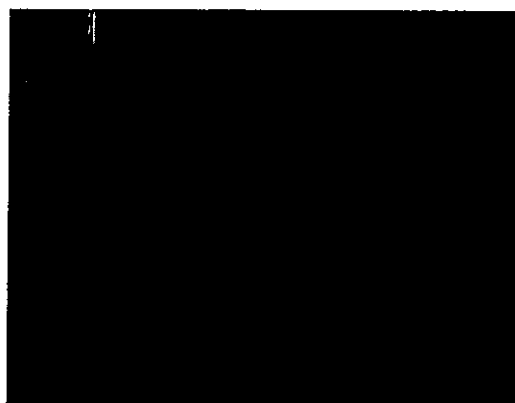


Photo 1 : La paroi interne à forte inertie pendant la phase de construction

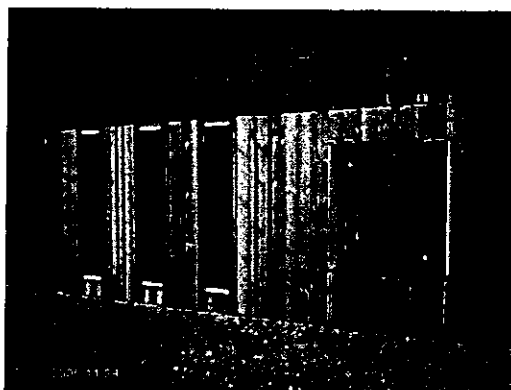


Photo 2 : Le système complet (capteurs intégré + mur interne inerte et ventilé)

La figure 6 montre une comparaison des résultats expérimentaux pour le capteur solaire et le mur interne inerte et ventilé en mode de fonctionnement « hiver » (circulation en boucle fermée entre ces 2 composants). Le débit d'air mesuré est de 74 m³/h par m² de capteur (il est maintenu constant). Les températures d'entrée du capteur et du mur sont supposées connues, ainsi que la température intérieure du local. La figure 6 montre l'évolution des températures (sortie du capteur, sortie du mur) mesurées (ToutC et ToutM) et calculées (ToutCcal et ToutMcal). En ce qui concerne le capteur solaire, nous pouvons voir que le modèle détermine de façon assez précise la température de sortie puisque les écarts (ToutC - ToutCcal) restent très faibles pour toute la durée considérée. La température de sortie du mur mesurée est très proche de la température intérieure (mesurée). Il est probable que la valeur de sortie mesurée soit influencée par la température du local dans la mesure où elle est mesurée dans la gaine située entre le mur et les capteurs (même si cette gaine a été isolée). Par ailleurs, la température mesurée au milieu du mur au sein de la lame d'air (TmilieuM) est très légèrement supérieure à la valeur calculée à la sortie du mur (ToutM). Il est probable que la « bonne » température mesurée à la sortie du mur est située entre ToutM et TmilieuM ; c'est le cas de la valeur calculée ToutMcal.

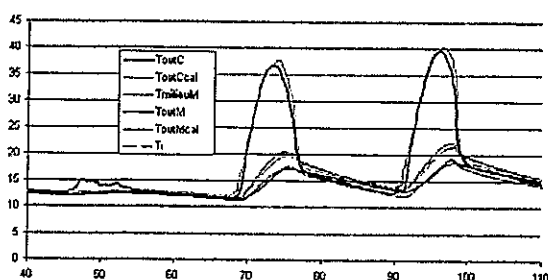


Figure 6 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques (TRNSYS)- fonctionnement en mode « hiver »

6. Conclusion

La problématique initiale d'améliorer le confort thermique et de réduire les besoins énergétiques dans les maisons à ossature bois nous a conduit à intégrer un mur interne inerte et ventilé. L'intérêt est à la fois d'augmenter l'inertie du bâtiment et de stocker l'énergie solaire issue des capteurs intégrés en façade. Pendant l'été, l'utilisation du mur interne ventilé et à forte inertie conduit à un rafraîchissement sensible du bâtiment.

Nous pensons que l'utilisation conjointe du bois et du béton est une solution pertinente pour améliorer le confort d'été et réduire la consommation énergétique. Les maisons à ossature bois ont par ailleurs l'avantage de limiter l'impact environnemental. C'est la raison pour laquelle, la France s'est fixée comme objectif d'en avoir 10 % d'ici 2010.

L'expérimentation réalisée au CTBA a permis de montrer que l'intégration en façade d'un capteur solaire dans le cas d'un bâtiment à ossature bois est tout à fait adaptée du fait de sa structure modulaire. Elle a également montré la faisabilité du procédé capteur air / mur ventilé.

Bibliographie

Baker P.H. and McEvoy ME. (1999), *An investigation into the use of a supply air window as a heat reclaim device*. Proceedings of CIBSE A : building services and engineering technology. 20(3), pp. 105-112

Bansal N. K. (May 1998), *Shail Characteristic parameters of a hypocaust construction*. Building and Environment, Volume 34, Issue 3, Pages 305-318

Barton P, Beggs C. B. and Sleight P. A. (september 2002) *A theoretical study of the thermal performance of the ThermoDeck hollow core slab system* Applied Thermal Engineering, Volume 22, Issue 13, Pages 1485-1499

Brun *hollow core concrete elements* <http://www.brunag.ch/>

Cadiergues R., Espic R., Lemaire MC., Michel E. (1986), *Isolation dynamique, étude de synthèse, rapport final, contrat n°4.330.2315*, 217 p.

CSTB (2001), *Réglementation thermique, guide RT2000, Enjeux, changements, exigence, textes de référence*, <http://www.cstb.fr>

Fraisse G., Viardot C., Lafabrie O. and Achard G. (2002), *Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy*. Energy and Building 1430, p. 1-14

Fraisse G., Achard G., Trillat-Berdal V. (april 2004), *Bâtiments à ossature bois : définition d'une enveloppe pariéto-dynamique*. Climamed, Lisbon, 10 p.

Fraisse G., Kouyoumji J.L., Goyon D. et al. (2006), *Utilisation d'une paroi interne lourde et ventilée pour stocker l'énergie solaire et améliorer le confort d'été dans les maisons à ossature bois*. Rapport Final, Appel d'offre ADEME-PUCA, 106 p.

Gütermann A., amena ag, Winterthur http://www.empa-ren.ch/REN%20english/Herisau_E.htm

Guiavarch A. et Peuportier B (2003). *Murs solaires à isolation renforcée*. Rapport d'avancement n°1 de la convention ADEME-ARMINES n° 02.04.083, 46 pages.

Harbola, (web) *hypokaustenheating*, http://www.harbola.de/start_e.htm

Hollick J. C. (September-December 1996), *World's largest and tallest solar recladding* Renewable Energy, Volume 9, Issues 1-4, Pages 703-707

Howard Bion D. (April 11-15 1999), *The CMU air-core passive hybrid heat storage system*, Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century, Lahaina, Maui, Hawaii

Imessad K., Messaoudene N. Ait and Belhamel M. (March 2004), *Performances of the Bara-Costantini passive heating system under Algerian climate conditions* Renewable Energy, Volume 29, Issue 3, Pages 357-367

Klein S.A. et al. (1996), *TRNSYS a transient system simulation program, version 14.2*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, reference manual, WI 53706.

Lee T., *Comparing the performance of masonry, Masonry in solar energy design*, chapter 5, final draft, T. Lee, 10 p., <http://www.ucalgary.ca/UofC/faculties/EV/people/faculty/profiles/lee/bldgsc/brick/Chapt5.PDF>

Nordstrom C. *Project summary, Västra balltorp*, www.rehva.com/projects/resset/resset_soubory/RESSET_SE_2.pdf

Ontario (web) *Thermal properties and thermal design, solar heat storage*, www.ocba.ca/media/Chapt_6.pdf

Paziaud (1997), *Des fenêtres pariéto-dynamiques contre les déperditions thermiques*. Les Cahiers Techniques du Bâtiment, n°181, p 38-40

Plantier C. and Fraisse G. (14-19 June 2003), *Development and experimental validation of a detailed flat-plate solar collector model*. ISES Solar World Congress 2003, Göteborg, Sweden, 7 p.

Potier S., Maltret J.L. et Zoller J. (October 1998), *Computer graphics, assistance for archaeological hypotheses*. ACADIA 98, Association for Computer Aided Design in architecture. pp. 366-383

Pottler K., Sippel C.M., Beck A. and Fricke J. (1999), *Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors*, Solar Energy, Volume 67, Issues 1-3, Pages 35-52

Rahbek J. (15-16 November 2001), *Eco-houses with solar walls and integrated heat storages in Denmark*. Sustainable building and solar energy, Brno, Czech Republic

Schmidt D., Jóhannesson G. (2002), *Approach for Modelling of Hybrid Heating and Cooling Components with Optimised RC Networks*, The Nordic Journal of Building Physics, Volume 3, 34 p.

Schuler M., Lechner T. *Two exemple for corporate identity by intelligent building design* www.transsolar.com/download/eeco_gniebel_WA_T.pdf

Takase S. Watanabe T., Hayashi T. Ozaki A. (2001), *Measurement and Simulation of the Thermal Environment of a Low Energy House with Air-circulation in Brick Walls*. www.esim.ca/2001/documents/proceedings/Session_6-2.pdf

Trombe F. (1971), *Brevet ANVAR Trombe-Michel BF 7123778*, France

Ubertini S. and Desideri U. (2003), *Design of a solar collector for year-round climatization*, Renewable Energy, Volume 28, Issue 4, Pages 623-645

Wallentén P. (1996), *Dynamic insulation, analysis and field measurements*. Report TABK—96/3034, Lund University, Sweden. 36 p. L.

Zalewski M., Chantant S., Lassue and Duthoit B. (February 1997) *Experimental thermal study of a solar wall of composite type* Energy and Buildings, Volume 25, Issue 1, Pages 7-18