

SIMULATIONS DE DISPOSITIFS DU TYPE MUR TROMBE AVEC CODYRUN

Harry BOYER, Franck LUCAS, Frédéric MIRANVILLE, Alain BASTIDE,
Dominique MORAU

Université de La Réunion

Laboratoire de Physique du Bâtiment et des Systèmes (LPBS),
IUT de Saint Pierre, 40, avenue de Soweto
97410 Saint Pierre - Ile de La Réunion

ABSTRACT

Les dispositifs Mur Trombe ont fait l'objet de nombreuses études en climat tempéré et ont prouvé leur efficacité en tant que système de chauffage passif. Vis à vis du détail de la modélisation associée, un couplage fin (car faisant intervenir plusieurs modes de transfert) entre la pièce et le dispositif est nécessaire. Avec CODYRUN développé à l'Université de La Réunion, des résultats de simulation sont présentés au départ d'un fichier météorologique et d'un habitat type de Madagascar. Ces murs capteurs stockeurs s'avèrent pouvoir améliorer notablement les conditions de confort. En utilisant des sorties spécifiques (débits enthalpiques, apports par conduction, indices de confort, ...), une analyse de l'efficacité du dispositif est menée et démontre les avantages de ce mode de chauffage passif et peu onéreux.

INTRODUCTION

Les dispositifs du type mur Trombe et leurs variantes ont fait l'objet de nombreuses études en climat tempéré (Duffie 1974, Sfeir 1981, Mazria, 1981, Breton 1986, Zalewski 1996, Zalewski et al. 1997, 2002) et ont prouvé leur efficacité en tant que système de chauffage passif. Par extension, d'autres dispositions faisant appel aux mêmes principes tels que les cheminées solaires (solar chimney) font aussi l'objet de nombreuses publications (Buzzoni 1998, Raman 2001, Ong 2003, Awbi 2003).

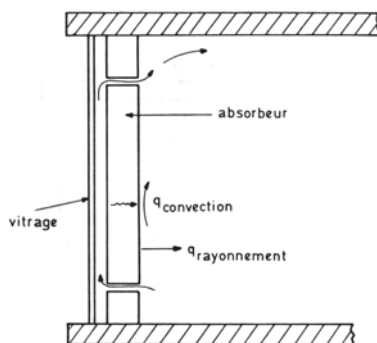


Figure 1. Coupe d'un mur à recyclage (Sfeir et al., 1981)

Les principes physiques mis en jeu sont simples et rappelés sur la figure 1. Le flux solaire traversant le vitrage est absorbé par une paroi verticale dite absorbeur ou mur stockeur et piégé par effet de serre. Ce mur stockeur présente des ouvertures (appelées ouïes, orifices ou encore clapets). L'échauffement de cette paroi et de la lame d'air déclenche un mouvement de l'air intérieur aspiré par l'ouverture basse, chauffé au travers du mur trombe et réintroduit au niveau de l'ouverture haute. Ce système transfère ainsi de l'énergie à la pièce via les apports enthalpiques sensibles liés aux débits d'air et par conduction via la paroi. La nuit, ainsi que sur la figure ci-dessous, les clapets sont fermés.

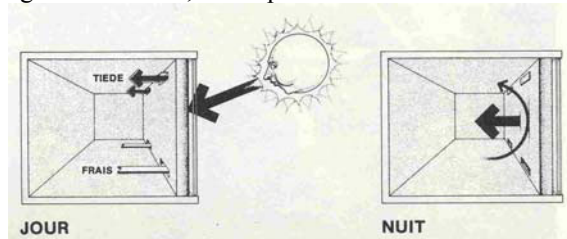


Figure 2. Fonctionnement d'un mur Trombe à recyclage (Mazria 1981)

Par comparaison avec un vitrage conduisant à des apports directs, ce système permet tout d'abord de minimiser la surchauffe du local pendant les heures où le rayonnement solaire est intense et de limiter les pertes par journée d'hiver peu ensoleillée. De plus, s'il est vrai qu'une partie moindre de l'énergie est transmise à la pièce dans le cas du mur Trombe (en raison des pertes à travers le vitrage qui sont alors plus importantes, le gradient thermique étant plus élevé), cette énergie stockée peut être destockée de façon contrôlée selon la stratégie d'ouverture des clapets. Par exemple, dans le cas d'une pièce du type d'une chambre (utilisation nocturne), il est possible de fermer les clapets la journée et de les ouvrir la nuit pour bénéficier d'un apport de chaleur la nuit, sous réserve des pertes par conduction via le vitrage pendant la journée. L'épaisseur du mur stockeur permet aussi, compte tenu de l'inertie de la paroi, de bénéficier du déphasage temporel (par ex, de 2.6 h à 5.1 h lorsque l'épaisseur du mur passe de 10 à 20 cm).

Parmi les variantes des murs Trombe, il est tout d'abord possible de distinguer les murs présentant des ouies de ventilation (dits murs à recyclage) de ceux n'en présentant pas. La nature du mur accumulateur (eau, béton, terre, matériau à changement de phase), son épaisseur (15 à 40 cm), la présence ou non d'une couche isolante, le choix de la couverture vitrée (simple vitrage, double vitrage, double vitrage faiblement émissif, ...) sont autant de paramètres influents sur le comportement de ce système particulier. De surcroît, la conception est très liée au climat du lieu où sera implanté ce dispositif.

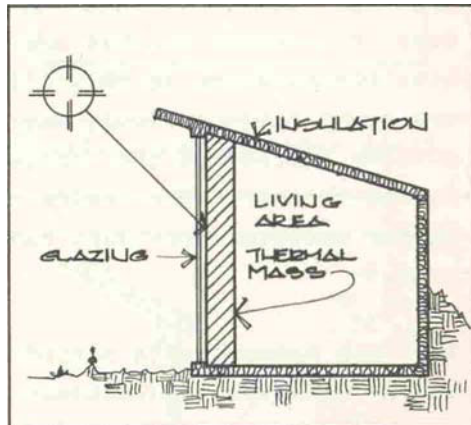


Figure 3. Mur sans recyclage (Balcomb, 1977)

Certaines indications quant à des solutions techniques et au fonctionnement de ce type de mur sont données dans (Mazria 1981). Certains aspects tels que l'épaisseur du mur stockeur, l'influence des orifices (ou ouies) et l'effet sur la régulation de température intérieure sont indiqués.

Au terme d'une analyse de sensibilité basée sur des plans d'expérience factoriels à deux niveaux, Zalewski (Zalewski 1996, 1997, 2002) montre l'importance des paramètres que sont l'émissivité de la face externe du vitrage, le type de couverture (simple ou double vitrage) ou encore l'absorptivité de la surface absorbante. Compte tenu de notre volonté d'expérimenter numériquement un mur Trombe avec des matériaux courants à Madagascar (pays en voie de développement), nous ne considérons pas les deux premiers cas.

Les grandeurs usuellement utilisées lors de l'analyse du fonctionnement d'un mur trombe sont multiples :

- la puissance transmise par apport enthalpique sensible (via les débits à travers les ouies)
- la puissance transmise par conduction (via le mur stockeur)
- la puissance totale (la somme des deux précédentes)
- la Fraction de Gains Solaires (FGS), définie comme étant le rapport des gains (via le mur trombe) à la charge sensible de référence du local (définie pour une consigne à 22°C), ce pour une période donnée.

- l'efficacité (rapport de l'énergie totale transmise par le mur à l'ensoleillement reçu par une paroi Nord dans le même temps)

Bien que le FGS fasse référence à des principes actifs de chauffage, il permet de comparer cet indicateur global (car intégré sur une durée de chauffage) aux résultats d'autres installations.

ÉLÉMENTS DE DIMENSIONNEMENT

Bien que la référence (Mazria 1981) soit restreinte aux latitudes comprises entre 28° et 56° excluant à priori Madagascar (entre 12 et 25° S), elle fournit par extension des indications pour le dimensionnement du mur en terme de surface (laquelle conditionne directement l'énergie transmise). Le paramètre indiqué est une fraction de la surface de plancher à chauffer. Cette fraction est ainsi de 0.43 à 1 pour les climats froids (moyenne de température en hiver de -1 à -7 °C) et de 0.22 à 0.6 pour ceux tempérés (moyenne de température en hiver de +2 à +7 °C). Pour Madagascar et la station de Antananarivo, cette température moyenne hivernale est de 15°C pour la saison de Mai à Septembre. Cette donnée est issue du fichier météorologique annuel au format TMY2 de la station. Cette valeur indique en particulier un risque important de surchauffe et induit un choix d'un ratio de surface de captation sur celle de plancher de l'ordre de 0.22. Mazria, cité par Bansal (Bansal 1994), fournit un tableau de fraction de surface en fonction de la température moyenne et des besoins du local. De plus, il convient de prévoir la possibilité d'ombrager le capteur. Une possibilité évoquée par Mazria (Mazria 1981) est de coupler ces éléments avec des réflecteurs augmentant l'efficacité du mur pour la période de chauffage.

La réf. (Charbonnier, 1992) indique ainsi que le percement des ouies n'est utile que pour des climats froids (moyenne de température en hiver de -1 à -7 °C) et fournit pour la France un guide de choix de solutions (vitrage simple à apports directs, mur trombe à recyclage, ...) en fonction de la zone climatique (H1, H2, H3) de la réglementation et des besoins annuels de chauffage.

En conclusion de cette partie, il ne nous a pas été possible d'identifier des méthodes simples et synthétiques de dimensionnement adaptée à nos climats (surface de captation, épaisseur du mur, ...) et de conception (recyclage, présence d'isolant, composite, ...). Cette première étude se veut donc exploratoire et ce à l'aide d'un outil logiciel validé.

LE DISPOSITIF ET SA MODÉLISATION SOUS CODYRUN

Cette étude numérique s'appuie sur le logiciel CODYRUN (Boyer et al., 1996), conçu pour la simulation thermo hygro aéraulique de bâtiments multizones. En considérant la zone de captation comme une zone au sens de CODYRUN (i.e. une pièce ou un groupe de pièces), le code permet la

simulation d'un mur trombe et de son couplage avec un bâtiment. Hypothèse est donc faite de l'isothermie du volume d'air de la zone de captation, point sur lequel il sera ultérieurement possible d'améliorer le modèle (hypothèse de gradient linéaire, par exemple). Un des problèmes mentionné dans la bibliographie est celui du choix du coefficient d'échange convectif dans la veine formée par la lame d'air de la zone Trombe. En raison de régimes d'écoulement successifs laminaire et turbulent, les corrélations de convection naturelle - du type $Nu = f(Gr)$ - sont conditionnées par le nombre de Rayleigh Ra de l'écoulement. Au départ d'une étude expérimentale et de confrontations avec la bibliographie, Zalewski (Zalewski et al., 1996) indique un choix de corrélations adaptées à ce cas. Pour le régime laminaire, le coefficient d'échange (en $W.m^{-2}.K^{-1}$) varie entre 2 et 2.3 pour le régime laminaire et entre 2.25 et 3.75 pour celui turbulent. Pour cette première approche, une valeur intermédiaire de 2.9 dans cette zone est adoptée pour nos simulations.

Le module aéralique intégré (Boyer et al., 1999) permet de calculer les débits résultant du percement des ouies de thermo-circulation du mur. L'avantage de cette modélisation couplée (Mur Trombe + pièce) est que ces deux parties forment des systèmes couplés (en terme d'influence mutuelle, ce bien sur dépendant de la configuration) et que leur interaction a été peu étudiée précédemment, du moins à notre connaissance.

Vis à vis de la validité des résultats obtenus par la simulation, l'ensemble des modules et des composants mis en jeu lors de cette simulation a fait l'objet de confrontations dans cadre de la procédure BESTEST (conduction, masques, prise en compte du rayonnement, ...) et de comparaisons avec d'autres codes de référence pour l'aéralique (Boyer et al., 2005).

La structure multi-modèle du code (Boyer et al., 1998) peut être mise à profit pour des études spécifiques telles que celle-ci. Il est ainsi possible de choisir les coefficient d'échanges convectifs par zone ou par paroi, de mailler finement la paroi du mur pour calculer de façon précise les flux conductifs ou de choisir un modèle particulier de répartition des apports radiatifs solaires, de la température équivalente de ciel, ...).

CODYRUN propose par ailleurs un grand nombre de variables de sorties de simulations, en plus de celles liées aux températures sèches des zones. Pour la zone intérieure habitable, nous exploiterons spécifiquement les gains sensibles liés aux échanges massiques via les clapets, les flux conductifs via le mur accumulateur de la zone trombe, le solde des apports enthalpiques sensibles par zone et le PMV* (Predictive Mean Vote, selon Gagge) de la zone intérieure pour quantifier l'amélioration du confort escomptée. Il aurait été aussi possible d'exploiter les

flux conductifs à travers le vitrage du mur Trombe (analyse des pertes).

Le bâtiment simulé est représentatif d'une cellule d'habitation, basée sur la description d'un parallélépipède à base carrée de $9 m^2$, équipé d'un vitrage de $1 m^2$ et d'une porte standard. Cependant, matériaux, caractéristiques thermo-physiques et types de parois sont ceux typiques de Madagascar. La pièce est supposée occupée en permanence par 2 personnes et présente une charge interne d'éclairage avec un profil habituel. Elle est supposée n'échanger de l'air avec l'extérieur qu'au travers d'un renouvellement d'air de 1 volume/heure. Le mur Trombe ($2 m^2$) est en façade Nord.

Le fichier météorologique horaire est celui annuel de la station d'Antananarivo, au format TMY2, fichier fourni avec la documentation de TRNSYS 16.0. Selon ce fichier, l'ensoleillement journalier moyen annuel est $5.5 kWh.m^{-2}$ et ceux annuels sur les parois Nord et Est sont respectivement de 2.23 et 2.67 $kWh.m^{-2}$. Avec un albédo courant de 0.3 que nous utiliserons pour la suite des simulations, ces dernières valeurs deviennent 3 et 3.46 $kWh.m^{-2}$.

SIMULATIONS

Les simulations, orientées chauffage passif, concerneront les premier jours du mois de Juillet, (jours juliens 181 et suivants, correspondant à une période d'hiver austral). Dans la mesure où l'objectif poursuivi est dans un premier temps de mettre en évidence le fonctionnement du dispositif, des analyses basées sur l'évolution horaire de grandeurs seront conduites. Les 3 premiers cas traitent de ventilation via des orifices, alors que le dernier envisage celui d'un mur sans recyclage.

Mise en évidence de la thermo-circulation inverse

La nuit, sous certaines conditions liées au système (pas de fermeture des clapets) et aux sollicitations de la journée précédente (faible ensoleillement, par ex.) il peut arriver que le sens de l'écoulement la nuit soit le symétrique de celui présenté en figure 2 pour le jour. Dans cette configuration, le fonctionnement du capteur est « inversé », la zone trombe conduisant à refroidir la pièce intérieure.

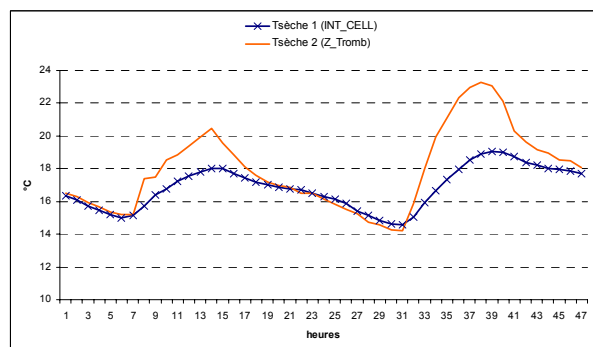


Figure 4. Evolution des températures sèches, jours 182 et 183 (1/07 et 2/07)

Entre les points 19 et 32 (i.e. la nuit, entre 19 h et 8h), la température de la zone Trombe est inférieure à celle de la pièce intérieure, déclenchant ainsi la thermo-circulation inverse. Ce fonctionnement est encore illustré par la partie négative de l'évolution des apports sensibles liés à l'aéraulique pour la zone intérieure (figure 5).

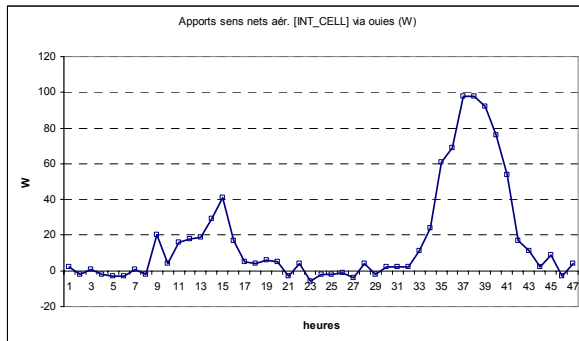


Figure 5. Evolution des apports sensibles aérauliques via les ouies, jours 182 et 183

Bien que les valeurs de flux mises en jeu la nuit soient faibles, il est important de noter que les courbes précédentes ont été obtenues en faisant l'hypothèse que la température équivalente de ciel est celle de l'air extérieur. Ce fonctionnement défavorable du dispositif la nuit serait aggravé par une prise en compte plus réaliste du rayonnement de grande longueur d'onde du ciel, compte tenu de l'émissivité importante du verre (0.9). Pour se faire une idée des flux mis en jeu, pour une paroi verticale, un modèle de température de ciel du type $T_c = T_{ae} - K$, avec $K=6$ génère un offset négatif de $h_{re} \cdot F_{pc} \cdot K \cdot S$, soit de 27 W (avec h_{re} coefficient d'échange radiatif linéarisé de grande longueur d'onde, T_{ae} température sèche d'air, F_{pc} le facteur de forme selon lequel le vitrage voit la vôte céleste et S la surface du vitrage).

Mise en place de clapets

La stratégie de commandes des ouies appelle un commentaire particulier. Si celle ci peut se réaliser de façon optimale au départ d'une commande basée sur des mesures fluxométriques (Zalewski, 1996), un moyen très simple et efficace est décrit dans la même référence. Il s'agit d'un film plastique disposé au niveau des ouies occultant le passage à l'air en cas de thermo-circulation inverse. Pour CODYRUN, le composant de type *Petite Ouverture* correspondant au clapet est alors muni d'un profil (i.e. une série horaire de 24 pourcentages) fermant le clapet la nuit et l'ouvrant le jour. La thermo-circulation (positive) se poursuivant cependant en début de nuit, le profil inclut les 2 premières heures de la soirée.

Le résultat est de prime abord assez surprenant, dans la mesure où l'écart avec les courbes présentées dans le cas précédent est très faible. Une première

explication est liée au gradient thermique qui se trouve être faible pour la nuit considérée.

Il est utile de se remémorer que les auteurs (Mazria, 1981, Bansal, 1994) indiquent que les ouies ne sont utiles que pour des climats froids (moyenne de température en hiver de -1 à -7 °C). Les résultats de simulation que nous avons obtenus illustrent alors que leur commande (via des clapets) ne présente donc qu'un intérêt mineur dans notre cas. Dans nos conditions d'exploitation, ceci semble indiquer une sensibilité très faible des débits massiques à la perméabilité de l'ouverture. Cette hypothèse rejoint une des conclusions de (Zalewski, 1996), qui pour un climat du Nord de la France, indique une sensibilité très réduite à la surface (et donc à la perméabilité) des orifices assurant la ventilation du mur.

Fonctionnement global du mur

La puissance totale fournie par le mur est tracée figure 6 suivante, puissance liée aux transferts aérauliques et celle traversant le mur par conduction.

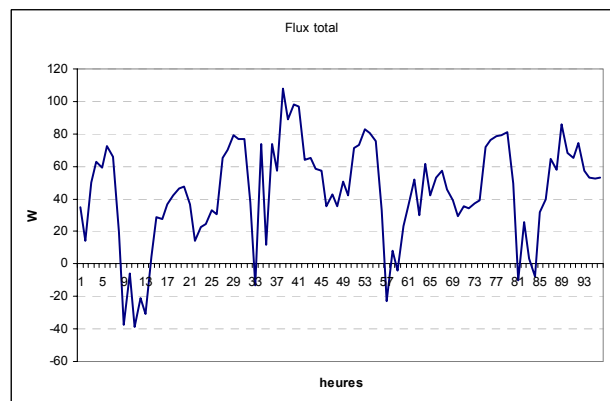


Figure 6. Evolution des apports totaux, jours 182 à 186 (1/07 au 5/07)

Il apparaît que la nuit, le flux est toujours positif et conduit au réchauffement de la pièce. En matinée (par ex. dès 9h du premier jour), le flux total devient négatif. Pour interpréter plus complètement la courbe, il est utile de tracer les deux composantes du flux traversant le mur Trombe.

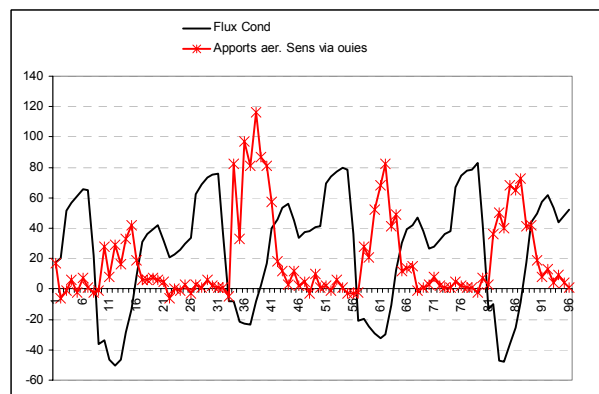


Figure 7. Evolution par mode des apports liés au mur Trombe

En début de matinée, l'inversion du flux total s'explique par celle du flux conductif qui prend des valeurs fortement négatives, en liaison vraisemblablement avec une inversion de flux pendant la nuit (aux alentours de 9-5=4h du matin). Pour mémoire, 5h est le temps de traversée d'un mur de 20 cm de béton, qui se rapproche de la configuration du bâtiment. Les courbes de tracé du flux en entrée du mur (i.e. du côté zone Trombe) confirment cette hypothèse.

Ainsi que prévisible sans déclencher un outil de simulation, la courbe précédente illustre le fonctionnement alternatif des deux composantes : par conduction, le mur amène de la puissance la nuit (avec une amplitude et un déphasage liés à son épaisseur et ses caractéristiques thermo-physiques) alors que la ventilation naturelle via les orifices assure le réchauffement pendant la journée (de façon à priori synchrone avec le rayonnement solaire).

Le constat précédent nous amène à penser que si en terme de rendement les ouïes ne se justifient pas, leur intérêt est de permettre une modulation dans le temps de la distribution de chaleur dans le bâtiment.

Pour augmenter les valeurs de puissance fournies, il serait simple d'accroître la surface du mur et/ou d'y adjoindre des réflecteurs. Cependant, dans tous les cas, le comportement d'été du système doit être évalué au préalable.

Dans l'objectif de réduire les pertes vers l'extérieur (indiquées par des valeurs de flux conductif négatif), un double vitrage est utilisable, bien que conduisant simultanément à une réduction du rayonnement transmis. Une autre solution est de placer en face intérieure du mur une couche isolante, du côté intérieur.

Confrontation mur sans/avec recyclage

Le mur répond alors à la coupe de la figure 3. Par rapport à la figure 7 (avec ouïes), pour la même période, les valeurs du flux total sont décalées vers les valeurs positives.

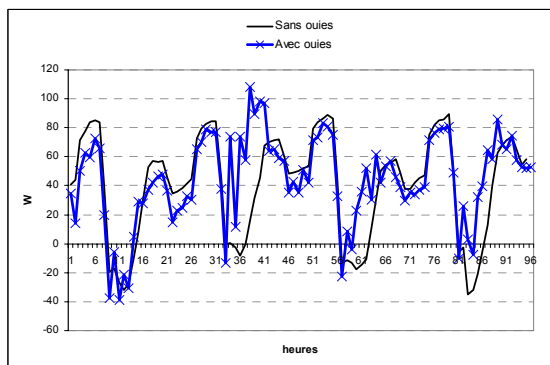


Figure 9. Comparaison des puissances fournies

La puissance totale fournie en présence des ouïes est ainsi sensiblement supérieure, un élément d'interprétation (vérifiable par le code) est celui de diminution du gradient thermique entre les deux

zones et donc des pertes par conduction à travers le vitrage.

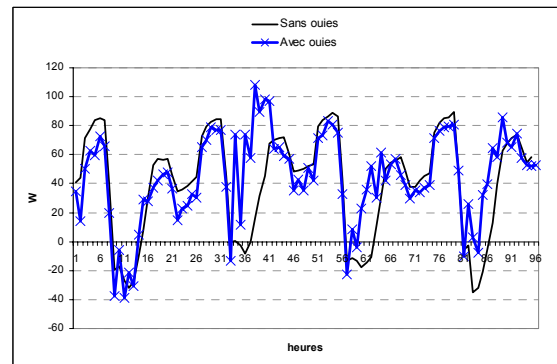


Figure 9. Comparaison des puissances fournies

En comparant les courbes du PMV* (traduisant la sensation de confort et évoluant entre -3 et +3) sur la figure 10, il est ainsi clair que les ouïes améliorent sensiblement la sensation de confort.

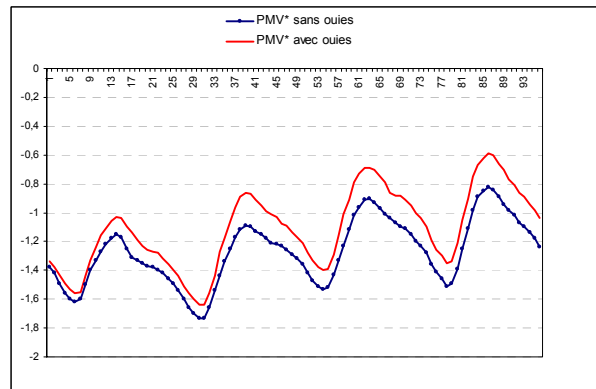


Figure 10. Comparaison du PMV*

Cette amélioration est liée au commentaire précédent (accroissement de la température sèche) et des températures de surface intérieures des parois plus élevées (auxquelles est sensible le PMV*).

CONCLUSION

La raréfaction et l'augmentation du coût des ressources fossiles vont avoir de positif qu'ils rendront plus attractifs pour les pays industrialisés le recours à des solutions passives. Un effort de recherche conséquent est prévisible dans ces domaines et par extension, ces solutions seront « exportées » vers le reste du monde. Ainsi, après une période basée sur la compréhension fine du fonctionnement physique d'un bâtiment, un objectif nouveau et crucial est alors celui de la satisfaction aussi naturelle que possible des besoins énergétiques associés.

Dans cette voie, cette première série de simulations ne constitue qu'une piste pour développer en toute connaissance ces techniques à Madagascar et par extension dans la zone Océan Indien. Elle propose le recours à des outils de simulations robustes pour

évaluer rapidement des solutions techniques et donner des indications relatives à une conception adaptée de ces systèmes passifs. Ainsi, un premier résultat de cette communication est d'illustrer que, si en terme de rendement les ouies ne se justifient pas (ainsi qu'indiqué dans les études publiées par ailleurs), leur intérêt nous paraît être de permettre une modulation dans le temps de la distribution de chaleur dans le bâtiment, conduisant à améliorer les conditions de confort.

REFERENCES

- Awbi H. 2003, *Ventilation of buildings*, Spon Press, ISBN 0 415 270-55-3.
- Balcomb J.D. & al. 1977, Passive solar heating of buildings, in *Solar Architecture*, Proceedings of the aspen Energy Forum, Ann Arbor Science Publishers Inc., Aspen, Colorado.
- Bansal N.K. & al. 1994, *Passive building design*, Elsevier, ISBN 0-444-81745-X.
- Boyer H. et al. 1996, Thermal building simulation and computer generation of nodal models, *Building and Environment*, 31(3), pp. 207-214.
- Boyer H., Bastide A., Lauret P. 2005, CODYRUN, outil de simulation et d'aide à la conception thermo-aéraulique de bâtiments, Journée Thématique IBPSA/SFT *Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment*, La Rochelle, 31 mars 2005.
- Boyer H., Garde F., Gatina J.C., Brau J. 1998, A multi-model approach to building thermal simulation for design and research purposes, *Energy and Buildings*, 28, 1, pp. 71-79
- Boyer H., Lauret A.P., Adelard L., Mara T.A. 1999, Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation, *Energy and Buildings*, 29, pp. 283-292.
- Breton J. 1986, *Modélisation thermique et simulation numérique en régime variable de parois à lame d'air isolée et ou ventilée*, Thèse INSA de Lyon, 363 p.
- Buzzoni L. & al. 1998, Energy analysis of a passive solar system, *Revue Générale de Thermique*, 411-416, 37.
- Charbonnier S, Parant C, Pouget A. 1992, *Guide le Thermique dans l'habitat neuf, bâtir une stratégie globale*, Editions du Moniteur, ISBN 2-281-11132-6.
- Duffie J.A. and Beckman W.A. 1974, *Solar Energy thermal processes*, ISBN 0 471 22371-9, John Wiley & Sons.
- Mazria E. 1981, *Le guide de l'énergie solaire passive*, Editions Parenthèses, ISBN 2-86364-011-9.
- Ong K.S. 2003, A mathematical model of a solar chimney, *Renewable Energy*, 28, 1047-1060.
- Raman P. & al. 2001, A passive solar system for thermal confort conditioning of building in composite climates, *Solar Energy*, 70, 4, 319-329.
- Sfeir A.A., Guarracino G. 1981, *Ingénierie des systèmes solaires, application à l'habitat*, collection Technique et Documentation, ISBN 2-85206-101-5.
- Zalewski L & al., Experimental thermal study of a solar wall composite type, *Energy and Buildings*, 7-8, 25, 1997
- Zalewski L. & al. 2002, Study of solar walls, validating a simulation model, *Building and Environment*, 109-121, 37.
- Zalewski L. 1996, *Etude thermique expérimentale et simulation numérique d'un mur solaire composite. Optimisation des performances énergétiques*, Thèse Université d'Artois, 218 p.