

Conception d'un système de chauffage adapté aux logements à très faibles besoins énergétiques : micro-cogénération et ventilation double-flux

Stéphane Thiers¹, Françoise Thellier², Damien Labaume³, Bernard Aoun¹,
Frédéry Lavoye², Bruno Peuportier¹

¹ ARMINES – Centre Energétique et Procédés
MINES ParisTech : 60 Bd St Michel - 75272 PARIS Cedex 06
stephane.thiers@mines-paristech.fr, bruno.peuportier@mines-paristech.fr

² Laboratoire PHASE
Université de Toulouse - Paul Sabatier : 118, route de Narbonne - 31062
TOULOUSE Cedex 9
thellier@cict.fr

³ ALDES Aéraulique : 16 Avenue Charles de Gaulle, Bât 14 - 31130 BALMA
labaume-damien@aldes.com

RESUME. Cet article présente les réalisations et les principaux résultats et conclusions obtenus dans le cadre du projet PREBAT-2006 « MICRO 15 kWh » qui s'est terminé fin 2009. Ce projet avait pour objet l'étude d'un système de micro-cogénération couplé à une ventilation double-flux et adapté aux bâtiments à très faibles besoins énergétiques (de type Maison passive, Minergie ou Bâtiment Basse Consommation). Ce système a été étudié pour assurer des conditions thermiques intérieures optimales vis-à-vis du confort des occupants et réduire les impacts environnementaux par rapport aux équipements actuellement les plus répandus. En effet, lorsque les besoins énergétiques sont faibles, il semble pertinent de regrouper les différents systèmes actifs du bâtiment au sein d'un unique système afin d'accroître l'efficacité énergétique globale par une meilleure gestion des interactions entre les différentes fonctions.

MOTS-CLÉS : micro-cogénération, ventilation, logement performant

ABSTRACT. This article presents the main results and conclusions obtained during the PREBAT-2006 "MICRO 15 kWh" project ended end of 2009. The aim of this project was the study of a micro-cogeneration system coupled to a heat recovery ventilation unit adapted to buildings with very low energy load (such as Passive Houses, Minergie or Bâtiment Basse Consommation). This system has been designed to supply optimal indoor thermal conditions regarding the comfort of the occupants and to reduce the environmental impacts compared to the most common equipments. Indeed, when the energy load is low, it seems relevant to group several active systems of the building into one system in order to increase the global energy efficiency through the best management of the interactions between the various functions.

KEYWORDS : micro-cogeneration, ventilation, energy-efficient dwellings

1. INTRODUCTION

L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments induit des besoins de chauffage réduits et concentrés sur de courtes périodes. Les équipements de chauffage centralisés performants sont alors plus difficiles à rentabiliser, ce qui peut constituer un frein à la réduction des impacts environnementaux. Un système multifonctionnel, assurant à la fois le chauffage, la préparation d'eau chaude sanitaire et en partie la génération d'électricité peut constituer une réponse adaptée aux logements à très faibles besoins énergétiques (TFBE).

Les besoins de chauffage d'un logement à TFBE sont très variables dans le temps et il est nécessaire de contrôler l'ambiance thermique afin de limiter les risques de surchauffe liés aux apports internes et aux apports solaires passifs. La très grande réactivité du chauffage aéraulique, avec la possibilité de réguler la température de l'air soufflé par l'apport d'air extérieur – éventuellement complétée par la mise en œuvre de tubes enterrés (« puits climatique ») – devrait permettre de répondre à deux exigences parfois antagonistes : minimiser les consommations d'énergie tout en maintenant un niveau de confort maximal.

Le projet « MICRO 15 kWh » – lauréat du programme PREBAT 2006 – a eu pour objet la conception d'un système associant micro-cogénération à base de bois, chauffage aéraulique et ventilation, destinés à des logements confortables et à très faibles besoins en énergie.

2. ÉTAT DE L'ART

Les principales **caractéristiques des logements à TFBE** sont maintenant bien connues puisqu'elles découlent des principaux standards existants en la matière, tels que *Passivhaus*[®], *Minergie*[®] ou *Effinergie*[®]. Ces caractéristiques regroupent de faibles besoins de chauffage, une forte étanchéité à l'air et une consommation énergétique primaire limitée. Le chauffage aéraulique est la solution la plus courante sur ce type de bâtiments, ce qui est justifié par sa grande réactivité, adaptée aux fluctuations rapides des besoins.

Deux types de chauffage aéraulique peuvent être employés (éventuellement de façon combinée) : le chauffage par recyclage ou le chauffage sur air neuf. Le premier est plus efficace mais n'assure pas la gestion du renouvellement d'air neuf hygiénique et peut donc dégrader la qualité de l'air. Le second est plus délicat à mettre en œuvre mais il permet, par un système unique, de gérer à la fois le renouvellement d'air et le chauffage, voire le rafraîchissement. Dans le cas de logements à très faibles besoins énergétiques, le préchauffage de l'air est en général assuré par un récupérateur de chaleur sur air vicié inséré dans un réseau de ventilation à double-flux. Durant ce projet, une étude portant sur le marché actuel a montré qu'une dizaine de fabricants proposaient des équipements de chauffage compacts spécialement dédiés au chauffage aéraulique des logements performants ; il s'agit généralement de pompes à chaleur électriques.

Dans le cadre de ce projet, c'est un autre type de production de chaleur, encore peu diffusé, qui a été étudié : **la micro-cogénération à bois**. Ce système de petite dimension, composé d'un brûleur à granulés de bois et d'une chambre de combustion, permet d'actionner un moteur Stirling couplé à une génératrice produisant de l'électricité. La chaleur

résiduelle peut être valorisée pour chauffer le logement et l'eau sanitaire. Les avantages recherchés par ce système sont la réduction des impacts environnementaux par l'utilisation d'un combustible renouvelable et la production d'électricité, en particulier en période de pointe.

Le chauffage à air demeure peu répandu en France et son acceptabilité est en partie liée aux conditions de confort thermique qu'il est en mesure d'apporter. **La notion de confort thermique est complexe** car elle est multifactorielle. Elle dépend tout d'abord de l'équilibre thermique du corps dans son environnement, et donc de variables physiques très locales (température, humidité et vitesse d'air et température de surface des parois) mais aussi à celles du corps humain (activité, métabolisme). De plus, le maintien de l'équilibre thermique fait intervenir deux mécanismes très différents : des réactions thermophysiques inconscientes (sudation, frisson, etc.) et des comportements d'adaptation conscients (p. ex. ouverture de fenêtre, modification de la tenue vestimentaire, modification de la consigne de température du chauffage). De nombreux modèles et indicateurs permettent d'analyser et d'évaluer plus ou moins finement ce « confort thermique » (ET¹, PMV/PDD², etc.). Actuellement, les recherches se développent dans le domaine de **l'approche adaptative** qui considère le fait que l'être humain, lorsque qu'il perçoit un inconfort, développe des actions comportementales visant à rétablir son confort. Au cours de cette étude, ce phénomène a été pris en compte au niveau de la modélisation.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Un **banc d'essai** a été réalisé dans les locaux de MINES ParisTech pour la caractérisation des régimes de fonctionnement stationnaire et transitoire d'une unité de micro-cogénération à bois « Sunmachine Pellet » (Fig. 1).

Le banc d'essai a été entièrement instrumenté de façon à pouvoir établir le bilan énergétique instantané de la machine. Le comportement de l'unité de cogénération a pu être étudié en régime établi (arrêt et fonctionnement à plein régime) et en régime transitoire (phases de démarrage à froid, de démarrage à chaud et d'arrêt) (Thiers *et al.* 2010).

Cette caractérisation a mené à la modélisation du fonctionnement dynamique de cet appareil (Thiers, 2008). Le modèle obtenu a été intégré dans un modèle plus global, représentant le système dans son ensemble (Fig. 2) et comportant une unité de micro-cogénération, un ballon d'eau chaude à stratification, des canalisations d'eau, des émetteurs de chaleur, des gaines de diffusion d'air et un soutirage d'eau chaude sanitaire. Cet ensemble a ensuite été couplé à un modèle de bâtiment multizone dans le logiciel COMFIE pour permettre la **simulation thermique dynamique de l'ensemble cogénération /chauffage à air/bâtiment** pour une année complète avec un pas de temps de 6 min.

¹ ET : Effective Temperature

² PMV/PPD : Predicted Mean Vote / Predicted Percentage of Dissatisfied

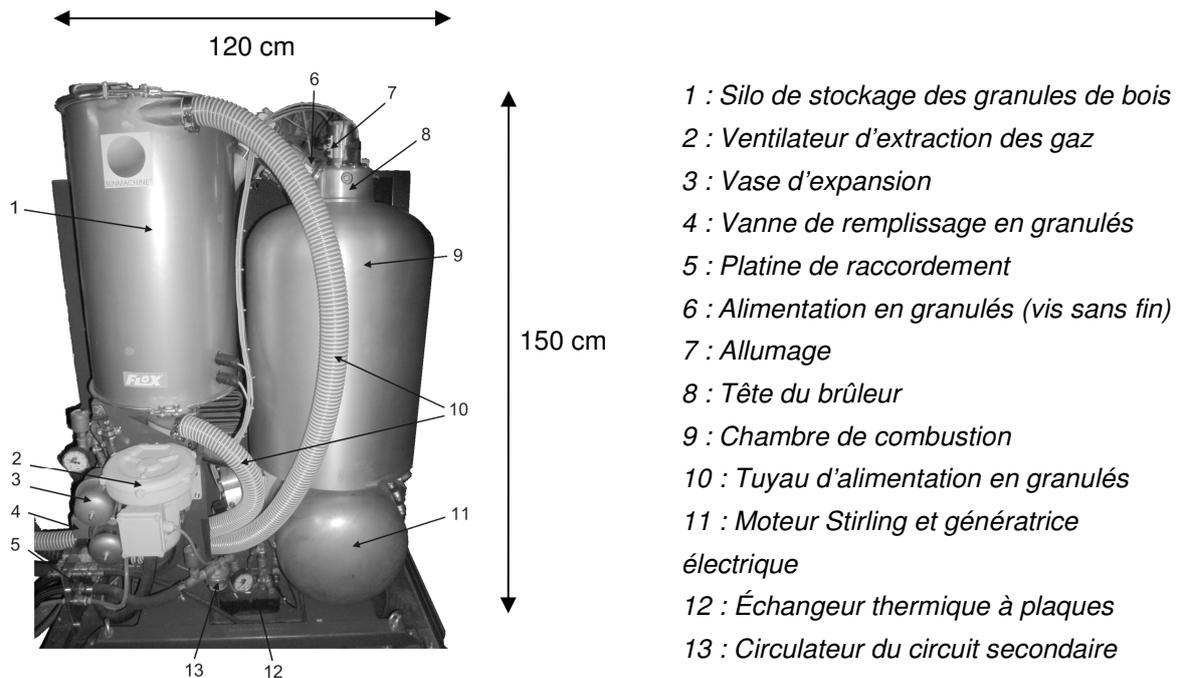


Figure 1 : Vue de l'unité de micro-cogénération à bois étudiée.

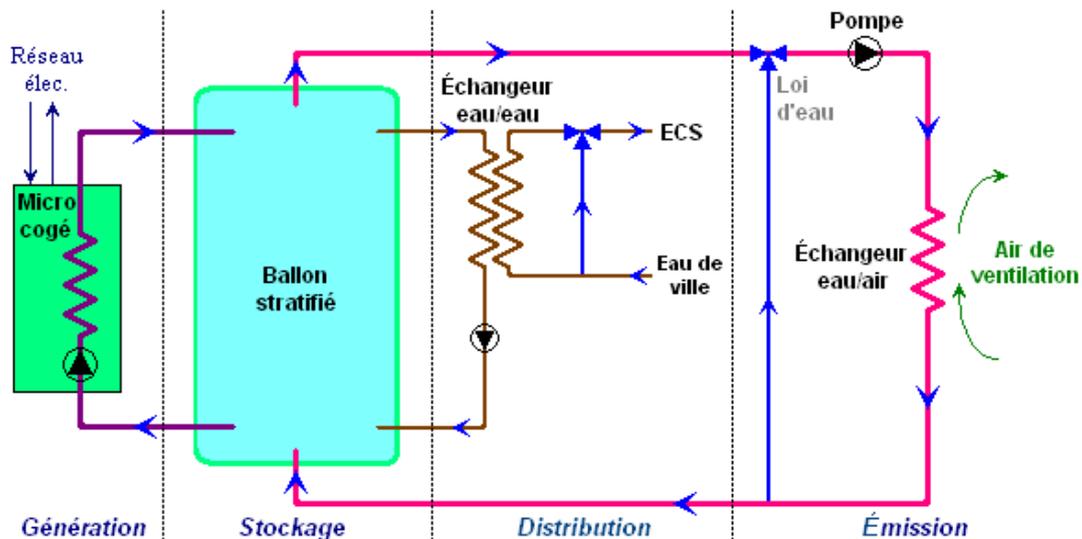


Figure 2 : Schéma général du système de chauffage et d'ECS étudié

Parallèlement, pour évaluer la qualité des ambiances thermiques un **modèle de comportement thermique de l'homme** simple a été intégré à un outil de simulation thermique dynamique du bâtiment (TRNSYS) (Lavoye *et al.*, 2008). Grâce aux données physiques de l'environnement, toutes les données thermo-physiques du corps humain (température de peau, flux échangés, etc.) ont pu être déterminées pour permettre d'évaluer la **sensation thermique** en termes objectifs (chaud, froid, neutre). Dans la réalité, l'être humain exprime son agrément envers l'ambiance en termes subjectifs (confortable, agréable, etc.) et se sont ces jugements qui l'amènent à agir ou non sur son environnement (Fig. 3.a). Ces notions subjectives étant impossibles à modéliser, il a été supposé que seules les sensations étaient à l'origine des actions comportementales (Fig. 3.b).

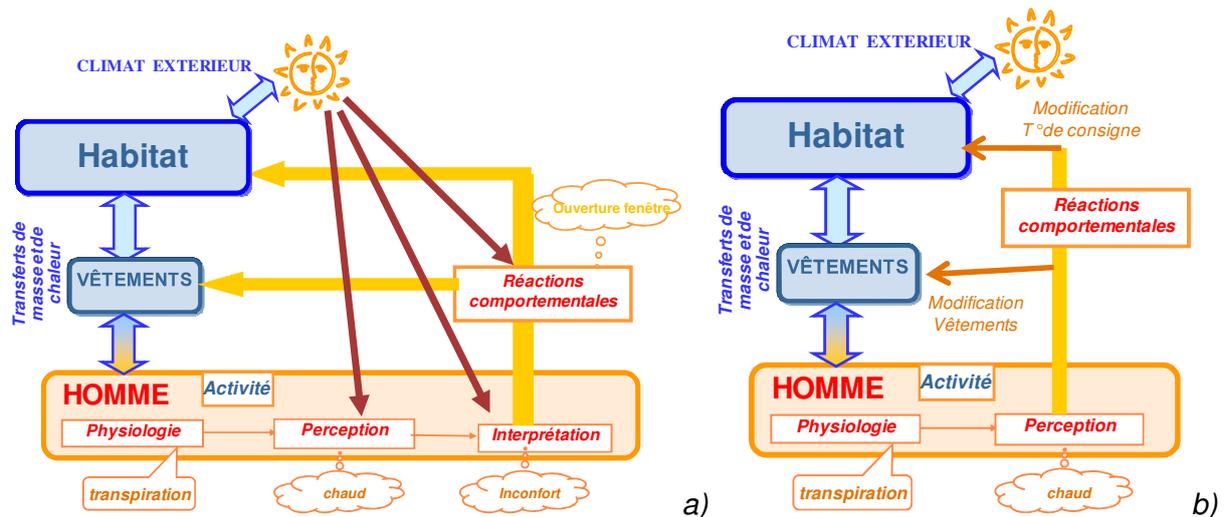


Figure 3 : Schématisation du couplage Homme-Habitat réel (a) et modélisé (b)

En ce qui concerne les comportements adaptatifs, dans un premier temps le modèle ne représente que des actions simples (Fig. 3.b): modification des vêtements (action personnelle) et modification de la température de consigne (action technologique).

Avant de passer à l'évaluation de l'ambiance, les points suivants ont été vérifiés :

- les vitesses et températures d'air de soufflage dans la zone d'occupation sont relativement homogènes. Une modélisation a été faite avec un code numérique de mécanique de fluide (CFD), puis un modèle zonal simple a été validé avec ce code CFD et ajouté dans la modélisation de l'ensemble du bâtiment. L'air soufflé, même dans les conditions extrêmes, a peu d'impact sur les températures et vitesses d'air dans la zone d'occupation.
- Le couplage de la micro-cogénération et du système de distribution d'air semble convenir pour chauffer tous les locaux, même si toutefois dans certaines conditions la température de l'air soufflé est un peu élevée, surtout lors de la remise en température d'un bâtiment à forte inertie thermique.

Le **cahier des charges** du système de diffusion de chaleur par le réseau de ventilation a été défini. Il inclut les possibilités de couplage avec un récupérateur de chaleur sur air vicié ou un puits climatique (échangeur air-sol), une régulation de puissance pièce par pièce, ainsi que la possibilité de limiter les températures de chauffage en jouant sur les débits de ventilation par recyclage de l'air intérieur. **Plusieurs prototypes** ont été réalisés et successivement améliorés afin d'accroître les performances et la durée de vie de l'équipement et de faciliter son industrialisation.

4. RÉSULTATS

L'étude expérimentale de la micro-cogénération sur banc d'essai a montré que l'unité testée présentait des performances limitées (rendement thermique sur PCS³ : 50 %,

³ PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

rendement électrique net sur PCS : 9 %) et un niveau de fiabilité largement perfectible (plusieurs actions de maintenance ont été nécessaires) (Aoun *et al.*, 2009). Le système a depuis été perfectionné par le fabricant.

Des simulations ont été réalisées grâce au modèle développé ici et couplé au modèle de bâtiment afin d'évaluer les performances du système de chauffage équipant un bâtiment à TFBE constitué de deux maisons individuelles accolées (maisons passives à Formerie, Oise) (Thiers, 2008 ; Peuportier, 2009). Les résultats ont notamment montré que l'unité de micro-cogénération étudiée dans cette configuration était surdimensionnée. La machine étudiée serait mieux adaptée à un bâtiment de logement collectif regroupant 6 à 8 logements. Une opération de démonstration de ce type a alors été étudiée et l'outil a aussi permis d'optimiser le dimensionnement du ballon de stockage et des pompes du circuit de chauffage.

Le prototype final du système de diffusion de chaleur par le réseau de ventilation (Fig. 4) est un boîtier comportant un ventilateur de recyclage et 3 ou 5 batteries chaudes air-eau (selon la version). Le boîtier est isolé pour réduire les déperditions thermiques et les nuisances acoustiques. Les canalisations ont été optimisées et leur architecture simplifiée afin de réduire les risques de défaillance et de faciliter l'industrialisation du produit.



Figure 4 : Vue de côté de la dernière version du prototype, version 5 sorties d'air

Pour l'évaluation des conditions de "confort thermique" en début de journée, la température de consigne est fixée sur la base de l'Algorithme de Commande Adaptative (ACA), qui donne la température de "confort" en fonction de la température moyenne courante extérieure. Dans le cas des bâtiments non climatisés, en été, elle augmente proportionnellement à la température extérieure. À partir de ces conditions thermiques ambiantes, l'état thermo-physiologique du corps est calculé, puis selon les sensations l'occupant peut intervenir et les besoins énergétiques du bâtiment peuvent alors notablement varier.

La Fig. 5 présente deux comportements extrêmes, issus du modèle de comportement humain, au cours d'une semaine dans la même maison passive à Formerie. Tous les matins, on considère que le chauffage est réinitialisé à la température minimale de 17°C et la tenue vestimentaire à 0,7 clo. L'occupant au comportement "responsable", conscient de l'intérêt des économies d'énergie (Fig. 5.a) augmente sa tenue vestimentaire, la maintient élevée toute la journée (courbe en rouge). La consigne de chauffage reste assez basse

(température moyenne dans la pièce 19,1°C (courbe en bleu). Un occupant « non sensibilisé » aux questions énergétiques (Fig. 5.b) aura tendance à augmenter la consigne de chauffage (température moyenne dans la pièce 21,7°C) et, lorsqu'il a chaud, à diminuer sa tenue vestimentaire. La conséquence sur la consommation d'énergie est forte puisque l'utilisateur non sensibilisé aura une consommation sur cette période de 267 kWh, alors que pour le comportement plus économique, la consommation vaut environ la moitié, 125 kWh. Par contre, il faut noter que dans les deux cas le niveau de sensation thermique est "neutre", donc le confort est possible. On constate alors que l'on peut simuler l'impact du comportement humain dans le bilan énergétique d'une maison.

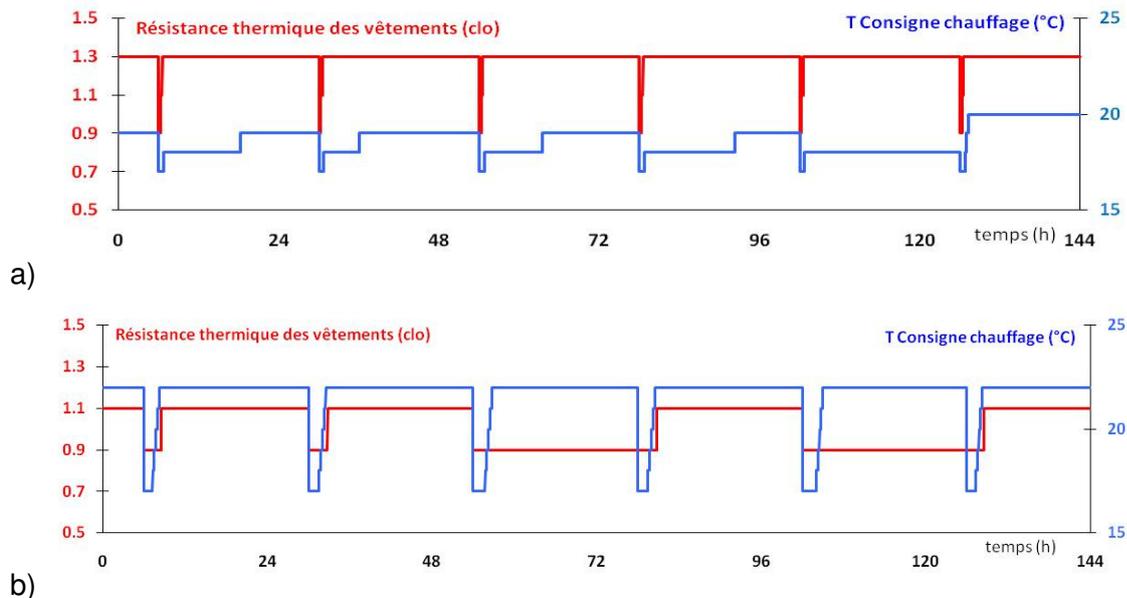


Figure 5 : Tenue vestimentaire (rouge) et température de consigne (bleu) pour six jours, selon le comportement des occupants : « responsable » (a) et « non sensibilisé » (b)

5. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Ce projet a permis d'améliorer la connaissance des performances des systèmes de micro-cogénération Stirling à bois et d'identifier plusieurs limitations techniques qui constituent autant de voies d'amélioration de ces systèmes, telles que l'instabilité de la régulation des pompes et de la combustion du bois, ainsi que la mauvaise évacuation des cendres.

Ce projet a mené à l'élaboration de différents modèles couplés à un modèle thermique de bâtiment. Certains sont utilisables pour le dimensionnement du système de chauffage en intégrant diverses solutions techniques telles que puits climatique et récupérateur de chaleur sur air vicié. La prise en compte de l'inertie thermique du bâtiment facilite l'évaluation des besoins de chaleur et des puissances de chauffage appelées ; cette inertie joue un rôle important, notamment en période de relance. D'autres modèles permettent d'évaluer la qualité de l'ambiance thermique dans les bâtiments à très faibles besoins énergétiques, aussi bien en hiver qu'en été, en tenant compte par exemple des possibilités de free-cooling.

D'autre part, un produit innovant de chauffage aéraulique (UBIO®) a été développé et est en cours de commercialisation. Il est déjà testé in-situ.

Les études réalisées au cours du projet pour une maison individuelle et un bâtiment de logement collectif pourront donner lieu à la mise en place de projets de démonstration. Ceci permettrait de valider la technologie ainsi que les modèles et les outils de dimensionnement développés dans le cadre de ce projet.

Cette étude pourrait être élargie, par exemple aux systèmes de micro-cogénération à gaz, qui posent probablement moins de contraintes techniques que les systèmes à bois (temps et puissance de démarrage). D'autre part, les modèles de sensation thermique et de thermorégulation comportementale pourraient être affinés et intégrés aux outils courants d'aide à la conception des bâtiments. En effet, sur des bâtiments à très faibles besoins énergétiques, le niveau de performance atteint est très sensible à l'interaction entre l'occupant et le bâtiment.

Pour aller plus loin sur les aspects de confort, il serait nécessaire d'élargir le champ d'étude à plusieurs disciplines, comme la sociologie et la domotique. En ce qui concerne les aspects environnementaux, les systèmes de micro-cogénération permettent de produire de l'électricité durant les périodes de pointe lors desquelles des centrales thermiques fortement émettrices en CO₂ sont généralement utilisées, ce qui correspond bien à la problématique actuelle de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par l'ANR dans le cadre du programme PREBAT 2006. Les auteurs souhaitent remercier Michel Carré, de l'ADEME, qui a assuré le suivi du projet.

7. BIBLIOGRAPHIE

Aoun B., Thiers S., Peuportier B. (2009) « Experimental Characterization of a Micro CHP unit based on Stirling engine, fueled by Wood Pellet. » *14th International Stirling Engine Conference ISEC*, Groningen.

Lavoye F., Thellier F., Spagnol S., Lartigue B. (2008) « Perception de la qualité des ambiances intérieures soumises à des transferts thermo-aérauliques. » *Conférence IBPSA*, Lyon.

Peuportier B., Thiers S. (2009) « Les maisons passives : sont elles confortables ? écologiques ? » *CVC*, n° 857, p. 22-25.

Thiers S. (2008) « *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive* », Thèse de doctorat, MINES ParisTech <<http://pastel.paristech.org/4692>>

Thiers S., Aoun B., Peuportier B. (2010) « Experimental characterization, modeling and simulation of a wood pellet micro-combined heat and power unit used as a heat source for a residential building » *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 6, p. 896-903.