

# Bilans énergétique et environnemental simulés d'un bâtiment passif équipé d'un échangeur air-sol, en Picardie

Stéphane Thiers<sup>1</sup>, Bruno Peuportier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ARMINES – Centre Énergétique et Procédés  
Mines ParisTech : 60, bd Saint-Michel 75272 PARIS CEDEX 06  
[stephane.thiers@ensmp.fr](mailto:stephane.thiers@ensmp.fr)

---

*RESUME.* Un bâtiment constitué de deux maisons individuelles mitoyennes, répondant au standard allemand « Passivhaus », a été réalisé en 2007 à Formerie (Oise). Ce bâtiment a été modélisé et son comportement thermique simulé à l'aide du logiciel de simulation dynamique des bâtiments COMFIE. Afin de prendre en compte son système de ventilation — comprenant un échangeur air-sol et un récupérateur sur air vicié — un modèle a été spécifiquement développé et intégré à COMFIE. Dans cet article, le comportement de ce bâtiment passif a été simulé, de même que celui d'un bâtiment analogue répondant seulement aux exigences de la réglementation thermique française RT2005. Les besoins de chauffage et le confort thermique des deux bâtiments sont comparés, puis un bilan environnemental, réalisé à l'aide de l'outil d'analyse de cycle de vie EQUER, montre les performances du standard Passivhaus en terme de consommation d'énergie primaire, de réchauffement climatique et de divers autres impacts. Dans le contexte français, le concept passif constitue une solution pour améliorer les performances énergétiques et environnementales des bâtiments.

*MOTS-CLÉS :* Bâtiment passif, Simulation, Analyse du cycle de vie

---

*ABSTRACT.* In 2007, a two-dwelling passive building has been carried out in Formerie (North-West of France), complying with the "Passivhaus" standard. This building, not yet monitored, has been modeled using the dynamic simulation software COMFIE, which is dedicated to building eco-design. In order to account for the implemented ventilation system, including a heat recovery unit and an earth-to-air heat exchanger, a specific model has been developed and integrated to COMFIE. In order to quantify the benefits brought by a passive design, the simulation results are presented for the passive house and a reference house complying with the French thermal regulation for buildings. The heating load and thermal comfort level of both houses are compared, showing for the passive design a tenfold reduction of the heating load and a clear reduction of summer discomfort. Finally, the environmental assessment – carried out with the life cycle assessment tool EQUER – shows the reduction in primary energy consumption, global warming potential and other impacts brought by the passive house design. Passive building concept appears to be an adequate solution to improve the environmental performances of buildings in the French context.

*KEYWORDS :* Passive Building, Thermal Simulation, Life Cycle Assessment

---

## 1. INTRODUCTION

Le concept de bâtiment passif a été progressivement formalisé à partir de 1988 par le Passivhaus Institute de Darmstadt (Allemagne) (Feist, 1993 ; Feist *et al.*, 2005). Selon le standard « Passivhaus », un tel bâtiment doit valider trois critères correspondant à un niveau de performance élevé : (i) des besoins de chauffage spécifiques<sup>1</sup> inférieurs à 15 kWh.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, (ii) une demande totale en énergie primaire<sup>2</sup> inférieure à 120 kWh.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> et (iii) des infiltrations d'air inférieures à 0,6 vol.h<sup>-1</sup> à 50 Pa

---

<sup>1</sup> Énergie utile par unité de surface nette à l'intérieur de l'enveloppe (*Treated Floor Area, TFA*).

<sup>2</sup> Énergie primaire non-renouvelable par unité de surface nette à l'intérieur de l'enveloppe, incluant le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires et l'électricité spécifique.

(Feist, 2004). La validation de ces critères peut être obtenue en combinant différentes techniques visant à la réduction des déperditions thermiques, à la valorisation des apports thermiques passifs en période de chauffage et au maintien d'un confort thermique satisfaisant en période de rafraîchissement (Breesch *et al.*, 2005). Plus de 4000 bâtiments passifs ont ainsi été réalisés en Allemagne, Autriche et Suisse.

En France, bien que le développement de bâtiments énergétiquement performants constitue l'une des voies pour atteindre l'objectif national de division par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> entre 1990 et 2050, le concept de maison passive peine à émerger et peu de bâtiments passifs y ont vu le jour jusqu'à présent.

Début 2007, la société LES AIRELLES a construit deux maisons jumelles en Picardie ; les premières maisons labellisées « Passivhaus » en France (Figure 1). Ces maisons ne sont encore ni occupées ni instrumentées.



*Figure 1 : Vue de la façade sud-est du bâtiment (Architecte : En Act architecture)*

L'objectif de cette étude est d'évaluer, pour ce bâtiment, la consommation énergétique, le confort thermique et les impacts environnementaux engendrés sur sa durée de vie et de comparer ses performances à celles d'une construction réglementaire équivalente (RT2005), afin de quantifier l'énergie économisée et la réduction de différents impacts environnementaux.

## **2. DESCRIPTION DU BATIMENT**

### *2.1. BATIMENT PASSIF*

Le bâtiment étudié est situé à Formerie (Oise). Il se compose de deux maisons jumelles mitoyennes en R+1. Chacune présente une Surface Hors Œuvre Nette (SHON) de 132 m<sup>2</sup>, comporte un garage, un balcon, une terrasse et un jardin, et peut accueillir une famille de quatre personnes. La structure intérieure des deux maisons est identique avec, au rez-de-chaussée, un hall d'entrée, un bureau, une réserve, un salon et une cuisine et, à l'étage, trois chambres, une salle de bain et un salon. Les orientations des deux maisons sont identiques. Seules diffèrent les dispositions des garages.

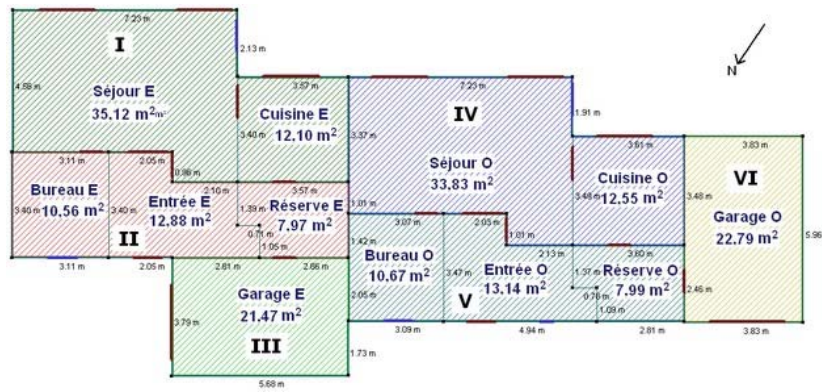


Figure 2 : Plan du rez-de-chaussée du bâtiment modélisé et découpé en zones thermiques

Les murs extérieurs, à ossature bois, comportent une couche de 22 cm d’ouate de cellulose et une isolation de 15 cm de polystyrène est ajoutée à l’extérieur. La dalle est isolée par 20 cm de polystyrène. L’isolation des combles est constituée par 40 cm d’ouate de cellulose. Des vitrages très performants (triple vitrage) et des portes extérieures isolées ont été installées de manière à assurer une bonne étanchéité à l’air. Des stores extérieurs à lamelles protègent les vitrages exposés au soleil d’avril à septembre ce qui réduit alors le facteur solaire des vitrages d’environ 80 %. Le tableau 1 fournit les caractéristiques des éléments de l’enveloppe du bâtiment. Les ponts thermiques considérés sont de  $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour le contour de la dalle et du plancher des combles. Un test de la porte soufflante a mesuré des infiltrations d’air à 50 Pa ne dépassant pas  $0,58 \text{ vol.h}^{-1}$ , ce qui satisfait au critère (iii) du standard Passivhaus.

Parois	Description	Épaisseur d’isolant (cm)	Conductance surfacique ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
Murs extérieurs	Ossature bois, polystyrène et ouate de cellulose	38	0,12
Dalle	Béton et polystyrène (sur terre-plein)	20	0,19
Combles	Plaque de plâtre et ouate de cellulose	40	0,11
		Facteur solaire (-)	Conductance surfacique ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
Fenêtres	Triple-vitrage et store à lamelles	0,52	0,71
Portes extérieures	Bois et polystyrène	0	0,78

Tableau 1 : Description des éléments de l’enveloppe du bâtiment passif

Pour chaque maison, la ventilation est contrôlée comme suit :

- En période de chauffage, un échangeur air-sol est couplé à un récupérateur sur air vicié associé à une ventilation double-flux. L’échangeur air-sol se compose d’un unique tube de polychlorure de vinyle (PVC) de 200 mm de diamètre, enfoui dans le jardin à 1,6 m sous la surface du sol. Compte tenu des infiltrations, la récupération de chaleur sur air vicié présente une efficacité moyenne globale de 70 %<sup>3</sup>. Le débit total de renouvellement d’air considéré (intégrant les infiltrations) est de  $0,6 \text{ vol.h}^{-1}$ .
- En période de rafraîchissement, l’échangeur air-sol est utilisé seul (by-pass du récupérateur sur air vicié) à un débit de  $1,5 \text{ vol.h}^{-1}$ . La nuit, lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure et que celle-ci dépasse  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , une surventilation naturelle nocturne est enclenchée lorsqu’elle est nécessaire (renouvellement à  $5 \text{ vol.h}^{-1}$  avec de l’air extérieur).

<sup>3</sup> L’efficacité moyenne annuelle du récupérateur est supposée atteindre 85 %.

La maison passive est équipée d'un chauffe-eau solaire (fraction solaire considérée : 50 %) et d'une pompe à chaleur d'appoint pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage (Coefficient de Performance moyen annuel considéré : 3).

## 2.2. VARIANTE REGLEMENTAIRE UTILISEE COMME REFERENCE

Les performances du bâtiment passif sont comparées à celles d'un bâtiment de référence respectant la réglementation thermique 2005 (RT2005). Les caractéristiques de cette variante sont les mêmes que celles du bâtiment passif décrit plus haut (même orientation, dimensions, même ossature bois) excepté pour l'isolation (réduction des épaisseurs), les ponts thermiques ( $0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour le bord de la dalle et  $0,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour les autres ponts thermiques) et le renouvellement d'air (limité au renouvellement hygiénique) pour lesquels les valeurs réglementaires ont été retenues. L'équipement standard des maisons françaises a aussi été retenu : chaudière à gaz (rendement PCS de 78 %) pour le chauffage et la production d'ECS. Il n'y a ni récupérateur sur air vicié ni échangeur air-sol ni chauffe-eau solaire sur cette variante.

Parois	Description	Épaisseur d'isolant (cm)	Conductance surfacique ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
Murs extérieurs	Ossature bois avec polystyrène et ouate de cellulose	13	0,35
Dalle	Béton et polystyrène (sur terre-plein)	14	0,27
Combles	Ouate de cellulose	22,5	0,2
		Facteur solaire (-)	Conductance surfacique ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
Fenêtres	Double-vitrage avec store à lamelles	0,66	1,8
Portes extérieures	Bois	0	1,5

Tableau 2 : Description des éléments de l'enveloppe du bâtiment réglementaire

## 3. METHODE

Dans un premier temps, les deux variantes (passive et réglementaire) ont été modélisées et leur comportement thermique simulé à l'aide de COMFIE. Ce logiciel, développé par le Centre Énergétique et Procédés (CEP) de Mines ParisTech, est un outil de simulation dynamique multizone des bâtiments, basé sur une description en volumes finis et une résolution par analyse modale (Peuportier *et al.*, 1990). 10 zones thermiques ont été définies : 5 pour chaque logement. Aucune climatisation n'est considérée pour aucune des deux variantes (Figure 3).

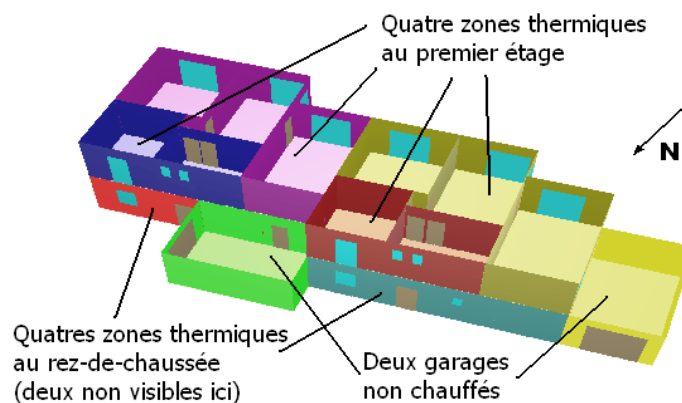


Figure 3 : Représentation tridimensionnelle du bâtiment modélisé et découpage en zones thermiques

Pour le bâtiment passif, le système de ventilation comportant un échangeur air-sol a été spécifiquement modélisé (Thiers *et al.*, 2007) (Figure 4). Ce modèle comprend un modèle détaillé de température de sol et un modèle d'échangeur air-sol utilisant une représentation de l'échangeur en volumes finis. Il a été validé à partir de mesures réalisées sur deux installations en région Île-de-France (Thiers, 2008). Il a été intégré à COMFIE sous forme d'un module complémentaire. Ainsi, les consommations énergétiques et les températures ont pu être calculées pour les périodes de chauffage et de rafraîchissement. L'inconfort thermique d'été est évalué en degrés-jour d'inconfort<sup>4</sup> (DJI) par rapport à une limite de température fixée ici à 27 °C.

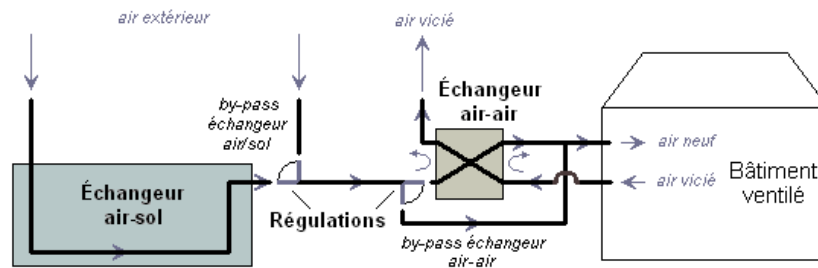


Figure 4 : Schéma du système de ventilation

Le climat de la région parisienne (Trappes (Yvelines), année moyenne, 2700 DJU) a été retenu pour les simulations. Pour l'évaluation de l'inconfort d'été, une période caniculaire (mesurée à Montreuil (Seine-Saint-Denis) en 2003) a été insérée en juillet et août.

Indicateur d'impact	Unité	Légende
Demande cumulative d'énergie	GJ	ENERGIE
Eau utilisée	m <sup>3</sup>	EAU
Épuisement des ressources abiotiques	kg Sb-eq.	RESSOURCES
Production de déchets (non radioactifs)	t eq.	DECHETS
Production de déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	DECHETS RAD
Potentiel de réchauffement global à 100 ans (PRG100)	t CO <sub>2</sub> -eq.	PRG100
Potentiel d'acidification	kg SO <sub>2</sub> -eq.	ACIDIF
Potentiel d'eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq.	EUTROPH
Domage à la qualité des écosystèmes dû à l'écotoxicité	PDF.m <sup>2</sup> .an	ECOTOX
Domage à la santé	DALY	SANTEHUM
Production d'ozone photochimique (Smog)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.	O3-SMOG
Odeur	Mm <sup>3</sup>	ODEUR

Tableau 3 : Indicateurs d'impacts considérés (Popovici, 2006)

Dans un second temps, en s'appuyant sur les résultats des simulations thermiques, les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment ont été calculés pour les deux variantes à l'aide de l'outil EQUER (Polster *et al.* 1996). Douze impacts (Tableau 3) ont été étudiés pour les phases de construction, d'utilisation et de démolition, pour une durée de vie du bâtiment supposée de 80 ans. Les divers matériaux composant l'échangeur air-sol, le récupérateur sur air vicié, la pompe à chaleur et les panneaux solaires ne sont pas pris en compte dans ce bilan, en faisant l'hypothèse que

<sup>4</sup> À l'intérieur du bâtiment, les degrés-jours d'inconfort annuels, définis sur une base horaire, par rapport à une température limite  $T_{lim}$ , sont définis comme :  $DJI_{T_{lim}} = \frac{1}{24} \cdot \sum_{h=1}^{8760} (T_{int}(h) - T_{lim})^+$  où  $T_{int}$  est la température intérieure et l'indice '+' désigne la partie positive de l'élément considéré.

leurs quantités et les impacts associés sont faibles par rapport à ceux des matériaux de construction et de l'énergie consommée.

## 4. RESULTATS

### 4.1. CONSOMMATION ENERGETIQUE ET CONFORT

Les besoins de chauffage du bâtiment passif sont évalués à 7,9 kWh.m<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>, ce qui satisfait le critère (i) du standard Passivhaus (< 15 kWh.m<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>). Cela correspond environ à une division par dix par rapport à la variante réglementaire (cf. Tableau 4).

Variante	Besoins de chauffage		Inconfort d'été (DJI <sub>27°C</sub> )		
	kWh.an <sup>-1</sup>	kWh.m <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup>	Sans surventilation	Avec surventilation	
Passive	2 073	7,9	37	14	<i>avec éch. air-sol</i>
Réglementaire	21 124	80,0	94	43	<i>sans éch. air-sol</i>

Tableau 4 : Résultats pour les deux variantes

L'échangeur air-sol réduit l'inconfort d'été par rapport à la variante réglementaire : 37 DJI<sub>27°C</sub> contre 94 DJI<sub>27°C</sub> (période caniculaire). On note que la surventilation nocturne en période chaude peut amener une réduction équivalente de l'inconfort sur la variante réglementaire et très fortement limiter l'inconfort sur le bâtiment passif.

De par ailleurs, une étude de sensibilité menée sur la variante passive a aussi montré l'intérêt de l'inertie thermique en terme de réduction des besoins de chauffage et des risques de surchauffe.

En supposant une consommation d'ECS de 40 l par jour et par personnes (valeur standard), des équipements électriques performants et une famille consommant peu d'électricité spécifique (2 000 kWh par an et par famille), la consommation d'énergie finale serait de 5 435 kWh.an<sup>-1</sup>, soit 21 kWh.m<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>, pour le bâtiment passif, et de 36 800 kWh.an<sup>-1</sup>, soit 139 kWh.m<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>, pour la variante réglementaire<sup>5</sup>. En utilisant les facteurs d'énergie primaire (ep) du standard Passivhaus (2,7 kW<sub>k<sub>ep</sub></sub>/kWh pour l'électricité et 1,1 kW<sub>k<sub>ep</sub></sub>/kWh pour le gaz), les consommations d'énergie primaire s'élèvent respectivement à 56 kWh<sub>ep</sub>.m<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup> et 178 kWh<sub>ep</sub>.m<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>. Ainsi le bâtiment passif remplit aussi le critère (ii) du standard Passivhaus (< 120 kWh<sub>ep</sub>.m<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>).

### 4.2. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX AU COURS DU CYCLE DE VIE DU BATIMENT

Le bilan environnemental obtenu par analyse du cycle de vie montre que les impacts du bâtiment passif sont inférieurs à ceux de la variante réglementaire, exceptés les productions de déchets (Figure 5). Cette amélioration est particulièrement marquée sur les impacts liés à la consommation de gaz naturel (PRG, épuisement des ressources, acidification, smog d'été, odeurs...). La production de déchets inertes demeure inchangée car une quantité quasi identique de matériaux a été mise en œuvre dans les deux variantes. La production de déchets radioactifs est accrue (+35 %) du fait d'une consommation électrique plus élevée du bâtiment passif (pompe à chaleur) par rapport à la variante réglementaire (chaudière à gaz).

Les impacts sur le cycle de vie ont été normalisés par rapport aux impacts moyens annuels nationaux en France ramenés par habitant (Popovici *op. cit.*). Ainsi, l'expression de ces impacts en *équivalent année-habitant* permet leur comparaison (Figure 6). Par exemple, ici, la consommation

<sup>5</sup> Calculé à partir du pouvoir calorifique supérieur (PCS) du gaz naturel.

d'eau semble prépondérante pour le bâtiment passif, ce qui signifie que des mesures complémentaires (récupération d'eau, réducteurs de pression) seraient nécessaires pour réduire significativement cet impact. La réduction du pouvoir de réchauffement global durant la phase d'utilisation du bâtiment passif amène à ne plus considérer le PRG dû à la phase de construction comme négligeable : en effet, il représente 20 % de l'impact sur le cycle de vie. Cependant, pour les deux variantes, la phase d'utilisation représente la principale contribution pour l'ensemble des impacts environnementaux, excepté pour la production de déchets inertes où la phase de démolition est prépondérante.

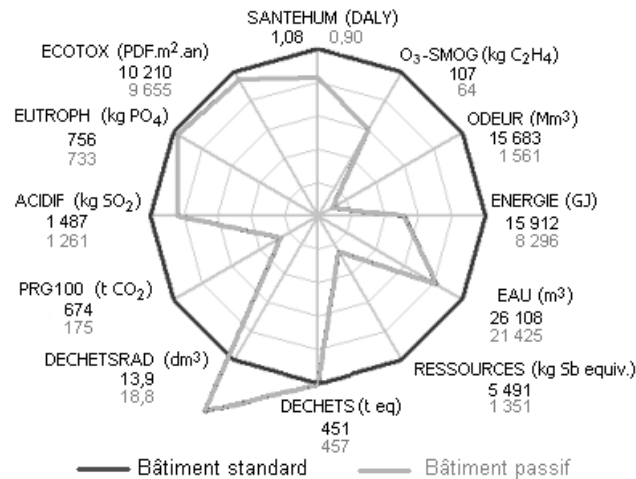


Figure 5 : Comparaison des impacts des deux variantes pour les douze indicateurs considérés

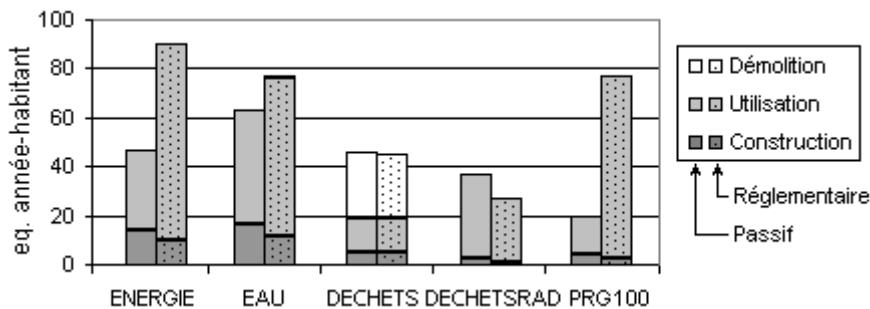


Figure 6 : Contribution de chaque phase du cycle de vie pour quelques impacts normalisés en équivalent année-habitant

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le bâtiment étudié est un bâtiment passif situé en Picardie équipé d'un échangeur air-sol, d'un récupérateur sur air vicié, d'un chauffe-eau solaire et d'une pompe à chaleur d'appoint pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Afin de réaliser les bilans énergétiques et environnementaux de ce bâtiment, un modèle de système de ventilation intégrant un échangeur air-sol a été développé et intégré à un outil de simulation dynamique du bâtiment. Des hypothèses simplifiées ont été considérées en ce qui concerne les performances du chauffe-eau solaire et de la pompe à chaleur : des modules de calcul sont en cours de développement sur ces composants. Les simulations réalisées montrent une amélioration substantielle des performances du bâtiment par rapport à un bâtiment de niveau de performance réglementaire. Le confort thermique peut y être préservé en toute saison à l'aide de mesures appropriées (protections solaires, ventilation, inertie thermique). Plus

particulièrement, en été, les protections solaires, l'échangeur air-sol et la surventilation nocturne constituent des solutions efficaces pour éviter la surchauffe. De plus, durant son cycle de vie, le bâtiment permet une réduction significative de la plupart des impacts environnementaux, en particulier du potentiel de réchauffement global et de l'épuisement des ressources abiotiques. Ainsi le concept Passivhaus semble constituer une solution valide en climat océanique pour améliorer les performances énergétiques et environnementales des logements par rapport au contexte réglementaire français.

Le suivi des consommations du bâtiment de Formerie et d'autres bâtiments passifs en France permettra d'affiner les modèles développés et d'approfondir leur validation. En particulier, une modélisation du couplage entre échangeur air-sol et pompe à chaleur devrait permettre de mieux évaluer la consommation électrique de tels systèmes. De même, une amélioration de la modélisation de la régulation entre différents régimes de ventilation (dont surventilation nocturne) et de la prise en compte des écoulements d'air dans l'évaluation du confort thermique pourront constituer des pistes de recherche futures.

## 6. REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par l'ADEME, la région Île-de-France dans le cadre du réseau de recherche sur le développement soutenable (R2DS), CANADA CLIM (conception et réalisation d'échangeurs air-sol) et LES AIRELLES (construction de maisons passives).

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- Breesch H., Bossaer A., Janssens A. (2005). Passive cooling in a low-energy office building. *Solar Energy*, vol 79, n° 6, p. 682–696.
- Feist W. (1993). *Passivhäuser in Mitteleuropa*. Thèse de doctorat. Université de Kassel.
- Feist W. (2004). *First Steps: What Can be a Passive House in Your Region with Your Climate?*. Passivhaus Institute Darmstadt.
- Feist W., Schnieders J., Dorer V., Haas A. (2005). Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings*, vol. 37, n° 11, p. 1186–1203.
- Peuportier B., Blanc-Sommereux I. (1990). Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *International Journal of Solar Energy*, vol 8, p. 109–120.
- Polster B., Peuportier B., Blanc-Sommereux I., Diaz Pedregal P., Gobin C., Durand E. (1996). Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design. *Solar Energy*, vol 57, n° 3, p. 219–230.
- Popovici E.C. (2006). *Contribution à l'analyse du cycle de vie des quartiers*. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Paris.
- RT 2005 (2006). Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles des bâtiments, Journal Officiel de la République Française n° 121 du 25 mai 2006.
- Thiers S. (2008). *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Paris.
- Thiers S., Peuportier B. (2007). Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments, *Journée thématique SFT-IBPSA "Froid solaire et confort d'été"*, Aix les Bains, p. 96–103.