

# EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

*Vers des bâtiments autonomes en énergie*

Journée Thématique SFT – IBPSA

Organisée par Etienne Wurtz (INES, Chambéry) et Alain Trombe (INSA de Toulouse)

à L'INES : Institut National d'Énergie Solaire Mardi 21 mars 2006

## PROGRAMME ET ACTES

### Première session : **Vers des bâtiments autonomes en énergie**

09h00 - 09h20 : **Ouverture de la journée, Présentation de l'appel à proposition ANR ADEME du programme PREBAT**, Ludovic Valadier, Responsable des programmes transport (PREDIT), bâtiment (PREBAT), et solaire photovoltaïque (PV), Agence Nationale de la Recherche

09h20 – 09h40 : **Des éco-techniques à l'éco-conception des bâtiments**, Bruno Peuportier, responsable scientifique, CEP, Ecole des Mines Paris

09h40 – 10h00 : **Réalisation d'un bâtiment à énergie positive. De la phase programme à la conception**, François Garde, Professeur, LPBS, Université de La Réunion

10h00 – 10h20 : **Commande des systèmes multi-énergies pour bâtiments à haute performance énergétique**, Joseph Virgone, MCF, CETHIL, INSA Lyon

10h20 – 10h50 : *Pause*

### Deuxième session : **Couplage systèmes solaires et bâtiments**

10h50 – 11h10 : **Les systèmes solaires combinés : Quel bilan et quel avenir ?** Thomas Letz, Responsable filière thermique, INES Education

11h10 – 11h30 : **Couplage panneaux solaires et stockage géothermique**, Bernard Souyri, MCF, LOCIE, Université de Savoie

11h30 – 11h50 : **R&D sur les intégrations des énergies renouvelables dans les bâtiments**, Didier Binesti, Ingénieur de recherche, EDF R&D

11h50 – 12h10 : **Les interactions du solaire photovoltaïque avec le bâtiment**, Philippe Malbranche, Responsable Programme Photovoltaïque au CEA, INES RDI

12h10 – 12h30 : **Les orientations du PREBAT**, François Buyle Bodin, DRAST/Chef de la mission Génie Civil; Gérard Guarracino, Directeur du Département Génie Civil et Bâtiment, LASH, ENTPE

12h30 – 14h30 : *Repas – visite des installations à INES*

### Troisième session : **Les projets démonstratifs**

14h30 – 14h50 : **Le laboratoire semi-virtuel du CSTB**, Peter Riederer, Ingénieur de recherche, CSTB

14h50 – 15h20 : **Bâtiments soutenable - entre rêve et réalité**, Radu Zmeureanu, professeur et directeur, Université de Concordia, Montréal, Canada

**Simulation des maisons "zero-net"**, Michel Bernier, Professeur, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada

15h20 – 15h40 : **Les bâtiments démonstrateurs à l'INES**, Etienne Wurtz, directeur de recherche CNRS, INES RDI

15h40 – 16h00 : **La maison « zéro énergie »**, Alain Ricaud, Directeur BE, Cythelia

16h00 - 16h20 : **Evaluation des performances énergétiques des bâtiments adaptatifs en utilisant la température en évolution libre**, Cristian Ghiaus, Ingénieur de recherche, LEPTAB, Université de La Rochelle

16h20 – 17h00 : Discussions et clôture

---

## DES ÉCO-TECHNIQUES À L'ÉCO-CONCEPTION DES BÂTIMENTS

Bruno Peuportier et Stéphane Thiers

Ecole des Mines de Paris, CEP, 60 Bd St Michel, 75272 Paris Cedex 06

### RESUME.

*Les recherches menées à l'Ecole des Mines de Paris depuis la fin des années 70 ont porté sur diverses techniques d'économie d'énergie et d'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments (solaire passif, solaire actif, solaire photovoltaïque). Plus récemment, des travaux ont été initiés sur les échangeurs air/sol (appelés parfois « puits canadiens »). Des modèles de bâtiments ont été développés pour évaluer les besoins de chauffage, de climatisation et d'éclairage, puis ils ont été étendus à l'évaluation des impacts environnementaux par l'analyse de cycle de vie. La programmation orientée objets a permis de capitaliser les connaissances, en facilitant le chaînage de ces différents modèles. Cet ensemble logiciel comporte un certain nombre de limites, en particulier sur la prise en compte des mouvements d'air, de l'humidité et de certains équipements. Des activités complémentaires de validation seraient utiles, en particulier dans le cas de bâtiments à très faibles besoins. L'utilisation de ces outils comme aide à la conception est facilitée par une interface conviviale, qui pourrait encore être améliorée de manière à progresser vers l'éco-conception des bâtiments. Enfin, une extension à l'échelle d'un quartier est en cours de développement.*

*MOTS-CLÉS : bâtiment, énergie, simulation thermique, éco-conception*

---

### ABSTRACT.

*Research activities have been performed at Ecole des Mines de Paris since the seventies, regarding energy efficient techniques and the integration of renewable energy systems in buildings (passive and active solar, photovoltaic systems). More recently, earth/air heat exchangers have been studied. Building models have been developed to evaluate heating, cooling and lighting loads. These models have been complemented with life cycle assessment in order to estimate environmental impacts. Object oriented programming allowed the modelling contributions on each technique to be integrated in a whole software package. The limits of this model concern air movements, humidity transfer, and some types of equipment. Complementary validation work would be useful, particularly for low energy buildings. The use of these tools as design aid benefits from a user friendly interface, but further improvement would still be useful in order to progress towards eco-design. Finally, an extension of the models at a settlement level is in progress.*

*KEYWORDS : building, energy, thermal simulation, eco-design*

---

## 1. INTRODUCTION

L'éco-conception, c'est à dire la prise en compte des aspects environnementaux dans la conception, ne consiste pas simplement à additionner des « éco-techniques », techniques favorables à l'environnement. La conception, en particulier d'un objet complexe comme un bâtiment, met en jeu une combinatoire d'éléments en interaction, d'où un risque de sous-optimisation. Par exemple une faible inertie est souvent conseillée dans les bâtiments tertiaires, du fait d'un chauffage intermittent. Dans ce cas, les apports solaires peuvent difficilement être valorisés et une étude de sensibilité sur ce paramètre conduit à réduire les surfaces vitrées au minimum imposé pour l'éclairage, ou à utiliser des vitrages à faible facteur solaire. Cette « optimisation » mériterait d'être comparée à une solution à forte inertie, avec une sur-ventilation nocturne en été permettant de réduire les consommations de climatisation, et avec une ouverture solaire importante réduisant les besoins de chauffage. Les résultats de calcul donnent l'avantage à cette deuxième solution, mais n'ont pas pu être vérifiés par la mesure, le projet étudié n'ayant pas été construit. Si ce résultat est confirmé, un certain nombre de pratiques devront être revues.

Les travaux passés ont souvent privilégié l'étude de chaque technique isolément, ce qui est plus facilement gérable au niveau des équipes de recherche, en particulier dans le cadre de thèses. Or la conception des bâtiments est en pratique multi-techniques, car d'une part de nombreux composants sont associés, et d'autre part de nombreux aspects

doivent être pris en compte simultanément : performance thermique, éclairage, acoustique, qualité de l'air, impacts environnementaux, sans oublier bien sûr les aspects économiques.

L'objet de cette communication est de présenter des travaux effectués sur les techniques, puis de proposer quelques pistes pour progresser vers des outils plus intégrés, et mieux adaptés aux pratiques professionnelles. Une étape intermédiaire consiste à élaborer des « concepts », associant plusieurs techniques. Par exemple les « maisons passives » associent une forte isolation, une ouverture solaire importante, une ventilation à double flux et un chauffage par air pulsé. La même notion de concept s'applique aussi à l'urbanisme, avec par exemple la « ville solaire », ensemble de bâtiments exposés plein sud et privilégiant la compacité. Le risque de cette approche est une réplication à l'identique et, à terme, un appauvrissement de la création architecturale. C'est pourquoi l'idée d'étape intermédiaire est proposée ici pour ces concepts, dont l'efficacité et donc l'utilité n'est pas contestée, mais qui pourraient ensuite être dépassés grâce à des outils plus intégrés.

## 2. MODÉLISATION DE COMPOSANTS

### 2.1. L'ISOLATION TRANSPARENTE

Les murs solaires ont été proposés dans les années 60 pour améliorer le bilan thermique des bâtiments en valorisant les apports solaires par les parois opaques (Trombe et Michel, 1971). A cette époque, la couverture transparente était un simple vitrage, et ce système s'est avéré moins efficace qu'une isolation opaque. Dans les années 80, des matériaux isolants et translucides sont apparus (Goetzberger et al., 1984), permettant cette fois de capter une quantité de chaleur supérieure aux déperditions. Aujourd'hui les performances des vitrages ont progressé et un double vitrage performant (basse émissivité, lame d'argon) permet de réaliser un mur solaire performant à moindre coût. L'intérêt de ce type de paroi est de stocker les apports solaires, et ainsi de prendre la relève, en soirée, des apports directs par les vitrages.

En ce qui concerne la modélisation de ces systèmes, un outil de simulation dynamique est nécessaire pour prendre en compte le stockage de chaleur et évaluer les gains solaires utiles. Dans cette famille d'outils, les modèles aux différences finies sont les plus répandus. Développés sur micro-ordinateurs, les outils de ce type à usage professionnel étaient dans les années 80 limités au cas monozone (une température d'air unique dans tout le bâtiment). On peut citer par exemple CASAMO (Watremez, 1985).

Grâce aux techniques de réduction de modèles, il a été possible de décrire plus finement un bâtiment, en considérant plusieurs zones thermiques. Par exemple, la méthode d'analyse modale a été initialement développée pour la mécanique avant d'avoir été appliquée à la thermique (Carter, 1979). La théorie a été complétée (Bacot, 1984) pour donner lieu à diverses applications en thermique du bâtiment (Neveu, Lefebvre, Sicard, 1984 à 1988).

Les principaux phénomènes liés à l'évolution thermique des bâtiments peuvent être représentés ou approximés par des équations linéaires. Lorsqu'on peut isoler un tel système linéaire, il est possible d'appliquer l'analyse modale. Mais il existe aussi des phénomènes représentés par des équations non linéaires (par exemple la convection naturelle), et d'autre part le système linéaire peut être variable (la fermeture d'un volet augmente la résistance thermique d'une fenêtre). Nous avons donc séparé ces équations du système linéaire fixe, et nous les avons couplées en phase de simulation au modèle modal réduit.

Au niveau informatique, le modèle a été mis en œuvre dans le logiciel COMFIE, sous la forme d'une structure d'objets reliés par des pointeurs (Peuportier et Blanc Sommereux, 1988). Les composants de base, matériaux, vitrages, revêtements de murs etc. sont combinés pour former des structures plus complexes: parois, zones, bâtiment entier. Un modèle par volumes finis est d'abord constitué, le nombre de mailles par paroi étant paramétrable, puis ce modèle est réduit aux six modes principaux (correspondant à six constantes de temps). Le comportement des occupants, lié à l'utilisation du bâtiment (habitations, bureaux,...), est défini dans un scénario d'occupation, contenant les profils de

températures de consigne, de ventilation et d'apports internes pour chaque jour de la semaine. Des années types à pas de temps horaire sont utilisées pour les données climatiques. La programmation orientée objets a permis de développer et de chaîner des modèles de composants au simulateur global de bâtiments, par exemple des murs solaires et des systèmes photovoltaïques. Cette approche de développement logiciel s'est avérée très utile pour capitaliser les connaissances issues de différentes contributions.

Cet outil de simulation a été appliqué pour analyser une opération expérimentale de six maisons individuelles, construites dans les Ardennes par l'architecte Jacques Michel en 1992 (Peuportier et Michel, 1995). Différents matériaux isolants transparents ont été comparés, dans des murs solaires mais également pour former des capteurs à air en toiture. Dans la configuration murs solaires, les besoins de chauffage du bâtiment sont de  $60 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ , ce qui a été confirmé par la mesure.

## 2.2. PRÉCHAUFFAGE DE L'AIR DE VENTILATION

Le modèle décrit précédemment étant multi-zones, il permet d'étudier le préchauffage d'air neuf dans des espaces comme des vérandas ou des balcons vitrés. Une application a concerné une opération de réhabilitation de logements sociaux à Montreuil, dans le cadre du projet européen REGEN LINK. D'après les calculs, l'isolation par l'extérieur, le remplacement du simple vitrage par du double vitrage à isolation renforcée et les balcons vitrés permettent de réduire par deux les besoins de chauffage, qui passent de  $160$  à  $80 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . Les mesures conduisent à une consommation supérieure de 20% aux estimations, car la température des logements est passée de  $20$  à  $23^\circ\text{C}$  et une action est en cours pour revenir progressivement à un niveau de température plus modéré.

Un autre projet européen, SOLANOVA, vise à réduire d'un facteur 6 la consommation de logements semblables, situés en Hongrie. Dans ce cas, l'air neuf est préchauffé par une ventilation double flux. Le modèle estime les besoins après réhabilitation à  $30 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ , dans un immeuble sans balcon (ce qui réduit les ponts thermiques). Les mesures sont en cours sur ce bâtiment.

## 2.3. COMPOSANTS SOLAIRES THERMIQUES

De nombreux travaux effectués durant les années 70-80 dans ce domaine ont conduit à l'élaboration de modèles détaillés et simplifiés, en particulier le logiciel TRNSYS (Klein, 1976). Un modèle de système d'eau chaude sanitaire solaire issu de ces travaux a été chaîné au simulateur de bâtiments décrit précédemment, ainsi qu'un modèle de plancher chauffant. La stratification des températures dans le ballon d'eau chaude est prise en compte en découpant le ballon en 100 segments. Le modèle de capteur sélectionné est un modèle sans inertie.

Ces modèles, adaptés au pas de temps horaire et donc de niveau de détail homogène à celui du simulateur global, permettent d'évaluer l'intérêt énergétiques de systèmes solaires thermiques. Les consommations d'énergie liées à l'eau chaude sanitaire tendent à devenir importantes en valeur relative, les besoins liés au chauffage étant réduits. Il est donc important d'intégrer ces aspects dans la conception globale des bâtiments.

## 2.4. EVALUATION DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES À L'ÉCLAIRAGE

Un modèle issu de la méthode « Lumen » (Rabl et Kreider, 1994) a été développé et chaîné au simulateur COMFIE. L'éclairage naturel est d'abord déterminé en considérant une pièce rectangulaire découpée en 9 mailles (3 en largeur x 3 en profondeur), puis la consommation d'électricité correspondant à l'éclairage artificiel est évaluée en fonction d'un scénario (par exemple possibilité d'allumer seulement les lampes les plus éloignées des fenêtres ou éclairage en tout ou rien).

L'efficacité lumineuse du ciel est évaluée à chaque pas de temps, en fonction d'un type de ciel déduit des données de rayonnement solaire global et diffus. Le calcul de l'éclairage naturel prend en compte le facteur de transmission et

la surface des vitrages, les masques éventuels et des coefficients d'utilance, qui correspondent à l'efficacité avec laquelle la lumière parvient sur le plan de travail compte tenu des réflexions sur les différentes parois.

La consommation d'électricité pour l'éclairage artificiel constitue un apport interne d'énergie. Cette valeur est alors transmise au simulateur thermique, de manière à être prise en compte dans l'évaluation des besoins de chauffage et de climatisation.

## 2.5. SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES INTÉGRÉS AUX BÂTIMENTS

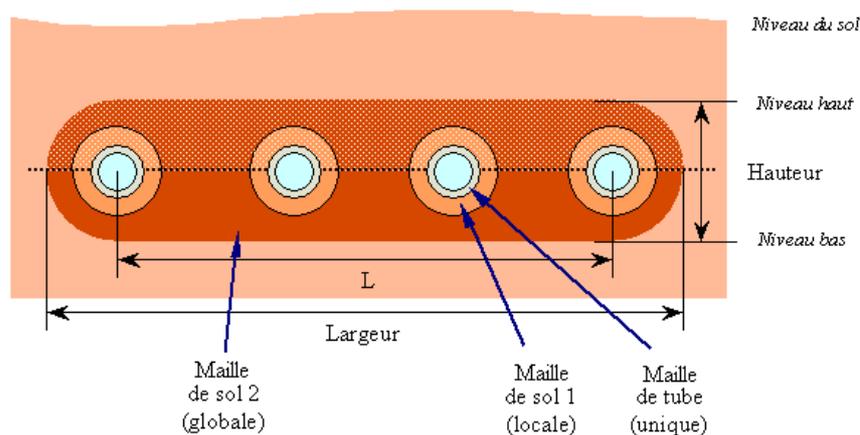
La production d'électricité est évaluée en utilisant le modèle à une diode (Ricaud, 1997). Cette production dépend de la température des modules, et donc de leur intégration au bâti. D'autre part, les modules peuvent constituer l'absorbeur ou la couverture d'un capteur solaire à air (ils sont semi-transparents si les cellules sont espacées), ce qui permet une récupération supplémentaire d'énergie sous forme de chaleur.

Un modèle a été développé, en collaboration avec l'Université de Cergy Pontoise pour la partie mécanique des fluides, et chaîné au modèle de bâtiment pour évaluer la production d'électricité et de chaleur dans différentes configurations : mur solaire, capteur à air, cheminée solaire accentuant la ventilation naturelle (Guiavarch, 2003).

## 2.6. ECHANGEURS AIR/SOL

Ce système, appelé parfois « puits canadien » ou « puits provençal », a pour objectif de tempérer l'air neuf en le faisant circuler dans des tubes enterrés : en hiver, le sol est moins froid que l'extérieur donc les besoins de chauffage sont réduits ; en été, le sol reste plus frais que l'extérieur donc le bâtiment est rafraîchi.

Le modèle met en œuvre un maillage du sol comprenant des couches cylindriques autour des tubes, et une couche plus épaisse englobant la nappe de tubes (cf. figure ci-dessous). Ces couches sont séparées en deux parties, supérieure et inférieure, car la température du sol varie en fonction de la profondeur. Cette température est estimée par le modèle du massif semi-infini, ce travail étant réalisé en collaboration avec l'INSA de Toulouse, en considérant une variation annuelle sinusoïdale de la température extérieure (les variations journalières deviennent négligeables au delà d'une certaine profondeur), et en intégrant le rayonnement solaire absorbé par le sol.



*Maillage du sol autour des tubes enterrés*

Les tubes et les mailles de sol sont sectionnés en 10 tronçons le long du parcours de l'air. Le système d'équations différentielles résultant du bilan thermique des mailles est ensuite transformé par diagonalisation matricielle pour faciliter sa résolution numérique. L'objet informatique a été chaîné au simulateur de bâtiment, l'échangeur air/sol pouvant alimenter une ou plusieurs zones thermiques. Dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Canada CLIM, le modèle a été appliqué dans le cas d'une maison de retraite à Presles (95) et la comparaison avec les résultats de mesures est en cours.

### 3. PRINCIPALES HYPOTHÈSES ET LIMITES DES MODÈLES, VALIDATION

Le modèle de bâtiment repose sur le concept de "zone thermique", sous-ensemble du bâtiment considéré à température homogène. Ce modèle présente des limites pour des pièces de grande hauteur dans lesquelles l'air est stratifié (par exemple des atriums). Dans le futur, il sera peut-être possible de diviser ces pièces en plusieurs zones (par exemple rez-de-chaussée et mezzanine) et de considérer un échange d'air interzones calculé de manière simplifiée, mais cela n'est pas réalisé pour le moment.

Les équations de mécanique des fluides ne sont pas intégrées dans notre démarche de simulation simplifiée. Les échanges d'air sont donc approximés par des corrélations (Blay, 1986). Les infiltrations d'air ne sont pas calculées, car il faudrait connaître la distribution des vitesses et directions du vent sur le site même du bâtiment une fois construit, ce qui pose problème. Des indications sont données pour évaluer les échanges d'air en fonction de la configuration.

Les transferts convectifs et radiatifs au niveau des surfaces des parois sont combinés dans un coefficient d'échange "h" unique. La conséquence est que la température de zone n'est pas une température d'air, mais se rapproche de la température résultante, pondération de la température d'air et des températures des parois. Cette température est un bon indicateur du confort thermique, et nous supposons que l'occupant règle le thermostat pour obtenir une température résultante confortable : il peut compenser un effet de paroi froide en augmentant un peu la consigne. C'est donc la température résultante qui est régulée et non la température d'air.

Le rayonnement solaire entrant dans une zone par les vitrages est réparti sur les différentes parois opaques au prorata des surfaces, après avoir déduit, en fonction des facteurs d'absorption, la fraction réfléchi vers l'extérieur. On considère donc ce rayonnement comme diffus, sans suivre la "tâche solaire". Il est difficile de savoir comment les espaces seront meublés, et en pratique le rayonnement direct est réfléchi par les meubles. La répartition du flux, considéré comme diffus, est donc sans doute une hypothèse assez réaliste.

Comme on l'a vu précédemment, les phénomènes non linéaires ou à paramètres variables sont découplés du système linéaire fixe. Cela peut introduire des écarts sur les dynamiques rapides. En fait, l'outil est utilisé en pratique avec un pas de temps d'une heure lorsqu'on évalue des besoins de chauffage/climatisation, et d'un quart d'heure à un dixième d'heure lorsqu'on souhaite obtenir des profils de température plus précis (étude de l'intermittence ou du confort d'été). L'analyse n'est donc pas poussée jusqu'aux intervalles de temps très fins, des modèles plus détaillés seraient nécessaires.

Les phénomènes de changement de phase ne sont pas pris en compte dans le modèle actuel, en ce qui concerne l'humidité ou le stockage par chaleur latente. La prise en compte de l'humidité pourrait se faire par des bilans enthalpiques pour chaque zone, d'une manière analogue à la prise en compte actuelle des échanges d'air. L'intégration de matériaux à changement de phase nécessiterait des sorties supplémentaires pour déterminer les températures d'interface, ce qui ne pose pas de problème comme l'a montré une étude concernant des murs solaires.

Il ne semble donc pas que l'étape de réduction modale soit un frein pour la prise en compte des phénomènes complexes décrits ci-dessus, problème commun à tous les outils de simulation. L'avantage des modèles réduits en terme de réduction du temps de calcul permet de décrire plus finement le bâtiment (nombre de zones) et/ou d'effectuer des études de sensibilité plus complètes.

Le modèle utilisé pour les calculs d'éclairage est plus simplifié : les modèles détaillés imposent un calcul par suivi de rayons, très coûteux en temps calcul et qui n'est en général pas effectué heure par heure, mais par type de ciel et pour des bâtiments particuliers (musées par exemple).

Des activités de validation ont été menées, par comparaison à des mesures sur cellule test ou à d'autres modèles détaillés (Peuportier, 2005). Il serait utile de poursuivre ces travaux dans le cas de bâtiments à très faibles besoins, dans lesquels les aspects dynamiques prennent une importance accrue.

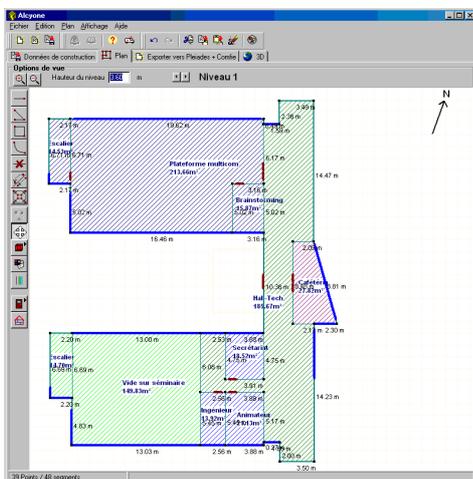
#### 4. DES ÉCO-TECHNIQUES À L'ÉCO-CONCEPTION

Parmi les concepts élaborés pour améliorer la performance thermique des bâtiments, le standard « maisons passives » est sans doute l'un des plus intéressants actuellement. Il s'agit de logements très bien isolés, tant au niveau des parois opaques que vitrées, et équipées d'une ventilation double flux. Les besoins de chauffage annuels sont réduits à moins de 15 kWh/m<sup>2</sup>, ce qui permet de les couvrir par un chauffage à air, en complément de la ventilation double flux : le système classique de chauffage (radiateurs, convecteurs ou plancher chauffant) n'est alors plus nécessaire, ce qui réduit les coûts. Ce concept peut être complété par un système d'eau chaude sanitaire solaire. En se basant sur cette approche, l'architecte Rolf Disch a construit à Freiburg (Allemagne) des maisons à énergie positive : grâce à une toiture photovoltaïque, les bâtiments produisent davantage d'énergie qu'ils n'en consomment. Les besoins de chauffage annuels, mesurés par l'Institut Fraunhofer pour les systèmes énergétiques solaires, sont de 11 kWh/m<sup>2</sup> (Wittwer et Voss, 2001).

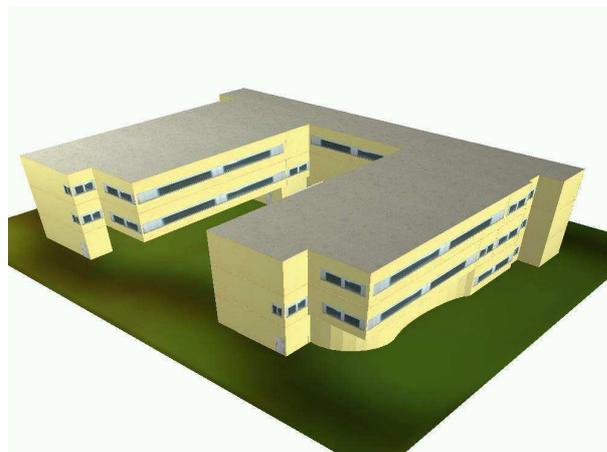
Ces concepts ont été reproduits à de nombreux exemplaires en Allemagne mais aussi en Suisse, en Autriche et en Suède, et avec des styles architecturaux variés. Ils sont plus difficiles à mettre en œuvre en réhabilitation, car d'une part certains ponts thermiques sont difficiles à corriger (liaisons au niveau des fondations, et des balcons éventuels) et d'autre part la mise en œuvre d'une ventilation double flux nécessite le passage de gaines d'air dans les logements. L'isolation thermique des bâtiments anciens pose également des problèmes : limite de parcelle et esthétique pour l'isolation par l'extérieur, encombrement et esthétique pour l'isolation par l'intérieur).

D'autre part, il peut être intéressant d'adapter la conception à un site donné, en particulier en fonction des masques et de l'exposition au soleil. Les outils d'aide à la conception ont donc une utilité, au delà des concepts « prêts à l'emploi ». Mais l'utilisation des modèles en tant qu'aide à la conception nécessite une interface utilisateur adaptée à la pratique des professionnels concernés, en particulier les bureaux d'études techniques et les architectes : il faut réduire le temps de saisie d'un projet, et faciliter l'interprétation des résultats.

C'est dans cet objectif que l'environnement PLEIADES a été conçu et développé par Gefosat puis IZUBA énergie avec le soutien de l'ADEME (Salomon, 2005), dont a bénéficié l'ensemble des travaux décrits dans cette communication. ALCYONE, un module de saisie graphique par niveau avec visualisation en 3D permet de tracer rapidement un projet, d'affecter des ouvertures (fenêtres, portes) sur les parois, etc. Une image scannée peut être insérée en fond d'écran pour faciliter la saisie, même dès la première esquisse. ALCYONE permet également de visualiser les projets en 3D avec diverses possibilités de représentation (zoom, vues par niveau, rotation, affichage des zones thermiques, etc.). Il est ainsi possible de contrôler facilement la cohérence de la saisie, mais aussi de visualiser une première esquisse (cf. figure ci-dessous).



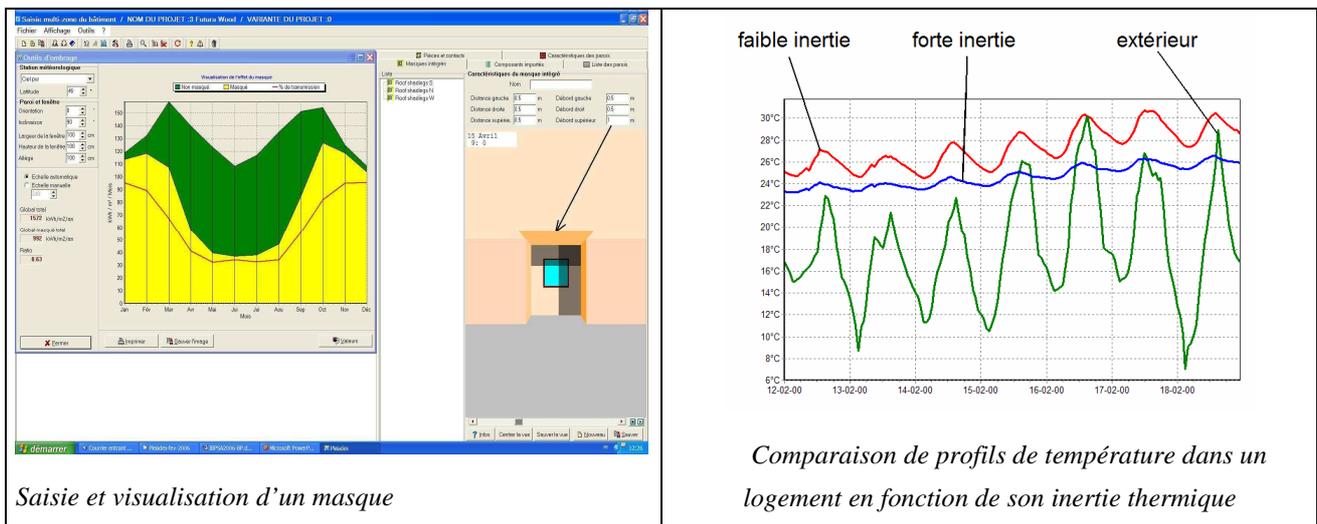
Saisie graphique par niveau



Visualisation 3D  
Cf. [www.izuba.fr](http://www.izuba.fr)

Le logiciel comporte plusieurs bibliothèques de données thermiques sur les matériaux et les éléments constructifs, les menuiseries, etc. Il comprend aussi des bibliothèques concernant la gestion d'un bâtiment selon un scénario horaire pour une semaine-type (occupation, apports internes, températures de consigne de chauffage ou de climatisation, gestion des occultations).

En phase de conception, il est par exemple utile d'étudier un masque intégré au dessus d'une baie vitrée (auvent, brise-soleil etc.). Le logiciel permet de visualiser l'ombre créée au cours de l'année, et la transmission du rayonnement mois par mois (cf. la figure ci-dessous). Un éditeur de graphes facilement paramétrable permet l'analyse graphique des résultats, en particulier les profils de température et la comparaison des variantes (cf. l'exemple ci-dessous).



PLEIADES + COMFIE permet ainsi à un architecte, un BET ou un maître d'ouvrage d'étudier un projet de construction ou de réhabilitation dans une démarche complète d'analyse thermique, depuis les premières esquisses jusqu'aux étapes plus avancées du projet.

## 5. EXTENSIONS À L'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Les objectifs de réduction des consommations énergétiques sont liés à des préoccupations environnementales comme la protection du climat et la préservation des ressources. Il est alors intéressant de compléter l'analyse énergétique par l'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments. Pour éviter des « déplacements de pollution » (par exemple réduire une pollution dans un bâtiment mais en générant des impacts au niveau de la production d'énergie), il convient de prendre en compte les impacts en amont et d'inclure le cycle de vie des bâtiments : depuis l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux et le chantier de construction jusqu'au chantier de démolition et au traitement des déchets.

Le logiciel COMFIE a alors été chaîné à l'outil d'analyse de cycle de vie EQUER (Polster, 1995), permettant d'évaluer les impacts environnementaux sous la forme d'une douzaine d'indicateurs : ressources en énergie, en eau et en matières premières épuisables, contribution au changement climatique et autres pollutions de l'air, pollution de l'eau, toxicité, production de déchets. Cette double approche, à la fois précise sur la maîtrise des ambiances et à large spectre sur l'environnement permet de choisir entre différentes options avec une meilleure connaissance du comportement interne d'un bâtiment et de son impact environnemental global.

L'analyse de cycle de vie a ensuite été étendue à l'échelle d'un quartier, dans le cadre du projet européen Eco-housing et du projet ADEQUA. Le modèle ARIADNE intègre plusieurs types de bâtiments, des rues et des espaces extérieurs, ainsi que des réseaux : eau potable, eaux usées, réseau de chaleur (Popovici, 2006). Ce modèle a été appliqué à titre expérimental sur trois opérations à Trondheim (Norvège), Dunaujvaros (Hongrie) et Montreuil (93). L'échelle du quartier permet d'aborder des aspects d'organisation d'un plan masse, qui ont des conséquences importantes en terme

d'orientation et d'exposition au soleil des façades, de compacité des constructions, d'éclairage public et d'efficacité de certains équipements collectifs.

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet ensemble de modèles développé depuis une vingtaine d'années et complété en capitalisant les travaux successifs constitue une plate forme d'aide à la conception, avec actuellement près de 150 utilisateurs. Une utilisation pédagogique plus large serait utile, en particulier pour la formation des architectes, qui intègre encore assez peu ces aspects.

Plusieurs pistes peuvent être proposées pour améliorer la précision des modèles et les valider, prendre en compte des aspects supplémentaires ou de nouvelles technologies. Le chaînage avec d'autres outils techniques (par exemple les calculs d'acoustique) et avec l'évaluation économique répondrait aussi à une demande des praticiens.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

Bacot P., Analyse modale des systèmes thermiques, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1984

Bacot P., Neveu A., Sicard J., Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment, Revue Générale de Thermique, n°267, Paris, 1984

Blay D., Comportement et performance thermique d'un habitat bioclimatique à serre accolée, Bâtiment-Energie n°45, 1986

Carter C., A validation of the modal expansion method of modelling heat conduction in passive solar buildings, Solar Energy 23 n°6, 1979

Goetzberger A., Schmid J. and Wittwer V., Transparent insulation system for passive solar utilization in buildings, 1st E.C. Conference on solar heating, Amsterdam, 1984

Guiavarch A., Etude de l'amélioration de la qualité environnementale du bâtiment par intégration de composants solaires, thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, novembre 2003

Klein, S. A., Duffie, J.A., and Beckman, W.A., "TRNSYS - A Transient Simulation Program", ASHRAE Trans, 82, 623, 1976

Lefebvre G., Analyse et réduction modale d'un modèle de comportement thermique de bâtiment, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1988

Peuportier B. et Blanc Sommereux I., Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings, International Journal of Solar Energy, 1988

Peuportier B. and Michel J., Comparative analysis of active and passive solar heating systems with transparent insulation, Solar Energy vol. 54 n°1, janvier 1995

Peuportier B., Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique, Journée SFT-IBPSA « Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment », La Rochelle, mars 2005

Polster B., contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie, thèse de docteur en énergétique, Ecole des Mines de Paris, décembre 1995

Popovici E., Contribution à l'analyse de cycle de vie des quartiers, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, février 2006

Rabl A. et Kreider J., Heating and Cooling of Buildings, Mac Graw Hill, 1994

Ricaud, A., Photopiles solaires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne, 1997

Salomon T., Mikolasek R. et Peuportier B., Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE, Journée SFT-IBPSA « Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment », La Rochelle, mars 2005

Trombe F. et Michel J., Brevet ANVAR TROMBE MICHEL BF 7123778 (France 29/06/1971)

Watremez G., Campana D., Neirac F., Elaboration d'un logiciel sur micro ordinateur pour l'aide à la conception des bâtiments en pays tropicaux secs, rapport final REXCOOP, 1985

Wittwer V. et Voss K., Solar Passiv-haus „Wohnen und Arbeiten“, Freiburg, Vauban, rapport n° TOS-1-0103-VK-02, mars 2001

# RÉALISATION D'UN BÂTIMENT À ENERGIE POSITIVE À L'ILE DE LA RÉUNION. DE LA PHASE PROGRAMME A LA CONCEPTION.

François Garde<sup>1</sup>, Dalila Bentaleb<sup>1</sup>, Alain Bastide<sup>1</sup>  
Eric Ottenwelter<sup>2</sup>, Eric Pothin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique du Bâtiment et des Systèmes, Université de La Réunion.

<sup>2</sup>Bureau d'études Imageen, Technopole de La Réunion, Ile de La Réunion.

## RESUME

Ce papier présente un projet de bâtiment universitaire à énergie positive à l'Ile de La Réunion. L'objectif est de réaliser un bâtiment consommant deux fois moins d'énergie qu'un bâtiment standard. La méthodologie a porté sur des exigences définies dès la phase programme sur la conception thermique et les systèmes. Les innovations portant sur la conception architecturale du bâtiment, sur les performances des systèmes et sur les simulations numériques sont présentées. Les toitures photovoltaïques intégrées au bâtiment assurent la production de l'énergie électrique qui permettra au bâtiment de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme.

## INTRODUCTION

### **Le contexte énergétique de l'Ile de La Réunion**

L'Ile de La Réunion, à l'instar de l'ensemble des milieux insulaires, rencontre l'éternel problème de la réponse des moyens de production à la demande énergétique. Ceux-ci arrivent de plus en plus difficilement à répondre à l'appel de puissance de l'île provenant à 87% du secteur du bâtiment. La croissance est de l'ordre de 7 % par an, aussi bien en puissance qu'en énergie. Pour le moment, l'absence de réglementation thermique autorise la construction de bâtiment tels que celui représenté par la figure 1.



Figure 1: Un contre-exemple parfait en matière de conception thermique de bâtiment en climat tropical. La façade vitrée sans protection est une façade Est.

Les institutions publiques telles que le Conseil Régional encouragent heureusement la construction de bâtiments à haute qualité environnementale. Le Conseil Régional a par ailleurs financé une planification énergétique à l'échelle de La Réunion baptisée le PRERURE<sup>1</sup> dont l'objectif final est d'atteindre l'autonomie énergétique de La Réunion en 2025 (Lopez, 2000). Les conclusions de l'étude portent entre autre sur le développement de la maîtrise de l'énergie –ie MDE et une planification de diverses énergies renouvelables.

### **L'Université de La Réunion et la MDE**

L'Université de La Réunion connaît à son échelle les mêmes problèmes que l'Ile de La Réunion en général, à savoir, une croissance énergétique similaire, des problèmes de MDE récurrents et un patrimoine immobilier énergivore. Le ratio de consommation énergétique est égal à 165 kWh par an et par mètre carré de surface utile (kWh/an/m<sup>2</sup>SU). Ce ratio comprend la climatisation, ses auxiliaires et l'ensemble des autres usages (principalement parc informatique et éclairage). La facture d'électricité 2004 est de l'ordre de 560 k€ dont 40% est dû à la climatisation. L'Université a mis en place depuis cinq ans une politique énergétique de MDE. Nous allons dans ce papier présenter la méthodologie adoptée pour les bâtiments neufs et illustrerons nos propos en présentant le projet de bâtiment à énergie positive.

## METHODOLOGIE ET OBJECTIFS

Les objectifs énergétiques que nous nous fixons à l'horizon 2020 sont ceux fixés par le protocole de Kyoto, à savoir diminuer d'un facteur 4 les émissions de gaz à effet de serre et donc la consommation des bâtiments. La figure 2 représente les ratios énergétiques actuels, ceux fixés pour les bâtiments universitaires neufs optimisés et ceux fixés pour le bâtiment à énergie positive, l'objectif étant d'atteindre en 2020 un ratio de 40 kWh/an/m<sup>2</sup> SU.

Le principe de base de notre méthodologie est d'essayer d'atteindre les conditions de confort thermique et visuel par des solutions passives. La climatisation et l'éclairage artificiel doivent être

<sup>1</sup> Plan Régional sur les Energies Renouvelables et l'Utilisation Rationnelle de L'Énergie.

utilisés en dernière limite. Pour se faire, l'ensemble des bâtiments neufs de l'université doit respecter un certain nombre de critères de qualité portant sur différents points concernant le bâtiment, à savoir :

- L'environnement autour du bâtiment ;
- La conception thermique et aéraluque ;
- Les systèmes et équipements techniques ;
- La maîtrise et le suivi des énergies.

Ces critères de qualité sont énoncés dans une note MDE intégrée dans le programme de construction du bâtiment. Plus récemment, les bâtiments doivent également respecter des prescriptions contenues dans l'outil PERENE (Garde 2005). Le programme PERENE –ie PERFORMANCE Énergétique des Bâtiments, est un programme qui préfigure un projet de réglementation thermique dans les DOM pour les bâtiments tertiaires. En effet, devant la lenteur des pouvoirs publics à mettre en place une réglementation, même minimale, dans le domaine du bâtiment, les professionnels locaux ont décidé de mettre en place un outil d'aide à la conception appliqué à la fois au résidentiel et au tertiaire, permettant de bien concevoir un bâtiment quelle que soit la zone climatique de l'île (Garde 2005). Des objectifs de puissance installée et de consommation énergétique sont indiqués. L'outil est opérationnel depuis 2004 et est actuellement en phase d'expérimentation.

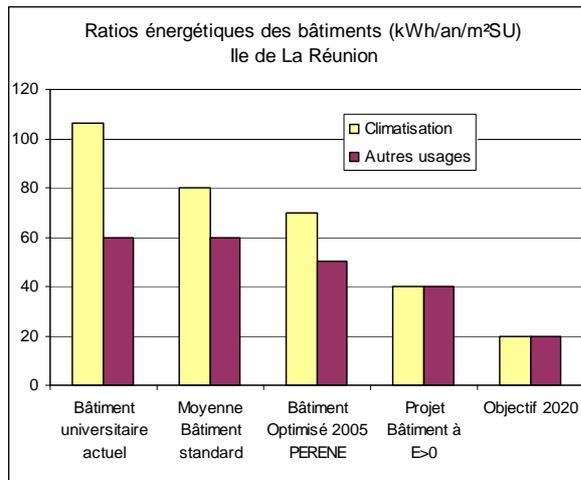


Figure 2 : Objectifs de ratio énergétiques.

Le projet de bâtiment à énergie positive fait partie des bâtiments retenus lors de cette phase d'expérimentation. Il est également prévu que ce projet obtienne le label Greenlight pour l'éclairage. Ce label européen récompense les bâtiments bien conçus en terme d'éclairage artificiel et naturel. Les objectifs clairement affichés sont de faire de ce bâtiment la référence dans les Départements d'Outre Mer français en terme d'optimisation énergétique.

### LE PROJET DE BÂTIMENT A E>0

Le projet est composé de quatre petits bâtiments parallèles les uns aux autres. Les façades principales sont orientées Nord et Sud (voir Figure 3). Les deux bâtiments situés au Nord vont accueillir une

formation de Services et Réseaux de Communication de niveau bac +2 et les deux autres bâtiments plus au sud une formation en master Génie Civil de niveau ingénieur.

Les typologies de locaux sont :

- des bureaux pour les deux départements situés au Rdc des bâtiments latéraux ;
- des salles dites banalisées pour l'enseignement des travaux dirigés –ieTD ;
- des salles informatiques.



Figure 3 : Vue 3D du bâtiment. L'azimut des façades Nord est de -14°Est/Nord géographique..

La répartition des surfaces utiles par type de salle est donnée par le tableau 1. On note que 47 % de la surface utile est climatisée. Il s'agit d'une exigence du programme dans la mesure où nous exigeons que les salles de TD ne soient pas climatisées. A charge aux concepteurs de trouver les solutions passives pour atteindre un certain niveau de confort.

Tableau 1 : Répartition des surfaces utiles par typologie de salle

Locaux	Surfaces climatisées	Surfaces non climatisées
Bureaux départements	401 m <sup>2</sup>	
Salles informatiques	423 m <sup>2</sup>	
Salles banalisées		401 m <sup>2</sup>
Autres		512 m <sup>2</sup>
<b>Sous Total</b>	<b>824 m<sup>2</sup> (47%)</b>	<b>913 m<sup>2</sup>(53%)</b>
<b>Total surface utile</b>	<b>1737 m<sup>2</sup></b>	

## RESULTATS ET DISCUSSION : CONFORT THERMIQUE

### **Objectifs :**

Comme nous l'avons dit précédemment, l'objectif est de réduire voire d'annuler la période de climatisation. Les bâtiments standards ont une période de climatisation qui peut durer toute l'année. En moyenne, celle-ci dure sept mois (de début octobre à mi mai). Pour atteindre cet objectif, l'environnement autour du bâtiment, la conception thermique et aéraluque ont une importance primordiale.

### Environnement autour du bâtiment

Le programme de construction ainsi que PERENE imposent une végétalisation périphérique d'au moins 3 mètres de large autour du bâtiment, ceci pour éviter que l'air s'échauffe et pénètre dans les locaux lorsque ceux-ci fonctionnent en ventilation naturelle. Les figures 3 et 4 montrent que ce point est respecté. Par ailleurs, les orientations des façades principales nord-sud limitent les apports solaires sur les pignons est et ouest. De plus, celles-ci sont perpendiculaires aux brises thermiques soufflant en saison chaude. La ventilation des locaux est donc optimisée.



Figure 4 : Vue des façades nord (protections solaires en lame de bois) et ouest (bardage tôle et bois).

### Conception thermique de l'enveloppe

PERENE et le programme du bâtiment fixent des valeurs de facteur solaire pour les parois opaques et les vitrages. Le projet respecte ces valeurs de facteur solaire à ne pas dépasser. Les solutions techniques pour atteindre les valeurs PERENE sont les suivantes :

- Toiture : isolation de 9 cm de polystyrène sur la dalle avec une surtoiture ventilée.

- Mur et vitrages nord et sud: Débord de toiture, coursives et brises soleil déportés en lames de bois fixées sur des supports obliques en acier galvanisé. Concernant l'optimisation des brises soleil, leur modélisation est quasiment impossible avec des codes de simulation thermique classiques. Pour toutes les façades, le nombre de lames, leur espacement et leur angle a donc été déterminé à l'aide d'une reconstitution du bâtiment en 3D sous Autocad. La figure 6 montre l'efficacité des protections solaires sur une façade Nord pour une journée du mois d'avril. L'objectif in fine est d'avoir une protection totale pendant les horaires d'enseignement (de 8h à 17h) pour les façades nord jusqu'au 30 avril et pour les façades sud durant le mois de décembre.

### Conception aéralique

Le principe de base en climat tropical est d'avoir des locaux traversants, -ie d'avoir deux façades opposées donnant sur l'extérieur, avec un niveau de porosité supérieur à 20%. Ce principe est imposé dans le programme de construction. Ainsi, toutes les salles d'enseignements sont traversantes avec un niveau de porosité supérieur à 30% assuré par des menuiseries de type jalousies qui ont l'avantage de pouvoir réguler les flux d'air, mais qui sont également anti-cyclonique et anti-effraction. De ce fait, les locaux peuvent continuer à fonctionner en ventilation naturelle la nuit et être rafraîchis par ventilation nocturne. Grâce à ce principe, on peut atteindre des niveaux de renouvellement d'air compris entre 40 et 100 vol/h et des vitesses intérieures de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  pour des vitesses de vent de l'ordre de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ .

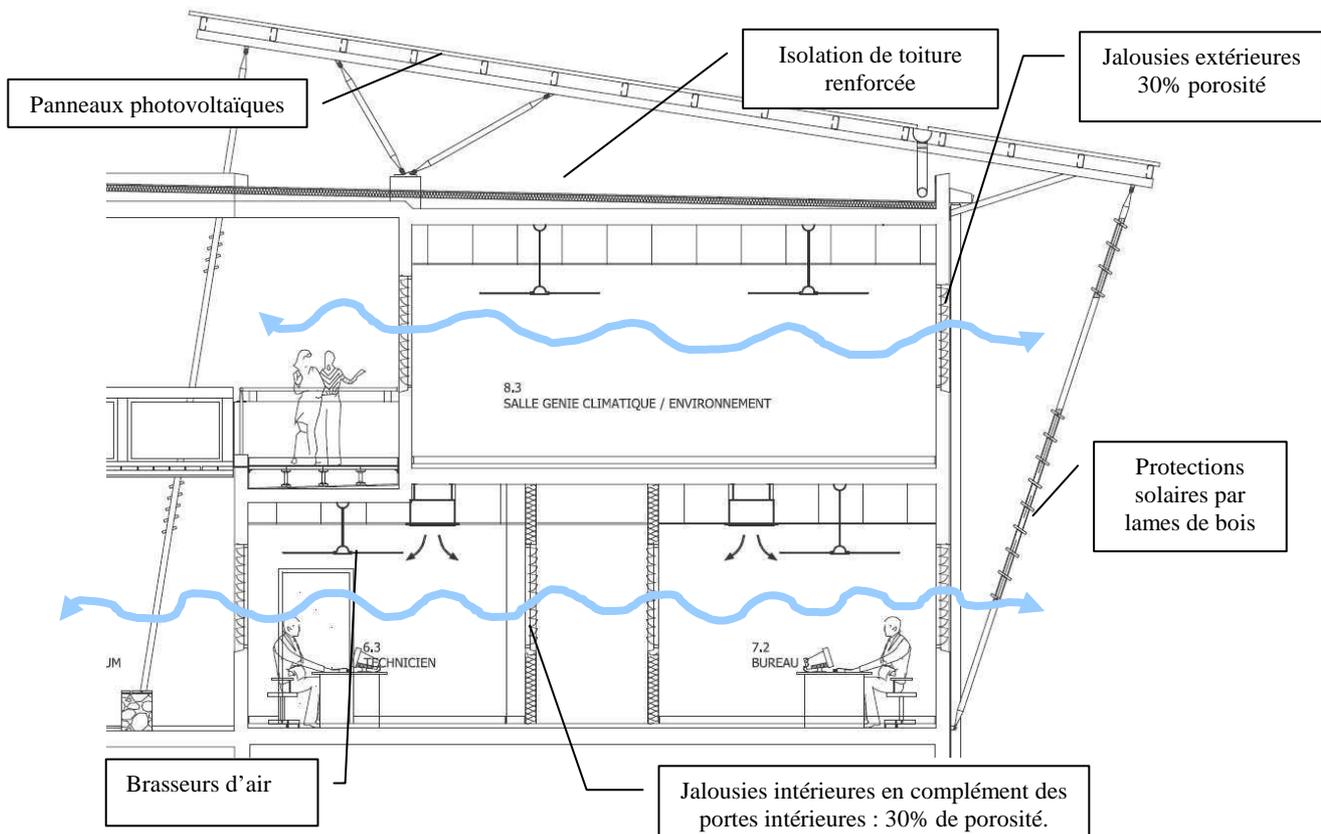


Figure 5 : Solutions techniques retenues pour la conception thermique et aéralique du bâtiment.

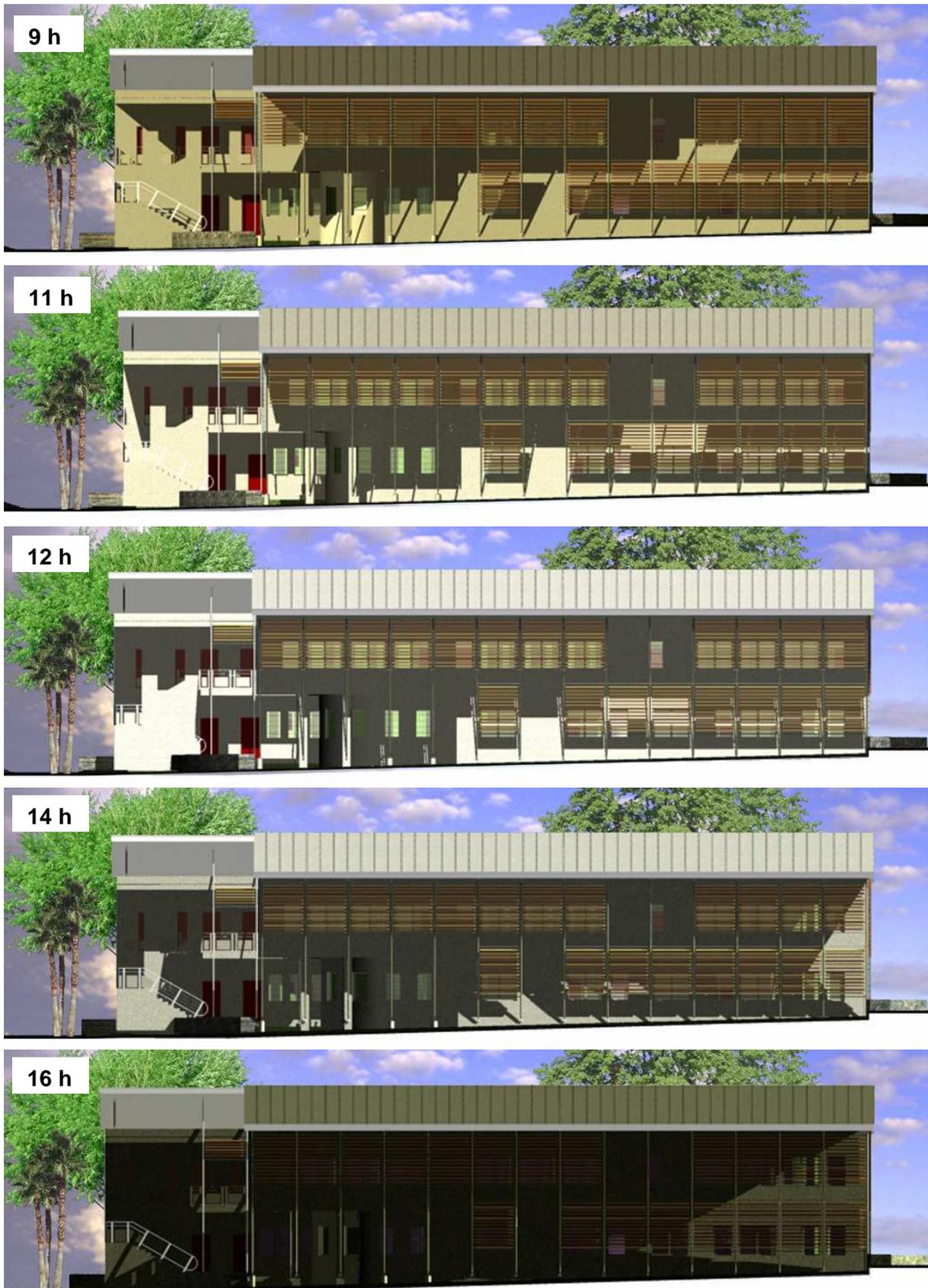


Figure 6 : Simulation de l'efficacité des protections solaires de la façade Nord du bâtiment Nord à différentes heures d'une journée du mois d'avril : 9h 11h, 12h 14h 16h. Les ouvertures sont à l'ombre quelque soit l'heure.

La conception des bureaux est plus problématique car, comme le montre la figure 5, nous sommes dans une configuration standard avec un couloir central qui dessert les bureaux. L'originalité du projet est d'avoir prévu des jalousies intérieures en verre sablé qui favorisent et assurent une meilleure répartition de l'écoulement de l'air intérieur. Ceci permet d'avoir une porosité intérieure de 30 %. Enfin, une autre innovation est d'avoir prévu des brasseurs d'air dans toutes les salles y compris dans les locaux climatisés. Ceux-ci assurent le complément de vitesse d'air pour les jours sans vent et permettent d'avoir une période de transition avant la période de climatisation active (voir Figures 5, 11 et 12).

### Simulations en régime dynamique

Les simulations en régime dynamique ont pour objectif de prédire les différentes périodes de fonctionnement : ventilation naturelle, brasseurs d'air et climatisation active. Elles ont été menées par les chercheurs de l'université en collaboration avec le bureau d'étude thermique. Le code utilisé est un code de simulation thermique et aérodynamique pouvant, à l'aide d'un modèle de grandes ouvertures en pression, modéliser l'effet de la ventilation naturelle sur le confort thermique. Le modèle utilisé pour les transferts de masse est le modèle de Roldan détaillé dans (Boyer 1998). Le modèle considère un seul nœud d'air par pièce. La stratification est négligée. Les indices de confort choisis sont le diagramme de confort de Givoni et la température résultante  $T_{res}$ . La formule de  $T_{res}$  intègre la température d'air  $T_a$  et la moyenne des températures de parois  $T_m$  pour une pièce ventilée naturellement ( $T_{res} = 2/3.T_a + 1/3.T_m$ ). Les zones de confort permettent de connaître le pourcentage de points compris dans les différentes zones de confort ( $0 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  et  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ) ainsi que le nombre d'heures d'inconfort. La température résultante permet d'avoir une idée des différentes périodes de fonctionnement. Le fichier météo utilisé est une année type au pas de temps horaire. Celle-ci a été reconstituée à partir d'une base de données incomplète mesurée sur site. La méthode de reconstitution est présentée dans (David 2005). La vitesse moyenne d'air intérieure est estimée à l'aide d'un coefficient de corrélation entre la porosité et la vitesse d'air extérieure provenant de (Allard 02). Ainsi, pour une porosité de 30 % et une vitesse de vent de  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ , nous avons des vitesses moyennes de  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Concernant la vitesse d'air avec les brasseurs d'air, des mesures sur site montrent que nous obtenons des vitesses supérieures à  $1 \text{ m.s}^{-1}$ .

Les figures 7 et 8 montrent le résultat des simulations pour un bureau de 3 personnes. Concernant les charges internes, nous avons supposé que l'éclairage naturel est suffisant. Les ordinateurs ont une puissance de 200 W, ce qui est légèrement surestimé par rapport aux ordinateurs plus récents à écran TFT où la puissance moyenne est de 120 W. La figure 7 et

le tableau 2 montrent que les couples température résultante/humidité sont à 89% compris dans l'ensemble des zones de confort pour la période du 1<sup>er</sup> octobre au 31 avril, ce qui correspond à la saison chaude. Les occupants auront donc une sensation d'inconfort 11 % du temps et principalement à partir du début de l'après midi. En nombre d'heures, cela représente 160 h. On peut donc imaginer un fonctionnement en ventilation naturelle le matin et passer en climatisation active l'après midi.

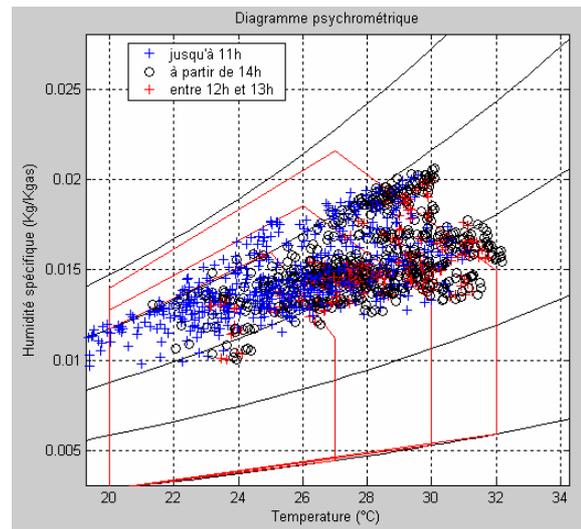


Figure 7 : Résultats des simulations pour un bureau pendant la saison chaude (1<sup>er</sup> octobre au 31 avril).

Les mêmes simulations ont été menées pour une salle de TD de 60 m<sup>2</sup> avec 40 étudiants et une salle informatique de 50 m<sup>2</sup> avec 20 étudiants et 20 PC. Dans chaque cas, on suppose que l'éclairage naturel est suffisant. Le tableau 2 synthétise les résultats. Bien évidemment, le pourcentage d'inconfort est le plus élevé pour la salle informatique. Le nombre d'heures d'inconfort –ie le nombre de points en dehors des zones de confort, est le double de celles du bureau. Ce nombre d'heures correspond à la durée de fonctionnement de la climatisation active.

Tableau 2 : Pourcentage de points situés dans les zones de confort et nombre d'heures inconfortables

	Bureau	Salle TD	Salle info
$0 \text{ m.s}^{-1}$	24%	26%	23%
$0,5 \text{ m.s}^{-1}$	38%	38%	36%
$1 \text{ m.s}^{-1}$	27%	22%	23%
<b>Total %</b>	<b>89%</b>	<b>86%</b>	<b>82%</b>
Nbre d'heures inconfortables	160 h	270 h	335 h

La figure 8 permet, grâce à l'évolution annuelle de la température résultante, de prévoir les différentes périodes de fonctionnement : ventilation naturelle, brasseurs d'air, climatisation. La transition ventilation naturelle/brasseurs d'air s'effectue d'une part grâce à notre expérience et connaissance du site et du climat mais également sur le critère d'une température

résultante maximale moyenne supérieure à 28°C et enfin sur une étude de la transition des régimes de vents Alizés/brises thermiques. La transition brasseurs d'air/climatisation a été définie selon le critère d'une température résultante supérieure à 30°C. En effet, un occupant en activité du bureau habillé en tenue d'été commence à ressentir une sensation de chaleur au delà de 30°C avec une vitesse d'air de 1 m.s<sup>-1</sup>. Rappelons que la température ressentie à cette vitesse est 4°C inférieure à la température résultante effective. Ainsi, nous voyons que pour un bureau la climatisation active n'est nécessaire qu'à compter de janvier. Le fonctionnement en brasseurs d'air est efficace jusqu'à la fin de l'année civile.

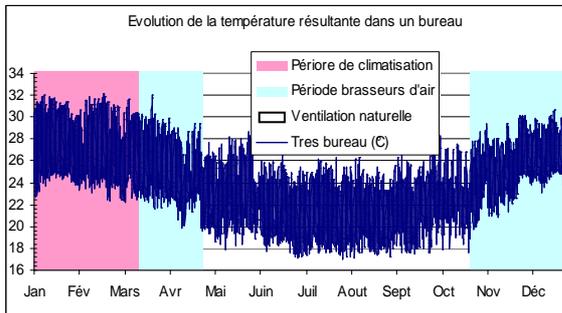


Figure 8 : Evolution de la température résultante dans un bureau pendant une année type.

La figure 9 synthétise les différentes périodes de fonctionnement définies grâce aux simulations dynamiques. Nous voyons que les espaces de bureaux sont climatisés pendant 1,5 mois et les salles informatiques pendant 3 mois (15 jours en décembre et de début février à mi avril).

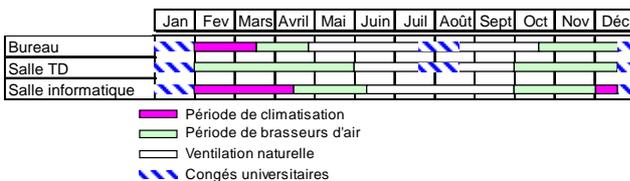


Figure 9 : Périodes de fonctionnement de la climatisation et des brasseurs d'air définies grâce aux simulations en régime dynamique

Ainsi, les consommations annuelles dues à la climatisation et aux brasseurs d'air ont pu être calculées. Au final, le bâtiment à énergie positive consommera quatre fois moins d'énergie électrique qu'un bâtiment standard avec un ratio énergétique de 17 kWh/an/m<sup>2</sup>SU pour le conditionnement d'air. Ceci comprend les groupes de froid et auxiliaires ainsi que les brasseurs d'air.

## RESULTATS ET DISCUSSION CONFORT VISUEL

### Contexte et objectifs

De la même manière que le confort thermique, les conditions d'éclairage doivent pouvoir être atteintes

par des moyens passifs, c'est-à-dire en éclairage naturel. Concernant l'éclairage artificiel, les normes françaises en matière d'exigence d'éclairage sur un plan de travail ont souvent tendance à surdimensionner les systèmes. Par exemple, les puissances installées sont souvent de l'ordre de 17W/m<sup>2</sup> pour un niveau d'éclairage mesuré de 700 lux, alors que 300 lux est largement suffisant. On se retrouve donc avec des bâtiments qui consomment deux fois plus d'énergie qu'il n'en faudrait. Le programme de construction et la note MDE imposent que la puissance électrique installée soit inférieure à 7 W/m<sup>2</sup>. Nous allons voir que cet objectif peut être facilement atteint sans surcoût significatif.

### Eclairage naturel

L'ensemble des salles a été classé par typologie et a fait l'objet de simulation sous un logiciel capable de simuler le niveau d'éclairage naturel. Ce logiciel est largement répandu dans les milieux des bureaux d'études (DIAL).

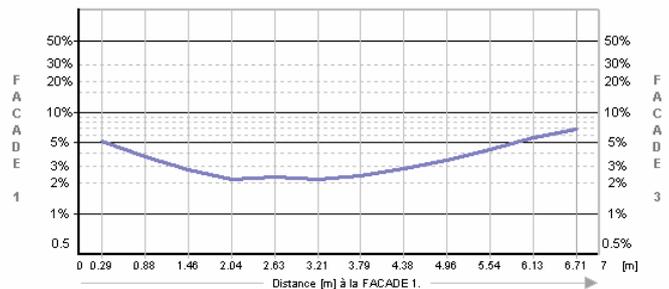


Figure 10 : Evolution du facteur de jour suivant une coupe d'une salle de TD à l'étage

La figure 10 par exemple montre l'évolution du facteur de jour par temps couvert pour une salle de classe située à l'étage. Pour avoir un niveau d'éclairage acceptable, le FJ doit être supérieur à 1,5%. Ce type de figure couplé aux résultats du tableau 3 nous montre que pour l'ensemble des pièces situées à l'étage, l'éclairage artificiel n'est pas nécessaire quel que soit le moment de l'année pendant les heures d'enseignement (de 8h à 17h).

Tableau 3 : Pourcentage de facteur de jour supérieur à 1,5% par typologie de local

Local	% surface pièce avec FJ ≥ 1.5%	FJ minimum (%)
Bureau RdC sur patio	60%	1.0%
Salle RdC sur patio	Entre 40 et 82%	1.2%
Salles en R+1	100%	1.6%

Les seuls locaux qui posent problème sont deux salles d'enseignement situés au RdC des deux bâtiments centraux. Des solutions sont actuellement à l'étude pour améliorer l'éclairage naturel, notamment de réduire ou de percer les dalles terrasse (voir figure 3). En terme de solution technique, les jalousies intérieures des bureaux qui sont utilisées pour la

ventilation naturelle jouent également le rôle de second jour dans le couloir (voir figures 5 et 11). Ainsi, les simulations ont montré que l'éclairage artificiel du couloir n'était pas nécessaire.

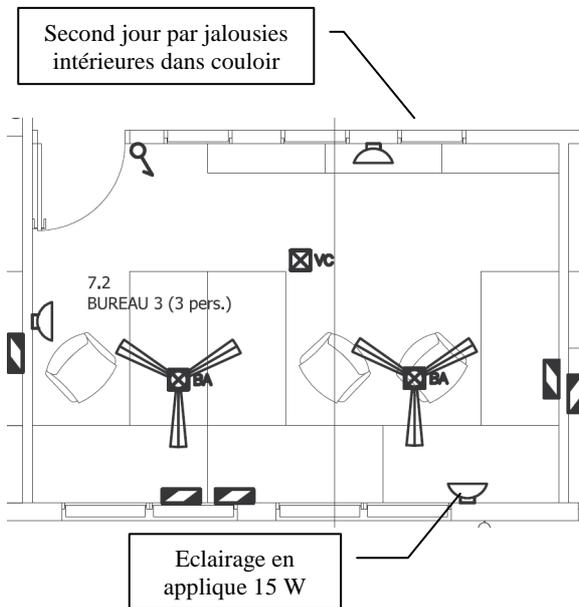


Figure 11 : Principes d'éclairage naturel (jalouies intérieures en second jour) et artificiel (appliques) pour un bureau.

### Eclairage artificiel

Pour atteindre les objectifs de  $7 \text{ W/m}^2$ , l'ergonomie du bureau et des salles de cours a été repensée afin de tenir compte de la présence des brasseurs d'air et d'éviter tout effet stroboscopique sur le plan de travail. La législation française impose 425 lux d'éclairage moyen dans un bureau et 325 lux dans une salle d'enseignement. Notre démarche a consisté à respecter 400 lux au niveau des tables de travail mais nous avons estimé qu'ailleurs, un niveau d'éclairage de 100 lux était largement suffisant. De ce fait, comme le montre la figure 11, l'éclairage artificiel du bureau est constitué de 3 appliques en verre sablé avec des lampes basse consommation de 15 W chacune et de trois lampes de bureaux également en lampe basse consommation. La puissance installée est de  $90 \text{ W}/20 \text{ m}^2$ , soit un ratio de  $4,5 \text{ W/m}^2$ . Un bâtiment standard aurait eu un éclairage de 3 pavés de  $4 \times 18 \text{ W}$ , soit une puissance totale de 216 W et un ratio de  $11 \text{ W/m}^2$ . Concernant les salles de TD, le niveau d'éclairage exigé dans le programme est de 250 lux, soit 100 lux de moins que la législation. L'éclairage naturel assurera le complément exigé. De ce fait, en terme de solution technique, les pavés de  $4 \times 18 \text{ W}$  habituellement utilisés ont été remplacés par des pavés de  $2 \times 24 \text{ W}$  avec ballast électronique. La puissance installée pour une salle telle que celle représentée par la figure 12 est alors de  $8,4 \text{ W/m}^2$ . Elle aurait été de  $14 \text{ W/m}^2$  pour un bâtiment standard. La figure 12. Cette salle, à

l'instar de l'ensemble des salles, est dotée d'un double allumage qui permet seulement d'allumer la trame centrale si l'utilisateur le désire au cas où le FJ soit trop faible. Bien évidemment, les solutions proposées ont fait l'objet de simulations afin de vérifier que les niveaux d'éclairage en éclairage artificiel étaient atteints. A l'échelle de l'ensemble du bâtiment, la puissance moyenne installée est de  $7 \text{ W/m}^2$ . Le ratio énergétique est de  $5,5 \text{ kWh/an/m}^2$ , contre  $9,4 \text{ kWh/an/m}^2$  pour un bâtiment standard.

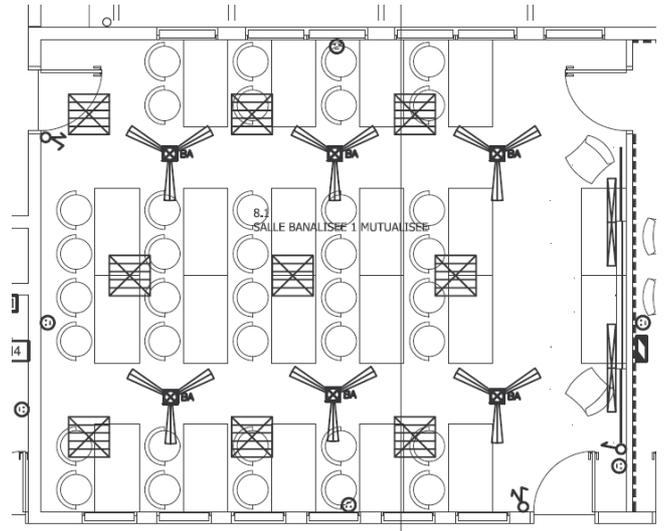


Figure 12 : Principes d'éclairage artificiel et calpinage des luminaires et brasseurs d'air pour une salle banalisée de  $60 \text{ m}^2$ .

## RESULTATS ET DISCUSSION EQUIPEMENTS TECHNIQUES

### Synthèse équipements techniques

Le programme de construction exige un niveau de performance minimal pour certains équipements techniques. Ainsi, la production de froid sera assurée par deux groupes monoblocs à compression scroll situés en toiture terrasse, de technologie différente afin de comparer leurs performances respectives :

- 1 groupe d'eau glacée pour le département SRC;
- 1 groupe VRV –ie volume variable de réfrigérant, pour le département GC.

Le VRV utilise un fluide frigorigène comme fluide caloporteur entre le groupe et les unités terminales. Il s'agit d'une technologie très peu répandue à La Réunion mais qui donne de très bonnes efficacités frigorifiques de l'ordre de 10. L'Eff est définie ici comme étant le ratio de la puissance frigorifique fournie sur la puissance électrique du groupe. Les Eff exigées dans le programme doivent être supérieures à 3 quelque soit le taux de charge. La puissance électrique de ces groupes est de 30 kW. Elle aurait été de 78 kW pour un bâtiment standard. Concernant l'éclairage artificiel, tous les luminaires utilisés sont de type fluorescent à basse luminance. L'éclairage extérieur sera assuré par des lampes sodium à haute pression. Les halogènes sont interdits. Les bureaux

sont équipés de détecteurs de présence qui remontent la consigne de climatisation à 27°C et coupent l'éclairage en cas d'inoccupation prolongée. Une gestion technique centralisée assure le contrôle et le suivi des énergies. La GTC permet d'avoir les consommations par type d'utilisation et de reconstituer la courbe de charge du bâtiment en temps réel. L'ensemble des solutions techniques performantes ainsi que la qualité thermique du bâtiment ont permis de réduire significativement l'appel de puissance du bâtiment. En tenant compte des foisonnements et des facteurs de simultanéité, nous arrivons à une puissance électrique appelée maximale de 51 kW. Elle aurait été de 94 kW pour le même bâtiment sans préconisations MDE. La figure 13 donne les ratios de consommation globaux et par type d'utilisation. On peut constater que le bâtiment va consommer 3 fois moins qu'un bâtiment standard avec un ratio total de 50 kWh/an/m<sup>2</sup>. La consommation annuelle est de l'ordre de 87 MWh/an.

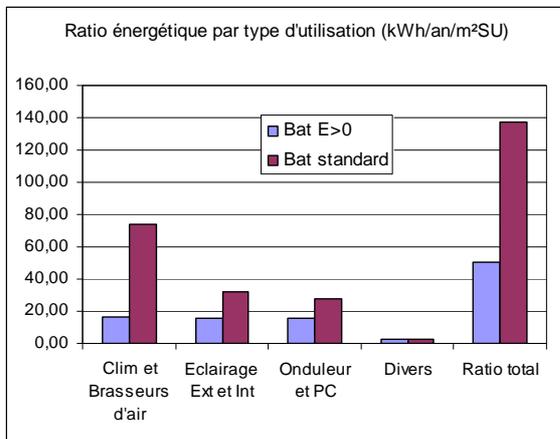


Figure 13 : Synthèse des ratios énergétiques par type d'utilisation pour le bâtiment à énergie positive et le même bâtiment mais avec une conception standard.

### Energies renouvelables

Les quatre sur-toitures mono-pente nord et sud sont constituées de panneaux photovoltaïques polycristallins fixés directement sur la structure métallique en remplacement d'une tôle classique. Les toits 1 et 3 ont une pente nord de 9°. Les toits 2 et 4 ont une pente sud de 9° (voir figures 3 et 5). Les simulations menées avec PVSYST (PVSYST 3.4) montrent que les toitures au sud ont productivité annuelle inférieures de 5% seulement par rapport aux toitures nord. Celle-ci est de l'ordre de 1500 kWh/kWc/an (voir tableau 4).

Tableau 4 : Puissance nominale, énergie produite et productivité pour les quatre toitures.

	Surf.	P. nom. kWc	Production MWh/an	Productivité kWh/kWc/an
Toit 1	360m <sup>2</sup>	46	71.1	1553
Toit 2	252m <sup>2</sup>	32	47.5	1484
Toit 3	242m <sup>2</sup>	31	47.9	1558
Toit 4	317m <sup>2</sup>	40	59.9	1485
<b>Total</b>	<b>1171m<sup>2</sup></b>	<b>149 kWc</b>	<b>226.4</b>	

La puissance nominale est de 149 kWc. La production annuelle est estimée à 226 MWh soit 2,5 fois la consommation prévisionnelle du bâtiment. Nous voyons que les toits 1 et 3 pourraient à eux seuls compenser la consommation et l'appel de puissance du bâtiment. L'ensemble des installations PV est connecté au réseau. Le montage financier est de type location de toiture avec défiscalisation. L'université loue les toitures mais les installations PV ne lui appartiennent pas, ce qui permet de s'affranchir des problèmes de maintenance.

### CONCLUSION

Les objectifs fixés en terme de consommation ont été atteints. Ce résultat a pu être possible grâce à une forte collaboration entre l'équipe de maîtrise d'œuvre et les chercheurs de l'université, avec une mise en commun non seulement des outils de dimensionnement et d'expertise, mais également des habitudes de conception. Ainsi, avec quelques innovations architecturales telles que les jalousies intérieures, les lampes en appliques, l'utilisation de brasseurs d'air, une meilleure gestion et un dimensionnement intelligent des systèmes, on peut arriver à réaliser un bâtiment qui consomme trois fois moins qu'un bâtiment standard avec un surcoût de 2% du principalement à la GTC optimisée. Les installations PV produiront en outre l'équivalent de 2,5 fois la consommation du bâtiment.

### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'architecte du projet Thierry Faessel-Bohe pour les vues 3D du bâtiment et le BET Tribu pour les simulations DIAL.

### REFERENCES

- Allard F. 2002. Natural ventilation in buildings. A design handbook. Ed° James & James, 356 p. ISBN 1 873936729.
- Boyer ,H., Garde, F., Gatina, J.C., Brau, J. 1998. A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes. Energy and Buildings 28 (1):71-79.
- David, M., Adelard, L., Lauret, P. and Fock, E. 2005. Time Delay Neural Networks (TDNN) applied to a weather data generator based on typical meteorological sequence analysis., Proceedings of ISES, Aout 2005, Orlando, USA, p.1-11
- DIAL Europe version 3.4, [www.estia.ch](http://www.estia.ch).
- Garde, F. Adelard, L. David, M. 2005. Elaboration of Thermal Standards for French Tropical Islands : Presentation of The PERENE Project. In proceedings of Clima 2005, Lausanne, Suisse.
- Lopez, J. Ottenwelter, E. 2000. ICE, INSET. Rapport PRERURE téléchargeable à [www.arer.org](http://www.arer.org).
- PVSYST 3.4. Université de Genève. <http://www.pvsyst.com>

# COMMANDE DES SYSTÈMES MULTI-ÉNERGIES POUR LES BÂTIMENTS À HAUTE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

*Joseph Virgone<sup>1</sup>, Enrico Fabrizio<sup>1,2</sup>, Yoann Raffenel<sup>1,3</sup>, Eric Blanco<sup>3</sup>, Gérard  
Thomas<sup>3</sup>*

1 CETHIL, Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, INSA Lyon, UCBL, Domaine scientifique de la  
Doua, Bât. Freyssinet, 40 rue des arts, 69100 VILLEURBANNE

2 DENER, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, 24, corso Duca degli Abruzzi, I - 10129  
TURIN

3 CEGELY, Centre de Génie Electrique de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 69134 ECULLY cedex

## **Résumé**

*On entend parler de plus en plus de bâtiments à énergie positive, c'est-à-dire qu'ils produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Pour arriver à ce résultat, les sources d'énergie renouvelable sont, et seront de plus en plus, amenées à cohabiter avec les sources d'énergie habituelles sur un même site ; cependant, elles ne font pas encore l'objet d'une réelle stratégie de gestion énergétique globale : il est en effet nécessaire de comprendre comment on peut obtenir le meilleur couplage entre demande et offre d'énergie, soit à l'échelle de bâtiment soit à l'échelle de quartier, et définir les règles expertes et les solutions les plus efficaces du point de vue énergétique, les plus rentables du point de vue économique ou les deux.*

*Du point de vue méthodologique, le travail essentiel sur lequel nous nous sommes engagés est d'approfondir les techniques de couplage entre bâtiment, caractérisé par les profils de besoins (électrique, thermique et frigorifique) en puissance et en énergie, et système de production de l'énergie, caractérisé par des profils de production. Ce couplage doit pouvoir se caractériser par un indice permettant de juger l'efficacité du couplage.*

*L'objectif est alors de deux types : sur une installation existante, comment trouver des solutions de commande des systèmes pour réduire au mieux les consommations d'énergie en privilégiant les énergies renouvelables ; l'autre façon d'utiliser ce travail consiste à proposer un outil de conception d'un ensemble bâtiment-systèmes pour définir les conditions les meilleures du couplage entre demande et offre d'énergie et pour estimer les consommations qui en découlent.*

Mots clés : Energie renouvelable, Habitat Multi-sources, Commande, Modélisation, Optimisation, Intelligence Artificielle

## **1. INTRODUCTION**

Le secteur du bâtiment consomme aujourd'hui 47% de l'énergie produite et est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre. Face aux changements climatiques qui en découlent, il est aujourd'hui plus que nécessaire de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment, tant au niveau du neuf que de l'existant, et de

substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables. Pour cela, il faut moderniser les méthodes de conception et de rénovation des habitats en intégrant une démarche de Qualité Environnementale. L'objectif à l'horizon 2050 est le bâtiment à énergie positive, c'est-à-dire un bâtiment pouvant produire plus d'énergie qu'il n'en consomme.

Les bâtiments ont des besoins énergétiques qui se répartissent sur trois postes :

- Chaleur : chauffage, production de l'ECS ;
- Froid : rafraîchissement ou refroidissement des locaux, conservation des aliments ;
- Electricité : utilisations captives de l'électricité (éclairage, électroménager, audiovisuel et divers auxiliaires tels que brûleurs, pompes, ventilateurs, ...)

Les combustibles fossiles et fissiles (uranium) ont des réserves limitées il est donc impératif et urgent de développer dans le bâtiment des solutions énergétiques fonctionnant directement avec des énergies renouvelables : solaire thermique, solaire photovoltaïque (pour l'électricité), géothermie, biomasse (bois –énergie), micro- ou pico-hydraulique (pour l'électricité). Ces énergies renouvelables se caractérisent par une diffusion spatiale qui est bien adaptée au caractère diffus de l'habitat.

Une autre caractéristique est que l'utilisation de ces énergies renouvelables correspond à une production de chaleur à faible niveau de température qui est tout à fait compatible avec l'application bâtiment. Toutefois, sur le site d'un bâtiment ou à proximité immédiate, il existe d'autres sources énergétiques inutilisées et souvent à faible niveau de température. Ce sont par exemple des rejets thermiques industriels ou résultant d'une autre application énergétique déjà valorisée dans le bâtiment, l'énergie contenue dans le sol adjacent (géothermie de surface), dans l'air ou dans l'eau des nappes phréatiques et des rivières proches.

L'intégration énergétique consiste à utiliser une combinaison de ces sources, pouvant se réduire à au moins une énergie renouvelable, pour couvrir le maximum de besoins énergétiques du bâtiment avec la meilleure efficacité. On trouve quelques études partielles sur le sujet [1, 2, 3]. Les combinaisons envisageables sont nombreuses et constituent un gisement potentiel d'innovations. La cogénération solaire avec des cellules PV / T, mais aussi la cogénération classique permettent de compenser des besoins en chaud et en électricité. L'association solaire thermique et pompe à chaleur géothermale réversible prélevant (ou rejetant) de la chaleur dans le sol (ou d'autres combinaisons avec des pompes à chaleur) permet de compenser la totalité des besoins de chauffage et une grande partie des besoins en ECS ainsi qu'une partie des besoins en rafraîchissement des locaux. La production de froid à partir du solaire, soit avec des machines à absorption, soit avec des réacteurs chimiques à fonctionnement continu ou discontinu, soit en utilisant des cellules à effet Peltier alimentées en électricité photovoltaïque, soit encore avec le procédé DEC (desorption and evaporative cooling appelé aussi dessicant cooling) sont autant d'exemples d'intégration énergétique.

L'objectif est de diminuer les consommations d'énergie primaire et de réduire les impacts environnementaux associés, afin de tendre vers des bâtiments "zéro énergie" ou "négawatts".

Les sources d'énergie renouvelable sont donc, et seront de plus en plus, amenées à cohabiter sur un même site, cependant, elles ne font pas encore l'objet d'une réelle stratégie de gestion énergétique globale. Les développements actuels visent à optimiser la cohabitation de sources de natures différentes pour profiter pleinement de leurs potentiels. C'est-à-dire que leur exploitation doit se faire non seulement en fonction des

besoins mais aussi en fonction de la disponibilité de l'énergie. L'utilisation de cette énergie doit donc se faire de manière plus rationnelle pour ne pas conduire à une approche archaïque du dimensionnement consistant à opter pour la surcapacité.

Le travail qui est présenté dans ce document est la description de la méthodologie envisagée pour mener à bien aux buts que nous nous sommes fixés.

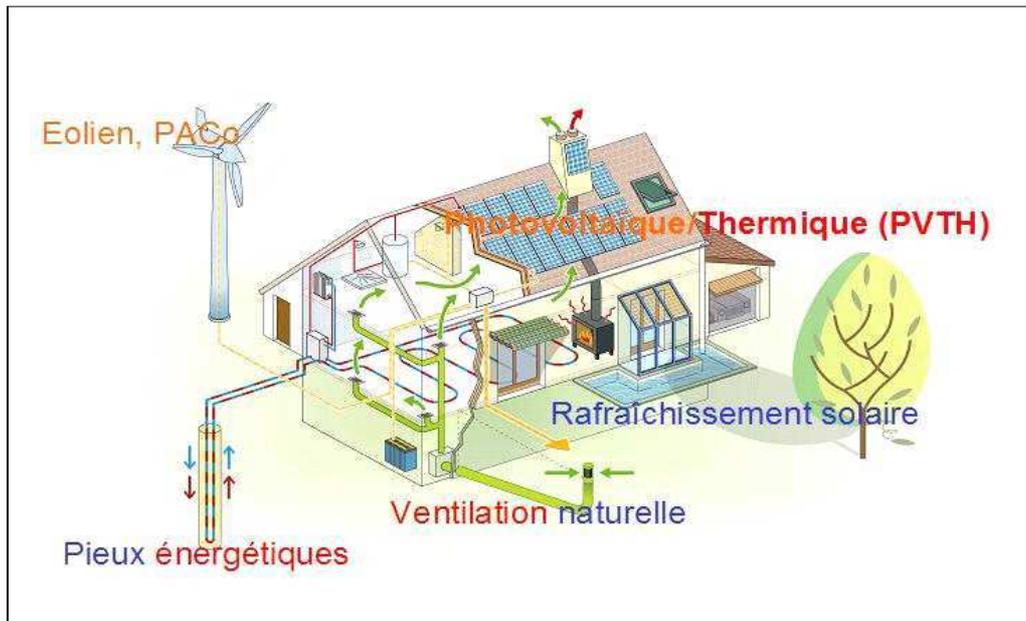


Figure 1 : Maison équipée de systèmes multi-énergies

## 2. POSITION DU PROBLEME : LA MODELISATION D'UN BATIMENT MULTI-ENERGIE

La première question à laquelle nous devons savoir répondre concerne la modélisation d'un bâtiment équipé de systèmes multi-énergies. Comment-peut-on effectuer cette modélisation ? Y-a-t-il des différences entre cette modélisation et celle d'un bâtiment traditionnel ? La première considération qui ressort est que, les sources d'énergie renouvelable ayant un caractère fortement dynamique, il est nécessaire de conduire une modélisation avec un pas de temps de calcul au moins horaire, si non le long de l'année, au moins le long de la durée du projet (en été et en hiver) et des jours moyens mensuels. Comme les décisions qui concernent l'exploitation des différentes énergies renouvelables doivent être prises au moment de la conception du bâtiment et de la définition des budgets, et comme il est long et difficile de conduire cette modélisation dynamique dans une phase, celle de conception, où on n'a pas de données suffisantes pour mettre en place un modèle type EnergyPlus ou TRNSYS, nous proposons donc l'idée d'adopter une modélisation paramétrable vis à vis de tous les flux énergétiques qui traversent le système bâtiment et qui peuvent être décomposés en flux thermiques, frigorifiques et électriques. En outre, dans un bâtiment multi-énergies les interactions entre différentes formes d'énergies sont encore plus complexes que dans un bâtiment traditionnel (on ne peut pas

dans un bâtiment multi-énergies conduire l'analyse de la partie électrique indépendamment de la partie thermique). Le modèle doit reproduire tous les flux mis en jeu et doit aussi être suffisamment détaillé et sensible pour reproduire les interactions entre les flux énergétiques qui très variables, changent de signe et ont une valeur moyenne généralement plus faible par rapport à celle d'un bâtiment traditionnel. Le schéma de modélisation en offre et en demande donné dans la figure suivante permet aussi d'envisager les meilleures stratégies de gestion de la charge (*load management*) soit au niveau de la demande d'énergie du bâtiment (isolation thermique de l'enveloppe, adoption d'appareils à haute efficacité énergétique,...) soit au niveau de l'offre d'énergie pour le bâtiment.

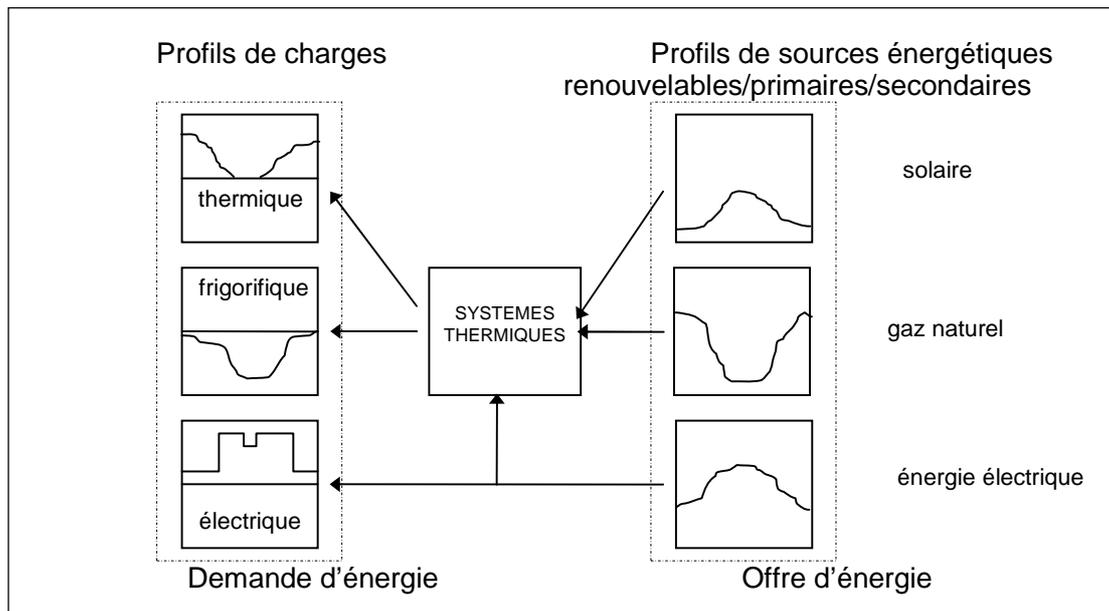


Figure 2 : Schéma de classement entre les flux énergétiques mis en jeu

Du point de vue méthodologique d'ailleurs, la différence entre une modélisation de bâtiment traditionnel et celle d'un bâtiment multi-énergies est importante : dans le premier cas on soumet des besoins aux sources énergétiques, dans l'autre la disponibilité et le coût des sources (particulièrement celle des sources renouvelables) interagissent avec les besoins.

### 3. CHOIX D'UNE ENERGIE ET VARIABILITE DES SOURCES RENEUVABLES ET DES BESOINS DE L'HABITAT

L'optimisation, dans le système envisagé dans le paragraphe précédent, ne se fonde plus sur la minimisation de la fonction coût du chauffage et de l'ECS, comme d'habitude, mais sur la minimisation de la facture énergétique totale payée par l'utilisateur. Celle-ci comprend [4] :

- l'ensemble des abonnements,
- les consommations observées pour toutes les énergies auxquelles le logement a accès (électricité, gaz, propane, fioul, etc.), ce qui inclut tous les postes utilisateurs sans

distinction : chauffage, ECS, cuisine, électroménager, éclairage, VMC, etc.

- les locations (cuve, compteurs, etc.)
  - les frais de maintenance ordinaires (mais pas les frais de grosses réparations qui sont directement prélevés à travers le loyer),
  - la quote-part du coût des services généraux ayant trait au chauffage, à l'ECS, à la VMC.
- La détermination du choix est liée à l'association d'énergies qui minimisera la facture annuelle de l'occupant et présentera sur ses concurrentes moins chères à l'investissement un temps de retour inférieur à une durée déterminée (10 ans par exemple).

Pour cela, il faut :

- inventorier les fournitures d'énergie présentes sur le site, ainsi que les techniques de chauffage/distribution/émission associées,
- déterminer pour chaque solution le montant de la facture énergétique du logement type, ramené à la surface habitable,
- évaluer le montant des travaux correspondant à chaque solution,
- classer les solutions par coût d'exploitation croissant, en indiquant pour les meilleures le temps de retour de l'investissement par rapport à leurs concurrentes moins chères.

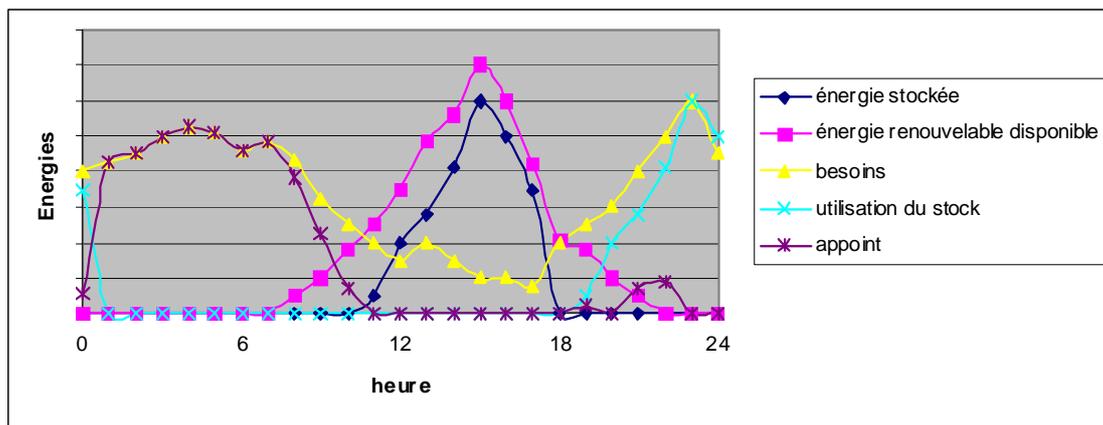


Figure 3 : Exemple de variations des flux d'énergies

#### 4. LES SYSTEMES DE CONTROLE-COMMANDE

Dans le contexte de l'autonomie énergétique des bâtiments, les efforts de recherche du Politecnico de Turin, du CEGELY et du CETHIL portent sur de nombreux domaines convergeants sur une combinaison entre : l'isolation, la ventilation, les systèmes (producteurs) passifs, actifs ou adaptatifs, le stockage (du chaud et/ou du froid). Cette évolution plus ou moins facile à atteindre sur chacun des domaines engendre une complexité évidente de la gestion de ces systèmes à deux niveaux : d'une part à l'échelle des composants qui s'enrichissent en fonctionnalités (multi-flux, isolation, stockage intégré ...) et d'autre part à l'échelle du bâtiment qui intègre le chaînage production, distribution, émission, stockage de multi-énergies produites à partir de multi-systèmes.

##### 4.1 Le bâtiment domotique

Un système domotique peut être vu comme un système de pilotage réparti spatialement visant à maîtriser différentes variables caractéristiques d'environnements (thermique-air, thermique-eau, lumineux, ventilation) et de services (cuisson, lavage,...). La commande est réalisée au moyen d'équipements qui peuvent être qualifiés, par analogie avec la notion de capteur intelligent, d'actionneurs intelligents : les équipements embarquent une intelligence qui comprend généralement capteurs et mécanisme de commande locale. En guise d'exemple, un radiateur, actionneur agissant sur l'environnement thermique-air, dispose d'un capteur de température et d'un mécanisme de régulation. Il en va de même du réfrigérateur qui participe au service réfrigération. Les commandes de ces différents équipements sont indépendantes les unes des autres et peuvent parfois conduire à des situations difficile à gérer d'un point de vue énergétique.

Les systèmes de Gestion Technique des Bâtiments (GTB) sont aujourd'hui des solutions disponibles pour l'automatisation du fonctionnement des installations de chauffage et climatisation. A travers des stratégies de contrôles de défaillances des équipements, ces plateformes permettent d'alerter l'exploitant des maintenances à effectuer, mais ne sont aujourd'hui pas adaptées à l'arrivée des énergies renouvelables intégrées dans le Bâtiment.

#### **4.2 Une domotique pour les énergies renouvelables**

Par ailleurs, ces solutions classiques de contrôle commande (associées au chauffage, climatisation, etc) n'intègrent pas des concepts relatifs au caractère intermittent des sources renouvelables d'énergie. Cette particularité rend complètement inadaptées (voir inefficaces) les solutions classiques dans des configurations faisant appel aux sources renouvelables. Aussi, il est nécessaire aujourd'hui de travailler au développement d'un système de contrôle commande permettant d'exploiter au mieux le potentiel des différentes sources renouvelables, en gérant de manière globale les besoins en énergie et la capacité de production d'un habitat.

Bien entendu, cela suppose également une gestion des consommations en fonction de moyens de production disponibles. Cependant la consommation en énergie est fortement liée au mode de vie des habitants dont, malheureusement, le comportement peut être en complet désaccord avec une logique économique. La réduction des consommations passe donc par l'information des populations et par le développement d'habitat « intelligent ».

En effet, il n'est pas illusoire, compte tenu des avancées dans les domaines du contrôle commande et de l'intelligence artificielle, d'imaginer un système autonome capable de gérer les consommations d'un habitat en fonction de stratégies et de priorités définies par défaut (utilisation de décalage de services), et adaptables en fonction des utilisateurs. Il devra être également capable de gérer la production et répondre, autant que possible, à des pics ponctuels de consommation (accumulation-restitution). Cela suppose alors dans les habitats, une utilisation accrue de la domotique qui peut être vu comme un moyen de pilotage réparti visant à maîtriser différentes variables d'environnement et de service. La réalisation de cette « intelligence » nécessitera de formaliser un mécanisme de coopération entre les sources et les charges domestiques, coopération nécessaire dans le cas d'une production locale dont la capacité est limitée et variable dans le temps. Enfin, Il sera nécessaire d'opter pour une interface homme-machine suffisamment simple et

conviviale pour que la complexité réelle du système reste masquée et ne représente pas un frein à son développement.

Nous sommes encore loin de cet habitat « intelligent », mais il est important de poser dès aujourd'hui les premières pierres pour satisfaire au plus tôt les impératifs environnementaux. Ce chantier doit débiter par un contrôle le plus efficace possible de la production en fonction des besoins et de la disponibilité des énergies. C'est pourquoi, le CEGELY a débuté en 2004 des travaux sur la modélisation des flux énergétiques dans un habitat. Un premier modèle de consommation électrique a été validé et différents modèles de sources de production énergie renouvelable (électrique) ont été réalisés. En collaboration avec le CETHIL, l'aspect thermique est en cours d'intégration et offrira sous peu un modèle complet des flux énergétiques, c'est-à-dire un outil de simulation complètement paramétrable (situation géographique, type et surface de l'habitation, nombre et habitudes des occupants, niveau de vie, appareillages...). De plus, le CEGELY a organisé en mars 2005 une rencontre baptisée « Journée Maison Autonome » à laquelle ont participé le CETHIL et le CSTB. A l'issue de cette rencontre, le CEGELY s'est vu conforté dans son approche de gestion globale des énergies dans l'habitat.

## **5. DEMARCHE**

Outre les recherches bibliographiques sur la gestion des systèmes multi-sources, la première partie du projet consiste à définir un ensemble de situations, ou plutôt d'habitats, présentant des caractéristiques suffisamment différentes au niveau architectural, équipement et situation géographique pour permettre de tester la pertinence de l'outil qui sera développé. Il sera nécessaire d'avoir des échantillons d'habitats en cours de conception et bien entendu d'habitats existants pouvant déjà présenter des sources d'énergie renouvelable.

La deuxième étape consistera dans un premier temps à rechercher des modèles de sources de production d'énergie renouvelable (solaire thermique, solaire photovoltaïque...). Dans un deuxième temps, la phase de dimensionnement des installations (production) sera réalisée pour chaque habitat en phase de conception défini dans l'étape 1. Pour les habitats existants, un bilan consommation-production devra être établi.

Du point de vue méthodologique ce travail demande la mise en place de procédures d'analyse de la charge journalière, mensuelle et annuelle de la demande et de l'offre des différentes formes d'énergies et l'évaluation des systèmes traditionnels de chauffage, rafraîchissement, production d'eau chaude sanitaire, production d'électricité, pour répondre à la demande d'énergie.

S'appuyant sur un modèle paramétrable des flux énergétiques dans un habitat, et sur les modèles des sources d'énergie renouvelable, différentes configurations existantes ou en cours de conception seront modélisées. Elles serviront de base d'étude au choix et au bon dimensionnement des systèmes de production d'énergie en fonction des besoins en étant capable, autant que possible, de répondre à des pics de consommation (problème de la disponibilité de l'énergie et du stockage).

Cette phase nous conduira à la constitution de règles expertes permettant d'évaluer l'influence d'un paramètre de dimensionnement (surface de captation, puissance d'installation, volume de stockage ...) sur la consommation énergétique, le coût de l'installation ou l'impact environnemental.

Dans la troisième étape les méthodes de couplage entre profils de demande et d'offre d'énergie seront étudiées selon les techniques de *demand management* et *supply-side management* dérivées du secteur électrique. Ce couplage dépend de la technologie des systèmes, et du stockage d'énergie ou déphasage des charges.

La quatrième et dernière étape consistera à mettre en œuvre un outil d'aide à la conception basé sur une analyse multicritères (méthodes ELECTRE et PROMETHEE) permettant d'optimiser les choix fondamentaux au moment de la conception du bâtiment. Les critères décisionnels pourront être de type exclusivement économiques ou énergétiques, thermo-économiques ou liés à l'environnement.

Du côté de l'analyse multicritère, plusieurs travaux ont été réalisés au CETHIL: en particulier la mise en œuvre d'un outil informatique d'aide à la décision « CONCEPT » [5] pour optimiser dans la phase de conception du bâtiment, outre l'orientation du bâtiment, la surface des fenêtres, les protections solaires, la stratégie de ventilation. Un ensemble de 2304 simulations numériques ont permis de définir des règles expertes utilisées par une méthode d'aide à la décision multicritère de type ELECTRE III. L'utilisateur peut modifier les poids, voire les seuils de préférence, indifférence et veto utilisées dans la comparaison par couples des différentes solutions architecturales.

Un tel outil; et d'autres similaires qui viendront tenant compte de l'intégration des énergies renouvelables représentera notre contribution pour atteindre le stade évolué de la conception d'un bâtiment à énergie positive.

## 6. CONCLUSION

Le travail décrit envisage donc deux objectifs finaux : l'un est de trouver les solutions de commande des systèmes sur une installation existante qui réduisent les consommations en privilégiant les énergies renouvelables ; l'autre est de proposer un outil de conception d'un ensemble bâtiment-systèmes pour définir les conditions les meilleurs du couplage entre demande et offre d'énergie et pour estimer les consommations qui en découlent.

## REFERENCES :

- [1] **N.J. Kelly**, Towards a design environment for building-integrated energy systems: the integration of electrical power flow modelling with building simulation,. *A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering, Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde*, Glasgow, UK. October 1998.
- [2] **J.A. Clarke, J. Cockroft, S. Conner, J.W. Hand, N.J. Kelly, R. Moore, T. O'Brien and P. Strachan**, Control in building energy management systems: the role of simulation, , *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001.
- [3] **Y Zhang and V I Hanby**, Model-based control of renewable energy systems in buildings, , *Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, Canada, August 15-18, 2005.
- [4] **O. Sidler**, L'habitat social economie en charges, intervention au séminaire construction climatique de Saint-Etienne, 21 juin 2000, <http://perso.club-internet.fr/sidler>.
- [5] **E.B.P. de Castro, J. Virgone, L.E.G. Bastos**, *A computer program to aid architectural conception based on multicriteria analysis and on simulated building data*, CISBAT; septembre 2005, Lausanne.

## LES SYSTÈMES SOLAIRES COMBINÉS : QUEL BILAN ET QUEL AVENIR ?

Thomas Letz

INES-Education, Parc Technologique de Savoie Technolac  
50 avenue du Léman BP 258  
F - 73 375 LE BOURGET DU LAC Cedex

Dès le premier choc pétrolier en 1973, on a assisté en France au démarrage de la filière solaire thermique, avec un grand nombre de constructeurs présents jusqu'au contre-choc pétrolier de 1986. De nombreuses installations ont été réalisées, avec, il faut bien le dire, des matériels de qualité insuffisante. De 1987 à 2000, le parc cumulé est resté relativement stable avec environ 600 000 m<sup>2</sup>, les mises en service compensant à peine l'arrêt des installations les plus anciennes.

En 2000, un plan national de relance (plan Soleil) a mis l'accent sur les trois filières qui semblaient les plus matures :

- le chauffe eau solaire individuel (CESI), quasiment absent en métropole à cette époque, mais se développant de manière importante dans les départements d'outre-mer
- les installations collectives ou centralisées de production d'eau chaude sanitaire, fiabilisées grâce à des procédures de Garantie de Résultats Solaires
- les systèmes solaires combinés (SSC), pour la maison individuelle, assurant une partie de la production d'eau chaude sanitaire et du chauffage de locaux.

Dans cette dernière catégorie, le marché jusqu'à cette date était porté quasiment par un seul constructeur diffusant la technique du Plancher Solaire Direct, inventée en France au début des années 80.

Depuis 2000, le marché s'est ouvert et plusieurs autres constructeurs ont commencé à proposer des systèmes à hydroaccumulation.

En 2005, les nombres d'installations réalisées devrait atteindre 1800, avec une surface de capteurs solaires installées de l'ordre de 24 000 m<sup>2</sup>, soit 60 % de plus que le marché du collectif !

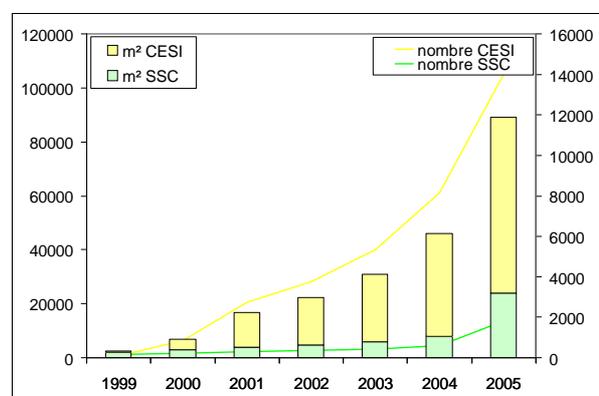


Figure 1 : Evolution du marché des SSC en France

### Les deux catégories de SSC

Le développement des SSC aux plans européen et français présente des particularités "historiques" : dans la plupart des pays sauf la France, on trouve des systèmes utilisant un stockage de l'énergie solaire excédentaire à certains moments dans des réservoirs hydrauliques (fig 2).

En France, après le premier choc pétrolier, de nombreux pionniers se sont lancés dans la construction de tels systèmes, avec, il faut bien le dire, plus d'échecs que de succès. Cette situation a conduit, au début des années 80, à une remise en cause radicale du principe de l'hydroaccumulation, et à la simplification des schémas hydrauliques utilisés à cette époque, qui ont débouché sur le développement du Plancher Solaire Direct.

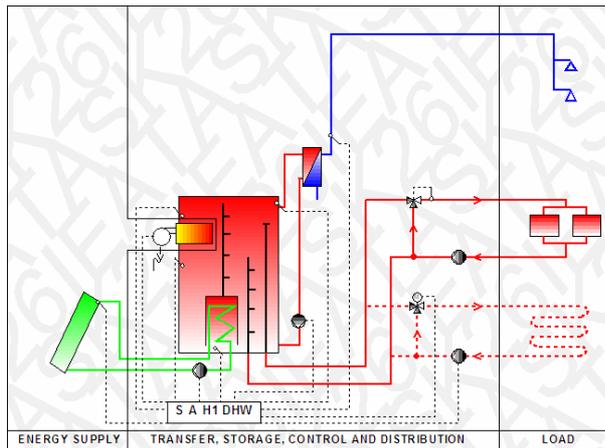


Figure 2 : Exemple de schéma hydraulique d'un SSC à hydroaccumulation

Dans ce système, l'énergie solaire pour le chauffage est transférée directement par le fluide antigel caloporteur depuis les capteurs solaires vers une dalle, sans échangeur de chaleur intermédiaire. L'épaisseur de béton plus importante (12 à 15 cm) que dans un plancher chauffant classique permet d'accumuler cette énergie et de la restituer avec un certain déphasage dans le volume à chauffer.

Deux variantes de PSD existent : la première dans laquelle le plancher chauffant n'est alimenté qu'en énergie solaire, et la deuxième dans laquelle l'énergie d'appoint est également distribuée par le plancher (fig. 3) :

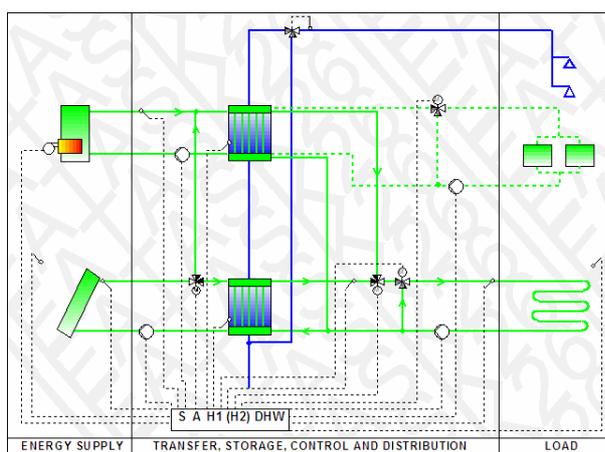


Figure 3 : Schéma hydraulique d'un Plancher Solaire Direct à appoint intégré

Au-delà de cette distinction, on trouve une très grande variété de concepts hydrauliques, qui se différencient par :

- Le nombre de réservoirs de stockage pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire
- Le mode de raccordement de l'appoint
  - Séparé : l'appoint ne passe pas par la cuve solaire.
  - Chaudière couplée : l'appoint fourni de l'énergie en partie haute de la cuve solaire
  - Brûleur intégré : l'appoint est intégré à la cuve solaire.
- Le niveau d'intégration des composants (assemblage à façon sur site, modules pré-fabriqués en usine)
- L'utilisation d'antigel ou la vidange des capteurs en cas de risque de gel

Devant cette explosion du marché accompagné d'une offre de matériels abondante, les utilisateurs potentiels se trouvent un peu démunis pour faire un choix éclairé, car les outils permettant de caractériser ces systèmes de manière un tant soit peu rigoureuse font actuellement cruellement défaut :

- Pas d'étiquetage des performances des SSC
- Pas de tests reconnus au niveau français ou européen. Deux méthodes sont actuellement poussées au niveau de la normalisation européenne :
  - "l'école" allemande privilégie une approche basée sur la caractérisation des composants (capteurs solaires, ballons de stockage, échangeurs) suivie d'une simulation du comportement du système, et en particulier de l'interaction entre la régulation et ces différents composants.
  - "l'école" franco-suisse raisonne "système", et développe des bancs-test du type "boîte noire", dans lesquels une caractérisation globale est recherchée, grâce à une émulation des entrées et sorties du système : capteurs solaires, éventuellement chaudière d'appoint, et circuit de distribution de chauffage et d'ECS.

- Quelques SSC ont été évalués par la procédure des Avis techniques Expérimentaux (ATEX) du CSTB. Mais ces ATEX ne donnent pas d'éléments sur les performances des installations.

Pour avancer néanmoins dans la connaissance des performances réelles des SSC, l'Ademe a lancé en 2003 un programme d'évaluation, basé sur des mesures réalisées sur des installations réelles.

Pour pouvoir comparer utilement les performances de systèmes installés dans des conditions variées de climat, charges de chauffage et d'ECS, et de taille de capteurs solaires, il était nécessaire de concevoir une méthode permettant de s'affranchir de ces paramètres. C'est pour cela que la méthode FSC a été développée, dans le cadre de la tâche 26 Solar Combisystems du programme "Solar Heating and Cooling" de l'Agence Internationale de l'Energie [1].

### L'évaluation des performances

Il n'est pas suffisant de connaître la productivité (quantité d'énergie délivrée annuellement par m<sup>2</sup> de capteur), ou la fraction solaire (part des besoins de chauffage et d'eau chaude couverts par l'énergie solaire), pour caractériser correctement un SSC. En effet, les deux indicateurs précédents ne s'appliquent qu'à la partie solaire du système, et ne donnent aucune indication sur son fonctionnement global.

La vraie question est de connaître l'économie d'énergie d'appoint apportée par le SSC en comparaison avec une installation conventionnelle sans partie solaire, appelée installation de "référence", qui aurait fourni le même service. Dans le projet de normes européennes EN 19277 [2] est définie la grandeur à utiliser pour caractériser un système : il s'agit du taux d'économie d'énergie ( $F_{sav}$ ), rapport entre cette économie et la consommation de l'installation de "référence".

$$F_{sav} = \frac{Q_{économ}}{Q_{aux,réf}} = \frac{Q_{app,réf} - Q_{app,sol}}{Q_{app,réf}} \quad (1)$$

*Définitions des grandeurs :*

$Q_{économ}$  = énergie économisée :  $Q_{économ} = (Q_{app,réf} - Q_{app,sol})$

$Q_{app,réf}$  = énergie fossile d'appoint (ou électrique) fournie à l'installation de "référence" (sans apport solaire)

$Q_{app,sol}$  = énergie fossile d'appoint (ou électrique) fournie à l'installation solaire

La difficulté dans la définition du taux d'économie d'énergie réside dans le choix de la référence : si la référence est trop exigeante, l'économie sera minorée. Inversement, si la référence est trop laxiste, l'économie apparaît comme plus importante.

Pour pouvoir confronter utilement les taux d'économie pour différents SSC, il faut comparer la valeur de  $F_{sav}$  pour le système réel avec la valeur théorique maximale qu'aurait un SSC idéal sans pertes. Cette grandeur est appelée Fraction Solarisable des Consommations (FSC) [3].

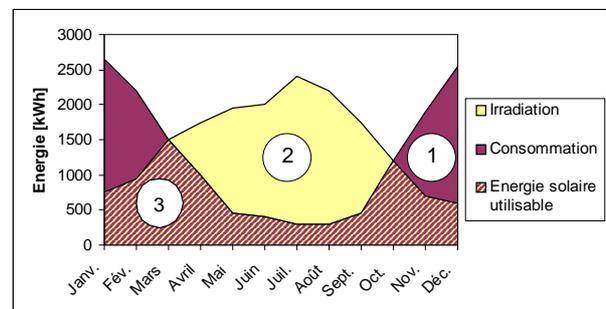


Figure 4 : Définition de la Fraction Solarisable des Consommations

Si on superpose sur un graphique la consommation de l'installation conventionnelle - ou consommation de "référence"<sup>1</sup> ① - avec l'irradiation incidente sur la surface totale des capteurs solaires du SSC ②, il apparaît une troisième zone ③ (intersection entre ① et ②) (fig 4). Elle représente l'irradiation totale utilisable, (en phase avec les consommations),

<sup>1</sup> Calculée à partir des mêmes besoins de chauffage et d'eau chaude que ceux du SSC étudié, des pertes d'un ballon de stockage de l'ECS de "référence", et des pertes d'une chaudière de "référence"

ou également la part des consommations qui peuvent être substituées par l'énergie solaire.

FSC est défini comme le rapport entre l'irradiation totale utilisable et la consommation de référence, soit ③ / ①

Si le SSC était parfait, c'est-à-dire s'il n'avait aucune perte et que toute l'irradiation incidente sur le capteur était convertie en économie d'énergie à l'entrée de la chaudière d'appoint, le taux d'économie d'énergie serait alors égal à FSC. En réalité, différentes pertes se produisent au niveau du capteur, des ballons de stockage, des tuyaux de liaisons et de la chaudière d'appoint.  $F_{sav}$  est donc inférieur à FSC. Mais plus l'écart entre les deux est réduit, plus le SSC est efficace.

Si on trace  $F_{sav}$  en fonction de FSC pour un SSC choisi, en faisant varier le climat, les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire et la taille des capteurs solaires, les points se répartissent avec très peu de dispersion le long d'une courbe d'allure parabolique, qui peut être considérée comme la courbe caractéristique du SSC considéré. (fig. 5)

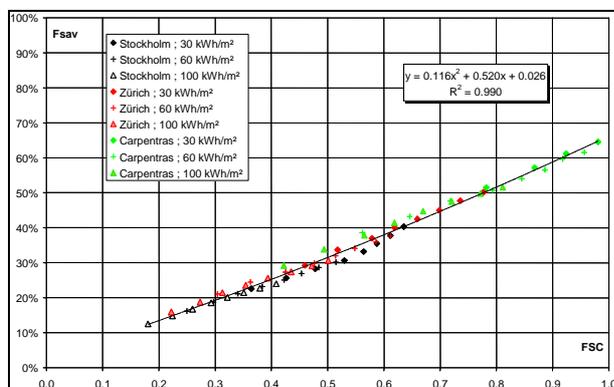


Figure 5 : Relation entre le taux d'économie d'énergie ( $F_{sav}$ ) et la Fraction Solarisable des Consommations (FSC)

Cette approche a été utilisée par la Tâche 26 pour comparer une dizaine de SSC différents, toutes les simulations étant réalisées avec le même outil (TRNSYS) et des conditions identiques (3 climats : Stockholm, Zürich et Carpentras, 3 maisons avec des niveaux d'isolation différents) [1]. La figure 6 montre les courbes caractéristiques obtenues pour 9 SSC. Pour cette étude, la référence considérée

était constituée d'une chaudière ayant un rendement annuel de 85 % et d'un ballon de production d'ECS avec des pertes annuelles de 644 kWh.

Les différentes courbes ont des allures et des pentes identiques, ce qui signifie que tous les systèmes récupèrent l'énergie solaire avec une efficacité comparable. Par contre, l'ordonnée à l'origine des courbes diffère, ce qui indique des différences de qualité dans les isolations des ballons de stockage et dans les rendements des chaudières d'appoint.

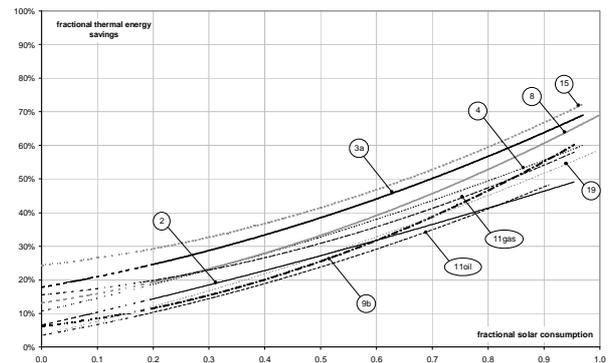


Figure 6 : Courbes caractéristiques des SSC simulés par la Tâche 26, et résultats de mesures du projet Altener combisystems

Dans ce qui suit, les différents résultats seront présentés sur un diagramme  $F_{sav} = f(FSC)$ , sur lequel est portée la plage enveloppe des résultats de simulation obtenus dans le cadre de la tâche 26. La position d'un point représentatif des performances d'un système permet de voir facilement comment il se situe par rapport aux résultats de simulation. Un point situé entre les deux courbes enveloppes est satisfaisant, par contre un point situé trop nettement sous cette plage révèle un fonctionnement médiocre.

### Présentation de résultats sur le diagramme $F_{sav} = f(FSC)$

L'approche présentée précédemment peut être utilisée pour visualiser les résultats de test en laboratoire (fig. 7) ou de campagnes de mesures sur site (fig. 8 et 9).

La laboratoire SPF à Rapperswil est actuellement le seul laboratoire européen à

avoir publié des résultats de mesures pour des SSC. Les résultats disponibles sont synthétisés sur le graphique suivant. La plupart des points sont situés à l'intérieur de la plage tâche 26.

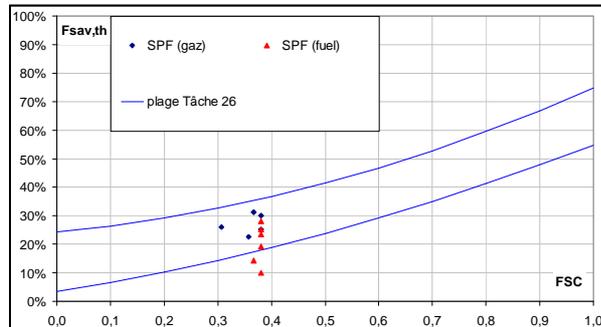


Figure 7 : Résultats de tests effectués au laboratoire SPF à Rapperswil (CH)

Dans le cadre du projet européen Altener combisystems [4], qui s'est déroulé entre 2001 et 2003, des mesures ont été réalisées sur des sites réels dans 5 pays. Les points représentant les résultats obtenus sur 14 SSC sont portés également sur la figure 8.

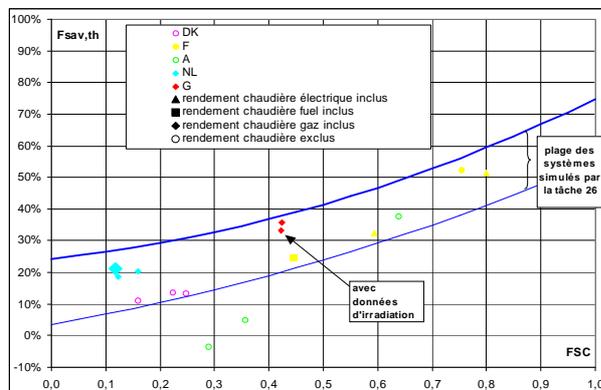


Figure 8 : Résultats du projet Altener Combisystems

Seuls 2 SSC autrichiens présentent de mauvais résultats, mais ceux-ci sont liés à une régulation défectueuse, qui a été améliorée par la suite. Les SSC hollandais, qui utilisent de petites surfaces de capteurs, ont des valeurs de FSC faibles, mais des valeurs de  $F_{sav}$  élevées grâce à des chaudières d'appoint à condensation. Les SSC danois, installés sur des systèmes de chauffage existants, ont des résultats conformes à ceux obtenus par les simulations (courbe 2). Les SSC allemands et français ont de bons résultats, sauf pour celui

utilisant un appoint fuel qui est un peu en dessous.

### Les résultats du programme d'évaluation français

En France, l'Ademe a mis en place un programme d'évaluation des SSC : 37 systèmes de 5 fabricants différents ont été mesurés entre 2004 et 2006. Ce programme n'est actuellement pas totalement achevé, mais les premiers enseignements peuvent en être tirés [5].

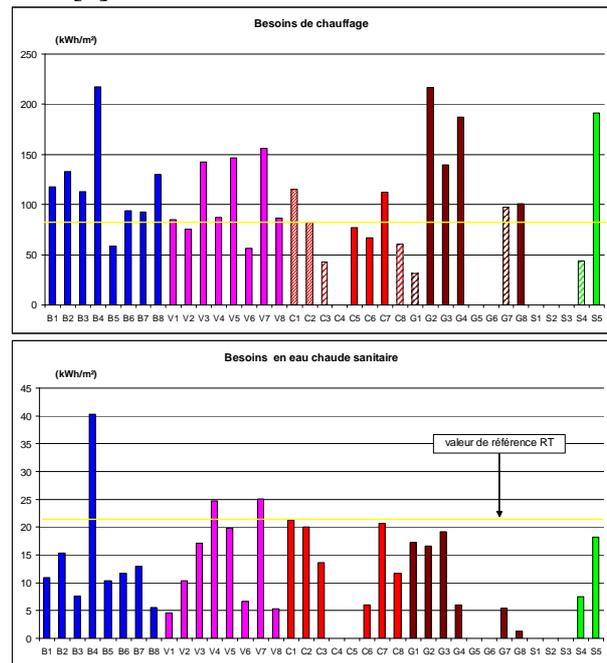


Figure 9 : Besoins spécifiques des projets du programme d'évaluation SSC

Les graphiques de la figure 9 montrent que la plupart des maisons ont des besoins de chauffage relativement élevés alors que les besoins d'ECS sont largement inférieurs au ratio moyen de la réglementation thermique Th-C 88. Cette disparité entre les besoins de chauffage essentiellement concentrés sur l'hiver alors que les besoins d'eau chaude notamment en été sont faibles, se traduit par des taux de couverture qui dépassent rarement 30 % (fig. 10). Pour cette évaluation, les consommations de référence ont été calculées à partir de la définition des installations de référence de la RT 2000 [6].

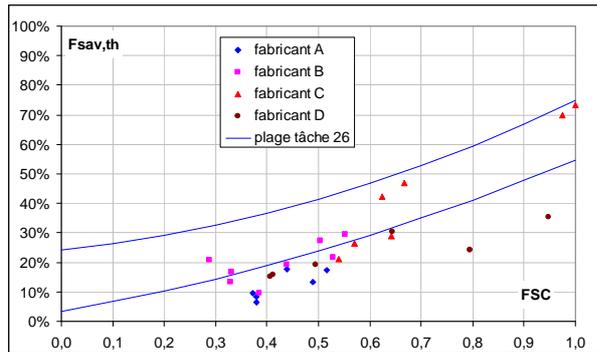


Figure 10 : Résultats du programme d'évaluation SSC pour 4 constructeurs

Pour la plupart des installations, les résultats sont situés en dessous de la plage des simulations de la tâche 26 : cette situation résulte de trois facteurs, dont l'un seul, deux ou trois peuvent être observés sur les installations :

- Conception des systèmes non optimisée (par exemple, schéma hydraulique et régulation donnant priorité au chauffage de l'ECS)
- Installation de mauvaise qualité (défaut d'isolation, schéma hydraulique non conforme aux préconisations du fabricant...)
- Réglages non optimisés

Ces résultats assez décevants montrent qu'un effort soutenu sur la qualité doit être apporté par l'ensemble des acteurs de la filière, aussi bien au niveau des constructeurs que des installateurs. Ceci est d'autant plus important que de nombreux acteurs nouveaux arrivent sur un marché qui s'ouvre rapidement aujourd'hui.

## Les perspectives

L'utilisation des systèmes solaires actifs se heurte à un paradoxe : leur productivité et par conséquent leur rentabilité sont d'autant meilleures que les besoins thermiques de base sont importants. Cependant, un SSC doit bien évidemment être préconisé une fois que les mesures permettant une diminution des besoins ont été prises, de manière à ce que la

consommation résiduelle d'énergie d'appoint soit la plus réduite possible.

On peut donc tracer les perspectives suivantes :

- Dans l'existant, une rénovation thermique du bâti peut réduire les besoins de chauffage à des valeurs comprises entre 50 et 100 kWh/m<sup>2</sup>. Dans ce cas, un SSC peut permettre d'économiser de 30 à 50 % des consommations d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. L'exemple de la figure 11 (maison ayant un besoin de chauffage de 80 kWh/m<sup>2</sup>, située à Grenoble) montre que l'économie d'énergie principale se produit pendant les mois de mi-saison (février à avril et octobre).

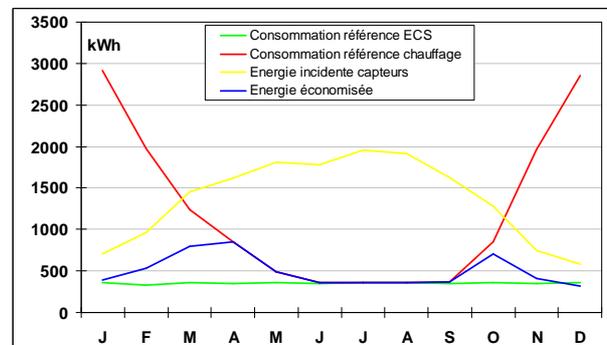


Figure 11 : Diagramme ressource – consommations pour maison existante rénovée

Pour les maisons rénovées déjà équipées d'une distribution hydraulique, un fonctionnement à basse température des émetteurs de chauffage doit être recherché : la rénovation thermique permet alors de baisser les températures de distribution à un niveau compatible avec un rendement correct du capteur solaire. Les planchers solaires directs ne sont possibles qu'en cas de réhabilitation lourde, avec création de dalles chauffantes.

Les 14 millions de maisons individuelles existant en France représentent un potentiel de développement considérable pour les SSC.

- Dans le neuf, les réglementations thermiques successives réduiront progressivement les besoins de chauffage. Les SSC pourront y être utilisés avec

profit, notamment les planchers solaires directs faciles à installer si cela est prévu dès la conception de la maison. Des taux d'économie d'énergie pouvant atteindre 40 à 60 % sont possibles dans ces conditions.

- Dans un futur plus lointain, on assistera à une diffusion de maisons hyper-isolées sans chauffage, (maisons PassivHaus) ou à besoins très faibles, rendues possibles par l'optimisation de l'enveloppe, réduisant les pertes et maximisant les apports passifs. Dans ces conditions, les besoins résiduels sont de plus en plus concentrés sur les mois les plus défavorables (décembre et janvier), peu ensoleillés et froids, où le facteur limitant concernant l'utilisation de l'énergie solaire est de toute façon la ressource (fig. 12). Sur ce type de maison, un SSC ne se justifie plus, et doit être abandonné au profit d'un simple chauffe-eau solaire.

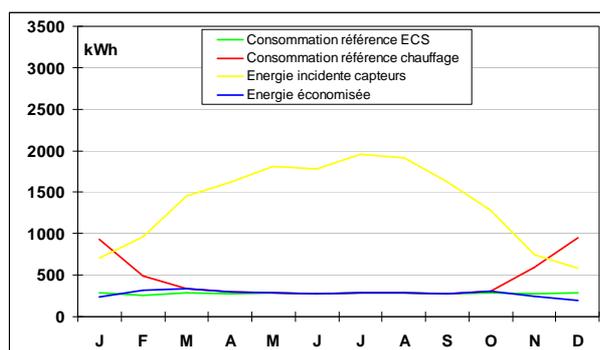


Figure 12 : Diagramme ressource – consommations pour maison hyper-isolée

## Conclusion

Amorcée il y a 5 ans, la diffusion des systèmes solaires combinés se trouve aujourd'hui à la croisée des chemins : une demande importante existe au niveau des particuliers, les pouvoirs publics mettent des moyens importants dans les aides à cette filière (crédit d'impôts, subventions directes régionales ou départementales). Profitant de cette dynamique, les professionnels (constructeurs, installateurs) proposent une offre de matériel pour laquelle la qualité n'est pas toujours au rendez-vous alors que les prix le sont. Il faut donc absolument mettre en place les moyens d'encadrer la qualité des réalisations. Cela

se passe par de la formation (séminaires techniques pour fabricants, stages pour installateurs), du travail au niveau de la caractérisation des systèmes (tests en laboratoire, mise au point d'une étiquette énergie, normalisation) et également de l'évaluation systématique des installations réalisées (enquête de satisfaction, mesures sur site).

## Références

- [1] : WEISS W. et all., Solar Heating Systems for Houses – A design handbook for solar combisystems, James and James, London, 2003, 314 p.
- [2] : AFNOR, Norme prEN 12977-2., Installations solaires thermiques et leur composants – Installations assemblées à façon – Partie 2 : Méthodes d'essais, 1997, 91 p.
- [3] : LETZ Th. - Validation and background information on the FSC procedure - A Report of IEA SHC - Task 26 Solar Combisystems, Décembre 2002, 22 p.
- [4] : LETZ T., Altener program : SOLAR COMBISYSTEMS, workpackage 6 comparison of monitoring results, avril 2003, 26 p.
- [5] : LETZ Th. et all., Suivi des systèmes combinés solaires - Guide méthodologique, Rapport Ademe, 2001, 85 p.
- [6] : Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, J.O. Numéro 277 du 30 Novembre 2000 page 19049, 18 p.

## Liens Internet

1. Agence Internationale de l'énergie – Programme de chauffage et de climatisation solaire : <http://www.iea-shc.org>
2. Tâche 26 : <http://www.iea-shc.org/task26/>
3. Projet Altener Combisystems : <http://www.elle-kilde.dk/altener-combi/> (logiciel Combisun)

# INTEGRATION ENERGETIQUE DANS LES BATIMENTS : UTILISATION COMBINEE DE L'ENERGIE SOLAIRE ET DE LA GEOTHERMIE BASSE TEMPERATURE

Valentin Trillat-Berdal\*, Bernard Souyri, Gilbert Achard

Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE)  
École Supérieure d'Ingénieurs de Chambéry (ESIGEC), Université de Savoie  
Campus Scientifique – Savoie Technolac  
73376 Le Bourget du Lac Cedex France  
Tél. +33 (0) 4 79 75 88 21

\*Mél. [Valentin.Trillat-Berdal@etu.univ-savoie.fr](mailto:Valentin.Trillat-Berdal@etu.univ-savoie.fr)

---

## Résumé

La réduction des émissions de gaz à effet de serre et la lutte contre les dérèglements climatiques impliquent le développement et la mise au point de systèmes énergétiques intégrant les énergies renouvelables disponibles sur les sites de construction. Cet article présente l'étude d'un procédé intégrant simultanément l'énergie solaire thermique et la géothermie basse température, et répondant aux besoins de chauffage, de rafraîchissement et de production d'eau chaude sanitaire des bâtiments. Le système a été récemment installé dans une maison individuelle de 180 m<sup>2</sup> en Savoie. Les résultats expérimentaux de la première saison de fonctionnement (de novembre 2004 à août 2005) ont permis d'analyser le fonctionnement du système, de mettre en évidence la décharge thermique du sol générée par le fonctionnement de la pompe à chaleur, et la contribution des capteurs solaires à la recharge thermique du sol lors des périodes de surproduction d'énergie thermique d'origine solaire. Malgré la consommation électrique des auxiliaires, qui pénalisent d'environ 15% la performance énergétique du système, le coefficient de performance saisonnier est supérieur à 3,1 sur la période considérée. Le taux de couverture solaire pour la production d'eau chaude sanitaire a, quant à lui, une valeur moyenne de 65% sur les dix premiers mois de fonctionnement. Les résultats issus de la simulation dynamique du procédé réalisés à l'aide du logiciel TRNSYS permettront de procéder à une optimisation technico-économique du système.

---

## Integration of energy in buildings: combined use of solar energy and of low-temperature geothermics

Systems which use renewable energies available on the building-sites are good solutions to reduce the green house gas effect concentration and to avoid climate changing. The study discussed relates to the experimental study of a solar-assisted ground-source heat pump system for building heating and cooling and the production of domestic hot water. The proposed process, called GEOSOL, has been installed in a 180 m<sup>2</sup> private residence. The first ten months of working (from November 2004 to August 2005) allow to analyze the operation of the system, show the thermal discharge of the ground generated by the operation of the heat pump in heating mode, and show the contribution of the thermal solar collectors to the thermal refill of the ground. In spite of the electric consumptions of the circulation pumps, which decrease the energy performance of the system of about 15%, the seasonal coefficient of performance is higher than 3,1. The domestic hot water solar fraction has an average value of 65% for the first ten months of working. At last, theoretical results generated by simulations carried out under TRNSYS are awaited to carry out a technical and economical optimization of the system.

### Nomenclature

COP : coefficient de performance  
COP<sub>PAC</sub> : coefficient de performance de la pompe à chaleur  
COP<sub>SYS</sub> : coefficient de performance du système intégrant la consommation électrique des circulateurs  
ECS : eau chaude sanitaire

PAC : pompe à chaleur  
PACG : pompe à chaleur géothermique  
PEHD : polyéthylène haute densité  
Pc : puissance calorifique  
Pf : puissance frigorifique

## 1. INTRODUCTION

En un siècle, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont augmenté de 30% [1]. Les ménages sont responsables pour moitié de ces émissions, engendrées principalement par le poste chauffage [2]. Pour tenter d'enrayer les conséquences du dérèglement climatique, il est aujourd'hui nécessaire de mettre au point de nouveaux systèmes énergétiques, qui permettent de réduire sensiblement la consommation énergétique des bâtiments en faisant appel aux énergies renouvelables. Cette démarche s'inscrit dans le développement des « bâtiments à énergie positive » qui demande une très bonne intégration énergétique.

Aujourd'hui, l'utilisation des ressources géothermiques se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi la géothermie est-elle qualifiée de « haute température », « moyenne température » ou « basse température ». Les deux premiers types de géothermie (au-delà de 100°C) produisent de l'électricité, le troisième type de la chaleur.

Il existe deux façons de produire de l'eau chaude pour le chauffage des locaux par la géothermie :

- la première est d'utiliser les nappes d'eau chaude du sous-sol profond. Pour cela il faut trouver des couches géologiques renfermant des aquifères exploitables, puis par le biais de forages profonds (de 1 à 2 km) l'eau chaude (de 50°C à 90°C) remonte à la surface. Un échangeur transfère ensuite les calories à un réseau de chauffage urbain ;
- l'autre voie de chauffage, faisant l'objet de cet article, exploite la ressource géothermique basse température des couches superficielles du sol (profondeur inférieure à 100 m) qui renferment une grande quantité d'énergie. Dans une zone comprise entre 6 et 46 mètres de profondeur, le sol est à une température constante tout au long de l'année [3]. Ce phénomène résulte de l'interaction complexe entre les flux thermiques provenant d'une part de la surface et d'autre part des profondeurs de la terre. La température de cette zone correspond finalement à la température moyenne extérieure du lieu considéré. Au dessus de cette zone (profondeur inférieure à 6 m), la température du sol est fortement fonction des conditions climatiques ; et en dessous (profondeur supérieure à 46 mètres), le gradient géothermique est prépondérant (2 à 3°C par 100 m). Depuis les années 1950 [4], cette énergie à basse température peut être exploitée pour le chauffage des bâtiments grâce au développement de la pompe à chaleur (PAC). Celle-ci rehausse, grâce à la compression et à la détente d'un fluide frigorigène, la température naturelle du sous-sol à des valeurs comprises entre 35°C et 65°C qui sont alors exploitables par les émetteurs de chaleur utilisés

dans les bâtiments. Il faut toutefois noter que plus l'écart de température entre le sol et l'émetteur de chaleur est faible, meilleur est le coefficient de performance de la pompe à chaleur ( $COP_{PAC}$ ).

L'utilisation d'émetteurs dit « basse température » est donc préconisée et permet d'avoir un  $COP_{PAC}$  supérieur à 3,5. La pompe à chaleur présente également l'intérêt d'être réversible ce qui permet, à partir d'un unique système de production, de répondre aussi bien aux besoins de chauffage que de rafraîchissement d'un bâtiment.

Pour exploiter la chaleur contenue dans les couches superficielles du sol, deux types d'échangeurs thermiques sont utilisés : les échangeurs enterrés horizontaux et les échangeurs enterrés verticaux.

Les échangeurs enterrés horizontaux sont composés de nappes de tubes. Ils demandent une surface de terrain importante (1,5 à 2 fois la surface à chauffer) et sont enterrés à une profondeur comprise entre 0,6 m (mise hors gel) et 1,5 m. Cette faible profondeur génère des fluctuations des performances en fonction des conditions météorologiques [5] [6] [7]. Selon le site, les nappes horizontales de tubes permettent de retirer 20 à 30 W d'énergie thermique par m<sup>2</sup> [5].

Un échangeur de chaleur enterré vertical est installé dans un forage vertical (parfois incliné). Il s'agit le plus souvent de deux tubes formant chacun un U, dans lequel circule un fluide caloporteur. Un matériau de remplissage remplit l'espace entre les tubes et la paroi du forage, il doit assurer un bon contact thermique entre les tubes et le terrain. En fonction de la composition géologique du terrain, la puissance d'extraction de chaleur est généralement comprise entre 20 et 70W/m [5]. Les échangeurs enterrés verticaux mobilisent une surface de terrain faible et exploitent la régularité de la température du sol en dessous de quelques mètres de profondeur, ce qui garantit des coefficients de performance élevés tout au long de l'année. Cependant, ces sondes géothermiques, lorsqu'elles sont utilisées uniquement pour le chauffage, génèrent une décharge thermique du sol (la température moyenne du sol au voisinage des sondes baisse) qui a pour conséquence de pénaliser les performances globales de la pompe à chaleur [8] [9] [10].

Les tubes en U des échangeurs enterrés verticaux peuvent aussi être intégrés à des pieux de fondation, qui jouent alors un double rôle : reporter les charges d'une construction en profondeur et servir d'échangeur de chaleur avec le terrain.

L'énergie solaire est, quant à elle, une source inépuisable de chaleur. Elle est de plus en plus couramment utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire dans l'habitat individuel ; cependant le gisement solaire disponible sur un site donné est encore très largement sous-exploité.

Cette étude vise donc à proposer une solution énergétique alternative couplant énergie solaire et géothermie basse température, et assurant grâce à l'énergie solaire excédentaire un meilleur équilibre énergétique entre l'extraction de chaleur du sol et sa recharge thermique, qui est nécessaire si l'on souhaite garantir la pérennité des performances énergétiques de la pompe à chaleur géothermique (PACG) tout au long de la durée d'exploitation de l'installation.

## 2. DESCRIPTION DU PROCÉDE GEOSOL

Le procédé, dénommé GEOSOL et décrit à la figure 1, repose sur l'idée de coupler une pompe à chaleur géothermique à des capteurs solaires thermiques de telle sorte que l'énergie solaire compense, au moins partiellement, la décharge thermique du sol engendrée par le fonctionnement de la PAC en mode chauffage. Dès que les besoins en eau chaude sanitaire sont satisfaits grâce au ballon d'eau chaude mixte solaire/électrique, l'énergie solaire excédentaire est injectée dans le sol via les sondes géothermiques. Des procédés analogues ont déjà fait l'objet d'études récentes aussi bien expérimentale comme à Lugano (Suisse) [11] que théorique comme celle menée par KJELLSSON en Suède [12]. Ces procédés visent le même objectif à savoir la recharge thermique du sol mais s'appuient sur des schémas de principe différents.

L'installation est composée de sept circuits hydrauliques :

- circuit n°1 : alimentation du ballon d'eau chaude sanitaire par les capteurs solaires ;
- circuit n°2 : alimentation de la bouteille casse-pression n°1 par les capteurs solaires ;
- circuit n°3 : circuit des échangeurs enterrés

verticaux ;

- circuits n°4 et 5 : connexion des bouteilles casse-pression à la PAC ;
- circuit n°6 : circuit de distribution du plancher chauffant-rafraîchissant ;
- circuit n°7 : circuit de distribution de l'ECS.

Tous les circuits (sauf celui de l'eau chaude sanitaire) comportent un circulateur muni d'un clapet anti-retour. La solution technique privilégiant la mise en place de vannes à trois voies pour gérer la connexion des circuits n'a pas été retenue car elle génère généralement des coûts de maintenance supérieurs, et alourdit la régulation de l'ensemble du procédé.

Les deux bouteilles casse-pression de 50 litres assurent le découplage hydraulique des différents circuits. Elles jouent également le rôle de stockage de chaleur, mais celui-ci est volontairement limité pour que les transferts d'énergie entre les différents circuits hydrauliques soient les plus rapides possibles.

Les avantages techniques de ce procédé sont multiples :

- la surchauffe des capteurs solaires est évitée en toutes saisons, grâce à l'injection dans le sol de l'énergie solaire excédentaire. La valorisation de cette énergie renouvelable tend donc à devenir optimale ;
- la décharge thermique du sol est ralentie ;
- la température moyenne du fluide à l'évaporateur est plus élevée, grâce notamment au volume de stockage intermédiaire constitué par la bouteille casse-pression située à l'amont de la PAC.

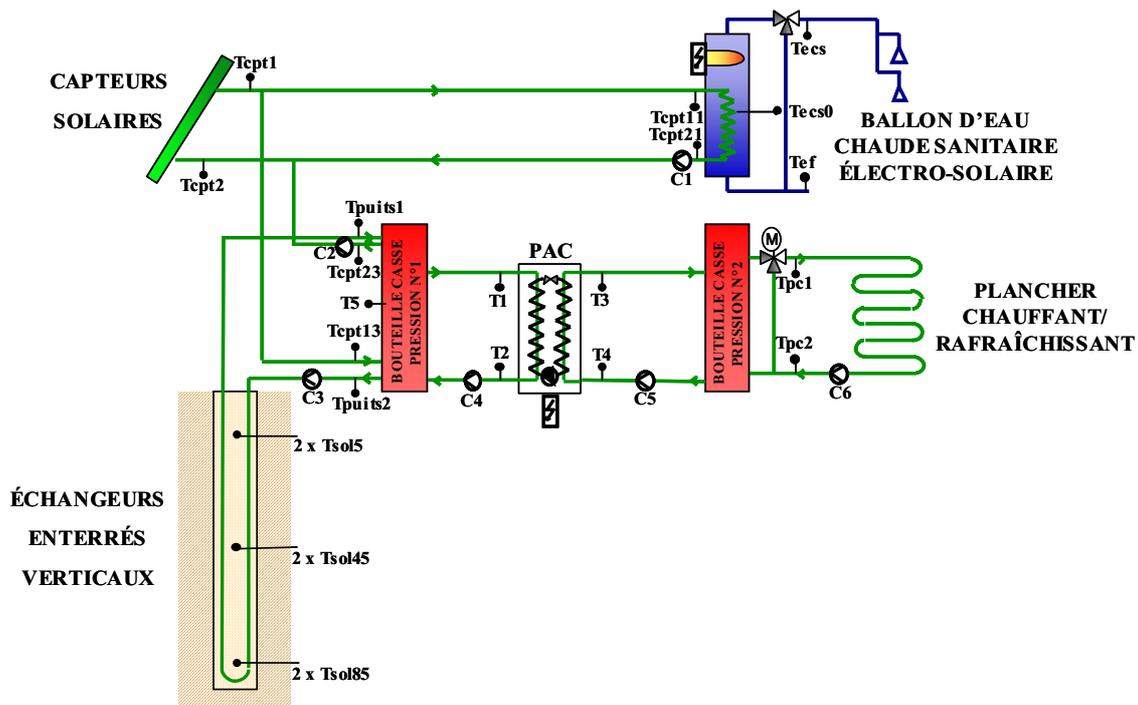


Figure 1 : schéma du procédé GEOSOL

### 3. EXPERIMENTATION DU PROCEDE

#### 3.1 Installation du procédé GEOSOL

Le système décrit précédemment a été mis en œuvre dans le cadre de la construction neuve d'une maison individuelle de 180 m<sup>2</sup> de surface habitable à St Jean d'Arvey en Savoie (73). Réceptionnée en juillet 2004, la maison (figure 2) comprend une zone combles aménagés, une zone rez-de-chaussée (cuisine, séjour, chambre 1, WC, entrée, cellier et garage) et une zone sous-sol semi enterrée (chambres 2, 3, et 4, salle de bains, atelier, cave et chaufferie).



Figure 2 : vue de la façade Est de la maison

L'eau chaude sanitaire est produite par un ballon à énergie mixte solaire/électrique d'un volume de 500 litres. Le chauffage de l'ECS par les capteurs solaires thermiques est prioritaire ; lorsque l'ensoleillement ne suffit pas au chauffage de l'ECS (la température de consigne est fixée à 65°C), l'appoint électrique prend le relais. Pour l'étude de notre procédé, la surface des capteurs solaires de marque CLIPSOL - généralement de l'ordre de 6 m<sup>2</sup> au vu des besoins des occupants [13] - a été surdimensionnée et portée à 12 m<sup>2</sup> pour favoriser le mode de fonctionnement recharge thermique du sol. Les circuits hydrauliques sont protégés du gel jusqu'à -18°C avec du monopropylène glycol à 35% de concentration.

Dans les conditions de température extérieure de base (-12°C) les déperditions thermiques du bâtiment ont été évaluées à 12 kW (pour un coefficient  $U_{bat}$  de 0,64 W/(m<sup>2</sup>.K)) ; les besoins de chauffage sont fournis par une PAC réversible (modèle CIAT Auréa ILA Z60) d'une puissance calorifique de 15,8 kW en mode chauffage pour une température à l'entrée du condenseur de 40°C et une température à l'entrée de l'évaporateur de 5°C. Deux émetteurs de type plancher basse température (154 m<sup>2</sup> au total), un pour la zone sous-sol et un pour la zone rez-de-chaussée assurent le chauffage en hiver et le rafraîchissement en été des locaux.

La PAC puise son énergie dans le sol grâce à deux échangeurs verticaux en PEHD (polyéthylène haute densité) de 90 mètres de profondeur chacun, équipés de deux tubes en U de 32 mm de diamètre extérieur. Sur les 10 premiers mètres de profondeur, l'espace compris entre les tubes et le forage est composé d'une cimentation pour empêcher tout risque de pollution du

sous-sol par les eaux de surface. Pour les 80 mètres restant, cet espace est rempli par du sable. Le sol est principalement composé de moraines sur les 30 premiers mètres et de roches calcaires pour le reste du forage. De plus, les forages réalisés pour les échangeurs enterrés verticaux n'ont pas révélé d'écoulement d'eau souterraine pouvant notamment être préjudiciable lors des phases d'injection dans le sol de l'énergie solaire excédentaire.

#### 3.2 Instrumentation

Les températures de fluide sont mesurées grâce à des sondes de type PT1000 placées dans des doigts de gant. Des compteurs volumétriques à impulsions donnent les débits des différents circuits hydrauliques. Ces sondes sont connectées à un système d'acquisition (figure 3) relié à un ordinateur qui recueille les données en continu, avec un pas de temps suffisamment faible (de l'ordre de la minute) pour accéder précisément à l'évolution temporelle des phénomènes physiques. Ainsi les énergies produites ou consommées par les divers circuits sont connues. Les consommations électriques horaires des différents postes (circulateurs, appoint électrique du ballon d'ECS, compresseur de la PAC) sont obtenues grâce à des indicateurs de consommation électrique. Une station météorologique mesure la température extérieure, l'humidité de l'air ainsi que l'ensoleillement du site sur un plan horizontal.



Figure 3 : vue d'une partie du système de métrologie

Le traitement de toutes ces données permet de procéder au réglage et à l'optimisation énergétique du système, et de calculer le COP instantané et saisonnier de l'installation. Toutes ces données seront aussi utilisées pour valider le modèle numérique du procédé développé à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS [14].

### 4. SUIVI EXPERIMENTAL

#### 4.1 Principes de régulation de la PACG

Le suivi expérimental présenté dans cet article porte sur la période de novembre 2004 à août 2005. La durée des cycles de fonctionnement de la PAC en mode chauffage, directement liée aux besoins de chauffage, a

évolué entre 4 minutes et 3 heures. Le mode chauffage est régulé selon deux séquences successives :

- l'ouverture de la vanne à trois voies du circuit de distribution du plancher est commandée par une sonde d'ambiance installée dans le séjour, et une sonde de température extérieure ;
- le fonctionnement de la PAC est activé lorsque la température à l'entrée du condenseur ( $T_4$ ) devient inférieure à  $26^\circ\text{C}$ , et stoppé lorsqu'elle atteint  $31^\circ\text{C}$ . Cette consigne est fixée volontairement à une faible valeur pour diminuer l'écart de température moyen entre l'évaporateur et le condenseur, ce qui a pour conséquence d'améliorer le COP.

Ces séquences sont observables sur la figure 4.

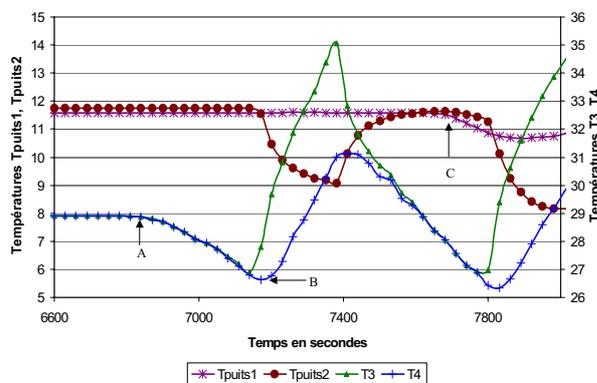


Figure 4 : séquences de fonctionnement de la PACG

Avant le point A, la température de départ du plancher chauffant n'est pas suffisante pour couvrir les besoins de chaleur, ce qui entraîne l'ouverture de la vanne à trois voies. Les températures du fluide côté condenseur ( $T_3$  et  $T_4$ ) commencent alors à diminuer. Lorsque  $T_4$  devient inférieure à  $26^\circ\text{C}$  (point B), la régulation interne de la PAC commande alors la mise en route de son compresseur et des circulateurs C4, C5 et C6. Dès la mise en route de la PAC, la température du fluide à la sortie de l'évaporateur diminue, ainsi que celle au départ des sondes géothermiques ( $T_{\text{puits2}}$ ) ; la température au retour des puits ( $T_{\text{puits1}}$ ) diminue environ 10 minutes après (point C). Cette durée correspond approximativement au temps de renouvellement total du fluide dans les sondes géothermiques. Tant que la durée du cycle de fonctionnement de la PAC reste inférieure à 10 minutes, la température moyenne du fluide à l'évaporateur diminue lentement et affecte peu le COP de l'installation.

#### 4.2 Etude du comportement du procédé

Les conditions météorologiques du 17 novembre 2004 (journée froide et ensoleillée) étaient favorables pour activer le mode recharge thermique du sol par les capteurs solaires. La figure 5 illustre les différentes phases de fonctionnement de l'installation lors de cette journée. La PAC a fonctionné en continu puis de

manière cyclique jusqu'en milieu de matinée. Les planchers chauffants sont alors à un niveau de température suffisant pour que, grâce à leur inertie, la PAC reste à l'arrêt jusqu'à la nuit suivante.

En fin de matinée, comme la consigne de température dans le ballon d'ECS est respectée, et comme le niveau d'ensoleillement n'est pas suffisant pour augmenter plus amplement la température de production de l'ECS, l'énergie solaire excédentaire a donc été injectée dans le sol de 11h jusqu'à 17h. Lors de cette journée, la puissance moyenne fournie par les sondes géothermiques était de l'ordre de  $8500\text{ W}$ , soit  $45\text{ W/m}$  de puits. Le COP de la pompe à chaleur est calculé avec la relation (1).

$$P_f = P_c \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (1)$$

où  $P_f$  (puissance frigorifique) et  $P_c$  (puissance calorifique) sont déterminés expérimentalement. Il est intéressant de noter qu'en début de nuit, après un fonctionnement en continu de la PAC de plusieurs heures, le COP a tendance à diminuer, alors qu'ensuite, lorsque le fonctionnement de la PAC devient cyclique (cycle d'environ une heure), le COP a au contraire plutôt tendance à croître. En effet, entre deux séquences de marche la température moyenne des puits remonte et se rapproche de la température moyenne du sol ; quand la PAC se ré-enclenche, le niveau de température de l'évaporateur est plus élevé, et génère un meilleur COP.

La durée des cycles de fonctionnement de la PAC est directement liée aux besoins énergétiques du bâtiment. Pour éviter les courts cycles et l'usure prématurée des organes de la PAC, la durée minimale de fonctionnement du compresseur est réglée à 4 minutes. Lors des périodes de grands froids, la PAC peut marcher plusieurs heures consécutives, avec pour conséquence une baisse sensible du COP, et le risque de geler localement le sol à proximité des sondes géothermiques. Le bon dimensionnement de la PAC (puissance et températures moyennes du fluide à l'évaporateur et au condenseur) et des sondes géothermiques (nombre et longueur des puits) est donc crucial pour assurer un fonctionnement optimal et durable des installations géothermiques à échangeurs verticaux [15].

#### 4.3 Mise en évidence de la décharge et de la recharge thermique du sol

Les sondes de températures  $T_{\text{sol5}}$ ,  $T_{\text{sol45}}$  et  $T_{\text{sol85}}$  sont positionnées près des 2 tubes en U, au centre des échangeurs enterrés verticaux. Elles permettent d'étudier le comportement des puits lorsque la PAC fonctionne et de s'assurer que le sol situé à proximité de ceux-ci n'est pas soumis à un risque de gel. De plus, nous avons pu constater que lorsque les échangeurs enterrés ne sont pas exploités pendant plus de 2 jours, ces températures se stabilisent. Elles correspondent

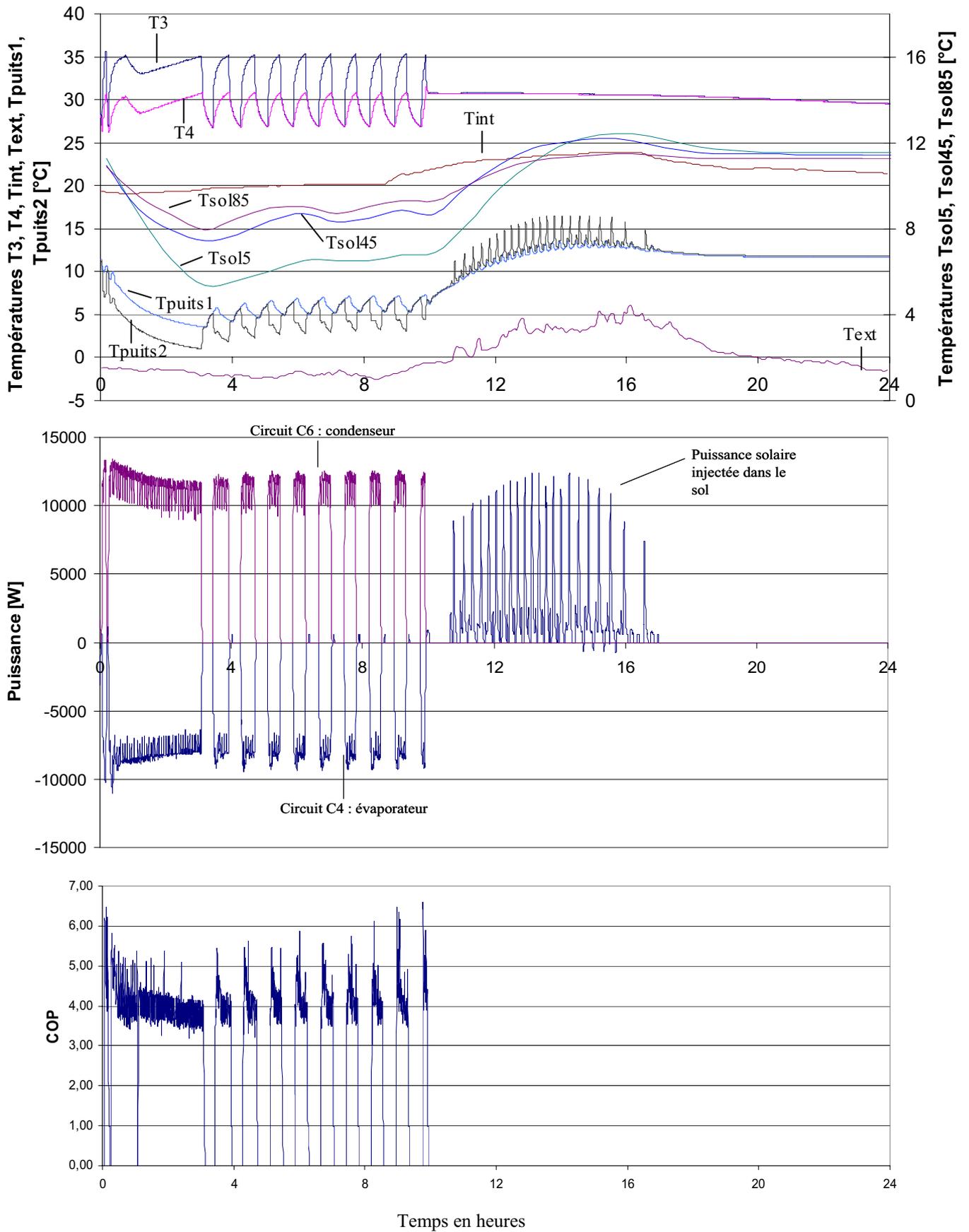


Figure 5 : évolution journalière des températures, des puissances et du COP du procédé GEOSOL

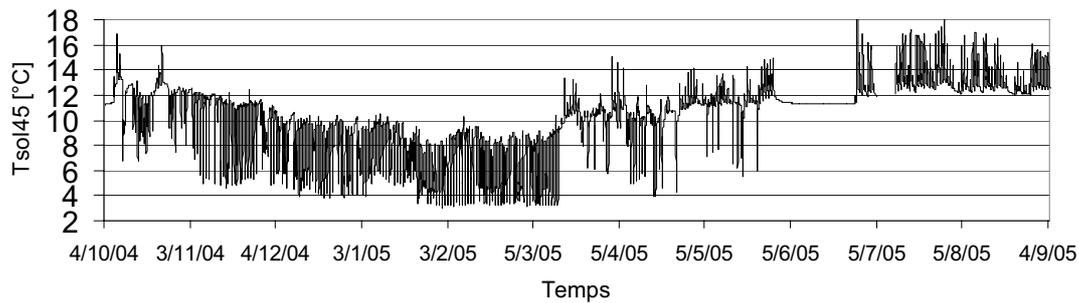


Figure 6 : évolution de la température Tsol45 dans un des deux échangeurs enterrés verticaux

alors à la température moyenne du sol situé à proximité des échangeurs enterrés. La figure 6 nous présente l'évolution, depuis la mise en fonctionnement de l'installation, de la température Tsol45 située à 45 m de profondeur dans un des deux puits. Les oscillations des courbes correspondent aux phases de marche arrêt de la pompe à chaleur. Avant la mise en fonctionnement du procédé, la température initiale du sol était de 11,6°C. La figure 6 indique que cette température a tendance à diminuer à partir du milieu du mois d'octobre 2004, date correspondant à la mise en fonctionnement de l'installation. Les relevés montrent qu'à la fin de la saison de chauffage, le sol situé à proximité des puits a une température proche de 9°C. A partir du milieu de mois de mars 2005, le fonctionnement en mode chauffage se fait plus rare (tableau 1). En parallèle, le fonctionnement en recharge thermique du sol par les capteurs a un temps de fonctionnement de plus en plus important, ce qui explique l'augmentation de Tsol45. Au mois de juin 2005, le puits a été déconnecté afin d'estimer la température à proximité des puits : à savoir 11,3°C. Nous pouvons également voir au cours des mois de juillet et d'août l'influence sur la sonde de température de la recharge thermique par les capteurs solaires.

#### 4.4 Bilan énergétique

Le tableau 1 présente les bilans énergétiques du procédé GEOSOL au cours des dix premiers mois de fonctionnement. Les coefficients de performance énergétique de l'installation diminuent tout au long de la saison de chauffage car la température moyenne du sol mesurée au voisinage des sondes géothermiques a baissé (figure 6). La décharge thermique du sol et ses effets immédiats sur l'installation sont ainsi mis en évidence.

Suite au défaut d'un appareil de régulation, la recharge thermique du sol par les capteurs solaires a peu fonctionné en juin. A la fin du mois d'août, l'énergie solaire injectée dans le sol représente 32% de l'énergie extraite par la pompe à chaleur depuis sa mise en service.

Par ailleurs, la comparaison du coefficient de performance instantané ( $COP_{PAC}$ ) avec le coefficient de performance du procédé GEOSOL ( $COP_{SYS}$ ), qui intègre la consommation électrique des circulateurs montrent que ces auxiliaires diminuent d'environ 15% les performances globales du système (tableau 1) ; il est donc particulièrement important de limiter le nombre de circulateurs au strict minimum, de choisir les moins énergivores et d'optimiser leur vitesse de rotation.

Tableau 1 : bilan d'exploitation

	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Température moyenne extérieure (°C)	4,7	2	-1,1	-0,8	6,7	10,1	15,2	20,3	20,5	18,1
Irradiation horizontale (kWh/m <sup>2</sup> .h)	62	40	65	49	134	170	200	264	223	180
Temps de fonctionnement de la PAC (heures)	88	185	190	186	106	66	18	13	0	0
Energie extraite du sol (kWh)	629	1321	1407	1272	723	497	139	84	0	0
Energie solaire injectée dans le sol (kWh)	63	26	34	40	156	283,5	277,4	147,2	531	363
COP <sub>PAC</sub>	4,1	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,8	3,8	/	/
COP <sub>sys</sub>	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1	3,1	3,3	3,3	/	/
Taux de couverture solaire pour le chauffage de l'ECS (%)	27	15,4	40,2	40,9	82,3	63,6	93,8	100	100	88,7

Enfin, le taux de couverture solaire pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire, calculé selon les normes internationales [16], a une valeur moyenne de 65% jusqu'à la fin du mois d'août.

## CONCLUSION

Le procédé GEOSOL, qui propose d'intégrer dans un système unique énergie solaire thermique et énergie géothermique est opérationnel depuis novembre 2004 dans une maison individuelle. Le couplage des deux sources d'énergie vise à optimiser le gisement solaire d'un site en l'exploitant pour la production d'eau chaude sanitaire et pour la recharge thermique du sol, dont le potentiel énergétique est diminué par le fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermale à capteurs enterrés verticaux dédiée aux besoins de chauffage de l'habitation.

L'instrumentation du procédé et le suivi de l'installation sur les dix premiers mois de fonctionnement ont mis en évidence la décharge thermique du sol générée par la PAC, ainsi que les effets favorables induits par le couplage des capteurs solaires thermiques aux sondes géothermiques. La quantité d'énergie solaire injectée dans le sol représente 32% de l'énergie extraite par la pompe à chaleur au cours de la saison de chauffage et le taux de couverture solaire pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire a une valeur moyenne de 65%. De plus, le coefficient de performance du système géothermique reste supérieur à 3,1 sur la période d'étude considérée.

Le suivi expérimental lors du prochain hiver montrera si la recharge thermique du sol entre les deux saisons de chauffage est suffisamment efficace pour garantir des coefficients de performance identiques à ceux observés lors des premiers mois de fonctionnement de l'installation.

Enfin, l'étude devra conduire à l'optimisation technico-économique du procédé GEOSOL en termes de conception hydraulique de l'installation, de surfaces de capteurs solaires thermiques, du nombre et des longueurs de sondes géothermiques. Ce procédé pourra évidemment être étendu ultérieurement à des installations de plus grande taille, telles que des lotissements, des quartiers, des bâtiments collectifs d'habitation ou tertiaires.

## REMERCIEMENTS

Cette étude bénéficie du soutien financier de l'Assemblée des Pays de Savoie, de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), et du PUCA (Plan Urbanisme Construction et Architecture). Les partenaires industriels du projet sont les sociétés CIAT, CLIPSOL et ECO'ALTERNATIVE.

## RÉFÉRENCES

- [1] **MONFRAY**, P., INSU, 30 ans de recherche en sciences de l'Univers, 1967-1997
- [2] **MAYER**, J., **DANAE**, D., Campagne de mobilisation nationale 2004-2006 sur les économies d'énergie et le changement climatique, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 36 pages, (2004)
- [3] **CHIASSON**, A.D., Advances in modelling of ground-source heat pump systems, Oklahoma State University, 168 p. (1999)
- [4] **SANNER**, B., Some history of shallow geothermal energy use, International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy, 10 p.
- [5] **PAHUD**, D., Geothermal energy and heat storage, SUPSI-DCT-LEEE, Laboratorio di Energia, Ecologia ed Economia, CH – 6952 Canobbio, 133 p. (2002)
- [6] **REUSS**, M., **SANNER**, B., Design of closed loop heat exchangers, International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy, Chapter 2.5, pp. 147-156 (2000)
- [7] **BOSE**, J.E., **SMITH**, M.D., **SPITLER**, J.D., Advances in ground source heat pump systems an international overview, Proceedings of the Seventh International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, May 19-22, pp. 313-324 (2002)
- [8] **CHIASSON**, A.D., **YAVUZTURK**, C., Assessment of the viability of hybrid geothermal heat pump systems with solar thermal collectors, ASHRAE Transactions 109(2), pp. 487-500. (2003)
- [9] **PAHUD**, D., **MATTHEY** B., Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ, Energy and Buildings, 5 pages, (2001)
- [10] **TRILLAT-BERDAL**, V., **SOUYRI** B., **ACHARD**, G., Numerical study of the evolution of ground-coupled heat pump system performance, Ninth International IBPSA Conference, August 15-18, 2005, Montréal, Canada, 1245-1252
- [11] **PAHUD**, D., **LACHAL**, B., Misura di un impianto di riscaldamento con sonda geotermica a Lugano, rapport intermédiaire décembre 2002, Programme de recherche énergétique sur mandat de l'Office Fédéral de l'Energie (Suisse), 30 pages, (2002)
- [12] **KJELLSSON**, E., Solar Heating in Dwellings With Analysis of Combined Solar Collectors and Ground Source Heat Pump, Report TVBH 3047, Dept. of Buildings Physics, Lund University, Sweden, 173 p. (2004)
- [13] **Office Fédéral de l'Energie Suisse**, Dimensionnement d'installations à capteurs solaires, 12 pages, (2000)
- [14] **KLEIN** et al., TRNSYS, A TRANSIENT SYSTEM SIMULATION PROGRAM, Version 15.1, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, (2000)
- [15] **BERNIER**, M., Uncertainty in the design length calculation for vertical ground heat exchanger, ASHRAE AC-02-15-2, 5 pages, (2002)
- [16] **International Standard ISO/FDIS 9488:1999(E/F)**, (1999), 47p.

# SUSTAINABLE BUILDINGS: DREAM OR REALITY?

Radu ZMEUREANU

Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Centre for Building Studies, Faculty of Engineering and Computer Science, Concordia University, Montreal (Quebec), Canada H3G 1M8, [zmeur@bcee.concordia.ca](mailto:zmeur@bcee.concordia.ca)

Keywords: sustainability, environmental load, buildings, indices, thermodynamics, exergy.

## Summary

The design community and stakeholders started to accept the concept of "Green Buildings." The green buildings incorporate better practical solutions, with respect to the present market or design requirements, that reduce the environmental load. Although the development of green buildings has a considerable success in the today's market, this concept is only the first step towards the sustainable buildings. Over the past three decades, researchers discussed other approaches for assessing the sustainability of a given development, including buildings. The paper presents a short summary of indices of sustainability with applications to buildings, with emphasis on those based on the second law of thermodynamics. The paper also presents examples from some case studies from the author's research projects, related to the building envelope and HVAC systems.

## 1. Sustainable Development

The United Nations report "Our Common Future", known as the Brundtland report (1987), defined the sustainable development as "development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs." In a few years, the sustainable development has evolved from an esoteric concept to a philosophy embraced by dozens of multinational corporations and government agencies (Fiksel and Fiksel 2001).

On the other hand, Leadbitter (2002) underlined that the Brundtland definition failed to convey the idea that there are biophysical limits within which society must operate. In his opinion, the sustainable development is only the process of moving towards sustainability. The present situation is characterized by the fast-depletion of resources and the fast-growth of population. Under these conditions, a sustainable system should be defined as one that can continue forever, without any additional impact on resources. The final destination of sustainability must be defined in such a way that some indices could be measured, and finally compared with accepted benchmarks. Hammond (2004a) made reference to work by Parker, who found in the literature more than 200 formal definitions for sustainable development.

There are, however, no accepted standards for measurement of sustainability. The situation is even worst: all definitions and measurements of sustainability must consider the fact that we do not really know how the system works (Hardi et al. 1997), and therefore the decision about what to measure must be based on judgments about what is important, in the absence of full knowledge.

Four ecological principles, known as the Natural Step concept, were defined as criteria for sustainability (Robert et al. 1995): (1) Substances from the Earth's crust must not systematically increase in the ecosphere; (2) Substances produced by the society must not systematically increase in the ecosphere; (3) The physical basis for the productivity and diversity of nature must not be systematically diminished; and (4) Resources must be used fairly and efficiently with respect to meeting human needs. Hammond (2004b) believes that the Natural Step criteria put severe constraints on economic development, and therefore be viewed as impractical or utopian.

Peacock (1999) concluded that there are three major concepts about sustainability: (1) there is no problem that the technology cannot solve or the "business as usual" concept, (2) the sustainability is the management of scarce resources or the "lifeboat" concept, and (3) the sustainability is the symbiosis between humans and the ecosystem or the "mutualistic" concept. According to the lifeboat concept, the sustainable development is not even theoretically conceivable. The sustainable use of nonrenewable resources means using them as slowly as possible, to delay their complete depletion. The unsustainable use of renewable resources means using them slowly enough that the ecosystem can regenerate them. Peacock is the promoter of the mutualistic concept, where humans can produce with hands and voices as plants produce chlorophyll. For instance, through a sensitive design and careful placement in the landscape, a new building can enhance the productive effectiveness of human beings. Cultural factors generated by the construction of a new building such as architecture, art, music, literature or philosophy should also be considered when its sustainability is measured.

Voorspools (2004) analyzed the current efforts towards sustainability of energy services, and concluded that they mainly focus on efficiency improvement and sustainable conversion technologies. In his opinion, these technological efforts most likely cannot provide long-term alternatives, and therefore there are only two long-term sustainable alternatives: (i) the discovery of an infinite energy source, and (ii) the stabilization of demand for energy services.

Norde (1997) warned the reader that the “thermal death” of the universe (when no energy will be available to generate work, and the processes will cease to occur) should not be of concern, because long before this event occurs the Sun will extinguish, and therefore the terrestrial life will be impossible. In his opinion, the future of the Earth on a shorter term should be the real concern. The use of some energy sources such as nuclear energy, which is supposed to be unlimited, will bring in addition to some technical issues another problem: the maintaining of a high flow of energy will require the significant increase of matter entropy, and therefore matter will dissipate over the planet and will not be available any more. Therefore, the thermodynamics lead the reader to the only feasible scenario of sustainable development, in which the economic activities should be adjusted to low-scale energy consumption, and the technological infrastructure should be modified to use only the renewable energy sources (e.g., sun, water and wind).

Other researchers argued that development per se cannot be sustainable or even it is not desired by some developing countries. Finally, other researchers suggested that the sustainability may be just a dream such as happiness (Manning 1990, referred by Peacock 1999). Thring (1990) prefers that humanity would look for a creative and stable world with the aid of equilibrium engineering.

The opinions presented above indicate that there is no consensus on the definition of sustainable development or even on the question if such development could exist. Fowler and Hobbs (2003) tried to respond to the question “Is humanity sustainable?” The authors compared humans with 31 samples of non-human species with respect to the following measures: biomass consumption, global energy consumption, CO<sub>2</sub> production, population size and extent of unoccupied areas. They concluded that humans consume more than the mean of other species and also produce more CO<sub>2</sub> emissions (they are outside the 90-99% confidence limits). This abnormality leads to the conclusion that humanity is not sustainable. Our uniqueness is the source of extreme risks, including extinction.

Glicksman (2003) noticed that there is no general agreement about the meaning of a sustainable building, and developers are more interested in making the building “look green”. The coordination between the designer, consulting engineer, and building owner is the important condition to achieve the outstanding sustainability performance of a building. The concept of sustainable development is translated in the building industry as the concept of sustainable buildings or “green” buildings (Brandemuehl 2004).

ASHRAE defined the concept of green design, as applied to building systems, as the design that is aware of and respects nature and the natural order of things. A green building is one that achieves high performance, over the full life cycle, in the following areas (Grumman 2004): (1) Minimal consumption of nonrenewable natural resources, depletable energy resources, land, water, and other materials as well; (2) Minimal atmospheric emissions having negative environmental impacts, especially those related to greenhouse gases, global warming, particulates, or acid rain; (3) Minimal discharge of harmful liquid effluents and solid wastes, including those resulting from the ultimate demolition of the building itself at the end of its useful life; and (4) Minimal negative impacts on site ecosystems. The sustainability is a simple and good general definition when is applied to planet Earth, however, it is difficult to apply the concept, in a meaningful way, to an individual earthly component such as a building. For this reason, the ASHRAE GreenGuide focused on “green” buildings, and was developed specifically directed toward practitioners.

A global vision about the sustainability of built environment requires the implementation of mechanisms to transform the traditional linear development process followed presently by the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry into a closed cyclical system (Vanegas 2003). The sustainable built environment should ensure the collaborative push/pull environment of three components: (1) the sustainable facilities, (2) the sustainable civil infrastructure systems, and (3) the sustainable technologies, systems, products, materials and equipment. Each component should be optimized over its life cycle. A residence that can be a provider of energy rather than a simple user is an example of such collaborative environment. This new goal will pull the development of new technologies and materials, and will push the utility companies to use the excess electricity generated by these residences.

Larsson (2000) presented the Canadian experience in the integrated building design process as a significant step towards the green building design process. The Commercial Buildings Incentive Program (CBIP) and C-2000 program proved that, at least in the Canadian context, it is possible to improve the energy performance by about 35% without heroic measures.

Although the development of green buildings has a considerable success in the today’s market, this should be only the first step towards sustainable buildings. It is important to define at the very beginning the control boundaries used for the definition and analysis of sustainable buildings. There are two extreme cases:

- (1) The sustainable building is seen as one component of a larger geo-socio-economical space, and therefore its performance should be evaluated through the contribution to the sustainable development of the village, community, city or country. The goal of design and operation of such building is the

minimization of environmental loads, expressed as energy use (e.g., annual or life cycle operation energy use, life cycle totals energy use including embodied energy and operation energy), life cycle equivalent CO<sub>2</sub> emissions, and life cycle costs that may integrate the external costs related to the environmental impacts (e.g., penalties or taxes, or abatement costs).

- (2) The sustainable building is seen as a net producer of goods (e.g., energy) with respect to surroundings, which would sustain the socio-cultural-economical development within its own boundaries. An example of this approach is the Net Zero Energy House.

## 2. Indices of Sustainable Development

Over the last decade a large number of practical tools such as GBTool, BEES, BREEAM or Athena have been developed to help designers in assessing the environmental impact of buildings. The Green Building Challenge, an international competition organized along with the Sustainable Building conference was of a great success. Designers proved that it is possible to improve significantly the energy performance and reduce the environmental impact. A detailed matrix of indicators was used to compare the performance of buildings in competition. Several building energy rating schemes (e.g., HERS) or environmental rating schemes (e.g., LEED) are today in operation.

The indicator framework of the United Nations Commission on Sustainable Development, which is used by national governments to measure their progress in implementing Agenda 21, includes a list of over 140 indicators grouped in four major categories: social, economic, environmental and institutional (Hardi et al. 1997). In Canada, the sustainable development is measured based on the ecological framework of the Indicators, Monitoring and Assessment Branch of Environment Canada. There are 18 issue areas (e.g., atmosphere, water, living organisms, and natural economic resources) for each ecozone of Canada.

Green Building Council (Larsson 2003) proposed the use of several indicators to measure the building sustainability such as total embodied energy, total primary energy for building operation, area of land for building and related works, annual greenhouse gas emissions from operation and annual consumption of potable water for operation.

Designers and clients look for innovative design solutions, which will make buildings “greener” than before. Following this approach, one may ask questions such as: How much “green” a building should be? What is the ideal building “greenness”? Instead of responding to this question, someone should look from a higher level of concept, which is the concept of sustainable buildings. All efforts and successes obtained so far by designers should open a new search towards the development of sustainable buildings. The goal should be assessed in terms of objective functions that are not affected by economical or political conditions of today such as energy price, labor and material cost, or current standards and by-laws. Over the past three decades, researchers developed several indices that eventually can be used to respond to questions such as: How to measure sustainability or sustainable development, or how to measure the progress towards sustainability? Some of these indices are presented in this section. The emphasis is given to those indices based on the second law of thermodynamics that help assessing the quality of developments and the potential impacts on the environment.

Wall (1977) recommended the use of exergy for the accounting of natural resources. In 1993 he proposed the use of exergy of emissions as an indicator of environmental effects.

Wackernagel and Rees (1996) introduced one single indicator, called the ecological footprint, to assess the sustainability of human developments. The ecological footprint of a given population is the amount of productive land required to produce the energy and materials, and to assimilate all wastes generated by that population, in order to sustain the lifestyle. The calculated value is compared with the overall average of 2.0 hectares per person, which is estimated by dividing the total area of Earth's productive land by the today's population. For instance, the average footprint of Canada is 8.8 ha/person (Footprint 2005). This result can be converted into another indicator that is much easier to understand: if every person on the Earth would have the same life style as an average Canadian, we would need more than four planets to sustain that lifestyle.

McMahon and Mrozek (1997) interpreted the Brundtland definition as the call for continued economic expansion without environmental degradation. Presently, the environmental decision models are based on: (1) the axiom of material value (the resources have no intrinsic value apart from their economic value on the market), and (2) the axiom of abundance (the Earth is very large, so the natural capital cannot be depleted or degraded by economic processes within human time frame). As a consequence of the second axiom, it is concluded that technologies will always find substitution among sources of natural capital, and between manmade and natural capital. The authors indicated that the entropy, as a measure of irreversibility, should be the unifying factor of economics, physics and ecology for the foundation of the theoretical concept of sustainability.

Krotscheck (1997) discussed several indicators for eco-sustainability: (1) the critical volume of air, water and soil that is needed to dilute the toxic emissions; (2) the material input (water, air, abiotic material such as

concrete, and biotic material such as biomass) per unit of goods produced by the process; (3) the sustainable process index (SPI) that is the area per inhabitant, which is required for the delivery of a service (e.g., area to produce raw materials, area to provide process energy, area to accommodate products and by-products); (4) the appropriated carrying capacity that is the area a region uses to run its economy; (5) the waste potential entropy (WPE) that is measured as the difference between the actual entropy of a system and its final entropy, after it reaches equilibrium with its local environment; and (6) the pollution control (abatement) costs that show the costs for control measures to attain a specific environmental quality.

Rosen and Dincer (2001) represented the relationship between exergy, sustainability and environmental impact as follows: the sustainability increases and the environmental impact decreases as the exergy efficiency of a process increases.

Gong and Wall (2001) found that the Delin's definition of sustainability offers a precise measurement, without being manipulated by political or economical arguments. According to this definition, the thermodynamic conditions of sustainable life-support system require that the incoming energy from the sun must be greater than the outgoing energy, and therefore the exergy must be stored as deposits on the earth. The authors used the life cycle exergy analysis, applied to renewable and non-renewable resources, to define sustainable engineering. If the input of exergy to build, for instance a wind power plant or a solar collector, is less than the output of exergy over the entire life duration, than the deposits that were initially used can be restored, and the development is considered to be sustainable.

Cornelissen and Hirs (2002) applied the exergetic life cycle assessment to analyze the depletion of natural resources through the depletion of copper ore. The depletion of natural resources is calculated as the difference between the life cycle irreversibilities and the depletion of exergy content of renewables.

Lems et al. (2002) presented the overall sustainability coefficient, originally developed by De Wulf, as the average of the renewability parameter and the overall efficiency parameter. The renewability parameter is defined as the exergy value of the ingoing renewable resources as a fraction of the exergy value of all resources used in the process. The overall efficiency parameter is defined as the product of two efficiencies: (1) The first efficiency is calculated as the ratio between the exergy required to run a process and the total exergy of the process including the exergy required for abating the harmful emissions; (2) The second efficiency is defined as the exergy value of the useful products as a fraction of the exergy value of resources required to run the process. Maximum overall sustainability is obtained when all resources used in the process are renewable, and when no exergy is lost in the process and no exergy is required to abate harmful emissions. Lems et al. (2002) presented a revised quantification method of the sustainability of a technological process that is composed of a set of three independent sustainability parameters, that are not combined into one sustainability coefficient: (1) The parameter of sustainable resource utilization is defined as the product of the average and minimum abundance of resources, which take into account the depletion time of a resource; (2) The exergy efficiency is defined as the ratio between the useful exergy flows coming out of the process and the exergy input; (3) The environmental compatibility parameter is defined as the ratio between the exergy required to run the process and the exergy required to run the process in an environmentally sound way, which includes the extra exergy required for abating the harmful effects on the environment.

Hornbogen (2003) defined the material sustainability index as the inverse of the total entropy of a cycle, relative to the starting conditions. This index can be used to assess the sustainability of a final product (e.g., building) compared with the initial state of raw materials, or can be used to compare the sustainability among several building design alternatives. The analysis should consider both material and energetic entropies, and the life duration of goods. Since the present type of development cannot be sustained, a new condition must be fulfilled for new approaches to development: the entropy should not be raised at a higher rate than the negative entropy that is available from the sun.

### 3. Examples

This section presents results from some case studies selected from the author's research projects.

Weimin et al. (2005) optimized a commercial building using two conflicting objective functions: (1) the life cycle environmental impact (LCEI) that is expressed by the expanded cumulative exergy consumption; this term takes into account the exergy of all natural energy and non-energy resources consumed in all steps of the production process, and the abatement exergy that is required to remove or isolate the emissions from the environment; and (2) the life cycle cost (LCC). The optimization was performed using Genetic Algorithms, and the solution was presented as a Pareto front (Figure 1).

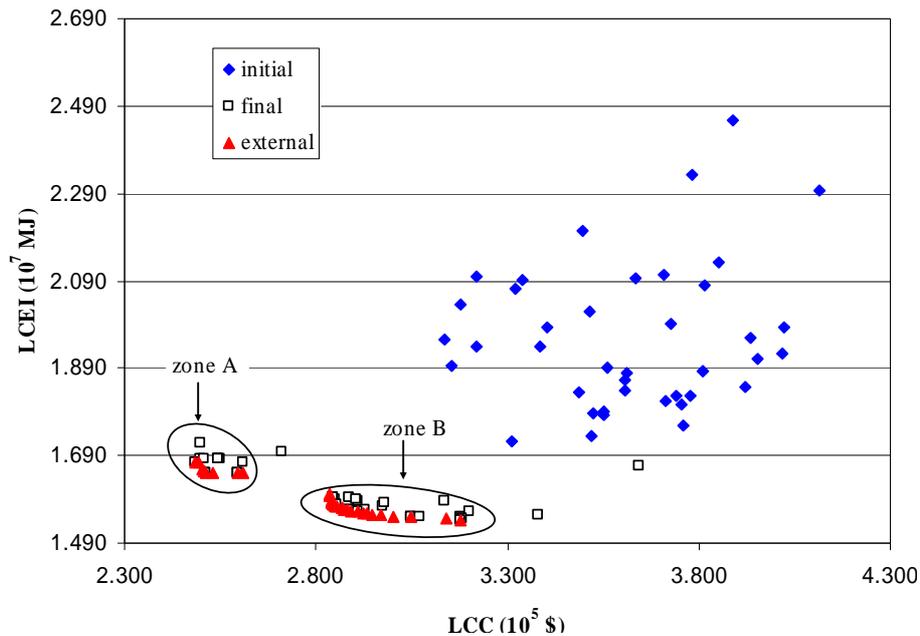


Figure 1. Distribution of the initial and final population or solution.

Zmeureanu and Wu (2005) used the second law of thermodynamics analysis to estimate the performance of nine design alternatives of residential heating, ventilation and domestic hot water (HVAC-DHW) systems for a house in Montreal, Canada (Table 1). System no.1 is composed of electric baseboard heaters, installed in each room, while the domestic hot water is heated by electricity in a standard storage tank. System no.2 uses a gas-fired hot water boiler to supply the baseboard heaters and the storage tank. System no.3 uses a ground source water-to-water electric heat pump (GSHP) to supply the radiant heating floor and the storage tank. Systems no.1 to no.3 do not have a mechanical ventilation system. Systems no.4 to no.6 are similar to the first system, the main difference being the addition of mechanical ventilation system and an electric air heater for heating the cold ventilation air. In addition, in order to reduce the energy use for heating the ventilation air, two heat exchangers are used to preheat the cold air: (1) an air-to-air heat exchanger that uses heat from the exhaust air stream, and (2) an earth tube heat exchanger that uses heat from the ground. System no.7 uses a gas-fired hot water boiler to supply the baseboard heaters and the storage tank (as system no.2) and has a mechanical ventilation system. System no.8 uses an electric boiler to heat the radiant heating floor and an electric heater for domestic hot water. System no.9 uses a ground source water-to-water electric heat pump (GSHP) to supply the radiant heating floor and the storage tank (a gas-fired water heater is used if the demand is not satisfied), and has a mechanical ventilation system.

The following indices are used for the comparison between the seven residential HVAC-DHW systems (Table 1): the Coefficient of Performance, the exergy efficiency, and the environmental compatibility index  $\xi$  (Lems et al. 2002). Calculations are based on the primary energy use and related CO<sub>2</sub> emissions, for the electricity mix of Quebec, where hydroelectricity accounts for about 97% of electricity generation. The reference temperature for the calculation of exergy efficiency is the hourly outdoor air temperature.

The environmental compatibility index  $\xi$  is calculated as the ratio between the exergy used for satisfying the heating needs of the sample house and the exergy used for heating the house without polluting the environment. The denominator is composed of the exergy needed for heating the house plus the abatement exergy (a value of 5.86 MJ/kg of CO<sub>2</sub> emissions is used, see Cornelissen 1997). Systems no.2 and no.7 have low values of  $\xi$  that indicates a significant exergy demand for abatement, compared with the exergy demand for heating. Both systems use a gas-fired boiler for domestic hot water. The environmental compatibility index  $\xi$  indicates that these two systems have significant impact on the environment, compared with others that use hydroelectricity.

If both exergy-related indicators are considered, the exergy efficiency and the environmental compatibility index, it can be concluded that the system no.3 has the lower environmental impact. This system is composed of: a radiant floor heating system; a ground source heat pump; an air-to-air heat exchanger; and an earth tube heat exchanger. This system does not contain a mechanical ventilation system. The addition of a mechanical ventilation system, with or without heat recovery, to any HVAC-DHW system discussed in the paper increase the COP and decreases the exergy efficiency, which indicates a potential damaging impact on the natural environment. The best system, among those evaluated, uses for the HVAC-DHW system 29.5% of the potential of natural energy resources, while 70.5% are wasted in the environment.

Table 1. Comparison of residential HVAC systems under annual operating conditions.

System	COP [-]	$\eta_2$ [%]	Environmental compatibility index (-)
No.1	0.71	6.9	0.51
No.2	0.73	8.4	0.18
No.3	1.19	29.5	0.50
No.4	0.66	4.9	0.51
No.5	0.83	5.1	0.51
No.6	0.88	5.6	0.51
No.7	0.90	6.8	0.19
No.8	1.49	25.4	0.51
No.9	1.46	26.8	0.33

Baouendi et al. (2005) developed the Energy & Emission Estimator (EEE) tool that is based on the Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost methods. The EEE tool uses information about the house envelope, imported from the HOT2000 energy simulation software (HOT2000 1995), and a built-in inventory database containing values of the embodied energy, the greenhouse gas emissions corresponding to both embodied energy (called “embodied emissions”) and operating energy use, and the initial cost of a number of common building materials. In the present version of the EEE, the life cycle calculations account only for the inventory flows associated with the construction and operation stages of a house. The main results of analysis are (Figure 1): (1) the Life Cycle Energy Consumption (LCEC, in MJ); (2) the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions (LCGE, in tons of equivalent- $\text{CO}_2$ ); and (3) the Life Cycle Cost (LCC, CAN\$). The life cycle energy use is given in MJ, and is obtained as the sum of the embodied energy in the exterior envelope and the life cycle operating energy use. The life cycle emissions are given in kg of equivalent  $\text{CO}_2$ , and are calculated as the sum of the embodied emissions in the exterior envelope and the emissions generated from the house operation over its physical life. The life cycle cost, given in Canadian dollars, is the sum of the initial cost of the exterior envelope and the life cycle cost of energy used for the house operation.

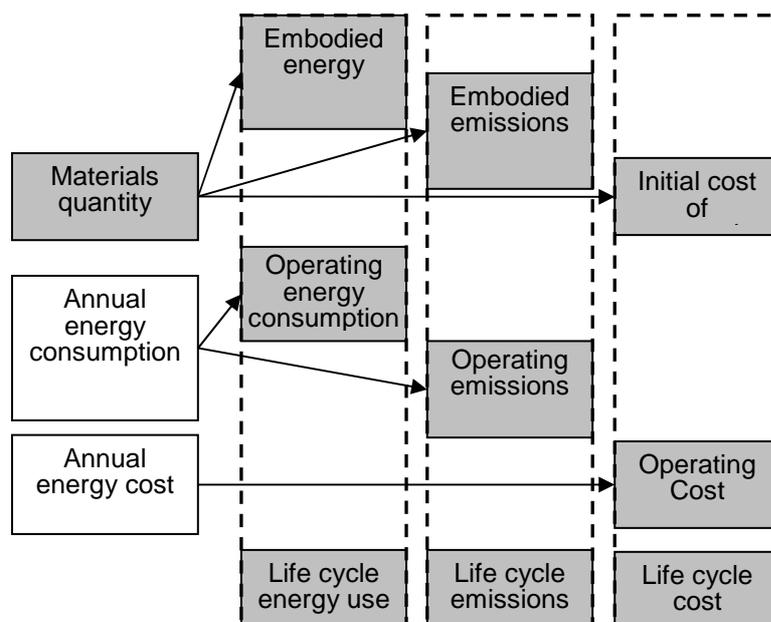


Figure 2. Flowchart of the Energy and Emissions Estimator (EEE)

## 4. Conclusions

This paper presented a few opinions, collected from the technical literature, concerning the term sustainable development. Although this term is largely used and applied to economical, social and environmental areas, there is still a need for developing simple measuring indicators, especially for assessing the quality of sustainable buildings. All successes obtained so far by designers should be considered as the first step towards the development of sustainable buildings. The goal should be assessed in terms of objective functions that are not affected by economical or political conditions of today. Such criteria should be developed based on the second law of thermodynamics that allows the assessment of the quality of developments and the potential impacts on the environment.

## Acknowledgements

The author acknowledges the financial support received from Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

## References

- Baouendi, R., Zmeureanu, R., Bradley, B. 2005, Energy & Emission Estimator: a prototype tool for designing Canadian houses. *ASCE Architectural Engineering Journal*, June, pp.1-10.
- Brandemuehl, M.J. 2004, *ASHRAE Research Toward Sustainable Buildings*, 10(1), pp.1-3.
- Cornelissen, R.L. 1997, Thermodynamics and sustainable development — the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. Ph.D. Thesis, Laboratory of Thermal Engineering, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Cornelissen, R.L. and Hirs, G.G. 2002, The value of exergetic life cycle assessment besides the LCA. *Energy Conversion and Management*, 43, pp. 1417-1424.
- Fiksel, J. and Fiksel, D.G. 2001, From Here to Sustainability: A Global Perspective. *Chemistry Business*, April.
- Fowler, C.W. and Hobbs, L. 2003, Is humanity sustainable? *Proceedings of the Royal Society of London*, 270(1533), pp.2579-2583.
- Footprint. 2005, [www.earthday.net/footprint/index.asp](http://www.earthday.net/footprint/index.asp). Ecological Footprint. Last access on February 27.
- Glicksman, L.R. 2003, Promoting Sustainable Building. *HVAC&R Research*, 9(2), pp.107-109.
- Grumman, D.L. 2003, *ASHRAE GreenGuide*. American Society of Heating, Ventilating and Air-conditioners Engineers, Inc., Atlanta.
- Gong, M. and Wall, G. 2001, On exergy and sustainable development-Part 2: Indicators and methods. *Exergy, an International journal*, 1(4), pp. 217-233.
- Hammond, G.P. 2004a, Towards sustainability: energy efficiency, thermodynamic analysis, and 'two cultures.' *Energy Policy*, 32, pp. 1789-1798.
- Hammond, G.P. 2004b, Science, sustainability and the establishment in a technological age. *Interdisciplinary Science Reviews*, 29(2), pp.193-208.
- Hardi, P., Barg, S., Hodge, T. and Pinter, L. 1997, Measuring sustainable development: Review of current practice. International Institute for Sustainable Development. Occasional paper no. 17. Industry Canada, ISBN 0-662-63202-8.
- Hornbogen, E. 2003, A definition of sustainability based on entropy production by matter and energy. *Metall-Heidelberg*, 57(3), pp.124-128.
- HOT2000. 1995, User's manual. CANMET, Natural Resources Canada, Canada.
- Krotscheck, C. 1997, Measuring eco-sustainability: comparison of mass and/or energy flow based highly aggregated indicators. *Environmetrics*, 8(6), pp. 661-681.
- Larsson, N. 2000, Moving Towards a Green Building Design Process. Sustainable Building Conference, Maastricht, The Netherlands.
- Larsson, N. 2003, Sustainability Indicators and Benchmarks for GBC. Background for Discussion. Madrid, Spain, March.
- Leadbitter, J. 2002, PVC and sustainability. *Progress in Polymer Science*, 27, pp. 2197-2226.

- Lems, S., Van der Kooij, H.J. and De Swaan Arons, J. 2002, The sustainability of resource utilization. *Green Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, 4, pp.308-313.
- McMahon, G.F. and Mrozek, J.R. 1997, Economics, entropy and sustainability. *Hydrological Sciences*, 42(4), pp. 501-512.
- Norde, W. 1997, Energy and entropy: a thermodynamic approach to sustainability. *The Environmentalist*, 17, pp.57-62.
- Peacock, K. 1999, Staying out of the lifeboat: sustainability, culture, and the thermodynamics of symbiosis. *Ecosystem Health*, 5(2), pp. 91-103.
- Robert, K.H., Daly, H., Hawken, P. and Holmberg, J. 1995, A Compass for Sustainable Development. *Resource Magazine*, 170, pp.31.
- Rosen, M.A. and Dincer, I. 2001, Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. *Exergy, an International Journal*, 1, pp.3-13.
- The Brundtland Commissions 1987, *Our Common Future*, The Report of the World Commission on Environment and Development (WCOED), Oxford University Press, Oxford.
- Thring, M.W. 1990, Engineering in a stable world. *Science, Technology and Development*, 8(2), pp.107-121.
- Vanegas, J.A. 2003, Road Map and principles for Built Environment Sustainability. *Environmental Science and Technology*, 37 (23), pp.5363-5372.
- Voorspools, K. 2004, Sustainability of the future; rethinking the fundamentals of energy research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, pp. 599-608.
- Wackernagel, M. and Rees, W. 1996, *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers, Gabriola Island, Canada.
- Wall, G. 1977, Exergy - a useful concept within resource accounting. Institute of Theoretical Physics, Goteborg, Report No.72-42.
- Weimin, W., Zmeureanu, R. and Rivard, H. 2005, Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment Journal*, January, pp.1-14.

## SIMULATION OF ZERO NET ENERGY HOMES

Affouda-Léon Biaou   Michel A. Bernier   Yan Ferron  
Département de génie mécanique  
École Polytechnique de Montréal  
Montréal, Québec

[affouda-leon.biaou@polymtl.ca](mailto:affouda-leon.biaou@polymtl.ca)   [michel.bernier@polymtl.ca](mailto:michel.bernier@polymtl.ca)   [yan.ferron@polymtl.ca](mailto:yan.ferron@polymtl.ca)

### ABSTRACT

This article presents the models and methods used to simulate a Zero Net Energy Home (ZNEH). The ZNEH studied here is equipped with photovoltaic (PV) panels for on-site electrical production and a geothermal heat pump for space heating and cooling and domestic hot water pre-heating.

Simulations are performed using TRNSYS 15.3 with the IISiBat 3 interface. All major components are simulated using standard TRNSYS components except for the ground-source heat pump and geothermal heat exchanger which are modelled using components from the TESS library or from in-house models.

A R-2000 type home located in Montréal and equipped with 85.4 m<sup>2</sup> of PV panels and a 2.5 tons ground-source heat pump is simulated. Results indicate that with such an arrangement it is possible to achieve a ZNEH. The ground-source heat pump reduces the electrical energy for space heating and cooling requirements as well as for water heating by about half when compared to an all-electric house. With this scenario, 13550 kWh are required from the PV panels on an annual basis to achieve a ZNEH.

### INTRODUCTION

The non-renewable nature and greenhouse gas (GHG) emissions associated with conventional forms of energy has lead the way to the current trend towards “greener” engineering designs. The building sector is no exception. For example, in Canada, buildings are responsible for about 31% of all the energy consumed while GHG emissions are of the order of 134 Mt (Ayoub et al. 2001). Building engineers, helped by visionary building owners and government agencies, have risen to the challenge and buildings consume less energy than before. However, it is possible to do more and Zero Net Energy Homes (ZNEH) are a step closer towards sustainability.

Zero net energy homes (ZNEH) are energy-efficient grid-connected buildings with on-site electrical production from renewable energy sources. ZNEH supply electrical energy to the utility when there is a surplus and draws from the same grid in the case of on-site energy production shortage. The goal of a ZNEH is to have a balance, on an annual basis, between the surpluses and the shortages. The ZNEH concept is

attractive to reduce the energy consumption in residential buildings and the emissions of greenhouse gases. Furthermore, when ZNEH use grid electricity produced from renewable sources, such as hydropower in the province of Québec, then ZNEH can be considered to be self-sufficient in terms of operational energy requirements. ZNEH are also very attractive in regions where electricity is produced from non-renewable sources. For example, in Canada, on average, each kW produced by renewable energy (PV, wind ...) reduces CO<sub>2</sub> emissions by 1.58 tons per year when replacing coal; 1.30 tons per year when replacing oil; and 0.73 tons per year when replacing natural gas (Ayoub et al. 2001).

In order to limit the size (and cost) of on-site electrical production, the building part of a ZNEH need to be well designed. Furthermore, it has to be equipped with efficient electrical appliances, and heating/cooling systems. One particularity of the present study is that space heating/cooling as well as partial heating of domestic hot water is accomplished using a high efficiency (COP >3) ground-source heat pump.

ZNEH have been the subject of many investigations around the world. For example, the National Renewable Energy Laboratory (NREL) in the USA has a ZNEH program with the goal of building 120,000 such houses and schools by 2020 with an expected total energy reduction of 44.31×10<sup>6</sup>GJ per year and consequently a decrease of GHG emissions of 0.7×10<sup>6</sup> metric tons of equivalent CO<sub>2</sub> per year (EERE, 2000).

The ZNEH concept has been discussed in several papers. Kadam (2001) reviewed the available technologies for zero net energy buildings and looked at the economical feasibility of the concept. Basing his analysis on a ZNEH prototype in Florida, Kadam indicated that the payback period is 63 years with the component costs of 1998. Reducing the price by half can reduce the payback period to 34 years.

Gilijamse (1995) studied the feasibility of using zero-energy houses in the Netherlands. The author used TRNSYS TYPE 56 to model the house and TUTSIM (a program for engineering design and optimisation which simulates dynamics systems) to simulate the heat demand with current best practices and advanced systems. Three configurations of zero-energy houses

all using PV electricity have been studied. Space heating and domestic hot water heating was provided either by using solar collectors in combination with seasonal storage or by additional photovoltaic cells feeding an electric heat pump. Giljamse showed that zero-energy houses are feasible in the Netherlands and that cost-effectiveness can be achieved only for advanced systems with a heat pump configuration.

ZNEH are not limited to the use of photovoltaic panels for on-site electrical production. For instance, as suggested by Iqbal (2004) wind energy can be used. Using the HOMER software from NREL, Iqbal concluded that a 10 kW wind turbine could generate enough energy to satisfy the energy requirements of a R-2000 house in Newfoundland.

As mentioned in most studies, the main drawback of PV-driven ZNEH is the relatively long payback period. However, the rate at which the PV market increases and the current climate change challenge will contribute to make this technology attractive in the near future. Over the last 25 years, 1000 MW of PV power has been installed around the world with half that capacity installed in the last four years alone. The current rate of increase of PV production is around 26% per year and the cost-effectiveness of PV electricity is expected to be reached by 2020-2030 (Ayoub et al. 2001).

### PRINCIPLE OF OPERATION OF A ZNEH

A schematic representation of the ZNEH used in the present study is presented in Figure 1. The main components are: PV arrays for electricity generation; an inverter that transforms the direct current delivered by the PV array into alternative current required by the load; the local electric grid; a ground-source heat pump for space heating and cooling; and a desuperheater (included in the heat pump) for domestic water pre-

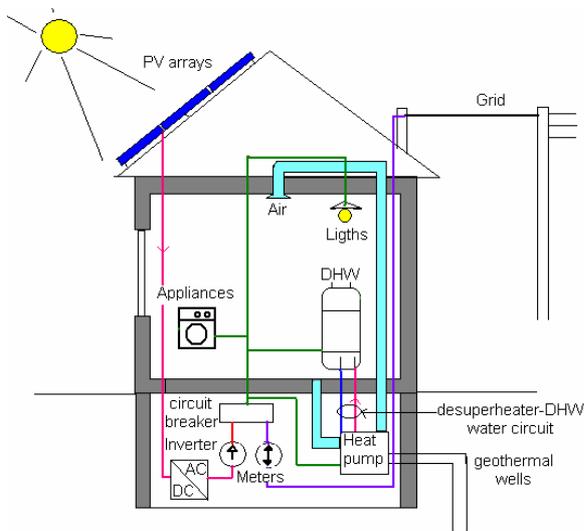


Figure 1: Schematic representation of the ZNEH studied.

heating. Thermal or electrical energy is exchanged at several levels in this ZNEH. First, the PV generator (array+inverter) produces electricity that is fed to all appliances requiring electricity. The house is also connected to the electrical grid which can be considered to act as an energy storage device. When the PV system generates more energy than needed the surplus is sent to the grid. Conversely, when the PV output is insufficient to cover the house power demand, the grid supplies the required power. Usually, some form of net metering is used to measure the energy exchange in both directions (Messenger and Ventre, 2004). The objective of a ZNEH is to have an equal amount of electrical energy leaving and entering the house over a certain period (usually a year).

The second set of energy exchange concerns the ground-source heat pump (GSHP) which has two liquid circuits and an air circuit. The first liquid circuit links the heat pump to the ground via a ground heat exchanger. With this set up, the ground is used as a heat source/sink for space heating or cooling and domestic hot water pre-heating. In heating, the heat pump captures heat from the ground to provide heat to the air circuit of the house and to pre-heat the domestic hot water. In cooling, the refrigeration cycle is reversed and the heat pump now removes heat from the house air circuit; part of the rejected heat is used to pre-heat the domestic hot water and the rest is rejected into the ground. The second liquid circuit is coupled to the desuperheater of the GSHP. A desuperheater is a heat exchanger that captures part of the energy contained in the hot refrigerant leaving the compressor and transfers it to a water circuit that preheats the domestic hot water. This preheated water is then pumped to a domestic hot water tank. Final water heating is accomplished inside the water tank using regular resistance heaters.

### SIMULATION

The ZNEH is simulated using the TRNSYS 15.3 simulation engine with the IISIBAT 3.0 interface (Klein, et al, 2000). Components models come from three sources: the TRNSYS standard models; models built in-house for this project; and models from the TESS library (TESS, 2001). The following paragraphs describe each component with an emphasis on the non-standard components.

**House.** The building simulated is a two-story 156 m<sup>2</sup> residential house with an unheated half-basement. The house characteristics are given in Table 1. The level of insulation is similar to that encountered in a R-2000 house which typically uses at least 30% less energy than a common house (ENERINFO Advisor, February 2000). The house is modelled using TRNSYS's TYPE 56 as three distinct thermal zones: living quarters,

attic, and basement. The last two zones are unconditioned and, therefore, the temperatures in these spaces are free-floating. TYPE 56 uses internally-generated conduction transfer functions to calculate transient heat conduction in the exterior walls and in the adjacent walls between the basement and the living space and between the attic and the living space. In this study, conduction transfer functions are generated based on a one hour time base.

The basement requires a special treatment since TYPE 56 can not model it directly. A new TYPE was therefore created, based on the work of Mitalas (1987), to calculate heat losses/gains from basement walls and floors (Dutil, 2003).

House infiltration is calculated using a technique presented by ASHRAE (1981). In this technique, the number of air changes per hour (ACH) is simply given by:

$$ACH = K1 + K2 \times (T_{zone} - T_{amb}) + K3 \times \text{Windspeed} \quad (1)$$

The values of K1, K2, K3 are respectively equal to 0.1, 0.011, and 0.034. These values are recommended by ASHRAE for a tightly sealed construction. Based on preliminary simulations it was found that the mean value of ACH ranged from about 0.5 to 0.2 for winter and summer conditions, respectively.

The weather processing model uses standard TRNSYS TYPE 9 in the WYEC2 format (ASHRAE, 1997). It is assumed that the house is occupied by a family of four persons who perform light work. This represents a heat gain of 150 W per person based on ISO7730. The four occupants are present from midnight to 8h and from 17h to 24h while only two are in the house from 8h to 17h. The hourly electrical power demand profile from the electrical appliances and the lighting is presented in Figure 2 (Gunes et al., 2003). As shown, the electrical load reaches a minimum of 0.15 kW at 2h and a maximum of 1.63 kW at 19h. It is assumed that the entire electrical load is instantly converted into heat and thus becomes a heat gain. The domestic hot water consumption profile used in the present study is given in Figure 3. It is based on a study by Perlman and Mills (1985).

**Ground source heat pump.** The GSHP model used in this study was first developed by TESS (TESS, 2001) as TYPE127. It has been modified by Lemire (1999) to account for the time of operation of the heat pump during a simulation time step. A thermostat TYPE, also written by Lemire (1999) controls the operation of the heat pump. It calculates the time of operation required, during a simulation time step, to maintain the heating and cooling set point temperatures. These set point temperatures are 20°C (with a deadband of 1°C) in heating and 25°C in cooling. In this study, the modeled

Table 1: House characteristics

<b>Dimensions</b>	
Conditioned area	156m <sup>2</sup> (6m×13m×2 floors)
Conditioned volume	468m <sup>3</sup> (6m×13m×3m×2 floors)
Roof area (south/north)	88.4 m <sup>2</sup> /64.35m <sup>2</sup>
Attic volume	187.2m <sup>3</sup>
Basement (height/volume)	1.5m/117m <sup>3</sup>
Window area	14m <sup>2</sup>
East/south/west/north	1.4/7/1.4/4.2 m <sup>2</sup>
<b>Envelop</b>	
Window	Double pane, low-e, Argon, insulated spacer U=1.5 W/m <sup>2</sup> C, SHGC=0.596
Conditioned space wall R=4.74 m <sup>2</sup> C/W	102 mm Brick 12.7mm air layer 150 mm mineral wool 12.7 mm gypsum board
Conditioned space floor R=3.77 m <sup>2</sup> C/W	150 mm conc. (2400 kg/m <sup>3</sup> ) 125 mm mineral wool 19 mm gypsum board
Conditioned space ceiling R=8.92 m <sup>2</sup> C/W	310 mm mineral wool 12.7 mm gypsum plaster
Basement wall R=3.57 m <sup>2</sup> C/W	200 mm conc. (2400 kg/m <sup>3</sup> ) 115mm mineral wool
Roof R=0.3 m <sup>2</sup> C/W	6 mm shingles 12.7 mm plywood
	PV arrays on the south Tilted at 45°

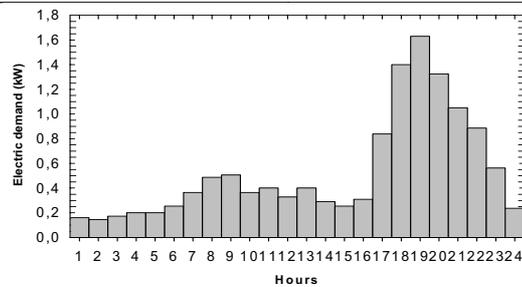


Figure 2: Lights and appliances electrical load profile.

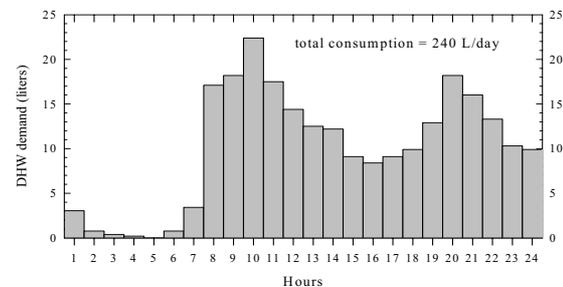


Figure 3: Hourly domestic hot water consumption.

heat pump is based on a commercially-available GSHP (ClimateMaster, 1995). It has a nominal cooling capacity of 2.5 tons (8.75 kW). It can operate with loop temperatures from 4.4°C to 43.3°C in cooling and from -3.5°C to 26.7°C in heating. Manufacturer's data were curve-fitted according to a procedure outlined by Lemire (1999). The resulting correlations and the corresponding data are shown on Figure 4 where it can be shown that the agreement between the correlations and the manufacturer's data is excellent.

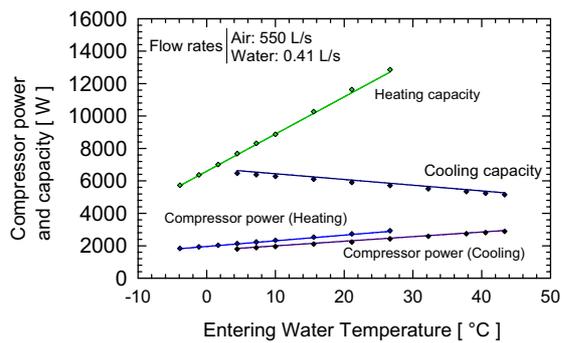


Figure 4: Heat pump performance data.

**Hot water heating.** As shown in Figure 5, domestic water heating is accomplished using a desuperheater coupled to a regular hot water tank equipped with electrical heating elements. The desuperheater is a refrigerant-to-water heat exchanger located between the compressor and the condenser. It is often found as an option on some GSHP models. As shown in Figure 5, a circulator pumps the cold water from the bottom of the tank to the desuperheater where the hot refrigerant gases heat the incoming water. Then, the heated water re-enters the hot water tank near the top. The desuperheater used in the present study operates only when the heat pump is providing space conditioning. In other words, the circulator is activated when there is a space conditioning need (heating or cooling). In

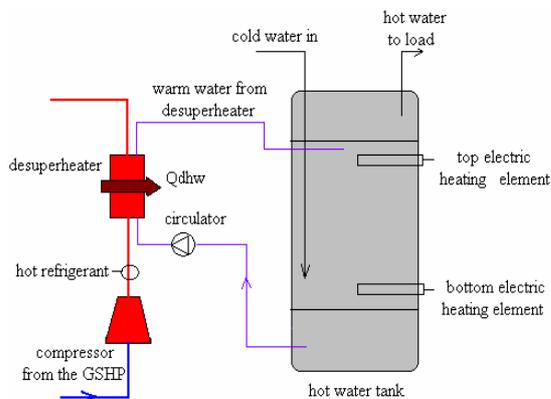


Figure 5: Domestic hot water pre-heating using a desuperheater.

cooling mode, the heat exchange in the desuperheater reduces the load on the condenser and, consequently, the amount of heat rejected to the ground.

This “free” energy would have been lost to the ground without a desuperheater. In heating, the heat recovered in the desuperheater translates into a loss of space heating capacity normally provided by the condenser of the GSHP. Thus, the heat pump would have to operate for a longer period to meet the space heating requirements. In this case, the hot water produced is not “free” but nonetheless obtained with a relatively high COP. The original TYPE 127 was modified to model the heat transfer from the desuperheater to the water. This heat transfer, denoted here by the expression  $Q_{dhw}$ , is given by:

$$Q_{dhw} = c_0 + c_1 T_{in,gsHP} + c_2 T_{in,gsHP}^2 + c_3 \dot{m}_w \quad (\text{in kW}) \quad (2)$$

$$+ c_4 \dot{m}_w^2 + c_5 T_{in,gsHP} \dot{m}_w$$

where  $T_{in,gsHP}$  (in °C) and  $\dot{m}_w$  (in m<sup>3</sup>/s) are the fluid inlet temperature and flow rate on the GHE side of the GSHP, respectively. The coefficients  $c_0$  to  $c_5$  were obtained by curve-fitting manufacturer's data. These coefficients are given in Table 2.

Table 2 Coefficients used in Equation 2

	Heating	Cooling
$c_0$	0.622553465	0.8084253
$c_1$	0.0331952776	0.0532855
$c_2$	$-3.1182 \times 10^{-5}$	$3.0760 \times 10^{-5}$
$c_3$	960.891509	-29.20673
$c_4$	-324411.498	-30694.289
$c_5$	6.44317172	-31.893414

Typically,  $Q_{dhw}$  is of the order of 1.5 kW which represents approximately 15% of the total GSHP capacity. It should be noted that the manufacturer does not provide any indication on the effect of the water temperature coming from the hot water tank. Therefore, it is assumed that  $Q_{dhw}$  is independent of this temperature. It can be shown that the manufacturer's data and Equation 2 agree within  $\pm 2\%$  and  $\pm 3\%$  for cooling and heating mode, respectively.

The warm water produced by the desuperheater is fed to a regular 210 litres (1.5m high) electrical hot water tank. TYPE 60 of TRNSYS is used to model this tank. As shown in Figure 5, the tank has two inlets and two outlets. The cold water inlet is located 0.1 m from the bottom and the hot water outlet exists at the top of the tank. Water going to the desuperheater is taken 5 cm from the bottom of the tank (in order to have the coldest possible temperature at the inlet of the desuperheater) and returned to the tank at a height of 1 m (to avoid mixing the incoming warm water with hot water in the top portion of the tank). Two 0.75 kW resistance heaters provide the supplementary power to

heat the water to the set point temperature of 55 °C. These elements are located 0.3 and 1 m from the bottom of the tank, respectively. They operate in master/slave mode, with the highest priority assigned to the top element.

**Ground heat exchanger.** The closed-loop ground heat exchanger (GHE) used in this study consists of a U-tube made of high density Polyethylene (HDPE) inserted into a borehole. The GHE model used in this study is the one developed by the Department of Mathematical Physics from the University of Lund (Sweden) which has been implemented as a TRNSYS TYPE by Hellström et al. (1996). The main parameters used for the GHE are presented in Table 3. The borehole length of 100m was determined to be sufficient to avoid feeding the GSHP with fluid at a temperature below its minimum acceptable inlet temperature of -3.5°C.

Table 3: Main characteristics of the GHE

Parameter	Value
Number of boreholes	1
Borehole length	100 m
Undisturbed ground temperature	10 °C
Ground thermal conductivity	2.0 W/m-K
Storage heat capacity	2000 kJ/m <sup>3</sup> -K
Borehole diameter	15 cm
U-tube	1" SDR-11
U-tube center-to-center distance	8.3 cm
Grout thermal conductivity	2.08 W/m-K
Pipe thermal conductivity	0.42 W/m-K

**Photovoltaic system.** On-site electrical production is accomplished using a photovoltaic (PV) array composed of a series of PV modules which themselves are composed of PV cells. PV cells are semiconductor devices that convert sunlight into direct current (DC) electricity (Messenger and Ventre, 2004). Single crystal silicon cells are used in the present study. They supply the house with electrical energy with the surplus being fed to the grid; no on-site electrical storage is provided.

The PV array is modelled using TRNSYS's TYPE 94. TYPE 94 uses a so-called "four parameter" model which treats a PV as an irradiance and temperature dependent current source connected in parallel with a diode and in series with a resistor and the load (Fry, 1998). This model is briefly described below.

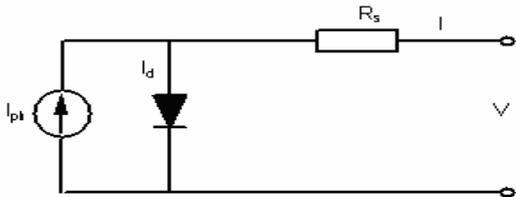


Figure 6: Equivalent circuit of a four-parameter PV model.

The equivalent circuit is shown in Figure 6 where  $I$  and  $V$  represent the load current and voltage, respectively. The useful power is given by the product of these two electric characteristics.

The diode current,  $I_d$ , is given by (Fry, 1998):

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{q}{\gamma k T_c} (V + I R_s) \right) - 1 \right] \quad (3)$$

where  $I_s$  is the reverse saturation current,  $\gamma$  is a dimensionless diode curve-fitting factor with a minimum possible value equal to the number of cells in series in the module  $N_s$ ,  $k$  is the Boltzmann constant ( $1.38066 \times 10^{-23}$  J/K),  $q$  is the electron charge (1eV or  $1.60218 \times 10^{-19}$  C),  $R_s$  is the module series resistance ( $\Omega$ ),  $T_c$  is the cell temperature (K), and  $V$  is the voltage across the PV module (Volts).

The photocurrent,  $I_{ph}$ , is proportional to the solar radiation reaching the PV cell. The current generated by the module,  $I$ , is simply the difference between the photocurrent and the diode current:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (4)$$

The four parameters of the model are:  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $R_s$ , and  $\gamma$ . The reverse saturation current depends on the semiconductor material characteristic and the cell temperature (Carlin and al. 1996):

$$I_s = B T_c^3 \exp \left( - \frac{E_b}{A k T_c} \right) \quad (5)$$

$A$  is a constant ( $= \gamma/N_s$ ),  $E_b$  is the semiconductor band gap energy at 0 K (1.12 to 1.79 eV for silicon cells) and  $B$  is a material constant estimated using manufacturer's data. The model considers  $R_s$  and  $\gamma$  to be constants while  $I_{ph}$  and  $I_s$  depend on the operating conditions:  $I_s$  varies with cell temperature and  $I_{ph}$  depends on the incident irradiance. The 1.22 m<sup>2</sup> PV modules used in this study are made of 72 solar cells connected in series with a peak power of 140 W and a conversion efficiency of 11.5% at so-called "Standard Test Conditions". They are produced for grid-connected systems by a leading manufacturer of solar cells. The PV module characteristics are summarized in Table 4 and in Figure 7.

As can be seen, manufacturer's data do not provide directly the four parameters needed to run TYPE 94. These parameters are evaluated internally by TYPE 94 using a methodology described by Eckstein (1990). The underlined values in Table 4 are required by TYPE 94 to calculate these four parameters.

As shown in Figure 7, the electrical output of the PV cell is influenced by its operating temperature,  $T_{cell}$ . It is possible to account for this temperature dependence by using temperature coefficients applied to the short circuit current,  $I_{sc}$ , the open circuit voltage,  $V_{oc}$ , and the maximum power  $P_{mpp}$  (Patel, 1999):

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \times (1 + \alpha_{Isc} \times [T_{cell} - T_{cell,ref}]) \quad (6)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} \times (1 - \alpha_{Voc} \times [T_{cell} - T_{cell,ref}]) \quad (7)$$

$$P_{mpp} = P_{mpp,ref} \times (1 - \alpha_{Pmpp} \times [T_{cell} - T_{cell,ref}]) \quad (8)$$

where  $T_{cell,ref}$ ,  $I_{sc,ref}$ ,  $V_{oc,ref}$ ,  $P_{mpp,ref}$  are the cell temperature, the short circuit current, open circuit voltage, and maximum power at the STC, respectively. The temperature coefficients are usually provided by manufacturers. In the present case, the values are given in the last column of Table 4. Using Equation 8 and the PV module used in this study, one can see that a 1°C rise in the cell temperature above the reference temperature decreases the maximum power by 0.45%. Thus, PV cells work better in cold climates.

Table 4: Characteristics of the PV module used in the present study.

Standard Tests Conditions		Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) conditions		Temperature coefficients	
1000W/m <sup>2</sup> ; AM1.5; cell temperature 25°C		800W/m <sup>2</sup> ; AM1.5; wind speed = 1m/s; Ambient temp. = 20°C			
Rated power	140 W	Cell Temp.	45°C	$\alpha_{Pmpp}$	-0.45%/°C
Peak power current	4.24 A	Mpp* power	102 W		
Peak power voltage	33 V	Mpp voltage	30.2 V	$\alpha_{Isc}$	+2 mA/°C
Open circuit voltage	42.8 V	Open circuit voltage	39.2 V	$\alpha_{Voc}$	-152 mV/°C
Short circuit current	4.7 A	Short circuit	3.8 A	*Mpp: maximum power point	

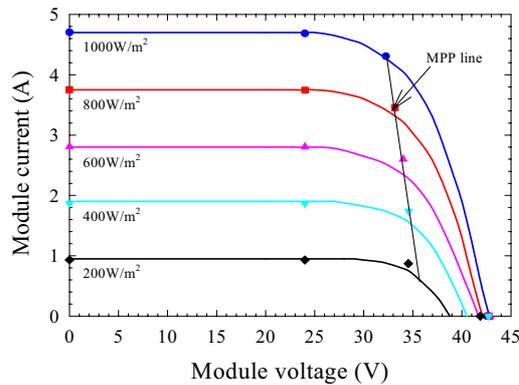


Figure 7: I-V curves for a cell temperature of 25°C and different irradiance levels. Manufacturer's data (curves) and results from TYPE 94 (data points).

The four-parameter TYPE 94 PV model has been validated several times (Fry, 1998). As a further check and to verify its implementation in the present study, its outputs were checked against manufacturer's data.

Some results of this verification are presented in Figure 7 where four sets of data points are shown for each irradiance level. They represent (from left to right): the short circuit current, the array current, the maximum power point (MPP) and the open circuit voltage, respectively. In each case, the agreement between the outputs of TYPE94 and the manufacturer's data is very good.

It is important to note that, depending on the load characteristics, the cell can operate anywhere on a given I-V curve and not necessarily at the MPP. Fortunately, PV arrays are usually coupled to inverters which, in addition to converting direct current to alternative current, "seek" the optimal power point of the PV arrays by using a maximum power point tracker. The TYPE 94 model assumes that the PV array is connected to such an inverter. Therefore, during a simulation, TYPE 94 uses the manufacturer's data and the weather data to calculate the model parameters and provides, at each time step, the maximum power point. TRNSYS as an inverter model as one of its standard component (TYPE 48). It is a relatively simple model which assumes that the DC/AC conversion is accomplished at constant (user-specified) conversion efficiency. A conversion efficiency of 95% is used in the present study based on data taken from commercially available devices. In essence, TYPE 48 gets as inputs the array power and the house load power requirements and outputs the excess power output from the array.

## RESULTS

Results presented in this section are based on the house described in Table 1. Figure 8 shows the hourly space conditioning loads of this house for the Montréal climate. As shown, the peak heating and cooling loads are approximately 9.0 and 3.3 kW, respectively. Annually, space heating and cooling energy requirements are 13905 and 1742 kWh, respectively. The annual energy needs for domestic water heating are 4986 kWh while lights and appliances require 4659 kWh. Overall, if one assumes that the house is electrically heated (space and water) and cooled with an electrically-driven air-conditioning with a COP of 3, then the amount of electricity needed by the house is 24131 kWh (and 14485 kWh for space heating and cooling requirements).

Figures 9 and 10 present various electrical power demands for the same house equipped with 85.4 m<sup>2</sup> of PV panels and a GSHP for space conditioning and domestic water pre-heating. Figure 9 presents data for a typical winter week while Figure 10 is for a typical summer week. The first three curves in each figure present the average hourly power requirements of the

DHW tank, the GSHP, and the lights and appliances while the fourth one gives the total of the first three.

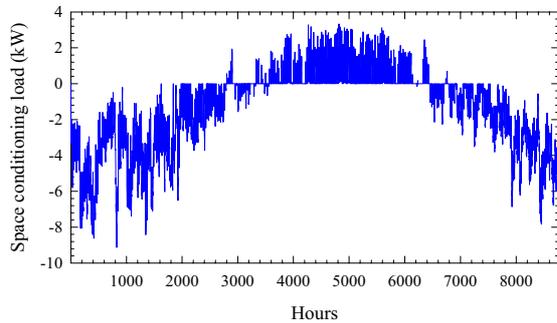


Figure 8: Hourly space heating and cooling loads.

It can be seen that the power required in the DHW tank peaks at 0.75 kW (maximum power of the heating element in the tank) while the power required by lights and appliances peak at the hourly average value of 1.63 kW in accordance with Figure 2. During the weeks shown in Figures 9 and 10, the maximum average hourly power demand required by the GSHP is 2.0 and 1.15 kW, respectively. The resulting maximum power requirements for the winter and summer weeks are 3.85 and 2.9 kW, respectively.

The top three curves in Figures 9 and 10 give the PV module output, the total power demand and the power deficit (= total power demand – PV output). As can be seen, the peak power produced by the PV arrays is greater in the winter week ( $\approx 9.9$  kW) than in the summer week ( $\approx 7.7$  kW). This is fairly representative of the winter/summer difference in PV output. In fact, the maximum PV output occurs near the spring equinox ( $\approx 11.4$  kW) and the minimum near the summer solstice ( $\approx 8$  kW) based on an examination of the yearly values (not presented here). This difference is due to two factors. First, the cell temperatures are lower in winter than in summer. As indicated earlier, there is performance improvement of the order of 0.45% per  $^{\circ}\text{C}$  below  $25^{\circ}\text{C}$ . Secondly, the sun angle striking the PV array (inclined at  $45^{\circ}$ ) is more favourable at the equinox than at the solstice.

The peak power produced by the PV panels is lower in summer. However, the insolation duration is longer in summer as can be noticed by comparing the width of the PV peaks in Figures 9 and 10. Therefore, the energy produced per day is higher in the summer months. As can be seen in Figures 9 and 10, the deficit is negative during the daytime hours for both the winter and summer weeks indicating a surplus of electrical energy production by the PV panels.

On an annual basis, the GSHP consumes 5735 kWh for space conditioning and water pre-heating (which represents only 39.5% of the raw space heating and cooling requirements). Domestic hot water heating

requirements drop to 2472.5 kWh (from 4986 kWh) due to water preheating by the GSHP desuperheater.

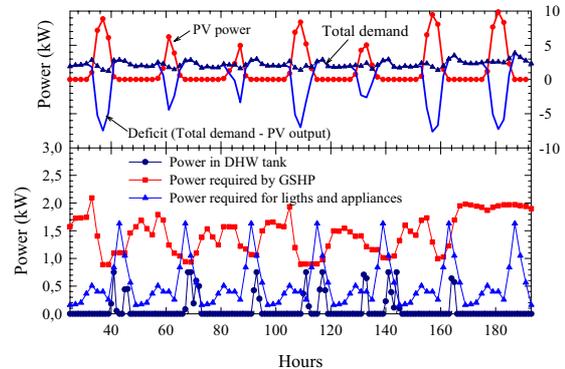


Figure 9: Power requirements and production for a typical winter week.

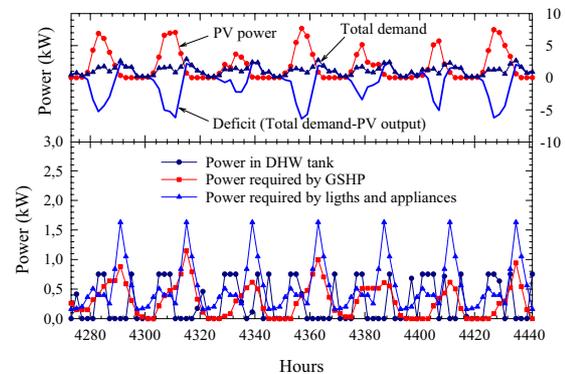


Figure 10: Power requirements and production for a typical summer week.

Figure 11 shows the annual cumulative energy balance of the ZNEH. The total annual electrical consumption is 13550 kWh. As indicated in Figure 11, as the year progresses the deficit shifts from a positive to a negative value with the inflection point located around mid-year. The PV production is 13655 kWh and the annual energy balance is almost zero (105 kWh) indicating that a ZNEH is possible.

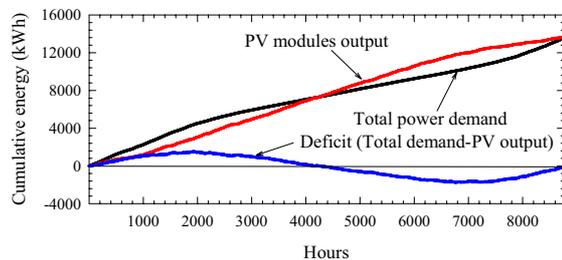


Figure 11: Cumulative energy requirements and production.

## CONCLUSION

This article presents the models and methods used to simulate a Zero Net Energy Home (ZNEH). The grid-connected ZNEH studied here is equipped with photovoltaic (PV) panels for on-site electrical production and a ground-source heat pump for space heating and cooling and domestic water pre-heating. Simulations are performed, using TRNSYS 15.3 with the IISiBat 3 interface, on a R-2000, 156m<sup>2</sup> home located in Montréal.

Overall, if one assumes that the house is electrically heated (space and water) and cooled with an electrically-driven air-conditioning with a COP of 3, then the amount of electricity needed by the house is 24131 kWh. When this house is equipped with a 2.5 tons ground-source heat pump, the annual amount of electricity required drops to 13550 kWh. It is shown that this level of electricity production can be accomplished using 85.4 m<sup>2</sup> of south-facing PV panels tilted at 45°. On an annual basis, the grid supplies more electricity than it receives from the PV panels in the winter. However, the situation is reversed in the summer and overall, there is a near zero net energy balance at the end of the year.

## REFERENCES

- ASHRAE (1981). Handbook of fundamentals, Chapter 26.
- ASHRAE (1997). WYEC2, Weather Year for Energy Calculations. ASHRAE, Inc. Atlanta.
- Ayoub, J., Dignard, L., Filion, A. (2001). Photovoltaics for buildings: opportunities for Canada.. CANMET-CTEC Number 2001-123(TR)/21-12-2001.(<http://cetc-varenes.nrcan.gc.ca/eng/publication/r2001-123f.html>).
- ClimateMaster (1995). E Series – E030 model, Water source heat pumps.
- Dutil, Jean-Pier (2003). Création d'un programme sur TRNSYS permettant de calculer les pertes de chaleur dans un sous-sol, Projet de fin d'études, département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal.
- Eckstein, J.H. (1990). Detailed Modelling of Photovoltaic System Components, M.Sc. thesis, University of Wisconsin – Madison.
- EERE (2000). Zero Net Energy Buildings, Outreach and action Plan. (<http://www.eere.energy.gov/solarbuildings/pdfs/zne.pdf>).
- ENERINFO Advisor (2000). Building an Energy Efficient Home. Nova Scotia Department of Natural Resources.
- Fry, B. (1998). Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems. M.Sc. thesis. University of Wisconsin - Madison.
- Gilijamse, W. (1995). Zero-energy Houses in the Netherlands. In: Proceedings of IBPSA 95. Madison, Wisconsin, USA, August 14-16, 1995. 276-283.
- Gunes, B. M., Ellis, M.W. (2003). Evaluation of Energy Environmental, and Economic Characteristics of Fuel Cell Combined Heat and Power Systems for Residential applications. ASME Trans.. Vol. 125. 208-220.
- Hellström, G., Mazzarella, L., Pahud, D. (1996). Duct ground storage model – TRNSYS version. Department of Mathematical Physics, University Of Lund, Sweden.
- Iqbal, M.T. (2004). A Feasibility Study of a Zero Home in Newfoundland. Ren. Energy 29. 277-289.
- Kadam, S. (2001). Zero net Energy Buildings: Are they economically feasible? Sustainable Energy Proceedings. <http://web.mit.edu/10.391j/www/proceedings/Kadam2001.pdf>
- Klein, S.A., et al. (2000). "TRNSYS - Reference Manual". Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. Madison, WI (USA).
- Lemire, N. (1999). Étude sur les systèmes de pompes à chaleur géothermiques, M.Sc.A., département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal.
- Messenger, R.A., Ventre, J. (2004). Photovoltaic Systems Engineering, 2<sup>nd</sup> edition, CRC press.
- Mitalas, G.P. (1987). Calculation of below-grade residential heat loss: low-rise residential buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 93, part 1.
- Patel, M. R. (1999). Wind and Solar Power Systems. CRC press.
- Perlman, M., Mills, B.E. (1985). Development of Residential Hot Water Use Patterns, ASHRAE Transactions, vol. 91, part2, pp.657-679.
- TESS (2001). <http://www.tess-inc.com>

# DES BATIMENTS DEMONSTRATIFS A USAGE MAITRISE

Etienne Wurtz

Institut National d'Energie solaire, Savoie Technolac  
50, avenue du lac Léman BP 332  
73375 Le Bourget du Lac Cedex France

## 1. Objectifs des constructions

Dans le cadre de la mise en place de la structure INES (Institut National de l'Energie Solaire), une plate-forme expérimentale destinée à analyser le comportement de différents types de bâtiments sera mise en place. Or, si la réalisation de plusieurs bâtiments à usage maîtrisé est une démarche complexe et nécessitant de sérieux investissements, il ne peut y avoir de résultats intéressants si cette démarche n'est pas accompagnée de plusieurs projets de recherche ambitieux et bien définis.

Parmi les principales problématiques à résoudre dans le domaine de la thermo-aéraulique du bâtiment on peut citer l'optimisation du facteur inertie/isolation permettant de récupérer le maximum d'énergie solaire de façon passive dans le bâtiment ainsi que le couplage entre comportement aéraulique et échanges au niveau des parois et ces réalisations devront donc permettre de progresser scientifiquement dans ce domaine.

Un autre intérêt de ce type de projet est la réalisation d'une maison passive ce qui est relativement courant en Europe mais n'a pas encore été en France. Il s'agira de réaliser une construction à très faible consommation énergétique de façon à évaluer dans quelle mesure il est possible d'obtenir un bâtiment autonome en énergie en maintenant été comme hiver des conditions de confort satisfaisantes.

Enfin le principal objectif de ce projet est la validation d'un code de calcul qui puisse permettre à l'avenir de concevoir des maisons à forte efficacité énergétique sans nécessiter pour autant de nouvelles constructions expérimentales.

## 2. Méthode de travail

Pour atteindre ces objectifs, on envisage de réaliser quatre types de configurations très différentes qui sont :

- Une construction réalisée en blocs de béton à isolation intérieure correspondant à la réalisation la plus courante sur le marché actuel de la construction. Elle devra respecter la réglementation 2010 que l'on peut estimer à environ 10% en-dessous de la réglementation 2005 qui entre en vigueur cette année. On peut estimer que c'est sur ce type de constructions que les industriels seront le plus amenés à tester leurs produits innovants.
- De façon à anticiper les progrès nécessaires pour atteindre notamment les objectifs du protocole de Kyoto, on réalisera ensuite une construction du même type mais à isolation extérieure ce qui permettra une bien meilleure efficacité notamment par l'élimination de la majorité des ponts thermiques.
- Pour valider les constructions les plus couramment réalisées lorsqu'on évoque le terme de maison solaire on réalisera également une maison en brique à isolation répartie qui permet d'associer inertie et isolation mais qui semble trouver ses limites en regard des réglementations thermiques toujours plus exigeantes.
- La dernière réalisation sera la maison passive qui sera conçue en bois avec une isolation renforcée intégrée en évitant tout problème de pont thermique et en étant particulièrement attentif au problème de confort d'été.

De façon à être en mesure de comparer les résultats il est bien sûr nécessaire de réaliser quatre configurations identiques pour les différentes maisons en choisissant des configurations simples sur des vides sanitaires de façon à limiter au maximum les possibilités d'erreur au niveau de la modélisation. Par ailleurs une étude toute particulière concernera le renouvellement d'air que ce soit par simple ou double flux ou encore la ventilation naturelle.

### **3. L'expérimentation un outil indispensable pour valider la simulation**

La simulation permet par la connaissance du comportement des différents composants de modéliser le comportement global du bâtiment mais ne permet pas de prendre en compte l'interaction entre ces différents composants et c'est pour cette raison qu'il a été décidé de réaliser ces différents types de construction en optimisant leurs propriétés thermiques tout en veillant à l'aspect économique des réalisations. La première phase consistera donc à étudier par la simulation le comportement de ces différentes configurations et de mettre en évidence les différences constatées pour des climats identiques de façon à bien identifier les variations des configurations totalement distinctes qui ont été choisies. La réalisation en site réel de ces constructions qui aura lieu en parallèle qui nécessitera également de simuler les charges internes par des boucles chaud et froid tout en maintenant des conditions de confort en fonction des conditions météorologique permettra dans un second temps de valider les résultats obtenus par simulation et ainsi d'évaluer le domaine de validité des différents logiciels testés. Une fois ces résultats obtenus on s'attachera à réaliser une étude paramétrique en considérant différents types de climats à la fois sur les conditions d'été et d'hiver en maintenant des conditions de confort que le travail permettra également de préciser

### **4. Résultats attendus**

A l'issue de ces travaux on devra être capable de proposer des caractéristiques de construction adaptées à la fois aux conditions climatiques, aux modes de vie des occupants ainsi qu'aux ressources en matériaux disponibles localement. On devra également proposer un outil permettant l'estimation quantitative des consommations annuelles en fonction des options choisies pour le type de réalisations avec un niveau de précision acceptable ce qui permettra de réaliser des choix de conception permettant en fonction des conditions météorologiques de minimiser les consommations énergétiques et d'améliorer les conditions de confort.

# ESTIMATION OF ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS BY USING THE FREE-RUNNING TEMPERATURE

Francis Allard, Cristian Ghiaus

Laboratoire d'Études des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment, Université de La Rochelle,  
Av. M. Crépeau, 17000 La Rochelle, France

E-mails: [francis.allard@univ-lr.fr](mailto:francis.allard@univ-lr.fr), [cristian.ghiaus@univ-lr.fr](mailto:cristian.ghiaus@univ-lr.fr)

## Abstract

This paper demonstrates that the time series values obtained from measurements or dynamic simulation can be used to estimate the energy load curve, that this curve may be applied to calculate the energy consumption and that the free-running temperature is an equivalent form of the load curve. The main advantages of using the concept of free-running temperature are that 1) the dynamic behavior may be described by steady-state concepts, 2) the whole range of building operation (heating, ventilation and cooling) is described by a single concept, and 3) the thermal behavior of the building, the comfort and the climate are decoupled. The mathematical formalism uses matrix notation.

*Key words:* energy performance, bin methods, degree-day, on-line measurements, BEMS

## 1 Introduction

Currently, energy performance of buildings is assessed by using two types of methods: steady-state and dynamic. Steady-state approach is appropriate if the building operation and the efficiency of HVAC systems are constant, at least on intervals of time and/or outdoor temperature [1]. Dynamic analysis, which uses building thermal simulation, requires exhaustive information about the building construction and operation. The results are usually given in the form of time series. The current dynamic approach needs two important improvements in order to become a current practice: to reduce the amount of input data [2] and to give more condensed information as results.

A new paradigm for estimating the energy performance in the initial stages of design is based on frequency distribution [3] which may be combined with qualitative reasoning [4]. The advantage of the frequency distribution over the time series is that the information contained is much richer.

**Nomenclature**

$q$	heat flux, energy rate (W)
$s$	complex variable, $s = \sigma + j\omega$ ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$F$	frequency occurrences (-)
$K$	thermal conductance (W/K)
$Q$	energy (J or kWh)
$R$	thermal resistance (K/W)
$T$	temperature (K or °C)

*Vectors*

<b>F</b>	frequency occurrences (-)
<b>K</b>	conductance (W/K)
<b>Q</b>	energy (J or kWh)
<b>T</b>	temperature (K or °C)

*Symbols*

$\times$	matrix product
$*$	element by element array multiplication

*Superscript*

$T$	transpose
-----	-----------

*Subscripts*

$b$	base
$c$	cooling
$cd$	conduction
$cl$	lower comfort limit
$cu$	upper comfort limit
$fc$	free-cooling
$fr$	free-running
$g$	gains
$h$	heat
$i$	indoor
$l$	total loss
$o$	outdoor
$s$	sun
$v$	ventilation

*Diacritical marks*

$\sim$	transfer function
$-$	mean value

*Greek symbol*

$\delta$	condition, $\delta \in \{0; 1\}$
----------	----------------------------------

For example, the designer would be more interested in the frequency of occurrences and in the duration of the indoor temperature values larger than the upper comfort limit in a period of, lets say, 10 years, than in the time variation of the temperature during each day of a standard weather year. With this information, the design decisions become a choice of accepted risk with important economic and social benefits.

Steady-state methods based on temperatures [5, 6] or on load (i.e. heating / cooling) curve [7] can be adapted to characterized the dynamic behavior by considering their frequency of occurrence or probability distributions [3]. The load curve and the temperatures were used

separately in analyzing the building performance [8, 9]. This paper demonstrates the equivalence between the load curve and the free-running temperature, which allows us to analyze the building in heating, ventilation, and cooling regimes by using a single concept. The advantage of this method consists in decoupling the three main factors that influence the energy consumption of the building: the thermal behavior of the building, the thermal comfort range and the climate.

## 2 Energy calculation from load curve

The heating load for a bin (i.e. an interval) of the outdoor temperature for a given operating mode of the HVAC system is

$$\bar{q}_h = \bar{K}(T_o - \bar{T}_b), \quad (1)$$

where  $\bar{K}$ ,  $\bar{K} = \bar{K}_{cd} + \bar{K}_v$ , is the mean value of the thermal conductance and  $T_b$  is the outdoor temperature for which the heating load is zero, called the base temperature

$$T_b \equiv T_o \Big|_{q_h=0}. \quad (2)$$

By using the equation (1), the sum of energy rate for heating in a bin around  $T_o$  is:

$$\sum [q_h] = F \cdot \bar{q}_h = F \cdot \bar{K}(T_o - \bar{T}_b), \quad (3)$$

where and the brackets  $[ ]$  indicate the operation:

$$[f] = \begin{cases} f & \text{if } f < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

$F \equiv F(T_o | q_h < 0)$  is the frequency of occurrences of the outdoor temperature in the considered bin, with the condition that the heating is needed. The energy consumption on the whole range of variation of the outdoor temperature is:

$$\sum_{T_o} [q_h] = \mathbf{F}^T \times \bar{\mathbf{K}} * (\mathbf{T}_o - \bar{T}_b), \quad (5)$$

$\mathbf{T}_o = [T_{o1} \ T_{o2} \ \dots \ T_{ok}]^T$  is the vector which represents the centers of the bins of outdoor temperature,  $\mathbf{F} = [F(T_{o1}) \ F(T_{o2}) \ \dots \ F(T_{ok})]^T$  is the vector of frequencies of occurrences of outdoor temperature in the bins  $\mathbf{T}_o$ , and  $\bar{\mathbf{K}} = [\bar{K}(T_{o1}) \ \bar{K}(T_{o2}) \ \dots \ \bar{K}(T_{ok})]^T$  is the vector of mean global conductance values corresponding to the bins  $\mathbf{T}_o$ . The operator  $\times$  represents the

matrix multiplication and the operator  $*$  represents the array multiplication, i.e. the element-by-element product of arrays:

$$\bar{\mathbf{K}} * \mathbf{T}_o = [\bar{K}(T_{o1}) \cdot T_{o1} \quad \bar{K}(T_{o2}) \cdot T_{o2} \quad \dots \quad \bar{K}(T_{ok}) \cdot T_{ok}]^T. \quad (6)$$

If the values of the vector  $\bar{\mathbf{K}}$  are constant, then:

$$\bar{\mathbf{K}} * \mathbf{T}_o = \bar{K} \mathbf{T}_o, \quad (7)$$

and equation (5) becomes:

$$\sum_{T_o} [q_h] = \mathbf{F}^T \times \bar{K} (\mathbf{T}_o - \bar{T}_b). \quad (8)$$

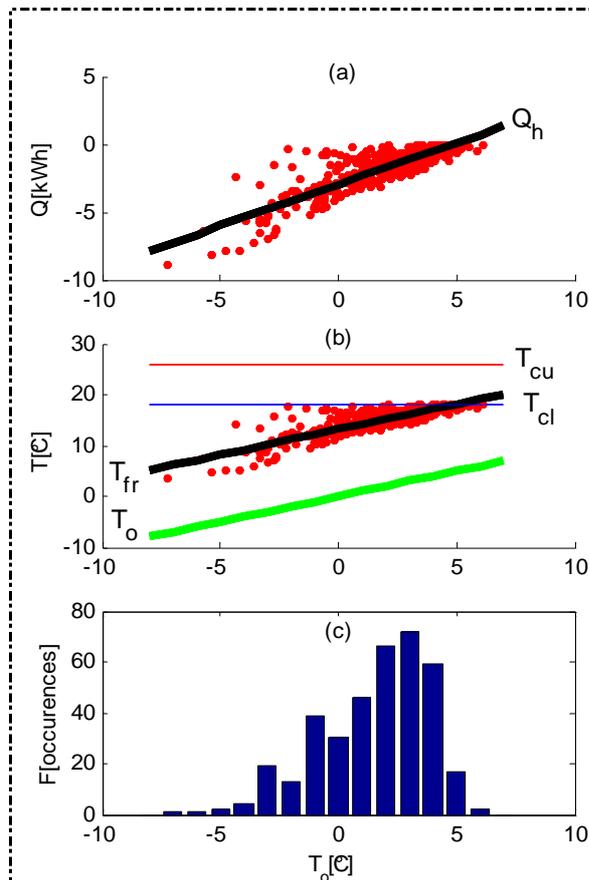


Fig. 1 Energy load and free-running temperature for heating: a) Heating load; b) Free-running temperature obtained from heating load; c) Frequency of occurrences distribution of outdoor temperature.

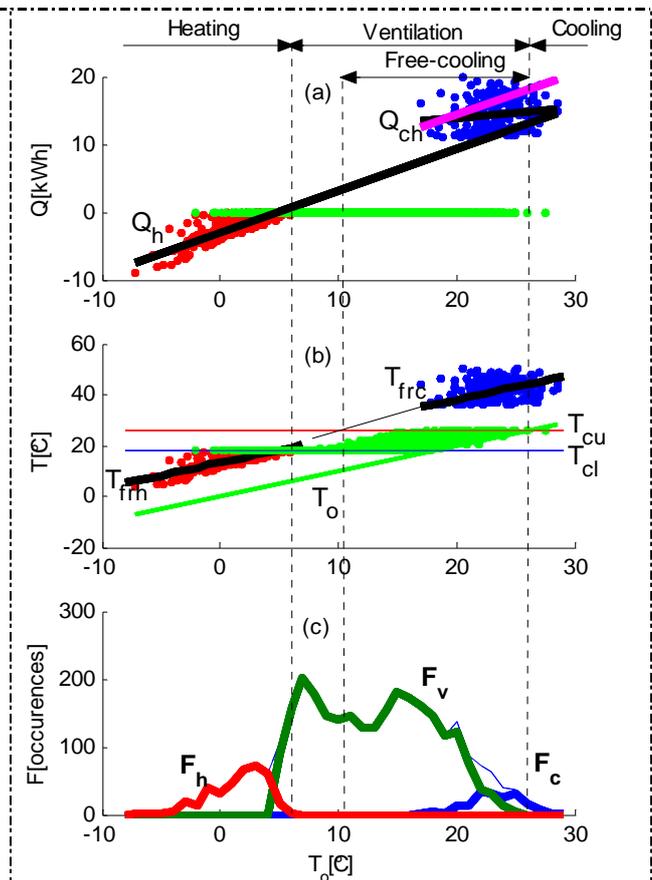


Fig. 2 Energy load and free-running temperature for heating and cooling: a) Heating load; b) Free-running temperature obtained from heating load; c) Frequency of occurrences distribution of outdoor temperature.

Commonly, energy simulation software and energy meters in real buildings give energy consumption for heating over a sample time,  $\Delta t$ , e.g.  $\Delta t = 1\text{h}$ . Integrating the energy rate expressed by the equation (1), the energy consumption during the period  $\Delta t$  is

$$\bar{Q} = \bar{K}(T_o - \bar{T}_b)\Delta t, \quad (9)$$

where  $\bar{Q}$ ,  $\bar{K}$ , and  $\bar{T}_b$  are the mean values of the hourly energy consumption, overall thermal conductance and base temperature for the bin of the outdoor temperature  $T_o$ . The energy consumption for heating is then

$$\sum_{T_o} [Q] = \mathbf{F}^T \times \bar{K}(\mathbf{T}_o - \bar{T}_b)\Delta t. \quad (10)$$

If the values of the vector  $\bar{\mathbf{K}}$  are constant, i.e. the mean values of the total thermal conductance are constant for a bin of outdoor temperature and an operating mode of the HVAC system, then the global thermal conductance  $\bar{K}$  may be found from experimental data by regression.

### 3 Experimental estimation of the load curve

Representing the energy losses for heating,  $Q$ , as a function of the outdoor temperature will result in a cloud of data. Fig. 1 presents the results of a thermal simulation of a full air-conditioned building. The linear regression model for this data cloud is:

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{1}_n \quad \mathbf{T}_o] \times \mathbf{b} + \mathbf{E}, \quad (11)$$

where  $\mathbf{1}_n = [1, \dots, 1]^T \in R^n$ , the hourly energy consumption  $\mathbf{Q} = [Q_1 \quad Q_2 \quad \dots \quad Q_n]^T$  and the hourly mean outdoor temperature  $\mathbf{T} = [T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_n]^T$  are the observations, and  $\mathbf{b} = [b_0 \quad b_1]^T$  is the unknown parameter vector. The vector  $\mathbf{E} = [E_1 \quad E_2 \quad \dots \quad E_n]^T$  models the scatter of data and the variation of  $K_v$  and  $K_{cd}$ . The vector  $\mathbf{b}$  is found by ordinary or robust regression [13],

$$\mathbf{b} = [\mathbf{1}_n \quad \mathbf{T}_o] \setminus \mathbf{Q} \quad (12)$$

where  $\setminus$  is the regression operator.

From equation (11) we obtain the global heat loss coefficient of the building,

$$\bar{K} = b_1 / \Delta t \quad (13)$$

and the base temperature, i.e. the outdoor temperature for which the heat load is zero:

$$\bar{T}_b = -b_0 / b_1. \quad (14)$$

### 3.1 Conditions of application and limits of ordinary regression

The assumptions made for linear regression are that the outdoor temperature,  $T_o$ , has a normal distribution and that the heat load,  $Q$ , is a random variable of mean  $\mu_Q = \beta_0 + \beta_1 T_o$  and homogeneous variance  $\sigma^2$ . These conditions may be synthesized in [34]:

The random variables  $Q$  are independent

of mean  $\mu_Q = \beta_0 + \beta_1 T_o$  (15)

and variance  $\sigma^2$

The conditions (15) imply that the residuals of the regressions should have a normal distribution of zero mean.

Over a long period of time, the statistical distribution of the outdoor temperature,  $T_o(t)$ , is normal (or Gaussian). If the building is fully air conditioned, if the internal gains (occupation) and the ventilation rates are independent random variables having a normal distribution, and if the indoor temperature is controlled within a narrow range, then the energy load (heating and cooling) has also a normal distribution. These conditions are not satisfied in real situations; for example, the building is not air-conditioned at a constant temperature for the whole range of the outdoor temperature. Consequently, the outdoor temperature which corresponds to the heating period does not have a normal distribution.

The heating load is, in a first approximation, a linear function of the random variable outdoor temperature, as indicated by the equation (11). The linear transformation will change the mean and the variance but not the form of the distribution. When  $\mathbf{x}$  is vector of random values,

$$\begin{aligned} \text{if } \mathbf{y} &= [\mathbf{1} \quad \mathbf{x}] \times [a \quad b]^T \\ \text{then } \mu_y &= a + b\mu_x \\ \text{and } \sigma_y &= |b|\sigma_x \end{aligned} \tag{16}$$

where  $\mu$  and  $\sigma$  represent the mean and the standard deviation of the indices variables. If we want to find the answer to the question what is the expected value of  $Q$  as a function of  $T_o$ , then we use the least mean square to estimate the coefficients of the equation:

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{1} \quad \mathbf{T}_o] \times [a_T \quad b_T]^T \quad (17)$$

as

$$b_T = \frac{(\mathbf{T} - \mu_T)^T \times (\mathbf{Q} - \mu_Q)}{(\mathbf{T} - \mu_T)^T \times (\mathbf{T} - \mu_T)} \quad (18)$$

and

$$a_T = \mu_Q - b_Q \mu_T. \quad (19)$$

An example of estimation of  $\mathbf{Q} = [\mathbf{1} \quad \mathbf{T}_o] \times [a_T \quad b_T]^T$  for a real building is given in Fig. 4 (a):

$$Q = -22.43 + 1.47T_o. \quad (20)$$

On the other hand, if we want to answer the question what is the outdoor temperature  $T_o$  for which the building is in thermal balance for a given energy flow rate,  $Q$ , then we find out by regression the coefficients of the equation:

$$\mathbf{T}_o = [\mathbf{1} \quad \mathbf{Q}] \times [a_Q \quad b_Q]^T \quad (21)$$

as

$$b_Q = \frac{(\mathbf{Q} - \mu_Q)^T \times (\mathbf{T} - \mu_T)}{(\mathbf{Q} - \mu_Q)^T \times (\mathbf{Q} - \mu_Q)} \quad (22)$$

and

$$a_Q = \mu_T - b_Q \mu_Q. \quad (23)$$

An example of estimation of  $\mathbf{T}_o = [\mathbf{1} \quad \mathbf{Q}] \times [a_Q \quad b_Q]^T$  for a real building is given in Fig. 4 (a):

$$T_o = 9.99 + 0.28Q. \quad (24)$$

The correlation coefficient of the regressions (17) and (21) is

$$r_{T_o Q}^2 = b_{T_o} \cdot b_Q. \quad (25)$$

For the example shown in Fig. 4 (a), by using the values from (20) and (24), it results  $r_{T_o Q}^2 = 0.41$ . This value shows a small correlation between data indicating low confidence in the model. Note that the model (17) will give good results for the estimation of energy consumption by using equation (10) for the data set on which it was calculated but the results will be much less precise when used with other sets of outdoor temperature.

### 3.2 Robust regression of heating load curve based on q-q plot

A robust regression based on quantile – quantile plot is proposed to mitigate this problem. The discussion of this method is done on real data collected in a school building in La Rochelle, France, for a month during the heating season. The school is heated intermittently, with the daytime set-point of 20°C and the nighttime set-point of 15°C. The data set considered in this example is selected for daytime, from 10:00H to 17:00H.

The points in a q-q plot represent quantiles of the data. Quantiles indicate the number of elements of a random variable that are in a given range. The  $k$ -th quantile,  $P_k$ , is that value of the random variable  $x$  having  $N$  values, say  $x_k$ , which corresponds to a cumulative frequency of  $Nk/n$ . The quantile is called percentile for  $n = 100$  [35]. The 25<sup>th</sup> and the 75<sup>th</sup> percentiles are called the first and the third quartiles, respectively, and the 50<sup>th</sup> percentile is called the median [34]. If the points in a q-q plot lie roughly on a line, then the distributions are the same, whether normal or not.

A robust estimation of the linear relation between the outdoor temperature and the heat load may be done based on the central region of the q-q plot by considering data between the 1<sup>st</sup> and the 3<sup>rd</sup> quartile. If the two distributions are the same for this quantile range, then the coefficients of the model

$$\mathbf{Q} = a + b\mathbf{T}_o \quad (26)$$

are:

$$b = \sigma_Q / \sigma_{T_o} \quad (27)$$

and

$$a = \mu_{T_o} - b\mu_Q \quad (28)$$

which represents the principal component axis in Fig. 4.

Equation (28) is a direct result of the fact that  $Q$  is a function of the random variable  $T_o$  and it is in accordance with the set of equations (16). In Fig. 4, the principal component axis (28) is located between the regression models (17) and (21). Fig. 4 (b) shows that the model (28) approximates the q-q plot in the central zone.

It is known from physical considerations that the relation  $Q = f(T_o)$  is non linear for hot water heating systems equipped with radiators due to the nonlinearity of the heat transfer by convection and radiation:

$$P_i = kS(T_m - T_a)^n, \quad 1 \leq n \leq 1.5 \quad (29)$$

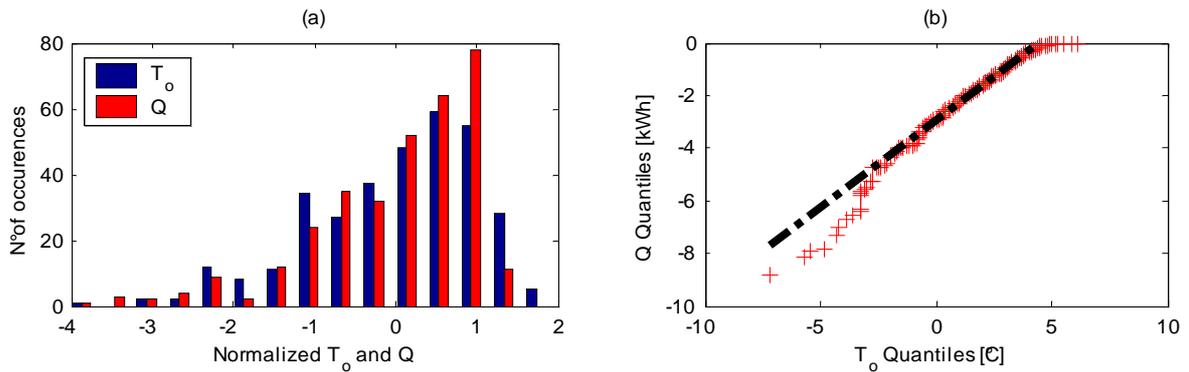


Fig. 3 Outdoor temperature and the heating load have partially the same statistical distribution. a) histogram b) quantile-quantile plot

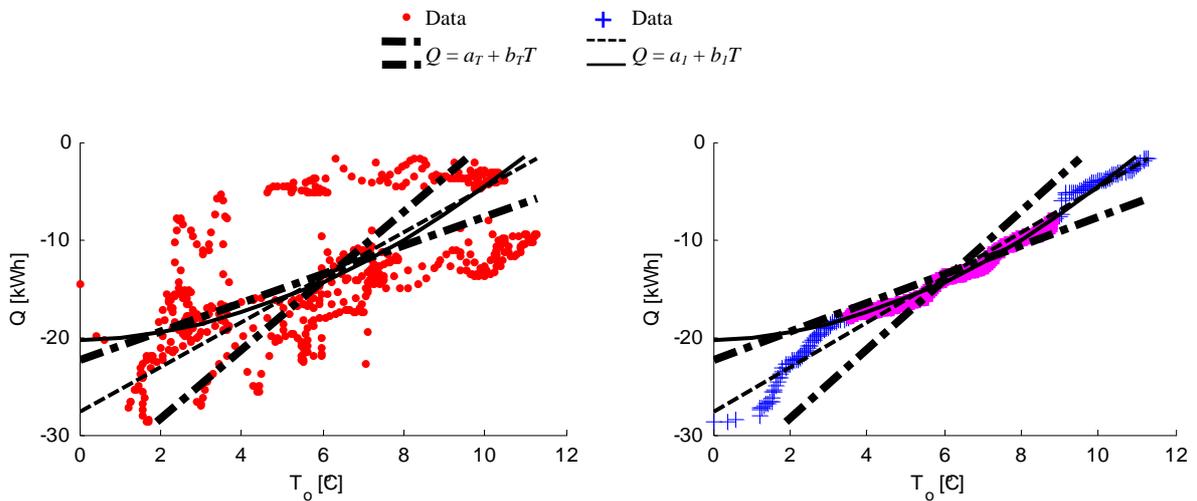


Fig. 4. Regression models on a) scatter plot b) quantile-quantile plot

where  $P$  is the heat flux of the radiators,  $k$  is the global transfer coefficient,  $S$  is the total surface,  $T_a$  is the ambient temperature and  $T_m$  is the mean temperature of the hot water:

$$T_m = (T_s + T_r) / 2 \quad (30)$$

where  $T_s$  and  $T_r$  are the supply and the return hot water temperature, respectively. The nonlinearity of the relation  $Q = f(T_o)$  may be modeled by considering a quadratic function of the type:

$$Q = a_2 + b_2 T_o + c_2 T_o^2. \quad (31)$$

For the same reasons as above, a robust estimation of the parameters of equation (31) can be done by using the data from the q-q plot between the 1<sup>st</sup> and the 3<sup>rd</sup> quartile. For the data set shown in Fig. 4, the model obtained is:

$$Q = -20.35 + 0.12T_o + 0.15T_o^2. \quad (32)$$

This model has a small slope for  $T_o = -5^\circ\text{C}$  which is the design temperature for heating in La Rochelle, France, and a higher slope for the base temperature of  $12^\circ\text{C}$ .

When energy consumption is estimated by using equation (10), the ordinary regression, equations (17) - (19), gives relative errors of 0.5% for the data on which it was obtained and of about 5-10 % for different set of data. The q-q regressions, equations (26) and (31), give the same relative error of 2-4% for the data set on which it was obtained as well as on new data set.

#### 4 Relation between the free-running temperature and the load curve

The heat gains from sun, occupants, lights, and so forth,  $\bar{q}_g$ , are equal to the total energy loss when the outdoor temperature is equal to the balance point,  $T_b$ , for a given lower limit of the indoor comfort temperature,  $T_{cl}$  [1]:

$$\bar{\mathbf{g}}_g = \bar{\mathbf{K}} * (T_{cl} - \bar{\mathbf{T}}_b). \quad (33)$$

The free-running temperature,  $T_{fr}$ , is the indoor temperature when no energy is supplied by the heating or cooling system and the air permeability of the building is kept at the winter value, i.e. the windows are closed [3]. In this case, the heat gains are:

$$\bar{\mathbf{g}}_g = \bar{\mathbf{K}} * (\bar{\mathbf{T}}_{fr} - \bar{\mathbf{T}}_o). \quad (34)$$

From equations (33) and (34) it results that:

$$\bar{\mathbf{T}}_{fr} - T_{cl} = \bar{\mathbf{T}}_o - \bar{\mathbf{T}}_b. \quad (35)$$

Expressed as a function of the free-running temperature, the heating load equation (1) becomes:

$$\bar{q}_h = \bar{K}(\bar{T}_{fr} - T_{cl}). \quad (36)$$

From equation (36) we obtain the free-running temperature:

$$\bar{\mathbf{T}}_{fr} = T_{cl} + \bar{\mathbf{R}} * \bar{\mathbf{q}}. \quad (37)$$

With the notations used, the energy rate for heating,  $\bar{\mathbf{q}}_h$ , is negative. For practical purposes, equation (37) may be expressed as a function of the energy consumption,  $\bar{\mathbf{Q}}_h$ , during a time interval,  $\Delta t$ :

$$\bar{\mathbf{T}}_{fr} = T_{cl} + \bar{\mathbf{R}} * \bar{\mathbf{Q}}_h / \Delta t. \quad (38)$$

Equation (38) provides the means of representing the free-running temperature as a function of the energy load. Fig. 1 (a) shows the scattered data of the energy consumption and the load curve obtained by regression,  $Q_h$ . Fig. 1 (b) shows the equivalent of the panel (a) obtained by using the free-running temperatures calculated with equation (38). The last panel, Fig. 1 (c), shows the frequency distribution of the outdoor temperature.

## 5 Energy performance evaluation by using the free-running temperature

The free-running temperature may replace the load curve to estimate the energy performance of buildings. In addition, it may be used in energy estimating methods such as degree-day and bin methods or to assess the climatic suitability of HVAC solutions and the potential for cooling by ventilation [3, 4, 14].

The load curves for heating and air conditioning are shown in Fig. 2 (a). The regression line  $Q_h$  represents the heating load. The regression line for cooling is more difficult to obtain due to data scattering produced mainly by the variable ventilation rates used for free-cooling [15]. Since the building is the same, it may be assumed that the cooling load is similar to the heating load with a difference introduced by the change of the base temperature equal to  $T_{cu} - T_{cl}$ . Consequently, the cooling load obtained from heating load  $Q_{ch}$  is parallel to the heating load,  $Q_h$ , and biased so that it passes through the center (mean) of the data cloud.

The free-running temperatures, obtained by using equation (38) for the regression line, are shown in Fig. 2 (b). Although mathematically equivalent to Fig. 2 (a), this is a condensed representation of the building performance during heating, ventilation and cooling. The conditions for heating, ventilation and cooling can be expressed as:

$$\delta_h = \begin{cases} 1, & \text{if } T_{fr} < T_{cl} \\ 0, & \text{if } T_{fr} \geq T_{cl} \end{cases}, \quad (39)$$

$$\delta_v = \begin{cases} 1, & \text{if } T_{fr} > T_{cl} \text{ and } T_o < T_{cu} \\ 0, & \text{if not.} \end{cases}, \quad (40)$$

and

$$\delta_c = \begin{cases} 1, & \text{if } T_{fr} > T_{cu} \\ 0, & \text{if not.} \end{cases}. \quad (41)$$

The condition for free-cooling (cooling by ventilation) is a sub-domain of ventilation,

$$\delta_{fc} = \begin{cases} 1, & \text{if } T_{fr} > T_{cu} \text{ and } T_o < T_{cu} \\ 0, & \text{if not.} \end{cases} \quad (42)$$

These domains are shown in Fig. 5. The example data shown in Fig. 2 (b) reveals that the free-cooling potential is not fully used since there are many points plotted for mechanical cooling in the free-cooling domain.

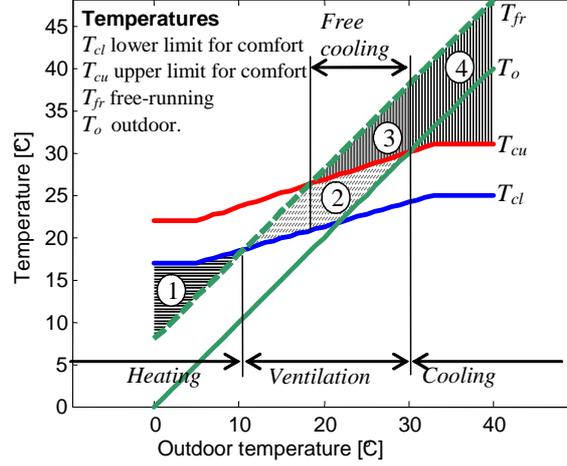


Fig. 5 HVAC operating zones: 1) heating, 2) ventilation 3) free-cooling, 4) mechanical cooling.

The frequency distributions of heating,  $\mathbf{F}_h$ , ventilation,  $\mathbf{F}_v$ , and cooling,  $\mathbf{F}_c$ , are shown in Fig. 2 (c). They represent the number of occurrences of outdoor temperature that satisfy the conditions (39), (40), and (41). The free-running temperature,  $\mathbf{T}_{fr}$ , the comfort range,  $\mathbf{T}_{cl}$  and  $\mathbf{T}_{cu}$ , and the frequency distributions,  $\mathbf{F}_h$ ,  $\mathbf{F}_v$ , and  $\mathbf{F}_c$ , can be used in energy performance estimation methods such as the bin method [3, 14]. The frequency distribution of degree-hour in bins of outdoor temperature for heating is:

$$\mathbf{F}_{DHh} = \mathbf{F}_h * (\mathbf{T}_{cl} - \mathbf{T}_{fr}), \quad (43)$$

for cooling is:

$$\mathbf{F}_{DHc} = \mathbf{F}_c * (\mathbf{T}_{fr} - \mathbf{T}_{cu}), \quad (44)$$

and for free-cooling is:

$$\mathbf{F}_{DHfc} = \mathbf{F}_{fc} * (\mathbf{T}_{fr} - \mathbf{T}_{cu}). \quad (45)$$

Multiplying the equations (43), (44), and (45) by  $\bar{K}$  we obtain the frequency distribution of energy consumption for heating and cooling and of the energy savings for cooling by using free-cooling.

The total energy for heating is:

$$Q_h = \mathbf{F}_h \times \bar{K}(\mathbf{T}_{cl} - \mathbf{T}_{fr}), \quad (46)$$

and for cooling is:

$$Q_c = \mathbf{F}_c \times \bar{K}(\mathbf{T}_{fr} - \mathbf{T}_{cu}). \quad (47)$$

The total energy saved for cooling by using ventilation is:

$$Q_{fc} = \mathbf{F}_{fc} \times \bar{K}(\mathbf{T}_{fr} - \mathbf{T}_{cu}). \quad (48)$$

## 6 Conclusions

The load curve may be used in conjunction with the frequency distribution of the outdoor temperature to estimate the energy consumption of a building in different locations or in the same location but in different years. The errors introduced by using the energy load curve instead of using the measured energy are, generally, less than 5 %. These properties make the load curve useful in three applications: 1) to specify and check the building energy performance, 2) to estimate the energy consumption of a given building in another climate, and 3) to compare energy performance for different periods of time. Since the load curve is a characteristic of the building, which is independent of the climate, it can be used as a performance requirement for the design that may be easily checked during the operation of the building. The load curve obtained experimentally may be used to estimate the energy consumption of a building in another climate. This may be helpful for a first estimate of the feasibility of an exemplary building in a new climatic context. The same experimental load curve may be applied to assess the building performance in different years; consequently, it may be used in service contracts that offer comfort as a product. The energy consumption will vary from year to year not only due to the weather but also to the operation of the building; these variations are partially shown by the load curve.

The main disadvantage of the load curve is that it characterizes only the operation modes for heating and cooling but not for ventilation and it does not show explicitly the influence of the temperature comfort range on energy consumption. The information given by the load curve may be conveyed by the free-running temperature. The advantages of using the free-running temperature are that it describes the thermal behavior of the building that is decoupled from the temperature comfort domain and the weather data. By using the thermal characteristic of the building, the comfort range and the climate, we may obtain the distribution of degree-hour, which is mathematically equivalent to the bin method employed in energy estimating methods. The total thermal conductance, which makes the link between the energy load curve and the free-

running temperature, may be helpful in estimating the energy consumption from the frequency distribution of degree-hours.

### Acknowledgement

The development of the method presented in this paper was partially supported by the European Commission in the projects 'URBVENT Natural ventilation in urban areas' and 'EULEB European high quality low energy buildings'.

### References

1. ASHRAE, *Energy Estimating and Modeling Methods*, in *ASHRAE Fundamentals*. 2001.
2. Ellis, M.W. and E.H. Mathews, *A new simplified thermal design tool for architects*. Building and Environment, 2001. **36**(9): p. 1009-1021.
3. Ghiaus, C., *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings, 2003. **35**(4): p. 405-411.
4. Germano, M., et al., *Natural ventilation potential of urban buildings*:. International Journal of Ventilation, 2005. **4**: p. 49-56.
5. Shaviv, E., A. Yezioro, I. G. Capeluto, *Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy*. Renewable Energy, 2001. **24**: p. 445-452.
6. Heras, M.R., et al., *Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept*. Solar Energy, 2004. **78**(1): p. 85-96.
7. Elkhuizen, P.A., H.C. Peitsman, and W. W.J., *A new design guideline for the heating and cooling curve in AHU units of HVAC systems*. Building Services Engineering Research and Technology, 2003. **24**(3): p. 191-202.
8. Pfafferott, J., S. Herkel, and J. Wapler, *Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models*. Energy and Buildings, 2005. **37**(8): p. 844-852.
9. Pfafferott, J., S. Herkel, and M. Jäschke, *Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements*. Energy and Buildings, 2003. **35**(11): p. 1129-1143.
10. ASHRAE, *Nonresidential cooling and heating load calculation procedures*, in *ASHRAE Fundamentals*. 2001.
11. Laub, A.J., et al., *Computation of system balancing transformations and other applications of simultaneous diagonalization algorithms*. IEEE Trans. Automatic Control, 1987. **32**: p. 115-122.
12. Moore, B., *Principal component analysis in linear systems: controllability, observability, and model reduction*. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981. **26**: p. 17-31.
13. Ghiaus, C., *Experimental estimation of building energy performance by robust regression*. Energy and buildings, 2005. **in press**.
14. Ghiaus, C. and F. Allard, *Potential for free-cooling by ventilation*. Solar Energy, 2005. **in press**.
15. Yik, F.W.H. and K.S.Y. Wan, *An evaluation of the appropriateness of using overall thermal transfer value (OTTV) to regulate envelope energy performance of air-conditioned buildings*. Energy, 2005. **30**: p. 41-71.