

Rapport annuel 1998 à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie

Nom du rapporteur: B. Lachal

e-mail du rapporteur: Bernard.Lachal@cuepe.unige.ch

Institut mandataire: Centre Universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)

URL de l'Institut: <http://www.unige.ch/cuepe/>

Titre du projet: Toiture Solaire de Plan-Les-Ouates: mesures, bilan technico-économique et étude de son intégration architecturale

Résumé: La toiture solaire, composée d'absorbeurs non vitrés, est un nouveau concept pour rendre plus compétitif l'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment. Dans la banlieue de Genève, la commune de Plan-Les-Ouates a intégré sur des nouveaux bâtiments 1400 m² de ces collecteurs (voir image plus bas). Une étude détaillée du fonctionnement de ce système et de son intégration technique et architectural permettra de faire un bilan énergétique du système, d'analyser son comportement et son adaptabilité au système technique et de proposer des améliorations, à la fois sur le rendement, sur les coûts et son intégration architectural.

Ce projet s'intègre à un mandat de la commune et de l'Office Cantonal de l'Energie, qui est d'analyser les différents systèmes installés sur ces bâtiments pour économiser l'énergie.

Les mesures effectuées depuis juin 1997 ont permis d'établir un premier bilan énergétique annuel du bâtiment. Pendant l'année mesurée, le système solaire a produit 120 kWh/m² de capteur, soit une contribution de 55 MJ/an par m² de plancher chauffé (17% de la demande). Quelques améliorations doivent augmenter cet apport jusqu'à 90 MJ/m².an l'année qui vient. Les premières conclusions présentées dans ce rapport devront être confirmées par la deuxième année de mesures.

Le bilan énergétique effectué pour l'été 1998 indique que, pendant la saison estival, le système solaire couvre quasi totalement les besoins thermiques du bâtiment (97% de la demande). Ce résultat est très satisfaisant par rapport à l'année précédente, où la contribution du solaire a représenté seulement 80% de la demande.

Le système de mesures développé pendant l'année en cours pour l'étude fine de la toiture solaire est aussi présenté dans ce rapport. Une analyse de la performance propre des capteurs est finalement discutée.



Cité solaire de Plan-les-Ouates

1. Objectifs

L'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage des bâtiments et la production d'eau chaude se heurte au problème du coût. Une possibilité pour améliorer la compétitivité économique de tels systèmes est le concept de "toiture solaire", qui a l'avantage de baisser les coûts, mais amène plusieurs contraintes.

- L'utilisation de capteurs non vitrés, nettement moins chers mais moins performants, suppose une très bonne gestion du niveau de la température de travail, et par conséquent un stockage et un système de chauffage très bien adaptés.
- Le vent aura un effet déterminant sur la productivité. L'aspect micro météorologique devient un facteur important à comprendre et à prendre en compte dès la conception du bâtiment.
- La double fonction de protection/production d'énergie se fait à partir d'éléments de captage d'énergie. Ce sont ces derniers qui doivent s'adapter pour devenir également "une toiture" (étanchéité, problème de diffusion de vapeur, etc.).
- L'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage n'est possible que dans un bâtiment à basse consommation d'énergie et nécessite une bonne complémentarité entre enveloppe, chauffage et ventilation.

On se propose dans cette recherche d'étudier ces 4 aspects à partir de l'exemple de "la cité solaire de Plan-les-Ouates", où une "toiture solaire" de 1400m² a été installée. Cette réalisation a été soutenue financièrement par Energie 2000. A partir d'une campagne de mesures détaillées, l'analyse du système de toiture solaire de la cité solaire permettra de tirer un bilan thermique et économique, d'étudier son intégration dans les systèmes techniques et du point de vue architectural. Une optimisation de ces systèmes ainsi que des recommandations pratiques seront faites en relation avec des ingénieurs, des architectes et des constructeurs.

La construction de ce complexe immobilier de 82 appartements et 1700m² de commerce a démarré en janvier 1994 près de Genève et est terminé actuellement. Le maître d'œuvre, la commune de Plan-les-Ouates, désire évaluer les différentes mesures adoptées (toiture solaire de 1400m² avec 100m³ de stockage à eau, puits canadien, ventilation double flux, régulation dynamique, isolation accrue de l'enveloppe).

Le projet s'inscrit dans ce cadre; il se propose d'étudier plus à fond et de façon plus spécifique un aspect: la toiture solaire et son intégration au système technique et à la partie architecturale.

L'année 1998 a été consacrée à:

- l'analyse thermique de l'ensemble du bâtiment (basée sur une année de mesures);
- l'analyse des mesures d'été (deuxième année de mesures);
- la mise en place du système de mesures concernant l'étude détaillée de la toiture solaire et de l'effet du vent sur sa performance.

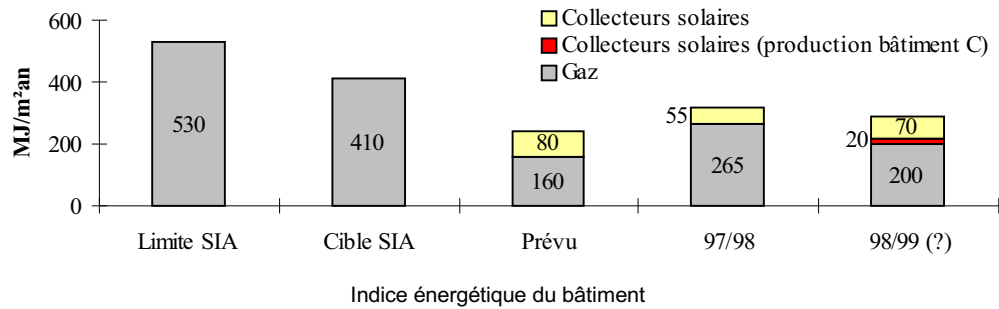
2. Travaux effectués et résultats obtenus

Analyse énergétique annuel (1997-1998)

Afin d'établir l'analyse thermique de l'ensemble du bâtiment et de chacun des sous-systèmes, un système de mesures a été mis en place l'année précédente. Il est décrit sur le rapport annuel 1997.

La première année de mesure s'est terminée le 10 juin et permet de tirer un premier bilan, dont un aperçu synthétique se trouve ci-dessous. Les premières conclusions devront être confirmées par la deuxième année de mesures, qui devrait voir quelques améliorations:

- l'année écoulée a été caractérisée par un hiver plutôt doux (2700 DJ/20/12 contre 3000 DJ/20/12 en moyenne) et ensoleillé (1650 MJ/m² contre 1540 MJ/m² habituellement entre octobre et avril);
- l'indice de dépense thermique des bâtiments, incluant chauffage et eau chaude sanitaire, s'est monté à 265 MJ/m²an (voir figure plus bas). Il est supérieur à celui annoncé (160 MJ/m²an), mais reste bien en dessous des normes (valeur cible : 410 MJ/m²an);
- les températures intérieures plutôt élevées (près de 23°C en moyenne au lieu de 20°C pour le calcul) expliquent partiellement ce surplus;



- la part du solaire (55 MJ/m².an, soit 17% de la demande), représente une production de 120 kWh/m² de capteur. Cet apport devrait être notablement augmenté l'année qui vient grâce, d'une part, à l'amélioration de la régulation et, d'autre part, à la fourniture de la chaleur estivale excédentaire au bâtiment "C" voisin. La production moyenne devrait atteindre 200 kWh/m² de capteur, soit une contribution de 90 MJ/an par m² de plancher chauffé;
- à condition que les températures des logements puissent être maintenues à 20°C, l'indice énergétique pourrait être de l'ordre de 200 MJ/m², se rapprochant de l'estimation initiale sans toutefois l'atteindre.

Le diagramme énergétique représenté ci-contre représente la période allant du 11 juin 1997 au 10 juin 1998. Les mesures ont été effectuées sur une des deux chaufferies.

La saison de chauffage, comprise entre le 13 octobre 1997 et le 30 avril 1998, a été marquée par un hiver doux et un ensoleillement au dessus de la moyenne (peu de stratus).

Malgré un hiver ensoleillé, les capteurs solaires ont produit très peu d'énergie entre le mois d'octobre et mars. Un problème de sonde de température d'enclenchement du système solaire est en grande partie à l'origine de ce dysfonctionnement; il a été corrigé au printemps 98 (voir plus bas).

Pendant l'année de mesures, le rendement de la chaudière a été de 92% en moyenne (PCI).

L'erreur de mesure (3 à 4%) est due au nombre élevé de compteurs de chaleur (3 à l'entrée du stock et 8 à la sortie). Les pertes de stockage sont donc trop faibles pour être mesurables.

La chaleur apportée par l'électricité des pompes représente moins de 1% de la chaleur totale.

Le solde de l'énergie de chauffage est constitué des pertes par l'enveloppe et par ventilation non-contrôlée (fenêtres) diminuées par les apports «gratuits» (solaire direct, électricité, occupants).

Les pertes par le système de ventilation contrôlée sont minimisées par le puits canadien et l'échangeur sur l'air vicié.

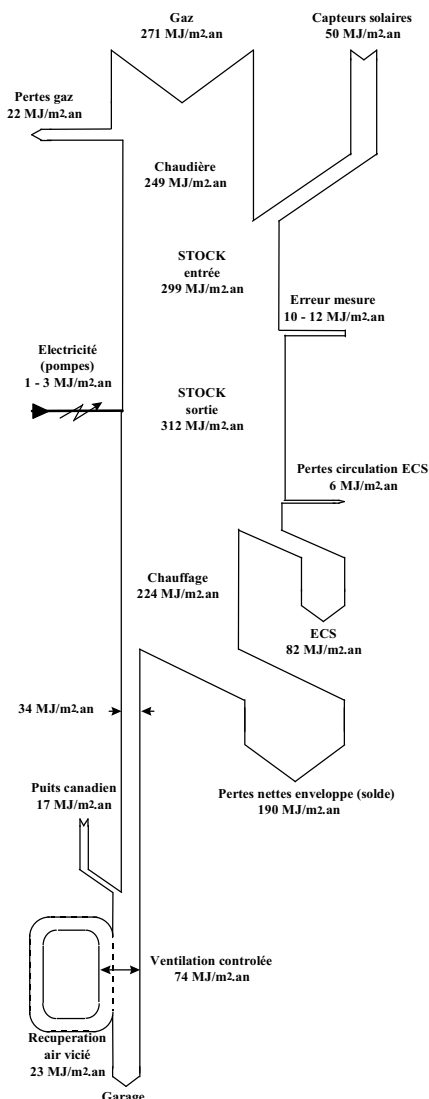
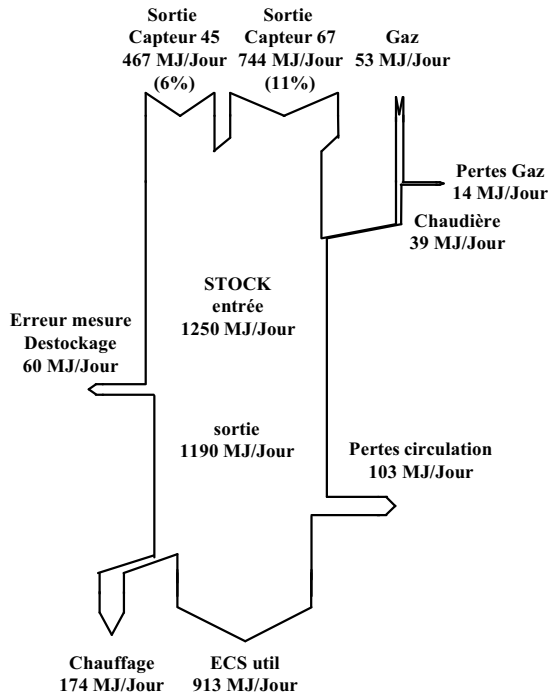


Diagramme énergétique pour la chaufferie 2 (moitié ouest du complexe). Les mesures ont été effectuées pendant la période du 11 juin 1997 au 10 juin 1998.

Bilan énergétique été 1998

Le diagramme énergétique représenté cidessous concerne la période allant du 12 mai 1998 au 12 septembre 1998 (période de non chauffage). L'année prochaine, la mesure intégrera la connexion du champ de capteurs au bâtiment "C" voisin, actuellement en cours.



Cette année, l'été a été chaud et normalement ensoleillé.

Par rapport à l'année passée (voir rapport annuel 1997), les collecteurs du bâtiment 45 ont produit la même quantité d'énergie. Par contre les collecteurs de la toiture 6-7 ont été un peu plus productifs, grâce à un meilleur contrôle entre mai et juillet. Les collecteurs solaires sont maintenant correctement pilotés, les sondes de régulation ayant été remplacées par le CUEPE fin mars pour le champs 6-7 et pour les 3 autres champs le 16 juillet 1998. Les nouvelles sondes sont fixées sur les capteurs, en contact direct avec les absorbeurs, et sont maintenant situées au milieu du champ et non plus en haut, dans la partie horizontale, comme auparavant.

Le gaz ne représente plus que 3% de la chaleur nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire (et du chauffage) pendant l'été.

La demande de chauffage pendant cette période peut paraître superflue.

Diagramme énergétique pour la chaufferie 2. Les mesures ont été effectuées pendant la période du 12 mai 1998 au 12 septembre 1998.

Etude de la toiture solaire: système de mesures

L'effet du microclimat sur la performance propre de la toiture solaire, et en particulier celui du vent, fait l'objet d'une étude menée en parallèle à l'analyse du système solaire et de son adaptabilité au système technique.

Cette étude comprend la mesure *in situ* et la simulation numérique validée par ces mesures.

Les sondes, mises graduellement en place depuis avril 1998, mesurent :

- l'effet de la géométrie du bâtiment sur la distribution du vent dans le voisinage de la toiture. Pour cette mesure, quatre anémomètres à coupelles et trois anémomètres ultrasoniques à 3 dimensions sont placés sur les toitures des bâtiments 1-2 et 6-7 (figure à côté et figure en dessous);
- l'effet du vent sur les pertes de chaleur par convection des capteurs. Ces pertes sont mesurées à travers des températures de stagnation et de la production des collecteurs solaires.



Anémomètre ultrasonique 3D placé à 50 cm de la toiture solaire (bâtiment 6-7).

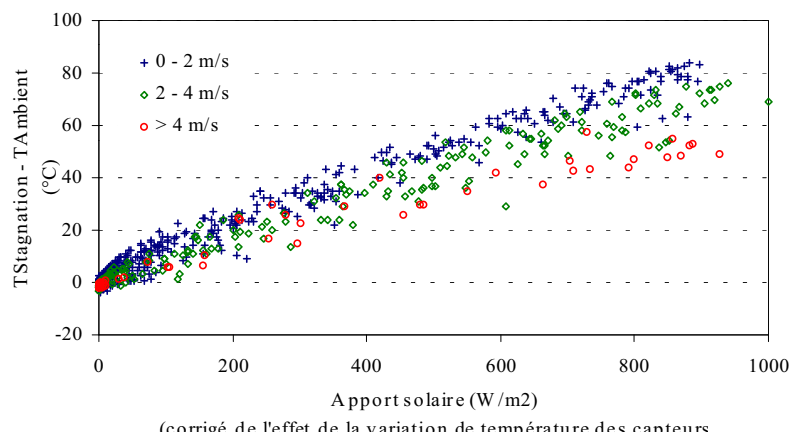


Mat météo placé sur la toiture du bâtiment 6-7. Un anémomètre ultrasonique à trois dimensions est placé à 2.5 m du toit. La vitesse du vent est mesurée avec deux anémomètres à coupelles placés à 2 m et à 1 m au dessus des capteurs. La température et l'humidité de l'air sont également obtenues.

Afin d'étudier en détail les flux cinétiques et thermiques au voisinage des capteurs, des anémomètres ultrasoniques sont utilisés. Ces appareils ont l'avantage de pouvoir mesurer les trois composantes de la vitesse du vent et leurs fluctuations à une fréquence de 10 Hz (mesures/seconde). La précision de 10 cm/s, donnée par le fabricant, a été confirmée par une étude menée en soufflerie en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique de l'Ecole d'Ingénieurs de Genève.

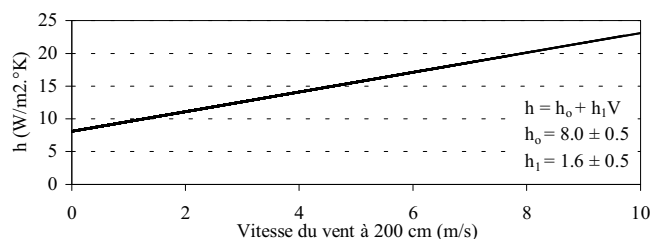
Evaluation de la performance des capteurs solaires

L'effet du vent mesuré à deux mètres au dessus des capteurs sur les pertes de chaleur par convection et par rayonnement est mis en évidence dans le graphique ci-dessous. L'élévation de température des capteurs en stagnation est tracée en fonction des apports solaires. Les mesures sont différenciées par plages de vitesse du vent (faible, moyenne, élevée). Ces apports sont corrigés par l'effet de la capacité thermique des collecteurs solaires en stagnation: sa valeur varie entre 15 et 25 kJ/K.m² dû en partie à l'effet de la diffusion de chaleur à travers des capteurs, qui peut être plus ou moins quantifiée sur cette "constante" selon les caractéristiques de l'échantillon utilisé pour la calculer. La valeur moyenne de 20 kJ/ K.m² a été utilisée. Les mesures, moyennées par pas de 60 minutes, concernent la période d'avril à septembre 1998.



Effet du vent sur la température de stagnation des capteurs solaires.

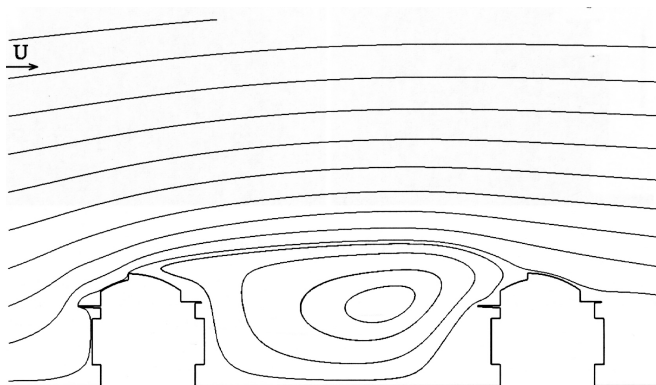
L'effet du vent sur le coefficient de pertes thermiques est représenté en bas: à faible vitesse, une augmentation de la température des capteurs de 1 °K entraîne 10 W/m² de pertes de chaleur supplémentaires, soit 14 kW pour les 4 champs. A vitesse de 5 m/s, pour la même variation de température, l'augmentation des pertes par convection est d'environ 15 W/m² (20 kW). Cette courbe a été obtenue par interpolation multilinéaire des mesures.



Effet du vent sur le coefficient de pertes thermiques des collecteurs solaires par convection (et rayonnement). Courbe obtenue par ajustement multilinéaire des mesures concernant la période d'avril à septembre 1998.

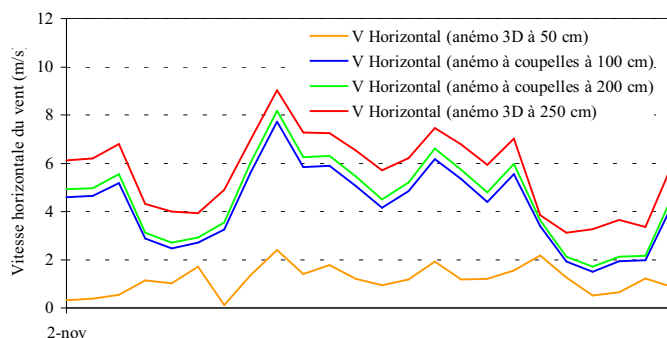
Etude de la distribution du vent au tours du bâtiment

La simulation numérique des flux turbulents autour du bâtiment fait l'objet d'une collaboration avec le Laboratoire CERMA de l'Ecole d'Architecture de Nantes en France. Le code de calcul N3S développé à l'origine par le Laboratoire National d'Hydraulique de l'Electricité de France, est utilisé. Il résout les équations de Navier-Stokes bi ou tridimensionnelles et l'équation de conservation de la masse pour un écoulement turbulent à travers la méthode des éléments finis. Un maillage avec 60000 points a été construit pour effectuer la simulation numérique bidimensionnelle; dans les régions d'intérêt, notamment proche des toitures solaires, le maillage est plus raffiné.



Simulation numérique bidimensionnelle des champs de vitesse autour des bâtiments 1-2 et 6-7.

La figure ci-contre donne une représentation qualitative des champs de vitesse autour des bâtiments 1-2 (à gauche) et 6-7 (à droite) obtenus par simulation bidimensionnelle. Pour un vent du nord (6 m/s), l'angle vif du décrochement de la toiture du bâtiment 1-2 provoque un décollement du vent incident. Le haut de la toiture du bâtiment 6-7 coïncide avec le point de recollement des filets d'air.



Composante horizontale du vent, mesurée à quatre hauteurs au-dessus des capteurs. La toiture était exposée au vent du sud. Les données représentées concernent le 2 novembre 1998.

Le graphique à côté montre les toutes premières mesures du vent sur la toiture du bâtiment 6-7 (moyennes par pas de 60 minutes). La toiture était exposée au vent du sud le 2 novembre. La comparaison quantitative entre les données calculées et mesurées doit permettre de calibrer le modèle numérique. Celui-ci sera alors utilisé pour simuler des dispositifs de protection (claustrés, dispositifs simples).

3. Collaboration

Un *groupe d'accompagnement* comprend les représentants des institutions parties prenantes au projet et des cercles concernés par l'utilisation rationnelle de l'énergie ainsi que certains professionnels ayant participé à la construction de la Cité Solaire. Son objectif est d'assurer la liaison entre le groupe de suivi et les milieux concernés par les résultats de cette recherche. Il s'est réuni deux fois cette année (juin et novembre).

La simulation numérique des flux turbulents autour du bâtiment fait l'objet d'une collaboration avec le Laboratoire CERMA de l'Ecole d'Architecture de Nantes en France.

Les anémomètres ultrasoniques ont été testés en soufflerie au Laboratoire d'Aérodynamique de l'Ecole d'Ingénieurs de Genève.

Une collaboration avec M. Helder Gonçalves (LNETI, Lisbonne) permettra de transposer le concept de toiture solaire au Portugal.

4. Perspectives

La deuxième année de mesures doit terminer l'été 1999. L'étude de l'intégration du système solaire dans l'ensemble des installations techniques du bâtiment pourra alors être complétée.

L'analyse des données concernant l'étude fine de la toiture solaire doit aussi être établie. Elle nous permettra d'une part d'évaluer l'intégration des capteurs solaires du point de vue architectural, et d'autre part de tirer quelques enseignements sur l'influence du vent (vitesse, direction, intensité de la turbulence) sur la performance des capteurs solaires.

La connexion du champ de capteurs au bâtiment C est actuellement en cours. La fourniture de la chaleur estivale excédentaire au bâtiment voisin doit permettre d'augmenter l'apport au système solaire. La mesure de l'été 1999 nous semble alors importante pour conclure cette étude.

La collaboration avec le CERMA sera poursuivie: il est prévu d'effectuer une simulation aérodynamique tridimensionnelle, et d'intégrer l'effet de la température des capteurs sur l'écoulement.

5. Publications

Les travaux effectués ont donné lieu aux publications suivantes:

- ⇒ *Suivi scientifique de la Cité solaire Pré-du-Camp à Plan-les-Ouates/Genève, Feuille d'information N°1, juin 97;*
- ⇒ *Suivi scientifique de la Cité solaire Pré-du-Camp à Plan-les-Ouates/Genève, Feuille d'information N°2, nov 97;*
- ⇒ *Suivi scientifique de la Cité solaire Pré-du-Camp à Plan-les-Ouates/Genève, Feuille d'information N°3, juin 98;*
- ⇒ *Suivi scientifique de la Cité solaire Pré-du-Camp à Plan-les-Ouates/Genève, Feuille d'information N°4, nov 98;*
- ⇒ *PLO: analyse énergétique de la cité solaire de Plan-les-Ouates, CUEPE – Rapport d'activités 1997-1998.*
- ⇒ *A low energy building with an integrated uncovered solar collector roof in the suburb of Geneva (CH), Proceedings of PLEA'98, Portugal, June 1998.*