

SYNTHESE du projet RENOVA

1. Introduction

Le projet RENOVA consiste à agrandir et rénover une maison existante en faisant en sorte de tendre vers une consommation d'énergie primaire très basse par conception générale, isolation poussée et véranda solaire. Cette phase a été achevée en 1994 avec succès. La dernière phase du projet a consisté à équiper la maison d'une installation solaire active avec tentative de stockage long terme à basse température. Le projet a été accepté comme projet P+D par l'Office Fédéral de l'Energie et l'Office Cantonal de l'Energie de Genève.

L'installation est terminée depuis le mois de mai 1997.

Une campagne de mesure complète sur deux ans financée par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) a permis d'étudier plus spécifiquement les points suivants:

- qualité de la toiture solaire vitrée construite sur place (31 m^2),
- stratification thermique dans une cuve de 11 m^3 ,
- avantage d'un appoint à gaz en série avec le solaire (non injecté dans la cuve) pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire,
- fonctionnement et intérêt d'une solution originale de stockage souterrain d'excédent solaire d'été,
- comportement de l'argile du bassin genevois soumis à un réchauffement.

Le projet a débuté mi-octobre 1996 et la campagne de mesure a commencé le premier juin 1997 pour se finir en juin 1999. Nous présentons ici une synthèse des résultats après deux années de mesures, des analyses plus détaillées sont données dans les 7 annexes.



Maison avant (à gauche) et après (à droite) rénovation.

2. Présentation du bâtiment

Le bâtiment est une villa du début du siècle (1926), qui a juste connu une légère amélioration thermique il y a 25 ans (quelques cm d'isolant aux points les plus critiques). Sa consommation était alors de 850 MJ/m².an. Le propriétaire actuel, Monsieur Aeschbacher, a entrepris une rénovation importante, avec agrandissement et redistribution des espaces intérieurs. Les améliorations suivantes ont été planifiées avec soin (voir le détail dans l'annexe 1):

- Très bonne isolation extérieure de l'enveloppe, 11 cm d'épaisseur plus 4 à 6 cm intérieur pour certaines pièces.
- Protection totale de la façade NE, soumise à la bise, par l'adjonction d'un garage et de sa toiture bien isolés.
- Toiture refaite, isolée à 14 cm et modifiée pour être orientée parfaitement au sud.
- Vitrages isolants sélectifs avec stores extérieures isolants.
- Façade sud fortement vitrée et ajout d'une véranda.

Elle a été agrandie, mais la surface chauffée pendant les mesures est restée à peu près la même : 97 m² (SRE), plusieurs locaux étant tempérés par l'effet tampon qu'ils réalisent. Elle est occupée par deux personnes. La figure 1 montre la maison et les 2 stockages.

Le système de chauffage a pu alors être entièrement revu et le propriétaire a tenté d'assurer l'indépendance énergétique presque totale pour les besoins thermiques grâce à une installation solaire thermique active avec un système de stockage dans une cuve d'eau isolée couplée avec un stockage saisonnier par diffusion dans le terrain situé sous la maison, composé d'argile humide. La chaudière à gaz peut fournir la chaleur complémentaire directement, soit à l'eau chaude, soit au fluide circulant dans les radiateurs ; contrairement aux installations habituelles de ce type, où l'auxiliaire maintient un niveau de température prédéterminé dans la cuve. Cette caractéristique permet d'utiliser au mieux les bas niveaux de température, favorables au rendement des installations solaires. C'est un des points originaux de l'expérience.

Les données techniques de l'installation sont détaillées dans l'annexe 2 et la figure 2 :

- Capteurs sélectifs à un vitrage de type spécial, surface d'ouverture 31.3 m², inclinaison 30°, orientation sud.
- Accumulateur de chaleur à eau 11 m³ tank in tank, double échangeur solaire, sans auxiliaire.
- Stockage en terre (argile humide), longueur totale de sonde ($\varnothing \frac{3}{4}$ en PE) de 200 m dans 7 forages ($\varnothing 12$ cm remplis de Betonite) de 7 m inclinés à 45°.
- Chaudière d'appoint à gaz à condensation (5 kW), en série avec le stock.
- Chauffage des pièces par radiateurs à basse température.

Le système de mesure comprend 44 senseurs étalonnés par nos soins, mesurant toutes les 15 secondes et moyennés toutes les 30 minutes. Nous disposons de 24 mois de mesures complètes. Les positions des sondes de mesure sont montrées sur la fig. 2 et sont détaillées dans l'annexe 3.

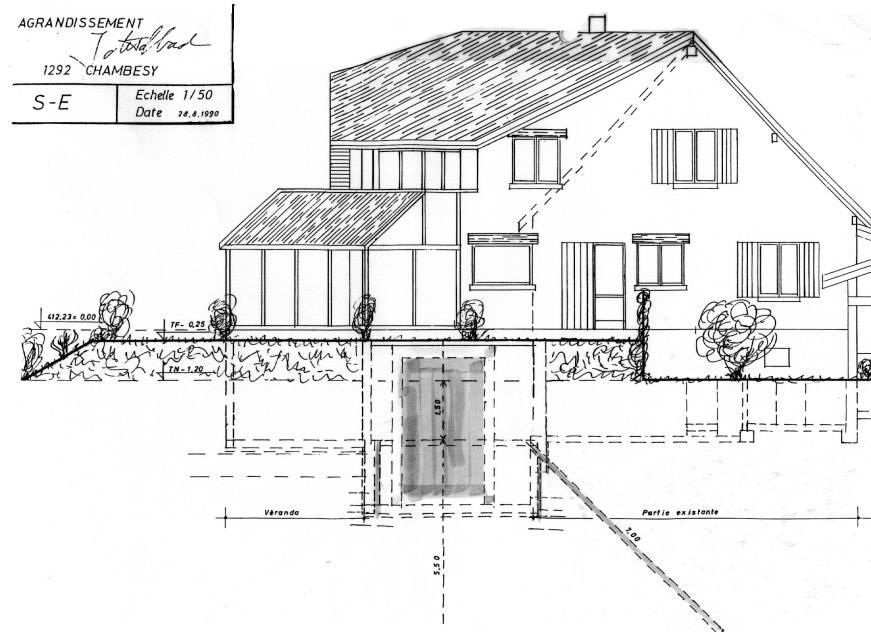


Figure 1 : Vue de la maison avec, au sous-sol, les 2 stockages : la cuve et les forages à 45°

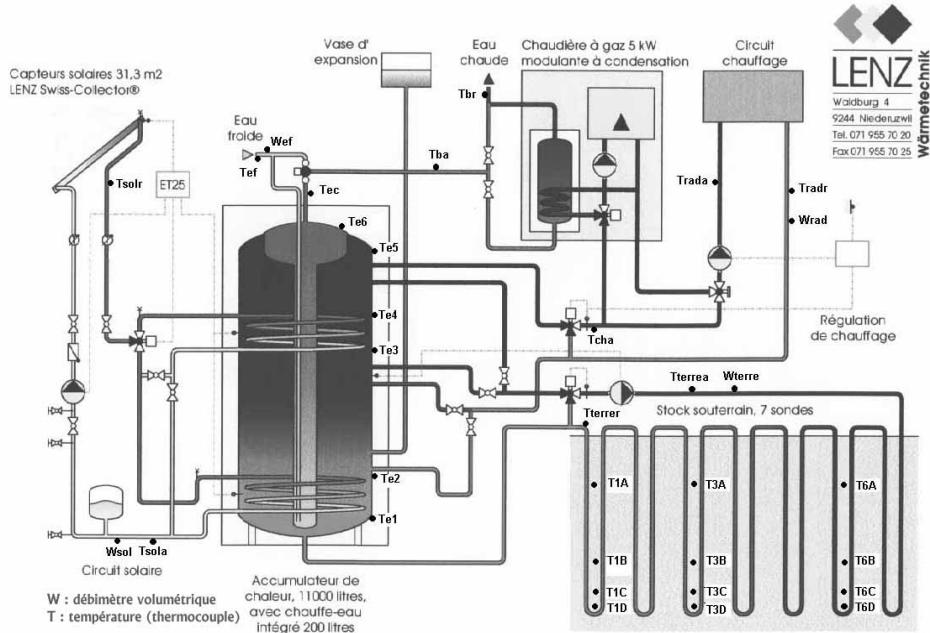


Figure 2 : Schéma de l'installation avec points de mesure

3. Principaux résultats et discussion

Nous présentons dans ce chapitre les principaux résultats des divers sous-systèmes et leur contribution énergétique, analysés plus en détail en annexe :

- capteurs solaires, annexe 4
- véranda, annexe 5
- cuve à eau, annexe 6
- stock en terre, annexe 7

3.1 Les capteurs solaires

Ils constituent la toiture de la façade Sud, et sont inclinés à 30° sur l'horizontal. Ils sont constitués d'absorbeurs sélectifs de la maison Lenz et ont été montés sur place :



Figure 3 : Intégration des capteurs en toiture.

Rendement instantané

Leur caractérisation s'est faite par les valeurs du rendement optique η_0 , des coefficients de pertes thermiques K_0 et K_1 , et de la capacité thermique d'un mètre carré d'absorbeur. Ces paramètres ont été obtenus par ajustement multilinéaire des valeurs semi-horaires mesurées pendant deux ans, autour de midi solaire (faible angle d'incidence). Le tableau 2 donne les résultats de la régression multilinéaire sur le rendement, exprimé de la façon suivante:

$$Q / G t = \eta_0 - K_0 \Delta T / G - K_1 \Delta T^2 / G - C \Delta T_c / G t$$

avec :

t	= 30 minutes	G	= puissance du rayonnement solaire [W/m ²]
ΔT	= $T_{\text{absorbeur}} - T_{\text{extérieure}} [\text{K}]$	K_0	= coefficient de pertes thermiques [W/m ² K]
ΔT_c	= variation de température de l'absorbeur pendant la période de mesure [K]	K_1	= coefficient de pertes thermiques du 2 ^{ème} ordre, [W/m ² K ²]
η_0	= rendement optique	C	= capacité des capteurs y compris plomberie [J/m ² K]
Q	= énergie solaire produite [J/m ²]		

	rendement optique η_0	K_0 [W/m ² K]	K_1 [W/m ² K ²]	C [kJ/m ² K]
valeur moyenne	0.90 ± 0.03	$5.11 \pm 0.3 *$	$0.0095 \pm 0.003 *$	$19.2 \pm 3 *$
Test Rapperswill	0.83	3.6	0.012	-
mesure de nuit	-	4.95 pour ΔT entre 15 et 20°C		16.3

* y compris plomberie

Tableau 2 : Paramètres caractéristiques des collecteurs solaires

Le rendement optique obtenu est plus grand que celui mesuré par le test officiel réalisé par le technikum Rapperswill [1]. Ceci est dû en partie aux vitrages spéciaux, mais aussi aux conditions de mesures (pas de points avec un faible écart en température). De façon symétrique, le coefficient K mesuré est plus grand que celui mesuré par le technikum, même en tenant compte de la plomberie. Une expérience de nuit, par circulation d'eau chaude dans la boucle solaire vient toutefois confirmer un coefficient de transfert thermique de proche de 5 (4.95 W/Km^2), contre 5.25 W/Km^2 pour $\Delta T = 15\text{K}$. La constante de temps de refroidissement de la boucle en circulation a permis également la mesure de capacité $C = 16.3 \text{ kJ/Km}^2$, valeur juste compatible avec celle déterminée de jour ($19 \pm 3 \text{ kJ/Km}^2$) et avec un calcul à partir des matériaux constitutifs.

Diagramme Input/Output quotidien

Les mesures effectuées du 1er juin 1997 au 31 mai 1998 sur la boucle solaire nous ont permis de tracer le diagramme entrée-sortie des capteurs (fig. 4), qui rend compte du fonctionnement de l'installation.

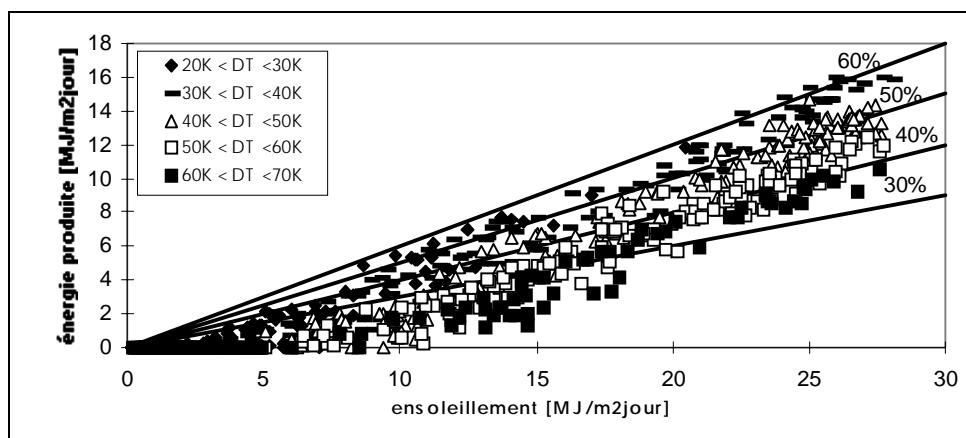


Figure 4 : diagramme entrée- sortie quotidienne des capteurs.

Le rendement journalier du système solaire, directement dépendant de la température de la cuve, est supérieur à 50% en été lorsque la température de la cuve est maintenue inférieure à 60°C, par évacuation du surplus de chaleur dans le stockage en terre. Il se maintient entre 30% et 40% en automne lorsque la température de la cuve dépasse les 60°C et que le ΔT (Tabs-Text) dépasse les 50K. Ces valeurs sont excellentes et montrent le parfait fonctionnement du système solaire pendant les deux années de suivi scientifique.

Production annuelle

La productivité moyenne des collecteurs solaires entre juillet 97 et juin 99 a été de 57 311 MJ/an, soit 509 kWh /m². an, ce qui correspond à un rendement de 38%. Toute cette chaleur a été cédée au stock à eau pour servir soit au chauffage, soit à la production d'eau chaude.

3.2 Le stock en terre

Le stock en terre permet l'évacuation des excédents de chaleur produite lorsque la température moyenne de la cuve est considérée comme trop élevée, soit 60°C au printemps et 80°C en fin d'été. La température de la terre près des sondes ne dépasse jamais 55°C en activité et relaxe rapidement vers des températures assez basses (30°C) quand on arrête la charge. On peut se rendre compte de l'absence de soutirage actif (fig. 5).

En début de période, la puissance évacuée par mètre de sonde est d'environ 25 W/m, puis se stabilise aux alentours de 15 W/m, grandeur qui tient compte du contact fluide-tube, tube-terre et diffusion de la chaleur dans le sol. Les valeurs par mètre de forage sont quatre fois plus élevées (60 W/m).

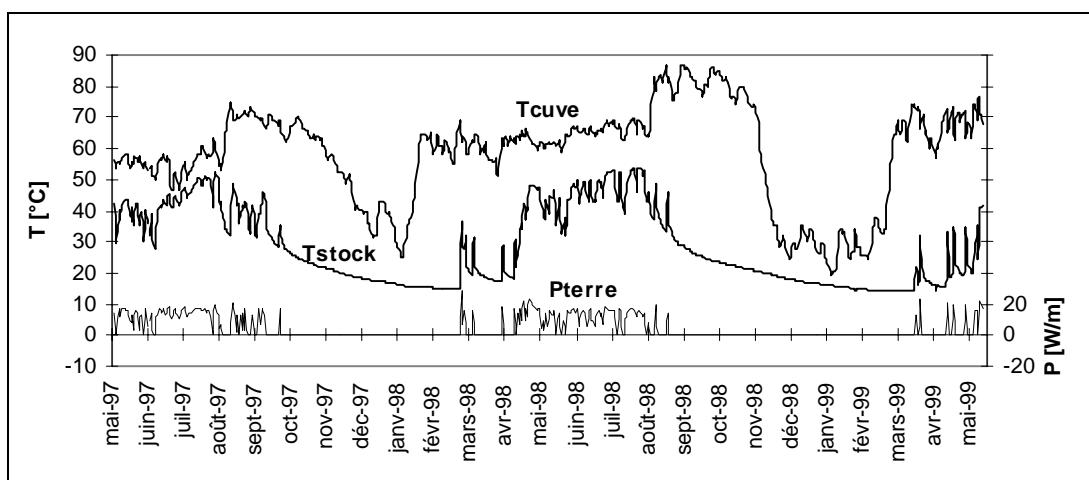


Figure 5 : évolution des températures et de l'énergie stockée.

Le graphique de la figure 6 montre que le flux de chaleur est positif (du sol vers la cave) jusqu'au mois de février et contribue ainsi au chauffage du bâtiment situé sur celui-ci.

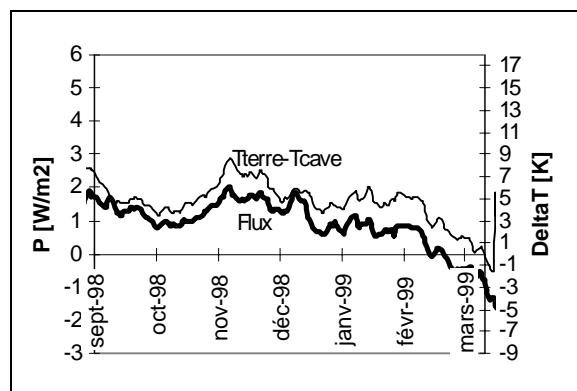


Figure 6 : flux de chaleur et différence de température entre le sol et la cave.

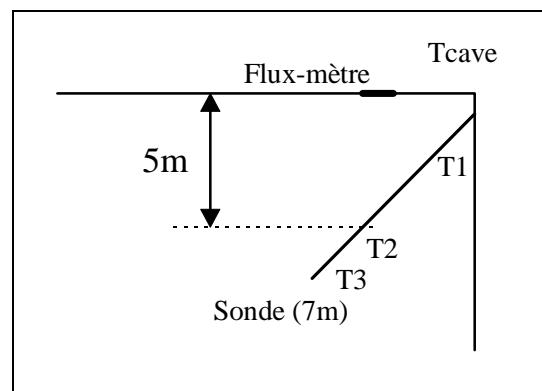


Figure 7 : emplacement des sondes.

Les variations parallèles de la puissance P donnée par le flux-mètre et de l'écart de température ΔT_{CT} entre la cave (T_{cave}) et la terre ($T_{terre}=(T_1+T_2+T_3)/3$) s'expliquent d'une part par les variations de température de la cave (fluctuations rapides) et d'autre part par la diffusion dans le sol ("ligne de base"). En première approximation, le rapport de $P/\Delta T_{CT}$ correspond bien à ce qui était attendu avec une épaisseur de terre humide ($\lambda = 1.8 \text{ à } 2.2 \text{ W/Km}$) comprise entre 5 et 10 m, (fig. 7).

3.3 La cuve à eau

La cuve à eau de 11 m^3 a été reçue entière et installée dans le sous-sol (fig. 8).



Figure 8 : réception et installation de la cuve de 11 m^3 , non encore isolée.

Elle a été prévue uniquement pour stocker la chaleur produite par le système solaire, soit directement, soit après le stockage intermédiaire souterrain. Comme cela a été mentionné au paragraphe précédent, cette dernière possibilité n'a pas été exploitée et nous n'avons donc pas pu tester l'effet de ce flux sur la stratification thermique du stock.

Stratification thermique

Malgré les nombreux flux d'énergie et d'eau qui le traversent, les températures internes sont restées très bien stratifiées. Le fait de ne pas avoir injecté la chaleur provenant de la chaudière à gaz a facilité la gestion des niveaux de température et constitue de ce fait un point très positif de ce système.

Un exemple de la bonne stratification des températures dans la cuve est montré sur la figure 9, pour le 16 mai 1999 où trois flux d'énergie se sont succédés. L'écart de température entre le bas de la cuve ($60 \text{ à } 40 \text{ }^\circ\text{C}$) et le haut ($75 \text{ à } 83 \text{ }^\circ\text{C}$) est toujours resté supérieur à $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le flux de chaleur envoyé dans les radiateurs au petit matin ne se traduit que par une légère baisse de la température à l'endroit où le fluide retourne dans la cuve. Les apports solaires, importants par cette belle journée, activent séparément les deux couches d'eau correspondant aux deux niveaux d'injection de la chaleur, avec un écart constant de 10°C entre ces deux couches. Malgré les 10 heures de fonctionnement des collecteurs, aucun brassage physique d'eau n'est possible grâce à l'utilisation de deux échangeurs internes superposés.

Enfin, la mise en route du stockage en terre se traduit instantanément par la chute de température de la couche d'eau située au fond du stockage, là où revient une partie de l'eau circulant dans les sondes en terre. La température au niveau 2 baisse seulement quelques heures après, quand la couche d'eau située en dessous (environ 1 000 litres) a été entièrement remplacée par de l'eau ayant circulé dans les sondes souterraines.

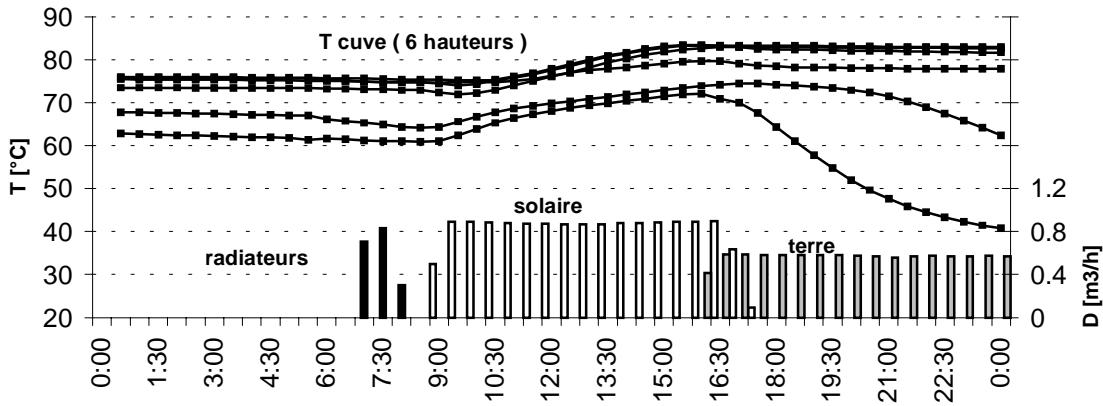


Figure 9 : Stratification et transferts de chaleur et d'eau dans la cuve le 16 mai 1999.

Flux de chaleur

Les flux de chaleur mensuels entrant et sortant du stockage à eau sont montrés sur la figure 10 pour la période complète. La somme de toutes les contributions est équivalente à l'énergie solaire produite.

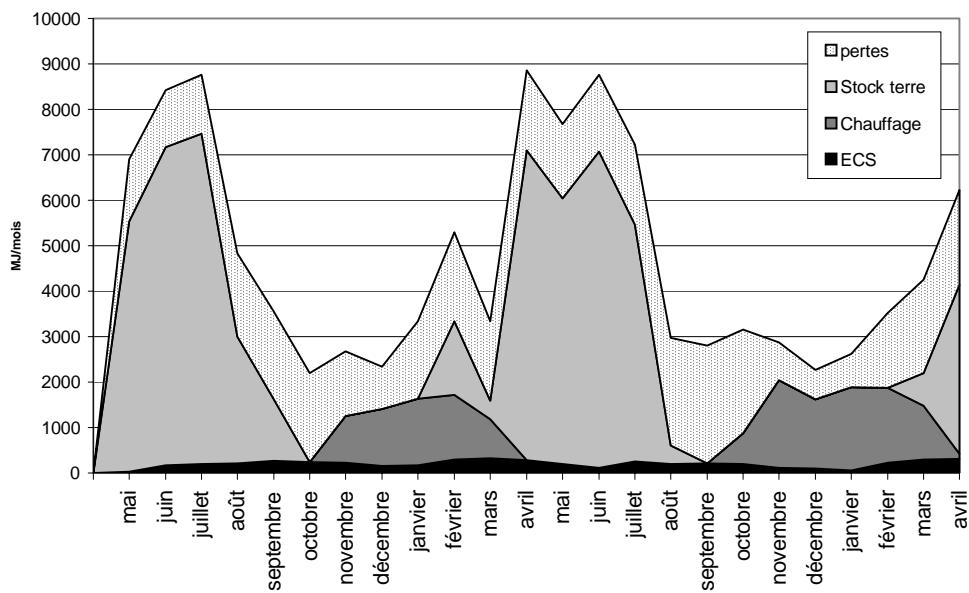


Figure 10 : évolution des flux entrant et sortant du stock à eau, 1997 – 1999.

Mis à part le début des mesures qui correspond à la mise en route de l'installation, l'allure générale des 2 cycles annuels est très semblable :

- La contribution de l'eau chaude sanitaire (ECS) fluctue peu et les variations reflètent autant les fluctuations saisonnières de température de l'eau froide (minimum en février) que la présence des occupants.
- Le chauffage solaire des locaux a lieu pour les deux années du mois de septembre jusqu'au mois d'avril. Cependant, la puissance moyenne pendant la période de chauffage n'est que de 600 W. Le complément pour atteindre la température de confort est donné uniquement par la cheminée fermée du salon.
- De grandes quantités d'énergie sont injectées dans le stock en terre durant tout l'été et également dès la fin de l'hiver par temps très ensoleillé (cas de février 1998). Aucune chaleur n'est récupérée activement du stock souterrain.

- Quant aux pertes du stockage, obtenues par défaut de bilan, elles sont maximales en automne quand le stockage en eau est porté à une haute température (80°C, voir annexe 7), afin de se préparer pour l'hiver. A cette période, on cesse en parallèle l'injection de chaleur souterraine. Il faut aussi remarquer des pertes non négligeables en hiver malgré la bonne isolation de la cuve.

Bilan énergétique annuel

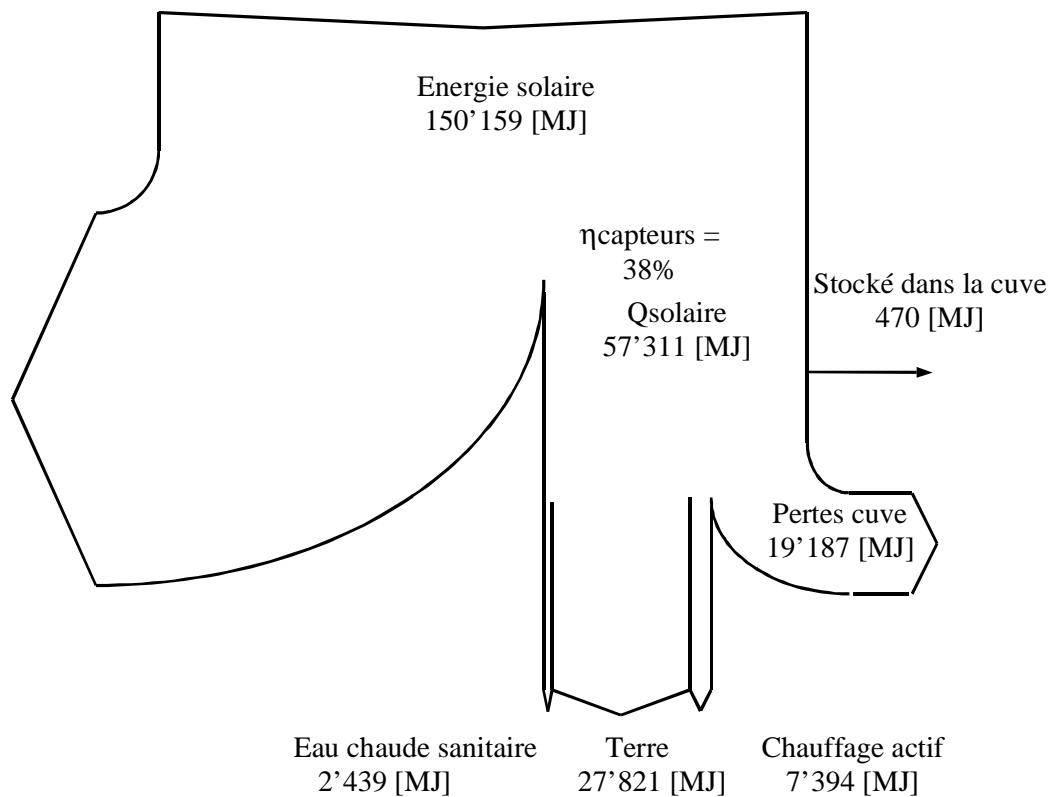


Figure 11 : diagramme énergétique annuel moyen de la cuve à eau, 97-99

Le bilan énergétique annuel moyen de l'accumulateur de chaleur sur les deux années (1997-1999) nous permet de faire les remarques suivantes (figure 11) :

- Le rendement moyen de la boucle solaire se monte à 38% sur l'année et toute l'eau chaude sanitaire a été fournie par le solaire. La productivité des collecteurs est de 509 kWh/m²an.
- La plus grande partie de l'énergie solaire captée (Qsolaire) a été introduite dans le stock en terre (Qterre). Seulement 22 kWh/m²an ont été utilisés pour l'eau chaude sanitaire et 66 kWh/m²an pour le chauffage solaire actif. La contribution au chauffage par diffusion du stock en terre est difficile à estimer (méconnaissance du système en absence de stock) mais ne permet pas de compenser totalement les pertes entre le rez et la cave.
- Les pertes du stockage à eau (Qpertes cuve), représentent environ 33% de l'énergie. La valeur du facteur K du stock mesurée à partir du défaut de bilan et des écarts de température est de 21W/K (correspondant à 0.2 W/K par 100 litres). Elles correspondent à environ trois fois la valeur calculée sans tenir compte des ponts

thermiques, dont l'effet est accentué par le nombre élevé de tubes entrant ou sortant du stockage et par d'éventuelles boucles de thermocirculation.

3.4 La véranda

Une véranda de ce type offre un climat intérieur très agréable même au plus fort de l'hiver, pour autant que le soleil soit présent (fig. 12). Son apport énergétique, malgré des occupants très consciencieux, est relativement faible sous le climat de Genève. L'aspect économique lié à la production de chaleur ne devrait pas être prépondérant pour le choix d'un tel investissement.

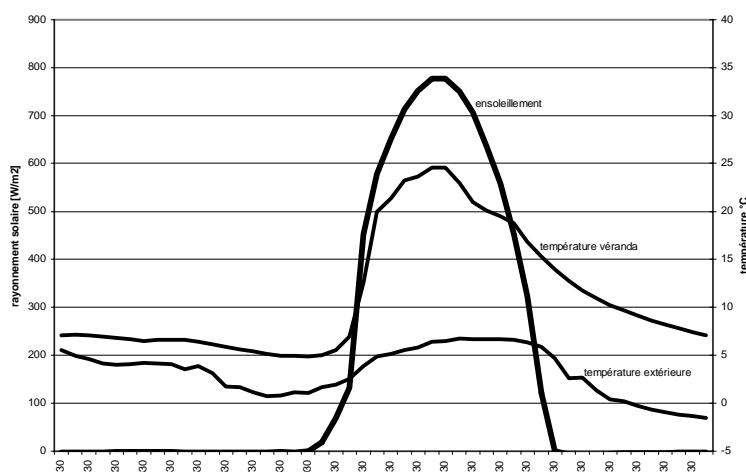


Figure 12 : vue intérieure et graphique des températures et de l'ensoleillement (plan capteurs) le 17 janvier 1998.

4. Bilan énergétique de la maison

4.1 Eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude sanitaire s'est montée à 2440 MJ/an, soit 1220 MJ/an par personne, ce qui correspond à 21 litres par jour et par personne à 50 °C ; valeur correspondant au tiers de la consommation standard et qui montre encore une fois la réelle motivation des occupants pour les économies d'énergie.

Toute la chaleur nécessaire à chauffer l'eau sanitaire a été fournie par les collecteurs solaires.

4.2 Chauffage des locaux

Rappelons les caractéristiques du bâtiment et des conditions météo :

Surface de référence énergétique :	$SR = 96.6 \text{ m}^2$
Volume chauffé :	$V = 241 \text{ m}^3$
Nombre de jours de chauffage :	200 jours
Degrés jours réels (moyenne 97-99):	2927 (proche des 3000 standards)

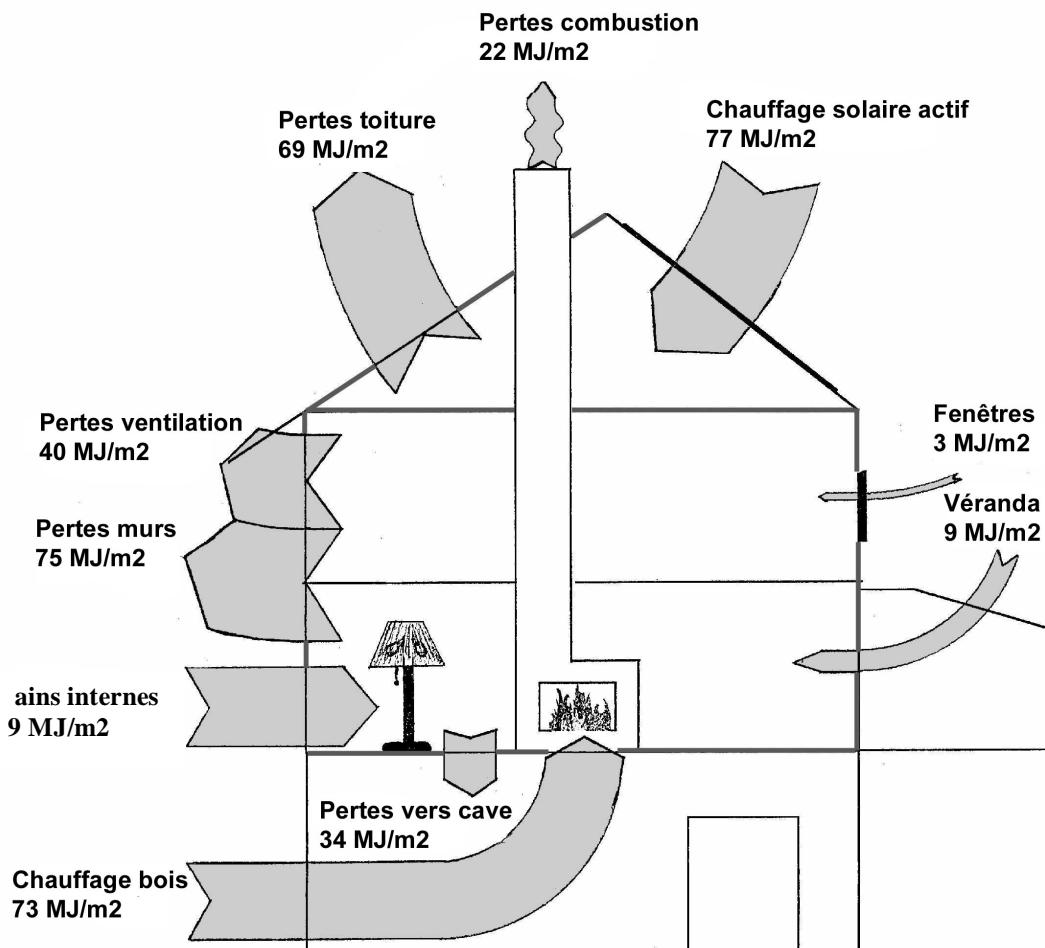


Figure 13 : Bilan énergétique annuel moyen du chauffage, 97 – 99

La figure 13 illustre le bilan global moyen annuel (juin 97-juin 99) du bâtiment qui est la somme de chaque sous-système étudié de manière indépendante. L'erreur de bilan (9 MJ/m^2 sur 240 MJ/m^2 de pertes) donne une indication sur la cohérence de l'analyse.

Ces valeurs ont été déterminées auparavant dans les annexes. En ce qui concerne les gains internes, on a considéré 70% de la consommation électrique et deux personnes 20 heures par jour.

Le chauffage central au gaz n'a pas été utilisé pendant les deux années de mesure et le raccordement du stock en terre au réseau de radiateurs n'a pas été jugé utile par le propriétaire. Comme vu précédemment, la cuve et le stock saisonnier, par élévation de la température de la cave, contribuent de manière passive au chauffage de la maison, effet qu'il n'a pas été possible de quantifier avec précision. Ces apports ne suffisent pas à compenser totalement les pertes thermiques vers le sous-sol.

L'indice énergétique de chauffage (bois), mesuré par pesage, est très faible: 73 MJ/m².an en moyenne pour les hivers 97-98 et 98-99 (360 et 520 kg de bois sec avec un PCI d'environ 16 MJ/kg et un rendement de 70%). Les pertes par la ventilation n'ont pas été l'objet de mesures précises et relèvent d'estimations (0.2 1/h en moyenne).

Des mesures de températures intérieures en continu et la composition des murs a permis l'évaluation des pertes par l'enveloppe. Pour la véranda, l'écart de température entre véranda et salon (mesurées en continu) a permis l'estimation des apports, le coefficient d'échange tenant compte de l'ouverture des portes par un occupant modèle, ce qui est le cas. Les gains solaires directs à travers la véranda et les fenêtres ont été simulés avec le logiciel DIAS.

Le surcoût de l'installation de chauffage est d'environ 70 000 FS, dont 10 000 pour le stockage saisonnier. Du point de vue strictement économique, l'optimum est certainement vers une surface de capteurs plus faible, le calcul exact n'a pas été réalisé compte tenu des spécificités de ce projet.

4.3 Consommation électrique

La consommation électrique annuelle de la maison (y compris l'installation solaire) est de 3086 kWh/an, soit 115 MJ/m².an

La consommation électrique totale de l'installation solaire est de 286 kWh/an, soit 11 MJ/m².an.

L'indice de consommation électrique totale pendant la période de chauffage est de 55 MJ/m².an, déduction faite de 500 kWh de consommation estivale (conserves et confitures) et de machines électriques dans l'atelier de menuiserie (non-compris dans la surface de référence énergétique).

Le coefficient d'amplification de l'énergie électrique utilisée est de 56 pour l'énergie solaire captée et de 10 pour l'énergie solaire réellement utilisée.

5. Conclusions

Le chauffage au gaz n'a pas été utilisé pendant les deux années de mesure et l'indice de consommation énergétique est de 73 MJ/m².an en bois-énergie, donc un indice bien en dessous du standard MINERGIE [3] pour les bâtiments neufs. Même en tenant compte de l'apport solaire actif pour le chauffage (77MJ/m².an), l'indice de dépense mesuré de 150 MJ/m².an reste en dessous de l'indice MINERGIE (160 MJ/m².an) demandé pour un bâtiment neuf. Cette expérience montre donc clairement que le standard pour une nouvelle construction peut être obtenu par un propriétaire motivé aussi lors de rénovation, qui plus est sans traitement mécanique de l'air.

Un apport solaire conséquent pour le chauffage permet de diviser par deux la consommation, mais sans rendre l'objectif d'autarcie possible à Genève si on ne dispose pas d'un grand volume de stockage à eau (plusieurs fois celui de RENOVA ?). De toute façon, la basse consommation résiduelle permet l'utilisation du bois, autre ressource renouvelable, sans poser de problèmes (seulement un stère par année).

Ces deux années de mesures permettent également de préciser ou de confirmer des idées déjà connues:

- Lors de rénovations il importe avant tout de prévoir une très bonne isolation de l'enveloppe.
- L'apport de l'énergie solaire active pour le chauffage en direct (sans stockage à long terme) est limité, même avec de très bons capteurs (décalage entre production et besoins).
- Le stockage saisonnier par stock diffusif est impraticable pour les maisons individuelles, même si des apports passifs existent. Ici, le système permet avant tout d'évacuer les excédents de chaleur en été. Un très grand volume d'eau bien isolé (quelques dizaines de m³) semble être la seule possibilité si on ne prévoit pas de pompe à chaleur.

Enfin, nous pouvons souligner les points positifs suivants :

- La régulation des systèmes s'est fait de manière décentralisée et simple par des régulateurs du commerce bien adaptés ; chaque sous-système s'est ainsi bien comporté et en bonne intelligence avec le reste.
- Les capteurs solaires ont donné d'excellents résultats.
- La cuve à eau, malgré le nombre élevé de flux d'eau et d'énergie qui la traversent, est restée bien stratifiée.
- La fonction claire du stockage à eau (utilisé uniquement pour le solaire, l'auxiliaire n'intervenant que si nécessaire et en complément sur les flux et non sur le stock), qui a permis de ne pas consommer de gaz. C'est certainement une des leçons à retenir.
- Enfin, malgré la non utilisation active du stockage en terre pour les besoins énergétiques, les solutions techniques retenues par Monsieur Aeschbacher ont parfaitement fonctionnées, preuve de la maîtrise de la technique des stockages souterrains diffusifs en Suisse.

6. Bibliographie

1. Testkollektor Nr 180, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle, Technikum Rapperswil, 1996.
2. DIAS, Données Interactive d'Architecture Solaire, Cuepe – IAUG, Université de Genève.
3. MINERGIE : label pour des bâtiments à très grand confort et très basse consommation d'énergie, édité par la conférence romande des délégués à l'énergie, mai 1998.