

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

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 m² 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 m² 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	PAC : pompe à chaleur
COP _{PAC} : coefficient de performance de la pompe à chaleur	PACG : pompe à chaleur géothermique
COP _{SYS} : coefficient de performance du système intégrant la consommation électrique des circulateurs	PEHD : polyéthylène haute densité
ECS : eau chaude sanitaire	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 m² [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 géothermale (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.

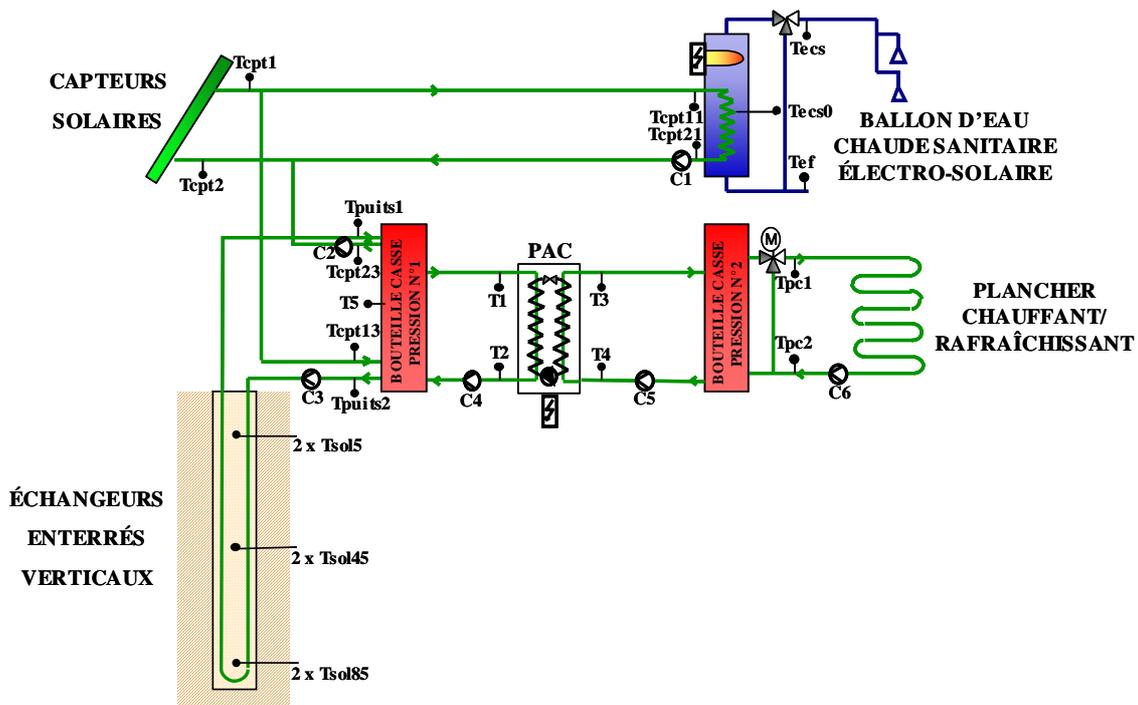


Figure 1 : schéma du procédé GEOSOL

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 m² 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 m² au vu des besoins des occupants [13] - a été surdimensionnée et portée à 12 m² 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 Ubat de 0,64 W/(m².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 m² 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°C , et stoppé lorsqu'elle atteint 31°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.

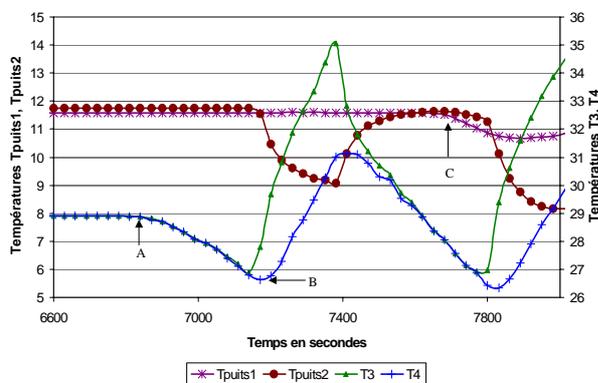


Figure 4 : séquences de fonctionnement de la PACG

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°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_{puits2}) ; la température au retour des puits (T_{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 W, soit 45 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 Tsol5, Tsol45 et Tsol85 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

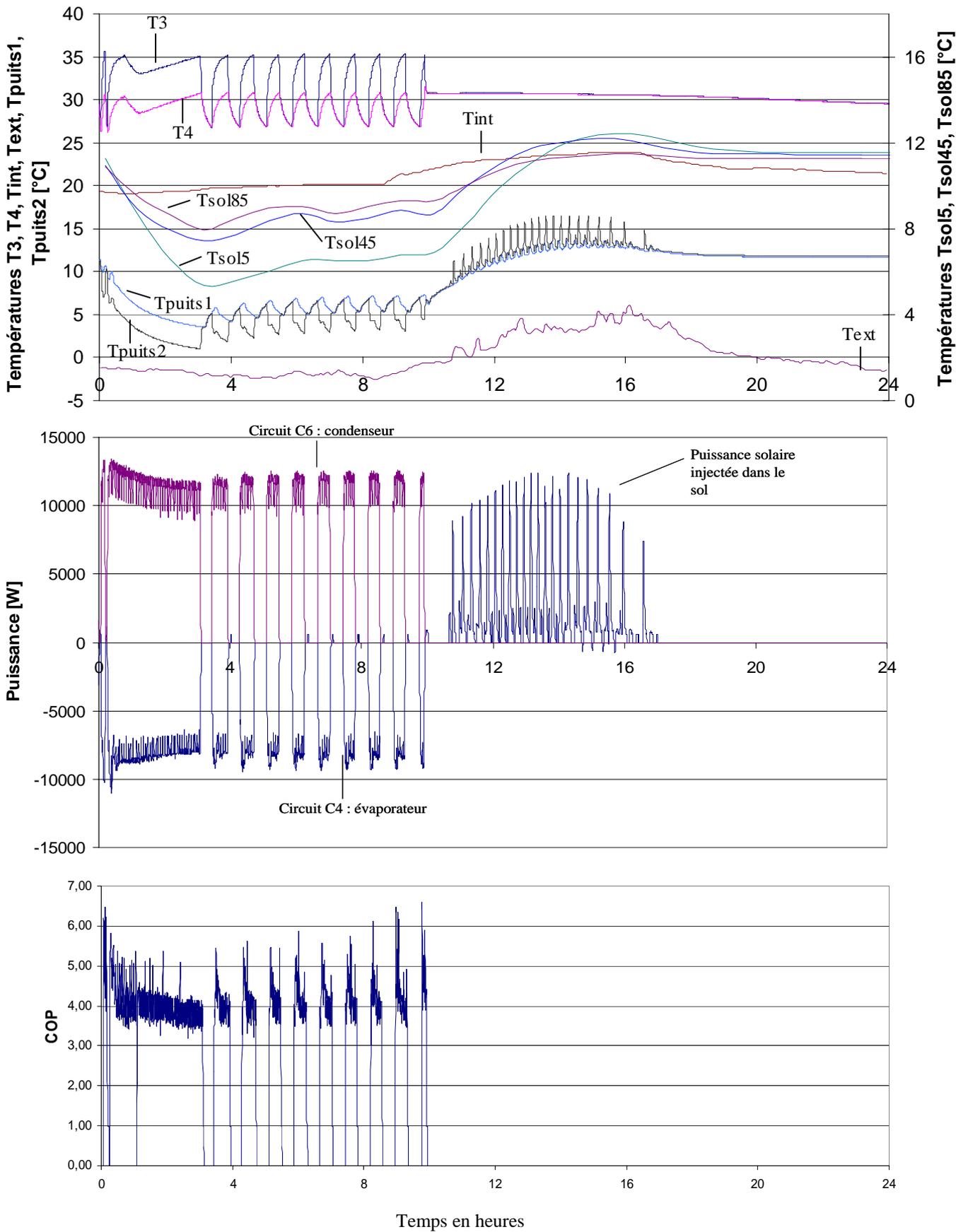


Figure 5 : évolution journalière des températures, des puissances et du COP du procédé GEOSOL

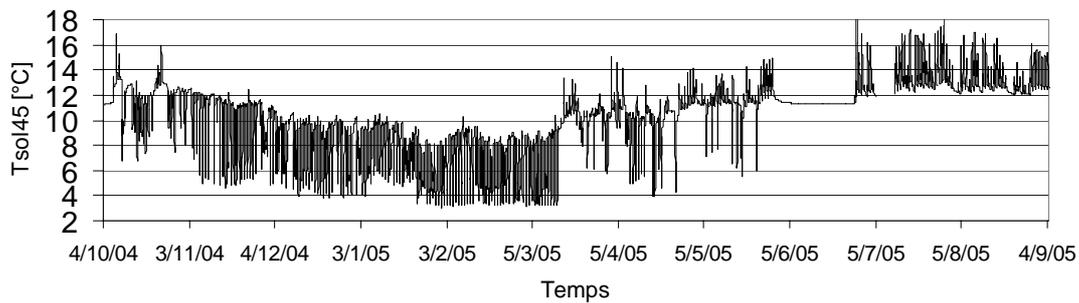


Figure 6 : évolution de la température T_{sol45} dans un des deux échangeurs enterrés verticaux

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 T_{sol45} 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 $11,6^{\circ}\text{C}$. 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 T_{sol45} . Au mois de juin 2005, le puits a été déconnecté afin d'estimer la température à proximité des puits : à savoir $11,3^{\circ}\text{C}$. 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 ($^{\circ}\text{C}$)	4,7	2	-1,1	-0,8	6,7	10,1	15,2	20,3	20,5	18,1
Irradiation horizontale ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{h}$)	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 _{PAC}	4,1	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,8	3,8	/	/
COP _{sys}	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.