



Projet GEOSOL

Couplage de pompes à chaleur géothermales avec des capteurs solaires thermiques

date de notification : juin 2003

Qualité énergétique, environnementale et sanitaire

Préparer le bâtiment à l'horizon 2010

Consultation 2002



Partenaires du projet

- **Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE)** - Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Chambéry (ESIGEC), Université de Savoie (Valentin TRILLAT BERDAL, Bernard SOUYRI, Gilbert ACHARD)
- **Société ECO'Alternative** (Pierre-Albert WATIER)
- **Société CLIPSOL** (Philippe PAPIILLON)
- **Société CIAT** (Eric AUZENET)



Sommaire

- 1- Contexte de l'étude
 - 2- Le projet GEOSOL : objectifs et enjeux
 - 3- Présentation du projet GEOSOL
 - 4- Etat d'avancement de l'étude et perspectives
-



1- Contexte de l'étude

Augmentation de la production de CO₂



Recherche de nouvelles solutions énergétiques



- Le solaire thermique : chauffage de l'eau chaude sanitaire ou/et de bâtiments avec des capteurs solaires thermiques
 - Une autre solution énergétique : la géothermie basse température (géothermie de surface)
 - Association des deux solutions précédentes (intégration énergétique)
-



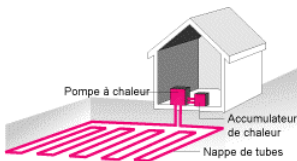
1.1- Principe de la géothermie basse température

- Constat : le sol est une importante source de chaleur. La géothermie basse température vise à l'exploiter par l'intermédiaire de pompes à chaleur (PAC) pour le chauffage de bâtiments
- Les PAC rehaussent la température naturelle du sol (entre 7 et 12°C en France) jusqu'à des valeurs de l'ordre de 45°C. Elles sont en général couplées à des émetteurs basse température de type plancher chauffant afin d'avoir un coefficient de performance supérieur à 3. Elles peuvent également être réversibles (mode chaud ou mode froid) et ainsi être aussi utilisées pour le rafraîchissement des bâtiments en été.
- Deux types d'échangeurs enterrés : les échangeurs horizontaux et les échangeurs verticaux



1.2- Les deux types d'échangeurs enterrés

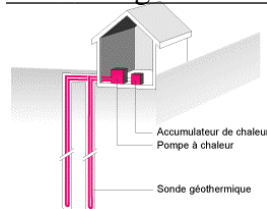
Les échangeurs horizontaux



Avantages : faible coût

Inconvénients : surface mobilisée importante 1.5 à 2 fois la surface à chauffer ; performances du système liées aux conditions climatiques locales ; pérennité des performances incertaine

Les échangeurs verticaux



Avantages : performances constantes car liées à la régularité de la température ; surface mobilisée plus faible

Inconvénient : coût de forage important



2- Le projet GEOSOL

Objectifs et enjeux

2.1- Objectifs

Conception d'un système basé sur l'**association** d'une **pompe à chaleur géothermale (forages verticaux)** avec **des capteurs solaires thermiques**

- Pour le chauffage basse température (PAC Geo connectée à un plancher chauffant + solaire) ;
 - Pour la production d'eau chaude sanitaire (solaire + appoint) ;
 - Pour le rafraîchissement des locaux (PAC Geo connectée à un plancher rafraîchissant).
-



2.2- Les enjeux

- Diminution des consommations énergétiques ;
- Réduction des émissions polluantes (gaz à effet de serre, ...) ;
- **valorisation de l'énergie solaire** : les capteurs solaires peuvent fournir de la chaleur à trois circuits différents (ECS, Plancher Chauffant et échangeurs enterrés).

Le gisement solaire du site est alors valorisé au mieux.

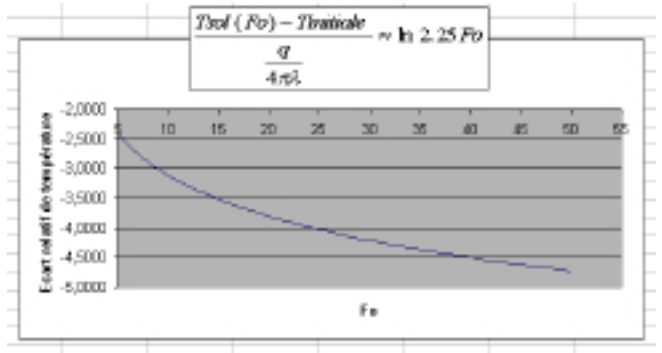


2.3- Le problème de la décharge thermique du sol

L'extraction de chaleur dans le sol via des échangeurs enterrés peut amener à une décharge thermique du terrain

$$T_{sol}(r,t) - T_{initiale} = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{4at}{cr^2}$$

$$Fo = \frac{at}{r^2}$$

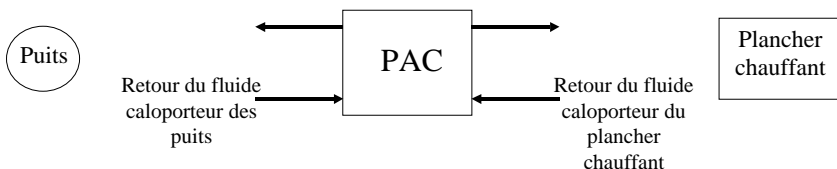


2.3.1- Etude numérique de la décharge thermique du sol (avec Trnsys)

→ **Modélisation de la PAC en mode chaud** : on rentre les puissances de la PAC en fonction des températures de retour des échangeurs extérieurs

Température de retour coté échangeur extérieur (puits)	Température de retour coté échangeur intérieur (plancher chauffant)					
	30		35		40	
	Pa (kW)	Pc (kW)	Pa (kW)	Pc (kW)	Pa (kW)	Pc (kW)
-5	3,2	11,5	3,5	11,3	3,9	11,2
-2	3,2	12,7	3,6	12,5	4	12,4
1	3,2	14	3,6	13,8	4	13,6

Régime de fonctionnement de la PAC Z60 en mode chaud pour une solution à 30% de mono éthylène glycol coté puits





→ Modélisation des échangeurs verticaux enterrés :

Les caractéristiques du sol et des puits sont les paramètres du sous-programme (*type Trnsys*).

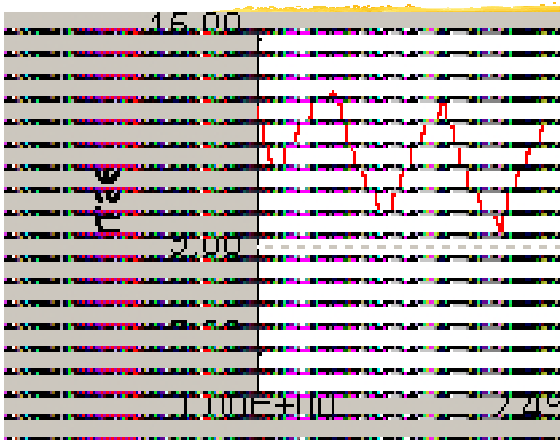
La température d'entrée du fluide caloporteur des puits ainsi que son débit font partie des entrées du *type*.

Le modèle calcule la température de sortie des puits.

Il prend en compte les échanges convectifs entre le fluide caloporteur et les tubes PEHD et les échanges conductifs au sein des puits et entre ces puits et le sol. Le calcul de la température du sol est basé sur une méthode de résolution par différences finies.



Evolution de la température moyenne dans le sol



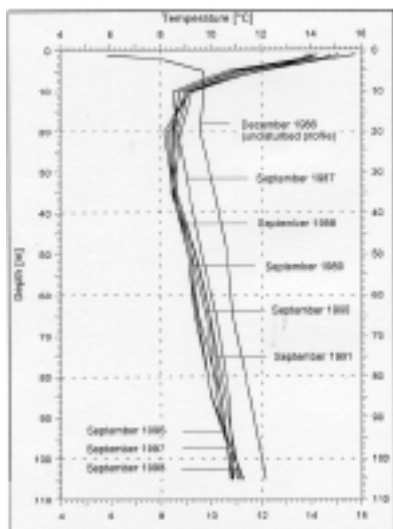
Graphe issu de la simulation d'une pompe à chaleur géothermale sous Trnsys15 pendant 20 ans de fonctionnement.

Hypothèses : demande de chauffage 6 mois par an, retour PC à 30°C et débit de 2000 kg/h, fonctionnement de la pompe à chaleur 11 heures par jour de chauffage, 2 puits (distants de 10 m) de 90 m de profondeur avec 2 tubes en U chacun

Conclusion : diminution importante de la température dans le sol les premières années (de l'ordre de 2°C), puis décharge plus lente.



2.3.2- Exemple d'évolution de la température dans le sol



Graphique présentant le profil de la température du sol en fonction du temps à une distance d'un mètre d'un puits vertical

Campagne de mesures effectuée sur un seul puits de 105 m de profondeur utilisé pour le chauffage d'une maison à Zurich

Conclusion de cette étude : la température du sol décroît de l'ordre de 2°C les premières années et la vitesse de décharge diminue ensuite avec le temps

Eugster et Rybach, 2000, Sustainable production from borehole heat exchanger systems, Proceeding World Geothermal Congress, p. 825-830



2.3.3- Nécessité d'une recharge thermique du sol

L'étude bibliographique nous amène à la conclusion suivante : une décharge thermique du sol se produit, à une vitesse plus ou moins grande en fonction de la composition du sol et du dimensionnement des puits. Un nombre de puits croissant augmente la décharge thermique du sol.

↓ **Projet GEOSOL** ↓

Recharge mixte du sol en été à partir des capteurs solaires et d'une PAC réversible permettant le maintien de bonnes performances du système à long terme



2.4- Le dimensionnement des puits verticaux

Une des méthodes empiriques de dimensionnement consiste à utiliser les puissances pouvant être extraites du sol en fonction de sa nature (tableau ci-dessous)

Sous-sol	Conductivité thermique W/m K	Puissance extractable W/m
Sous-sol de mauvaise qualité (roches meubles sèches)	moins de 1,5	25
Roches indurées ou roches meubles saturées d'eau	1,5 à 3,0	65
Roches indurées à conductivité thermique élevée	supérieure à 3,0	84
Gravier, sable, sec	0,4	moins de 25
Grave, sable, aquifère	1,8 à 2,4	65 à 80
Argile, limon, humide	1,7	35 à 50
Calcaire, massif	2,8	55 à 70
Grès	2,3	65 à 80
Granite	3,4	65 à 85
Basalte	1,7	40 à 65
Gneiss	2,9	70 à 85

Un dimensionnement plus rigoureux (nombre de puits et longueur) est nécessaire et nécessite de modéliser précisément les échanges thermiques entre le sol et les puits.



Dimensionnement des puits verticaux

Exploitation d'un modèle de type « loi d'Ohm » $\Delta T = q.R_T = q.R / L$

$$L = \frac{q_h (R_b + R_{6h}) + q_y R_{10y} + q_m R_{1m}}{T_g - \frac{T_{inground} + T_{outground}}{2}}$$

Puissances prélevées dans le sol
(= - charges thermiques du bâtiment)

→

- qh [W] : horaire maxi
- qm [W] : moyenne mensuelle maxi
- qy [W] : moyenne annuelle

Caractéristiques du puits

→ Rb [m.K/W]

Caractéristiques du sol

→ Fonctions d'influences :
R10y, R1m et R6h [m.K/W]

Tg est la température moyenne initiale du sol ;

Tinground est la température d'entrée du fluide caloporteur des puits ;

et Toutground est sa température de sortie : $T_{outground} = T_{inground} + \frac{q_h}{n \cdot C_p}$



Exemple de dimensionnement : l'installation de St Jean d'Arvey (Savoie)

Hypothèses principales :

$q_m = -5000$ W : puissance moyenne prélevée dans le sol pour le mois le plus défavorable de l'année ;

$q_h = -10000$ W : puissance maximale horaire prélevée dans le sol ;

$q_y = -2500$ W : puissance moyenne prélevée dans le sol en 1 an ;

Sol rocheux (conductivité de 2 W/m.K et diffusivité de $2E-6$ m²/s), conductivité du matériau de remplissage des puits de 2.5 W/m.K ;

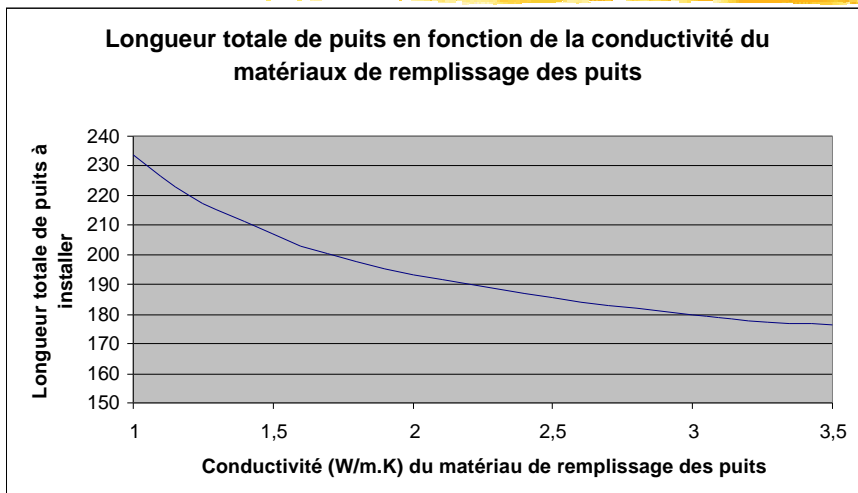
Deux tubes en U par puits ;

Résultat : Longueur totale de puits = 185 mètres

Longueur forée réellement = 190 mètres



Evolution de la longueur totale de puits à installer en fonction de la conductivité du matériau de remplissage des puits





3- Présentation du projet GEOSOL

- Etude théorique
 - Etude expérimentale
-



3.1- Etude théorique

- Modélisation et simulation de l'installation avec le logiciel TRNSYS
 - Outil simplifié de conception et de dimensionnement de systèmes couplant des PAC géothermales à des capteurs solaires thermiques
 - Optimisation technico-économique du système énergétique
 - Dimensionnement des puits verticaux et de la surface des capteurs solaires
-



3.2- Etude expérimentale

- Suivi d'une installation-type relative à une maison individuelle
- Phase d'expérimentation in situ du système énergétique afin de **valider l'outil numérique de conception et de dimensionnement**
- Identification des difficultés éventuelles de réalisation, de fonctionnement, et de maintenance



3.2.1 Support expérimental

- Système en cours d'installation sur une maison individuelle de 180 m² à St Jean d'Arvey (Savoie)



Façade OUEST



Façade EST



Description de l'installation

- Présentation des éléments principaux :
- deux puits verticaux de 90 m de profondeur avec deux tubes en U chacun
- 12 m₂ (surdimensionnement par rapport à la seule production d'ECS) de capteurs solaires thermiques en toiture (CLIPSOL)
- une PAC d'une puissance calorifique de 15,5 kW (CIAT)
- une ballon d'eau chaude sanitaire mixte solaire/électrique de 500 litres
- distribution par plancher réversible

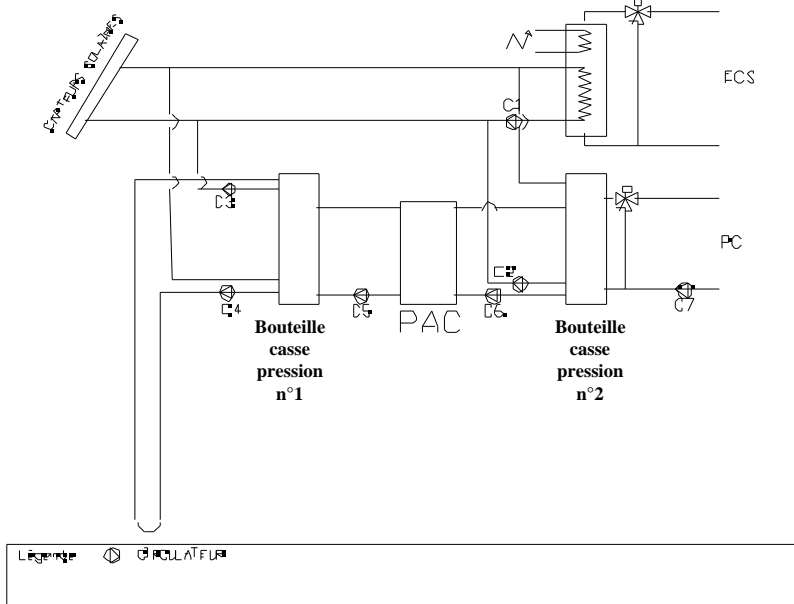


3.2.2- Principe de fonctionnement du procédé GEOSOL

- Présentation du schéma hydraulique
- Présentation des différentes séquences de fonctionnement
- Présentation du schéma hydraulique avec les sondes de régulation et de suivi



Schéma hydraulique complet



Couplage de pompes à chaleurs géothermales avec des capteurs solaires



Les différentes séquences de fonctionnement

→ Présentation des **modes de fonctionnement de base**

Séquence 1 : les capteurs solaires thermiques réchauffent le ballon d'eau chaude sanitaire (ECS)

Séquence 2 : la PAC fonctionne en mode chauffage

Séquence 3 : la PAC fonctionne en mode rafraîchissement

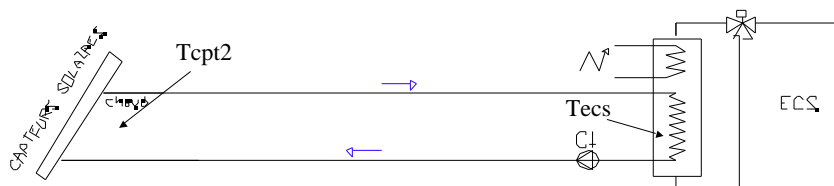
Séquence 4 : fonctionnement en plancher solaire direct (PSD)

Séquence 5 : le fluide caloporteur des capteurs solaires recharge le sol



Séquence n°1

le fluide caloporteur des capteurs solaires réchauffe l'eau chaude sanitaire



Le circulateur **C1** est actionné par le différentiel ($T_{cpt2} - T_{ecs}$) : si l'écart de température entre la sortie des capteurs solaires et l'ECS dans le ballon est supérieur à 5°C alors C1 est actionné, on réchauffe alors l'ECS avec les capteurs solaires.

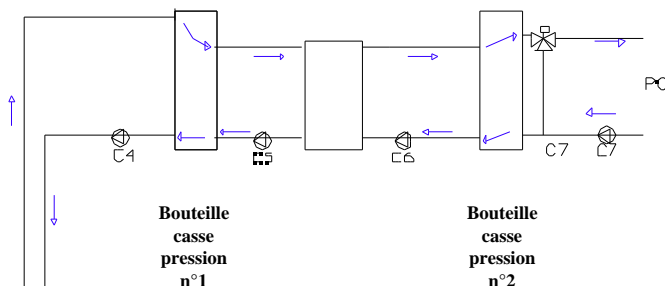
Si $(T_{cpt2} - T_{ecs}) < 2^{\circ}\text{C}$ alors C1 est arrêté

Fonctionnements simultanés possibles : PAC géothermale en mode chaud ou en mode froid



Séquence n°2

La PAC fonctionne en mode chauffage

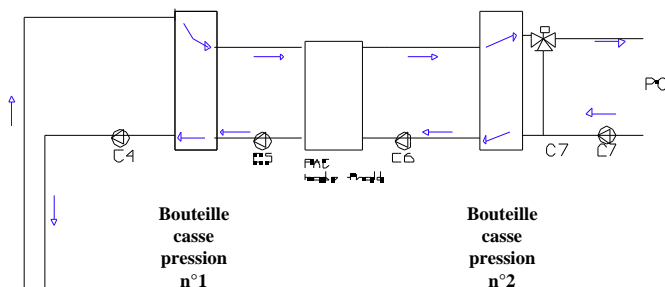


S'il y a **besoin de chauffage** alors le compresseur de la PAC se déclenche ainsi que les circulateurs C5, C6 et C7. La PAC va puiser la chaleur de la bouteille casse-pression coté puits. Lorsque la température du fluide dans la bouteille casse-pression coté puits devient $< 10^{\circ}\text{C}$, alors C4 est actionné pour réchauffer le fluide coté puits.



Séquence n°3

La PAC fonctionne en mode rafraîchissement

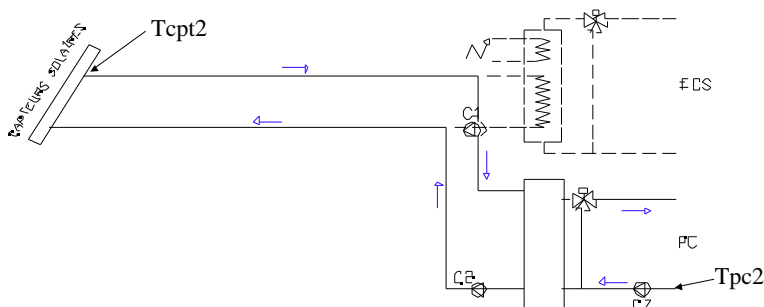


S'il y a **besoin de rafraîchir**, alors le compresseur de la PAC se déclenche (PAC en mode rafraîchissement) ainsi que les circulateurs C5, C6 et C7. La PAC va réchauffer le fluide de la bouteille casse-pression n°1. Lorsque la température du fluide dans la bouteille casse-pression n°1 devient $> 10^{\circ}\text{C}$, alors C4 est actionné pour refroidir le fluide coté puits.



Séquence n°4

Le fluide caloporteur se réchauffe dans les capteurs solaires et restitue sa chaleur au blancher : fonctionnement en blancher solaire direct



Les circulateurs **C2 et C7** sont actionnés par le différentiel ($T_{\text{cpt}2} - T_{\text{pc}2}$) : si l'écart de température entre la sortie des capteurs solaires et le retour du PC est supérieur à 5°C , alors C2 et C7 sont actionnés ; on réchauffe alors le PC avec les capteurs solaires. C2 et C7 sont arrêtés lorsque $(T_{\text{cpt}2} - T_{\text{pc}2}) < 2^{\circ}\text{C}$



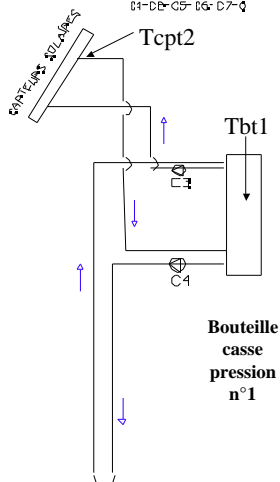
Séquence n°5

le fluide caloporteur des capteurs solaires recharge le sol

PROJET GÉOSOL
PROJET
HYDRAULIQUE

Circuit capteurs solaires / recharge du sol

État des pressions C3, C4
04-05-06-07-08-09

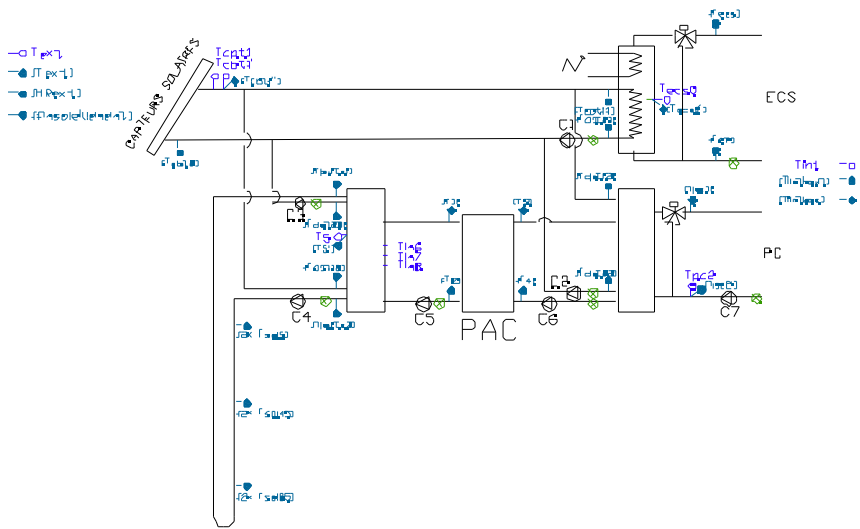


Le circulateur C3 est actionné par le différentiel ($T_{cpt2} - T_{bt1}$) : si l'écart de température entre la sortie des capteurs solaires et le fluide de la bouteille casse-pression n°1 est supérieur à 5°C, alors C3 est actionné. Puis, lorsque $T_{bt1} > 10^{\circ}\text{C}$, on actionne aussi C4, la bouteille casse-pression n°1 est alors refroidie, et le sol est réchauffé.

La production de l'ECS ou le chauffage du bâtiment avec les capteurs solaires sont prioritaires sur cette séquence.



- Installation de St Jean d'Arvey : schéma d'ensemble



Légende	⊙ CIRCULATEUR	⊗ Détecteur de surchauffe	⊕ Sondes (eau + le sol)	⊖ Sondes de Température (eau + le sol)
	⊖ T14 Thermistor			



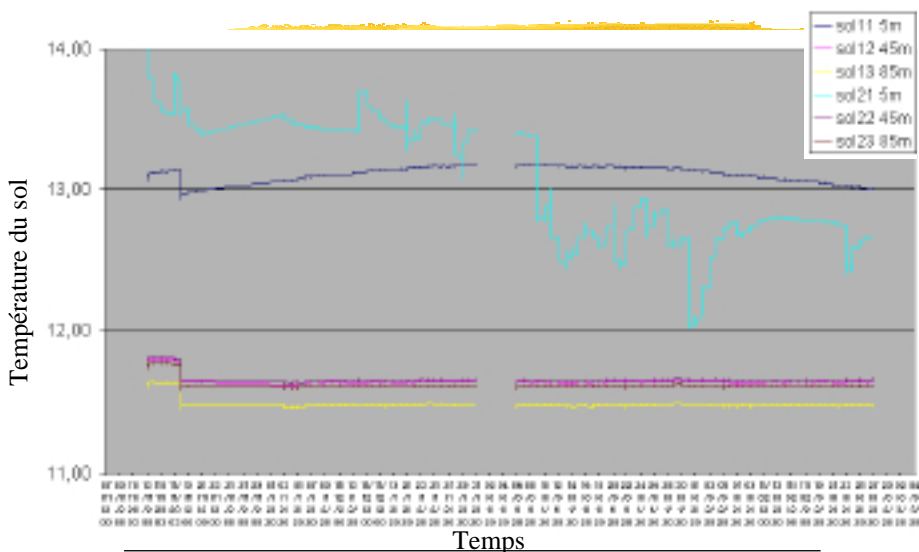
4- Etat de l'étude et perspectives

4.1- Partie expérimentale

- Les puits verticaux (deux avec deux tubes en U) ont été forés et installés durant l'été 2003 ;
- Les capteurs solaires ont été installés (automne 2003) ;
- Les divers circuits hydrauliques sont en cours de réalisation
- Le plancher chauffant sera réalisé à la fin du mois de mars 2004 ;
- La métrologie est progressivement mise en place ;
- Fin de la réalisation du support expérimental et début des tests et du suivi du comportement de l'ensemble : juin 2004
- Des mesures de températures ont lieu dans le sol depuis le 13/11/03 pour définir un état de référence



Températures dans le sol depuis de 13/11/03





4.2- Partie théorique

- Réalisation sous TRNSYS d'un ensemble de modèles permettant d'analyser le comportement de l'ensemble de l'installation (en cours, fin prévue décembre 2004)
 - Validation des modèles par comparaison avec les résultats expérimentaux (à partir de début 2005)
 - Optimisation technico-économique (à partir de début 2005)
 - Mise au point d'une méthode de dimensionnement de l'ensemble du système (à partir de juin 2005)
-