



**Dr François-D. Vuataz**

Directeur du Centre de recherche en géothermie CREGE

# L'énergie géothermique et les pompes à chaleur: grand potentiel et multiples applications

**Actuellement, l'utilisation directe de la chaleur de la Terre, notamment pour les nombreuses applications de chauffage, s'est développée dans plus de 70 pays. En Suisse, la quasi-totalité des installations de géothermie sont couplées à des pompes à chaleur.**

A toute époque, les manifestations naturelles de la chaleur de la Terre, telles les sources thermales, les geysers et les volcans, ont été des centres d'attraction de l'humanité. Les Romains ont été vraisemblablement les premiers à mettre au point le chauffage par le sol dans certains de leurs édifices, une technique qui s'est ensuite perdue jusqu'au 20<sup>e</sup> siècle.

Plus de 99% de la masse de la Terre est à une température de plus de 1000° C. Seul le 0,1% de la masse de la Terre est plus froid que 100° C. En s'enfonçant dans le sous-sol, la température des ouvrages tels que tunnels, galeries de mines et forages monte régulièrement. En moyenne, le gradient géothermique augmente de 33° C par kilomètre de profondeur. Sous le Plateau suisse, les roches et les eaux possèdent à 1000 m de profondeur une température de 35 à 45° C.

L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée géothermie, quelle que soit la température de la ressource, la profondeur à laquelle on l'exploite et l'usage que l'on en fait. Cependant, la chaleur contenue dans les roches est trop diffuse pour être extraite de manière économique: il est nécessaire d'avoir à disposition un fluide caloporteur, généralement de l'eau, afin de transporter l'énergie vers la surface. C'est au moyen de forages que l'on peut faire remonter de l'eau souterraine contenant l'énergie thermique du sous-sol.

## Modes d'utilisation

Selon le type de ressources géothermiques, son potentiel, sa température et sa profondeur, le mode d'utilisation peut être très différent. Si l'on dispose d'un réservoir géothermique à plus de 100° C, on préférera convertir cette abondante énergie thermique en électricité. Au contraire, si la température de la ressource est nettement inférieure à 100° C, c'est un usage thermique direct qui en sera fait, c'est-à-dire principalement pour des applications de chauffage.

En fonction de sa température, l'eau chaude provenant d'un aquifère géothermique peut être utilisée directement pour fournir de

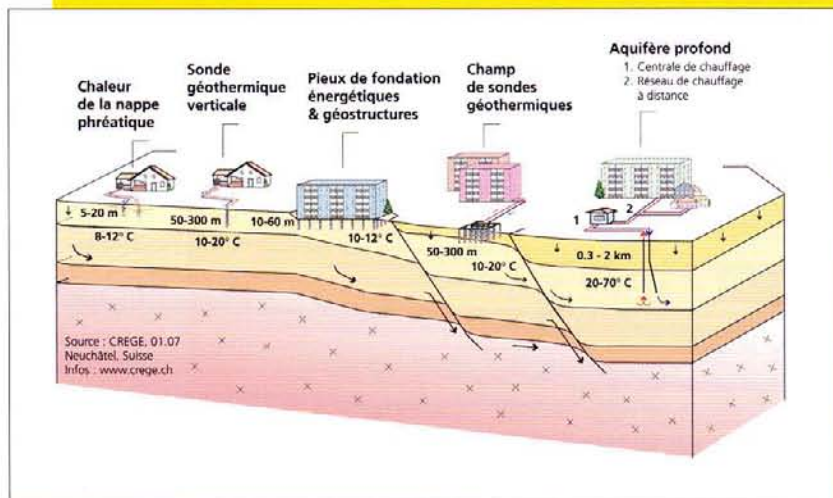
la chaleur à un réseau de chauffage à distance, aux piscines d'un centre thermal, aux bassins d'une pisciculture, à des serres agricoles, ou à toute autre activité nécessitant de la chaleur. Toute la gamme des températures entre 15 et plus de 100° C peut être utilisée pour des applications diverses. La grande majorité des installations géothermiques en fonction servent au chauffage (habitat urbain collectif ou individuel, locaux industriels et agricoles), à la balnéothérapie et dans une moindre mesure à la pisciculture et aux usages industriels.

Si la température de la ressource n'est pas suffisante pour assurer un système monovalent, une autre source d'énergie (électricité, gaz, fuel) peut être couplée, pour assurer les pointes de consommation de chaleur pendant les jours les plus froids de l'hiver. Pour les ressources dites de faible température (10 à 50° C), on couple des pompes à chaleur (PAC) pour rehausser la température de fourniture de la chaleur.

La taille des installations est très variable, allant de quelques kilowatts thermiques pour des maisons familiales jusqu'à plusieurs mégawatts thermiques pour des réseaux de chauffage urbain approvisionnant des milliers d'appartements, des écoles, des hôpitaux, etc. Dans le monde en 2005, plus de 70 pays totalisaient une puissance installée de 28 000 mégawatts thermique (MWt), produisant 72 600 gigawattheures par an (GWh/an). Les dix pays qui possèdent plus de 500 MWt installés chacun sont les suivants: USA, Suède, Chine, Islande, Turquie, Danemark, Hongrie, Italie, Suisse et Allemagne.

## Applications en Suisse

Il y a 25 ans, la Suisse était représentée par une tache blanche sur la carte géothermique de l'Europe. A cette époque, personne n'imaginait que la Suisse deviendrait un jour un utilisateur important de la chaleur terrestre. Une des caractéristiques de la géothermie suisse est représentée par la variété des ressources et des modes d'utilisation qui sont détaillés ci-après.



**Types d'exploitation des ressources géothermiques de basse et moyenne énergie.**

### Sondes géothermiques verticales (SGV)

Les SGV sont des échangeurs de chaleur installés verticalement dans des forages de 50 à 400 m. De l'eau est pompée en circuit fermé et permet d'extraire l'énergie du sous-sol à l'aide d'une PAC sol-eau. Ces SGV sont installées clé en main par des entreprises de forage spécialisées.

Pour autant que l'autorisation de forer soit donnée, et que la puissance thermique de la sonde géothermique soit correctement calculée en fonction du terrain et de la demande de chaleur, une SGV peut être installée dans presque tous les contextes géologiques. Un forage, ou deux si nécessaire, est alors réalisé à proximité du bâtiment à chauffer.

Dans le forage terminé, on insère un double tube de polyéthylène en forme de U jusqu'au fond. L'espace vide restant est rempli d'un coulis d'argile et de ciment pour assurer un bon contact thermique entre les tubes et la paroi du forage. Ensuite, un circuit fermé est établi entre le forage et la PAC sol-eau située dans le sous-sol du bâtiment. De l'eau généralement additionnée de 25 à 30% d'antigel circule dans l'échangeur de chaleur ainsi créé. Ce fluide circulant dans le forage gagne la chaleur du terrain et fournit la source d'énergie géothermique à la PAC. Cette dernière rehausse le niveau de température entre 30 et 65° C selon le type de diffuseur de chaleur (chauffage au sol, radiateur). La part de l'électricité faisant fonctionner la PAC représente 25 à 30% de l'énergie totale de l'installation et le 70 à 75% restant provient du sous-sol. Ce système permet d'assurer toute la saison de chauffage d'une habitation par sols chauff-

fants à basse température. Selon le type de PAC, il peut également assurer la fourniture de l'eau chaude sanitaire.

Pour une villa neuve, le coût d'investissement d'une SGV est un peu plus élevé que celui d'un système de chauffage au mazout ou au gaz. Par contre, les frais annuels de fonctionnement sont très en faveur de la SGV et le temps de retour de l'investissement n'est actuellement que de quelques années. Dans le cas de la rénovation d'une maison ou du changement d'un chauffage vétuste, il vaut la peine d'évaluer les coûts et les avantages d'une sonde géothermique.

Plus de 40 000 installations de ce type existent en Suisse, ce qui représente la plus forte densité au monde par km<sup>2</sup>! Jusqu'en 2004, la très grande majorité des SGV servaient à chauffer des maisons familiales neuves. Depuis lors, l'installation des SGV dans le domaine de la rénovation et pour des immeubles est en plein essor.

### Champs de sondes géothermiques

Si l'on regroupe une série de SGV ou si l'on fore à plus grande profondeur, l'échangeur de chaleur disposera d'un potentiel plus important, et permettra de chauffer un groupe de villas ou des bâtiments de plus grande taille, comme des immeubles, des locaux industriels, administratifs ou encore des salles polyvalentes. Les puissances thermiques installées vont de quelques dizaines à plus de 1000 kilowatts pour les grandes installations.

Une série de sondes géothermiques verticales (4 à 80 sondes), de profondeur variée (50 à 350 m), sont disposées à côté du bâtiment à chauffer. Les conduites de chaque sonde se rejoignent dans un collecteur alimentant une ou plusieurs PAC. Le fonctionnement de l'installation se déroule sur un cycle annuel : la chaleur du terrain est extraite pendant la saison de chauffage (injection de froid) ; pendant la période de rafraîchissement estival (réinjection de chaleur dans le terrain), c'est le froid qui est extrait du milieu souterrain. Ce cycle saisonnier permet de recharger thermiquement le terrain. Un système de chauffage de secours ou d'appoint est parfois installé, mais n'est mis en fonction que pendant les périodes d'entretien et de réparation ou lors des jours de grand froid.

### Géostructures et pieux énergétiques

Les géostructures nécessaires au soutènement et aux fondations de bâtiments de taille importante peuvent être équipées d'échangeurs de chaleur. Les pieux en béton armé atteignent généralement une profondeur de 10 à 40 m. A l'intérieur de ces pieux est installé un tube ou un réseau de tubes en polyéthylène. Ces tubes sont ensuite noyés

## Sondes géothermiques et capteurs plans

Une utilisation durable de la chaleur de la Terre pour le chauffage et le refroidissement dans une zone proche de la surface n'est assurée que si l'on tient compte du flux de chaleur dans la Terre. Les directives VDI 4640 fournissent les bases d'un bon dimensionnement de l'installation pour une utilisation durable. En Suisse, la documentation D025 et D0136 est en cours de révision et sera disponible à fin 2007.

Les sondes géothermiques constituent en Suisse le type d'utilisation le plus fréquent de la géothermie. Néanmoins, l'appellation est trompeuse: avec une sonde géothermique, on peut non seulement prélever de la chaleur, mais également du froid du sol. On utilise en Suisse des sondes d'une longueur de 70 à 350 m. Les diamètres des tuyaux varient de 25 à 40 mm (voir figure 2).

Les capteurs plans sont fréquemment utilisés en Autriche et en France. On pose dans ce cas des tuyaux de polyéthylène (PE) en serpentins à une profondeur d'environ 1,2 m. Ce système occupe une surface relativement importante.

On désigne par pieux échangeurs des pieux en béton coulés sur place ou des pieux battus, dans lesquels est monté un collecteur tubulaire pour récupérer de l'énergie. On peut ainsi utiliser les pieux de fondation pour soutenir un ouvrage dans le cas d'un mauvais terrain et récupérer simultanément de l'énergie.

Le transport de chaleur est assuré par un agent caloporteur liquide, par ex. un mélange d'eau et d'antigel (appelé saumure) circulant dans un circuit de tuyaux (circuit primaire). Le système est généralement exploité avec de faibles différences de température entre l'aller et le retour, 2-4° K, mais avec des quantités importantes de saumure. Le respect de petites résistances de débit est indispensable pour maintenir l'indice de performance annuel de l'ensemble du système à un niveau élevé. Les pompes de circulation utilisées pour l'ensemble du système assurent généralement une hauteur de refoulement de 7 m. La vitesse de la saumure dans le tuyau devrait en conséquence se situer dans une plage de 0,3 à 0,7 m/s.

Les collecteurs constituent une partie importante du système de raccordement de plusieurs sondes géothermiques, de collecteurs

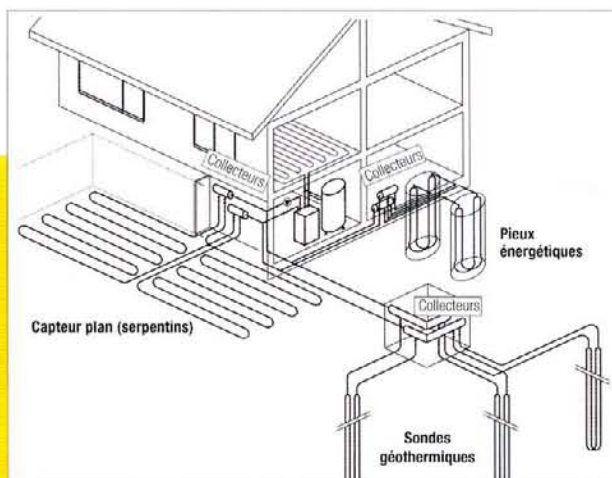


Fig. 1: Trois moyens de capter la chaleur du sous-sol.

enterrés ou de pieux échangeurs (voir figure 1). Les collecteurs de GEROrtherm® de HakaGerodur sont dimensionnés en fonction des besoins du système de captage et satisfont entre autres les exigences de qualité d'un montage rapide et simple. La pratique et la norme VDI 4640 impliquent que les différentes boucles des capteurs plans et des sondes géothermiques puissent être fermées séparément. Dès lors, le remplissage et la purge de l'air du circuit lors de la mise en service sont exécutés facilement et les éventuels travaux de service sont possibles à tout moment.

Alfons Ebnöther, HakaGerodur SA

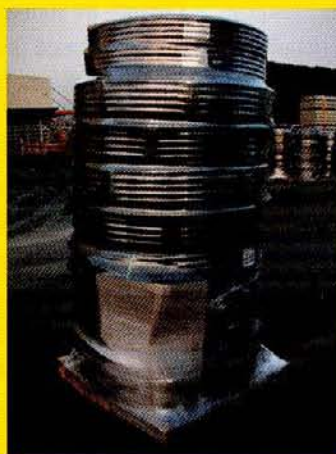


Fig. 2: Livraison sur chantier d'une sonde géothermique (double U) avec tube d'injection et pied de sonde soudé en usine sur palette.



Aperçu des produits: sondes géothermiques avec accessoires, collecteurs enterrés, collecteurs de pieux échangeurs, distributeurs/collecteurs, raccords UNI pour le raccordement de la pompe à chaleur, éléments de liaison.

dans le béton pour assurer un bon contact thermique. Un fluide caloporteur, souvent de l'eau claire uniquement, circule dans un réseau en boucle entre les pieux et la PAC sol-eau, afin de pouvoir échanger la chaleur ou le froid du terrain en fonction des saisons, comme pour les champs de sondes géothermiques.

Cette technologie simple et rationnelle ne demande pas des surcoûts excessifs, mais nécessite son intégration dès le début du projet, ainsi qu'une réflexion globale sur les aspects de la construction et de la consommation de l'énergie. Il existe actuellement une trentaine d'installations de ce type en Suisse, dont la plus grande, le Dock Midfield à l'aéroport de Zurich, est décrite à la p. 60.

### **Chaleur de la nappe phréatique**

La nappe phréatique est un fournisseur remarquable d'énergie pour le chauffage et le rafraîchissement de bâtiments. En Suisse, la température des eaux souterraines superficielles (5 à 20 m) atteint de 8 à 12° C et ne fait l'objet que de très faibles variations saisonnières, à la différence des eaux de surface. L'exploitation de la nappe phréatique fait appel à des puits uniques ou multiples (puits de production et d'injection) et requiert une concession.

Après avoir extrait l'eau souterraine par pompage dans un puits, une PAC soutire ses calories et rehausse la température pour le système chauffage. Après refroidissement, l'eau est renvoyée dans la nappe par un deuxième puits. En période estivale, l'eau souterraine peut servir à refroidir le même bâtiment de manière directe sans utiliser une machine frigorifique. En Suisse, on compte environ 5000 installations de ce type.

### **Sources thermales et aquifères profonds**

La plupart des sources chaudes « naturelles » sont exploitées depuis longtemps en Suisse par les stations thermales. Certaines d'entre elles profitent des excédents de calories pour chauffer leurs bâtiments et préchauffer l'eau chaude sanitaire. A Bad Schinznach, dans le canton d'Argovie, un système de chauffage couplé à une PAC de 600 kilowatts (kW) fonctionne depuis 2001 et alimente les piscines, les bâtiments, la buanderie ainsi qu'une serre dans le parc thermal.

Pour des raisons environnementales et de gestion durable de la ressource, l'eau d'un réservoir aquifère profond exploité pour son usage géothermique doit être réinjectée en profondeur après refroidissement. Ce mode de fonctionnement est réalisé au moyen d'un doublet géothermique. Tout d'abord, un forage produit par pompage l'eau géothermale à la surface. Ensuite, un échangeur de chaleur transmet les calories géothermiques au circuit de chauffage. Finalement, l'eau géothermale refroidie est restituée à l'aquifère par un forage d'injection.

La plus grande centrale géothermique de Suisse, basée sur le principe du doublet, alimente le réseau de distribution de chaleur de Riehen (Bâle). Cette installation est équipée d'une centrale de cogénération chaleur-force à gaz et de deux PAC électriques de 1410 kW chacune, la géothermie fournissant la moitié de la chaleur du réseau. L'exploitation de l'aquifère à 64° C et 1500 m de profondeur est réalisée au moyen de deux forages verticaux, un producteur et un injecteur, séparés par une distance de 1 km. Un quart des logements de la commune de Riehen, soit environ 2000, sont chauffés par la géothermie, ainsi qu'un quartier de Lörrach, de l'autre côté de la frontière allemande, au moyen d'une conduite de 600 m.

### **Géothermie des tunnels**

Les tunnels et les galeries traversant des massifs rocheux drainent les eaux souterraines qu'ils rencontrent. Ces eaux sont évacuées vers l'extérieur des galeries par des canaux et sont déversées dans des cours d'eau. Suivant l'épaisseur de roches qui recouvre le tunnel, la température des eaux interceptées peut atteindre 20 à 40° C. Associée à des débits importants, cette ressource géothermique peut être utilisée pour des besoins en chaleur de consommateurs proches des portails des tunnels.

Une étude géothermique de 15 tunnels et galeries de Suisse a montré leur potentiel, tant sur le plan de l'énergie géothermique disponible que de la présence de consommateurs. Il faut également relever que les deux tunnels de base d'AlpTransit (Lötschberg et Gothard) fourniront un potentiel important, en raison de leur longueur et de l'épaisseur du recouvrement rocheux. D'ailleurs, deux projets d'installations géothermiques sont en cours à Frutigen et à Bodio.

Actuellement en Suisse, il existe six installations de chauffage utilisant la chaleur des tunnels. Dans le tunnel ferroviaire de la Furka en Valais, quelque 90 litres/seconde à 16° C sont drainés et s'écoulent de manière naturelle vers le portail ouest. Une conduite amène l'eau par gravité au village d'Oberwald, où un système novateur a été choisi : un réseau de

distribution amène l'eau à la PAC de chaque utilisateur. Actuellement, 177 appartements et une salle de sport communale sont chauffés par la chaleur du tunnel.

### Quel avenir pour la géothermie?

A moyen terme, la géothermie de basse température (sondes géothermiques et chaleur de la nappe phréatique) pour le chauffage et la climatisation des bâtiments va poursuivre sa forte progression. De manière générale, l'utilisation accrue de la géothermie et la bonne gestion de la chaleur et du froid du sous-sol en Suisse contribueront à diminuer la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles et par conséquent les émissions de gaz à effet de serre. L'énergie du sous-sol est disponible partout et peut apporter une contribution nettement plus importante sur la scène énergétique suisse.

## Références

www.geothermie.ch  
www.crege.ch

## Aéroport Unique et ses pieux énergétiques

Le Dock Midfield est le nouveau terminal E de l'aéroport de Zurich. Avec une longueur de 500 m sur une largeur de 30 m, il a été construit dans le triangle des pistes dans le cadre de la 5<sup>e</sup> étape de développement de l'aéroport. Le terrain, formé par d'anciens fonds lacustres, est trop meuble pour reprendre le poids du bâtiment. Ce dernier a dû être construit sur 440 pieux de fondation en béton. Avec un diamètre compris entre 90 et 150 cm, ils sont fichés dans une couche de moraine de fond située à environ 30 m de profondeur.

Plus de 300 pieux sont utilisés en pieux énergétiques. Les pieux sont équipés avec cinq tubes en U en polyéthylène, fixés verticalement sur leur cage métallique. Les tubes des pieux sont raccordés en surface à deux collecteurs principaux. Les pieux énergétiques forment ainsi un gigantesque échangeur de chaleur avec le terrain, qui permet de faire contribuer l'énergie géothermique au chauffage et au refroidissement du bâtiment. Le

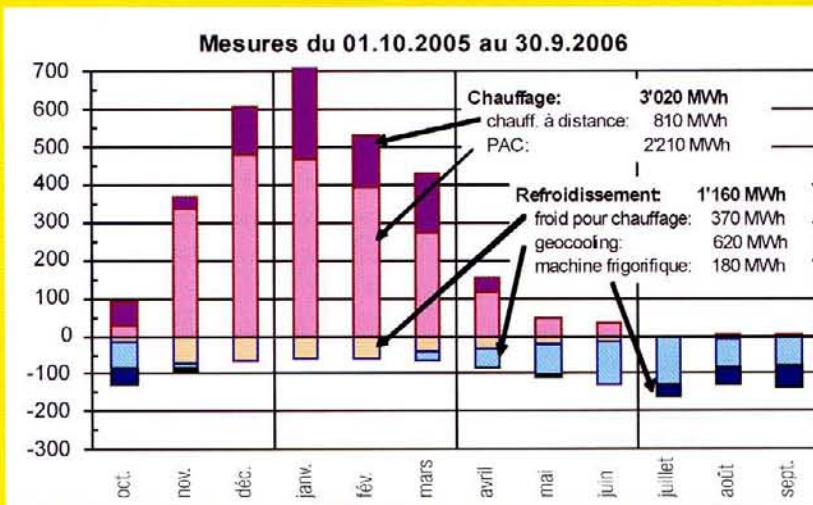
circuit hydraulique des pieux est couplé à l'évaporateur d'une pompe à chaleur et à la distribution de refroidissement du bâtiment par l'intermédiaire d'un simple échangeur de chaleur. Ce mode de fonctionnement est appelé refroidissement par geocooling.

Les mesures d'octobre 2005 à septembre 2006 ont montré que la pompe à chaleur (PAC), dimensionnée pour délivrer une puissance thermique de 630 kW, contribue pour plus de 70% au chauffage du bâtiment, le reste étant couvert par du chauffage à distance. La demande de refroidissement, quant à elle, est couverte par geocooling (53%), en satisfaisant des besoins de chauffage simultanés (32%) et avec la PAC utilisée comme machine frigorifique (15%). Les rejets thermiques de cette dernière sont évacués par une tour de refroidissement sur le toit du bâtiment et ne compromettent pas la production de froid par geocooling. Cette dernière représente 40% de l'énergie extraite en hiver par la PAC. Elle assure ainsi une recharge thermique suffisante du terrain, indispensable pour garantir un fonctionnement à long terme du système.

Les indices de performance du système sont excellents. Le coefficient de performance annuel de la PAC est mesuré à 3.9. L'efficacité annuelle de geocooling, définie par le rapport de l'énergie de geocooling sur l'énergie électrique consommée par les pompes de circulation, est exceptionnellement élevée avec une valeur de 60. L'efficacité globale annuelle du système, définie par le rapport de l'énergie thermique de chauffage et de refroidissement sur l'énergie électrique totale pour le faire fonctionner, pompes de circulation incluses, est de 5.1.

D<sup>r</sup> Daniel Pahud,

Ecole universitaire professionnelle de Suisse italienne (laboratoire d'énergie, d'écologie et d'économie)



**Bilan mensuel du système de chauffage et de refroidissement couplés sur les pieux énergétiques du Dock Midfield terminal E de l'aéroport de Zurich.**