

# **L'énergie géothermique**

**La chaleur de la Terre, une énergie propre et durable pour tous**

François-D. Vuataz

## **1 INTRODUCTION**

### ***1.1 D'où provient la chaleur de la terre?***

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, c'est-à-dire les 3 kilomètres superficiels, sont plus froids que 100° C. A la surface de la Terre, la chaleur rayonne avec un flux moyen de 0.065 watt/m<sup>2</sup>. Pour la seule superficie de la Suisse, cela représente une puissance quasiment inutilisée de 3'000 Mégawatts (MW), ce qui correspond environ à celle de l'ensemble des centrales nucléaires suisses.

L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée géothermie. Cette chaleur provient pour l'essentiel de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, et pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre. Dans nos régions (Plateau suisse), à 500 et 1000 m de profondeur, les roches possèdent généralement une température de 25° C, respectivement 40° C. Dans d'autres régions où les conditions géologiques sont différentes, ces températures peuvent atteindre ou dépasser largement 100° C.

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. Ce fluide peut être naturellement présent dans le sous-sol, il s'agit des aquifères, bien connus à faible profondeur (0 à 200 m), mais qui peuvent atteindre des profondeurs de 500 à 2000 m également. En l'absence d'aquifères, d'autres techniques existent, pour transférer à un fluide la chaleur contenue dans les roches. L'extraction de la chaleur du sous-sol est réalisée au moyen de forages.

On distingue plusieurs types de géothermie en fonction de la température de la ressource et du mode d'utilisation de l'énergie.

### ***1.2 Classification des ressources géothermiques***

La géothermie de très basse énergie (<30° C): aquifères peu profonds, sondes terrestres, couplage avec une pompe à chaleur.

La géothermie de basse énergie (30-100° C): aquifères profonds ou zones d'anomalie thermique.

La géothermie de moyenne énergie (100-150° C): aquifères très profonds ou zones d'anomalie thermique à faible profondeur, technologie Hot Dry Rock (circulation en boucle induite dans des roches naturellement peu perméables).

La géothermie de haute énergie (150-350° C): aquifères profonds dans des zones d'anomalie thermique à faible profondeur, technologie Hot Dry Rock.

Schéma\_aquifères.ai

### ***Nappes d'eau souterraine profondes et modes d'exploitation des ressources géothermiques (Infos-Géothermie)***

#### ***1.3 Modes d'utilisation de l'énergie géothermique***

##### **GÉOTHERMIE À USAGE DIRECT (CHALEUR)**

Utilisation calorifique au moyen d'un échangeur de chaleur qui transmet les calories du fluide géothermique à un fluide de chauffage. Toutes les applications liées au chauffage et à la climatisation peuvent être envisagées (habitat urbain collectif ou individuel, locaux industriels et agricoles, thermalisme, balnéothérapie, usages industriels, pisciculture).

Afin de rentabiliser au mieux l'utilisation d'une ressource géothermique, les rejets de fluide (réinjection dans l'aquifère) doivent se faire à la température la plus basse possible. La solution idéale est de refroidir le fluide géothermique par des utilisations successives en cascade, jusqu'à la température ambiante.

##### **GÉOTHERMIE À USAGE INDIRECT (ÉLECTRICITÉ)**

En remontant dans un forage, le fluide géothermal, sous forme liquide ou diphasique, se trouve progressivement dépressurisé et se vaporise. La vapeur sous pression ainsi formée

permet de convertir son énergie en électricité, au moyen d'une turbine et d'un générateur. A la sortie de la turbine, les rejets de fluide sont encore à près de 100° C, ce qui permet encore une utilisation calorifique de cette énergie.

### ***1.4 L'exploitation de la géothermie dans le monde***

Actuellement, quelques 50 pays utilisent leurs ressources géothermiques à un stade industriel plus ou moins avancé. Les ressources de vapeur à haute température et haute pression sont essentiellement exploitées pour produire de l'électricité. Une vingtaine de pays (USA, Philippines, Mexique, Italie, Nouvelle-Zélande, Indonésie, Japon, Islande, etc.) totalisent une puissance installée plus de 8'000 MW électriques. Par contre, les ressources à moyenne ou basse température servent pour des usages directs, en majorité le chauffage de bâtiments et de serres, mais aussi la pisciculture et les usages associés au thermalisme et à l'industrie. Près de 60 pays (USA, Chine, Islande, Turquie, Suisse, Allemagne, Canada, Suède, France, Hongrie, Japon, Italie, Nouvelle-Zélande, etc.) totalisent une puissance installée plus de 16'000 MW thermiques.

Au niveau du prix des installations et l'énergie géothermique, de nombreux facteurs interviennent, mais ce sont essentiellement les politiques énergétiques des pays concernés, qui modifient les coûts de l'investissement, de l'exploitation et du prix de vente de l'énergie. De manière générale, les investissements nécessaires pour réaliser une centrale de production d'électricité ou de chaleur géothermique sont sensiblement plus élevés que ceux d'une centrale à fuel diesel, par contre, les coûts d'exploitation annuels sont beaucoup plus bas dans le cas de la géothermie.

## **2 LA GÉOTHERMIE EN SUISSE**

### ***2.1 Introduction***

Il y a 25 ans, la Suisse était représentée par une tache blanche sur la carte géothermique de l'Europe. En effet, la prospection et l'utilisation des ressources géothermiques en Suisse n'était pratiquée que de manière confidentielle, par quelques rares spécialistes. A cette époque, personne n'imaginait que la Suisse deviendrait un jour un utilisateur important de la chaleur terrestre. Pour mémoire, si l'on compare à l'échelle mondiale la puissance géothermique installée par habitant (uniquement la production de chaleur), la Suisse arrive au troisième rang avec 70 watts par habitant, après l'Islande et la Nouvelle Zélande, tous trois réputés pour leur passé de pionniers dans le domaine de la géothermie. Bien entendu, plusieurs facteurs ont contribué à cet étonnant développement.

Une des caractéristiques de la géothermie suisse est représentée par la variété des ressources (quelques mètres de profondeur à plus de 2000 m) et des utilisations (de la villa familiale jusqu'au complexe résidentiel urbain).

### ***2.2 Les sondes géothermiques***

A partir de la profondeur de 20 m, la température du sous-sol est constante et ne dépend plus du jour ou de la nuit, ni des saisons. C'est le flux de chaleur venant de la profondeur qui commande le niveau de température. En Suisse, sur le Plateau et dans les vallées à

une altitude inférieure à 1000 m d'altitude, cette température ne varie qu'entre 8 et 12° C. En dessous de 20 m de profondeur, la température augmente de 1° C tous les 33 m environ. Cette ressource géothermique dite de très basse température convient bien pour des installations de chauffage décentralisées, telles que maisons familiales, groupes de villas, petits immeubles, hôtels de ville, écoles, salles polyvalentes, etc. Plusieurs techniques peuvent être envisagées pour profiter de cette énergie à disposition de manière permanente. Le système le plus répandu en Suisse est la sonde géothermique verticale (SGV).

Temp\_sous-sol.eps

*Température moyenne du sous-sol sur le Plateau suisse*

Schéma\_sonde.eps

***Chauffage d'une maison familiale avec une sonde géothermique couplée à une pompe à chaleur (Infos-Géothermie)***

SONDE GÉOTHERMIQUE VERTICALE

Les SGV sont des échangeurs de chaleur installés verticalement dans des forages de 50 à 350 m. Un fluide est pompé en circuit fermé et permet d'extraire l'énergie du sous-sol à l'aide d'une pompe à chaleur. Ces SGV sont installées clés en mains par des entreprises spécialisées. Les quelques 25'000 installations qui existent en Suisse représentent la plus grande densité au monde de ce type d'installation! Les statistiques montrent que 70% des SGV ont une profondeur entre 80 et 120 m et servent à chauffer des maisons familiales.

CONSTRUCTION ET FONCTIONNEMENT D'UNE SONDE GÉOTHERMIQUE

Une SGV peut être installée dans presque tous les types de formation rocheuse. Un ou deux forages d'un diamètre de 10-15 cm sont réalisés très proches du bâtiment à chauffer. La profondeur du forage est déterminée d'après le volume des locaux à chauffer et le type de terrain. En fonction de la législation sur la protection des eaux souterraines, une demande d'autorisation doit être délivrée par les autorités.

Dans le forage terminé, on insère généralement un tube de polyéthylène en forme de U jusqu'au fond. L'espace vide restant est rempli d'un mélange de bentonite 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 le sous-sol du bâtiment, et de l'eau additionnée de 15-20% d'antigel est pompée dans l'échangeur de chaleur ainsi créé.

Le fluide circulant dans le forage gagne la chaleur du terrain et fournit l'énergie géothermique à une pompe à chaleur (PAC). Celle-ci est dimensionnée pour la puissance de chauffage nécessaire et est installée dans la cave du bâtiment. La PAC permet de monter le niveau de température à environ 35° C et la part de l'électricité qui fait fonctionner la PAC se situe entre 25 et 30 % de l'énergie globale. Par conséquent, les coefficients de

performance (COP) des PAC sol-eau, pour des sondes géothermiques atteignent actuellement 4 et sont en progression régulière. Ce système permet d'assurer toute la saison de chauffage d'une habitation par planchers chauffants ou par radiateurs à basse température (35° C). Cette installation peut également fournir l'eau chaude sanitaire à la température de 60° C.

Photo\_sondeuse.tif

***Travaux pour l'installation d'une sonde géothermique (photo Engeo)***

**QUELQUES CHIFFRES**

Dans certaines conditions, notamment pour une maison neuve, les coûts d'investissement pour une SGV sont similaires à ceux d'un système de chauffage classique à mazout équipé d'une chaudière. Par contre, les frais de fonctionnements annuels sont très en faveur de la SGV (pas d'entretien et pas de combustible). Dans le cas d'une restauration de maison ancienne ou de changement nécessaire du système de chauffage, il vaut la peine d'évaluer les coûts et les avantages d'une sonde géothermique.

Finalement, le choix d'un chauffage avec une sonde géothermique est aussi celui d'une installation propre, en accord avec les normes sur la qualité de l'air. Elle est de taille réduite, sans dégagement de CO<sub>2</sub>, sans odeur et d'une durée de vie de 30 ans environ pour les équipements de surface et plus de 50 ans pour la SGV.

***Caractéristiques et coûts d'une sonde géothermique verticale (SGV) pour une maison familiale sur le Plateau suisse.***

Caractéristiques techniques	
Surface de référence énergétique	150 – 200 m <sup>2</sup>
Puissance de chauffage maximale	8 kW (100%)
Puissance de la SGV	5.2 kW (65%)

## L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Puissance électrique de la pompe à chaleur	2.8 kW (35%)
Profondeur du forage	110 - 130 m
<b>Coûts d'investissements (en francs) <sup>1</sup></b>	
Forage et SGV complète	10'000 - 11'000
Pompe à chaleur	9'000 - 10'000
Installation, matériel, système de régulation du chauffage et de préparation de l'eau chaude sanitaire	5'000 - 6'000
Total	24'000 - 27'000
<b>Coûts annuels, incl. amortissement</b>	
Frais de capitaux, coûts annuels, énergie électrique	3'500 - 4'000

<sup>1</sup> A l'exclusion des coûts de distribution de la chaleur par planchers chauffants (env. 8500 francs), similaires pour tout type de chauffage à basse température.

### ***2.3 Champs de sondes géothermiques et sondes profondes***

Plus l'on s'enfonce en profondeur, plus la température augmente, généralement de 3° C par 100 m de manière assez régulière. Si l'on regroupe une série de sondes ou si l'on fore à plus grande profondeur, l'échangeur de chaleur disposera d'un potentiel plus important, et permettra donc de chauffer un groupe de villas ou des bâtiments de plus grande taille, tels que des petits immeubles, des locaux industriels ou administratifs, des salles polyvalentes, etc.

#### CHAMPS DE SONDES GÉOTHERMIQUES

Depuis quelques années, on assiste à la réalisation de systèmes de chauffage, ou de chauffage - climatisation, pour des bâtiments industriels ou administratifs. Une série (4 à 45) sondes géothermiques verticales de profondeurs variées (30 à 350 m) sont disposées sous le bâtiment à chauffer ou immédiatement à côté. Les conduites de chaque sonde se rejoignent à un collecteur qui alimente une ou plusieurs pompes à chaleur. Si l'on utilise le froid du terrain en été pour de la climatisation (free cooling), la profondeur des forages doit être limitée à 150 m, pour éviter une température trop importante du terrain.

Le fonctionnement de l'installation se déroule sur un cycle annuel, avec une extraction de la chaleur du terrain pendant la saison de chauffage (injection de froid) et une extraction de froid pendant la période de climatisation (réinjection de chaleur dans le terrain). Une chaudière est aussi installée, mais n'est mise en fonction que pendant les périodes d'entretien et de réparation.

#### ***Champ de sondes à Wollerau***

<b>Nom</b>	<b>Wollerau</b>
------------	-----------------

## L'ÉNERGIE AU FUTUR

Canton	Schwyz
Type de bâtiment	entreprise industrielle
Utilisation de l'énergie	chauffage + climatisation
Début fonctionnement	1995
Nombre de sondes	32
Profondeur	135 m
Type de sonde	double U
Volume de stockage	325'000 m <sup>3</sup>
Puissance de chauffe	186 kW
Puissance climatisation	211 kW

### SONDES PROFONDES

La tendance actuelle est de réaliser des sondes plus profondes (200 – 500 m) que dans les années 1990 (50 – 200 m). Ce type de sonde nécessite une plus grande attention tant au niveau du projet que ceux de la réalisation et de l'exploitation.

Il existe en Suisse de nombreux forages profonds désaffectés, provenant notamment de l'exploration pétrolière, mais aussi de la prospection des aquifères géothermiques. Deux sondes géothermiques vraiment profondes ont été conçues à partir de forages de prospection géothermique non productifs. La plus profonde atteint 2300 m et se trouve à Weggis dans le canton de Lucerne: couplée à une pompe à chaleur, elle permet de chauffer quelques 50 logements et d'assurer leur eau chaude.

Photo\_Wattwil.jpg



***Installation de quatre sondes de profondeur moyenne à Wattwil***

<b>Nom</b>	<b>Wattwil</b>
Canton	St Gall
Type de bâtiment	entreprise industrielle
Utilisation de l'énergie	chauffage
Début fonctionnement	1999
Nombre de sondes	4
Profondeur	250 m
Types de sonde	2x double U et 2x multiple U
Puissance de chauffe	52 kW
Demande d'énergie de chauffage	90 MWh/an

***2.4 Géostructures et pieux énergétiques***

La conductivité thermique et la capacité de stockage font du béton un matériau de construction idéal pour des absorbeurs d'énergie thermique. D'autre part, à quelques mètres sous la surface de la Terre (15-20 m), la température devient très rapidement constante (9-11° C sous notre climat). Ce niveau de température peut être utilisé pour le refroidissement de bâtiments en été et pour le chauffage en hiver.

Les géostructures nécessaires au soutènement et aux fondations de bâtiments de toute taille peuvent être équipées d'échangeurs de chaleur. Les pieux et les parois en béton en contact avec le terrain contiennent des conduites en matière synthétique, pour échanger la chaleur ou le froid du terrain. Ces conduites rejoignent un collecteur qui alimente une ou plusieurs pompes à chaleur.

Le fonctionnement de l'installation se déroule sur un cycle annuel, avec une extraction de la chaleur du terrain pendant la saison de chauffage (injection de froid) et une extraction de froid pendant la période de climatisation (injection de chaleur dans le terrain). Les puissances installées varient entre 20 kW et 1000 kW thermiques. Les avantages de ces installations sont la réduction des coûts d'exploitation en combustible fossile (env. 80%) et une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (45 à 100%).

**LES PIEUX ÉNERGÉTIQUES**

Les pieux en béton armé sont généralement d'un diamètre de 0.4 à 1.5 m et atteignent une longueur de quelques mètres à plus de 30 m de longueur. A l'intérieur de ces pieux est

installé un tube ou un réseau de tubes en polyéthylène, souvent des doubles ou quadruples U, selon le diamètre des pieux. Ces tubes sont ensuite noyés 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 pompe à chaleur, afin de pouvoir échanger la chaleur ou le froid du terrain.

Schéma\_pieux.ai

*Système de pieux énergétiques pour le chauffage en hiver et la climatisation en été (Infos-Géothermie)*

Cette technologie simple et rationnelle ne demande pas des surcoûts excessifs mais nécessite, d'une part son intégration dès le début du projet, et d'autre part une réflexion globale sur les aspects de la construction et de la consommation de l'énergie. Il existe actuellement plus de 350 installations de type géostructures énergétiques en Autriche et en Allemagne, dont la puissance installée va de quelques dizaines de kW pour des petits immeubles jusqu'à 800 kW pour des grands bâtiments industriels. Actuellement en Suisse fonctionnent une trentaine d'installations de géostructures énergétiques, presque toutes situées dans le nord-est du pays.

#### QUELQUES EXEMPLES EN SUISSE

##### ***Dock Midfield, aéroport de Zurich***

Il s'agit d'un nouveau bâtiment de 500 m de long sur 30 m de large en cours de construction qui servira de terminal dès l'automne 2002. Il s'appuie sur 440 pieux moulés de fondation d'un diamètre de 0.9 à 1.5 m d'une longueur de 30 m environ. Un total de 315 pieux seront équipés en pieux énergétiques. En été, quelques 470 MWh de froid seront soutirés au terrain pour climatiser le terminal (free cooling, sans utilisation de pompe à chaleur). La chaleur ainsi injectée dans le terrain sera récupérée en hiver (1100 MWh) et montée au niveau de 30-40° C par une pompe à chaleur.

##### ***Centre scolaire de Fully, Valais***

La volonté de construire un bâtiment de type Minergie et la nature du terrain ont conduit à fonder ce centre scolaire de 20 salles de classe sur des pieux battus et de les équiper en tant qu'échangeurs thermiques. Ces pieux sont évidés et centrifugés, équipés de sondes géothermiques avec un remplissage de sable humide.

Les échanges thermiques avec le bâtiment sont minimaux et la recharge thermique du terrain est assurée par l'évacuation des charges internes en saison chaude, ce qui permet de rafraîchir le bâtiment par le réseau intégré en dalle. Associé à un principe de chauffage à basse température, ce dispositif donne des rendements élevés pour la pompe à chaleur.

##### ***Caractéristiques du système de pieux énergétiques du Centre scolaire de Fully***

Type de bâtiment	Minergie
Surface de référence	2'635 m <sup>2</sup>
Volume net chauffé	7'018 m <sup>3</sup>
Utilisation de l'énergie	chauffage et climatisation
Début du fonctionnement	février 2000
Demande d'énergie de chauffage	92'225 kWh/an

## L'ÉNERGIE AU FUTUR

Énergie de rafraîchissement	50'000 kWh/an
Nombre de pieux équipés	41
Profondeur moyenne	23.2 m
Échangeur dans les pieux	tube en double U
Débit par pieu	310 l/h
Puissance spécifique soutirée	50 W/m
Énergie spécifique soutirée	75 kWh/m
Puissance de la PAC au condenseur	56 kW

### **2.5 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 ensuite dans la plupart des cas déversées dans des cours d'eau. Suivant l'épaisseur de roches qui recouvre le tunnel, la température des eaux interceptées peut atteindre 30° C, voire plus. Associée à des débits importants, cette ressource géothermique potentielle peut être utilisée pour des besoins en chaleur de consommateurs proches des sorties des tunnels. Avec plus de 700 tunnels ferroviaires et routiers, la Suisse possède l'une des plus grandes densités de ce type d'ouvrages.

#### POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DES TUNNELS EN SUISSE

L'Office fédéral de l'énergie a initié dès 1995 une étude du potentiel géothermique des tunnels et galeries de Suisse. Sur quelques 600 ouvrages recensés, 130 ont été retenus dans une première évaluation. Dans une deuxième phase, 15 tunnels se sont révélés intéressants pour une étude multicritère. Dans le tableau donné ci-dessous sont présentées les caractéristiques de 15 tunnels et leur potentiel géothermique. Le potentiel total susceptible d'être exploité atteint 30'000 kW. Relevons que les deux tunnels de base d'AlpTransit (Lötschberg et Gothard) vont fournir un potentiel bien plus important encore, en raison de leur longueur et de l'épaisseur du recouvrement rocheux.

#### EXEMPLES DE RÉALISATIONS EN SUISSE

Actuellement en Suisse, il existe six installations de chauffage utilisant la chaleur des tunnels: St Gothard-N2, Furka, Mappo-Morettina, Hauenstein, Ricken et finalement le Grand St Bernard, qui n'utilise pas l'eau de drainage, mais l'air chaud de sa galerie.

#### ***Tunnel routier du St Gothard, Tessin***

Depuis 1979 déjà, le centre d'entretien autoroutier situé à la sortie sud du tunnel routier du Gothard à Airolo est chauffé et climatisé par la géothermie. En effet, un débit important de 6700 l/min à 17° C s'écoule par le portail sud. Une pompe à chaleur, fondée sur le principe

#### L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

---

d'une grande surface d'évaporateurs à plaques immergés, refroidit l'eau de 2.3° C et fournit une puissance thermique totale de 1860 kW. En modernisant cette installation, il serait possible de refroidir davantage la source de chaleur et de gagner 4000 kW supplémentaires.

Photo\_Oberwald.jpg

*Maisons d'Oberwald chauffées à l'aide de l'eau du tunnel de la Furka, Valais (photo JW)*

***Tunnel ferroviaire de la Furka, Valais***

Quelques 5400 l/min à 16° C s'écoulent de manière naturelle par le portail ouest du tunnel ferroviaire de la Furka. Une conduite amène l'eau par gravité au village d'Oberwald. Ensuite, c'est un système novateur qui a été choisi: un réseau de distribution amène l'eau à 16° C aux pompes à chaleur de chaque utilisateur. Actuellement, 177 appartements et une salle de sport communale sont chauffés par la chaleur du tunnel. La puissance totale installée atteint 960 kW.

***Potentiel géothermique d'une sélection de 15 tunnels ferroviaires, routiers et de galeries de sondage***

<b>Tunnel</b>	<b>Canton</b>	<b>Type de tunnel</b>	<b>Débit eau (l/min)</b>	<b>Temp. eau (° C)</b>	<b>Potentiel thermique (kW)<sup>2</sup></b>
Ascona	TI	routier	360	12	150
Furka <sup>1</sup>	VS	ferroviaire	5400	16	3'758
Frutigen	BE	galerie de sondage	800	17	612
Gothard <sup>1</sup>	TI	routier (N2)	7200	15	4'510
Grenchenberg (portail sud)	SO	ferroviaire	18000	10	11'693
Hauenstein (tunnel de base)	SO	ferroviaire	2500	19	2'262
Isla Bella	GR	routier	800	15	501
Lötschberg	VS	ferroviaire	731	12	305
Mappo-Morettina <sup>1</sup>	TI	routier	983	16	684
Mauvoisin	VS	galerie-pilote de Riddes	600	20	584
Polmengo	TI	galerie de sondage	600	20	584
Rawyl	VS	galerie de sondage	1200	24	1'503
Ricken <sup>1</sup>	SG	ferroviaire	1200	12	501
Simplon (portail Brigue)	VS	ferroviaire	1380	13	672
Vereina	GR	ferroviaire	2100	17	1'608

## L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

<b>Total (kW)</b>					<b>29'927</b>
-------------------	--	--	--	--	---------------

<sup>1</sup> Installation de chauffage géothermique en fonction

<sup>2</sup> Potentiel à la sortie du tunnel, sans pompe à chaleur, avec refroidissement à 6° C.

### **2.6 Stockage souterrain de la chaleur**

On sait que la moitié de notre énergie est utilisée pour le chauffage des locaux. Cette énergie résulte pour 90% de la consommation du pétrole ou du gaz naturel, le solde provenant du bois et de l'électricité. Si l'énergie solaire excédentaire en été pouvait être utilisée en hiver pour nous chauffer, on épargnerait des coûts de chauffage non négligeables. Dans ce but, le stockage saisonnier de chaleur nécessite des dispositifs tels que les stocks convectifs (bassins, cavernes, réservoirs en surface, etc.), les stocks diffusifs (champs de sondes géothermiques, collecteurs horizontaux, etc.) et les stocks mixtes (stockage en aquifère).

Pour le stockage saisonnier de chaleur et de froid, les accumulateurs diffusifs sont les plus prometteurs: ils sont composés de sondes géothermiques et de pompes à chaleur à des prix de construction compris entre 20 et 80 Fr./m<sup>3</sup>. En été, l'accumulateur, situé à une profondeur comprise entre 20 et 200 m, est rechargé par l'énergie solaire; puis en hiver, il est utilisé pour le chauffage des locaux. D'autre part, l'eau refroidie est récupérée en été à des fins de réfrigération. Les coûts d'exploitation sont estimés entre 10 et 20 ct./kWh. Au début des années 1980, le projet de recherche SPEOS de l'EPFL a permis la construction d'un accumulateur-pilote, consistant en un puits central sur lequel se raccordent des drains horizontaux rayonnants, étagés entre 7 et 24 m de profondeur. A Peseux (Neuchâtel), un collège secondaire fait d'importantes économies d'énergie au moyen d'un stock diffusif de 29'000 m<sup>3</sup> basé sur 30 sondes géothermiques de 60 m. La recharge du stock est assurée par 306 m<sup>2</sup> d'absorbeurs solaires et un groupe chaleur-force qui fournit 3 à 4 kW d'électricité. Dans le nord de l'Europe, notamment aux Pays-Bas et en Suède, des stocks de grande dimension fonctionnent avec satisfaction.

### **2.7 Ressources hydrothermales**

La plupart des ressources hydrothermales "naturelles" ont été exploitées depuis longtemps en Suisse par les stations thermales. Certaines d'entre elles ont profité de leurs excédents de chaleur depuis plus de 20 ans déjà pour le chauffage des bâtiments et le préchauffage de l'eau chaude sanitaire, à l'aide de pompes à chaleur: par exemple Lavey-les-Bains (VD) et Zuzach (AG). Dans le cadre du soutien aux projets de forages géothermiques profonds et de la couverture du risque géologique mis en place par l'OFEN, 14 forages profonds de 400 à 2500 m ont été réalisés entre 1988 et 1998.

Si l'eau chaude exploitée par forage est très peu minéralisée et non sulfurée, on peut la rejeter, après refroidissement, dans le réseau hydrographique de surface. Par contre, si elle est trop salée ou contient trop de sulfure, on doit la réinjecter dans l'aquifère par le biais d'un autre forage. Ce mode de fonctionnement est appelé doublet géothermique. Le forage de production amène l'eau géothermale à la surface au moyen d'une pompe immergée.

Ensuite, un échangeur de chaleur, et si nécessaire une pompe à chaleur, permettent d'obtenir la température du circuit de chauffage désirée. Après refroidissement, l'eau géothermale est alors restituée à l'aquifère par le forage d'injection.

La première centrale géothermique de Suisse fonctionnant sur le principe du doublet, a été mise en service en 1994 pour le réseau de distribution de chaleur de Riehen (Bâle). L'installation géothermique est équipée de deux pompes à chaleur entraînées électriquement et d'une centrale de cogénération chaleur-force. L'exploitation de l'aquifère profond (67° C à 1.5 km) est réalisée au moyen de deux forages verticaux séparés par une distance de 1 km. Quelques 160 immeubles sur territoire suisse sont chauffés par la géothermie et depuis 2000 un cas unique de vente de chaleur géothermique transfrontalière permet également d'approvisionner un quartier de la ville de Lörrach (Allemagne) par une conduite de 600 m provenant de la centrale géothermique de Riehen.

Photo\_Riehen.psd

***Vue partielle de la centrale de chauffage géothermique de Riehen, Bâle (photo FDV)***



## ***2.8 Technologie Hot Dry Rock: le projet Deep Heat Mining***

Après des études préliminaires scientifiques et techniques importantes, le projet Deep Heat Mining (DHM) a été initié au début de 1996 par l'OFEN. Dès le début du projet, le concept d'une centrale pilote pour la production conjointe d'électricité et de chaleur en Suisse a été élaboré, sur la base des expériences réalisées aux USA, en Europe et au Japon depuis plus de 25 ans (programmes Hot Dry Rock), et de la connaissance des conditions régionales. Les résultats obtenus jusqu'à aujourd'hui démontrent d'une manière séduisante la faisabilité et le potentiel économique de ce projet.

Le principe du « Deep Heat Mining », consiste à créer des connexions dans un massif de roches fissurées, afin de faire circuler de l'eau pour la réchauffer. Dans ce but, on injecte sous forte pression de l'eau froide dans un forage, à une profondeur où la roche atteint une température d'environ 200° C. Sous l'effet de la pression, l'eau élargit les fissures existantes dans le massif rocheux et une circulation en continu peut alors être instaurée entre le puits d'injection et le puits de production. Après son trajet dans le réservoir souterrain, l'eau se transforme partiellement en vapeur lors de sa remontée dans le forage de production. Ce fluide caloporteur transmet ensuite son énergie en surface, par le biais d'un échangeur de chaleur, à un deuxième fluide dans un circuit fermé équipé d'une turbine à vapeur couplée à un générateur. L'eau du premier circuit, ainsi refroidie, retourne dans le massif rocheux par le forage d'injection.

Le projet DHM prévoit la réalisation en Suisse d'une centrale pilote pour la coproduction d'électricité et de chaleur. Pour un certain nombre de raisons économiques, politiques et géothermiques, c'est la ville de Bâle qui a été sélectionnée et un premier forage d'observation de 2.7 km a été réalisé à Otterbach. La centrale pilote projetée possédera une puissance électrique nette de 3 MW électriques et une puissance thermique de 20 MW thermiques, ce qui permettra de fournir l'électricité et la chaleur à 5'000 ménages. Cette capacité sera atteinte au moyen d'un forage d'injection et de deux forages de production, qui fourniront un débit de fluide de 75 l/s à la température de 170° C. Le coût global de réalisation de cette centrale pilote est devisé à 85 millions de francs, alors que le prix de revient de l'énergie a été évalué à 15 ct/kWh pour le courant électrique 3.5 ct/kWh pour la chaleur. Si le financement est trouvé et le premier forage de 5 km foré en 2003, les premiers kilowattheures devraient arriver sur le réseau à partir de 2010.

*Schéma d'une installation Deep Heat Mining (Häring Geo-Project)*

**2.9 État de la géothermie en Suisse à l'aube du 21<sup>e</sup> siècle**

La production de chaleur par la géothermie représente 9% de toutes les énergies renouvelables. Actuellement et pour assez longtemps, ce sont les sondes géothermiques verticales peu profondes qui représentent avec près de 60% la grande part de la production géothermique en Suisse. Cependant, cette tendance pourrait être modifiée à l'avenir, si dans une période de 10-20 ans, la technologie de production d'électricité et de chaleur par la géothermie profonde (Deep Heat Mining) se développe.

*Comparaison de la production de chaleur par les énergies renouvelables en Suisse pendant l'année 1999 (Rybach et al. 2000a)*

Source d'énergie	Production annuelle (GWh)	%
Biomasse (par ex. le bois)	5'720	81.6
Environnement (air, eau, sol)	1'030	14.7
dont la géothermie	627	8.9
Solaire	260	3.7
<b>Total</b>	<b>7'010</b>	<b>100</b>

*Production de chaleur des installations géothermiques en Suisse pendant l'année 1999 (Rybach et al. 2000a)*

Source géothermique	Production annuelle (GWh)	%
Sondes géothermiques verticales	362	57.7
Forages dans la nappe phréatique	180	28.7
Aquifères profonds	36	5.7

## L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Nappes de tubes horizontales	32	5.1
Sources thermales	10	1.6
Tunnels (eaux de drainage)	3.8	0.6
Pieux énergétiques	2.8	0.4
Échangeurs de chaleur dans des forages profonds	0.7	0.1
<b>Total</b>	<b>627</b>	<b>100</b>

### 3 DE BONNES RAISONS D'UTILISER L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

La géothermie est une source d'énergie indigène et respectueuse de l'environnement. Elle n'engendre dans l'atmosphère ni substances polluantes, ni CO<sub>2</sub> et remplace ainsi de manière idéale les agents énergétiques fossiles.

La géothermie est disponible en permanence. Elle ne dépend pas des conditions climatiques, des saisons, ou des heures de la journée.

Les installations géothermiques sont asservies selon les besoins.

Inépuisable à la dimension de l'ère humaine, la géothermie fait partie des énergies renouvelables, donc durables: les besoins de la génération actuelle peuvent être satisfaits sans préteriter ceux des générations futures.

Il existe des solutions éprouvées pour tous les types de géothermie et tous les environnements géologiques. Des systèmes d'exploitation directe de la chaleur sont disponibles sur le marché tant pour les villas que les immeubles ou les quartiers résidentiels. Pour la production d'électricité, des centrales modulaires peuvent être acquises clés en main.

Les installations géothermiques sont peu visibles en surface. Elles ne revendiquent qu'un espace restreint près des forages et le transport des fluides géothermiques dans des conduites en surface est réduit au minimum.

### 4 SÉLECTION BIBLIOGRAPHIQUE

ADER, 1997. L'énergie au futur. Editions d'En Bas, Lausanne, 264 pp.

Géothermie CH, Bulletin technique de la Société Suisse pour la Géothermie (SSG), 3x/an depuis 1990.

Infos-Géothermie Feuille d'information grand public, 3x/an depuis oct. 2001, Programme Suisse-Energie.

Circulations profondes et ressources géothermiques du Valais, Suisse, 1993. Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 12, numéro spécial, 152 pp.

- Dickson M. H. & Fanelli M. (eds.), 1995. Geothermal energy. J. Wiley & Sons, Chichester, 214 pp.
- Economides M. J. & Ungemach P. O., 1987. Applied Geothermics. Wiley- Intersci. Public., New York.
- Ferrandes R., 1998. La chaleur de la Terre. De l'origine de la chaleur à l'exploitation des gisements géothermiques. Ed. ADEME, Angers, 400 pp.
- Hadorn J.-C., 1988. Guide du stockage saisonnier de chaleur. Document SIA D028, SIA, Zürich, 230 pp.
- Harrisson R., Mortimer N. D., & Smarason O. B., 1990. Geothermal heating. A handbook of engineering economics. Pergamon Press, Oxford, 569 pp.
- Hurtig, E., Cermak V., Haenel R. & Zui V., (eds.) 1992. Geothermal Atlas of Europe, H. Haack Verlagsges. mbH., Gotha, Germany.
- Lemale J. & Jaudin F., 1998. La géothermie, une énergie d'avenir. Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies Ile-de-France (ARENE).
- Lund J. W. (ed.), 1998. Geothermal direct use engineering and design guidebook. 3<sup>rd</sup> ed. Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR, USA, 454 pp.
- Mathey B. et al., 1990. Guide de l'utilisation thermique du sous-sol. Document SIA D025, SIA, Zürich. Ed. allemande mise à jour: 1996, Document SIA D138, Zürich.
- Medici F. & Rybach L., 1995. Geothermal map of Switzerland 1995 (heat flow density). Matér. Géol. Suisse, Géophysique, 30, ETH Zürich, 36 pp.
- Office fédéral de l'énergie, 1998. Géothermie. Exploitation de l'énergie géothermique. Guide pour concepteurs, maîtres d'ouvrages, investisseurs et décideurs. OCFIM, N° 805.016f, Berne, 23 pp.
- Rummel F. & Kappelmeyer O. (eds.), 1993. Geothermal Energy. Future energy source?. Facts-Research-Future. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe (bilingue allemand-anglais).
- Rybach L., Brunner M. & Gorhan H., 2000a. Swiss geothermal update 1995-2000. Proc. World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000: 413-426.
- Rybach L., Mégel Th. & Eugster W. J., 2000b. At what time scale are geothermal resources renewable? Proc. World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000: 867-872.
- Vuataz F.-D.(ed.), 1999. Prodeedings of the European Geothermal Conference, Basel'99. Vol. 1: Bulletin d'Hydrogéologie, 17, 492 pp.; Vol. 2: Centre d'hydrogéologie, 278 pp.
- Vuataz F.-D., 1999. Chaleur naturelle à grande profondeur. Le potentiel géothermique pour la production d'électricité Bull. Assoc. suisse des électriciens et de l'Union des centrales suisses d'électricité, 11: 11-14.
- Vuataz F.-D. & Fehr A., 2000. 25 ans d'activités géothermiques en Suisse. Bulletin Géothermie-CH, 26: 2-10.

## 5 QUELQUES SITES INTÉRESSANTS SUR INTERNET

Web address: <a 138="" 163="" 830="" 845"="" data-label="Page-Footer" href="http://&lt;/a&gt;&lt;/th&gt;&lt;th&gt;Description du site&lt;/th&gt;&lt;/tr&gt; &lt;/table&gt; &lt;/div&gt; &lt;div data-bbox="> <p>20</p> </a>
---

## L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

<b>Suisse</b>	
<a href="http://www.geothermal-energy.ch">www.geothermal-energy.ch</a>	Société Suisse pour la Géothermie (SSG)
<a href="http://www.dhm.ch">www.dhm.ch</a>	Deep Heat Mining (DHM): le projet Hot Dry Rock suisse
<a href="http://www.geothermal.ch">www.geothermal.ch</a>	Geothermal Explorers Ltd, le projet DHM à Bâle
<a href="http://www.minergie.ch">www.minergie.ch</a>	La maison Minergie
<a href="http://www.pac.ch">www.pac.ch</a>	Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP)
<b>Union européenne</b>	
<a href="http://www.soultz.net">www.soultz.net</a>	Le projet européen Hot Dry Rock, Soultz-sous-Forêts, France
<a href="http://www.geothermie.de">www.geothermie.de</a>	Geothermische Vereinigung e.V., Deutschland
<a href="http://www.demon.co.uk/geosci/igahome.html">www.demon.co.uk/geosci/igahome.html</a>	International Geothermal Association (IGA)

<b>Web address: http://</b>	<b>Description du site</b>
<b>Autres pays</b>	
<a href="http://www.eren.doe.gov/geothermal">www.eren.doe.gov/geothermal</a>	Office of geothermal geothermal technologies, DOE, USA
<a href="http://geothermal.id.doe.gov">geothermal.id.doe.gov</a>	Geothermal energy technical site, DOE, USA
<a href="http://geothermal.marin.org">geothermal.marin.org</a>	Geothermal Education Office, USA
<a href="http://www.geothermal.org/index.html">www.geothermal.org/index.html</a>	Geothermal Resources Council (GRC), USA
<a href="http://www.oit.osshe.edu/admin/geoheat/index.htm">www.oit.osshe.edu/admin/geoheat/index.htm</a>	Geo-Heat Center (GHC), USA
<a href="http://www.igshpa.okstate.edu">www.igshpa.okstate.edu</a>	International Ground Source Heat Pump Association
<a href="http://www.worldbank.org/html/fpd/geothermal/index.htm">www.worldbank.org/html/fpd/geothermal/index.htm</a>	Web pages on geothermal energy at the World Bank

***Informations supplémentaires***

SSG - CENTRE ROMAND DE PROMOTION DE LA GÉOTHERMIE

Jules Wilhelm, Ing.-conseil

Ch. du Fau-Blanc 26 – 1009 Pully

Tél. & Fax 021 729 13 06

[jules.wilhelm@geothermal-energy.ch](mailto:jules.wilhelm@geothermal-energy.ch)

SOCIÉTÉ SUISSE POUR LA GÉOTHERMIE

c/o Inter-Prax

Dufourstr. 87

2502 Bienne

Tél. & Fax 032 341 45 65

[svg-ssg@geothermal-energy.ch](mailto:svg-ssg@geothermal-energy.ch)