



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Géothermie Exploitation de l'énergie géothermique

Guide pour concepteurs,
maîtres d'ouvrages,
investisseurs et décideurs



Sondes géothermiques et nappes de tubes
Exploitation de la chaleur de
la nappe phréatique
Pieux énergétiques
Stockage saisonnier de la chaleur et du froid
Géothermie hydrothermale
Deep Heat Mining
Exploitation de l'eau chaude des tunnels

octobre 1998

Sommaire

- 1 Avant-propos
- 2 La géothermie, ou comment tirer parti de la chaleur des profondeurs
- 4 Sondes géothermiques, nappes de tubes et exploitation de la chaleur de la nappe phréatique
- 8 Sondes géothermiques profondes
- 10 Aspects importants pour la planification d'installations à sondes géothermiques et pour l'exploitation de la chaleur tirée de la nappe phréatique
- 12 Systèmes de pieux énergétiques
- 14 Stockage saisonnier de chaleur et de froid
- 16 Géothermie hydrothermale
- 18 Deep Heat Mining
- 20 Exploitation de l'eau chaude des tunnels
- 22 Glossaire
- 23 Adresses utiles et matériels d'information

Impressum

Editeur

Office fédéral de l'énergie (OFE), Berne

Direction du projet

Dr R.L. Garban, Electrowatt Engineering AG, Zurich
M. Brunner, Office fédéral de l'énergie (OFE), Berne

Auteurs

Géothermie: Prof. Dr L. Rybach, EPF Zurich
Sondes géothermiques: E. Rohner, Grundag AG, Gossau
Sondes géothermiques profondes: Dr R. J. Hopkirk, Polydynamics Engineering, Männedorf
Dr W. Leu, Geofirm AG, Winterthur
Aspects importants: F. Beyeler, Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP), Berne
Pieux énergétiques: U. Schüss, Lippuner & Partner AG, Grabs
Stockage saisonnier: J.-Ch. Hadorn, Lausanne
Géothermie hydrothermale: Dr F.-D. Vuataz, Centre d'Hydrogéologie, Neuchâtel
Deep Heat Mining: Dr M.G. Häring, Häring GeoProject, Steinmaur
Eau chaude des tunnels: M. Keller, Electrowatt Engineering AG, Zurich

Rédaction

O. Hunzli et M. Kilchenmann, Oerlikon Journalisten AG, Zurich
Réalisation et production: H. von Arx, SGD, Zurich
Traduction: Messerknecht & Fournier, Yvernon

Distribution

Office central fédéral des imprimés et du matériel (OCFIM),
3000 Berne, tél. 031 322 30 16, fax 031 992 00 23
Numéro de commande: 805.016 f

Il existe une version en allemand de cette brochure:
Numéro de commande: 805.016 d

Avant-propos

L'exploitation et la mise en valeur de la chaleur terrestre ont enregistré des progrès considérables ces dernières années. Cette forme d'énergie renouvelable, toutefois, n'est encore que trop peu connue.

Notre propos est de familiariser un cercle plus étendu d'intéressés avec la géothermie, en actualisant une brochure d'information publiée en 1990 sous le titre «La géothermie en Suisse – gisements et possibilités d'utilisation».

En 1990 également, l'article sur l'énergie a été admis dans la Constitution fédérale à une forte majorité des voix. Il engage notamment la Confédération à promouvoir les techniques énergétiques dans le domaine des énergies renouvelables, ce que concrétise le programme Energie 2000.

Le mandat politique donné par la Constitution fédérale apporte une impulsion supplémentaire à la géothermie. C'est ainsi que les installations pilotes et de démonstration profitent désormais de l'effort de promotion, outre la couverture déjà existante des risques en matière de forages profonds de géothermie. Les nouveaux modes d'exploitation tels que celui de l'eau chaude des tunnels et les nouvelles technologies, par exemple le système des pieux énergétiques, ne seront désormais plus l'apanage de quelques rares initiés.

Les sondes géothermiques sont déjà largement répandues en Suisse. L'avenir nous révélera encore d'autres possibilités d'exploitation. Des forages à de grandes profondeurs devraient fournir non seulement de la chaleur, mais encore la possibilité de produire de l'électricité sans émission de dioxyde de carbone.

Je remercie de leur collaboration compétente toutes les personnes qui ont contribué à la rédaction de la présente brochure. Qu'elle représente pour le lecteur intéressé une source appréciée de suggestions et d'informations.

Eté 1998

Office fédéral de l'énergie
Le Directeur

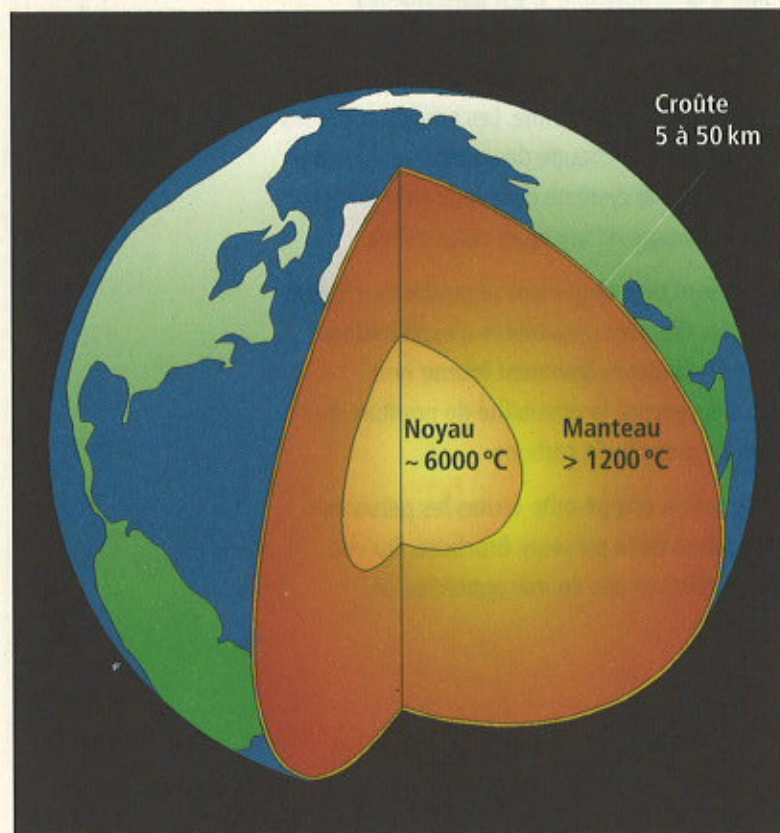


Dr Eduard Kiener

Le globe est d'une brûlante actualité

La géothermie, ou comment tirer parti de la chaleur des profondeurs

L'énergie géothermique ou chaleur du sous-sol est l'énergie calorifique stockée sous la surface terrestre. Les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle, dont l'origine réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs. Selon les connaissances actuelles, les températures culminent à 6000 °C dans le noyau et atteignent encore 1300 °C environ dans le manteau supérieur du globe terrestre. Le flux géothermique qui parvient à la surface du globe dépasse 40 milliards de kW.



Plus de 99 % de la masse de notre Terre est soumise à des températures dépassant 1000 °C. Seul 0,1 % est plus froid que 100 °C

(Source: Häring GeoProject, Steinmaur)

En moyenne, la température augmente à partir de la surface terrestre de 3 °C environ par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique normal. En de nombreux endroits du globe, nous constatons toutefois des anomalies géothermiques (dites «positives»), c'est-à-dire des régions présentant des gradients de température nettement plus élevés, par exemple en Islande, en Italie, en Indonésie ou en Nouvelle-Zélande. Le but d'une exploitation de l'énergie géothermique est de capter la chaleur des profondeurs, pour l'amener à la surface de la terre en recourant à des technologies ad hoc. A certains endroits, la nature fournit elle-même le système de circulation requis, par exemple les sources thermales. En d'autres lieux, on doit faire appel à des forages avec pompes de production ou à des sondes géothermiques doublées de pompes de circulation.

L'utilisation des ressources géothermiques permet une exploitation intégrale de la chaleur tirée du sous-sol, pratiquement à partir de la surface terrestre jusqu'à une profondeur se justifiant encore sur le plan technique et économique de 5000 m maximum. Cette dernière présente un intérêt particulier, car sa chaleur permet également de produire de l'électricité (cf. Deep Heat Mining). En Suisse, les applications géothermiques existantes se limitent en général aux 500 premiers mètres à partir de la surface terrestre.

La géothermie en Suisse

La Suisse a déjà enregistré de nombreux succès dans l'exploitation de la géothermie à des fins de chauffage. Une comparaison sur le plan mondial place notre pays en tête pour la densité des sondes géothermiques, avec une installation pour 2 km². En matière de production géothermique par habitant, la Suisse prend le quatrième rang avec 44 W environ, derrière l'Islande, la Nouvelle-Zélande et la Hongrie. Les ressources géothermiques indigènes se répartissent entre la géothermie à faible profondeur, faisant par exemple appel aux sondes géothermiques classiques ou aux pieux énergétiques, et la géothermie profonde, requérant par exemple des sondages hydrothermaux ou la technique Deep Heat Mining. La profondeur de 400 m a été choisie comme limite arbitraire. Afin d'exploiter des plages de température plus élevées, les sondes géothermiques atteignent progressivement une profondeur considérée comme intermédiaire entre les notions de «peu profond» et «profond».

Méthodes d'exploitation géothermique

- Sondes géothermiques disposées verticalement; types d'exécution les plus divers.
- Nappes de tubes (serpentins) disposés horizontalement dans le terrain (solution de plus en plus rare actuellement).
- Exploitation thermique des eaux souterraines (exemple: 870 installations en exploitation dans le seul canton de Berne, état 1997).
- Sondes géothermiques profondes (réutilisation d'anciens forages).
- Pieux énergétiques et parois continues en béton moulées dans le sol pour la production du chaud et du froid (climatisation).
- Exploitation de sources thermales ou d'aquifères profonds au moyen de puits uniques (singlets) ou de deux puits (doublets). Exemple: installation de chauffage géothermique de Riehen.
- Exploitation de l'eau chaude des tunnels à des fins de chauffage, par exemple les tunnels de la Furka, de Ricken et de Mappo-Morettina.
- Deep Heat Mining pour la production d'électricité et de chaleur, par exemple l'installation-pilote de Soultz-sous-Forêts en Alsace; un projet suisse de même envergure est en cours d'élaboration.

Cinq bonnes raisons d'exploiter la chaleur terrestre

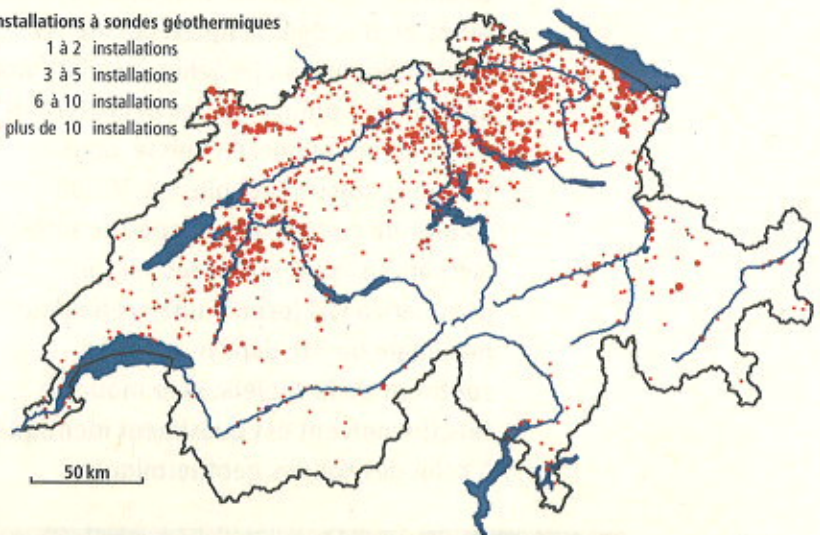
- La géothermie est une source d'énergie indigène et respectueuse de l'environnement. Elle n'engendre dans l'atmosphère ni substances polluantes, ni dioxyde de carbone et remplace ainsi de manière idéale les agents énergétiques fossiles.
- La géothermie est disponible en permanence. Elle ne dépend pas des conditions climatiques, des saisons ou des heures de la journée.
- 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 préterir ceux des générations futures.
- La Suisse dispose de conditions favorisant l'exploitation de la géothermie. Il existe des solutions éprouvées tant pour les villas et les immeubles que pour des ensembles d'habitation ou des quartiers entiers.
- Les installations géothermiques sont à peine perceptibles en surface. Elles revendiquent un espace minimum près du forage.

Système	Puissance thermique installée (MW)
Sources thermales, exploitation de l'eau chaude des tunnels	10
Aquifère profond (plus de 400 m de profondeur, cf. glossaire)	10,5
Sondes géothermiques	287
Total	307,5

Puissance installée pour l'exploitation de la chaleur terrestre en Suisse (état 1997)

Installations à sondes géothermiques

- 1 à 2 installations
- 3 à 5 installations
- 6 à 10 installations
- plus de 10 installations



Distribution des installations à sondes géothermiques en Suisse

(Source: Polydynamics Engineering, Zurich)

Rang	Pays	Puissance thermique (MW)	Habitants (millions)	Puissance thermique par habitant (W)
1	Islande	1443	0,27	5344
2	Nouvelle-Zélande	264	3,5	75,4
3	Hongrie	638	10,1	63,1
4	Suisse	308	7,0	43,9
5	Macédoine	70	2,1	33,3
6	Slovaquie	100	5,3	18,9
7	France	456	57,7	7,9
8	Etats-Unis	1876	260,0	7,2

Comparaison à l'échelon mondial de l'exploitation géothermique directe

Type de centrale de production d'électricité	Puissance installée (MW)	%	Production par année (GWh)	%
Géothermie	6 456	61	37 976	86
Energie éolienne	3 517	33	4 878	11
Energie solaire (photovoltaïque)	366	3	897	2
Energie marémotrice	261	3	601	1
Total	10 600	100	44 352	100

Production d'électricité de sources renouvelables: parmi les énergies renouvelables, la géothermie occupe une position de pointe sur le plan mondial, notamment pour la production d'électricité

(Source: World Energy Council, 1995)

Maison familiale et géothermie

Sondes géothermiques, nappes de tubes et exploitation de chaleur de la nappe phréatique

Les sondes géothermiques sont des échangeurs de chaleur enterrés verticalement – il s'agit normalement de tubes en U –, dans lesquels circule un fluide caloporteur. De telles installations ont fait leur preuve sur les plans technique et économique. En Suisse, nous trouvons aujourd'hui plus de 20 000 sondes de ce type. Les nappes de tubes (serpentins) sont enterrées sur un plan horizontal jusqu'à une profondeur maximale de 3 m dans le sol et en soutirent de la chaleur. Leur mode de fonctionnement est quasiment identique à celui des sondes géothermiques.



Construction d'une sonde géothermique: implantation de circuits de tubes en U dans le forage
(Source: Foralith AG, Gossau)

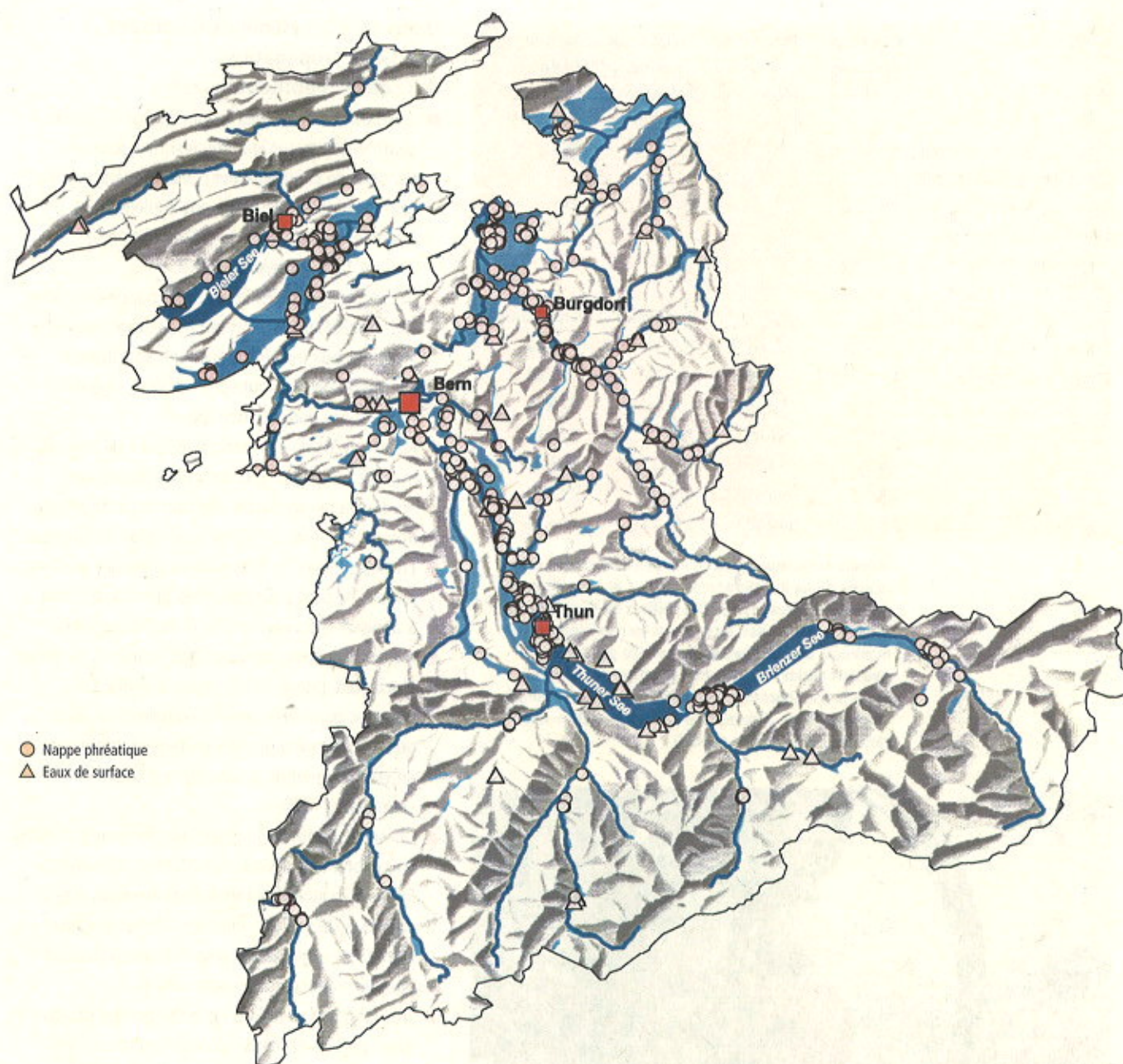
Les sondes géothermiques et les nappes de tubes prélèvent de la chaleur dans le sous-sol par un système de circulation. De l'eau additionnée d'antigel sert de fluide caloporteur. A l'aide d'une pompe à chaleur, la chaleur prélevée est portée à la température nécessaire au chauffage des locaux et le cas échéant de l'eau sanitaire.

La longueur des **sondes géothermiques** utilisées actuellement varie entre 50 et 250 m, permettant de s'affranchir des variations de température journalières et saisonnières. A titre d'exemple, une température constante de 17°C environ règne à la profondeur de 200 m, ce qui permet d'exploiter des pompes à chaleur également en hiver, en dépit de basses températures extérieures. Les sondes géothermiques prennent également de l'importance lors de l'assainissement d'anciens chauffages, respectant en cela l'Ordonnance sur la protection de l'air.

Comme les **nappes de tubes** ne sont normalement disposées qu'à une profondeur de 1,5 à 3 m, le climat notamment joue un rôle pour ce genre d'exploitation de la chaleur. La terre sert pour ainsi dire d'accumulateur d'énergie solaire. Dans ce cas précis, l'énergie géothermique proprement dite ne revêt qu'un rôle secondaire. Selon l'altitude topographique, les nappes de tubes permettent de retirer 20 à 30 W par m² d'énergie thermique.

La **nappe phréatique** est un fournisseur remarquable d'énergie aux fins de chauffage des locaux et de l'eau sanitaire, mais elle implique également la présence d'une pompe à chaleur. Dans notre pays, les températures des eaux souterraines atteignent en moyenne de 8 à 12°C et ne font 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. Il existe déjà un nombre important d'installations de ce type dans le canton de Berne.

L'installation de pompage des eaux souterraines profondes de la piscine couverte de Seon près d'Aarau propose une double exploitation intéressante des ressources. De la chaleur est prélevée de l'aquifère à 300 m de profondeur pour chauffer une piscine couverte et 60 appartements ainsi que des locaux industriels par un réseau à distance. L'eau refroidie est ensuite injectée dans le réseau d'approvisionnement en eau de la commune.



Exploitation thermique de la nappe phréatique dans le canton de Berne: Puissance thermique totale de 50 MW prélevée dans 870 installations (état 1997)

(Source: Office fédéral de la topographie, Berne et Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne)

Sous-sol	Conductibilité thermique (W/m K)	Puissance d'extraction (W/m)	Longueur de sonde géothermique par kW de puissance de chauffe (m)	
			COP = 3	COP = 3,5
Sous-sol de mauvaise qualité (roches meubles sèches)	moins de 1,5	20	33	36
Roches indurées ou roches meubles saturées d'eau	1,5 à 3,0	50	13	14
Roches indurées à conductibilité thermique élevée	supérieure à 3,0	70	9,5	10
Gravier, sable, sec	0,4	moins de 20	supérieure à 33	supérieure à 36
Gravier, sable, aquifère	1,8 à 2,4	55 à 65	10 à 12	11 à 13
Argile, limon, humide	1,7	30 à 40	17 à 22	18 à 24
Calcaire, massif	2,8	45 à 60	11 à 15	12 à 16
Grès	2,3	55 à 65	10 à 12	11 à 13
Granite	3,4	55 à 70	9,5 à 12	10 à 13
Basalte	1,7	35 à 55	12 à 19	13 à 20
Gneiss	2,9	60 à 70	9,5 à 11	10 à 16

Valeurs empiriques pour le «dimensionnement sommaire» d'une installation de sondes géothermiques dans différentes roches. Ces chiffres ne s'appliquent qu'au Plateau suisse, en prenant en considération un maximum de 1800 heures de service par année. Ils peuvent varier fortement en fonction de l'altitude et de la configuration locale des roches, par exemple en présence de fissures et d'altération (COP = coefficient de performance annuel)



Forage pour sonde géothermique: la longueur des sondes utilisées actuellement varie entre 50 et 250 m

(Source: Grundag, Gossau)

Quels sont les éléments favorisant une large propagation des sondes géothermiques?

- Conditions climatiques requises pour les sondes géothermiques sur le Plateau suisse: longues périodes de chauffage avec des températures de l'air avoisinant 0°C, faible ensoleillement et température naturelle du sol variant entre 10°C et 12°C en terrain saturé.
- Les sondes géothermiques et les nappes de tubes sont implantées localement et peuvent ainsi être adaptées aux besoins individuels spécifiques. Un réseau de distribution de chaleur, onéreux, ne s'impose normalement pas.
- Faibles coûts d'exploitation: absence de frais de mazout ou de gaz, pas de service de brûleur ou de chaudière, aucun contrôle de cheminée ou antipollution, ni nettoyage et révision de citernes.
- En exploitation, les installations à sondes géothermiques ne sont pas polluantes. Elles contribuent à abaisser le niveau de CO₂ dans l'atmosphère.
- Aucune augmentation du trafic routier et du risque d'accident, puisque il n'y a pas transport de matières premières vers les consommateurs et que l'on ne traite pas des matériaux dangereux: en effet, l'agent de production est tout simplement «l'eau».
- Choix relativement libre de l'emplacement et faible encombrement dans la construction. Une installation pour une villa familiale revendique à peu près la surface d'une machine à laver. La place attribuée normalement à une citerne à mazout peut être affectée à un autre usage.
- Très longue durée de service des sondes géothermiques: plus de 100 ans selon de récents calculs.
- La température constante du sol permet d'obtenir un bon coefficient de performance annuel et une longue durée de vie de la pompe à chaleur, sous réserve d'une configuration correcte de l'installation. On peut renoncer dans une large mesure à la maintenance du système, ce qui se traduit par de faibles coûts d'exploitation.
- Pour les installations de petite et de moyenne importance, aucune recharge thermique n'est normalement nécessaire. L'autorégénération est continue. De grandes installations peuvent au besoin être rechargées thermiquement grâce à des systèmes d'appoint simples, par exemple au moyen de capteurs solaires.

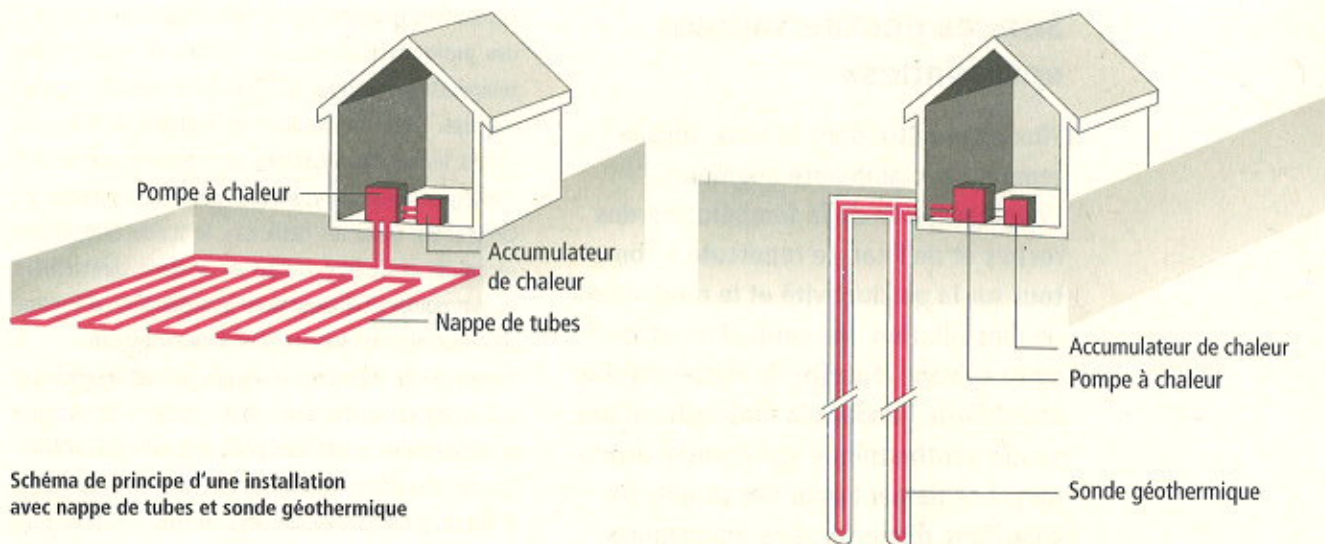
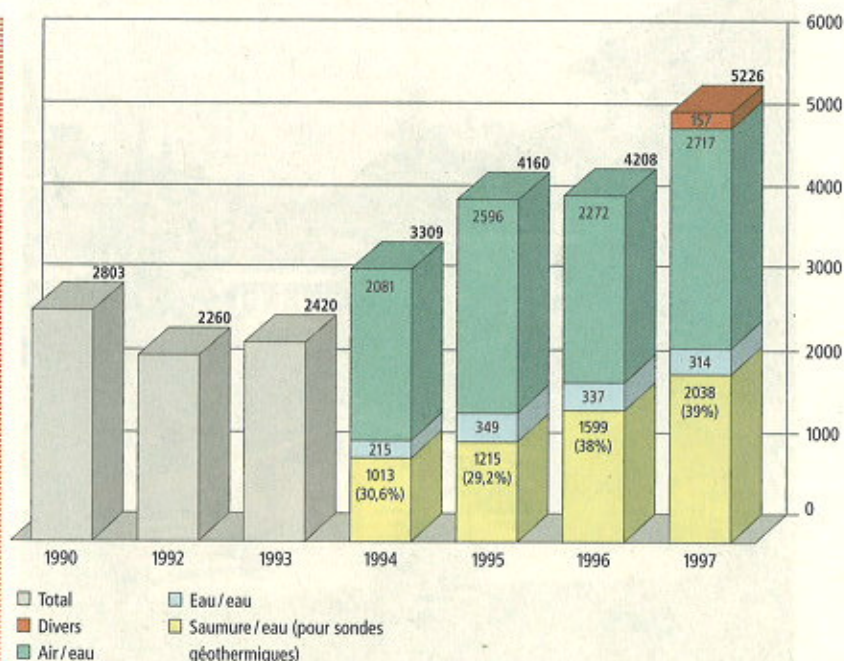


Schéma de principe d'une installation avec nappe de tubes et sonde géothermique

Paramètres pour dimensionner les sondes géothermiques

- Type de terrain: le facteur essentiel à respecter lors de la conception d'une sonde géothermique est la conductibilité thermique du sous-sol. La puissance d'extraction est proportionnelle à la conductibilité thermique (cf. tableau page 6).
- Humidité naturelle du sol: elle améliore la conductibilité thermique et garantit un bon contact entre la sonde et le sous-sol.
- Eaux souterraines: lorsqu'une sonde géothermique pénètre dans une nappe phréatique qui présente une vitesse d'écoulement excédant quelques centimètres par jour, la quantité de chaleur utilisable augmente sensiblement.
- Matériau de la sonde: grâce à leur maniement relativement simple, à leur bonne résistance à la corrosion et à leur prix avantageux, les tubes en polyéthylène se sont imposés à titre de matériau constituant de sonde. La paroi devrait être aussi mince que possible (aspect thermique), tout en résistant à la poussée du terrain.



Ventes de pompes à chaleur en Suisse
(Source: Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur, GSP, Zurich)

La température des roches augmente rapidement avec la profondeur

Sondes géothermiques «profondes»

Plus on pénètre dans la terre, plus la température ambiante augmente. L'augmentation de la température des roches et de l'eau se répercute à son tour sur la productivité et le rendement de l'installation. Les coûts d'investissement suivent toutefois la même courbe ascendante, rendant la réalisation d'une sonde géothermique «profonde» économique seulement pour des projets de chauffage d'une certaine importance.



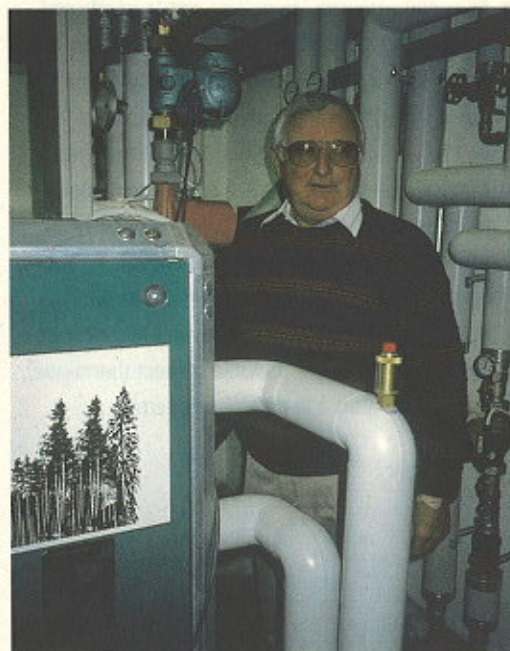
A peine perceptible en surface, la sonde géothermique profonde Thermal 1 de H. Füglistner AG à Weggis. Cette sonde fournit 240 000 kWh de chaleur (1996-1997) pour une profondeur totale de 2300 m et un coefficient d'exploitation de 35 %

(Source: Polydynamics Engineering, Männedorf)

Les sondes géothermiques «profondes» pénètrent à des profondeurs de 500 à 2000 m, où règnent des températures jusqu'à 70°C. Dans le cas des sondes fermées, l'eau circule dans un système de tubes en circuit fermé. Les systèmes semi-fermés permettent d'intégrer l'eau souterraine dans le système de circulation. Dans les deux cas, le fluide caloporteur réchauffé peut être utilisé en surface directement ou par pompe à chaleur pour la production d'énergie de chauffage des locaux et de l'eau sanitaire.

L'exemple de Thermal 1 à Weggis permet d'envisager à l'avenir un accroissement du nombre des sondes géothermiques profondes pour la production d'énergie de chauffage des locaux et de l'eau sanitaire, d'autant plus qu'il existe déjà en Suisse 130 forages profonds inutilisés, issus par exemple de la prospection pétrolière. Le potentiel énergétique relativement élevé exige toutefois de gros consommateurs de chaleur (maisons locatives, ensembles d'habitation et industriels ou serres), devant se trouver si possible à proximité de la sonde pour éviter de longues conduites de transport de la chaleur.

Tant les forages existants désaffectés que de nouveaux développements dans le domaine de la technologie de forage profond permettent d'abaisser les coûts d'investissement pour l'installation de sondes géothermiques profondes. Dans ce domaine, une nouvelle technique de marteau-fond-de-trou hydrau-



Pompe à chaleur pour la sonde géothermique Thermal 1 à Weggis: un propriétaire satisfait

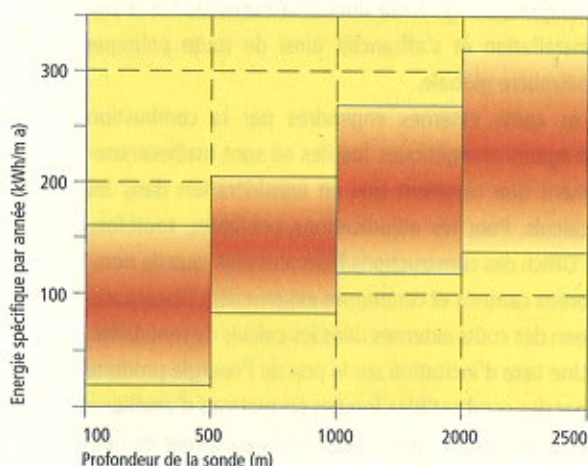
lique semble très prometteuse. De l'eau claire ou un fluide de circulation est pompé à haute pression (jusqu'à 180 bars) dans un outil de forage de conception nouvelle, permettant des vitesses d'avancement supérieures de 50% à celles des installations de forage classiques.

De quoi dépend la quantité d'énergie utilisable d'une sonde géothermique «profonde»?

- La température atteinte dans le sous-sol est proportionnelle à la longueur de la sonde.
- Caractéristiques thermiques du sous-sol, notamment sa conductibilité thermique.
- Type de construction de la sonde et de la colonne de production. Une longue sonde, de grand diamètre, possède une plus grande surface d'échange de chaleur (contact entre la sonde et le terrain).
- Durée de service prévue de la sonde.

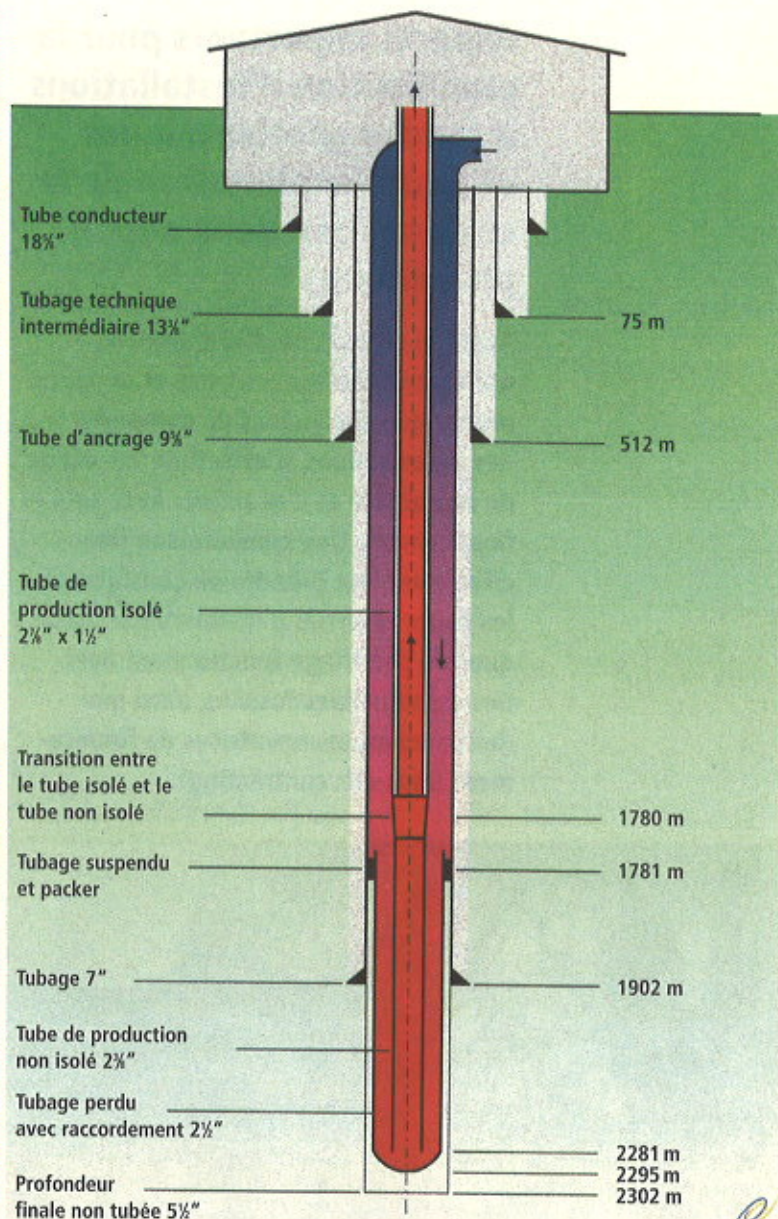
Type de sonde	coaxial
Rendement de la sonde	240 000 kWh
Fourniture d'énergie à la sortie de la pompe à chaleur	270 000 kWh
Production de pointe de la sonde	70 kW
Approvisionnement	3 petits locatifs

Données de la sonde géothermique profonde Thermal 1 à Weggis (1996-1997)



Quantité d'énergie utilisable par année produite par une sonde géothermique «profonde» en fonction de la profondeur atteinte, de la conductibilité thermique du sous-sol, du type de construction de la sonde et de sa durée de service prévue, par exemple 20 ou 50 ans (partie hachurée)

(Source: Geoform AG, Winterthur)



Coupe technique de la sonde géothermique profonde Thermal 1 à Weggis.

Le fluide caloporteur circule dans un système de tubes fermé, la sonde est du type coaxial. La chaleur prélevée dans le sous-sol est utilisée pour satisfaire les besoins de chauffage des locaux et d'eau chaude sanitaire de trois petits immeubles locatifs

(Source: Polydynamics Engineering, Zurich)

Ce qu'il faut savoir aussi

Aspects importants pour la planification d'installations à sondes géothermiques et pour l'exploitation de la chaleur tirée de la nappe phréatique

Avant la réalisation d'installations utilisant la chaleur terrestre et la nappe phréatique, il convient de demander des autorisations, d'effectuer une étude de rentabilité et d'examiner avec soin le financement. Une comparaison financière complète prendra en considération les coûts externes d'installations classiques de chauffage fonctionnant avec des combustibles fossiles, ainsi que des conceptions novatrices de financement (mot-clé: contracting).



Il existe toujours d'importantes différences entre les cantons en matière de législation et d'autorisation applicables aux forages. D'une manière générale, le soutirage de l'eau aux fins d'approvisionnement en eau potable l'emporte sur celui de l'énergie thermique (Source: Grundag AG, Gossau)

Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP)

Ce groupement s'emploie à promouvoir de manière ciblée l'exploitation des pompes à chaleur, en respectant une qualité élevée des systèmes et des produits. L'accent est mis sur l'information des maîtres d'ouvrages, des autorités, des installateurs, des architectes, des concepteurs et des conseillers en énergie. Une assistance financière peut être demandée dans certains cantons ou auprès d'entreprises locales d'approvisionnement en énergie pour la réalisation d'une installation à sondes géothermiques. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et les offices cantonaux de l'énergie peuvent renseigner à ce sujet.

Rentabilité

Les études de rentabilité d'installations géothermiques se basent toujours sur des comparaisons avec des installations classiques faisant appel au mazout ou au gaz. Dans la géothermie, ce sont surtout les forages et l'électricité des pompes à chaleur qui coûtent. Pour toutes ces raisons, les coûts d'investissement et les frais d'exploitation doivent être calculés en fonction de l'emplacement spécifique et des tarifs de l'électricité en vigueur.

Les prix des combustibles peuvent varier fortement sur une assez longue période, ce que prouvent bien les deux «crises pétrolières» des années 1973 et 1980. La production géothermique, source d'énergie indigène, est garantie durant la durée de vie d'une installation et s'affranchit ainsi de toute politique pétrolière globale.

Les coûts externes engendrés par la combustion d'agents énergétiques fossiles ne sont malheureusement que rarement pris en considération dans les calculs. Pour les adjudications publiques, toutefois, l'Office des constructions fédérales ainsi que de nombreux cantons et communes exigent déjà l'incorporation des coûts externes dans les calculs de rentabilité. Une taxe d'incitation sur le prix de l'énergie produite par des combustibles fossiles permettrait d'améliorer sensiblement le rapport des coûts en faveur de l'exploitation géothermique.

L'énergie géothermique est de plus en plus souvent adoptée pour l'assainissement d'anciennes installations de chauffage. Un rôle important lui revient dans le respect de l'Ordonnance sur la protection de l'air, puisque l'exploitation de la chaleur terrestre est essentiellement non polluante.

Autorisations

Les forages sont soumis à l'autorisation obligatoire des cantons, exceptionnellement des communes. Il existe toujours de grandes différences d'un canton à l'autre en matière de législation et de pratique d'autorisation. D'une manière générale, le prélèvement de l'eau aux fins d'approvisionnement en eau potable l'emporte sur le prélèvement d'énergie thermique (dispositions sur la protection des eaux). Lors de la planification d'une installation d'exploitation de la chaleur terrestre ou de la nappe phréatique, des informations spécifiques ou des concessions doivent être demandées aux autorités cantonales compétentes.

Le Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur a élaboré des propositions d'uniformisation de la pratique d'autorisation.

Des directives uniformisées figurent dans un guide de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Des cartes spéciales déjà publiées par quelques cantons, par exemple Berne, Zurich et Argovie, renseignent sur l'admissibilité d'installations à sondes géothermiques ou de l'exploitation de la chaleur tirée de la nappe phréatique.

Nouveau modèle de financement pour les installations géothermiques: le contracting

Le contracting n'est pas une nouvelle technologie, mais plutôt un nouveau modèle de financement et d'exploitation pour des installations énergétiques. Le consommateur d'énergie n'achète plus du mazout, du gaz ou de l'électricité, il acquiert de la chaleur, c'est-à-dire une prestation énergétique.

Le contracting n'est rien d'autre que la prestation d'un tiers compétent, le «contractor», qui finance et exploite une installation énergétique. Le consommateur de chaleur lui garantit la prise en charge d'énergie de chauffage à un prix fixé dans le contrat pour une durée déterminée. Dans le cadre du contracting, le concepteur, le constructeur et l'exploitant d'une

installation sont normalement identiques. C'est pourquoi la tendance à investir dans des techniques énergétiques rationnelles s'amplifie et l'incitation à surdimensionner un projet disparaît d'elle-même.

Pour le consommateur, le contracting est intéressant dans la mesure où il «transfère» les coûts d'investissement très élevés, permettant de libérer ses propres ressources financières en faveur d'autres investissements. De plus, le contracting aboutit en général à des frais de chauffage plus bas: le «contractor» ne réalisera que des installations assurant un rendement élevé: ses connaissances techniques de même que son expérience conduisent à de meilleurs résultats.

Conséquences du contracting pour le consommateur d'énergie

- Le contracting donne libre choix au consommateur de chaleur quant au fournisseur d'énergie. Il peut choisir le meilleur rapport prix/prestation et diminuer ainsi ses frais d'énergie.
- Le contractor endosse tout risque d'investissement improductif.
- Les connaissances professionnelles du contractor sur les meilleures technologies disponibles conduisent à un approvisionnement énergétique optimisé.
- Le propre capital du consommateur reste disponible pour d'autres investissements.
- Le consommateur d'énergie accepte une dépendance à long terme d'un partenaire externe. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de fixer des réglementations contractuelles pour remédier à d'éventuels conflits.

Une méthode de construction inspirée des Lacustres et pourtant d'avenir

Systèmes de pieux énergétiques

Les fondations souterraines ou sur pieux, équipées de conduites à titre d'échangeurs thermiques pour la production d'énergie, sont nommées «systèmes de pieux énergétiques». Leur particularité est la double application, intéressante sur les plans écologique et économique, d'éléments bétonnés en contact avec le sol, servant d'une part de fondations, et permettant d'autre part la production d'énergie sous forme de chaud et de froid.

Dans les sols de fondation dits «mous», la charge d'un bâtiment doit bien souvent être absorbée par des pieux. Il est relativement simple d'en faire des pieux énergétiques.

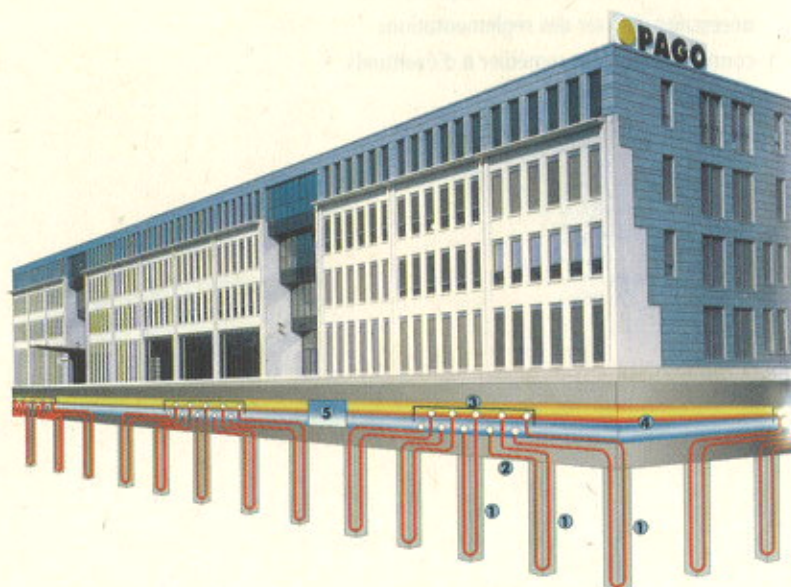
Comme échangeurs thermiques, on fait normalement appel à des tuyaux synthétiques. Dans le cas des pieux préfabriqués et en béton coulé sur place, ces tuyaux sont fixés à l'armature avant le montage du pieu et coulés dans le béton. Pour les pieux en béton centrifuge, en revanche, les circuits de tubes en U sont introduits après coup dans la partie évidée du pieu et les espaces restants sont comblés avec un matériau de soutien ou de remplissage présentant une bonne conductibilité thermique. Toutes les parties bétonnées en contact avec le sol peuvent être

utilisées en principe pour la production d'énergie, c'est-à-dire également les parois moulées dans le sol et les murs de soutènement.

Dans tous ces types de fondations, la tuyauterie est connectée au système de chauffage ou de refroidissement du bâtiment par un circuit hydraulique comportant une pompe à chaleur. De la sorte, le terrain portant l'immeuble est exploité en hiver comme producteur naturel de chaleur. En été, de tels systèmes peuvent être utilisés pour le refroidissement industriel, de même que pour une climatisation modérée. Dans ce cas, la chaleur dégagée par l'ouvrage construit est évacuée dans le sol et stockée en vue de son exploitation hivernale.

La capacité énergétique de pieux battus dans la terre, d'un diamètre de 40 cm, représente – en fonction de la distance entre les pieux et des paramètres de la nappe phréatique – 30 à 50 W de puissance thermique ou de froid, l'énergie acquise étant de 40 à 90 kWh par mètre de longueur de pieu énergétique et par année. Dans un sous-sol peu exploité, des puissances plus élevées sont parfois possibles. En règle générale, les pieux sont implantés en Suisse jusqu'à des profondeurs de 25 à 30 m. La distance idéale entre eux est de 4 à 6 m. Des distances plus petites engendrent des interactions négatives.

En matière de coût de l'énergie, la combinaison de l'exploitation du froid avec le chauffage est particulièrement économique. Au prix d'une planification minutieuse et d'une exécution soignée, une telle solution ne requiert pratiquement pas de maintenance. Ces avantages ont également convaincu le maître



570 pieux énergétiques exploitent le sous-sol situé sous un grand complexe industriel comme source de chaleur ou de froid. Par mètre de pieu énergétique actif, 35 kWh de chaleur sont produits en hiver pour le chauffage équipé d'une pompe à chaleur, et 40 kWh de froid en été pour le refroidissement des machines et des locaux

(Source: Lippuner & Partner AG, Grabs)

- 1 Pieux énergétiques
- 2 Conduites de connexion aux pieux
- 3 Collecteur des connexions aux pieux
- 4 Conduite principale
- 5 Centrale de production de froid

de l'ouvrage responsable de l'extension de l'aéroport de Kloten (projet Dock Midfield – Airport 2000). Les pieux de fondation imposés par les caractéristiques du sol seront équipés comme échangeurs thermiques.

Paramètres géologiques et hydrogéologiques déterminants sur le plan énergétique

- Caractéristiques géologiques des couches
- Evaluation de la conductibilité thermique et de la capacité de stockage thermique du terrain
- Température du sous-sol
- Profondeur de la nappe phréatique
- Vitesse et direction d'écoulement des eaux souterraines. Sur les sites sans échange notable avec les eaux souterraines, on enregistre une capacité prononcée de stockage. Dans de tels lieux, une régénération active peut s'imposer, par exemple en combinant les fonctions de chauffage et de refroidissement.

De quoi faut-il tenir compte dans la planification de systèmes de pieux énergétiques?

- Lors de l'analyse du sol de fondation, outre sa configuration mécanique, on en examinera les paramètres géologiques et hydrogéologiques. En effet, des sondages ultérieurs seraient très onéreux.
- Comme les pieux énergétiques sont implantés durant la première phase de construction, leur conception doit être définie dès une phase préliminaire du projet.
- Le pieu énergétique ne doit pas être exploité en dessous de la limite de risque de gel, puisque toute formation de gel à sa surface en affecte la stabilité dans le terrain.
- L'ensemble de l'enveloppe du bâtiment en contact avec le sol et toutes les conduites à découvert du système de pieux énergétiques requièrent une isolation thermique. A défaut, on accusera de sensibles déperditions thermiques, ainsi que la formation, en été, d'eau de condensation dans les caves.



Implantation du circuit de tubes en U dans un pieu évidé battu, en béton centrifuge
(Source: Sacac Schleuderbetonwerk AG, Lenzburg)



Montage d'une cage d'armature contenant les conduites nécessaires à un échangeur thermique pour une paroi moulée dans le sol
(Source: Photo Nägelebau, A-Röthis)

«Collecter en été pour l'hiver»

Stockage saisonnier de la chaleur et du froid

Dans l'exploitation géothermique, la chaleur terrestre n'est en fait que «consommée». En revanche, dans le cas du stockage thermique souterrain, nous assistons à un cycle périodique de charge et de décharge.



Pont sans formation de verglas, près de Därligen (A8): Le fluide caloporteur contenu dans les nappes de tubes incorporés dans le revêtement de la chaussée transporte de la chaleur en été dans le stock souterrain, disposé latéralement aux fondations du pont et composé de 91 sondes géothermiques (image du haut). Ce stock a un diamètre de 30 m, une profondeur de 65 m et représente avec les zones de bordure un volume de 55 000 m³ (en majeure partie du grès). 70 % environ de l'énergie collectée en été peut être utilisée en hiver pour dégivrer la surface du pont (image du bas)

(Source: Polydynamics Engineering, Männedorf)

Le cycle périodique de charge et de décharge permet l'exploitation combinée des stocks souterrains pour le chauffage et la climatisation. En hiver, de la chaleur est prélevée du stock souterrain et utilisée à des fins de chauffage en recourant à une pompe à chaleur. En été, on exploite les températures relativement basses du stock souterrain pour la climatisation, permettant ainsi de le recharger.

Le sous-sol possède de manière générale de très bonnes propriétés de stockage de la chaleur. Sa chaleur spécifique volumique est de 0,42 à 0,78 kWh/m³K et sa conductibilité thermique s'étend de 1 à 3 W/mK.

Les stocks souterrains «diffusifs» exploitent le sol saturé d'eau ou sec. Avec l'aide de capteurs solaires, de la chaleur solaire est stockée dans le sol en recourant à des champs de sondes géothermiques. Pour un stockage saisonnier, nous avons besoin en Suisse d'un volume de sol de 3 à 5 m³ par m² de surface de capteur solaire. A la place de l'énergie solaire, il est possible d'utiliser les rejets de chaleur d'exploitations industrielles. La distance entre les sondes peut varier de 2 à 6 m en fonction de la configuration du sol et de l'application utilitaire. De même, il est possible d'utiliser des installations de pieux énergétiques comme accumulateurs de chaleur et de froid.

Par analogie, dans le cas du «stockage en aquifère», de l'énergie solaire ou des rejets de chaleurs sont collectés dans un terrain aquifère approprié. En hiver, la chaleur stockée est à disposition à des fins de chauffage. Les coûts d'investissement d'un stockage en aquifère sont nettement moindres que ceux d'un stock souterrain diffusif.

Les conditions climatiques régnant dans notre pays sont particulièrement favorables à un stockage de chaleur, respectueux de l'environnement. Le stockage saisonnier d'énergie aura donc un rôle important à jouer à l'avenir.

Applications pratiques

Il existe actuellement quelque 15 installations de stockage saisonnier en Suisse. Un exemple classique est le stockage souterrain diffusif du Collège de Peseux à Neuchâtel. Il est composé de 30 sondes géothermiques d'une longueur de 60 m, exploitant un volume de terrain de 22 500 m³.

Pour des raisons de sécurité, les routes, ponts, rampes de chargement, etc. doivent être maintenus libres de tout verglas, passagèrement ou continuellement. Les

stockages souterrains s'y prêtent parfaitement. En été, les surfaces extérieures sont fortement réchauffées par le soleil. Cette énergie est stockée dans le sol et utilisée en hiver pour lutter contre le verglas.

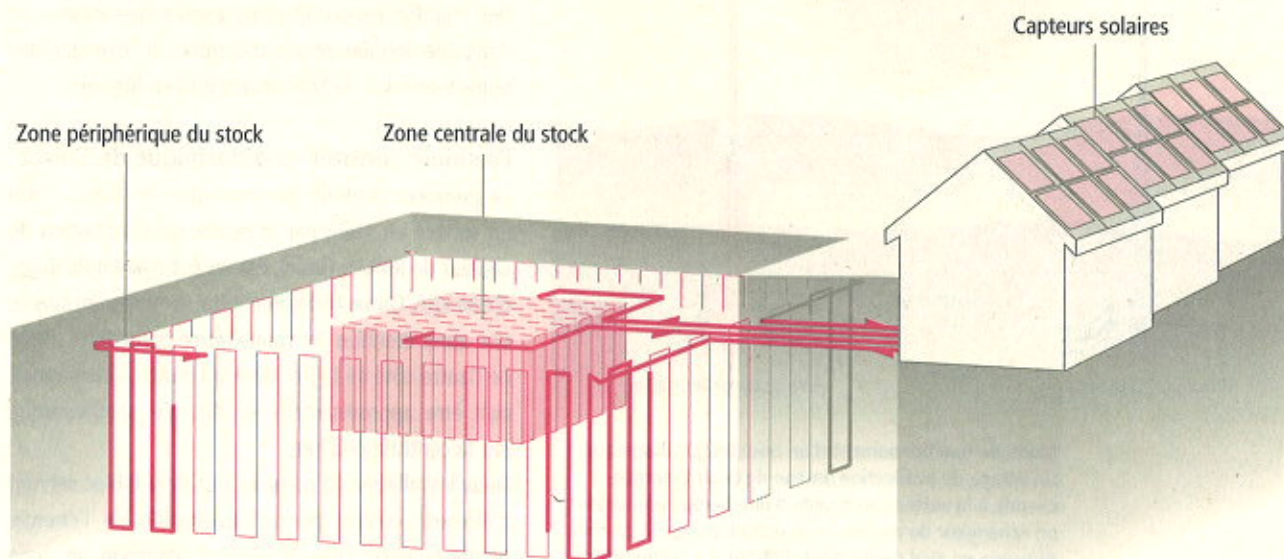
Une telle installation de grande envergure évite la formation de verglas sur un pont de l'autoroute A8 près de Därligen, peu avant Interlaken. Elle travaille sans pompe à chaleur. Dans le passé, la formation de verglas a causé de nombreux accidents à cet endroit. Autre avantage de la solution adoptée: la chaussée est refroidie en été du fait du soutirage de chaleur, ce qui empêche la formation de fissures dans le revêtement en asphalte.

Stockage de chaleur: facteurs d'influence

- Température moyenne du stock: la perte de chaleur est proportionnelle à la température du stock souterrain par rapport à son environnement; d'autre part, les stocks présentant des températures basses requièrent une pompe à chaleur.
- Rapport surface/volume du stock: plus ce rapport est petit, moins la déperdition de chaleur est importante par rapport à la chaleur totale stockée.
- Isolation thermique: une couche d'isolation artificielle est nécessaire pour les stocks souterrains jusqu'à une profondeur de 20 m.

Mise en service	1996
Volume	22 500 m ³
Profondeur	60 m
Température	entre 6 et 18 °C
Captage	par 30 sondes géothermiques
Recharge (en été)	par 300 m ² d'absorbeurs solaires non vitrés
Capacité de stockage	130 000 kWh
Puissance thermique de la pompe à chaleur (le courant est produit par la centrale chaleur-force du collège)	60 kW
Efficacité annuelle	95 %

Exemple: stockage souterrain du Collège de Pesex à Neuchâtel

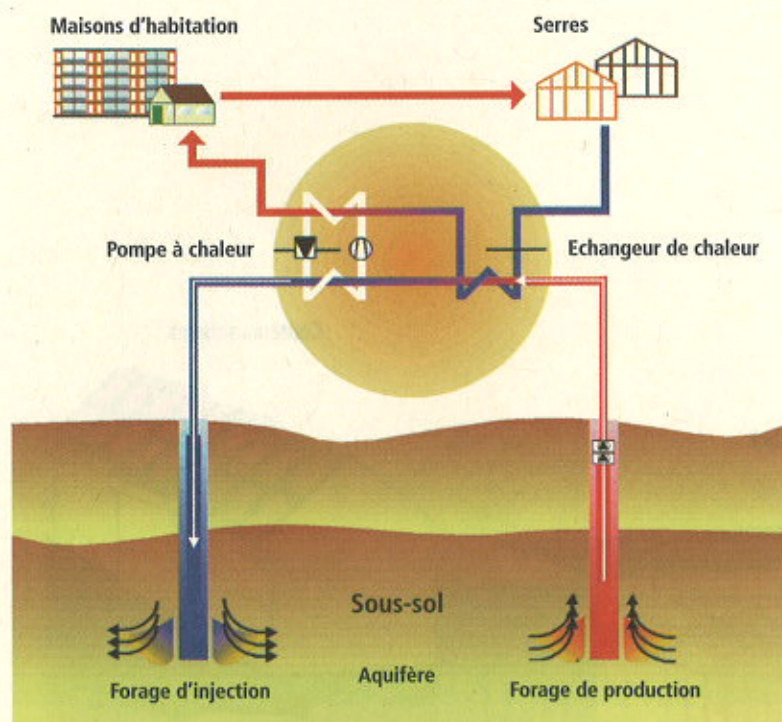


Stock souterrain saisonnier: l'accumulateur de chaleur est constitué de tubes verticaux, soit montés dans des forages, soit battus directement dans le sol. Les tubes qui transportent le fluide caloporteur sont connectés en série ou en parallèle

Chauffer à l'eau thermale

Géothermie hydrothermale

Les bains thermaux sont certainement la forme la plus ancienne d'exploitation de l'énergie géothermique. Alors que l'on exploitait initialement les sources d'eau chaude jaillissant en surface, on n'a pas tardé à en augmenter tant le débit que la température en effectuant des sondages et en construisant des puits. Des forages géothermiques profonds permettent de nos jours de pomper de l'eau thermale à la surface et de l'exploiter à diverses fins de chauffage selon le principe de l'utilisation en cascades.



Mode de fonctionnement d'un doublet géothermique:
Un forage de production amène de l'eau thermale chaude à la surface au moyen d'une pompe immergée; un échangeur de chaleur ainsi qu'une pompe à chaleur disposée en aval permettent d'obtenir la température de chauffage désirée. Le circuit de chauffage alimente le consommateur par une conduite de chauffage à distance. L'eau refroidie est restituée à l'aquifère par un forage d'injection

(Source: Erdwärme Neustadt-Glewe GmbH, Schwerin [Allemagne])

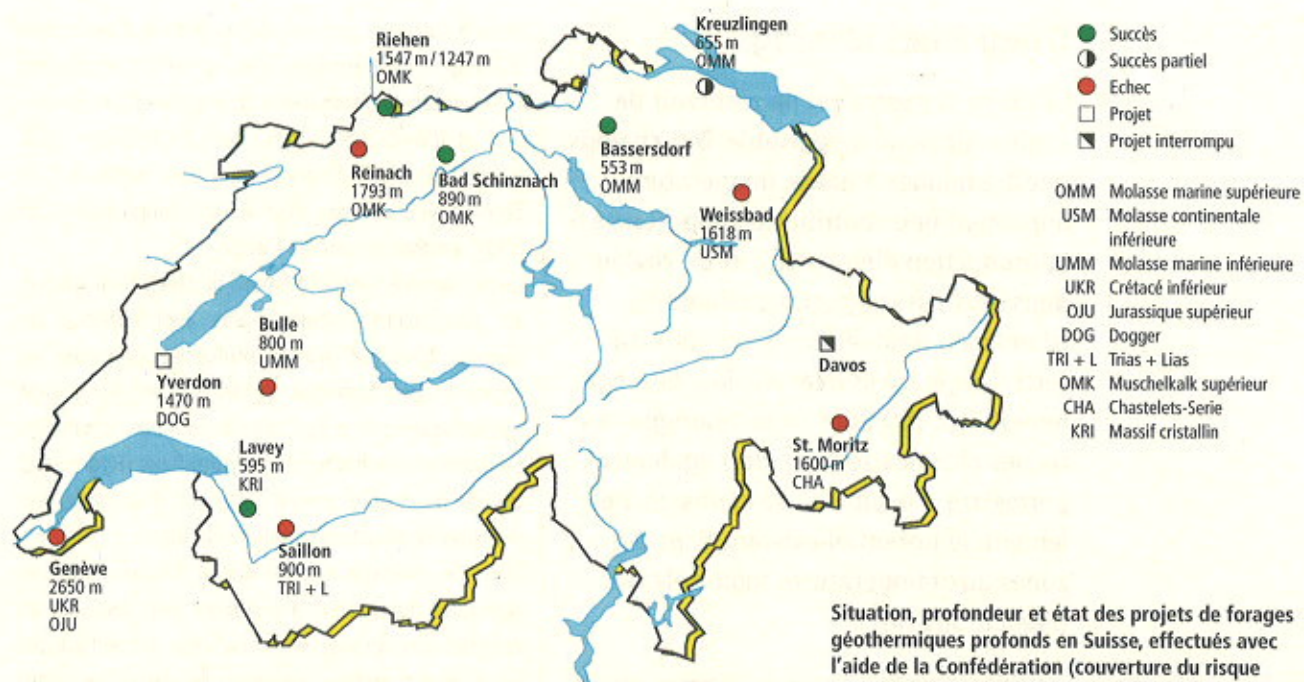
Si les eaux souterraines profondes ne sont que faiblement minéralisées (moins de 2 g/l) et s'il est possible d'évacuer l'eau refroidie après l'extraction thermique dans un exutoire – cours d'eau ou lac –, un seul forage de production suffira alors (forage singlet). Si la teneur minérale dépasse 2 g/l, un second forage est nécessaire pour réinjecter l'eau refroidie dans les profondeurs (doublet). De 1987 à 1998, 12 forages profonds ont été effectués en Suisse, opérations facilitées par la couverture du risque accordée par la Confédération. Cinq succès ont été enregistrés en tout, ainsi qu'un succès partiel et six échecs au sens de la garantie accordée, à savoir des forages «secs» ou d'un débit trop faible. Des six forages non concluants, deux ont toutefois pu être exploités à des fins géothermiques, à savoir le forage de Weissbad, Appenzell, en utilisant une sonde géothermique «profonde», et celui de Saillon en Valais exploitant l'eau thermale rencontrée, bien que d'un débit modeste.

Les forages profonds couronnés de succès ont pour objet principal une exploitation énergétique judicieuse. Dans le cas de l'approvisionnement en eau pour stations thermales, il conviendrait par exemple de procéder selon le principe de l'usage en cascades. Après exploitation de l'eau pour les bains proprement dits (avec des températures décroissantes), il faut chauffer les installations de cure elles-mêmes, et dans une dernière phase, des serres, à l'exemple des bains thermaux de Schinznach Bad en Argovie.

Première centrale géothermique de Suisse

La première centrale géothermique de Suisse, mise en service en 1994 par le réseau de distribution de chaleur de Riehen (Bâle), est un autre exemple digne d'être cité. Outre 160 immeubles sur territoire suisse, une zone étendue de nouvelles constructions située de l'autre côté de la frontière, à Lörrach (Allemagne), doit être approvisionnée en énergie géothermique par la centrale précitée.

Deux installations à pompes à chaleur bibloc servent d'élément central pour l'exploitation de l'énergie géothermique. Elles consistent chacune en une pompe à chaleur entraînée électriquement et en une centrale de cogénération chaleur-force. L'exploitation des eaux souterraines profondes est réalisée par deux forages verticaux (doublet) distants de 1 km.



Situation, profondeur et état des projets de forages géothermiques profonds en Suisse, effectués avec l'aide de la Confédération (couverture du risque par l'Office fédéral de l'énergie 1987-1998)

(Source: Office fédéral de l'énergie, Berne)

Site	Profondeur (m)	Température de production (°C)	Débit (l/s)	Puissance en tête de forage avec un refroidissement à 10°C (kW)
Kreuzlingen	655	26,5	3,7	255
Bässersdorf	553	22,9	4,3	232
Schinznach Bad	890	44,5	8,3	1198
Riehen	1547	62	20	4351
Lavey-les-Bains	595	69	25	6172
Yverdon-les-Bains (forage en cours)	1470	au moins 50	au moins 6,0	au moins 1000

Forages géothermiques profonds utilisables (1987-1998)

Forage 1 (production)	1547 m
Forage 2 (injection)	1247 m
Température des eaux souterraines profondes	64 °C
Température de production	62 °C
Débit	20 l/s
Minéralisation	18,2 g/l
Nombre de consommateurs de chaleur	160 immeubles
Rendement thermique annuel tiré du circuit géothermique (période de mesure 1996/97)	22,8 GWh

Caractéristiques de l'exploitation géothermique de Riehen



Essai de pompage de longue durée du sondage profond de Lavey-les-Bains

De la chaleur à grande profondeur

Deep Heat Mining

Le globe terrestre est un réservoir de chaleur presque inépuisable. Des champs géothermiques à haute température apportent une contribution importante à la production d'électricité et de chaleur dans plusieurs pays, par exemple en Islande, en Italie et aux Etats-Unis. La technologie Deep Heat Mining, dite également Hot Dry Rock (= technologie des roches chaudes sèches), doit également permettre d'exploiter, du moins partiellement, le potentiel existant dans des zones aux températures moins élevées (France, Suisse).



Test de production de l'installation-pilote Hot Dry Rock à Soultz-sous-Forêts (Alsace) en été 1995: production de vapeur avec une température excédant 140°C
(Source: SOCOMINE, France)



Nous entendons par Deep Heat Mining l'extraction d'énergie géothermique d'un réservoir souterrain créé artificiellement en vue de la production de chaleur et d'électricité. L'utilisation de machines ORC (Organic Rankine Cycle) permet une production de courant économique déjà à des températures de 100°C environ en tête de forage.

Le principe de fonctionnement du Deep Heat Mining est relativement simple. Après avoir effectué un premier forage à grande profondeur, on crée un réservoir géothermique souterrain en élargissant hydrauliquement les systèmes de fractures naturelles. La technique de fracturation hydraulique (Hydro-frac) utilisée à cet effet prévoit l'injection d'eau sous une pression de plusieurs centaines de bars.

Dans le réservoir géothermique fissuré, l'eau se réchauffe, puis revient à la surface de la terre par un ou plusieurs forages de production. Un échangeur de chaleur transfère l'énergie à un deuxième circuit alimentant un turbogénérateur pour produire de l'électricité. Une grande partie de la chaleur résiduelle peut être injectée dans un réseau de chauffage à distance. Un puits d'injection complète le circuit fermé et restitue l'eau refroidie au réservoir.

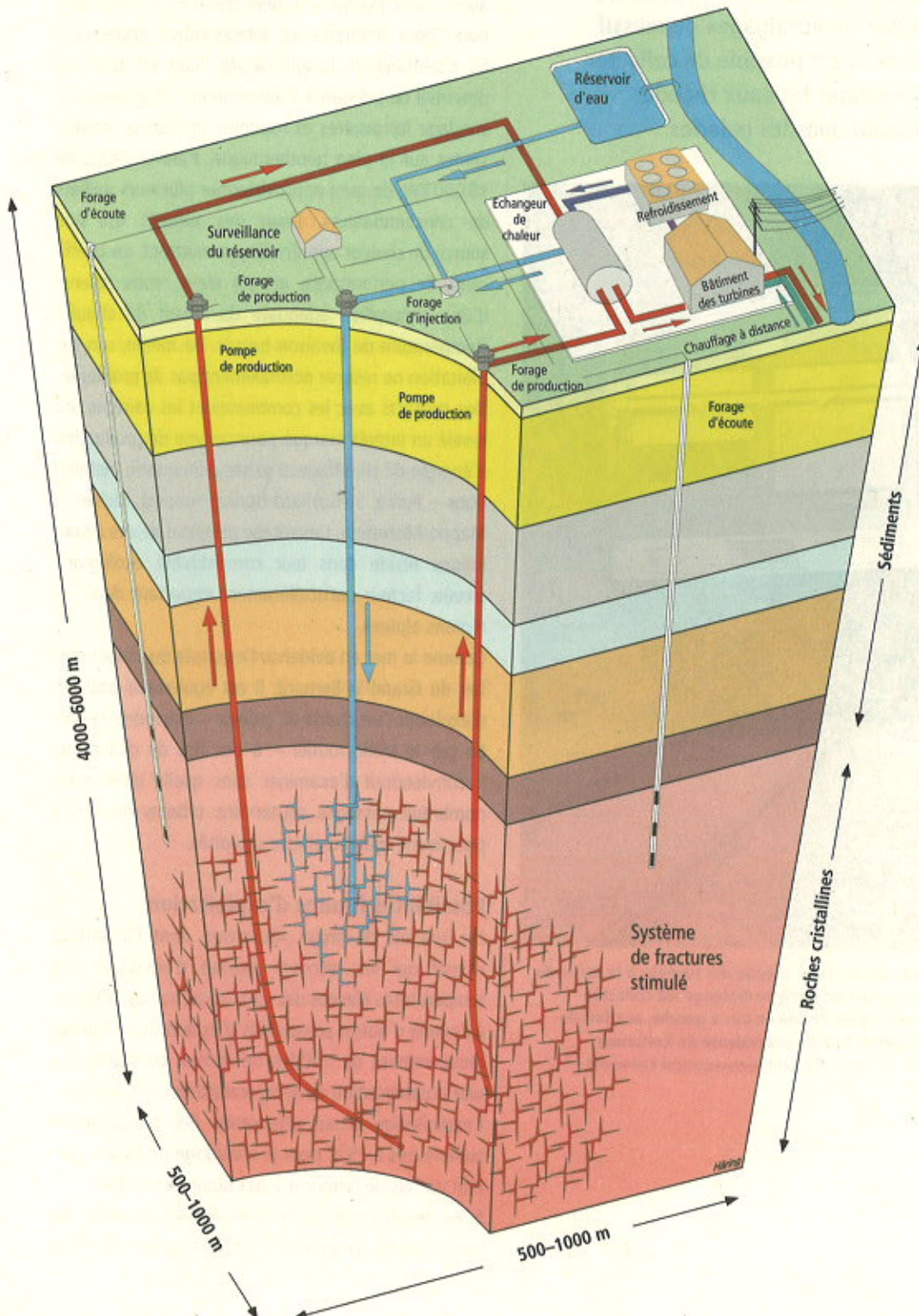
Une installation-pilote Hot Dry Rock a été construite à Soultz-sous-Forêts en Alsace et testée à plusieurs reprises. La production de vapeur est prometteuse.

Un projet d'installation-pilote est également étudié intensivement en Suisse. Il prévoit un puits d'injection central et deux puits de production latéraux qui atteindraient des roches à une profondeur de 5000 m. L'objectif est de réaliser une production d'électricité de 20 000 MWh ainsi qu'une production de chaleur de 100 000 MWh par année. Un critère important dans le choix du site de l'installation-pilote est la prise en charge garantie de la chaleur résiduelle à des fins de chauffage, justifiant la production d'électricité sur le plan économique.

Résultats de l'étude Deep Heat Mining: sites possibles pour une installation Hot Dry Rock en Suisse
(Source: Häring GeoProject, Steinmaur)

10 raisons en faveur de la technologie Deep Heat Mining

- Couplage chaleur-force sans production de CO₂
- Source d'énergie autonome par rapport à l'heure de la journée, aux saisons et aux variations climatiques
- Potentiel presque inépuisable
- Souplesse de fonctionnement
- Cheminement réduit des fluides en surface
- Incidence minimale sur l'environnement
- Faible encombrement en surface
- Énergie indigène
- Création de savoir-faire susceptible d'être exporté
- Impulsion novatrice pour la Suisse



Principe Hot Dry Rock:
La production de chaleur est réalisée par un circuit hydraulique fermé. Une pompe d'injection injecte de l'eau (bleu) dans un réservoir de chaleur. L'eau se réchauffe dans les roches fissurées, pour ensuite être remontée à la surface (rouge). Un échangeur de chaleur extrait l'énergie aux fins de production de courant électrique et de chaleur

(Source: Häring GeoProjet, Steinmaur)

Une ressource énergétique locale importante

Exploitation de l'eau chaude des tunnels

Avec plus de 700 tunnels ferroviaires et routiers, la Suisse est au monde l'un des pays les plus riches en ouvrages de ce genre. Comme les tunnels font pour ainsi dire un « drainage » du massif traversé, il est possible de collecter et d'exploiter les eaux chaudes s'écoulant dans les galeries.



Exploitation de l'eau chaude des tunnels: à la sortie du tunnel du Ricken, l'eau de drainage est collectée dans une rigole, visible en bas à gauche, aux fins de chauffage de la salle polyvalente de Kaltbrunn

(Source: illustration NOK, Nordostschweizerische Kraftwerke)

La chaleur de l'eau d'un tunnel peut être utilisée à des fins de chauffage, lorsque des consommateurs potentiels sont localisés à proximité de la sortie de la galerie: ils ne devraient pas être éloignés de plus de 1,5 km. La distribution de chaleur est réalisée par des réseaux de proximité. Selon la température des eaux contenues dans le massif, il est nécessaire de faire appel à une pompe à chaleur (centrale ou décentralisée) pour atteindre les températures nécessaires au chauffage de locaux ou de l'eau sanitaire. Le potentiel de puissance thermique des 16 galeries de sondage ferroviaires et routières de Suisse, intéressantes sur le plan géothermique, s'élève à plus de 16 000 kW, de quoi approvisionner plusieurs milliers de consommateurs. L'eau des tunnels est une source de chaleur appréciable, permettant un coefficient de performance annuel élevé, sous réserve d'une conception adéquate du circuit de chauffe (température de livraison basse). De même, son exploitation ne réserve normalement pas de problème. Des contacts avec les communes et les cantons ont révélé un intérêt marqué pour ce type de production d'énergie de chauffage. Il existe déjà quatre installations – Furka, St-Gothard (tunnel routier), Ricken et Mappo-Morettina. L'avantage principal de ces installations réside dans leur compatibilité écologique élevée, facteur particulièrement important dans les régions alpines.

Comme le met en évidence l'exemple du tunnel routier du Grand-St-Bernard, il est également possible d'exploiter l'air chaud de galerie – engendré en partie par le trafic routier – à des fins de chauffage. Il conviendrait d'examiner dans quelle mesure les nombreux passages souterrains urbains de Suisse pourraient également être exploités.

Possibilités futures d'exploitation

Les tunnels du projet AlpTransit, dont l'important massif qui les recouvre permet d'envisager des températures élevées des eaux souterraines, offriront à l'avenir d'autres possibilités d'exploitation. Pour un recouvrement de 1000 m de roches, on s'attend à une augmentation de température de 30°C environ. L'exploitation d'eau présentant des températures supérieures à 25°C pour le chauffage de locaux permet parfois de renoncer à des pompes à chaleur.

Selon les dispositions de la protection des eaux, les eaux chaudes de tunnel doivent être fortement refroidies.

dies de manière permanente dans des bassins d'évaporation, avant de se déverser dans un exutoire ou dans les canalisations publiques. Pour remédier à cette «destruction d'énergie» onéreuse, il est plus intéressant, sur le plan économique, d'en exploiter les calories en utilisant des échangeurs thermiques et des pompes à chaleur. Les premières recherches ont démontré qu'il existe des consommateurs de chaleur potentiels à proximité de la sortie des deux tunnels du projet AlpTransit. Des interventions parlementaires ont déjà demandé que l'on exploite la chaleur des eaux de tunnel.

Quel est l'intérêt de l'exploitation des eaux chaudes de tunnel?

- **Débit d'eau sortant du tunnel:** les tunnels examinés présentent des débits de 360 (Ascona) à 24 000 litres par minute (Grenchenberg).
- **Température:** le potentiel de puissance thermique est proportionnel à la température de l'eau. Les eaux des tunnels utilisables présentent des températures de 15 °C en moyenne jusqu'à 24 °C maximum, par exemple dans la galerie de sondage du Rawyl.
- **Distance par rapport aux consommateurs de chaleur:** les investissements nécessités par la distribution de la chaleur augmentent avec la distance entre la source et le consommateur.
- **Respect de l'environnement:** c'est l'avantage principal des installations prévues, car les prix du combustible de chauffage sont extrêmement bas actuellement.



Tunnels avec potentiel géothermique

(Source: Office fédéral de l'énergie, Berne)

Tunnel	Débit d'eau (l/min)	Température de l'eau (°C)	Potentiel de puissance thermique avec un refroidissement à 10 °C (kW)
Raccordement vallée de la Viège	1 200	16	501
Ascona	360	12	50
Installation de la Furka à Oberwald	5 400	16	2 255
Frutigen (galerie de sondage)	800	20	557
Gotthard (y compris avant-tunnel)	7 200	15	2 506
Grenchenberg	24 000	13	5 011
Hauenstein, tunnel de base	2 500	19	1 566
Isla Bella	800	14,7	262
Lötschberg	731	12	102
Mappo-Morettina, installation nord	983	16	411
Mauvoisin (galerie-pilote de Riddes)	600	20	418
Polmengo (galerie de sondage)	600	20	418
Rawyl (galerie de sondage)	1 200	24,3	1 194
Installation du Ricken	1 200	11,9	159
Simplon (sortie nord)	1 200	12 à 14	272
Vereina, nord	2 100	17	1 024
Total			16 706

Potentiel de puissance thermique de tunnels ferroviaires, routiers et galeries de sondage intéressants sur le plan géothermique (calculé à la sortie du tunnel et sans utilisation d'une pompe à chaleur)

Glossaire

Aquifère: volume de roche meuble ou indurée perméable, contenant une nappe d'eau souterraine. Les aquifères d'eau thermale présentent un intérêt particulier pour l'exploitation géothermique.

Centrale de cogénération chaleur-force: installation à couplage chaleur-force; construction compacte, à faible encombrement (cf. également «Couplage chaleur-force»).

Chaleur spécifique volumique: caractéristique d'un matériau ou d'un stock d'absorber de la chaleur ou de la restituer. Pour les matériaux, la chaleur spécifique volumique est indiquée en kWh/m³K.

Coefficient de performance annuel (COP): production d'énergie thermique de la pompe à chaleur par année, divisée par la consommation d'électricité du compresseur et de la pompe de circulation. La consommation d'électricité est inversement proportionnelle au COP mesuré. Un bon COP possède une valeur supérieure à 4.

Colonne de production: conduite verticale disposée dans un forage, servant à pomper le fluide caloporteur en surface.

Conductibilité thermique: propriété physique d'un matériau (roche, acier, matière synthétique, etc.) de transporter l'énergie thermique (chaleur).

Couplage chaleur-force: production combinée de chaleur (chaleur de chauffage ou de processus) et de force (pour la production d'électricité). Une installation à couplage chaleur-force peut fournir prioritairement de la chaleur ou de l'électricité.

Coûts externes: ils regroupent les préjudices causés à la santé, au matériel, à la forêt, au paysage et par le transport, ainsi que d'éventuels frais de prévention et inhérents à l'effet de serre. Des écobilans permettent de les recenser (cf. également «Ecobilans»).

Doublet: forage de production et forage d'injection d'une installation géothermique.

Echangeur de chaleur: il sert au transfert de chaleur d'un agent caloporteur à un autre.

Ecobilans: ils ont pour objet le relevé de la charge écologique imputable à un produit, un processus ou une exploitation. Selon les recommandations de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) pour des calculs de rentabilité énergétique prenant en considération les coûts externes, un supplément de 4,5 centimes par kWh pour le mazout et de 3 centimes par kWh pour le gaz doit être ajouté aux prix actuels de l'énergie.

Efficacité d'un stock souterrain: rapport entre la quantité de chaleur extraite et celle qui est injectée par année, en pour cent.

Fluide caloporteur: il s'agit d'un liquide ou d'un mélange liquide (saumure, antigel) servant au transfert de la chaleur dans une sonde ou une nappe de tubes. Pour les pieux énergétiques, qui ne devraient pas être exploités en dessous de la limite de risque de gel afin d'éviter des dommages, on utilise de l'eau pure comme fluide caloporteur.

Fondations sur pieux: lorsque la résistance existant à la surface du sol ne suffit pas pour admettre la charge d'un bâtiment sans tassements (fissuration), les forces mécaniques sont réparties dans le sol sur des surfaces plus grandes (pieux de fondation) ou transférées dans des couches souterraines plus profondes et plus stables (pilotis).

Forage singlet: forage unique de production d'une installation géothermique.

HDR (Hot Dry Rock), Technologie ~: des fractures sont créées sous pression hydraulique dans des roches chaudes sèches. Ensuite, l'eau froide injectée se réchauffe et peut être utilisée pour la production d'électricité.

Installation de pompe à chaleur bibloc: pompe à chaleur dont l'évaporateur est séparé du reste du groupe.

ORC (Organic Rankine Cycle), Machines ~: circuit secondaire fermé avec fluide caloporteur à faible point d'ébullition pour la production d'électricité par turbina. Le transfert de chaleur du cycle primaire, c'est-à-dire du circuit d'eau souterraine, est réalisé par un échangeur de chaleur.

Pompe à chaleur: une source d'énergie de haute valeur, par exemple l'électricité, permet de porter une basse température, par exemple la chaleur du sous-sol, à un niveau plus élevé, pour l'utiliser aux fins de chauffage et de préparation d'eau sanitaire. Une pompe à chaleur est en principe composée d'un évaporateur, d'un compresseur, d'un condenseur et d'un dispositif de détente.

Profondeur du niveau piézométrique: distance verticale entre la surface du sol et le niveau de la nappe phréatique.

Recharge thermique: apport de chaleur supplémentaire dans le sous-sol, par exemple de l'énergie solaire ou des rejets de chaleur, pour en éviter le refroidissement excessif.

Sonde double en U: deux tubes en U implantés dans un forage, à l'intérieur desquels circule un fluide caloporteur.

Supplément sur le prix de l'énergie: supplément comptable sur le prix marchand du mazout et du gaz, pour tenir compte des coûts externes. De nombreux cantons et communes exigent la prise en considération des coûts externes dans les calculs de rentabilité pour les adjudications publiques.

Température de livraison: dans le circuit de chauffage, température mesurée à la sortie de la pompe à chaleur. Des températures de livraison basses (35 à 40°C) constituent une condition pour réaliser de bons coefficients de performance annuels (COP).

Utilisation en cascade: extraction par étapes de la chaleur à des niveaux décroissants de température. Par exemple: station thermale → chauffage des locaux → chauffage d'une serre.

Adresses utiles

- Office fédéral de l'énergie (OFEN),
M. Brunner et F. Rognon
Monbijoustrasse 74, 3003 Berne
tél. 031/322 56 11, fax 031/323 25 00
Homepage <http://www.admin.ch/bfe>
- Direction du programme Géothermie,
Dr H.L. Gorhan
c/o Electrowatt Engineering AG,
Bellerivestrasse 36, case postale, 8034 Zurich
tél. 01/385 27 33, fax 01/385 26 54,
Homepage <http://www.geothermal-energy.ch>
(dès l'automne 1998)
- Institut für Geophysik, ETHZ, Prof. Dr L. Rybach
ETH-Hönggerberg, 8093 Zurich
tél. 01/633 20 76, fax 01/633 10 65,
Homepage <http://www.gtr.geophys.ethz.ch>
- Centre d'hydrogéologie (CHYN),
Dr F.-D. Vuataz
Université de Neuchâtel
11, rue Emile-Argand, 2007 Neuchâtel
tél. 032/718 26 92, fax 032/718 26 03
Homepage <http://www-deep-heat-mining.unine.ch>
- Energie 2000/P&D-Information
c/o Nova Energie GmbH
Schachenalle 29, 5000 Aarau
tél. 062/834 03 00, fax 062/834 03 23
- ENET. Administration et distribution
Thunstrasse 9, case postale 130, 3000 Berne 6
tél. 031/350 00 05, fax 031/352 77 56
- Groupement promotionnel suisse pour les pompes
à chaleur (GSP)
Lagerstrasse 1, 8021 Zurich
tél. 01/299 41 68, fax 01/299 41 40
- Groupement pompes à chaleur (AWP)
Konradstrasse 9, case postale 7190, 8023 Zurich
tél. 01/271 90 90, fax 01/271 92 92
- Direction du programme de recherche chaleur
ambiante, rejets de chaleur, couplage
chaleur-force (UAW), Prof. Dr M. Zogg
Kirchstutz 3, 3414 Oberburg
tél. 034/422 07 85, fax 034/422 69 10
- Société Suisse pour la Géothermie (SSG)
c/o Büro Inter-Prax, Dufourstrasse 87, 2502 Bienne
tél./ fax 032/341 45 65
- Services cantonaux de l'énergie
- Offices cantonaux de la protection des eaux

Matériels d'information

Office fédéral de l'énergie

- «L'énergie notre préoccupation»:
No de commande OCFIM: 805.690 f
 - «Les programmes par domaines techniques énergétiques»:
No de commande OCFIM: 805.829 f
 - «Le chauffage par pompe à chaleur. Une utilisation
sûre, propre et efficace de l'énergie renouvelable de
l'environnement»:
No de commande OCFIM: 805.067 f
- Distribution: OCFIM, 3000 Berne, fax 031/992 00 23
- «Pour un calcul de la rentabilité énergétique incluant
les coûts externes»
- Distribution: Office fédéral de l'énergie,
3003 Berne, fax 031/323 25 10

Société Suisse pour la Géothermie (SSG)

- «Géothermie – CH»: bulletin paraissant trois fois par an
- Distribution: Secrétariat SSG,
2502 Bienne, fax 032/341 45 65

Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP)

- Liste d'adresses des services de consultation des
compagnies d'électricité
- Subventions cantonales et avantages fiscaux
pour pompes à chaleur
- «Le chauffage par pompe à chaleur»:
brochure pour maîtres d'ouvrages et propriétaires
d'immeubles
- Liste des partenaires spécialisés pour installations
de chauffage avec pompes à chaleur

Distribution: GSP, 8021 Zurich, fax 01/299 41 40

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)

- «Directives pour l'exploitation de la chaleur au moyen
de sondes géothermiques fermées»

Distribution: OFEFP, service de documentation, 3003 Berne
fax 031/324 02 16

Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA)

- «Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme
für Heizsystem»: documentation SIA D 0136
(disponible seulement en allemand)

Distribution: SIA, 8039 Zurich, fax 01/201 63 35

Verein Deutscher Ingenieure (VDI)

- «Thermische Nutzung des Untergrundes»:
norme VDI 4640
Notice 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte
Notice 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

Distribution: VDI-Gesellschaft Energietechnik,
Postfach 101139, D-400002 Düsseldorf