

## L'énergie géothermique: la chaleur, le froid et l'électricité tirés du sous-sol



Dr. François-D. Vuataz  
**Chargé d'enseignement et consultant en géothermie**  
Université de Neuchâtel

## L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE: LA CHALEUR, LE FROID ET L'ÉLECTRICITÉ TIRÉS DU SOUS-SOL

### Contenu

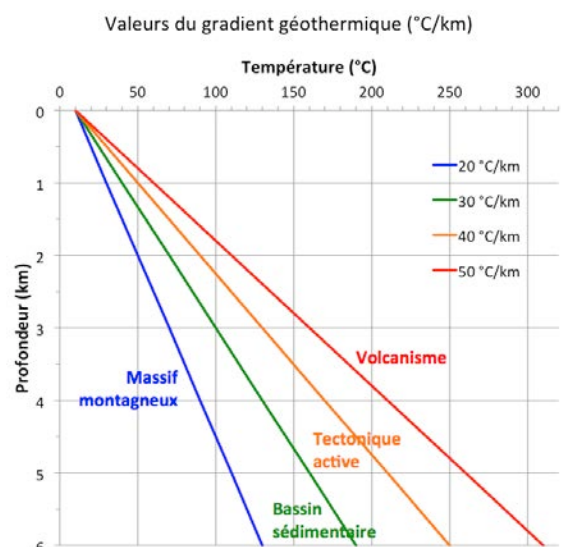
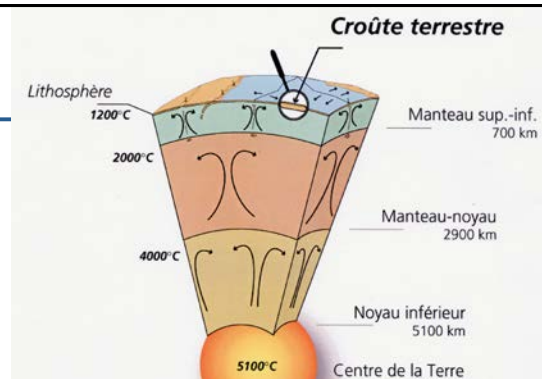
- ✓ *Introduction et origine de la chaleur*
- ✓ *Utilisation directe de la chaleur extraite*
- ✓ *Utilisation indirecte de la chaleur : conversion en électricité*
- ✓ *Applications géothermiques en Suisse*
- ✓ *Avantages et limites de l'énergie géothermique*
- ✓ *Potentiel de la géothermie*

Modes de production d'électricité et puissance des centrales dans le monde

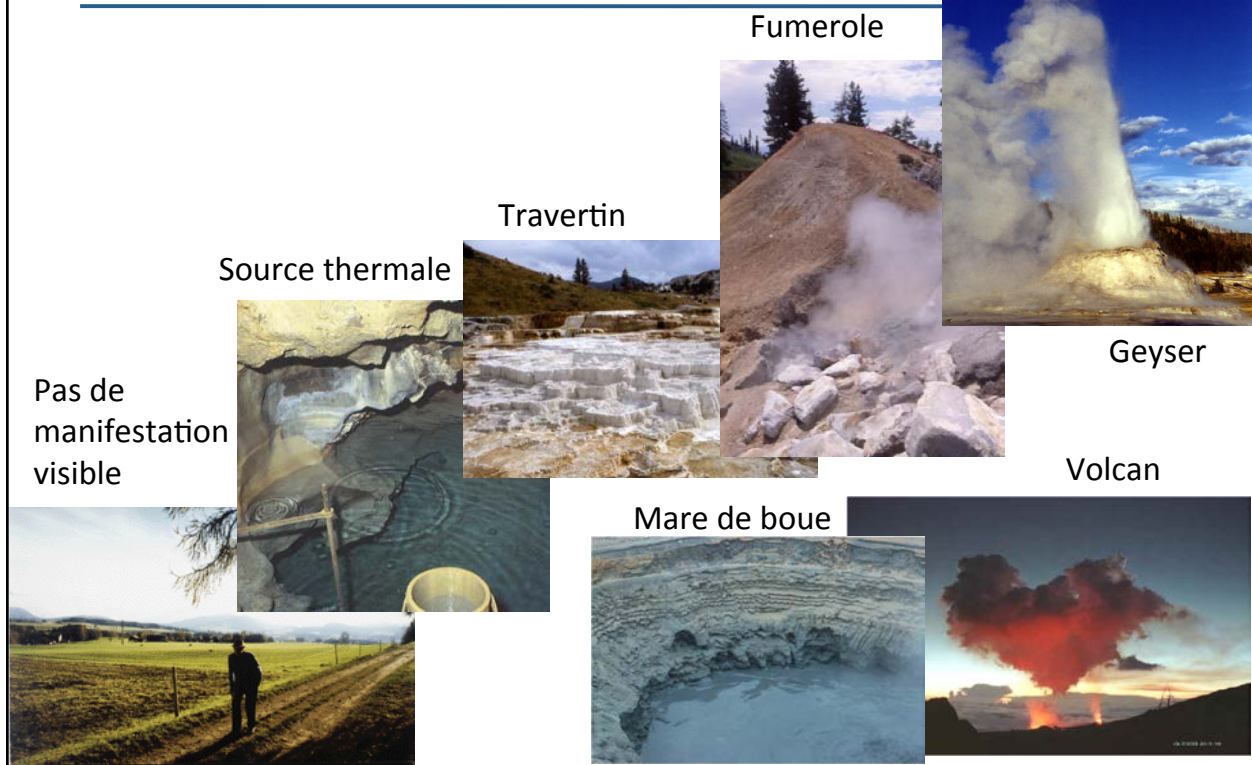
Type de centrale	Electricité en 2012 (%)	Puissance des plus grosses centrales (MWe)
Thermique à combustible fossile (gaz, charbon, fuel, schistes bitumineux)	68	5'800 (Chine)
Hydraulique (lac de barrage ou au fil de l'eau) Mini-hydraulique	16	22'500 (barrage 3-Gorges, Chine) 1 – 10
Nucléaire	11	8'200 (Japon)
Vent	2.4	5'200 (Chine)
Biomasse	1.4	750 (UK)
Solaire PV	0.5	550 MW-crête (USA)
<b>Géothermie</b> - Turbine géothermique - Champ géothermique	0.3	132 (Nlle Zélande) 1'600 (USA)

ORIGINE DE LA CHALEUR DE LA TERRE

- 62 % de la chaleur émise par notre planète a pour origine la décroissance des éléments radioactifs contenus dans les minéraux des roches (famille de l'uranium) de la croûte terrestre. L'autre partie vient du refroidissement du manteau et du noyau.
- 99 % de la masse de la Terre est à plus de 1000 °C et seulement 0.1 % est plus froid que 100 °C !
- Le flux de chaleur qui remonte continuellement de l'intérieur de la Terre atteint environ 42x10<sup>9</sup> Watts. Cela représente 50'000 fois l'énergie de toutes les ressources mondiales de pétrole et de gaz.
- Gradient géothermique moyen = 30°C/km (3°C/100 m). Il représente l'accroissement moyen de la température avec la profondeur dans les premiers.
- La **géothermie** représente la chaleur de la Terre qui peut être utilisée comme énergie.

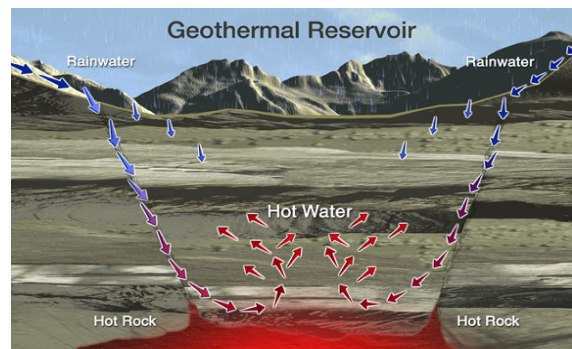


## CHALEUR DE LA TERRE: MANIFESTATIONS DE SURFACE



## EXTRACTION DE LA CHALEUR DE LA TERRE

- Pour extraire la chaleur des roches et l'apporter à la surface >>> Nécessité d'un fluide caloporteur.
- Recherche de fluides contenus dans les formations rocheuses >>> Prospection des aquifères.
- Fluide existant dans le sous-sol avec une perméabilité suffisante >>> Aquifère productif.
- Pas de fluide ou s'il n'est pas mobilisable (roches très peu perméables):
  - Ouvrir des fissures par stimulation pour créer un échangeur de chaleur souterrain.
  - Installer un échangeur de chaleur dans le forage.



### Potentiel d'énergie libérée

Exemple: bloc de granite de 1 km<sup>3</sup> refroidi de 200 à 180 °C pour l'exploitation:

- = 10 MW électriques pendant 20 ans.
- = Energie électrique de 10'000 habitants.
- = Equivalent annuel de chauffage de 350'000 logements.



Usages	Domaine de température (°C)
<b>Industriel</b> pâte à papier, ciments, évaporation, réfrigération, séchage, distillation, alimentation, chauffage	<b>100 -&gt; 150</b>
<b>Chauffage direct avec l'eau</b> Réseau de chauffage à distance (CAD), serres, locaux divers, dégivrage de routes et d'édifices	<b>50 -&gt; 100</b>
<b>Chauffage direct avec l'eau</b> balnéologie, thermalisme, pisciculture, petits CAD pour des éco-quartiers	<b>10 -&gt; 50</b>
<b>Chauffage indirect avec pompe à chaleur</b> Habitations privées, bâtiments industriels, locaux divers, petits CAD pour des éco-quartiers	<b>10 -&gt; 50</b>

## EXEMPLES D'UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR (1)



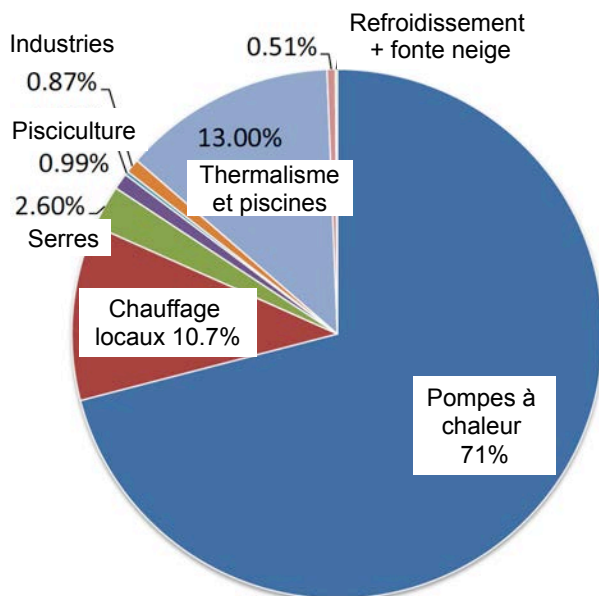
## EXEMPLES D'UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR (2)



## Exemples de centrales géothermiques pour du chauffage urbain en Hongrie



## USAGES DIRECTS DE LA GÉOTHERMIE DANS LE MONDE



Sous notre climat, une puissance de 1 MWth (MégaWatt thermique) permet d'assurer le chauffage d'env. 200 équivalents-logements.

## Production de chaleur géothermique et puissance installée dans les premiers pays (Lund & Boyd, 2015)

Rang	Pays	Puissance installée (MWth)	Production (GWh/an)
1 <sup>er</sup>	Chine	17'870	48'430
2 <sup>e</sup>	USA	17'420	21'070
3 <sup>e</sup>	Suède	5'600	14'420
4 <sup>e</sup>	Turquie	2'890	12'540
5 <sup>e</sup>	Allemagne	2'850	5'430
6 <sup>e</sup>	France	2'350	4'410
9 <sup>e</sup> !	Suisse	1'730	3'290

A ce jour, 82 pays utilisent la géothermie:  
Total = 70'000 MWth ; 163'000 GWh/an .

## Centrale à fluide binaire

- Aucune émission dans l'atmosphère : 2 circuits fermés sous pression.
- Fluide de travail organique à bas point de vaporisation: isobutane, isopentane, eau + ammoniac.
- Efficacité de la conversion énergétique : 7 à 15 %.
- Coefficient d'utilisation : 95 à 98%.



Centrale ORC Landau, Allemagne

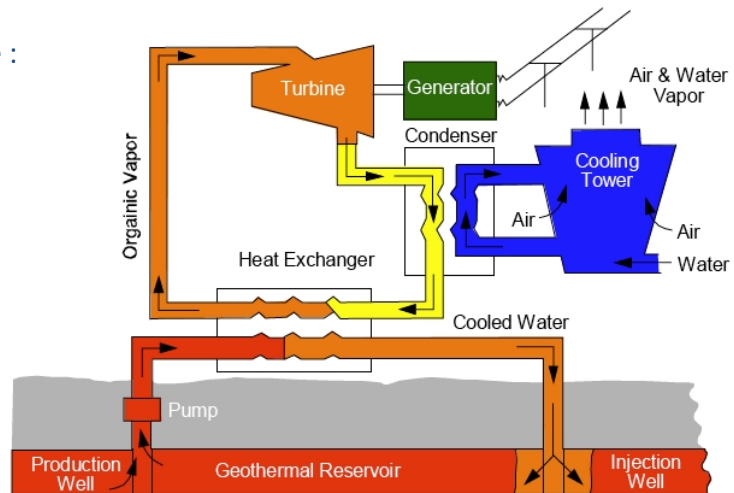
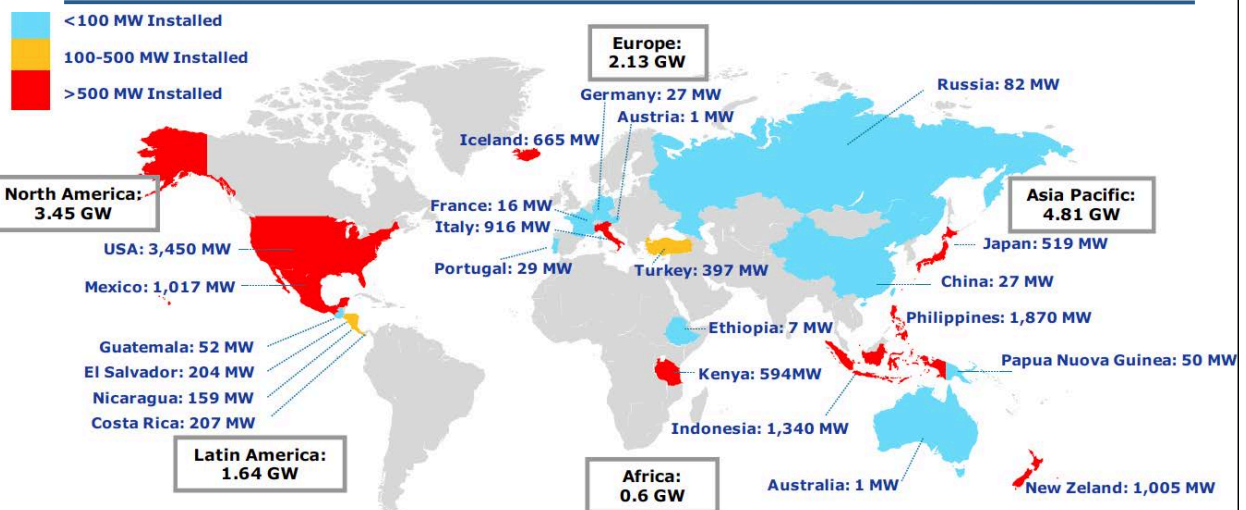


Schéma de fonctionnement d'une centrale géothermique à fluide binaire

Production d'électricité avec un fluide géothermal sous pression

Gamme de température  
100 à > 300 °C

## UTILISATION DE L'ÉLECTRICITÉ GÉOTHERMIQUE DANS LE MONDE (1)



Puissance géothermique installée dans le monde en 2015 en MW électrique (Bertani, 2015)

Dans 26 pays: 12'600 MWe installés et 73'500 GWh/an produits. Plus de 70 millions d'habitants alimentés par l'électricité géothermique.

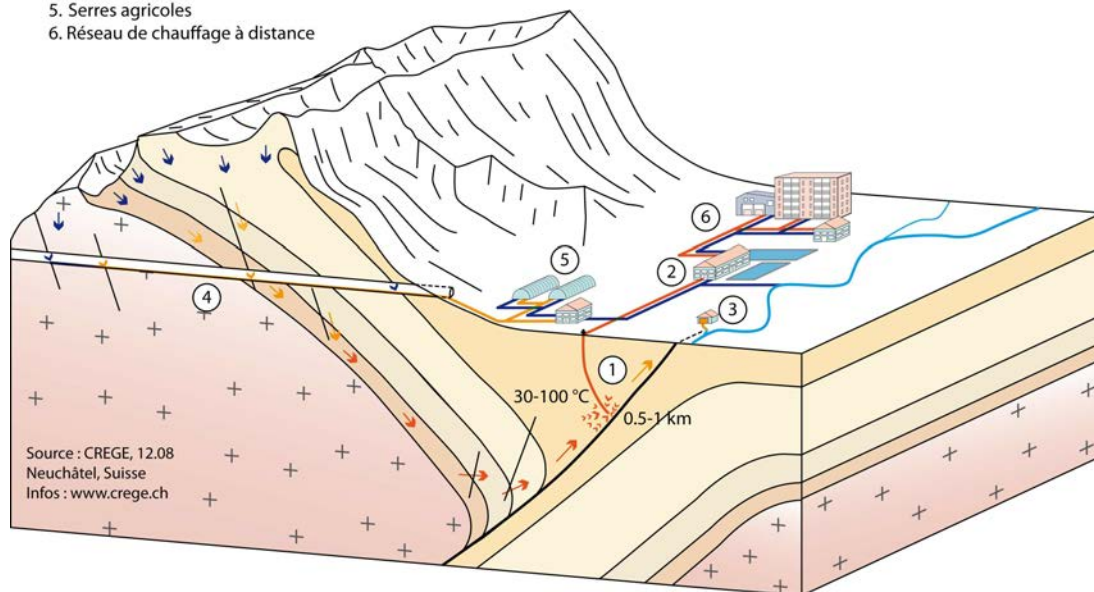
Une puissance de 1 MégaWatt électrique permet d'alimenter plus de 1'200 habitants en Suisse et env. 8'000 aux Philippines !



## TYPES D'INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES EN SUISSE (2)

### Chaleur des tunnels et hydrothermalisme

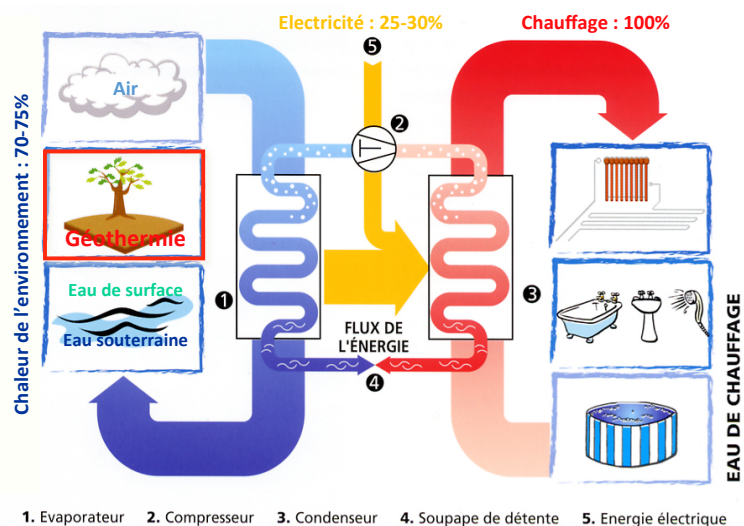
1. Forage de production
2. Centre thermal
3. Source thermale
4. Tunnel
5. Serres agricoles
6. Réseau de chauffage à distance



## POMPE A CHALEUR (PAC) POUR LE CHAUFFAGE GEOTHERMIQUE

### Pompes à chaleur (PAC) en Suisse en 2013

- Au total, 232'000 PAC installées et 20'000 vendues en 2013.
- PAC: consomment 1.6 % d'électricité et produisent 3.5 % de chaleur de la Suisse.
- Les PAC substituent > 400 millions de litres de mazout.
- Les PAC évitent l'émission de >1 milliard de kilos de CO<sub>2</sub> et >1.5 million de kilos de NO<sub>x</sub>.

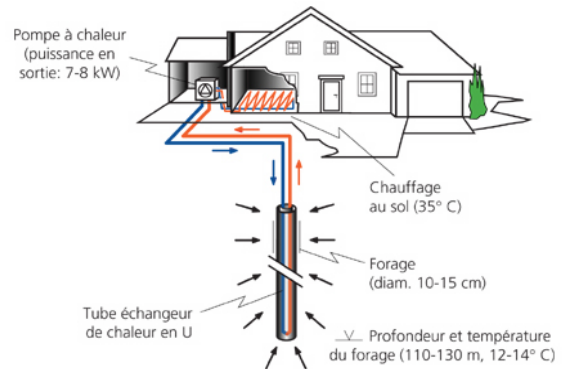


### Schéma de principe d'une PAC

- Puissance habituelle 5-10 kW pour une villa) et 20-50 kW pour des bâtiments divers.
- Fluide de travail: composé organique artificiel à bas point de vaporisation (HFC, propane, ammoniac).

## SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES

- Sonde géothermique verticale (SGV) = échangeur de chaleur installé dans un forage.
- Circulation d'eau en boucle dans un double tube en U: extraction de l'énergie du sous-sol.
- Avec une pompe à chaleur (PAC): le fluide est porté de 10 à 35°C et passe dans les planchers chauffants.
- La géothermie fournit 75% de l'énergie (4-7 kW) et le 25% restant est représenté par l'électricité alimentant la PAC (1.5-3 kW).
- Technique de plus en plus utilisée lors de la rénovation des maisons et des systèmes de chauffage.
- Plus de > 70'000 SGV en Suisse, la plupart pour des maisons familiales récentes.



**Sonde géothermique verticale (SGV) pour une villa familiale**



**Villa Minergie à Bevaix (NE) chauffée par 2 sondes de 70 m**

## CHAMPS DE SONDES GÉOTHERMIQUES ET SONDES PROFONDES

- Pour chauffer et refroidir des bâtiments de grande taille ou des groupes de maisons: une série de sondes géothermiques (5 à 100).
- Autre possibilité: plusieurs sondes géothermiques profondes (200-400 m): température de 18 à 25°C.
- Groupe de sondes raccordées à un collecteur qui alimente une ou plusieurs pompes à chaleur: bonne solution pour de grands bâtiments.
- En été, après la saison de chauffage, on utilise le froid injecté pendant l'hiver dans le champ de sondes géothermiques ; « climatisation » ou rafraîchissement sans machine frigorifique, au moyen d'une pompe de circulation (geocooling).
- > 50 installations en Suisse.



**Entreprise industrielle à Wollerau (Schwyz) chauffée et rafraîchie depuis 1995 par un champ de sondes:**

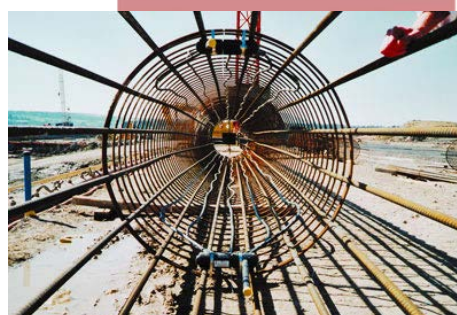
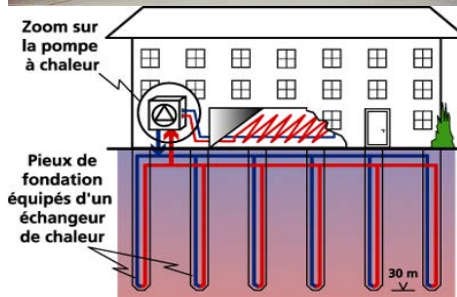
- 32 sondes de 135 m
- volume du stock souterrain: 325'000 m<sup>3</sup>
- volume des locaux chauffés: 30'000 m<sup>3</sup>

## GÉOSTRUCTURES ET PIEUX ÉNERGÉTIQUES

- Les géostructures (pieu, dalle, paroi): ouvrages en béton servant à soutenir un bâtiment lorsque le terrain ne peut pas assurer sa stabilité.
- Les géostructures, et notamment les pieux peuvent être équipés d'échangeurs de chaleur.
- En hiver, le fluide de circulation prend les calories du terrain et assure le chauffage du bâtiment.
- En été, c'est le contraire: réinjection dans le terrain de la chaleur accumulée par les locaux et récupération du froid injecté pendant l'hiver pour rafraîchir le bâtiment.
- ≈ 30 installations en Suisse.

Cage  
d'armature  
pour un  
pieu  
énergétique  
moulé

### Ecole de Fully



## STOCKAGE SOUTERRAIN DE CHALEUR ET DE FROID

- Dès 20 m de profondeur, la température des roches ne varie plus en fonction de la saison.
- Les roches possèdent de bonnes propriétés de stockage de la chaleur ou du froid.
- Stock souterrain saisonnier: accumulateur constitué d'une série de sondes géothermiques verticales.
- Hiver : chaleur soutirée dans le terrain.  
Été : stock rechargé par l'eau chaude provenant des panneaux solaires et/ou par la chaleur évacuée des bâtiments.
- La chaleur ainsi stockée permet le chauffage de grands bâtiments, ou le dégivrage de routes ou de ponts.
- > 20 installations en Suisse.



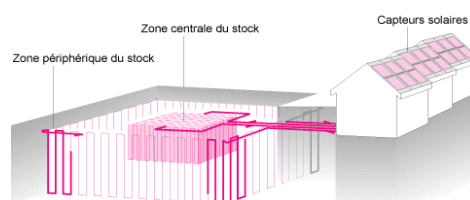
### Stock souterrain de chaleur à Peseux (NE)

Chauffage du Collège des Coteaux depuis 1996.

Volume du stock : 29'000 m<sup>3</sup> avec 30 sondes de 60 m en double U.

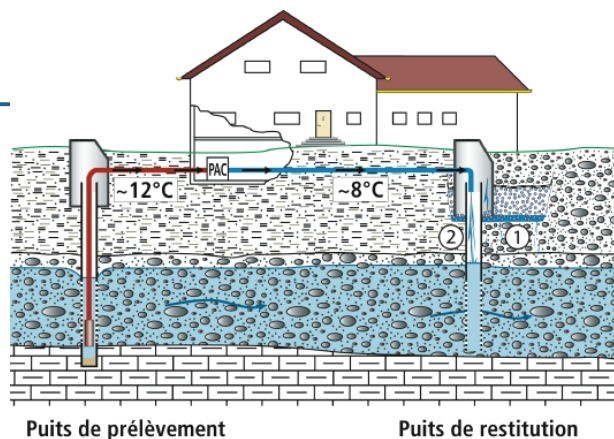
Terrain foré : calcaire et marno-calcaire.

Collecteurs solaires : 306 m<sup>2</sup>



## CHALEUR DES NAPPES PHRÉATIQUES

- La température de l'eau des nappes phréatiques (8-12°C) est ± constante au cours de l'année.
- Cette source de chaleur est exploitable par un puits équipé d'une pompe de production (1-20 m<sup>3</sup>/h).
- Dans le bâtiment à chauffer, une pompe à chaleur rehausse la température de l'eau à 35-40°C pour du chauffage en dalle.
- L'eau refroidie ( $\Delta 4^\circ\text{C}$ ) est réinjectée dans un autre puits, ou déversée en surface.
- Au total  $\approx 5'000$  installations surtout dans les cantons de Berne, Argovie et Valais.



Puits de prélèvement

Puits de restitution

### Schéma d'utilisation de la chaleur de l'eau souterraine



Dépôt de train à Fleurier (NE)

Lotissement de villas (AG)

## GÉOTHERMIE DES TUNNELS

- Les tunnels traversent les massifs rocheux et captent des débits d'eau souterraine importants sur plusieurs kilomètres.
- Selon l'épaisseur de roche au-dessus de la galerie, la température des eaux peut atteindre 20 à 40°C.
- En Suisse: env. 600 tunnels; 15 considérés intéressants pour leur potentiel géothermique; six d'entre eux l'utilisent.
- 7 tunnels équipés d'installations de chauffage de bâtiments: Hauenstein (SO), Gd-St-Bernard (VS), Furka (VS), St Gothard (TI), Ricken (SG) et Mappo-Morettina (TI) et le tunnel de base du Loetschberg.
- Projet de géothermie dans le tunnel de base Alp Transit du St. Gothard (57 km) : réseau de chauffage à Bodio (TI).



Tunnel de base du Lötschberg, Mitholz (BE)

### Lötschberg (35 km) : serre tropicale, pisciculture et caviar, réseau de chauffage à Frutigen (BE)



Serres tropicales à Frutigen

- Les sources thermales sont utilisées depuis l'Antiquité: la plus ancienne application de la géothermie.
- Sources d'eau chaude: témoins naturels de circulations profondes. La plupart de ces sources se situent dans des vallées alpines et au pied du Jura.
- Sources de 15 à 69°C: presque toutes captées et utilisées par des centres de balnéothérapie.
- Plusieurs centres ont réalisé des forages pour augmenter le débit et la température de leur ressource.
- Certaines stations chauffent leurs bâtiments avec les excédents de chaleur: par ex. Lavey-les-Bains (100 % des besoins thermiques), Bad Schinznach, etc.

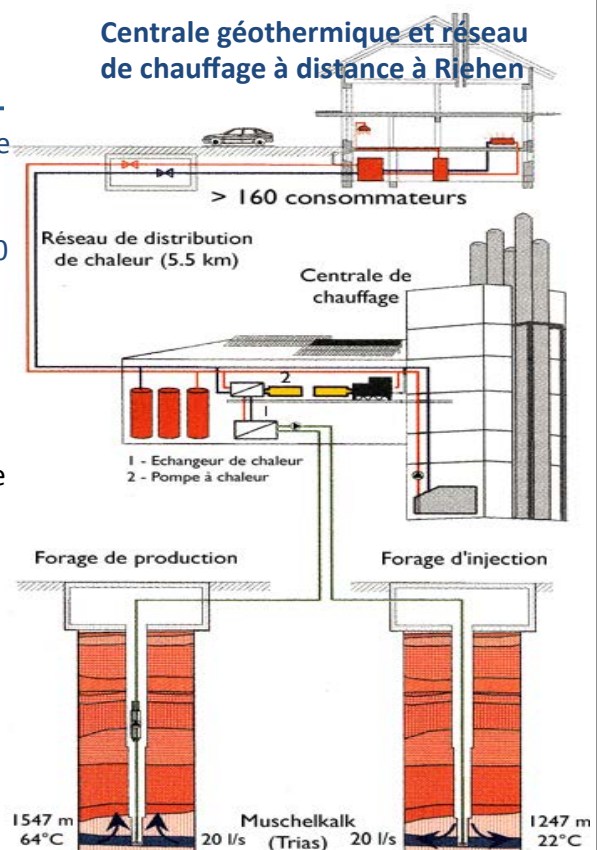


## AQUIFERES PROFONDS

- Si nappes d'eau à 1'000 m sous le Plateau suisse -> température = 35 à 45°C.
- 12 forages de prospection réalisés entre 1987 et 1998 : présence d'aquifères entre 400 et 1'500 m dans différentes régions de Suisse.
- Six installations de chauffage de petite taille pour un ou deux consommateurs (immeuble, piscine).

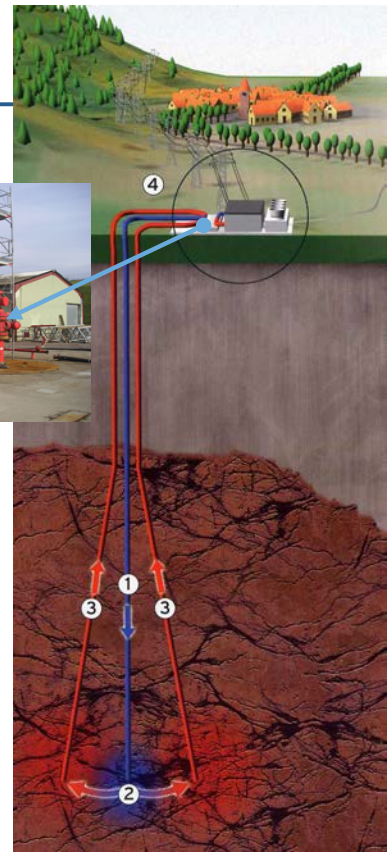
### Cas de Riehen (Bâle-Ville)

- La plus grande centrale géothermique de Suisse alimente un réseau de chauffage de 200 habitations depuis 1994.
- 2 forages verticaux distants de 1 km.
- Une conduite transfrontalière amène de l'eau chaude à la commune allemande de Lörrach (réseau de 20 immeubles).
- La géothermie fournit 50% de l'énergie distribuée (20 GWh/an). Solde : électricité (deux PAC), gaz (centrale de cogénération) et mazout (chaudières d'appoint).



## SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES STIMULÉS PROFONDS - EGS

- Entre 4 à 6 km de profondeur, il n'y a plus beaucoup d'eau dans les roches, mais elles atteignent 180 à 200°C.
- L'injection d'eau froide sous forte pression (1) ouvre des fissures et permet de créer un réservoir échangeur de chaleur (2).
- Des forages de production récupèrent le fluide réchauffé en profondeur (3). Dans la centrale géothermique (4), un turbo-générateur produit de l'électricité.



### Projets actuels

- Alsace: 1ère centrale pilote à Soultz
- Allemagne: 2 petites centrales industrielles
- Australie: activité dans les années 2000 et 1 centrale pilote réalisée en 2013.
- Projet à Bâle arrêté depuis le 8.12.06 !
- Geo-Energie Suisse: projets sur 4 sites, dont celui prioritaire de Haute-Sorne (JU).

## Situation de la géothermie en Suisse

### Nombre d'installations

> 5'000  
Chaleur de la nappe phréatique

> 70'000  
Sonde géothermique verticale

≈ 30  
Pieux de fondation énergétiques & géostructures

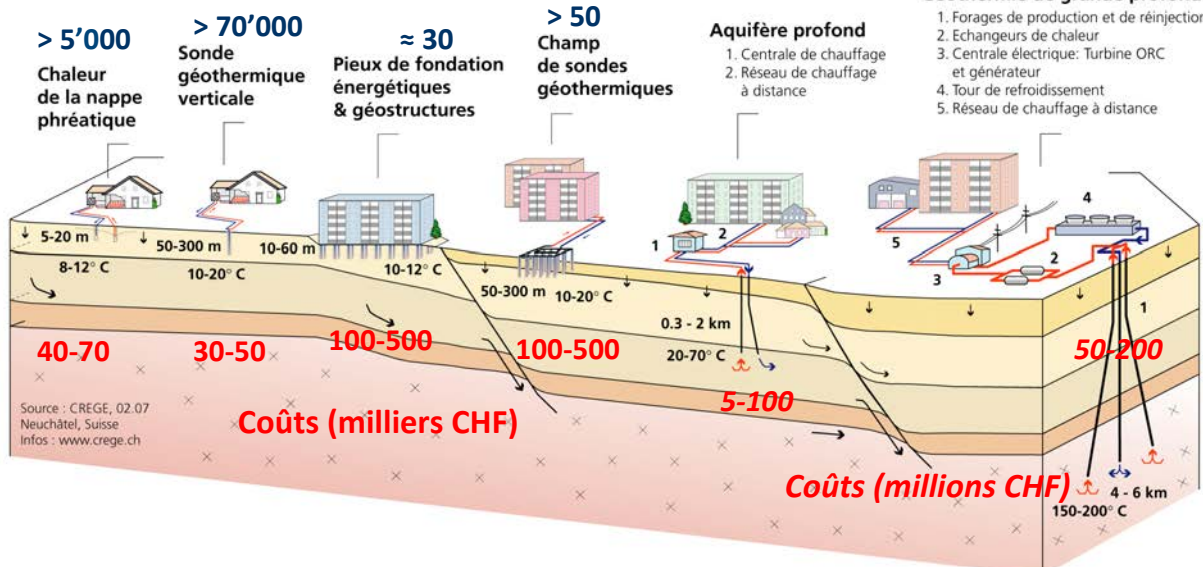
> 50  
Champ de sondes géothermiques

6 aquifères profonds  
+ 7 tunnels  
+ 17 centres thermaux

Nouveaux projets de Geo-Energie Suisse

Géothermie de grande profondeur

1. Forages de production et de réinjection
2. Echangeurs de chaleur
3. Centrale électrique: Turbine ORC et générateur
4. Tour de refroidissement
5. Réseau de chauffage à distance



- ✓ Connaissance lacunaire des conditions géologiques profondes (1'000 – 5'000 m).
- ✓ Pas de méthodes indirectes fiables pour prévoir la perméabilité des aquifères.
- ✓ Evaluation souvent trop optimiste de la ressource lors de la prospection.
- ✓ Coût élevé des forages profonds, lié au prix du pétrole et au prix de l'acier.
- ✓ Incitations et promotion faible par rapport aux autres énergies.
- ✓ Durée trop élevée de réalisation des projets.
- ✓ Pas de centrale électrique en fonction (expérience sur le comportement à long terme, durée de vie du réservoir, coût d'exploitation, etc.).
- ✓ Effet d'échelle sur l'évolution des coûts (forages, réservoir) encore difficilement estimable.
- ✓ Prédiction du risque sismique induit par la stimulation hydraulique doit s'améliorer.

## AVANTAGES DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE

**Universalité:** utilisable dans tous les pays et sous tous les climats.

**Variété:** large gamme de températures (10 - 350°C) et de profondeurs (5 - 5'000 m).

**Durabilité:** inépuisable à l'échelle humaine, si gestion de type renouvelable.

**Disponibilité:** 24/24 heures et 365 jours par an.

**Propreté:** pas de déchets et pas d'émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>).

**Sécurité:** pas de transport, ni de stockage de substances polluantes ou dangereuses.

**Discrétion:** installations compactes, qui n'occupent que peu de surface de terrain.

**Indépendance:** énergie locale et indigène.

### **Economie en Suisse:**

- Electricité >> rentabilité si la chaleur résiduelle est aussi utilisée et vendue.
- Chaleur profonde >> concurrentiels avec les autres énergies.
- Chaleur et froid à faible profondeur >> investissements amortis en peu d'années.

**Innovation:** le développement de la géothermie stimule les nouvelles technologies et crée des places de travail qualifiées.

- Aujourd'hui en Suisse: 154'000 tonnes équivalent-pétrole substituées par la géothermie.
- Dans le Monde, 40 pays pourraient produire 100% de leur électricité au moyen de la technologie actuelle (> 650 millions d'habitants).

- La technologie EGS devrait arriver à maturité dans les années 2020-2030: cela représente un grand potentiel pour la cogénération d'électricité et de chaleur.

Potentiel géothermique	Aujourd'hui	Nb. pays	Demain (2030-2050)
<b>Monde</b>			
Electricité (MWe)	13'000	26	> 140'000
Chaleur (MWth)	70'000	82	>> 100'000
<b>Europe</b>			
Electricité (MWe)	2'000	8	> 10'000
Chaleur (MWth)	25'000	37	>> 50'000
<b>Suisse</b>			
Electricité (MWe)	0		environ 500
Chaleur (MWth)	1'700		>> 3'000

- Tous les pays nécessitant un chauffage hivernal de leurs bâtiments pourraient produire une partie importante de la chaleur par la géothermie.

## CONDITIONS CADRE DU DEVELOPPEMENT DE LA GEOTHERMIE EN SUISSE

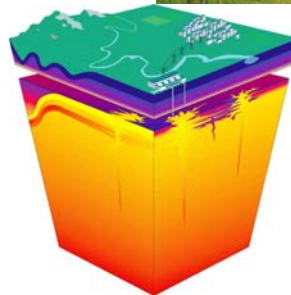
### Stratégie énergétique 2050 de la Confédération

- Arrêt programmé des centrales nucléaires.
- Prévission de l'OFEN pour la production d'électricité par la géothermie en 2050: puissance installée de 550 MWe en 2050.
- Soutien accru au développement des énergies renouvelables: allocation de fonds pour la R&D et les installations P&D.
- Création de 7 centres de compétence en énergie et 1 en géothermie avec de nouveaux postes de recherche appliquée: SCCER SoE (ETHZ leader + universités).
- Tarif de rachat de l'électricité produite par la géothermie: 23-40 ct/kWh.
- Garantie du risque d'exploration pour la géothermie avec production d'électricité: couverture de 50 % max. des forages et des tests.

### Secteur privé

- **Geo-Energie Suisse AG:** consortium de 7 entreprises a créé une compagnie ayant pour but de développer la technologie des EGS en Suisse (4 projets en cours de faisabilité).
- Romande-Energie soutient le projet AGEPP à Lavey-les-Bains.
- Plusieurs petites compagnies (bureaux d'ingénieurs-conseils).

- Actuellement, les projets d'énergie renouvelable (hydraulique, éolien, biomasse, solaire PV, géothermie) ont de la peine à être réalisés : problèmes économiques et sociétaux, conditions-cadres variables, etc.
- Pas de solution énergétique unique envisageable à moyen terme !
- De nombreuses technologies sont sur le marché pour produire et économiser l'énergie thermique et électrique.
- **La géothermie**, parmi les « nouvelles » énergies renouvelables, fait partie des réponses possibles pour le mix énergétique de la Suisse, de l'Europe et du monde.



## Merci de votre attention !

Dr. François-D. Vuataz  
Chargé d'enseignement et consultant en géothermie  
c/o CHYN, UNINE  
Rue E.-Argand 11  
CH-2000 Neuchâtel

[francois.vuataz@unine.ch](mailto:francois.vuataz@unine.ch)

[www.unine.ch/chyn](http://www.unine.ch/chyn)

<http://www2.unine.ch/foco/CAS-DEEGEOSYS>