

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

Tables des matières

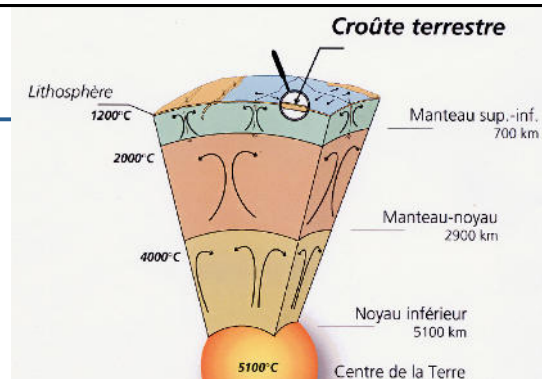
- ✓ *Introduction et origine de la chaleur*
- ✓ *Utilisation directe de la chaleur extraite*
- ✓ *Utilisation indirecte de la chaleur : conversion en électricité*
- ✓ *Applications géothermiques en Suisse*
- ✓ *La géothermie dans les pays européens voisins*
- ✓ *Avantages et problèmes de l'énergie géothermique*
- ✓ *Potentiel géothermique*

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

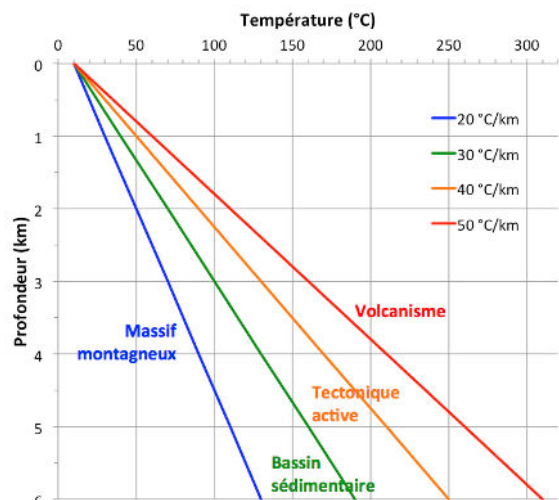
Type de centrale	Electricité en 2012 (%)	Domaine de puissance par centrale (MWe)
Thermique à combustible fossile (gaz, charbon, fuel, schistes bitumineux)	68	100 – 5'800 (Chine)
Hydraulique (lac de barrage ou au fil de l'eau) Mini-hydraulique	16	10 - 22'500 (barrage des 3-Gorges, Chine) 1 – 10
Nucléaire	11	300 – 8'200 (Japon)
Vent	2.4	0.1 – 5'200 (Chine)
Biomasse	1.4	0.1 – 750 (UK)
Solaire PV	0.5	0.1 – 550 MW-crête (USA)
Géothermie - Turbine géothermique - Champ géothermique	0.3	1 – 132 (Nlle Zélande) 1 – 1'600 (USA)

ORIGINE DE LA CHALEUR DE LA TERRE

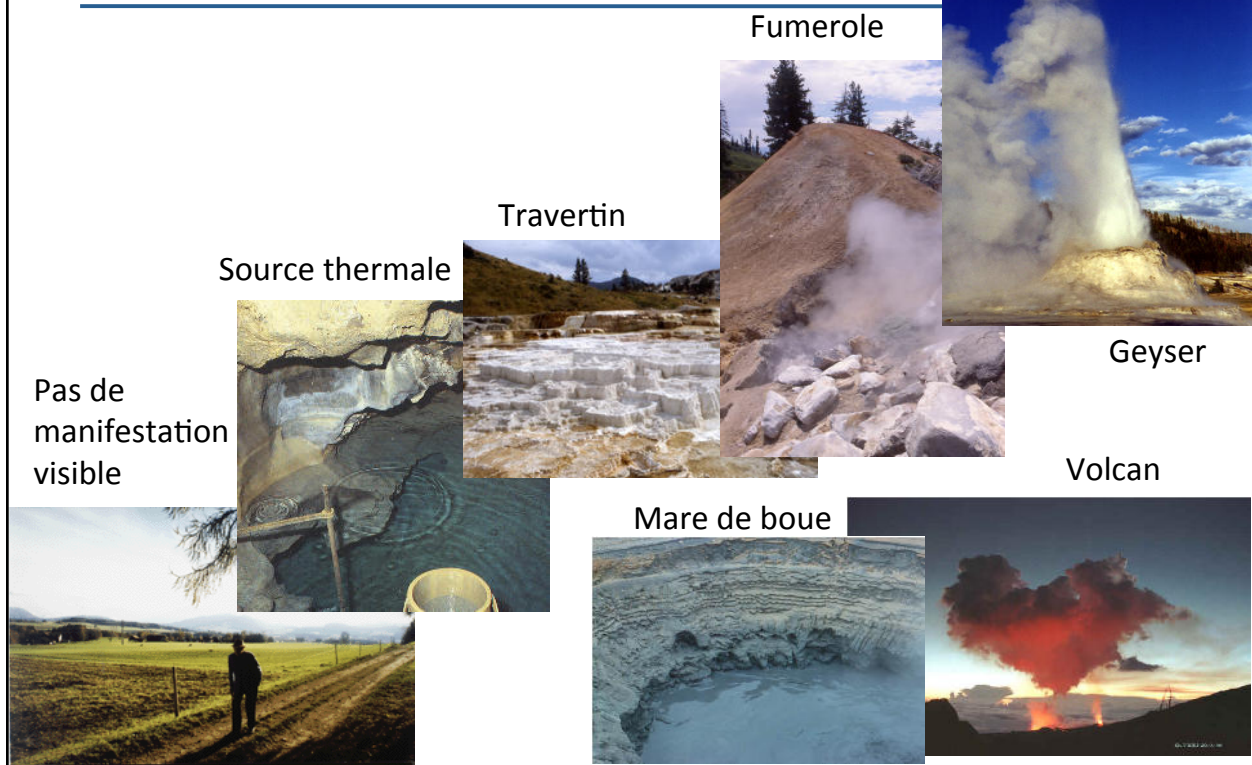
- 62 % de la chaleur émise par notre planète a pour origine la décroissance des éléments radioactifs contenus dans les minéraux des roches (famille de l'uranium) de la croûte terrestre. L'autre partie vient du refroidissement du manteau et du noyau.
- 99 % de la masse de la Terre est à plus de 1000 °C 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 42x10⁹ 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.
- Mais 150 to 250 °C peuvent être trouvés à la profondeur de 1 km dans les zones volcaniques actives ou péri-volcaniques.
- La **géothermie** représente la chaleur de la Terre qui peut être utilisée comme énergie.



Valeurs du gradient géothermique (°C/km)

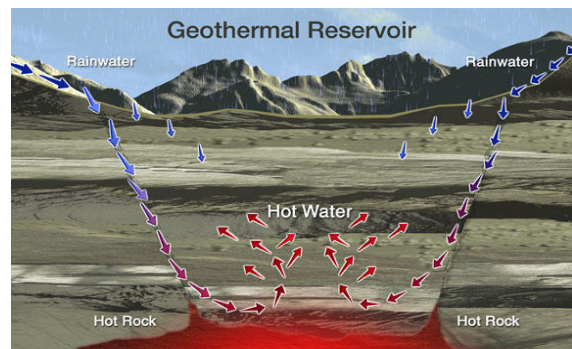


CHALEUR DE LA TERRE: MANIFESTATIONS DE SURFACE



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 km³ refroidi de 200 à 180 °C pour l'exploitation:

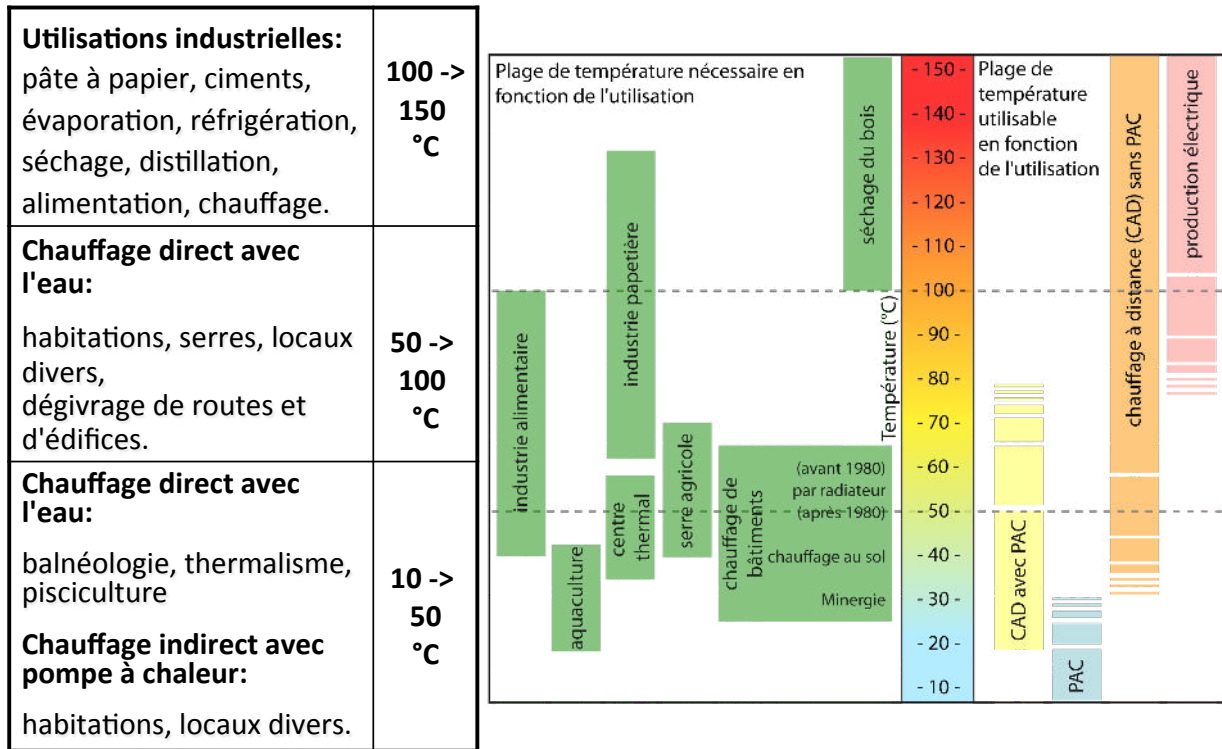
= 10 MW électriques pendant 20 ans.

= Energie électrique de 10'000 habitants.

= Equivalent annuel de chauffage de 350'000 logements.



UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR



EXEMPLES D'UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR (1)





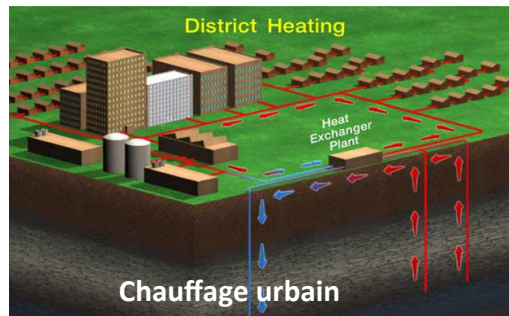
Reykjavik aujourd'hui



Centrale de chauffage à Riehen (BS)



Reykjavik en 1920

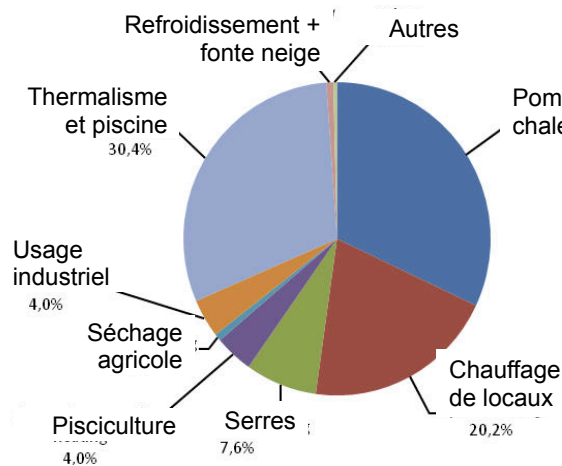


EXEMPLES
D'UTILISATION
DIRECTE DE LA
CHALEUR (3)



Exemples de
centrales
géothermiques pour
du chauffage urbain
en Hongrie





Répartition des modes d'utilisation directe de la géothermie

Production de chaleur géothermique et puissance installée dans les 16 premiers pays

Country	GWh/yr	MWt	Main Applications
China	20,932	8,898	bath/district heating
USA	15,710	12,611	GHP
Sweden	12,585	4,460	GHP
Turkey	10,247	2,084	district heating
Japan	7,139	2,100	bathing (onsens)
Iceland	6,768	1,826	district heating
France	3,592	1,345	district heating
Germany	3,546	2,485	bath/district heating
Norway	3,000	1,000	GHP
Netherlands	2,972	1,410	GHP
Italy	2,762	867	spas/space heating
Hungary	2,713	655	spas/greenhouses
New Zealand	2,654	393	industrial uses
Canada	2,465	1,126	GHP
Finland	2,213	994	GHP
Switzerland	2,143	1,061	GHP

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

A ce jour, env. 80 pays utilisent la géothermie (total > 55'000 MWth).

CONVERSION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE EN ÉLECTRICITÉ

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

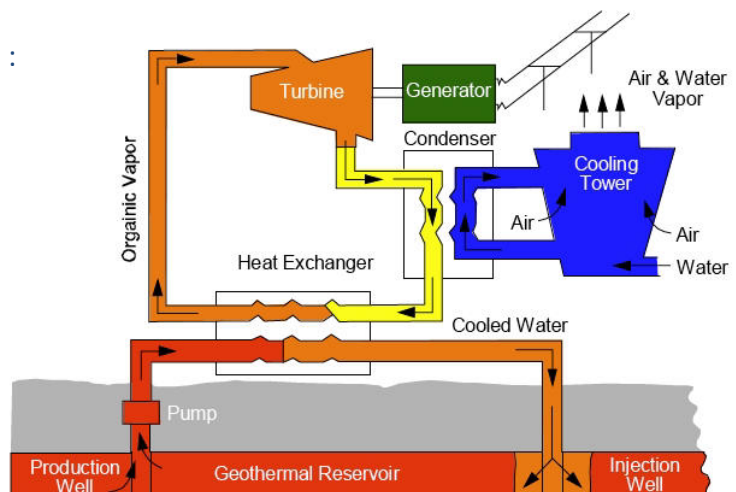


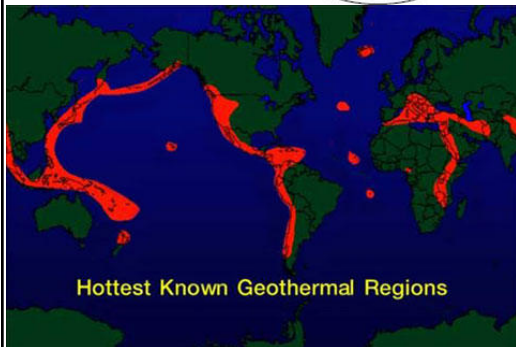
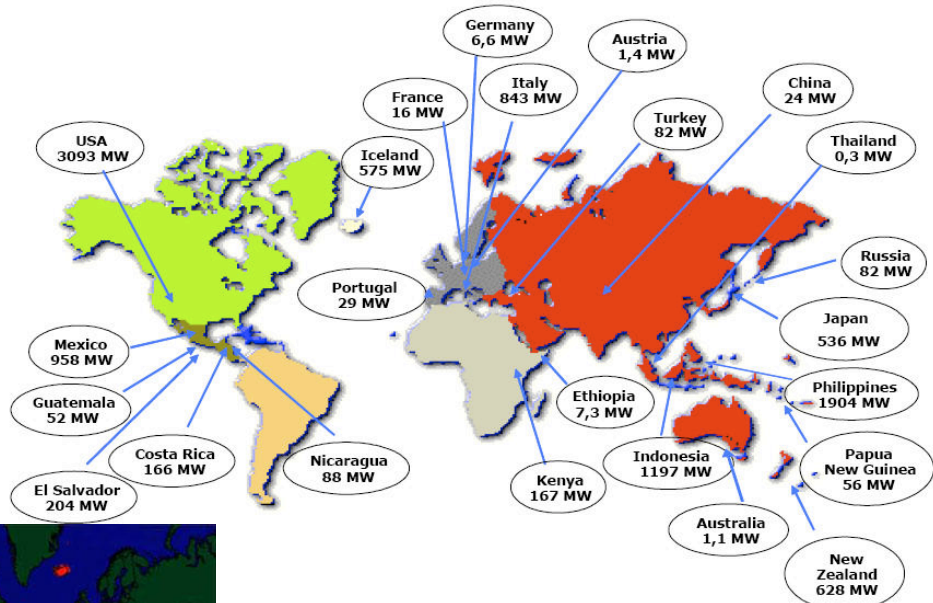
Schéma de fonctionnement d'une centrale géothermique à fluide binaire

Production d'électricité avec un fluide géothermique sous pression

Gamme de température
100 à > 300 °C

UTILISATION DE L'ÉLECTRICITÉ GÉOTHERMIQUE DANS LE MONDE

Puissance géothermique installée dans le monde en 2010 en MW électrique (Bertani, 2010)



Dans 24 pays, env. 13'000 MWe installés à ce jour: > 70 millions d'habitants alimentés par de 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 !

UTILISATION DE L'ÉLECTRICITÉ GÉOTHERMIQUE DANS LE MONDE (3)

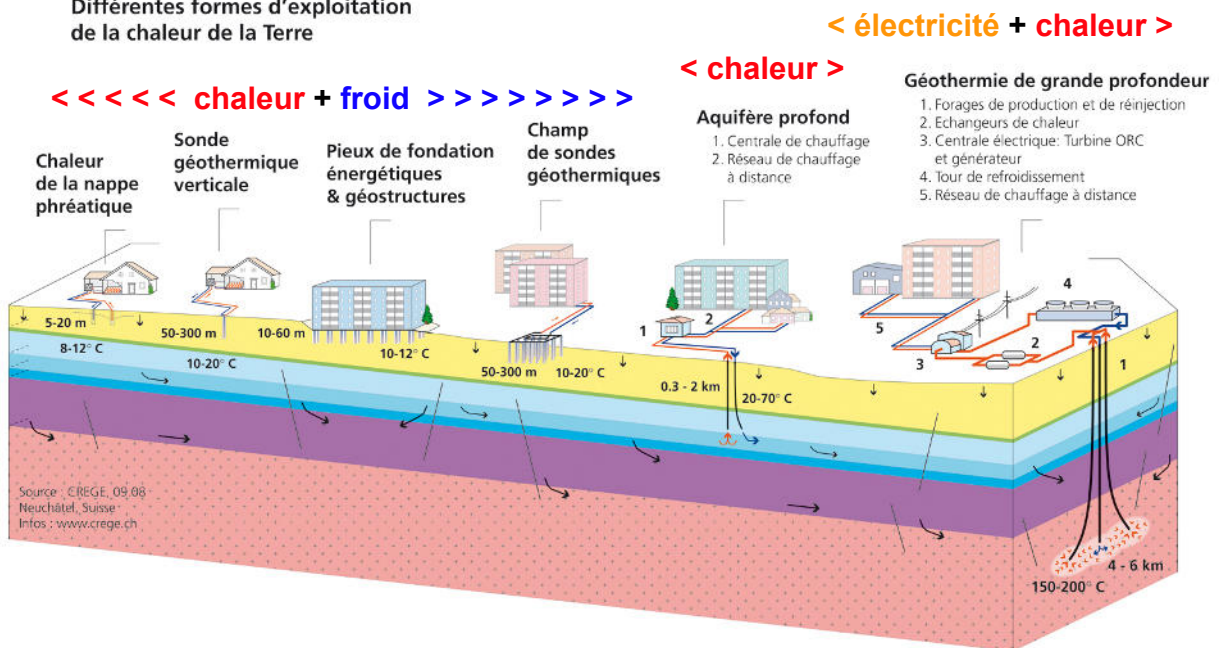


Exemples de centrales géothermiques de production d'électricité



TYPES D'INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES EN SUISSE (1)

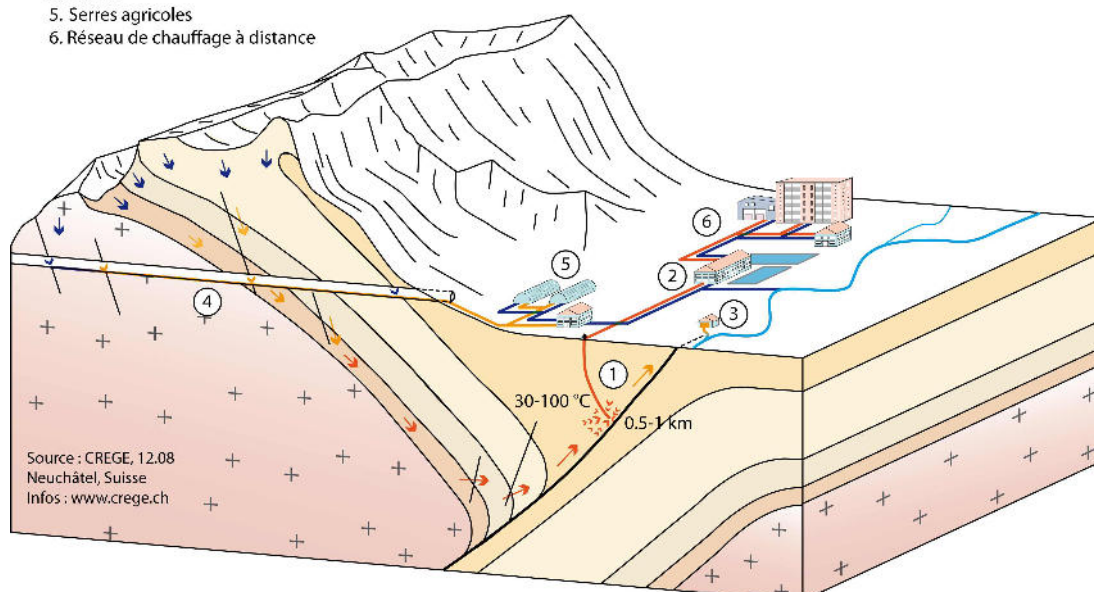
Différentes formes d'exploitation
de la chaleur de la Terre



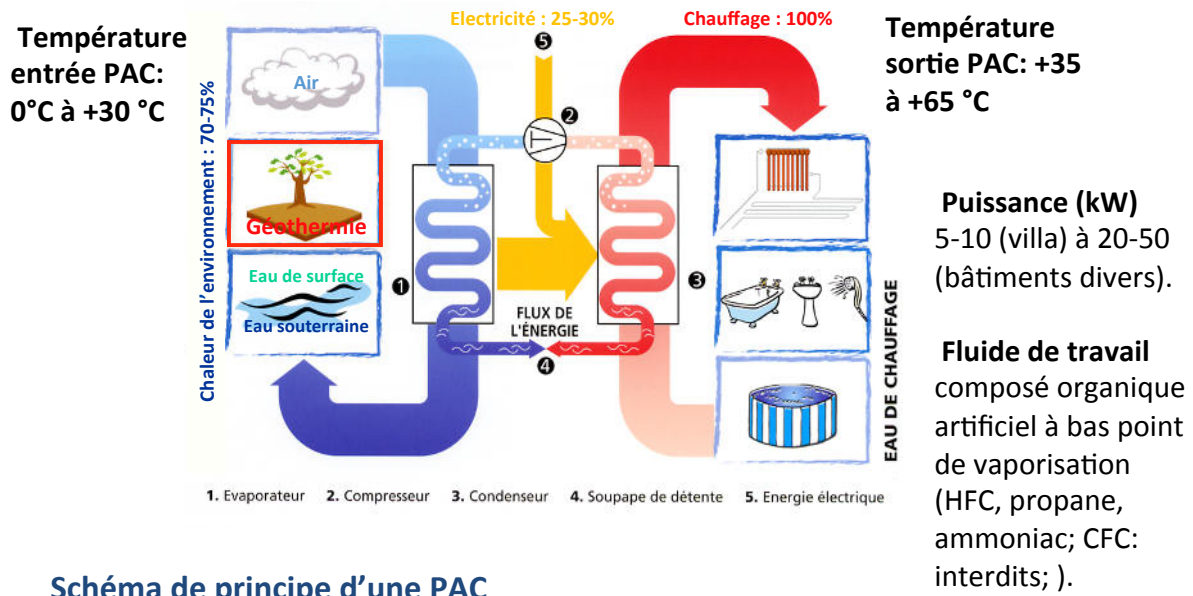
TYPES D'INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES EN SUISSE (2)

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

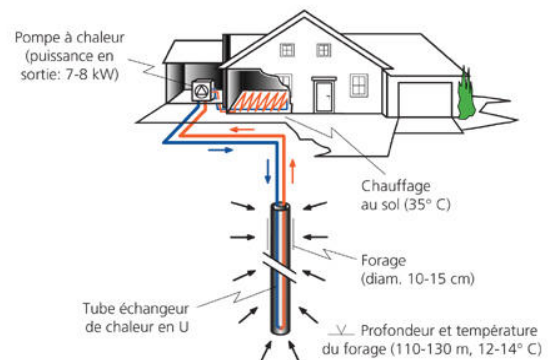


Si la température de la ressource géothermique est en dessous de 40°C, une PAC est nécessaire pour hausser le niveau de température.



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.

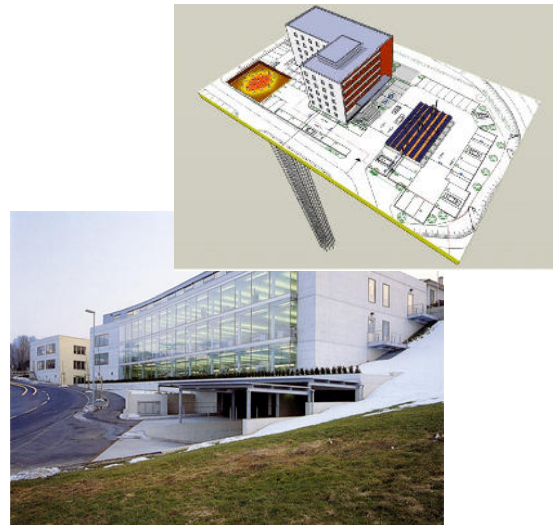


Sonde géothermique verticale (SGV) pour une villa familiale



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

- 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.

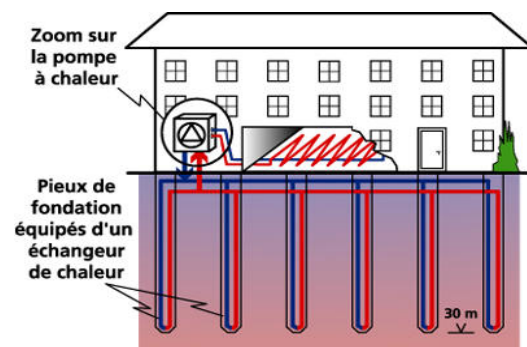


Entreprise industrielle à Wollerau (Schwyz) chauffée et rafraîchie depuis 1995 par un champ de sondes:

- 32 sondes de 135 m
- volume du stock souterrain: 325'000 m³
- volume des locaux chauffés: 30'000 m³

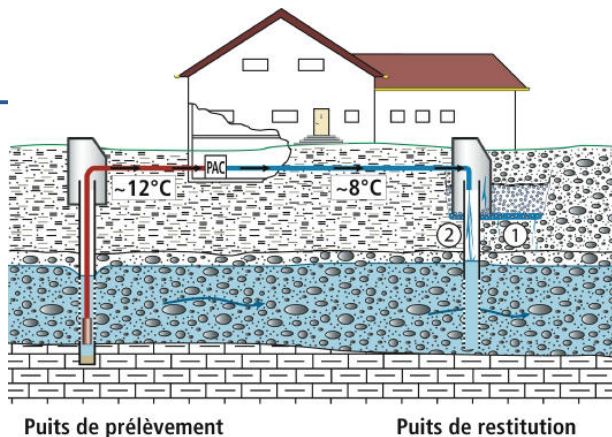
GÉOSTRUCTURES ET PIEUX ÉNERGÉTIQUES

- 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.



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 m³/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



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).



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



SOURCES THERMALES

- 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.

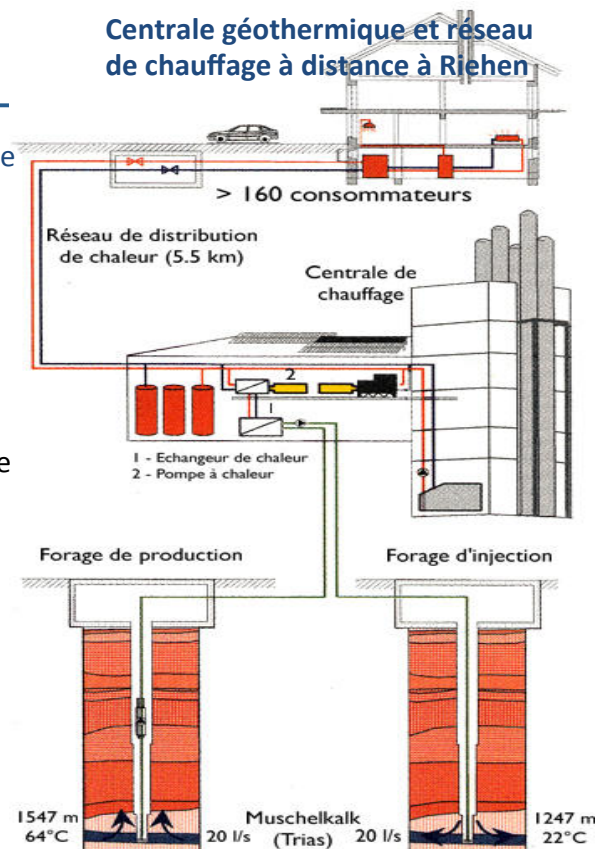


AQUIFERES PROFONDS

- Si nappes d'eau à 1'000 m sous le Plateau suisse -> température = 35 à 45°C.
- 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).

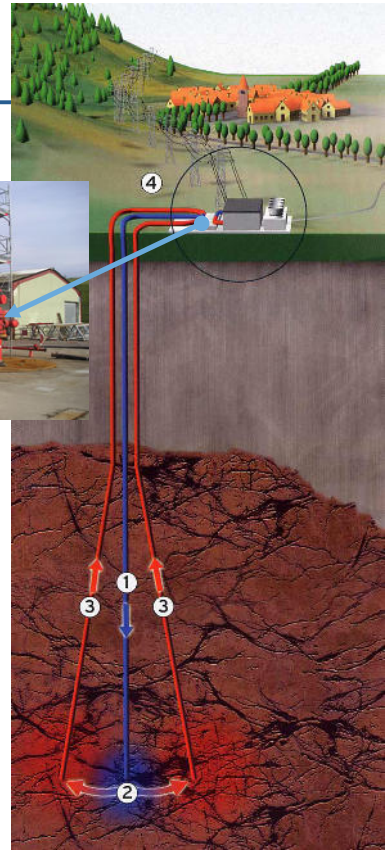


SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES STIMULÉS PROFONDS - EGS

- 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.

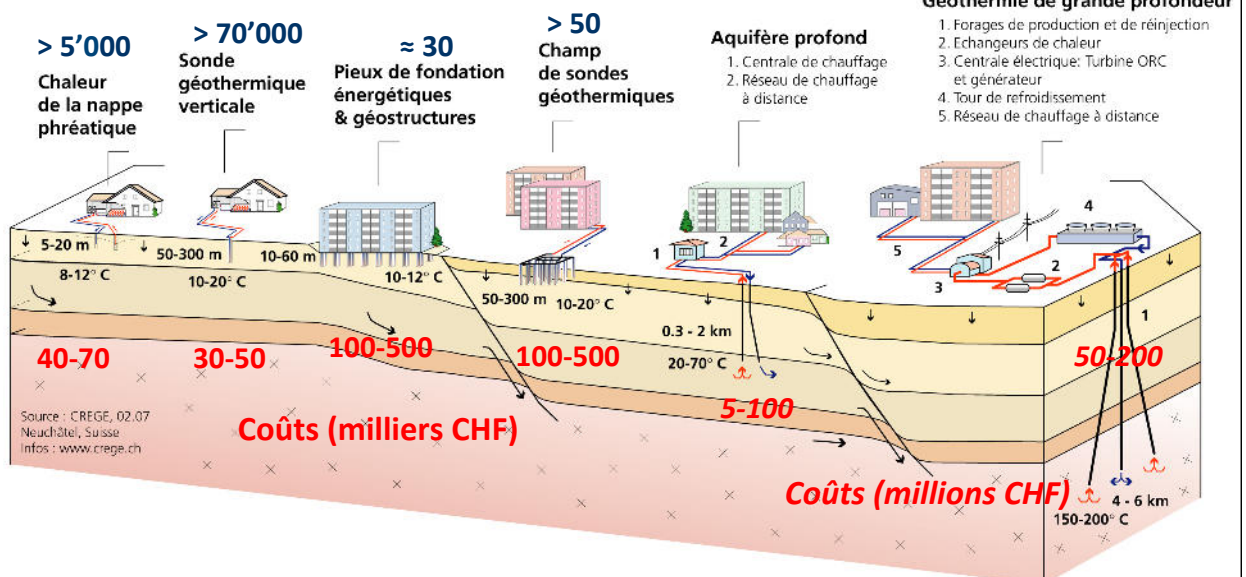
Projets

- Alsace: 1ère centrale pilote à Soultz et plusieurs projets en cours de réalisation.
- 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



Géothermie profonde en aquifère

- ✓ Connaissance lacunaire des conditions géologiques profondes (> 500 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.

Problèmes spécifiques au développement des systèmes stimulés (EGS)

- ✓ Peu de forages à grande profondeur (socle cristallin): faible connaissance des systèmes EGS potentiels.
- ✓ Critères de dépendance géologique/géographique encore trop peu connus.
- ✓ Pas de centrale EGS de taille industrielle en fonction : peu d'expérience sur le comportement à long terme (durée de vie du réservoir, coût d'exploitation, etc.).
- ✓ Prédiction du risque sismique induit par la stimulation hydraulique doit s'améliorer.
- ✓ Effet d'échelle sur l'évolution des coûts (forages, réservoir) encore difficilement estimable.
- ✓ Coût des forages profonds encore trop chers.
- ✓ Durée de réalisation des projets encore trop longue.

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 heures sur 24 et 365 jours par an.

Propreté: pas de déchets et ni d'émission de gaz à effet de serre (CO₂).

Sécurité: pas de longs 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:

- (1) Géothermie profonde pour l'électricité: une des plus rentables parmi les renouvelables;
- (2) Géothermie faible profondeur et basse température: investissements amortis en peu d'années.

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

- Aujourd'hui en Suisse: 154' 000 tonnes équivalent-pétrole substituées par la géothermie.
- Dans le Monde, env. 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)
Monde			
Electricité (MWe)	13'000	25	> 140'000
Chaleur (MWth)	55'000	80	>> 100'000
Europe			
Electricité (MWe)	2'000	8	> 10'000
Chaleur (MWth)	25'000	30	>> 50'000
Suisse			
Electricité (MWe)	0		environ 500
Chaleur (MWth)	1'500		>> 3'000

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

CONDITIONS CADRE DU DEVELOPPEMENT DE LA GEOTHERMIE EN SUISSE

La stratégie énergétique 2050 de la Confédération

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

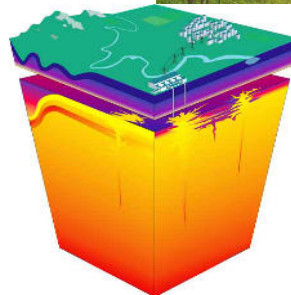
Centres de compétence en géothermie

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).

- Plusieurs petites compagnies (bureaux d'ingénieurs-conseils).
- Des laboratoires de recherche appliquées: Univ. Neuchâtel, EPF-Zurich.

La GÉOTHERMIE : une partie de la réponse aux questions énergétiques d'aujourd'hui et de demain

- Actuellement, les projets d'énergie renouvelable (hydraulique, éolien, biomasse, solaire PV, géothermie) ont de la peine à être acceptés par la société.
- Pas de solution énergétique unique envisageable à court et moyen terme !
- De nombreuses technologies sont à disposition 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
www.unine.ch/chyn
<http://www2.unine.ch/foco/CAS-DEEGEOSYS>