

Université d'été 2012 - Sauvons le climat - Landéda - 7-8 sept. 2012

## Le développement multiple de la géothermie en Suisse

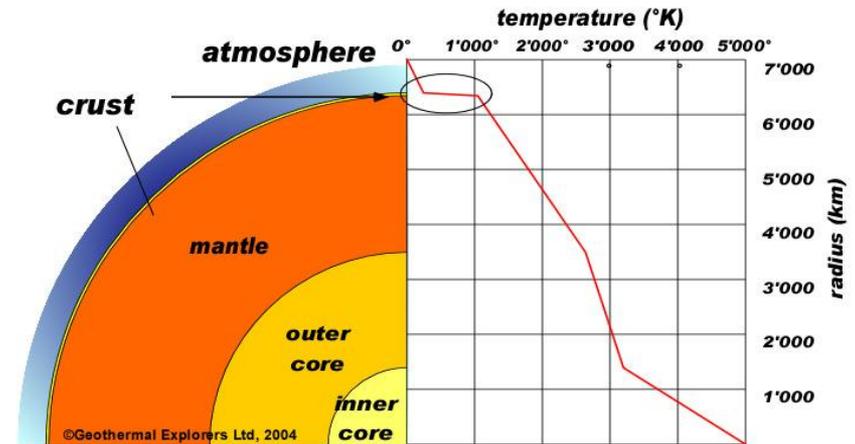


Dr. François-D. Vuataz  
**Laboratoire de Géothermie - CREGE**  
Neuchâtel

## Contenu

- Chaleur de la Terre et gradient géothermique
- Utilisation directe de la chaleur : chauffage
- Utilisation indirecte de la chaleur : conversion en électricité
- Types d'applications géothermiques en Suisse
- Pompes à chaleur et géothermie
- Situation actuelle
- Synthèse

- 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). Une petite partie vient du refroidissement 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 !**
- 30 ° C/km représente l'accroissement moyen de la température avec la profondeur dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre.
- 150 to 250 ° C peuvent être trouvés à des profondeurs de 1 à 2 km dans les zones volcaniques ou péri-volcaniques.

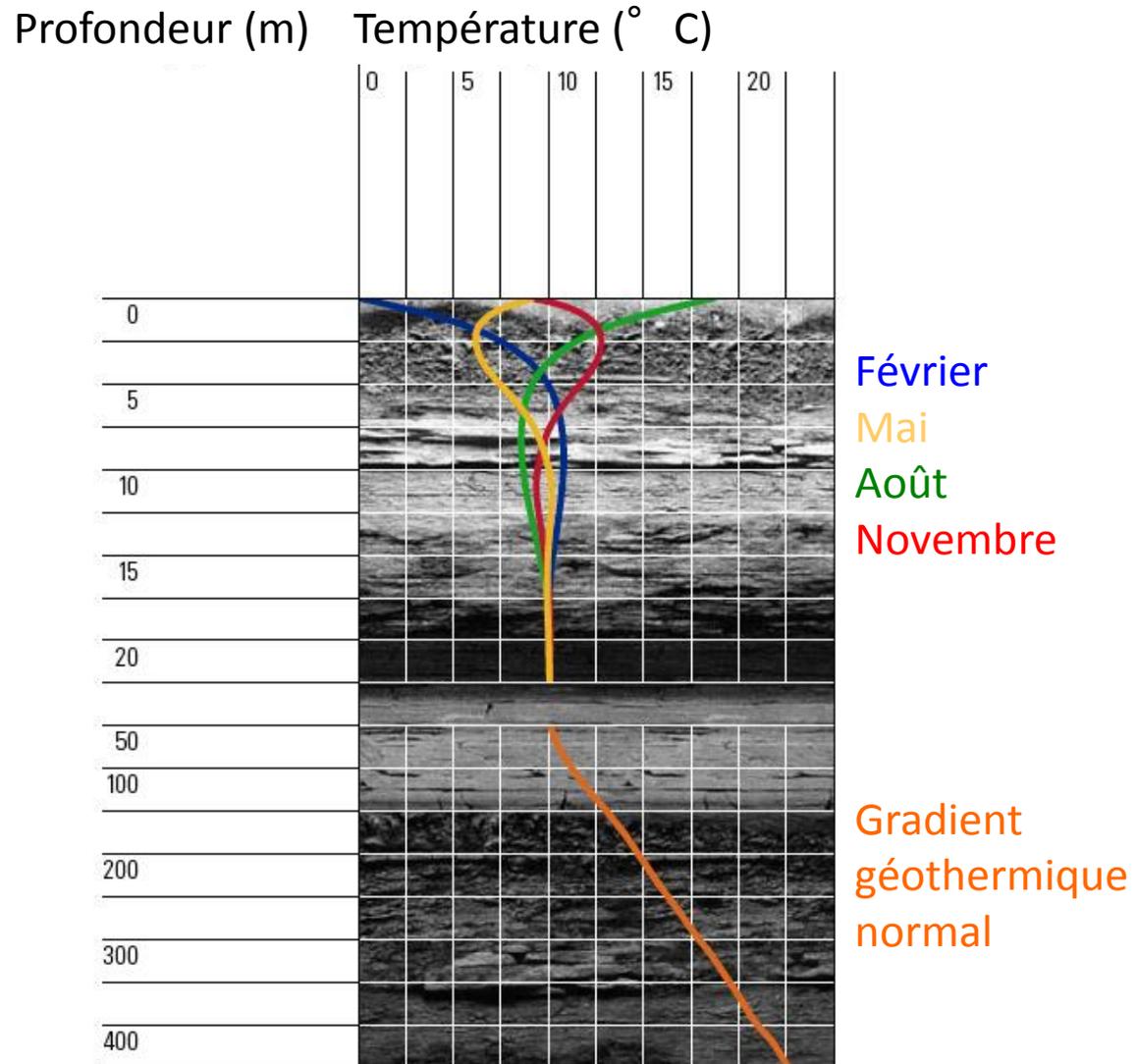


## Structure interne et température de la Terre

- La géothermie représente la chaleur (et le froid) de la Terre qui peut être utilisée comme énergie.

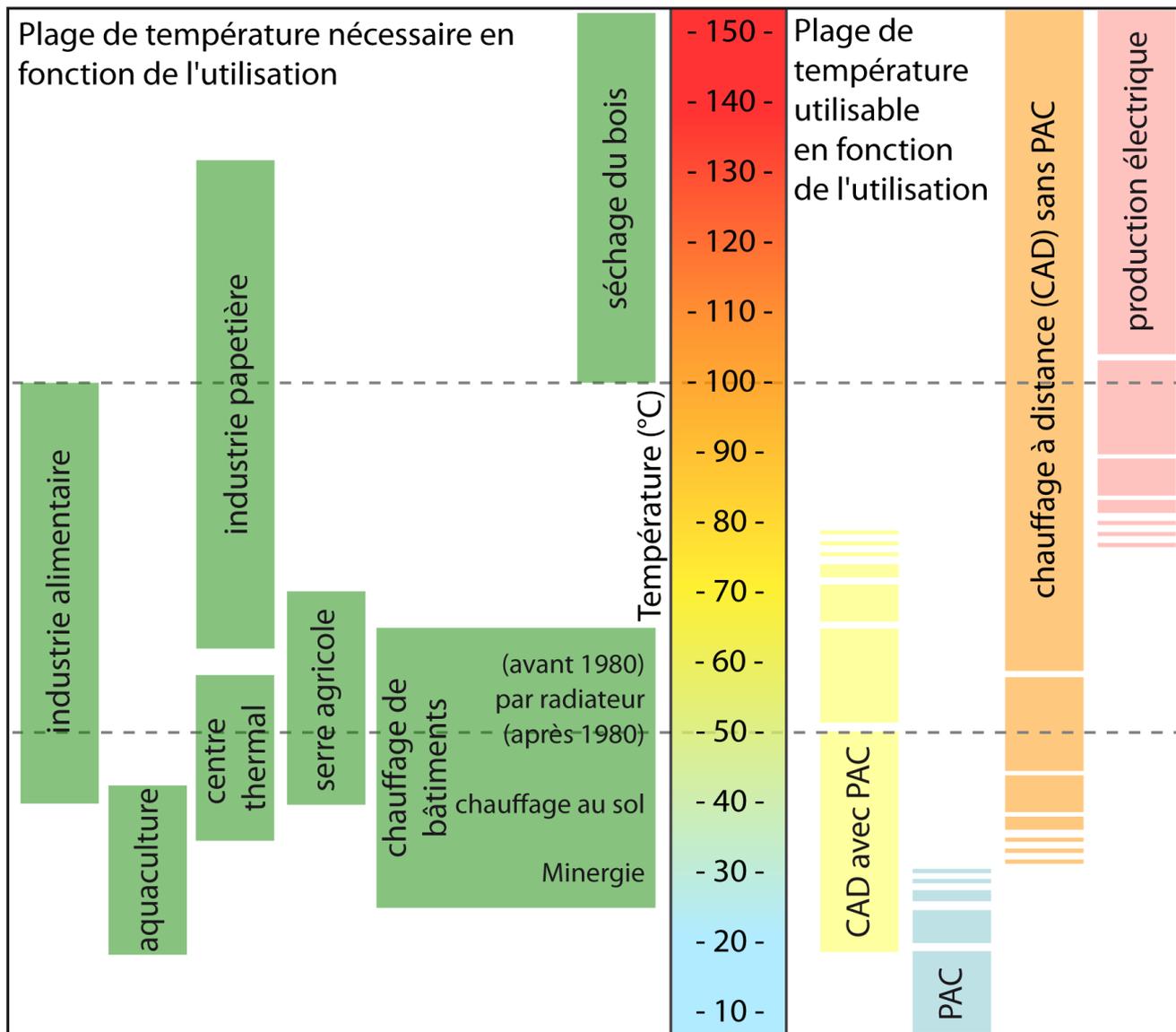
## Variations saisonnières de la température de 0 à 20 m de profondeur

- A proximité de la surface, les températures sont très variables: fluctuations journalières à moins de 1 m de profondeur.
- En dessous, on mesure encore des variations: fluctuations saisonnières de 1 à 15 m de profondeur, selon le type de roches et la présence d'eau.
- Depuis 20 m, l'influence de l'énergie solaire n'est plus décelable et on observe le gradient géothermique normal.



# UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR

Utilisations  
diverses de la  
chaleur pour une  
gamme de  
température de  
10 ° C à > 150 ° C



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



Dégivrage d'un trottoir



Chauffage de petits bâtiments



Thermalisme



Pisciculture



Rénovation énergétique



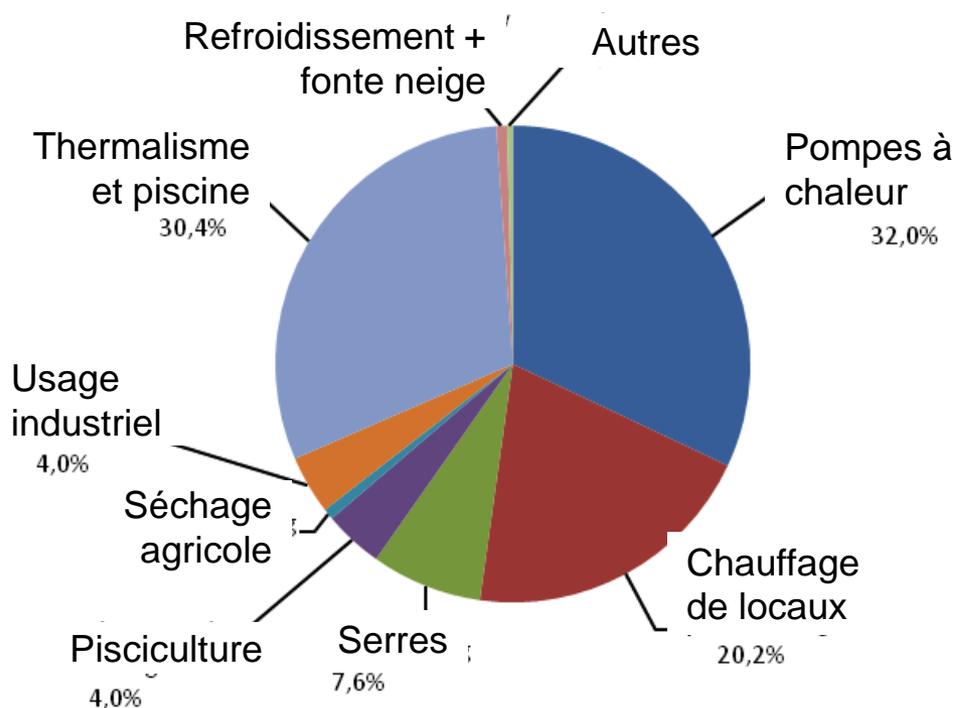
Serres agricoles

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



## Exemples de réseaux de chauffage urbain





## Répartition des modes d'utilisation directe de la géothermie

Sous notre climat, une puissance de 1 MW th (Mégawatt thermique) permet d'assurer le chauffage le 150 à 190 équivalents-logements

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

Pays	GWh/an	MW th	Usage principal
1. Chine	20'932	8'898	Thermalisme + CAD
2. USA	15'710	12'611	Couplage PAC
3. Suède	12'585	4'460	Couplage PAC
4. Turquie	10'247	2'084	CAD
5. Japon	7'139	2'100	Thermalisme
6. Islande	6'768	1'826	CAD
7. France	3'546	1'345	CAD
...			
16. Suisse	2'143	1'061	Couplage PAC

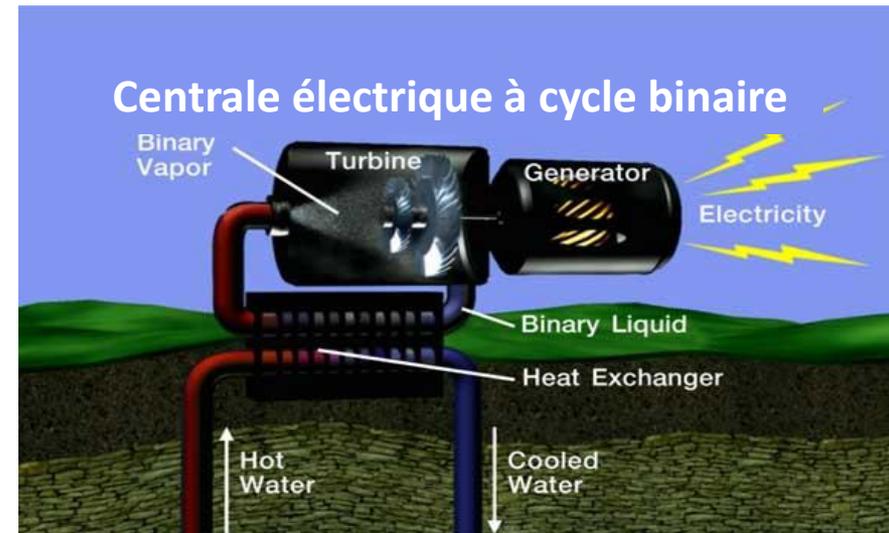
En 2010, **74 pays** avaient une capacité installée totale de **48'500 MW de chaleur** à partir de la géothermie.

Production d'électricité à l'aide d'un fluide secondaire organique à basse température de vaporisation (isopentane, isobutane):  
→ centrale à cycle binaire (ORC)

<100  
→  
>300  
° C

Production d'électricité avec la vapeur géothermale sous pression

180  
→  
>300  
° C



# UTILISATION DE L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE DANS LE MONDE

## Puissance installée et production en 2010 d'électricité géothermique dans les pays avec >100 MW él. installés

Dans **24 pays**, un total de 10'700 MW él. installés en 2010: → 65 millions d'habitants alimentés par de l'électricité géothermique.



Centrales de Carboli (2x20 MWe), Toscane

Pays	MW él.	GWh/an	Nb. centrales
USA	3'093	16'603	209
Philippines	1'904	10'311	56
Indonésie	1'197	9'600	22
Mexique	958	7'047	37
Italie	843	5'520	33
Nlle Zélande	628	4'055	43
Islande	575	4'597	25
Japon	536	3'064	20
El Salvador	204	1'422	7
Kenya	167	1'430	10
Costa Rica	166	1'131	6

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

# TYPES D'INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES EN SUISSE (1)

<<<<< **chaleur + froid** >>>>>

**électricité + chaleur**

**chaleur**

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

Aquifère profond

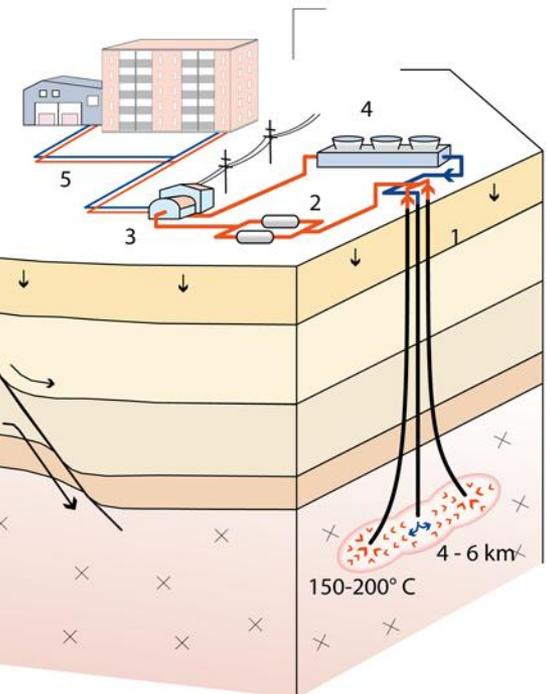
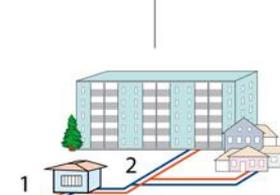
1. Centrale de chauffage
2. Réseau de chauffage à distance

Chaleur de la nappe phréatique

Sonde géothermique verticale

Pieux de fondation énergétiques & géostructures

Champ de sondes géothermiques



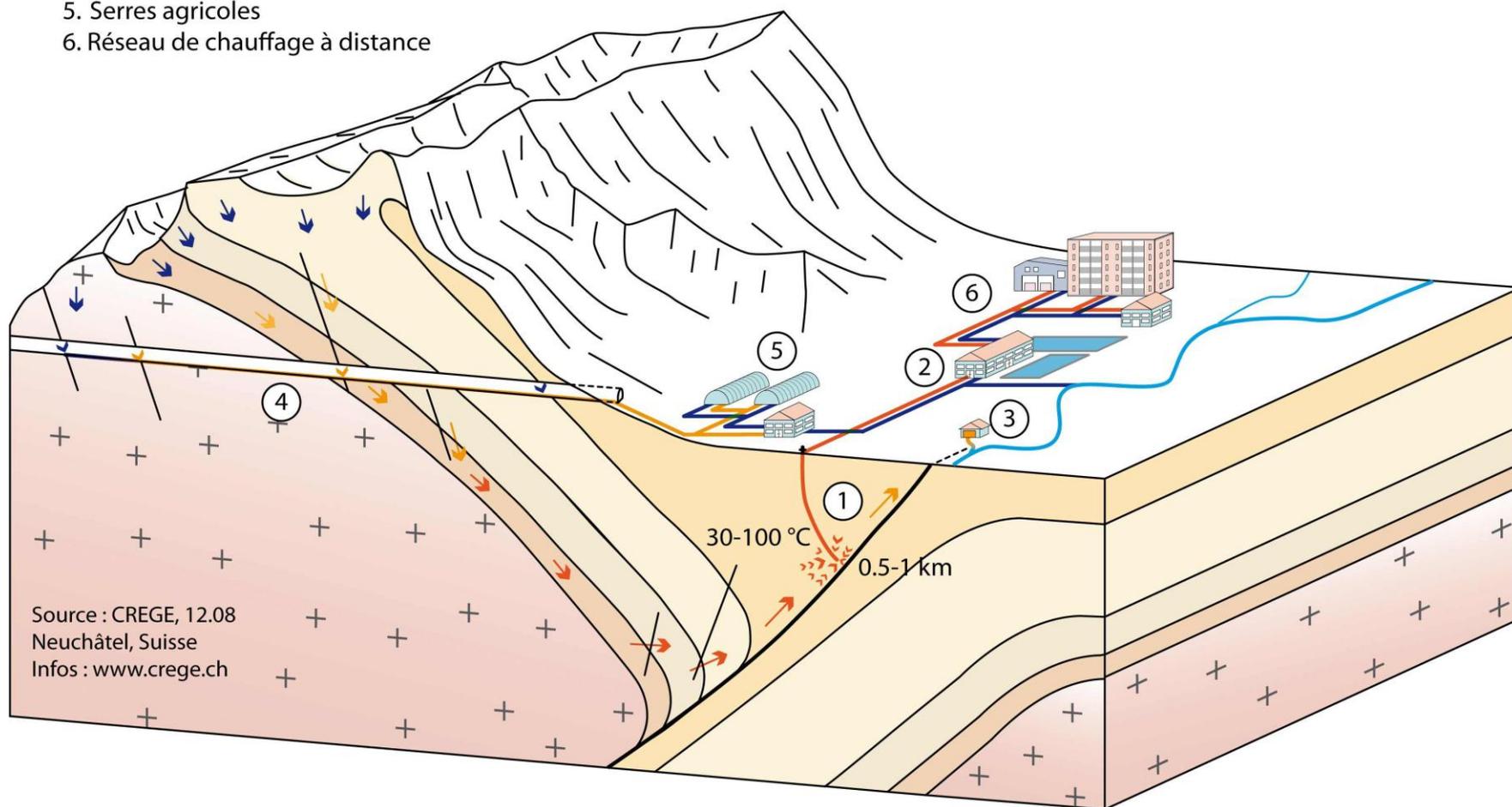
Source : CREGE, 09.08  
Neuchâtel, Suisse  
Infos : [www.crege.ch](http://www.crege.ch)

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

### Chaleur des tunnels et hydrothermalisme

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

### Chaleur des tunnels et hydrothermalisme



Source : CREGE, 12.08  
Neuchâtel, Suisse  
Infos : [www.crege.ch](http://www.crege.ch)

# POMPE A CHALEUR ET GEOTHERMIE (1)

- La pompe à chaleur (PAC) est utilisée en géothermie dès que la température de la ressource est plus faible que la température d'entrée du circuit.
- Température d'entrée : -5 à +50° C
- Température de sortie: -5 à +65° C
- Très efficace pour les bâtiments neufs.

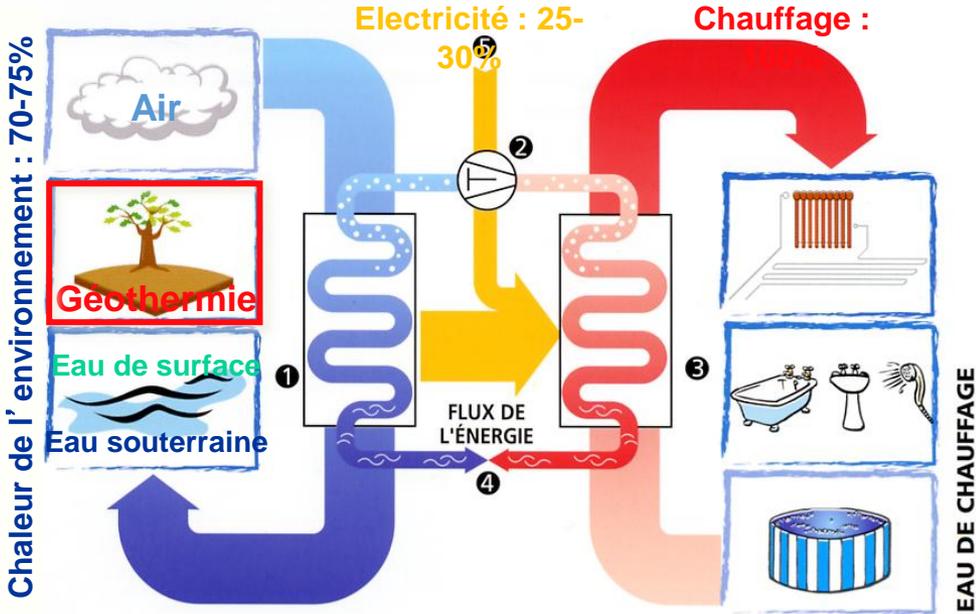


Schéma de principe d'une PAC

1. Evaporateur 2. Compresseur 3. Condenseur 4. Soupape de détente 5. Energie électrique

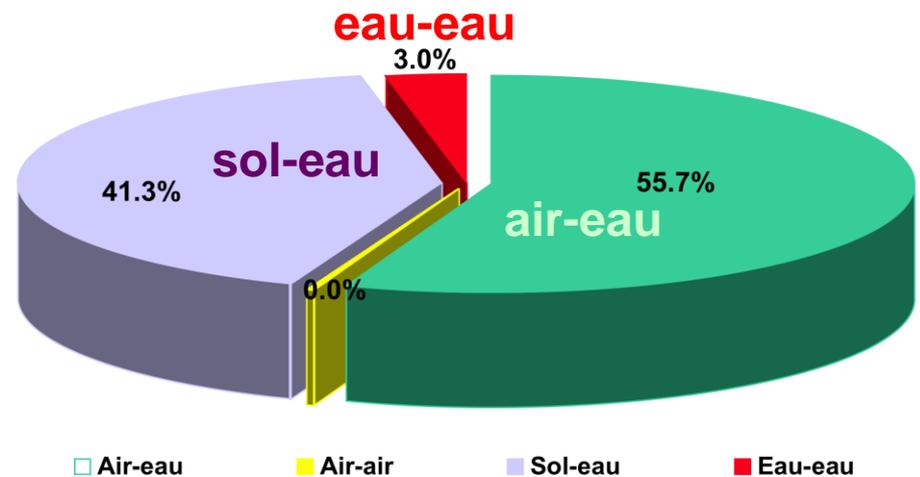
PAC	Source d'énergie	Mode de captage	Coefficient de performance
<b>sol-eau</b>	- Chaleur du sous-sol	- Réseau de tubes horizontaux - Echangeurs de chaleur verticaux en forage	COP 4 - 4.5
<b>eau-eau</b>	- Eau souterraine - Eau de surface - Eau de rejet	- Extraction d'eau par pompage: puits lac, rivière, effluents de STEP	COP 5 - 5.5
<b>air-eau</b>	- Air extérieur - Air intérieur	- Prise d'air à l'extérieur - Prise à l'intérieur d'un bâtiment	COP 3 - 3.5

## POMPE A CHALEUR ET GEOTHERMIE (2)

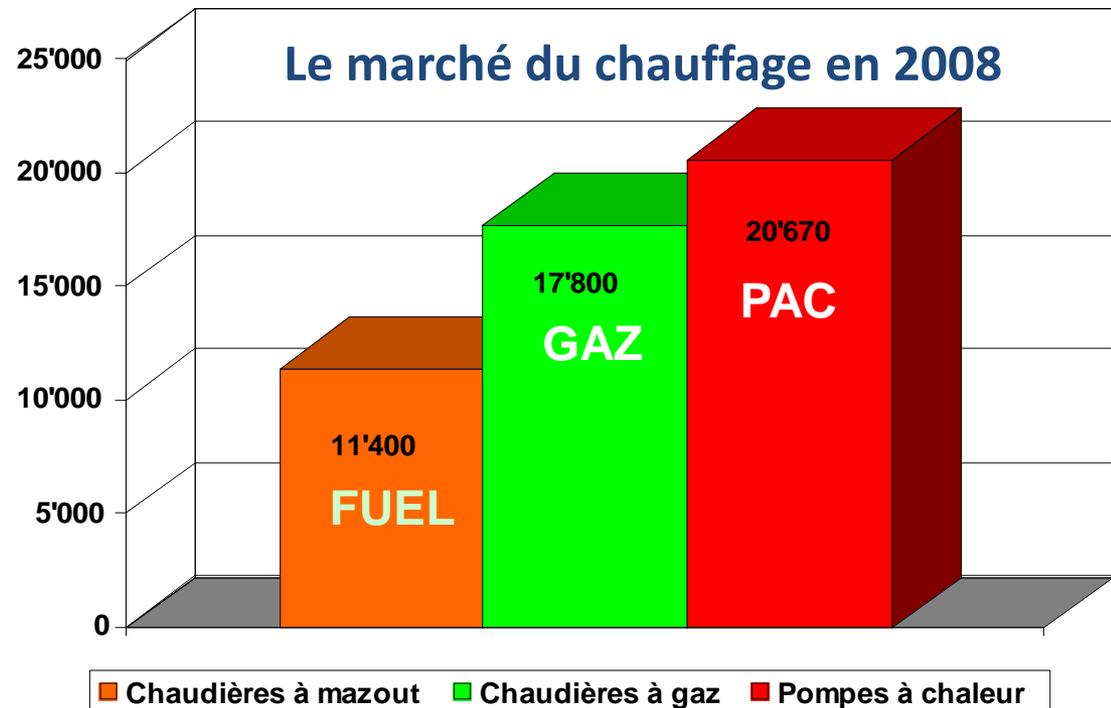
### Les PAC en 2009 en Suisse

- Nombre de PAC installées: **154'000**.
- Consommation d'électricité par les PAC : **1,57 %** de la consommation totale d'électricité (1'141 GWh).
- Chaleur utile produite par les PAC : **3.3 %** de la consommation totale des ménages (3'566 GWh).
- Substitution de **365 millions de litres par an** de fuel.

Sources: OFEN

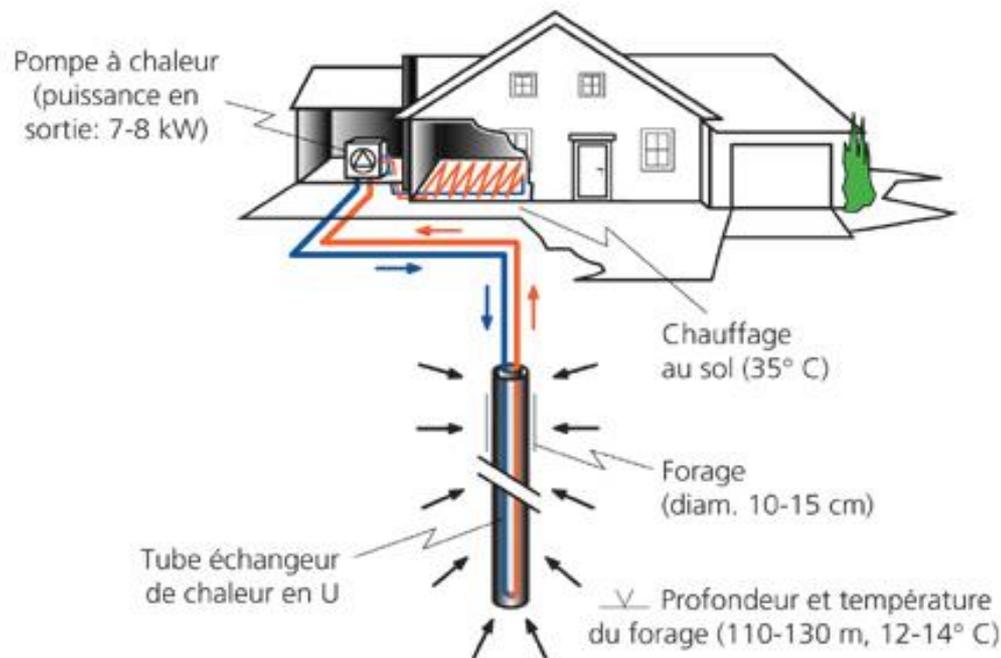


### Répartition des ventes de PAC par type en 2009



## SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES (1)

- Sonde géothermique verticale = 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 et le 25% restant est représenté par l'électricité alimentant la PAC.
- Plus de > 65'000 installations en Suisse, la plupart installées dans des maisons mono-familiales neuves.



### Sonde géothermique verticale pour une villa familiale

## SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES (2)

- Technique de plus en plus utilisée pour la rénovation des bâtiments et des systèmes de chauffage.

### Avantages d'une sonde géothermique

- Indépendance vis-à-vis du prix du fuel
- Pas de cheminée ni de citerne
- Pas d'émission de CO<sub>2</sub>
- Durée de vie de 30 ans pour les équipements de surface
- Durée de vie estimée de 50 ans pour la sonde
- Récupération rapide de l'investissement (env. 5 ans pour une habitation neuve).

### Coût d'une sonde géothermique pour le chauffage et l'eau chaude d'une villa mono-familiale neuve

- Forage 140 m + sonde double U 32 mm: ≈ 8000 €
- PAC de 6 à 8 kW: ≈ 8'500 €
- Divers: ≈ 1'500 € (sauf sols chauffants et boiler)
- **Total: ≈ 18'000 €**



**2 sondes géothermiques de 70 m pour chauffer une villa Minergie**

- 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 ; « rafraîchissement estival sans machine frigorifique, uniquement avec une pompe de circulation ».
- Au total > 50 installations en Suisse.

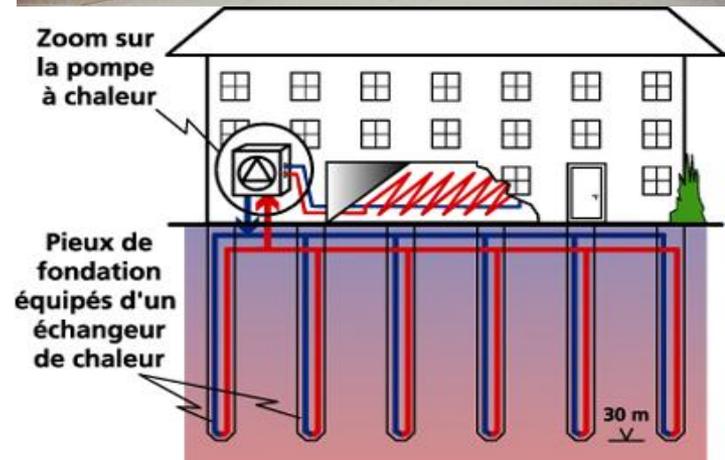


## Entreprise industrielle chauffée et rafraîchie par un champ de sondes depuis 1995 :

- 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.
- Au total > 30 installations en Suisse.

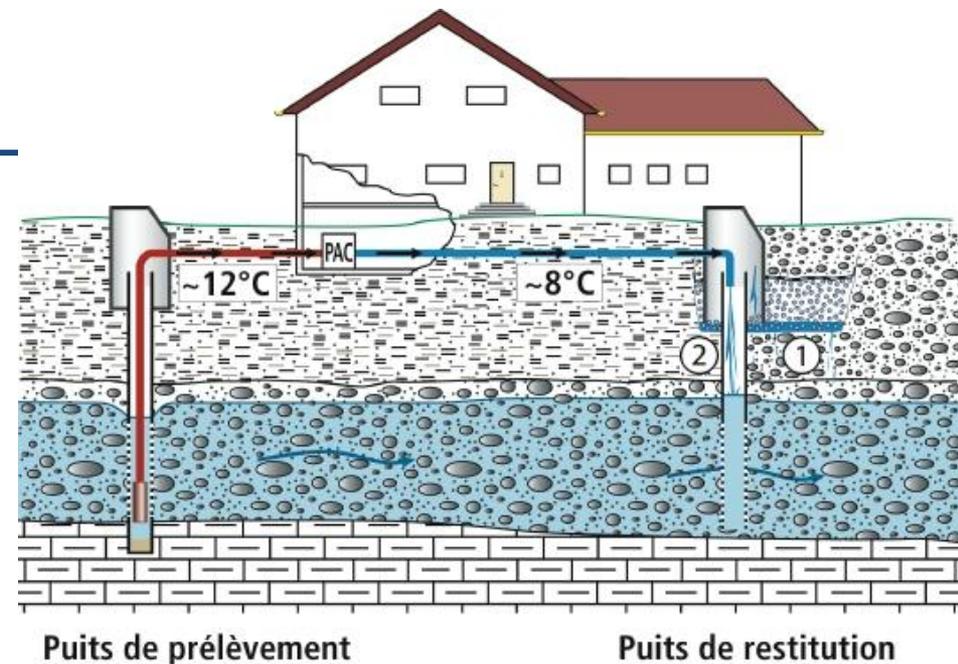


**Cage  
d'armature  
pour un  
pieu  
énergétique  
moulé**



# CHALEUR DE LA NAPPE PHRÉATIQUE

- La température de l'eau des nappes phréatiques (8-12° C) est  $\pm$  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 (12-> 8° C) est réinjectée dans un autre puits, ou déversée en surface.
- Au total > 5'000 installations de ce type.



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



- 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; 7 d'entre eux l'utilisent.
- Au total 7 tunnels équipés d'installations de chauffage de bâtiments (Alpes, Jura et Plateau).



Accès au Tunnel de base du Lötschberg

## Installations de géothermie dans les tunnels alpins de base Alp Transit

- Lötschberg (35 km) : serre tropicale, pisciculture et caviar, réseau de chauffage.
- St. Gothard (57 km) : projet de réseau de chauffage en 2015.

- 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 65° 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 sont couverts).
- Au total, env. 14 centres thermaux utilisent la géothermie pour les piscines et le chauffage de locaux.



## AQUIFERES PROFONDS

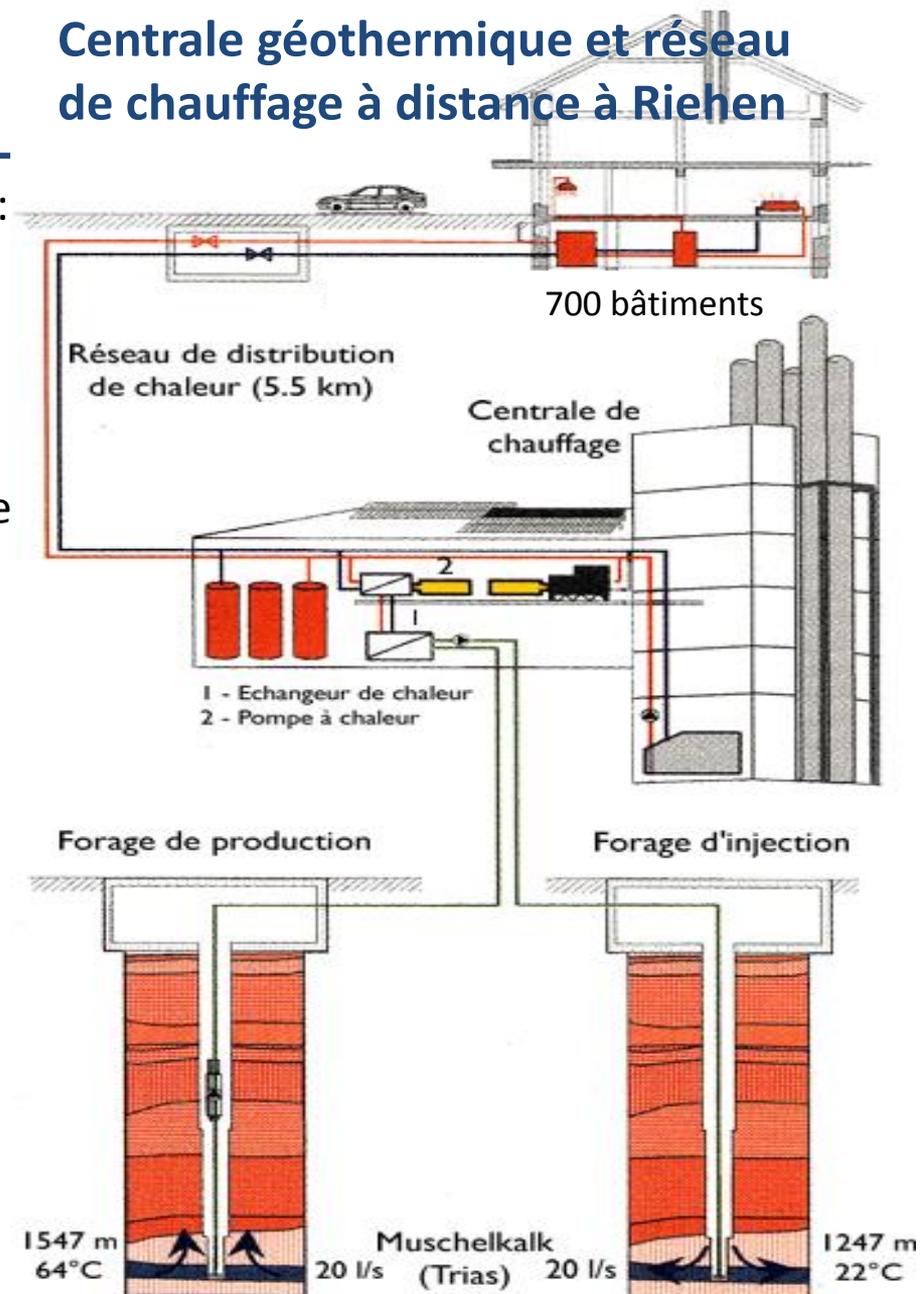
- Nappes d'eau profondes sous le Plateau suisse :
  - 35 à 45° C à 1'000 m de profondeur
  - 45 à 65° C à 1'500 m de profondeur.

### Riehen (Bâle-Ville)

- La plus grande centrale géothermique de Suisse alimente un réseau de chauffage de 700 bâtiments 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 totale distribuée. Le solde : électricité (deux pompes à chaleur), gaz (centrale de cogénération) et mazout (chaudières d'appoint).

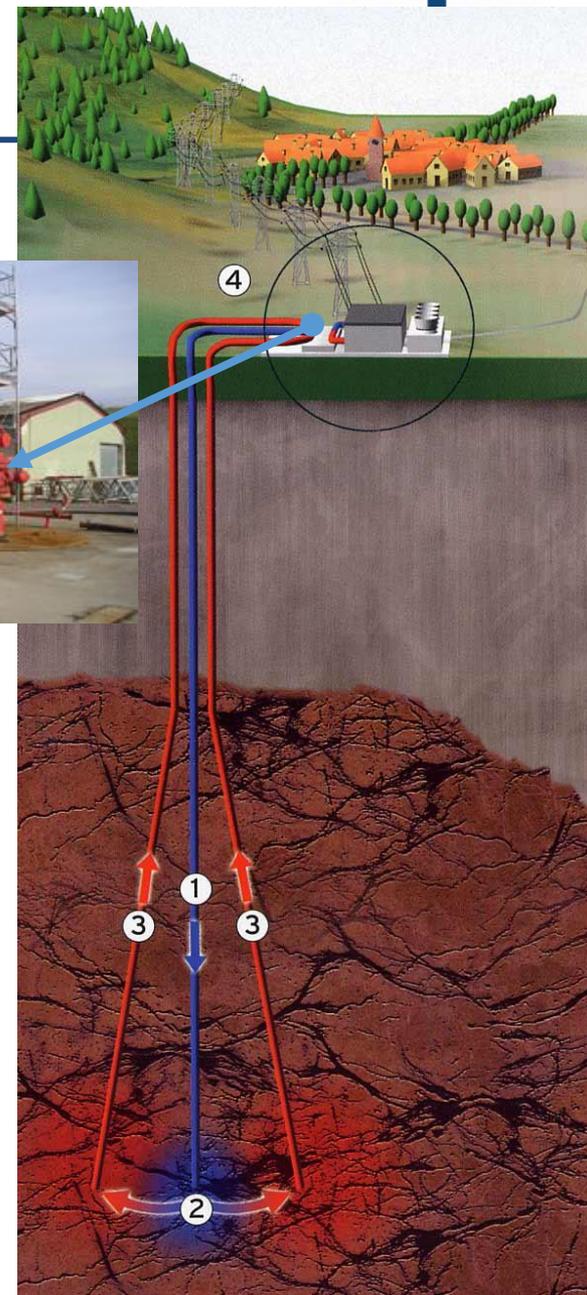
Au total, 5 installations de chauffage (en général de petite taille sauf celle de Riehen).

## Centrale géothermique et réseau de chauffage à distance à Riehen



# 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 150 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.



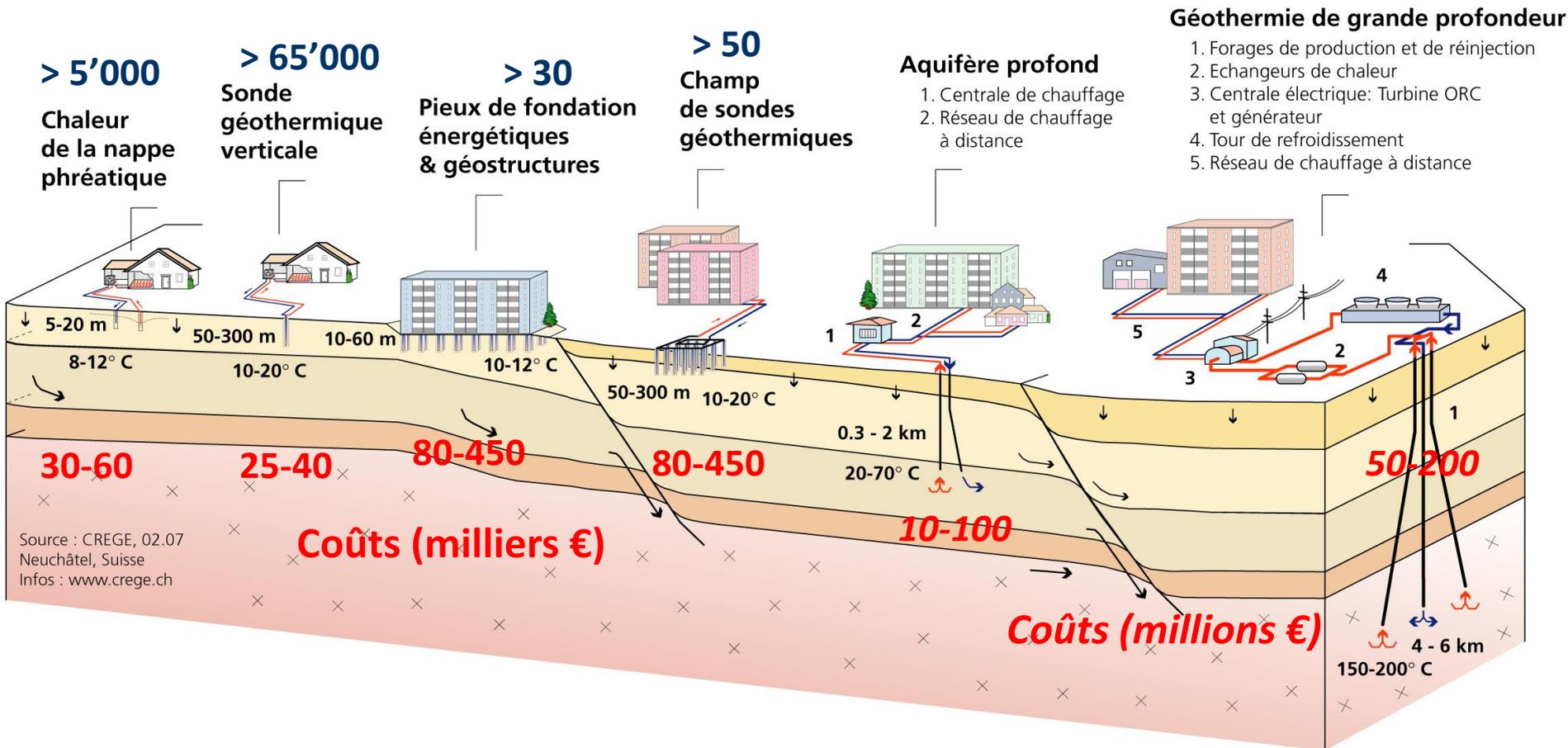
## Projets actuels

- **Fossé rhénan**: 1<sup>ère</sup> centrale pilote à Soultz-sous-Forêts en Alsace; 2<sup>e</sup> centrale à Landau et plusieurs autres en construction en Allemagne.
- **Suisse**: Projet Deep Heat Mining à Bâle: arrêté depuis le 8.12.06 suite à de la sismicité induite ! Nouveau programme avec sélection de sites sur le Plateau.
- **Australie**: forte activité EGS; énorme potentiel et 1<sup>ère</sup> centrale pilote prévue fin 2012.

## Nombre d'installations

6 aquifères profonds  
+ 7 tunnels  
+ 8 centres thermaux

1 centrale  
pilote en  
2015 ??



## Développement en Suisse

- Au total, 1330 MW thermiques de géothermie installée en 2010 en Suisse :
  - ✓ 85 % par les sondes géothermiques verticales;
  - ✓ 13 % par l'usage thermique des nappes phréatiques;
  - ✓ 2 % par les autres technologies !

## Raisons du succès

- Baisse de moitié du prix du forage des sondes géothermiques entre 1985 et 1995.
- Baisse du prix et diversification des PAC (par ex. PAC spéciales pour la rénovation).
- Mise place d'assurances qualité: forage, PAC, et installation complète (en cours).

## Tendance actuelle

- Sondes géothermiques plus profondes (200-400 m).
- Développement de grands champs de sondes (50-100).

## Potentiel

- Progression continue de 10 – 15 % par an.
- Potentiel très élevé sur presque tout le territoire.
- Efficacité énergétique très favorable pour les bâtiments à faible consommation.

## Développement en Suisse

- Pas de production électrique par la géothermie; 5 installations pour la chaleur.
- Développement très faible en raison des conditions peu favorables : investissement initial à risque, géologie profonde mal connue, gestion par canton des autorisations et des concessions.

## Tendance actuelle

Mise en place progressive de conditions favorables :

- Assurance du risque géologique (max. 50% du prix du forage et des tests);
- Rétribution du courant à prix coûtant (0.33 €/kWh pour les installations  $\leq 5$  MWe);
- Sortie du nucléaire prévue en 2034;
- Programme de développement « Energie 2050 » en discussion;
- Intérêt nouveau des producteurs d'électricité -> énergie en ruban.
- Nouvelles directives et projet de lois pour l'utilisation du sous-sol.

## Potentiel

- Aquifères profonds : exploration indispensable, mais ressources limitées.
- Systèmes EGS : potentiel théorique immense; technologie en développement; potentiel réalisable pour 2035 : 150 MWe.

# Merci de votre attention !

Dr. François-D. Vuataz  
Laboratoire de Géothermie - CREGE  
c/o CHYN, UNINE  
Rue E.-Argand 11  
CH-2000 Neuchâtel, Suisse  
[francois.vuataz@unine.ch](mailto:francois.vuataz@unine.ch)  
[www.unine.ch/chyn](http://www.unine.ch/chyn)  
[www.crege.ch](http://www.crege.ch)

