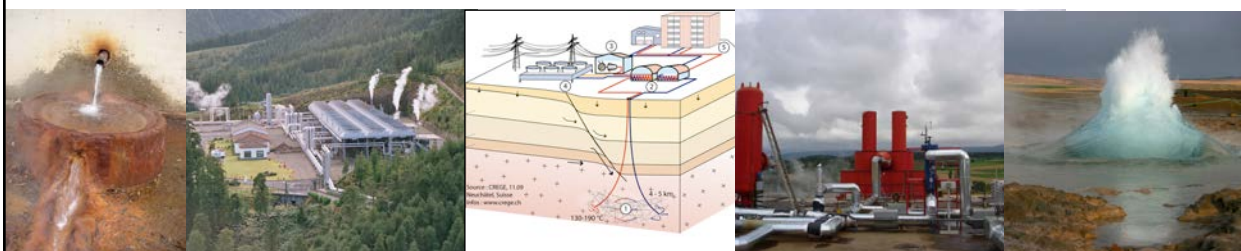


L'énergie géothermique pour une production électrique tirée des profondeurs



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

L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE POUR UNE PRODUCTION ÉLECTRIQUE TIRÉE DES PROFONDEURS

Contenu

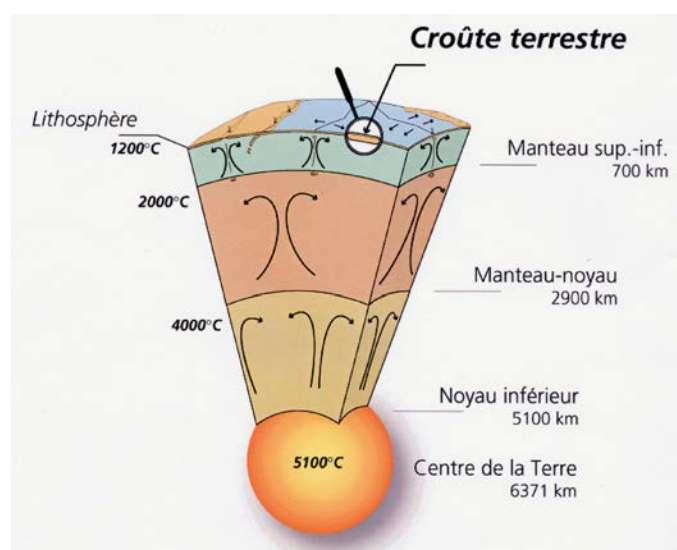
- ✓ *Introduction et origine de la chaleur*
- ✓ *Utilisation de la chaleur extraite*
- ✓ *Options pour la production d'électricité*
- ✓ *Electricité par la géothermie chez nos voisins*
- ✓ *Conditions et projets en Suisse*
- ✓ *Avantages et limites de la géothermie profonde*
- ✓ *Potentiel de la géothermie*

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

Type de centrale	Production électrique en 2013 (%)	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)	16	22'500 (barrage 3-Gorges, Chine)
Nucléaire	11	8'200 (Japon)
Vent	3.0	5'200 (Chine)
Biomasse	1.4	750 (UK)
Solaire PV	0.5	550 MW-crête (USA)
Géothermie	0.3	
- Turbine géothermique		140 (Nlle Zélande)
- Champ géothermique		1'600 (USA)

ORIGINE DE LA CHALEUR DE LA TERRE

- 62 % de la chaleur émise par notre planète : décroissance des éléments radioactifs contenus dans les minéraux des roches (famille de l'uranium) de la croûte terrestre. Le reste : 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 !
- Flux de chaleur remontant en permanence de l'intérieur de la Terre : 42×10^9 Watts. Equivalent à 50'000 fois l'énergie de toutes les ressources mondiales de pétrole et de gaz.
- La géothermie représente la chaleur de la Terre qui peut être utilisée comme énergie.

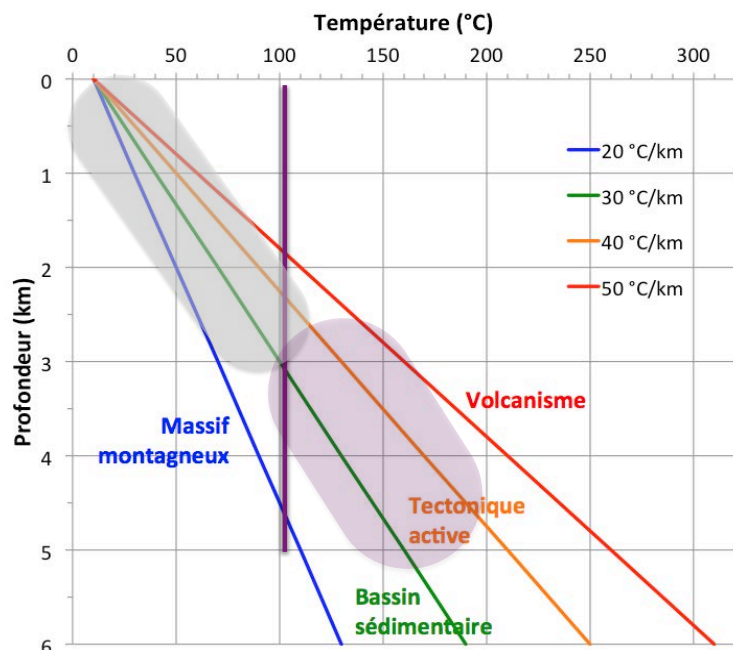


CHALEUR DE LA TERRE: MANIFESTATIONS DE SURFACE



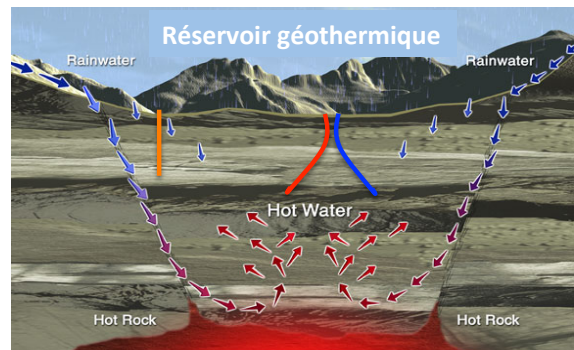
LA CHALEUR DE LA TERRE EN PROFONDEUR

- Gradient géothermique : accroissement moyen de la température avec la profondeur dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre.
- Gradient géothermique moyen : $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ($3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)
>>> bassins sédimentaires
>>> Plateau suisse !
- **Limite économique pour produire de l'électricité: $> 100^{\circ}\text{C}$.**
- $10 - 100^{\circ}\text{C}$: usage thermique direct ou avec une pompe à chaleur.
- $110 - >200^{\circ}\text{C}$: coproduction électricité et de chaleur.



EXTRACTION DE LA CHALEUR DE LA TERRE

- Comment extraire la chaleur des roches profondes pour l'apporter à la surface >>> nécessité d'un fluide caloporteur et de forages.
- Comment trouver des fluides contenus dans les formations rocheuses >>> prospection des aquifères profonds.
- Si fluide dans le sous-sol avec une perméabilité suffisante >>> aquifère productif.
- Si pas ou peu de fluide (roches peu perméables) >>> ouverture de fissures par stimulation pour créer un échangeur de chaleur souterrain.



Potentiel d'énergie libérée

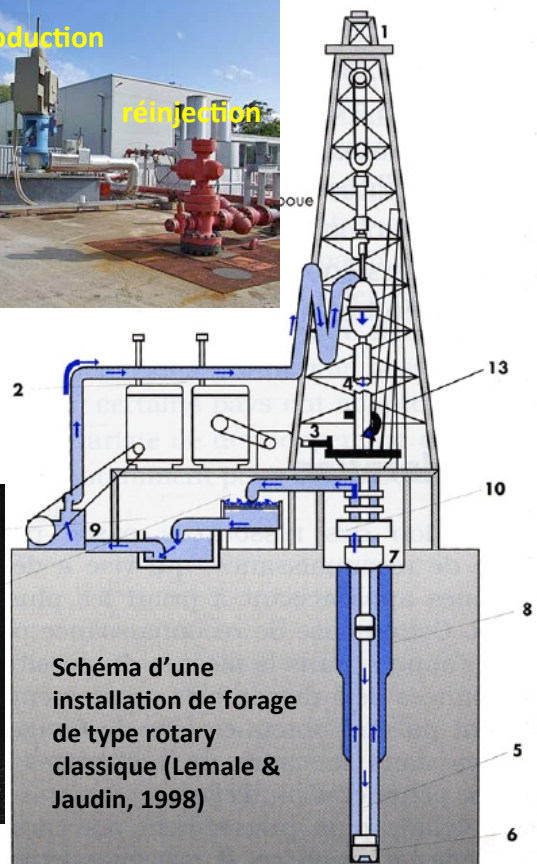
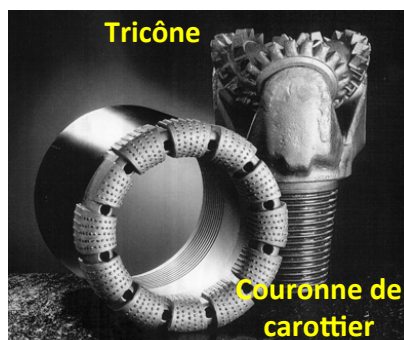
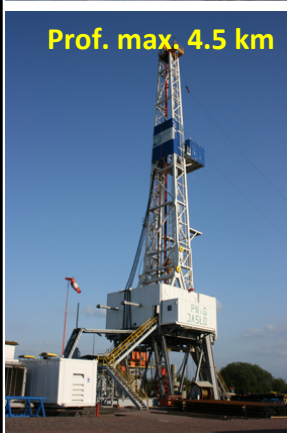
Bloc de granite de 1 km³ refroidi de 200 à 180°C pour son exploitation énergétique :

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



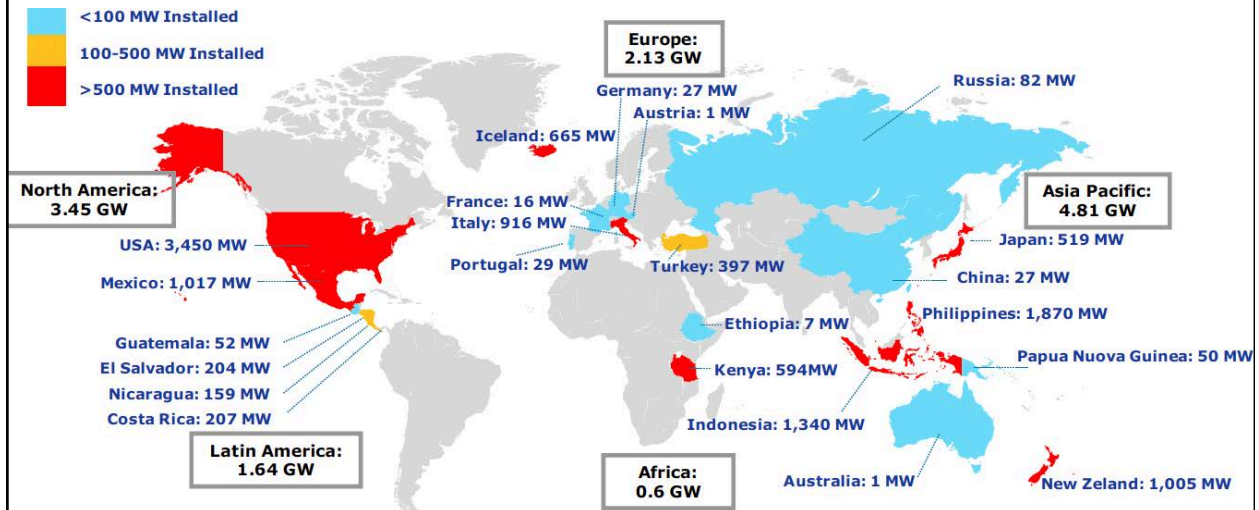
FORAGES DE PROSPECTION ET DE PRODUCTION

Équipement de forage



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

- Production d'électricité par la géothermie débute en Italie dès 1904 et de manière industrielle en 1913.
- Japon, USA et Nouvelle Zélande ont aussi été les pays pionniers dès les années 1920.
- En 2015, 25 pays produisent de l'électricité par la géothermie.



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

UTILISATION DE L'ÉLECTRICITÉ GÉOTHERMIQUE DANS LE MONDE (2)

- Electricité produite en exploitant des réservoirs géothermiques :
 - profondeurs de <1 à >4 km
 - températures de 110 à 350°C.
- Plus de 70 millions d'habitants alimentés par l'électricité géothermique dans 25 pays.
- Une puissance de 1 Méga Watt électrique permet d'alimenter >1'200 habitants en Suisse et env. 8'000 aux Philippines !
- La production électrique nette en Suisse est de 67'000 GWh/an

Puissance installée et production d'électricité géothermique en 2015 dans les 10 premiers pays

Pays	Puissance inst. (MWe)	Production (GWh/an)
USA	3'450	16'600
Philippines	1'870	9'646
Indonésie	1'340	9'600
Mexique	1'017	6'071
Nlle Zélande	1'005	7'000
Italie	916	5'660
Islande	665	5'245
Kenya	594	2'848
Japon	519	2'687
Turquie	397	3'127
Total: 25 pays	12'635	73'549

CONVERSION DE L'ÉNERGIE GEOTHERMIQUE EN ÉLECTRICITÉ (1)

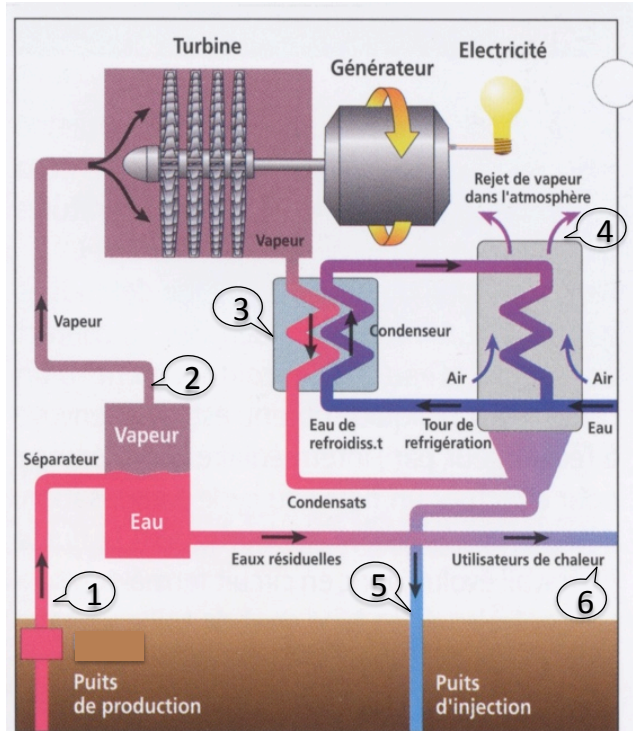
Ressources à haute température

- Domaine: 150 à 350°C
- Puissance par unité: 10 à 140 MWe.

Centrale à condensation

- ① Mélange eau-vapeur sort du puits de production.
- ② Séparateur envoie la vapeur seule sous pression dans la turbine.
- ③ Vapeur géothermique à basse pression condensée en sortie de turbine.
- ④ Rejet de vapeur d'eau dans l'atmosphère.
- ⑤ Condensats et fluides résiduels réinjectés dans le réservoir.
- ⑥ Utilisation thermique des fluides résiduels si consommateurs de chaleur à proximité.

Centrale géothermique à condensation et détente simple



CONVERSION DE L'ÉNERGIE GEOTHERMIQUE EN ÉLECTRICITÉ (2)

Exemples de centrales géothermiques à haute température

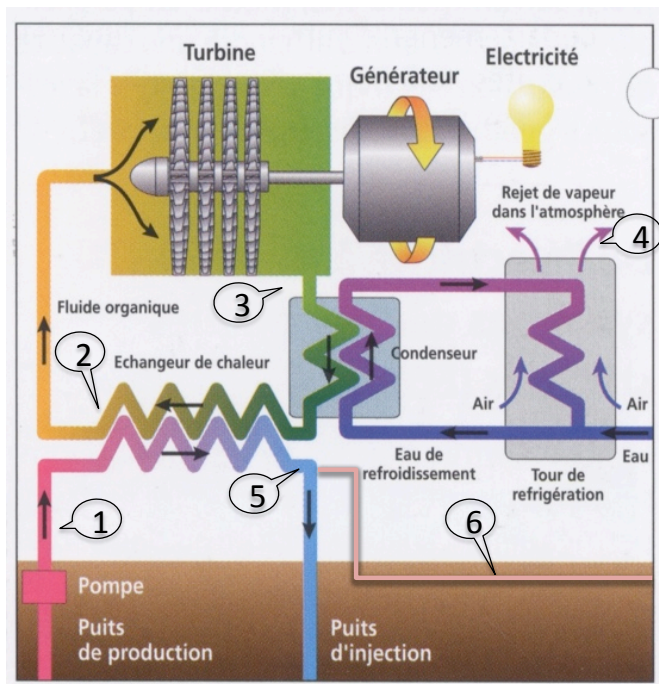


Ressources à basse ou moyenne température

- Domaine: 100 à 200°C
- Puissance par unité: 1 à 25 MWe.

Centrale ORC à fluide binaire

- ① Pompage du fluide géothermique en phase liquide.
- ② Echange de chaleur: vaporisation du fluide de travail sous pression vers la turbine.
- ③ Condensation du fluide de travail à basse pression en sortie de turbine.
- ④ Rejet de vapeur d'eau (ou air de refroidissement) dans l'atmosphère.
- ⑤ Réinjection du fluide géothermique dans le réservoir.
- ⑥ Utilisation thermique du fluide résiduel pour des consommateurs de chaleur.



Centrale géothermique à fluide binaire

Centrales ORC à fluide binaire: utilisable en Suisse comme dans les pays voisins

- ORC = Cycle Organique de Rankine.
- Fluide de travail organique à bas point de vaporisation : isobutane, isopentane, ammoniac.
- En zone habitée, fluide de travail ininflammable peut être utilisé: par ex. réfrigérant HFC-245fa.
- Aucune émission dans l'atmosphère : 2 circuits fermés sous pression (fluide géothermique et fluide organique de travail).
- Efficacité de la conversion énergétique selon la température : 7 à 16 %.
- Coefficient d'utilisation annuel : 95 à 98 %.



Maquette d'une centrale géothermique ORC à fluide binaire (ORMAT)

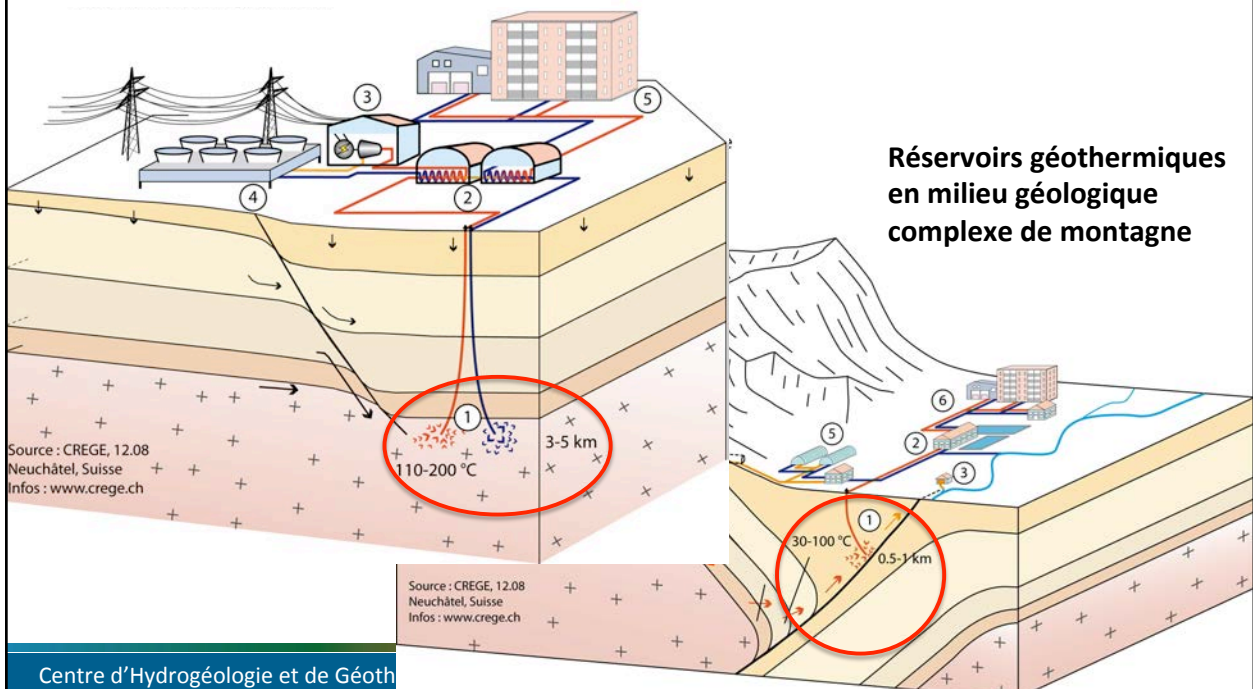
Exemples de centrales géothermiques à fluide binaire



RESSOURCES GEOTHERMIQUES POUR PRODUIRE DE L'ELECTRICITE

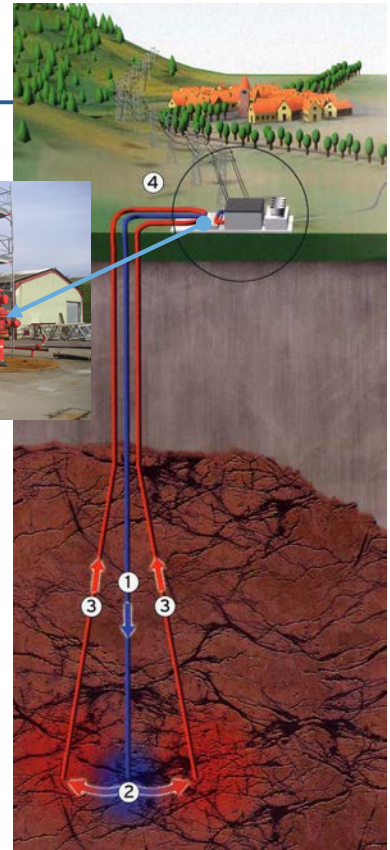
Systèmes fracturés en roches cristallines et aquifères en roches sédimentaires

Ressources géothermiques profondes en Suisse et en Europe continentale



SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES STIMULÉS PROFONDS - EGS

- Entre 4 à 6 km de profondeur, il y a peu d'eau disponible dans les roches, mais elles atteignent 160 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 et réalisations

- Nombreux projets entre 1975 et 1995 !
- Alsace: 1ère centrale pilote à Soultz
- Allemagne: 2 centrales industrielles
- Australie: centrale pilote réalisée en 2013.
- Bâle: projet arrêté depuis le 8.12.06 !
- **Depuis 2011 Geo-Energie Suisse: 4 projets en cours, dont le plus avancé à Haute-Sorne (JU).**

FRANCE

1ère centrale pilote EGS à Soultz-sous-Forêts, Alsace

Projet de recherche européen (1987-2008)

- Leaders: France + Allemagne
- Equipes de recherche: UK, CH, I,

Réservoir géothermique

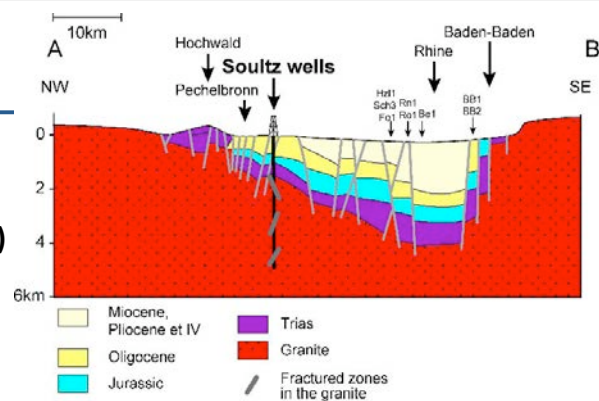
- Fossé Rhénan: zone d'extension, flux de chaleur et gradient géothermique élevés dans la couverture sédimentaire.
- Réservoir formé de granite fracturé et stimulé entre 4.5 et > 5 km.
- Température: 200°C à 5 km.

Forages

- 3 forages à 5 km de profondeur.
- Ecartement des forages à 5 km: 650 m.
- Ecartement en surface : 6 m.

Production électrique

- Centrale ORC à fluide binaire de 1.5 MWe.



Sept centrales géothermiques de production couplée chaleur + électricité sont en fonction en Allemagne

Fossé rhénan

- Landau (3.0 MWe)
- Insheim (4.3 MWe)
- Bruchsal (0.55 MWe)

Bassin molassique bavarois

- Unterhaching (3.4 MWe)
- Sauerlach (5.0 MWe)
- Dürnnhaar (5.5 MWe)
- Kirchstockach (5.5 MWe)

+ 3 en construction



Centrale géothermique d'Unterhaching, Bavière

Exemple de la centrale d'Unterhaching

- Puissance géothermique: 38 MWt.
- Puissance chaufferie d'appoint: 47 MWt.
- Longueur du réseau CAD: 28 km.
- Puissance du CAD: 30 MWt.
- Production de chaleur en 2008: 47'000 MWh (équivalent à ~ 3'000 ménages).
- Puissance électrique installée: 3.4 MWe.
- Production électrique: 21.5 GWh (équivalent à ~ 6'000 ménages).

Deux installations de très petite taille produisent électricité et chaleur avec des ressources géothermiques à 100-105°C.

Bad Blumau (Est de Graz)

Réservoir géothermique de 100°C. alimente une mini centrale électrique ORC de 0.2 MWe et un grand centre thermal.



Centrale ORC de Bad Blumau

Altheim (Haute Autriche)

- Réservoir géothermique de 106°C alimente une centrale électrique ORC de 1 MWe et réseau de chauffage pour 2'000 habitants.
- Selon la saison et la demande en chauffage, les deux modes d'utilisation se partagent la ressource géothermique entre production de chaleur et d'électricité.

Centre thermal à Bad Blumau



Krafthaus geothermische Stromerzeugung
↑ Centrale ORC d'Altheim ↓

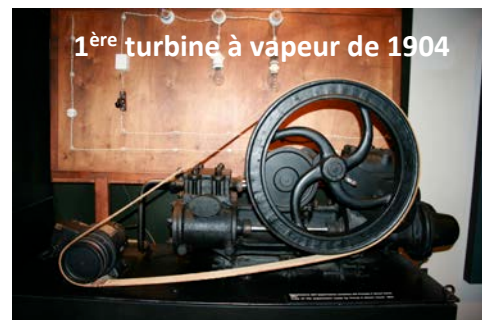
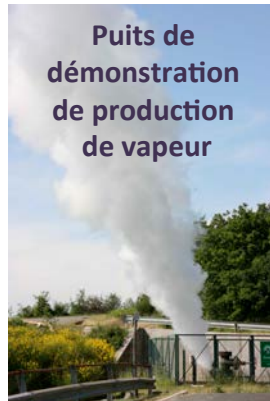


Dampfleitung
Turbinengehäuse
Kondensator

- L'Italie est le berceau de la géothermie industrielle: dès 1913, la production d'électricité a démarré à Larderello (au sud-ouest de Sienne, Toscane).
- Les ressources proviennent de 3 champs géothermiques à haute température.
- En 2015, 35 centrales géothermiques produisent 915 MW électriques (env. 25 % de l'électricité de la Toscane).



Puits de
démonstration
de production
de vapeur



AVANTAGES DE LA GEOTHERMIE PROFONDE EN SUISSE ET EN EUROPE

Universalité: utilisable dans tous les pays.

Variété: large gamme de températures pour la production électrique (100 - 350°C) et de profondeurs (2'000 - 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 (CO₂).

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

Discrétion: installations modernes compactes, occupant 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 >> concurrentielle avec les autres énergies.

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

Aspects techniques

- ✓ Connaissance lacunaire des conditions géologiques profondes (1'000 – 5'000 m).
- ✓ Pas de méthodes indirectes fiables pour prévoir la perméabilité des aquifères.
- ✓ Coût élevé des forages profonds, lié à la taille des projets, aux prix des hydrocarbures et de l'acier.
- ✓ Incitations et promotion faible par rapport à d'autres énergies.
- ✓ Durée trop élevée de réalisation des projets.
- ✓ Pas de centrale électrique géothermique existante (comportement à long terme, durée de vie du réservoir, coûts d'exploitation, promotion, etc.).
- ✓ Effet d'échelle sur l'évolution des coûts (forages, réservoir) encore difficilement estimable.
- ✓ Prévision du risque sismique induit par la stimulation hydraulique à améliorer.

Aspects sociétaux

- Le sous-sol profond est méconnu en Suisse (ni mines, ni pétrole) et considéré comme zone à risque.
- Faible acceptation sociale des grands projets (géothermie et autres énergies).
- En comparaison, peu de remise en question pour transporter et stocker gaz, pétrole et substances chimiques.
- L'approvisionnement en énergie n'est pas considéré comme un problème par la société.
- Les risques environnementaux sont considérés comme plus importants à l'échelle locale que nationale.

Stratégie énergétique 2050 de la Confédération

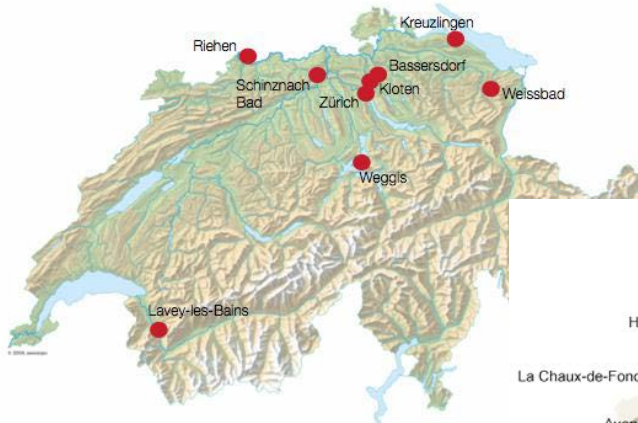
- Arrêt programmé des centrales nucléaires.
- Prévision OFEN pour la production d'électricité géothermique en 2050: 550 MWe.
- Soutien accru aux énergies renouvelables: fonds pour la R&D et les installations P&D.
- Création de 7 centres de compétence en énergie dont un en géothermie pour la recherche 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.

Cantons

- Projets d'étude des ressources géothermiques (GE) et de réalisation (VD).
- Modernisation de la législation sur le sous-sol, incluant la géothermie.

Secteur privé

- AXPO et BKW ont quitté le secteur de la géothermie profonde !
- **Geo-Energie Suisse AG**: consortium de 7 entreprises a créé en 2011 une compagnie dans le 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).



- **Installations de géothermie profonde en activité**
(Wyss & Link, 2015)



- **Forages réalisés entre 2010 et 2014**
- **Projets en phase de planification**
(Wyss & Link, 2015)

POTENTIEL DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE PROFONDE

- Dans le Monde, 40 pays pourraient produire 100% de leur électricité au moyen de la technologie actuelle (> 700 millions d'habitants).
- Aujourd'hui en Suisse: 154'000 tonnes équivalent-pétrole substituées par la géothermie basse température (90% par les sondes géothermiques verticales).

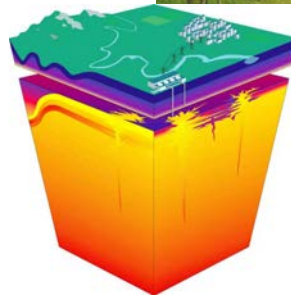
• La technologie EGS devrait arriver à maturité dans les années 2020-2030: cela représente un grand potentiel pour la cogénération d'électricité et de chaleur.

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

• Tous les pays nécessitant un chauffage hivernal de plus de 4 mois pourraient produire une partie importante de la chaleur nécessaire par la géothermie.

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

- Actuellement, les projets d'électricité 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 !
- De nombreuses technologies existent sur le marché pour produire, économiser et stocker l'énergie électrique.
- La **géothermie**, parmi les « nouvelles » énergies renouvelables, fait partie des réponses possibles pour le mix électrique 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>