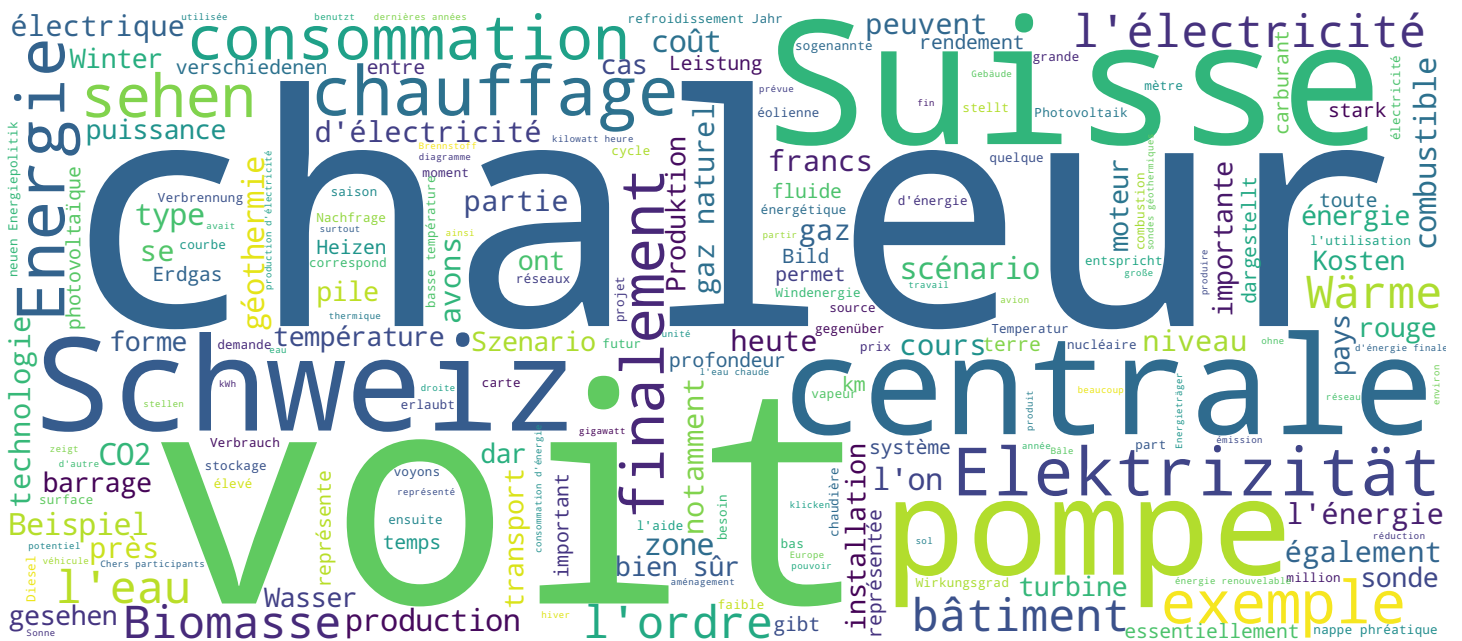


L19: Energie géothermique

Transition énergétique suisse comprendre pour choisir

Prof D. Favrat



EPFL

Search MOOC



Video





- Potentiel global
- Types de géothermie
 - Chaleur (basse et moyenne profondeur)
 - Electricité et chaleur (grande profondeur)
- Résumé de leurs caractéristiques générales
- Conclusions

La transition énergétique suisse

L19 : Energie géothermique Transition énergétique suisse comprendre pour choisir Chères participantes et chers participants, il est temps maintenant de passer à une énergie renouvelable très abondante et qui ne dépend ni des fluctuations atmosphériques des jours ou des saisons. Il s'agit de l'énergie géothermique. Nous allons passer en revue le potentiel global, le type de géothermie, à savoir la chaleur basse et moyenne profondeur ou bien, pour de l'électricité et de la chaleur, et ça c'est essentiellement les grandes profondeurs, et finalement nous ferons le résumé de leurs caractéristiques générales et passerons à quelques conclusions.

Notes

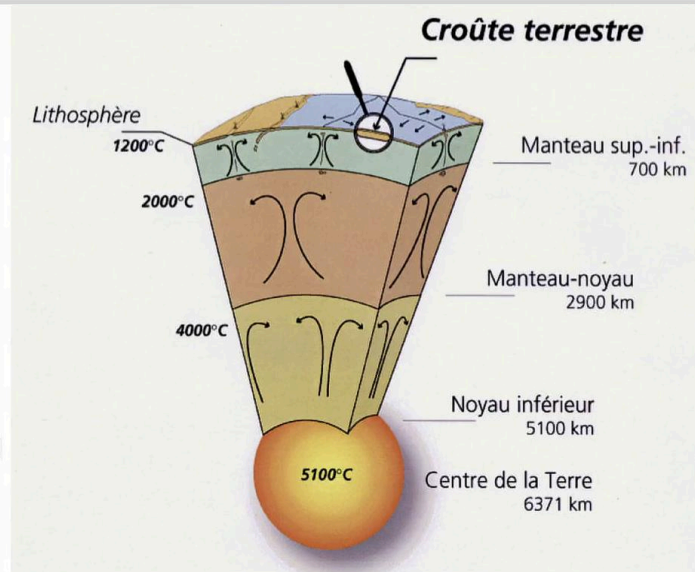
Summary



0m 03s

La chaleur de la terre

- 99% de la masse de la terre est $> 1000^{\circ}\text{C}$
- La majorité (62%) de la chaleur géothermique émise par la terre provient de la décroissance d'éléments radioactifs
- Le reste provient du refroidissement progressif du manteau et du noyau



La transition énergétique suisse

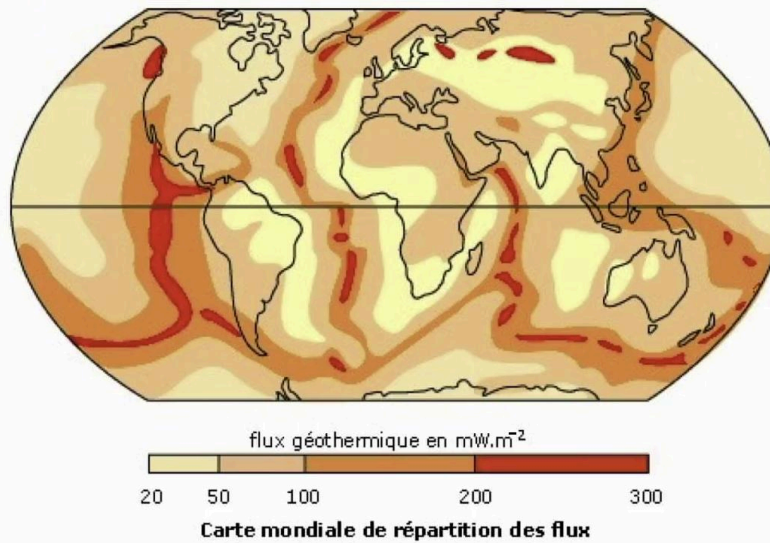
Comme nous le voyons sur cette coupe de la terre, 99 % de sa masse est à plus de $1\,000^{\circ}\text{C}$. La majorité du flux géothermique à la surface de la Terre provient à 60 % de la décroissance d'éléments radioactifs et le reste provient d'un long refroidissement du manteau et du noyau, la croûte terrestre dans laquelle nous pouvons actuellement exploiter cette énergie n'a qu'une épaisseur d'une trentaine de kilomètres et on n'en explore actuellement que les 5 000 premiers mètres, c'est-à-dire un millième.

Notes

Summary



Flus géothermique au niveau mondial



La transition énergétique suisse

Le flux géothermique est loin d'être constant géographiquement, comme on peut le voir sur cette carte. Il est très élevé dans les zones rouges le long des failles volcaniques, il est en moyenne de près de 80 milliwatts par mètre carré, ce qui fait un flux global mondial qui est de l'ordre de 44 000 gigawatts, sachant, par exemple, que la consommation suisse d'énergie finale, comme nous l'avons vu à la leçon 2, était de 22 gigawatts. Donc 44 000 et 22, on voit les proportions. C'est un flux important, mais il est quand même 4 000 fois plus faible que le flux solaire moyen.

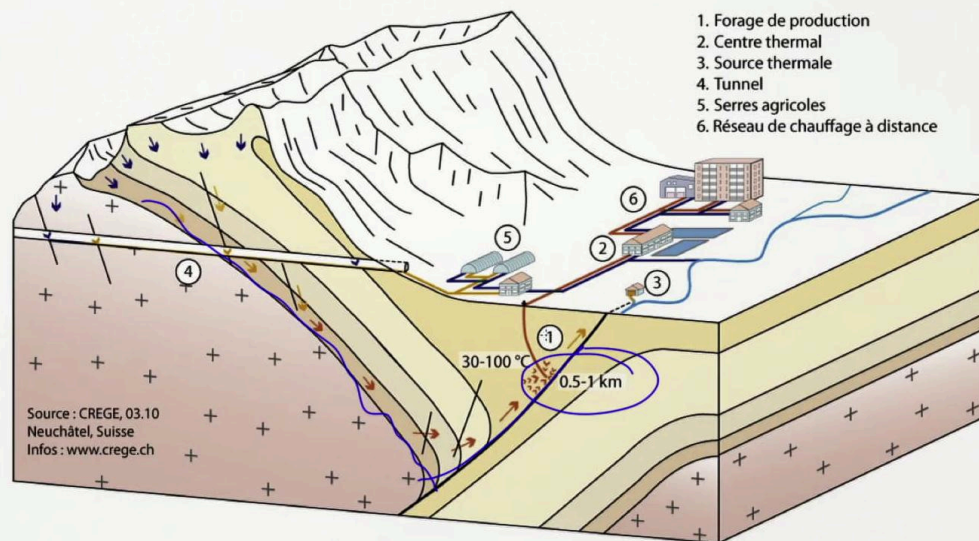
Notes

Summary



1m 21s

Les sources (géo-)thermales



1 énergétique suisse

La géothermie est surtout connue pour des sources géothermales. Ces ressources trouvent leur origine dans les infiltrations d'eau le long des couches géologiques. Ces eaux sont chauffées en profondeur et remontent à des niveaux de profondeur accessibles autour des 500 m à 1 km de profondeur facilement accessibles à l'aide de forages. Elles peuvent alors alimenter des bains thermaux, des serres ou éventuellement des réseaux de chauffage à distance à basse température. Parfois, de l'eau chaude peut aussi être récupérée de tunnels et nous en avons en Suisse toute une série où on peut le faire.

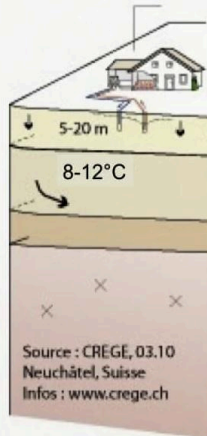
Notes

Summary



2m 11s

Chaleur de la nappe phréatique



La transition énergétique suisse

Commençons par la chaleur à basse température. La nappe phréatique, aussi réchauffée naturellement par la géothermie, entre 8°C et 12°C peut être parfois utilisée pour alimenter en chauffage par l'intermédiaire de pompes à chaleur.

Notes

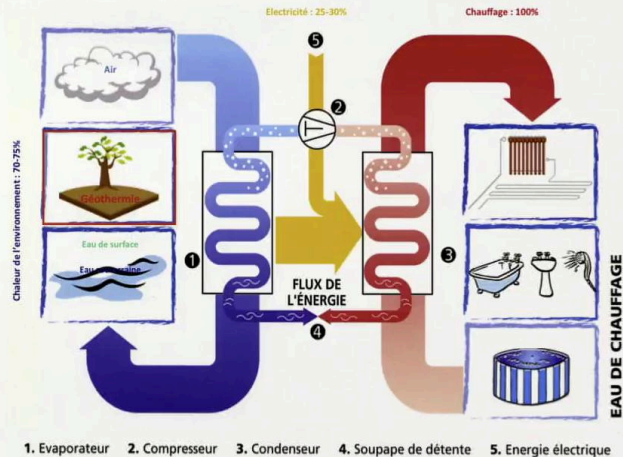
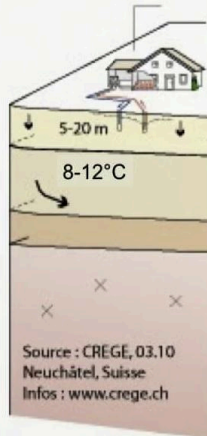
Summary



3m 00s

La géothermie à basse température

Chaleur de la nappe phréatique et pompe à chaleur



La transition énergétique suisse

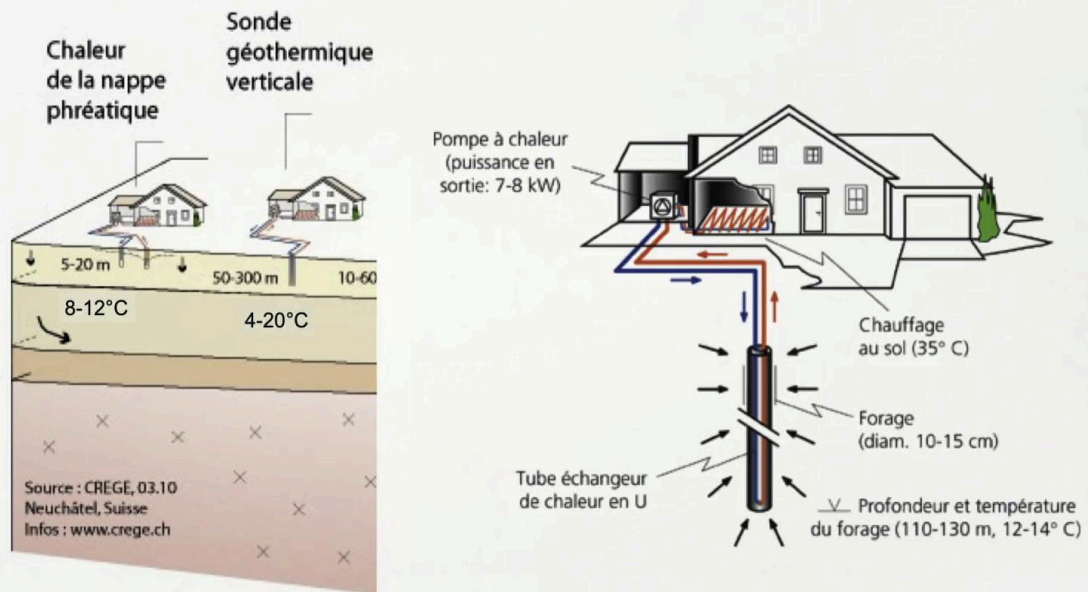
Les pompes à chaleur, qui peuvent être électriques ou à gaz naturel, permettent de remonter le niveau de température jusqu'au niveau de température des réseaux de chauffage de bâtiments. Elles fonctionnent comme un frigo mais au lieu de prendre la chaleur dans la nourriture stockée, la chaleur est prise à l'aide de sondes prélevant l'eau de la nappe phréatique, la refroidissant et la rejetant à une distance suffisante pour que le refroidissement de la nappe ne vienne pas perturber la température à la sonde de prélèvement. Ces installations sont parfois interdites dans des zones sensibles pour éviter les risques de contamination accidentelle.

Notes

Summary



La géothermie à basse température



La transition énergétique suisse

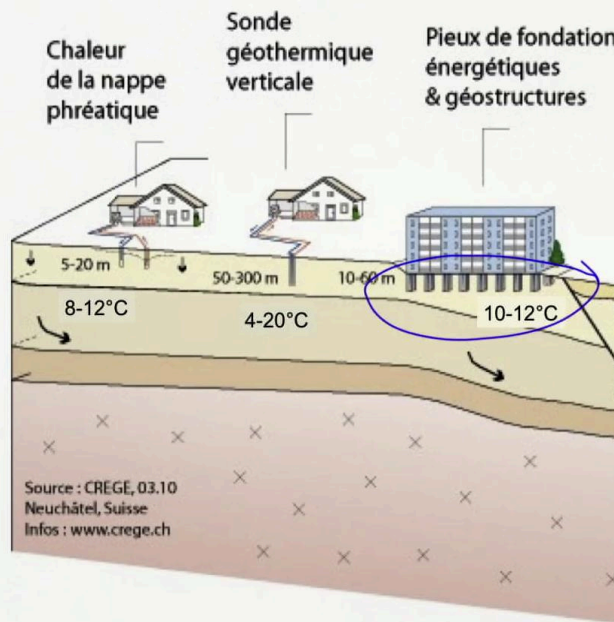
L'application de loin la plus répandue et en forte augmentation est l'utilisation de sondes géothermiques verticales à circuit fermé qui fonctionnent comme des échangeurs de chaleur dans lesquels il n'y a pas de contact direct entre le terrain et l'eau du circuit. Selon la profondeur des sondes et la saison, la température de captation peut être de l'ordre de 4°C à 12°C. Ces installations silencieuses, surtout si elles alimentent des chauffages à basse température comme les chauffages par le sol, par exemple, ont un excellent coefficient de performance, voire normalement de 4 et plus.

Notes

Summary



La géothermie à basse température



La transition énergétique suisse

Une alternative relativement nouvelle et applicable aux bâtiments à multi-étages, est d'utiliser les piles de géostructure comme capteurs de chaleur ou de froid, selon la saison. Ces installations fonctionnent aussi avec des pompes à chaleur. On voit ici une représentation de ces piles qui supportent le bâtiment lui-même.

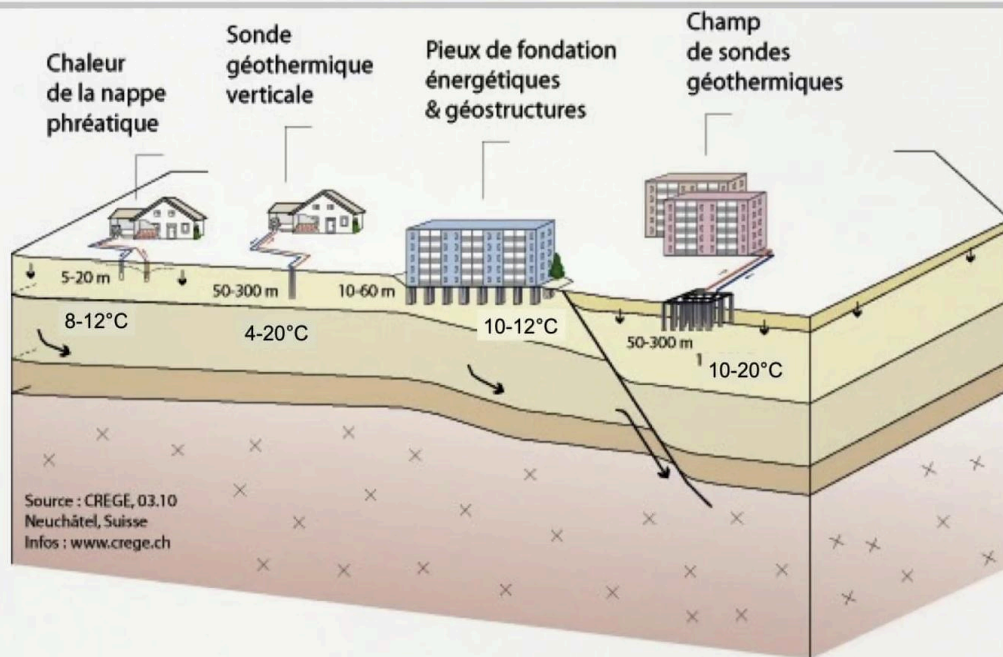
Notes

Summary



4m 48s

La géothermie à basse température



La transition énergétique suisse

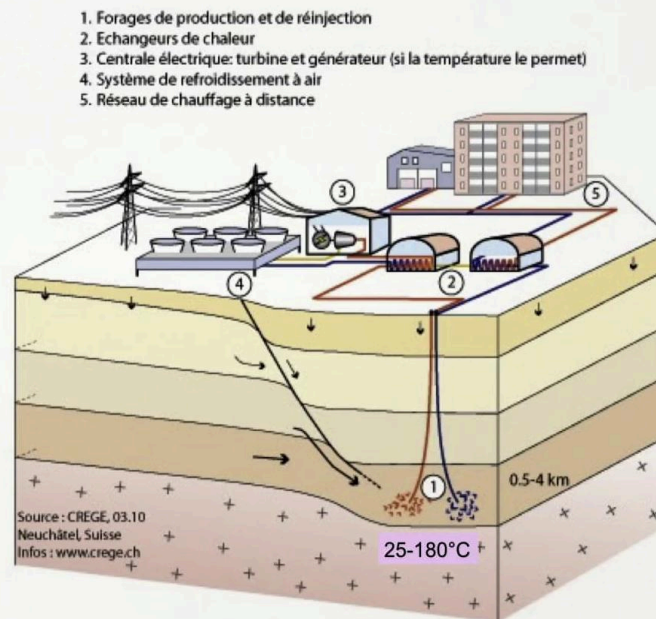
Finalement, et pour ce même type de bâtiment, on peut coupler une pompe à chaleur avec un stockage thermique saisonnier constitué de champs de sondes géothermiques verticales dans les espaces verts autour des bâtiments. Typiquement, ces sondes sont espacées de 6 à 7 mètres dans ces champs de sondes verticales pour le stockage. C'est la solution choisie, par exemple, sur le nouveau campus de Höggerberg de ETH-Z.

Notes

Summary



Sources hydrothermales profondes



La transition énergétique suisse

Finalement, une solution encore émergente est la recherche de nappes d'eau profondes de plusieurs kilomètres permettant d'obtenir de l'eau ou de la vapeur à plus de 120°C pour pouvoir produire de l'électricité, voire souvent de l'électricité et de la chaleur en même temps. On utilise alors aussi un doublet et une sonde de captation avec une sonde de rejet qui doivent être suffisamment éloignés. Malheureusement, la Suisse n'est pas particulièrement bien placée pour de telles ressources. Un projet à Saint-Gall vient d'échouer à cet égard mais il a été compensé par le fait qu'on ait trouvé du gaz naturel.

Notes

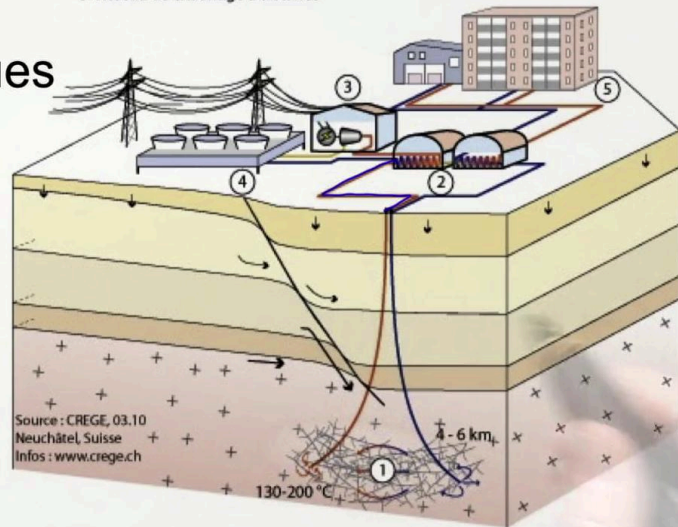
Summary



Sources (sèches) à grande profondeur

Systèmes Géothermiques Stimulés (SGS)

1. Forages de production, de réinjection et réservoir stimulé
2. Echangeurs de chaleur
3. Centrale électrique: turbine et générateur
4. Système de refroidissement à air
5. Réseau de chauffage à distance



La transition énergétique suisse

Comme dans notre pays on ne trouve pas beaucoup de sources hydrothermales, on cherche à exploiter les roches granitiques relativement sèches, déjà naturellement fracturées en possédant déjà une certaine porosité qui vont fonctionner comme un gigantesque échangeur de chaleur vers 5 km de profondeur environ. Le problème de ces zones est qu'il faut généralement en stimuler les fissures par surpression d'eau, ce qui implique un risque de faible tremblement de terre. De telles tentatives ont été réalisées dans les années 1980, notamment, en Cornouailles en Grande-Bretagne, mais les progrès sont très, très lents et en Suisse, un projet récent à Bâle a dû être arrêté à cause du danger de mini tremblements de terre. Sur cette image, on voit l'eau qui est prise et pompée à quelque 5 km et puis ensuite qui est rendue à sa source mais à une certaine distance. Ainsi donc on a un transfert de fluide qui va de la zone froide de l'eau froide jusqu'à l'eau chaude et tout ce volume constitue le volume d'échange dans la roche granitique. Cette eau chaude alimente ensuite l'échangeur d'une centrale à vapeur, pas forcément vapeur d'eau, souvent des vapeurs de fluides qui changent de phase un peu comme l'eau mais qui sont un peu plus denses.

Notes

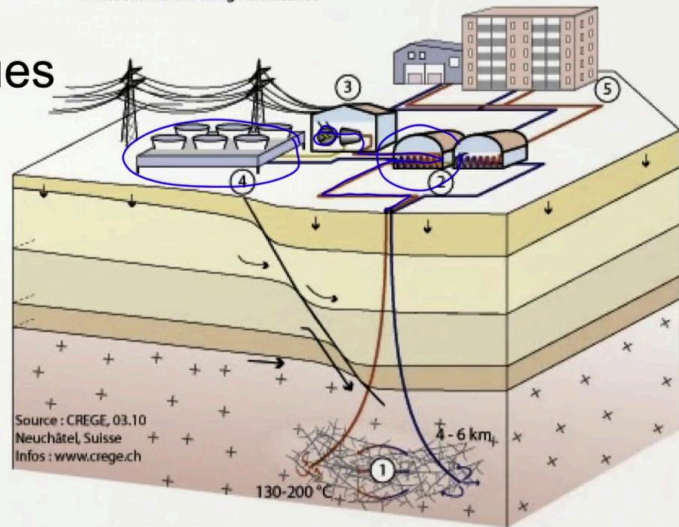
Summary



Sources (sèches) à grande profondeur

Systèmes Géothermiques Stimulés (SGS)

1. Forages de production, de réinjection et réservoir stimulé
2. Echangeurs de chaleur
3. Centrale électrique: turbine et générateur
4. Système de refroidissement à air
5. Réseau de chauffage à distance



La transition énergétique suisse

et cette vapeur alimente ensuite les turbines et les génératrices, comme on le voit sur ce dessin, et ici sont aussi représentées, dans le cas où on n'utilise pas la chaleur pour du chauffage à distance, les tours de refroidissement pour refroidir le cycle et refaire du fluide de travail sous forme liquide pour être pompé à nouveau dans l'évaporateur.

Notes

Summary



Géothermie en Suisse actuellement

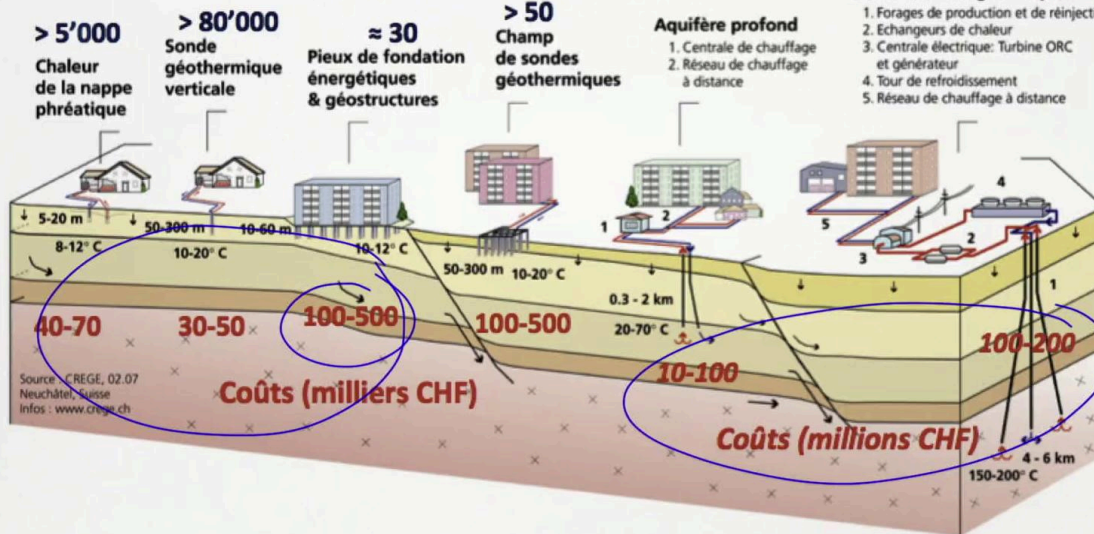
Nombre d'installations

6 aquifères profonds
+ 7 tunnels
+ 17 centres thermaux

Projet en cours de réalisation

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



La transition énergétique suisse

Cette image résume l'ensemble des voies technologiques d'exploitation de la géothermie avec les niveaux de coûts en jeu. On voit que cela passe des installations avec pompe à chaleur à quelques dizaines de milliers de francs dans toute cette zone, voire quelques centaines de milliers de francs s'il s'agit d'un bâtiment avec stockage partiel. Et puis on a des installations à des millions de francs ici qui sont les installations de production d'électricité ou d'électricité et de chaleur.

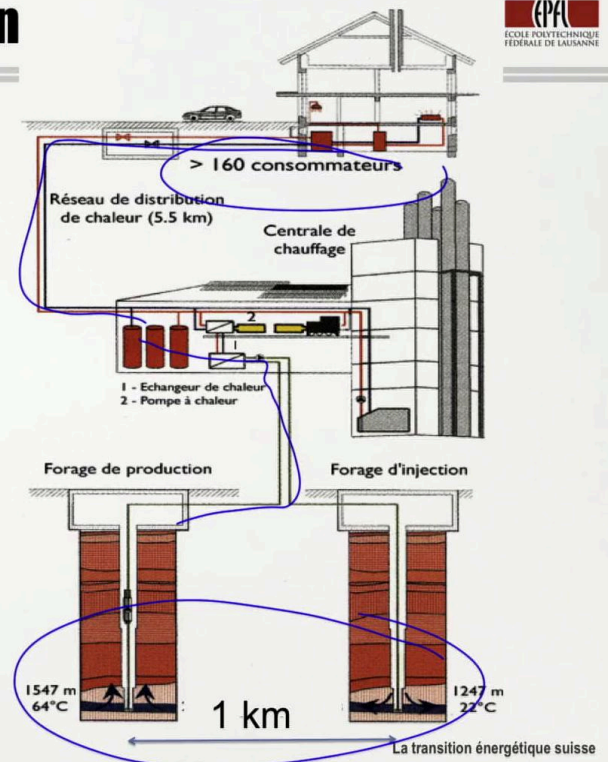
Notes

Summary



Chauffage à distance de Riehen

- Plus grande centrale géothermique de Suisse
- La géothermie fournit 50% de l'énergie distribuée sous forme de chaleur (20 GWh), le reste est fourni sous forme d'électricité pour pompes à chaleur, de gaz (cogénération) et de mazout (chaudière de pointe)



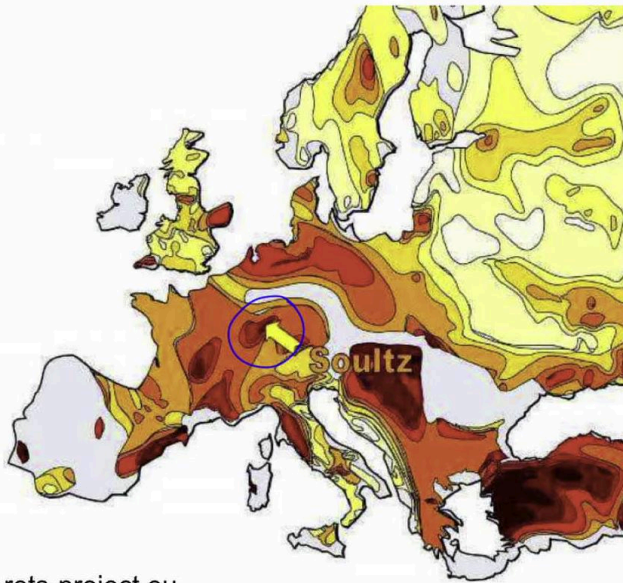
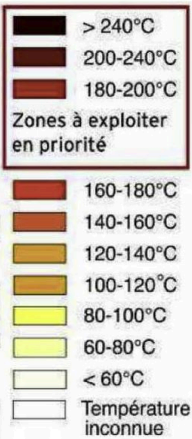
Parmi les centrales pour chauffage à distance, on peut citer la centrale de Riehen près de Bâle qui est la plus grande centrale de chauffage géothermique de Suisse, avec deux forages séparés de 1 km, qu'on voit ici et un réseau de distribution sur plus de 5 km qui alimente environ 160 consommateurs. Cette centrale fournit 50 % de l'énergie distribuée sous forme de chaleur, donc ça représente ici 20 GWh. Le reste est fourni sous forme d'électricité pour pompe à chaleur, de gaz - un peu de cogénération, électricité, chaleur- et de mazout pour des chaudières de pointe hivernales.

Notes

Summary



Europe: Températures de roches à 5000 mètres



www.rets-project.eu

Centrale de Soutz

- 3 puits
- eau à 200°C en fonds de puits mais arrive à 160°C à la centrale
- réinjectée à 50°C
- 80 millions d'euros pour une puissance nette de 1.5 MW (env. 60000 Frs/kW)

La transition énergétique suisse

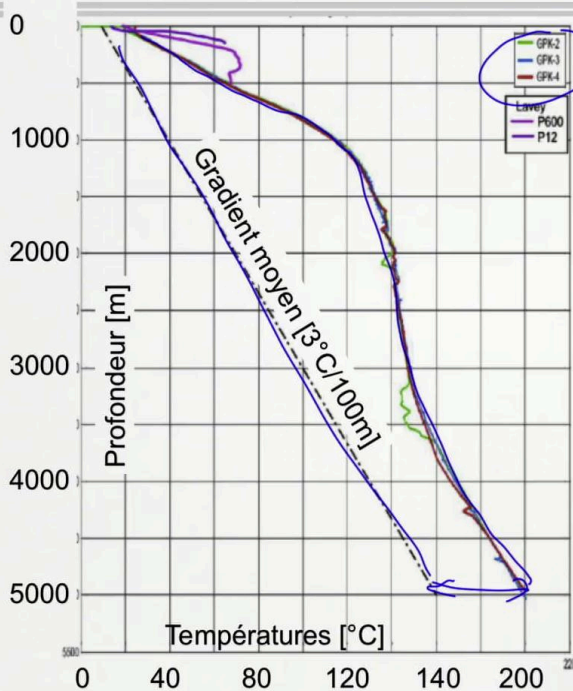
Pour la production d'électricité, plus la chaleur de la source est élevée, plus l'efficacité de conversion est bonne et la rentabilité s'améliore. On voit sur cette carte les points les plus chauds en Europe avec notamment le site de Soutz sur la frontière franco-allemande au nord de Bâle. La centrale de Soutz comporte trois forages, capte de l'eau à environ 200°C à 5 000 mètres qui arrive ensuite à la centrale à 160°C à cause des déperditions de chaleur au cours de l'ascension de cette eau et elle est ensuite réinjectée à 50°C. Les coûts du projet sont de 80 millions d'euros pour une puissance électrique de 1,5 MW, ce qui donne un coût spécifique énorme de 60 000 francs par kilowatt installé. Mais il s'agit d'une centrale pilote.

Notes

Summary



Températures et profondeurs



- La température moyenne augmente de 3°C /100 mètres
- Dans les zones favorables, cette différence est plus marquée mais non linéaire (Ex: les 3 puits de Soultz et 2 de Lavey)

La transition énergétique suisse

Ça c'est les températures moyennes et ça c'est la profondeur. Donc la température augmente avec la profondeur, de l'ordre de 3°C par 100 mètres. Cependant, ça c'est la moyenne mais dans la réalité, lorsqu'on choisit des zones particulièrement bien positionnées, à ce moment-là, on voit, et ça c'est par exemple les trois forages de Soultz, on voit que le profil s'écarte singulièrement de la droite standard mais on arrive à la fin quand même à quelque 60°C de plus de ce que l'on aurait eu avec un gradient moyen si on avait mal choisi la zone de forage.

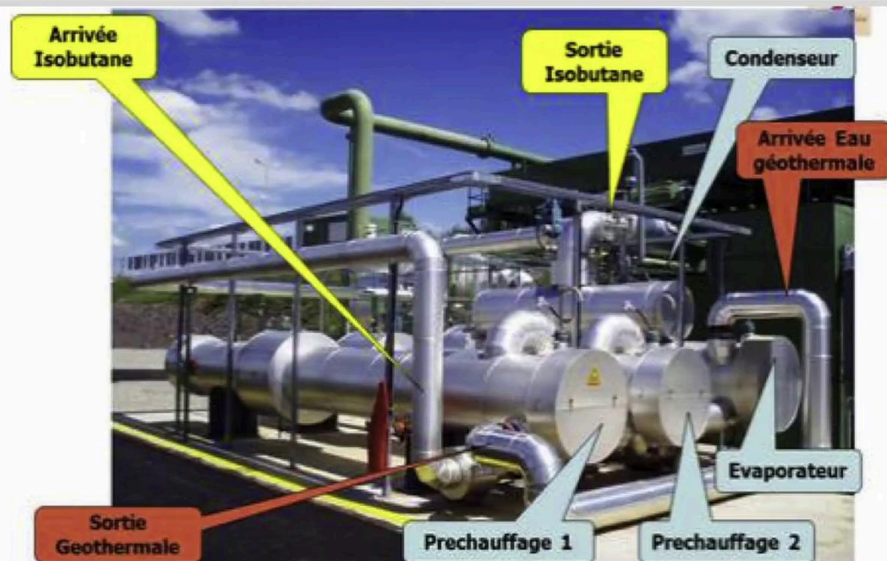
Notes

Summary



11m 17s

Equipements de surface à Soultz



<http://labex-geothermie.unistra.fr/article200.html?lang=fr>

La transition énergétique suisse

Cette photo montre les équipements de surface avec la transmission de la chaleur en cycle à vapeur d'isobutane. L'isobutane est un fluide de travail qui, comme l'eau, change de phase mais est plus dense que l'eau dans la gamme de température recherchée, ce qui nécessite des tuyauteries de plus faible diamètre.

Notes

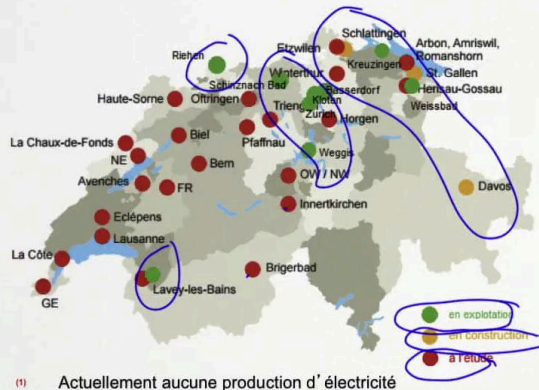
Summary



12m 09s

Evolution des coûts de l'électricité géothermique

En Suisse...



La géothermie profonde pour la production d'électricité est une technologie encore immature en Suisse, donc les coûts d'investissement restent incertains.

Les coûts d'aujourd'hui...

St. Gallen ⁽²⁾

- Investissement prévu: 160 millions CHF
 - Forages → 50 millions CHF
 - Cycle ORC → 25 millions CHF
 - CAD → 85 millions CHF
- Puissance électrique: 4.5 MW

16'700 CHF/kW_{el} (hors CAD)

Lavey-les-Bains ⁽³⁾

- Investissement prévu: 30 millions CHF

- Puissance électrique: 0.5 MW

60'000 CHF/kW_{el} (avec CAD)

Les coûts de demain...

Coûts d'investissement (CHF/kW_{el})

	2035	2050
MIN	5'300 ⁽⁴⁾	4'500 ⁽²⁾
MAX	16'700 ⁽²⁾	10'000 ⁽²⁾

La transition énergétique suisse

Sources: (1) geothermie.ch; (2) Electricité géothermique, AES (2010); (3) Géothermie profonde: La Suisse romande au cœur de la stratégie nationale, sol-E Suisse; (4) Energy Roadmap 2050, European Commission (2011)

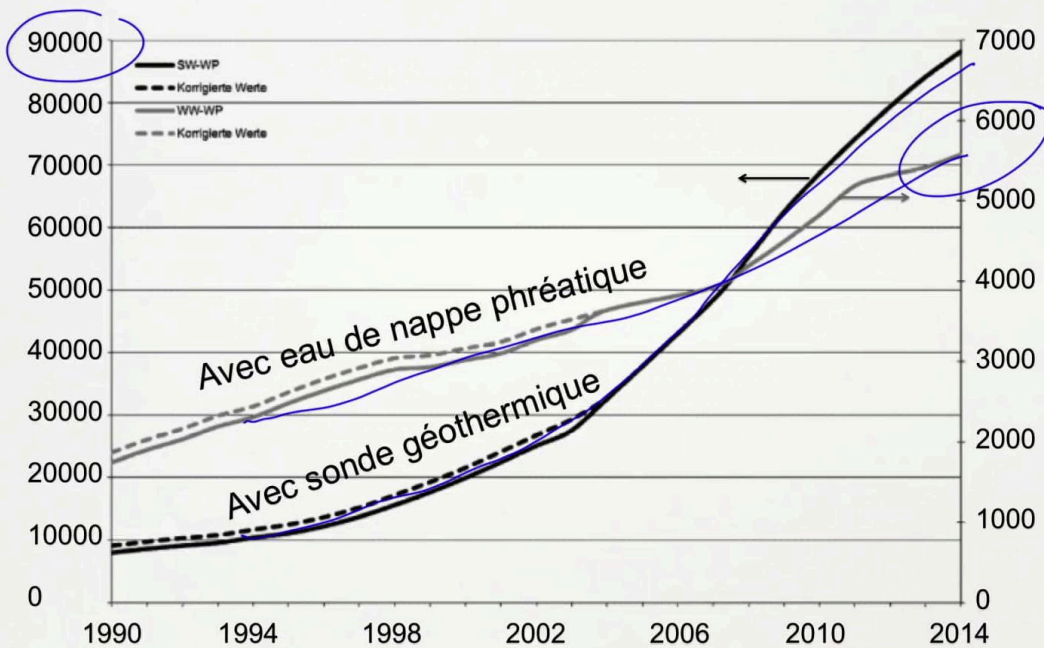
Ce graphe montre, d'une part, les installations géothermiques en Suisse avec en rouge les centrales à l'étude qui parsèment tout le pays, en jaune les centrales en cours de construction, on voit que c'est plutôt dans cette zone-là, et puis finalement les centrales en exploitation et là on retrouve en vert la zone de Riehen dont j'ai parlé et un certain nombre de zones en Suisse allemande ainsi que Lavey-les-Bains qui est exploité dans la vallée du Rhône. Ceci montre qu'il existe un engouement certain pour la géothermie en Suisse en dépit des incertitudes. La comparaison des coûts reste cependant préoccupante et les valeurs que nous avons introduites ici dans Energyscope paraissent relativement optimistes même si elles sont tirées de la littérature spécialisée. Parce qu'en effet, à Saint-Gall, il était prévu un investissement de l'ordre de près de 17 000 francs par KW électrique et on sait que ça n'a pas marché puisqu'ils n'ont pas trouvé la quantité d'eau suffisante et qu'ils ont trouvé du gaz naturel à la place. Et puis à Lavey, on voit que ce qui est prévu, c'est de l'ordre de 30 millions de francs pour une puissance électrique de l'ordre de 0,5 MW et ça nous conduit à 60 000 francs le kilowatt électrique installé. Et ça c'est avec un petit élément de CAD mais pas de manière conséquente. Donc on voit que ces prix sont très, très élevés à l'heure actuelle.

Notes

Summary



Développement des pompes à chaleur en Suisse



Comme nous l'avons dit, la plus grande partie de l'utilisation de la géothermie se fait en Suisse avec de l'eau de nappe ou de sondes verticales à relativement faible profondeur. Cette figure montre le développement important des pompes à chaleur au cours des 20 dernières années pour ce type d'installation en Suisse, avec près de 90 000 pompes à chaleur de type à sonde géothermique verticale et quelque 5 600 basées sur le principe du prélèvement dans la nappe phréatique. Ceci se traduit donc par un facteur 10 au cours des 20 dernières années, avec cette courbe solide noire ici qui représente les pompes à chaleur avec sonde géothermique et un accroissement de l'ordre de 3 pour les pompes à chaleur qui travaillent directement sur la nappe phréatique.

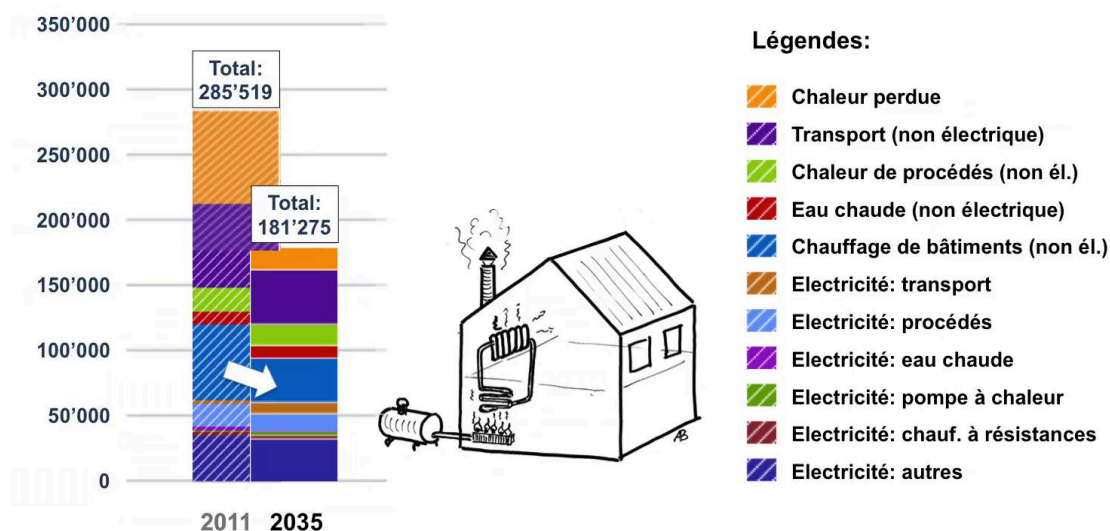
Notes

Summary



Scénarios de la Confédération: "NPE" 2035

Consommations comparées d'énergie finale* en 2011 et en 2035 [GWh]



La transition énergétique suisse

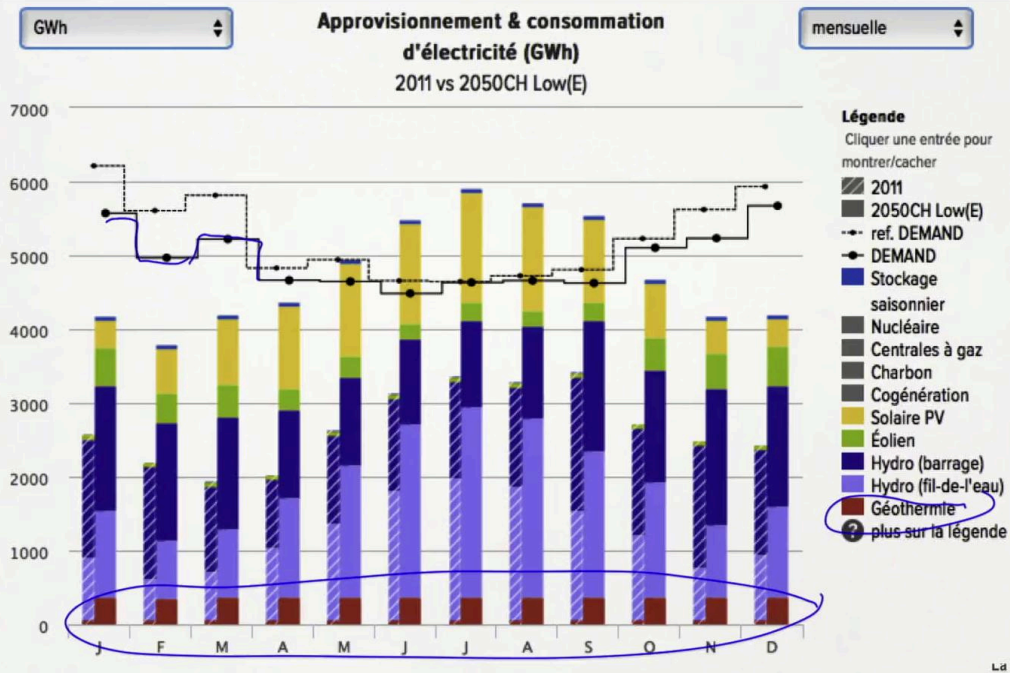
Voici un rappel de notre logiciel Energyscope où on voyait la consommation d'énergie finale de 2011 ici et celle prévue en 2035 ici. Et on voit ici cette forte réduction qui est souhaitée du côté du chauffage non électrique des bâtiments. Et la géothermie sera bien sûr un contributeur principal à cette diminution, en plus de l'amélioration des enveloppes des bâtiments.

Notes

Summary



Géothermie: contribution à l'électricité



Et sur ce graphe on montre en rouge, ça c'est pour l'électricité, ces courbes qui montrent la consommation moyenne mensuelle. On voit en bas, en rouge la partie géothermique qui est souhaitée. Et ça c'est en 2050 pour la géothermie et l'électricité d'origine géothermique. Toutefois, comme nous l'avons relevé, cette contribution est la plus incertaine de toutes les contributions renouvelables attendues d'ici 2050 dans les scénarios de la Confédération.

Notes

Summary



Conclusions



- Exploitée sans excès localement l'énergie géothermique est renouvelable
- En Suisse le plus grand potentiel est pour le chauffage directement ou indirectement à l'aide de pompes à chaleur. Les sondes géothermiques peuvent aussi être utilisées pour satisfaire les besoins de refroidissement
- La plus grande incertitude est sur le futur des centrales géothermiques de cogénération électricité-chaleur ou électricité seule car
 - Les coûts d'investissement sont actuellement extrêmement élevés et les perspectives comprennent beaucoup d'incertitudes
 - Les quelques démonstrations technologiques se heurtent à d'importantes difficultés
- Le grand avantage de la géothermie est l'accessibilité en continu toute l'année

La transition énergétique suisse

La géothermie, si elle est exploitée sans excès localement, est une énergie renouvelable. En Suisse, le plus grand potentiel est pour le chauffage directement à l'aide de pompe à chaleur. Les sondes géothermiques peuvent alors aussi être utilisées pour faire du froid ou du refroidissement en été. La plus grande incertitude sur le futur est celle des centrales géothermiques de cogénération, électricité chaleur ou électricité seule, car les coûts d'investissement sont actuellement extrêmement élevés et les perspectives comprennent beaucoup d'incertitudes. Il en va de même des quelques démonstrations technologiques qui se heurtent à d'importantes difficultés. Enfin, relevons que le grand avantage de la géothermie, c'est une énergie renouvelable dont l'accessibilité en continu toute l'année est garantie.

Notes

Summary



16m 58s