



**Energie**

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

# Synthèse

# Géothermie





**Energie**

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

# Géothermie

Synthèse conjointe



# 1. Géothermie

Synthèse du projet conjoint du PNR 70  
« Énergie hydroélectrique et géothermique »



## 1.1. Résumé

### 1.1.1. Résumé



La géothermie de faible profondeur avec des pompes à chaleur correspond à l'état actuel de la technique et est déjà largement répandue en Suisse. Au sein du futur système énergétique, la géothermie de moyenne à grande profondeur (1 à 6 km) devrait également jouer un rôle important, notamment en matière de fourniture de chaleur pour les bâtiments et les process industriels. Cette forme d'utilisation de la chaleur géothermique nécessite un sous-sol bien perméable, permettant à un fluide – généralement de l'eau – d'engranger la chaleur naturellement présente dans la roche et de la transporter jusqu'à la surface. Dans les roches sédimentaires, cette condition est généralement vérifiée du fait de la structure naturelle, tandis que dans les granites et les gneiss la perméabilité doit être générée artificiellement par injection d'eau. La chaleur ainsi récupérée augmente au fur et à mesure de la profondeur de forage : la température souterraine atteint environ 40°C à 1 km de profondeur et environ 100°C à 3 km de profondeur.

Pour entraîner une turbine à vapeur en vue de produire de l'électricité, des températures supérieures à 100°C sont nécessaires. Étant donné que cela implique de forer à des profondeurs de 3 à 6 km, le risque de sismicité induite augmente en conséquence.

Le sous-sol peut également servir à stocker de la chaleur ou des gaz, par exemple de l'hydrogène ou du méthane, ou encore à enfouir de façon permanente du CO<sub>2</sub>. À cet effet, les mêmes exigences que pour l'extraction de chaleur doivent être vérifiées et le réservoir doit en outre être surmonté d'une couche étanche, empêchant le gaz de s'échapper. Le projet conjoint « Énergie hydroélectrique et géothermique » du PNR « Énergie » était avant tout consacré à la question de savoir où en Suisse trouver des couches de sol appropriées, répondant de manière optimale aux exigences des différentes utilisations. Un deuxième grand axe de recherche concernait les mesures visant à réduire la sismicité induite par les forages profonds et les dommages aux structures qui en résultent. Par ailleurs, des modèles



et des simulations ont été élaborés dans le but de mieux comprendre les processus souterrains qui interviennent dans la mise en œuvre et l'exploitation des ressources géothermiques.

En résumé, les résultats de recherche montrent que la Suisse jouit de bonnes conditions pour l'utilisation de la géothermie de moyenne profondeur (1-3 km), tant pour le parc de bâtiments que pour les processus industriels. L'optimisme est également de mise en ce qui concerne le stockage saisonnier de chaleur et de gaz. Le potentiel de stockage définitif de CO<sub>2</sub> dans des quantités pertinentes s'avère en revanche plutôt limité. Concernant la production d'électricité à partir de la chaleur issue de la géothermie profonde (> 3 km), il n'existe pas encore de certitude définitive quant à l'importance du potentiel économiquement exploitable du sous-sol. Des installations de démonstration exploitées industriellement sont absolument nécessaires à cet égard, afin de renforcer l'acceptation par la population et les investisseurs.

## 1.2. Messages clés

### 1.2.1. Messages clés



Le sous-sol peut et va très probablement jouer un rôle central dans le futur système énergétique suisse. Les recherches menées dans le cadre du projet conjoint « Énergie hydroélectrique et géothermique » permettent de formuler les quatre messages clés suivants :

1. Potentiel disponible – Au cours des dernières années, la Suisse a fait de grands progrès dans l'utilisation de la géothermie de faible profondeur, par exemple grâce à l'utilisation de pompes à chaleur. Le potentiel des réservoirs de chaleur qui existent incontestablement à des profondeurs plus importantes (1 à 3 km) n'est en revanche pas encore exploité. Il serait particulièrement adapté à l'alimentation de réseaux de chaleur de proximité et de process industriels. L'utilisation de la géothermie pour la production d'électricité n'en est quant à elle encore qu'à ses débuts. Elle pourrait cependant percer dès lors que les risques liés aux séismes induits seront maîtrisés. Un certain potentiel de stockage de gaz et de CO<sub>2</sub> a également été identifié, bien que de façon limitée.
2. Approche globale – Tant les utilisations potentielles pour l'approvisionnement en chaleur, la production d'électricité et comme moyen de stockage que les conditions géologiques, hydrogéologiques et tectoniques du sous-sol, ainsi que tous les aspects de l'approvisionnement en énergie et des émissions de gaz à effet de serre, doivent être abordés de manière globale et en tenant compte de nombreuses interdépendances. Une telle démarche est incontournable pour trouver des solutions optimales.
3. Large acceptation nécessaire – Sans le consentement de la population, le grand potentiel de la géothermie profonde ne peut être exploité. Pour que les technologies et les projets concrets bénéficient d'une large acceptation, la population doit être impliquée à un stade précoce dans les projets concernés et être informée en détail sur les avantages et les inconvénients. Les recherches le montrent : sur la base de faits



complets et communiqués de manière compréhensible, les citoyennes et citoyens sont parfaitement capables d'évaluer de manière rationnelle les différentes options permettant de garantir à long terme un approvisionnement énergétique économiquement et écologiquement supportable<sup>1</sup>.

4. Définition de priorités – Afin de soutenir le plus efficacement possible la restructuration fondamentale du système énergétique suisse au cours des prochaines décennies, des priorités claires doivent être fixées en matière d'utilisation du sous-sol :
  1. Extraction de chaleur à moyenne profondeur (1-3 km) afin de réduire substantiellement les émissions de CO<sub>2</sub>.
  2. Séparation du CO<sub>2</sub> chez les principaux émetteurs, tels que les cimenteries et les usines d'incinération de déchets, en vue de sa réutilisation judicieuse ou de son stockage permanent.
  3. Développement de la production de courant géothermique pour répondre à la demande croissante d'électricité qui résultera du couplage sectoriel (p. ex. électromobilité, pompes à chaleur).

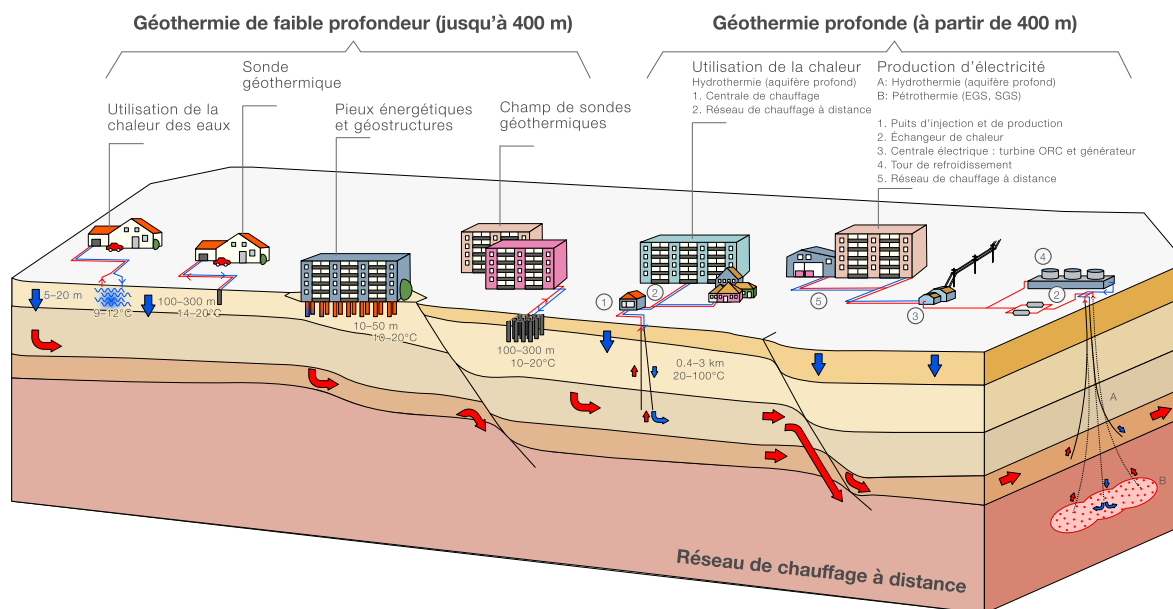
#### Notes et références

1 Knoblauch, T. A., Trutnevyte, E., & Stauffacher, M. (2019). Siting deep geothermal energy : Acceptance of various risk and benefit scenarios in a Swiss-German cross-national study. *Energy policy*, 128, 807-816.

### 1.3. Le sous-sol comme partie intégrante du système énergétique

# Chauffer # Pompe à chaleur # Fourniture d'énergie

### 1.3.1. Formes et usages de la géothermie



**Possibilités d'utilisation des ressources géothermiques pour la production de chaleur et d'électricité.** *Source : Géothermie Suisse, modifié selon CREGE*

Le sous-sol suisse offre une multitude de possibilités susceptibles de favoriser la concrétisation des objectifs de la Stratégie énergétique 2050. Elles comprennent notamment l'utilisation de la chaleur, la production d'électricité et le stockage de chaleur ou de gaz dans des formations rocheuses.

La chaleur du sous-sol provient d'une part des premiers temps de la formation de la Terre et d'autre part de processus constants de désintégration radioactive. Dans le noyau terrestre, la température atteint probablement encore près de 6000°C. En se rapprochant de la surface de la Terre, elle diminue progressivement : sous la Suisse, sur les derniers kilomètres, selon un gradient moyen d'environ 30°C par kilomètre.

De ce gradient géothermique découle une stratification naturelle des niveaux de température : pour la géothermie de faible profondeur, la température est comprise entre 10 et 20°C. Elle peut être exploitée à des fins de chauffage et de refroidissement grâce à des pompes à chaleur. La géothermie profonde, de 1 à 3 kilomètres de profondeur, fournit de la chaleur dans une plage de température pouvant atteindre 100°C, ce qui est suffisant pour alimenter des réseaux de chaleur ou des processus industriels. Dans l'état actuel de la technique et pour des raisons d'efficacité, des températures supérieures à 100°C sont nécessaires pour produire de l'électricité.

Au moins dans les applications de faible profondeur, la Suisse est déjà une terre de géothermie à part entière. En 2018, la production de chaleur a atteint 9,3 PJ<sup>1</sup>, dont 85 % étaient issus de champs de sondes géothermiques et de pompes à chaleur<sup>2</sup>. La géothermie





## Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

directe sans pompe à chaleur et la géothermie profonde pour produire de l'électricité ne jouent en revanche encore qu'un rôle marginal. Ces techniques offrent un potentiel considérable d'utilisation durable des ressources existantes.

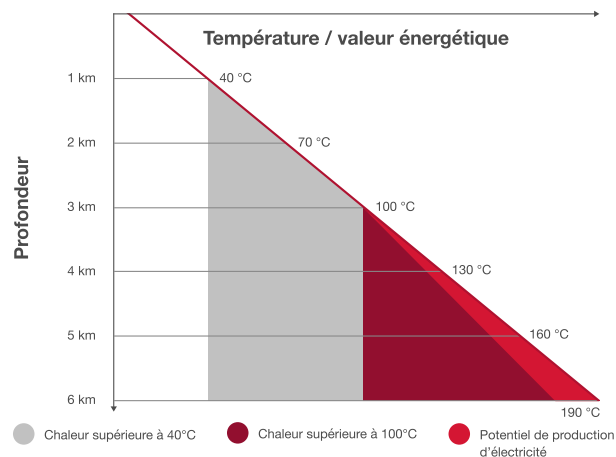
### Notes et références

1 1 pétajoule (PJ) =  $10^{15}$  J correspond à env. 278 GWh, une centrale de 1 GWh produit au max. 31,5 PJ par an.

2 [Statistique suisse des énergies renouvelables, édition 2018](#)

# Ressources # Froid / chaleur # Durabilité # Fourniture d'énergie

### 1.3.2. Les ressources de géothermie profonde ne sont pas exploitées



**La température dans le sol augmente d'environ 30°C par kilomètre de profondeur. Des quantités considérables de chaleur sont disponibles avec une température supérieure à 40°C (pour le chauffage des locaux) ou de 100°C (pour les réseaux de chauffage et les processus industriels). Pour produire du courant, cette chaleur peut être convertie en électricité avec un rendement de 12-13 %.**

La géothermie profonde consiste à puiser de la chaleur entre 1 et 6 km de profondeur, où les températures peuvent varier entre 40 et 190°C. L'énergie géothermique est alors disponible sous forme de chaleur accumulée dans la roche, qui peut être extraite au moyen d'un fluide support – généralement de l'eau. Sur les quelque 41 000 kilomètres carrés que couvre la Suisse, environ 30 % du territoire – notamment le Plateau suisse et les vallées alpines formées par les grands fleuves – sont suffisamment densément peuplés pour permettre une exploitation rentable de cette chaleur.

La quantité d'énergie théoriquement disponible sous ces quelque 12 000 kilomètres carrés peut être estimée de façon approximative. Pour cela, il faut tout d'abord supposer que, pour des raisons pratiques, seuls 20 % de la chaleur peut être extraite. Si l'on considère que la chaleur est fondamentalement utilisable au-dessus de 40°C (c'est-à-dire à partir d'une profondeur d'un kilomètre), on obtient 1 400 000 PJ d'énergie thermique stockée, ce qui représente plus de 5 000 fois les besoins annuels de chaleur du parc immobilier suisse (situation en 2018)<sup>1</sup>. Si l'on prend uniquement en compte la chaleur au-dessus de 100°C, cela représente encore 800 000 PJ. Pour estimer le potentiel théorique de production d'électricité, cette quantité de chaleur doit être multipliée par le facteur de Carnot et le degré de qualité thermodynamique du processus d'une centrale électrique<sup>2</sup>. Avec le rendement moyen de 12-13 % ainsi obtenu, on peut estimer le potentiel théorique de production d'électricité à 100 000 PJ ou 27 000 TWh<sup>3</sup>, ce qui correspond à environ 130 fois la demande totale d'électricité de la Suisse (situation en 2018)<sup>4</sup>.



### Notes et références

1 OFEN (2019), Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 – 2018 nach Verwendungszwecken, Office fédéral de l'énergie, Ittigen

2 Le facteur de Carnot représente une limite supérieure avec laquelle la chaleur peut être convertie en travail (et donc en électricité). Il dépend de la température de la source de chaleur. Le degré de qualité thermodynamique du processus d'une centrale électrique indique la quantité de ce travail théoriquement productible qui est réellement obtenue. Pour les procédés techniques habituels, il est d'environ 50 %.

3 1 PJ = 0,27 TWh, 1 TWh = 3,6 PJ

4 OFEN (2019), Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 – 2018 nach Verwendungszwecken, Office fédéral de l'énergie, Ittigen

# Ressources    # Froid / chaleur    # Fourniture d'énergie

### 1.3.3. Énergie hydrothermale dans les roches perméables et pétrothermale dans les roches denses

**Profil géologique de la Suisse centrale.** *Source : Dr. Roland Wyss GmbH*

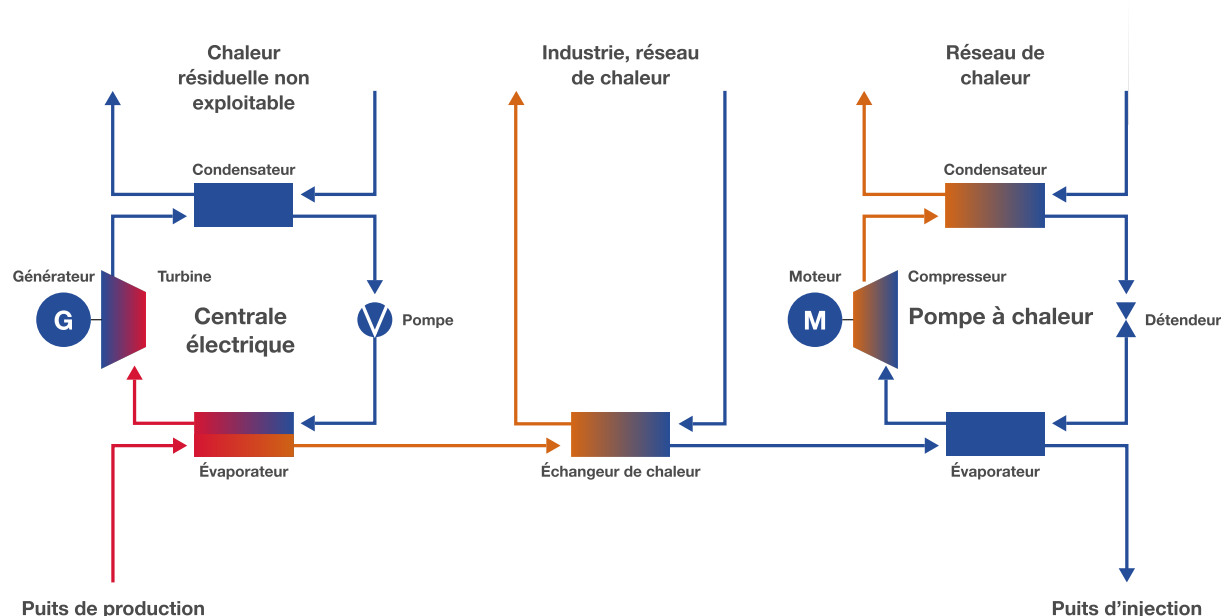
Pour extraire l'énergie géothermique du sous-sol, un fluide – généralement de l'eau – doit pouvoir circuler à travers la roche chaude. Réchauffé par contact direct, il transporte ensuite l'énergie géothermique jusqu'à la surface. Un tel processus exige une perméabilité suffisante de la roche, afin que le fluide puisse circuler à travers un volume suffisamment important de roche chaude et à la vitesse requise. Cette perméabilité varie en fonction des différents types de roche. Alors que les roches sédimentaires comme le grès ou le calcaire possèdent souvent une perméabilité naturelle à l'eau, les roches comme le granit ou le gneiss sont peu perméables.

Dans les roches sédimentaires poreuses, un forage dans une couche dite aquifère permet d'acheminer directement l'eau chaude des profondeurs jusqu'à la surface (énergie géothermique hydrothermale). En Suisse, les couches aquifères se trouvent principalement dans le mésozoïque (cf. couches bleues dans la figure), un terme générique désignant une série de formations rocheuses âgées d'environ 70 à 250 millions d'années, qui se situent près de la surface dans le nord du pays et à des profondeurs croissantes en allant vers les Alpes et vers l'ouest. Près de la surface, le rendement est meilleur mais les températures sont plus basses.

Dans le cas des roches cristallines peu perméables (cf. socle rocheux et massif de l'Aar dans la figure), des méthodes d'ingénierie doivent être mises en œuvre pour accroître la perméabilité (géothermie pétrothermale). Ce procédé, appelé système EGS (Enhanced Geothermal System), consiste à injecter de l'eau dans des fractures existantes de la roche pour les élargir ou en générer de nouvelles. Le socle rocheux cristallin étant soumis à de fortes tensions du fait de la pression des plaques tectoniques continentales, ces stimulations provoquent des mouvements de décharge qui peuvent être perçus comme des tremblements de terre à la surface. La prévention des dommages causés par cette sismicité induite est un axe de recherche central.

# Ressources    # Froid / chaleur    # Fourniture d'énergie

### 1.3.4. Les trois niveaux d'utilisation de la géothermie



**Niveaux d'utilisation de la géothermie : production d'électricité, utilisation directe de la chaleur, utilisation de la chaleur via une pompe à chaleur.**

Selon le niveau de température, la géothermie peut être utilisée de différentes manières (voir illustration). Si la température est supérieure à 100°C, les technologies actuelles permettent de produire de l'électricité, généralement par l'intermédiaire d'un cycle binaire. Dans le cas le plus simple, celui-ci se compose d'un échangeur de chaleur dans lequel un fluide de travail approprié est vaporisé par absorption de la chaleur du fluide géothermal. La vapeur est ensuite détendue grâce à une turbine qui entraîne un générateur. Puis, le fluide de travail est condensé par transfert de chaleur à l'environnement, avant d'être renvoyé à l'évaporateur par une pompe d'alimentation.

Si le fluide géothermal a encore une température suffisamment élevée après l'échange de chaleur avec le fluide de travail, la chaleur peut encore être directement utilisée par un réseau de chaleur ou un processus industriel. Si le niveau de température résiduel est trop faible pour une utilisation directe, l'énergie thermique peut être extraite du fluide support au moyen d'une pompe à chaleur. L'éventuelle chaleur résiduelle peut être utilisée pour alimenter des bains ou dans l'agriculture.

Dans la pratique, chacune de ces trois variantes peut être mise en œuvre indépendamment des autres, en fonction du niveau de température disponible. On peut également envisager de combiner la production d'électricité et l'utilisation directe de la chaleur en aval, ou l'exploitation directe de la chaleur avec l'utilisation ultérieure de la chaleur résiduelle par une pompe à chaleur.

# Froid / chaleur    # CO<sub>2</sub> / Gaz à effet de serre    # Fourniture d'énergie

### 1.3.5. Le sous-sol comme accumulateur de chaleur ou de gaz



Parallèlement à l'extraction de l'énergie géothermique, le sous-sol peut aussi être utilisé comme un moyen de stockage de chaleur, de froid ou de substances gazeuses telles que le CO<sub>2</sub>, l'hydrogène ou le gaz naturel.

Le stockage de chaleur est basé sur le même principe que l'extraction de chaleur, c'est-à-dire un échange thermique entre un fluide tel que l'eau et la roche. Il diffère toutefois de l'extraction de chaleur pure dans la mesure où il est bidirectionnel. Lors du stockage de chaleur, un fluide chaud – généralement de l'eau – transfère sa chaleur à la roche et se refroidit au cours de ce processus. Lors de l'extraction, un fluide froid absorbe la chaleur de la roche préalablement échauffée. Les exigences en matière de perméabilité de la roche sont exactement les mêmes pour les deux procédés. La même méthode permet également de régénérer un réservoir géothermique qui s'est refroidi par extraction de chaleur.

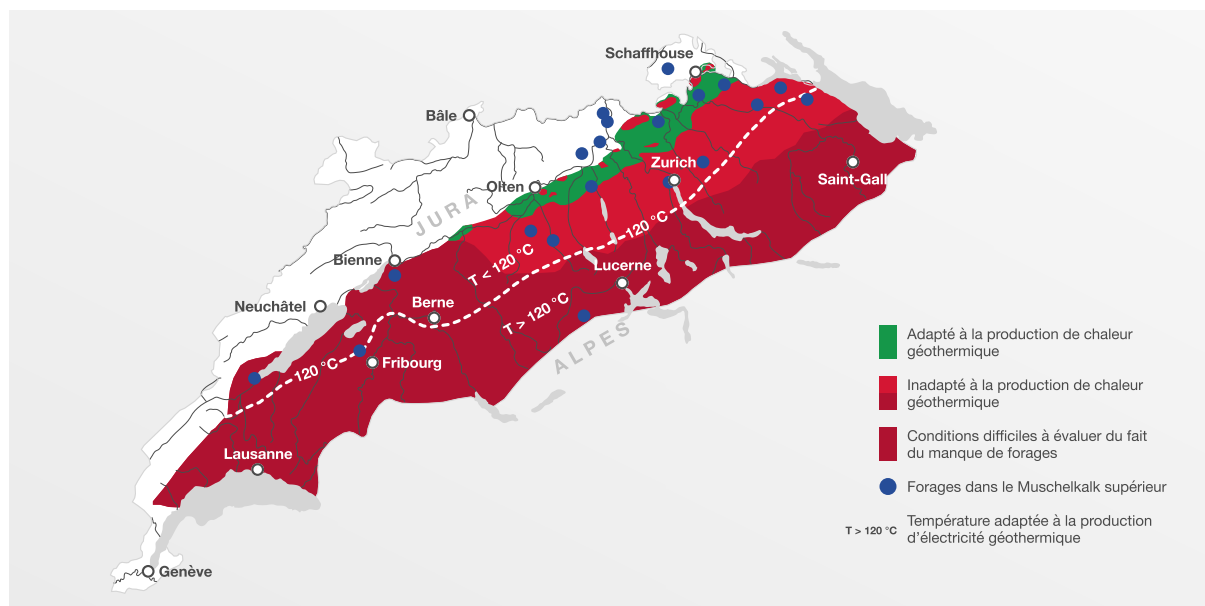
Une façon de réduire la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> est de stocker ce dernier de façon permanente dans le sous-sol. Cette technologie de séquestration géologique du dioxyde de carbone – ou Carbon Capture and Storage (CCS) en anglais – exige non seulement une perméabilité satisfaisante de la roche, mais aussi une porosité suffisante pour pouvoir absorber le CO<sub>2</sub>. De plus, la roche doit être recouverte d'une couche de roche imperméable, afin d'éviter toute fuite du gaz injecté.

D'autres gaz peuvent être stockés dans des formations rocheuses selon le même principe. Dans la perspective de la transformation du système énergétique, c'est avant tout le stockage saisonnier d'hydrogène ou de gaz naturel qui est intéressant. Ces derniers ne faisaient pas explicitement partie de l'objet des projets de recherche, mais les critères d'adéquation de ces gaz sont quasiment identiques à ceux du stockage du CO<sub>2</sub>.



## 1.4. Le sous-sol comme source d'énergie

## 1.4.1. Potentiel de la géothermie hydrothermale en Suisse



**Adéquation de l'aquifère dolomitique à Trigonodus dans le Muschelkalk supérieur pour la production de chaleur et d'électricité.** *Source : Prof. Larryn Diamond, Université de Berne*

Dans la production d'électricité ou l'utilisation de chaleur hydrothermale, l'eau chaude des profondeurs est prélevée dans une couche aquifère et acheminée en surface pour alimenter un processus de centrale électrique ou servir directement de source de chaleur. Puis, l'eau refroidie est renvoyée dans le sol. Selon les formations et structures géologiques, la Suisse dispose d'un potentiel variable.

Le projet « Réservoirs de chaleur souterrains »<sup>1</sup> a étudié plus particulièrement les propriétés d'un aquifère donné : les dolomies à Trigonodus qui forment une couche de 20 à 30 m d'épaisseur dans le Muschelkalk supérieur. Il a été constaté que la porosité de 10 % et la perméabilité de 10 millidarcy nécessaires à une exploitation efficace ne sont assurées qu'à des profondeurs inférieures à 1130 m (cf. zone verte dans l'illustration). Cela exclut la production d'électricité, puisque celle-ci nécessite des températures supérieures à 100°C, que l'on ne trouve qu'à des profondeurs supérieures à 3 km. Les dolomies à Trigonodus ne sont par conséquent pas adaptées à la production d'électricité hydrothermale.

En revanche, l'anomalie thermique dans la vallée du Rhône, géographiquement très étendue entre Saint-Maurice et le Haut-Valais, représente l'un des meilleurs potentiels géothermiques de Suisse. La présence de systèmes de failles et de fractures remplis d'eau chaude – peu nombreux mais d'autant plus productifs – y suscite beaucoup d'espoir. Ils font actuellement l'objet d'un projet de production d'électricité hydrothermale à Lavey-les-Bains<sup>2</sup>.

L'exploitation de la chaleur peut en tous les cas être pertinente, même avec des températures plus basses comme celles que l'on rencontre à moindre profondeur (1 à 2 km), en employant une pompe à chaleur le cas échéant.





## Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

### Notes et références

- 1 Projet « Réservoirs de chaleur souterrains »
- 2 <https://www.agepp.ch/>

# Ressources   # Géothermie   # Fourniture d'énergie

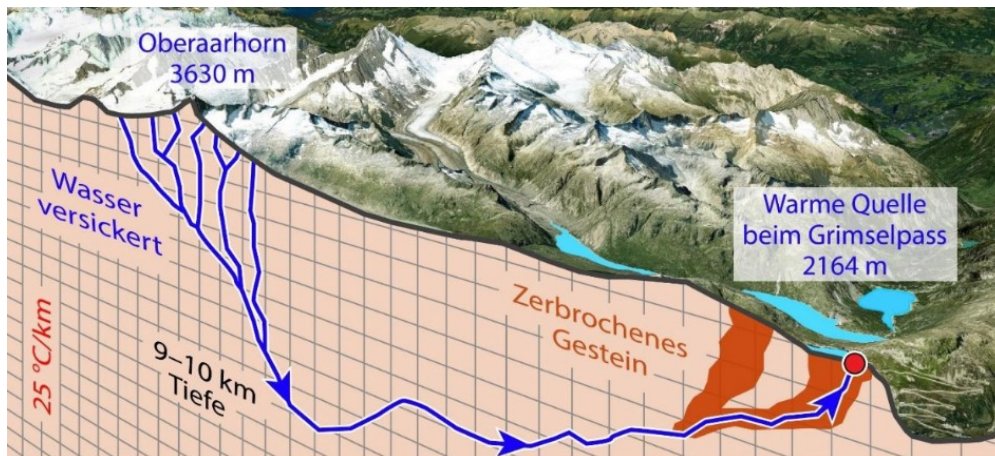
## 1.4.2. Zones de fractures à potentiel de réservoirs hydrothermaux



Le sous-sol suisse n'est pas homogène en termes de propriétés géologiques et thermiques. Ainsi, au fil des évolutions géologiques ont pu se développer des zones de fracture naturelles, favorisant la formation de gisements géothermiques intéressants. Un exemple est la faille dite de la brèche du Grimsel (Grimsel Breccia Fault, GBF) près du col éponyme, qui s'est formée il y a environ 20 millions d'années à 20 km de profondeur. Au fil de la formation des Alpes, une circulation naturelle d'eau a fini par se mettre en place. Alimentée par des eaux de surface près de l'Oberaarhorn, elle se réchauffe jusqu'à 230 à 250°C en plongeant à 9-10 km de profondeur, avant de refaire surface près du col du Grimsel.

Ce système de fractures a donné naissance à une anomalie géothermique, grâce à laquelle la température augmente beaucoup plus rapidement avec la profondeur que dans la roche non perturbée. La GBF a été caractérisée dans le cadre du projet « Réservoirs de chaleur souterrains »<sup>1</sup> à l'aide d'un certain nombre de méthodes géologiques et géophysiques. La conclusion principale de ces recherches est que les zones de fractures comme celles que l'on trouve dans les Alpes centrales et dans la région de la vallée du Rhône peuvent être très prometteuses pour la géothermie hydrothermale. En effet, elles offrent à la fois des températures élevées et une bonne perméabilité des roches à faible profondeur.

Schéma du système géothermique du col du Grimsel.



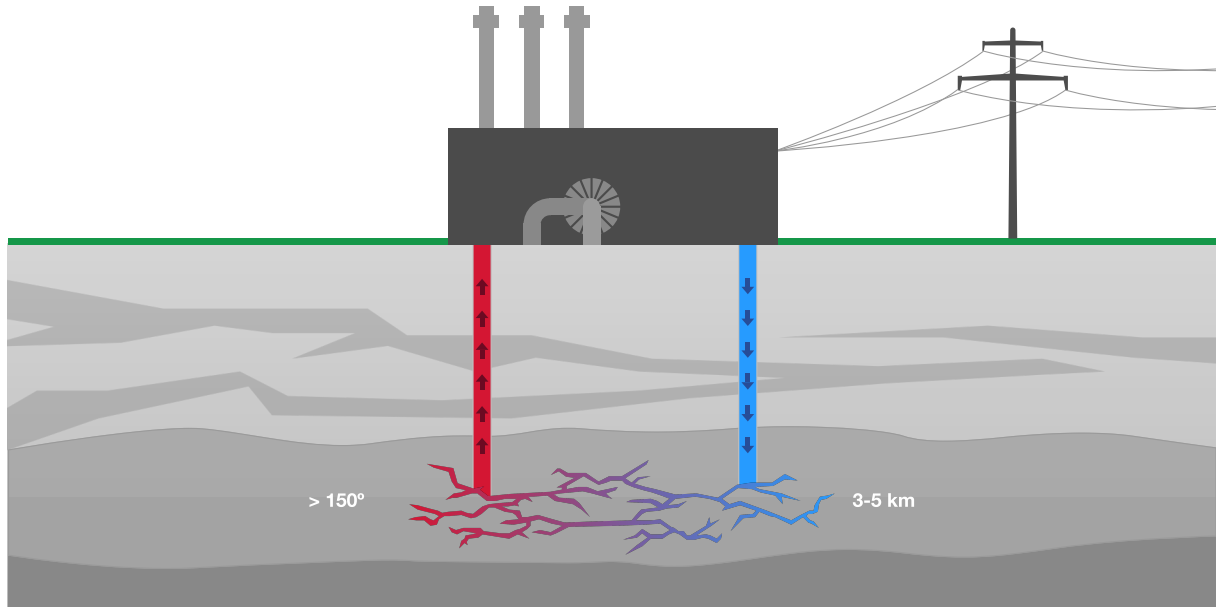
Source : Prof. Larryn Diamond, Université de Berne

#### Notes et références

1 Projet « Réservoirs de chaleur souterrains »

# Risque # Accumulateur d'énergie # Fourniture d'énergie

### 1.4.3. Potentiel de la géothermie pétrothermale en Suisse



**La réalisation d'un projet de géothermie pétrothermale suit un processus en plusieurs étapes visant à minimiser le risque de sismicité induite.** *Source : Geo-Energie Suisse AG*

À des profondeurs de 4 à 6 km, l'ensemble du sous-sol suisse atteint en principe des températures permettant de produire de l'électricité selon un procédé de centrale à cycle binaire (géothermie pétrothermale). Pour en profiter, la perméabilité de la roche doit toutefois être préalablement stimulée, en injectant de l'eau pour élargir les fractures existantes dans la roche ou en générer de nouvelles.

Des recherches fondamentales ont été menées sur ce thème au cours des dernières années au sein du SCCER-SoE (Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity). Dans le laboratoire souterrain du Grimsel, les essais d'injection effectués ont montré que la perméabilité de la roche peut être améliorée si le réservoir est stimulé et fragmenté section par section, à partir de forages orientés de manière optimale. Cela a également permis de limiter les séismes induits en profondeur à l'intensité nécessaire pour générer la perméabilité requise. Il a également été démontré que le risque de séismes sensibles en surface peut être réduit à un niveau tolérable grâce à des systèmes de contrôle sophistiqués. Dans le nouveau laboratoire souterrain créé par l'EPF de Zurich dans le tunnel de Bedretto, ces découvertes sont actuellement approfondies grâce à des expériences supplémentaires, à une échelle dix fois plus grande qu'au col du Grimsel. Par ailleurs, le projet pilote « Haute-Sorne »<sup>1</sup>, approuvé par le canton du Jura, cofinancé par le gouvernement fédéral et porté par l'industrie, a été lancé.

Divers projets sont par conséquent en cours en vue de l'exploitation de la géothermie pétrothermale. Si l'on parvient à profiter des réservoirs géothermiques pour produire de



## Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

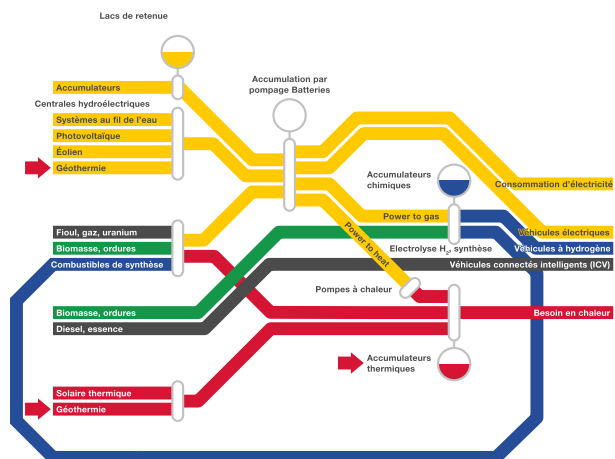
l'électricité, il y aura toujours la possibilité supplémentaire d'utiliser directement la chaleur pour alimenter des réseaux de chaleur ou des process industriels, en particulier avec des températures nettement supérieures à 100°C. Un stockage saisonnier de chaleur, dans une plage de température de 100 à 200°C, serait également possible.

### Notes et références

1 <https://www.geo-energie-jura.ch/>

# Ressources    # CO<sub>2</sub> / Gaz à effet de serre    # Durabilité    # Coût / bénéfice

## 1.4.4. Électricité ou chaleur ?



**Représentation simplifiée du système énergétique. L'énergie géothermique peut se substituer aux ressources fossiles, aussi bien pour la production d'électricité que de chaleur.**

La géothermie pétrothermale profonde pourrait jouer un rôle important dans la production d'électricité et de chaleur. En raison des progrès encore nécessaires du côté de la recherche et de l'industrie, la technologie correspondante ne sera toutefois pas opérationnelle avant l'horizon 2030. Les propriétés qui la caractérisent bénéficieront aux deux secteurs. Elle est foncièrement contrôlable, flexible et en mesure de couvrir la charge de base. En outre, elle utilise de l'énergie primaire indigène et presque illimitée, et son fonctionnement ne génère ni émissions de CO<sub>2</sub>, ni frais de combustibles.

L'électricité d'origine géothermique peut être injectée sans problème dans le réseau et profite donc à tous les consommateurs, y compris les utilisateurs de pompes à chaleur et de solutions d'électromobilité. De plus, dans le cas de la géothermie pétrothermale, la production de chaleur n'est pas tributaire de conditions géologiques spécifiques, de sorte qu'elle peut être installée à proximité des consommateurs (réseaux de chauffage ou processus industriels).

L'extraction d'énergie géothermique par combinaison de puits d'injection et de production, offrant un débit d'au moins 50 l/s d'eau à plus de 100°C, reste un défi. Il s'agit avant tout d'éviter la sismicité induite à de grandes profondeurs (4-6 km). L'extraction de chaleur implique également des investissements considérables, tandis que ses coûts de fonctionnement sont relativement faibles. Un tel rapport entre un investissement initial élevé et des coûts d'exploitation modiques est cependant typique de presque toutes les technologies d'un futur système énergétique décarboné (exemples : photovoltaïque, pompes à chaleur, véhicules électriques).

Compte tenu des nombreuses incertitudes qui pèsent actuellement sur la géothermie pétrothermale profonde, il n'est pas encore possible de déterminer de manière fiable si cette



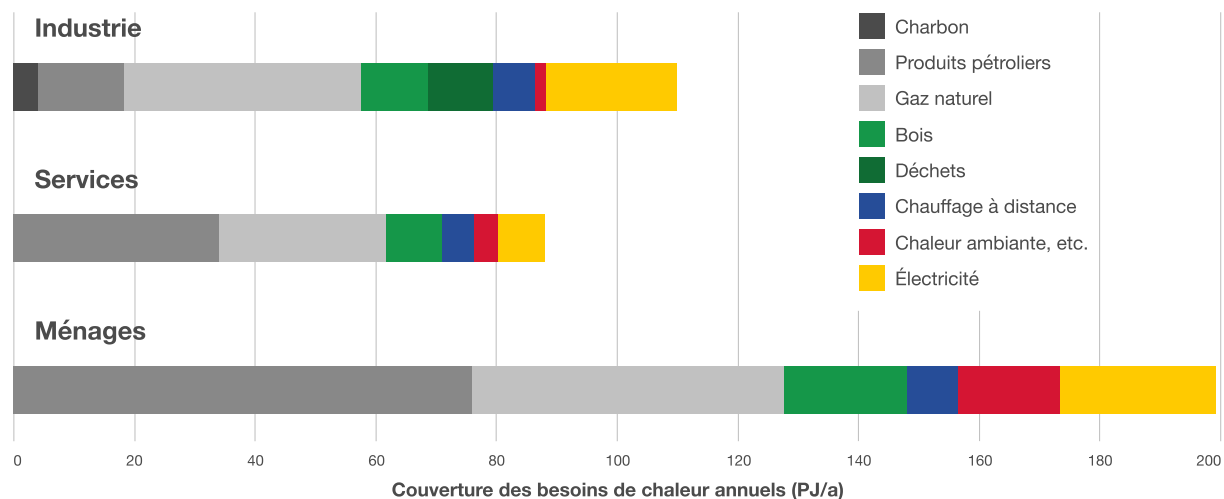
## **Energie**

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

technologie devrait plutôt être utilisée pour la production d'électricité ou de chaleur en Suisse, voire pour les deux. Pour l'instant, les deux options doivent continuer à être envisagées pour la suite des développements. Ce qui est certain, en revanche, est que l'extraction de chaleur à moyenne profondeur (1-3 km) présente un risque sismique nettement plus faible et est également moins coûteuse.

# Froid / chaleur    # Réseaux énergétiques    # Fourniture d'énergie

### 1.4.5. Utilisation directe de la chaleur géothermique pour les réseaux de chaleur de proximité ou les processus industriels



**L’approvisionnement en chaleur des ménages, des services et de l’industrie (chauffage, eau chaude, chaleur industrielle) est actuellement couvert à plus de 62 % par des combustibles fossiles.** *Source : Office fédéral de l’énergie<sup>1</sup>*

En 2018, les besoins d’énergie finale de la Suisse s’élevaient à 775 PJ (après correction climatique), dont un peu plus de 50 % provenaient du chauffage des locaux, de la production d’eau chaude et de la chaleur nécessaire aux process industriels<sup>2</sup>. Dans le secteur du bâtiment, la pompe à chaleur (air, eau ou saumure) sera à l’avenir le principal moyen de chauffage. Une large part des besoins en chaleur se situe cependant dans une plage de température à laquelle la géothermie profonde est parfaitement adaptée.

En Suisse, environ 19,4 PJ sont actuellement distribués par l’intermédiaire de réseaux de chaleur aux secteurs de consommation que représentent les ménages, les services et l’industrie. Les sources de chaleur sont généralement des usines d’incinération d’ordures ménagères. Les températures de départ dépendent fortement des spécificités de chaque usage mais se situent généralement autour de 80 à 130°C. Avec un gradient géothermique habituellement de l’ordre de 30°C par kilomètre, l’extraction de chaleur géothermique nécessite donc de forer à une profondeur d’environ 3 km. À l’heure actuelle, le chauffage des locaux et la préparation d’eau chaude ne représentent qu’environ 5 % des usages de la chaleur à distance. Selon des estimations de l’Association suisse du chauffage à distance, cette proportion pourrait atteindre un bon tiers à l’avenir<sup>3</sup>.

Dans le domaine de la chaleur de processus, la consommation totale de la Suisse atteignait en 2018 quelque 95 PJ, dont 75 % sont actuellement produits par combustion de pétrole et de gaz. Ici, la proportion qui pourrait être remplacée par la géothermie profonde est toutefois plus faible. Des études montrent que des températures inférieures à 150°C sont courantes dans les secteurs de l’alimentation, du papier et du meuble<sup>4</sup>. Selon les statistiques de l’Office





fédéral de l'énergie, ces domaines représentent environ un tiers de la consommation totale de chaleur de processus. En principe, plus de 30 PJ de cette dernière pourraient donc être couverts par la géothermie profonde, de 3 à 6 km selon le niveau de température.

#### Notes et références

1 Statistique globale suisse de l'énergie 2018

2 *Analyse de la consommation énergétique suisse 2000 – 2018 en fonction de l'application*

3 <https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/News/>

4 Ralf Kuder (2010), *Technology orientated analysis of the emission reduction potentials in the industrial sector in the EU-27*. Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. Stockholm.

## 1.5. Le sous-sol comme moyen de stockage

# Froid / chaleur    # Accumulateur d'énergie

### 1.5.1. Stockage de chaleur dans le sous-sol pour la compensation saisonnière



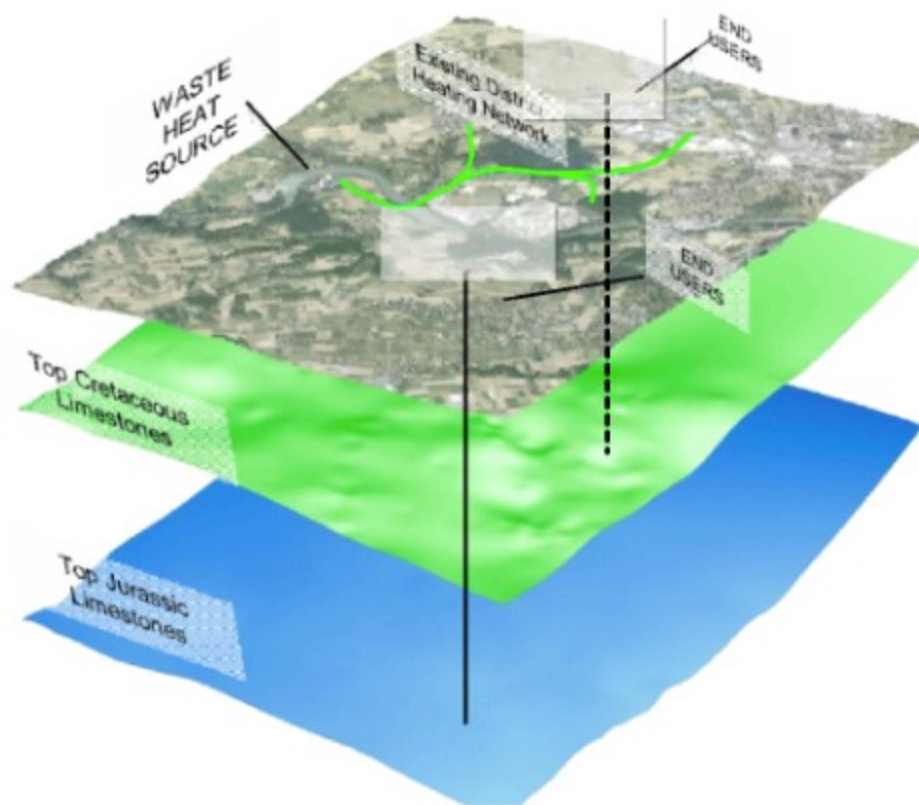
Contrairement à l'électricité, la chaleur peut facilement être stockée. La plupart des systèmes de chauffage disposent d'un système d'accumulation d'eau permettant de découpler temporellement la production de chaleur et sa consommation tout au long de la journée. Le défi réside cependant dans le stockage saisonnier et abordable de la chaleur. L'utilisation du sous-sol peut justement contribuer à réaliser cet objectif.

Un accumulateur de chaleur saisonnier nécessite un volume conséquent. Les besoins de chauffage d'une maison individuelle – environ 10 MWh – nécessitent environ 170 mètres cubes d'eau (pour un delta de température de 50°C). De grands réservoirs pouvant atteindre 100 000 mètres cubes sont construits sous forme de bassins enterrés affichant la taille d'un terrain de football et jusqu'à 20 mètres de profondeur. Un bassin enterré de ce type, d'un volume de 75 000 m<sup>3</sup> et d'une capacité de stockage de 4350 MWh a été mis en service en 2012 à Marstal (Danemark). Lorsque l'espace est limité, le stockage dans des sondes enfouies peut constituer une alternative<sup>1</sup>.

Comme pour la géothermie de moyenne profondeur, les couches rocheuses aquifères sont désormais envisageables comme moyen de stockage. Techniquement, cette variante est identique à l'extraction nette de chaleur, à la différence que le sens du flux de chaleur s'inverse durant les mois d'été, c'est-à-dire que de l'eau chaude est injectée et de l'eau froide est extraite. En Suisse, cette technologie est testée sur deux sites dans le cadre du projet Heatstore<sup>2</sup>, à Genève et à Berne. Enfin, la géothermie pétrothermale peut également être utilisée en guise de technologie de stockage, en particulier dans le cadre de processus

industriels, dans la plage de température de 100 à 200°C.

Deux forages sont prévus près de Genève dans le cadre du projet Heatstore. La chaleur résiduelle d'une usine d'incinération d'ordures ménagères doit être stockée durant les mois d'été et injectée dans un réseau de chauffage existant pendant les mois d'hiver.



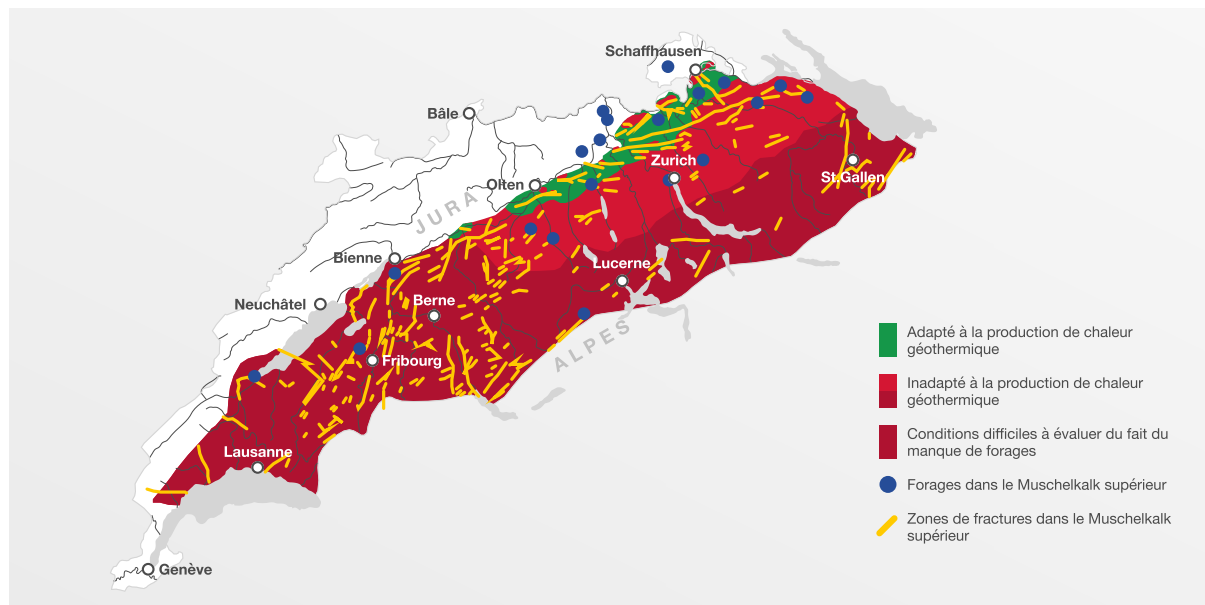
Source : Prof. Andrea Moscariello, Université de Genève

#### Notes et références

- 1 Étude ciblée « Saisonale Wärmespeicher – Stand der Technik und Ausblick », Forum Stockage d'énergie Suisse
- 2 <https://www.heatstore.eu/>

# CO2 / Gaz à effet de serre    # Durabilité

## 1.5.2. Adéquation du Muschelkalk supérieur pour le stockage de CO<sub>2</sub>



**Adéquation de l'aquifère dolomitique à Trigonodus dans le Muschelkalk supérieur pour le stockage permanent de CO<sub>2</sub>. D'autres formations rocheuses peuvent comporter du potentiel, mais celles-ci n'ont pas été étudiées dans le cadre du sous-projet « Réservoirs de chaleur souterrains ».** *Source : Prof. Larryn Diamond, Université de Berne*

Un moyen de réduire les émissions suisses de CO<sub>2</sub> consiste à capter le gaz lorsqu'il apparaît et à le stocker durablement sous terre, c'est la technologie CCS (Carbon Capture and Storage en anglais). De fortes concentrations de CO<sub>2</sub> sont notamment générées par les cimenteries, les usines d'incinération d'ordures ménagères ou les centrales électriques à gaz, si jamais la Suisse devait en construire un jour.

Le stockage souterrain du CO<sub>2</sub> nécessite des structures géologiques adaptées. Comme pour la géothermie hydrothermale, celles-ci doivent présenter une porosité et une perméabilité suffisantes. C'est sous le Plateau suisse que ces conditions sont les plus probables d'être réunies, dans une formation géologique appelée dolomies à Trigonodus et formant une couche de 20 à 30 m d'épaisseur dans le Muschelkalk supérieur.

Les propriétés des dolomies à Trigonodus ont été étudiées en détail dans le cadre du projet « Réservoirs de chaleur souterrains ». Cela a permis de constater que les caractéristiques requises pour le stockage du CO<sub>2</sub> ne se trouvaient qu'au-dessus d'une profondeur de 1130 m. Le stockage permanent de CO<sub>2</sub> nécessitant cependant aussi une profondeur minimum de 800 m, la partie appropriée du Plateau suisse se réduit à une surface de 640 km<sup>2</sup> entre Olten et Schaffhouse (cf. zone verte dans l'illustration).

Les dolomies à Trigonodus sont recouvertes d'une couche imperméable de keuper gypseux. Les déformations qui entrecoupent cette dernière par endroits réduisent encore davantage la



## **Energie**

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

surface disponible à 300 km<sup>2</sup>. Le réservoir ainsi formé permettrait, par exemple, de stocker les émissions fossiles des 30 usines d'incinération d'ordures ménagères de Suisse (environ 2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an ) pendant 25 ans.

### 1.6. Maîtriser le sous-sol

# Numérisation   # Planification   # Innovation   # Fourniture d'énergie

## 1.6.1. Mieux comprendre les réseaux de fractures induites grâce à la simulation

Faible transmissivité  
 $1.0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$

Transmissivité moyenne  
 $2.9 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$

Forte transmissivité  
 $8.3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$

**Développement du champ de température au voisinage d'une zone de fracture de forme elliptique. La figure montre, pour trois transmissivités<sup>1</sup> différentes, comment le champ de température se développe au voisinage d'une zone de fracture de forme elliptique. Source : Prof. Thomas Driesner, EPF Zurich**

La géothermie pétrothermale nécessite une stimulation hydraulique pour créer des réseaux de fractures en vue de l'extraction ultérieure de chaleur grâce à un fluide. Les processus physiques impliqués sont complexes et exigent une coopération étroite entre différentes disciplines telles que la mécanique des fluides, le transfert de chaleur et de matière, et la mécanique de la rupture. Les expériences en conditions réelles étant possibles mais très coûteuses, des simulations numériques sont utilisées pour développer la technologie.

Dans le cadre du projet « Géothermie profonde »<sup>2</sup>, divers effets survenant au sein d'un tel réseau de fractures ont été étudiés à l'aide de simulations numériques. Cela a, entre autres, permis de démontrer que la convection naturelle de l'eau peut entraîner des anomalies de température allant jusqu'à 20°C. Ce type d'anomalies permet notamment aussi d'identifier les réseaux de fractures déjà existants et donc de les retrouver plus facilement.

Il a également été constaté que l'injection d'eau froide en vue d'extraire de la chaleur pouvait influencer des propriétés importantes du réseau de fractures, telles que la perméabilité. Enfin, de premiers indices ont été décelés, attestant que l'eau froide pouvait provoquer la croissance des fractures en raison d'effets thermo-élastiques. Un tel mécanisme avait uniquement pu être suspecté jusqu'à présent.



## Energie

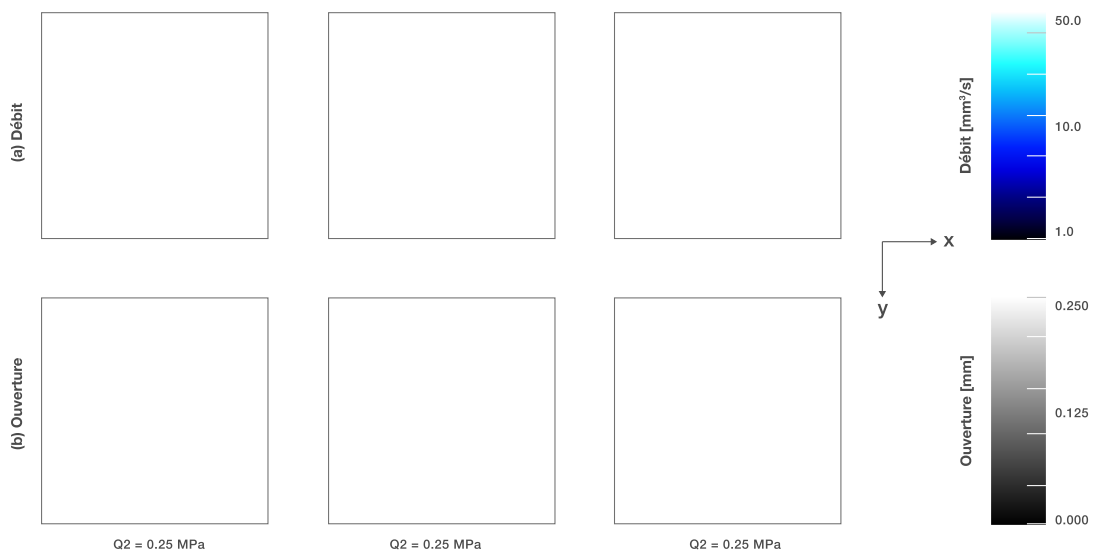
Programmes nationaux de recherche 70 et 71

### Notes et références

- 1 La transmissivité désigne la capacité d'un aquifère à transporter l'eau qu'il contient
- 2 Projet « **Géothermie profonde** »

# Numérisation    # Innovation    # Fourniture d'énergie

## 1.6.2. Simulation du changement de perméabilité durant la stimulation hydraulique



**La simulation montre comment une augmentation de la contrainte verticale entraîne une fermeture de la fracture et une diminution correspondante de la perméabilité<sup>1</sup>.**

La fragmentation de la roche profonde lors de la stimulation dite hydraulique est un processus complexe en plusieurs étapes. En augmentant la pression de l'eau, on commence par briser la roche. En raison des contraintes de cisaillement existantes, la roche se déplace alors en direction tangentielle, comme lors d'un tremblement de terre. À la suite de ce déplacement, les côtés opposés ne s'emboîtent plus, ce qui crée un espace formé d'étroits canaux permanents par lesquels l'eau peut circuler.

La simulation numérique détaillée d'un tel processus doit prendre en compte le couplage de la déformation mécanique de la roche et de l'écoulement à travers la fracture. Un aspect primordial est à cet égard une représentation efficace de la géométrie d'une telle surface de fracture brute. Les géométries des roches sont représentées approximativement sous la forme de maillages, de sorte que les maillages des côtés opposés de la fracture ne correspondent plus. Cette situation peut entraîner de nombreux problèmes lors de la simulation. Le projet « Géothermie profonde »<sup>2</sup> a permis de montrer comment ce problème complexe pouvait être résolu efficacement grâce à des « opérateurs de transfert variationnels ».

L'illustration ci-dessus montre le champ d'écoulement et la largeur d'ouverture dans une fracture dont la géométrie est basée sur un échantillon de roche réel. Il a pu être mis en évidence comment une augmentation de la contrainte de la roche perpendiculaire à la fracture (à gauche : 0,25 MPa, au centre : 8 MPa, à droite : 20 MPa) conduit à une fermeture





de la fracture et à une réduction correspondante de la perméabilité. Ce type d'approche permet de mieux comprendre les processus qui sous-tendent la stimulation hydraulique.

#### Notes et références

1 von Planta, C., Vogler, D., Chen, X. et al. Comput Geosci (2019) 23 : 1125.

<https://doi.org/10.1007/s10596-019-09873-0>

2 Projet « Géothermie profonde »

# Innovation

### 1.6.3. Caractérisation des réservoirs géothermiques



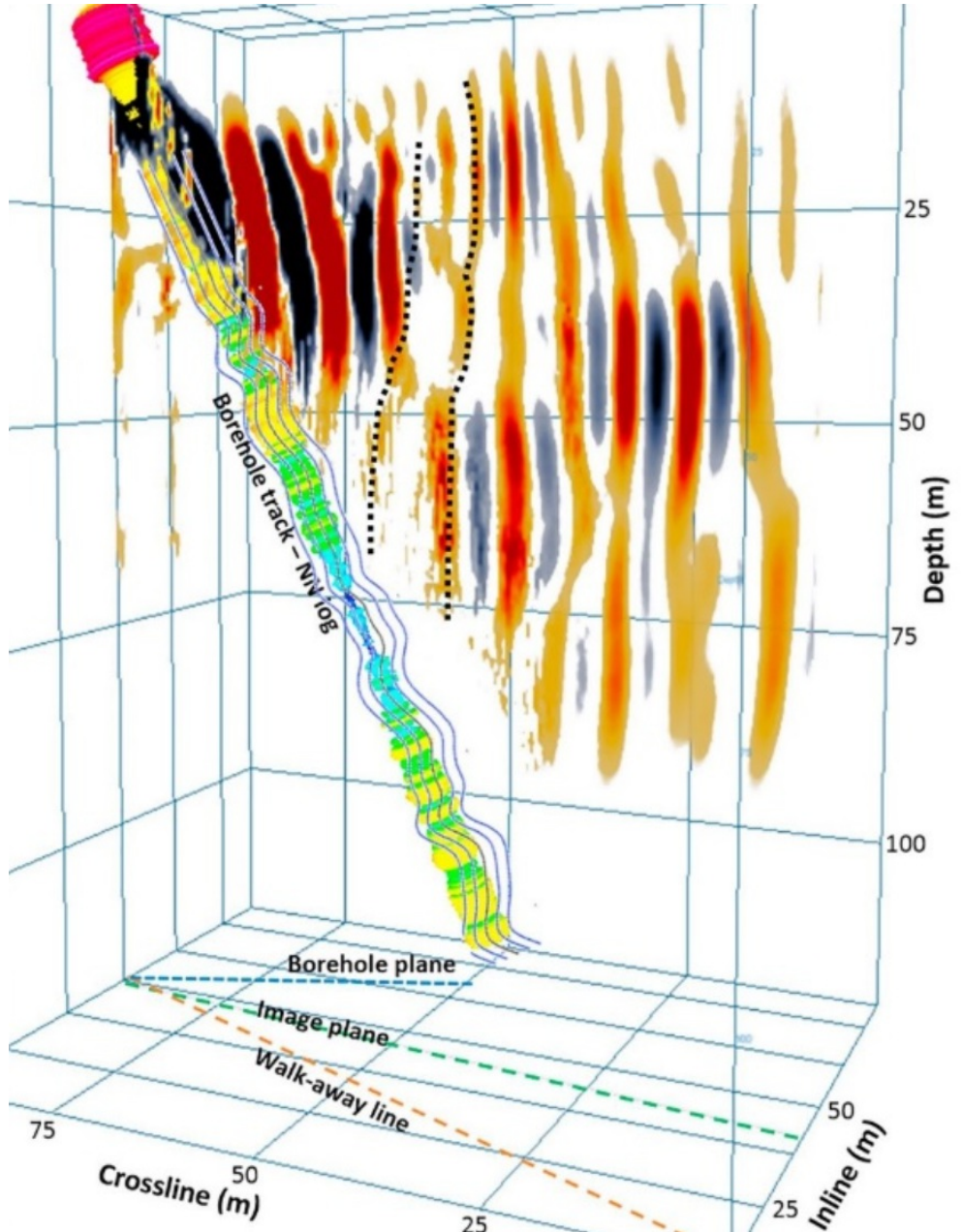
Pour extraire de la chaleur du sous-sol, la perméabilité de la roche doit être suffisante pour permettre la circulation de l'eau ou être générée par stimulation hydraulique. Dans tous les cas, des méthodes de mesure et d'analyse sont nécessaires pour caractériser les propriétés des réseaux de fractures existants ou nouvellement créés.

Le projet « Réservoirs de chaleur souterrains »<sup>1</sup> a permis de déterminer quelles méthodes de mesure indirectes permettraient de cartographier la distribution des fractures dans la roche autour d'un forage. Diverses mesures des propriétés physiques de la roche ont été effectuées à cet effet le long du puits de forage de 125 m. De puissants coups de masse ont notamment été donnés à la surface du sol dans le but de faire vibrer les roches avoisinant le forage (un peu comme si l'on faisait vibrer une corde de guitare) et d'enregistrer les ondes sismiques grâce aux capteurs de pression situés dans le puits de forage.

L'analyse informatique des données recueillies a permis d'obtenir une représentation quasiment en trois dimensions de la roche autour du forage. Grâce à cette technique, il sera désormais plus aisé de localiser les fractures dans la roche, même à proximité de forages plus profonds, ce qui permettra ensuite de stimuler le sous-sol de manière plus ciblée, en injectant de l'eau dans des zones spécifiques d'un forage. Cela devrait permettre d'éviter à l'avenir de provoquer des séismes notables, comme ceux qui ont émaillé les projets géothermiques de Saint-Gall (2012) et de Bâle (2006) et ont en partie causé leur interruption. La capacité à éviter ce type de séismes sera décisive dans le futur succès de la géothermie.

Image sismique quasi-tridimensionnelle des environs du puits de forage du col du Grimsel. Les structures verticales colorées correspondent à l'énergie sismique diffusée par les

fractures. Les deux lignes en pointillés matérialisent les limites de la vaste zone de failles connue sous le nom de Grimsel Breccia Fault.



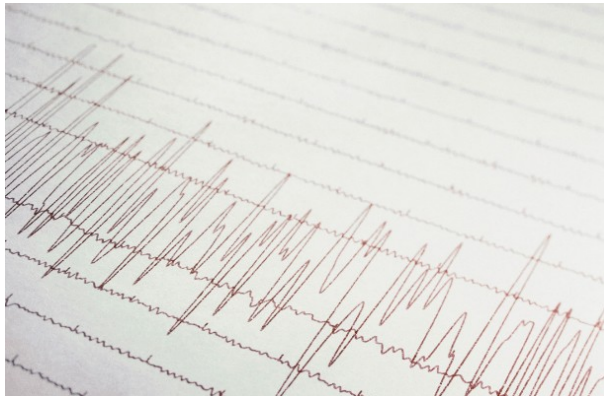
Source : Dr. Andrew Greenwood, anciennement Université de Lausanne, désormais Université de Leoben

#### Notes et références

1 Projet « Réservoirs de chaleur souterrains »

# Risque    # Acceptation    # Innovation

### 1.6.4. Analyse optimisée de la sismicité induite de faible intensité

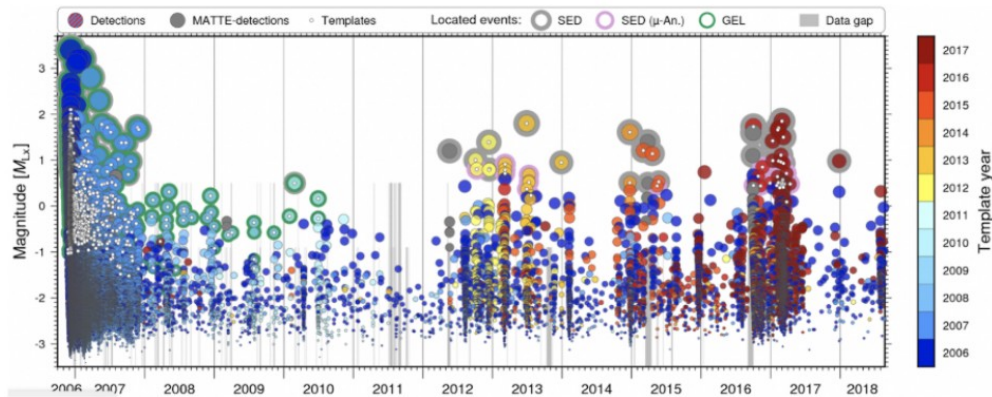


Dans le cadre d'un projet géothermique optimisé (Enhanced Geothermal System), un forage d'essai a été réalisé en décembre 2006 à Petit-Huningue, près de Bâle, jusqu'à une profondeur de 5000 m. De l'eau a ensuite été injectée pour augmenter la perméabilité de la roche – le trou de forage était ouvert sur la roche à partir d'une profondeur d'environ 2500 m. Contrairement à la procédure prévue à Haute-Sorne, la stimulation n'a pas été effectuée par sections, mais sur la totalité des 2,5 km de forage ouverts.

Dans le cadre du projet « Gestion du risque en géothermie et hydroélectricité <sup>2</sup> », douze ans de données sismiques, relevées à Bâle par un sismomètre placé à 2,7 km de profondeur, ont été étudiés. Cela représente un total de 280 000 événements. L'application d'un filtre optimisé (ou matched filter en anglais) a permis d'améliorer la sensibilité de deux ordres de grandeur, jusqu'à une magnitude<sup>3</sup> de  $ML_x = -3,4$ . Le filtre optimisé est basé sur la corrélation croisée du signal mesuré avec les formes d'onde d'événements sismiques connus.

Comme les concepts développés par le Center for Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE) pour faire face au risque de sismicité induite reposent en grande partie sur des catalogues de séismes et leur distribution statistique, le nombre de séismes détectés – en particulier ceux qui ne sont pas perceptibles – doit être sensiblement revu à la hausse. L'évolution du risque sismique pendant l'aménagement et plus tard pendant l'exploitation d'un réservoir géothermique peut ainsi être évaluée en temps réel. L'application de la nouvelle méthode d'évaluation permet de détecter des événements sismiques d'ampleur nettement plus faible.

Série chronologique des événements sismiques consécutifs à la stimulation hydraulique à Bâle. L'échelle de couleurs indique l'année de survenue des événements sismiques utilisés pour la corrélation croisée.



Source : Service Sismologique Suisse<sup>1</sup>

### Notes et références

1 Herrmann, M., Kraft, T., Tormann, T., Scarabello, L., & Wiemer, S. (2019). A consistent high-resolution catalog of induced seismicity in Basel based on matched filter detection and tailored post-processing. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 124, <https://doi.org/10.1029/>

2 Projet « **Gestion du risque en géothermie et hydroélectricité** »

3 La magnitude locale  $M_{L,x}$  correspond à l'échelle de Richter. Étant donné qu'il s'agit d'une échelle logarithmique, les magnitudes obtenues peuvent être négatives pour les séismes de très faible intensité.

# Risque # Innovation

### 1.6.5. Description améliorée des dommages aux bâtiments dus à la sismicité induite de faible intensité



**Dommages constatés sur la maçonnerie : pas de fissures (à gauche), fissures visibles (au centre), écaillage de l'enduit (à droite).<sup>1</sup>**

Une fonction de fragilité décrit la corrélation entre l'intensité d'un événement déclencheur (par ex. un tremblement de terre) et la probabilité d'un certain dommage. Les fonctions de fragilité sismiques habituelles tiennent uniquement compte de la gamme des dommages très visibles causés aux structures des bâtiments jusqu'à l'effondrement. L'évaluation de dommages mineurs tels que des fissures dans l'enduit nécessite une échelle de mesure beaucoup plus fine, capable d'associer les changements dans la maçonnerie à l'intensité des événements sismiques.

Dans le cadre du projet « Gestion du risque en géothermie et hydroélectricité <sup>2</sup> », dans une installation de test de l'EPF de Zurich, des maçonneries enduites et non armées ont été soumises à des charges cycliques correspondant à de longues séries d'événements sismiques de faible à moyenne intensité. Les champs de contrainte et de déformation des sections de paroi ont été mesurés directement pendant les essais par corrélation d'images numériques. Sur la base de la distribution des changements de forme mesurés en tant que contraintes de von Mises, deux indicateurs de dommages ont été définis, qui quantifient la surface d'enduit endommagée et la longueur des fissures.

Trois cas de dommages observables ont été définis pour les évaluations : (1) absence de fissures, (2) fissures visibles, (3) écaillage de l'enduit mural. Les indicateurs de dommages ont été reliés aux trois cas de dommages grâce à des calculs mathématiques. Sur cette base, un modèle de probabilité a été développé pour les dommages, avec une corrélation entre les

amplitudes de déformation et les indicateurs de dommages calculés. Cette approche a finalement permis d'établir un lien entre l'intensité d'un événement sismique et les dommages causés à la maçonnerie.

#### Notes et références

1 Didier, M. (2018) : Seismic Resilience of Communities and of Their Civil Infrastructure Systems, thèse de doctorat, EPF Zurich, Suisse.

2 Projet « **Gestion du risque en géothermie et hydroélectricité** »

## 1.7. Vouloir, pouvoir, agir

Le thème de la « géothermie » concerne un large éventail de groupes d'intérêt – il comprend en fait tous les acteurs du système énergétique, c'est-à-dire l'ensemble de la population, les entreprises, les fournisseurs d'énergie, les associations professionnelles, l'administration publique et les instances politiques.

Les recommandations suivantes s'adressent toutefois seulement aux groupes d'intérêt ayant une influence immédiate sur la future organisation de l'approvisionnement en énergie et sur la consommation énergétique du parc immobilier suisse, c'est-à-dire notamment les :

- instances politiques (Confédération, cantons, communes),
- fournisseurs d'énergie,
- entreprises,
- investisseurs,
- administrations publiques,
- associations

Les recommandations formulées sont essentiellement déduites des études menées dans le cadre du projet conjoint « Énergie hydroélectrique et géothermique » et des actions requises qui en découlent, et sont pertinentes dans la perspective de la transformation de notre système énergétique.



# Administration publique    # Fournisseur d'énergie    # Entreprises    # Politique (Confédération, canton, commune)

### 1.7.1. La Suisse a besoin d'une stratégie nationale pour le sous-sol profond !

*Afin de soutenir au mieux la transformation du système énergétique suisse, une stratégie globale doit être élaborée pour le sous-sol, en tenant compte de la géothermie et de tous les autres usages.*

La géothermie consiste à extraire de la chaleur du sous-sol. Le projet conjoint « Énergie hydroélectrique et géothermique » et les travaux complémentaires du Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE) ont toutefois clairement démontré que cette définition stricte ne rendait pas justice à toute l'étendue des possibilités qu'offre le sous-sol profond.

La première des priorités est toujours l'extraction nette de la chaleur stockée dans le sous-sol. Selon la profondeur, le niveau de température et les conditions géologiques, celle-ci peut être utilisée directement ou transformée en électricité à l'aide de procédés appropriés. Le sous-sol peut cependant aussi être utilisé comme un accumulateur de chaleur saisonnier, ce qui est possible dans différentes structures géologiques et à différentes profondeurs en fonction du niveau de température.

Outre de la chaleur, le sous-sol peut également servir à stocker des gaz, tels que l'hydrogène ou le gaz naturel, ou encore au stockage permanent de CO<sub>2</sub>. Ces applications nécessitent une porosité appropriée et une couche de roche imperméable au-dessus. Outre toutes ces possibilités, il ne faut pas oublier que le stockage définitif de déchets hautement radioactifs fait également appel à la solution du sous-sol et que les systèmes de transport sont eux aussi implantés à des profondeurs toujours plus importantes.

Il apparaît ainsi clairement que la Suisse a besoin d'une stratégie à long terme, reliant de manière optimale toutes les formes d'utilisation du sous-sol profond. Ces dernières étant systématiquement liées à des installations correspondantes en surface, une planification à long terme des infrastructures est également nécessaire à ce niveau.



# Investisseurs (bailleurs de fonds extérieurs) # Politique (Confédération, canton, commune)

## 1.7.2. Utiliser toutes les possibilités de stockage de CO<sub>2</sub> à long terme !



*Pour atteindre l'objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre, le CO<sub>2</sub> doit être éliminé de la biosphère, converti de façon judicieuse ou stocké de manière permanente dans le sous-sol.*

Le Conseil fédéral s'est donné pour objectif de réduire à zéro les émissions nettes de gaz à effet de serre de la Suisse d'ici 2050. Étant donné qu'il existe des secteurs tels que la production de ciment ou l'agriculture, dans lesquels il sera très difficile de réduire les émissions, la Suisse doit soit compenser ses émissions nationales à l'étranger, soit retirer durablement du CO<sub>2</sub> de la biosphère. À long terme, la première option finira par ne plus être possible parce que tous les pays du monde voudront apporter leur contribution à l'éradication des émissions de gaz à effet de serre et optimiseront à cet effet leur propre bilan.

Le potentiel de stockage de CO<sub>2</sub> dans une structure géologique donnée a été évalué dans le cadre du projet « Réservoirs de chaleur souterrains »<sup>1</sup>. Il permettrait d'absorber les émissions des usines d'incinération d'ordures ménagères suisses pendant environ 25 ans. Pour éliminer durablement des quantités encore plus importantes de CO<sub>2</sub>, il faut développer des alternatives. Une option consiste à convertir le CO<sub>2</sub> en méthane ou en carburant pour l'aviation. La création d'une infrastructure européenne de transport de CO<sub>2</sub> est également envisageable. Le CO<sub>2</sub> serait ainsi collecté par l'intermédiaire de pipelines et transporté vers des gisements épuisés de pétrole ou de gaz.

Il est urgent que la Suisse se préoccupe intensivement de l'élimination du CO<sub>2</sub>, qu'elle étudie en détail toutes les options, qu'elle s'engage dans ce domaine – y compris au niveau international – et qu'elle mette en œuvre des solutions réalisables à moyen terme. Les recherches ont montré qu'une solution optimale « zéro émissions nettes » ne pouvait pas être trouvée à un niveau purement national !

Notes et références



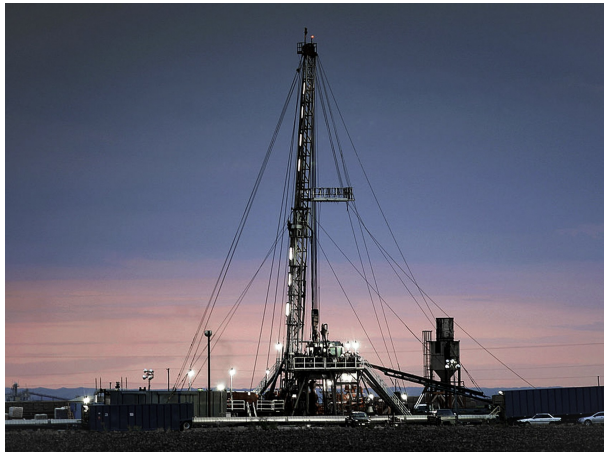
## **Energie**

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

1 Projet « Réservoirs de chaleur souterrains »

# Associations et ONG    # Politique (Confédération, canton, commune)

### 1.7.3. La production d'électricité géothermique doit être démontrée de toute urgence !



*Deux projets pilotes de géothermie hydrothermale et pétrothermale sont dans les starting blocks : Lavey-les-Bains (VD) et Haute-Sorne (JU). Ils doivent servir à démontrer dans la pratique les progrès majeurs réalisés ces dernières années par la recherche en matière de limitation des risques sismiques.*

La recherche et l'industrie travaillent main dans la main sur les fondements de la stimulation hydraulique avec l'objectif clair d'atteindre une stimulation efficace avec un risque sismique minimal. Des systèmes de feux de signalisation ont été développés et testés, qui combinent une surveillance permanente de la sismicité induite pendant le processus de stimulation avec des critères de décision clairs quant au moment où la stimulation doit être interrompue. L'ensemble des résultats obtenus sont pris en compte dans le projet de Haute-Sorne. Suite à une étude de faisabilité positive, le projet de géothermie hydrothermale de Lavey-les-Bains (VD) prend lui aussi forme<sup>1</sup>.

L'utilisation directe de la chaleur doit également être encouragée. Dans les zones densément peuplées, lorsque la demande de chaleur est importante ou pour les gros consommateurs de chaleur du secteur agricole ou industriel, la géothermie hydrothermale à moyenne profondeur peut fournir de la chaleur à une température d'environ 30 à 100°C à des coûts de production intéressants (cf. la centrale géothermique de Riehen<sup>2</sup>). Pour les températures plus élevées et si aucune source de chaleur hydrothermale n'est disponible, la géothermie pétrothermale peut être utilisée.

Les acteurs concernés, tels que les communes, les promoteurs de projets ou les entreprises industrielles, doivent davantage prendre conscience de ces possibilités. À cet effet, il est urgent de réaliser des projets pilotes et de démonstration.

Notes et références



## Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

1 <http://www.agepp.ch/>

2 <https://www.erdwaermeriehen.ch/erdwaerme-riehen.html>

# Associations et ONG    # Fournisseur d'énergie    # Politique (Confédération, canton, commune)

#### 1.7.4. Les mesures de soutien public sont importantes et pertinentes !



*Dans de nombreux domaines, la géothermie profonde n'en est qu'aux prémices de son développement et ne peut donc pas encore générer les investissements nécessaires sur le marché ouvert. Pour accélérer leur développement, un soutien ciblé par le gouvernement fédéral et les cantons est indispensable.*

Des mesures de soutien public resteront nécessaires à l'avenir pour développer le potentiel de la géothermie. Dans de nombreux projets, le risque lié aux investissements restera pendant un certain temps encore trop élevé pour les acteurs du secteur privé.

Les projets de production d'électricité géothermique bénéficient actuellement d'une « garantie géothermie » du gouvernement fédéral. Avec ce système, jusqu'à 60 % des coûts d'investissement imputables peuvent être couverts par une garantie contre les risques si la recherche d'un réservoir géothermique approprié se solde par un échec. Par ailleurs, les projets pilotes et de démonstration peuvent bénéficier du soutien de l'Office fédéral de l'énergie. Une rétribution du courant injecté est en outre disponible pour la production d'électricité géothermique.

D'autres mesures de soutien ont en outre été décidées dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050. Celles-ci comprennent par exemple des contributions à l'exploration, pouvant atteindre jusqu'à 60 % des coûts d'investissement des projets visant à produire de l'électricité. Une telle contribution a été accordée en septembre 2019 au projet de Haute-Sorne. Jusqu'à CHF 50 millions sont mis à disposition à cet effet. Depuis 2018, les projets de chauffage peuvent également être financés par des contributions à l'exploration pouvant aller



## Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

jusqu'à 60 %.

Le passage prévisible des projets pilotes pétrothermaux aux premières installations de production nécessitera également une adaptation du soutien public. En lieu et place des garanties et des contributions à l'exploration, des mesures de financement initial et de participation des cantons auront un effet optimal. Étant donné que ces centrales de géothermie profonde seront à l'avenir des piliers importants de l'infrastructure énergétique, il est logique qu'elles soient cofinancées par les pouvoirs publics, au même titre que les infrastructures ferroviaires et routières.