



MOOC

Énergies Renouvelables

UVED
Université Virtuelle Environnement
& Développement Durable

SEMAINE 6 : GÉOTHERMIES

Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « La géothermie haute température non conventionnelle » de la semaine 6 du MOOC « Énergies renouvelables ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.

Les principes de la géothermie haute température non conventionnelle

Jean SCHMITTBUHL

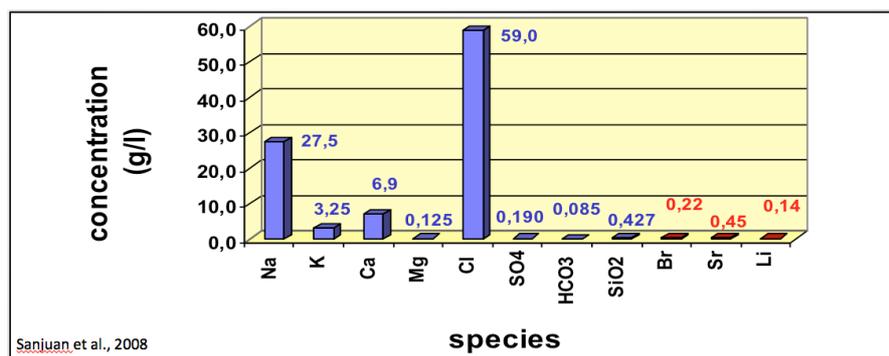
Directeur de recherche – CNRS

Alors la géothermie haute énergie non conventionnelle.

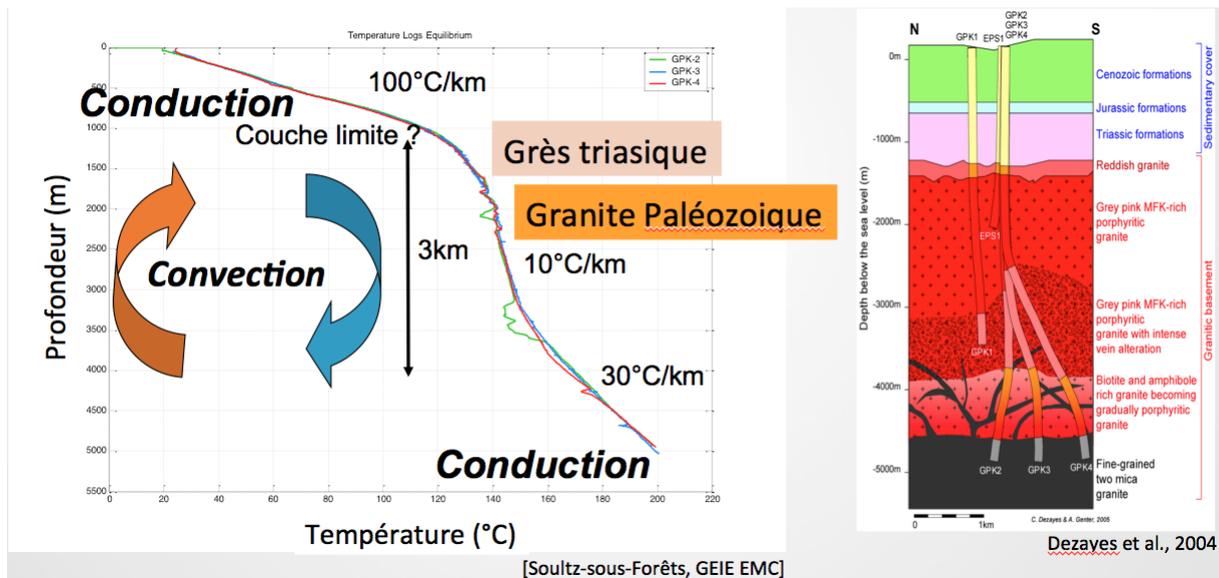
- Donc là, on s'intéresse à une ressource au-delà de 150 °C qui définit la géothermie haute température mais dans un cadre non conventionnel, c'est-à-dire qu'à priori on va chercher à modifier le milieu pour réussir à exploiter cette énergie et c'est souvent le cas quand on va très profond.
- Donc l'objectif, c'est de produire de l'électricité principalement et peut-être aussi un peu de chaleur.
- Et dans le cadre de cette géothermie non conventionnelle, on a eu une évolution très singulière des concepts, des principes, en grande partie suite à l'expérience de Soultz-Sous-Forêts.

Donc là je voudrais revenir un peu sur l'historique de ce concept parce qu'il est majeur et qu'il a changé le paradigme sensiblement.

- Donc on est partis d'une idée qu'on a appelé *Hot Dry Rock* (HDR) où le principe était finalement essayer de transposer un peu la situation typique, je dirais, du bassin de Paris avec un milieu poreux naturel, dans lequel circule un fluide et on avait l'objectif d'exploiter ce fluide circulant.
- Donc la prolongation de cette idée là, ça a été de se dire, si le milieu poreux naturel n'existe pas naturellement, et bien on va essayer de le reproduire, de l'introduire dans le milieu et pour ça donc de fracturer le milieu artificiellement pour créer cet espace poreux.
- Donc ça c'était l'essence de l'idée, de créer cet aquifère en profondeur pour faire circuler un fluide artificiel, puisque dans l'idée, il n'existait pas naturellement, pour extraire cette chaleur et ensuite produire de l'électricité.
- En fait, avec l'histoire de Soultz-Sous-Forêts, on s'est aperçus qu'il y avait un fluide naturel important qui circulait, donc il y avait un espace poreux de circulation avec un fluide naturel et, ce qui est très singulier dans le cas de Soultz-Sous-Forêts, c'est que ce fluide naturel il est extrêmement salé, c'est un grand océan profond si on peut dire, avec une eau qui peut être trois fois plus salée que l'eau de mer, donc une saumure profonde qui circule.



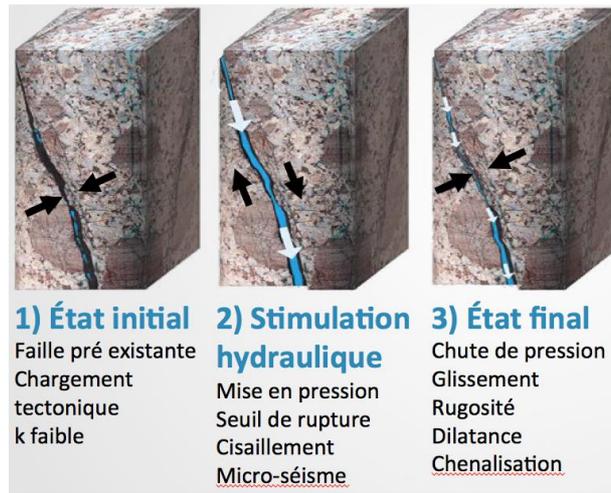
- ⇒ Donc l'idée au départ qui était d'imaginer que la roche était sèche, n'était pas du tout validée.
- ⇒ Donc ça c'était un premier point d'évolution sensible.
- La deuxième observation qui a fait évoluer le concept, c'est que la circulation était importante et ça, on l'a vu en regardant, en essayant de comprendre le profil de température qui est mesurée dans un puits de forage à Soultz-Sous-Forêts.
- Si on s'imaginer être un petit capteur qui descend dans un puits de forage à Soultz-Sous-Forêts depuis la surface jusqu'au fond du puits à 5000 mètres, on va voir la température évoluer de façon non continue.



- ⇒ Elle évolue très rapidement sur le premier kilomètre, dans la partie sédimentaire du système et puis ensuite, quand on va vers la partie plus profonde, en dessous des sédiments, en fait la température n'évolue pratiquement plus, elle évolue dix fois moins, une dizaine de degrés par kilomètre, pour revenir à une évolution plus classique d'une trentaine de degrés par kilomètre.
- Et pour expliquer cette anomalie de comportement, et bien il faut penser à une circulation majeure sur plusieurs kilomètres de hauteur de grande boucle de convection.
- Donc on voit bien que l'idée au départ d'un système sec où il fallait créer complètement le milieu poreux pour arriver à une circulation n'était pas du tout pertinente et ce nouveau concept, on lui a donné un autre nom, qui s'appelle cette fois-ci EGS (ou *Enhanced Geothermal System*).
 - ⇒ L'idée de fond, elle est assez simple, c'est de dire qu'il existe beaucoup de choses naturellement et il faut les utiliser.
 - ⇒ Il existe d'une part un milieu où circule le fluide, c'est l'ensemble des grandes failles préexistantes et puis l'autre chose, c'est qu'il y a une circulation naturelle qu'il faut aller exploiter.
- Donc dans le nouveau concept, on ne va pas du tout chercher à créer ce réservoir, on va utiliser les failles existantes et la grande spécificité c'est d'aller créer les forages qui vont sur ces failles préexistantes pour aller prélever le fluide naturel.
- L'autre point qui a fait un peu évoluer les choses, c'est le fait qu'on a introduit des tarifs de rachat de l'électricité, fixés, et qui permettent d'avoir une planification de la ressource financière sur de nombreuses années.

Alors, le cœur de cet aspect non conventionnel, c'est modifier le milieu et la principale technique pour le faire c'est ce qu'on appelle la stimulation hydraulique. C'est en fait la stimulation générale mais principalement utilisée c'est la stimulation hydraulique.

- Dans l'esprit, elle se différencie assez singulièrement de ce qu'on pourrait appeler la fracturation hydraulique où là on cherche à créer la fracture avec une montée en pression hydraulique, ici là on cherche à réutiliser une faille existante avec une mise en pression ce qui en fait une différence.

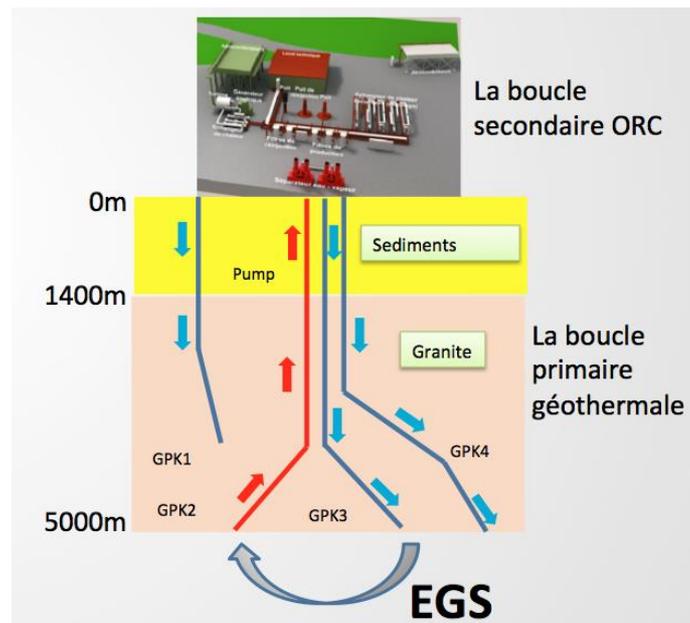


- Donc, si on compare ou qu'on définit trois grands stades dans ce système-là, l'état initial, c'est une fracture qui existe déjà.
 - ⇒ Donc on ne la crée pas, on cherche à faire rejouer une fracture existante.
- La deuxième étape, c'est de mettre en pression pour arriver jusqu'à la chute de la pression effective sur la fracture et donc son cisaillement, ce qui va générer un micro séisme au moment de son glissement.
- Et puis, l'état final, c'est la reprise de l'effort mais du fait de la dilatance de la fracture, donc du fait que quand elle se cisaille, est obligée de s'ouvrir pour pouvoir se cisailer du fait de la topographie assez compliquée de ses fractures.
 - ⇒ Elle est obligée de passer par-dessus les aspérités et donc elle va rester plus ouverte après qu'avant.
 - ⇒ Donc c'est ça vraiment la stimulation que, dans un certain jargon, on appelle l'*hydro-shear*.

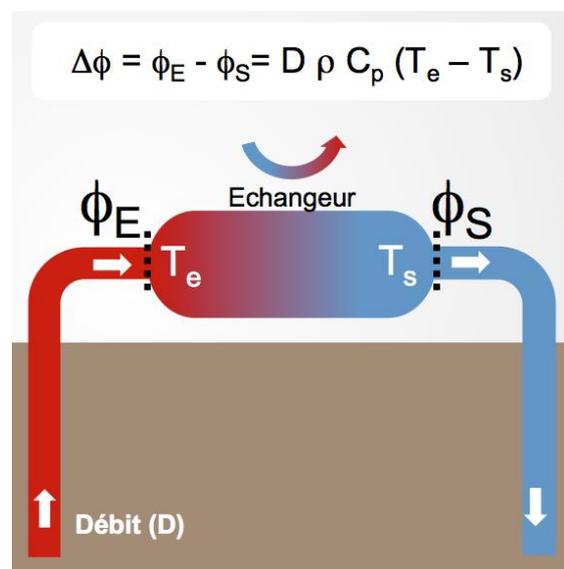
Alors, ça c'est ce qui se passe dans le sous-sol. Pour cette technologie-là, il faut aussi une installation de surface avec une centrale qui permet la circulation à grande échelle.

- Dans cette centrale, il y a principalement deux grands systèmes.

- Il y a d'une part ce qui permet de réaliser la boucle géothermale, donc la pompe et le système de fermeture de la circulation géothermale ;
 - Et l'autre partie - puisque c'est en deux sous-systèmes -, il y a un fluide spécifique qui vient prélever la chaleur qui est extraite de la boucle géothermale pour l'emmener vers une turbine qui va produire l'électricité.
- ⇒ C'est la boucle secondaire typiquement ORC.



- Donc si on fait la différence entre ces deux flux, on peut l'estimer à partir du débit (D), de la densité du fluide (ρ), de la capacité calorifique de ce fluide et de la différence de température entre l'entrée (T_e) et la sortie (T_s).



- Alors si on applique les paramètres qui sont en gros utilisés à Soultz-Sous-Forêts, on voit que le flux, le bilan est de l'ordre de 9,5 MW thermiques avec une capacité calorifique de 4200 J par kilogramme par kelvin, une densité d'environ 2000 kg par mètre cube et un débit de 25 litres par seconde, pour une température d'entrée de 160°C et une température de sortie de 70°C.
 - ⇒ Ça c'est les chiffres qui sont vraiment typiques de cette technologie et que l'on peut garder en tête.
 - ⇒ Et tout ça, c'est pour une certaine pression, une pression de production donc de pompage de l'ordre de 20 bars et une pression de réinjection qui peut être de l'ordre de 50 bars.
- Et avec ces chiffres-là, on arrivera donc à une production thermique de 9,5 MW thermiques, ce qui donnera avec le rendement de l'ordre de 10 % typiquement, une production électrique de l'ordre du mégawatt.
 - ⇒ Donc on voit que Soultz, dans ce cadre-là reste une centrale à production modérée mais on a tous les chiffres pour à peu près estimer la production d'un tel système.

La géothermie haute température non conventionnelle aujourd'hui : le projet ECOGI

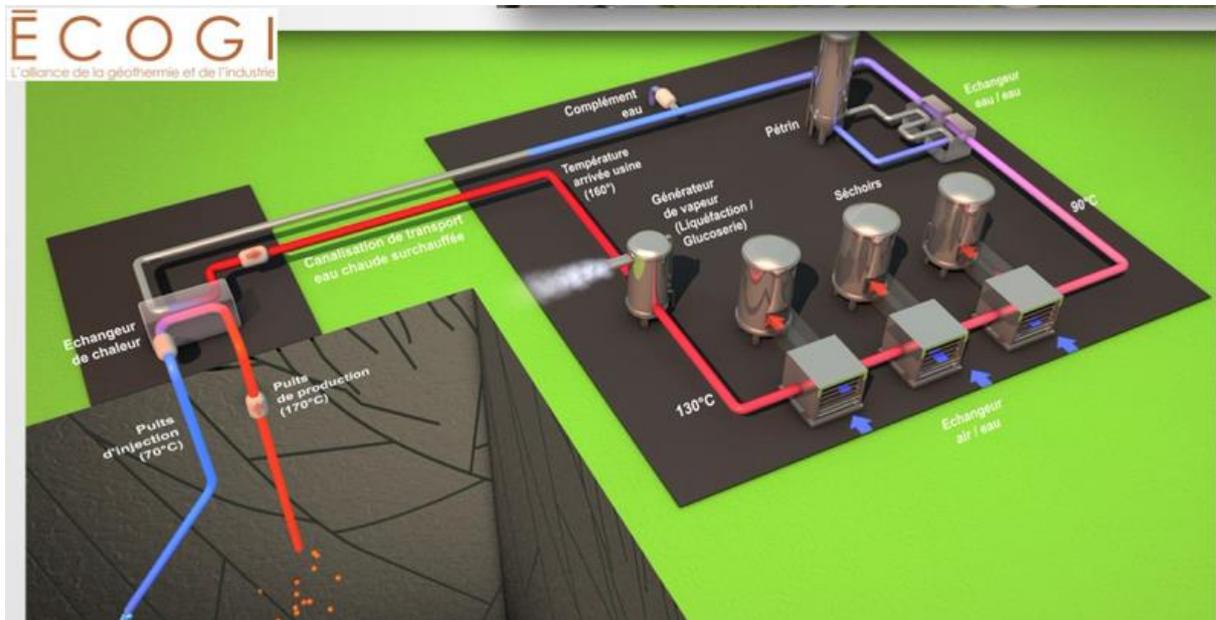
Jean SCHMITTBUHL

Directeur de recherche – CNRS

La géothermie profonde aujourd'hui, où en est-on ? Alors pour ça, il y a un projet important pour cette technologie en ce moment qui est le projet ECOGI dans le nord-est de la France.

- Tout près du site historique de Soultz-Sous-Forêts, à 8 km de ce site historique, et c'est pour répondre à la demande d'une société très gourmande en énergie, une amidonnerie à Beinheim, de la société Roquettes Frères, qui a des besoins énergétiques de l'ordre de 100 MW thermiques et qui cherche à diversifier sa ressource, en particulier en allant vers les énergies renouvelables, et qui vise de développer une utilisation d'énergie, de géothermie profonde pour environ 25 MW thermiques (donc un quart de ses besoins) par une boucle géothermale qui va se situer au voisinage de cette usine, à quelques kilomètres, à Rittershoffen.
- Donc l'objectif, c'est d'utiliser une ressource, un fluide à environ 170°C et d'essayer d'aller jusqu'à 250 m³ / heure en production pendant, de l'ordre de 8000 heures par an, donc de la façon la plus continue possible.
- Alors, il y a une spécificité à Rittershoffen, c'est d'essayer de tirer les enseignements de la grande expérience de Soultz-Sous-Forêts.
- ⇒ A Soultz-Sous-Forêts, on a cherché à utiliser une ressource profonde, d'environ 5000 mètres.
- Ce que l'on peut voir sur cette figure où on a fait une coupe géologique à travers le fossé rhénan, depuis le nord-ouest jusqu'au sud-est, à l'échelle d'une trentaine de kilomètres, et on a positionné le site, le réservoir de Soultz-Sous-Forêts (qu'on voit en profondeur, sur la gauche), à environ de 4000 – 5000 mètres de profondeur et la situation de Rittershoffen, un tout petit peu à côté, on voit que l'on cherche là à exploiter un réservoir moins profond (aux environs de 2500 mètres), mais le point important, c'est de voir que là où est située l'usine à Beinheim (c'est le trait orange sur la figure), on n'est pas exactement au-dessus de là où on a positionné le réservoir.

⇒ Donc il y a eu le choix de déporter la ressource, le réservoir, l'utilisation du réservoir à près 15 km de là où on l'exploite pour essayer d'avoir un réservoir moins profond, qui est sensiblement moins coûteux, donc avec un risque géologique nettement moindre.



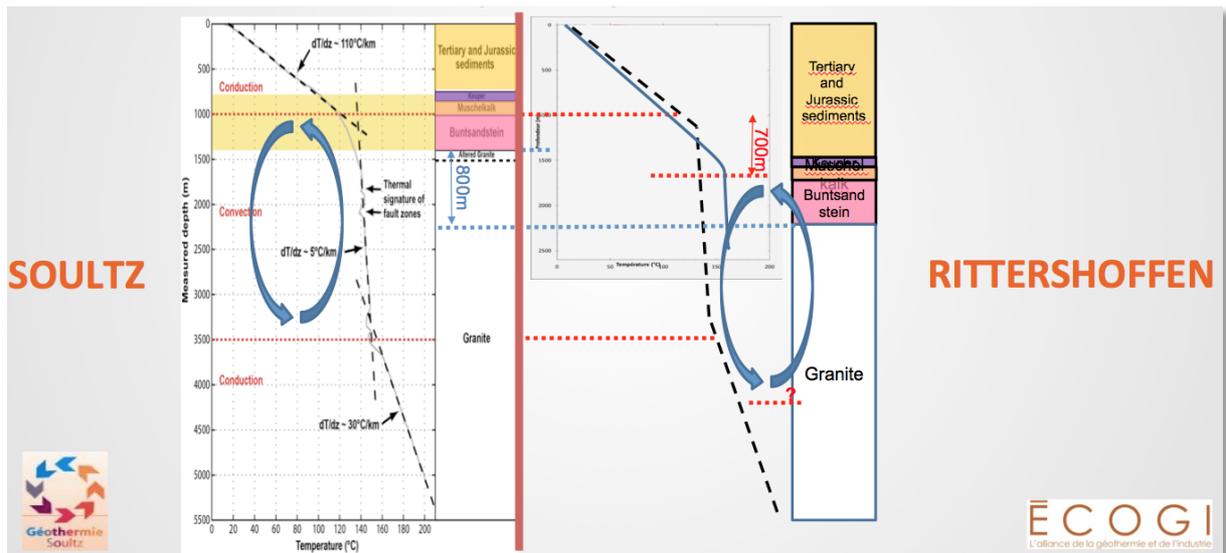
⇒ Donc ça c'est le choix important qui a été fait.

➤ Du coup, on se retrouve dans une situation que l'on peut comparer à celle de Soultz-Sous-Forêts.

⇒ Vous avez ici la représentation des profils de température dans les deux sites, à la fois à Soultz et d'autre part à Rittershoffen.

⇒ Donc l'évolution de la température avec la profondeur, on trouve en particulier à Soultz où ça a été très bien étudié, cette évolution, cette augmentation très rapide sur les premiers mille mètres et puis une quasi température homogène sur les 2000 mètres suivants pour reprendre une température, une évolution plus classique.

⇒ Donc cette structure de température existe aussi à Rittershoffen, mais la zone à évolution rapide qui est typique d'un régime conductif est plus importante et visiblement liée à la géologie. C'est la zone qui est un petit peu plus profonde qu'à Soultz qui a l'air de contrôler le toit de ce réservoir et ça, c'était intéressant dans ce système-là à constater.



➤ Donc la géologie contrôle le toit du réservoir et par contre, il existe aussi un impact fort de la circulation importante, hydrothermale, sur une échelle plurikilométrique dans les deux sites.

➤ Donc si on retient le bilan, c'est une situation comparable mais quand même un certain contrôle de la géologie.

Alors aujourd'hui, où on en est dans ce projet ?

➤ Les deux grands forages qui permettent d'accéder à la ressource ont été réalisés.

- GRT1 qui a été fait toute fin 2012 ;
- Et GRT2 qui a été fait en 2014, pendant l'été 2014.

➤ Ce projet, aujourd'hui a un vrai succès, avec une productivité très forte à GRT2, naturellement le forage produit un fluide géothermique à une température plus élevée que prévue (supérieure à 160°C) et il n'y a pas eu besoin de stimuler ce deuxième puit.

⇒ Le premier a nécessité une stimulation et c'est cette stimulation que l'on a suivie très finement par un monitoring sismologique où on a pu mettre en évidence le développement de la micro sismicité et donc à imager le développement du réservoir pendant la stimulation.

➤ Alors aujourd'hui, qu'est-ce qui se passe en 2015 ? Et bien c'est la réalisation de cette boucle secondaire qui va permettre la circulation de la vapeur d'eau sur 15 km.

⇒ C'est tout un développement technologique aussi très important : comment transporter cette chaleur sur 15 km avec une déperdition la plus faible possible ?

⇒ La déperdition attendue est de l'ordre de 3°C.

- Donc il y a un vrai savoir-faire qui est en train de se mettre et qui permet d'envisager des développements innovants avec ce décalage entre la zone d'utilisation et la zone de production sur ces distances d'une dizaine de kilomètres typiquement.
- ⇒ C'est important aussi par rapport aux utilisations en perspective dans un contexte urbain où ça peut être utile de déplacer la production de l'utilisation.

Doit-on avoir peur de la géothermie haute température non conventionnelle ?

Jean SCHMITTBUHL

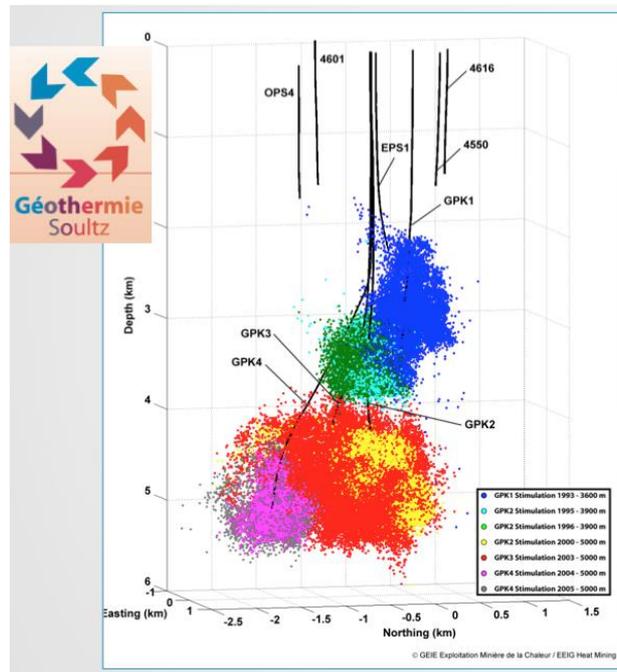
Directeur de recherche – CNRS

Alors, doit-on avoir peur de la géothermie profonde ?

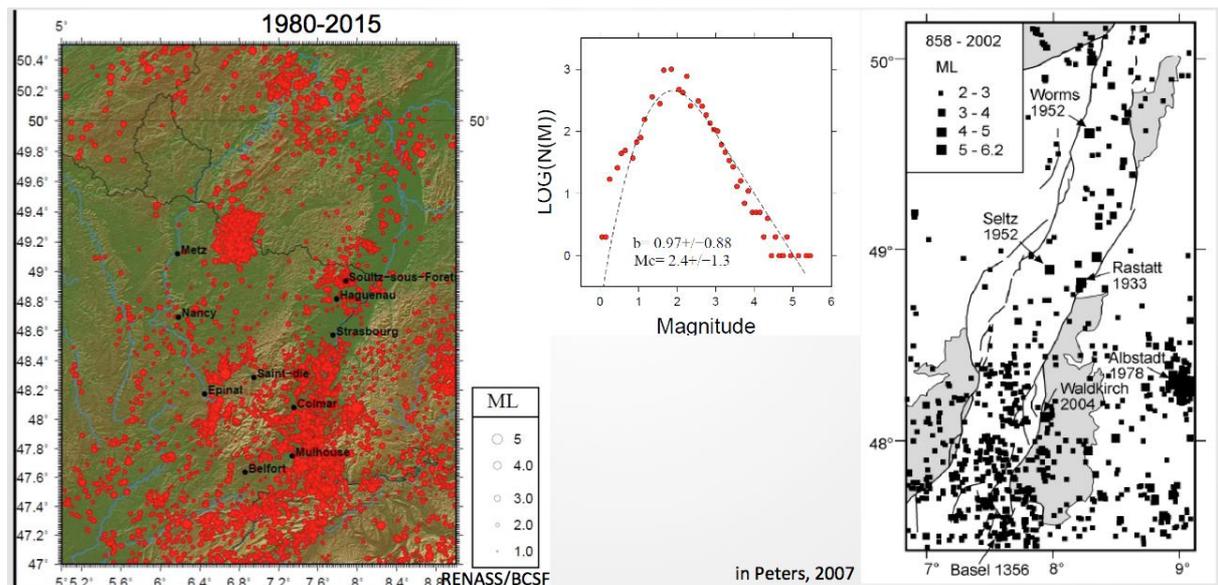


- Ça c'est une question quand même qu'un certain nombre de personnes se posent quand elles voient venir ces grands projets près de chez eux.
- Il y a des raisons effectivement à ces inquiétudes, il y a quelques exemples qui sont bien rapportés dans la presse.
- ⇒ Il y a eu des difficultés à Soultz-Sous-Forêts en 2003 avec quelques séismes qui ont été ressentis et donc qui ont rapidement inquiété la population.
- ⇒ Il y a eu le séisme de Bâle en 2006, qui a été effectivement un enjeu majeur pour le développement de ce projet à Bâle.
- ⇒ En ce moment, sur la ville de Strasbourg, il y a une mobilisation importante par rapport aux projets où un certain nombre de riverains se posent des questions et manifestent leur inquiétude vis-à-vis de ces projets-là.
- Alors, si on reprend un peu les grands sujets d'inquiétude :
 - Le premier évidemment c'est la sismicité induite.
- ⇒ Alors, une façon d'en parler, c'est de montrer quantitativement ce qui se passe, ce qui a été fait très largement sur le site de Soultz-Sous-Forêts où sont représentés ici les nuages

de sismicité pendant les phases de stimulation des pluies et on voit par les couleurs, les différents nuages, qui montrent qu'il y a énormément de micro séismes qui sont produits.



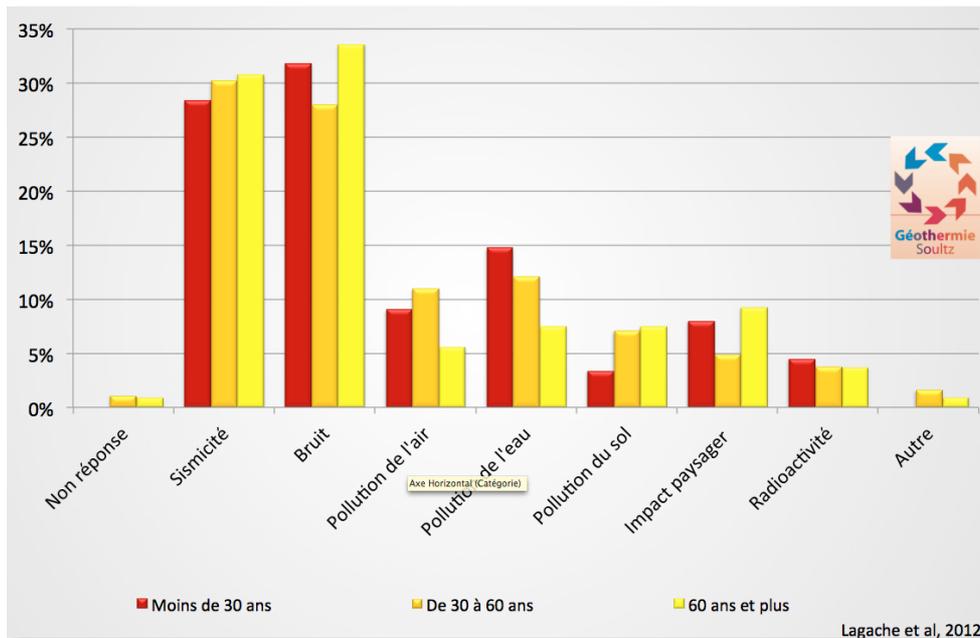
- ⇒ Là ils sont observés grâce à des capteurs en profondeur, donc ils donnent un niveau de sensibilité extrême, et qui montrent les dizaines de milliers de micro événements qui sont produits par ces stimulations.
- C'est des tous petits événements, la plupart d'entre eux, même la quasi-totalité d'entre eux ne sont absolument pas ressentis par les populations mais quand même quelques-uns peuvent dépasser typiquement une magnitude de 2, qui est le seuil d'être ressenti.
- ⇒ Ça a été le cas dans toutes les stimulations.
- L'autre chiffre qu'il faut avoir en tête, c'est peut-être magnitude 3 - 3,5 qui serait le début de dégâts sur les infrastructures.
- ⇒ Donc on est dans le domaine de la frayeur mais pas vraiment des dégâts.
- Alors, cette sismicité induite, il faut aussi la replacer par rapport à la sismicité naturelle et dans le cas de la situation alsacienne, elle est importante.
- Cette sismicité naturelle peut être plus forte que la sismicité induite.
- ⇒ Vous avez ici en rouge la représentation de tous les tremblements de terre qui ont eu lieu entre 1980 et 2015 et on voit leur répartition sur l'ensemble du territoire et plus particulièrement sur fossé rhénan qui a une activité tectonique non négligeable.



- ⇒ Et sur le haut, au centre de l'image, il y a une représentation de la distribution de cette sismicité en termes de magnitude et on voit qu'effectivement, les petits événements sont les plus fréquents (au voisinage de magnitude 2), en tout cas c'est le maximum qu'on enregistre.
- ⇒ Ils sont très importants mais il existe aussi des magnitudes jusqu'à 5 qui sont naturellement produites et on voit le fait que les éléments naturels sont sensiblement plus forts que les événements induits
- ⇒ A Bâle, le plus gros, c'était de l'ordre de 3.
- Et cette sismicité elle est historique, elle n'est pas seulement depuis les années 80, elle existe depuis longtemps.
- ⇒ Là vous avez une représentation à l'échelle de 1000 ans, sur la droite, qui montre que cette sismicité est ancienne et à l'échelle historique, il peut y avoir même des événements plus gros jusqu'à magnitude 6 qui a été le grand événement à Bâle au Moyen-Âge.
- Le deuxième grand sujet d'inquiétude, c'est la radioactivité qui est en fait une inquiétude qui vient de la rigueur scientifique qui a été utilisée, qui a été suivie à Soultz où on a mesuré la possible concentration de la radioactivité sur le site, liée au lessivage des granites profonds, qui entraîne, au niveau de la précipitation dans les infrastructures de surface, des dépôts qui peuvent concentrer cette radioactivité.
- Alors, elle existe, elle est suivie par les autorités de sûreté nucléaire, et si on la mesure, elle est de l'ordre, si on veut citer un chiffre, de l'ordre de quelques dizaines de micro sieverts par heure et il faut aussi relativiser, c'est mesurable, ça a besoin d'être suivi, mais ça reste très faible par rapport à la dose maximale en France qui est de l'ordre de 1000 sieverts.

- ⇒ Donc plusieurs ordres de magnitude supérieurs.
- Et ça reste petit par rapport à typiquement un ordre de grandeur aussi, c'est la quantité de radioactivité que l'on reçoit lors d'un scanner, typiquement du thorax, où là on peut être soumis à des doses sensiblement supérieures.
- Donc c'est inexistant, c'est un sujet qu'il faut suivre mais qui n'est pas vraiment un sujet d'inquiétude.
- Le troisième grand thème dans ces problématiques de risques, c'est la question de la pollution possible des aquifères supérieurs.
- On exploite un aquifère profond qui est très salé, qui contient potentiellement des substances qui pourraient polluer les aquifères supérieurs, en particulier la grande nappe d'Alsace, dans le cas alsacien, qui est utilisée pour l'eau potable.
- ⇒ Donc c'est très important de ne pas mettre ces fluides en contact.
- Et je crois que là, les inquiétudes, elles ne sont pas forcément justifiées.
- ⇒ Il y a un énorme savoir-faire en Alsace.
- ⇒ Du fait de l'expérience pétrolière, il y a plus de 5000 puits qui ont déjà été creusés en Alsace depuis plus de 100 ans. A titre d'anecdote, il y avait déjà plus de 2800 puits créés en 1916.
- ⇒ Donc on voit qu'on a une très grande expérience de ça et il n'y a pas aujourd'hui de cas de pollution sensible à partir de ces puits.
- Donc le cas de la problématique de la pollution liée au vieillissement des puits est importante mais il y a un savoir-faire et on sait déployer des puits (ce qu'on voit sur la droite de l'image), une représentation du puits, on voit qu'il y a un certain nombre de puits emboîtés qui font - comme pour les pétroliers multicoques -, un système de protection d'au moins trois enveloppes pour les parties supérieures et qui protègent donc très fortement le contact potentiel entre le fluide géothermal profond et les aquifères de surface.

Alors, ces risques évidemment ils existent, ils sont ressentis, ils sont vécus. Il y a une expérience intéressante à Soultz-Sous-Forêts, c'est qu'il y a eu une vraie enquête sociologique qui a été faite : on a demandé à la population comment était perçus soit la radioactivité, soit l'impact potentiel de la sismicité, les questions de pollution, les questions d'impact paysager aussi et les questions de bruit.



- ⇒ Et ici, on rappelle juste le résultat de cette enquête où on voit que finalement, c'est le bruit de l'infrastructure qui est retenu comme la première nuisance, un petit peu devant la sismicité.
- ⇒ Bon cette enquête a été faite près de 10 ans après le dernier événement ressenti donc ça reste persistant dans la population mais ce n'est pas le sujet principal. Et les autres sujets sont quand même des sujets de préoccupation pratiquement négligeables.
- Donc, les risques existent, ça a été étudié, ils sont perçus, je pense que c'est quantifié aujourd'hui, mais on a aussi des nouveaux moyens d'observation et dans le cadre d'un programme de recherche à Strasbourg, on travaille beaucoup là-dessus.
- ⇒ On a un exemple très illustratif, c'est le suivi des problèmes qui ont eu lieu sur l'infrastructure de Landau, en Allemagne, qui est aussi un site géothermique bien connu.
- Et grâce à un suivi géodésique, c'est-à-dire par une mesure à partir des satellites qui prennent des images régulières, en particulier radars, on est capables de mesurer la déformation du sol très finement et sur l'image principale que vous voyez, on voit la déformation du sol liée à l'incident qu'il y a eu à Landau et on a pu voir la déformation, suivre en temps réel la déformation entre 2013 et 2014, liée à la fuite de fluide géothermique qu'il y a eu.
- ⇒ Et grâce à ce suivi d'un nouveau type, ce suivi géodésique, on peut apporter des informations sur l'historique de l'incident qui a eu lieu sur cette centrale.
- Donc ça c'est des nouvelles technologies, il y en a d'autres et ça permettra, je pense, d'avoir plus de transparence dans l'utilisation de ces sites vis-à-vis du public et, on l'espère, améliorer l'acceptabilité.

Comment aller vers la maturité de la géothermie haute température non conventionnelle ?

Jean SCHMITTBUHL

Directeur de recherche – CNRS

Comment aller vers la maturité de la géothermie profonde ou géothermie haute température non conventionnelle ?

➤ Alors, c'est du domaine un peu de la prospective ici de savoir comment faire avancer les choses et je pense que les trois grands enjeux à relever sont :

- premièrement des enjeux sur le risque géologique.

⇒ Comment lever le risque géologique.

- D'autre part, comment lever les risques hydrauliques liés à la circulation ;
- Et enfin, je dirais, des risques liés au temps.

⇒ C'est-à-dire l'évolution dans le temps du réservoir et des installations, la question du vieillissement.

➤ Pour tout ça, c'est vraisemblablement des actions de recherche qui vont permettre d'avancer et si on revient sur chacun de ces points et donner quelques pistes, on peut dire la chose suivante :

- Sur le risque géologique, l'enjeu c'est d'aller trouver les meilleures méthodes pour, non seulement identifier les failles qui sont les zones de circulation et les zones préexistantes, qu'on n'ait pas besoin de les créer, mais c'est aussi de trouver les failles perméables et ça, en géophysique, ce n'est pas quelque chose de très facile donc c'est une première piste.

➤ La deuxième chose, c'est la question de l'optimisation de la profondeur des forages. Il y a un point qui n'est pas toujours bien identifié, c'est comment ces forages se positionnent par rapport à la zone sismogénique, c'est-à-dire la zone à partir de laquelle on peut former naturellement des tremblements de terre.

⇒ Donc faire un forage au-dessus ou en dessous de cette zone, c'est un enjeu. Il y a une profondeur, un ordre de grandeur de cette profondeur caractéristique, c'est de l'ordre de 3 km.

- ⇒ Typiquement au-dessus de 3 km c'est difficile de faire des séismes naturellement et par contre, en dessous, c'est assez typique.
- Donc, faire de la sismicité induite, enfin être dans les conditions de mise en pression au-dessus de cette limite ou en-dessous, ça change la nature du risque associé.
- Et le troisième grand domaine qui est un domaine en pleine effervescence scientifique, c'est le domaine de la déformation non sismique ou asismique du réservoir.
- C'est quelque chose qu'on est seulement en train de commencer à imager mais c'est quelque chose qui risque de contrôler le réservoir.
- ⇒ Typiquement, au-dessus des 3 km, on va vraisemblablement être dominés par ces questions de déformation asismiques, en dessous elles seront peut-être moins importantes et on aura peut-être plus de déformations du réservoir liées à de la sismicité.
- Le deuxième grand domaine envisagé pour le développement vers une maturité de cette technologie, c'est lié à des questions hydrauliques.
- C'est être capable de prévoir l'injectivité ou la productivité d'un puits, c'est-à-dire la capacité à injecter du fluide dans le puits ou les capacités à extraire du fluide dans le puits et sous quelles conditions de pression.
- ⇒ Et pour ça, évidemment, c'est comment optimiser la stimulation, donc c'est comment optimiser la connexion du puits avec les structures existantes qui sont capables de réaliser cette circulation, donc les failles principales.
- ⇒ Est-ce qu'il faut panacher entre une simulation hydraulique ou plutôt chimique ou plutôt thermique et comment faire ce panachage entre ces différentes technologies reste une question qui est encore assez ouverte.
- Et enfin, c'est la question d'aller vers l'optimisation commerciale du réservoir, en d'autres mots, dit de façon un peu moins abrupte, c'est comment permettre une circulation suffisamment importante pour assurer une production d'électricité sensible mais rester en dessous de seuils qui permettent de se mettre à distance, par exemple, d'une sismicité induite importante.
- Alors, pour illustrer ça, je reviendrai sur un des enseignements de l'expérience pilote de Soultz-Sous-Forêts de ces dernières années où on a pu mesurer cette injectivité ou cette productivité.
- ⇒ Vous avez une figure ici qui représente la valeur de l'injectivité ou la productivité, et on voit que déjà elle est différente, la capacité d'un puits à recevoir du fluide (en bleu ici), capable d'injecter du fluide, c'est sur le puits qui serait schématisé en bleu sur la figure de droite où la capacité à produire, c'est-à-dire à extraire du fluide à partir du puits (donc sur

le schéma de droite, ce serait le puits en rouge), on voit que c'est différent et on quantifie ça par une unité qui peut paraître un peu compliquée qui sont des litres par seconde par bar.

- ⇒ Typiquement, c'est la pression qu'il faut injecter, donc les bars qu'il faut introduire au niveau de la pompe qui est associée à ce puits pour avoir un certain débit.
- ⇒ Donc, là, on a 1 l/s/bar, c'est-à-dire que pour avoir 1 l/s de débit, il faut typiquement introduire un bar de différence de pression.
- Donc c'est plus facile d'extraire, de produire le fluide, c'est deux fois plus facile puisqu'en termes d'injectivité, la pression qu'il faut fournir pour réussir à avoir un certain débit, typiquement, quand on injecte avec un bar, on va seulement pouvoir introduire un débit de 0,5 l/s.
- Donc on voit qu'il y a des différences et qu'avec ces chiffres-là, il y a beaucoup d'hypothèses derrière mais ça permet de faire un peu des prédictions de ce qui peut se passer.
- ⇒ Dans la situation de Soultz qui est décrite en vert ici, avec une exploitation à 25 000 l/s, il faut typiquement pomper avec 20 bars de pression et réinjecter avec 50 bars de pression.
- Si on voulait se mettre en condition commerciale ou en tout cas ce qui est visé dans un certain nombre de projets qui serait de chercher à avoir 100 l/s, si on essaie d'appliquer ces chiffres, on voit qu'il faudrait avoir un pompage très sensiblement supérieur et surtout une réinjection à des pressions très élevée, peut-être de l'ordre de 200 bars, ce qui pose de réelles questions sur la sismicité induite qui va être générée.
- ⇒ On est dans des conditions quasiment de stimulation.
- ⇒ Donc comment trouver le bon compromis dans ces opérations-là reste un sujet assez ouvert.
- Alors, pour finir, la question du vieillissement, donc du temps : tenir 20 ans, au moins avec ce système-là qui est soumis à de multiples variations, c'est la question du retour sur investissement.
- Pour obtenir le retour sur les investissements liés au forage en particulier et ça c'est d'une part au niveau des installations de surface comment améliorer la fiabilité des pompes.
- ⇒ La ressource est continue mais son utilisation par les pompes est beaucoup plus fluctuante parce qu'on ne sait pas toujours faire des pompes qui ont la fiabilité nécessaire.
- ⇒ Quand elles durent plus d'un an, elles sont déjà considérées comme extrêmement fiables.

- ⇒ Il y a la question de la corrosion, pour éviter les fuites au niveau du puits à l'échelle de 20 ans, c'est maîtrisé mais il faut quand même optimiser ça.
- Au niveau sous-sol, au niveau du réservoir, et bien le réservoir à l'échelle de 20 ans il peut tout de même se transformer, c'est la question des interactions fluide - roche, il y a la question des colmatages de ce système-là.
- ⇒ Donc bien connaître ces conditions de colmatages, et surtout imaginer la chimie pour aller détartrer ce système là et éviter les court-circuits hydrauliques qui peuvent se développer dans les puits.
- Et enfin, maîtriser sa déformation au cours du temps.
- ⇒ On l'imagine souvent très statique ce réservoir mais on voit de plus en plus qu'il se déforme lentement et contrôler ça, ça reste un enjeu important.