

EXPLOITER LA CHALEUR EN TOUTE SÉCURITÉ

Les températures élevées régnant dans les grandes profondeurs de la terre présentent un grand potentiel pour la fourniture d'électricité et de chaleur. Après quelques revers, l'espoir renaît aujourd'hui de pouvoir exploiter le potentiel de la géothermie profonde pour un approvisionnement énergétique durable. En effet, de nouveaux outils de surveillance et de prévision permettent aujourd'hui une meilleure évaluation et un contrôle plus fiable du risque sismique. C'est ce que montre le projet de recherche international auquel l'ETH de Zurich et la société Geo-Energie Suisse SA ont également participé.



Tour de forage du projet géothermique de Haute-Sorne. Photo: Geo-Energie Suisse SA

Depuis le début de l'été 2024, le forage est en cours à Haute-Sorne, dans le Jura. Celui-ci doit atteindre une profondeur de 4000 mètres dans la roche cristalline, où règne une température s'élevant de 160 à 180°C. Après des études géologiques approfondies, les premiers essais devraient commencer au premier trimestre 2025. Ils montreront s'il est possible de faire remonter la chaleur à la surface de la terre pour pouvoir la convertir en électricité dans des centrales géothermiques au moyen d'une turbine à vapeur. Le projet de forage de Haute-Sorne fournira des bases de décision afin de déterminer si la production d'énergie à partir de couches géologiques profondes a de l'avenir en Suisse, et si elle peut contribuer à un approvisionnement énergétique national sans recours aux énergies fossiles.

À 4000 mètres de profondeur, le sol se compose de granit solide, traversé par endroits de fissures rocheuses (failles). L'utilisation de la chaleur de la roche implique une stimulation hydraulique qui consiste à injecter de l'eau à haute pression dans la roche. Il en résulte des microséismes très limités dans l'espace, idéalement imperceptibles en surface, lesquels ont pour but d'élargir les fissures. Cela crée lesdits « réservoirs » ; il s'agit d'échangeurs de chaleur dans lesquels l'eau peut circuler. Si de l'eau froide est injectée dans les réservoirs, elle absorbe la chaleur de la roche. L'eau chauffée est acheminée à la surface par un deuxième forage, dans lequel la vapeur peut être transformée en électricité ou utilisée comme chaleur.

Simulation délicate sur la roche

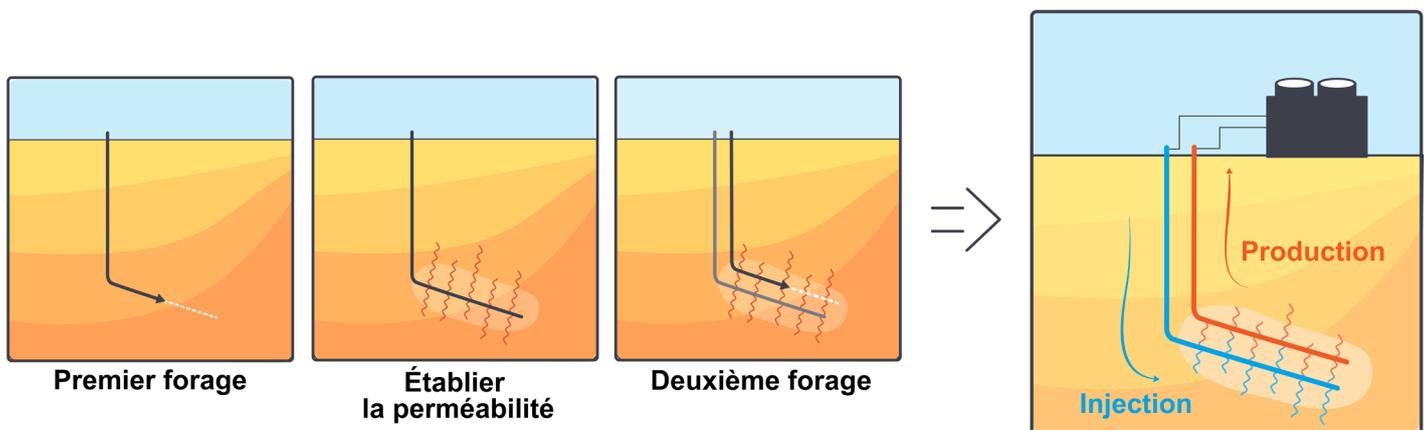
L'exploitation de la chaleur géothermique à partir de réservoirs stimulés à grande profondeur était déjà l'idée de base du forage géothermique réalisé fin 2006 à Bâle. Cependant,

DEEP

Des scientifiques de sept pays (CH, D, F, Irlande, ITA, NL, USA) ont participé au consortium de recherche DEEP (« Innovation for De-Risking Enhanced Geothermal Energy Projects »). La coopération internationale a été rendue possible grâce au financement du deuxième GEOTHERMICA Joint Call (2019). En Suisse, Geo-Energie Suisse SA, l'Université de Genève et l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH) ont participé au projet. Cette dernière a coordonné le projet de recherche international. La partie suisse du projet de trois ans a été financé par l'OFEN.

plusieurs tremblements de terre perceptibles dans la région de Bâle se sont produits au cours du forage. Pour des raisons de sécurité, le projet de géothermie a été interrompu. Ce revers a été l'occasion de développer un nouveau concept de stimulation délicate : la roche est stimulée avec de l'eau, mais seules certaines sections de quelques mètres de long du trou de forage sont mises sous pression (« zones »). Pour cela, le trou de forage doit être divisé par des manchons en caoutchouc (« packer ») au préalable.

Cette technique de stimulation, dite multi-étapes, a depuis lors fait ses preuves en laboratoire et dans le cadre de projets pilotes. Des études menées par la société Geo-Energie Suisse SA et l'ETH dans le laboratoire souterrain de Bedretto (BedrettoLab) ont confirmé que cette méthode réduisait le risque de séismes importants. La raison : un réservoir peut être stimulé dans chaque zone, les injections d'eau sont réalisées



Représentation schématique de la géothermie de profondeur : au cours d'un premier forage, la roche est stimulée par l'injection d'eau, ce qui la rend perméable. Un deuxième forage est ensuite réalisé en parallèle : il en résulte un circuit dans lequel l'eau froide est chauffée en vue de pouvoir l'utiliser pour la production d'énergie. Schéma : Utah FORGE

DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME D'ALERTE

Au cours des dernières années, des chercheurs de l'ETH de Zurich ont développé un système d'alerte et l'ont amené à maturité d'application dans le cadre du projet DEEP, afin de minimiser le risque de séisme lors de la stimulation de la roche dans le cadre de l'utilisation de la géothermie. Les scientifiques qualifient le système d'alerte de « Adaptive Traffic Light System » (ATLS), c'est-à-dire un système de feux de signalisation qui s'adapte en permanence aux conditions actuelles de stimulation. Il aide les responsables à gérer la stimulation de la roche de manière à éviter les séismes dangereux.

Des mesures continues, notamment des microséismes localisés qui accompagnent les stimulations dans la roche, constituent le point de départ du système d'alerte. Sur une heure, plusieurs dizaines de milliers de microséismes se produisent. Ceux-ci doivent alors être évalués de manière entièrement automatisée et avec le moins d'erreurs possible. Pour mesurer les mouvements de la roche, on utilise, entre autres, des géophones à haute température. Une méthode plus récente consiste à poser des câbles à fibres optiques dans le forage. La lumière laser à haute fréquence permet de déterminer les moindres mouvements de la roche (de l'ordre du millionième de millimètre) avec une haute résolution spatiale (« Distributed acoustic sensing »/DAS). Le projet a permis de démontrer que les mesures par fibre optique sont robustes et résistantes à la température, et qu'elles offrent ainsi un grand potentiel d'utilisation dans le contexte de la géothermie profonde.

Les données de mesure sont analysées en temps réel et interprétées en les intégrant dans des modèles appropriés. Pour l'évaluation de grandes quantités de données, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique a fait ses preuves. Des prévisions sur le comportement de la roche sur le site de forage sont calculées sur cette base, ce qui permet de déterminer le risque sismique pour les minutes, les heures et les jours à venir.

Si, sur la base de ces prévisions, une stimulation est jugée dangereuse, celle-ci peut être adaptée, par exemple, en injectant moins d'eau à une pression plus faible ou en renonçant complètement à la stimulation d'une section de forage.

de manière échelonnée dans l'espace et le temps. La méthode permet ainsi de stimuler des microséismes dans chaque section de la roche avec précisément la force nécessaire pour créer un réservoir. Cela réduit nettement la probabilité d'un séisme de plus grande ampleur.

Alerte en temps réel

Un projet de recherche international de trois ans sur la réduction des risques des projets de géothermie profonde (avec l'acronyme DEEP), dirigé par l'ETH, cherche désormais à optimiser la gestion des risques des stimulations multi-étapes.

Système de feu de signalisation adaptatif (ATLS)

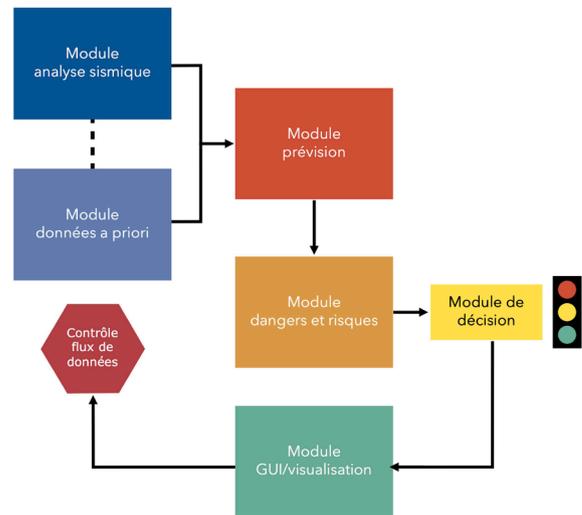


Illustration: ETHZ

Pour y parvenir, les microséismes sont enregistrés en temps réel au cours de la stimulation de la roche à l'aide de différentes techniques de mesure. Les données sont alors intégrées dans des modèles qui permettent de prédire l'activité sismique dans la roche due aux stimulations dans les minutes, les heures et les jours à venir. « Nous disposons aujourd'hui d'un système de prévision qui a prouvé son aptitude pour une utilisation en laboratoire, mais aussi dans des conditions réelles », explique Stefan Wiemer, professeur de sismologie et directeur du Service Sismologique Suisse à l'ETH de Zurich. Les scientifiques comparent ce système de prévision à un feu

de signalisation permettant de savoir s'il est possible de poursuivre la stimulation (voir encadré p. 3). Wiemer : « Si ce système avait été disponible dès 2006 à Bâle, on aurait détecté très tôt que des séismes dommageables étaient probables et on aurait interrompu les stimulations un ou deux jours avant que ces séismes perceptibles ne se produisent. Cependant, nous n'aurions pas été en mesure de créer un échangeur de chaleur profond ».

Le système de prévision a d'abord été testé sur des données de projets géothermiques existants, puis en temps réel dans BedrettoLab. Le projet DEEP constitue ainsi un cadre adapté pour la réalisation d'essais dans des conditions proches de la réalité. Ces tests ont été réalisés dans l'État américain de l'Utah. Un total de 15 stimulations y ont été effectuées sur le site de forage Utah FORGE entre 2022 et le printemps 2024. Utah FORGE est une station d'essai internationale financée principalement par le ministère américain de l'énergie.

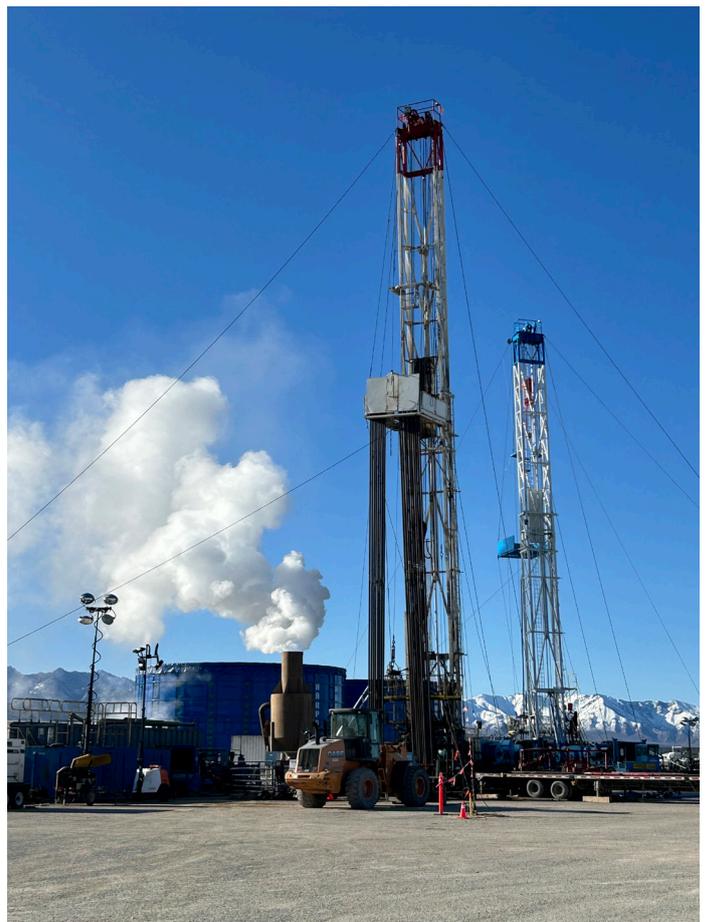
Des experts de Geo-Energie Suisse SA, une organisation de services municipaux et de fournisseurs d'énergie régionaux qui travaille à l'exploitation de la géothermie profonde en Suisse, étaient également impliqués. Pendant les stimulations, les scientifiques ont mesuré les données des microséismes et les ont traitées pour le système de prévision. « Nous avons pu montrer que les prévisions en temps réel concernant d'éventuels séismes sont fiables, et nos collaborateurs ont en outre pu s'entraîner à l'utilisation du système de prévision dans des conditions réelles », explique Peter Meier, CEO de Geo-Energie Suisse, en résumant les principaux résultats de DEEP. Les expériences auraient également montré clairement que les dispositifs de mesure devaient encore être améliorés pour une utilisation prolongée dans le forage.

Guide des bonnes pratiques

Le système de prévision en temps réel sera utilisé pour la première fois en Suisse lors des premières stimulations de la roche à Haute-Sorne en 2025. Stefan Wiemer, de l'ETH, est convaincu que les connaissances acquises dans le cadre du projet DEEP apporteront une importante contribution à la réduction du risque sismique lié à l'exploitation de la géothermie profonde. « Nous avons bien progressé dans nos efforts pour établir une sécurité sismologique dans le cadre des stimulations », déclare Wiemer. Pour que la géothermie profonde ait une chance de se développer à Haute-Sorne et ailleurs, d'autres conditions doivent être remplies. Pour ce faire, non seulement les détails techniques et la rentabilité doivent être



Le site d'essai géothermique Utah FORGE se situe dans une région peu peuplée de l'État américain de l'Utah. Photo : Utah FORGE



Sur le site de forage Utah-FORGE, 15 stimulations au total ont été réalisées entre 2022 et 2024 et le système de prévision ATLS en temps réel a été testé dans des conditions réelles. Photo : ETH

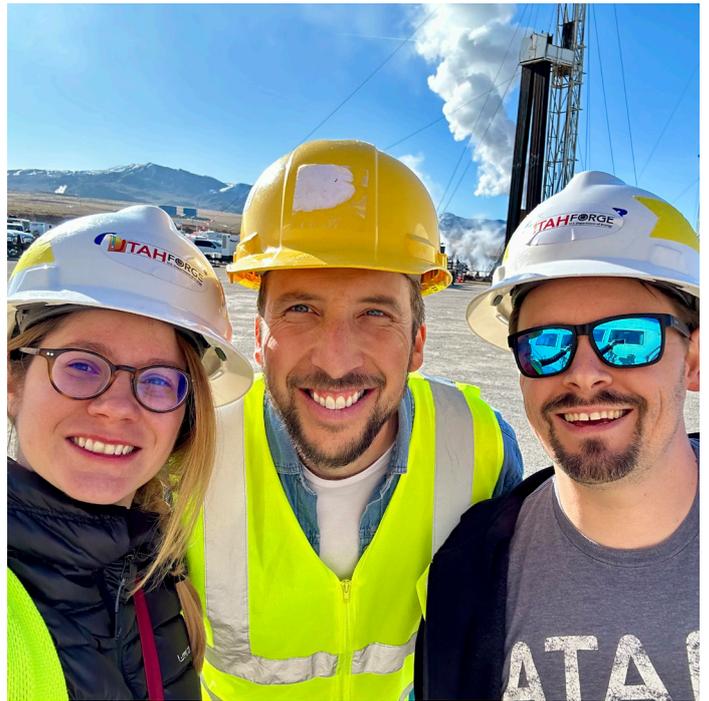
LES ÉTATS-UNIS OUVRENT LA VOIE

L'énergie géothermique peut être utilisée à différentes profondeurs et avec différentes techniques. On parle de « Enhanced Geothermal Systems » (EGS) en cas de forage à une profondeur de 2 à 7 km dans une roche sèche et chaude, laquelle est ensuite fissurée par stimulation pour permettre le transport de la chaleur géothermique jusqu'à la surface de la terre au moyen d'eau ou de vapeur à une température de 100 à 300 degrés. L'approche EGS a été testée pour la première fois en Californie à la fin des années 1970, puis en Grande-Bretagne, en Suisse (Bâle) et en Corée du Sud.

Fin 2023, l'entreprise américaine Fervo Energy a mis en service dans l'État du Nevada une centrale pilote EGS qui produit de l'électricité avec une vapeur à 190 degrés. La puissance de 3,5 MW correspond à celle d'une éolienne de taille moyenne. D'ici 2026, Fervo Energy veut construire, dans l'État de l'Utah, une centrale EGS d'une puissance de 400 MW, ce qui correspondrait à peu près à la puissance de l'ancienne centrale nucléaire de Mühleberg.

clarifiés, mais aussi les questions d'acceptation sociale et les aspects juridiques.

Dans le cadre du projet DEEP, les chercheurs de l'ETH ont élaboré, avec un soutien international, un guide de bonnes pratiques qui offre aux constructeurs de centrales géothermiques des aides visant à limiter le risque sismique. Les résultats du projet sont utilisables dans le monde entier via des publications en accès libre et des logiciels destinés aux projets géothermiques. Dans le cadre d'un projet consécutif DEEP, une illustration numérique (« digital twin ») du sous-sol suisse doit être créée dans le but d'augmenter encore la fiabilité des outils de prévision des séismes et de développement des réservoirs.



La scientifique de l'ETH Federica Lanza (ici avec deux collègues) a mené des recherches dans le cadre du projet DEEP sur le site Utah FORGE. Photo : ETH

- De plus amples informations sur le projet **DEEP** sont disponibles sur www.deepgeothermal.org et www.geothermica.eu/projects/call-2/deep/. Plus d'informations sur **Utah FORGE** www.utahforge.com.
- Stefano Benato (stefano.benato@bfe.admin.ch), directeur externe du programme de recherche sur la géoénergie de l'OFEN, communique des **informations** sur ce projet.
- Vous trouverez plus d'**articles spécialisés** concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine de la géoénergie sur www.bfe.admin.ch/ec-geothermie-fr.