



Geyser de Strokkur en Islande

La Terre : une source d'énergie considérable

L'utilisation de la chaleur géothermale est documentée depuis des millénaires. De nos jours, la chaleur géothermale est essentiellement utilisée pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments, soit directement par les réseaux de chaleur, soit indirectement via des pompes à chaleur (PAC) pour les ressources à très basse température (inférieure à 30° C). Elle peut également être utilisée pour certains processus industriels. Il existe différents types de géothermie (très basse, basse, moyenne et haute énergie), classifiés en fonction du type de production (chaleur, électricité, cogénération). Ce dernier type fait l'objet de ce numéro d'*Une technologie dévoilée* et est généralement qualifié de géothermie profonde. Seules les ressources de très haute température sont utilisées pour la production d'électricité. Les utilisations commerciales concernent des sites où les conditions géologiques permettent d'accéder à des températures comprises entre 180° C et 350° C. La géothermie présente l'avantage d'être une énergie non intermittente (fonctionnement en base ou semi-base), et pour la géothermie à très basse température, d'être disponible (presque) partout.

La géothermie profonde

LA GEOTHERMIE UTILISE LA CHALEUR DU SOUS-SOL POUR PRODUIRE DE L'ÉNERGIE.

La capacité électrique installée dans le monde est actuellement de plus de 11 GWe, provenant principalement de quelques zones géographiques (Etats-Unis, Indonésie, Philippines, Mexique, Italie, Nouvelle-Zélande, Islande). Cette dispersion découle de celle des ressources, elles-mêmes intimement liées au contexte géologique. L'électricité produite d'origine géothermale représente à ce jour un faible pourcentage des besoins électriques mondiaux (moins de 0,5%), mais l'émergence de nouvelles technologies devrait permettre une augmentation significative de sa contribution au mix énergétique. En France, la géothermie représente une infime partie de la production d'électricité, malgré un potentiel technique important estimé entre 6000 et 9000 MW. A ce jour, les perspectives de production d'électricité française d'origine géothermale se concentrent principalement sur deux zones cibles : le fossé rhénan et les Antilles.



Centrale expérimentale de Soultz-sous-Forêts

Des projets en Alsace

La filière de la géothermie profonde du groupe EDF est portée par ÉS Géothermie, filiale du groupe Electricité de Strasbourg (ÉS), engagé depuis plus de vingt ans dans le développement et l'exploitation de centrales géothermiques dans le fossé rhénan. ÉS Géothermie doit maîtriser l'ensemble du savoir-faire nécessaire à l'exploitation du potentiel des fossés d'effondrement.

Dr Elodie JEANDEL, chef de projet à l'Institut EIFER (European Institute for Energy Research).

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA GEOTHERMIE

L'électricité des profondeurs

LA GEOTHERMIE RECHERCHE L'EAU CHAUDE EN PROFONDEUR, PUIS CONVERTIT CETTE CHALEUR EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

La géothermie est une énergie renouvelable exploitant la machine thermique qu'est notre planète. Des manifestations de surface libérant une énergie considérable (éruptions volcaniques, séismes, geysers, etc.) témoignent de son activité. L'énergie interne totale de la Terre est gigantesque (2.10^{18} térajoules), ce qui correspond à la consommation énergétique primaire mondiale pendant trois milliards d'années. En témoigne la perte de chaleur globale estimée à 46 TW par des mesures de flux de chaleur à la surface. Le bilan énergétique comprend le flux de chaleur interne (dans le manteau et le noyau de la Terre) au sein du globe terrestre, son refroidissement, et la production de chaleur par la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans le manteau terrestre et la croûte continentale. La dissipation de l'énergie thermique se fait principalement par des mouvements de convection dans le manteau liquide et par conduction dans la lithosphère. La tectonique des plaques est la manifestation externe de ces transferts de chaleur qui gouvernent ainsi la structure géologique de la Terre. Le flux de chaleur est maximal aux frontières de plaques divergentes (dorsales océaniques et rifts continentaux). D'autres types de frontières, où les plaques lithosphériques plongent dans le manteau (subduction), s'accompagnent d'un volcanisme intense et de flux de chaleur importants. La distribution des ressources géothermales dans le monde est ainsi étroitement liée à la carte du flux de chaleur. Elle explique la grande disparité géographique des pays à fort potentiel qu'ils soient ou non producteurs. L'évolution de la température avec la profondeur (gradient géothermique) dépend du mode de transfert de chaleur du sous-sol (régime conductif ou convectif). Le gra-

dient géothermique moyen est de $3,3^{\circ}\text{C}$ tous les 100 m et varie en fonction des conditions géologiques (20°C tous les 100 m à la Réunion, 10°C tous les 100 m en Alsace, 2°C tous les 100 m au pied des Pyrénées). L'exploitation des ressources repose sur trois paramètres : la température, le flux et la présence d'un fluide caloporteur naturel (eau ou saumure). En milieu volcanique, la présence de sources de chaleur magmatiques conduit à des températures élevées dès les faibles profondeurs permettant d'envisager des centrales de plusieurs dizaines de MW. En milieu non volcanique mais à anomalie thermique (Alsace, sillon rhodanien, Aquitaine), la production électrique ne s'envisage qu'avec des techniques innovantes de stimulation hydraulique.



Centrale de Rittershoffen

L'enjeu est d'accroître la perméabilité naturelle de ces milieux en augmentant la circulation dans les fractures existantes et la connexion du puits au réservoir géothermal naturel.

REPÈRES

Premiers usages

- - 20 000 ans utilisations pour le thermalisme, le chauffage, l'alimentation attestées dans les civilisations anciennes.

XIV^{ème} siècle

- Réseau de chaleur de Chaudes Aigues (82°C).
- Exploitation des bassins d'eau chaude saumâtre à Volterra (Italie) pour l'extraction du soufre, du vitriol, de l'alun.

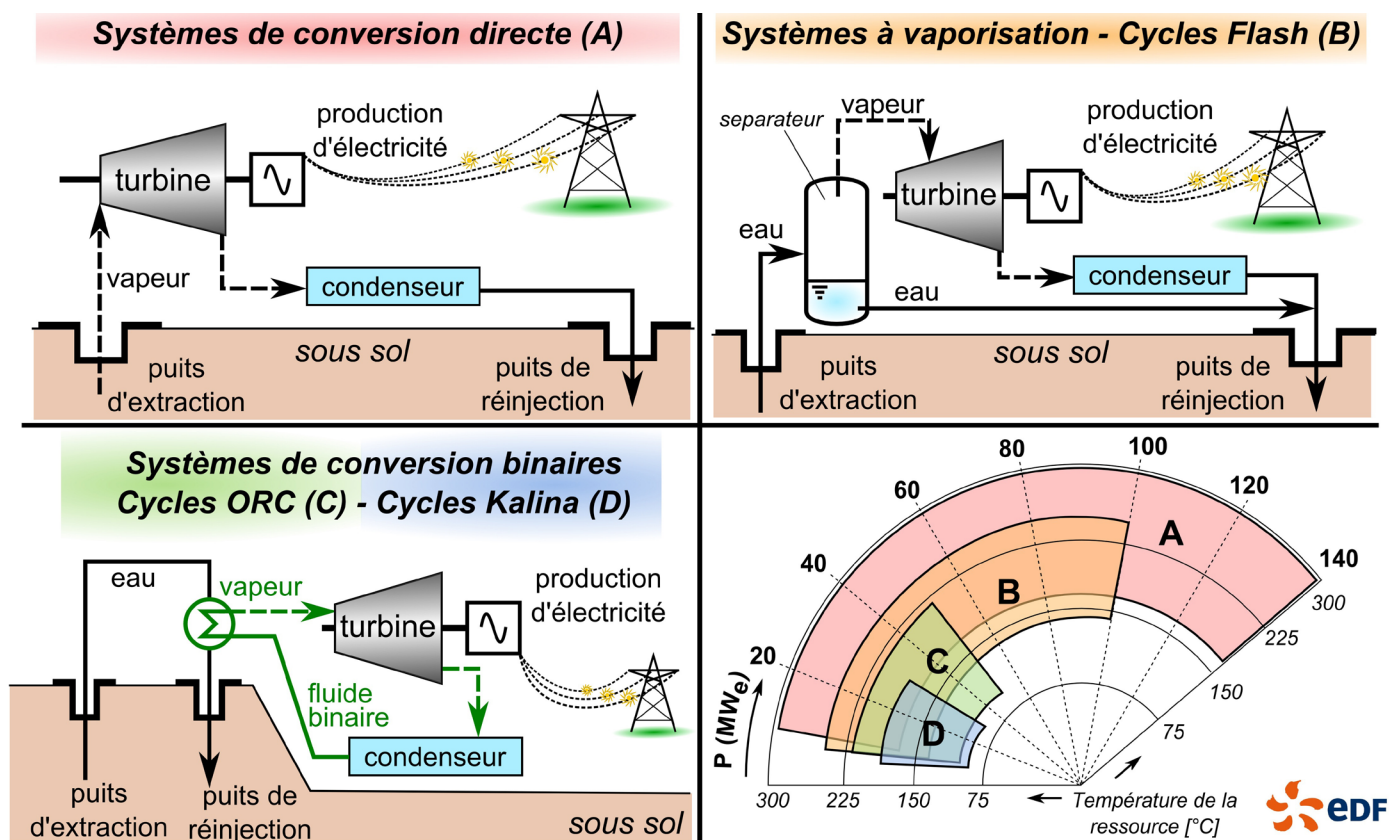
Premières exploitations industrielles au XIX^{ème} siècle

- Mise au point de la technique du lagoni couvert (captage de la vapeur pour l'extraire à une pression suffisante pour alimenter les chaudières d'évaporation et pomper les eaux boriques) par F. Lardarel à Volterra.
- Premier usage industriel de la géothermie en Islande : extraction du sel.
- Premier forage en France pour capter l'eau douce des sables albiens.

Les développements du XX^{ème} siècle à aujourd'hui

- 1904 : Première centrale électrique expérimentale à Larderello (20 kWe).
- 1930 : Premier réseau moderne de chauffage urbain (Reykjavik).
- 1960 : 400 MWe de capacité installée mondiale.
- 2000 : 8 GWe.
- 2013 : 11,4 GWe.

Les systèmes de conversion utilisés en fonction de la température de la ressource



LE SAVIEZ-VOUS ?

Les centrales électriques géothermiques possèdent des rendements de production plus faibles que ceux des centrales fossiles ou nucléaires en raison de températures de vapeurs plus faibles. On peut améliorer ces rendements et augmenter la température de la ressource (eau ou vapeur) en creusant plus profond et en se rapprochant au maximum des chambres magmatiques où les températures peuvent atteindre les 600°C pour des pressions supérieures à 220 bars. C'est ce qu'on appelle la géothermie supercritique. Un projet de recherche est actuellement en cours en Islande afin de mieux maîtriser ce concept.

En fonction de la température et de la pression du fluide géothermal, trois techniques permettent de convertir la chaleur en électricité.

Les systèmes de conversion directs peuvent être utilisés si le fluide géothermal est de la vapeur, qui est dans ce cas directement utilisée dans une turbine.

Les systèmes à vaporisation flash permettent l'exploitation d'un fluide géothermal se présentant sous forme de liquide pressurisé ou de mélange liquide-vapeur. Il s'agit du cycle de surface le plus employé.

Les systèmes de conversion binaire sont utilisés lorsque la température ou la composition chimique de la ressource géothermale ne permet pas son utilisation directe. Ils consistent à séparer le circuit en deux, le fluide géothermal et un fluide de travail circulant chacun en boucle fermée. Le transfert de chaleur entre les deux fluides est réalisé via un échangeur. Deux types de fluides de travail sont utilisés : les fluides organiques, (cycles ORC), ou un mélange eau-ammoniac (cycle de Kalina). La composition

chimique du fluide géothermal et son potentiel caractère corrosif imposent des contraintes spécifiques quant aux cycles thermodynamiques mis en œuvre. Pour éviter le rejet de composés naturellement présents dans le sous-sol, dans l'atmosphère ou dans les eaux de surface, le fluide géothermal et les gaz incondensables associés doivent être réinjectés dans le réservoir après utilisation (cycle fermé). Il faut aussi être vigilant sur les nuisances sonores, olfactives et visuelles. Des stratégies d'intégration paysagère et d'optimisation des infrastructures sont mises en place dans certaines centrales géothermiques. La maîtrise de la micro sismicité induite par la stimulation des réservoirs géothermaux dans les systèmes géothermaux améliorés (EGS - *Enhanced Geothermal Systems*) impose une gestion rigoureuse des pressions d'injection ainsi qu'un contrôle sismique de la centrale. Un suivi de la radioactivité des installations et la mise en place de mesures de radioprotection sont nécessaires lorsque les roches cibles du réservoir géothermal sont naturellement radioactives.

Perspectives

Selon les experts, le potentiel de l'énergie géothermale est intéressant mais actuellement sous-exploité. Dans de nombreux pays, la géothermie électrogène est une énergie compétitive car seule énergie renouvelable en base. Une quarantaine de pays sont producteurs et quelques leaders mondiaux (Etats-Unis, Islande, Nouvelle-Zélande) exportent leur savoir-faire à l'international. Le marché est en croissance, principalement dans les pays en développement, et plus modérément, aux Etats-Unis et en Europe. Il pourrait doubler d'ici dix ans. Les projets demeurent risqués : montant des investissements financiers et durée d'amortissement élevés, temps de développement important. L'enjeu est donc la maîtrise des risques, l'objectif étant de réduire les coûts pour produire une électricité compétitive. De nombreux projets restent dépendants de financements publics, en raison des craintes des opérateurs privés quant à leur rentabilité. La revalorisation des tarifs d'achat est un levier important pour contribuer à cette rentabilité. Le potentiel d'une ressource

ne peut être confirmé (ou infirmé) qu'à l'issue de la très coûteuse phase de forage. Un protocole d'exploration standard ne peut être appliqué de manière universelle bien que des recommandations générales puissent être formulées. Peu d'acteurs maîtrisent l'ensemble de la chaîne de valeur (exploration, forage, gestion du réservoir, ingénierie, exploitation, maintenance, gestion environnementale). En France, la géothermie électrogène est à ce jour limitée à deux installations : Bouillante (Guadeloupe) et Soultz-sous-Forêts (Alsace) pour une capacité totale installée de 17,2 MWe. Le marché de la géothermie profonde connaît aujourd'hui un regain d'intérêt qui se manifeste par le dépôt et l'attribution de nombreux permis d'exploration. Ce nouveau souffle se traduit par une forte volonté de structurer une offre française spécialisée de biens et de services. Cette dynamique devrait se concrétiser par des opérations dans les fossés d'effondrement et une politique active de prospective et de réalisation menée en outre-mer.

Lexique

Conduction : transfert de chaleur sans mouvement de matière, par vibration de la matière. En régime conductif, l'évolution de la température est quasi-linéaire avec la profondeur.

Convection : transfert par mouvement macroscopique de matière sous l'effet de la poussée d'Archimède, induite par des variations de densité du fluide. En régime convectif, la température est bien homogénéisée et varie peu avec la profondeur.

Fossé d'effondrement : enveloppe terrestre rigide s'étendant de la surface jusqu'à quelques centaines de kilomètres de profondeur. Elle est composée de douze plaques principales dont les bordures présentent des mouvements tectoniques relatifs allant jusqu'à plusieurs centimètres par an.

Perméabilité : propriété physique qui représente la capacité d'un matériau à permettre le passage d'un fluide (milieu poreux ou fracturé).

Stimulation : opération consistant à injecter dans la roche un fluide sous pression à base d'eau pour augmenter la perméabilité du milieu.

Tectonique des plaques : théorie expliquant que les déformations à grande échelle sur Terre sont liées à l'existence de plaques rigides animées de mouvements sur le manteau. Elle définit trois grands types de frontières de plaques : les zones de divergence (dorsales, rifts), de convergence (subduction, collision) et les zones en décrochement (failles transformantes).

> pour en savoir plus

Site de l'ADEME et du BRGM <http://www.geothermie-perspectives.fr/>

Association Française des Professionnels de la Géothermie <http://www.afpg.asso.fr/>

Site de Soultz-sous-Forêts <http://www.geothermie-soultz.fr/>

Association européenne de géothermie <http://www.egec.org/>

Association internationale de géothermie <http://www.geothermal-energy.org/>



N'imprimez que si vous en avez l'utilité.

EDF
22-30 avenue de Wagram 75382 Paris Cedex 08
FRANCE

SA au capital de 930 004 234 euros - 552 081 317 R.C.S. Paris

www.edf.fr

Publication EDF R&D - 1 av Général de Gaulle 92141 Clamart Cedex
Directeur de la publication : **Stéphane ANDRIEUX**
Secrétaire de rédaction : **Florence METGE-LAYMAJOUX**
Le contenu de cette publication n'engage que son auteur et en aucune manière la responsabilité d'EDF.

© 2013 EDF

Toute reproduction interdite sans l'autorisation de l'auteur.
Crédits photos : Wilfrid KRAUEL, EDF / Groupe ES / GEIE,
EDF / Groupe ES / ECOGI.

Le groupe EDF est certifié ISO 14001

Contact :

communication-rd@edf.fr
<http://innovation.edf.com>