n°143 - juin 2011

La géothermie

Aspects généraux

Mots clés associés : innovation, sciences et techniques | climat et énergie | energie | energies renouvelables | science et recherche | sols

Résumé

La géothermie concerne l'étude et l'exploitation du régime thermique du globe. Sa connaissance intègre l'ensemble des données géologiques, géochimiques et géophysiques dans des modèles permettant de développer des applications de l'usage de cette ressource soit pour la production directe de chaleur, soit pour la production d'électricité. La diversité des applications découle de la nature de la demande et des caractéristiques de la ressource. A cet égard, il faut distinguer :

- les zones continentales stables, dans lesquelles le gradient géothermique (augmentation de la température avec la profondeur, de 3 à 5° par 100m en France) permet d'exploiter la chaleur du sous-sol, soit directement, soit par recours à des pompes à chaleur, à des profondeurs variables depuis la sub-surface jusqu'à 2000m ;

- des zones géodynamiques actives, dans lesquelles le flux de chaleur plus élevé permet la production d'électricité à partir de la vapeur extraite par forage à une profondeur intéressante (500 à 2500m).

Le présent article traite des aspects généraux, et notamment des fondements scientifiques, de la géothermie. Deux autres articles aborderont plus en détails les applications thermiques, notamment en France et les applications thermoélectriques, notamment dans les régions géologiquement actives de la planète.

Auteurs

Varet Jacques

Volcanologue, ancien chef du département géothermie du BRGM puis directeur du Service Géologique National et président de l'association des services géologiques européens (Eurogeosurveys), Jaques VARET a également présidé le conseil scientifique de la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, a été le fondateur de l'Institut Français de l'Environnement et a présidé le CESMAT.
Il préside encore aujourd'hui le conseil scientifique du Parc National des Cévennes, conseille la société Electerre et enseigne la géothermie au Kenya.
Jaques Varet est Vice-président de 4D et Gérant de GEO2D (Ressources Géologiques pour le

Développement Durable).

Texte

Introduction

La crise de l'énergie a mis en évidence, dans les années 1970, la nécessité de diversifier l'approvisionnement énergétique. La géothermie est susceptible d'y contribuer dans un grand nombre de pays, de manière plus ou moins significative selon les ressources et la demande. En effet, selon les cas, la géothermie peut faire l'objet de petites installations - de quelques mégawatts - assurant le ravitaillement direct en chaleur, en énergie mécanique ou électrique de communautés autonomes, comme d'installations plus vastes - dépassant la centaine de mégawatts - pour l'alimentation d'un réseau électrique interconnecté.

Depuis les années 1990, les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont entrainé un regain d'intérêt pour les énergies décarbonées. La géothermie est à cet égard intéressante, au même titre que les énergies solaires, éoliennes et hydroélectrique. C'est en outre une énergie renouvelable, la seule à exploiter un flux véritablement terrestre, et à permettre une production stable – en base - indépendante des fluctuations atmosphériques et climatiques.

Depuis 2005, c'est l'augmentation du prix des énergies fossiles – et plus généralement de l'ensemble de l'énergie – qui suscite à nouveau l'intérêt pour le développement de l'énergie géothermique. Il faut dire que – à la différence des autres renouvelables – la géothermie n'est pas portée par des lobbies industriels propres. En effet, les divers composants des installations géothermiques – qu'il s'agisse des forages, des tubages, ou des centrales thermiques et thermoélectriques – sont disponibles sur le marché et constituent plutôt des sous-ensembles de systèmes de productions développés pour d'autres productions (pétrole, gaz, électricité thermique…).

Plus récemment, les risques liés à l'industrie nucléaire, notamment dans les régions géodynamiques actives – celles-là même qui disposent de ressources géothermiques exceptionnelles – amènent à revoir les choix énergétiques antérieurs, avec un regard plus favorable pour ces énergies renouvelables trop longtemps négligées. Le présent article – et les suivants – visent à convaincre de la faisabilité d'un recours bien supérieur à la géothermie dans le bilan énergétique à venir de l'humanité.

Gradients et flux géothermiques

Abstraction faite des variations thermiques superficielles, d'origine climatique, qui affectent, selon leur périodicité, quelques mètres ou quelques dizaines de mètres d'épaisseur, on sait depuis longtemps que la température du sol augmente progressivement avec la profondeur : c'est le gradient géothermique.

Le degré géothermique est la distance verticale à franchir pour que la température s'élève d'un degré Celsius. Il est en moyenne de 30 mètres en France métropolitaine.

Le flux géothermique, quantité d'énergie dégagée par la terre par unité de surface, est fonction du gradient et de la conductibilité thermique des roches traversées. Sa connaissance est encore très imparfaite du fait de la difficulté des mesures, mais surtout à cause des perturbations apportées par la circulation des eaux souterraines, qui transportent la chaleur concurremment avec la conduction

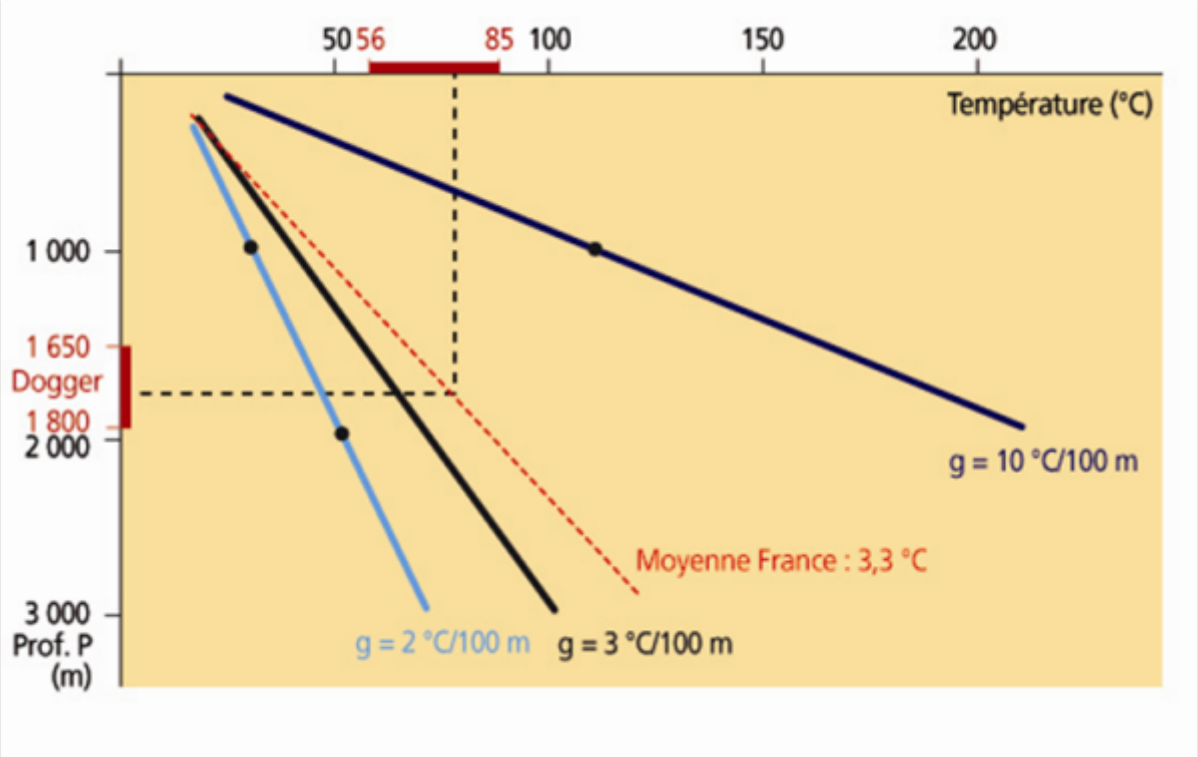
dans le solide, modifiant la distribution des températures en profondeur. Ces perturbations sont en elles même extrêmement intéressantes à connaître car elles fournissent généralement les systèmes convectifs [1] , les plus favorables à des exploitations industrielles.

L'existence même du flux géothermique et les variations de sa valeur constituent des données essentielles pour la connaissance de l'évolution du globe. A grande échelle, des relations apparaissent avec les structures géologiques. Ainsi, le flux est généralement faible dans les zones montagneuses non volcaniques – comme les Alpes – moyen dans les bassins sédimentaires et les socles anciens, et élevé dans les zones volcaniques ou les fossés (graben) récents. En faisant abstraction des variations périodiques superficielles, la valeur du gradient géothermique, de 3,3°C/100m en moyenne globale, est de 4°C/100m en France où il varie de 10°C/100m dans le nord de l'Alsace à 2°C/100m au pied des Pyrénées.

La température locale du sol présente, dans le temps, des variations complexes et irrégulières, comportant une partie périodique très marquée, annuelle et diurne. La géologie, en apportant la preuve de glaciations relativement récentes (12 000 ans), fait prévoir l'existence possible de variations séculaires, c'est-à-dire d'une évolution progressive de la moyenne annuelle.

Si l'on se borne à la conduction thermique dans le solide, c'est-à-dire si l'on néglige les circulations éventuelles de fluides, on montre facilement qu'à partir de quelques mètres de profondeur, les fluctuations climatiques ne sont plus perceptibles.
La moyenne du flux géothermique, est la même pour les continents dans les zones géologiquement stables, et sous les océans, à l'intérieur des plaques (soit : 1,2 microcal/cm2.sec, ou 50 kW/km2)).
Dans les zones continentales, le flux varie selon l'âge des terrains. Il est inférieur à la moyenne dans les régions de vieilles plates-formes et supérieur dans le domaine des chaînes tertiaires (la moyenne relativement élevée en France est due à la relative jeunesse de son socle cristallin).

Figure 1 : Gradients géothermiques comparés entre zones continentales stables d'âge ancien (les plus faibles, soit 2°C par 100m) et zones géodynamiques (10°C par 100m soit 200°C à 1875m) ; la moyenne française est indiquée (3,3°C/100m)



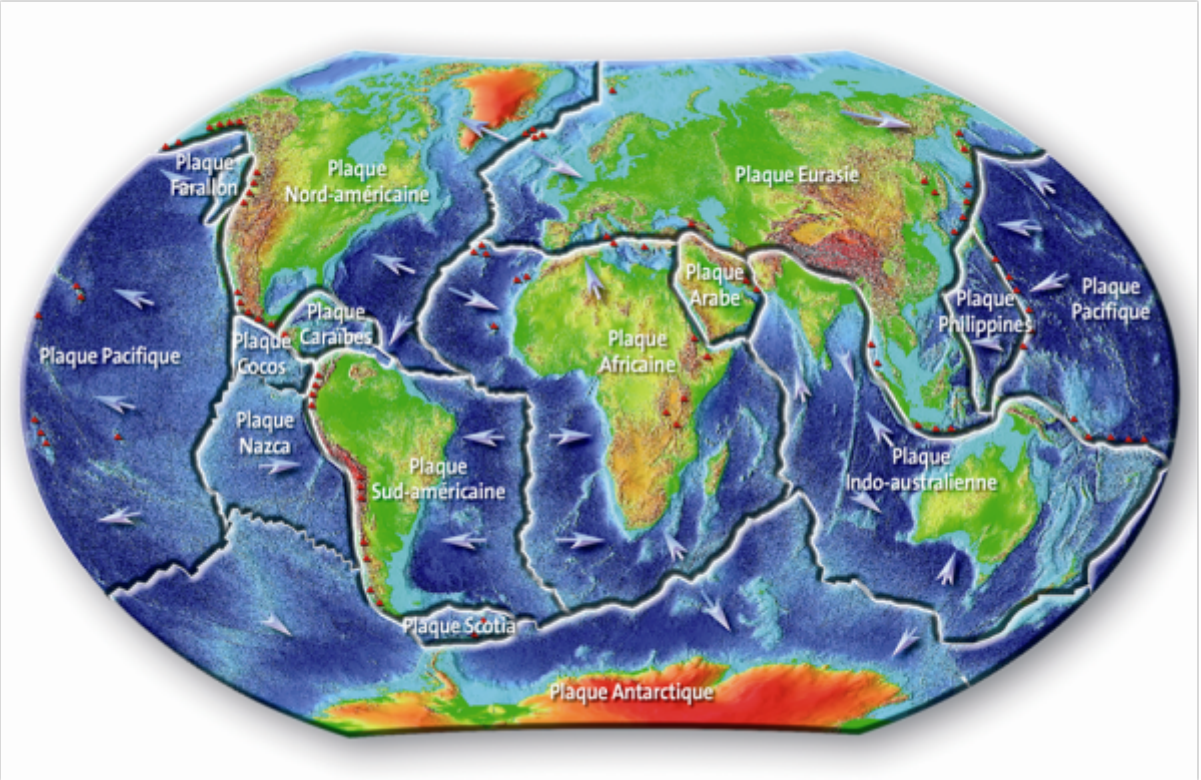
La puissance totale du flux géothermique, pour toute la surface de la Terre, est équivalente à 3 × 1010 kW, ce qui est l'ordre de grandeur de toute l'énergie produite industriellement par l'homme. Ce chiffre est beaucoup plus faible que celui de l'énergie reçue du soleil : 15 × 1013 kW ; mais celle-ci est exactement compensée par le rayonnement thermique propre de la Terre. Ainsi, la géothermie est une énergie susceptible de contribuer de manière durable aux besoins de l'humanité.

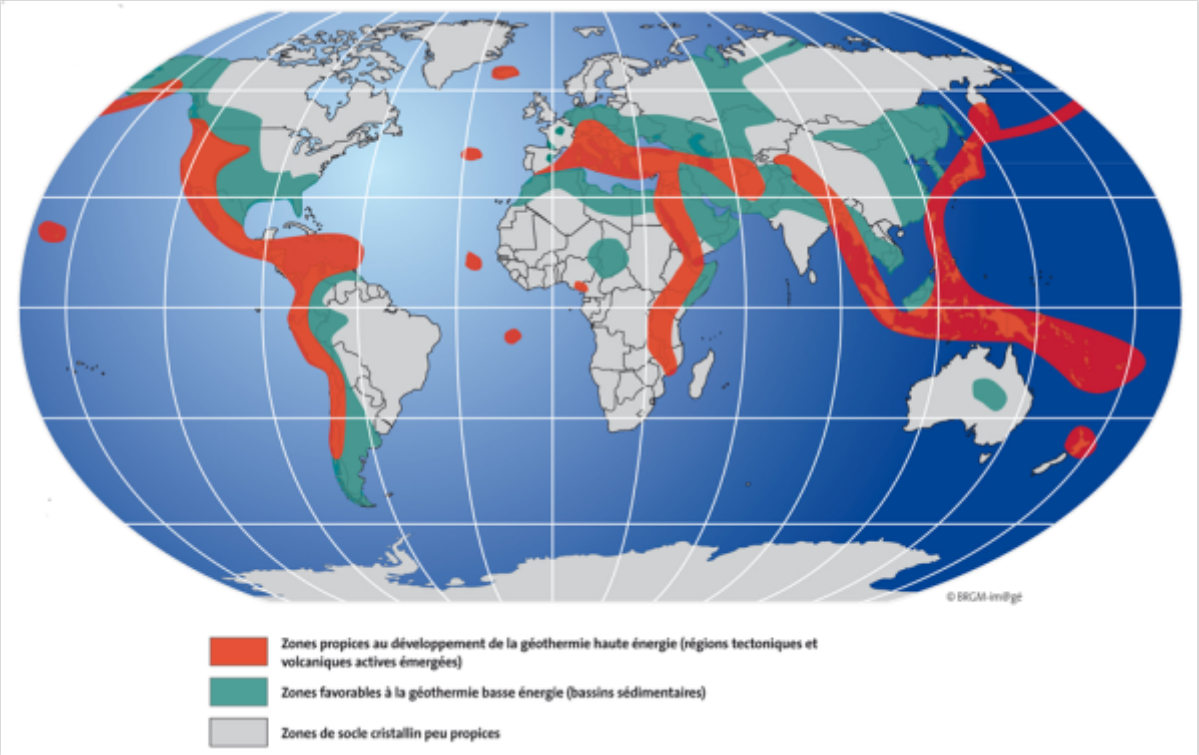
Thermique terrestre et tectonique des plaques

La puissance du flux thermique est notable par rapport à celle que dissipent les séismes (3 × 107 kW en moyenne), qui nous indiquent l'ordre de grandeur de l'énergie mise en jeu par les déformations mécaniques d'origine tellurique. De fait, l'activité sismique de la planète est bien une conséquence de son activité thermique.

Il n'est pas possible d'obtenir, par extrapolation de ce qui est mesurable au voisinage de la surface, un profil thermique crédible pour les grandes profondeurs. Mais on peut s'en faire indirectement, idée à partir de la résistivité électrique, qui diminue dans les roches avec la température. Le comportement des ondes sismiques, montre que le manteau a une rigidité caractéristique d'un solide, avec un comportement pâteux de viscosité élevée. Selon les modèles satisfaisant ces conditions, on retient aujourd'hui que la température moyenne est de 1300°C à 100 Km de profondeur. Ce fort contraste de température avec la surface de la terre, et le changement de densité qui en résulte explique, outre le flux thermique, la force motrice des mouvements des plaques terrestres. L'énergie disponible au niveau du manteau est simplement trop grande pour autoriser l'immobilité. Il en résulte une circulation en boucle avec des courants ascendants et descendants reliés par des mouvements horizontaux responsables des mouvements des plaques. Aux mouvements ascendants du manteau correspondent des mouvements divergents des plaques (zones de rift ou d'accrétion). Aux mouvements descendants du manteau correspondent les frontières de plaques convergentes et la subduction (les arcs insulaires, les chaines de montagnes et les cordillères). La planète se décompose ainsi en « plaques tectoniques », qui sont amincies dans les zones divergentes océaniques et épaissies dans les zones convergentes continentales.

Figure 2 : tectonique des plaques, géodynamique et géothermie. Les frontières de plaques (planisphère A) sont des zones géodynamiques actives dans lesquelles une grande quantité d'énergie tellurique est dissipée vers la surface, sous forme de séismles, de volcans et d'activité hydrothermale. Les zones les plus favorables pour la production d'énergie géothermique (planisphère B) de haute température (figurées en rouge) sont situées sous la mer (dorsales océaniques) et ne sont pas figurées de ce fait (pas encore de technologies de production avérées). Les zones de bassins sédimentaires continentaux, favorables aux applications thermiques sont figurées en vert)





Pourquoi exploiter la géothermie ?

Le flux géothermique moyen est généralement beaucoup trop faible (quelques centaines de KW par Km2) pour être utilisé directement. Par contre, la croute terrestre a l'immense avantage de stocker la chaleur en abondance. On peut dès lors utiliser ce stock thermique et non plus seulement le flux, et ce, pratiquement en tout point du globe.

Sous le nom d'« énergie géothermique », on exploite, selon différentes modalités, la chaleur sensible de masses rocheuses par l'intermédiaire d'une circulation d'eau à l'état liquide ou de vapeur. Nous avons vu que, selon les régions, le gradient géothermique varie considérablement : de quelques

degrés à quelques dizaines de degrés par cent mètres. De même, le flux de chaleur varie de quelques dizaines à quelques centaines de milliwatts par mètre carré. Ramené à la surface de la France, on peut calculer qu'il équivaut à 20 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) par an. En termes de flux, on estime la puissance géothermique de la Terre à 30 milliards de kilowatts. Et en termes de stock, les réserves en calories des deux premiers kilomètres de la croûte terrestre sont plusieurs milliers de fois supérieures à celles des combustibles fossiles. Reste que l'exploitation de ces ressources n'est techniquement possible aujourd'hui à un coût acceptable que si un autre paramètre est satisfait : la présence d'eau permettant d'extraire la chaleur. De ce fait, la géothermie ne présente d'intérêt économique que dans des situations géologiques particulières, auxquelles doivent s'ajouter des conditions de surface favorables. Ces difficultés expliquent en partie la part relativement modeste de la géothermie dans le bilan énergétique mondial (moins de un pour cent) : près de 11 000 MW électriques installés en 2010 et deux fois plus de mégawatts thermiques pour usage direct de la chaleur.

L'industrie géothermique peut exploiter directement la chaleur du fluide, pour des usages thermiques, principalement le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire ou industrielle. Mais elle peut aussi la convertir en électricité. Ce qui n'est possible dans des conditions économiques viables que si la température du fluide géothermal est suffisamment élevée. La limite entre géothermie basse énergie (production de chaleur) et géothermie haute énergie (production d'électricité) est arbitrairement fixée à 150 0C. Or – c'est notamment le cas dans ces zones actives de frontières de plaques - il existe des sites dans lesquels une grande quantité d'énergie est dissipée grâce à une circulation hydrothermale le long de failles ou du fait de la présence d'une chambre magmatique superficielle. Dans ces sites géothermiques – souvent volcaniques - de « haute température » [2], on exploite des systèmes convectifs ; les flux peuvent alors atteindre ou dépasser le MW par Km2.

1.

La géothermie est-elle une source d'énergie renouvelable ? Cela dépend de la quantité d'énergie extraite du sous-sol dans une opération relativement à la capacité de renouvellement naturel de la chaleur. Dans les sites conductifs à gradient normal, ce n'est pas une forme d'exploitation renouvelable compte tenu de la puissance unitaire des installations, supérieure à celle découlant du flux de chaleur géothermique. Par contre, les zones exploitables en sous-sol étant nombreuses, il sera possible de déplacer en profondeur la zone de production pour poursuivre l'exploitation au-delà de la « durée de vie » du premier site. Et dans la mesure où, globalement, le flux terrestre dépasse les besoins énergétiques de l'humanité, et que la chaleur stockée dans la croûte est encore bien supérieure, les perspectives d'épuisement du potentiel géothermique terrestre sont hors d'atteinte. Soulignons d'ailleurs que, dans les gisements de haute température (sites convectifs), la source de chaleur, qui peut atteindre ou dépasser le MW par Km2, peut être assez puissante pour équilibrer

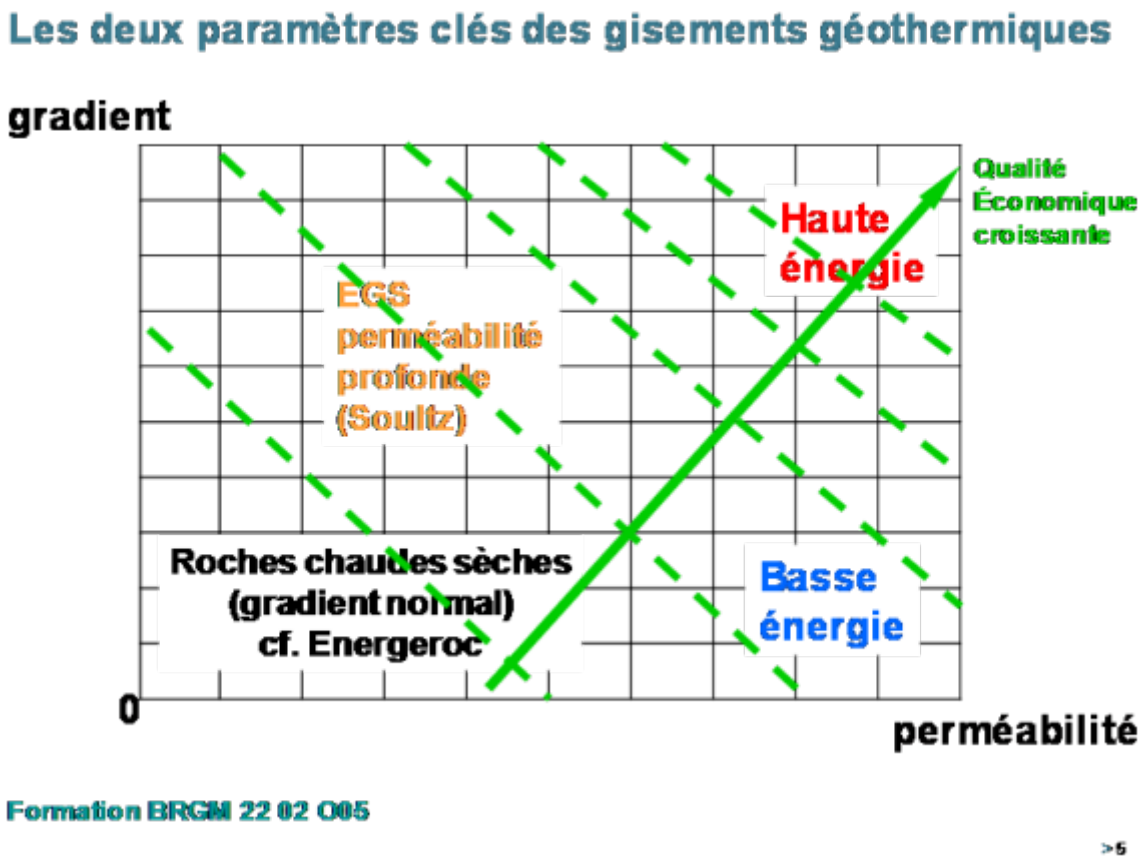
l'exploitation (de l'ordre de quelques MW par puits, soit même ordre de grandeur). Même localement, l'exploitation est alors renouvelable.

La perméabilité de la roche, l'autre facteur favorable

Un projet géothermique consiste à exploiter la chaleur contenue dans une masse rocheuse au moyen d'un fluide caloporteur (de l'eau plus ou moins chargée en gaz et en sels dissouts). Le plus souvent, le fluide utilisé est celui-là même qui est contenu dans la roche du gisement. Ainsi, la démarche du géothermicien consiste-t-elle à rechercher des zones présentant à la fois un gradient géothermique et une transmissivité élevée [3].

Divers types de situations géologiques permettent la superposition de ces deux conditions – gradients de température et perméabilité - favorables à l'existence d'un champ géothermique. Dans les bons gisements, les transmissivités varient de 10 à 100 darcy-mètres, et les gradients de 3 à 30 degrés par cent mètres (Fig. 3).

Figure 3 : variations du gradient et de la perméabilité selon le type de gisement. Les gisements économiquement les plus favorables sont ceux bénéficiant à la fois d'un gradient géothermique et d'une perméabilité naturelle élevée (géothermie haute énergie). Une perméabilité élevée dans une zone à gradient normal est favorable aux applications de basse énergie (ex. bassin Parisien). Lorsque l'on dispose d'un bon gradient sans perméabilité assurée, les systèmes « EGS » (enhenced geothermal energy ou géothermie stimulée) peuvent être développés (cf. pilote de Soultz-sous-Forêt). Schéma : J.Varet.



Aperçu des ressources géothermiques conventionnelles en

France

Compte tenu des caractéristiques géologiques de la France métropolitaine, les types de gisements le plus répandu sont de type « basse énergie ». Ils se développent au sein de bassins sédimentaires, dont certaines strates sont perméables ; elles sont alors généralement gorgées d'eau dont la température dépend de la profondeur et du gradient géothermique. Ces nappes d'eau chaude ont été systématiquement répertoriées par le BRGM (Bureau de recherche géologique et minière) dans les années 70, opération régulièrement renouvelée depuis. Les données rassemblées permettent de préciser le débit et la température prévisibles pour les diverses nappes, ainsi que la profondeur des forages à réaliser. Dans le Bassin parisien, les nappes contenues dans les formations géologiques de l'Albien, du Lusitanien, du Dogger et du Trias sont les meilleures. Les plus superficielles participent au chauffage d'ensembles d'habitations ou de piscines, l'appoint étant fourni par des pompes à chaleur, comme à la Maison de la Radio de Paris. Ces ressources superficielles sont aujourd'hui exploitées même pour l'habitat individuel. La nappe du Dogger est actuellement la plus exploitée puisqu'elle est sollicitée pour le chauffage d'une quarantaine d'installations en fonctionnement depuis les années 70-80, contribuant ainsi aux besoins de près de 200 000 équivalents-logements. Des gisements favorables sont également connus dans le bassin Aquitain, dans la vallée de la Saône et du Rhône, en Alsace et en Limagne.

D'importantes réserves géothermiques, à des températures de 12 0C à 150 0C sont donc disponibles en France. Elles sont tellement abondantes que l'exploitation des nappes suffirait à couvrir la quasi-totalité des besoins calorifiques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, soit d'économiser 40 millions de tep par an. Et de fait, la plupart des agglomérations françaises se sont développées sur des formations sédimentaires.

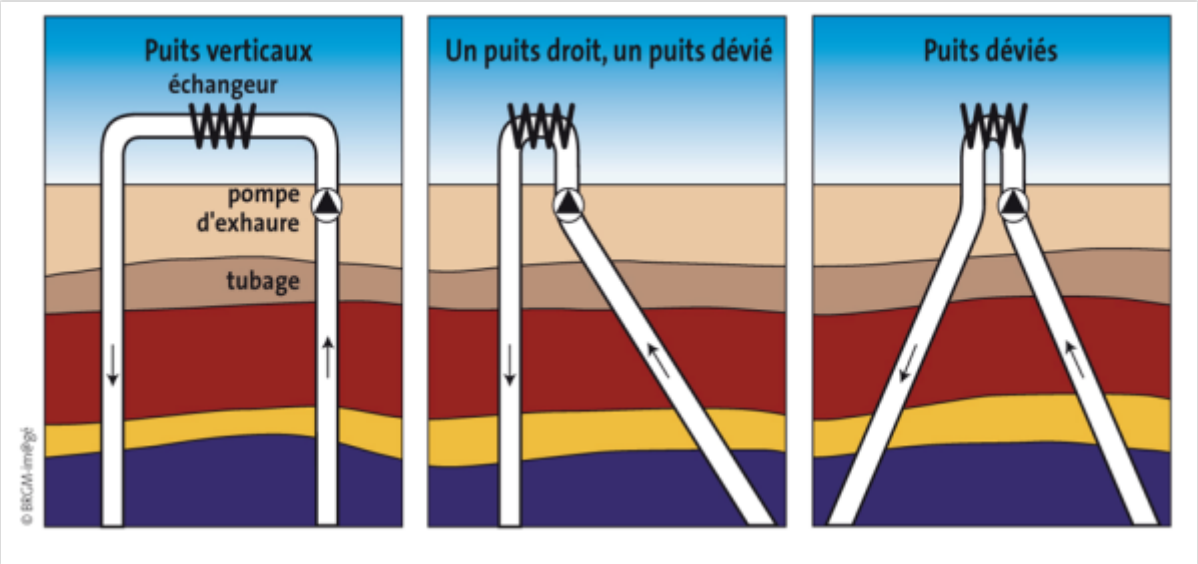
Le second type de gisement est moins fréquent mais plus spectaculaire : lorsque les roches sont fracturées ou fissurées, l'eau s'infiltre, se réchauffe en profondeur et remonte vers la surface en donnant des sources thermales. Les calories peuvent alors être extraites en surface, ce qui s'est fait depuis l'époque romaine et même avant. La production peut être améliorée par la réalisation de forages de faible profondeur permettant l'utilisation directe de la chaleur ou sa conversion thermodynamique en électricité. Diverses réalisations existent en France, à Chaudes-Aigues, Plombières, Dax et La Bourboule. Bien d'autres installations pourraient être mises en place pour exploiter les systèmes géothermiques convectifs associés aux sources thermales.

Dans les régions volcaniques, le magma peut fournir une source de chaleur importante à proximité de la surface et induire par hydrothermalisme la formation d'un réservoir et d'une couverture favorables à l'exploitation d'un gisement. L'eau profonde peut être portée à des températures de plusieurs centaines de degrés. Lorsqu'elle est atteinte par forage, cette eau se vaporise et l'énergie peut alors être captée pour la production d'électricité. Plusieurs milliers de mégawatts géothermiques sont actuellement produits de par le monde, principalement aux États-Unis en Asie du SE et en Italie. En France, cette possibilité d'exploitation existe aux Antilles, à la Réunion et dans le Massif Central, mais elle n'a été prouvée à ce jour qu'à la Guadeloupe.

Que les installations soient de haute ou de basse énergie (production d'électricité ou de chaleur), la tendance qui a prévalu ces dernières années a été de développer des systèmes de réinjection du fluide extrait. Des puits d'injection viennent ainsi compléter les puits de production (Fig.4). Conçue à l'origine pour limiter l'impact environnemental des effluents – souvent chargés en sels ou en gaz – cette technologie a tendu à se répandre du fait qu'elle permet une meilleure exploitation du gisement. En effet, en réalité, dans le sous-sol rocheux, l'essentiel de la chaleur est contenue dans la roche et non dans l'eau. Même lorsque l'on dispose d'un réservoir présentant une bonne perméabilité et une certaine porosité, il est intéressant d'extraire, outre la chaleur du fluide, celle de

la roche du réservoir qui constitue l'essentiel (plus de 90%) du stock.

Figure 4 : l'exploitation par doublet. (Un puits de production, un puits d'injection) : trois options possibles deux puits droits (nécessitant 2 sites), deux puits déviés, ou un droit et un dévié (nécessitant un seul site).



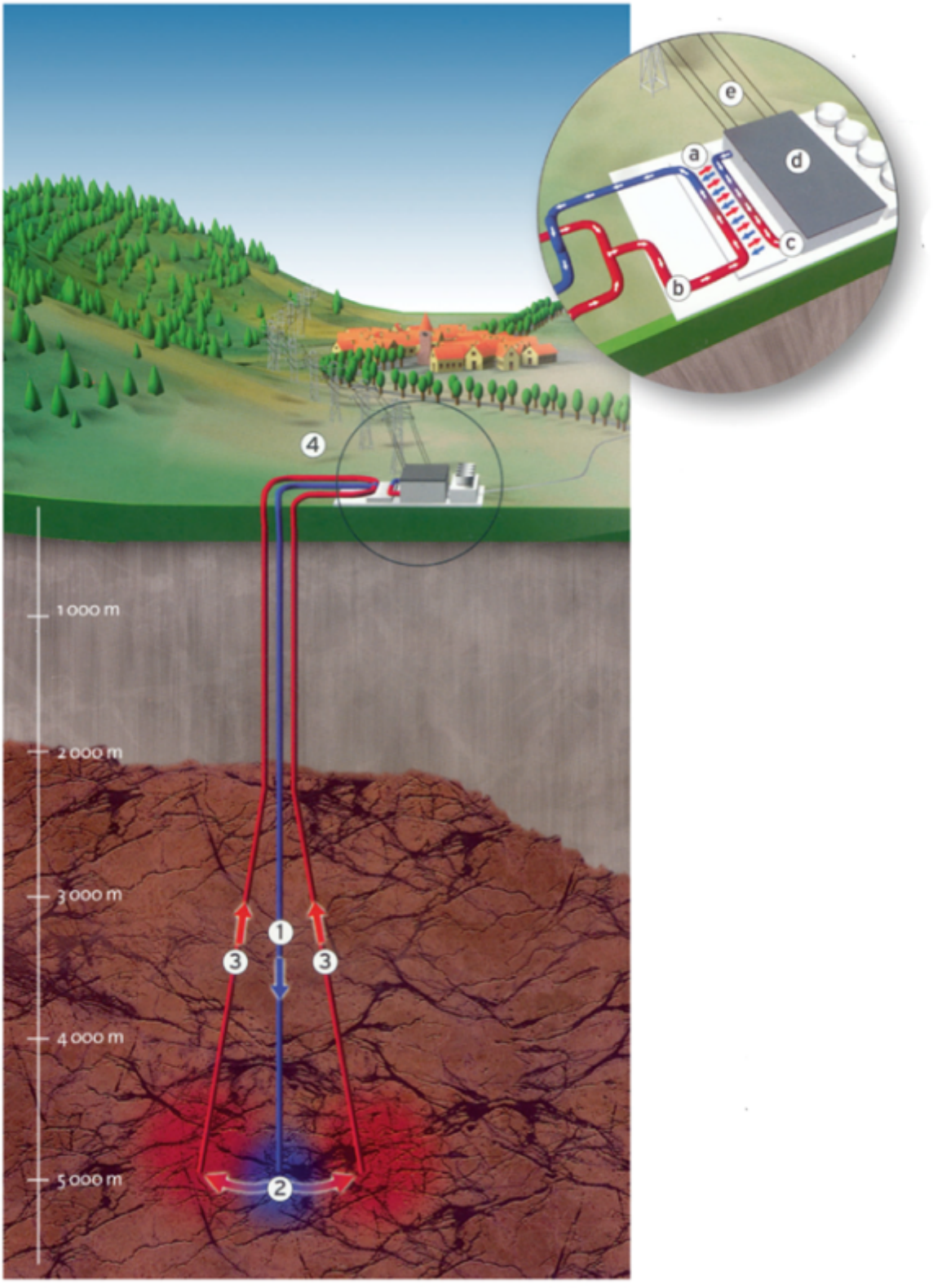
Vers une exploitation de la chaleur des roches : la géothermie stimulée (ou EGS)

[4]

Le développement des techniques de réinjection, et de stimulation des puits, a eu pour conséquence qu'un nouveau type de géothermie puisse voir le jour, par mise en production de roches chaudes profondes. En effet, le plus souvent, les formations géologiques profondes ne sont ni fissurées ni poreuses. Il est dès lors nécessaire de les fracturer artificiellement, puis d'injecter de l'eau que l'on récupère après circulation au contact des roches chaudes. Cette forme d'exploitation, encore largement du domaine de la recherche, est en train de trouver ses premiers débouchés économiques. Notamment dans les zones à gradient élevé (plus de 10 0C par cent mètres) une production d'énergie électrique dans des conditions économiques est en voie d'aboutir. Les expériences menées à Los Alamos (Nouveau-Mexique) entre 1972 et 1992 avec une température de 200 0C à 3 000 mètres de profondeur, n'ont pas permis de développer un échangeur artificiel de capacité suffisante. D'autres tentatives ont été faites en Grande-Bretagne, en Suède et au Japon.

Implanté dans un contexte présentant à la fois un fort gradient géothermique et une bonne fracturation en bordure du fossé rhénan, c'est le projet européen de Soultz [5] qui a donné les résultats les plus prometteurs. Une température de 146 0C a été atteinte à 2 000 m par forage en 1995. Deux puits plus profonds, distants de 450 mètres, ont été creusés (l'un à 3 600 m, l'autre à 3 800 m) ainsi que cinq puits d'observation. En 1997 et pendant quatre mois, une circulation d'eau a été réalisée entre les deux forages profonds, avec un débit de 25 kg/s et une température supérieure à 140°C, sans perte d'eau ni effet de corrosion, et avec une puissance de pompage modeste. Cette première mondiale a donné le feu vert à la construction d'un pilote comprenant trois forages à 5 000 m et la construction d'une centrale de production d'électricité à fluide binaire d'une puissance de 5 MW. Par la suite un prototype industriel capable de produire 25 MW devrait être construit.

Figure 5 : le prototype géothermique de Soultz (Alsace)



Source : GEIE "Exploitation minière de la chaleur", 2002.

Si le dispositif confirme ses potentialités, le calcul montre que la mise en exploitation géothermique d'une faible part du sous-sol de l'Alsace (3% de la surface sur un kilomètre de hauteur, entre 4,5 et 5,5 km de profondeur) pourrait assurer une production électrique équivalente à celle d'une dizaine de tranches nucléaires. Des régions comprenant des roches naturellement fracturées, se retrouvent aussi dans le Massif central et le Couloir rhodanien, sur de vastes étendues en Europe et dans le monde, ouvrant des perspectives à la géothermie profonde, dont l'avenir reste conditionné à sa rentabilité. S'il s'agit d'une énergie chère - nécessitant des forages à grande profondeur – c'est une

énergie propre et locale. Les prix de l'énergie de référence étant destinés à augmenter dans le futur, avec l'épuisement des ressources fossiles et les politiques climatiques, cette forme de production géothermique fait à l'évidence partie des options à considérer en Europe.

Quel avenir pour la géothermie ?

Dans les articles suivants [6] ; géothermie haute énergie (J.Varet, 2011), nous aborderons plus en détails les caractéristiques de la géothermie en cours de développement industriel en France et dans le monde. Nous sommes loin d'avoir un niveau de connaissances suffisant pour fixer les limites des développements possibles. Que ce soit en termes de connaissances géologiques des ressources – reposant sur des approches complexes impliquant de nombreuses disciplines des sciences de la terre -, ou en matière d'innovations technologiques propres concernant ces systèmes de production. C'est dû au manque d'opérateurs industriels spécialisés (à la différence d'autres filières renouvelables, solaires ou éoliennes par exemple qui disposent de lobbies industriels propres). Chaque segment de technologie impliqué – de l'exploration au forage et de la conduite de vapeur à la centrale thermoélectrique – dépend aujourd'hui d'autres marchés bien plus vastes. Mais il est certain que le potentiel de développement est immense, plus encore dans les zones géodynamiques les plus actives, justement celles qui mettent en danger le nucléaire [7].

Dans un contexte dans lequel des évènements tragiques nous amènent à remettre en cause nos choix antérieurs, il est temps de considérer l'énergie formidable de notre planète, non seulement comme une menace, mais aussi comme une opportunité dont nous sommes encore très loin d'avoir la capacité de mesurer les limites, à la différences des énergies sur lesquelles nous avons basé jusqu'à ce jour l'essentiel de notre développement.
Aux plans technologique et économique, il est possible de produire la totalité des besoins énergétiques de l'humanité à partir de sources d'énergies renouvelables, comme le montrent les travaux de l'Université de Standford ; les barrières sont essentiellement politiques et sociales.
Les différentes formes d'énergie géothermique connaîtront des développements variés selon les régions en fonction de la connaissance géologique de la ressource, de la nature des besoins, et du niveau de maîtrise des technologies. En France métropolitaine, les recherches et les inventaires réalisés à ce jour montrent que c'est dans le domaine de la production de chaleur pour l'habitat et le tertiaire que le plus d'énergie peut être produit, au point de répondre à la quasi-totalité des besoins. Dans de nombreux pays du monde, en Amérique latine, en Asie du Sud-Est et en Afrique de l'Est en particulier, c'est par contre la production d'électricité qui est le plus à même de contribuer de manière significative au bilan énergétique.
http://www.encyclopedie-dd.org/ency...http://www.encyclopedie-dd.org/ency...

Notes

[1] La chaleur peut se diffuser selon deux modes : conductif (par transfert de chaleur à l'intérieur du solide) ou convectif, lorsque l'eau sert de fluide caloporteur.

[2] dits aussi de « haute enthalpie »

[3] produit de la perméabilité k et de la hauteur utile h, (exprimée en darcy-mètre)

[4] EGS Enhanced Geothermal System (géothermie stimulée)

[5] A la suite d'une démonstration et sur proposition de l'auteur.

[6] Ref : 2 articles à paraître dans l'Encyclopédie : géothermie pour le chauffage

[7] Géodynamique terrestre : menaces et opportunités. Repenser nos choix énergétiques pour mieux vivre avec notre planète. J.Varet, mars 2011

Bibliographie

ADEME, La Géothermie en France et dans le monde, in Réseaux et chaleur, no 16, 1992

ARMSTEAD, H. C. H., Geothermal Energy, John Wiley & Sons, New York, 1978

GOGUEL, J., La Géothermie, Doin, Paris, 1975

GOGUEL, J. & VARET, J. La géothermie, Article, Encyclopedia Universalis, (Ed. et Réed.) Paris.

JAUPART, C., Dynamique interne de la terre. Géosciences N°4, p.12-19, 2006

JACOBSON, M.Z. & DELUCCHI, M.A., "Providing all global energy with wind, water and solar power"… Energy Policy 39, 1154-1169, 2011

LINDAL, B., Review of industrial applications of geothermal energy and future considerations, in Geothermics, no 21, 1992

J. VARET, La Géothermie basse énergie : usage direct de la chaleur, Masson, Paris, 1982

Sur Internet

- www.brgm.fr
- www.geothermie-perspectives.fr