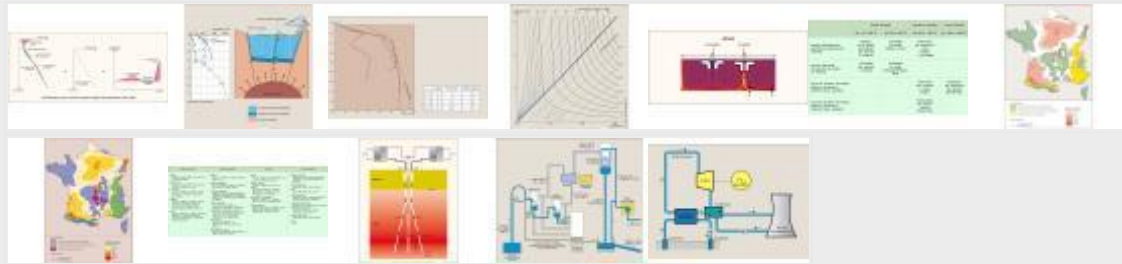


GÉOTHERMIE



[Afficher la liste complète \(18 médias\)](#)

Sur le plan scientifique, la géothermie s'attache à l'étude du régime [thermique](#) du globe et aux mécanismes de transfert thermique – conductifs et convectifs. Elle tente d'intégrer l'ensemble des données géologiques, géochimiques et géophysiques dans des modèles satisfaisants.

Abstraction faite des variations thermiques d'origine externe, qui affectent, selon leur périodicité, quelques mètres ou quelques dizaines de mètres d'épaisseur, la température du sol augmente 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. La connaissance du flux géothermique, proportionnel au gradient et à la conduction des roches traversées, est encore très imparfaite à cause de la difficulté des mesures, et surtout des perturbations apportées à la distribution des températures par la circulation des eaux souterraines, qui transportent la [chaleur](#), concurremment avec la conduction dans le solide.

Ces perturbations sont en elles-mêmes extrêmement intéressantes à connaître, car elles fournissent généralement les systèmes géologiques les plus favorables à des exploitations industrielles.

Néanmoins, des relations apparaissent entre la distribution du flux géothermique et les grandes structures géologiques ; l'existence même de ce flux et la connaissance de la distribution de sa valeur est une donnée essentielle sur l'[évolution](#) du globe.

Le flux géothermique est généralement beaucoup trop faible pour être utilisé directement – sauf lorsqu'il se trouve concentré dans une source thermale ou une chambre magmatique superficielle avec son système hydrothermal associé. Dans les sites géothermiques de « haute température », dits de « haute enthalpie », on exploite des systèmes convectifs.

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 – parfois de vapeur. Ce n'est donc pas une énergie renouvelable lorsque l'on exploite des sites conductifs. Mais les sites favorables de ce type sont très abondants, et il sera possible de déplacer en profondeur la zone de production pour poursuivre

l'exploitation. En revanche, dans les sites convectifs des gisements de haute température, la source de chaleur est assez puissante pour équilibrer l'exploitation. Il s'agit alors d'énergie largement renouvelable.

Jean GOGUEL

Jacques VARET

La crise de l'énergie a mis en évidence, à partir des 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.

Selon les régions, le gradient géothermique varie 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. On estime la puissance géothermique de la Terre à 30 milliards de kilowatts, et 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 ne présente d'intérêt économique que dans des situations géologiques tout à fait particulières, auxquelles doivent s'ajouter des conditions de surface favorables. C'est ce qui explique la part relativement modeste de la géothermie dans le bilan énergétique mondial (moins de un pour cent) : près de 10 000 mégawatts électriques installés au début du XXI^e siècle et, selon les estimations, 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, ou encore la convertir en électricité. Cette dernière opération n'est possible dans des conditions économiques 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 °C.

Jacques VARET

1. Flux géothermique

Si on fait abstraction des variations périodiques superficielles, on sait depuis longtemps que la température du sol augmente progressivement avec la profondeur. La valeur du gradient géothermique, souvent citée, de 30 mètres par degré, n'est qu'un ordre de grandeur, et il faut s'attacher à en analyser les variations. Ainsi le gradient géothermique est-il de 4 °C par 100 mètres en France en moyenne, et varie de 10 °C par 100 mètres dans le nord de l'[Alsace](#) à seulement 2 °C par 100 mètres au pied des [Pyrénées](#).

De l'existence d'un gradient thermique résulte celle d'un flux de chaleur, proportionnel à celui-ci et au coefficient de conduction thermique de la roche. C'est la valeur de ce flux géothermique qui détermine celle du gradient.

Dans la mesure du flux géothermique et pour sa compréhension, on devra, en premier lieu, tenir compte des températures superficielles d'origine externe.

• Variations climatiques et températures superficielles

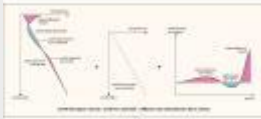
Le régime des températures extérieures du globe, dans l'hydrosphère et l'atmosphère, peut s'étudier en faisant abstraction des phénomènes internes, qui ne relèvent ces températures que de quelques centièmes de degré au plus. La météorologie et l'océanographie s'intéressent à ce régime, qui est dominé par le rayonnement reçu du [Soleil](#) ($2 \text{ cal} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$), le rayonnement réfléchi vers l'espace et le déplacement des masses fluides, qui tendent à atténuer les contrastes de température.

Notons seulement que la température moyenne du sol peut différer de la température moyenne du lieu de plusieurs degrés, selon les conditions locales : ombre, ensoleillement, possibilités de refroidissement par évaporation, etc.

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'une variation périodique sinusoïdale autour de la même valeur moyenne se propage en profondeur avec une diminution exponentielle d'amplitude et un déphasage proportionnel à la racine carrée de la période. La profondeur à laquelle l'amplitude est réduite à 1/23 de sa valeur initiale, et la phase inversée, est de l'ordre de 50 centimètres pour la variation diurne et de 10 mètres pour la variation annuelle. À une profondeur double, l'amplitude est réduite au 1/500 et, partant, négligeable.

On peut donc, pour étudier les températures internes, laisser de côté les variations périodiques de la température superficielle au-delà de ces profondeurs et se borner à la moyenne annuelle. Les variations séculaires se propagent beaucoup plus loin, en s'amortissant, mais si lentement que l'effet des glaciations quaternaires doit se manifester sur un millier de mètres, sans que, faute de connaître leur histoire d'une manière assez précise, on sache en tenir compte ; inversement, le profil thermique mesuré dans un sondage, à travers une roche très homogène, telle qu'un granite ou, mieux, la [glace](#) de l'Antarctide, permettrait théoriquement, par ses écarts à la linéarité, de remonter à l'histoire des variations climatiques (fig. 1 ^[4]) ; mais le problème est, mathématiquement, très mal déterminé, et, malgré certaines tentatives, il ne paraît pas possible d'arriver à un résultat significatif avec cette seule [méthode](#) (les mesures isotopiques sur l'oxygène de l'eau donnent de bien meilleurs résultats).



Dessin

Géothermie : incidence des variations climatiques Incidence des variations climatiques passées sur le profil thermique mesuré (source : L. Guillou-Frottier, B.R.G.M., « Géosciences », no 3).

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter

Dans les régions du Grand Nord, la température moyenne superficielle est inférieure à zéro sur de longues périodes et l'eau du sol est gelée, sur une plus ou moins grande profondeur, parfois des centaines de mètres, en dessous de la faible profondeur à laquelle pénètre le dégel estival. Le comportement mécanique des sols et la circulation des eaux souterraines s'en trouvent complètement bouleversés.

• **Mesure du flux**

La mesure du flux se fait dans des zones où la chaleur se dissipe exclusivement par conduction. Celle-ci n'est donc significative que dans une roche imperméable ou, à la rigueur, dans une roche où le déplacement de l'eau serait purement horizontal. On évite de ce fait tout site affecté par la convection, c'est-à-dire ceux où la chaleur est transmise par le mouvement des fluides – air, eau ou magma – dans le sol. Si cette condition est remplie, la mesure comporte d'abord la détermination du profil de la température en fonction de la profondeur, qui se fait dans un sondage laissé en repos pendant un temps suffisant pour que la chaleur dégagée par la foration soit dissipée, ainsi que les perturbations apportées par la circulation des boues. Ce temps doit être supérieur à la durée totale de la foration. Il faut, de plus, qu'il ne se soit pas établi dans le sondage de circulation d'eau, comme cela se produit lorsque le forage a traversé une zone perméable (réservoir productif).

On mesure ensuite la conduction thermique sur une série d'échantillons représentatifs extraits du sondage. Il faut découper des disques d'épaisseurs variées et les intercaler entre les tronçons d'une barre métallique dont les extrémités sont maintenues à des températures différentes. Les températures sont mesurées en un certain nombre de points des barres, une fois le régime permanent atteint. Toutefois, il est inévitable que les échantillons se dessèchent au cours de leur préparation. On vérifie que la valeur du flux est sensiblement constante le long du sondage, gradient thermique et conduction variant en sens inverse.

Le calcul suppose un régime permanent. Or les perturbations thermiques dues aux époques glaciaires se propagent encore sur le premier millier de mètres, et il est difficile d'en corriger l'effet. Malgré un effort récent, les mesures du flux géothermique restent peu nombreuses sur les continents et sont fort inégalement réparties. De plus, la topographie, la géologie et la circulation de l'eau souterraine perturbent souvent les mesures et compliquent les interprétations. En revanche, des milliers de mesures ont été effectuées dans tous les océans. Sur les fonds océaniques, la température de l'eau ne présente aucune variation périodique, ce qui permet de mesurer le gradient sur quelques mètres ; on enfonce pour cela dans les sédiments mous une sonde munie de trois thermomètres enregistreurs (électriques) et on la laisse assez longtemps pour que se dissipe la chaleur dégagée par le [frottement](#) lors de la pénétration. D'autre part, on détermine la conduction de l'échantillon du sédiment rapporté par la sonde.


Il s'agit donc de la composante verticale du flux, et le résultat n'est pas significatif si les conditions varient latéralement. Par exemple, la mesure faite à Resolute Bay, sur la côte de l'île Cornwallis, dans le Grand Nord canadien, est complètement faussée, du fait que la température moyenne à terre est de -23°C , et, au fond de la mer, voisine de 0°C . Le flux local est également perturbé si la structure du terrain présente des variations latérales. Il arrive qu'un socle relativement conducteur de la chaleur (calcaire, par exemple) soit limité par une surface irrégulière, et surmonté par une couverture de grès et schistes, moins conducteurs. On observe alors, dans cette couverture, un flux plus élevé au-dessus des parties hautes du socle que des parties basses. Cela a été observé aussi bien en Aquitaine, à Tarbes, qu'en Chine à Pékin et Tianjin, et doit être assez fréquent. Le conducteur profond peut aussi être constitué par un granite, intrusif au milieu de terrains schisteux, comme c'est le cas dans le socle profond du [Bassin parisien](#). De plus, ces granites sont généralement plus riches en éléments radioactifs que les terrains environnants, et constituent alors une source de chaleur. L'interpolation entre les trop rares mesures significatives du flux dans le Bassin parisien devrait donc se faire en tenant compte de ce que l'on sait (par la [géophysique](#), et en particulier la gravimétrie) de la distribution des granites dans le socle. La localisation des batholites

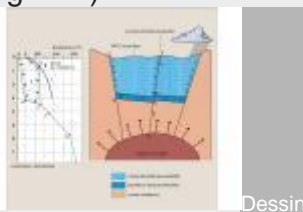
granitiques sous couverture pourrait ouvrir la voie à de nouvelles perspectives en géothermie.

Lorsqu'il y a une circulation de fluide, le transport de chaleur par convection peut devenir prédominant, et la mesure du flux par conduction, décrite ci-dessus, n'a plus aucun sens.

C'est en particulier le cas dans la zone non saturée d'eau, au-dessus d'une nappe phréatique, parfois très profonde. On observe alors une température pratiquement uniforme sur une grande hauteur. C'est le cas dans les Causses (la température dans les grottes est uniforme, quelle que soit leur profondeur), mais également dans des [îles](#) volcaniques, comme [Hawaii](#) et La Réunion, où les empilements de coulées de basaltes et de matériaux de projections volcaniques sont extrêmement perméables. Ce n'est qu'en dessous de la surface de saturation, ou, à La Réunion, dans les terrains imperméables profonds, qu'on observe un gradient, en sondage, et qu'on peut calculer un flux, qui est d'ailleurs exceptionnellement élevé (cf. forage profond de Salazic).

Même en dessous de la surface de saturation (niveau phréatique), la circulation de l'eau dans les nappes profondes peut ne pas être parallèle à la surface, et le flux apparent se trouve alors complètement perturbé, réduit là où les eaux s'enfoncent, augmenté là où elles se rapprochent de la surface. Par exemple, dans les grandes plaines de l'Amérique du Nord, entre les montagnes Rocheuses et le Mississippi, le flux apparent se trouve réduit à l'ouest, majoré à l'est.

C'est le cas des sources thermales, où l'eau d'une nappe profonde remonte rapidement au jour, le long d'une faille, ou, plus exactement, le long d'une cheminée restée perméable dans le plan d'une faille, qui peut être ailleurs obstruée par concrétionnement, et atteint ainsi la surface à une température qui peut être très supérieure à la moyenne du lieu. C'est aussi le cas dans les zones volcaniques, où la remontée du magma assure un transfert très rapide d'une grande quantité de chaleur vers la surface. Lorsqu'il stationne dans une chambre magmatique, un système hydrothermal se développe à sa périphérie. Le système convectif fonctionne alors à deux niveaux, avec un étage magmatique et un étage hydrothermal. Ce sont ces configurations qui sont les plus recherchées pour le développement des gisements géothermiques de haute énergie (fig. 2 .



Champ de haute énergie Modèle de champ géothermique de haute énergie. La courbe 1 est la courbe de référence de l'ébullition de l'eau pure. La courbe 2 représente le profil de température le long d'un système de circulation depuis un point de recharge A vers un point de décharge E.

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter

Malgré le nombre encore très faible des mesures suffisamment précises du flux géothermique local, et compte tenu de ces systèmes convectifs, les grandes lignes de la distribution du flux thermique issu de la profondeur commencent à apparaître. La moyenne, de l'ordre de $1,2 \text{ microcal/cm}^2 \cdot \text{sec}$, ou 50 kW/km^2 , est la même pour les océans et les continents dans les zones géologiquement stables, à l'intérieur des plaques. 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 (c'est la raison pour laquelle il est d'une moyenne relativement élevée en France, dans son ensemble).

Dans les océans, le flux atteint des valeurs particulièrement élevées (de 3 à 10 fois la moyenne) le long des frontières de plaques et, notamment, des [dorsales océaniques](#), où des injections volcaniques viennent régulièrement combler les fissures qui s'ouvrent, accroissant ainsi la surface du fond océanique avec une croûte basaltique toujours plus jeune. Dans ces zones d'expansion océaniques, qui sont le plus souvent immergées, mais quelquefois émergées (en [Islande](#) et en Afar), une large partie du flux est transmis non par conduction mais par convection magmatique. Plus encore que dans les zones volcaniques des continents s'ajoute la circulation de l'eau dans les fissures, qui se traduit par les sources sous-marines à haute température, découvertes en divers endroits le long des dorsales océaniques. Dans les zones océaniques émergées d'Islande ou de l'Afar, comme dans le [rift est-africain](#), ces systèmes géothermiques actifs offrent des opportunités de développements industriels dans des conditions particulièrement favorables. Ainsi, l'Islande, qui assure le chauffage de la quasi-totalité de ses habitants par géothermie, est en plein développement de sa capacité géothermoélectrique, notamment pour la production d'aluminium (100 mégawatts supplémentaires installés par an au début du XXI^e siècle).

Dans les [arcs insulaires](#) volcaniques qui bordent à l'ouest le Pacifique, des Aléoutiennes aux Tonga, mais aussi aux Antilles, en Méditerranée ou en Indonésie, le flux est faible à l'extérieur et plus fort que la moyenne à l'intérieur de l'arc volcanique ; c'est là une donnée dont tout essai de modélisation de ces structures, marquées par la localisation des séismes profonds, le long d'une « surface de Benioff » plongeant vers l'intérieur de l'arc, doit tenir compte. De même, le long des cordillères, comme dans la [Cordillère des Andes](#) ou en Amérique centrale, le flux est faible le long de la fosse où s'accumulent les sédiments récents, et élevé le long de l'axe montagneux où les champs hydrothermaux et volcaniques abondent. De très nombreux sites géothermiques, très favorables à la production d'électricité, peuvent être identifiés dans les pays correspondants.

Enfin, les sites correspondant à des points chauds à l'intérieur des plaques, comme à Hawaii ou à la Réunion, sont également très favorables au développement industriel de la géothermie.

La puissance totale du flux géothermique, pour toute la surface de la Terre, est équivalente à 3×10^{10} 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 : 15×10^{13} 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.

La puissance du flux thermique est notable par rapport à celle que dissipent les séismes (3×10^7 kW en moyenne), qui nous indique l'ordre de grandeur de l'énergie mise en jeu par les déformations mécaniques d'origine interne. L'activité sismique de la planète est bien une conséquence de son activité thermique.

2. Volcanisme et injections magmatiques

Les volcans sont très inégalement distribués, et leur activité intermittente apporte à la surface de la Terre, d'une manière très spectaculaire, des quantités importantes de matières à haute température. Lorsqu'on analyse leur bilan énergétique, on se rend compte que les laves fondues doivent être, dans les réservoirs d'où elles proviennent, en équilibre de pression avec les roches environnantes.

Si l'on néglige le rôle de la [tectonique](#) – l'ouverture de fissures facilitant non seulement la genèse mais aussi l'émission des magmas –, le moteur essentiel de leur ascension est la convection, la densité de la lave fondue étant inférieure à celle des roches refroidies. Notamment du fait que les produits volatils dissous dans le magma (eau, gaz divers, etc.) se dégagent lorsque la pression s'abaisse, à l'approche de la surface, pour former des bulles, qui allègent la lave fondue. Les fluides peuvent aussi produire un dégagement brutal se traduisant par des explosions, avec projection de laves fondues. Cette phase gazeuse joue un rôle dans de nombreux phénomènes géologiques induits, comme les altérations ou les dépôts hydrothermaux (par exemple à la source de nombreux gisements métalliques). La lave, visqueuse, envahit les vides ainsi préparés lorsque le gaz ou la vapeur s'échappent en fracturant les terrains.

Bien que le flux de chaleur d'un volcan puisse être énorme (on a estimé à 1 000 MW l'énergie dissipée durant des dizaines d'années sous forme de chaleur par le lac de lave en fusion qui occupait le cratère du Niragongo, dans la région des Grands [Lacs](#), en Afrique), la quantité de chaleur totale libérée par les volcans apparaît faible à côté de celle qui est amenée à la surface par le flux normal. La chaleur émise par le cratère du Niragongo est égale à celle que fournit le flux normal pour une surface de 200 kilomètres de diamètre. Même si l'on prend en compte la totalité des zones de dorsales océaniques,

la quantité d'énergie dissipée par convection ne dépasse pas le dixième de l'énergie amenée à la surface par conduction. Cela même en tenant compte des nombreuses injections de roches éruptives au milieu de terrains préexistants qui, à côté des [éruptions volcaniques](#) visibles, nous sont connues essentiellement grâce à l'érosion, très postérieure à leur mise en place. Lors d'une intrusion volcanique, une roche éruptive à haute température se trouve assez rapidement mise en place au sein de terrains plus froids, sa forme initiale pouvant être celle d'une cheminée cylindrique (neck), d'une plaque plus ou moins épaisse (dyke), ou d'un amas de forme quelconque. On reconnaît souvent des injections successives dans une même région. Une telle injection se refroidira nécessairement, ne serait-ce que par conduction solide à travers les terrains environnants. Ce refroidissement est assez facile à modéliser par un calcul, qui indique que sa durée est proportionnelle au carré des dimensions, et va de l'année, pour une dimension métrique, au million d'années, pour une dimension kilométrique. On peut suivre aussi l'évolution du profil thermique entre l'intrusion et la surface.

Les zones géothermiques intéressantes du point de vue de l'exploitation industrielle sont donc celles dont la dimension est au moins kilométrique et l'âge inférieur à un million d'années. En outre, une durée longue de l'activité volcanique dans la période récente constitue un critère favorable.

La composition des produits émis par le système volcanique offre un critère supplémentaire. La présence d'un ensemble différencié de laves constitue un critère favorable et les produits acides (rhyolites, trachytes, phonolites) indiquent souvent la présence de chambres magmatiques superficielles, favorables pour le développement de systèmes géothermiques d'intérêt industriel lorsqu'elles sont jeunes.

Il peut arriver que la température dépasse par place celle de la vaporisation de l'eau, sous la pression hydrostatique liée à la profondeur. La vapeur ainsi formée ne peut que s'élever, et réchauffe le terrain là où elle se condense. Ainsi s'ajoute au transfert de chaleur par conduction un transfert extrêmement efficace par convection biphasée (eau descendante et vapeur ascendante). Ces deux phénomènes peuvent prendre place au même endroit, eau et vapeur étant en équilibre, ou s'individualiser en cellules distinctes. On peut, théoriquement, envisager une convection entièrement en phase aqueuse, mais les cellules doivent alors être de grande taille et le terrain extrêmement perméable. Une telle convection en phase aqueuse n'est vraisemblable qu'à haute température, non loin du point critique, et doit passer à la convection diphasique. Cette dernière assure un transfert de chaleur très rapide, et aboutit à une distribution particulière de la température.

Si les terrains sont perméables jusqu'à la surface, l'équilibre des pressions entraînera l'invasion de tout le volume par de l'eau liquide, mais la température est proche de

celle de la vaporisation sous la pression régnant en chaque point. C'est ce qui apparaît clairement sur la figure 3 ^[4], qui indique les profils de température relevés pour plusieurs sondages à Wairakei (Nouvelle-Zélande), où l'on exploite l'énergie géothermique. La convection diphasique peut avoir cessé (partie occidentale du site) ou ne conserver qu'une faible importance et alimenter des manifestations superficielles (partie orientale du site). En l'absence de convection, une telle distribution de température se modifie par conduction solide ; elle sera très atténuée au bout de 100 000 ans et aura pratiquement disparu en 500 000 ans. Des systèmes actifs de ce type sont à l'œuvre dans la plupart des gisements géothermiques de haute température en exploitation dans le monde.



Dessin

Température dans différents sondages Température dans différents sondages, à Wairakei (Nouvelle-Zélande), après un long temps de repos...

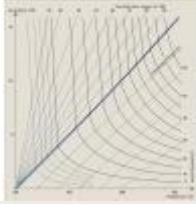
Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter

S'il existe une couverture imperméable, la vapeur s'accumule en dessous, et la convection aboutit à un gisement où un certain volume de terrain a ses pores occupés par de la vapeur ; l'équilibre des pressions, la vapeur étant saturante, entraîne une quasi-uniformité de la température. Une fois formé, le gisement se refroidit par conduction à travers les terrains environnants mais en restant pratiquement isotherme. Cependant, s'il existe du gaz carbonique mélangé à la vapeur, il s'accumule à la partie haute, où la température s'abaisse légèrement. De telles accumulations de vapeur dans les pores d'une masse rocheuse sont connues (et exploitées, comme on le verra plus loin) à Larderello en Italie (1 200 MW installés) et aux Geysers en Californie (3 000 MW installés).

• Explosions phréatiques

Non seulement l'énergie que représente la température atteinte par ces masses rocheuses, relativement proches de la surface, se prête à une exploitation, mais elle peut se manifester spontanément. Si la pression qui maintient l'eau liquide dans les pores d'une roche, par exemple à 200 °C avec une porosité de 10 p. 100, se relâche, l'eau se vaporise, et la chaleur sensible de la roche peut permettre sa vaporisation totale ; l'augmentation de volume qui en résulte est susceptible de fournir un travail mécanique, 30 J/cm³ dans cet exemple par détente jusqu'à la pression atmosphérique. Le diagramme de la figure 4 ^[4] fournit la valeur de ce travail dans une détente adiabatique. Même si les choses sont, en fait, plus compliquées, il est clair que, une fois amorcée la détente initiale par l'ouverture d'une fissure, la vaporisation peut

expliquer une « explosion phréatique » qui a été parfois confondue avec une éruption volcanique, mais qui s'en distingue par la température beaucoup plus basse des produits (avec la présence de minéraux hydrothermaux et non magmatiques), l'énergie disponible étant largement suffisante pour projeter toute la masse à une hauteur notable.



Dessin

Détente adiabatique Travail disponible dans la détente adiabatique du terrain humide.

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter

De telles explosions phréatiques sont connues pour certains volcans (Bandai San, 1888 ; Azuna San, 1893 ; Usu San, 1944, au Japon) et pour plusieurs zones géothermales (île de Milos en Grèce, plateau de Dieng en Indonésie, etc). Elles sont caractérisées par la température relativement basse (de 200 à 300 °C), en comparaison avec les explosions volcaniques (de 800 à 1 200 °C) et l'[humidité](#) des matériaux projetés. On relève de nombreuses traces de telles éruptions anciennes en [Nouvelle-Zélande](#) et dans de nombreuses autres régions actives. Enfin, des sondages exécutés sans précautions suffisantes (cimentation des tubages, refroidissement du puits...) en ont déclenché en Islande, en Californie, en Nouvelle-Zélande et en Indonésie.

La détente brusque d'un terrain dont les pores seraient occupés par une vapeur saturante fournirait beaucoup moins d'énergie, ce qui ne veut pas dire qu'il ne s'est pas produit d'explosions de ce type, mais sans doute sur une échelle beaucoup plus réduite.

En tout état de cause, la présence, reconnue sur le terrain par le géologue, de traces d'explosions phréatiques récentes, constitue un indice extrêmement favorable quant à l'existence d'un gisement géothermique de bonne qualité sur ce site.

3. Interprétation géophysique

L'interprétation globale du flux géothermique est l'un des plus anciens problèmes que se soit posé la géophysique, puisque Buffon déjà en avait tiré l'idée d'un refroidissement de la Terre et avait tenté d'en déduire l'âge de celle-ci. Les boulets de canon pris comme terme de comparaison lui avaient montré, correctement, une durée de refroidissement proportionnelle au diamètre, mais il définissait le terme de leur refroidissement par la possibilité de « les tenir dans la main sans se brûler », ce qui correspond certainement à un flux superficiel bien supérieur au flux géothermique. Aussi l'âge auquel il était parvenu, 63 000 ans, s'il avait fait scandale à l'époque par sa longueur, paraît-il aujourd'hui ridiculement court. Les mêmes calculs repris par [Joseph Fourier](#), puis par William Thomson (lord Kelvin), conduisaient à quelques dizaines de millions

d'années ; mais Kelvin se heurtait à l'impossibilité d'expliquer l'origine de l'énergie rayonnée par le Soleil pendant une telle durée.

La découverte de la [radioactivité](#) a rendu caduques toutes ces considérations ; on admet aujourd'hui que le Soleil et les [étoiles](#) sont le siège de réactions de fusion nucléaire (principalement, transformation de l'hydrogène en hélium), capables d'alimenter leur rayonnement pendant des millions de millions d'années, durées très supérieures à leur âge. Pour la Terre, cette radioactivité actuelle explique qu'elle soit encore chaude plus de 4 milliards d'années après sa naissance. On s'est vite rendu compte que les teneurs en [uranium](#), thorium (et leurs dérivés) et en potassium de roches communes à la surface sont telles que la chaleur dégagée permet de mettre en doute la réalité du refroidissement. Une couche de granite de 50 kilomètres d'épaisseur, avec des teneurs de l'ordre de celles qui sont ordinairement observées, fournirait le flux de chaleur constaté à la surface. Mais les roches basiques ou ultrabasiques peuvent n'avoir que des teneurs entraînant un dégagement de chaleur dix ou cent fois moindre. Or les géologues admettent que, dans les continents, et abstraction faite de la pellicule des roches sédimentaires, les granites et les roches analogues (gneiss, etc.) n'occupent qu'une épaisseur limitée et surmontent des roches basiques et ultrabasiques. Dans les océans, la couche granitique manque complètement, et c'est pourquoi, lorsqu'on a développé l'appareillage permettant la mesure du flux géothermique en mer, on s'attendait à y trouver des valeurs beaucoup plus basses que sur les continents, alors qu'en fait les moyennes sont les mêmes.

• **La distribution des températures dans l'intérieur du globe**

De ce qui précède, il résulte qu'on ne sait pas quelle est la valeur du flux à la base de l'écorce, lequel correspond à une fraction seulement de sa valeur à la surface, compte tenu de la chaleur produite par les éléments radioactifs contenus dans celle-ci. Il n'est pas non plus possible d'affirmer que ce flux est constant, car ses variations éventuelles, à cause de l'inertie thermique de l'écorce, mettraient des centaines de millions d'années à se faire sentir à la surface.

Il n'est donc pas possible d'obtenir, par extrapolation de ce qui est connu au voisinage de la surface, un profil thermique vraisemblable pour le manteau. Il n'existe aucun moyen direct d'évaluer les températures en profondeur. Indirectement, on peut examiner la résistivité électrique, qui, pour les silicates, doit diminuer à haute température, mais dont l'ordre de grandeur en profondeur n'est encore déterminé qu'assez grossièrement. On connaît aussi les vitesses sismiques en fonction de la profondeur ; l'existence d'ondes transversales jusqu'à 2 960 kilomètres (manteau) indique une rigidité caractéristique d'un solide, mais n'exclut pas nécessairement un comportement pâteux, avec une [viscosité](#) élevée.

Nous en sommes donc réduits à concevoir un [modèle](#) (ou une série de modèles) qui soit vraisemblable et satisfasse aux conditions connues à la surface. Sous la croûte, dans le manteau, on retient aujourd'hui que la température moyenne est de 1 300 °C à 100 kilomètres de profondeur.

Il apparaît très vite qu'on ne peut se borner à un modèle de régime permanent, représentant l'état actuel. Les durées impliquées par tout modèle de refroidissement sont en effet notables par rapport à l'âge de la Terre (4,6 milliards d'années) évalué à partir de considérations sur la radioactivité et la composition isotopique des différents plombs. Les hypothèses que l'on fera sur les températures initiales ont encore une influence directe sur la répartition actuelle des températures du modèle. Si l'on envisage une Terre solide, on peut avancer que les températures initiales dans la partie centrale n'ont pas eu le temps de faire sentir leur effet jusqu'à la surface.

Il est à peine besoin de souligner combien sont aléatoires des modèles qui incluent les hypothèses cosmologiques sur l'origine de la Terre. Un tel modèle doit tenir compte de ce que, à côté de la conduction – qui varie d'ailleurs avec la température –, un autre processus de transfert doit entrer en jeu : le rayonnement électromagnétique (lumineux), pour lequel les silicates sont transparents sauf dans certaines bandes d'absorption. Selon la distance moyenne d'absorption, ce rayonnement, fonction de la quatrième puissance de la température, assure un transfert de chaleur avec un coefficient par rapport au gradient qui est proportionnel au cube de la température. Ce transfert radiatif, négligeable en dessous de 1 000 °C, doit être pris en considération à partir de 2 000 °C, et peut devenir prédominant au-delà de 3 000 °C.

D'autre part, nous devons demander à notre modèle d'expliquer comment est engendrée, à partir des phénomènes thermiques, l'énergie mécanique dissipée par les séismes, les déformations tectoniques, y compris les soulèvements qui rajeunissent le relief, la dérive des plaques, etc. Cette énergie peut être estimée à quelque 10⁸ kilowatts. Les hypothèses cosmologiques généralement acceptées font naître le Soleil (comme les autres étoiles) d'un nuage de [matière](#) initialement froide, dispersée sur une grande distance, se condensant sous l'effet de sa propre gravitation. L'énergie potentielle de la gravité, ainsi dissipée, se transforme en chaleur qui, comme l'a montré Helmholtz, peut élever la température du Soleil jusqu'à plusieurs dizaines de millions de degrés. On considère maintenant que cet échauffement permet l'amorçage de réactions nucléaires, en particulier de fusion dont un résultat global est la transformation d'hydrogène en hélium, ce qui peut alimenter le rayonnement du Soleil pendant une durée très supérieure à l'âge de 4,6 milliards d'années que nous lui attribuons.

Pour peu que la matière du nuage primitif soit animée de mouvements aléatoires, la conservation du moment cinétique pourrait imposer à la masse condensée une vitesse

de rotation incompatible avec sa condensation finale. Mais il se fait un partage du moment cinétique, entre la condensation centrale et la matière restée à la périphérie, si bien que nous trouvons aujourd'hui 99 p. 100 de la masse totale dans le Soleil et 99 p. 100 du moment cinétique dans les [planètes](#). (Un autre processus conciliant la conservation du moment cinétique et la condensation stellaire pourrait être la formation d'une étoile double, les deux composantes étant animées d'un mouvement keplérien, cela excluant toute planète. Si la condensation s'était faite en trois noyaux stellaires, les lois du mouvement des trois corps rendent très vraisemblable, à plus ou moins longue échéance, l'expulsion d'une des composantes qui deviendra une étoile simple dépourvue de planètes.)

Cela nous conduit à considérer la Terre comme formée par la condensation d'un nuage de poussière, initialement de grande dimension. La chaleur alors fournie par la condensation, jusqu'à former une sphère homogène du rayon de la Terre, serait suffisante pour porter celle-ci à une température uniforme de l'ordre de 50 000 °C. Mais il n'est pas du tout certain que cette température ait effectivement été atteinte, le dégagement de chaleur se produisant surtout à la surface et dans la phase finale, ce qui permet peut-être sa dissipation par rayonnement. En revanche, la différenciation qui a conduit les éléments les plus lourds à se rassembler dans le noyau, phénomène que l'on peut considérer comme postérieur à la condensation initiale, aurait fourni assez de chaleur pour élever toute la masse à 6 000 °C, soit sept fois le flux géothermique actuel pendant 4,6 milliards d'années.

Même en rejetant les hypothèses « chaudes » (une goutte de matière extraite du Soleil et qui se refroidit ensuite) pour l'origine de la Terre comme on le fait aujourd'hui, une hypothèse « froide » – comme celle que nous avons esquissée – conduit à des températures élevées, qui expliquent très largement le flux observé aujourd'hui (il faut même le supposer plus élevé dans une phase initiale de l'histoire de la Terre).

Encore ne peut-on exclure la présence d'éléments radioactifs dans le noyau et/ou le manteau à des teneurs assurément très inférieures à celles que nous observons dans les roches de l'écorce (où le dégagement de chaleur des éléments radioactifs était quatre fois plus important il y a 4,6 milliards d'années qu'aujourd'hui). La présence de tels éléments est même aujourd'hui communément acceptée, et les hétérogénéités géochimiques du manteau contribueraient à expliquer la genèse et la localisation des mouvements convectifs.

Parmi les effets que tout modèle de la structure interne du globe doit expliquer figure également le champ magnétique. L'analyse harmonique de sa partie d'origine interne montre que sa source est très profonde, et qu'on peut la placer dans le noyau dense, dont l'existence est prouvée par la valeur de l'aplatissement polaire, et la profondeur

(2 860 km) établie par la sismologie. On admet que ce noyau liquide (les ondes sismiques transversales ne s'y propagent pas) est formé de fer et qu'il est brassé par des courants tels que, la matière se déplaçant dans le champ magnétique, des courants électriques y prennent naissance, qui entretiennent ce même champ magnétique. On peut démontrer que ce processus – magnétohydrodynamique – est possible. L'énergie dissipée pour produire, et surtout pour faire varier le champ magnétique, ne peut provenir que de la convection thermique qui brasse le noyau. S'il est vraisemblable qu'une « graine » (rayon = 1 000 km), sismiquement plus rapide, est formée par la condensation du fer solidifié, le jeu de ces courants implique un flux de chaleur du noyau vers le manteau, même s'il est très inférieur au flux superficiel. L'absence de champ magnétique sur la [Lune](#), [Mars](#) et Mercure fait penser que, si ces astres ont comporté un noyau, il est aujourd'hui entièrement figé, ce qui pourrait se produire pour la Terre dans un avenir lointain.

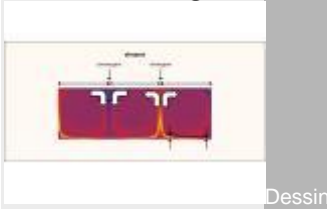
On ne peut retenir l'hypothèse selon laquelle le transfert de chaleur dans le manteau (à des profondeurs de 40 à 2 860 km) – entre le flux issu du noyau et celui dissipé vers la croûte – se ferait uniquement par conduction et transfert radiatif. Il y faudrait des gradients conduisant à la base du manteau, à des températures difficilement conciliables avec la rigidité attestée par les vitesses des ondes sismiques, longitudinales (P) et transversales (S). Mais, surtout, l'origine de l'énergie mécanique dissipée par les séismes, les déformations tectoniques et la dérive des plaques serait inexplicable. C'est là la raison principale qui oblige à envisager des courants de convection dans le manteau (on peut montrer facilement que la vieille hypothèse d'une contraction par refroidissement est totalement inadéquate).

Le manteau, rappelons-le, se comporte de manière rigide et élastique pour des variations de contrainte de périodes de l'ordre de la seconde (il transmet les ondes sismiques transversales S), et même du jour et du mois (marées). Mais ce n'est pas incompatible avec une viscosité à long terme, c'est-à-dire une déformation très lente, proportionnelle au déviateur de la contrainte. La forme d'ensemble du globe montre que, en dessous d'une écorce rigide, une telle viscosité existe – elle est postulée par la théorie de l'isostasie –, et la vitesse de remontée de la [Scandinavie](#) depuis la fusion du glacier [quaternaire](#) (disparition de la moitié de l'écart à l'équilibre en 6 000 ans, pour un bloc de 2 000 km de diamètre) permet de calculer cette viscosité (10^{21} poises).

Le calcul, fait pour un modèle simple, certainement non réaliste, montre que, avec les données dont on dispose, des courants de convection sont possibles, à condition d'être très larges (plusieurs milliers de kilomètres), très lents (de quelques centimètres à quelques décimètres par an), mettant en jeu des écarts de quelques dizaines de degrés.

La durée de révolution de tels courants – de l'ordre de la centaine de millions d'années – peut correspondre au rythme des phases tectoniques majeures.

Au niveau de la croûte, la différence de température entre le toit du manteau (1 300 °C à 100 km) et la surface (proche de 0 °C), et le changement de densité qui en résulte suffisent à fournir, 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 que des mouvements s'organisent en courants ascendants et descendants reliés par des mouvements horizontaux (fig. 5 ⁴⁴), c'est-à-dire une circulation en boucle (ou en rouleau) qui est responsable des mouvements de convergence et de divergence des plaques crustales. Aux mouvements ascendants du manteau correspondent des mouvements divergents des plaques, et aux mouvements descendants du manteau les frontières de plaques convergentes et la [subduction](#). C'est ce phénomène qui a fourni l'explication et déterminé le nom de la « tectonique des plaques ». Les plaques sont amincies dans les zones divergentes et épaissies dans les zones convergentes.



Géothermie : courants profonds et surface terrestre Coupe verticale du champ de température dans un système convectif montrant les relations entre courants profonds et déformation de la surface. Les zones les plus claires sont plus chaudes que la moyenne et s'élèvent sous l'effet de la force d'Archimède. À la surface, le résultat est un mouvement...

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter

On sait maintenant que l'augmentation de rigidité de la matière, entre 400 et 900 kilomètres, qui se traduit par une augmentation des vitesses sismiques supérieure à celle qu'on pourrait attendre pour une matière homogène, tient au passage de certains minéraux à des formes plus denses de haute pression : l'olivine passe à une structure de spinelle cubique, la [silice](#) prend les formes denses de coésite et stishovite, qui remplacent le quartz, etc. Cela écarte ce qui aurait pu être une objection à l'hypothèse des courants de convection.

Il convient de noter que, aux vitesses envisagées, l'inertie ne joue absolument aucun rôle ; il n'y a aucune raison pour que les vitesses soient continues. Sur la forme des courants de convection, la meilleure indication nous est sans doute fournie par la disposition des plaques, les rifts médio-océaniques correspondant aux branches ascendantes.

Pour compléter le dispositif, il faut ajouter un autre phénomène : le mouvement ascendant convectif localisé. D'une forme cylindrique, ce « point chaud » ou « panache » explique les sites volcaniques comme celui de Hawaii, fort loin du rift du Pacifique oriental. Cette île au volcanisme intense a, dans le passé géologique – au fur et à mesure du défilement de la plaque au-dessus du point chaud – engendré successivement les îles et les guyots (volcan sous-marin non émergé), qui constituent la chaîne sous-marine « Empereur » entre le Kamchatka et Hawaii. La même explication du « point chaud » prévaut pour les îles du Pacifique sud et la Réunion.

Du moment que l'on envisage des courants de convection thermique, il faut se poser la question d'une différenciation des densités. Nous savons que des produits volatils s'échappent des volcans ; la branche descendante devient donc, fût-ce de peu, plus dense que la branche ascendante. Ce même processus de différenciation par gravité a pu, dans une phase initiale, jouer un rôle essentiel dans la différenciation du noyau ; si atténué qu'il soit aujourd'hui, il faut en constater la continuité.

On sait que la viscosité varie très rapidement avec la température. La distribution des températures dans le manteau est telle que la viscosité qui en résulte autorise les lents courants de convection qui permettent l'évacuation de la chaleur provenant du noyau. Si la température était plus élevée, le refroidissement serait plus rapide. Si elle était plus basse, la chaleur ne s'évacuerait pas et il y aurait un réchauffement. La distribution des températures résulte donc d'une autorégulation. Cela ne veut pas dire qu'elle soit permanente, et un ralentissement progressif de cette activité thermique est vraisemblable, mais à l'échelle de milliards d'années.

On sait maintenant en outre que le [manteau terrestre](#) est hétérogène. La composition du manteau joue probablement un rôle important dans l'organisation des mouvements en son sein. Selon les hypothèses les plus répandues, un régime de « dômes » correspondant aux parties du manteau les plus riches en éléments légers (« hygromagmatophiles ») et radiogéniques serait à l'origine des systèmes convectifs (panaches et dorsales).

Jean GOGUEL

Jacques VARET


4. Types de champs géothermiques exploitables

Un projet géothermique consiste à exploiter la chaleur contenue dans une masse rocheuse au moyen d'un fluide caloporteur. 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, produit de la perméabilité k et de la hauteur utile h , exprimée en darcy-mètre.

La perméabilité des formations géologiques peut résulter de trois types de situations :

- soit elle provient de la nature de la formation géologique d'origine elle-même ; c'est notamment le cas, dans les roches sédimentaires, des calcaires (karstiques) et des sables et grès, ou encore des coulées de laves basaltiques, souvent scoriacées et fissurées ;
- soit elle provient de l'effet de mécanismes postérieurs, comme la fracturation tectonique, fréquemment bien développée dans ces zones géologiques actives ; le travail du géologue consiste alors à identifier les failles actives et les zones tectoniques fissurées ;
- soit elle provient du phénomène géothermique lui-même. L'altération hydrothermale contribue soit à imperméabiliser les terrains superficiels (il s'agit notamment de « l'autocolmatage » ou « self-sealing » produit par hydratation des silicates – chlorite, kaolinite...), soit à les rendre perméables (les transformations en albite et épidote produisent des assemblages souvent poreux, fragiles et cassants).



Divers types de situations géologiques permettent ainsi la superposition de ces deux conditions – gradients de température et transmissivité – favorables à l'existence d'un champ géothermique (tabl. 1 ). Les transmissivités varient de 10 à 100 darcy-mètres, et les gradients de 3 à 30 degrés par cent mètres.


A small table with a light green background, containing text and some icons. The text is too small to read clearly, but it appears to be a classification table for geothermal fields. The table has several columns and rows, with some cells containing small icons or symbols.

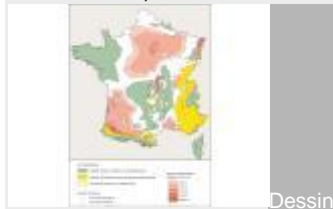
Tableau

Géothermie : classification des champs Classification des champs géothermiques (avec quelques exemples d'application).

Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter

Le type de gisement le plus répandu en France appartient à la première catégorie. Ces gisements 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 (fig. 6  ) par le Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M.) dans les années 1970. 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

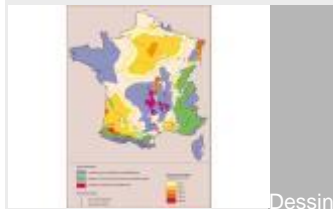
les formations géologiques de l'Albien, du Lusitanien, du Dogger et du Trias sont les meilleures (tabl. 2 ). Les plus superficielles participent au chauffage d'ensembles d'habitations ou de piscines, l'appoint étant fourni soit par des pompes à chaleur, comme à la Maison de la Radio à [Paris](#), soit par des combustibles classiques. 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 1970-1980, 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.



Dessin

Géothermie : ressources de la France Ressources géothermiques de la France (d'après B.R.G.M., 1978).

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter



Dessin

France : ressources géothermiques Ressources géothermiques de la France (d'après B.R.G.M., 1978).

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter

Localisation	Température (°C)	Profondeur (m)	Utilisation
Alsace	12-15	100-200	Chauffage individuel
Limagne	12-15	100-200	Chauffage individuel
Bassin Aquitain	12-15	100-200	Chauffage individuel
Vallée de la Saône et du Rhône	12-15	100-200	Chauffage individuel
Alsace	12-15	100-200	Chauffage individuel
Limagne	12-15	100-200	Chauffage individuel
Bassin Aquitain	12-15	100-200	Chauffage individuel
Vallée de la Saône et du Rhône	12-15	100-200	Chauffage individuel
Alsace	12-15	100-200	Chauffage individuel
Limagne	12-15	100-200	Chauffage individuel
Bassin Aquitain	12-15	100-200	Chauffage individuel
Vallée de la Saône et du Rhône	12-15	100-200	Chauffage individuel
Alsace	12-15	100-200	Chauffage individuel
Limagne	12-15	100-200	Chauffage individuel
Bassin Aquitain	12-15	100-200	Chauffage individuel
Vallée de la Saône et du Rhône	12-15	100-200	Chauffage individuel

Tableau

France : localisation des ressources Localisation des ressources géothermiques.

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter


D'importantes réserves d'eau chaude, à des températures de 12 °C à 150 °C sont donc disponibles en France. Elles sont tellement abondantes qu'une exploitation des nappes suffirait à couvrir la quasi-totalité des besoins calorifiques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, soit 40 millions de tonnes d'équivalent pétrole (tep) par an.

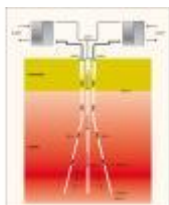
Le second type de gisement est moins fréquent mais plus spectaculaire : lorsque les roches sont fracturées ou fissurées, l'eau s'infiltré, se réchauffe en profondeur et remonte vers la surface en donnant des sources thermales. Les calories peuvent alors être extraites en surface, ce qui s'est fait depuis 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 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, à Bouillante.

Enfin, un nouveau type de géothermie pourrait voir le jour, par mise en production des roches profondes. Comme elles ne sont le plus souvent ni perméables ni poreuses, il est 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 est encore du domaine de la recherche et n'a pas vu d'application économique. Il est possible que l'on parvienne dans les zones à gradient élevé (plus de 10 °C par cent mètres) à une production d'énergie électrique dans des conditions économiques si les recherches aboutissent. Des expériences ont été menées à Los Alamos (Nouveau-Mexique), de 1972 à 1992 : des forages à 3 000 mètres de profondeur ont permis d'atteindre 200 °C, mais les essais 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.

Un projet européen se poursuit à Soultz-sous-Forêts, en Alsace, où une température de 146 °C a été atteinte à 2 000 mètres 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 géophysique (1 400 à 2 200 m). 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 scientifique avec la réalisation de trois forages à 5 000 mètres et la construction d'une centrale de production d'électricité à fluide binaire d'une puissance de 5 à 6 mégawatts. Par la suite un prototype industriel capable de produire 25 mégawatts devrait être construit (fig. 7 .



Dessin

Énergie géothermique Schéma du système de production d'énergie géothermique par injection et fracturation profonde au site européen de Soultz-sous-Forêts (Alsace) [d'après B.R.G.M., « La Géothermie », 2004].

Crédits: *Encyclopædia Universalis France* Consulter

Le calcul montre que, si le dispositif confirme ses potentialités, la mise en exploitation géothermique de 3 p. 100 de la surface de l'Alsace 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 centrales nucléaires pendant plusieurs décennies. 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 par sa rentabilité. Or il s'agit d'une énergie chère, car elle nécessite des forages à grande profondeur, mais propre et locale, et il est probable que les prix de l'énergie augmenteront dans le futur, avec l'épuisement des ressources fossiles et la prise en compte de la dimension environnementale.

Ces différentes formes d'énergie géothermique connaîtront des développements variés selon les régions en fonction des caractéristiques géologiques 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. Dans de nombreux pays du monde, en Amérique latine, en Afrique de l'Est et en Asie du Sud-Est en particulier, c'est plutôt la production d'électricité qui est le plus à même de contribuer de manière significative au bilan énergétique.

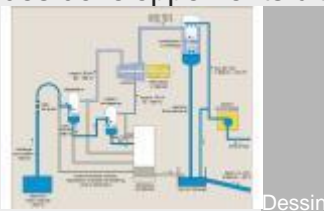
5. Divers types d'applications industrielles

Quatre types principaux de systèmes géothermiques peuvent être distingués en fonction des caractéristiques de l'utilisation finale.

• La géothermie de haute énergie classique

Caractérisée par des températures de fluides de 150 à 320 °C, la géothermie de haute énergie classique (fig. 2) ne peut se développer que dans des zones particulières dans lesquelles des phénomènes de convection magmatique produisent des anomalies de flux entraînant la formation de réservoirs superficiels d'eau chaude pressurisée ou de vapeur. Un gisement de géothermie peut être mis en évidence par des travaux d'exploration, qui visent – sur la base d'études géologiques, géochimiques et

géophysiques de terrain – à identifier la source de chaleur magmatique, le réservoir et la couverture. La faisabilité du projet ne peut être engagée qu'après une campagne de forages de reconnaissance permettant d'évaluer les caractéristiques techniques et l'économie du projet. Au stade de la réalisation industrielle, on produit par forages un mélange eau-vapeur, dont on sépare la vapeur, ou de la vapeur sèche qui, déchargée dans des turbines, permet de produire de l'électricité à un coût extrêmement compétitif. Le développement du gisement peut être modulaire (par ajouts successifs d'unités de 10 à 50 MW). L'Italie a été le pays pionnier, suivi de la Nouvelle-Zélande et des États-Unis. Pour la France, une centrale de 5 mégawatts a été mise en production en 1983 à Bouillante, en Guadeloupe (fig. 8 ¹⁴), une seconde unité de 10 mégawatts a été mise en service en 2005, et une extension du gisement a été identifiée par le B.R.G.M., propice à des développements ultérieurs.



Installation de Bouillante, en Guadeloupe Schéma de l'installation géothermique de Bouillante (Guadeloupe).
 Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter

On dénombre, au début du ^{xxi} siècle, un peu plus de 350 installations géothermiques de production d'électricité dans une vingtaine de pays. La puissance totale de ces centrales est d'environ 10 gigawatts, soit environ 0,3 p. 100 de la puissance mondiale installée.

Très loin derrière l'hydroélectricité, en nombre de mégawattheures produits, la géothermie reste cependant, avec la biomasse et l'éolien, l'une des trois autres sources principales d'électricité renouvelable dans le monde. La disparité géographique de la production découle de celle des ressources. Les principaux pays producteurs se situent sur la périphérie du Pacifique : six dans les Amériques pour 3 390 mégawatts, cinq en Asie pour 3 100 mégawatts, deux en Océanie pour 437 mégawatts.


On compte six pays producteurs en Europe, pour une puissance de 1 300 mégawatts, et deux seulement en Afrique de l'Est pour 54 mégawatts (alors que la ressource est importante). La géothermie couvre 0,4 p. 100 des besoins mondiaux en électricité.

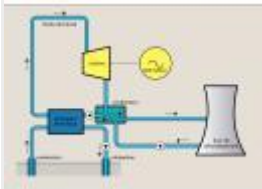
Toutefois, dans certains pays sa contribution aux besoins nationaux peut atteindre plusieurs dizaines de pour-cent. Avec 202 unités réparties sur 22 champs géothermiques (Californie, Nevada, Utah et Hawaii), les États-Unis arrivent en tête des pays producteurs avec une capacité installée de 2 220 mégawatts et une production importante (15 TWh/a), qui ne satisfait que 0,4 p. 100 des besoins. Viennent ensuite les Philippines (1 900 MW), l'Italie (1 200), le Mexique (755), l'Indonésie (590), le Japon (547), la Nouvelle-Zélande (437), l'Islande (170), le Salvador (161), et le Costa Rica

(142). En France, outre la Guadeloupe, la ressource est présente dans les îles volcaniques de la Martinique et de la Réunion.

La géothermie comme source d'électricité devrait poursuivre son essor dans le monde. Au début du xxi^{e} siècle, l'industrie géothermique est en développement rapide aux Philippines et en Indonésie, en Amérique centrale et au Mexique, et commence à se développer en Afrique de l'Est (Kenya, Éthiopie), en [Turquie](#) et au Portugal (Açores). Mais c'est sans doute en Islande que l'essor est le plus spectaculaire. L'industrie japonaise, qui assure la construction de la plupart des centrales géothermiques dans le monde, domine le marché avec une certaine concurrence italienne, néo-zélandaise et américaine. Les acteurs européens n'existeront sur la scène mondiale que s'ils unissent leurs efforts.

• La géothermie de moyenne énergie (90-150 °C)

La géothermie de moyenne énergie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150 °C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie de haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1 000 mètres. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2 000 à 4 000 mètres. L'exploitation nécessite l'utilisation d'une centrale à cycle binaire et à fluide volatil, ammoniacque ou isobutane (fig. 9 ). Le fluide circule en circuit clos, et il est également possible d'utiliser l'eau pure dans un cycle à détente à très basse pression. Contrairement au cas précédent, où la décharge est faite à l'air libre, les eaux tièdes de rejet sont réinjectées dans l'aquifère sans modification de son chimisme, ce qui évite toute [pollution](#) et assure la réalimentation en eau de gisement. Un certain nombre de prototypes fonctionnent aux États-Unis, en ex-U.R.S.S. et en Chine. À l'exception des petites unités en zones isolées, ou des unités raccordées à des centrales de haute température dont elles exploitent la périphérie, l'intérêt économique de ce type de réalisation reste encore à améliorer. L'augmentation des performances peut porter sur les machines thermodynamiques comme sur l'ingénierie des gisements. En France, les conditions géologiques requises pour ce type d'installation existent en Alsace et en Limagne, ainsi que dans un certain nombre de sites d'activité hydrothermale. Une mini-centrale pilote installée à Chaudes-Aigues (Cantal) au début des années 1980 a permis une démonstration technique et a montré que ce type de production, s'il n'est pas économique en France, peut l'être dans des sites isolés en remplacement de générateurs électriques Diesel. Des opérations de ce type ont été réalisées en Thaïlande et en Indonésie, et devraient se développer en contexte insulaire. L'industrie israélienne a pris une avance certaine sur ces technologies.



Dessin



Production d'électricité par une centrale à cycle binaire Géothermie moyenne énergie (température entre 90 et 150°C). Production d'électricité par une centrale à cycle binaire.

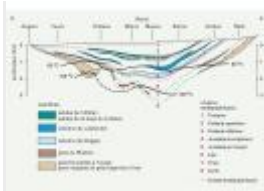
Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter

Nombre d'usages industriels se font entre 100 et 200 °C. Dans ce domaine, le fluide se présente sous forme d'eau et de vapeur. Il peut servir pour le lavage de la laine, le séchage des produits industriels, l'extraction de substances chimiques (récupération des tannins), la fabrication de pâte à papier ou l'évaporation de solutions concentrées (production d'eau douce par dessalement d'eau de mer). Dans certains cas, il est intéressant de récupérer en outre certains sous-produits qui se trouvent dans l'eau géothermale : [iode](#), brome, acide borique, lithium. On peut aussi extraire des gaz dissous, comme le méthane ou le gaz carbonique.

• La géothermie de basse énergie (50-90 °C)

Une ressource abondante dans les bassins sédimentaires

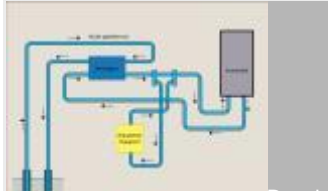
La géothermie de basse énergie peut se développer dans des zones à gradient normal (fig. 10 ) où des formations géologiques favorables (porosité, perméabilité, épaisseur importantes) sont situées à une profondeur suffisante pour atteindre les températures que l'on cherche (71 °C à 1 800 m pour un gradient normal). Cette géothermie trouve ses applications dans le chauffage urbain (fig. 11 ) . Dans la plupart des cas, la réinjection est recommandée, non seulement pour protéger l'environnement (les eaux sont salines), mais aussi pour maintenir la pression du gisement et, plus généralement, pour permettre une meilleure exploitation à long terme. Ce type de géothermie est économique à l'heure actuelle en France. La faisabilité des opérations doit être déterminée cas par cas. En effet, d'une part, la ressource est très diverse selon les régions (profondeur des nappes exploitables, souvent superposées, variant de 800 à 3 000 m) et, d'autre part, le type de besoin en surface (nombre de logements à raccorder, dispersion, mode de chauffage dans les locaux) varie et doit être adapté au mieux à la ressource. Les potentiels énergétiques de ce type de géothermie sont bien connus grâce aux nombreuses campagnes pétrolières dont les résultats sont en général disponibles dans les zones de bassins sédimentaires grâce aux travaux de synthèses du B.R.G.M. (tabl. 2). Les problèmes de corrosion, rencontrés au début du développement dans les années 1980, sont aujourd'hui bien maîtrisés.



Diaporama

Bassin parisien : aquifères profonds Coupe schématique des aquifères profonds du Bassin parisien (d'après B.R.G.M., 1978).

Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter



Dessin

Chauffage urbain Géothermie basse énergie (température entre 50 et 90°C). Utilisation pour le chauffage urbain.

Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter

Abondante en France (Bassin parisien, Bassin aquitain, Alsace, couloir rhodanien), ce type de ressource est disponible dans de nombreuses régions du globe : les grands bassins sédimentaires du nord de l'Europe, le bassin de l'Amazonie et du Río de La Plata en Amérique du Sud, la région de Boise (Idaho) et le bassin du Mississippi-Missouri aux États-Unis, le Bassin pannonien en Hongrie, le Grand Bassin artésien en [Australie](#), la région de Pékin et l'Asie centrale... Si le chauffage urbain reste l'application la plus répandue, d'autres usages sont possibles, qui ne dépendent que de l'imagination et du besoin des êtres humains.

Le doublet géothermique

Les techniques d'exploitation des puits géothermiques sont voisines de celles de l'industrie pétrolière. Même si le puits est artésien, on a souvent intérêt à prévoir dans le puits de production une pompe immergée qui permet d'augmenter les débits pour atteindre 200 à 300 mètres cubes par heure. Que ce soit pour des raisons d'environnement (éviter tout rejet en surface) ou de bonne gestion de la ressource, le doublet est la technique recommandée. Pour des profondeurs supérieures à 1 000 mètres, les eaux de formation peuvent avoir une teneur en sels très élevée (les eaux du Dogger dans le centre du Bassin parisien ont une salinité supérieure à 20 grammes par litre). Ces eaux ne peuvent être rejetées en surface après extraction de leurs calories sans risques de pollution importants et doivent alors être réinjectées dans la nappe. La réinjection a aussi l'avantage de maintenir constant le potentiel de production de la nappe. Elle peut donc s'imposer, même si le fluide géothermal n'est pas polluant, quand il y a risque de voir baisser le débit à défaut de réalimentation naturelle de la nappe.

Pendant l'exploitation d'une nappe par doublet, une zone froide se crée autour du puits de réinjection ; cette zone s'étend peu à peu et finit par atteindre le puits de production. La distance entre le point d'injection et le point de production dans le réservoir est calculée de façon à obtenir une production à température constante pendant la durée de vie de l'installation (au minimum trente ans, fig. 12 ⁴). Par la suite, le modèle prévoit un refroidissement très lent : de 1 à 4 °C tous les dix ans suivant les cas. Les doublets actuellement exploités en région parisienne ne présentent pas de signe de vieillissement de ce type malgré 20 à 30 années d'exploitation. Des problèmes de corrosion ont été rencontrés sur plusieurs sites, dont le fluide était particulièrement riche en sulfure dissous. Les recherches menées depuis ont permis de développer des techniques de nettoyage et de protection des tubages. Dans quelques cas, la réinjection pose des problèmes du fait de phénomènes de colmatage du puits ou du réservoir. Des progrès techniques significatifs réalisés ces dernières années ont généralement permis de résoudre ces difficultés.



Doublet Schéma d'un doublet géothermique.

Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter

Une utilisation par réseau de chaleur

Un doublet géothermique constitue un investissement significatif, qui n'est rentabilisé que si un nombre suffisant de logements peuvent être raccordés. Le débit doit être suffisant pour répondre aux besoins de plusieurs milliers de logements. Ce type de géothermie est en conséquence lié à l'existence d'un réseau de chaleur. Dans le cas du chauffage urbain, la puissance maximale de la chaufferie est calculée pour pouvoir maintenir la température intérieure des locaux au niveau désiré dans les conditions climatiques les plus défavorables. Dans la région parisienne, on choisit le seuil de -7 °C , mais la température extérieure n'est inférieure à $+6\text{ °C}$ que pendant 27 p. 100 de la saison de chauffe, de sorte que la puissance maximale n'est sollicitée que quelques jours par an et que, pendant la plus grande partie de l'année, la puissance est inférieure à la moitié de la puissance maximale. De ce fait, la géothermie trouve sa rentabilité maximale dans un système à deux sources. Ainsi, une source géothermique de base ne représentant que 40 p. 100 de la puissance maximale peut fournir 83 p. 100 de l'énergie calorifique totale pour le chauffage, la source d'appoint n'étant sollicitée que pendant les périodes de grands froids.

C'est cette solution qui est adoptée pour le chauffage urbain par géothermie, la participation de cette dernière dans la puissance totale étant déterminée après un calcul

d'optimisation qui dépend principalement des caractéristiques de la ressource (température, débits possibles), du nombre de logements à desservir, du système d'émission de chaleur dans les logements (température de retour) et des conditions climatiques locales. Prenons pour exemple un ensemble de 3 000 logements situé dans la région parisienne sur un site où la ressource géothermique est une nappe, avec une température de 70 °C et un débit maximal par pompage de 200 m³/h. Les puissances nécessaires pour obtenir ce débit sont de 80 kW à l'extraction et 200 kW à la réinjection. Les émetteurs de chaleur, anciens, fonctionnent avec une température de 75 °C par — 7 °C à l'extérieur ; avec l'eau chaude sanitaire, l'énergie consommée était de 3 000 à 4 000 tep/an. Les investissements couvrant les forages et la boucle géothermale, la centrale et le réseau, étaient de 7 millions d'euros, soit un investissement de 2 000 euros par [tep](#). Compte tenu des charges de fonctionnement, qui incluent essentiellement l'électricité pour les pompes, les provisions pour remplacement de matériels et les assurances, les délais de retour des investissements varient de 5 à 10 ans et les taux de rentabilité internes des projets de 8 à 16. Les caractéristiques économiques des installations varient considérablement selon les sites, qu'il s'agisse des caractéristiques de la ressource ou de la surface, notamment les températures de retour des émetteurs de chaleur dans les logements : la puissance d'origine géothermique est égale à $P = Q (T_{pr} - T_{re})$, où Q est le débit en mètres cubes par heure, T_{pr} et T_{re} respectivement les températures de production et de réinjection. Cette puissance est d'autant plus élevée que la température de réinjection et donc celle du retour du circuit secondaire sont plus basses.

Outre le chauffage urbain et les applications qui peuvent être directement raccordées, comme les hôpitaux, les piscines ou les lycées et collèges, la géothermie peut aussi être déployée au service de l'agriculture et de l'industrie.

Le chauffage des serres par air ou par sol constitue un domaine important d'application car beaucoup d'énergie est nécessaire pour ce type d'agriculture : en moyenne, en Europe, 200 tonnes de fioul par hectare et par an pour des cultures maraîchères et 400 tonnes pour les cultures florales. Utiliser la chaleur du sous-sol représente donc le meilleur moyen de faire des économies tout en protégeant l'environnement. Dans ces applications, la fourniture est calculée pour tenir compte de l'ensoleillement dans la journée et de la chaleur fournie par effet de [serre](#). Ainsi, l'exploitation mise en service en 1992 à Lamazère (Gers), comporte 3,6 hectares de serres destinées à la production de [plantes](#) tropicales comme le yucca : à partir de sables de l'Éocène, à 1 700 mètres de profondeur, un puits produit de l'eau douce à 57 °C.

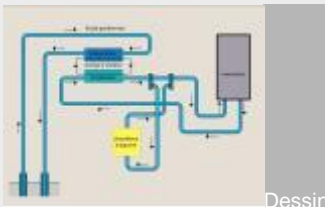
La pisciculture est une autre application intéressante. Une élévation de la température de quelques degrés, et surtout le maintien d'une température constante (une des

grandes qualités de l'eau géothermale), suffisent à augmenter le [métabolisme](#) des poissons et [crustacés](#). Leur maintien dans une eau tiède prolonge leur possibilité de croissance. Une installation de pisciculture comporte un puits unique ou un doublet. L'installation de Mios-le-Teich (Gironde) utilise un ancien forage pétrolier réhabilité pour un usage géothermique. Les eaux à 74 °C puisées à 1 830 mètres de profondeur permettent de produire annuellement, avec un échangeur, 70 tonnes d'esturgeons et quelques centaines de kilos de caviar.

Enfin, des thermes classiques aux piscines olympiques, en passant par des centres de vacances sous bulle avec animaux exotiques, plantes tropicales et toboggans d'eau chaude, les applications de loisirs ont un bel avenir. Parmi les installations les plus originales : les immenses serres des jardins tropicaux d'Atagawa, au Japon, avec leur élevage de crocodiles, d'oiseaux exotiques et de tortues géantes, construites sur des thermes qui datent du xv^e siècle, ou encore les stations thermales populaires de la grande plaine du nord de la Hongrie.

• La géothermie de très basse énergie (12-50 °C)

Les nappes souterraines peu profondes (de quelques dizaines à quelques centaines de mètres) présentent des températures qui varient de 12 à 50 °C selon la profondeur. La ressource peut servir pour des utilisations de chauffage et d'eau chaude sanitaire en ajoutant en surface une pompe à chaleur, qui permet de transférer de l'énergie d'un niveau à basse température vers un niveau à température plus élevée (fig. 13⁸⁴). Ce transfert consomme de l'énergie, mais l'énergie totale restituée par la pompe à chaleur est bien supérieure à celle qui est fournie pour la faire fonctionner. On parle d'un « coefficient de performance » qui peut varier de 4 à 5, voire plus pour les machines les plus récentes. Ainsi, les pompes à chaleur, à compression ou absorption, permettent de produire de l'eau chaude (sanitaire ou pour le chauffage, à 50 ou 60 °C) à partir d'une ressource à basse température (12 à 30 °C). Elles peuvent, à l'inverse, servir pour le refroidissement ou la climatisation : il suffit d'inverser le circuit de fonctionnement.



Chauffage urbain avec pompe à chaleur Géothermie très basse énergie (température entre 20 et 50°C).

Utilisation pour le chauffage urbain avec pompe à chaleur.

Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter

Lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le proche sous-sol, on peut encore exploiter la chaleur diffuse en implantant dans la terre, verticalement ou horizontalement, des capteurs chargés d'un fluide caloporteur. Associés à une pompe à chaleur, ils offrent pratiquement les mêmes avantages. Pour une maison individuelle, la profondeur d'une sonde verticale

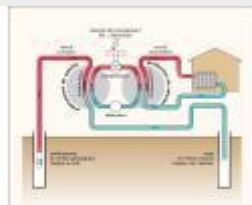
sera comprise entre 30 et 150 mètres. Le dispositif peut être installé dans n'importe quel milieu géologique. Selon la nature du sous-sol, on choisira la formule la plus adaptée : aiguilles, serpentins, forages (fig. 14 et 15).



Dessin

Énergie géothermique Divers procédés de captage de la chaleur superficielle pour le chauffage individuel par géothermie avec pompe à chaleur (source : B.R.G.M., « La Géothermie », 2004).

Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter



Dessin

Chauffage par géothermie Schéma conceptuel du système de chauffage de logement individuel par géothermie superficielle avec pompe à chaleur (source : B.R.G.M., « La Géothermie », 2004).

Crédits: Encyclopædia Universalis France Consulter

Cette forme de géothermie est celle qui se développe en Europe au début du XXI^e siècle. On comptait environ 13 000 opérations réalisées en 2005, en France, dans le neuf individuel. L'investissement correspondant est de 10 000 euros à 20 000 euros pour une maison individuelle, selon les caractéristiques de la maison et les options retenues en matière de capteur géologique. Le système qui en résulte libère totalement des énergies fossiles, et consomme en électricité entre le tiers et le quart d'une installation traditionnelle (effet joule). Les coefficients de performance sont en amélioration constante.

Le taux de progression est de 20 à 30 p. 100 par an en France. Cette pénétration rapide est due aux coûts croissants des énergies de référence ainsi qu'à une fiscalité favorable. À court terme, on pourrait atteindre 40 000 opérations par an dans le neuf individuel en France, à la fois par augmentation du marché des pompes à chaleur et par une croissance de la part géothermie/air-air. Cela représenterait à peine 20 p. 100 des équipements individuels. En escomptant d'en faire alors dans l'ancien autant qu'aujourd'hui dans le neuf, on atteindrait 300 000 logements installés (250 000 neufs + 50 000 anciens) soit 300 ktep à l'horizon de 2010. Une hypothèse plus ambitieuse viserait à atteindre 50 p. 100 du marché du neuf individuel, soit 90 000 opérations par an en 2010, et autant dans l'existant ; on dépasserait 600 000 logements équipés de pompes à chaleur géothermales en 2010, soit 600 ktep. Des taux de pénétration supérieurs pourraient être envisagés par développement de l'offre.

Ce type de géothermie trouve aussi des applications en agriculture (serres et pisciculture) et balnéothérapie (piscines, etc.). Il permet un couplage souple avec d'autres sources énergétiques (rejets thermiques industriels ou énergie solaire). La combinaison géothermique-solaire, ou héliogéothermie, est très prometteuse à long terme (il s'agit d'énergies renouvelables). C'est une des options de l'« habitat à énergie positive » de demain.

6. Avenir de la géothermie

L'humanité s'est développée, depuis des millénaires, dans un équilibre fragile et évolutif avec les milieux physiques – eau, air, sol, sous-sol – et avec l'ensemble des autres espèces vivantes. Le développement extraordinairement rapide des sociétés humaines au cours de l'ère industrielle a largement bénéficié de l'exploitation – de plus en plus intensive – des ressources énergétiques fossiles. Depuis les années 1950, la prépondérance du pétrole a conduit à négliger les autres [ressources naturelles](#). En effet, dans la période de l'après-guerre (1950-1970), on pouvait pratiquement négliger le coût de l'énergie dans les choix d'investissements ; on n'avait pas conscience des limites des ressources fossiles. Ce faisant, quelques générations seulement – et plus précisément, en leur sein, celles de l'hémisphère Nord – auront réussi le tour de force, d'une part, d'épuiser une bonne part des ressources d'[hydrocarbures](#) accumulées au cours de plusieurs centaines de millions d'années dans les couches géologiques de la planète et d'autre part, d'émettre dans l'atmosphère de telles quantités de composés carbonés gazeux que le climat va s'en trouver profondément modifié.

Cette option non durable, il est grand temps de la remettre en cause et de choisir des formes de développement à la fois moins énergivores et substituant aux énergies fossiles des énergies qui ne rejettent pas de gaz à effet de serre. Parmi celles-ci, la géothermie est encore peu sollicitée au regard de son potentiel. La géothermie n'est pas vraiment une énergie nouvelle : elle a été utilisée de longue date pour le thermalisme et le site de Larderello est exploité depuis 1902. Plus généralement, depuis le début du ^{xx} siècle et surtout l'après-guerre, la géothermie a trouvé sa place dans la plupart des procédés énergétiques modernes (production d'électricité, chauffage). Dans les années 1970, l'énergie nucléaire a remplacé le pétrole comme mirage énergétique. Mais les cours élevés de l'énergie et les problèmes d'environnement et de prolifération nucléaire ont incité au développement d'autres ressources, parmi lesquelles la géothermie est susceptible d'occuper une place importante. Les développements technologiques les plus significatifs ont vu le jour dans les années 1970-1980, mais, au milieu des années 1980, le cours du pétrole s'est effondré, et les prix bas se sont maintenus pendant une vingtaine d'années. Trop souvent – ce fut le cas en France

notamment –, cette pose a entraîné l'abandon des efforts en matière de diversification. La géothermie a ainsi gardé le statut d'« énergie nouvelle » jusqu'à la fin du millénaire. Depuis quelques années, les prix du pétrole ont retrouvé un niveau élevé. En outre, la mise en œuvre des politiques de lutte contre le [changement climatique](#) (convention-cadre des [Nations unies](#) sur les changements climatiques, protocole de Kyōto...) se traduit dans les politiques nationales et européennes (obligation d'achat des [énergies renouvelables](#) à des prix rémunérateurs), et les systèmes de financement internationaux (comme le Fonds pour l'environnement mondial). Ainsi se créent des mécanismes favorables au développement des énergies renouvelables.

L'humanité devrait ainsi entrer dans une période d'utilisation plus courante de ces énergies, et mieux en mesure d'édifier les structures industrielles que leur développement nécessite. Ces énergies intégrées dans l'espace naturel, et de gestion décentralisée, conviennent aussi aux aspirations de développement régional et d'initiatives locales.

Au niveau mondial, la répartition des ressources exploitables dans des conditions compétitives au plan économique, avec des technologies bien maîtrisées, y compris pour des pays en développement, montre que les perspectives de développement restent importantes, tant en haute qu'en basse énergie.

L'abaissement des coûts de production de l'énergie géothermique peut être obtenu par une multiplication des opérations et une normalisation des produits, une meilleure gestion globale des moyens et le développement des recherches technologiques. Par exemple, l'augmentation du nombre de forages permet, d'une part, de réduire les coûts et, d'autre part, de mieux planifier l'utilisation des machines. Les recherches sur les problèmes de corrosion permettent d'abaisser les coûts des échangeurs et des tuyauteries.

La géothermie doit être considérée dans le cadre plus global de la gestion des ressources du sous-sol. Son utilisation doit être en particulier combinée, si possible, soit avec le solaire (héliogéothermie), soit avec la récupération des rejets thermiques industriels. À la surface, une meilleure politique d'utilisation des eaux chaudes, incluant, par exemple, le développement de réseaux de chauffage urbain à basse température comme l'isolation des logements et la généralisation des modes de dissipation de la chaleur à basse température joueront globalement en faveur de la géothermie.

Une des conditions essentielles de rentabilité de la géothermie est de consommer l'énergie à proximité de son site de production. Par ailleurs, et indépendamment des considérations économiques, il convient de ne plus dégrader des combustibles nobles,

susceptibles non seulement de produire de hautes températures, mais encore d'avoir des applications pétrochimiques.

Pour la France, les enjeux pour la géothermie au cours des premières décennies du XXI^e siècle portent, d'une part, sur le développement de la production thermique pour l'habitat et le tertiaire (chauffage, confort d'été, eau chaude sanitaire), notamment avec l'usage des pompes à chaleur à partir de ressources superficielles et, d'autre part, sur la production d'électricité dans les îles volcaniques des départements d'outre-mer. La géothermie peut contribuer de manière très significative à atteindre le « facteur 4 » de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'hexagone et dans les départements d'outre-mer. À plus long terme, les travaux de recherche pourraient amener au développement d'une filière de géothermie profonde, et contribuer ainsi à la solution des problèmes énergétiques de l'humanité.

Jacques VARET

[Retour en haut](#)

Pour citer cet article

GOGUEL, VARET, « **GÉOTHERMIE** », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 6 mai 2017. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/geothermie/>

Bibliographie

- ADEME, « La Géothermie en France et dans le monde », in *Réseaux et chaleur*, n° 16, 1992
- A.F.M.E., *La Géothermie, une énergie nationale directement utilisable pour le chauffage*, 1983
- A.F.M.E.-B.R.G.M.-GÉOCHALEUR, *Le Guide du maître d'ouvrage en géothermie*, B.R.G.M. éd., 1983
- H. C. H. ARMSTEAD, *Geothermal Energy*, John Wiley & Sons, New York, 1978
- V. V. BELOUSSOV & P. J. HART dir., « The Earth's Crust and upper mantle », 2^e part. : « Heat Flow », in *Geophysical Monograph*, n° 13, 1969
- B.R.G.M., *La Géothermie en France*, Orléans, 1978
- B.R.G.M.-ADEME, *La géothermie*, Coll. « Les enjeux des géosciences » (dir. J. Varet), 2005
- B.R.G.M.-ELF, *Potentiel géothermique du Bassin parisien*, *ibid.*, 1976
- B.R.G.M.-P. SNEA, *Potentiel géothermique du Bassin aquitain*, *ibid.*, 1977
- J. GOGUEL, *La Géothermie*, Doin, Paris, 1975
- G. W. GRINDLEY, « The Geology, structure and exploitation of the Wairakei geothermal field, Taupo, New Zealand », in *New Zealand Geological Survey Bull.*, n° 75, 1965
- L. GUILLOU-FROTTIER, « Les empreintes paléothermiques du sous-sol », in *Géosciences*, n° 3, 2003
- C. JAUPART, « Dynamique interne de la terre », in *Géosciences*, n° 4, 2006
- W. H. K. LEE, « Terrestrial Heat Flow », in *Geophysical Monograph*, n° 8, 1965
- B. LINDAL, « Review of industrial applications of geothermal energy and future considerations », in *Geothermics*, n° 21, 1992
- A. MAZZONI, *I Solfioni boraciferi toscani e gli impianti della Larderello*, Bologne, 1951
- J. OLIVET, *Le Chauffage géothermique*, Eyrolles, Paris, 1982
- J. OLIVET et al., *Le Chauffage géothermique*, Éd. de l'ingénierie, Paris, 1976
- O.N.U., *Les Sources nouvelles d'énergie*, Actes officiels de la Conférence de Rome en 1961, Paris, 1964
- M. TREUIL & J. VARET, *Critères pétrologiques, géochimiques et structuraux de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques, exemple de l'Afar*, thèse, Orsay, 1973
- J. VARET, *La Géothermie basse énergie : usage direct de la chaleur*, Masson, Paris, 1982
- J. VERHOOGEN, « Temperature within the earth », in *Amer. Sci.*, t. XLVIII, 1960
- E. F. WAHL, *Geothermal Energy Utilisation*, John Wiley & Sons, New York, 1979.