

Se servir de la chaleur de la Terre

Jean Goguel *

Depuis Prométhée, le pouvoir de l'homme vient de ce que, au-delà de sa force musculaire, de celle de ses esclaves et de ses animaux domestiques, il a appris à détourner à son profit une partie des flux énergétiques de l'Univers.

Ces flux lui sont apparus, à l'origine, immenses par rapport à ses besoins. Mais ceux-ci se sont tellement accrus, tant par suite de l'augmentation de la population du globe (doublement en trente ans actuellement), que de celle des besoins individuels, qu'il n'en est plus du tout ainsi. Il devient essentiel pour nous de distinguer ce qui est emprunt direct à un flux permanent d'énergie qui pourra se poursuivre indéfiniment, et ce qui fait appel à des réserves accumulées, pour lesquelles toute extrapolation de la croissance exponentielle actuelle de l'exploitation fait prévoir un épuisement prochain.

A la première catégorie appartient essentiellement le rayonnement solaire, qui nous apparaît comme trop diffus pour être commodément utilisé à la production d'énergie, et ses dérivés, comme la synthèse chlorophyllienne de la matière vivante qui est à la base de toute notre nourriture, mais n'est plus capable de nous fournir, avec le bois, un combustible répondant à nos besoins. En dérivent aussi tous les mouvements de l'atmosphère, utilisés jadis sous la forme du vent, aujourd'hui sous celle de la houille blanche, presque entièrement équipée dans les pays industrialisés.

A la catégorie des réserves, non susceptibles de se renouveler, et donc condamnées à un épuisement inévitable, appartiennent les accumulations de combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz, qui résultent de la transformation et de l'enfouissement au cours d'une période de 500 millions d'années, d'une petite part de la matière organique formée grâce à l'énergie du rayonnement solaire. Avec un temps de doublement de la consommation de dix ans pour le pétrole, de vingt ans pour le charbon, et quelle que soit l'estimation que l'on puisse faire des réserves totales existantes, les propriétés bien connues de la fonction exponentielle montrent que ces réserves seront épuisées en un temps très bref par rapport à l'histoire de l'humanité. Les réserves actuellement reconnues de pétrole seraient pour le monde entier épuisées dans trente ans, avec le taux actuel de croissance, et il faudrait découvrir autant de nouvelles réserves qu'il en a été découvert jusqu'à ce jour, pour prolonger de dix ans ce délai. En combien de décades, à un tel régime, butera-t-on contre l'obstacle infranchissable du total des ressources existantes, dont l'estimation est encore difficile ?

Un inventaire des sources d'énergie

Il est donc clair que, d'ici là, quelque chose doit changer : nous devons nous accommoder d'autres sources d'énergie, moins commodes et plus coûteuses. Certaines sont déjà connues, comme l'énergie nucléaire, d'autres pressenties, comme les schistes bitumineux. Nous devons aussi économiser une énergie devenue plus coûteuse, mais ce sera d'autant plus difficile, qu'une agriculture à fort rende-

ment consomme, directement ou par les engrais qu'elle utilise, une énergie qui atteint le tiers du pouvoir calorifique des aliments qu'elle produit. Or, pour peu que la croissance de la population mondiale se poursuive - et elle ne saurait se ralentir avant longtemps - le problème de la nourriture deviendra crucial.

Il est indispensable, dans ces conditions, d'entreprendre un inventaire complet de toutes les sources d'énergie, pour être prêt à les utiliser, le moment venu, et savoir ce qu'on peut en attendre.

Il est commode de produire la chaleur, là et quand on en a besoin, mais à défaut, on peut utiliser la chaleur là où elle se trouve, le transfert étant assuré par une circulation d'eau. Et, si on n'en a pas l'usage sur place, il est toujours possible de la transformer en énergie électrique, avec la limitation de rendement due au principe de Carnot, en fonction de la température à laquelle la chaleur nous est fournie

$$\text{(rendement)} \quad \frac{T_c - T_0}{273 + T_c}$$

où T_c est la température de la source chaude, T_0 celle d'une source froide capable d'absorber la chaleur non transformée en électricité).

La géothermie consiste à utiliser la chaleur sensible des roches chaudes qui existent en profondeur. Pour évaluer ses possibilités, il nous faut préciser la distribution de leurs températures.

La température superficielle de la Terre est déterminée par l'équilibre de son rayonnement propre avec celui qu'elle reçoit du Soleil. La température intérieure de la Terre résulte, d'abord, des conditions initiales de sa genèse, il y a quelque 4,6 milliards d'années, qui peuvent avoir comporté un échauffement qu'il nous est difficile d'estimer. Par la suite, toute contraction, toute descente vers la profondeur des matières les plus lourdes, comme le fer du noyau, implique la transformation en chaleur d'une énergie potentielle de gravitation. Et enfin la radioactivité des roches dégage de la chaleur, à un taux qui diminue progressivement, tout au moins à l'échelle du milliard d'années. Cette chaleur se dissipe vers la surface, et il est vraisemblable qu'un certain refroidissement se produit, à l'échelle du milliard d'années ; mais à notre échelle de temps, le flux qui en résulte est pratiquement constant. La plus grande partie s'échappe par conduction, ce qui détermine un flux, légèrement variable selon les régions, et de l'ordre, en moyenne, de 1,5 microcalorie/cm² sec. Une petite partie s'échappe dans les éruptions volcaniques, au rythme foncièrement irrégulier, dans le temps comme dans l'espace. Si on assimile au volcanisme la formation d'une croûte océanique nouvelle dans l'axe des rifts océaniques en expansion, par injection de roches volcaniques basiques, cette part peut, au lieu de 1‰, atteindre quelques ‰. Il faut rapprocher du volcanisme un certain nombre de phénomènes, cachés en profondeur, mais que la géologie nous permet d'analyser, pour le passé.

*Geyser du Château
(Etats-Unis), 1923.*

* Service Géologique National (B.R.G.M.).



Il n'est pas besoin d'insister sur l'impossibilité d'utiliser l'énergie volcanique, à cause de son irrégularité, qui risque de faire disparaître la source de chaleur, avant que soit réalisé un dispositif d'exploitation, combien difficile à concevoir !

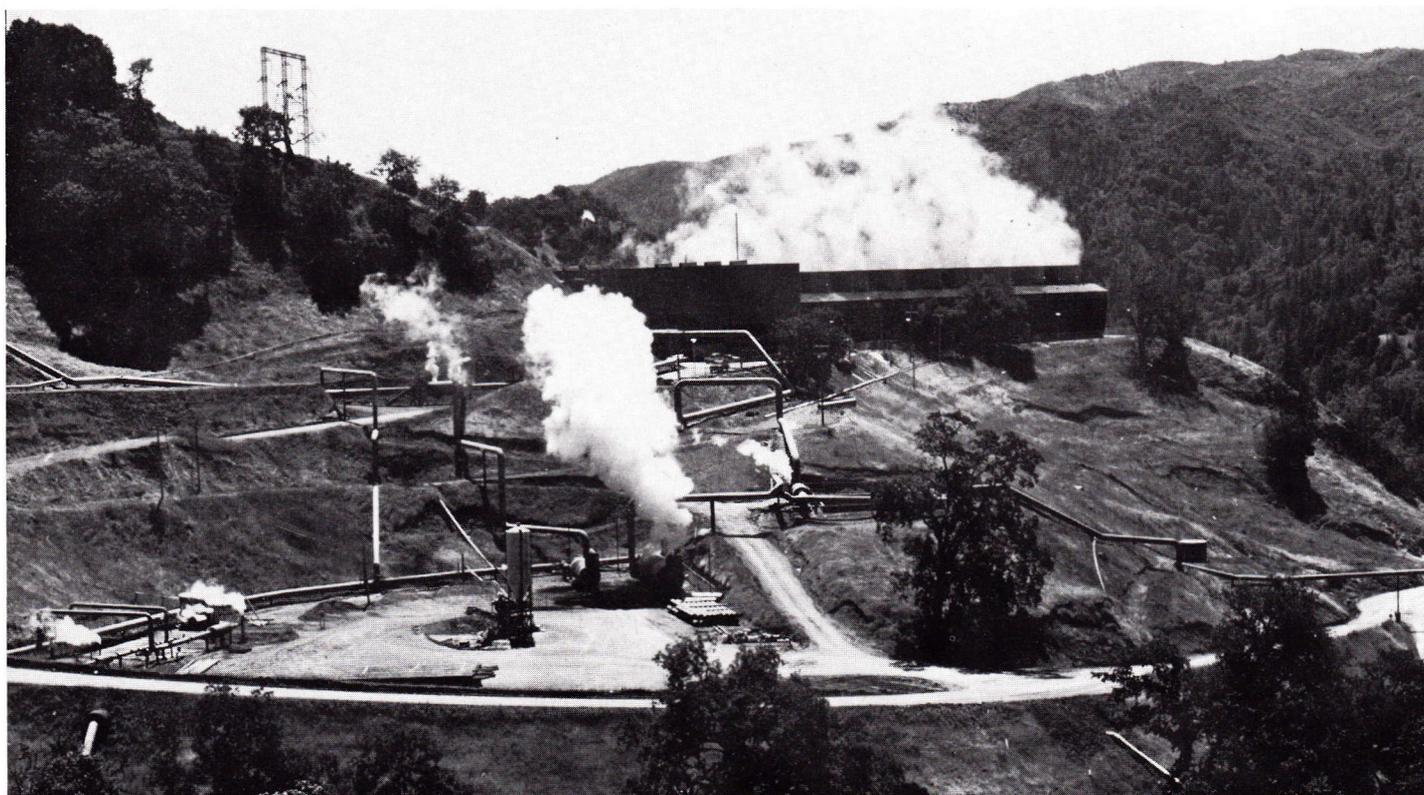
Le flux géothermique

Le flux géothermique, de l'ordre de la microcalorie par cm^2 -seconde est lui-même totalement inutilisable ; il suffit, pour s'en convaincre, de noter qu'il n'est que la 1/30 000^e partie du flux apporté par le rayonnement du Soleil. Mais nous pouvons, ici encore, nous intéresser, non aux flux naturels, mais aux accumulations, acceptant un régime d'exploitation qui ne soit pas permanent, mais temporaire, pourvu que les durées d'exploitation soient de l'ordre de celles qui sont exigées pour les amortissements industriels. Le taux d'intérêt de l'argent ne nous apparaît pas comme l'une des constantes fondamentales de l'univers et

faut, on trouve parfois dans des bassins sédimentaires une ou plusieurs couches, plus ou moins épaisses, à forte perméabilité ; une circulation d'eau entre deux sondages espacés, mettons, de 1 km, permet alors d'exploiter la chaleur, sans refroidissement gênant, pendant quelques dizaines d'années. Par contre, une fissuration irrégulière - et cela risquerait d'être le cas pour toute fissuration provoquée, que ce soit par fraction hydraulique, ou par des explosions souterraines, nucléaires ou non - risque de créer des voies privilégiées le long desquelles la roche se refroidira rapidement, et en dehors desquelles la chaleur ne sera pas exploitée.

Pour les richesses minérales, nous trouvons deux catégories d'exploitation : celles qui se situent au voisinage immédiat des besoins, et portent sur des matériaux largement répandus qui correspondent aux carrières, et celles qui recherchent les concentrations exception-

intéressants, à cause de leur irrégularité dans le temps. Mais la géologie nous apprend que, à toutes les époques, des masses rocheuses très importantes, telles que les granites, se sont formées à toute température à des profondeurs de quelques kilomètres. Les lieux où des formations analogues prendraient naissance aujourd'hui échappent à notre observation. Mais le calcul montre que les durées de refroidissement doivent se compter en millions d'années : il doit donc exister, dans les zones d'activité géologique récente, que bien d'autres signes nous permettent de localiser, des régions anormalement échauffées. Cependant, elles ne constituent pas, jusqu'à présent, les objectifs directs de notre prospection, mais correspondent vraisemblablement aux provinces au sein desquelles nous avons quelques chances de trouver des gisements directement exploitables.



il est vraisemblable que cette durée d'amortissement est, en fin de compte, déterminée par la longueur de la vie humaine. Il se trouve que les contraintes inhérentes à l'exploitation font que cette condition est facilement remplie.

Du flux par conduction résulte un gradient général de température, de l'ordre de 1° par 30 cm. Partout, à quelques milliers de mètres de profondeur, on trouvera donc des roches à des températures de l'ordre de 100° . Si des besoins pour l'utilisation de cette chaleur existent - par exemple, pour le chauffage des immeubles, qui, en France, absorbe le tiers de l'énergie consommée - le seul problème est de pouvoir extraire cette chaleur à un débit suffisant. Cette extraction se faisant nécessairement par une circulation d'eau, il faut que les roches soient, à la profondeur voulue, suffisamment perméables, ce qui est loin d'être le cas général. Une perméabilité dans toute la masse serait l'idéal. A dé-

nelles où qu'elles se trouvent, qui correspondent aux mines. Il en est de même pour l'énergie géothermique ; le cas qui vient d'être envisagé - celui de l'utilisation pour le chauffage du régime thermique qui existe partout, sous réserve que la perméabilité des terrains le rende exploitable (dit, improprement, de basse énergie), correspond aux carrières.

Mais il y a, comme pour les mines, des possibilités de gisements, (dits de haute énergie), où les roches sont beaucoup plus chaudes. Encore faut-il les découvrir, et les techniques de prospection sont très imparfaites. Ils risquent d'être éloignés des zones de consommation, ce qui impose de transformer la chaleur en électricité pour pouvoir la transporter (ou d'installer sur place certaines industries consommatrices de chaleur à basse température, comme on en trouve quelques exemples en Nouvelle-Zélande). Les échauffements de roches, directement liés au volcanisme, paraissent peu

*Centrale électrique
sur le champ géothermique
« The Geysers »
près de San Francisco (Etats-Unis).*

Des poches de vapeur

Normalement, le flux de chaleur se dissipe vers la surface par conduction à travers la roche, ce qui donne lieu à un gradient régulier de température. Mais, lorsque ce gradient devient suffisamment élevé (environ quatre fois le gradient moyen), un autre mode de transfert peut intervenir, si les roches présentent une perméabilité suffisante : c'est un transfert par convection, mais qui se présente dans des conditions très différentes de celles auxquelles nous sommes habitués, puisqu'ici l'eau qui circule dans le terrain se met à chaque instant en équilibre de température avec la roche qu'elle imprègne. De ce fait, la convection est très ralentie, et elle ne joue pratiquement un rôle que lorsqu'in-

terviennent des différences considérables de densité, entre l'eau et la vapeur. Alors s'individualisent des cellules ascendantes dans lesquelles remonte la vapeur, et lorsque le processus cesse, le terrain se retrouve à une température voisine de celle de vaporisation de l'eau, sous la pression due à la colonne d'eau qui s'élève jusqu'au jour. Il peut en outre exister des poches de vapeur à pression et température sensiblement uniforme, pour peu qu'il existe une fermeture étanche.

Lorsqu'un tel gisement géothermique a pris naissance, il peut subsister quelques milliers, ou dizaines de milliers d'années, avant que la dissipation de la chaleur par conduction ait fait disparaître l'anomalie thermique qu'il constitue.

L'exploitation d'un tel gisement, qui se fait obligatoirement par l'intermédiaire d'une circulation d'eau, se trouve grandement facilitée par la vaporisation de cette eau dans le gisement, ou seulement

les résultats des sondages font foi. Mais (comme pour le pétrole, et à l'inverse des métaux et du charbon) il n'y a rien à espérer de gisements de faible profondeur, et il faut être prêt à pousser les sondages de reconnaissance à 500 ou 1 000 m. C'est un risque financier qu'on hésite souvent à prendre. Le fait que, quelques dizaines de milliers d'années après la fin des phénomènes qui leur ont donné naissance, les gisements se sont pratiquement dissipés par conduction, ajoute à la prospection une incertitude que l'industrie minière ne connaît pas.

Quelles sont les réserves ultimes, correspondant aux gisements de haute énergie, que l'on peut espérer exploiter un jour ? Toute estimation me paraît très difficile. On peut facilement délimiter les zones d'activité géologique, correspondant aux frontières entre plaques, en dehors desquelles les espoirs paraissent très faibles. Mais, si dans certaines zones

dans le gisement et n'extraire que la vapeur).

Quel peut être le rôle de la géothermie dans la crise de l'énergie qui s'annonce ? Ni sa répartition géographique, ni l'ordre de grandeur de la puissance qu'on peut en espérer, ni le caractère transitoire de ce qui est l'exploitation de réserves limitées, ne permettent d'y voir un élément substantiel de solution. Mais, là où les conditions sont favorables, la géothermie peut présenter une réelle importance économique (Islande, Nouvelle-Zélande), ou tout au moins permettre quelques économies sur une énergie importée (France, Italie, U.S.A., etc.). Les possibilités sont suffisantes pour qu'on ne puisse se permettre de négliger cette ressource.

J.G.

La géothermie en France

La Délégation Générale à la Recherche Scientifique a lancé toute une série d'études portant sur la géothermie : Une série de contrats de recherche sur la vaporisation de l'eau dans les terrains perméables a été confiée à l'Institut Français du Pétrole, au Commissariat à l'Énergie Atomique, et à l'I.N.E.A.H. de Toulouse.

Elle a aussi lancé une recherche sur l'optimisation de l'emploi de la chaleur géothermique à basse énergie pour le chauffage.

Enfin, on procède à un inventaire des ressources géothermiques françaises en particulier à partir des archives des sondages géologiques effectués par les compagnies pétrolières.

Toutes ces recherches, qui ont démarré fin 1973, sont actuellement en cours.

Tableau I

Exemples de prix de revient d'exploitation de minerais concentrés par flottation

Petite gisement filonien

500 tonnes/jour

Mine	30 F/t.
Laverie	11
Frais généraux	7
Total :	48

Gisement moyen (filon ou couche puissante)

3 000 tonnes/jour

Mine	13 F/t.
Laverie	6
Frais généraux	5
Total :	24

Gisement important exploité en carrière

10 000 tonnes/jour

Mine	6 F/t.
Laverie	5
Frais généraux	2,5
Total :	13,5

dans les sondages d'exploitation, et ceci régularise l'exploitation de la chaleur, même en présence d'une perméabilité de fracture, irrégulière. Il suffit, pour assurer cette vaporisation, de provoquer dans les sondages d'exploitation une baisse de la pression, tout en maintenant celle-ci suffisamment élevée pour alimenter les turbines d'une centrale.

Une prospection incertaine

Que peut-on attendre de ces gisements de haute énergie ? trois quarts de siècle après la première production d'électricité géothermique (à Larderello, en Italie) la production mondiale doit approcher du million de kW, mais ce n'est que depuis fort peu de temps que les prospections sont poussées avec une certaine activité. Elles sont handicapées par le caractère incertain des indications fournies par les observations de surface, géologiques, géochimiques ou géophysiques. Comme en matière de gisements minéraux, seuls

anciennes d'activité, comme les Andes, de nombreux granites ont pris naissance, ils sont très rares dans d'autres, comme la chaîne Alpine. Sur quelle proportion des zones d'activité actuelle, des granites se sont-ils formés au cours du dernier million d'années ? Et sur quelle proportion de leur surface, la perméabilité a-t-elle permis le jeu de cellules de convection, au cours des 20 000 dernières années ?

Il ne me paraît pas possible de chiffrer ces proportions. Mais poser ainsi le problème fait apparaître que les prospections déjà effectuées ne portent que sur une partie des zones possibles et qu'elles peuvent être largement étendues, dans un nombre de pays cependant limité. Ces prospections nouvelles doivent concourir à préciser une méthode de prospection, encore dans l'enfance, et nous devons tendre vers une amélioration des méthodes d'exploitation (en cherchant à produire la vaporisation