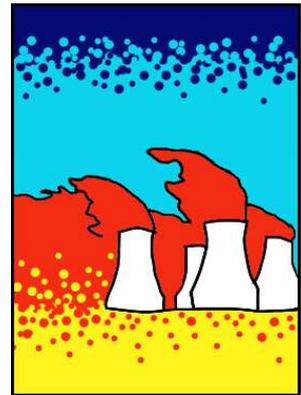


L'énergie durable — Pas que du vent !

Première partie

Des chiffres, pas des adjectifs



16 Géothermie

L'énergie géothermique provient de deux sources : d'une part, de la désintégration radioactive qui a lieu dans la croûte terrestre, et d'autre part, de la lente évacuation de la chaleur provenant du cœur de la Terre et traversant le manteau terrestre. Il y a de la chaleur dans le cœur parce qu'autrefois, la Terre était brûlante, et qu'aujourd'hui, elle est toujours en train de se refroidir et de se solidifier. La chaleur du cœur est également entretenue par la friction des marées : la Terre se déforme en réponse aux champs gravitationnels de la Lune et du Soleil, de la même manière qu'une orange change de forme lorsque vous la pressez et que vous la roulez entre vos mains.

La géothermie est une énergie renouvelable attrayante parce qu'elle est « toujours là », quel que soit le temps qu'il fait ; si on fabrique des centrales géothermiques, on peut les démarrer ou les arrêter quand on veut pour suivre la demande.

Mais combien y a-t-il de puissance géothermique disponible ? On peut distinguer deux types de puissance géothermique dont on peut faire l'estimation : d'une part, la puissance disponible à un lieu quelconque sur la croûte terrestre, et d'autre part, la puissance disponible dans des points chauds particuliers comme l'Islande (figure 16.3). Même si les meilleurs endroits pour commencer à développer la technologie géothermique sont certainement les points chauds, je vais supposer que la ressource totale la plus grande provient des sites ordinaires, puisqu'ils sont considérablement plus nombreux.

La principale difficulté que l'on rencontre quand on veut obtenir de la puissance géothermique *durable*, c'est le fait que la faible vitesse à laquelle la chaleur voyage à l'intérieur de la roche solide limite le rythme auquel la chaleur peut être durablement aspirée de l'intérieur brûlant de la Terre. C'est comme essayer de boire à la paille un verre rempli de glace pilée. Si vous plongez la paille dans la glace et que vous aspirez, vous commencez par obtenir une bonne gorgée de liquide froid. Mais si vous continuez, vous finirez par n'aspirer que de l'air. Vous aurez aspiré tout le liquide de la glace qui entourait le bout de la paille. Votre rythme initial d'aspiration n'était pas durable.

Si vous faites un trou de 15 kilomètres de profondeur dans la terre et que vous y plantez une paille, vous trouverez l'endroit chaud et douillet, en tout cas bien assez chaud pour faire bouillir de l'eau. Vous pourrez donc y planter deux pailles, envoyer de l'eau froide dans l'une et aspirer de l'eau chaude par l'autre. Vous aspirerez de la vapeur, et vous pourrez faire fonctionner une centrale électrique. Va-t-elle produire de la puissance sans limite ? Non. A force d'aspirer de la chaleur de la roche, vous aurez fait baisser la température de cette roche. Votre aspiration n'était pas durable. Il va alors vous falloir attendre un long moment avant que la roche

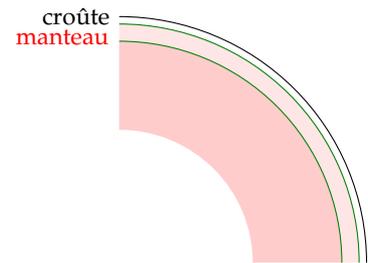


FIGURE 16.1. Une Terre en coupe.



FIGURE 16.2. Du granite.



FIGURE 16.3. Énergie géothermique en Islande. La production moyenne d'électricité géothermique en Islande (300 000 habitants) en 2006 était de 300 MW (soit 24 kWh/j par personne). Plus de la moitié de l'électricité islandaise est utilisée pour la production d'aluminium. Photo par Gretar Ívarsson.

au bout de vos deux pailles se réchauffe à nouveau. Une attitude possible face à ce problème est de traiter la chaleur géothermique de la même manière que les combustibles fossiles aujourd'hui : comme une ressource minière plutôt que comme une ressource collectée de manière durable. Vivre ainsi aux dépens de la chaleur géothermique pourrait bien être préférable pour la planète, plutôt que de vivre de manière insoutenable en dépendant des combustibles fossiles. Mais cela n'en ferait-il pas une autre source d'énergie provisoire, qui nous donnerait juste 100 ans de vie non durable de plus ? Dans ce livre, ce qui m'intéresse le plus, c'est l'énergie *durable*, comme son titre l'indique. Faisons le calcul.

De l'énergie géothermique qui serait durable pour toujours

Commençons par imaginer que l'on va exploiter l'énergie géothermique de manière durable en plantant des pailles dans le sous-sol à une profondeur adéquate, puis que l'on va aspirer *doucement*. Aspirer à un rythme tel que la roche au bout de nos pailles ne puisse pas se refroidir, cela signifie aspirer au rythme naturel auquel la chaleur se diffuse aujourd'hui à travers la terre.

Comme je le disais précédemment, l'énergie géothermique provient de deux sources : de la désintégration radioactive dans la croûte terrestre, et de la lente évacuation de chaleur provenant du cœur de la Terre et traversant le manteau terrestre. Dans un continent typique, le flux de chaleur qui provient du cœur de la Terre et traverse le manteau est d'environ 10 mW/m². Le flux de chaleur à la surface est de 50 mW/m². Ainsi, la désintégration radioactive ajoute 40 mW/m² supplémentaires au flux de

un milliwatt (1 mW) est égal à 0,001 W.

chaleur qui provient du cœur.

Donc, sur un site typique, la puissance maximum que l'on puisse obtenir par unité de surface est de 50 mW/m^2 . Mais cette puissance n'est pas de haute qualité. C'est de la chaleur de basse qualité, qui perce, remonte lentement et atteint la température ambiante de la surface où nous nous trouvons. Ce que nous voulons faire, vraisemblablement, c'est produire de l'électricité, et c'est la raison pour laquelle il nous faut creuser. La chaleur n'est utile que si elle provient d'une source dont la température est plus élevée que la température ambiante. La température augmente avec la profondeur, comme le montre la figure 16.4, pour atteindre une température d'environ 500°C à une profondeur de 40 kilomètres. Entre la surface où le flux de chaleur est le plus important mais où les roches sont trop froides, et 40 kilomètres de profondeur, où les roches sont les plus chaudes, mais où le flux de chaleur est 5 fois plus faible (parce que l'on passe à côté de toute la chaleur générée par la désintégration radioactive), il y a une profondeur optimale à laquelle nous devons aspirer. La profondeur optimale exacte dépend du type de machine que nous utilisons pour aspirer et générer de l'électricité. On peut déterminer la puissance maximale durable en déterminant la profondeur optimale, en supposant que l'on dispose d'un moteur idéal pour convertir la chaleur en électricité, que forer à n'importe quelle profondeur est possible et que ça ne coûte pas d'énergie.

Pour le profil de température que montre la figure 16.4, j'ai calculé que la profondeur optimale était d'environ 15 km. Dans ces conditions, un moteur calorifique idéal pourrait fournir 17 mW/m^2 . Avec une densité de la population mondiale de 43 habitants par kilomètre carré, cela fait 10 kWh par jour et par personne, si *absolument toutes* les surfaces de terres sont exploitées. Au Royaume-Uni, la densité de population est 5 fois plus grande, donc une puissance géothermique de ce type, durable pour toujours et déployée à grande échelle, pourrait fournir au plus **2 kWh par jour et par personne**.

C'est le chiffre « durable pour toujours » qui ignore les points chauds, suppose des centrales de conversion d'énergie parfaites, suppose que chaque mètre carré du continent est exploité, et suppose que le forage ne coûte rien. Et aussi qu'il est possible de forer des trous de 15 kilomètres de profondeur.

Une exploitation minière de la géothermie

L'autre stratégie géothermique consiste à considérer la chaleur comme une ressource minière à exploiter. Pour « l'extraction géothermique stimulée » à partir des roches chaudes fracturées (figure 16.5), on commence par forer jusqu'à une profondeur de 5 ou 10 km, et ensuite on fracture la roche en y injectant de l'eau. (Cette étape peut provoquer des tremblements de terre, ce qui risque de mécontenter quelque peu les riverains.) Puis on fore un second puits dans la zone de fractures. On peut alors injecter de

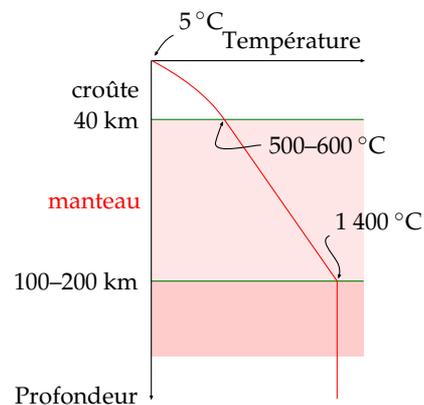


FIGURE 16.4. Profil de température dans un continent typique.

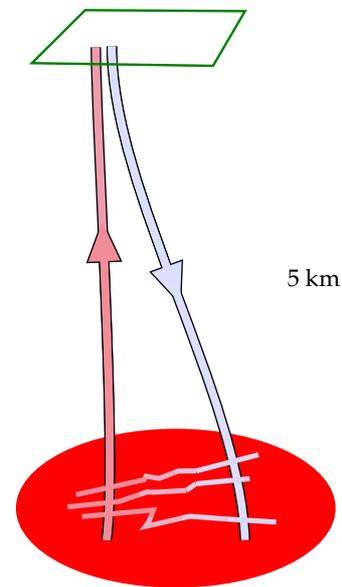


FIGURE 16.5. Extraction géothermique stimulée à partir de roches chaudes fracturées. Un puits est foré et pressurisé pour créer des fractures dans la roche. Un second puits est foré à l'autre extrémité de la zone de fractures. Puis de l'eau froide est injectée dans l'un des puits, et de l'eau chauffée (en fait, de la vapeur) est aspirée de l'autre puits.

l'eau dans l'un des puits et extraire de l'eau surchauffée ou de la vapeur de l'autre puits. Cette vapeur peut être ensuite utilisée pour produire de l'électricité ou fournir de la chaleur.

Quelle est la ressource en roches chaudes fracturables au Royaume-Uni ? Malheureusement, le pays est bien mal doté en la matière. La plupart de ces roches chaudes sont concentrées en Cornouailles, où quelques expériences de géothermie ont été menées en 1985 dans une installation de recherche à Rosemanowes, aujourd'hui fermée. Les consultants qui avaient évalué ces expériences avaient conclu que « il est improbable que la production d'électricité à partir de roches chaudes fracturées puisse être viable sur le plan technique ou commercial à court ou moyen terme, que ce soit en Cornouailles ou ailleurs au Royaume-Uni. » Néanmoins, à combien se monte la ressource ? L'estimation la plus élevée de la ressource en roches chaudes fracturables au Royaume-Uni représente une énergie totale de 130 000 TWh, ce qui, selon les consultants, pourrait, en théorie, contribuer à hauteur de 1,1 kWh par jour et par personne d'électricité pendant environ 800 ans.

D'autres sites dans le monde disposent de roches chaudes fracturables plus prometteuses. Par conséquent, si vous voulez connaître les réponses géothermiques pour d'autres pays, assurez-vous de poser la question à quelqu'un du coin. Mais malheureusement pour la Grande-Bretagne, la géothermie ne pourra jamais compter que pour une toute petite part.

Southampton n'utilise-t-elle pas déjà l'énergie géothermique ? Combien cela lui fournit-il ?

Oui, le système de chauffage géothermique de Southampton, dans le Hampshire était, du moins en 2004, le seul système de chauffage géothermique du Royaume-Uni. Il fournit de l'eau chaude à la ville. Le puits géothermique fait partie d'un système de cogénération de chaleur, d'électricité et de refroidissement qui fournit à ses clients de l'eau chaude et de l'eau refroidie, et revend de l'électricité au réseau. L'énergie géothermique contribue à hauteur de 15 % aux 70 GWh de chaleur fournis chaque année par ce système. Au dernier recensement, Southampton comptait 217 445 habitants, donc la puissance géothermique qui était fournie à la ville était de 0,13 kWh/j par personne.



Notes et bibliographie

Page n°

- 115 *Le flux de chaleur en surface est de 50 mW/m².* Le Massachusetts Institute of Technology (2006) indique une moyenne de 59 mW/m², dans une fourchette, aux États-Unis, allant de 25 mW à 150 mW. Shepherd (2003) donne 63 mW/m².
- 117 *« Il est improbable que la génération de puissance électrique à partir de roches chaudes fracturées puisse être viable sur le plan technique ou commercial ».* Source : MacDonald et al. (1992). Voir aussi Richards et al. (1994).

- L'estimation la plus élevée de la ressource en roches chaudes fracturables au Royaume-Uni [...] pourrait, en théorie, contribuer à hauteur de 1,1 kWh par jour et par personne d'électricité pour environ 800 ans. Source : MacDonald et al. (1992).
- 117 D'autres sites dans le monde disposent de roches chaudes fracturables plus prometteuses. Il y a une bonne étude (Massachusetts Institute of Technology, 2006) qui décrit les ressources en roches chaudes fracturables aux États-Unis. Une autre approche plus spéculative, poursuivie par les Sandia National Laboratories dans les années 1970, est de forer jusqu'au magma où règnent des températures de 600 à 1 300 °C, peut-être à 15 km de profondeur, et d'en obtenir de la puissance. Le site Web www.magma-power.com estime que la chaleur des réservoirs de magma sous le sol des États-Unis pourrait couvrir la consommation d'énergie américaine pour 500, voire 5 000 ans, et que cela pourrait être exploité de manière rentable.
- Chauffage urbain géothermique de Southampton. www.southampton.gov.uk.

Géothermie : 1 kWh/j	
Transporter les trucs : 12 kWh/j	Marée : 11 kWh/j
Trucs : au moins 48 kWh/j	Vagues : 4
	Eolien en mer profonde : 32 kWh/j
Nourriture, agriculture, engrais : 15	Eolien en mer peu profonde : 16 kWh/j
Gadgets : 5	Hydroélectr. : 1,5 kWh/j
Lumière : 4	Biomasse : nourriture, bois, biocarburants, incinér. déchets, gaz d'enfouiss. 24 kWh/j
Chauffage, refroidiss. : 37 kWh/j	Fermes photovolt. (200 m ² /p) : 50 kWh/j
Avions : 30 kWh/j	PV, 10 m ² /p : 5
Voitures : 40 kWh/j	Chauffage solaire : 13 kWh/j
	Vent : 20 kWh/j

FIGURE 16.6. Géothermie.