



La géothermie n'est pas une énergie nouvelle. Occupant le troisième rang des énergies renouvelables derrière l'hydraulique et la biomasse, elle est exploitée de façon industrielle depuis déjà un siècle en certains endroits du monde. Elle connaît, depuis quelques années, un regain d'intérêt qui en fait une rivale sérieuse de l'énergie solaire...

# Discrète GÉOTHERMIE

Les profondeurs de notre planète recèlent d'énormes quantités de chaleur provenant de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, par suite de la désintégration d'éléments radioactifs comme l'uranium ou le thorium. Plus de 99 % de la masse terrestre est ainsi portée à des températures dépassant 1000 °C, alors que seulement 0,1 % de cette même masse (essentiellement sur la croûte terrestre) se situe à une température inférieure à 100 °C...

Le flux géothermique qui parvient à la surface du globe n'est donc pas négligeable. Il représente – pour utiliser une image – l'équivalent d'un radiateur dont la puissance serait de l'ordre de 40 millions de MWe, soit l'équivalent de 30000 tranches nucléaires standard! La comparaison a de quoi impressionner, mais il faut préciser que ce flux est extrêmement réparti et trop faible pour être ressenti directement. En fait, on n'exploite pas le flux géothermique proprement dit mais la chaleur accumulée et stockée dans certaines zones du sous-sol; généralement des nappes d'eau souterraines. Il arrive pourtant que ce flux de chaleur jaillisse en surface de façon spectaculaire: ce sont les geysers, comme en Islande, en Nouvelle-Zélande ou à Yellowstone (États-Unis).

## VRAI OU FAUX

**Le flux géothermique équivaut au rayonnement reçu du soleil.**

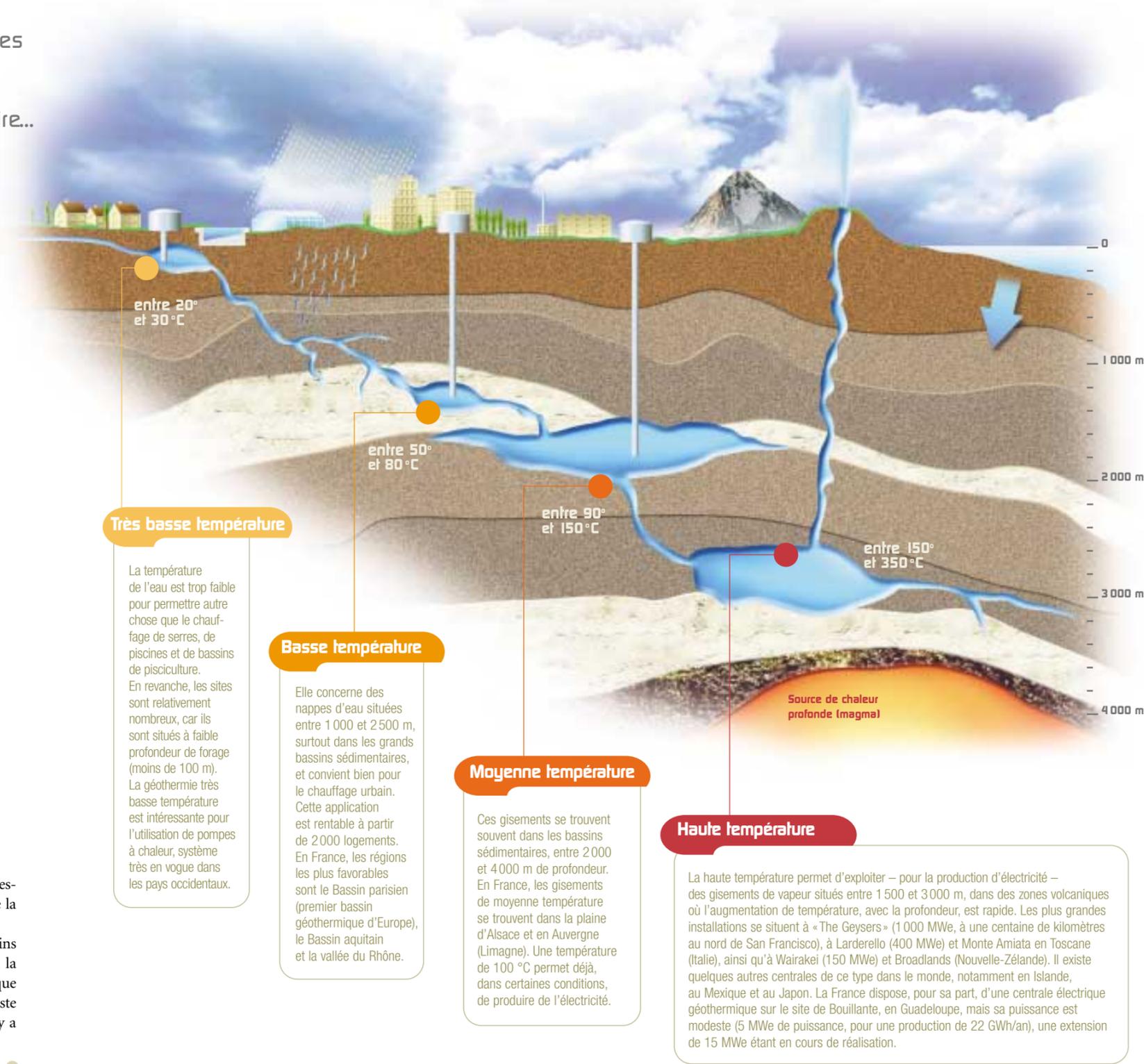
**FAUX**  
La chaleur qui arrive des entrailles de la Terre représente en moyenne 0,06 watt par m<sup>2</sup>, ce qui est 23000 fois inférieur au rayonnement solaire direct! C'est toutefois suffisant pour exploiter la chaleur de certaines réserves aquifères du sous-sol.

## Exploiter la chaleur de la Terre

Le but d'une installation géothermique est d'extraire l'énergie contenue dans les entrailles de la planète, afin de l'utiliser sous forme de chauffage ou produire de l'électricité à partir de la vapeur générée.

L'extraction de cette chaleur n'est cependant possible si les formations géologiques du sous-sol sont perméables ou fissurées, afin de permettre à l'eau chaude de remonter en surface. Il arrive également que des discontinuités du sous-sol permettent à de l'eau chaude de circuler au travers de failles. Elle surgit alors avec un fort débit (quelques dizaines de milliers de litres à l'heure) en donnant naissance à une source thermale. De nombreux sites de ce type existent en France, notamment dans le sud de l'Auvergne, à Chaudes-Aigues (Cantal), où l'eau jaillit à 82 °C. C'est la source la plus chaude d'Europe.

La chaleur géothermique, on le voit, sera plus ou moins facilement exploitable selon le contexte géologique et la profondeur. Certaines régions sont plus favorables que d'autres, au point qu'il n'est pas exagéré de dire qu'il existe des gisements d'énergie géothermique tout comme il y a des gisements de pétrole...



### Très basse température

La température de l'eau est trop faible pour permettre autre chose que le chauffage de serres, de piscines et de bassins de pisciculture. En revanche, les sites sont relativement nombreux, car ils sont situés à faible profondeur de forage (moins de 100 m). La géothermie très basse température est intéressante pour l'utilisation de pompes à chaleur, système très en vogue dans les pays occidentaux.

### Basse température

Elle concerne des nappes d'eau situées entre 1000 et 2500 m, surtout dans les grands bassins sédimentaires, et convient bien pour le chauffage urbain. Cette application est rentable à partir de 2000 logements. En France, les régions les plus favorables sont le Bassin parisien (premier bassin géothermique d'Europe), le Bassin aquitain et la vallée du Rhône.

### Moyenne température

Ces gisements se trouvent souvent dans les bassins sédimentaires, entre 2000 et 4000 m de profondeur. En France, les gisements de moyenne température se trouvent dans la plaine d'Alsace et en Auvergne (Limagne). Une température de 100 °C permet déjà, dans certaines conditions, de produire de l'électricité.

### Haute température

La haute température permet d'exploiter – pour la production d'électricité – des gisements de vapeur situés entre 1500 et 3000 m, dans des zones volcaniques où l'augmentation de température, avec la profondeur, est rapide. Les plus grandes installations se situent à « The Geysers » (1000 MWe, à une centaine de kilomètres au nord de San Francisco), à Larderello (400 MWe) et Monte Amiata en Toscane (Italie), ainsi qu'à Wairakei (150 MWe) et Broadlands (Nouvelle-Zélande). Il existe quelques autres centrales de ce type dans le monde, notamment en Islande, au Mexique et au Japon. La France dispose, pour sa part, d'une centrale électrique géothermique sur le site de Bouillante, en Guadeloupe, mais sa puissance est modeste (5 MWe de puissance, pour une production de 22 GWh/an), une extension de 15 MWe étant en cours de réalisation.



## MOT À MOT

## GRADIENT GÉOTHERMIQUE

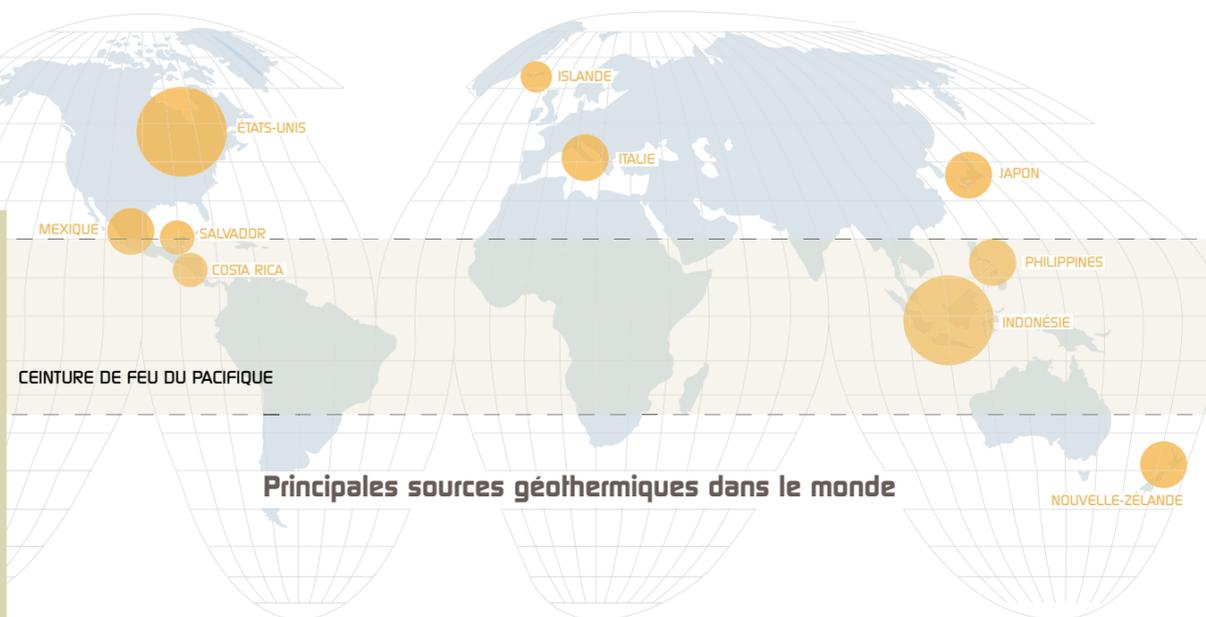
Élévation de température enregistrée pour une augmentation de profondeur de 1 km. La valeur moyenne de ce gradient est de l'ordre de 33 °C, soit environ 1 °C d'augmentation de température tous les 30 m. On constate facilement cette augmentation de chaleur quand on s'enfonce dans les mines. En zone volcanique, le gradient peut dépasser 100 °C/km.

## DOUBLET GÉOTHERMIQUE

Ensemble constitué par un forage principal «montant» (par lequel on pompe l'eau de la nappe) et un forage «descendant» situé un peu plus loin (par lequel on réinjecte l'eau). Ces doublets sont nécessaires quand l'eau chaude géothermale n'est pas pure, afin qu'elle communique sa chaleur à de l'eau contenue dans un circuit secondaire de chauffage, sans qu'il y ait de mélange entre elles. La technique du doublet a par ailleurs l'avantage de maintenir le gisement en pression et d'éviter ainsi un tassement des couches géologiques.

## POMPE À CHALEUR

Technique utilisée lorsque la température est insuffisante pour une utilisation directe en chauffage. Principe : on transfère la chaleur à un fluide à bas point d'ébullition qui sert d'intermédiaire (ammoniac par exemple). En s'échauffant, il communique sa chaleur à un circuit d'eau.



Principales sources géothermiques dans le monde



En fait, on peut trouver de l'eau chaude presque partout, sous réserve de descendre suffisamment bas. Mais il est évidemment plus avantageux de rechercher des sites favorables, où l'eau chaude se trouve près de la surface. La vapeur ou cette eau sont ensuite utilisées dans des centrales géothermiques pour produire de l'électricité ou alimenter un réseau de chauffage pour bâtiments.

## Une répartition inégale dans le monde

Les applications sont fonction de la température et de la profondeur des gisements. Si le «réservoir» d'eau se trouve dans une zone à gradient moyen (voir «Mot à mot»), cette eau pourra être utilisée pour le chauffage. C'est ce qu'on appelle la géothermie basse température. Mais, si le réservoir est situé dans une zone à gradient élevé (au voisinage de certains volcans), la température de l'eau peut dépasser 150 °C, voire atteindre 350 °C. Cette géothermie haute température est la seule qui permet de produire de l'électricité. Il faut bien distinguer ces deux applications (chaleur et électricité) qui, au niveau mondial, représentent respectivement 45 et 55 % de la production énergétique géothermique.

Quelque 350 installations de géothermie «haute température» existent actuellement dans le monde. Réparties dans 18 pays, leur puissance totale approche les 10 GWe après avoir quasiment doublé en dix ans (de 5836 MWe à 7974 MWe au cours de la décennie 1990). Il faut cependant remarquer que 4 pays seulement – États-Unis, Philippines, Mexique et Italie – cumulent à eux seuls les trois quarts de la production mondiale d'électricité géothermique. C'est dire que les nations sont loin d'être égales devant cette forme d'énergie. Si l'on excepte l'Italie et l'Islande, la plupart de ces sites sont

situés sur la célèbre «ceinture de feu» du Pacifique, la zone volcanique la plus active du globe.

Le Nicaragua tire ainsi une bonne part de sa capacité électrique de l'énergie géothermique. Mais, les Philippines présentent l'évolution la plus spectaculaire en ayant maintenant dépassé 5000 MWe de puissance cumulée (6,2 TWh produits annuellement), soit 19 % de la consommation nationale, avec l'objectif d'atteindre 50 % en 2005! Pour cela, de nouveaux projets sont menés, notamment sur les îles de Luzon et de Leyte. Les autres îles de l'archipel devant être raccordées au réseau par des câbles sous-marins.

## La géothermie de chaleur en France

Dans l'Hexagone, la géothermie est exploitée pour la production de chaleur ou de froid. Mais, les réalisations y sont exemplaires et la France est considérée comme pionnière en Europe. Seule l'Islande fait mieux puisque sa capitale, Reykjavík, est chauffée à 82 % par la chaleur géothermale. Avec une production de 200 000 tonnes équivalent pétrole par an, la contribution de la géothermie au bilan énergétique français se situe aujourd'hui loin devant celle des énergies solaire et éolienne. La géothermie représente 10 % de l'énergie distribuée par les réseaux de chaleur urbains et 0,4 % de la consommation totale d'énergie. Si la géothermie française a connu un véritable essor entre 1980 et 1985, la toute première réalisation date de 1969. Elle a permis de chauffer, grâce à une nappe à 30 °C, quelque 3 000 logements dans un quartier de Melun (Seine-et-Marne).

**GÉOTHERMIE**  
Étymologiquement: du grec ancien «Gêo» (la Terre) et «thermé» (chaleur). C'est la chaleur issue du sous-sol profond.



## AVIS D'EXPERT

# Prospection et forage

## Les difficultés

Il ne suffit pas de creuser un puits n'importe où pour tomber sur une nappe d'eau chaude. Les bassins sédimentaires sont des zones favorables, mais une prospection précise reste nécessaire au sein même de ces zones. Compte tenu des frais importants qu'entraînent les forages, il convient de ne pas se tromper, en tout cas le moins possible...

## Alternatives : Comment choisit-on un lieu de forage géothermique ?

**Alain Desplan** : La réalisation d'un forage géothermique se heurte essentiellement à deux difficultés : trouver le site le plus favorable dans la zone d'implantation choisie et lutter contre la corrosion des tubages. Concernant le premier point, il existe des cartes permettant de choisir au mieux l'emplacement des puits, grâce à l'inventaire géothermique réalisé au début des années 1980 par le BRGM. Ces cartes ont été établies à partir des données de prospections pétrolières dans les bassins sédimentaires. Quand on fore, en effet, on trouve soit du pétrole soit de l'eau chaude. Quand c'est un échec pour les pétroliers, c'est un succès pour nous ! Comme pour le pétrole, l'eau géothermale n'existe pas à l'état libre dans un «réservoir».

En fait, elle imprègne des sables ou des roches friables et c'est la mise à l'air libre par forage qui entraîne la remontée du fluide vers la surface, sous l'effet de la pression. Toute opération géothermique doit donc être précédée d'une recherche de site. Précisons qu'un second inventaire a été réalisé au début des années 1990, cette fois en géothermie superficielle (environ 100 m de profondeur) à la demande d'EDF, dans le cadre du programme d'installation de pompes à chaleur. Toutes ces cartes vont être réactualisées, à partir de cette année, avec l'aide de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et seront plus facilement accessibles grâce aux nouvelles technologies de stockage informatique et de communication (CD-Rom, téléchargement sur Internet).



Alain Desplan, ingénieur au BRGM

## ZOOM

**BRGM**  
**Bureau de recherches géologiques et minières.** Présent dans plus de 40 pays où il travaille pour le compte d'États, de sociétés publiques, d'industriels ou d'organismes de financement internationaux, le BRGM intervient dans tous les domaines des sciences de la Terre au travers d'études, de programmes de soutien institutionnel, d'assistance technique, de formations et de transferts de technologie.

## Quelles solutions mettez-vous en œuvre pour lutter contre la corrosion ?

La corrosion représentait une difficulté très sérieuse lors des premières réalisations, mais c'est un problème parfaitement résolu aujourd'hui. On injecte pour cela un produit chimique qui agit pour stopper le développement des bactéries, lesquelles fabriquent des sulfures corrosifs. C'est un traitement de fond, à poursuivre en permanence. Moyennant quoi, les tubes ne sont pas attaqués de l'intérieur et peuvent servir pendant une bonne trentaine d'années. Il faut seulement les nettoyer, tout comme on ramone régulièrement une cheminée.

« Quand on fore, on trouve soit du pétrole, soit de l'eau chaude. »



Serre chauffée par géothermie.



Le chauffage de la Maison de la Radio, à Paris, est partiellement assuré par la géothermie.

« NOUS VIVONS SUR UN STOCK D'ÉNERGIE QUASI INFINI. IL FAUT SEULEMENT TROUVER LE MOYEN DE L'EXPLOITER. »



### AVANTAGES DE LA GÉOTHERMIE

➤ C'est une énergie fiable et stable dans le temps, car elle ne dépend pas des conditions atmosphériques ou climatiques.

➤ Elle est respectueuse de l'environnement, son impact étant sinon nul, du moins très faible. Elle n'engendre, en effet, pratiquement pas de substances polluantes, très peu de gaz carbonique et seulement un peu d'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S). La plus grande partie de ces produits est d'ailleurs réinjectée dans la nappe et non dans l'environnement.

➤ Les forages géothermiques ont un impact visuel très limité. Un forage est totalement invisible une fois réalisé, la tête de puits étant enterrée. On en a même réalisé un dans la cour d'une école!



D'autres installations géothermiques importantes ont ensuite fleuri en région parisienne, avec des nappes dont la température était plus élevée (entre 70 et 85 °C). En 1986, on comptait pas moins de 74 forages, dont 54 dans le Bassin parisien, 15 dans le Bassin aquitain et 5 dans d'autres régions. Actuellement, 34 doublets (voir « Mot à mot ») sont toujours en exploitation en Ile-de-France, fournissant une énergie équivalente à plus de 90 000 tep (tonnes équivalent pétrole), soit 10 % de l'énergie distribuée par les réseaux de chaleur en Ile-de-France et de quoi chauffer 150 000 logements.

Au nombre des réalisations françaises : la Maison de la Radio à Paris. Ses 100 000 m<sup>2</sup> de bureaux et de studios sont en partie chauffés, depuis 1963, par une eau à 27 °C puisée à un peu moins de 600 mètres de profondeur. Cette eau est ensuite rejetée, refroidie à 7 °C, dans les égouts de la ville. Le « gisement géothermique » exploitable en France est estimé à 6 Mtep par an, mais en l'an 2000, l'énergie tirée des installations existantes n'a représenté que 0,117 Mtep, soit 2 % du potentiel du pays. C'est dire que ce secteur reste encore largement ouvert. Jusqu'ici, toutefois, l'exploitation de la chaleur terrestre s'est opérée seulement dans les endroits où l'on trouvait de l'eau chaude, ce qui constitue une sévère limitation. Si l'on veut assurer le développement de la géothermie dans le futur, il faut trouver le moyen de multiplier les zones intéressantes.

**MTEP**  
1 Mtep est égale à 1000000 tep. Une tonne équivalente pétrole (tep) correspond à la quantité d'énergie obtenue en brûlant une tonne de pétrole.

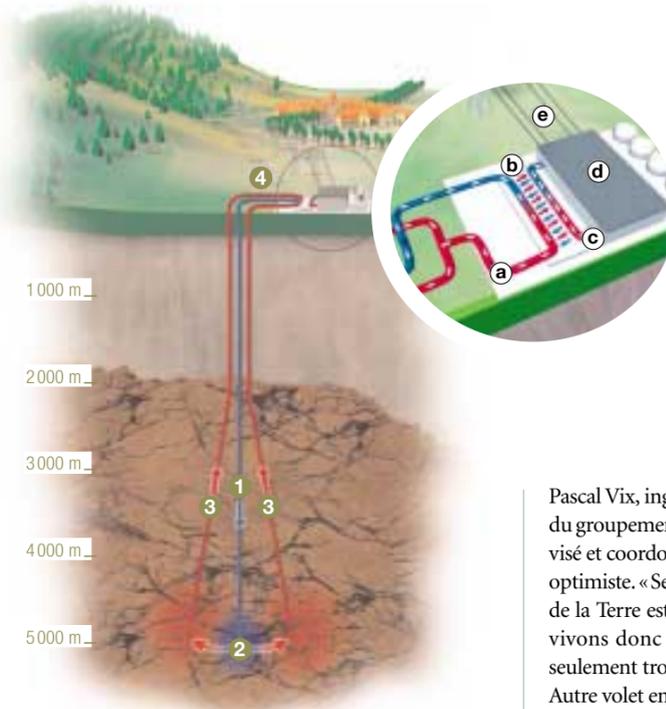
### La technique des roches chaudes sèches

Les spécialistes misent beaucoup sur la nouvelle technique dite des « roches chaudes sèches ». Son intérêt est de pouvoir exploiter la chaleur du sous-sol dans des zones où il n'existe pas de nappes aquifères à haute température. La méthode consiste à fracturer les roches entre deux forages et à faire circuler une eau froide venue de la surface, pour la réchauffer au contact des roches profondes. L'expérimentation grandeur nature la plus importante au monde est menée, depuis 1987, près de Soultz-sous-Forêts dans le nord de l'Alsace (un projet suisse équivalent est en cours près de Bâle, un autre au Salvador).

L'eau envoyée à 3 600 m de profondeur dans le réseau de fractures du granite, par un puits d'injection, a pu être récupérée sans perte, après avoir été réchauffée à 142 °C, par un second puits situé à 450 m du premier.

Les résultats de l'expérimentation de Soultz sont si favorables qu'un consortium industriel a été créé, rassemblant EDF, EDS (Électricité de Strasbourg), les électriciens allemand Pfalzwerke et italien Enel Green Power, ainsi que Shell international (Pays-Bas). La gérance est assurée par la société allemande Bestec. On est désormais passé du stade de la recherche à celui de la production industrielle d'électricité puisque les autorités françaises et allemandes, qui financent le projet, viennent de donner le feu vert au creusement des puits nécessaires à une première usine d'une puissance de 6 MWe, soit la consommation d'une ville de 25 000 habi-

## LE SITE PILOTE DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS (ALSACE)



4 En surface, l'eau chaude du circuit primaire (a) par l'intermédiaire d'un échangeur thermique (b) est transformée en vapeur dans le circuit secondaire (c) pour entraîner une turbine (d) qui produit de l'électricité (e).

1 Injection d'eau froide à 5 000 m de profondeur par le puits central.

2 Circulation d'eau dans les fractures et réchauffement au contact de la roche chaude (200 °C).

3 Extraction de l'eau réchauffée du sous-sol par deux puits de production.

tants. Ce prototype industriel devrait voir le jour d'ici à 2006 pour un coût des travaux estimé à 44 millions d'euros. 80 % seront assurés par des financements publics français, allemand et européen pour la première phase.

En France, d'autres sites présentant un potentiel calorifique supérieur à 180 °C, à 5 000 m de profondeur, ont été localisés dans le Languedoc-Roussillon et dans le Massif central. De telles réserves d'énergie ont également été repérées dans les Balkans et en Turquie.

### Un fort potentiel de développement

À l'échelle de la planète, le potentiel géothermique disponible avec cette technique des « roches chaudes sèches » devient important : il est estimé à 15 millions de tep par km<sup>2</sup> jusqu'à 10 km de profondeur. L'expérience de Soultz permet d'envisager le recours à ce nouveau type de géothermie à partir de 2030, à commencer dans les zones à fort gradient géothermique.

Pascal Vix, ingénieur à Électricité de Strasbourg et cogérant du groupement européen d'intérêt économique qui a supervisé et coordonné le projet de Soultz, se montre résolument optimiste. « Selon les estimations des experts, la température de la Terre est de 1 000 °C à 40 km de profondeur... Nous vivons donc sur un stock d'énergie quasi infini. Il faut seulement trouver le moyen de l'exploiter. »

Autre volet en expansion, celui de la géothermie dite superficielle, assistée par une pompe à chaleur. Elle représente la fraction la moins visible de l'énergie géothermique, utilisée pour chauffer ou climatiser des bâtiments de faible superficie. Ces pompes à chaleur ouvrent de nouvelles possibilités, envisageables à peu près partout. La technique consiste à creuser un double forage jusqu'à environ 150 m de profondeur, pour y introduire un échangeur de chaleur composé de tubes en polyéthylène. Le fluide qui y circule capte la chaleur du sous-sol pour alimenter une pompe à chaleur en surface. Un système largement développé en Suisse où l'on ne compte pas moins de 60 000 installations qui produisent l'équivalent de 440 GWh. Il en existe 40 000 en Allemagne et en Autriche, 300 000 en Suède et les États-Unis envisagent d'en créer 400 000 ! Il s'agit maintenant d'évaluer la volonté politique d'autres pays à cet égard, au moment où la tendance est au « mix énergétique » et à l'accroissement du pourcentage des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique global.

La géothermie, qui aurait dû rester une énergie extrêmement localisée compte tenu des conditions géophysiques à remplir pour la production d'électricité (utilisation en haute température), voit s'ouvrir de nouvelles perspectives avec l'expérience franco-allemande menée en Alsace. Il faudra cependant attendre la mise en service de l'unité pilote pour pouvoir bien évaluer les possibilités au niveau européen et mondial de cette nouvelle technologie et, surtout, les conditions économiques de ce type d'exploitation. ■

### INCONVÉNIENTS DE LA GÉOTHERMIE

➤ L'eau géothermale est le plus souvent salée, très chargée en sels minéraux : jusqu'à 100 g/l, soit trois fois plus que l'eau de mer ! Elle ne peut alors être utilisée qu'à travers un échangeur, c'est-à-dire un dispositif qui lui permet de céder sa chaleur à un circuit parallèle de chauffage contenant de l'eau douce, les deux liquides n'étant jamais en contact : il y a perte de rendement.

➤ Les eaux géothermales sont presque toujours corrosives. Cette corrosion (due au sel mais parfois également à des bactéries) augmente le coût de maintenance.

➤ Il y a un risque de pollution quand l'eau extraite contient des métaux lourds, ce qui nécessite de la réinjecter dans le sous-sol.

➤ Si l'énergie prélevée est gratuite, les coûts d'investissement et de maintenance sont, en revanche, très élevés.

➤ L'épuisement de la ressource est possible. Les stocks d'eau chaude souterraine sont certes considérés comme renouvelables (puisqu'ils se rechargent en permanence par la chaleur interne de la Terre), mais le rythme d'exploitation ne doit pas excéder celui de leur renouvellement.

➤ L'utilisation de la géothermie reste limitée à des régions très particulières, proches des zones volcaniques notamment.