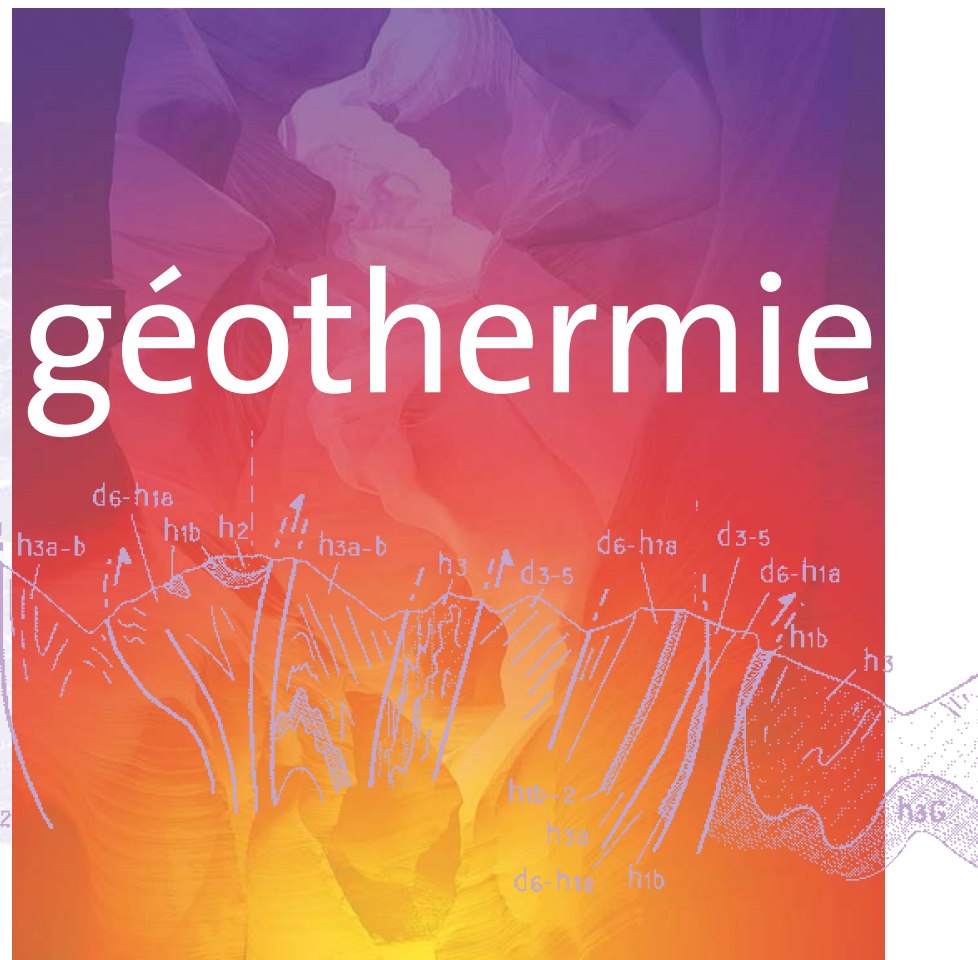




La géothermie



les enjeux
des
Géosciences

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Collection

Les enjeux des géosciences

Directeur de collection :

Jacques Varet

Comité de rédaction :

ADEME : Philippe Beutin, Bernard Lajouanie, Philippe Laplaige, Jean Lemale.

BRGM : Alain Desplan, Yves Horel, Laurent Le Bel.

Avec le concours des services et directions de l'ADEME et du BRGM.

Rédaction : Martine Castello

Conception et réalisation : BL Communication

Impression : Val de Loire Impressions

ISBN ADEME : 2-86817-786-7

ISBN BRGM : 2-7159-0952-7

Tous droits réservés. Reproduction partielle sur autorisation expresse.

Dépôt légal, décembre 2004.

ADEME



Avant-propos

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. 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. Même si elle a été utilisée de longue date pour le thermalisme et depuis le début du siècle et surtout l'après guerre, pour des procédés énergétiques modernes (production d'électricité, chauffage), les développements technologiques les plus significatifs ont vu le jour dans les années 70-80 sous le coup des chocs pétroliers.

Aujourd'hui, la politique nationale de lutte contre le changement climatique - qui vient de trouver une traduction dans le "Plan Climat" -, les politiques européennes, les accords internationaux - UNFCCC, Protocole de Kyoto, Fonds pour l'Environnement Mondial, ... - créent des mécanismes favorables au développement des énergies renouvelables. Pour la France, les enjeux pour la géothermie à court et moyen termes 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 DOM. A plus long terme, les travaux de R&D menés à Soultz pourraient amener au développement de la filière géothermie profonde.

Les technologies développées en France s'appuient sur un réseau d'opérateurs industriels, d'entreprises de services et d'équipes de recherche de qualité. Il pourra bénéficier à l'export des facilités mises en œuvre dans le cadre des politiques climat. Ici et maintenant, le développement de la géothermie dépendra d'abord de l'initiative de chacun : propriétaire, locataire, chef d'entreprise ou responsable d'établissement public ou de collectivité territoriale. L'ADEME et le BRGM sont là pour les aider à franchir le pas lorsque les conditions sont favorables. Notre souhait est que cette brochure y contribue.

Michèle Pappalardo
Présidente de l'ADEME

Philippe Vesseron
Président du BRGM

SOMMAIRE

La géothermie, énergie exemplaire ...3

- Une énergie du développement durable4
- La chaleur de la Terre6
- Du bain de boue à la turbine8
- La géothermie dans le monde10
- Des applications très diverses12
- Les ressources mondiales14

Comment ça marche ?15

- A la découverte des gisements géothermiques16
- Les méthodes d'exploitation18
- Des contraintes bien maîtrisées20

La géothermie en France21

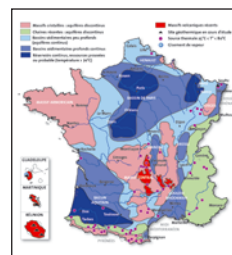
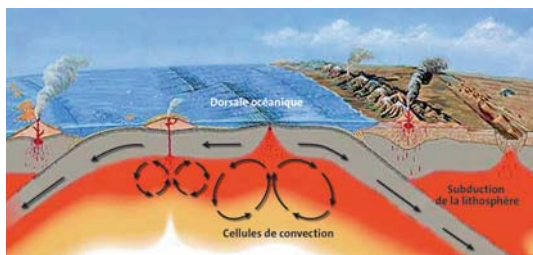
- Des ressources importantes22
- Le chauffage collectif dans le Bassin parisien23
- Les autres ressources en France métropolitaine26
- Soultz-sous-Forêts ou l'électricité du futur28
- La géothermie dans les départements d'outre-mer30
- Les pompes à chaleur32

L'avenir de la géothermie35

- Face aux énergies fossiles36
- La place de la géothermie parmi les énergies renouvelables37
- Perspectives39

ANNEXES

- Les aides à la géothermie42
- Les acteurs de la géothermie43



I

La géothermie, énergie exemplaire

- Une énergie
du développement durable
- La chaleur de la Terre
- Du bain de boue à la turbine
- La géothermie dans le monde
- Des applications très diverses
- Les ressources mondiales

La géothermie, énergie exemplaire

Renouvelable, propre, sans rejets, la géothermie est présente sur tous les continents. Elle se consomme sur place, elle n'est pas tributaire des conditions climatiques et offre un coût d'exploitation faible.

Une énergie du développement durable

En 1992, lors de la conférence de Rio sur l'environnement, les dirigeants de toutes les nations témoignaient de leur prise de conscience d'une dégradation avancée de l'état de la planète (diminution des ressources, pollution des mers et des terres, effet de serre, pluies acides, etc.). Pour infléchir la tendance avant qu'il ne soit trop tard, la plupart des pays - dont les Etats membres de l'Union européenne - travaillent à la traduction du concept de développement durable dans leurs politiques. Celui-ci se définit par la nécessité de satisfaire les besoins exprimés aujourd'hui sans compromettre les besoins des générations à venir. Comme les autres énergies renouvelables, la **géothermie** s'est alors retrouvée sur le devant de la scène, car elle **est depuis toujours par excellence une option du développement durable**.

La géothermie est écologique

Une exploitation géothermique produit **peu de rejets**. La quantité moyenne de CO₂ émise dans

l'atmosphère par les centrales géo-thermo-électriques dans le monde (estimation faite sur 73% du parc mondial) est de 55 g/kWh, **alors qu'une centrale au gaz naturel en produit 10 fois plus**. Ce niveau peut être ramené à des valeurs nulles par la ré-injection des fluides géothermaux dans les réservoirs dont ils sont issus - une technique largement répandue aujourd'hui. C'est donc une énergie **propre** qui ne participe pas à la dégradation du climat comme le font les énergies fossiles.

La géothermie est renouvelable

Contrairement aux réserves fossiles, la géothermie ne se vide pas de son réservoir au fur et à mesure que l'on s'en sert. Le vecteur, de l'eau piégée ou transitant dans le sous-sol, se renouvelle soit naturellement par le ruissellement des eaux de surface, soit par l'option technologique de l'injection artificielle. Quant à la chaleur, elle est contenue dans la roche qui représente 90% ou plus du gisement.

GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

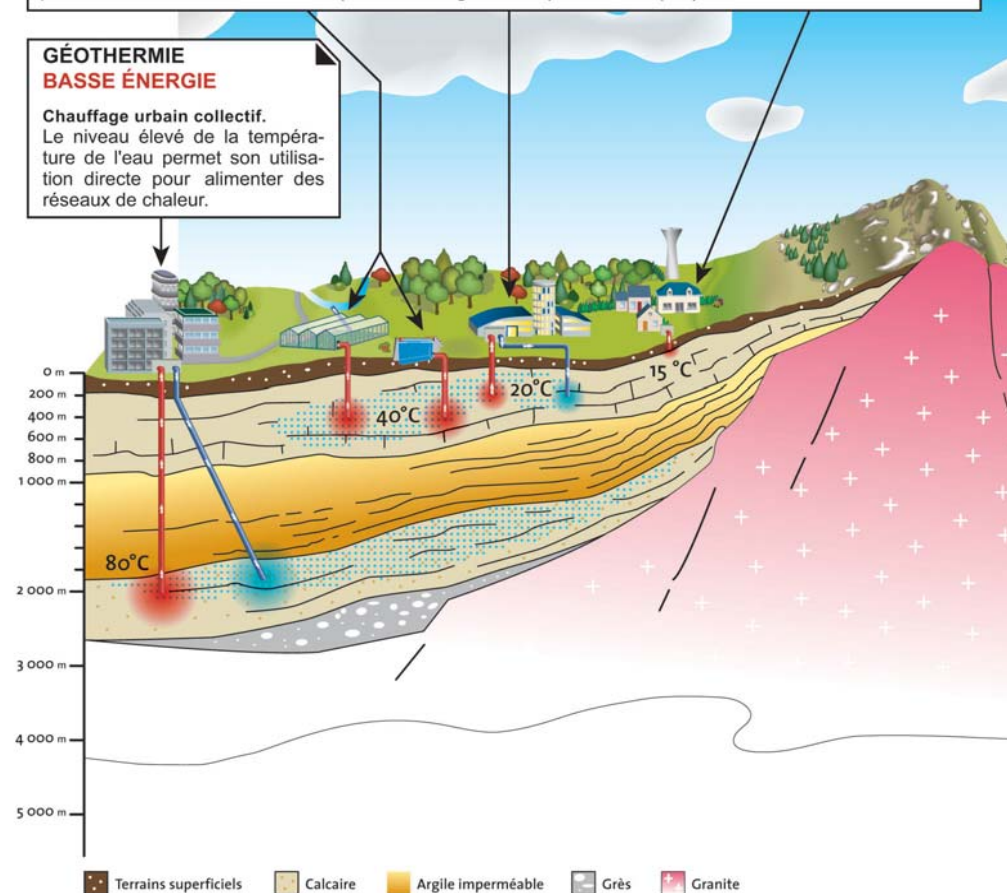
Chauffage de piscines, de serres...
Bien qu'elle présente une faible température, l'eau peut directement être utilisée pour le chauffage de piscines, serres ou bassins de pisciculture.

Chauffage par pompe à chaleur.
La température de l'eau insuffisante pour le chauffage direct de locaux, nécessite de recourir à des pompes à chaleur sur eau souterraine ou à des sondes géothermiques.

Chauffage de maisons individuelles.
Les calories nécessaires au chauffage sont prélevées par un dispositif associant une pompe à chaleur à un capteur enterré dans le sous-sol superficiel.

GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

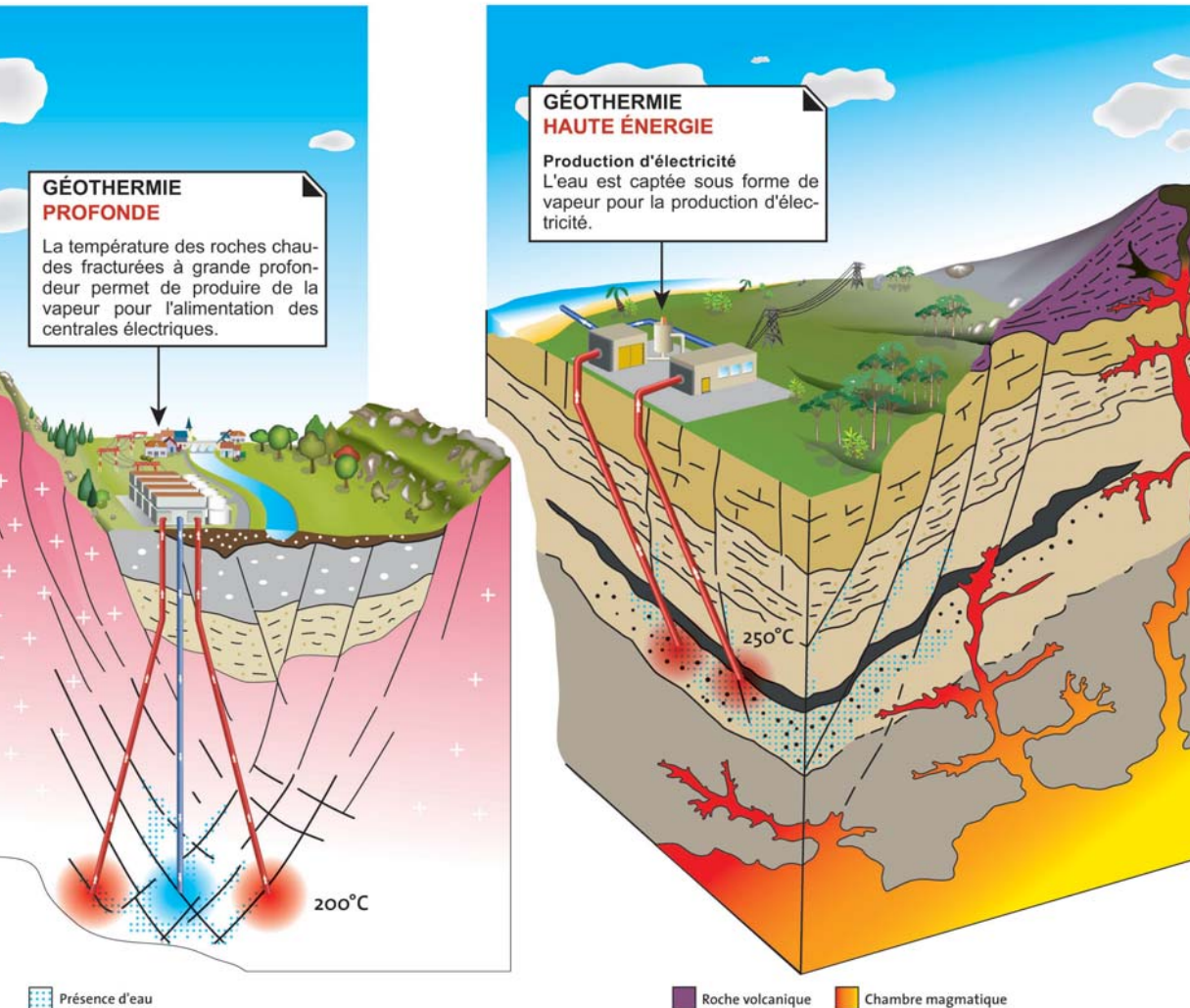
Chauffage urbain collectif.
Le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter des réseaux de chaleur.



La géothermie est partout

A la différence des énergies fossiles les plus utilisées aujourd'hui, ces réserves ne sont pas situées dans quelques sites particuliers, éventuellement désertiques ou au fond des mers. La chaleur du sous-sol est présente **sur tous les continents**, offerte à

tous les hommes. Evidemment, selon la structure des formations géologiques ou la composition des roches, cette énergie sera plus ou moins facile à extraire, mais les technologies existent aujourd'hui pour permettre un développement planétaire de la géothermie.



La géothermie est locale

Par nature, la géothermie est une énergie locale, **à consommer sur place**. Entre la chaleur du sous-sol et les activités humaines de surface, des liens sont possibles pour adapter la ressource aux besoins, ou les besoins aux ressources. On évite ainsi les pertes d'énergie induites par le transport de l'électricité et les pollutions provoquées par le transport routier du fioul. En outre on assure un développement local.

La géothermie est régulière

Contrairement à l'énergie solaire ou éolienne, **la géothermie n'est pas tributaire des conditions climatiques**. Elle ne dépend que des caractéristiques intrinsèques du sous-sol (gradient géothermique, perméabilité des roches...), une constance qui assure une grande régularité dans sa mise en œuvre. Ainsi, le taux de disponibilité des centrales géothermales électriques est de 90% en moyenne et peut atteindre 100% pour les réseaux de chaleur.

La géothermie est économique

L'accès à une ressource géothermique nécessite un investissement de base, constitué essentiellement par la réalisation d'un ou plusieurs forages. Particulièrement lourd dans les phases d'exploration à risques, en terrain inconnu, l'investissement va décroissant au fur et à mesure du développement du gisement. Mais, si l'investissement initial est élevé, **son coût d'exploitation est faible**. Il est de plus en plus compétitif avec les énergies fossiles (dont les prix iront croissant avec la raréfaction des ressources et les contraintes climatiques).

Du grec gêo (terre) et thermos (chaud), la géothermie consiste à exploiter la chaleur stockée dans le sous-sol de notre planète sous forme d'eau ou de vapeur. Cette énergie est potentiellement considérable : un km² de roche, sur une profondeur de 10 km, renferme en moyenne une quantité d'énergie équivalant à 15 millions de tep. L'utilisation de la chaleur de la terre pour le chauffage, la climatisation ou la production d'électricité, contrairement aux énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole) pourtant extraites elles aussi des profondeurs, semble n'offrir que des avantages.

◀ La géothermie est diversifiée : les utilisations de la géothermie varient en fonction de la profondeur. Elles sont très nombreuses : chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, chauffage de logements individuels, de piscines, de serres, chauffage par pompe à chaleur, production d'électricité...

La chaleur de la Terre

Ce n'est pas sans raison que les traditions ont placé l'enfer et son feu purificateur au centre de notre planète. Sous nos pieds, la Terre est chaude, et même de plus en plus chaude à mesure que l'on s'enfonce dans ses entrailles.

Le gradient géothermal

Expérimenté concrètement par des générations de mineurs de fond et aujourd'hui bien mesuré, l'accroissement de la température en fonction de la profondeur est appelé "**gradient géothermal**". Il est en moyenne, sur la planète, de $3,3^{\circ}\text{C}$ par 100 mètres, le flux d'énergie thermique à l'origine de ce gradient étant de l'ordre de 60 mW/m^2 . Mais ces

valeurs peuvent être nettement supérieures dans certaines zones instables du globe, et même varier de façon importante dans les zones

continentales stables.

Ainsi, le **gradient géothermal est en moyenne de 4°C en France**, et varie de $10^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ dans le nord de l'Alsace à seulement $2^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ au pied des Pyrénées.

Le flux de chaleur

Une partie de la chaleur de la Terre est une relique de sa formation, il y a 4,55 milliards d'années. Pour donner naissance à la Terre, des poussières, des gaz, des roches flottant dans la banlieue du

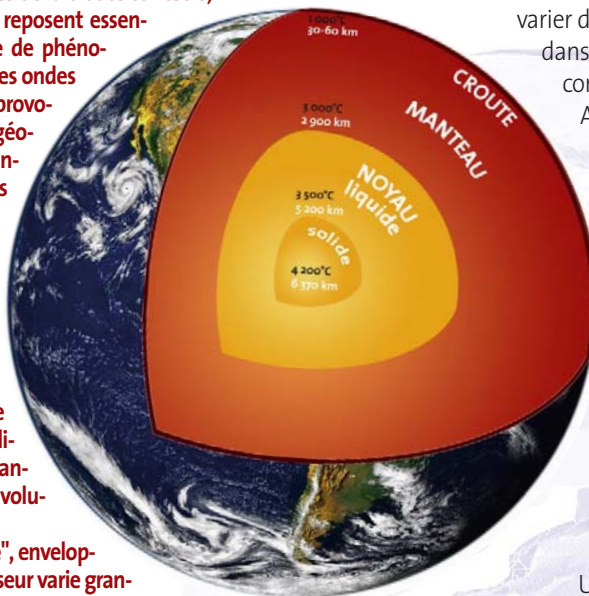
La structure interne du globe

Les observations directes ne dépassant pas les dix premiers kilomètres de la croûte terrestre, nos connaissances reposent essentiellement sur l'étude de phénomènes de propagation des ondes sismiques naturelles ou provoquées lors d'explorations géophysiques. On a ainsi pu distinguer trois enveloppes principales dans la structure du globe.

Au centre, sur un rayon de $3\,470 \text{ km}$, un alliage de fer et de nickel, solide au cœur et liquide autour, forme le "**noyau**", qui représente seulement 16% du volume total mais 67% de la masse terrestre. Il est entouré du "**manteau**" sur une épaisseur de $2\,900 \text{ km}$. Riche en silicate de fer et magnésium, le manteau représente plus de 80% du volume du globe.

Enfin vient l'écorce ou "**croûte**", enveloppe moins dense dont l'épaisseur varie grandement, puisqu'elle atteint entre 30 et 70 km dans les zones continentales pour seulement 20 km sous les océans, et seulement quelques kilomètres au niveau des dorsales et des rifts.

L'écorce et la partie supérieure du manteau constituent la **lithosphère**. Cet ensemble rigide, divisé en plusieurs plaques, flotte sur une couche inférieure du manteau : l'**asthénosphère**.



© 2000-2001 Geothermal Education Office

▲ **Volcan Kilauéa à Hawaï.** Le volcanisme s'observe le plus souvent à la frontière des plaques lithosphériques où les gradients géothermaux atteignent 30°C par 100 m.

tout jeune soleil se sont assemblées par accréation. Au centre, dans le noyau, **une énergie considérable s'est accumulée dans la masse**. Elle correspond à l'énergie potentielle issue de la condensation de la planète. Une vraie fournaise : la température du noyau frise les $4\,200^{\circ}\text{C}$. Le manteau de roche en fusion qui l'entoure est lui aussi très chaud, sa température variant entre 1 000 et 3 000 degrés. Mais toute cette chaleur remonte difficilement à la surface car les roches intermédiaires de l'écorce terrestre sont de très mauvais conducteurs. L'essentiel de l'énergie arrive donc jusqu'à nous par **conduction**, c'est ce "**flux de chaleur**" qui explique le gradient géothermal.

L'origine de la chaleur

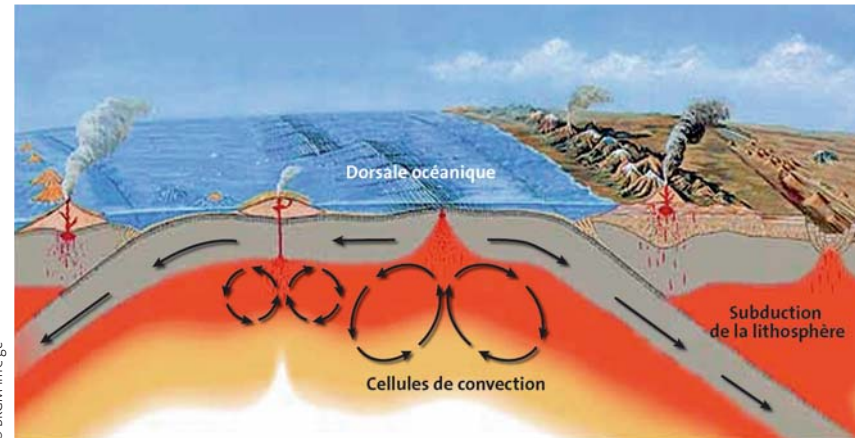
Pourtant, la chaleur dégagée par notre globe n'a pas pour principal responsable le refroidissement de son noyau, mais la **désintégration des éléments radioactifs** présents dans ses roches : uranium, thorium, potassium, etc. 90% de l'énergie dissipée provient en effet de ce mécanisme. La chaleur émise

par la fission varie avec la **composition chimique des roches** – elle est environ trois fois plus élevée, par exemple, pour les granites que pour les basaltes. Elle varie aussi selon l'**âge des roches**, raison pour laquelle les gradients géothermiques sont plus élevés dans les plates-formes jeunes, comme en France et en Europe du Sud, que dans les socles anciens, comme en Scandinavie. Pourtant, même dans ces conditions, la géothermie y a connu ces dernières années un grand essor, notamment pour le chauffage.

De la chaleur aux frontières

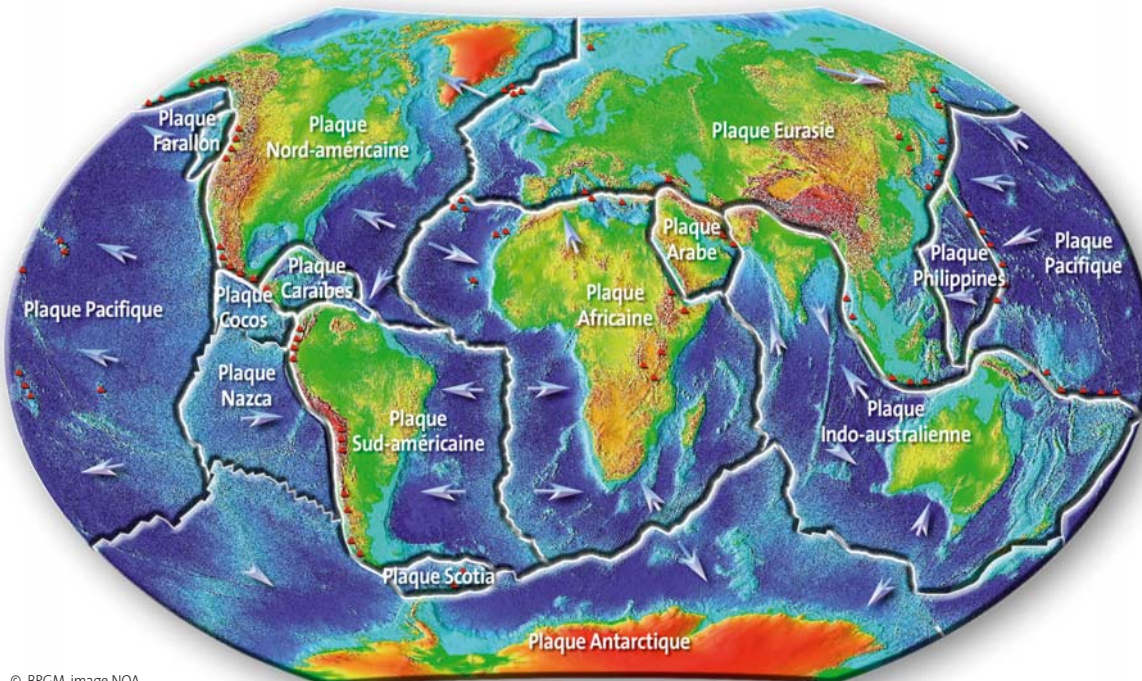
Il y a en outre des lieux où le flux de chaleur est plus élevé car le magma est parvenu à remonter vers la surface, en réchauffant au passage les roches qui l'entourent. Ce phénomène s'explique

Le mouvement des plaques lithosphériques : zone d'expansion le long d'une dorsale océanique (au centre), zones de subduction avec création d'une cordillère (à droite) ou d'un arc insulaire (à gauche). Les zones de rift continental et de point chaud océanique sont également figurées.



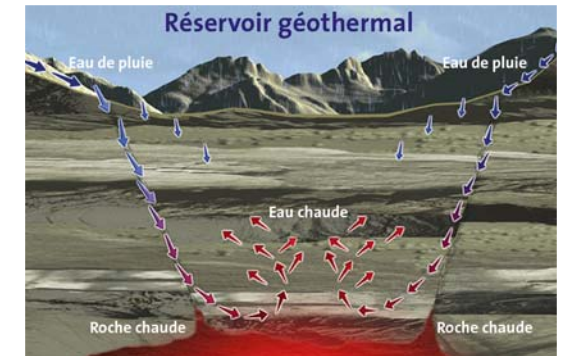
© BRGM-image

par le fait que la **lithosphère** (l'écorce et la couche supérieure du manteau) est fragile (cassante). Loin d'être une surface homogène, elle est constituée de **douze plaques principales** (et plusieurs autres petites) qui flottent sur une couche plus fluide, l'**asthénosphère**, dotée de mouvements de convection lents et réguliers. C'est essentiellement à la frontière de ces plaques – et plus généralement dans les zones fragiles de l'écorce – que le magma peut se glisser et remonter, donnant naissance aux intrusions plutoniques et aux volcans. Ici, la chaleur se dissipe essentiellement par **convection** ; ce transfert d'énergie est beaucoup plus efficace. Les gradients peuvent atteindre 30°C par 100m.



© BRGM, image NOAA

Schéma de principe d'un gisement géothermique de haute température. L'eau de pluie s'infiltré et se trouve réchauffée au contact de la roche portée à haute température par la proximité du réservoir magmatique. La production géothermique est facilitée par la fracturation naturelle des roches.



© 2000-2001 Geothermal Education Office

Carte des frontières actives de plaques lithosphériques (image NOAA). Dans ces zones le flux de chaleur y est plus élevé ; le magma remonte à la surface et réchauffe les roches qui l'entourent. En rouge sont représentées les chaînes de volcans.

Du bain de boue à la turbine

Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'homme remontent à près de 20 000 ans. Tout au long de l'histoire des civilisations, la pratique des bains thermaux s'est multipliée et depuis un siècle, les exploitations industrielles se sont développées pour la production d'électricité et le chauffage urbain.

S'il faut trouver des origines lointaines à l'utilisation de la géothermie, pourquoi ne pas se demander, comme les historiens de la Préhistoire, quel rôle jouèrent les sources chaudes dans la résistance de l'humanité aux dernières glaciations ? Les plus anciens vestiges en rapport avec la chaleur de la Terre, retrouvés sur le site de Niisato au Japon, sont des objets en pierre volcanique taillés (outils ou armes) datant justement du troisième âge glaciaire, il y a 15 ou 20 000 ans. Les régions volcaniques ont donc constitué, très tôt, des pôles d'attraction, du fait de l'existence de fumerolles et de sources chaudes que l'on pouvait utiliser pour se chauffer, cuire des aliments ou tout simplement se baigner.

Les thermes, lieu de rencontre et d'échange

Avec l'apparition de la civilisation, la pratique des bains thermaux et l'utilisation des boues thermominérales se répand, tant au Japon qu'en Amérique ou en Europe. Les Etrusques, puis les Romains, font des bains publics un lieu de rencontre



De nombreux vestiges archéologiques témoignent de la pratique des bains thermaux tout au long de l'histoire de l'humanité.

◀ Photo de fond de page : première mondiale en 1904, à Larderello en Italie, le prince Conti allume des ampoules avec de l'électricité produite par géothermie.



Vue de la Grande Source Thermale de 55 degrés qui donne à elle seule 2 500 l. en 24 heures et alimente d'abord une fontaine dont l'eau est employée à toutes sortes d'usages domestiques. C'est avec cette eau que les habitants de la ville chauffent en hiver leurs habitations, qu'ils trempent leur soupe qu'ils préparent leurs aliments sans usage de combustibles. Sur 2 maisons environnées, les eaux tiennent de cet avantage. Au rez-de-chaussée de chaque école est pratiqué un petit canal en maçonnerie communiquant avec un bassin intérieur recouvert d'une dalle mobile. L'eau entrant par le canal se répand dans le bassin, chauffe le pavé, et va ensuite ailleurs. Chacun peut diminuer le degré de chaleur.

Le Cantal Pittoresque
1496 Chaudesaigues — Source du Parc
Fontaine de CHAUDESAIGUES

et d'échange d'idées, ce qu'ils resteront tout au long du premier millénaire de notre ère, où malgré décadence, invasions et rudesse féodale, les thermes sont encore fort prisés. Les établissements thermaux se multiplieront ensuite dans toutes les régions du monde, et notamment dans les îles volcaniques du Japon, d'Islande et de Nouvelle-Zélande.

Un réseau de chaleur à Chaudesaigues dès le XIV^e siècle

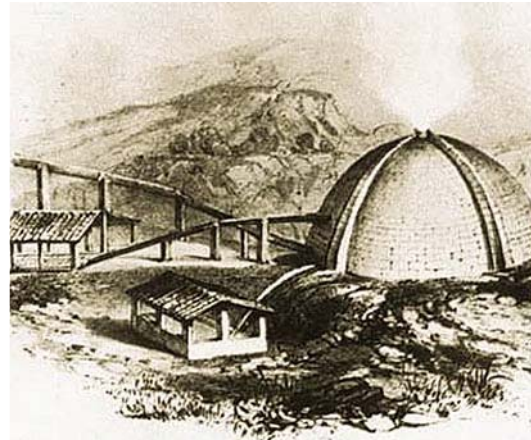
En France, aux confins méridionaux de l'Auvergne, la source du Parc à Chaudesaigues (Cantal) s'enorgueillit d'être la plus chaude d'Europe, avec ses 82°C. Dès 1330, les archives font mention d'un réseau distribuant l'eau géothermale à quelques maisons, et pour l'entretien duquel le seigneur local prélevait une taxe. Elle servait même, déjà, à quelques usages "industriels" comme le lavage de la laine et des peaux. Pourtant, à la même époque, en Italie, dans la région de Volterra en Toscane, les *lagoni*, petits bassins d'eau chaude saumâtre d'où s'échappe la vapeur à plus de 100°C, sont exploités pour l'extraction du soufre, du vitriol et de l'alun.

Les premières exploitations industrielles

Pendant longtemps l'homme s'est contenté d'utiliser la chaleur qui affleurait naturellement, ici ou là, à la

surface du globe. Mais à partir du XIX^e siècle, les progrès techniques et une meilleure connaissance du sous-sol vont permettre de la chercher de plus en plus en profondeur et de l'exploiter de mieux en mieux. En 1818, le Français François Larderel entreprend dans la région de Volterra la première véritable exploitation industrielle – donnant naissance à un village qui portera son nom. Il invente la technique du "lagoni couvert", permettant de capter la vapeur à une température suffisante pour alimenter des machines destinées à pomper les eaux boriques. L'Islande, à la même époque, consacre son premier usage industriel de la géothermie à l'extraction du sel. Et en France, on réalise entre 1833 et 1841, dans le quartier de Grenelle à Paris, le premier forage pour capter, à 548 m, l'eau douce à 30°C des sables albiens.

La technique ►
du "lagoni couvert" permet de recueillir la vapeur et de la faire sortir à une pression suffisante pour alimenter les chaudières d'évaporation et pomper les eaux boriques.



DK

Unité de production d'électricité géothermale par turbine à l'Imperial Valley en Californie.



© 2000-2001 Geothermal Education Office

Les développements au XX^e siècle

Au vingtième siècle, le mouvement s'amplifie, porté par des besoins toujours plus élevés en énergie pour alimenter la civilisation moderne et, dans une moindre mesure, par l'intérêt que l'on commence à trouver aux énergies renouvelables. C'est encore en Italie, à Larderello, que la géothermie produit de l'électricité pour la première fois au monde, en 1904. Le prince Ginori Conti allume symboliquement cinq ampoules, annonçant pour l'année suivante la construction de la première centrale expérimentale de 20 kW.

◀ Le premier réseau moderne de chauffage par géothermie a été installé en 1930 à Reykjavik en Islande. Aujourd'hui 95% des habitations de l'île sont chauffées au moyen de 700 km de conduites isolées qui transportent l'eau chaude.

Les exploitations ►
géothermiques nécessitent la réalisation de forages pour faire remonter les fluides chauds à la surface.



© 2000-2001 Geothermal Education Office



DK



© 2000-2001 Geothermal Education Office

La géothermie dans le monde

La géothermie a donné naissance à deux filières qui se distinguent par des technologies et des applications différentes : la production de chaleur pour la basse et très basse température et la production de l'électricité pour la haute et moyenne température.



© Wilfred A. Elders

▲ Sources chaudes à Umi Jigoku (Beppu) au Japon.

La production de chaleur

La puissance installée dans les 55 pays qui déclarent utiliser directement cette source en 2000 est estimée à 15 GW et l'énergie utilisée à 53 TWh/an, ce qui équivaut à 1% de la consommation d'énergie mondiale. Les principaux pays producteurs sont le Japon, la Chine, l'ex-URSS, les pays d'Europe centrale et orientale et les Etats-Unis. La France a joué un rôle de pionnier dans le développement de la géothermie en montrant l'exemple notamment avec la technique du doublet et avec un réservoir dans le Bassin parisien, le Dogger, qui présente la plus grande densité au monde d'opérations de géothermie en fonctionnement. La technique du doublet géothermal pour alimenter les réseaux de chaleur de l'habitat collectif est devenue une référence mondiale. Ses 1 360 GWh produits en 2002 proviennent

principalement des 34 exploitations en Ile-de-France, d'une capacité cumulée de 330 MW. Construites entre 1967 et 1987, elles lui valent une place de leader dans l'Union européenne. Selon les dispositifs employés et le niveau de la température, cette énergie est utilisée directement pour l'industrie (serre, pisciculture, séchage de produits agricoles, thermalisme), ou alimente un réseau de chaleur pour l'habitat collectif, le chauffage et la climatisation des entreprises ou de l'habitat individuel. Cette filière est en pleine progression : en Europe, son taux de croissance a été de 4,3% en 2001 et 2002 (1 051,6 MW en 2002). Elle devrait également connaître un développement important dans les pays où les ressources sont abondantes (Europe centrale et orientale, Russie et Chine).

La production d'électricité

On dénombre aujourd'hui un peu plus de 350 installations géothermiques haute et moyenne énergie dans le monde. La puissance mondiale de ces centrales électriques est d'environ 8 GW, ce qui ne représente que 0,2% de la puissance mondiale électrique installée sur la planète. Très loin derrière l'hydroélectricité, en nombre de MWh produits, la géothermie reste cependant, avec la biomasse et l'éolien, l'une des trois autres sources principales d'électricité par énergie renouvelable dans le monde. L'utilisation actuelle de cette ressource n'est pas équilibrée sur la planète. La disparité géographique de la production découle en partie de celle des ressources. Les principaux pays producteurs se situent sur la



© Josef Hölmjárn

Vue aérienne du site géothermal de Wairakei, le plus grand réservoir géothermique de Nouvelle-Zélande. L'eau chaude est captée par une centaine de forages.



© Emil Thor



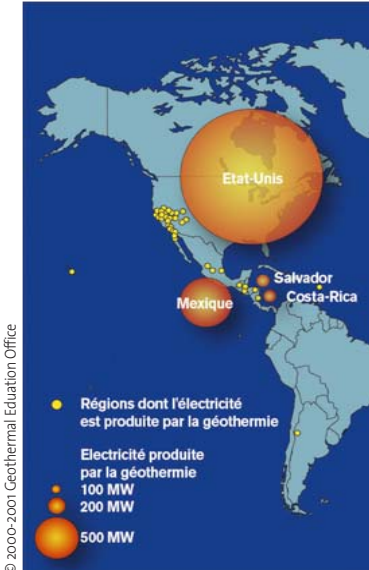
© Contact Energy



© 2000-2001 Geothermal Education Office

Islande : test de production d'un puits à l'usine géothermale de Krafla. Installation géothermale de Nesjavellir.

Les principaux pays producteurs d'électricité géothermique.



Isolateurs dans centrale géothermique.

Turbines au Mexique.

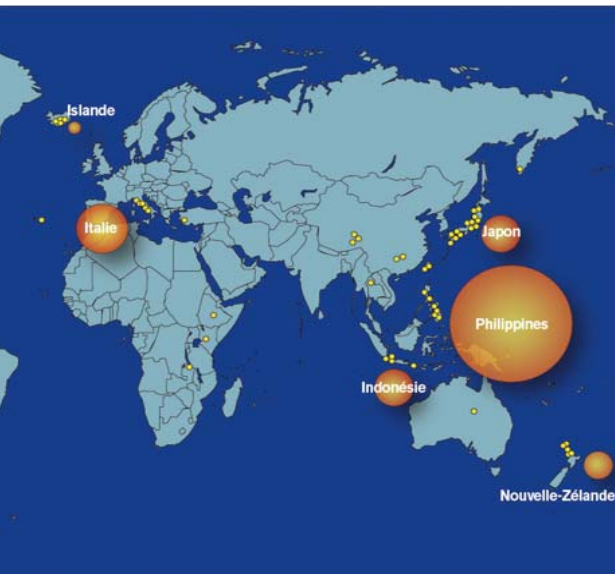
Ci-contre à droite : séparateur de la station de Sambaloran à Leyte (Philippines).

Aux Etats-Unis, vue des trois usines à travers la "Big sulphur Creek".



© 2000-2001 Geothermal Education Office

La géothermie très basse énergie utilisée pour l'habitat individuel a été rendue possible grâce à l'assistance de pompes à chaleur. Aux USA, les pompes à chaleur géothermales représentent aujourd'hui plus de 50% de l'exploitation géothermale basse énergie. Et ce sont la Suède et la Suisse qui ont pris une nette avance dans ce domaine sur le continent européen. L'utilisation des pompes à chaleur devrait s'étendre dans les années futures poussée par la nécessité de rationaliser l'usage de l'électricité, et de protéger l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre produits par les combustibles fossiles.



périphérie du Pacifique : six dans les Amériques pour 3 390 MW, cinq en Asie pour 3 100 MW, deux en Océanie pour 437 MW.

L'Europe compte six pays producteurs, pour une puissance de 1 000 MW, et deux seulement en Afrique pour 54 MW. La géothermie couvre 0,4% des besoins mondiaux en électricité. Toutefois, dans certains pays sa contribution aux besoins nationaux peut être bien plus élevée et atteindre plusieurs pour-cents.

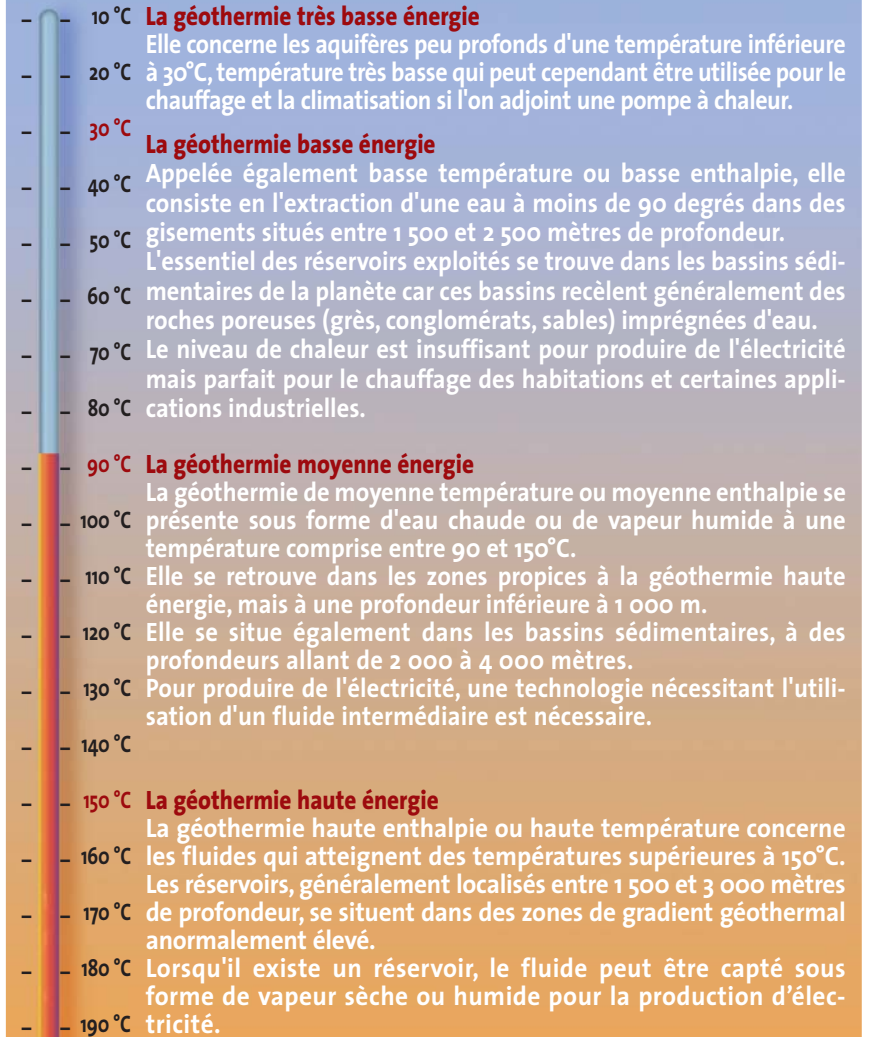
Avec 202 unités réparties sur 22 champs géothermiques (Californie, Nevada, Utah et Hawaii), les Etats-Unis arrivent en tête des pays producteurs avec une capacité installée de 2 220 MW et une production importante (15 TWh/a), mais qui ne satisfait que 0,4% des besoins. Viennent ensuite les Philippines (1 900 MW), l'Italie (785), 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, s'il n'existe pas en métropole de production d'électricité, c'est à Bouillante en Guadeloupe que se trouve la seule centrale électrique géothermique française (4,2 MW, auxquels devraient s'ajouter 10 MW supplémentaires en 2004). Outre la Guadeloupe, la ressource est présente dans les îles volcaniques en Martinique et sans doute à La Réunion.

La géothermie comme source d'électricité devrait poursuivre son essor dans le monde (il fut de 11% par an pendant la dernière décennie). Les investissements se tournent vers les pays en croissance économique dotés de ressources : Philippines, Indonésie, Amérique latine, ...



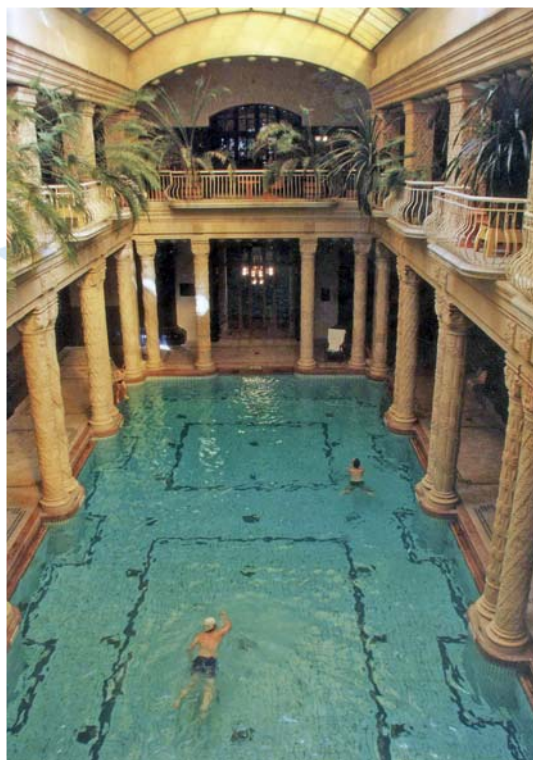
Les différents types de géothermie



La géothermie profonde des roches chaudes fracturées (**hot dry rock**) s'apparente à la création artificielle d'un gisement géothermique dans un massif cristallin. A trois, quatre ou cinq kilomètres de profondeur, de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Elle se réchauffe en circulant dans les failles et la vapeur qui s'en dégage est pompée jusqu'à un échangeur de chaleur permettant la production d'électricité. Plusieurs expérimentations de cette technique sont en cours dans le monde, notamment sur le site de Soultz-sous-Forêts en Alsace.

Des applications très diverses

La production d'électricité, le thermalisme et le chauffage urbain restent les applications les plus connues et les plus répandues de la géothermie. Mais les applications de la géothermie sont bien plus ouvertes. Toute une gamme d'usages sont possibles, qui ne dépendent que de l'imagination des hommes et des caractéristiques des fluides présents sous leurs pieds.



© John W. Lund

◀ La piscine de l'hôtel Gellert à Budapest en Hongrie est chauffée par géothermie.

► Pisciculture : une augmentation de la température de quelques degrés et son maintien à un niveau constant produit un accroissement du métabolisme chez les poissons et les crustacés.

Géothermie et agriculture

Le chauffage des serres par air ou par sol constitue un domaine important d'application de la géothermie, car beaucoup d'énergie est nécessaire pour ce type d'agriculture : en moyenne 200 tonnes de fioul par hectare et par an pour des cultures maraîchères et 400 tonnes pour les cultures florales. Changer d'énergie pour utiliser la chaleur du sous-sol représente donc le meilleur moyen de faire des économies tout en protégeant l'environnement. Dans le réseau de chaleur d'une serre, la fourniture en température est calculée pour tenir compte évidemment de l'ensoleillement dans la journée et de la chaleur fournie par effet de serre.

Géothermie et pisciculture

Pisciculture et géothermie vont bien ensemble. Une augmentation 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 chaude toute l'année prolonge encore leur possibilité de croissance. Une installation de pisciculture comporte un puits unique ou un doublet. L'eau chaude est utilisée directement, ou au travers d'un échangeur quand sa nature n'est pas compatible avec l'élevage.



DK

Plantes tropicales dans le Gers

L'exploitation, mise en service en 1992 à Lamazère dans le Gers, comporte 3,6 hectares de serres en verre destinées à la production de plante tropicales comme le yucca. Un puits unique vient chercher dans des sables datant de l'Eocène, à 1 700 mètres de profondeur, une eau douce à la température de 57°C. L'économie d'énergie annuelle est estimée à 1300 tep, le coût de chauffage incluant l'amortissement et la maintenance a été ramené à 4,5 euros par m³ et par an au lieu de 8,40 euros par m³ par an avec le gaz. Ces économies ont permis d'envisager le doublement de l'exploitation.



Géothermie et industrie

Une majorité des usages industriels directs a lieu entre 100 et 200°C. Dans ce domaine des hautes et moyennes énergies, 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, lorsque le fluide est très chaud et chargé en sels divers, il est intéressant de récupérer, outre la chaleur, 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 Turquie produit ainsi 40 000 tonnes par an de CO₂ liquide ou de neige carbonique à partir de ses installations géothermiques.

Géothermie et loisirs

La géothermie se prête bien à la douceur de vivre. 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 de la géothermie 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.



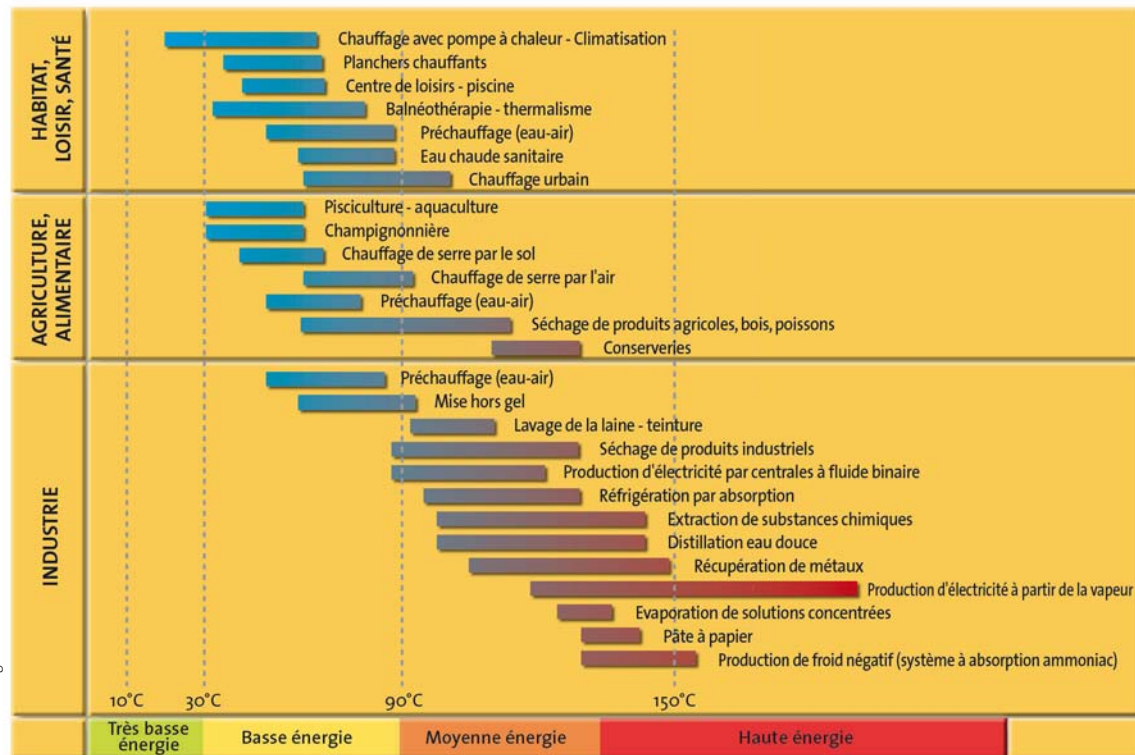
DK

Caviar géothermique en Gironde

L'installation de pisciculture de Mios-le-Teich en Gironde a été mise en service sur un ancien forage pétrolier réhabilité pour un usage géothermique. Pour produire annuellement ses 70 tonnes d'esturgeons et quelques centaines de kilos de caviar, elle va chercher de la chaleur à 1 830 mètres de profondeur dans des eaux qui jaillissent à 74° C en tête de puits mais qui ne peuvent être utilisées directement pour l'élevage car leur salinité est trop forte. L'eau d'élevage est prélevée dans une rivière proche et un système d'échangeur permet de lui transférer la chaleur de l'eau géothermale. L'économie d'énergie annuelle est estimée à 4 000 tep.



Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures



© BRCM-im@gc

La production de froid à partir d'une ressource géothermique peut se faire par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur.



© All Refrigeration Equipment



© All Refrigeration Equipment

De nombreuses utilisations sont possibles : fabrication du froid en usine agro-alimentaire, climatisation, réfrigération, stockage saisonnier de froid et de chaleur...

Les ressources mondiales

La géothermie haute énergie

Les ressources de géothermie haute énergie dont la température dépasse 150°C se situent, entre 1 500 et 3 000 mètres de profondeur, dans des zones géographiques au gradient géothermal anormalement élevé. Elles correspondent aux régions volcaniques situées à proximité des frontières des plaques lithosphériques : "ceinture de feu" du Pacifique, arc des petites Antilles, arc méditerranéen ou encore grand rift africain.

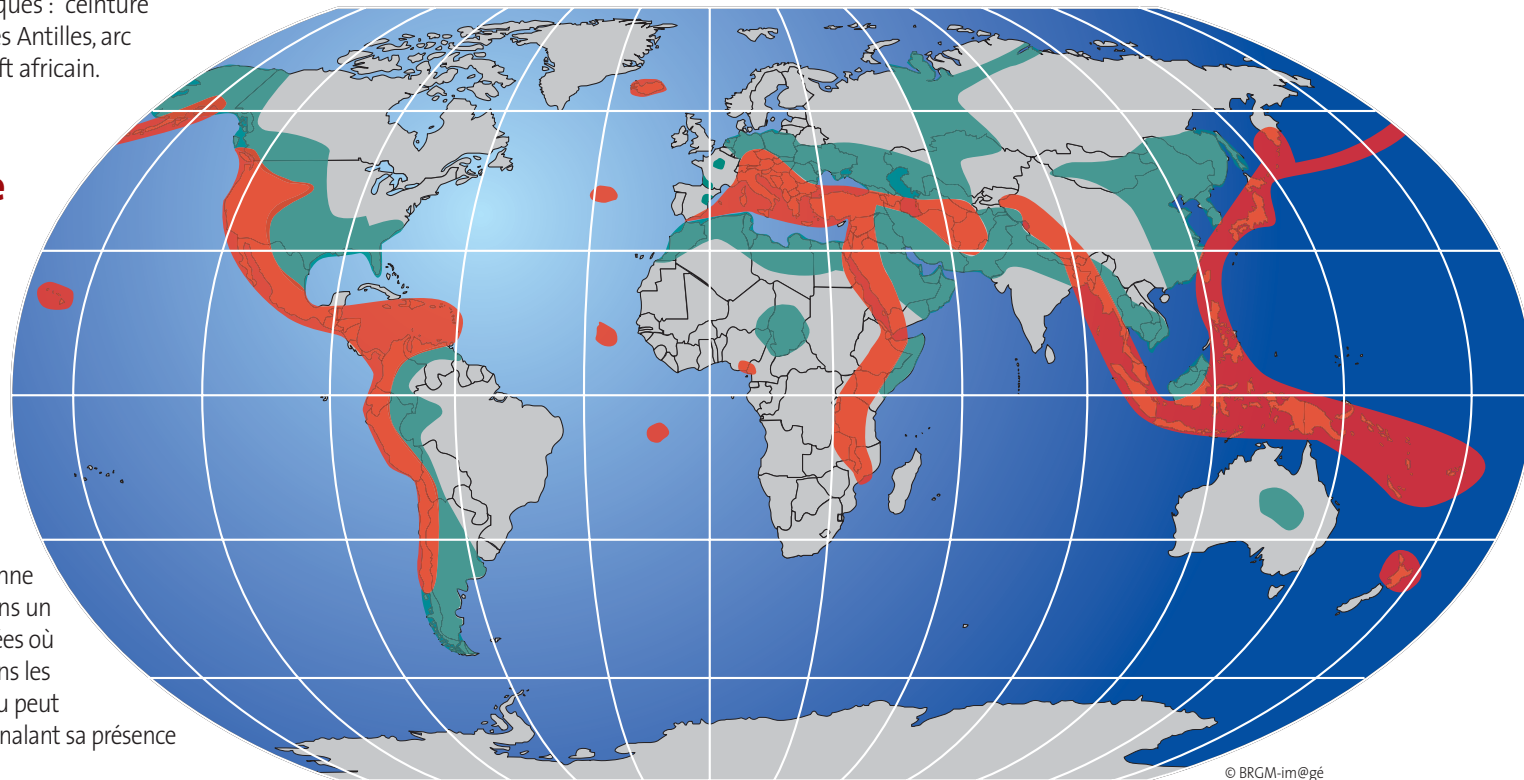
Les ressources de moyenne énergie

Présentes dans de nombreux endroits du globe, les ressources de moyenne énergie (90 à 150°C) se retrouvent dans le même décor géologique que la géothermie haute énergie, à une profondeur moindre (inférieure à 1 000 m). Mais elles se cachent aussi dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2 000 à 4 000 mètres. La géothermie moyenne énergie se manifeste également dans un grand nombre de zones très localisées où se produisent des discontinuités dans les roches, des failles par lesquelles l'eau peut remonter facilement à la surface, signalant sa présence par des sources chaudes.

La géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie (inférieure à 90°C) est présente dans de nombreuses régions du globe : le bassin de l'Amazonie et du Rio Plata en Amérique du Sud, la région de Boise (Idaho)

et le bassin du Mississippi-Missouri aux USA, le Bassin pannonien en Hongrie, les Bassins parisien et aquitain en France, le Bassin artésien en Australie, la région de Pékin et l'Asie centrale...



© BRGM-im@gé

- Zones propices au développement de la géothermie haute énergie (régions tectoniques et volcaniques actives émergées)
- Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires)
- Zones de socle cristallin peu propices

II

Comment ça marche ?

- **A la découverte des gisements géothermiques**
- **Les méthodes d'exploitation**
- **Des contraintes bien maîtrisées**

Comment ça marche ?

Les techniques de reconnaissance et les méthodes de modélisation permettent de connaître les caractéristiques des gisements géothermiques.

Les forages d'exploration font appel à plusieurs méthodes adaptées au type de terrain et à la profondeur recherchée. Diverses configurations sont mises en œuvre pour exploiter un gisement comme celle du "doublet" qui permet de réinjecter l'eau après extraction de sa chaleur.

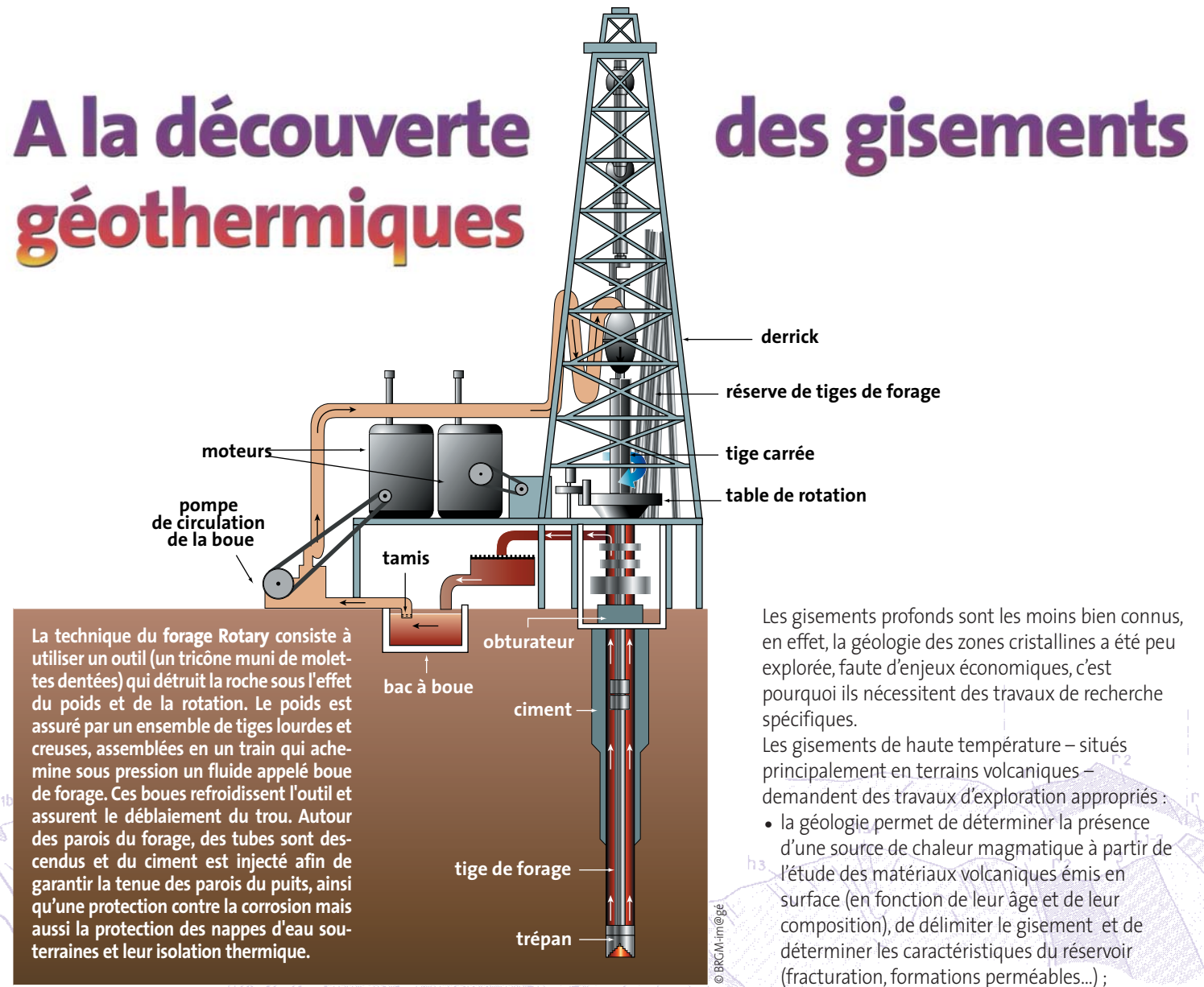
Chercher l'eau

Comme toute ressource du sous-sol, un gisement géothermique nécessite, avant d'être mis en exploitation industrielle, une phase d'études géologiques préalable, plus ou moins importante selon le type de gisement.

Les gisements de basse température exploités dans des formations sédimentaires sont connus à partir des données géologiques collectées antérieurement à d'autres fins : hydrogéologie et géotechnique pour les formations superficielles exploitées par pompes à chaleur, travaux d'explorations pétrolières pour les gisements profonds.

A la découverte géothermiques

des gisements



- l'hydrogéologie et la géochimie des eaux permettent de tracer les circuits d'alimentation et de fuites et de calculer les températures des réservoirs et la composition des fluides profonds ;
- diverses méthodes géophysiques (gravimétrie, électrique, magnéto-tellurique, écoute sismique...) permettent de cartographier le gisement profond et notamment de délimiter les réservoirs.

Les recherches en cours au BRGM visent à mettre au point de nouvelles technologies plus performantes d'exploration et de gestion des réservoirs géothermiques de haute température.

Capter l'eau

A l'exception des sources qui jaillissent spontanément, la plupart des exploitations géothermiques nécessitent en premier lieu un **forage de production**, permettant de faire remonter l'eau chaude à la surface. Ce forage sera différent suivant le type de terrain à traverser et la profondeur recherchée. La technique la plus fréquente est dite "**rotary**", largement utilisée pour les forages pétroliers. Pour les roches les plus dures, le forage le plus adapté associe **percussion et rotation** avec un outil

Ci-dessous, à gauche :
prélèvement sous-marin
de fluides géothermaux dans
la baie de Bouillante
(Guadeloupe).
À droite : prélèvement pour
analyse géochimique
permettant de caractériser
les fluides géothermaux.



© BRGM IM@GÉ

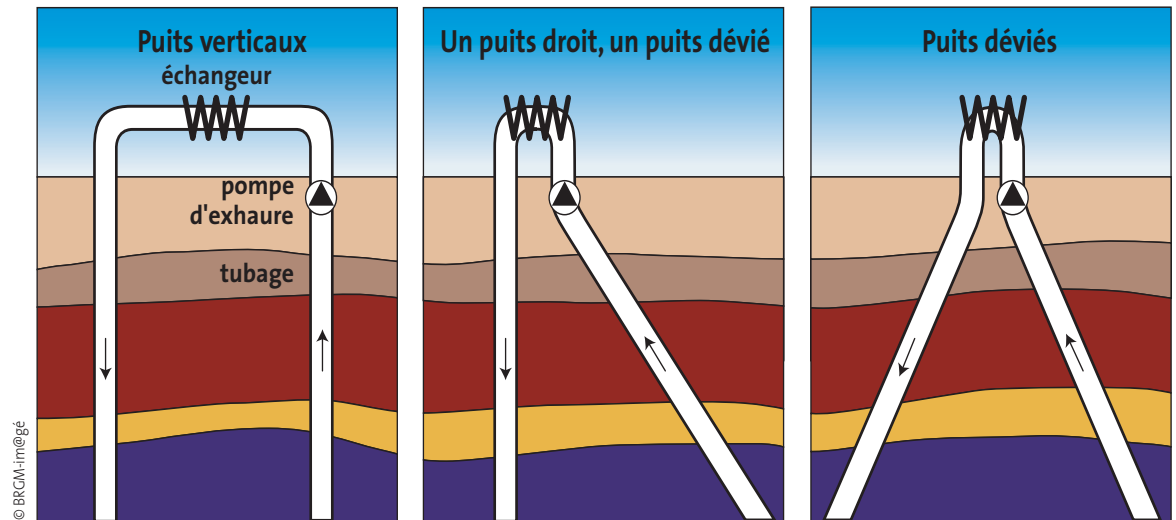
© BRGM IM@GÉ

Doublet géothermique

La réinjection de l'eau géothermale est indispensable pour protéger l'environnement et aussi pour garantir la pérennité de la ressource.

Afin de ne pas refroidir le réservoir, les puits d'exploitation et de réinjection doivent se trouver à une certaine distance l'un de l'autre, ce qui impose souvent la création d'une nouvelle plate-forme de forage.

Pour éviter les nuisances provoquées par ces différents chantiers, notamment en milieu urbain, ou encore lorsque le terrain manque on peut installer des puits dont la trajectoire dévie dans le sous-sol (puits déviés). Une seule plate-forme de forage suffit alors pour positionner les puits de production et d'injection. La France est le premier pays à avoir généralisé la technique du doublet.



© BRGM IM@GÉ

actionné par de l'air comprimé. Mais l'utilisation de molettes au carbure de tungstène, ou même au diamant, peut s'avérer nécessaire. Pour des forages moins profonds, on peut employer des techniques plus simples comme le classique **forage à la tarière** (excavation des terrains à l'aide d'une vis) ou le **battage** (on casse la roche à l'aide d'un poids ou "trépan").

Réinjecter l'eau

Quelle que soit la méthode de forage choisie, le problème du rejet de l'eau après échange de la chaleur va se poser. Si l'eau qui remonte du réservoir est peu chargée en sels minéraux, son évacuation pourra se faire en surface sans gêne pour

l'environnement (cas du Bassin aquitain). Mais si elle en est trop riche, le fluide devra être réinjecté dans sa nappe d'origine (cas du Bassin parisien). Un forage supplémentaire sera alors nécessaire : c'est la **technique du doublet**, dont il existe diverses configurations (plates-formes uniques à puits verticaux ou déviés, etc.).

En outre, la meilleure exploitation du gisement nécessite souvent de pratiquer la ré-injection pour le ré-alimenter en eau. Dans tous ces cas, et pour des raisons évidentes de conservation de la chaleur, l'eau doit être réinjectée en un point relativement éloigné du point de puisage (de l'ordre d'un kilomètre, par exemple, pour les forages du Bassin parisien).

Les méthodes d'exploitation

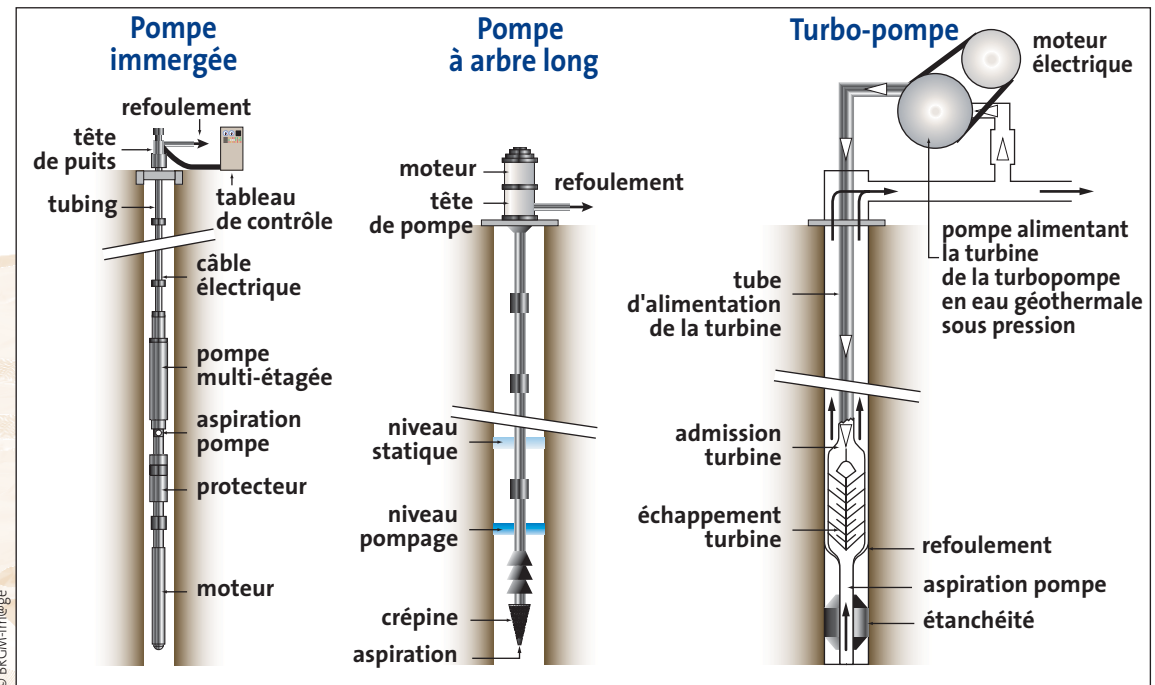
Réguler le débit de l'eau

Une installation géothermique opérationnelle nécessite un débit d'eau aussi régulier que suffisant. Si la pression dans le réservoir souterrain est supérieure à la pression atmosphérique, l'eau peut jaillir naturellement à la tête du puits de forage qui se suffit alors à lui-même, prenant le nom de **puits artésien**. Mais si cette pression n'est pas assez importante ou si l'eau ne remonte pas du tout, il devient nécessaire d'avoir recours à un dispositif de pompage. Quel que soit leur type, toutes les pompes mises en œuvre comportent une partie hydraulique immergée descendue en profondeur (- 100 mètres à - 400 mètres) et un moteur. Ce dernier peut être immergé sous le dispositif hydraulique (pompes immergées) ou placé en surface (pompes à arbre long). Il peut enfin, dans certains cas, fonctionner grâce à une circulation d'eau géothermale surpressée en surface : c'est le principe de la **turbo-pompe**. Bien que son rendement énergétique soit inférieur aux deux autres, une turbo-pompe a une durée de vie supérieure aux pompes immergées. Pour les sites où l'eau est renvoyée dans le réservoir (doublet), une pompe de réinjection installée en surface s'avère indispensable.

Ces dispositifs avec pompage sont surtout employés pour les exploitations de basse énergie. Dans les exploitations de haute énergie, l'eau se vaporise dans le forage, et un mélange eau - vapeur jaillit en surface. Il arrive même – comme à Larderello en Italie ou aux Geysers en Californie – que le gisement produise naturellement de la vapeur sèche. L'exploitant doit alors réguler la pression en tête de puits pour optimiser les conditions d'exploitation en fonction des caractéristiques du fluide ou de la centrale.

Pompes de production du fluide géothermal

Les pompes immergées sont largement utilisées dans le Bassin parisien pour pomper la nappe du Dogger. Elles permettent d'obtenir des débits importants supérieurs à 300 m³/h. Les pompes à arbre long (140 mètres maximum) sont surtout employées en Islande. Les turbo-pompes sont réputées pour leur longue vie malgré leur faible rendement énergétique. Pour la réinjection, on utilise des pompes de surface de type classique.

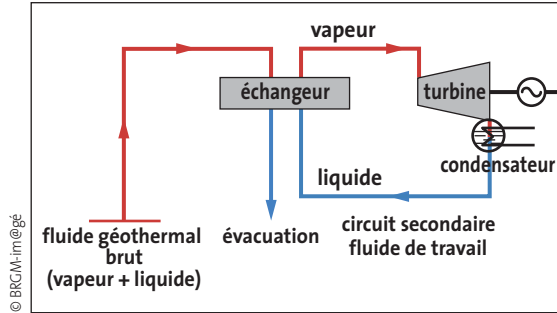


Utiliser la ressource

- La vapeur obtenue soit directement dans le cas de certains réservoirs, soit par séparation du mélange liquide-vapeur issu des puits de production, pour la grande majorité des réservoirs géothermaux, est utilisée pour actionner une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. On distingue :
- des unités de production à **cycle direct** où la vapeur actionne une turbine à échappement atmosphérique (cas le plus simple) ou une turbine

à condenseur (on crée alors un vide à l'échappement de la turbine) ;

- des unités à **cycle binaire** où la vapeur turbinée est celle d'un fluide dit "de travail" qui est vaporisé par échange thermique avec le fluide géothermal (**cycle de Rankine** ou **cycle de Kalina**) ;
- et des unités à **cycle combiné** qui associent des dispositifs de turbine à cycle direct avec des "récupérateurs" d'énergie à cycle binaire.
- Quand l'eau jaillit du sous-sol à moyenne et basse température, elle servira pour le chauffage. Mais cette eau est souvent trop corrosive pour être



© BRGM-im@gé

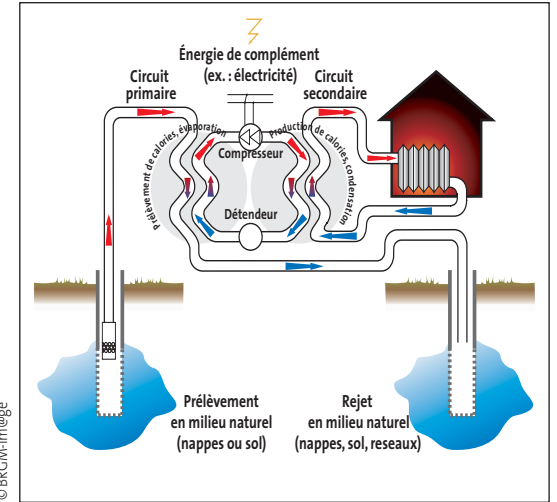
utilisée directement. On a donc recours à un **échangeur** (multitubulaire, spiralé ou à plaques) placé entre le circuit géothermal et le circuit de distribution de chaleur. La qualité d'un échangeur se mesure à la différence de température entre l'entrée de la boucle géothermale et sa sortie. Cette différence, baptisée "pincement", doit être aussi petite que possible (de l'ordre de 2° C). Pour durer, un bon échangeur doit être fabriqué en matériaux résistants à la corrosion : acier inoxydable ou, encore mieux, titane.

◀ Cycle à fluide binaire ou cycle de Rankine

Cette technologie s'est développée dans les années 1980 et concerne généralement les fluides géothermaux dont la température se situe entre 90 et 150 °C. Limitée à de petites puissances unitaires (de quelques centaines à quelques mégawatts), le cycle de Rankine est particulièrement adapté à l'alimentation électrique de zones isolées telles que les zones insulaires ou de montagne. Plus de 200 unités sont recensées dans le monde, réparties sur les cinq continents, pour une puissance totale installée de plus de 500 MW.

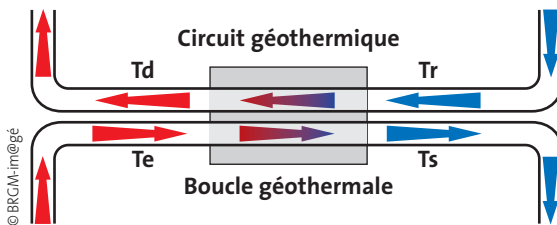
Les pompes à chaleur sur nappe

Les nappes souterraines peu profondes (de quelques dizaines à quelques centaines de mètres) présentent des températures qui varient de 12° à 30°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 (PAC). Une pompe à chaleur permet de transférer de l'énergie d'un niveau à basse température vers un niveau à température plus élevée. Ce transfert consomme de l'énergie, mais l'énergie totale restituée par la PAC est bien supérieure à celle qui est fournie pour la faire fonctionner. On parle d'un "coefficient de performance" (COP) qui peut varier de 4 à 5, voire plus pour les machines les plus récentes.



© BRGM-im@gé

▶ Principe de fonctionnement d'une pompe à compression exploitant l'eau souterraine.

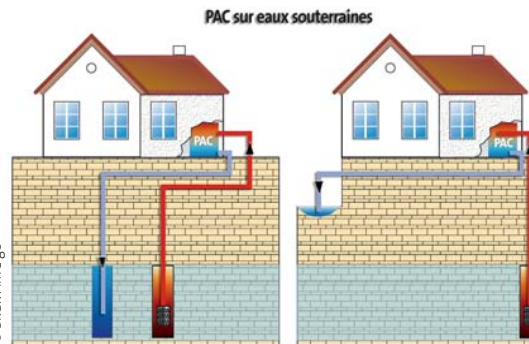
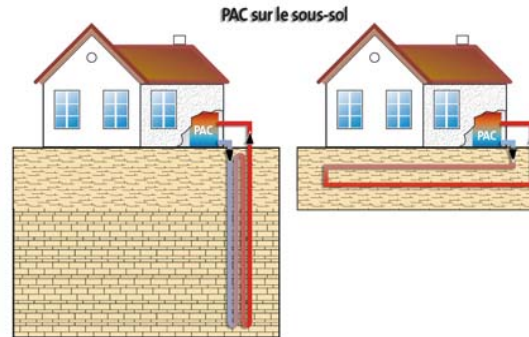


© BRGM-im@gé

▶ Echangeur thermique

Dans la *boucle géothermale*, l'eau qui sort chaude de la terre tourne en circuit fermé. Cette eau chargée de sels minéraux cède sa chaleur à un autre réseau appelé cette fois *circuit géothermique*, dans lequel circule l'eau de ville destinée à être réchauffée. Cet échange est nécessaire pour capter des calories tout en évitant la corrosion du réseau de chaleur. Le dispositif est appelé échangeur. Il est constitué soit de plaques, soit de tubes. Les échangeurs à plaques, plus commodes pour la maintenance, sont les plus utilisés.

Exemples de dispositifs d'exploitation de pompes à chaleur géothermiques : la nature géologique du sous-sol (roches dures, terrain meuble, présence d'aquifère) et l'emprise au sol disponible interviennent dans le choix du dispositif.



© BRGM-im@gé

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.

Les sondes géothermiques

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, ...

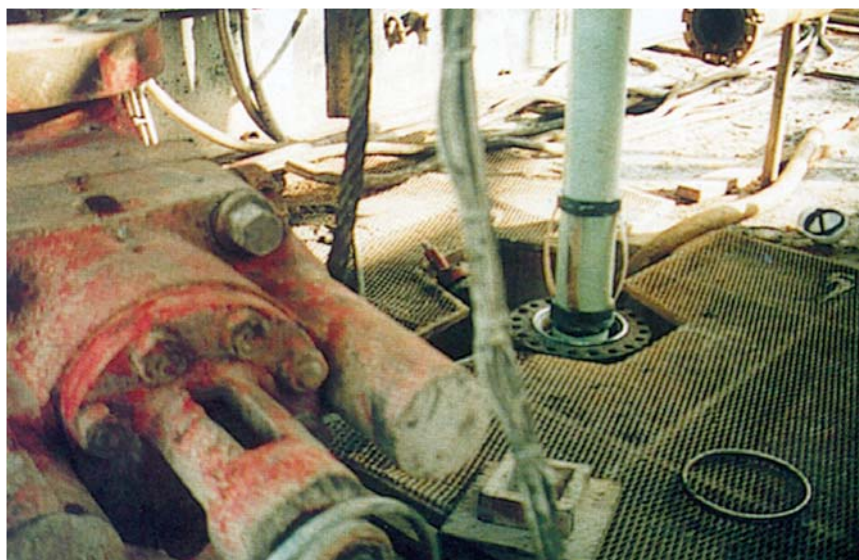
Des contraintes bien maîtrisées

A consommer sur place

A l'inverse de l'or noir, l'or blanc qui s'échappe d'un puits géothermal sous forme de vapeur ou d'eau chaude ne supporte pas les déplacements et doit être consommé localement. Cette contrainte est facilement résolue pour la vapeur, par le biais de la transformation de son énergie en électricité qui, elle, peut être distribuée sur un territoire plus large. Mais elle joue fortement lorsque, à défaut de vapeur, le site géothermal ne fournit que de la chaleur. A l'exception notable de l'Islande, cette énergie ne s'adresse aujourd'hui qu'à des usagers localisés à proximité de la source (quelques kilomètres). Illustrant l'adage "**produire et consommer localement**", elle s'est donc naturellement développée dans les villes

Puits en composite contre la corrosion

Le quatrième forage géothermique, sur le site de Melun l'Almont exploitant la nappe du Dogger à l'eau très saline (12 à 15 g/l pour les différents sels), fut l'occasion de réaliser un puits de nouvelle génération équipé de tubages en matériaux composites offrant une bonne résistance aux phénomènes de corrosion.



possédant une ressource géothermale dans leur sous-sol. Le chauffage urbain arrive ainsi en seconde position mondiale dans l'utilisation de la chaleur géothermique, après les établissements de bains thermaux qui, eux, se sont précisément implantés là où de l'eau chaude remontait du sous-sol.

Des traitements anti-corrosion

Tubes dans les forages, canalisations reliant les puits, échangeur, joints... autant de matériaux soumis à rude épreuve dans une centrale géothermique. En contact avec l'eau du sous-sol, ils sont victimes de différents types de corrosion : une corrosion chimique (le fluide peut être chargé de sels minéraux très agressifs), une corrosion galvanique (provoquée par la présence de courants électriques parasites), et même une corrosion bactériologique (certaines souches bactériennes – éventuellement présentes dans le gisement et réactivées par l'abaissement de la température – augmentent la corrosion de l'acier et les sulfures, sous-produits de leur métabolisme, sont corrosifs). Pour protéger l'installation, des traitements préventifs sont appliqués : injections de produits inhibiteurs pour obtenir un film protecteur ou éviter la cristallisation et la formation de dépôts, des produits bactéricides pour se débarrasser des micro-organismes. C'est le cas dans les forages de production du Bassin parisien pour annihiler les problèmes de corrosion liés à l'exploitation de la nappe du Dogger. Dans l'avenir, l'utilisation de tubages en matériaux composites devrait limiter les effets néfastes de la corrosion.

Bien gérer les réservoirs

La géothermie est une énergie renouvelable, car l'eau extraite du sous-sol y retourne naturellement ou artificiellement par réinjection. Mais cette eau qui retourne à la terre après usage est refroidie, et le travail de l'ingénieur consiste à calculer avec précision le délai qu'il lui faudra pour maintenir à niveau constant la production de calories compte

tenu des caractéristiques du réservoir. Dans le cas d'un doublet, la distance entre puits au niveau du réservoir est calculée pour **qu'aucune baisse de température n'apparaisse dans un délai équivalent à la durée de vie de l'installation (20 à 30 ans)**. Une bonne gestion est donc nécessaire car la ressource, pompée à outrance, pourrait s'épuiser assez vite, surtout si aucun dispositif de réinjection n'a été prévu.

Des risques maîtrisés

Le coût d'investissement est le principal obstacle qui limite le développement des centrales géothermiques. La perception des risques encourus lors des différentes phases d'un projet peut inquiéter les investisseurs. D'autant que les risques les plus élevés se situent dans les premières étapes d'un projet. Ainsi, un projet de centrale électrique d'une capacité de 15 MW, demande un investissement de l'ordre de 35 millions d'euros, dont environ 6 millions (soit 17% de l'investissement total) devront être consacrés à l'exploration et à la reconnaissance du site par géologie, géophysique, puis forage. Un investissement initial important, sans garantie de tomber sur un bon filon ! Mais une ingénierie financière adaptée peut être apportée. Le retour sur investissement se fera sur la durée de vie de la centrale et non celle du gisement. Pour soutenir le développement de cette source d'énergie, la plupart des pays proposent une tarification adaptée avec l'intervention de fonds d'investissement dédiés ou des bailleurs de fonds internationaux. En France, les pouvoirs publics ont mis en place depuis les années 1970 un fonds de garantie qui permet aux maîtres d'ouvrage d'être couverts contre les aléas géologiques. L'ADEME gère avec le recours d'un mandataire - SAF Environnement- et de façon paritaire avec des maîtres d'ouvrage un fonds de garantie long terme. L'ADEME propose en outre des aides aux maîtres d'ouvrage pour les inciter à se raccorder à un réseau géothermique.

III

La géothermie en France

- **Des ressources importantes**
- **Le chauffage collectif dans le Bassin parisien**
- **Les autres ressources en France métropolitaine**
- **Soultz-sous-Forêts ou l'électricité du futur**
- **La géothermie dans les départements d'outre-mer**
- **Les pompes à chaleur**

La géothermie en France

La France recèle dans son sous-sol un véritable trésor géothermique dont une infime partie est aujourd'hui exploitée. On dénombre seulement 65 installations dédiées au chauffage urbain réalisées pour l'essentiel dans les années 1980. Elles assurent la couverture des besoins d'environ 200 000 équivalent-logements. Après une quinzaine d'années de pause, liée aux cours relativement bas de l'énergie fossile, n'est-il pas temps de donner une plus grande place à cette ressource ?

Des ressources importantes

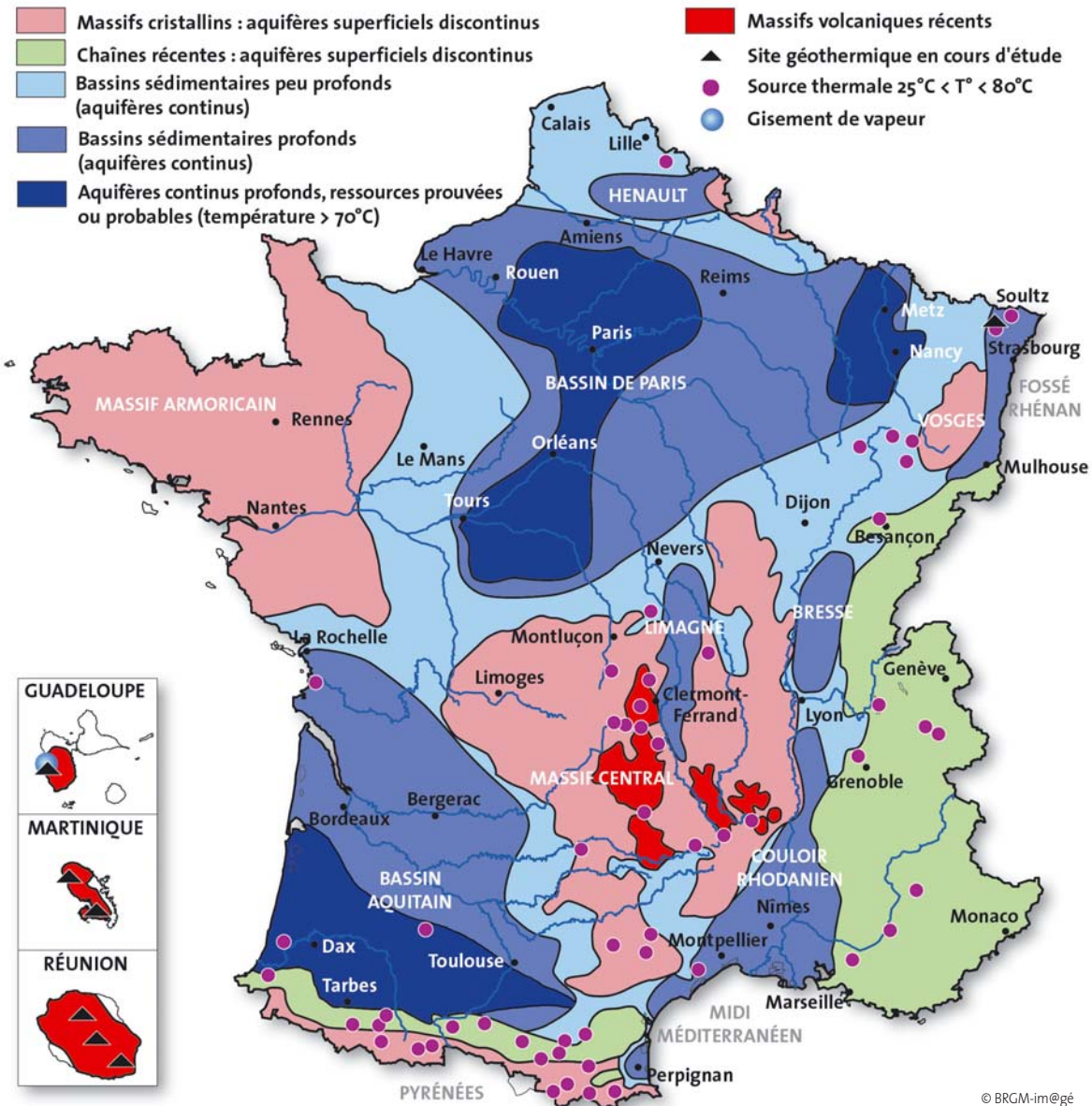
Près de la surface, à des profondeurs allant de quelques mètres à quelques kilomètres, le sous-sol de notre pays est riche d'une chaleur diffuse emmagasinée depuis plusieurs millions d'années dans ses nombreux bassins sédimentaires. Durant toutes ces ères géologiques, l'eau de mer, de pluie ou de fonte des neiges a pénétré dans les profondeurs de la Terre où elle s'est lentement réchauffée, jusqu'à 90°C parfois, à l'intérieur des roches

L'inventaire des ressources

Pour connaître notre potentiel de ressources géothermiques basse énergie, un inventaire des ressources profondes a débuté en 1976, après le premier choc pétrolier. Réalisé par le BRGM en association avec les grands groupes pétroliers, il a montré que notre territoire recèle de grandes quantités d'eau chaude au droit des zones les plus peuplées.

A la fin des années 80, des inventaires régionaux des ressources superficielles ont été réalisés en partenariat avec l'ADEME, le BRGM et EDF. Aujourd'hui, une nouvelle démarche visant à actualiser les données et à moderniser leur accès (CD-Rom, sites Internet) a été engagée sur une dizaine de régions. Par ailleurs, le BRGM et l'ADEME ont mis au point sur la Limagne une nouvelle méthodologie d'inventaire à la lumière des concepts modernes : il s'agit du projet baptisé Copgen, littéralement "compilation du potentiel géothermique national".

Les ressources géothermiques en France et leur cadre géologique



nées de l'accumulation de différents sédiments. Ces strates, une fois amenées à la surface, ont donné naissance à de nombreuses nappes aquifères. Nappes d'eau douce et potable, mais aussi nappes d'eau chaude

éventuellement salée pouvant couvrir de multiples usages : chauffage urbain, chauffage de serres, balnéothérapie, utilisation de la chaleur dans les procédés industriels, etc.

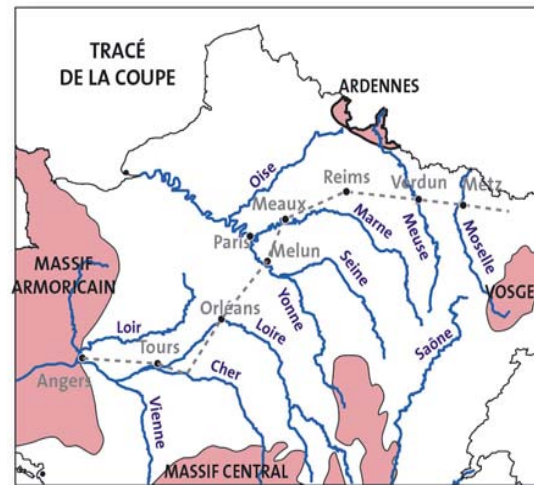
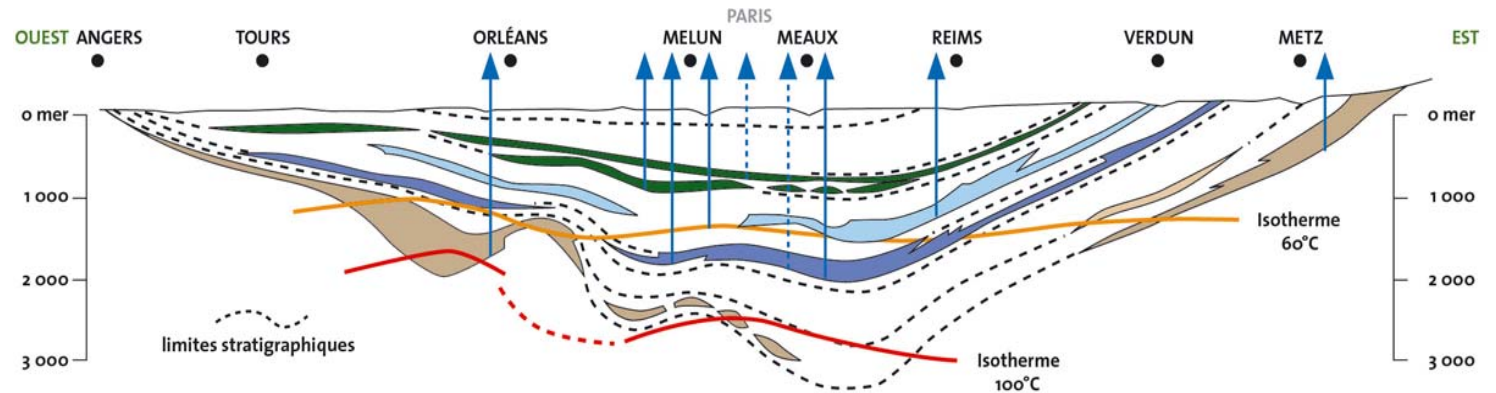
Le chauffage collectif dans le Bassin parisien

La particularité de cette zone est d'offrir une très bonne coïncidence entre les ressources géologiques et la demande puisque de nombreuses agglomérations sont situées au droit d'aquifères continus.

Le hasard ou le destin veut que la géothermie basse énergie en France commence sa carrière en fanfare à Paris, en 1963. On inaugure en effet la Maison de la radio sur les bords de Seine, mais on fête aussi, plus discrètement, la première installation géothermique française, car l'immense temple dédié aux nouvelles radios et à la télévision se chauffe à la chaleur de la Terre. Une curiosité qui ne prendra de l'intérêt qu'en 1980, lors du second choc pétrolier.

Sous les effets des chocs pétroliers et de la mise en place de politiques incitatives, près d'une centaine d'opérations en majorité dans le Bassin parisien vont alors être réalisées en quelques années, jusqu'en 1985 où des problèmes économiques (cours du pétrole), techniques (corrosion et dépôts dans les tubages) et financiers (prêts contractés avec des taux élevés en période d'inflation vite révolue) stopperont net le développement de la filière. En 1989, les pouvoirs publics vont s'engager dans une négociation avec les maîtres d'ouvrage du Bassin parisien. Le rééchelonnement des prêts permettra de sauver une trentaine d'exploitations.

Au plan technique, les problèmes de corrosion liés à la nappe du Dogger seront alors progressivement résolus. Depuis, les exploitations se sont poursuivies sans baisse des températures, conformément aux modèles développés par le BRGM.



© BRGM-im@gé

Formé par un empilement de couches sédimentaires qui se sont déposées au cours des trois dernières ères géologiques sur un socle cristallin ou granitique plus ancien, le Bassin parisien possède la particularité d'être très stable.

Cinq grands réservoirs aquifères géothermaux y ont été recensés, dans différentes couches de sédiments.

PÉRIODES		AQUIFÈRES	
SECONDAIRE	TERTIAIRE 65 millions d'années		
	CRÉTACÉ 140 millions d'années	NÉOCRÉTACÉ	Sables de l'Albien
		ÉOCRÉTACÉ	Sables du Néocomien
	JURASSIQUE 195 millions d'années	MALM	Calcaires du Lusitanien
		DOGGER	Calcaires du Dogger
LIAS		Grès du Retien	
TRIAS 225 millions d'années	TRIAS	Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest	
PRIMAIRE			

La plus connue et la plus exploitée est celle du Dogger (un étage du Jurassique) dans la région Ile de France. Ce réservoir, calcaire, qui s'étend sur 15 000 km², offre des températures variant entre 56°C et 85°C et assure le fonctionnement de 34 installations géothermales.

Mais dans la région Centre, ce sont les sédiments gréseux du Trias qui permettent à

Châteauroux de chauffer 1 310 logements HLM.

Et à Paris, un autre réservoir situé dans les sédiments de l'Albien (les "sables verts") assure le chauffage et la climatisation de la Maison de Radio France.

Les sédiments du Lusitanien et du Néocomien sont, quant à eux, peu exploités, bien que leurs ressources ne soient pas négligeables.

Principales opérations en Ile-de-France en service en 2004

Source : ADEME - Valor

Opérations	Dépt.	Date de mise en service	Température tête de puits en °C	Débit en m³/h	Equivalent-logements	MWh géo	Taux de couverture géo %
Alfortville	94	1986	73	275	4 415	43 155	78
Blanc Mesnil Nord	93	1983	66	175	2 754	25 471	74
Bonneuil sur Marne	94	1986	79,3	280	3 078	25 519	66
Cachan	94	1984	70	360	4 605	49 028	85
Champigny	94	1985	78	280	6 644	58 552	71
Chelles	77	1987	69	280	3 601	16 917	38
Chevilly La Rue - L'Hay les Roses	94	1985	72,6	560	9 793	72 580	58
Clichy sous Bois	93	1982	71	180	3 794	15 572	33
Coulommiers	77	1981	85	230	2 106	24 752	94
Créteil	94	1985	78,9	300	12 303	56 466	37
Epinay s/Sénart	91	1984	72	250	5 105	49 874	78
Fresnes	94	1986	73	250	5 351	32 335	48
La Courneuve Nord	93	1983	58	200	2 393	21 666	73
La Courneuve Sud	93	1982	56	180	2 822	12 472	35
Le Mée s/Seine	77	1978	72	134	4 856	21 155	35
Maisons Alfort 1	94	1985	73	300	4 505	36 673	65
Maisons Alfort 2	94	1986	74	260	4 329	20 755	39
Meaux Beauval et Collinet	77	1983	75	400	13 529	58 384	35
Meaux Hôpital	77	1983	76	130	3 761	20 674	44
Melun l'Almont	77	1971	72	260	5 238	44 593	68
Montgeron	91	1982	72,5	220	1 749	16 881	77
Orly 1 et 2	94	1984	75	355	6 651	62 046	75
Ris-Orangis	91	1983	72	190	225	16 239	58
Sucy-en-Brie	94	1984	78	200	2 152	25 167	94
Thiais	94	1986	76	250	4 352	43 539	87
Tremblay-en-France	93	1984	73	275	4 212	45 562	87
Vigneux	91	1985	73,2	240	3 430	33 579	66
Villeneuve-Saint-Georges	94	1987	76	350	4 303	34 411	65
Villiers-le-Bel	95	1985	67	230	2 959	21 699	60



La Maison de la radio

Un forage de 600 mètres réalisé dans le sous-sol de la Maison de la radio puise dans l'aquifère de l'Albien une eau douce à la température de 27°C.

L'eau géothermale cède 20°C au dispositif énergétique avant d'être rejetée à 7°C. Cette énergie géothermique est utilisée en appoint en hiver d'un chauffage de base lui-même original : un système complexe de pompes récupère la chaleur dégagée par les activités des studios (projecteurs, public, matériel). En été, ce système est inversé pour le rafraîchissement et la climatisation.

A deux pas de là, de l'autre côté de la Seine, la tour Mirabeau, où se trouve le siège du BRGM, est également chauffée par un forage à l'Albien situé devant l'immeuble.

Habitat collectif à Châteauroux

Depuis 1986, dans le quartier Saint-Jean à Châteauroux (Indre), 1 310 logements HLM sont alimentés par une centrale géothermique complétée par quatre pompes à chaleur. Le forage s'enfonce



© Sté HLM Habitat 2036

dans les sables du Trias entre 482 et 670 mètres pour y puiser une eau douce à 34°C, qui peut s'écouler à la surface après avoir cédé ses calories.

En 2003, des travaux ont été entrepris pour restaurer le débit initial du puits (passé de 70 à 30 m³ par heure), donnant ainsi une seconde jeunesse à la plus importante réalisation géothermique de la région Centre.

Doublets au Dogger à Fresnes

Commencée en 1985 alors que le pétrole valait 35 dollars le baril, l'opération de géothermie de Fresnes (Val-de-Marne) a été mise en service en 1986, au moment où le baril ne cotait plus que 12 dollars. Seul le Sud de la commune est alors desservi, avec 3 600 équivalent-logements. Le doublet de forages déviés offre une température en tête de puits de 73°C et la centrale comporte deux échangeurs à plaque de titane.



© Arene Ile-de-France

◀ Châteauroux : vue du chantier de réhabilitation du forage.

La centrale géothermique de Fresnes (94) comporte un doublet de forages déviés distants, à une profondeur de 1 800 m, de près de 2 km qui offrent une température de 73°C en tête de puits. ▶

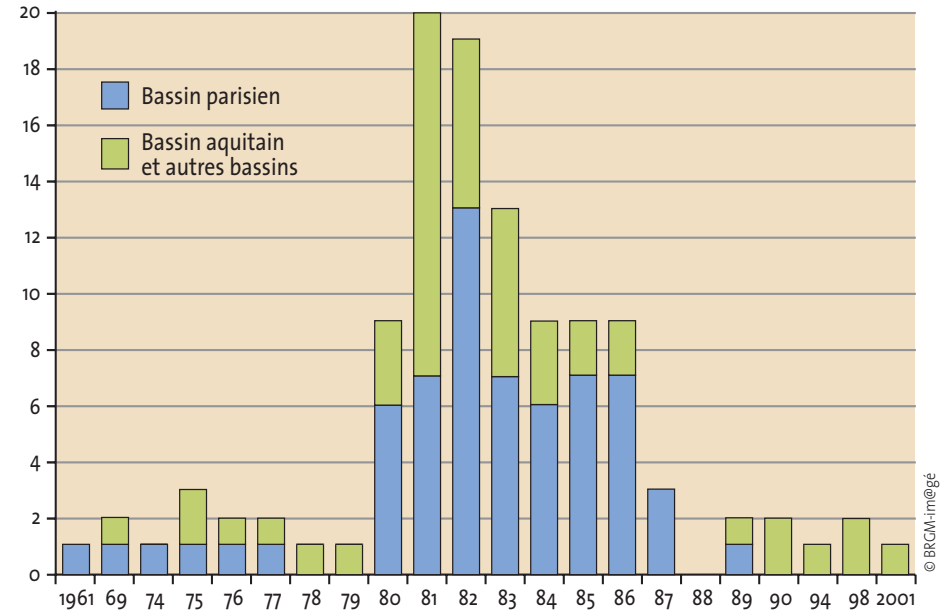
En 1999, la ville de Fresnes et la Société Fresnoise de Chaleur (Sofrechal) raccordent de nouveaux ensembles immobiliers qui portent le réseau à 4 500 équivalent-logements. Une centrale de cogénération est également mise en service en 1998 avec une desserte du nord de la ville. Le nombre d'équivalent-logements desservis aujourd'hui atteint 5 350.

Dans le cadre d'un partenariat associant le Conseil régional Ile-de-France, l'ADEME et les collectivités territoriales, un plan local de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies locales et renouvelables pour la réduction de l'effet de serre a été signé en mars 2004. Il prévoit sur la période 2003-2006 des travaux de raccordement d'un ensemble de 1 474 équivalent-logements existants et 627 équivalent-logements nouveaux au réseau de chaleur géothermique. L'ensemble de ces opérations doit permettre à terme d'éviter le rejet à l'atmosphère de 2 541 tonnes de CO₂ par an.

Une filière prête à repartir

Depuis 1961, 112 forages profonds, qu'il s'agisse de puits forés ou de forages existants réhabilités, ont été réalisés en France métropolitaine, principalement dans le Bassin parisien et le Bassin aquitain. Le graphique ci-contre de l'évolution annuelle des puits forés ou réhabilités montre l'impact des périodes de "chocs pétroliers" notamment en 1979 et le désengagement constaté à partir de 1987. 97 de ces forages ont été mis en exploitation et actuellement 65 installations géothermales sont exploitées en puits uniques, doublets ou triplets. Un tiers des installations environ a été arrêté en raison de difficultés d'ordre technique ou économique ou pour cause de concurrence énergétique. Les apports thermiques de la géothermie basse température permettent de substituer annuellement 1 265 GWh, ce qui représente environ 130 000 tep économisées pour un parc avoisinant

Nombre de puits forés ou réhabilités



Perspectives offertes par le Dogger en Ile-de-France

Le Dogger est un aquifère de l'Ile-de-France assez bien connu du fait qu'il alimente 34 installations géothermiques exploitées depuis une vingtaine d'années dans la région.

Pour contribuer au développement durable de cette ressource commune, l'ADEME, l'Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies d'Ile-de-France (ARENE) et le BRGM ont conclu un partenariat dont l'objectif est de fournir aux instances concernées (maîtres d'ouvrage, opérateurs...) des éléments et des méthodes pour une optimisation des installations actuelles et à venir, notamment pour parfaire la gestion à long terme du réservoir.

Un recensement historique des paramètres du Dogger acquis au cours de son exploitation est engagé. La base de données qui en résulte alimentera un modèle interactif du réservoir du Dogger permettant de prendre en compte les installations actuelles et de prévoir l'incidence à long terme de toute extension ou installation nouvelle.

166 000 équivalent-logements. Les émissions polluantes évitées sont estimées à 401 200 tonnes de CO₂ par an, soit 109 400 tonnes de carbone par an.



◀ Tête de puits d'un forage géothermique dans le Dogger, l'aquifère qui offre aujourd'hui la plus grande densité au monde d'opérations de géothermie en fonctionnement.

Les autres ressources en France métropolitaine

Beaucoup de régions offrent des ressources en géothermie basse et moyenne énergie et aussi en géothermie haute énergie comme c'est le cas dans le fossé rhénan et dans le Massif central.

Et demain ?

Des inventaires régionaux actualisés des ressources et de la demande restent à réaliser dans ces régions, à l'appui des plans régionaux de développement des énergies renouvelables qui ont été mis en place depuis 2000 dans le cadre de contrats de partenariat entre l'ADEME et les Conseils régionaux et généraux.

Les régions limitrophes du Bassin parisien recèlent également des ressources importantes qui sont encore bien peu sollicitées, qu'il s'agisse des régions Artois, Picardie, Haute et Basse-Normandie, Champagne-Ardenne, Lorraine, Bourgogne, ou encore de la région Centre où le réservoir du Trias présente des possibilités importantes.

Le Bassin aquitain

Le Bassin aquitain possède une structure géologique un peu plus complexe. Les formations aquifères sont nombreuses mais moins étendues, les plus profondes se trouvant au pied des Pyrénées, enfouies jusqu'à 10 km dans le sous-sol.

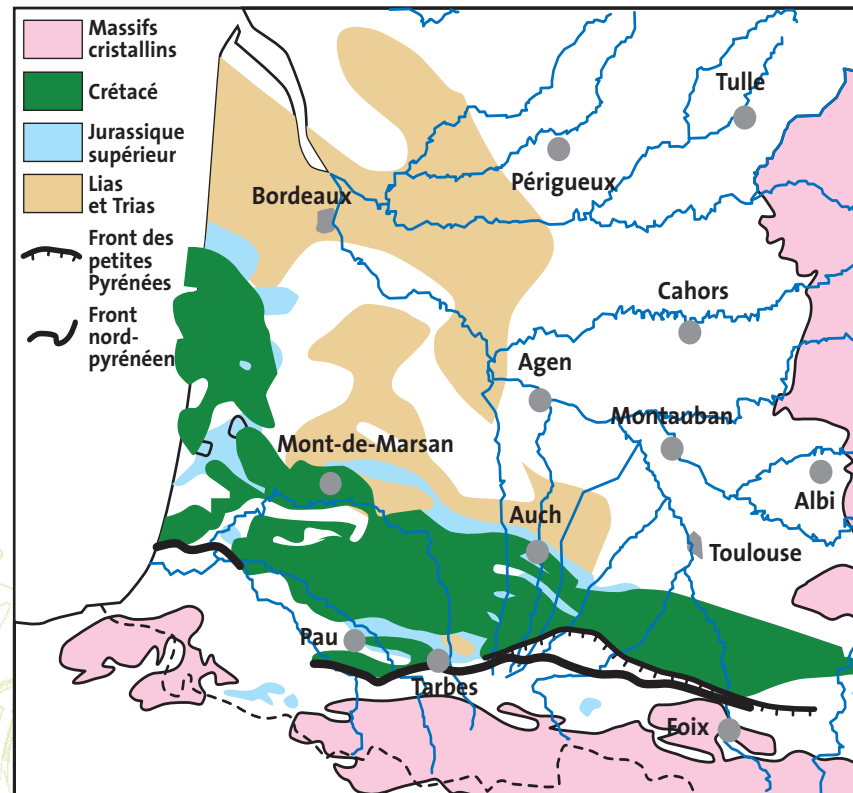
Deux zones particulièrement favorables ont été découvertes dans la région : l'une forme un croissant au nord et au nord-est de Bordeaux, et l'autre descend d'Arcachon à Bayonne avant de s'élargir vers l'est au pied des Pyrénées. Les principales exploitations géothermiques se trouvent dans la région de Bordeaux, de Mont-de-Marsan et de Dax.

Les autres bassins sédimentaires de France - Limagne, Bresse, Couloir rhodanien, Midi méditerranéen, Hainaut - ont peu développé leur potentiel géothermique. Leurs réservoirs

▼ Principaux réservoirs géothermiques en Aquitaine à plus de 60°C :

ils sont formés de terrains sédimentaires (Crétacé, Jurassique supérieur, Lias et Trias) qui reposent sur le socle ancien.

Les formations sont de type poreux (grès, sables, calcaires oolithiques, dolomies...) ou de type fissuré ou karstique (calcaires poreux ou non).



Source : Potentiel géothermique du Bassin aquitain, 1977, BRGM - SNEA.

sont de petites dimensions et leur exploitation nécessite des études spécifiques.

La géothermie haute énergie en métropole

Dans le Massif central, notamment le Massif du Mont Dore où un potentiel a été identifié, les projets n'ont pu aboutir. L'avenir de la géothermie haute-énergie repose sur la maîtrise de développements de projets sur roches profondes chaudes et fracturées, en s'assurant de l'absence d'incidence sur les ressources thermales de surface.

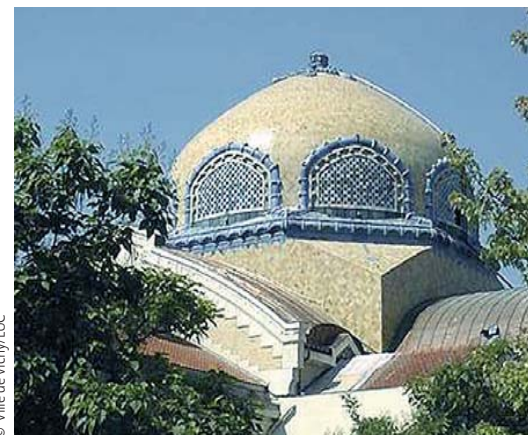
Dans le fossé rhénan, dans un contexte bien différent, bénéficiant d'un passé industriel et minier, un programme de recherche a démarré en 1987 à Soultz-sous-Forêts dans le cadre d'une collaboration européenne, avec la perspective de pouvoir mettre en exploitation à terme cette énergie des profondeurs : l'exploitation des roches chaudes et non plus des nappes.

Le Bassin rhénan, un fossé d'effondrement qui s'est rempli de dépôts du tertiaire et du quaternaire présente le gradient géothermal le plus élevé de France métropolitaine : jusqu'à 10°C par 100 mètres. A 5 km sous le continent, la température atteint les 250°C.

Principales opérations en Bassin aquitain, Limagne, Languedoc, Lorraine, Bresse en service en 2004.

Source : ADEME - Valor

Région	Opération	Utilisation	Température tête de puits (°C)	Apports géothermiques (MWh utiles)	Hydrocarbures substitués (TEP)	Pollution évitée (t de CO ₂)
Bassin aquitain	Argelouse / Sore	pisciculture	48	16 492	1 773	5 566
	Bordeaux Benauges	piscine	42	391	40	92
	Bordeaux Mériadeck	chauffage	52	3 312	339	847
	Bordeaux Stadium	piscine	34	1 082	110	255
	Gujan Mestra	centre nautique	25	2 004	203	472
	Hagetmau	piscine / ECS	32	2 793	283	657
	Merignac - BA 106	chauffage	52	16 218	1 641	3 816
	Mios Le Teich	pisciculture	73	21 440	2 169	5 045
	Mont-de-Marsan 1	chauffage	60	13 169	1 348	3 368
	Mont-de-Marsan 2	chauffage	56	2 480	251	583
	Pessac - Salge Formanoir	chauffage	48	16 157	1 635	3 802
	Saint-Paul-les-Dax 1	chauffage/thermes	47	13 775	1 394	3 241
	Saint-Paul-les-Dax 2	piscines/serres	60	4 299	435	1 012
	Blagnac 1	piscine	55	3 202	324	753
	Blagnac 2	chauffage	60	6 302	602	1 483
	Nogaro 2	pisciculture	51	18 494	1 988	6 242
	Jonzac 1	chauffage/thermes	60	5 487	555	1 291
	Jonzac 2	centre nautique	58	12 031	1 232	4 010
Limagne	Aigueperse	serres	43	11 512	1 238	3 885
Bassin parisien	Châteauroux	chauffage	34	14 860	1 503	3 496
Languedoc	Montagnac	pisciculture	30	7 850	844	2 649
	Lodève 1	serres	30	8 770	887	2 064
	Lodève 2	serres	52	6 280	635	1 478
Lorraine	Pézenas	piscine - pisciculture	38	11 576	1 171	2 724
	Dieuze	pisciculture	31	5 233	529	1 231
	Lunéville	piscine-pisciculture	25	827	84	195
	Nancy 1 - Thermes	chauffage - thermes	45	3 134	317	737
Bresse	Nancy 2 - Caserne Kellermann	chauffage	30	6 280	635	1 478
	Montevel-en-Bresse	centre nautique	32	1 924	195	453



© Ville de Vichy/LUC

◀ Dôme des établissements thermaux de Vichy : sous l'influence de Napoléon III et de l'impératrice Eugénie, Vichy devient "la reine des villes d'eau".

Située au centre de la France dans les Monts d'Auvergne, Vichy est la ville française la plus riche en sources thermales. Elle accueille près de 13 000 curistes par an.

▼ A Chaudes-Aigues dans le Cantal, l'eau jaillit de plus de 30 sources à 82°C.



© BRGM/rm@gé

Et demain ?

Les moyens de recherche et de développement se sont concentrés en France sur le projet de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts. Il est temps de reprendre les travaux d'acquisition et de diffusion des connaissances sur le reste du potentiel du territoire national : c'est l'objet d'un nouveau partenariat entre l'ADEME et le BRGM lancé en 2002.

Soultz-sous-Forêts ou l'électricité du futur

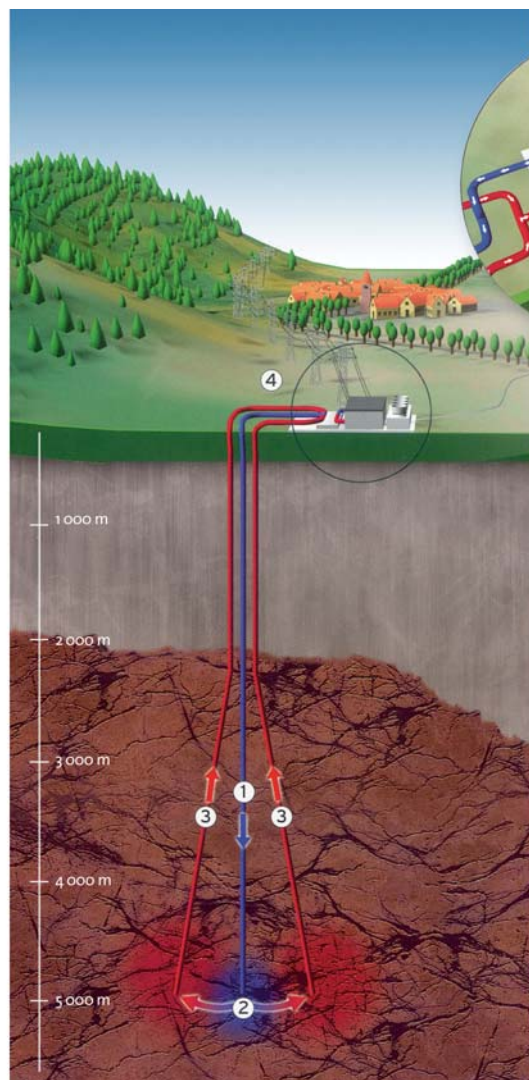


© BRGM-im@gé

Première mondiale, ce projet fait l'objet d'un programme pilote initié en 2000 et qui s'achève en 2007 avec le soutien financier de l'ADEME, du gouvernement allemand et de l'Union européenne. Il vise à extraire la chaleur des granites profonds pour la transformer en électricité.

La géothermie profonde

À quelques kilomètres de profondeur, la chaleur du sous-sol a tout pour plaire. Cette énergie est planétaire, abondante et quasi inépuisable. Elle possède aussi une qualité essentielle à la protection de notre environnement : son utilisation ne génère ni déchet ni gaz à effet de serre. Malheureusement, la ressource se trouve en grande partie emmagasinée dans des formations rocheuses peu perméables. En l'absence d'eau, il est difficile de la capter. L'idée est donc venue de créer artificiellement des réservoirs géothermiques en profondeur, en fracturant les roches et en leur injectant de l'eau. Simple dans sa conception mais difficile dans son application, ce concept inventé par les Américains dans les années 1970 correspond à ce que l'on appelle la géothermie profonde ou "géothermie des roches chaudes fracturées". Plusieurs expériences ont été tentées dans le monde pour mettre au point la technique. La plus avancée a démarré en 1987, en France, dans le cadre d'une collaboration franco-anglo-allemande avec le support de l'Union européenne, de l'ADEME et des ministères allemands concernés.



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

Le site de Soultz-sous-Forêts est situé sur le flanc ouest du fossé rhénan, à environ 50 km au nord de Strasbourg.

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

Installations de surface : échangeur thermique. ▶

Le plus grand projet "roches chaudes fracturées" dans le monde

Dès le début, le BRGM, en appui scientifique, a joué un rôle important dans la conception et le lancement de l'expérimentation. Sa banque de données du sous-sol a permis de sélectionner le site idéal : Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin), sur le flanc ouest du fossé rhénan, à une cinquantaine de kilomètres de Strasbourg, choisi car le granite de la région est naturellement fracturé et possède un gradient géothermique élevé, bien connu par les travaux d'exploration et d'exploitation pétrolières réalisés le siècle dernier. Ce site étant également représentatif des conditions qui règnent dans de nombreuses régions du monde, les données acquises pourront servir de référence. Deux puits 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). Après dix ans de tests et sondages, en 1997 et pendant quatre mois, une circulation d'eau a été



© BRGM-im@gé



© BRGM-im@gé

▲ Machine de forage permettant la réalisation de puits à de grandes profondeurs jusqu'à 5 000 mètres.

d'une centrale de production d'électricité à fluide binaire d'une puissance de 5 à 6 MW. La maîtrise d'œuvre a été confiée à un groupement d'intérêt économique appelé Exploitation Minière de la Chaleur et rassemblant les principaux électriciens européens. De nombreuses équipes de scientifiques français (BRGM, CNRS, Universités), allemands mais aussi suisses, anglais, japonais et américains, regroupées au sein de l'association European Hot Dry Rock créée par le BRGM, participent à ces travaux. En 2010, une autre étape devrait être franchie avec un prototype industriel capable de produire 25 MW. À ce stade, la construction d'unités en série pourrait commencer.

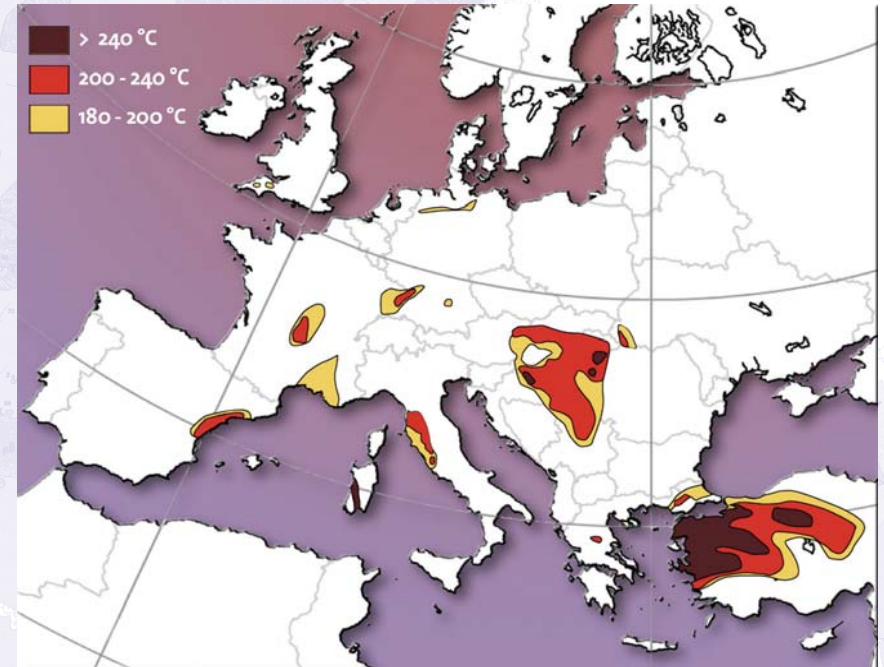
Un potentiel énorme

Le calcul montre que, si le dispositif en cours d'essai confirme ses potentialités, la mise en exploitation géothermique de 3% 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. Et ceci sans aucune pollution.

De telles 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 une grande partie du monde, ouvrant des perspectives révolutionnaires à la géothermie profonde. Mais son avenir est conditionné à sa rentabilité. Selon les prévisions des promoteurs du projet, le prix du kWh électrique produit par la géothermie profonde pourrait s'approcher de 8 centimes d'euro en 2015. Une énergie chère, donc, car elle nécessite des forages à grande profondeur dans un milieu encore mal connu. Son prix pourrait cependant baisser dans le futur, par abaissement des coûts de forages, à moins de 5 centimes d'euro, la rendant enfin compétitive avec les autres ressources. Cette énergie propre et locale pourrait alors donner son plein potentiel.

Soultz en chiffres

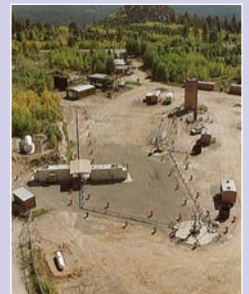
- 18 années de recherche.
- 80 millions d'euros investis dont 30 millions par l'Union européenne, 25 millions par l'Allemagne et 25 millions par la France (ADEME).
- 15 laboratoires de recherche impliqués et plusieurs centaines d'entreprises sous-traitantes.
- 60 000 m³ d'eau injectés en six grandes phases de stimulation des fractures.



▲ Carte des potentialités de géothermie profonde pour la production d'électricité en Europe. Source carte : E. Hurtig, V. Cermak, V. Zui, (1992). Geothermal Atlas of Europe, Hermann Haack.

Les principaux programmes de recherche

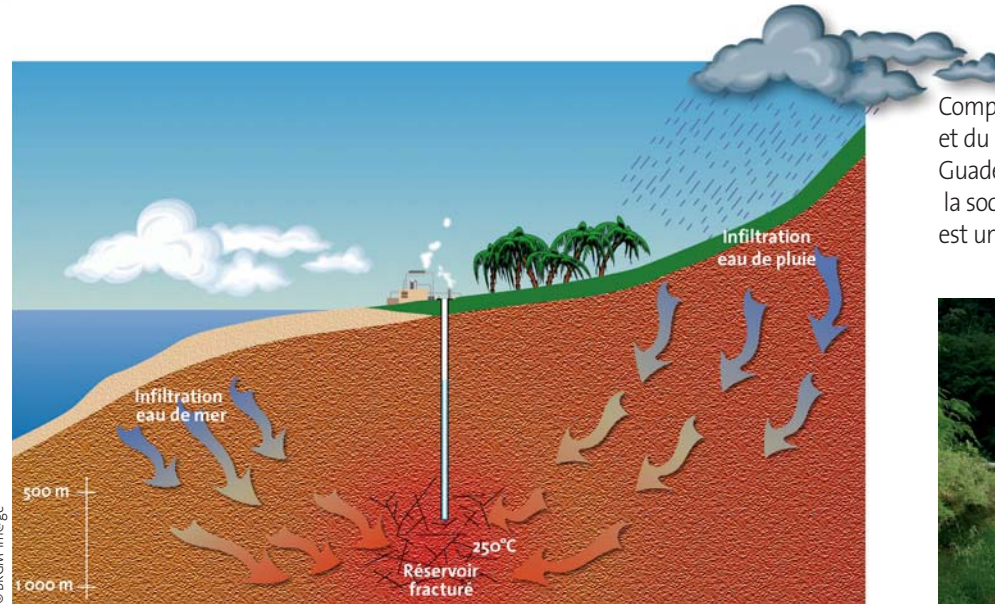
- Aux Etats-Unis, les recherches ont été menées de 1977 à 1990 par le Los Alamos National Laboratory à Fenton Hill, en bordure de la Caldera de Valles (Nouveau Mexique). Elles ont permis de réaliser une circulation en boucle pendant plusieurs mois sans déclin thermique excessif.
- En Grande-Bretagne, les années 1980 ont vu un programme ambitieux dans le granite de Camborne à Rosmanowes Quarry. Des prouesses techniques dans le domaine du forage et du suivi sismique n'ont pas empêché l'échec du projet.
- Au Japon, les projets de Hijiori à partir de 1984 et de Ogachi depuis 1989 ont connu des succès partiels mais un bilan final décevant. En dépit des conditions thermiques très favorables à 2 km de profondeur, les pertes en eau se sont révélées trop importantes.
- En Allemagne et en France, au début des années 1980, des recherches ont été entreprises séparément sans succès, avant que les deux pays s'associent en 1987 dans le programme de Soultz-sous-Forêts.
- En Australie, un projet basé sur des financements privés est mené activement dans des conditions géologiques différentes de celles de Soultz-sous-Forêts.



La géothermie dans les départements d'outre-mer

Trois départements d'outre-mer, de par leur insularité et leur contexte volcanique, représentent des régions potentiellement favorables pour la production d'électricité d'origine géothermale.

Parallèlement au développement du champ géothermique de Bouillante, en Guadeloupe, le BRGM a entrepris d'explorer à nouveau le potentiel géothermique haute énergie de l'ensemble des DOM, au travers de projets de recherche soutenus financièrement par l'ADEME, la CEE et les Conseils régionaux de Guadeloupe, Martinique et Réunion. Afin de réduire l'aléa géologique et de minimiser ainsi les coûts des phases d'exploration par forage – qui constituent le plus gros handicap pour les initiatives industrielles – le BRGM a également lancé un projet de recherche qui vise à améliorer les méthodologies d'exploration de surface et à les adapter au contexte particulier des DOM.



▲ Modèle simplifié du champ géothermique de Bouillante.

L'électricité en Guadeloupe

A l'heure actuelle, la seule référence française en matière de géothermie haute température se situe à Bouillante, non loin du volcan guadeloupéen de la Soufrière. La centrale de Bouillante, située en pleine agglomération, a déjà une longue histoire qui a débuté dans les années 1960 par des sondages et des forages d'exploration sous l'égide du BRGM. Quatre forages profonds ont suivi dans les années 70, réalisés par une entreprise privée innovante, la société Eurafrep. Un seul d'entre eux d'une profondeur de 300 m a été déclaré positif sur la base duquel l'installation d'une centrale de 5 MW a été décidée en 1984. A partir de 2000, un projet d'extension des activités géothermiques a été mis à l'étude pour multiplier par trois les capacités installées.



▲ Tête de puits à Bouillante.



© BRGM-im@gé

Ce projet a bénéficié du concours de la Compagnie Française de Géothermie (groupe BRGM) et du soutien de l'ADEME, du Conseil régional de Guadeloupe et de l'Union européenne. Aujourd'hui, la société Géothermie Bouillante qui exploite le site est une filiale à 60% du BRGM et à 40% d'EDF.



© BRGM-im@gé



© BRGM-im@gé



© BRGM-im@gé



© BRGM-im@gé

▲ De haut en bas, le volcan de la Soufrière, en Guadeloupe, et divers éléments de l'installation de Bouillante : le séparateur, le condenseur (détail) et les pompes d'eau de mer.



© BRGM-im@gé

▲ **Le réducteur et la turbine de Bouillante.**

Seule centrale de production électrique à partir de la géothermie sur le territoire français, Bouillante est en passe de fournir 10% des besoins en électricité de la Guadeloupe.

Bouillante 1 a été rénovée et le système de traitement de la vapeur transformé. La centrale met en œuvre un procédé original de refroidissement des effluents par l'eau de mer. Les études conduites ont permis de vérifier que l'impact écologique de ces rejets était négligeable de surcroît dans un site où existent de nombreuses sources géothermales sous-marines émanant du même réservoir.

Très proches de ce site, trois nouveaux puits de production plus profonds (1 km en moyenne) ont été mis en service en 2001 et une centrale, construite en 2003 (Bouillante 2), devrait mettre en production,

à fin 2004, 11 MW supplémentaires. Ce nouvel apport d'énergie devrait permettre de couvrir environ 10% des besoins annuels en électricité de l'île, en lieu et place des 3% actuels.

Des projets en Martinique ...

La réalisation par le BRGM (avec le soutien de l'ADEME, du Conseil régional et de l'Union européenne) de trois puits d'exploration dans la plaine du Lamentin et les travaux d'accompagnement scientifique ont précisé le potentiel géothermique de cette zone, proche de Fort-de-France. Des potentialités géothermiques ont également été découvertes dans les régions de Morne Rouge, de la Montagne Pelée et de l'anse du Diamant, à partir de travaux de surface.

... et à La Réunion

Paradoxalement, ce n'est pas le volcan actif de La Fournaise qui recèle le meilleur potentiel, mais le centre de l'île, au voisinage du piton des Neiges. Les travaux réalisés dans les années quatre-vingt ont en effet conclu négativement quant au



© BRGM-im@gé

▲ **Après refroidissement, l'eau géothermale est rejetée à la mer.**

Turbine de la centrale géothermique de Bouillante : le kWh d'électricité produite est vendu 8 centimes d'euro à EDF à comparer à 14 centimes d'euro, prix de revient de la filière classique en ▼ Guadeloupe.

potentiel au pied du piton de la Fournaise, mais ils ont permis d'identifier des températures intéressantes à Salazie.

La synthèse des résultats obtenus en géologie et en géochimie par de nouvelles recherches en surface, a permis au BRGM de réévaluer les potentialités géothermiques haute énergie des cirques de Salazie et de Cilaos, associés au piton des Neiges. Ces travaux ont confirmé la difficulté de trouver une ressource géothermique haute énergie classique et les travaux de recherche en cours et à venir porteront sur la plaine des Palmistes et des Cafres. Suite à des travaux de géophysique menés pour le compte du conseil régional, maître d'ouvrage, sur la base d'une reprise des données sur l'île, des opérations de géophysique ont indiqué des zones favorables pour y conduire des explorations complémentaires.

Et demain ?

L'utilisation des potentialités offertes par la bordure nord du réservoir actuellement exploité pourrait encore augmenter la capacité de la centrale de Bouillante. Le site peut déjà servir de point d'appui pour envisager la naissance d'un pôle régional de développement de la géothermie dans la Caraïbe. Le contexte est favorable : les besoins en électricité de la région augmentant de 7 à 10% par an. Les autres sources d'électricité à partir des combustibles fossiles ou d'énergies renouvelables offrent des prix de revient plus élevés que ceux d'une centrale comme Bouillante. Il s'agit donc bien d'une production compétitive.



© BRGM-im@gé

Les pompes à chaleur

La géothermie très basse énergie avec usage de pompes à chaleur sur eau de nappe ou circuit de circulation dans le sous-sol connaît un regain d'intérêt depuis quelques années pour le chauffage et la climatisation et/ou le rafraîchissement. La France connaît un développement rapide de ce marché, l'ADEME en partenariat avec EDF apporte son appui.



© Eco-Alternative

De nombreux avantages

La géothermie des très basses énergies avec PAC offre de nombreux avantages : c'est une énergie propre qui ne produit aucun déchet. Elle ne dépend pas des conditions climatiques car la température du sous-sol est constante tout au long de l'année. La dimension réduite de l'installation s'applique à des maisons individuelles ou à des bâtiments professionnels. Ainsi, le choix énergétique ne dépend que des particuliers ou des entreprises. Pour aider les citoyens dans leurs démarches, l'ADEME a engagé en collaboration avec EDF une politique de structuration de la filière (regroupement des professionnels, formation, labelisation des produits, information).

Elle propose également des aides pour l'utilisation de ces techniques encore peu diffusées en France, telle que la production de chaleur sur capteurs enterrés verticaux. Le BRGM, quant à lui, entend développer des modèles et des systèmes

d'aide à la décision pour aider les maîtres d'ouvrages et les entreprises, à optimiser les dispositifs selon les caractéristiques géologiques du sol et les caractéristiques thermiques du bâtiment.

Un marché d'avenir

Sous la pression des exigences environnementales et plus particulièrement de la réduction des rejets de CO₂ dans l'atmosphère, le développement des pompes à chaleur (PAC) dites "géothermiques" connaît depuis le début des années 90, au plan international, un développement intéressant et prometteur.

Cela est vrai en Amérique du Nord, aux USA et au Canada, mais aussi dans certains pays européens où ces produits sont déjà largement répandus comme en Suède, en Suisse, en Allemagne ou en Autriche. Ces techniques - qui puisent leur énergie dans le sous-sol - sont considérées par les

professionnels comme les techniques utilisant les énergies renouvelables dont le marché progresse le plus rapidement.

En France, l'intérêt pour les PAC géothermiques est plus récent et le marché est encore en émergence. Celui-ci était seulement de quelques centaines d'installations par an jusqu'en 1997. Il a atteint pour la seule année 2003, environ 9 000 réalisations. La France est ainsi devenue en l'espace de quelques années, le deuxième marché européen derrière la Suède ; le marché français étant sûrement appelé à devenir le premier marché en Europe dans les prochaines années.

▲ Mise en place de l'échangeur vertical d'une sonde géothermique.



© Eco-Alternative

▶ Réalisation d'un forage avant la pose de l'échangeur.



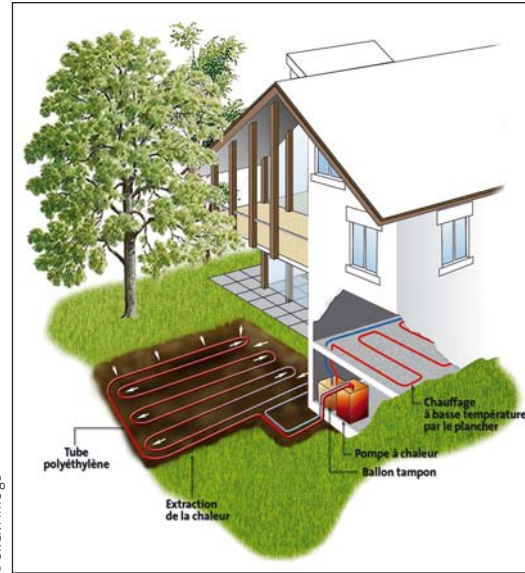
© Viessmann

▶ Réseau de capteurs horizontaux en polyéthylène enterrés à faible profondeur dans lequel circule le fluide caloporteur jusqu'à la pompe à chaleur.

Les pompes à chaleur géothermiques (PAC) dans les principaux pays de l'Union européenne ▼

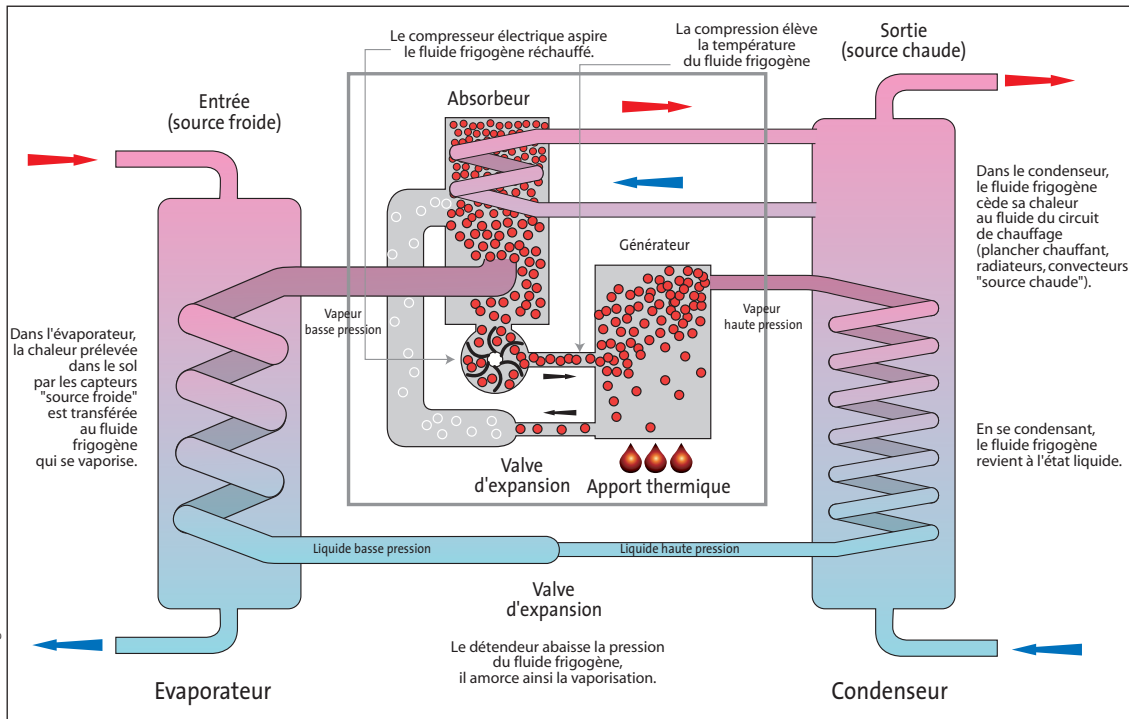
	2001		2002	
	Quantité	Production (MW)	Quantité	Production (MW)
Suède	147 000	882,0	176 000	1 056,0
Allemagne	66 000	533,2	73 455	587,6
France	28 500	453,0	36 500	541,0
Autriche	31 000	540,0	34 000	590,0
Finlande	18 356	296,0	19 833	320,0
Danemark	6 700	80,4	7 200	86,4
Pays-Bas	3 985	47,8	5 200	62,4
Belgique	2 100	21,0	2 250	22,5
Irlande	700	7,0	1 000	10,0
Grèce	150	2,0	150	2,0
Royaume-Uni	49	0,6	149	1,6
Italie	100	1,2	100	1,2
Total	305 293	2 864,2	355 837	3 280,7

Source : EurObserv'ER 2003



© BRGM-im@gé

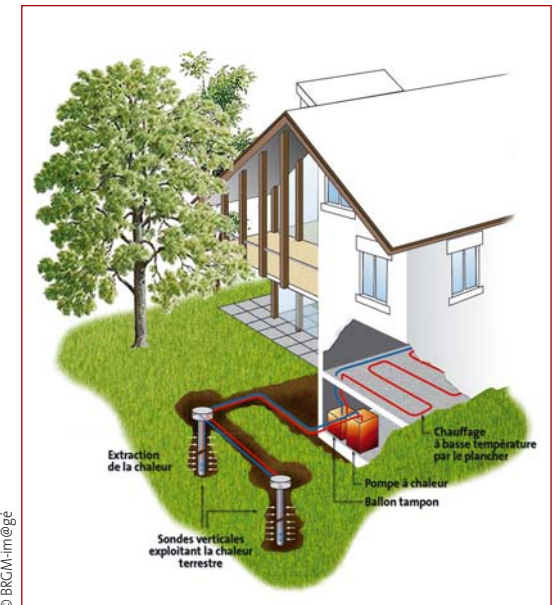
◀ Schéma d'une installation de chauffage avec capteurs horizontaux enterrés et pompe à chaleur. Les capteurs horizontaux sont des tubes de polyéthylène ou de cuivre gainés de polyéthylène dont la longueur peut dépasser plusieurs centaines de mètres. Ils sont installés en boucles enterrées horizontalement à faible profondeur (de 0,60 m à 1,20 m). Dans ces boucles circule en circuit fermé de l'eau additionnée d'antigel ou le fluide frigorigène de la pompe à chaleur (selon la technologie employée).



© BRGM-im@gé

◀ Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur à absorption utilisant l'aptitude d'un composé à absorber les vapeurs d'un fluide de travail (d'après document AIE).

Les capteurs verticaux sont constitués de deux tubes de polyéthylène formant un U installés dans un forage (à plusieurs dizaines de mètres de profondeur) et scellés dans celui-ci par du ciment. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau additionnée de liquide antigel. Dans ce cas, l'emprise au sol est minime par rapport à des capteurs horizontaux. L'installation de sondes géothermiques est effectuée par une entreprise de forage qualifiée (le BRGM gère, dans le cadre d'un partenariat avec l'ADEME et EDF, une liste de foreurs engagés dans une démarche de qualité). Il faut aussi respecter les procédures administratives concernant la protection du sous-sol.



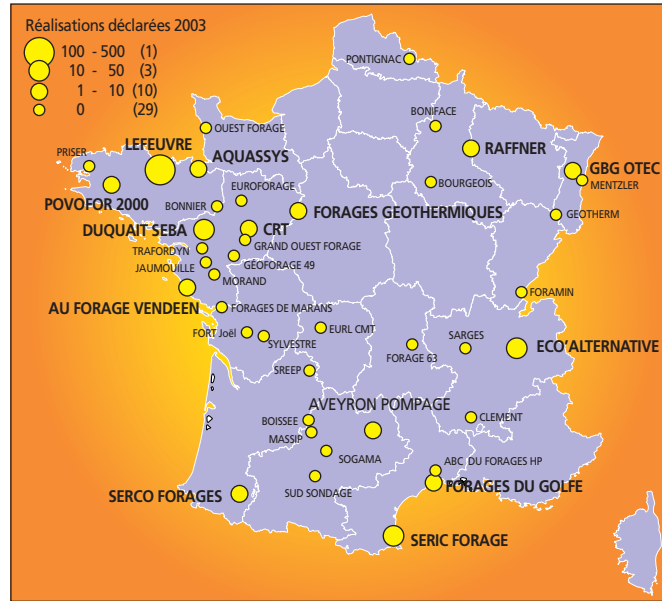
© BRGM-im@gé

Les sondes géothermiques : un chauffage discret avec peu d'entretien

Les sondes géothermiques verticales sont des échangeurs de chaleur installés verticalement dans des forages d'un diamètre de 10 à 15 cm et profonds de quelques dizaines de mètres dans pratiquement tous les types de formations géologiques. Par exemple, pour chauffer une maison de 120 m² habitables, deux sondes géothermiques de 50 m de profondeur suffisent et pour des petits ensembles de logements ou d'immeubles de bureaux, la profondeur peut descendre jusqu'à 300 m. L'emprise au sol est minime par rapport à des capteurs horizontaux.

Une fois le forage achevé, un tube de polyéthylène formant un U est alors inséré jusqu'au fond. L'espace vide restant est rempli d'un mélange de bentonite et

Carte de localisation ► des entreprises de forage ayant signé la lettre d'engagement qualité des forages pour capteurs verticaux en vue de l'obtention du label EDF "Promotelec" (les adresses sont téléchargeables sur les sites Internet promotelec.com et geothermie-perspectives.fr).



© BRGM-im@ge - septembre 2004

Et demain ?

Aujourd'hui, un regain d'intérêt se fait sentir, surtout pour l'installation de systèmes de chauffage et de climatisation pour les locaux professionnels (commerce, hôtellerie, bureaux).

La France est loin d'avoir épuisé son potentiel très basse énergie ! Avec ses 28 500 PAC, elle n'arrive en effet qu'en quatrième position dans l'Union européenne, derrière la Suède, l'Allemagne ou l'Autriche. Un partenariat étroit entre l'Association française des pompes à chaleur (AFPAC), l'ADEME et EDF, mis en place en 2002, souhaite relever ce challenge.

La Caisse d'Allocations Familiales de Lyon

Cet immeuble, construit en 1997, est devenu une référence pour l'économie énergétique qui a présidé à sa conception. EDF, qui s'était vu confiée l'assistance énergétique, a réalisé pour la Caisse d'Allocations Familiales du Rhône une performance en matière de maîtrise de l'énergie, en faisant appel à la technologie des pompes à chaleur réversibles. Pour assurer la partie chauffage et climatisation, deux thermofrigopompes utilisent la nappe phréatique comme source froide. Les puissances calorifiques et frigorifiques produites sont identiques : 600 kW. Le site est très favorable, puisque la température de l'eau reste extrêmement stable, avec une variation maximale de 3°C sur l'année. Mais l'exceptionnel rendement des pompes s'explique aussi par la cohérence et la finesse de la gestion électronique du système. Ainsi, la vitesse des pompes de puits est modulée en fonction des besoins, ce qui permet d'optimiser le système et de faire des économies d'énergie. Le coût du poste chauffage et climatisation de l'immeuble peut être comparé à celui des anciens locaux de la Caisse d'Allocations Familiales de Lyon : atteignant 11,30 euros le m² dans les anciens bâtiments, il ne dépasse pas 8,70 euros par m² dans les nouveaux.

de ciment, pour assurer un bon contact thermique entre les tubes et la paroi du forage et protéger le sous-sol.

Puis un circuit fermé est établi entre le forage et la pompe à chaleur installée en général dans le sous-sol du bâtiment. Le fluide - de l'eau additionnée d'antigel -

L'exemple suisse
Comment la Suisse, l'un des pays les plus froids d'Europe de l'ouest, réussit-elle à supporter les dépenses de chauffage les plus faibles ? Réponse : elle s'est massivement équipée de sondes géothermiques. Par groupes allant de quelques unités à plusieurs dizaines, les sondes géothermiques sont systématiquement envisagées lors de chaque projet de construction, qu'il soit individuel ou collectif. Une utilisation particulière des sondes : les pieux géothermiques. Il s'agit de sondes placées dans le gros œuvre, dès le stade des fondations. Les échangeurs de chaleur sont installés à l'intérieur de pieux, formant dans le sous-sol de véritables forêts. Ces pieux de différents diamètres sont traversés, suivant la taille des ouvrages, d'un réseau de tubes polyéthylènes doubles, quadruples ou multiples afin de former des boucles dans lesquelles circulent les fluides caloporteurs. La diffusion calorifique est assurée par des

en circulant dans le forage prélève de la chaleur du sous-sol et transfère l'énergie géothermique, ainsi captée, à la pompe à chaleur. Celle-ci relève le niveau de température de la chaleur prélevée jusqu'à une température suffisante (35°C) pour permettre un chauffage avec plancher chauffant ou avec des radiateurs à basse température. L'installation peut également produire de l'eau chaude sanitaire. La part de l'électricité qui fait fonctionner la PAC représente un quart à un tiers de l'énergie globale.

Le coût d'investissement est supérieur de 50% environ à celui d'un chauffage classique à mazout équipé d'une chaudière ; c'est principalement le forage qui explique ce surcoût.

Toutefois les frais de fonctionnement sont beaucoup plus faibles, car il y a peu d'entretien et aucun combustible à acheter. Enfin, il s'agit d'une installation

propre, de taille réduite, sans odeur et d'une durée de vie d'au moins 20 ans pour les équipements de surface et de plus de 50 ans pour la sonde géothermique.

IV

L'avenir de la géothermie

- **Face aux énergies fossiles**
- **La place de la géothermie
parmi les énergies renouvelables**
- **Perspectives**

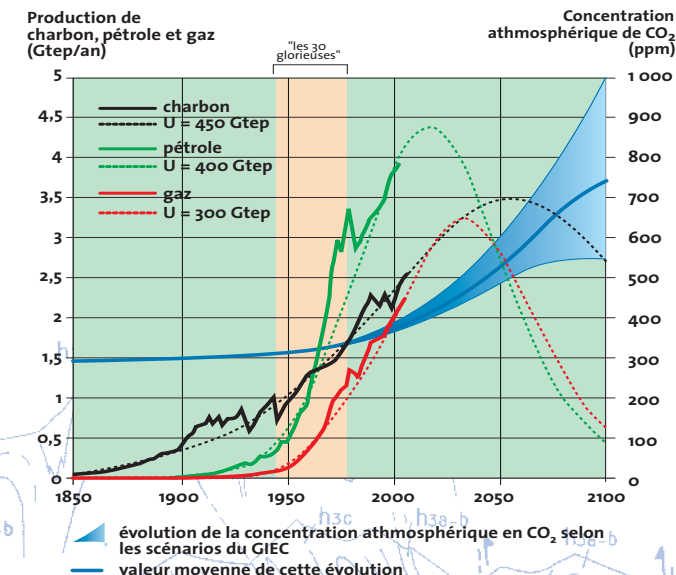
L'avenir de la géothermie



Au sein des énergies renouvelables, la géothermie est souvent méconnue. Pourtant, elle existait bien avant que l'expression soit inventée, bien avant que l'on parle de développement durable ou de lutte contre l'effet de serre. Mais malgré cette ancienneté (ou peut-être à cause d'elle), elle ne bénéficie pas de tout l'intérêt qu'elle mérite.

Face aux énergies fossiles

Nous ne sommes pas encore sortis de l'ère de l'énergie fossile. Si le charbon a perdu du terrain depuis les "30 glorieuses", notamment en Europe, le pétrole et le gaz vivent encore leur âge d'or. Leurs prix restent avantageux malgré plusieurs chocs pétroliers et les hausses sporadiques qui accompagnent les crises du Moyen-Orient. Ils gardent donc la faveur des consommateurs, d'autant plus que les circuits de distribution se sont consolidés et étendus, notamment pour le gaz. Faudra-t-il attendre la raréfaction des ressources pour réagir et se tourner vers les énergies renouvelables ? Ce ne serait pas faire preuve d'un esprit d'anticipation particulièrement novateur ! Car il ne s'agirait que d'anticiper de quelques années l'épuisement inéluctable des ressources, attendu dans les années 2020 à 2040 !



© 2000-2001 Geothermal Education Office

▲ Le recours aux énergies renouvelables permet de réduire les impacts sur le changement climatique.

Depuis le début de l'ère industrielle, on assiste à une croissance régulière des consommations d'énergies fossiles – à l'origine même du "développement" exceptionnel qu'auront connu notre génération et celle de nos parents – au point d'aller jusqu'à l'épuisement de certaines d'entre elles (pétrole, gaz) ; entre 2010 et 2040, on passera le "pic" au-delà duquel la production sera amenée à baisser inexorablement (courbes noire, verte et rouge).

Dans le même temps, le gaz carbonique émis par la combustion de ces énergies fossiles entraîne une augmentation des teneurs en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Selon les efforts qui seront faits par les producteurs et les consommateurs pour réduire le taux de croissance de ces émissions, on parviendra ou non à stabiliser ces émissions à l'horizon 2040 (courbe bleue). Ces efforts sont d'autant plus nécessaires que l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre induit une augmentation des températures moyennes de l'atmosphère, source de perturbations diverses et notamment d'événements météorologiques extrêmes.

Est-ce l'épuisement des gisements pétroliers qui limitera les émissions, ou bien une attitude plus responsable de l'humanité qui décidera de recourir aux énergies renouvelables – notamment à la géothermie ?

Ce serait un choix doublement gagnant pour l'avenir : réduction des impacts du changement climatique et préservation de matières premières bien utiles aux générations futures !



◀ Sonde géothermique prête à être installée dans le forage vertical.

Mais si la fin de l'ère des énergies fossiles ne s'impose pas du fait de la clairvoyance des hommes quant à l'épuisement des ressources, elle s'impose désormais pour cause d'excès d'émissions atmosphériques. Les risques climatiques liés à l'augmentation de l'effet de serre sont tels que des mesures impératives de réduction de l'usage des énergies fossiles s'imposent.

Dans les pays développés comme la France, il faudra diviser nos émissions par quatre en 2050. Ce qui implique de diminuer l'usage des combustibles fossiles - pétrole et gaz - en cherchant partout les secteurs où ils peuvent être remplacés. La première conversion, évidente, se situe dans les applications de basse température, comme le chauffage des bâtiments et la production d'eau chaude sanitaire. Dans ce domaine, les énergies renouvelables doivent désormais s'imposer pour la production de chaleur. La réglementation thermique dans la construction neuve met désormais bien en valeur l'apport de ces énergies ; et la géothermie plus que tout autre, cette énergie dont la fonction fut dès l'origine d'apporter la chaleur de la Terre aux humains !

Aujourd'hui bien maîtrisée, et porteuse de potentiels immenses, elle devrait être appelée à jouer un rôle important dans la conversion de notre civilisation au développement durable.



▶ Trépan utilisé pour le forage géothermique.

Installation géothermique pour le chauffage de la pisciculture de Mios le Teich (Gironde) à partir d'anciens forages pétroliers.



La place de la géothermie parmi les énergies renouvelables

Les quelques chiffres clés fournis ci-après permettent de situer la place occupée en France par la géothermie au sein des énergies renouvelables.

- En 2001, 4,5% de l'énergie consommée en France était d'origine renouvelable thermique, soit 12,2 Mtep, alors que la part de la consommation d'électricité d'origine renouvelable était de 16,9%, soit 78 TWh.
- Les contributions relatives des différentes filières montraient que deux d'entre elles jouaient un rôle prépondérant : le bois-énergie pour les renouvelables thermiques (environ 78% de la contribution totale) - la France étant leader européen pour cette filière - et l'hydro-électricité pour les renouvelables électriques (près de 95% de la contribution totale), avec une part essentielle issue de la grande hydraulique (barrages).
- La géothermie occupait une place modeste pour la chaleur (environ 2% de la contribution totale) et marginale pour la production d'électricité (0,023 TWh) mais avec une production concentrée sur une seule installation (à Bouillante en Guadeloupe).
- Au plan européen, on retrouvait grosso-modo les mêmes répartitions, tant pour les filières majeures - bois énergie et hydroélectricité (avec néanmoins

une contribution relative plus importante pour l'éolien) - que pour la place occupée par la géothermie.

Les renouvelables thermiques en France en 2001

Filières	Contribution relative
Bois et déchets de bois	env. 78%
Déchets urbains solides (UIOM)	env. 15%
Biogaz de décharge et méthanisation	env. 5%
Géothermie et pompes à chaleur géothermiques	env. 2%
Solaire thermique	0,05%

Les renouvelables électriques en France en 2001

Filières	Production en TWh	Contribution relative
Hydraulique	73,9	94,9%
Déchets urbains solides (UIOM)	2	2,6%
Bois et déchets de bois	1,5	1,9%
Biogaz de décharge et méthanisation	0,34	0,43%
Eolien	0,12	0,15%
Géothermie	0,023	0,03%
Solaire photovoltaïque	0,002	0,002%



© BRCM-im@gé

◀ Installation de la centrale de production d'électricité par géothermie à Bouillante en Guadeloupe.



© BRCM-im@gé

▶ Poste de contrôle de la centrale de Bouillante en Guadeloupe.

▼ Pompe à chaleur géothermique.



© Viessmann

▼ Echangeur à plaques de titane qui permet de transférer les calories de la boucle géothermale au circuit de distribution de chaleur.



© BRCM-im@gé

La géothermie en France devrait continuer à occuper une place marginale comme filière de production d'électricité, sauf dans les DOM. Pour respecter le protocole de Kyoto, les pays de l'Union européenne se sont en effet engagés à augmenter la contribution des énergies renouvelables électriques d'ici à 2010. Pour atteindre l'objectif qui lui a été fixé, c'est-à-dire passer d'une contribution de 15% en 1997 à 21% en 2010, soit 33 TWh supplémentaires, la France a choisi de miser sur l'éolien, la biomasse et dans une moindre mesure sur l'hydraulique. La géothermie devrait contribuer à cet effort, pour l'essentiel dans les DOM, à hauteur de 0,3 TWh seulement : objectif qui reste globalement petit, mais qui n'est pas ridicule à l'échelle des Départements d'Outre-mer où la géothermie peut constituer une vraie réponse à une demande énergétique croissante. A partir de 2020, la production d'électricité d'origine géothermale pourrait occuper une place plus importante, avec la mise en œuvre industrielle des techniques de géothermie profonde développées à Soultz-sous-Forêts. Dans le domaine de la production de chaleur, les perspectives qui s'offrent à la géothermie sont un peu plus ambitieuses, puisque la France se fixe l'objectif d'ici à 2010 d'accroître de 50% la production d'énergie renouvelable thermique. Cet objectif correspond à une augmentation de 5 à 6 Mtep et devrait profiter à la géothermie.

Des scénarios de développement de la géothermie

Dans ce cadre, l'ADEME a proposé pour la géothermie plusieurs scénarios de développement construits sur la base d'hypothèses crédibles et réalistes au regard de ce qui se passe à l'étranger par exemple, ou du potentiel existant en France raisonnablement accessible d'un point de vue technique et économique. Il ressort de cet exercice prospectif d'évaluation que la géothermie - dans le cas du scénario médian proposé - pourrait contribuer pour près de 0,7 Mtep/an en 2010, à la production nationale de chaleur ; ce qui conduirait à multiplier par trois la production de 2003 et équivaldrait à réduire les rejets de CO₂ dans l'atmosphère de près de 1,75 Millions de tonnes par an en 2010. La part relative de la géothermie dans le bouquet des énergies renouvelables thermiques passerait ainsi de 2 à 4%.

Trois axes sont privilégiés :

- **La géothermie individuelle avec les pompes à chaleur** sur capteurs enterrés. L'objectif affiché est de parvenir à équiper une maison individuelle neuve sur cinq en 2010 pour atteindre ainsi un parc total installé d'environ 300 000 unités. Des mesures fiscales adaptées (crédit d'impôt), ainsi que des actions visant à structurer la profession autour d'une démarche qualité (charte qualité installateurs, certification des produits, critères minimum de performance à respecter) devraient aider à installer durablement le marché.
- **La géothermie que l'on peut qualifier "d'intermédiaire"**. Elle concerne des opérations de taille moyenne (opérations de pompes à chaleur sur eau de nappe ou avec champs de sondes géothermiques verticales pour le chauffage et la climatisation de

bâtiments du moyen et grand tertiaires, ou opérations de géothermie de type Aquitain alimentant des mini-réseaux de chaleur ou des piscines, des serres, ...). Ce type de géothermie peut se pratiquer dans la plupart des régions françaises et peut davantage être développé. Les mesures proposées pour soutenir cette activité passent par une meilleure connaissance des ressources exploitables (ré-actualisation des inventaires de données sous-sol croisée avec des besoins énergétiques en surface, par exemple), l'information des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre concernés (mise à disposition d'outils cartographiques sur les ressources, aide au financement d'opérations exemplaires, formation,...), un meilleur accès à des mesures d'incitation comme la garantie AQUAPAC.

- **La géothermie des gros réseaux de chaleur urbains** tels qu'ils existent en Région parisienne. Les atouts de cette filière sont nombreux et bien réels (niveau du savoir-faire acquis en France, bilan global du fonctionnement des opérations existantes, contribution environnementale, coût du MWh...). Il est temps aujourd'hui de les faire connaître et de se montrer ambitieux alors qu'aucune opération nouvelle n'a vu le jour depuis 1987. L'objectif affiché est ainsi d'assurer une croissance forte du parc actuel (+50% sur l'Ile-de-France, d'ici à 2020, en exploitant mieux la ressource géothermale existante).

Des dispositifs tels que les certificats d'économie d'énergie, qui visent à rémunérer les économies d'énergies fossiles réalisées par la mise en place d'équipements énergétiquement performants ou exploitant des énergies renouvelables, la pression environnementale en site urbain, et la hausse inéluctable du coût des énergies fossiles devraient aider à remplir cet objectif.

Perspectives

Des besoins électriques à satisfaire

Si l'on regarde la répartition des ressources en géothermie haute température les plus prometteuses dans le monde, on s'aperçoit qu'elles se concentrent dans un nombre limité de pays, autour des zones volcaniques actives du globe : la cordillère des Amériques Centrale et du Sud, les arcs insulaires incluant notamment l'Indonésie et les Philippines, ou encore les Caraïbes, l'Afrique de l'Est (Erythrée, Ethiopie, Kenya, ...), la structure euro-arabique avec notamment la Turquie et l'Iran. Dans ces pays, il est possible d'équiper en centrales électriques des champs géothermiques pouvant produire plusieurs centaines de MW. Aujourd'hui, la demande fait encore défaut et les réseaux de distribution électriques sont souvent inexistant.

Toutefois, la mise en œuvre du protocole de Kyoto, la création des permis d'émissions de gaz à effet de serre, puis l'entrée en vigueur des mesures de deuxième génération d'application de la convention climat (UNFCCC) devraient conduire à une accélération dans la mise en œuvre de nouveaux projets.

Ainsi, sur la base de données et de projections réalistes établies en 1997, on prévoyait pour 2020, avec 18 000 MW, plus du doublement de la puissance mondiale installée. Par ailleurs, on peut espérer que des techniques de géothermie profonde comme celles développées à Soultz-sous-Forêts seront alors arrivées suffisamment à maturité pour permettre l'éclosion de nouveaux projets de production d'électricité ; ceci, dans des zones ne disposant pas

nécessairement de ressources géothermales naturelles mais consommatrices d'électricité et qui présenteront l'avantage d'offrir des structures existantes de transport d'énergie.

Développement des pompes à chaleur pour le chauffage et la climatisation

Le deuxième axe concerne le chauffage des bâtiments et la production d'eau chaude sanitaire. en France, par exemple, où 40 millions de tonnes de pétrole sont consommées chaque année à cette fin, il s'agit du premier poste de consommation d'énergie avec les transports. Or une bonne partie de ces besoins pourrait être couverte assez facilement par le recours à des systèmes géothermiques utilisant notamment des pompes à chaleur (avec des capteurs enterrés, ou avec des sondes ou des pieux énergétiques, ou avec des forages sur des nappes d'eau souterraines). intégrés dès la conception des bâtiments, ces systèmes sont particulièrement bien développés dans les pays voisins, en Suisse, Suède, Norvège... alors que ces pays sont pourtant moins bien dotés que la France en ressources géothermales.

On n'imagine plus, dans ces pays, d'installer un chauffage électrique dont l'électricité ne serait pas utilisée pour des pompes à chaleur. Avec le réchauffement climatique, la demande de climatisation va augmenter, et il est essentiel que les nouveaux systèmes exploitent les potentialités de la géothermie pour la production de chaleur ou de froid. Il en est ainsi du système à deux puits que les spécialistes appellent communément système à puits chaud/puits froid. Cette technique de chauffage-rafraîchissement de bâtiment, aujourd'hui bien répandue en dehors de l'hexagone, consiste à réaliser deux puits sur une nappe d'eau souterraine et à coupler les deux puits à une pompe à chaleur.



◀ Plancher chauffant constitué d'un réseau de tubes en polyéthylène noyé dans une chape en béton.

© Arene Ile-de-France



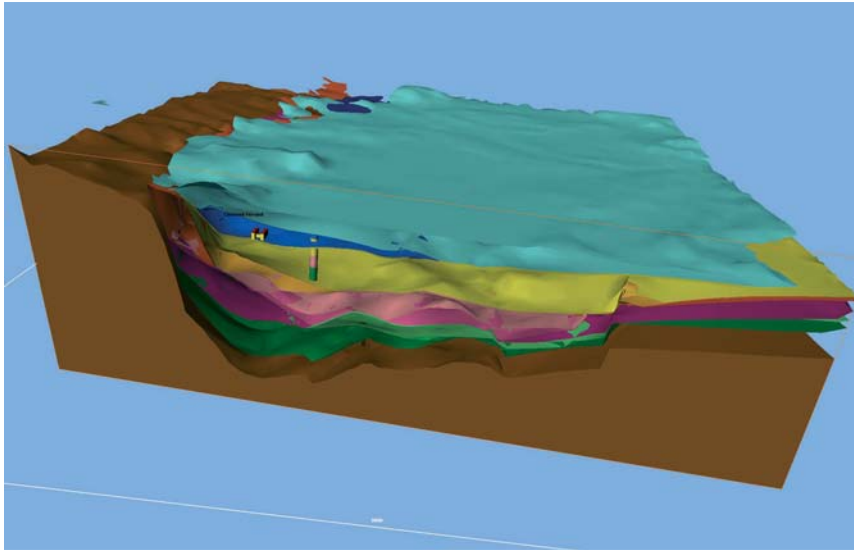
▶
© Pierre Baudin/ADEME



▶ Les deux demi-sphères translucides abritent les installations de chauffage géothermique. Cet ensemble alimente en eau chaude le réseau de chauffage urbain d'une partie des immeubles de la banlieue de Meaux.

▶ Forage géothermique à Bonneuil, Val-de-Marne, pour le chauffage d'un ensemble de logements collectifs.

© Olivier Sébart/ADEME



© BRGM-m@gé

En été, on extrait l'eau d'un des deux puits pour, avec la pompe à chaleur, rafraîchir le bâtiment. L'eau extraite voit ainsi sa température augmenter et elle est réinjectée chaude dans le deuxième puits. La température de l'eau autour de ce second puits augmente donc progressivement au fur et à mesure de l'exploitation - on parle alors de puits chaud. En hiver, on puise de la chaleur dans cet ouvrage pour chauffer le bâtiment puis l'on rejette l'eau souterraine extraite refroidie dans le premier puits - on parle alors de puits froid. C'est de ce puits froid que l'on extraira l'eau, l'été.

▲ Cette représentation en 3 D du fossé de la Limagne permet de visualiser les zones aquifères potentielles. Cette méthodologie mise au point dans le cadre du projet COPGEN conduit par l'ADEME et le BRGM, peut être appliquée aux autres fossés d'effondrement (grabens) comme le fossé rhénan ou la Bresse.

Centrale de cogénération ►
à La Courmeuve (93) :
la géothermie apporte l'essentiel
des besoins en chaleur
pour le chauffage et la production
d'eau chaude sanitaire
des 5 000 logements raccordés
au réseau de chaleur.



© Arene Ile-de-France

Piéger le gaz carbonique

Pour réduire les quantités de gaz carbonique émis dans l'atmosphère par l'utilisation des énergies fossiles, l'une des solutions consiste à capter directement le gaz auprès des principales sources d'émission et de le réinjecter dans le sous-sol. Dans l'avenir, la séquestration du CO₂ devrait aussi jouer un rôle dans la production d'hydrogène à partir du méthane afin de récupérer du CO₂ généré par l'opération. La séquestration géologique du CO₂ a donné naissance dans le monde à de nombreux projets pilotes et études. En France, le BRGM collabore depuis plus de dix ans aux principaux programmes de recherche européens dans ce domaine. Fort de ses compétences, il a concentré son activité sur la séquestration du CO₂ en aquifère profond. Son objectif est d'identifier sur le territoire national, mais aussi à l'étranger, les sites de stockage proches des lieux d'émission, et de proposer des critères de sécurité. Les aquifères profonds (au-delà de 800 mètres de profondeur) se retrouvent dans tous les bassins sédimentaires de la planète.

Ce fonctionnement permet d'accroître les performances de la pompe à chaleur, puisque en hiver comme en été, l'écart de température entre l'eau souterraine et l'eau du circuit de chauffage/ rafraîchissement du bâtiment est minimum.

Séquestration du CO₂

Le troisième axe de développement s'apparente à un service de nettoyage. Le gaz carbonique émis par les activités industrielles pourra sans doute être capté et réinjecté dans des aquifères profonds, sous forme liquide. Il devrait être également possible de concevoir des dispositifs permettant en même temps la réinjection du CO₂ dans le sous-sol et l'extraction de l'eau chaude géothermale.

Dans le futur, la séquestration du CO₂ devrait aussi jouer un rôle dans la production de l'hydrogène, ce carburant propre qui pourrait remplacer l'essence dans les voitures et supprimer ainsi la principale source de pollution de notre environnement. Le plus simple est en effet de l'extraire du méthane. Mais il y a un inconvénient : l'opération est génératrice de CO₂.

Ce problème peut être résolu par la création d'un dispositif de séquestration géologique installé à côté de l'usine de production d'hydrogène.

La géothermie dans les systèmes hybrides

Le dernier axe de développement de la géothermie concerne la mise en place de systèmes hybrides, combinant différentes sources d'énergie et ouvrant de nouvelles possibilités. Le champ de la géothermie s'élargit en effet quand cette dernière est impliquée dans des dispositifs de forte puissance, dans lesquels l'hybridation raisonnée des différents systèmes confère une efficacité énergétique supérieure à la somme des systèmes fonctionnant séparément. Cette judicieuse association entre sources d'énergie s'applique aussi bien à la géothermie basse ou haute température.

Ainsi en France, le site de Melun l'Almont, construit en 1969, ne se contente pas d'être la première centrale géothermique du Dogger, il sert aussi d'exemple d'hybridation pour la région. L'installation assure aujourd'hui le chauffage et l'eau chaude sanitaire de 5 500 logements en combinant géothermie, chauffage au fioul et au gaz. Sur ce modèle, une cinquantaine d'autres installations ont vu le jour dans cinq départements de l'Ile de France.

En Allemagne, la centrale de Neustadt-Glewe (Mecklenbourg-Poméranie Occidentale) n'aurait pu exister sans un minimum d'hybridation. La géothermie

Géothermie et stockage de calories : l'exemple du Reichstag

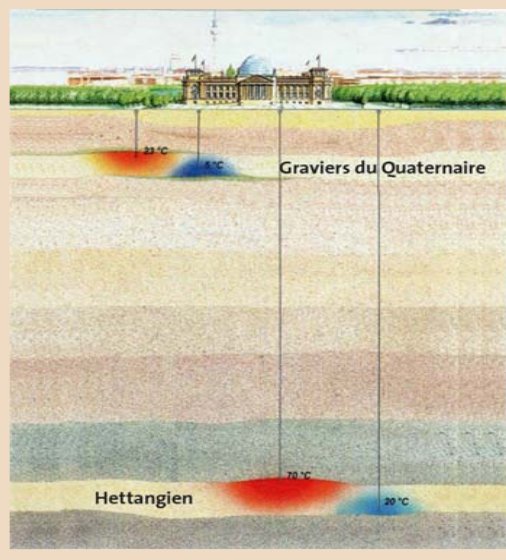
Nouvellement construits à Berlin, les bâtiments du Reichstag offrent un bon exemple d'efficacité énergétique. L'électricité, le chauffage et la climatisation du parlement allemand proviennent pour l'essentiel (90% de la chaleur, 60% du froid, 82% de l'électricité) d'une installation de co-génération. Celle-ci comprend un moteur fonctionnant à partir de biocarburant, capable de produire 3,2 MW et associé à plusieurs pompes à chaleur. Ces PAC à absorption sont alimentées par six doublets qui plongent dans deux nappes aquifères.

La première est située entre 285 et 315 m de profondeur dans les grès de l'Hettangien (Jurassique). Ce réservoir, délivrant 28 litres d'eau par seconde et par puits, joue le rôle d'étage chaud.

La seconde nappe, à une soixantaine de mètres de profondeur dans des graviers du Quaternaire, présente un débit de 17 litres par seconde par puits et sert d'étage froid.

En été, la cogénération produit de l'électricité et réchauffe l'aquifère de l'Hettangien de 25 à 70 degrés. Elle alimente aussi les machines frigorifiques et fait progressivement passer la température de l'étage froid de 5 à 30 degrés.

En hiver, la cogénération produit de l'électricité et actionne les pompes à chaleur qui assurent le chauffage des bâtiments et refroidissent simultanément les deux aquifères.



couvre pourtant 95% des besoins de chaleur de 1 300 logements, de 20 locaux commerciaux et d'une entreprise industrielle. L'installation est constituée d'un doublet de forages et puise un fluide à 100 °C contenu dans les Grès de Concora. Pour garantir la pérennité du système, une chaudière d'appoint à gaz de 4,8 MW et deux chaudières de secours, à fioul, de 5,6 MW, complètent l'installation. Depuis 2003, la centrale produit également de l'électricité par géothermie grâce à un petit générateur électrique à fluide binaire d'une capacité de 200 kW.

Autre cas de figure : à Honey Lake en Californie, de l'eau géothermale à 118°C puisée à 1 900 m de profondeur est utilisée en préchauffage d'une centrale de production d'électricité à partir de la combustion de déchets de bois. La centrale a une capacité de 35,5 MW, la contribution énergétique de la géothermie à ce système hybride étant de l'ordre de 20%.

Enfin, à Kuwerau en Nouvelle-Zélande, la géothermie est associée à d'autres énergies renouvelables pour assurer la couverture énergétique d'une usine de pâte à papier. À de la vapeur extraite du champ géothermal de Kuwerau (75 kg/s de vapeur à 7 bars), vient s'ajouter celle produite par quatre chaudières qui brûlent les déchets de bois et les déchets chimiques résultant de la fabrication de la pâte à papier. L'association de ces sources énergétiques en co-génération satisfait 75% des besoins en chaleur et 20% des besoins en électricité de l'entreprise, la géothermie contribuant pour 25% à la production de chaleur et pour 5,5% à celle d'électricité.

Une conjoncture favorable

En 1974, tout le monde était persuadé qu'il fallait absolument développer les énergies renouvelables. Des efforts considérables ont été faits en recherche, développement et démonstration, qui ont permis entre 1976 et 1986 l'installation d'un certain nombre de centrales géothermiques.



▲ La géothermie, ce formidable réservoir de chaleur installé sous nos pieds offre une énergie renouvelable, non polluante, locale, disponible 24 heures sur 24, 365 jours par an.

Mais en 1986, lorsque le prix du pétrole s'est mis à chuter, au lieu de maintenir un dispositif public encore plus efficace pour soutenir les énergies renouvelables, les politiques d'aides ont été abandonnées.

La récente prise en considération de l'effet de serre changera-t-elle la donne ? On en vient à considérer que le prix du pétrole évoluant à la hausse, la leçon, cette fois-ci, sera comprise. La problématique de l'effet de serre, associée à la rarefaction des ressources fossiles et à l'instabilité de leur prix, offre une conjoncture favorable à la géothermie. Elle devrait lui permettre de s'installer définitivement dans notre paysage énergétique. Ce n'est pas seulement un espoir... c'est aussi un engagement fort de l'ADEME en tant qu'agence d'objectifs et du BRGM acteur central pouvant capitaliser les efforts de tous.

Les aides à la géothermie

Couverture des risques géologiques et miniers

Pour couvrir les aléas géologiques d'une installation géothermique, l'Etat a mis en place un système de garantie à deux volets : une garantie à court terme qui couvre les risques de recherche et une garantie à long terme qui couvre la pérennité de l'installation.

Le **fonds court terme** a fonctionné jusqu'à la fin du milieu des années 1990 ; il garantissait qu'en cas d'échec lors du premier forage, le remboursement était égal à 90% des frais engagés. Ce fonds mis en place par l'ADEME a été dissous faute d'avoir de nouvelles opérations. Il est remplacé par un mécanisme financier d'avance remboursable cas par cas.

Le **fonds long terme** assure le maître d'ouvrage, pendant 15 ans, contre le risque de voir sa ressource diminuer ou disparaître. Il couvre également les éventuels dommages dus à l'obsolescence (garantie apportée sur la pérennité des installations).

Un système analogue a été mis en place pour les opérations de très basse énergie, utilisant des pompes à chaleur sur nappe peu profonde. La gestion de ce fonds dénommé **AQUAPAC** a été confiée à la Société Auxiliaire de Financement (SAF Environnement).

Ces fonds ont été mis en place par l'ADEME avec l'objectif de sécuriser les financements mis en place pour développer cette énergie (notamment par les collectivités locales).

Aide aux installations géothermiques

- Aide de l'**ADEME** pour l'extension d'un réseau de chaleur. Elle est calculée en fonction de la quantité de CO₂ évité, au prix de 400 euros la tonne. Son plafond est limité à 40% de l'investissement.
- Aide de l'**ADEME** pour de nouveaux forages. Elle peut atteindre 30% du coût du forage.

Primes, subventions et incitations fiscales spécifiques aux pompes à chaleur

- L'**ANAH** (Agence Nationale d'Amélioration de l'Habitat) accorde une aide aux particuliers pour l'installation d'une pompe à chaleur, à condition que le logement ait plus de quinze ans, qu'il constitue la résidence principale ou celle d'un locataire. La subvention propriétaire-bailleur atteint 20%, celle de propriétaire-occupant varie en fonction des ressources et de la région. A cette subvention vient s'ajouter une prime de 900 euros pour l'installation d'une pompe à chaleur (air-eau) et une prime de 1 800 euros pour l'installation d'une pompe à chaleur à capteurs enterrés.
- L'**EDF** délivre des accompagnements financiers (primes et /ou prêts à taux réduits, ...) pour l'installation de pompes à chaleur bénéficiant du label Promotelec.

- L'**Etat** accorde un crédit d'impôt pour l'achat d'une pompe à chaleur pour une résidence principale, qui porte sur les dépenses en matériels (subventions déduites, frais d'installation exclus). Ce crédit concerne les logements neufs, en construction ou anciens. Son taux, fixé à 40%, a été défini dans le projet de loi de finances 2005. Les particuliers peuvent également profiter du taux réduit de TVA (5,5%) appliqué par les entreprises qui vendent le matériel et en assurent la pose, à condition que la pompe à chaleur soit installée dans une résidence principale ou secondaire achevée depuis plus de deux ans.
- L'**ADEME** propose des aides aux opérations exemplaires de pompes à chaleur avec sondes géothermiques verticales. Ces aides ne concernent pas les particuliers (pour ces derniers existe le crédit d'impôt). Le montant des aides apportées peut aller jusqu'à 30% du coût des sondes et des pompes à chaleur installées. Elles supportent la mise en œuvre d'une campagne de suivi instrumentée d'une durée suffisante pour obtenir des résultats significatifs. Le coût de cette campagne est pris en charge à 100% par l'ADEME. Ces aides peuvent être complétées par des aides régionales.

Les acteurs de la géothermie

ADEME

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle conjointe des ministères chargés de l'Environnement, de l'Energie et de la Recherche. Dans le cadre des politiques publiques définies par le gouvernement et dans ses champs d'intervention, l'Agence a pour mission de susciter, animer, coordonner, faciliter ou réaliser des opérations ayant pour objet la protection de l'environnement et la maîtrise de l'énergie.

L'ADEME intervient sous des formes très diversifiées qui constituent la spécificité de son rôle :

- orientation, animation et financement de programmes de recherche,
- conseils et expertises,
- élaboration d'outils méthodologiques et diffusion de bonnes pratiques,
- financement d'aides à la décision, d'opérations exemplaires et de projets
- actions de formation, d'information, de communication et de sensibilisation.

En matière de lutte contre le changement climatique, ses priorités portent sur :

- des actions de recherche sur les véhicules, les bâtiments, les nouvelles technologies de l'énergie et les énergies renouvelables,
- une aide à la décision afin d'aider les maîtres d'ouvrage à orienter leurs choix vers des solutions économes en énergie,
- la promotion et la diffusion des énergies renouvelables, comme la géothermie,
- le financement d'opérations de démonstration et d'opérations exemplaires pour favoriser les techniques les plus performantes.

BRGM

Le BRGM est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la double tutelle du ministère de la Recherche et du ministère de l'Industrie. Il conduit une triple mission : recherche, expertise et coopération internationale.

Ses objectifs sont de :

- comprendre les phénomènes géologiques, développer des méthodologies et des techniques nouvelles, produire et diffuser des données pertinentes et de qualité ;
- mettre à disposition les outils nécessaires aux politiques publiques de gestion du sol, du sous-sol et des ressources, de prévention des risques naturels et des pollutions, d'aménagement du territoire.

Il développe ses activités dans huit domaines :

- ressources minérales,
- eau souterraine,
- aménagement et risques naturels géologiques,
- sites et sols pollués, déchets,
- métrologie de l'environnement,
- cartographie et connaissances géologiques,
- géothermie et séquestration géologique du CO₂,
- systèmes d'information numérique.

Au sein du BRGM, le Centre d'information technique sur l'énergie géothermique (CITEG) est chargé, en accompagnement de l'ADEME, d'assurer la promotion de la géothermie et de conduire des actions visant à son développement.

Le CITEG dispose notamment d'informations pratiques - d'ordre technique, administratif ou financier - sur les moyens de mettre en œuvre cette énergie renouvelable.

ORGANISMES

ARENE Ile-de-France

94 bis, avenue de Suffren
75015 Paris - Tél. : 01 53 85 61 75
Fax : 01 40 65 90 41 - www.arenidf.org
L'Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies d'Ile-de-France a été créée en 1994. Associée au Conseil Régional, sa vocation est d'être un outil au service de la mise en place de politiques de développement durable en Ile-de-France. Elle est fortement impliquée dans les actions de promotion de la géothermie.

DRIRE Ile-de-France

10, rue Crillon
75194 Paris Cedex 4
Tél. : 01 44 59 48 50
Les Directions régionales de l'Industrie, de la recherche et de l'environnement (DRIRE) sont des services extérieurs du ministère chargé de l'Industrie. Leurs différentes missions peuvent se résumer dans l'expression "favoriser le développement industriel et technologique tout en garantissant la sécurité des personnes et la protection de l'environnement".

SAF Environnement (groupe Caisse des dépôts et consignations)

195, boulevard Saint Germain
75007 Paris - Tél. : 01 58 50 76 76
La société auxiliaire de financement (SAF Environnement), mandataire de l'ADEME, intervient dans la gestion du fonds de garantie long terme pour les opérations de géothermie basse énergie et du fonds Aquapac pour les pompes à chaleur sur nappe peu profonde.

AFPAC

22, rue de la Pépinière - 75008 Paris
Fax : 01 45 22 33 55 - www.afpac.org
L'Association française des pompes à chaleur (AFPAC) regroupe les professionnels français de la pompe à chaleur, (fabricants, installateurs, ...). Elle représente la profession auprès des pouvoirs publics.

AGEMO

11, rue de la Gare - 94230 Cachan
Tél. : 01 46 64 53 43
L'Association des Maîtres d'Ouvrage en Géothermie (AGEMO) se bat pour une meilleure prise en compte de la géothermie par les pouvoirs publics.

SOCIÉTÉS D'EXPLOITATION

COFATHEC-Coriance

Immeuble Horizon, 1-10, allée Bienvenue
93885 Noisy-le-Grand Cedex
Tél. : 01 49 14 79 66 - www.cofathec.fr
Cette filiale services de GDF assure la gestion d'un ensemble de 17 réseaux de chaleur et de froid, le suivi de 7 doublets géothermiques, pour l'équivalent de 55 000 logements chauffés en Ile-de-France.

DALKIA

Technopolis 52 - 195, rue J.-J. Rousseau
92130 Issy-les-Moulineaux
Tél. : 01 46 62 72 16 - www.dalkia.com
Pionnier de la géothermie en France, la société Dalkia exploite aujourd'hui 12 réseaux de chaleur urbains en Ile-de-France. Elle est à l'initiative de nombreuses innovations pour l'entretien et la maîtrise des doublets.

ELYO

Le Tivoli, 235, avenue G. Clémenceau BP 4601
92746 Nanterre Cedex - Tél. : 01 41 20 10 00
L'entreprise assure la gestion globale de réseaux locaux d'énergie. Elle propose à des clients très diversifiés un ensemble de solutions innovantes en matière d'environnement.

IDEX

8 bis, rue Escudier - 92513 Boulogne Cedex
Tél 01 47 12 42 12 - index-groupe.com
IDEX assure l'exploitation de deux réseaux géothermiques en Ile-de-France.

SOCGRAM

44-46, allée Léon Gambetta
92112 Clichy Cedex - Tél. : 01 47 56 22 22
La société assure la gestion et l'exploitation de chaufferies urbaines : 22 réseaux de chaleur représentant une puissance de 1 100 MW, soit 6% de la puissance totale installée en France.

BUREAUX D'ÉTUDES SURFACE

SERMET

51 bis, rue du Pont de Créteil
94100 Saint-Maur - Tél. : 01 43 97 93 49
Créé en 1978, ce bureau d'études techniques est spécialisé dans l'ingénierie relative à tous les domaines du génie climatique et de l'énergie. Dans le domaine de la géothermie, SERMET réalise des études de faisabilité, mène la conception et la maîtrise d'œuvre des installations de surface (sept opérations réalisées et nombreuses extensions) et assure le suivi et le contrôle d'exploitation.

BUREAUX D'ÉTUDES SOUS-SOL

CFG (Compagnie Française de Géothermie)

3, avenue Claude Guillemin
BP 6429 - 45060 Orléans Cedex 2
Tél. : 02 38 64 31 22
Filiale à 100% du groupe BRGM et créée en 1985, CFG Services est une société commerciale qui propose ses compétences et ses services pour trois types d'activités : la haute énergie pour la production d'électricité, la basse énergie pour la production de chaleur et l'hydrochimie. Dans le domaine de la haute énergie, la CFG intervient depuis les phases de reconnaissance jusqu'à la mise en exploitation ; parmi ses réalisations récentes : la centrale de 20 MW à Lahendong en Indonésie et celle de Bouillante en Guadeloupe. Pour la basse énergie, la CFG a contribué dans les années 1980 aux études et réalisations visant la mise en exploitation du Dogger : Alfortville, La Courneuve, Meaux, Mios Le Teich, Châteauroux, ... Elle en assure le suivi périodique et la maintenance des équipements de la boucle géothermale.

GPC

14, rue de la Perdrix BP 50030
95946 Roissy CDG Cedex
Tél. : 01 48 63 08 08
Créé en 1989, GPC est un bureau d'études spécialisé en ingénierie et services géothermiques : restauration de puits endommagés, prévention contre la corrosion, protection de l'environnement. GPC assure le suivi géothermique et la maintenance de 19 doublets géothermiques de chauffage urbain en région Ile-de-France.

www.geothermie-perspectives.fr

L'ambition de ce site, associant les compétences de l'**ADEME** et du **BRGM**, est de mettre à la disposition de tous - particuliers, industriels, maîtres d'ouvrage, bureaux d'études - les informations destinées à faire connaître et à développer la géothermie.

Trois types d'informations sont présentés sur ce site :

Le concept scientifique de la géothermie : son histoire, la description des phénomènes thermiques naturels qui font que l'on passe de la chaleur de la Terre à une ressource énergétique, les processus industriels de production d'énergie thermique et électrique.

•
Des informations pratiques - techniques, administratives ou financières - sur les moyens de mettre en œuvre cette énergie.

•
Les enjeux du développement de l'énergie géothermique ou pourquoi faire appel à cette énergie renouvelable ?

Ouverture du Site au début de l'année 2005

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

Direction de la communication,
de la formation
et du développement

2, square La Fayette - BP 90406
49004 Angers Cedex 1

Tél. : 02 41 20 41 20 - Fax : 02 41 20 42 00

Direction des énergies renouvelables,
des réseaux et des marchés énergétiques

Centre de Sophia Antipolis
500, route des Lucioles
06560 Valbonne

Tél. : 04 93 95 79 00 - Fax : 04 93 65 31 96

www.ademe.fr



9 782868 177865

Réf ADEME

5212



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Direction
de la communication
et des éditions

3, avenue Claude Guillemin - BP 6009
45060 Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 30 28 - Fax : 02 38 64 36 82

editions.brgm.fr



9 782715 909526

Réf BRGM

ENJ002

Prix : 9 €