

La géothermie aujourd'hui (2^e partie)

François Audubert et Roland Mahérault, membres de la SAGA.

Dans la première partie de cet article, parue dans Saga Information de septembre dernier, nous avons examiné la géothermie Basse Énergie qui est, en France, pour une grande part, une spécificité de la région parisienne, grâce à l'aquifère du Dogger dans cette zone densément peuplée. La chaleur de cet aquifère peut ici être exploitée directement malgré la nature corrosive du fluide géothermal, grâce à des échangeurs de chaleur.

Nous abordons maintenant d'autres aspects de la géothermie : la géothermie Très Basse Énergie qu'on exploite un peu partout en France et dans le monde, selon des modalités que nous verrons. Puis nous aborderons la Haute Énergie, localisée au contraire dans des zones spécifiques : régions volcaniques, ou régions à gradients thermiques élevés. Cette dernière forme de géothermie est recherchée car elle peut permettre de produire de l'énergie électrique.

5. La nappe historique de l'Albien reprend du service en géothermie

5.1. La nappe de l'Albien

L'Albien est un étage du Crétacé inférieur (de – 108 à – 96 Ma), période où il y a eu transgression générale et sédimentation avec, pour l'Albien, trois niveaux sableux dont les sables verts glauconieux, séparés par des argiles peu épais. Ces couches se trouvent à 600 m de profondeur à Paris où l'épaisseur de l'Albien est voisine de 100 m, dont 60 m de sables. L'Albien constitue un aquifère étendu de 80 000 m². Le réservoir total est estimé entre 400 et 600 milliards de m³ d'eau. Cette nappe est captive en Île-de-France (confinée entre deux couches imperméables) ; la couche inférieure, le mur, est constituée des argiles de la base de l'Aptien, et le toit de l'aquifère est constitué des

argiles noires du Gault. Les géologues ont déterminé que l'aquifère de l'Albien est lié à celui du Néocomien ; celui-ci, constitué surtout de sables, est situé entre 100 et 200 m sous l'Albien. Les deux nappes sont séparées par les argiles et marnes de l'Aptien, semi-perméables. Au point de vue hydrodynamique, le Néocomien contribuerait au maximum pour 25 % à l'alimentation de l'Albien par drainance (7) au travers de ces formations semi-perméables.

« Fontaine, je boirai de ton eau... et t'en prélèverai quelques calories »

L'Albien est très exploité depuis le XIX^e siècle et, en 1930, le prélèvement y atteint 663 millions de m³ ce qui fait que la nappe n'est en général plus artésienne. La baisse du niveau piézométrique (le sommet de la zone saturée en eau de la nappe) fait que le volume des prélèvements a dû être limité à 18 millions de m³ en Île-de-France.

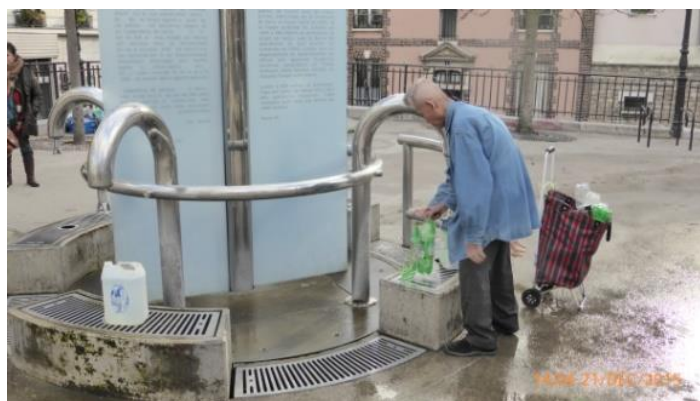


Figure 14. La fontaine de la Butte-aux-Cailles (Paris 13^e) alimente le quartier en eau potable de l'Albien. (Photo F. Audubert). Le puits artésien, creusé à partir de 1863, a alimenté la piscine toute proche en 1924.

Cet aquifère a été retenu en 2003 pour son importance stratégique comme « ressource ultime » : son eau peu minéralisée (sauf dans le secteur de la vallée de la Somme), légèrement ferrugineuse, est utilisée pour l'alimentation. Il existe cinq forages dans Paris permettant d'accéder à cette ressource dont trois qui alimentent des fontaines publiques (figure 14).

L'utilisation industrielle de cette eau est soumise à autorisation dès le seuil de 8 m³/heure. Cependant, des autorisations de forages ont été données à partir des années 1960 et, malgré la température peu élevée de son eau, 27-28 °C, cet aquifère est utilisé pour le chauffage géothermique sous réserve de réinjecter l'eau refroidie et de respecter sa qualité. Plusieurs nouveaux quartiers en création ont fait le choix de cet aquifère pour des raisons économiques. Il est en effet important de ce point de vue de bien mettre en adéquation la source de chaleur avec l'importance du réseau de chauffage envisagé et, lorsque les demandes d'énergie ne justifient pas l'utilisation du Dogger, on préfère une solution moins coûteuse à mettre en œuvre. Ceci est le cas pour deux réseaux de chaleur, l'un édifié en 2013 à Issy-les-Moulineaux, l'autre à Clichy-Batignolles, à Paris (17°) en cours d'installation.

Comme nous le verrons plus loin, l'utilisation de la nappe de l'Albien à la Maison de la Radio a été repensée à l'occasion de la réhabilitation du bâtiment en 2014.

5.2. La très basse énergie et les pompes à chaleur

Avec l'Albien, ou avec des sources de chaleur à des températures analogues ou plus basses, l'alimentation directe des réseaux de chaleur n'est pas possible. Il est nécessaire d'élever la température de l'eau grâce à des pompes à chaleur.

5-2-1. Les pompes à chaleur (PAC)

Les pompes à chaleur (PAC) sont des machines thermodynamiques capables de prélever des calories à une source froide, le milieu naturel, pour les transférer à une source chaude, l'élément à chauffer, par exemple l'eau d'une sous-station d'un réseau de chaleur.

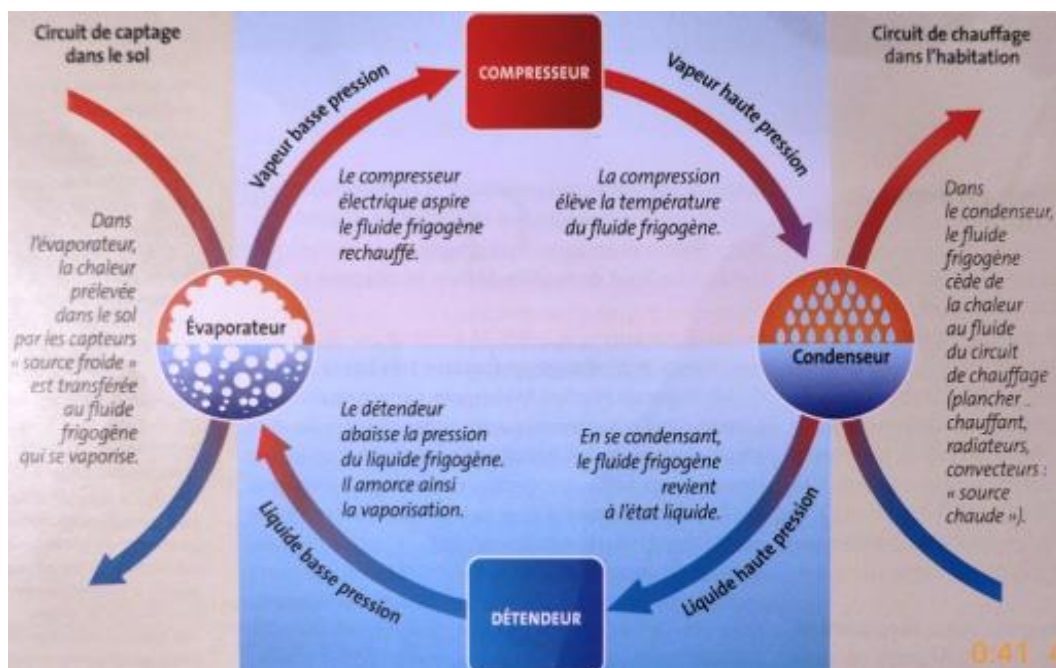


Figure 15. Schéma du fonctionnement d'une pompe à chaleur à compression (document BRGM).

Les plus utilisées sont les PAC à compression ; elles sont constituées d'un circuit fermé et étanche dans lequel circule un liquide dit frigorigène qui va récupérer les calories de la source froide. Ce liquide est choisi pour sa basse température d'ébullition. L'eau géothermale de la source froide lui transmet ses calories ce qui provoque sa vaporisation (figure 15).

La vapeur est alors comprimée dans un compresseur alimenté par un moteur électrique, ce qui augmente sa température, puis est dirigée vers le condenseur où elle restitue sa chaleur latente de condensation, chaleur qui peut être captée pour chauffer le circuit d'eau. La température du fluide frigorigène s'abaisse alors fortement ; il passe finalement dans le quatrième organe, le détendeur, qui provoque la diminution de sa pression, puis il rejoint l'évaporateur pour recommencer un cycle, à partir de la vapeur produite, en réabsorbant de la chaleur. Au total, il y a eu transfert de calories de la source froide vers la source chaude avec un apport d'énergie externe limité.

On définit le coefficient de performance, ou COP, de la machine par le rapport de l'énergie restituée à l'énergie fournie ; il est couramment voisin de 4. Le fluide frigorigène le plus utilisé pour la géothermie est le R-134a ou 1,1,1,2 tétrafluoroéthane, qui n'a pas d'impact sur la couche d'ozone et en cela diffère des CFC qui contiennent du chlore, mais qui malheureusement peut contribuer à l'effet de serre. Son utilisation impose donc des circuits parfaitement étanches et la vérification minutieuse et régulière des installations pour détecter toute fuite.

Des recherches se poursuivent pour trouver d'autres fluides frigorigènes.

Les pompes à chaleur réversibles produisent de la chaleur ou du froid, selon la saison et les besoins. Pour produire du froid il suffit d'inverser le sens de l'écoulement du fluide à l'aide de vannes : la chaleur est prélevée dans l'enceinte à refroidir, dirigée vers l'évaporateur, la vapeur produite est dirigée vers le compresseur qui provoque sa condensation en produisant de la chaleur qui sera évacuée à l'extérieur. Le liquide passe dans le détendeur et se vaporise ensuite sous l'effet de la chaleur prélevée, et le cycle se répète. Ce système est analogue à celui qui a lieu dans un réfrigérateur.

5-2-2. Les réalisations et les projets sur l'Albien

À Paris, la nappe de l'Albien a été utilisée, outre pour le chauffage de la Maison de la Radio, à la tour Mirabeau, quai de Javel (Paris 15°), qui abritait les AGF, où un doublet était installé pour une eau ayant initialement un débit de 120 m³/heure ; des expériences de stockage de la chaleur excédentaire d'été y ont été réalisées.

Actuellement, deux sites utilisent cette nappe à Paris ou dans la banlieue immédiate, l'éco-quartier (8) d'Issy-les-Moulineaux (92), et l'éco-quartier de Clichy-Batignolles. D'autres projets sont à l'étude. Dans ces éco-quartiers, l'isolation thermique des bâtiments est primordiale également.

• L'éco-quartier du fort d'Issy-les-Moulineaux

L'ancien fort désaffecté d'Issy a été utilisé pour construire des immeubles d'habitation, écoles, commerces, piscine chauffée, grâce à deux puits de géothermie creusés à 650 m, qui assurent 70 % des besoins énergétiques en chauffage et eau chaude pour 1 623 logements depuis 2013, évitant l'émission de 200 tonnes de CO₂ par an.

C'est la première fois qu'un réseau de chaleur est alimenté à partir de l'Albien, et en doublet, car précédemment cette nappe n'était utilisée que pour des bâtiments individuels. L'eau est puisée à l'aide d'une pompe placée à 120 m de profondeur, avec un débit maximum de 200 m³/heure ; elle est réinjectée à 16 °C.

La centrale comprend deux pompes à chaleur, une pour le chauffage amenant la température de l'eau à 45 °C, l'autre pour l'eau chaude sanitaire à 60 °C. La température à l'intérieur des appartements est fixée à 18 °C. Il y a 15 à 18 sous-stations, une dans les principaux bâtiments dont les deux groupes scolaires et la piscine. Le froid n'est produit que pour la piscine quand il y en a besoin.

• L'éco-quartier de Clichy-Batignolles (Paris 17°)

Situé près d'un nœud ferroviaire, ce quartier en grande partie déjà construit, accueille depuis 2007 des immeubles d'habitation pour 7 500 habitants, 140 000 m² de bureaux, 31 000 m² de commerces, équipements culturels et de loisirs, 38 000 m² d'équipements publics, et le futur Palais de Justice de Paris. Il doit être achevé en 2019.

Les besoins énergétiques du bâtiment sont couverts en grande partie par des énergies renouvelables grâce à deux puits de géothermie réalisés par Eau de Paris. La centrale comporte trois pompes à chaleur amenant la température de l'eau à 45 ou 65 °C. Ce système doit alimenter le réseau de chaleur et couvrir 80 % des besoins de chaleur de ce quartier. Une économie de 3 500 tonnes de CO₂ sera ainsi faite en dix ans. Un complément de chaleur est fourni en cas de besoin par le Réseau de Chauffage Urbain Général de Paris.

Une deuxième compagnie, la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain, prend en charge le chauffage des bâtiments à partir de l'échangeur de chaleur situé au niveau du local technique de réinjection. Le reste des énergies renouvelables sera réalisé grâce à 35 000 m² de panneaux d'électricité photovoltaïque qui produisent environ 4 000 Mwh/an. De plus, la création de ce nouveau quartier fournit un accès supplémentaire à la nappe stratégique de l'Albien dans le nord de Paris.

• Le futur réseau de chaleur de l'Université Paris-Saclay

Sur le plateau de Saclay, l'université Paris-Saclay doit s'étendre sur 174 ha. L'achèvement de 2 100 logements étudiants et 2 400 logements familiaux, actuellement en construction, est prévue pour 2022. Pour assurer le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la climatisation, quatre forages (deux doublets) sont prévus dans l'Albien, accompagnés de deux centrales thermiques, 14 km de réseau chaleur et froid, ainsi que 55 sous-stations. L'eau à 27 °C sera portée à 55 °C par des PAC. Le rejet de 6 100 tonnes de CO₂ sera évité. Il y aura également une chaudière à gaz et deux chaufferies d'appoint. Il est prévu également de récupérer la chaleur des grands équipements de recherche du site.

5.3. Réalisations utilisant d'autres nappes, et divers aspects de la très basse énergie

5.3.1. La Maison de la Radio, de l'Albien à la nappe de la craie

La décision de construire ce bâtiment circulaire célèbre a été prise en 1953 ; la première pierre a été posée par le Président René Coty, en 1954, et le

bâtiment inauguré en 1963 par le général De Gaulle. Par un choix pionnier à l'époque, un forage a été effectué en 1956 pour atteindre la nappe de l'Albien pour le chauffage du bâtiment. L'eau pompée à 27 °C était rejetée dans les égouts contre une redevance sur l'assainissement des eaux qui contenaient surtout des boues.

Lors de la réfection du bâtiment, à partir de 2005, le système de chauffage a été repensé : d'une part la crépine du forage était très dégradée, d'où des risques de remontée de sable, d'autre part un forage profond à cet endroit où la place est de plus en plus réduite pose des problèmes et il aurait fallu faire cette fois deux forages pour satisfaire à l'exigence du doublet. Ceci aurait été possible mais difficile, et le projet a été redimensionné ; il a été décidé d'aller chercher de l'eau moins chaude qui pourrait néanmoins suffire à la climatisation de l'immeuble. On s'est adressé à la nappe de la craie du Sénonien présente à faible profondeur sous le bâtiment. À cet endroit, les eaux de la partie supérieure de la craie sont en équilibre avec celles des alluvions de la Seine, formant une même nappe (figure 16).

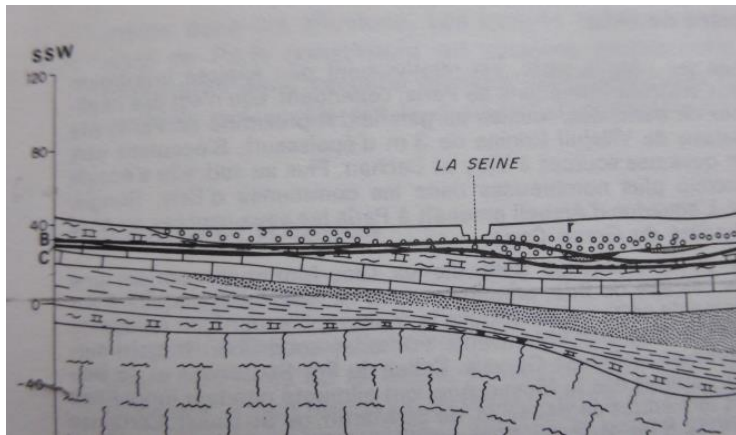


Figure 16. Position des nappes phréatiques à Paris à l'aplomb de la Maison de la Radio. De bas en haut : craie du Sénonien, marnes du Montien, argiles et sables de l'Yprésien, calcaire grossier, Marnes et caillasses, alluvions. B : niveau de la nappe phréatique générale. C : niveau de la nappe des sables Yprésiens. (D'après P. Diffre et C. Pomerol, Guides géologiques régionaux, Paris et environs).

L'eau de la nappe à 15 °C est pompée à 40 m de profondeur. La récupération et l'évacuation des calories passent par deux échangeurs, en acier inox spécial, dédiés à l'une ou à l'autre de ces opérations.

Après son passage par l'échangeur de récupération, l'eau du circuit secondaire est dirigée vers de puissantes pompes à chaleur de 1,25 MW (figure 17) dont on utilise à la fois la production de chaud et de froid par un double réseau (raccord chaud et raccord froid) dirigé vers les utilisateurs du bâtiment.

Ce dispositif qui permet d'utiliser toute l'énergie produite par les PAC fait que la COP est élevée, de 4 à 4,5.



Figure 17. Pompes à chaleur de la centrale géothermique de la Maison de la Radio (photo F. Audubert).

De l'eau à 40 °C est produite et dirigée vers le raccord chaud, alors que, dans le circuit de refroidissement, la température est abaissée à 5-6 °C. L'eau est rejetée dans la Seine après son passage par l'échangeur d'évacuation qui abaisse (« dégrade ») sa température à 28 °C (maximum autorisée pour le rejet).

Ce système permet de rafraîchir le bâtiment en été par une baisse de température de 3 à 4 °C qui suffit la plupart du temps pour procurer une température agréable dans les 1 000 bureaux et les 61 studios d'enregistrement.

La nappe de la craie semble avoir été un bon choix pour plusieurs raisons : d'abord elle est encore peu exploitée ; ce choix n'a nécessité que trois forages légers à faible profondeur ; l'eau qui est à pH7 n'est pas agressive et n'engendre pas de corrosion car elle ne contient pas de polluants.

5-3-2. La géothermie très basse énergie : maisons individuelles et bâtiments de type tertiaire (administrations, commerces...)

La géothermie très basse énergie peut être utilisée à peu près partout en prélevant des calories soit dans des nappes souterraines superficielles, soit dans le sol, en s'aidant de PAC géothermiques. Il faut là encore, pour qu'une exploitation soit réussie et rentable, que les besoins réels en énergie soient bien étudiés.

L'investissement le plus important réside dans les forages. Dans certaines de ces installations, on pratique à la belle saison le « freecooling », ou « refroidissement passif », qui permet de refroidir

presque gratuitement le bâtiment à partir du sol, les PAC étant éteintes.

Les durées de récupération de l'investissement peuvent aller jusqu'à 10 ans, mais les installations permettent ensuite une économie de 30 à 50 % par rapport à une énergie gaz.

Différents systèmes sont utilisés dans la géothermie de très basse énergie que nous allons détailler.

• **Les PAC géothermiques sur aquifères superficiels**

Il existe de nombreuses nappes dans toutes les régions françaises, notamment en Île-de-France, en Rhône-Alpes, en Alsace avec la très importante nappe alluviale du Rhin à forte perméabilité. Les forages font quelques dizaines de mètres de profondeur pour atteindre les nappes qu'on utilise à une température supérieure à 10 °C. Les débits des eaux souterraines sont de quelques dizaines de m³/h. On estime que 10 kW peuvent être générés par un débit d'eau de 1 m³/h.

C'est souvent à l'occasion de rénovations de bâtiment que les anciens chauffages sont remplacés par des chauffages avec PAC sur aquifères fonctionnant en doublets. Nous en avons vu un exemple de réalisation avec la Maison de la Radio ; en voici quelques autres :

- le Collège des Bernardins, à Paris, ancien couvent du XIII^e siècle qui a été réhabilité en 2005. La climatisation utilise la nappe de l'Yprésien (Éocène inférieur) à 40 m de profondeur avec un débit de 60 m³/h. Deux PAC réversibles sont utilisées, ainsi qu'un double échangeur à plaques ;
- la Halle aux grains, à Blois : elle a été rénovée en 1985 pour en faire le Centre de Culture et de Congrès de la ville. La nappe de la craie est utilisée à 70 m de profondeur, à 13 °C. Une PAC de 440 kW est utilisée pour le chauffage et le rafraîchissement de 4 900 m² ;
- le Centre Hospitalier d'Évreux (27) : 90 % des besoins énergétiques du bâtiment (25 000 m²) sont assurés par cette technique ;
- les opérations à Lyon ; la Mairie du 8^e arrondissement : le rafraîchissement du bâtiment est assuré de mai à octobre par la nappe des alluvions du Rhône (débit du forage 40 m³/h) ; la Caisse d'Allocations Familiales : le bâtiment est équipé de 2 PAC réversibles de 600 kW pour climatiser une surface de 17 000 m² ; le Théâtre des Célestins, équipé pour 15 000 m² chauffés et 3 500 m² rafraîchis ;
- le Siège social de la Fédération du BTP à Valence (26). 1 740 m² de plancher sont climatisés à l'aide d'une nappe forée à 46 m ;
- à Strasbourg, le Conseil de l'Europe est chauffé sur la nappe alluviale du Rhin prélevée à 75 m de profondeur. Le débit du forage est de 800 m³/h. Le système

fournit 8 MW. Le Palais des Congrès, ainsi que la Préfecture, sont également chauffés sur nappe ;

- le Data Center de Grenoble utilise une nappe à 13,5 °C pour maintenir la température des installations entre 19 et 21 °C. On estime qu'un Data Center de 10 000 m² nécessite une puissance électrique de 20 MW et qu'il consomme autant qu'une ville de 20 000 habitants ;
- l'éco-quartier de la ZAC Seguin, à Boulogne-Billancourt, qui doit s'achever en 2018 ; la réhabilitation d'un Centre socio-culturel, à Rueil-Malmaison ; l'éco-quartier du Centre Sainte-Geneviève de Nanterre ; le Centre du costume de scène, à Moulins ; l'École de musique du château de Fontainebleau, pour n'en citer que quelques-unes, sont équipées de ce type d'installations.

• **Les sondes terrestres**

En Europe, la température du sol est à peu près constante (à environ 12 °C) au-dessous de 10 m de profondeur.

a. Les sondes enterrées

Pour les pavillons individuels on peut procéder à un captage vertical de la chaleur par sondes enterrées à une profondeur de 30 à 200 m, dans lesquelles un fluide caloporteur, constitué d'eau et d'un liquide antigel comme le monopropylène glycol, transmet les calories vers des PAC. La chaleur est dirigée vers un plancher chauffant et vers des radiateurs. Le captage s'effectue par l'intermédiaire d'un ou plusieurs tubes en U en polyéthylène, introduit dans le forage. Il y a deux circuits de fluides indépendants : le réseau fermé enterré avec un tube très fin et long dans lequel circule, à l'aide d'une pompe, le fluide de transfert caloporteur, et un deuxième circuit qui relie la PAC au système de chauffage. Ces sondes sont réversibles ce qui peut permettre de recharger le sol en calories.

Exemples de réalisations : les bâtiments administratifs de la Communauté d'Agglomération Creilloise (60), soit 2 000 m² de bâtiments pour une consommation de 44 000 kWh/an ; l'Hôtel de ville de Beaumont (63), avec onze sondes en double U installées à 100 m de profondeur.

Remarques : le captage, dit horizontal, qui consiste à entreposer des capteurs à une profondeur de 50 cm à un mètre dans le sol sur une grande surface, ne relève pas véritablement de la géothermie puisque la température près de la surface du sol dépend surtout des intempéries plutôt que de la température fournie par la terre elle-même.

Depuis 2008, les clients se sont tournés plutôt vers des PAC aérothermiques dans lesquelles la chaleur est prélevée dans l'air. Elles fonctionnent mal lorsque la

température est trop basse mais elles sont moins chères que les sondes géothermiques.

*b. Les pieux de fondation
(ou fondations thermoactives,
ou béton thermoactif)*

Lorsque des bâtiments nécessitent la pose de poteaux de soutènement en béton de plus de 10 m de longueur pour asseoir leur stabilité dans un sol meuble, on utilise ces pieux pour les équiper de capteurs de calories à partir du sol. Lors de la fabrication des piliers, on introduit un réseau de tubes en polyéthylène dans lequel circule en circuit fermé le liquide caloporteur (circuit primaire). Ce dispositif permet d'éviter des travaux de forage ou d'installer des structures en béton supplémentaires. L'investissement peut être amorti en deux ans seulement.

En France, cette technique a été utilisée assez tardivement par rapport à d'autres pays où elle a eu une pénétration très forte ; la Cité du Design, à Saint-Étienne (42), a été le premier bâtiment du pays utilisant, en 2009, cette technique à grande échelle : 120 pieux géothermiques de 10 à 30 m, 10 sondes verticales de 150 m, ainsi qu'un puits canadien (9) ont été utilisés pour le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment sur 7 000 m².

Voici quelques autres réalisations utilisant ce procédé : le nouveau Quartier des Confluences, à Lyon, utilise à la fois ces pieux et des PAC sur aquifère ; la résidence Saint-Georges, à Limay (à proximité de Mantes, 78), pour 23 logements sociaux.

Ailleurs en Europe, on doit signaler l'aérogare de l'aéroport de Zurich en Suisse : le sous-sol est formé par d'anciens fonds lacustres sur une moraine. 306 gros pieux énergétiques de fondation de 27 m de long avec cinq tubes en U ont été utilisés. Le chauffage s'effectue en grande partie par PAC couplées sur les pieux. La puissance est de 630 kW, l'énergie annuelle de chauffage est de 2 300 MWh/an. L'université de Cambridge (GB) et celle de Vienne (Autriche) bénéficient également de ce système.

La géothermie très basse température a connu un grand essor aux USA, en Chine et au Japon ; en Europe également avec la Suède, l'Allemagne, la Norvège, la Finlande, l'Autriche et la Suisse, pays qui ne disposent pas en général de grands bassins sédimentaires à aquifères profonds ou de géothermie haute énergie. La Suède notamment avait, en 2013, une puissance installée deux fois plus importante que celle de la France. Le marché français des PAC géothermiques a presque doublé, entre 2002 et 2008, avec 22 000 installations.

À partir de 2009, la très forte baisse de 80 % est attribuée surtout à la baisse de plus de 50 % du taux de crédit d'impôts sur les PAC géothermiques et à la

Les échangeurs de chaleur

Les échangeurs thermiques, éléments importants d'une installation géothermique, sont placés à l'interface du circuit géothermal (primaire) qui cède ses calories, et du circuit géothermique (secondaire) qui achemine les calories dans le réseau de distribution.

Les échangeurs à plaques permettent d'obtenir la plus grande efficacité dans la récupération des calories. Ils sont constitués de fines plaques métalliques en acier inox (cas des échangeurs de la Maison de la Radio dont l'un d'eux est montré sur la photo ci-dessous), ou en titane, plus résistant aux fluides agressifs. Ils offrent une grande surface d'échange. Les espaces entre les plaques sont raccordés alternativement au circuit géothermal ou au circuit géothermique.



Le dispositif est conçu de manière à ce que les deux fluides ne se mélangent pas (joints étanches) et que la perte de chaleur après échange soit la plus faible possible. On appelle cette perte « pincement » et on fait en sorte qu'elle ne soit pas supérieure à 2 °C.

baisse des constructions neuves, ainsi qu'à la crise économique en général. Et on observe actuellement que ces installations ne sont plus guère utilisées que pour les bâtiments importants tels ceux de l'habitat collectif ou des bâtiments culturels et administratifs.

6. L'utilisation d'autres aquifères profonds pour la géothermie basse énergie dans le Bassin parisien. Les essais, les projets.

Devant l'afflux des opérations de géothermie sur le Dogger, cette nappe va arriver à certains endroits à saturation et donc se refroidir inexorablement. Les pouvoirs publics, les géologues et les opérateurs ont été conduits à prendre en considération d'autres aquifères profonds souvent incomplètement connus qui, bien qu'ayant des caractéristiques moins intéres-

santes que le Dogger, pourraient être utilisables ou utilisées davantage. Trois grandes formations géologiques autres que le Dogger contiennent des aquifères étendus qui peuvent fournir de l'eau à une température supérieure à 30 °C.

• **Le Néocomien**

Étage constitué de niveaux sableux et calcaires. L'eau de l'aquifère est un peu plus salée que celle de l'Albien et sa température est de 30 à 40 °C. La production la plus intéressante de cette nappe est située à l'ouest de la Seine et du Loing, au nord-est du Loiret, dans le Gâtinais, dans l'Essonne et les Yvelines.

Des opérations ont eu lieu à Thiverval-Grignon (78), et à Bruyères-le-Châtel (91), en 1982, pour le chauffage des bâtiments du CEA, exploitation en puits unique à 34 °C, 0,4g/l de sel, avec un débit de l'ordre de 140 m³/h.

Récemment, une opération de géothermie avec deux forages à 1 000 m a permis de mettre en place un réseau de chaleur au Plessis-Robinson (92), en 2013, avec le soutien de l'ADEME au titre du Fonds Chaleur pour le caractère innovant et la valorisation de la ressource Néocomien. Certaines difficultés de captage sont apparues du fait de la présence de couches argilo-sableuses et il a fallu clarifier l'eau par filtration. C'est le premier doublet géothermique qui exploite cette nappe stratégique comme l'est celle de l'Albien ; il chauffe 3 500 logements à l'aide de deux PAC de 3,4 MW chacune. Ce réseau évite le rejet de 6 000 tonnes de CO₂ par an.

• **Le Lusitanien**

C'est une formation du Jurassique supérieur de l'Oxfordien moyen et supérieur. En Île-de-France, ce réservoir est constitué surtout de calcaire oolithique caractéristique d'un dépôt de type plate-forme récifale d'une mer chaude peu profonde, ou de calcaires craeux ; il est limité par des dépôts marneux.

Les caractéristiques de cet aquifère sont encore mal connues. Il est à 900 m de profondeur, sa température est au plus de 64 °C (42 °C au forage d'Achères, Yvelines) ; son épaisseur est de 100 à 150 m à Paris, sa salinité est variable, de 2 à 12 g/l. Deux zones potentiellement utilisables pour la géothermie ont été détectées : au nord-est de Paris, autour de Meaux, et à l'ouest de la Seine-et-Marne. Des tests de productivité ont été effectués à l'occasion des forages au Dogger d'Orly et de Vigneux-sur-Seine, en 2006 ; un débit de 60 m³/h y a été mesuré. D'autres forages à Ivry-sur-Seine ont donné une épaisseur des niveaux poreux de 15 à 50 m et des débits de 100 à 200 m³/h, avec une salinité de 6 à 12 g/l. Des modèles géologiques en trois dimensions sont également utilisés pour préciser l'exploitabilité de cet aquifère.

• **Le Trias**

Dans le Bassin parisien, les aquifères du Trias se situent sous l'Île-de-France, l'Orléanais et le Berry. Les formations dans lesquelles ils se trouvent sont de type détritique, réparties sur trois niveaux inégaux de grès et de sables séparés par des niveaux argileux. Lors de forages pétroliers, en 1979, des mesures ont été effectuées, des températures de 100 °C ont été mesurées dans le Trias inférieur de la Brie centrale et en Sologne.

Deux zones profondes ont été l'objet d'investigations : l'Orléanais, avec le forage de Melleray, dans le Trias supérieur, où le forage a donné les caractéristiques suivantes : 150 m³/h, 74 °C à – 1 600 m, et 33g/l de sel. La difficulté de la réinjection de l'eau dans les formations argilo-sableuses qui nécessitait des puissances élevées a conduit à l'abandon de la production après un an de fonctionnement du doublet.

En région parisienne, un forage à Cergy (95) a donné 47 m³/h, 77 °C à – 1 900 m et 95g/l de sel, et un autre forage, à Achères (78), a donné des caractéristiques similaires avec un débit de 118 m³/h. La difficulté de réinjection a conduit à un repli des opérations sur le Dogger.

Finalement, la seule exploitation encore en fonctionnement se situe sur le flanc sud du Bassin parisien, à Châteauroux, sur le Trias supérieur, où le forage a donné les caractéristiques suivantes : 100 m³/h, 32 °C à – 500 m, salinité de 0,49 g/l. L'ensemble fonctionne avec quatre PAC de 350 kW pour assurer le chauffage de 1 300 logements.

Le BRGM a lancé, en 2009, le projet CLASTIC-2 de modélisation 3D pour le Trias, dans un périmètre Paris-Sens-Épernay-Reims, afin d'améliorer la connaissance de ces réservoirs profonds.

7- Aperçu sur la géothermie en Aquitaine

Le Bassin aquitain est le deuxième bassin sédimentaire de France par sa superficie. Il compte près de 20 % des opérations de géothermie basse énergie du pays. Les terrains de cette région comportent de nombreuses failles dont la grande faille de Bordeaux (figure 18, page 14) ; les réservoirs sont discontinus et de nature complexe.

L'accumulation de sédiments augmente de 2 000 m en Gironde à 4 000 m dans les Landes, et elle atteint plus de 8 000 m au pied des Pyrénées dans le bassin subsident de l'Adour. Des forages pétroliers ont eu lieu, au début des années 1960, surtout dans la zone des bassins profonds, qui ont contribué à rendre compte de la complexité du sous-sol. Certains de ces puits pétroliers pourraient d'ailleurs être réhabilités pour exploitation géothermique.

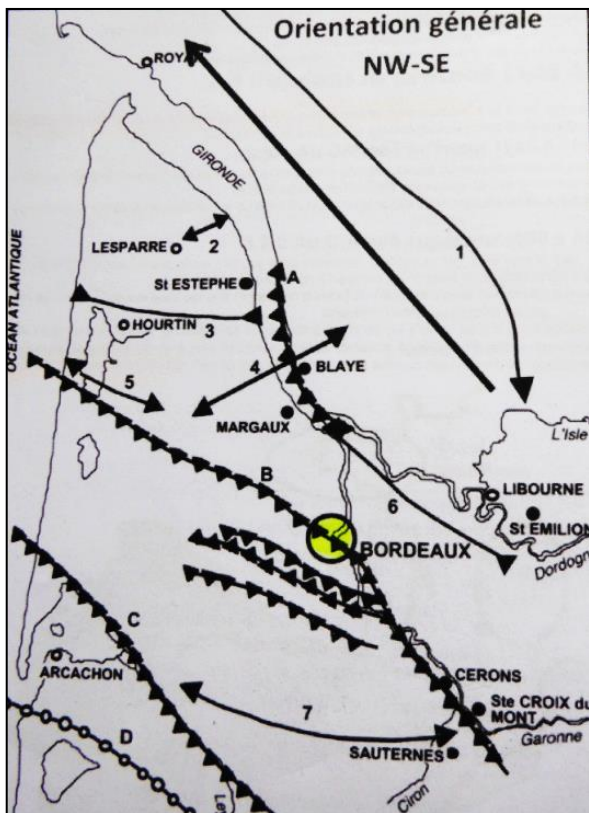


Figure 18. Schéma des structures géologiques profondes de la Gironde. (SIGES Aquitaine-BRGM). A : faille de l'estuaire. B : faille de Bordeaux. C : faille de la Leyre. D : flexure celtaquitaine. De 1 à 7 : anticlinaux <->, et synclinaux >-<.

Plusieurs forages géothermiques ont été réalisés depuis plus d'une trentaine d'années, surtout entre Arcachon et Dax, et autour de Bordeaux. Dans des départements périphériques, la géothermie est exploitée pour chauffer quelques piscicultures, serres agricoles ou piscines (figure 19).

D'une manière générale, les aquifères ayant des eaux exploitables en géothermie sont nombreux en Aquitaine, de l'Éocène au Trias, mais ils sont moins étendus et moins réguliers que ceux du Bassin parisien, et leurs caractéristiques en vue d'une exploitation géothermique sont encore souvent insuffisamment connues. Les forages fonctionnent pratiquement tous en puits unique compte tenu de leur faible teneur en sel et de l'absence de réglementation sur ce point à l'époque où ils ont été créés. Le seul doublet a été celui de Bègles, foré dans l'Éocène, destiné au chauffage de locaux industriels, et aujourd'hui arrêté.

Des forages géothermiques dans la nappe sableuse de l'Éocène ont eu lieu à Blagnac (31), Nogaro et Lamazère (32), ainsi qu'à Hagetmau (40), donnant des eaux à 50 à 60 °C. À Tarbes, un forage a atteint la nappe de l'Éocène à 1 800 m de profondeur, en 1978, donnant une température de 42 °C ; la productivité étant jugée trop faible, ce puits a été abandonné.



Figure 19. Carte des exploitations géothermiques en Aquitaine (document ADEME/AGÉMO).

Le Crétacé supérieur recèle des aquifères dans les formations carbonatées parfois gréseuses du Sénonien et de la base du Turonien, sur une grande partie du bassin notamment dans la région bordelaise. La température des aquifères varie de 44 à 56 °C et la concentration saline de 0,36 à 0,65 g/l aux puits de Bordeaux-Mérignac et Bordeaux-Mériadeck (débits de 150 à 200 m³/h). Ces formations sont également exploitées vers le sud-ouest où elles sont calcaires et dolomitiques.

À Dax, un forage effectué, en 1978, à 2 300 m dans le Cénomanien (dolomie karstique) a donné 150 m³/h, à 56 °C ; il a été utilisé pour le chauffage, pour des serres agricoles et pour une piscine.

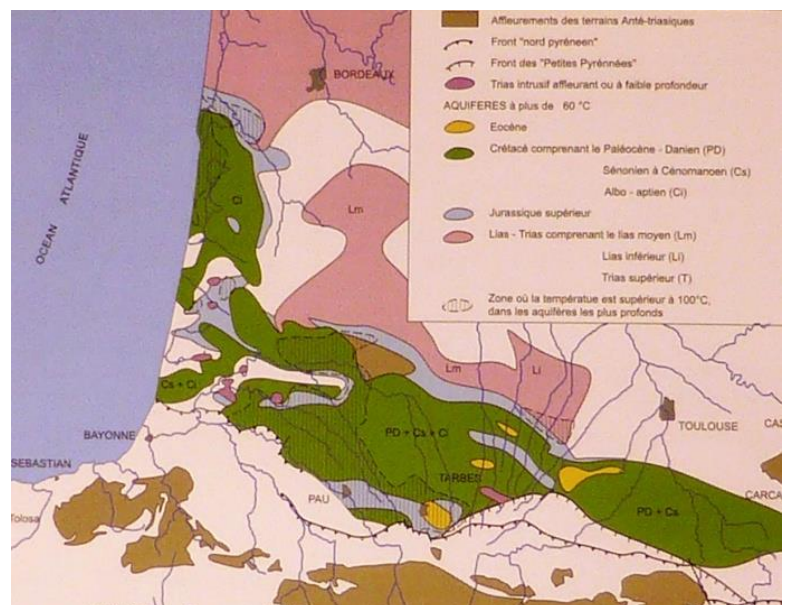


Figure 20. Aquifères à plus de 60 °C dans le Bassin aquitain. En vert (sombre), le Crétacé. (BRGM/SNEA, 1976).

À Mont-de-Marsan, un premier forage, en 1975, a permis d'alimenter en chaleur la base aérienne, une Résidence, et l'Hôpital Sainte-Anne ; en 1981, un deuxième forage a alimenté la caserne Maridor jusqu'en 2006. En 2007, l'exploitation est passée en Régie Municipale et, en 2011, il a été décidé une extension du réseau de chaleur à l'éco-quartier de Peyronat pour 451 logements et des serres agricoles. Des travaux ont eu lieu en 2012-2013 dont le forage d'un puits de réinjection pour satisfaire aux nouvelles normes. Cependant la situation reste confuse, une partie des travaux est remise en cause, les aides financières prévues n'étant pas au rendez-vous (figure 20).

Le Crétacé inférieur possède deux secteurs dits à fort potentiel : le bassin de Parentis (40) d'une part, et le bassin de l'Adour (64) où se trouve un réservoir de calcaires dolomitiques fracturés et récifaux dans la région de Lacq, dont la température est de 70 à 100 °C.

Dans la zone comprise entre Parentis et l'Adour, il y a également un réservoir de « dolomie de Mano » du Jurassique supérieur (Portlandien-Kimméridgien) exploité à partir d'un ancien puits de pétrole à Mios-le-Teich, dans le bassin d'Arcachon (74 °C, 200 m³/h, 3,7g/l), pour une pisciculture.

La Communauté Urbaine de Bordeaux reste naturellement la plus grosse cible des études géothermiques actuelles. Pour le moment, les seuls aquifères qui intéressent la géothermie par leur épaisseur et leur température sont ceux du Cénomaniens-Turonien (calcaires, grès et sables à une profondeur moyenne de 1 600 m), qui couvrent presque tout le département de la Gironde. Ils fournissent 80 % de la production géothermique de l'agglomération. Cependant la température de l'eau d'environ 50 °C limite son utilisation pour des réseaux de chaleur par échange direct, nécessitant l'utilisation de PAC.

Des projets sont à l'étude pour rechercher des aquifères de température plus élevée, susceptibles d'être exploités en usage direct. L'un d'eux vise l'aquifère du Jurassique (de l'Oxfordien inférieur au Sinémurien supérieur) qui renferme des formations calcaires dites « à filaments » car contenant des bioclastes recristallisés ayant l'aspect de filaments.

Des tests hydrauliques réalisés lors de forages anciens autour de Bordeaux avaient mis en évidence la fonction aquifère de cette formation ; sa température serait du même ordre que celle du Dogger d'Île-de-France mais ses caractéristiques sous la ville même de Bordeaux (perméabilité, épaisseur, position de failles, etc.) ne sont pas connues.

Un forage expérimental de prospection et d'exploration est donc envisagé afin de déterminer si une exploitation géothermique, rentable économiquement, est possible à partir de cet aquifère. Ce projet fait partie du Plan Climat Aquitaine dont l'objectif est de

valoriser les possibilités locales en développant notamment de nouveaux sites.

8- Ressources géothermiques haute énergie

Ces ressources haute énergie sont localisées essentiellement dans les zones d'activité volcanique, comme le site de Bouillante, en Guadeloupe, ou d'origine tectonique, comme le site de Soultz-sous-Forêts, dans le Bas-Rhin, présentant une anomalie thermique.

La centrale de Bouillante

Ce premier site se situe dans l'île de la Guadeloupe, sur la côte ouest de Basse-Terre (figure 21).

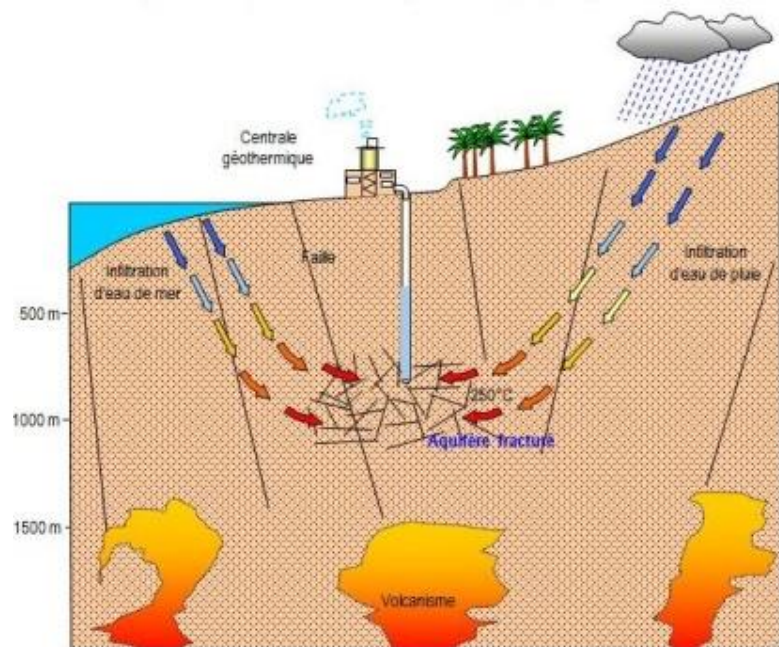


Figure 21. Champ géothermique de Bouillante, en Guadeloupe (BRGM).

En 1985, c'est le premier site français producteur d'électricité à partir de la géothermie. Depuis 1969, sept puits producteurs ont été forés : quatre puits verticaux et trois puits inclinés avec déviation. Seuls, un puits vertical et deux puits inclinés se sont révélés productifs. Le réservoir géothermique de haute température (250 °C), situé à quelque 1 000 m de profondeur, est alimenté par de l'eau météorique et de l'eau de mer.

L'ancien système volcanique de la chaîne de Bouillante est à l'origine de la source de chaleur de ce réservoir. Pour actionner les turbines couplées aux générateurs électriques, cette eau partiellement vaporisée lors de sa remontée vers la surface doit être séparée en deux phases : avant l'admission en turbine,

la phase vapeur doit être « séchée » (séparée de la phase liquide). La phase liquide est en partie réinjectée dans le réservoir afin de préserver la ressource.

À ce jour, deux unités d'une puissance d'environ 15 MW couvrent environ 8 % des besoins de la Guadeloupe. Une troisième unité exploitant un réservoir géothermique situé en bordure de la baie de Bouillante permettrait d'accroître très sensiblement la production de la centrale. Ce projet nécessite un investissement financier considérable. Or, entre le BRGM et EDF, détenteurs à l'origine de la filiale Géothermie Bouillante (respectivement 97,8 % et 2,2 %), de profonds désaccords se sont révélés qui ont conduit EDF à se désengager en 2013 des projets en cours.

Dans un rapport paru en avril 2015, la Cour des comptes constate la non rentabilité de l'usine : les coûts réels de production dus à des difficultés techniques et sociales, aux faibles durées de fonctionnement, ont toujours été supérieurs au prix de rachat de l'électricité par EDF, nécessitant des refinancements permanents. Elle préconise l'ouverture du capital de la filiale à des investisseurs privés. Affaire à suivre !

Il n'en demeure pas moins que la production d'électricité d'origine géothermique profonde reste primordiale dans cette région des Antilles : le contexte géologique de cet arc insulaire est propice à l'exploitation de ressources géothermiques à haute énergie.



Figure 22. Projet d'alimentation d'origine géothermique par câbles sous-marins, dans les Petites Antilles.

Ainsi, le projet « Géothermie Caraïbe », initié en 2008 par l'ADEME, le BRGM, l'AFD (Aide Française de Développement) et l'Europe, a pour objectif de couvrir l'intégralité des besoins électriques de La

Dominique dont le potentiel géothermique est le plus important des Petites Antilles. La production d'électricité, alors six fois supérieure aux besoins de l'île, permettrait d'exporter le surplus par câbles sous-marins vers la Martinique et la Guadeloupe (figure 22).

La centrale expérimentale européenne de Soultz-sous-Forêts

Initié au cours des années 1970 par des scientifiques américains, le concept *Hot Dry Rock* (HDR) visait à exploiter la chaleur stockée dans les roches profondes en faisant circuler entre deux puits un fluide caloporteur au sein des fractures de la roche, fractures existantes ou artificiellement créées par fracturation hydraulique en injectant des fluides à très haute pression.

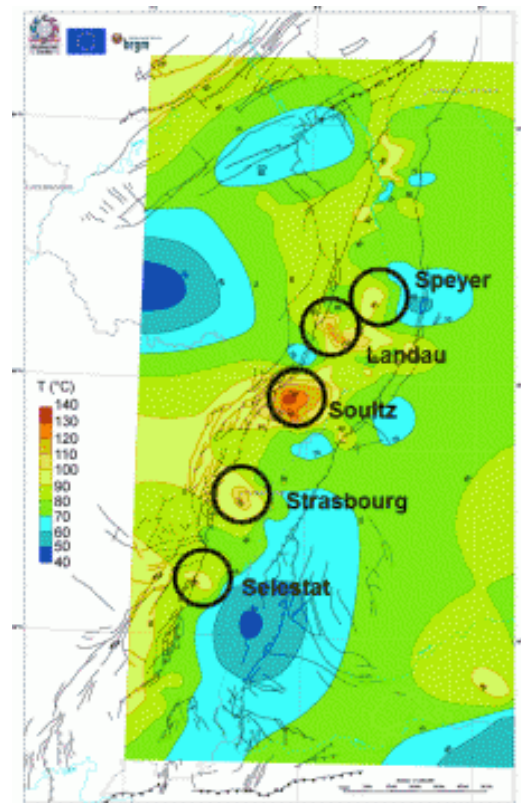


Figure 23. Les anomalies thermiques dans la plaine d'Alsace (document ADEME/BRGN).

Dans le même temps, un groupe de travail animé par l'ADEME, le BRGM et le CNRS s'intéresse au potentiel géothermique des milieux cristallins profonds assez fracturés pour permettre une circulation de fluide caloporteur entre deux puits (production et réinjection). Le sous-sol de la plaine d'Alsace, situé dans le graben du fossé rhénan, est bien connu grâce aux multiples forages pétroliers et aux sondages sismiques. Il se caractérise par une anomalie thermique de grande ampleur (110 °C à 1000 m de profondeur à Soultz) (figure 23) et sa bordure ouest, côté Vosges, se situe sur un grand champ de failles et de fractures dans le socle cristallin. Une expérimentation

scientifique est lancée, en 1987, regroupant des industriels et des établissements publics français, allemand et suisse : c'est la création du site pilote européen de Soultz-sous-Forêts, dans le département du Bas-Rhin (figure 24).

Vingt ans d'études et d'expérimentation ont été nécessaires : forage d'un doublet (puits à 3 000 et 3 500 m de profondeur, distants de 450 m), puis plus tard d'un triplet, c'est-à-dire deux puits de production 4 500 et 5 000 m de part et d'autre d'un puits de réinjection. Elles ont permis :

- de bien décrire la nature complexe des fractures naturelles du granite, plus ou moins interconnectées, perméables, parfois colmatées par divers dépôts hydrothermaux (quartz, chlorite, illite, calcite ...) ;
- de découvrir l'existence d'un réservoir géothermique faillé et fracturé dans lequel circulaient des fluides hydrothermaux à forte salinité (plus de 100g/l) ;
- d'optimiser les liaisons hydrauliques entre les puits injecteurs et les puits producteurs par le choix des points de forage, leur inclinaison et leur proximité.

Cette optimisation des performances hydrauliques de l'ensemble a alors nécessité la stimulation du milieu pour en augmenter la perméabilité : c'est ce qu'on appelle le concept EGS (*Enhanced Geothermal System*) de Soultz-sous-Forêts. Il s'agit du principe de « stimulation hydraulique et/ou chimique », avec deux objectifs : rouvrir les fractures existantes par l'injection contrôlée d'eau à pression élevée, puis d'élargir celles-ci par dissolution des remplissages hydrothermaux.

Si cette technologie n'est pas aussi agressive pour l'environnement que celle qui concerne l'exploitation des gaz de schistes, des questions demeurent auxquelles les équipes de gestion du projet essaient de répondre en permanence. Ainsi, lors de ces expérimentations, des microséismes non ressentis en surface se sont produits malgré la pression limitée d'injection de l'eau ; l'utilisation de deux puits injecteurs doit d'ores et déjà permettre de limiter les pressions de réinjection, donc les microséismes.

Depuis 2008, la centrale géothermique de production électrique est en service (figure 24) et un décret, publié le 24 septembre 2015 au Journal Officiel, accorde la concession de gîtes géothermiques de Soultz (24 km²) au Groupement Européen d'Intérêt Économique Exploitation Minière de la Chaleur (GEIE EMC).

Le groupe a obtenu un droit d'exploitation de 25 ans. Le raccordement au réseau électrique (2 MW) était prévu pour le premier semestre 2016. Une deuxième étape sera de valoriser la chaleur utilisée au cours de cette exploitation pour alimenter des industries locales via un réseau de chaleur.



Figure 24. La centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts, dans le département du Bas-Rhin (BRGM Im@gé).

Rittershoffen, première centrale de géothermie profonde française à application industrielle

La géothermie profonde en Alsace vient d'enregistrer un nouveau succès puisque le projet ECOGI (Exploitation de la Chaleur d'Origine Géothermale pour l'Industrie) visant à alimenter en énergie la plus grande usine d'Europe (figure 25) de traitement de l'amidon, Roquette Frères, a été inaugurée officiellement le 7 juin 2016.

L'extraction des calories du sous-sol s'effectue à partir d'un fluide contenu dans un réservoir profond formé à partir de l'eau qui descend notamment sur les bordures du Fossé rhénan, se réchauffe en profondeur, remontant par percolation le long de failles profondes.

Ce réservoir, d'une température proche de 170 °C, avait été identifié sous le village de Rittershoffen-Hatten (à 7 km à l'est de Soultz-sous-Forêts), à la limite des grès du Buntsandstein et du socle cristallin.



Figure 25. Vue générale de l'énorme usine Roquette Frères, à Beinheim, en bord de Rhin, utilisant la géothermie comme source d'énergie.

Le sous-sol du site a fait l'objet de deux forages à 2 600 m de profondeur. Le premier forage (puits de production), effectué en 2012, a permis de s'assurer

des caractéristiques de l'aquifère. Après une campagne d'acquisition de données sismiques en 2013, le deuxième forage (puits de réinjection) a eu lieu en 2014 en trajectoire déviée, suivi d'essais de circulation des fluides entre les deux puits dont l'extrémité est distante d'environ 1 000 m. Finalement, des essais de réinjection de l'eau rejetée à 70 °C, après prélèvement des calories, ont eu lieu pour vérifier le bon fonctionnement de la boucle géothermale.

Les méthodes utilisées pour ces opérations ont pu bénéficier de l'expérience acquise sur le site de Soultz, en particulier pour la maîtrise de la technique EGS (*Enhanced Geothermal System*) incluant la protection des nappes phréatiques et des couches sédimentaires, le détartrage contrôlé des failles souterraines, et la détection de la microsismicité.

L'eau géothermale est chargée en sels (100 g/l) et a un pH légèrement acide. Elle est acheminée au site de l'usine situé à Beinheim, près du Rhin, à 15 km de la centrale, par une canalisation étanche à double enveloppe enterrée. La puissance thermique disponible est de 24 MW. L'eau sortant du puits de production à 165 °C arrive à l'usine à 155 °C où, après échange thermique, elle est convertie en vapeur dont l'énergie est utilisée pour le traitement et la valorisation (pharmacie, nutrition, etc.) des céréales.

D'autres sites en Alsace font l'objet de demandes de permis de recherche d'énergie Haute Température, dont Wissembourg et Illkirsh, pour produire de la chaleur et de l'électricité. Cette exploration du Fossé rhénan a lieu aussi de l'autre côté de la frontière, en Rhénanie-Palatinat et en Bade-Wurtemberg.

Ces trois sites ne sont donnés qu'à titre d'exemples situés sur notre territoire.

De nombreux autres projets sont à l'étude et en cours de réalisation en France.

Dans le monde, de nombreuses centrales électriques d'origine géothermiques sont en service. Ainsi, au Kenya, la plus grande centrale géothermique d'Afrique, à Olkaria, dans le rift d'Afrique de l'Est, fournit plus de la moitié de l'électricité kényane. L'Islande, située sur l'axe de la dorsale Atlantique, bénéficie d'un gradient géothermique très élevé : les géologues y ont répertorié une vingtaine de sites où la température atteint 250 °C à moins d'un kilomètre de profondeur. Elle possède de nombreuses centrales d'électricité géothermique qui fournissent plus du tiers de la production électrique du pays.

9. Conclusion

Le champ d'application de la géothermie est potentiellement énorme, à l'image des réserves de la Terre en chaleur. La géothermie constitue une source d'énergie peu polluante, pour autant que les précautions vis-à-vis de l'environnement (surveillance de l'étanchéité des forages, etc.) soient prises, une énergie disponible, indépendante des intempéries et des saisons, et finalement économique à long terme. Cependant, c'est une énergie qui ne pourrait être qualifiée de renouvelable que dans la mesure où le flux de chaleur à travers la croûte terrestre suffirait à en assurer le renouvellement selon les besoins des activités humaines.

Cette source d'énergie, dont le renouvellement est très lent, nécessite donc de prendre en compte la maîtrise des quantités prélevées. Ceci est particulièrement valable pour les réservoirs basse énergie.

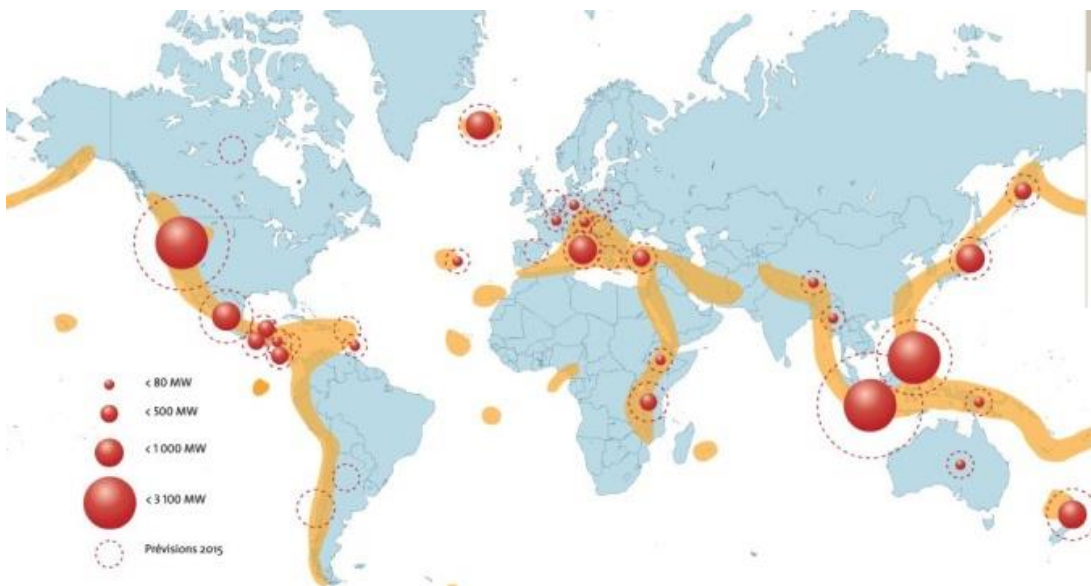


Figure 26. Ressources mondiales en électricité géothermique. En jaune : zones les plus favorables à la production d'électricité d'origine géothermique. Ronds rouges : production d'électricité d'origine géothermique en 2010. Cercles en pointillé : prévisions 2015 (BRGM).

Mais l'avenir des filières géothermiques dépend aussi de nombreux autres facteurs : conditions économiques, volonté politique des États, prise de conscience des changements climatiques, progression des techniques, etc. Des zones volcaniques, notamment celles de la ceinture de feu d'ores et déjà exploitée par de nombreux pays, pourraient participer davantage à l'alimentation de ces régions en énergie (figure 26). Nous avons vu que, pour l'instant, une très faible partie de cette énergie est captée et qu'elle tient une place modeste en général parmi les Énergies Nouvelles.

La situation concernant la géothermie productrice d'électricité est peut-être en train de changer.

La COP21 vient de se tenir à Paris suscitant quelques espoirs quant à la volonté des gouvernements de développer cette source d'énergie. Lors de cet événement, trente-six pays, dont des pays africains, et vingt-trois institutions ont annoncé la création d'une Alliance Mondiale de la Géothermie, avec pour objectif de multiplier par six la capacité de production d'électricité à partir de la géothermie ; à cette occasion, la coopération entre la France et l'Islande en matière de géothermie a été amorcée.

On prévoit un doublement de la puissance géothermique mondiale installée dans les dix prochaines années touchant notamment le sud-est de l'Asie, l'Amérique Centrale et Australe et l'est de l'Afrique avec au premier chef le Kenya.

Des expériences nouvelles ont lieu par exemple en Islande pour exploiter la chaleur des laves de cette zone de fracture de l'écorce terrestre.

Nous avons vu aussi que la France est assez bien pourvue en géothermie basse énergie, mais elle ne dispose pas de ressources moyenne énergie pour le moment. Les implantations de haute énergie ont fait leur apparition depuis quelques décennies et sont en développement. Des permis exclusifs de recherche en haute énergie dans les bassins d'effondrement continentaux et dans les zones volcaniques d'outre-mer sont lancés. Une Chaire Industrielle en Géothermie Profonde a été inaugurée à l'Université de Strasbourg, en avril 2014, avec mission de recherche et de formation.

Par ailleurs, dans le cadre du « Programme des Investissements d'Avenir », un projet Géodénergies a été élaboré pour favoriser l'émergence de filières pour l'exploitation et la gestion durable des ressources du sous-sol. Pour la géothermie, il concerne dans l'immédiat le financement de cinq projets de recherche industrielle d'une durée de deux à quatre ans mobilisant plusieurs partenaires.

Les premiers de ces projets portent sur l'optimisation de la géothermie profonde de fossés d'effondrement (trajectoire optimisée du puits), l'étude du comportement dynamique des réservoirs (enregistrement de la

microsismicité), l'amélioration des fluides des échangeurs géothermiques.

Ces études concernent surtout l'Alsace, l'Auvergne, la région Rhône-Alpes et la Guadeloupe. Une deuxième série de projets est prévue pour 2016, l'objectif de Géodénergies étant d'initier six à dix projets par an. Du travail en perspective...

Notes

(1) COP : Conférence Of Parties, conférences mondiales des États à la Convention cadre de l'ONU portant sur les changements climatiques.

(2) Enthalpie : quantité de chaleur contenue par unité de poids.

(3) 20 minutes.fr/Paris

(4) Équivalent logement : quantité de chaleur destinée au chauffage d'un appartement de 70 m².

(5) Voir cours de Daniel Obert « Hydrologie ». SAGA, 2014.

(6) Phréatique : du grec phréos, puits.

(7) Drainance : échanges verticaux ascendants ou descendants entre aquifères superposés à travers une couche semi-perméable.

(8) Éco-quartier (néologisme) : quartier à développement urbain durable, à sobriété énergétique et réduction des émissions de gaz à effets de serre, de biodiversité, de gestion de l'eau, des déchets, etc.

(9) Puits canadien : technique qui consiste à faire passer en hiver de l'air extérieur par un conduit placé à deux ou trois mètres dans le sol où il se réchauffe avant de parvenir dans les bâtiments. En été, il est possible de les rafraîchir par le même procédé.

Ouvrages et documents consultés

DIFFRE Ph., POMEROL Ch. (1979) – Guides géologiques régionaux : Paris et environs. Masson éd..

FERRANDES R. (1998) – La chaleur de la Terre. ADEME Éditions.

GÉLY J.-P. et HANOT F. (2014) – Le Bassin Parisien, un nouveau regard sur la géologie. Bull. Inf. Géol. Bassin de Paris. Mémoire hors-série n°9.

LEMALE J. (2012) – La géothermie. Éditions Le Moniteur, Dunod éd.

LHOMME J.-C. (2015) – La guerre des Watts. Éditions Quae.

VATHAIRE J.-Ch. et al., (2006) – Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM éditions.

VERNIER J. (2014) – Les énergies renouvelables. Que Sais-je n° 3240.

La géothermie, du geyser au radiateur. BRGM éditions, 1989.

La géothermie en Île-de-France, une énergie d'avenir ? In Géologue n° 142, 2004.

Quelques unités d'énergie et de puissance, et quelques chiffres

Énergie

La calorie : 1 calorie correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 g d'eau liquide de 14,5 °C à 15,5 °C.

Le Joule : équivalent mécanique de la calorie.

1 J = 0,239 calorie = $2,78 \cdot 10^{-7}$ kWh.

Le kilowattheure : travail accompli ou consommé par une installation produisant ou consommant 1000 W pendant 1 heure. Unité utilisée en électricité.
1 kWh = 3,6 MJ = $8,6 \cdot 10^5$ cal.

Le tep, tonne équivalent pétrole, unité utilisée en économie. 1 tep = 10 MWh = $42 \cdot 10^9$ J. C'est l'énergie fournie par la combustion d'une tonne de pétrole « moyen ».

- Consommation d'un réfrigérateur domestique : environ 500 kWh/an.
- Production d'une centrale géothermique sur le Dogger, en France : de 15 à 75 GWh (1 GWh = 10^9 Wh).
- Consommation d'électricité en France (BRGM, 2013) : 480 TWh.
- Production de chaleur géothermique en France (2014) : environ 4 TWh.
- Consommation mondiale des *data center* (2010) : $275 \cdot 10^9$ kWh, soit 1,4 % de la consommation mondiale d'électricité.
- Production mondiale d'électricité (2012) : 22 000 TWh, dont 70 TWh par géothermie, soit 0,3 %.

Puissance :

Le Watt : 1 W = 1J/sec.

Le cheval-vapeur : 1 CV = 735 W.

- d'une machine à laver domestique : environ 2 kW.
- d'une centrale de géothermie sur aquifère profond : de 5 à 30 MW.
- de la centrale de Bouillante, en Guadeloupe (2008) : 15 MW électrique.
- de la centrale de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) : 1,5 MW électrique.
- disponible en chaleur géothermique en France (2013) : 2 300 MW thermique.
- d'une tranche de Centrale nucléaire : environ 1000 MW électrique.
- de la Centrale Haute Énergie de Hellisheioi (Islande) : 213 MW élec. (2^e centrale la plus puissante du monde).

Puissance mondiale installée pour les centrales géothermiques électriques (2012) : 11 GW.

La géothermie, quelles technologies pour quels usages. Coll. « Les enjeux des géosciences », 2008.

Pompes à chaleur géothermiques sur aquifères. BRGM éditions, 2008.

La géothermie et les réseaux de chaleur. BRGM éditions, 2010.

Le rôle de l'eau dans le système terre. In Géosciences n° 13, 2011.

La Terre, source d'énergies durables. In Géosciences n° 16, 2013.

Les sols. In Géosciences n° 18, 2014.

L'évolution du renouvelable en France et dans le monde. In Géologues n° 185, 2015.

www.brgm.fr

www.ademe.fr/emr

<http://www.geothermie-perspectives.fr>

www.semhach.fr

<http://www.clichy-batignolles.fr>

<http://www.arcueil-gentilly.reseau-chaleur.fr>

<http://geothermie.ch>

<http://planet-terre.ens-lyon/planetterre/>

Remerciements

François Audubert remercie MM. Benjamin Roger et Frédéric Thomas responsables de l'énergie, et la Maison de la Radio, à Paris, pour leur accueil et leurs explications sur la centrale géothermique du bâtiment. Il exprime également sa gratitude envers Mme Valia Blum et M. Gil Melin, de la Mairie de Ris-Orangis, qui lui ont aimablement donné accès à leurs clichés sur le forage d'un troisième puits sur le site de la centrale géothermique de Ris-Orangis.

Une brève

Le diamant brut *Constellation*

Mesurant plus de six centimètres et pesant 813 carats, le *Constellation* a été découvert en novembre 2015 par la société canadienne *Lucara Diamond* dans la mine de Karowe, au Botswana. C'est actuellement le 3^e plus gros diamant brut au monde.

Il possède toutes les caractéristiques d'une pierre exceptionnelle, notamment en matière de couleur, de pureté et de poids. Sa taille pourrait révéler l'un des plus gros diamants certifiés *flawless* au monde. Il s'est vendu 55 millions d'euros en juin dernier.

Toutefois, un autre énorme diamant de 1 109 carats, le *Lesedi La Rona*, a été découvert dans la même mine de Karowe. Presque aussi grand qu'une balle de tennis, c'est le plus gros diamant trouvé depuis le fameux Cullinan, cette pierre de 3 106 carats, sortie d'une mine sud-africaine en 1905.

(Communiqué par notre collègue Francis Tran Thien).