



Production de chaleur et d'électricité géothermique : un investissement scientifique de soixante ans

La chaleur de la Terre, exploitée de tout temps par l'humanité, devient une option à considérer sérieusement dans le cadre de la transition énergétique. L'implication du BRGM dans les technologies d'exploitation du sous-sol en fait un acteur à même de contribuer à la valorisation du sous-sol national pour répondre aux besoins énergétiques futurs.

Dès la Préhistoire, les hommes ont su tirer parti de la chaleur de la Terre. Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'Homme remontent à près de 20 000 ans. Les sources chaudes ont aidé l'humanité à résister et à s'adapter aux changements climatiques. Elles pouvaient servir à se réchauffer, à cuire des aliments ou à se baigner, etc.

Le XIX^e siècle marque le début de l'usage industriel de la géothermie, grâce aux progrès scientifiques et aux développements de techniques nouvelles de forage qui ouvrent la voie à l'étude, l'exploration et le creusement pour atteindre cette chaleur et mettre en place des dispositifs afin de l'exploiter.

C'est surtout la prospection en vue d'une production d'électricité d'origine géothermique qui va prendre un essor durant la première moitié du XX^e siècle. En 1904, c'est dans la ville de Larderello (Italie) que la géothermie est utilisée pour la première fois pour produire

AUTEURS



Sylvie GENTIER

Directrice du programme « Transition énergétique et espace souterrain », BRGM
✉ s.gentier@brgm.fr



Bernard SANJUAN

Responsable de l'unité « Ressources géothermales profondes et superficielles », BRGM
✉ bsanjuan@brgm.fr



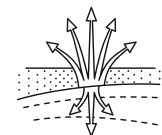
Mikaël PHILIPPE

Responsable de l'unité « Développement de l'énergie et des systèmes géothermiques », BRGM
✉ m.philippe@brgm.fr



PHOTO 1 ▲
Forage géothermique dans le Bassin parisien.

© C. LECOUTURE, CFG SERVICES



de l'électricité. Une centrale géothermique sera alors ouverte en 1911 (extraction d'une eau de 150 à 260 °C) et restera la seule jusqu'en 1958.

En France, les premiers puits qui peuvent être qualifiés *a posteriori* de géothermiques sont réalisés dès les années 1830 à Paris afin d'exploiter les sables albiens à une profondeur de 600 à 700 m en vue d'augmenter les ressources en eau de la capitale. L'eau y atteint des températures de 30 à 35 °C. Cette géothermie dite de basse température (extraction d'une eau à moins de 90 °C) a été utilisée pour le chauffage dès la fin du XIX^e siècle. Le premier vrai réseau de chauffage urbain alimenté grâce à la géothermie est celui de Reykjavik (Islande) dès 1930. Les utilisations directes de la chaleur vont alors connaître, quoique de façon moins rapide que la géothermie haute température, un important développement.

Les géothermies en France : l'engagement du BRGM

C'est dans la perspective de besoins de plus en plus élevés en énergie du monde moderne, mais aussi d'un intérêt de plus en plus grand porté aux énergies renouvelables dès les années 1970 à la suite des chocs pétroliers que se trouvent les racines de l'engagement du BRGM dans la géothermie. Il agira sur fond de grands progrès réalisés depuis le début du siècle dans la connaissance des



▼ PHOTO 2

Champs géothermique de Reykjanes (Islande) : Grey Lagoon formé artificiellement par le rejet des eaux géothermales exploitées. En arrière-plan les installations (usine de séchage de poisson, centrale électrique).

© MARIANNE PETER

structures du sous-sol grâce au perfectionnement des méthodes d'exploration, notamment géophysiques et géochimiques.

> Une production de chaleur

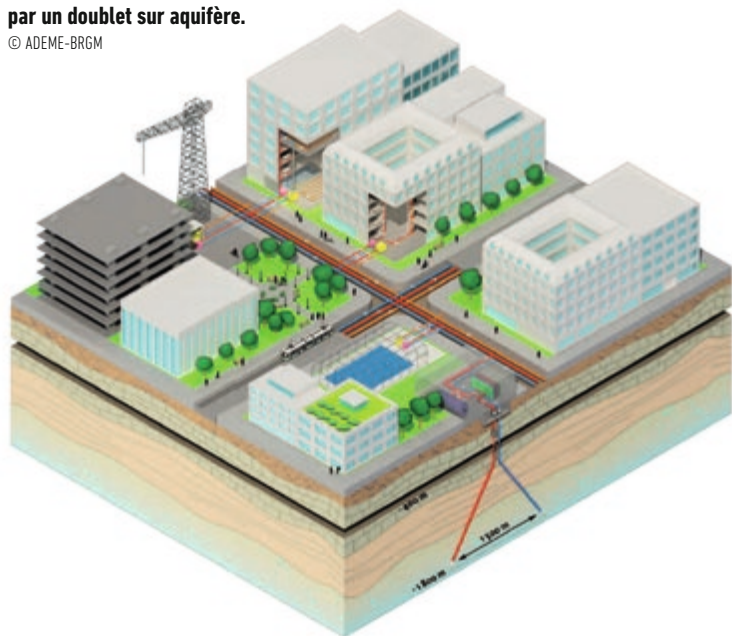
En France, le premier bâtiment ayant bénéficié d'un système de chauffage géothermique à partir de l'aquifère de l'Albien est la Maison de la radio, en 1963, via un puits à 600 m de profondeur. La première expérience significative démarre ensuite en 1969, à Melun l'Almont, au sud-est de Paris, par le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire de plus de 2 500 logements collectifs à partir d'eaux à basse température (72 °C) pompées à 1700 mètres de profondeur en utilisant la technique dite du « doublet ». Elle permet l'exploitation d'un des aquifères profonds du bassin de Paris (Dogger) en réinjectant l'eau, après épuisement calorifique, en évitant le rejet en surface d'une eau fortement minéralisée et en maintenant la pression du réservoir.

Le potentiel géothermique du bassin parisien, étudié dès le début des années 1970 par le BRGM et Elf-Aquitaine, régulièrement réactualisé depuis, a permis la réalisation des opérations géothermiques qui exploitent l'eau chaude du Dogger. En tant que maître d'œuvre, le BRGM a favorisé dès 1975 la promotion de la géothermie en France et a participé au montage et à la réalisation de plus de 60 % des installations existant en 1985



FIGURE 1
Réseau de chaleur, principe de fonctionnement et alimentation par un doublet sur aquifère.

© ADEME-BRGM



(65 forages totalisant 121 154 mètres forés), date de la création de CFG Services, filiale du BRGM. Aujourd'hui, 47 opérations géothermiques mettant en œuvre des doublets ou des triplets sont en fonctionnement (de l'ordre de 230 000 équivalents-logements) ou en cours de développement dans l'aquifère du Dogger.

Les travaux actuels montrent que les réseaux de chaleur alimentés par géothermie ont encore de nombreux jours devant eux. En effet, hormis le cas d'Alfortville où une baisse de 3 °C a été constatée, la décroissance thermique ne devrait pas se faire sentir avant les années 2028 voire 2040 suivant les simulations. Ces estimations reposent sur les relevés mensuels de température du réservoir du Dogger effectués par les exploitants des réseaux de chaleur géothermiques d'Île-de-France et sur des modélisations. Aussi, il est apparu primordial de développer et de maintenir un outil d'aide à la gestion adapté à l'échelle du champ géothermique, destiné aux décideurs pour le suivi des opérations à long terme comme pour la réalisation de nouvelles opérations.

Au cours de l'année 2018, la base de données des opérations du bassin parisien a été étendue à toutes les opérations de géothermie profonde en France pour la production de chaleur (bassin aquitain, bassin du Sud-Est, fossé rhénan, fossé rhodanien, fossé bressan, Limagne), ce qui représente environ 230 forages géothermiques.

› De l'électricité à la chaleur : vers la cogénération

Dès les années 1960, le BRGM contribue à des travaux d'exploration qui mènent à la découverte du champ de Bouillante, en Guadeloupe. Sa mise en production dans

les années 1980 et son développement représentent aujourd'hui une capacité annuelle de 15 MWe et il reste encore un large potentiel à exploiter.

Compte tenu des caractéristiques géologiques de la France métropolitaine, la production d'électricité d'origine géothermique dans un contexte volcanique reste très limitée. Jean Goguel, un des fondateurs du BRGM, est le premier à s'intéresser en France à la possibilité d'utiliser la chaleur contenue dans les roches peu perméables profondes de notre territoire. Il incite le BRGM à prospecter en métropole, notamment dans le nord de l'Alsace. Il faudra plus d'une vingtaine d'années pour que le projet de Soultz-sous-Forêts, initié par le BRGM pour la partie française, voie le jour en 1986 et se concrétise au travers d'une coopération franco-allemande (financements nationaux et européens). L'Alsace du Nord apparaît alors comme un excellent candidat compte tenu des informations de l'époque sur le potentiel thermique du sous-sol.

Le BRGM, fortement impliqué dès l'origine du projet, s'est focalisé sur la connaissance géologique, le suivi microsismique, l'étude des circulations d'eau profondes dans les fractures et failles naturelles et la compréhension des mécanismes mis en jeu lors des stimulations hydrauliques et thermiques en vue de l'augmentation de la productivité/injectivité des puits.

La première étape décisive correspond au premier test de circulation d'eau en 1997, réalisé entre deux forages distants de 450 m, à une profondeur de 3 500-4 000 m, préalablement stimulés hydrauliquement, sans perte de fluide et sans perte de température. Cela constituait alors une première mondiale (température de production de 140-150 °C pour un débit de 25 l/s). Les résultats acquis ont mis en évidence la présence d'un fluide naturel en profondeur dans le réseau de failles et de fractures constituant une forme de « réservoir ». Par ailleurs, l'augmentation de la performance hydraulique des puits (augmentation de leur productivité/injectivité) est rendue possible, sans injection d'agents de soutènement, par un mécanisme de libération des contraintes en réponse à la mise en pression hydraulique du puits.

Ce premier succès ayant incité à la réalisation de puits plus profonds (5 000 m) afin d'atteindre une température de 200 °C, une nouvelle étape décisive est franchie avec la réalisation successive de tests de circulation en 2005 et en 2010. La température de fond est de 203 °C et le fluide sort à 165 °C. Ces nouvelles étapes débouchent sur la construction d'une première unité de production (échangeur de type Organic Rankin Cycle ou ORC) de 2,1 MWe conduisant à une production nette de 1,5 MWe. Il s'agit alors, en 2008, de la première production d'électricité au monde issue de tels systèmes géothermiques raccordée au réseau électrique.

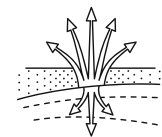


PHOTO 3

Réalisation de 13 forages de 100 m de profondeur sur la plate-forme Géothermie du BRGM lors de la mise en place d'un champ de sondes pour un stockage thermique souterrain (Orléans 2018).

© DIDIER DEPOORTER, BRGM-ADEME

› De la chaleur et du froid

En Europe, le développement des pompes à chaleur est associé au premier choc pétrolier, mais leurs performances technologiques s'affirment surtout dans les années 1980. Au BRGM, les installations géothermiques sur nappe font l'objet d'une première vague de travaux de recherche dès les années 1980. C'est seulement dans les années 2005-2010 que cette géothermie est relancée en se focalisant tout d'abord sur les échangeurs géothermiques horizontaux, qui sont une spécificité française. Cela mène à la mise en service en 2008 d'une plateforme sur le site du BRGM, destinée à tester et optimiser les différents types d'échangeurs géothermiques en boucles fermées (échangeurs horizontaux et verticaux, mais aussi corbeilles géothermiques de différentes géométries). Une nouvelle machinerie thermodynamique a été mise en œuvre sur cette plateforme en 2019 pour étudier les échanges de chaleur entre le sous-sol et les systèmes énergétiques d'un bâtiment (pompes à chaleur, panneaux solaires, etc.), aussi bien en injection qu'en prélèvement de chaleur et à des niveaux de puissance pouvant atteindre 200 kW. Cela a notamment déjà permis concrètement de simuler les systèmes énergétiques d'un bâtiment type de bureaux couplés à un stockage de chaleur souterrain installé sur cette plateforme (champ de 13 forages géothermiques profonds de 100 m), ce qui constitue la dernière évolution en date. Par ailleurs, l'efficacité des systèmes de rafraîchissement passif ou actif des bâtiments par la géothermie de surface est en cours d'évaluation et d'amélioration.

Les géothermies en France : quelles perspectives pour le BRGM

Après une implication forte dans le développement des technologies d'exploitation de la géothermie et dans la compréhension du fonctionnement des systèmes géothermaux profonds durant ces soixante dernières années, l'enjeu majeur est désormais le déploiement de ces technologies en accord avec les différents contextes géologiques, les nouveaux besoins de la société et les modèles économiques compétitifs. Toute l'expérience acquise et les connaissances accumulées sur l'exploitation du Dogger d'Île-de-France doivent contribuer à l'exploitation d'autres aquifères profonds, notamment en Aquitaine, en vue d'une production de chaleur destinée à l'alimentation de réseaux urbains.

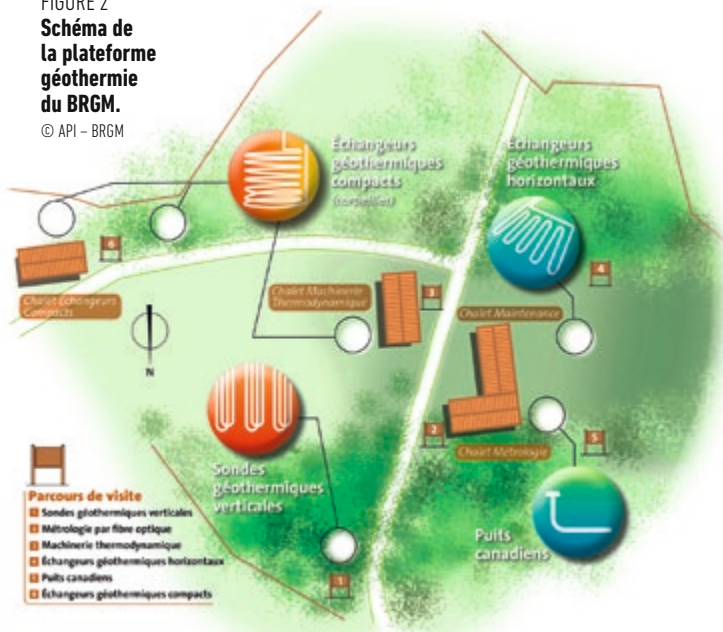




4

FIGURE 2
Schéma de la plateforme géothermie du BRGM.

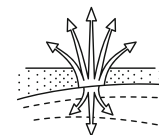
© API - BRGM



▲ PHOTO 4
Vue de la nouvelle centrale à Soultz-sous-Forêts inaugurée en 2016.
© C. DEZAYES

L'exemple de Bouillante pourrait être étendu dans les autres DROM, dans la mesure où une ressource géothermique haute température y serait prouvée, en vue d'une production d'électricité par de nouveaux forages d'exploration faisant suite aux travaux menés par le BRGM en Martinique et à La Réunion depuis les années 1970-1980 et à Mayotte, depuis les années 2000-2010. Les technologies qualifiées aujourd'hui d'EGS (Engineered Geothermal Systems), dont la maturité en vue d'une production d'électricité n'est pas envisagée avant 20 à 30 ans, s'inscrivent d'ores et déjà en recours potentiel pour une production de chaleur industrielle (Rittershoffen, Alsace) et une cogénération chaleur/électricité, potentiel déjà en cours de mise en exploitation en Alsace (Vendenheim, Illkirch...), incluant une valorisation de métaux contenu dans les saumures (Li). Des perspectives à terme dans des contextes géologiques analogues (couloir rhodanien et Limagne, notamment) sont d'ores et déjà envisageables. Ce déploiement nécessitera une mise en perspective des différentes technologies avec une connaissance géologique augmentée du sous-sol, activité au cœur des compétences du BRGM.

La réduction des coûts nécessaires à ce déploiement dépendra fortement du développement des nouvelles technologies de forages et des futures architectures et complétion de puits (forages déviés, latéraux, multi-drains...) à considérer pour optimiser la productivité et l'injectivité des puits. La question de la réinjection,



► **BOUILLANTE : UNE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ**

À l'initiative de la Société de production et de distribution de l'électricité en Guadeloupe (SPDEG), le BRGM et la compagnie EURAFREP ont réalisé l'exploration des ressources géothermiques (1963 à 1970) qui a conduit à la découverte du champ haute température de Bouillante. Ce champ géothermique est localisé sur la côte ouest de Basse-Terre. Une première centrale (4,2 MWe) est construite par EDF et EURAFREP et exploitée jusqu'à son arrêt en 1992. C'est à partir de 1995, avec la création de Géothermie Bouillante (GB), filiale des groupes BRGM (majoritaire) et EDF, que la production d'électricité reprend sur une base industrielle. L'exploitation de la centrale est confiée, entre 1996 et 2016, à CFG Services. En 1998, avec 23,2 GWh fournis au réseau EDF, l'électricité provenant de Bouillante représente 2 % de la

production d'électricité en Guadeloupe. Trois nouveaux forages déviés de production, d'une profondeur de 1 000 m environ, sont effectués entre 2000 et 2004 et une nouvelle unité d'une capacité de 11 MWe est mise en service en 2005. Depuis cette date, les forages génèrent autour de 70-90 GWh/an d'électricité, ce qui représente 5 à 6 % de la production annuelle d'électricité de l'île.

Au-delà de son rôle dans la production d'électricité, le champ de Bouillante constitue un remarquable laboratoire de recherche pour améliorer les connaissances sur un système géothermique de haute température (250-260 °C) en contexte d'arc insulaire. Les nombreux travaux d'exploration menés par le BRGM, ainsi que le développement de méthodologies associées, dans plusieurs domaines

des géosciences, ont d'ores et déjà permis de multiplier par un facteur 3 la production de ce champ. Les nombreux travaux de recherche en modélisation géologique 3D, hygrothermique et géochimique, la réalisation de tests de traçage chimique et le développement de méthodes de suivi géophysique et géochimique de l'impact de l'exploitation sur la production ainsi que sur l'environnement proche de la centrale ont aidé à mieux connaître et caractériser le réservoir géothermique exploité et son évolution, ainsi qu'à optimiser la gestion de ce réservoir. Tous ces travaux montrent qu'il existe encore un potentiel considérable à développer —

Vue aérienne de la centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe, 2003). © BRGM



5



▲ PHOTO 5

Machinerie de la plateforme géothermie du BRGM.

© TERTRE, BRGM

6



▲ PHOTO 6

Centrale géothermique de Rittershoffen dédiée à la production industrielle de chaleur pour le séchage de l'amidon.

© CDEZAYES



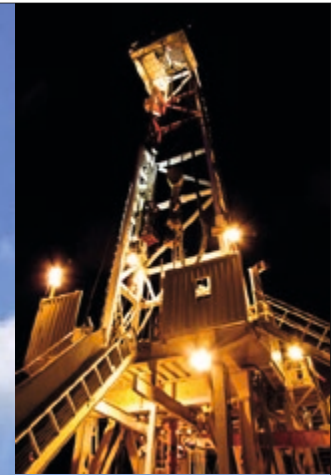
Compagnie Française de Géothermie

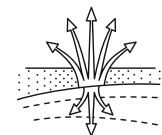


Etudes et Conseil : Dans toutes les applications géothermales, nous assistons les collectivités, acteurs publics ou privés et industriels dans leurs projets énergétiques

Conception et maîtrise d'œuvre : de la pré faisabilité à la réception des ouvrages, nous assurons les missions de maîtrise d'œuvre des ouvrages du sous sol et de la boucle géothermale

Maintenance – Suivi d'exploitation : Nous accompagnons les maitres d'ouvrages, délégataires, exploitants dans le suivi et la maintenance de leurs installations de production et les aidons dans leurs diagnostics





Vue de la centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe, 2003). © BRGM

aussi bien pour des raisons d'optimisation et de pérennité thermique des systèmes que pour des raisons environnementales, reste un axe scientifique majeur et nécessitera un focus particulier.

La géothermie pourrait avoir un bel avenir devant elle. Pour y parvenir, il est nécessaire de cartographier le potentiel de développement de la géothermie de surface, réaliser des retours d'expérience sur des opérations géothermiques en fonctionnement, développer des méthodologies innovantes permettant d'éclairer les collectivités dans le choix de leurs solutions géothermiques.

Enfin, le passage des géothermies relevant de l'utilisation de la chaleur naturelle renfermée dans le sous-sol au stockage thermique souterrain (utilisation du sous-sol pour y stocker de l'énergie thermique, chaleur ou froid), quelles que soient son origine et sa température (chaleur fatale) est dans la logique de l'investissement scientifique déjà effectué et des futurs besoins de la société. Le stockage saisonnier de chaleur ou de froid pour des périodes pouvant aller jusqu'à quelques mois est certainement un des défis scientifiques majeurs auquel le BRGM sera confronté : positionnement optimal des forages, caractérisation des hétérogénéités des roches réservoirs, suivi de l'évolution du stockage, prévention de la corrosion et des dépôts minéraux, maintien de la perméabilité des roches pendant l'exploitation, bilans économiques, entre autres. Ces systèmes de stockage peuvent alimenter aussi bien des réseaux de chaleur que des habitations ou des complexes isolés (27 à 80 °C). Des stockages massifs de haute à très haute température (> 90 °C) commencent aussi à être considérés à des fins plus industrielles et à la production d'électricité (centrales solaires), reprenant les premières tentatives et projets des années 1980.

Utilisée de longue date, la chaleur de la Terre n'est pas une énergie nouvelle, mais le développement des géothermies a été jusque-là largement fonction de l'évolution des coûts des énergies fossiles. À l'aube du XXI^e siècle, elles sont susceptibles de s'insérer dans le bouquet des énergies renouvelables décarbonées ; énergie intégrée dans l'espace naturel, de gestion décentralisée et en cohérence avec les aspirations de développement régional et d'initiatives locales, elles peuvent encore accompagner l'humanité, face au nouveau défi du changement climatique, en contribuant à limiter les émissions de gaz à effet de serre et à son rafraîchissement. ●



7

ABSTRACT

Since its creation, BRGM has been involved in developing deep geothermal resources for heat and electrical power generation. In addition to its long-standing experience in this field, BRGM has also been playing a major role in the development of shallow geothermal energy (< 200 m) over the past 12 years.

BRGM's involvement has resulted in the development and management of the Dogger reservoir in Île de France since the 1970s and the development of the Bouillante site in Guadeloupe since the 1960s, which concern conventional deep geothermal energy, respectively at low (50/90°C) temperatures for geothermal district heating, and high temperatures (>150°C) for generating electricity. Concomitantly, BRGM has been heavily involved since the end of the 1980s in the development of engineered geothermal systems (EGS) at the Soultz-sous-Forêts site in Alsace, laying the groundwork for more widespread exploitation of deep geothermal heat, initially for power generation, but currently geared towards industrial heat generation and combined heat and power generation in mainland France. All these activities are in line with the general trend of deep geothermal energy in Europe.

Furthermore, investments in shallow geothermal energy are such that it is now possible to consider all geothermal energy sources covering the full range of temperatures and to offer a range of solutions for residential applications as well as commercial buildings. The scientific and technical developments required are provided through the geothermal experimental platform on BRGM's own site in Orléans, which tests various types of exchangers. Experiences with very low and low temperatures also include heat storage in aquifers or using arrays of geothermal probes.

Cross-fertilisation is now possible between experiences previously undertaken in relative isolation, and this can help meet the various needs now emerging in the context of energy transition.

BIBLIOGRAPHIE

Gentier S. et A. Genter (2010) - Le pilote scientifique de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin), enjeux et perspectives. *Géochronique* 114, 40-44. **Sanjuan B., Bouchot V., Gadalia A., Traineau H. (2011)** - Géothermie haute température : le défi énergétique. *Geosciences*, 14, 32-41. **S. Lopez, V. Hamm, M. Le Brun, L. Schaper, F. Boissier, C. Cotiche, E. Giuglaris (2010)** - 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, *Geothermics*, Volume 39, Issue 4, December 2010, Pages 339-356. **Guide ADEME** « Ils l'ont fait : Chauffer et rafraîchir avec une énergie renouvelable - Géothermie très basse énergie » https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chauffer_rafraichir_geothermie_tres_basse_energie.pdf