

## **Le BRGM et la géothermie : la recherche au service de la transition énergétique**

Romain Vernier

*Mettre au point un système géothermique pour le bâtiment à coût réduit, coupler géothermie et panneaux solaires, chercher de nouvelles ressources exploitables en métropole... tels sont quelques exemples des travaux de recherche en cours au BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). L'établissement fait partie des pionniers en la matière depuis les années 1970, avec la participation aux premiers réseaux de chaleur en Île-de-France, la production d'électricité géothermique en Guadeloupe, le développement de la géothermie EGS (Engineered Geothermal System)... Plus récemment, l'établissement a également fait le choix d'investir sur la géothermie assistée par pompe à chaleur. Avec ses filiales CFG Services et Géothermie Bouillante, le BRGM accompagne la relance de la filière par l'appui aux politiques publiques, la recherche, le développement, l'innovation et l'exportation de son savoir-faire à l'international.*

*Cette activité contribue aux objectifs ambitieux fixés par le Grenelle de l'environnement et le débat sur la transition énergétique : augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique, réduction de la consommation énergétique annuelle des bâtiments neufs ou rénovation annuelle de 500 000 logements anciens pour une plus grande sobriété énergétique. Renouvelable, disponible 24h/24, la géothermie y aura toute sa part, avec notamment un objectif de contribution en matière de chaleur multiplié par 6 d'ici 2020.*

### **1. Géothermie très basse énergie : des solutions innovantes pour le bâtiment**

Premier exemple de projet avec Micro-Géo, qui vise à mettre au point un système géothermique complet pour 10 000 € TTC maximum à l'horizon 2015 pour l'habitat individuel neuf de type BBC (bâtiment basse consommation – Réglementation thermique 2012). La géothermie très basse énergie, sur pompe à chaleur, est mobilisable en tous points du territoire français, ce qui la rend particulièrement intéressante dans le contexte actuel de transition énergétique. L'objectif des pouvoirs publics est

ainsi de voir sa contribution dans la production de chaleur plus que décuplée : de 40 ktep (kilotonnes équivalent pétrole) en 2006 à 550 ktep en 2020. Micro-Géo, financé par le fonds unique interministériel, doit contribuer à cet objectif. Le projet réunit le BRGM, RYB Terra (échangeurs géothermiques enterrés), CIAT (pompes à chaleur), EDF, le CEA-INES, le CE-AT et Proxiserve (chauffage).

Cette solution géothermique devra assurer les trois usages thermiques essentiels d'un pavillon résidentiel : eau chaude sanitaire, chauffage et rafraîchissement. Grâce à sa plateforme Géo-thermie<sup>1</sup>, le BRGM dispose des moyens tech-

1. [www.plateforme-geothermie.brgm.fr](http://www.plateforme-geothermie.brgm.fr)

niques et scientifiques lui permettant de tester différents types d'échangeurs enterrés. Il a ainsi réalisé de premiers tests et évaluations de sept échangeurs compacts de type corbeille cylindrique à différentes profondeurs (projet ANR-ECLIPSE). Depuis fin 2013, les performances de quatre nouveaux échangeurs « corbeille » sont comparées sur la plateforme (un du commerce et trois prototypes mis au point par RYB Terra). Associés à une pompe à chaleur du commerce, ils seront prochainement testés sur un modèle spécifique développé pour le projet par CIAT. Le système a été testé pendant l'hiver 2013-2014 pour le chauffage de l'un des quatre chalets de la plateforme Géothermie du BRGM. Il est actuellement à l'arrêt, le chalet de nécessitant pas de rafraîchissement.

Gecko (GEOstructures, Couplage solaire hybride et stockage d'énergie Optimisé : solution pour bâtiments à énergie positive) est un autre projet phare du BRGM dans la géothermie très basse énergie, l'objectif étant de coupler des fondations thermoactives à des panneaux solaires. À l'horizon 2020, les nouveaux bâtiments seront à énergie positive. Ils devront donc produire de l'électricité pour compenser les consommations énergétiques. Pour atteindre cet objectif fixé par la nouvelle réglementation thermique, l'Agence nationale de la recherche a lancé plusieurs appels à projets dans le cadre de son programme Seed (Systèmes énergétiques efficaces et décarbonés). Gecko, lancé en 2012, est l'un d'entre eux. Il réunit plusieurs partenaires scientifiques et techniques<sup>2</sup> avec pour objectif de coupler des panneaux solaires hybrides (photovoltaïque et thermique en simultané) à des fondations thermoactives (fondations de bâtiments équipées d'échangeurs géothermiques et associés à une pompe à chaleur). La finalité est d'optimiser à la fois la production d'électricité (meilleur rendement électrique des panneaux photovoltaïques s'ils sont refroidis) et d'améliorer le coefficient de performance de la pompe à chaleur par une recharge saisonnière du sous-sol en chaleur. Le projet s'articule autour de sept axes principaux qui visent, globalement, à bien dimensionner les installations et à évaluer leur éventuel impact environnemental. Le BRGM a été plus

particulièrement chargé d'étudier l'interaction des géostructures avec le sous-sol, par le développement d'outils de simulations thermiques dynamiques (STD) des géostructures, et d'évaluer l'influence des hétérogénéités géologiques et hydrogéologiques sur le transfert thermique autour de celles-ci, ainsi que l'impact induit sur leur comportement thermomécanique. Dans le cadre de ce projet, deux sites-tests en France mettent notamment à profit les moyens d'investigation de la plateforme du BRGM (instrumentation en fibre optique) et des résultats de recherches qui y sont conduites. Le BRGM intervient également dans l'étude technico-économique du système Gecko. Il est leader de la tâche dédiée à l'étude de l'impact environnemental et de l'analyse de cycle de vie.

## 2. Réseaux de chaleur : la relance de la géothermie profonde en Île-de-France

Le BRGM, avec l'appui de sa filiale CFG Services, est fortement engagé dans la relance des réseaux de chaleur, voulue par le Grenelle de l'environnement, avec un objectif de triplement de la production thermique de ceux-ci à l'horizon 2020. Il assure la gestion du Dogger pour contrôler l'évolution thermique de l'aquifère et permettre l'implantation de nouveaux forages sans perturber la ressource ou les opérations existantes, et accompagne la réhabilitation des installations anciennes. Il s'intéresse également au potentiel d'aquifères moins profonds, aptes à alimenter des réseaux de chaleur de plus petite taille.

Mis en exploitation sur la base de travaux de caractérisation menés par le BRGM, le Dogger alimente aujourd'hui 31 réseaux de chaleur en région parisienne, produisant l'eau chaude sanitaire et le chauffage pour environ 180 000 équivalents-logements. D'une profondeur comprise entre 1 500 et 2 000 m et avec une température de 55 à 85° C, l'aquifère est exploité au moyen de doublets géothermiques, constitués d'un puits producteur et d'un puits de réinjection entre lesquels le fluide géothermique circule dans un échangeur de chaleur. Avec le temps, les performances de certains puits ont été affectées par des phénomènes de corrosion-dépôts

2. BRGM, ECOM, IFSTTAR, LEMTA, IGCCE.

et de refroidissement de la ressource au débouché du puits injecteur (« bulles froides »). C'est pourquoi le BRGM et l'Ademe, afin de réhabiliter les installations existantes, mais également de valoriser le potentiel du Dogger, ont mis en place un système de gestion de l'aquifère. Ils ont constitué une base de données capitalisant les informations sur les ouvrages (localisation, tubage, profondeur...), l'aquifère lui-même (transmissivité, température, épaisseur, productivité...), l'exploitation géothermique (chimie, géochimie, pression, débit, température...) et son historique (date de réalisation, état de l'opération, interventions...). Des travaux de modélisation ont été réalisés, permettant notamment de mieux localiser l'implantation de futurs doublets géothermiques. C'est le cas à Orly, dont l'aérogare et le quartier d'affaires sont depuis 2010 alimentés par un nouveau réseau de chaleur. Le groupe BRGM, par l'intermédiaire de sa filiale CFG Services, met en œuvre par ailleurs des solutions de réhabilitation des installations, par le rechemisage des puits ou la création de triplets géothermiques, via le forage d'un nouveau puits producteur.

Enfin, deux projets de R&D sont actuellement conduits. Le premier, InhibDogger, porte sur les problèmes de corrosion-dépôt dans les puits (étude comparative de l'action de différents produits inhibiteurs dans un fluide géothermal représentatif du Dogger, et sélection des trois meilleurs inhibiteurs identifiés préalablement à une expérimentation sur site en 2015). Le second, TestDogger, vise la caractérisation de la ressource dans une zone densément exploitée (tests d'interférence hydraulique – pression, transmissivité... – entre plusieurs opérations géothermiques dans le Val-de-Marne).

Outre le Dogger, plusieurs aquifères du bassin parisien constituent des ressources géothermiques potentielles. À moyenne profondeur – et faible niveau de température –, l'Albien et le Néocomien sont ainsi deux aquifères distincts exploitables en utilisant des pompes à chaleur. L'Albien est situé entre 540 et 770 m de profondeur pour une épaisseur productrice d'environ 100 m, avec une température d'eau de l'ordre de 30 °C. Le BRGM y a conduit de premiers travaux de reconnaissance à la fin des années 1990. Sur cette ressource peu exploitée,

le doublet géothermique le plus récent a été réalisé en 2011 à Issy-les-Moulineaux, par la Société Dalkia (60 pompes à chaleur alimentant 1 600 équivalents-logements). Sous l'Albien (entre 875 et 1 000 m de profondeur), le Néocomien offre une température d'eau de l'ordre de 40 °C, pour une épaisseur productrice d'environ 120 m. Les investigations conduites par le BRGM ont déjà débouché sur deux opérations : à Bruyères-le-Châtel (Essonne) et en 2012 au Plessis-Robinson, sous maîtrise d'ouvrage de la société Dalkia. Un autre aquifère, le Lusitanien, situé 100 à 150 m au-dessus du Dogger (entre 1 000 et 1 500 m de profondeur) et donc susceptible d'alimenter des réseaux de chaleur, reste inexploité et mal documenté.

La demande énergétique ne cessant d'augmenter, et face au risque de surexploitation du Dogger, un projet d'estimation de son potentiel géothermique à la lumière de l'ensemble des données de forages pétroliers et géothermiques actuellement disponibles a été lancé. Les travaux conduits par le BRGM ont pointé deux zones favorables dans les secteurs de Meaux et de Lagny-Fontainebleau. Toutes deux présentent des températures entre 55 et 65 °C pour des épaisseurs utiles d'environ 40 à 80 m. De nouveaux forages seront nécessaires pour estimer précisément la capacité de ce réservoir à être exploité (perméabilité, transmissivité, débit...).

L'aquifère du Trias, géologiquement plus profond que le Dogger et qui atteint par endroit -3 200 m, est plus chaud que le Dogger (jusqu'à 125 °C), mais demeure mal connu. Le BRGM a lancé en 2009 le projet CLASTIQ-2, cofinancé par l'Ademe, dont l'objectif est d'améliorer la connaissance des réservoirs profonds des bassins sédimentaires à partir des données des nombreux forages pétroliers existants.

Suite à ces travaux, le Trias a constitué la base du démonstrateur du site Thermo2Pro ([www.thermo2pro.fr](http://www.thermo2pro.fr)). Ce site web permet un accès direct à l'information sur les réservoirs géothermiques profonds. Il est le fruit d'un projet conduit entre 2010 et 2013 par le BRGM et l'Ademe. Son objectif : rendre accessible, via internet, l'ensemble des informations sur les ressources géothermiques des bassins sédimentaires (géologie, température, porosité, transmissivité...). L'outil a été développé en

utilisant, pour caler et valider ses fonctionnalités, des paramètres d'une partie de l'aquifère du Trias. Il est aujourd'hui capable de restituer les informations sur un aquifère au moyen de cartes, coupes ou forages virtuels. L'heure est désormais à l'intégration de nouvelles données, avec le projet Trans-Clas, lancé en 2014. Piloté par le BRGM et l'Ademe, il est dédié aux réservoirs clastiques (réservoirs argilo-gréseux dans le bassin parisien, le fossé rhénan...). À terme, Thermo2Pro a également vocation à intégrer les données d'autres aquifères exploités par des réseaux de chaleur (le Dogger) ou potentiellement exploitables (Albien, Lusitanien...).

### **3. Géothermie haute énergie : le BRGM, acteur majeur dans l'arc antillais**

Le contexte volcanique de la zone Caraïbe est favorable à l'exploitation de la géothermie haute-énergie. Spécialiste « historique » de cette énergie, le BRGM est impliqué – aux côtés de ses filiales Géothermie Bouillante et CFG Services – dans de nombreuses opérations, notamment d'exploration, sur tout l'arc antillais. Ses travaux s'inscrivent dans l'objectif du Grenelle de l'environnement de 50 % de production électrique en outre-mer grâce aux énergies renouvelables à échéance 2020.

Après l'implantation d'une première unité de production en 1986 (réhabilitée en 2013), puis d'une seconde en 2004, la centrale géothermique de Bouillante (capacité 15 MWe), en Guadeloupe, produit aujourd'hui plus de 6 % (80 GWh) de la consommation électrique totale de l'île. Gérée par Géothermie Bouillante (BRGM 97,8 % / EDF 2,2 %), la centrale exploite un réservoir géothermal alimenté par l'infiltration d'eaux de mer et de pluie dans le sous-sol volcanique autour du site de Bouillante. Puisée par forage à environ 1 000 m de profondeur, l'eau, qui s'est réchauffée en circulant en profondeur pour atteindre 250°C, produit de la vapeur entraînant, dans chaque unité, une turbine reliée à un alternateur. Expérience unique en France, susceptible d'être reproduite en zones volcaniques similaires, Géothermie Bouillante produit également une électricité 2 fois moins coûteuse que celle issue des centrales au fioul, générant d'importantes

économies pour le service public d'électricité (58 millions d'euros cumulés depuis 2005).

Outre divers travaux de R&D ayant notamment permis, par stimulation thermique, d'améliorer la productivité d'un puits et de mettre en évidence d'autres zones à fort potentiel géothermique, le BRGM s'attache à mesurer l'impact de l'exploitation géothermique sur la ressource et l'environnement. Il a ainsi mis en place un suivi multi-méthodes très novateur combinant mesures de températures et de pression sur les forages, réseau de surveillance sismologique, micro-gravimétrie, interférométrie radar et thermométrie des sols, suivi géochimique des fluides... et réalisé une modélisation hydrodynamique et thermique du réservoir. Ces travaux ont mis en évidence le caractère peu impactant de la centrale sur l'environnement et souligné la pérennité du réservoir, autorisant une extension de son exploitation. Un projet de troisième unité est en recherche de financement, Géothermie Bouillante disposant déjà de l'autorisation de réaliser de nouveaux forages d'exploration.

Par ailleurs, des travaux d'exploration ont été lancés au début des années 2000 puis repris en 2010 en Martinique, avec l'Ademe, la Région, le Syndicat mixte de l'électricité en Martinique et l'appui de fonds européens FEDER. Les investigations ont porté sur les secteurs de la Montagne Pelée, des Anses d'Arlet, du Lamentin et des Pitons du Carbet, permettant d'approfondir la connaissance de la ressource géothermale. Un comité de pilotage élargi a été constitué pour assurer le suivi de la démarche. Des travaux similaires sont conduits en Guadeloupe, notamment dans le secteur de Vieux Habitants, afin d'identifier d'éventuelles ressources au-delà de la zone de Bouillante.

Entre la Guadeloupe et la Martinique, l'île de la Dominique (membre du Commonwealth), dispose d'un potentiel géothermique supérieur à celui de Bouillante en Guadeloupe. C'est ce qu'ont mis en évidence les recherches menées dans le cadre du programme « Géothermie Caraïbes », projet de coopération internationale « Interreg » coordonné par la Région Guadeloupe et dont la phase 2 a débuté en 2014. Après des travaux exploratoires réalisés par le BRGM et sa filiale CFG Services, deux zones à fort potentiel ont été identifiées : la Soufrière, à l'extrémité sud de l'île, et Wotten Waven, dans

la vallée du Roseau. Des forages d'exploration, menés dans cette dernière en 2013, ont confirmé la présence d'un réservoir d'une température de plus de 250 °C à moins de 1 000 m de profondeur. La ressource de la Dominique est telle qu'elle pourrait satisfaire l'ensemble des besoins propres de l'île et alimenter la Guadeloupe et/ou la Martinique via des câbles sous-marins.

Le BRGM, pionnier en ce domaine, est présent d'un bout à l'autre de la chaîne, impliqué à toutes les étapes : études techniques sur la ressource et son exploitation, études d'analyse de cycle de vie (ACV), actions d'information et de concertation...

#### **4. Les EGS : se détacher des contraintes géologiques**

L'établissement a également engagé depuis plusieurs années des recherches visant l'exploitation généralisée de la température des roches profondes peu perméables, quel que soit le contexte géologique : sédimentaire, volcanique ou socle. L'objectif est de développer l'exploitation géothermique pour les températures comprises entre 130 °C et 180 °C, à des profondeurs de 4 à 6 km.

Les incertitudes quant à la perméabilité des massifs rocheux (perméabilité et porosité hétérogènes et localisées principalement dans les fractures et/ou failles), la quantité de fluide en place et les conditions de sa recharge impliquent de développer de nouvelles technologies pour atteindre une ressource économiquement suffisante en termes de débit et température, apte à une exploitation directe pour la production de chaleur, de froid ou d'électricité. C'est l'objet des EGS dédiées au développement d'architectures de puits (profondeur, orientation) et de stratégies de stimulation thermique et hydraulique et/ou chimique de ceux-ci, avec pour finalité d'améliorer leur injectivité et leur productivité, en augmentant localement la perméabilité et la connexion des puits aux réseaux fracturés naturellement perméables. Des recherches portent également sur le développement de l'échangeur souterrain et son évolution thermique, via des travaux de modélisation thermo-hydro-mécanique des stimulations, des mesures de la micro-sismicité induite, la modélisation

hydro-thermique du massif rocheux profond et un ensemble d'études des phénomènes physico-chimiques, etc.

Le développement de ces technologies représente un enjeu majeur dans la contribution future de la géothermie au mix énergétique en Europe et dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour mener ses recherches, le BRGM dispose d'un démonstrateur à Soultz-sous-Forêts (fossé rhénan). Unique au monde, l'installation, qui puise de la chaleur (jusqu'à 200 °C) entre 4 500 et 5 000 mètres, produit de l'électricité depuis 2010.

#### **5. Agir pour le développement de la filière**

Normes, guides techniques, formations, labels... : le BRGM est impliqué à tous les niveaux de la structuration et du développement de la filière géothermique.

L'important développement de la géothermie sur pompe à chaleur imposait effectivement la mise en place de normes pour encadrer les solutions techniques mises en œuvre : circuit fermé (sondes géothermiques verticales, capteurs horizontaux, corbeilles...), ou ouvert (forages d'eau).

En 2007, le BRGM, en collaboration avec le Syndicat des foreurs d'eau et géothermie (SFEG), a lancé une démarche de normalisation sur la mise en œuvre de la sonde géothermique verticale (norme NF X10-970, homologuée en 2010 et révisée en 2011).

En 2009, une démarche visant la normalisation « produit » sur la boucle de sondes géothermiques a été lancée, aboutissant à une homologation (NF X10-960) en mars 2013. En 2012, un groupe de travail a été mis en place pour réviser la norme NF X10-999 sur le forage d'eau de géothermie (homologation prévue en 2014). La même année, un groupe de travail associant de nombreux partenaires techniques et scientifiques était réuni autour d'un projet de norme (PR NF X10-950) sur le coulis géothermique de scellement des sondes géothermiques (homologation visée pour 2016). Actuellement, le BRGM se rapproche de l'Afnor afin d'étudier les possibilités de développement de ces normes à l'Europe et à l'international.

De plus, en partenariat avec l'Ademe, le BRGM a piloté la réalisation d'un guide pour la mise en œuvre des pompes à chaleur géothermiques sur aquifères, publié en 2008. Ce document s'adresse aux maîtres d'ouvrage, bureaux d'étude et autres organismes concernés par le chauffage géothermique sur pompe à chaleur. Le succès de sa diffusion a conduit à le réviser et le compléter avec la publication d'un guide pour les pompes à chaleur géothermiques sur champs de sondes, publié en 2012.

Quatre modules de formation continue, mis en place par le BRGM et l'Ademe, sont par ailleurs proposés en 2014. Ils s'adressent aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et à tous les professionnels concernés par le montage d'opérations intégrant la géothermie :

- Avantages, usages et filières d'application de la géothermie : introduction à la géothermie destinée à un public très large (1,5 jour).
- Montage et conduite de projet sur bâtiments collectifs et tertiaires (géothermie sur pompes à chaleur) : formation destinée aux assistants à maîtrise d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'études techniques, cabinets d'architectes, de conseils et d'expertise (3 jours).
- Champs de sondes, outils et méthodes : module de formation au pré-dimensionnement des champs de sondes géothermique verticales et d'initiation aux principaux outils de dimensionnement dynamique, destiné aux bureaux d'études (3 jours).
- Formation foreurs RGE : une formation qualifiante donnant accès à une reconnaissance RGE (reconnu garant de l'environnement) sera proposée aux foreurs en 2015, après un test auprès des entreprises de forage adhérent à la charte Geoqual (charte d'engagement qualité mise en place en région Centre avec l'appui du BRGM) en fin d'année 2014.

La démarche d'engagement qualité des entreprises spécialisées dans la réalisation de sondes géothermiques en France a été lancée par EDF en 2001, avant de passer sous pilotage BRGM en 2005. Ce travail a abouti, en 2007, à la création d'un label : Qualiforage. Sa gestion est assurée depuis 2013 par l'organisme de qualification QUALIT'ENR. L'objectif de ce transfert est de rendre Qualiforage compatible avec les

règles définies dans la charte relative à la « reconnaissance garant environnement ». À terme, Qualiforage devrait ainsi être éligible à la future éco-conditionnalité des aides publiques, annoncée pour le 1<sup>er</sup> juillet 2014 et portant sur la mise au point de deux qualifications dédiées au forage : Qualiforage « module géothermie sur sonde » et Qualiforage « module géothermie sur nappe ». Depuis 2001, le BRGM a formé près de 200 foreurs au dispositif Qualiforage et a assuré plus de 170 contrôles de chantier.

Enfin, l'information des différents publics concernés par la géothermie reste une priorité. C'est pourquoi le site [www.geothermie-perpectives.fr](http://www.geothermie-perpectives.fr) a fait peau neuve cette année. Diffuser une information de qualité sur la géothermie et ses différents acteurs et animer la filière géothermique française, telles sont les deux ambitions de ce site web, fruit de l'accord-cadre mis en place par le BRGM et l'Ademe en faveur du développement de la géothermie. Proposant une information générique sur la géothermie et ses usages ainsi qu'un ensemble de conseils pratiques pour la réalisation de projets, le site présente notamment un atlas du potentiel en région : cartographies régionales des potentiels géothermiques, avec des données actualisées sur les acteurs locaux, l'actualité et les événements régionaux, des exemples d'opérations... La rubrique « Actualité » permet de suivre les alertes et newsletters issues d'un travail quotidien de veille, avec notamment des focus sur de nouvelles opérations, de nouvelles technologies. La découverte pas à pas des étapes de réalisation d'un projet de géothermie, depuis l'analyse des besoins énergétiques jusqu'à l'entretien de l'installation, est désormais possible en ligne via un parcours projet. Le parcours « Comment ça marche ? » permet par ailleurs de découvrir les technologies mobilisées depuis la recherche de la ressource jusqu'à sa consommation : principe des pompes à chaleur, échangeurs géothermiques, réseaux de chaleur, planchers chauffant... Des informations pour les professionnels sur les parcours de formation sont également disponibles dans la rubrique « Se former ». Enfin, les enseignants et scolaires de collèges et lycées disposent d'un ensemble de ressources pédagogiques sur la géothermie et la découverte de ses métiers à travers des interviews de professionnels. ■