

99 % de la masse de la terre > 1000 °C

La Géothermie, le retour d'une solution efficace

Dossier coordonné par Jean-Marie Souchet (président AICVF Région Poitou Charentes Haute Vienne et membre du Comité revue CVC) assisté par Philippe Barritault (retraité ADEME et membre bureau et trésorier AICVF Région Poitou Charentes Haute Vienne)

La géothermie, véritable ressource inépuisable enfouie sous nos pieds, prend une place croissante dans le paysage énergétique français. Elle offre aujourd'hui des perspectives prometteuses pour l'avenir du pays. Dans le cadre de la transition énergétique et des objectifs fixés par la réglementation environnementale RE 2020, la géothermie émerge comme une alternative efficace et durable pour le chauffage, la climatisation et même la production d'électricité.

Ce dossier spécial consacré à la géothermie explore en détail les différentes facettes de cette ressource, de sa capture à différentes profondeurs jusqu'à son utilisation dans diverses applications, y compris le concept de «géocooling». Vous découvrirez ainsi comment la géothermie de surface, à travers des sondes, des nappes ou des pieux, trouve sa place dans la structure même des bâtiments, offrant un potentiel considérable en matière d'efficacité énergétique.

Au fil des articles, vous plongerez dans l'univers de la géothermie, en explorant les méthodes de forage, les applications de moyenne et haute importance, ainsi que les aspects réglementaires essentiels pour assurer une utilisation optimale de cette ressource. Vous comprendrez comment une étude préalable, accompagnée d'un hydrogéologue, est cruciale pour évaluer la faisabilité d'un projet géothermique, tout en garantissant la

disponibilité à long terme de cette précieuse ressource. Mais la géothermie ne se limite pas à la technologie. Ce dossier met également en lumière l'importance de la formation et des qualifications nécessaires pour les acteurs du secteur, tels que les foreurs, les bureaux d'études et les entreprises spécialisées. Vous découvrirez des exemples concrets de projets réussis, des bonnes pratiques, et des témoignages d'experts, enrichissant ainsi votre compréhension de la géothermie sous toutes ses facettes.

Nous passerons également en revue les principaux acteurs impliqués dans le développement de la géothermie en France, du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) à l'ADEME, en passant par les ALEC (Agence Locale de l'Énergie et du Climat), les CRER (Centre Régional des Énergies Renouvelables), l'AFPG (Association Française des Professionnels de la Géothermie), et le réseau des Chargés de Mission Énergies Renouvelables.

Enfin, pour clore ce dossier, nous vous proposerons une bibliographie complète et une liste d'ouvrages ainsi que des sites internet de référence pour approfondir vos connaissances sur la géothermie. Préparez-vous à plonger dans les profondeurs de cette source d'énergie renouvelable passionnante qui offre des perspectives prometteuses pour l'avenir énergétique de la France.

La géothermie dans le bilan énergétique national et perspectives

(feuille de route nationale de la géothermie - ADEME) - les aides – Positionner le discours & tendance du marché

➔ Au-delà des efforts de sobriété et d'efficacité énergétiques, la décarbonation de notre société devient aujourd'hui de plus en plus nécessaire, couplée à celle d'une moindre dépendance énergétique nationale mise en exergue avec le conflit Ukraine/Russie. Face à ces enjeux, la géothermie avec ses différentes filières et ses acteurs a de nombreux atouts à faire valoir et doit être davantage mise à contribution dans le mix énergétique français.

Un contexte et des enjeux favorables à l'essor de la géothermie ...

En effet, en France, la chaleur représentait plus de 41 % de la consommation finale d'énergie en 2021. Cette chaleur reste aujourd'hui majoritairement produite à partir d'énergies fossiles importées (notamment gaz naturel, fioul). En 2021, la consommation finale brute des énergies renouvelables thermiques représentait 180 TWh/an avec une contribution respective de 4,8 TWh/an pour la géothermie de surface et de 2 TWh/an pour la géothermie profonde.

La production brute d'électricité renouvelable totale en 2021 s'élevait au total à 121 TWh. Même si la contribution de la géothermie profonde à la production d'électricité en métropole reste marginale avec seules deux installations industrielles en Alsace (Soultz sous Forêt et Rittershoffen), celle-ci peut espérer une place plus importante dans les outre-mers. En effet, de par leur contexte géologique et souvent volcanique, plusieurs territoires ultramarins présentent des potentialités intéressantes pour y développer des projets de géothermie électrogène : la Guadeloupe et la Martinique, la Réunion et Mayotte et éventuellement la Nouvelle Calédonie et la Polynésie Française. En Guadeloupe, la centrale géothermique de 15 MW de Bouillante, contribue actuellement pour 6-7 % de la production d'électricité de l'archipel guadeloupéen. Cette centrale, mise en service en 1986, est actuellement en cours d'extension.

Produire la chaleur et l'électricité à partir d'énergies renouvelables et en particulier à partir de la géothermie offre donc l'opportunité de réduire les émissions de gaz à effet de serre associés et de relocaliser la production d'énergie en valorisant des ressources renouvelables et locales.

Que ce soit en métropole ou dans les territoires d'outre-mer, pour des usages chaleur, froid ou électricité, la géothermie et ses diverses formes possèdent un potentiel immense et encore largement sous exploité au plan national. La programmation pluri-annuelle de l'énergie (PPE2) a fixé les



La centrale-geothermique de Bouillante

© BRCM

cibles suivantes de production de chaleur renouvelable en métropole à l'horizon 2028 :

- Géothermie de surface : 5 à 7 TWh
- Géothermie profonde (chaleur) : 4 à 5,2 TWh

La PPE3 en cours de discussion prévoit des objectifs encore plus ambitieux pour la filière.

Quant aux zones non interconnectées (ZNI), les différentes PPE qui leur sont dédiées ont pour ambition de mettre ces départements et territoires sur la voie de l'autonomie énergétique dès 2030. En particulier, en Guadeloupe, il est attendu une augmentation de capacité de 30 MW de puissance installée en géothermie.

Une volonté politique affichée avec un plan d'action national pour booster la géothermie

Les enjeux cités précédemment ont rendu indispensable l'accélération du **développement de la géothermie en France**. Ainsi, le ministère de la Transition Ecologique et l'ADEME ont réfléchi, fin 2021, à l'élaboration d'une **feuille de route nationale sur la géothermie** traitant de l'ensemble de l'activité



(géothermie de surface, géothermie profonde, production de chaleur et de froid, production d'électricité, métropole et outre-mer, R&D, communication, formation...). L'exercice avait également pour ambitions d'associer toutes les parties prenantes qui le souhaiteraient (professionnels, acteurs institutionnels, représentants des ministères, acteurs du monde associatif...) pour élaborer un document réellement **opérationnel** avec des actions concrètes identifiées à mener en priorité et sur un **horizon de dix à quinze ans** et pour disposer également d'un **outil d'animation et de pilotage** qui permette d'évaluer régulièrement l'avancement et la mise à jour de cette feuille de route.

Les travaux ont conduit à un **plan d'action national** géothermie définissant une **cinquantaine de propositions d'actions structurantes** pour la filière et couvrant les champs suivants :

- Le soutien financier des porteurs de projets et ce, sur tous les segments de marché, particuliers, collectivités et entreprises.
- L'accompagnement technique des porteurs de projets.
- La réglementation sous-sol et autres réglementations.
- L'animation et la structuration de la filière.
- La montée en compétence des différents acteurs et intervenants sur un projet.
- L'innovation et la R&D.

Un soutien public qui évolue avec le contexte

Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses actions ont été menées en termes d'incitation financière, de sensibilisation, de formation, pour promouvoir cette filière. Toutefois, le paysage et l'écosystème de la **géothermie** en France ont beaucoup évolué ces dernières années. Son animation s'est renforcée, de nouveaux sujets ont émergé, d'autres ont pris plus d'importance (le fonds chaleur, les fonds de garantie, l'évolution de la réglementation minière, la structuration d'une offre française pour la géothermie à l'export...), enfin des exigences nouvelles liées à la politique énergétique se sont exprimées comme par exemple la massification souhaitée de la géothermie de surface en région, le développement attendu des projets de géothermie profonde chaleur dans d'autres régions que l'Île de France, ou ceux de production d'électricité géothermique dans les outre-mer. Dédié aux secteurs du résidentiel collectif, tertiaire, industriel et agricole, le **fonds chaleur** créé en 2009 et géré par l'ADEME, a permis le déploiement massif des installations de production de chaleur renouvelable et des réseaux de chaleur sur le territoire français. Sur la période 2009 à 2022, cette aide à l'investissement a soutenu plus de 7100 projets pour un montant de 3,68 Mds € d'aides sur 12,4 Mds € d'investissement et une production annuelle de 42,6 TWh d'EnR&R de chaleur. La géothermie de surface et profonde ont contribué à ces résultats pour 8 % de la production totale de chaleur renouvelable et 8 % du montant total des aides attribuées (plus de 885 installations "géothermie" ont reçu au global 280 M€ de subventions). Avec cet effet levier confirmé, le dispositif a vu son budget renforcé significativement passant de 370 M€ en 2022 à 595 M€ en 2023. Outre le soutien financier à la réalisation des opérations, le fonds chaleur permet également d'attribuer des aides à la

décision pour mener les études nécessaires à la bonne mise en œuvre des projets.¹

Dans l'optique de doubler d'ici 2025 le nombre de pompes à chaleur géothermiques chez les particuliers, l'aide à l'installation de cet équipement a été revalorisée à 5000 €² depuis mars 2023 quel que soit le niveau de revenu des ménages. Ce coup de pouce « chauffage » est cumulable avec d'autres aides comme l'ECO PTZ ou MaPrimeRénov' et peut ainsi permettre de supporter jusqu'à 90 % du coût de l'installation d'une pompe à chaleur géothermique.

Tout récemment, la Commission européenne a adopté le réaménagement du fonds de garantie dédié aux opérations de géothermie profonde en métropole ouvrant ainsi la voie à de nouvelles opportunités de développement de projets notamment hors région Ile-de-France (en Nouvelle Aquitaine, Occitanie, PACA, Hauts-de-France...). Ce fonds, mis en œuvre pour une durée de 10 ans, accordera des garanties pour les opérations de forage de projets de géothermie profonde ayant une capacité d'environ 30 MW. Ces garanties auront pour but de couvrir le risque lié au degré élevé d'incertitude de la ressource géothermale profonde lors de forages. Le montant maximum d'indemnisation par projet s'élèvera à 17 millions d'euros et sera payé aux porteurs de projets en cas d'échec sur la qualité ou la quantité de la ressource géothermale.

Dans les outre-mer, en réponse à l'article 215 de la LTECV qui précise : « Une stratégie nationale de développement de la filière géothermie dans les départements d'outre-mer est élaborée », les pouvoirs publics et les parties prenantes ont initié différentes actions à conduire en priorité, en particulier :

- La création d'une instance de concertation au niveau national afin de lever les points de blocage au développement de la géothermie en outre-mer sur les plans réglementaires, politiques et administratifs.
- La création d'une instance de concertation au niveau national afin de lever les points de blocage au développement de la géothermie en outre-mer sur les plans réglementaires, politiques et administratifs.
- La mise à jour du modèle de couverture du risque géologique pour sécuriser les projets de géothermie profonde en phase exploration.
- La mise en place du Centre Caraïben d'Excellence sur la Géothermie (CECG) qui vise à accompagner les territoires de la Caraïbe dans l'intégration de centrales de géothermie et à valoriser les savoir-faire et les compétences de la filière. ●

1. <https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/2023/etude-faisabilite-geothermie-surface-aerothermie>
<https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/2023/installations-production-chaleur-froid-a-partir-geothermie-surface>
<https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/2023/installations-production-chaleur-a-partir-geothermie-profonde>
<https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/2023/installations-production-chaleur-froid-a-partir-boucle-deau-temperée>

2. Auparavant, l'aide était de 4 000 € pour les ménages les plus modestes et de 2500 € pour les ménages aux revenus intermédiaires et supérieurs.

Astrid Cardona Maestro
Ingénieure Fonds chaleur Géothermie
Service Chaleur Renouvelable ADEME



Différentes sources géothermiques pour de nombreux domaines d'application

➔ Le principe général de la géothermie est de capter l'énergie disponible sous la surface de la terre, au droit des besoins, et en adéquation avec ces derniers. Elle peut être exploitée pour de nombreuses applications. La géothermie permet de produire différents types d'énergie en fonction de la température de la chaleur et des calories captées dans le sous-sol.

La géothermie, une ressource naturelle, locale et pérenne pour tous

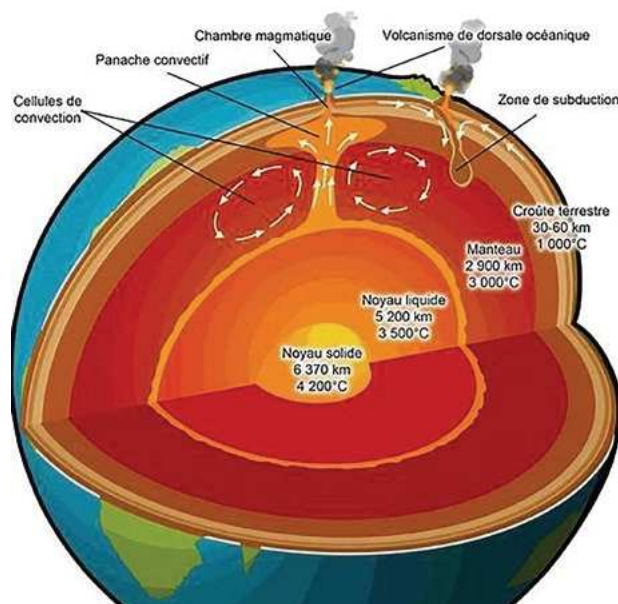
La géothermie est l'énergie intrinsèque de la Terre dont 99 % de la masse est à plus de 1 000 °C. L'énergie interne totale de la terre est gigantesque (2×10^{18} térajoules). Cette énergie renouvelable, accessible 24 h sur 24 et à faible émission de gaz à effet de serre (GES) est source d'indépendance énergétique.

D'une manière générale, les variations de température saisonnières sont amorties dans les premiers mètres du sous-sol. De 10 à 100 m la température est stable et idéale pour le fonctionnement d'une pompe à chaleur, pour la production de chaud et de froid. La température s'accroît ensuite avec la profondeur. La température des roches augmente en moyenne de 3 °C tous les 100 m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m.

Les ressources sont fortement dépendantes du contexte géologique, de la nature du sous-sol et de la circulation d'eau. En fonction des puissances mobilisées, des profondeurs et de la localisation des captages, il existe donc différentes formes de géothermie et différents usages associés. Les typologies usuelles de la géothermie sont :

- Très basse énergie, assistée par pompe à chaleur ou en usage direct (simple circulation dite en géocooling) ;
- Basse énergie (ou basse température), exploitant la chaleur de gisements d'eau situés à des profondeurs allant jusqu'à environ 2 000 m, pour des températures généralement comprises entre 30 °C et 90 °C ;
- Haute énergie (ou haute température, aussi appelée haute enthalpie), concernant les fluides dont les températures sont supérieures à 150 °C. Cette dernière est également considérée comme électrogène pour des températures entre 180 et 350 °C.

En pratique et pour faire simple, on distingue aujourd'hui deux notions :



Températures du globe terrestre et géothermie

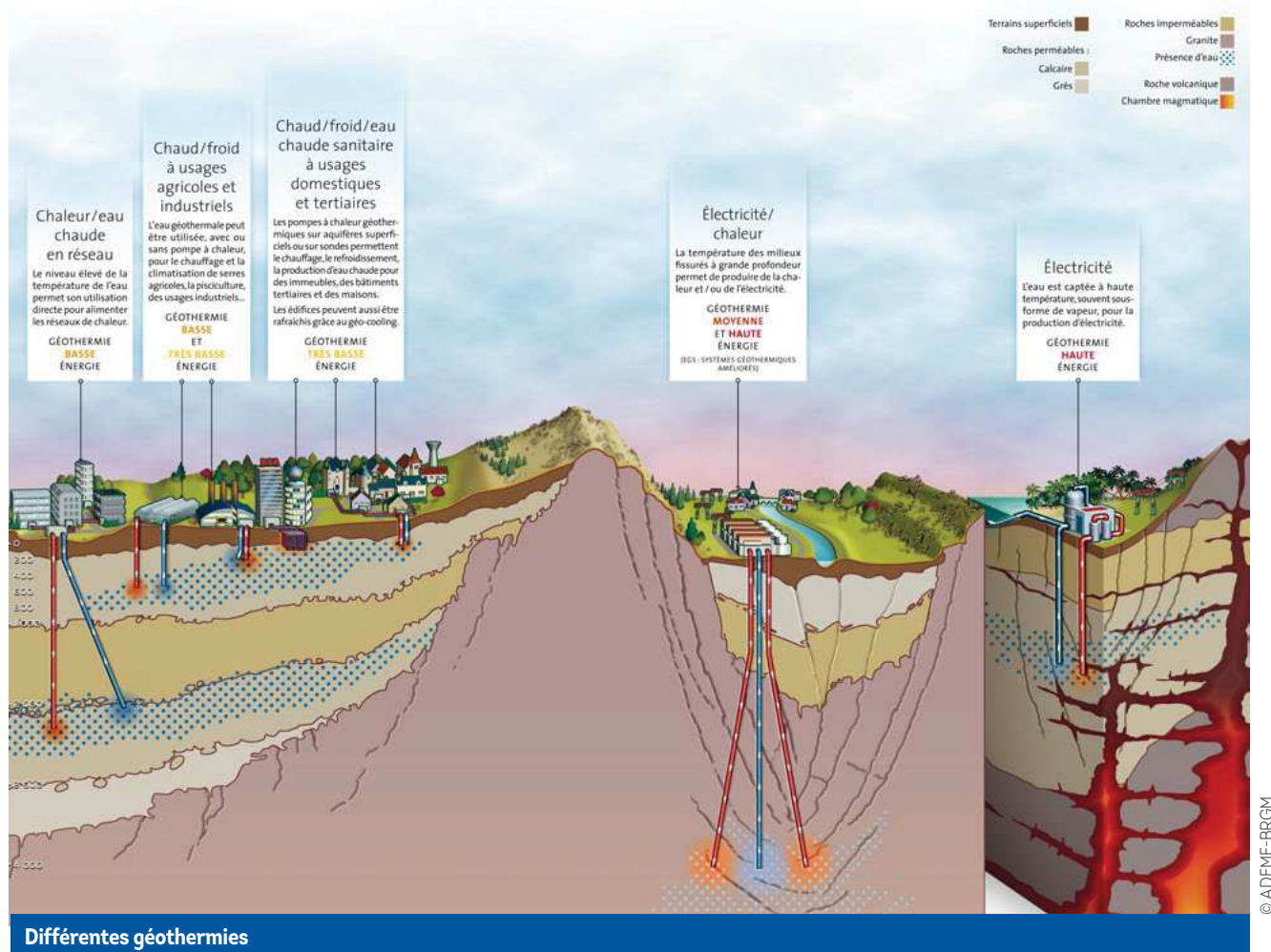
• La géothermie de surface, jusqu'à 200 m de profondeur correspondant à la très basse énergie.

Plus accessible, sur environ 90 % du territoire, et plus répandue, elle consiste à exploiter pour des besoins en chauffage, en eau chaude ou en fraîcheur, la température des roches et des nappes d'eau souterraine à moins de 25 °C via des forages avec un système de pompe à chaleur ou parfois en direct par simple circulation (géocooling).

La géothermie de surface peut être mobilisée à l'échelle d'un bâtiment (opération dédiée) ou sur un ensemble de bâtiments (îlots, écoquartiers) via des réseaux de chaleur et de froid (réseaux 4 tubes) ou via des boucles d'eau tempérée (voir article BETG paru dans CVC 920 de juillet 2023).

• La géothermie profonde regroupant les deux derniers types.

L'exploitation plus profonde permet de disposer en basse énergie de température d'eau entre 30 et 90 °C. La température élevée permet son exploitation directe pour des >>>



réseau de chaleur. La géothermie profonde peut également être utilisée pour des applications industrielles (procédés utilisant la vapeur, l'air chaud ou l'eau chaude), des applications agricoles (chauffage de serres, pisciculture, séchage), des applications aquatiques (piscines, centres nautiques, thermes).

L'aquifère le plus utilisé en France est celui du Dogger (Jurassique moyen), situé entre 1 600 et 1 800 m de profondeur sous Paris et sa région. Le bassin Aquitain représente, après le bassin Parisien, la deuxième ressource d'énergie géothermale en France métropolitaine. Suite au choc pétrolier, plusieurs forages profonds destinés à produire de l'eau chaude y ont été réalisés entre 1 000 et 2 000 m de profondeur. La géothermie de haute énergie permet quant à elle la production d'électricité via des turbines à vapeur ou cycles organiques de Rankine (ORC) et la production de chaleur, voire les deux couplées (cogénération). Pour la production d'électricité, deux sites existent en France. Les ressources valorisables sont situées :

- Dans les zones volcaniques comme pour la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe. Cette dernière, de 15 MW de puissance est en activité depuis 1986 et fournit 7 % de l'électricité de l'île à partir de forages à environ 1 000 m de profondeur.
- Dans des zones de fracturation à des profondeurs de plusieurs milliers de mètres comme c'est le cas pour la centrale de Soultz-sous-Forêts dans le Bas-Rhin, en Alsace. En service depuis 2016, après 30 ans de recherche, cette dernière est en capacité de produire 12 GWh d'électricité par an, correspondant à la consom-

mation électrique d'environ 3 000 logements grâce à des forages à 5 000 mètres de profondeur qui permettent d'exploiter un fluide à 200 °C et de le réinjecter dans le sous-sol. Cette concession est la première exploitation géothermique haute énergie en Métropole.

Un large panel de solutions pour la géothermie de surface

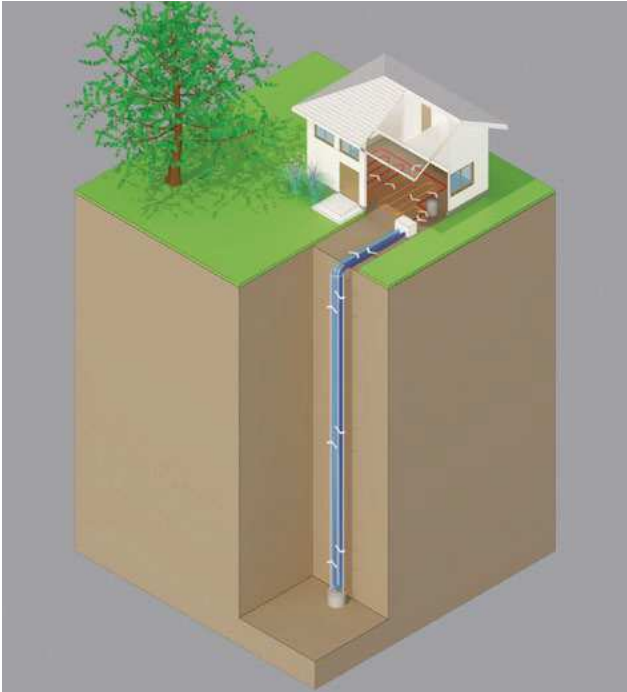
Il existe de nombreux dispositifs pour récupérer les calories ou frigorifiques dans le sol.

L'exploitation de la géothermie, c'est déjà l'utilisation de puits canadien / puits provençaux pour la ventilation et l'aération des bâtiments. C'est un système qui puise l'air extérieur et se sert de la géothermie pour le réchauffer ou le rafraîchir, selon les besoins. C'est un échangeur géothermique utilisant l'air comme fluide caloporteur, dans le but de chauffer ou de refroidir.

Différents types de capteurs peuvent valoriser la chaleur du sous-sol grâce à un fluide caloporteur qui prélève ou restitue l'énergie du sous-sol par conduction en circulant en circuit fermé dans des tuyaux : sondes géothermiques verticales, capteurs horizontaux, capteurs compacts et géostructures énergétiques.

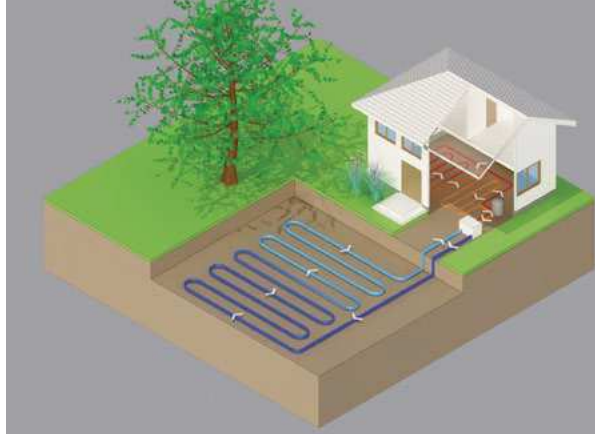
Les capteurs horizontaux sont constitués de tuyaux enterrés à plat à environ 70 cm sous la surface du sol.

Les capteurs compacts correspondent à des tuyaux contenant le fluide caloporteur qui peuvent être enterrés à 3,5 mètres de profondeur, enroulés en forme de spirales (corbeilles géothermiques) ou disposés sous forme d'une >>>



Sonde géothermique verticale

© ADEME-BRGM



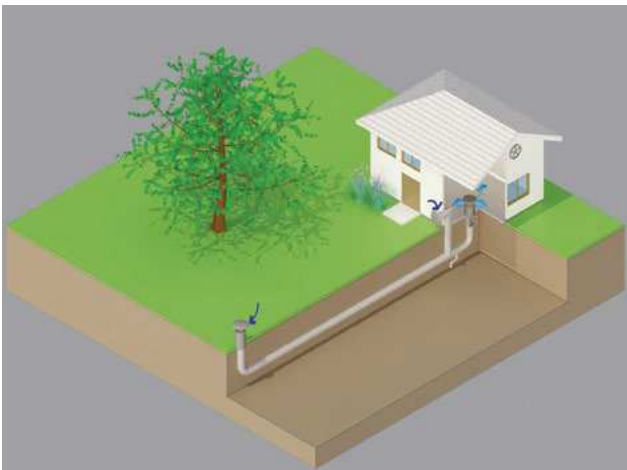
Capteurs horizontaux

© ADEME-BRGM



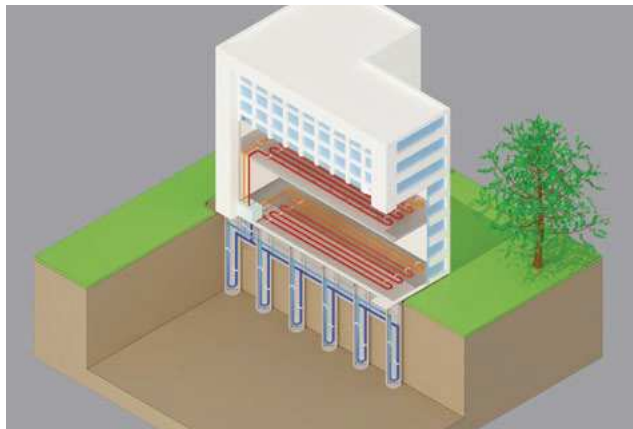
Corbeilles

© ADEME-BRGM



Puits canadien

© ADEME-BRGM



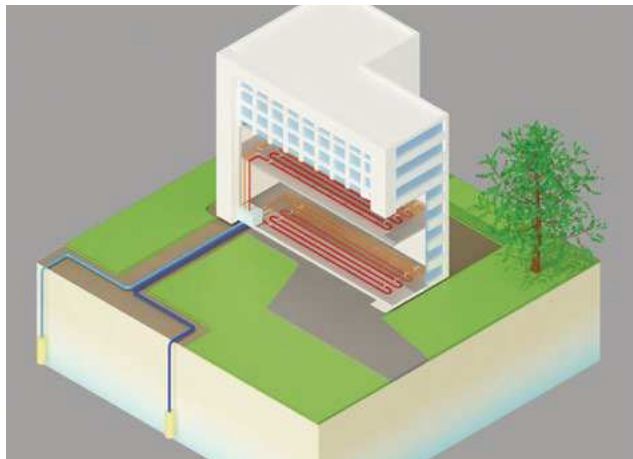
Pieux géothermiques

© ADEME-BRGM



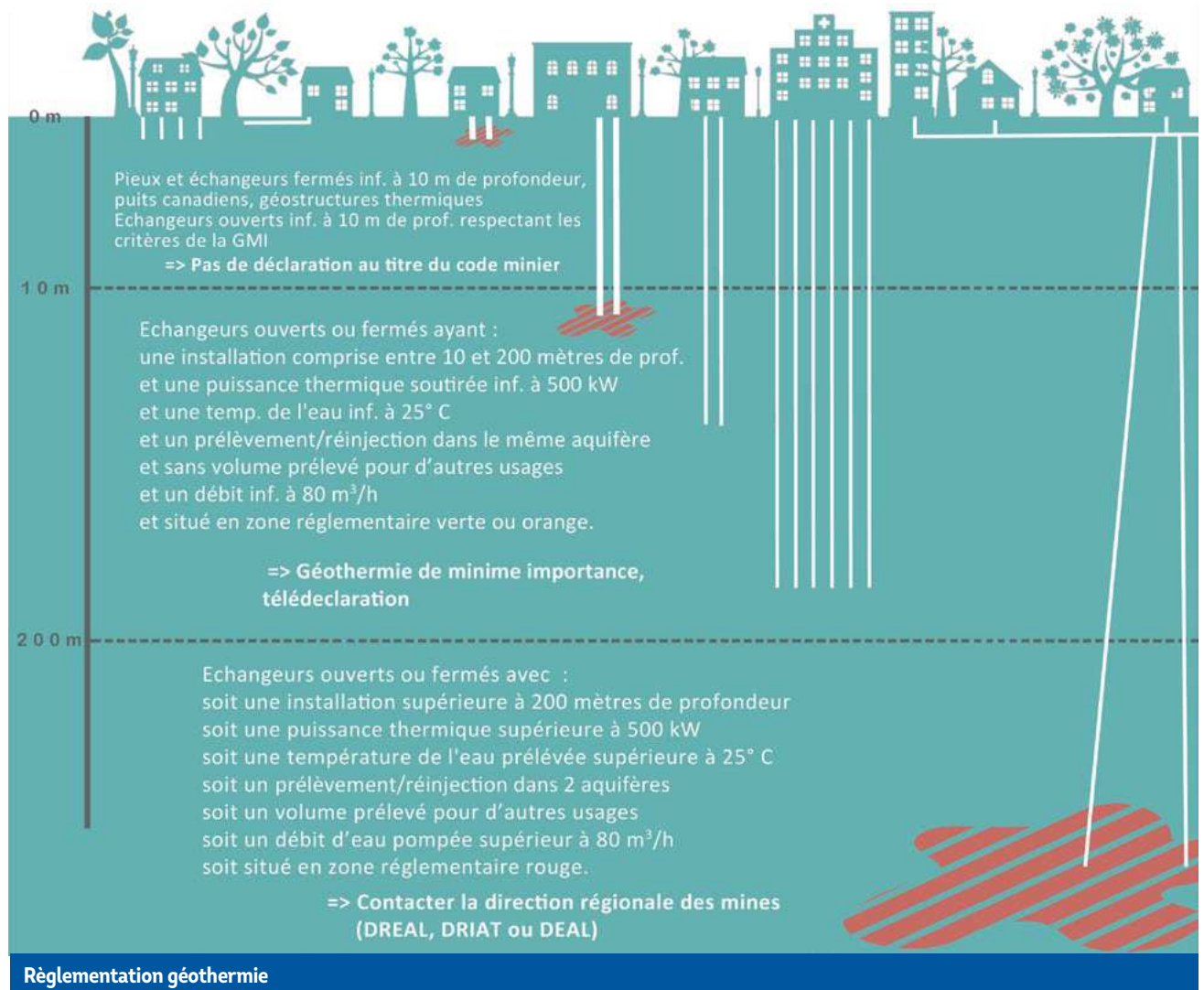
Mur géothermique

© AFPG



Sur nappe en boucle ouverte

© ADEME-BRGM



paroi verticale (mur géothermique).

Les géostructures énergétiques correspondent à des pieux, des parois moulées, dalles, semelles ou autres éléments en béton en contact avec le sol intégrant des tubes échangeurs de chaleur.

Les capteurs verticaux ou sondes géothermiques verticales correspondent à des tubes en U dans lesquels circulent un fluide caloporteur, placés et scellés dans un forage à une profondeur allant jusqu'à 200 m.

Il est également possible d'exploiter l'énergie des nappes d'eaux souterraines en bénéficiant, via un échangeur, de la stabilité de la température de l'eau autour de 15 °C et en ajustant le débit aux besoins grâce à des forages de captage et de réinjection en circuit ouvert sur le même aquifère.

Cadre réglementaire

Un cadre réglementaire permet d'accéder à la ressource géothermique tout en préservant l'environnement. Si le code minier s'applique de prime abord pour l'exploitation de la ressource géothermique, à défaut le code de l'environnement demeure.

En l'occurrence, ne relèvent pas du code minier, les puits canadiens, les dispositifs liés aux fondations (géostructures

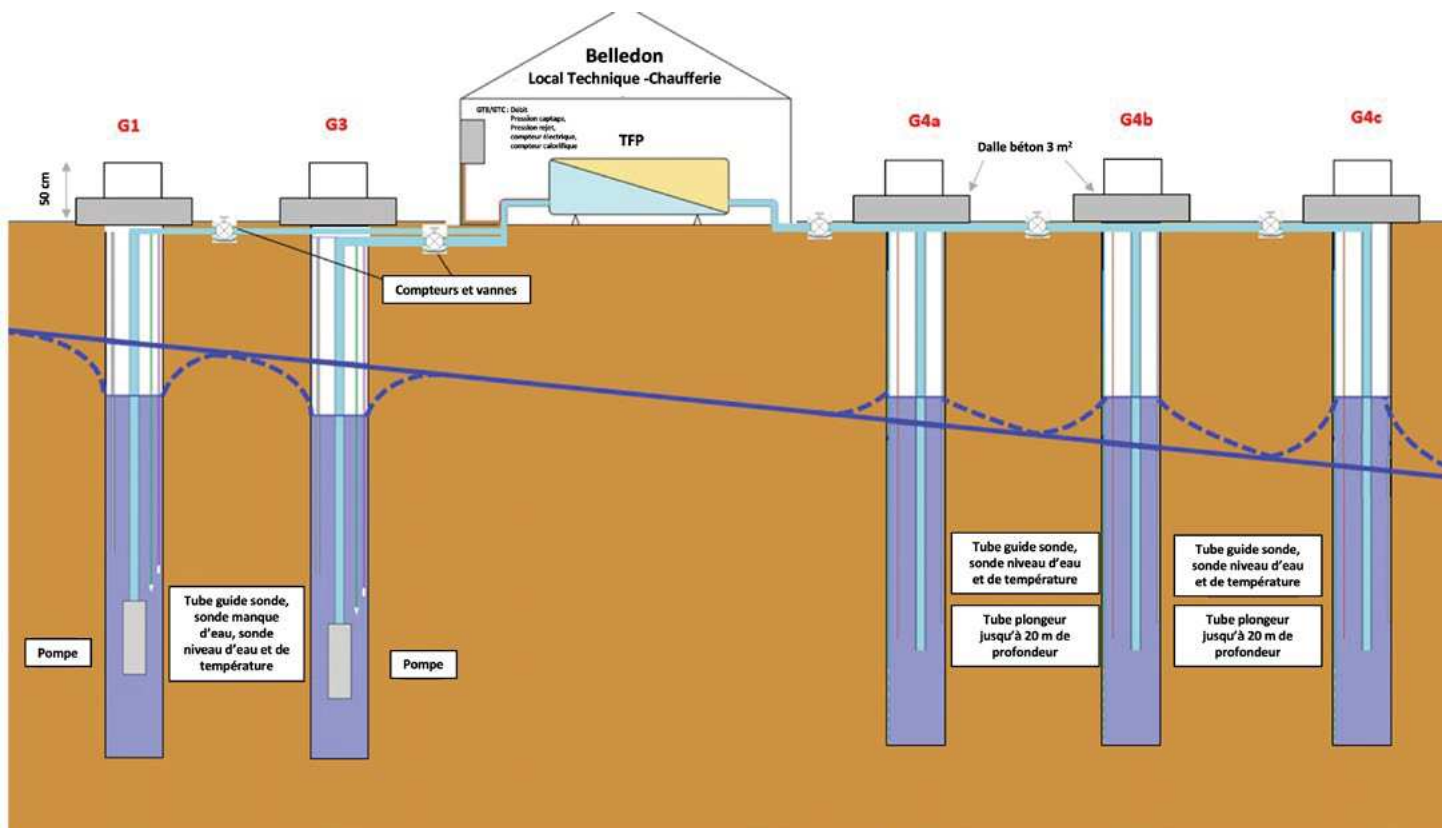
thermiques) et les ouvrages géothermiques respectant les limites suivantes :

- Moins de 10 mètres de profondeur ;
- Puissance inférieure à 500 kW ;
- Température d'eau prélevée inférieure à 25 °C ;
- Débit d'eau prélevée inférieur à 80 m³/h ;
- Totalité de l'eau prélevée et réinjectée dans la même nappe ;
- Non situés en zone rouge de la cartographie réglementaire de la Géothermie de Minime Importance (GMI).

GMI - déclaration

La Géothermie de Minime Importance (arrêté ministériel du 25 juin 2015) permet une démarche simplifiée avec une simple télédéclaration du projet quand il remplit les conditions suivantes :

- Puissance échangée avec le sous-sol et utilisée inférieure à 500 kW ;
- Ouvrages de moins de 200 m de profondeur ;
- Température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages inférieure à 25 °C ;
- Les eaux prélevées sont intégralement réinjectées dans le même aquifère ;
- Les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil



Dispositif Géothermie Belledone en boucle ouverte au Futuroscope pour le futur centre Aquatique AQUASCOPE et bâtiments



Raccordement du champ de sondes - Bénévot l'Abbaye (23)

d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du code de l'environnement (80 m³/h).

(Renvoi publication BRGM : <https://www.geotheirmies.fr/sites/default/files/inlinefiles/vademecum-GMI-Basse%20Def.pdf>)

Sur la base de l'évaluation de 9 risques géologiques (artésianisme, remontée de nappe, communication entre aquifère, évaporites, cavités, cavités minières, mouvements de terrains, pollution, biseau salé) et selon le type de capteurs (boucle ouverte ou fermée) et de leur profondeur (50-100-200 m), le territoire est découpé en trois zones en fonction de la capacité à pouvoir accueillir des projets de GMI :

- Des zones ne présentant pas de risques, dites « **vertes** » ;
- Des zones « **oranges** » dans lesquelles, en l'absence de

connaissances suffisantes ou compte tenu des risques déjà identifiés, il doit être joint à la déclaration l'attestation d'un expert agréé, qui garantit l'absence de risques graves du projet :

- Des zones à risque significatif, dites zones « **rouges** » où le projet ne pourra être réalisé qu'après autorisation de l'installation au titre du code minier.

Code minier - autorisations

Toute autre installation de géothermie ne répondant pas aux critères de la Géothermie de Minime Importance doit faire l'objet au titre du nouveau Code Minier (dernière modification en date du 14 avril 2022) d'une demande d'autorisation :

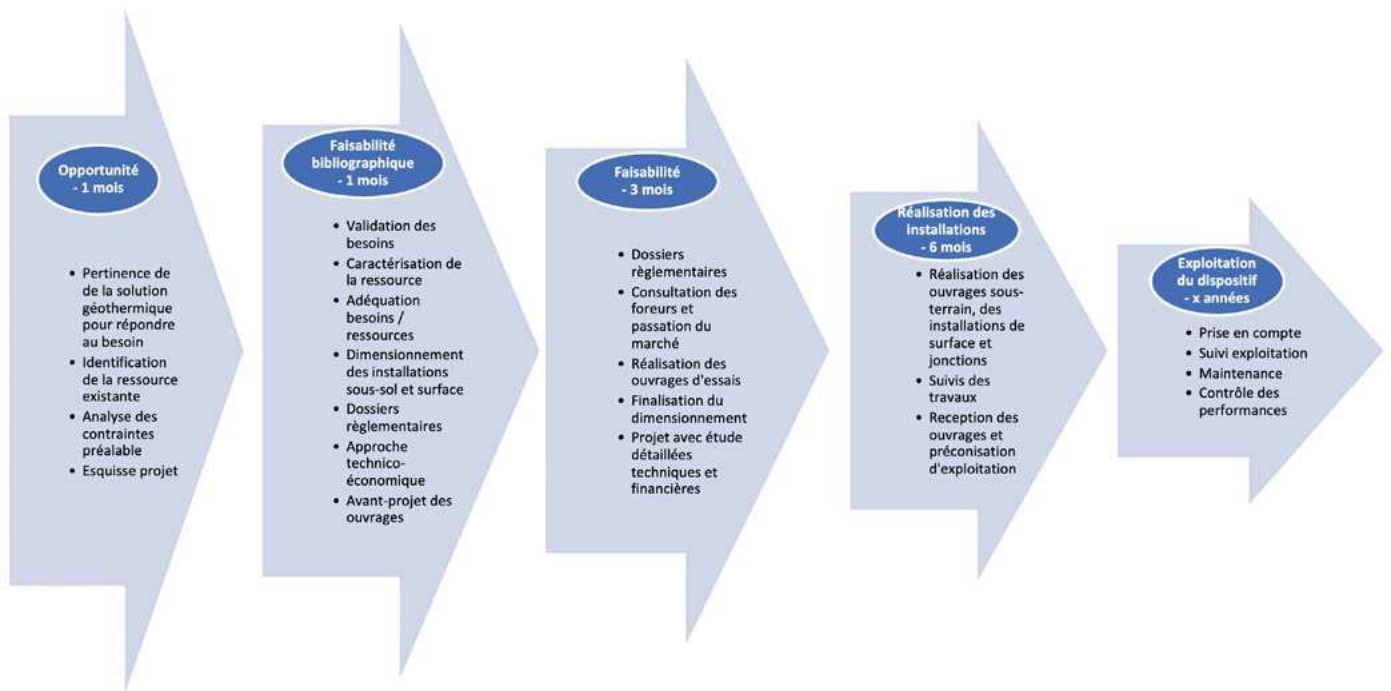
- De recherche de gîte géothermique (titre du décret 78-498 du 28 mars 1978),
- D'ouverture de travaux (titre du décret n°2006-649 du 2 juin 2006),
- Puis de permis d'exploitation ou concession par titre d'exploitation si la puissance primaire, prélevée du sous-sol, est supérieure ou égale à 20 MW (titre des dispositions du décret n°2019-1518 du 30 décembre 2019).

Le permis d'exploiter une ressource géothermique est accordé pour une durée de 30 ans renouvelable.

Mise en œuvre d'un dispositif géothermique de surface

La conception et l'installation d'un dispositif géothermique nécessitent de recourir à des professionnels ayant des com-





Phasage d'un projet de géothermie de surface



Forage d'essai sur nappe au Futuroscope (86)



Test de réponse thermique sur la première sonde à l'école du bois d'amour - Saint Benoit (86)

pétences variées : chauffagistes, thermiciens, hydrogéologues et foreurs. Ces intervenants doivent être qualifiés et Reconnus Garant de l'Environnement (RGE).

Au regard de l'opportunité de mise en œuvre d'un dispositif géothermique vis-à-vis des besoins énergétiques à satisfaire, il convient de vérifier sa faisabilité en réalisant :

- La définition du contexte administratif et réglementaire sommaire ;
- La caractérisation du contexte géologique et hydrogéologique ;
- La validation de l'existence du potentiel au droit du site ;
- La description sommaire de la nature des formations ;
- L'approche du débit ou de la profondeur requise pour disposer du potentiel géothermique ;
- L'estimation de la puissance d'extraction - réinjection calorifique des terrains ;
- L'évaluation de la pérennité de la ressource ;
- La détermination du nombre de forages ;
- L'implantation des forages, la détermination de leurs profondeurs et caractéristiques techniques, avec «enveloppe budgétaire» du (ou des) ouvrage(s) ;

- Des propositions et recommandations de mise en œuvre puis d'exploitation.

L'étude de faisabilité sera à proprement parler parachéevée après la réalisation des tests in-situ permettant d'intégrer les données réelles au droit du site. De fait, la réalisation d'un Test de Réponse Thermique (TRT) sur une première sonde test ou d'essais de pompages - injections sur un forage permet de recalculer et valider les dimensionnements des installations.

La mise en œuvre d'un dispositif géothermique est ainsi une démarche pas à pas engageant des compétences complémentaires qui doivent être interactives et coordonnées. Chaque étape constituant un point d'arrêt éventuel. La poursuite dans la mise en œuvre de la solution géothermique reste conditionnée à la décision du maître d'ouvrage qui doit être impliqué dans le projet.

Marc Galia
 Directeur général Bet Hygeo
 Eau Et Environnement



Du REX aux bonnes pratiques : l'assurance d'un résultat mesurable

→ La géothermie de surface est particulièrement adaptée aux activités qui demandent du chaud et du froid, car elle peut fournir les deux simultanément (grâce à une thermo-frigo-pompe) ou indépendamment selon les besoins saisonniers. Dans ce contexte, le temps de retour est considérablement réduit par rapport aux solutions traditionnelles dites de référence (ex : chaudière gaz + groupe froid). Retour sur deux réalisations et nos enseignements.

REX 1 : Répondre aux enjeux de l'existant

En exemple, un cas étudié, Hôtel du Golf **, à Brides Les Bains en Savoie.**

Le projet étudié concerne un hôtel historique, dans la station de Brides, à 500 m d'altitude, au pied des pistes de Méribel. Immeuble à forte valeur patrimoniale, d'une surface chauffée de 3 600 m².

Kappa-Ingénierie était missionné par le maître d'ouvrage afin d'établir un plan d'action pour se mettre en conformité avec le Décret Eco-Energie-Tertiaire

Après audit, le bilan énergétique décret tertiaire s'établit en synthèse comme suit :

Situation actuelle : 198 kWh/m²

Objectif relatif - 40 % : 119 kWh/m²

Où

Objectif valeur absolue : valeurs absolues suivantes à respecter (zone climatique H1c, altitude 480 m)

C cvc : 73 kWh/m²

Cuse : 58 kWh/m² (hors indexation des intensités d'usage)

Total Vabs : 131 kWh/m²

Un gain de 67 kWh/m² est donc à trouver à l'horizon 2030. A l'échéance 2040, un gain sur la situation actuelle de 99 kWh/m² (-50 %) et pour l'échéance 2050, un gain cumulé de 119 kWh/m² (-60 %).

Compte tenu des contraintes architecturale de cet immeuble, le bouquet de travaux, plan d'actions, retenu pour respecter ces objectifs est arrêté comme suit :

Situation actuelle : 198 kWh /m²

Isolation des combles : - 12 kWh/m²

Remplacement

des menuiseries : - 16 kWh/m²

Isolation des murs : - 10 kWh/m²

Géothermie : - 63 kWh/m²

CTA double flux : - 12 kWh/m²

Travaux GTB : - 8 kWh/m²

Travaux Éclairage : - 3 kWh/m²

Atterrissage 2050 : 74 kWh/m²

L'économie après travaux représente 63 %, l'objectif est atteint.

La géothermie, pertinente dans ce cas précis, par mise en œuvre de sondes sèches, permet à elle seule de réaliser plus de la moitié du chemin.

REX 2 : Répondre à la RE2020

Le projet étudié est un bâtiment de bureaux et commerces situé en Indre-et-Loire (37). Les plateaux de bureaux sont répartis sur 5 niveaux le tout sur un RDC constitué de parkings ouverts et d'un commerce. L'étude RE2020 porte sur les niveaux de bureaux uniquement (4265 m²).

Le bâtiment a une structure béton de type poteaux-poutres. Les façades en ossature métallique sont isolées par l'extérieur entre plateaux et ont une isolation complémentaire in-



térieure. Les menuiseries aluminium sont majoritairement équipées de vitrages à contrôle solaire. Le bâtiment est composé d'équipements « classiques » pour ce type d'usage, à savoir une ventilation double flux centralisée avec échangeur de chaleur, un éclairage LED avec gradation automatique ainsi qu'en version non géothermie un système de chauffage/climatisation à récupération d'énergie permettant d'assurer une production de chaud et froid, simultanée en fonction des besoins. Les déperditions sont de 156 kW et les apports de 180 kW.

► **Réglementation géothermie du site et caractéristiques du sol**

Afin de rester dans le cadre de la Géothermie de Minime Importance (GMI), il est nécessaire de vérifier le classement de la zone sur le site <https://www.geothermies.fr>. Celui-ci indique que le site étudié se trouve en zone verte de 0 à 200 m que ce soit en boucle fermée (sondes géothermiques verticales) ou boucle ouverte (nappe). Les caractéristiques du sol sont classiques, avec une conductivité du sol comprise entre 2.5 et 2.8 W/m.K soit une puissance extractible entre 50 et 60 W/m. La ressource nappe est quant à elle plus limitée avec un débit de 11 à 17 m³/h à une profondeur de 117 m (profondeur du toit 117 m, épaisseur de la formation 88 m).

► **Caractéristiques du système étudié**

Pour le cas présent, la géothermie sur nappe semble limitée à ce stade, les études sont alors poussées sur la géothermie sur sondes géothermiques verticales (SGV). Afin d'assurer une meilleure rentabilité économique, il n'est pas judicieux de dimensionner la PAC et les sondes pour assurer 100 % des besoins chaud et froid. Si une simulation thermique dynamique n'est pas réalisée, il est classiquement admis de réaliser un dimensionnement à environ 80 % des besoins. Le système est alors composé d'une cascade de 4 PAC eau glycolée/eau de 43 kW (B0W35), de 1 PAC air/eau de 58 kW permettant d'assurer l'appoint en été, d'un ballon tampon de 1000 L et de 3900 ml de SGV.

Kappa-Ingénierie

Chez Kappa-Ingénierie, nous intervenons souvent dans le secteur thermalisme - centres aquatiques & spa. Ce secteur fait partie des bâtiments les plus énergivores. La géothermie est souvent la solution la plus adaptée à la couverture de leurs besoins en chaleur, élevés pour le chauffage de l'eau des bassins, mais aussi pour la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage des spas, des locaux annexes. La mise en place d'une thermo-frigo-pompe, c'est-à-dire d'une PAC produisant simultanément du chaud et du froid, permet de couvrir aussi les besoins en froid pour la déshumidification de l'air ambiant. Cela permet d'ajouter à moindre frais un dispositif complémentaire de récupération d'énergie sur les eaux usées et vidanges bassins.

La mise en place d'une cascade et d'un ballon tampon suffisant ont l'avantage d'optimiser le temps de fonctionnement des compresseurs et d'éviter les courts-cycles.

► **Résultats RE2020**

Le tableau suivant donne les résultats RE 2020 de 4 variantes :

- La variante de base comprend un système VRV pour le chauffage et la climatisation des locaux,
- La variante V1 prend en compte le système de géothermie sur SGV décrit ci-dessus pour assurer le chauffage et la climatisation des locaux,
- La variante V2 correspond à la V1 + géocooling possible en complément de la climatisation,
- La variante V3 correspond à la V1 avec géocooling seul (pas de climatisation active). La V3 utilise le Titre V relatif à la prise en compte du géocooling dans la RE 2020.

	BASE	V1	V2	V3
	Base VRV	Géothermie SGV	Géothermie SGV géocooling	Géothermie SGV géocooling seul
Chauffage/ clim	Chauffage + clim	Chauffage + clim	Chauffage + géocooling + clim	Chauffage + géocooling
Cep.nr	68,1	53,8	53,6	46,1
Cep.nr max	78,2	78,2	78,2	78,2
Gain	12,9 %	31,2 %	31,4 %	41,2 %

► **Analyse des résultats RE 2020**

La mise en place d'une production géothermique via SGV pour le chauffage et la climatisation des locaux (V1) permet d'obtenir une diminution importante des consommations conventionnelles. On passe d'un gain de 1,3 % sur le Cep.nr max pour la variante de base (avec système VRV) à un gain de 22,0 % pour la V1.

L'ajout de géocooling lorsque le groupe est climatisé a très peu d'impact sur les consommations conventionnelles. En effet, seul le poste de climatisation diminue de 0,2 kWhEP/(m².an) pour la V2.

Pour la V3, les locaux sont rafraîchis seulement via le géocooling. Le Cep.nr est au plus bas avec un gain de 41,2 % sur le Cep.nr max. Cela s'explique par la suppression des consommations liées à la climatisation.

La RE 2020 n'étant pas un outil de conception, il faudrait faire en parallèle une STD pour mesurer l'efficacité du géocooling sur ce projet et la nécessité ou non de climatiser.

Le partage des bonnes pratiques

1. Étudier préalablement la nature du sous-sol

Dès le lancement de l'idée d'une géothermie sur un site, la première action à mener est de vérifier la compatibilité du sous-sol avec une solution géothermique (donnés BRGM disponibles sur les espaces cartographiques du site www.geothermies.fr), puis d'orienter la solution, sondes sèches ou doublet sur nappe.

2. Ne pas surdimensionner une production géothermique

Des installations existantes auditées présentent régulièrement des dysfonctionnements.

Très souvent on constate un surdimensionnement de la PAC géothermique.

Les puissances calculées de relance sont souvent pénalisantes.

Astuce : lors d'une simulation thermique dynamique, retenir un scénario sans réduits en période d'inoccupation, afin d'établir la monotone de puissance nécessaire au dimensionnement de l'installation. En effet, le logiciel a tendance à augmenter de façon importante le besoin de puissance pour assurer les relances en mode confort. C'est encore plus vrai en mode rafraîchissement.

Le seuil de 1000 heures de fonctionnement de la PAC à pleine puissance en mode chaud ou 1500 heures en mode chaud et froid est un bon indicateur.

Les volumes tampon sont également souvent sous-dimensionnés.

L'inertie du bâtiment et les apports ne sont pas correctement pris en compte dans les études règlementaires.

Ainsi, une surpuissance conjuguée à un volume tampon faible conduit à des cycles courts d'arrêt/marche, au détriment de la fiabilité du matériel.

3. Température de distribution, loi d'eau, géocooling

La température d'eau vers les émetteurs influence le COP et

la consommation : +3 % par °C supplémentaire, donc pour le mode hiver :

- Privilégier les émetteurs avec une température basse voire très basse (idéalement plancher chauffant / panneaux rayonnants / poutres)
- Toujours une loi d'eau
- Viser un delta T de 6 °C dans le dimensionnement des batteries.

Pour le mode été, privilégier le mode géocooling (Température de départ autour de 15° C). La solution géocooling est souvent suffisante en mode été, ce qui évite de faire tourner les compresseurs, si cela a été conçu et dimensionné préalablement.

Même si la géothermie est toujours performante lorsqu'elle est bien conçue et installée avec du bon matériel, on constate que tous les détails sont importants pour obtenir des performances remarquables. Le COP peut chuter à moins de 2 si on cumule les mauvais choix : surdimensionnement des puissances, sous-dimensionnement des volumes tampon, températures élevées, absence de loi d'eau, ECS à haute température, batteries de CTA dimensionnées pour température de soufflage élevée et delta T traditionnel, absence d'asservissement des auxiliaires (pompes...), pertes de charges de réseau élevées.

**Laurent Le GUILLOU BET KAPPA-Ingénierie -86
et pour la partie RE 2020 par Florie Martinez
& Mathieu Lacouture BET EFFILIOS 86 -
RGE en géothermie**



➔ GÉOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE ➔ PLATEFORME PÉDAGOGIQUE

La plateforme pédagogique du CRER donne l'exemple

➔ L'ADEME et la région Nouvelle-Aquitaine unissent leurs forces pour promouvoir massivement les énergies renouvelables thermiques. Le CRER, en partenariat, développe une plateforme de formation sur la géothermie de surface. Une initiative qui contribue à l'essor de la géothermie en offrant une vue d'ensemble du projet.

Préambule

En partenariat avec l'ADEME, la région Nouvelle-Aquitaine promeut la mobilisation des territoires pour le déploiement massif des énergies renouvelables thermiques à travers les contrats de développement territoriaux ou patrimoniaux en région.

L'objectif fixé, partagé entre l'ADEME et la région Nouvelle-Aquitaine, est de massifier l'usage de la chaleur renouvelable avec le recours aux filières biomasse, solaire thermique, géothermie et récupération de chaleur fatale.

Le CRER accompagne depuis 1995 les filières chaleur renouvelable. La géothermie est une de ces filières renouvelables, plus récente, qui suscite notamment l'intérêt de la part des porteurs de projets.

Afin de pouvoir répondre aux enjeux de développement de la filière et intensifier le recours à cette énergie, le CRER anime le territoire à travers :

- La mise en relation avec les acteurs, locaux et nationaux,
- L'information sur la géothermie pour une meilleure diffusion de la technologie,
- L'émergence des projets d'installations géothermiques exemplaires,
- L'accompagnement à la bonne mise en œuvre des projets et à la capitalisation des données de fonctionnement des installations,
- Le développement de la compétence au niveau régional.

En 2022, le Conseil d'Administration du CRER décide de la mise en place d'une plateforme pédagogique et de formation sur la géothermie de surface pour compléter de manière opérationnelle ces actions. Cet outil consiste à construire une station de présentation pédagogique et de formation, en situation d'exploitation, des différents systèmes de géothermie de surface. Les acteurs intervenants sont multiples (maîtres d'ouvrages, prescripteurs, maîtres d'œuvres, entreprises de travaux, exploitants...) et devront pouvoir acquérir les compétences et connaissances nécessaires au sein de ce centre.

Le CRER envisage pour répondre à ce besoin la construction d'un bâtiment à haute performance énergétique de 1000 m² avec 400 m² d'espace pédagogique et de formation et 600 m² de plateau technique regroupant les différentes

technologies de géothermie assistée par pompe à chaleur (échangeurs compacts, sondes, nappe).

Étude d'opportunité de l'opération

Dans un premier temps, il a fallu chercher un site susceptible d'avoir les ressources géothermiques suffisantes pour sa mise en œuvre. Le CRER a, au départ, le choix entre différentes localisations potentielles au travers de la région Nouvelle-Aquitaine. La faisabilité sur sondes et sur échangeurs compacts est liée à la conductivité thermique du terrain. Celle-ci peut être plus ou moins importante en fonction des sites et peut avoir des conséquences sur le dimensionnement des ouvrages souterrains. Dans aucun cas, la faisabilité des projets n'était cependant compromise et cette question n'était donc pas limitante. Le potentiel sur nappe est par contre plus aléatoire. En effet, en fonction des territoires, l'opportunité de trouver une nappe exploitable est plus ou moins grande. Nous nous sommes appuyés sur les données du site geothermies.fr pour identifier le potentiel des différents sites. Les informations trouvées ont orienté notre choix vers un terrain situé à proximité immédiate de notre siège à la Crèche dans les Deux-Sèvres qui présentait à la fois un potentiel intéressant sur sondes avec une conductivité thermique du terrain moyenne sur les 200 premiers mètres de 2,93 W/m. K et deux aquifères successifs (le Dogger et l'Infra-toarcién) avec des débits exploitables prévisionnels intéressants.

Ressource géothermique par nappe

	Aquifère	Profondeur toit (m)	Épaisseur de la formation	Débit (m ³ /h)	Potentiel
Aquifère 1	DOGGER	0	18	50 - 100	Fort
Aquifère 2	INFRA-TOARCIEN	29	31	10 - 50	Moyen
Aquifère 3	SOCLE	61	139	0 - 5	Faible

Nous avons également vérifié dès la phase d'opportunité qu'il n'y avait pas de barrière réglementaire à la réalisation de forages dans le cadre de **la Géothermie de Minime Importance (GMI)**. Les cartes réglementaires de géothermies.fr nous indiquent que nous nous situons dans une zone orange. Cela signifie que les forages sont réalisables sous simple déclaration avec l'appui d'un expert GMI (liste sur site Web AFPG). Nous ne nous situons pas non plus dans un pé-



rimètre de protection rapprochée pour le captage de l'eau potable, ce qui aurait compromis la réalisation du projet dans le cadre de la GMI. Les feux étaient donc au vert ! Nous avons par ailleurs évalué les besoins thermiques du bâtiment pour les comparer avec le potentiel du site. Nous avons estimé en première approche une **puissance appelée de 50 kW** dans les **conditions climatiques les plus défavorables** qui nécessiterait un **linéaire** de sondes géothermiques **verticales** de **600 m** ou un **débit sur nappe minimal de 9 m³/h**. Ces données étant a priori compatibles avec le potentiel du site, nous décidons de passer à l'étape suivante, l'étude de faisabilité.

Etude de faisabilité hydrogéologique

Suite aux conclusions favorables de l'étude d'opportunité, une validation des hypothèses prises était nécessaire. Nous avons donc fait appel au bureau d'études hydrogéologiques Hygé, avec la qualification OPOIBI 10.07 relative aux compétences en géothermie, pour réaliser cette étude. L'étude de faisabilité se déroule en deux phases :

1. Une étude bibliographique validant la faisabilité réglementaire et technique en se basant sur la réglementation et les connaissances locales du sous-sol.
2. Une phase essais à partir d'un forage test pour valider la présence d'une nappe avec un débit conforme aux attentes en puisage et en réinjection.

L'étude bibliographique

L'étude bibliographique réalisée par Hygé valide la faisabilité sur sondes en ajustant **le linéaire nécessaire à 700 m**. Pour la ressource sur nappe, elle souligne que les règles du SDAGE (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) nous oblige à tester d'abord le potentiel du premier

aquifère (Dogger) et que le deuxième aquifère (Infra-toarcien) ne pourra être testé que si le premier s'avère improductif. En effet, cette règle s'impose pour limiter les risques de pollution de l'Infra-toarcien qui constitue ici la nappe d'alimentation en eau potable (NAEP).

Bien que les cartes de potentiel aient indiqué un débit exploitable important sur le Dogger, l'étude bibliographique fait remarquer que les cartes indiquent un niveau piézométrique à 27 m du sol, plus bas que le mur de l'aquifère qui se situerait à 21 m du sol. Il existe donc un risque non négligeable de devoir atteindre le deuxième aquifère.

L'étude de faisabilité propose donc une alternative qui consisterait à aller chercher la ressource en eau dans l'Infra-toarcien où la probabilité d'obtenir un débit exploitable est plus important.

Afin de valider cette ressource et l'implantation du site, il restait donc à réaliser le forage d'essai et à vérifier la présence d'eau avec un débit suffisant.

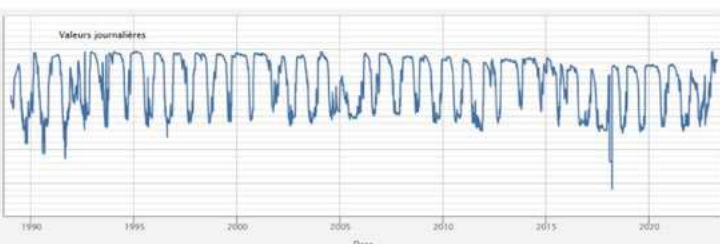
La phase essais

Pour les essais, nous avons dû tout d'abord effectuer le forage test. Nous avons sélectionné l'entreprise Van Ingen Forages qui possède la certification Qualiforage. L'objectif était d'abord de réaliser un premier forage au travers du premier aquifère. Si celui-ci était non productif, nous nous réservions la possibilité de réaliser un deuxième forage plus profond au travers du deuxième aquifère. Pour choisir l'emplacement des forages, nous avons fait appel à deux sourciers qui nous ont indiqué les emplacements à privilégier.

Avant la réalisation des forages, nous avons dû effectuer leur télédéclaration. Celle-ci se fait en ligne sur le site de www.geothermies.fr. A partir des données de l'étude de faisabilité, cette démarche est relativement simple à mener. Nous indiquons également un objectif de débit à 15 m³/h. A la suite de la télédéclaration, nous avons sélectionné l'expert GMI G2H qui nous a donné ses recommandations pour la réalisation du forage, notamment pour celui atteignant l'Infra-toarcien afin d'éviter la mise en communication des deux aquifères.

Une autre démarche préalable importante a été la contractualisation de la garantie AquaPAC. Cette assurance, dont le coût est de 5 % du prix du forage, permet d'être remboursé des frais engagés en cas d'improductivité de l'ouvrage (dans la limite d'un plafond établi au contrat). Etant donné les coûts importants d'un forage et le doute existant sur les résultats des essais, cette assurance est apparue comme indispensable.

Le premier forage sur le Dogger a malheureusement été improductif. Le foreur a traversé l'intégralité de l'aquifère jusqu'à une profondeur de 40 m avant d'atteindre une couche de marne étanche (Aaléno-Toarcien). Bien que l'épaisseur de l'aquifère ait été plus importante que prévue, celui-ci s'est avéré complètement sec. Nous avons alors pris la décision de réaliser un deuxième forage plus profond afin



Chronique piézométrique de 1989 à 2023 de la nappe du Dogger



Forage sur le Dogger

d'atteindre le deuxième aquifère. Il a fallu parvenir à une profondeur de 86 m pour enfin voir l'eau jaillir du forage. Le niveau statique de l'eau est remonté à 27 m de profondeur. L'objectif initial était de pouvoir exploiter un débit de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ pour répondre aux besoins de la plateforme de formation. Cependant, le rabattement de plus de 20 m à ce débit était trop important et risquait de mettre en péril le fonctionnement de l'installation. Malgré une tentative de développement chimique du forage par acidification, nous n'avons pas réussi à atteindre le débit escompté. Les essais longue durée de puisage et de réinjection ont toutefois montré un débit exploitable aux alentours de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, suffisant

pour chauffer et refroidir le bâtiment par géocooling. Avec l'ajout de sondes géothermiques en complément, nous devrions obtenir la ressource géothermique requise pour l'ensemble des besoins thermiques et pédagogiques de la plateforme.

**Edouard Chesnel Référent & animateur
géothermie Centre régional énergies
renouvelables (CRER) 79**



Le CHU de Poitiers capitalise sur sa propre expérience

➔ Le Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Poitiers s'engage résolument dans la transition énergétique en exploitant la géothermie pour réduire son empreinte carbone. Deux opérations distinctes ont été menées au sein de l'hôpital, mettant en lumière les avantages de cette source d'énergie renouvelable et les défis rencontrés lors de leur mise en œuvre.



Agora Direction

Histoire du lancement de la géothermie au CHU de Poitiers

En septembre 2016, Agora Direction, un immeuble de bureaux administratifs couvrant une superficie de 10 000 m² (voir photo ci-dessus), voit le jour au CHU de Poitiers, portant avec lui des objectifs ambitieux de consommation énergétique. Le projet inclut la mise en place d'un système de géothermie utilisant deux puits de forage sur une nappe phréatique. De plus, des dalles actives basse température, spécialement conçues pour fonctionner avec les pompes à chaleur géothermiques (PAC), sont intégrées au bâtiment. Le maître d'ouvrage exprime également le souhait d'analyser ce projet pour améliorer l'installation et l'utiliser comme référence pour les futures opérations.

Projet d'extension du Pôle Régional de Cancérologie (PRC2)

Le projet d'extension du Pôle Régional de Cancérologie de Poitiers (voir photo page suivante en haut) est soumis aux exigences de l'arrêté du 28 décembre 2012 concernant la réglementation thermique 2012 (RT 2012). Pour minimiser les risques, la faisabilité de ce projet doit être évaluée au moins un an avant l'établissement du programme technique. Le modèle et le bilan énergétique du système de PAC sur nappe phréatique ont conduit à plusieurs décisions stratégiques :

- La production d'eau chaude sanitaire sera assurée directement par le réseau de chaleur, qui servira de secours aux PAC géothermiques.
- Tous les équipements seront doublés pour garantir la fiabi-





Pôle régional de cancérologie de Poitiers

lité du chauffage, de la climatisation, et du rafraîchissement.

- Les régimes d'eau prévus pour les circuits de chauffage et les Centrales de Traitement d'Air (CTA), avec des retours à 35 °C, sont compatibles avec les PAC pour assurer des rendements optimaux.
- Le volume du ballon de stockage est dimensionné en prévision de l'ajout du PRC1, avec 3 m³ pour le chauffage et 2 m³ pour le rafraîchissement, afin d'éviter les cycles courts sur les compresseurs à vis des PAC.

Montage futur dossier géothermie Laboratoire PRC2

Les bilans énergétiques prévisionnels des bâtiments PCR2 et PCR1 conduisent aux estimations présentées dans les tableaux ci-dessous :

En ce qui concerne la réglementation relative au sous-sol,

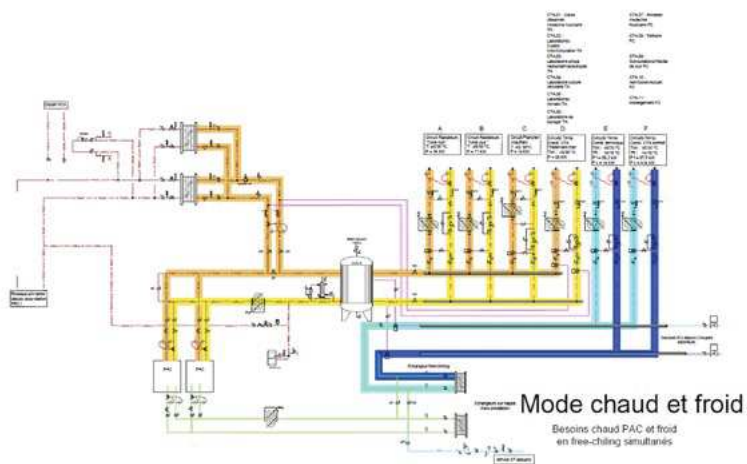


Illustration n°1 : schéma hydraulique des installations...

Bilan des besoins chaud	TOTAL	PRC2	PRC1
Surface brute (m ²)	21 531	10 069	11 462
Puissance installée ou estimée (kW)	1 416	266	1 150
Consos			
Conso Chauffage (MWh sst)	2 078	486	1 592
Conso ECS (MWh sst)	-	-	-
Conso Totales (MWh sst)	2 078	486	1 592
Puissances appelées max			
PA_ch (kW)	1 211	266	945
PA_ECS (kW)	-	-	-
PA Totale max (kW)	1 211	266	945

Scénario 1	Besoins utiles (kWh)	Solution géothermique (PAC + appoint éventuel)					SCOP/SEER
		Consommations			Production		
Scénario PRC 2 + PRC 1		PAC* (kWhef)	Auxiliaires** (kWhef)	Appoint (kWhef)	PAC part Géo (kWhef)	PAC part élec + Appoint (kWhef)	
Chauffage	2 082 224	375 699	77 230	198 447	1 522 565	565 812	3,36
Froid par PAC	-	-	-	-	-	-	-
Froid par géocooling	23 882	-	10 515	-	26 270	-	2,50
Total	2 106 106	375 699	87 745	198 447	1 548 835	565 812	3,34

* Consommation électrique du compresseur de la PAC
 ** Consommation électrique des auxiliaires : pompes de forage, pompes de circulation (hors pompes côté distribution) ;
 *** Froid : En cas de rafraîchissement direct (géocooling ou freecooling), l'indiquer clairement

Mode	Durée utilisation (h)	Consommation auxiliaires** (kWhef)	Puissance moyenne (kW)	Mode chaud	Production PAC	Production Appoint
				Puissance maximale atteinte (kWhef)	Taux de couverture	
Chauffage	5 000	77 230	15		493	659
Froid par PAC	-	-	-		72,9%	27,1%
Froid par géocooling	1 200	10 515	9			
	6 200	87 745	14			

Scénario avec performance : modélisation des besoins chaud PRC2 + PRC1 + géocooling PRC2

l'objectif est de rester conforme à la GMI (Géothermie de Minime Importance) pour le futur doublet géothermique. Cela implique que la puissance thermique prélevée du sous-sol reste inférieure à 500 kW, que la profondeur du forage ne dépasse pas 200 mètres, que le débit de réinjection (Q_{max}) ne dépasse pas 80 m³/h, que l'aquifère de prélèvement corresponde à l'aquifère de réinjection, et que la zone soit réglementée en vert.

Etude de faisabilité, étape préalable à un projet de géothermie

L'étude de faisabilité de mise en œuvre d'une solution géothermique est une étape indispensable

à l'obtention des subventions allouées par l'ADEME ; mais c'est surtout une étape primordiale pour un bon dimensionnement des besoins et puissances nécessaires et donc de l'installation géothermique à mettre en place.

Elle commence tout d'abord par une étude bibliographique qui s'appuie sur les bases de données existantes et les informations disponibles issues des installations et forages connus sur le secteur. Une fois le contexte sous-sol connu, des travaux de reconnaissance peuvent être engagés pour confirmer la faisabilité de l'opération.

Audit d'une installation existante

Pour le CHU de Poitiers, le retour d'expérience de l'exploitation du doublet du site de l'Agora a été une donnée d'entrée importante et valorisée dans le cadre de la faisabilité du projet PRC2.

Un audit a ainsi été réalisé sur l'installation existante de l'Agora, audit mené sous la forme d'un contrôle décennal tel que mentionné dans la norme NFX- 10 999¹ et reprenant la réglementation de l'arrêté du 11 septembre 2003.

Lors de cet audit, des opérations de contrôles endoscopiques (inspections télévisées des ouvrages, diagraphies flux, conductivité et température, pompage par paliers) ont été programmées ainsi qu'une analyse de l'exploitation de l'installation (visite de la chaufferie, relevés d'index et consultation de la télégestion).

Cet audit a permis d'identifier entre autres :

- Des manquements de protection sur les têtes des forages,
- Des problématiques structurelles des équipements empêchant la mise en œuvre d'opération de suivi et de maintenance de l'installation,

- Des incohérences dans l'exploitation de l'installation mettant en péril les ouvrages et engendrant des surconsommations électriques.

Ces points ont ainsi pu être intégrés dans la réflexion et l'analyse de la phase Projet du PRC2 en :

- Préconisant des têtes de forage étanches,
- Dimensionnant des équipements en cohérence avec les besoins de maintenance,
- Intégrant des équipements permettant d'asservir les prélèvements sur la nappe aux besoins.

Les travaux de reconnaissance, à quoi ça sert ?

Les travaux de reconnaissance ne sont pas une étape obligatoire dans un projet de géothermie si les contextes géologique et hydrogéologique sont connus, mais restent néanmoins une étape sécuritaire pour l'équilibre technico-économique du projet.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité du projet PRC2, le CHU de Poitiers avait directement intégré les travaux de reconnaissance dans l'étude de faisabilité malgré les données déjà acquises lors des travaux sur l'Agora.

Ces travaux de reconnaissance se justifiaient étant donné les difficultés rencontrées en foration sur les forages de l'Agora et du fait de l'hétérogénéité des formations géologiques calcaires du Dogger captées.

Ils ont permis :

- d'adapter le dimensionnement de l'ouvrage à la productivité de la nappe (plus faible que sur le site de l'Agora, en lien avec le taux de fracturation des calcaires),
- d'ajuster la coupe technique à la géologie rencontrée

>>>



Photos prises sur le forage d'exhaure de l'Agora lors de la dépose des équipements préalables au contrôle endoscopique :
À gauche : tête du forage avec crosse de refoulement avant dépose de la pompe – espace annulaire réduit et absence de tube guide pour pose de sonde de niveau
Au milieu : pompe immergée-partie hydraulique déposée avec partie moteur désolidarisée et câbles d'alimentation et de maintien rompus lors de la dépose
À droite : colonne d'exhaure souple initialement et rigidifiée par le dépôt de calcaires en lien direct avec la qualité de l'eau souterraine



Photos prises lors des travaux de reconnaissance sur le forage d'exhaure du PRC2
 À gauche : machine de forage avec mise en place d'un circuit fermé pour la récupération des déblais de foration et des eaux - demande du CHU pour éviter tout risque de ruissellement d'eau chargée en particules sur les parkings
 Au centre : bac de récupération des déblais de foration (=cuttings) et des eaux chargées en phase de foration
 À droite : mise en place des crépines inox dans le forage



À gauche : tête de forage inox verrouillée avant mise en place des équipements
 Au centre : protection de la tête de forage en attente de l'avancement des travaux sur le site
 À droite : coupe géologique établie via l'identification des cuttings recueillis lors de la foration et coupe technique du forage

en foration et prendre soin de choisir des tubages compatibles dans la durée avec la qualité de l'eau (choix de tubages inox car présence de fer et de manganèse).

Les travaux et la mise en exploitation des installations : où en sommes-nous ?

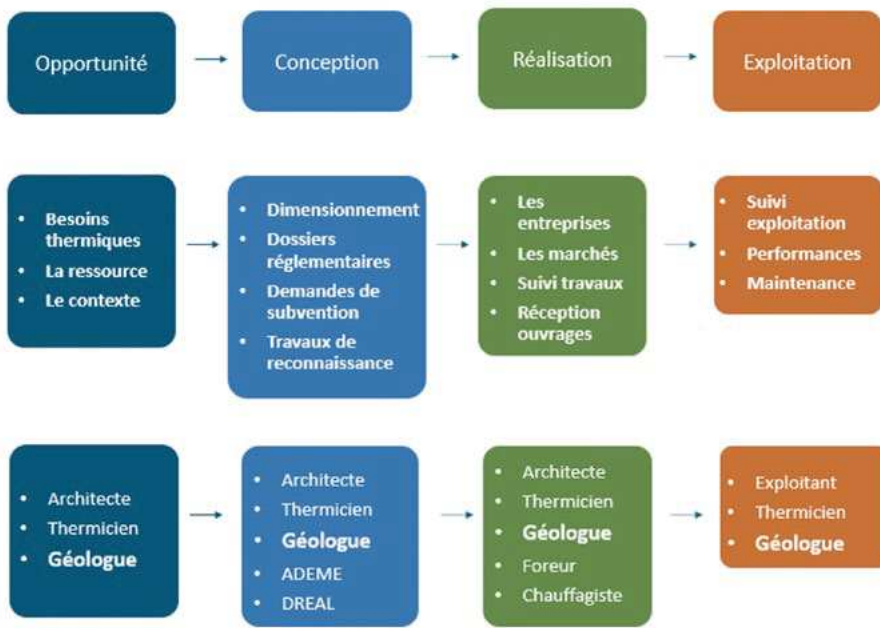
Le suivi des travaux et l'exploitation d'une installation de géothermie sont des étapes cruciales pour assurer la pérennité des équipements. Les projets de géothermie sont des projets transversaux car ils font appel à différents acteurs en fonc-

tion des phases du projet.

Le logigramme ci-après permet d'illustrer les différentes étapes d'un projet en associant les différents acteurs pour chaque phase.

Le risque inhérent au nombre d'intervenants est la perte de l'information entre les étapes par manque de communication ou de compréhension des informations par les différents acteurs, pouvant mettre en péril directement la pérennité de l'installation géothermique.

Par exemple, la mise en place d'une pompe surdimensionnée par rapport au besoin d'exploitation et à la capacité de la nappe (informations issues de l'étude de faisabilité) peut



lyse et apporté des informations sur la répartition des particules par classes de taille. Ces informations pourront être ainsi utilisées par les chauffagistes dans le dimensionnement des pièces hydrauliques telles que les filtres.

Quelles sont les étapes suivantes ?

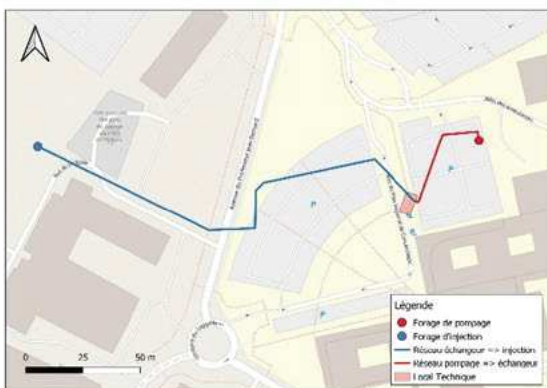
Les travaux du PRC2 vont se poursuivre en 2023/2024 avec la réalisation du forage de réinjection, la pose des équipements et leur raccordement aux forages. La mise en service de l'installation se fera en présence des différents acteurs : hydrogéologue, thermicien et exploitant, afin de veiller au bon paramétrage des installations en

engendrer une problématique de pérennité des forages. En effet, la surexploitation de la nappe entraînera une baisse trop importante du niveau d'eau et donc l'oxygénation de l'aquifère pouvant induire des précipitations de fer/manganèse. Ces précipitations au niveau des crépines induiront le colmatage des forages et donc une perte de production. Dans le cadre du projet PRC2, le forage de reconnaissance a été dimensionné pour être utilisé comme forage d'exploitation. Une fois le forage réalisé, des tests de productivité par pompage ont permis de valider le débit d'exploitation de l'ouvrage et ainsi le taux de couverture possible des besoins énergétiques du projet avec la géothermie. L'interprétation de ces tests a également permis d'accéder aux caractéristiques hydrodynamiques de la nappe captée, données indispensables pour implanter le forage de réinjection en assurant un taux de recyclage optimal. Une analyse chimique a été réalisée sur les eaux prélevées à la fin du test de pompage permettant ainsi d'appréhender les risques liés à la physico-chimie de l'eau au regard de l'usage géothermie. Une granulométrie laser a complété cette anat

fonction des besoins et de la productivité des forages. Suite à cette opération le CHU de Poitiers envisage d'autres projets sur le site.



Claire Jullien Responsable d'activité Eau Ressource et Géothermie BET Antea, avec le soutien de Dimitri Neel Direction Construction & Patrimoine et Transition écologique CHU Poitiers



Modélisation hydrodynamique et de l'implantation du doublet PRC2

À gauche : implantation du forage d'exhaure et du forage de réinjection sur plan

À droite : extrait de la modélisation réalisée avec le logiciel Courant rendant compte des interférences entre le doublet de l'Agora et le projet du doublet PRC2

→ FORMATIONS À LA GÉOTHERMIE → CERTIFICATIONS → ORGANISMES → CERTIFICATEURS → QUALIFICATION

La géothermie et la formation des acteurs

→ Face à la crise énergétique et climatique que nous vivons aujourd'hui, la géothermie assistée par pompe à chaleur présente des atouts majeurs pour générer des économies d'énergie sur la production de chaud et de froid et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Grâce à une température du sous-sol stable et élevée par rapport à la température de l'air en hiver, elle permet en effet d'atteindre des coefficients de performance (COP) supérieurs à 4 ou 5 en hiver, générant autant d'économies d'énergie. En été, elle peut être utilisée pour rafraîchir les bâtiments par « géocooling », avec une consommation électrique réduite à l'utilisation de circulateurs.

Compte-tenu de l'évolution du prix de l'énergie et, en particulier des aides publiques (Fonds Chaleur de l'ADEME, Régions, FEDER...), les solutions de géothermie présentent un intérêt économique de plus en plus attractif et sont plébiscitées par les maîtres d'ouvrage publics et privés. Grâce à leurs faibles consommations, elles contribuent également à atteindre les objectifs bas carbone.

Cette énergie renouvelable reste toutefois encore mal connue des différents acteurs de la filière énergie car faisant appel à des compétences spécifiques. En effet, afin de mener à bien une opération de géothermie, en plus du savoir-faire des énergéticiens s'ajoute la connaissance du sous-sol. C'est la combinaison de ces différentes compétences de sous-sol et de surface, depuis le dimensionnement jusqu'à la réalisation des travaux et l'exploitation des installations, qui permettra d'aboutir à des projets performants. Pour cela, et face à l'augmentation de la demande, la formation des différents acteurs devient primordiale. Faire appel à des acteurs qualifiés, c'est la garantie d'une installation fonctionnelle, performante et pérenne !

De plus, le CRER, en partenariat avec l'ADEME, prévoit la création d'une plateforme pédagogique de plus de 1000 m² à La Crèche, dans les Deux-Sèvres, pour former et informer les acteurs de la filière géothermique sur les différentes technologies et le fonctionnement de cette énergie souterraine.

La formation des maîtres d'ouvrage et des animateurs territoriaux

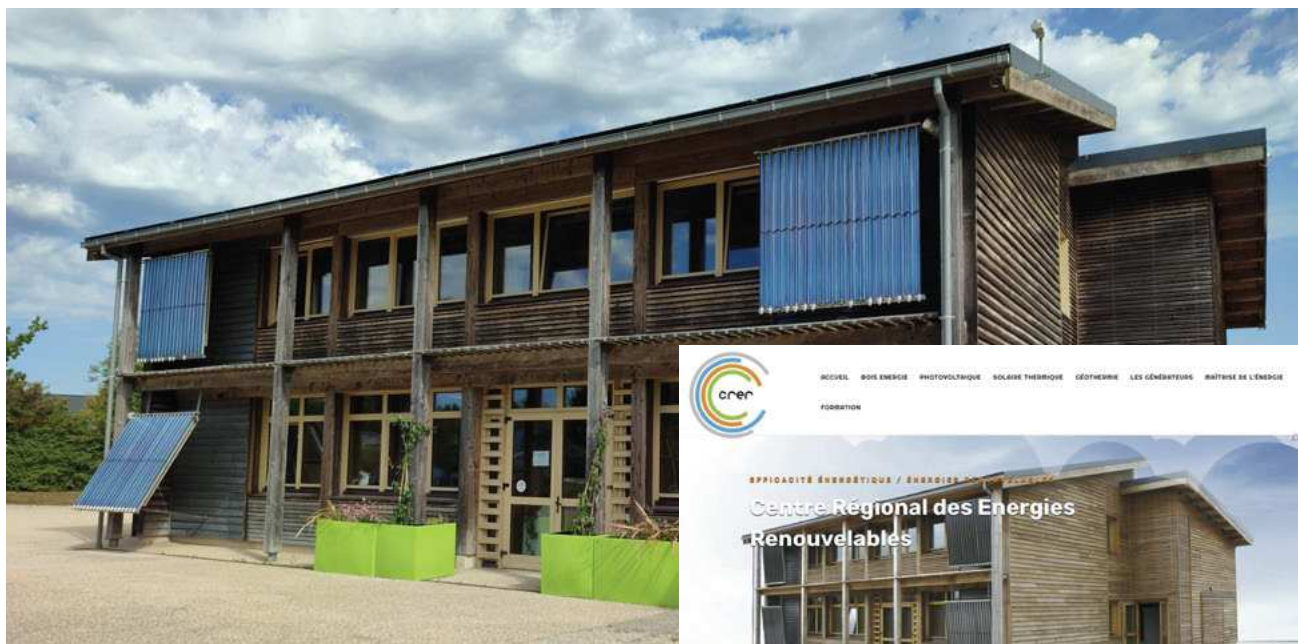
A la genèse d'un projet de géothermie, on retrouve souvent un maître d'ouvrage motivé par les économies d'énergie réalisées par cette énergie renouvelable discrète (car invisible), non bruyante (car les pompes à chaleur de type monobloc sont en local technique) et peu génératrice de gaz à effet de serre. Les animateurs territoriaux, au sein des collectivités, sont également les premiers à être en mesure d'identifier un potentiel géothermique sur le patrimoine public. Une sensi-

bilisation de ces acteurs sur les avantages et les conditions de réussite des projets de géothermie est indispensable au développement de la filière. Cette sensibilisation est notamment assurée par les animateurs géothermie régionaux. Leurs coordonnées sont disponibles sur les espaces régionaux du site <https://www.geothermies.fr>. L'ADEME propose également des **formations à la rédaction de notes d'opportunité pour les animateurs territoriaux**.

La formation des bureaux d'études sous-sol et surface (OPQIBI 10.07 et 20.13)

La mission des bureaux d'études s'étend des études de faisabilité jusqu'à la réception des travaux en passant par le dimensionnement des installations et le suivi de la réalisation des travaux. Pour mener à bien une opération de géothermie, une collaboration et une bonne communication entre bureaux d'études fluides et hydrogéologiques est indispensable. Le bureau d'études fluides aura pour mission le bon dimensionnement des équipements de surface (pompe à chaleur, échangeurs, ballons tampon, émetteurs, régulation, instrumentation...) et le bureau d'études hydrogéologique vérifiera la disponibilité et la pérennité de la ressource. En fonction de la puissance soutirée au sous-sol et des besoins du bâtiment, le bureau d'études hydrogéologique doit être en mesure de réaliser le dimensionnement et l'implantation des ouvrages souterrains (linéaire de sondes, débit nécessaire...). Il doit également assurer le suivi des travaux de forage et vérifier le respect des règles de l'art et réglementation sous-sol applicables.

Afin que les maîtres d'ouvrage puissent prétendre à des subventions dans le cadre du Fonds Chaleur, les projets doivent être suivis par des bureaux d'études qualifiés RGE (OPQIBI 20.13 pour les BE fluides OPQIBI 10.07 pour les BE hydrogéologiques). Un annuaire est disponible en ligne sur le site internet de l'OPQIBI (<https://www.opqibi.com/recherche-plus>).



La formation des foreurs (Qualiforage) et des installateurs (QualiPAC) pour la réalisation des travaux

Pour réaliser une installation de géothermie sur nappe ou sur sondes géothermiques verticales de qualité, l'intervention d'entreprises qualifiées RGE (Reconnues Garant Environnement) est nécessaire. La certification QualiPAC correspond à la qualification de référence pour les installateurs de pompes à chaleur. Pour l'obtenir, les entreprises doivent avoir en leur sein au minimum un référent ayant suivi et validé la formation sur les aspects pratiques et théoriques. On notera toutefois que la certification QualiPAC s'adresse à l'ensemble des installateurs de pompes à chaleur aérothermiques ou géothermiques. Afin de donner plus de visibilité aux installateurs de géothermie, l'AFPG a récemment pris l'initiative de mettre en place une cartographie des installateurs de géothermie (<https://geoartisans.afpg.fr>). Les installateurs souhaitant y figurer peuvent en faire la demande en ligne (<https://framaforms.org/geoartisans-1661339905>). Quant aux foreurs, ils doivent posséder la qualification Qualiforage. On distinguera le label Qualiforage « nappe » et le label Qualiforage « sondes ». Les foreurs qualifiés peuvent posséder un ou deux labels en fonction du type de forage qu'ils pratiquent.

La réalisation des travaux par des entreprises qualifiées RGE est indispensable pour l'obtention d'aides publiques. Par ailleurs, la réglementation sur la géothermie de minime importance (GMI) impose la qualification des foreurs.

Les organismes certificateurs (Qualit'ENR, Qualibat, Quali-felec) proposent en ligne des annuaires pour retrouver les entreprises qualifiées. Pour les entreprises souhaitant se qualifier, elles peuvent retrouver la liste des organismes de

CRER

Le CRER conçoit et anime les formations sur l'énergie avec des intervenants spécialisés et confirmés. Ses plates-formes pédagogiques ont déjà permis de dispenser des formations pratiques et certifiées (RGE) auprès d'un réseau de plus de 6000 stagiaires.



Centre de formation CRER - ZA de Baussais - 8 rue Jacques Cartier 79260 La Crèche

formation sur le site de Qualit'ENR (<https://www.formation-enr.org/annuaire>).

La formation des exploitants pour la conduite des installations de géothermie

L'exploitation d'une installation de géothermie par un nouvel utilisateur reste relativement aisée à condition que ces derniers en comprennent le principe et ses limites. Par exemple, un relevé des indicateurs de performance, une maintenance appropriée et un usage cohérent permettent d'assurer un fonctionnement optimal des installations dans la durée. Pour cela, une explication du système pour une meilleure prise en main dès la réception du chantier est nécessaire. A la demande de l'ADEME Centre-Val-de-Loire, le CRER a développé une formation à destination des exploitants pour la conduite des installations de géothermie.

La formation des entreprises de maintenance

Comme toute installation technique, la durabilité d'une installation de géothermie est conditionnée à une maintenance appropriée préventive et corrective le cas échéant. La maintenance des pompes à chaleur est réglementée et doit être réalisée à une fréquence définie en fonction de la quantité de fluide frigorigène qu'elle contient. Dans tous les cas, une visite annuelle a minima est recommandée. Les ouvrages souterrains nécessitent également une maintenance préventive afin d'assurer leur longévité (vérification du taux de glycol, nettoyage des filtres, ...).

L'entretien des installations nécessite pour les entreprises d'acquies les compétences adéquates.

Edouard Chesnel (Référént & animateur géothermie Centre Régional Energies Renouvelables : CRER 79)



→ ACTEURS ► BIBLIOGRAPHIE FILIÈRE

Bibliographie & acteurs de la promotion de la géothermie

→ Que ce soit au niveau national ou à un niveau plus local, la filière géothermie bénéficie depuis plus d'une décennie maintenant de la mobilisation et de la collaboration de nombreux acteurs pour accompagner son développement en France.

Parmi tous ces acteurs convaincus de la pertinence et des atouts de la géothermie, on peut citer de manière non exhaustive les soutiens institutionnels historiques tels que l'**ADEME** et le BRGM ainsi que l'appui des fédérations professionnelles comme l'**AFPG**.

- L'Agence de la Transition Ecologique (**ADEME**) est un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) placé sous la tutelle des ministères de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, de la Transition énergétique et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Elle participe à la construction des politiques nationales et locales de transition écologique et notamment de développement des énergies renouvelables incluant donc la géothermie.
- Le service géologique national (**BRGM**) est également un EPIC placé sous la tutelle des ministères en charge de la Recherche, de l'Écologie et de l'Économie. Depuis 1959, le **BRGM** est l'établissement public de référence français concernant la connaissance approfondie du sous-sol et de ses risques et en particulier la gestion durable des ressources géothermiques.
- Créée à l'initiative de l'**ADEME** en 2010, l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) regroupe aujourd'hui une centaine d'adhérents représentatifs des différents métiers de la géothermie en métropole et dans les DROM : foreurs, fabricants et installateurs de pompes à chaleur, fabricants de matériel, exploitants de réseaux de chaleur, bureaux d'études...

À l'échelle régionale voire territoriale, d'autres organismes assurent également la promotion de la filière. Par exemple, en région Nouvelle Aquitaine, les structures de l'**ALEC33** et du **CRER** ont la chance d'héberger des animateurs géothermie dont les missions couvrent l'ensemble de la région, en complémentarité des actions des réseaux de chargés de mission chaleur renouvelable et relais EnR. Récemment, le **Conseil régional** et l'**ADEME locale** ont signé une déclaration d'intention pour une coopération régionale sur le déploiement de la géothermie de surface et profonde.

- L'**Agence Locale de L'Énergie et du Climat 33** basée à Bordeaux (**ALEC33**) et le **Centre Régional des Énergies Renouvelables (CRER)** basé à La Crèche (79) conseillent et accompagnent les particuliers, les entreprises et les

collectivités dans leurs projets de rénovation énergétique sur les sujets de la sobriété, de l'efficacité énergétique et du développement des énergies renouvelables.

Bibliographie



Ce hors-série spécial géothermie du journal des [Énergies renouvelables](#) paru en avril 2023 vise à présenter tout le potentiel et les différents usages de la filière géothermie dont les atouts devraient lui permettre de trouver enfin sa place dans le mix énergétique français (*ouvrage payant*).

Pour plus d'informations sur la géothermie et ses différentes filières, il est également possible de consulter les sites internet de référence suivants :

- Le site institutionnel ADEME BRGM : www.geothermies.fr/
- Le site de l'Association française des professionnels de la filière AFPG : www.afpg.asso.fr/

On y retrouve par ailleurs de nombreux ouvrages sur la géothermie édités avec le soutien des acteurs institutionnels et professionnels.

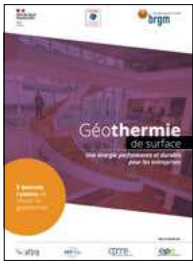
► Pour la géothermie de surface



Ce [rapport du Haut-Commissariat au Plan](#) paru en octobre 2022 présente l'intérêt et les atouts de la géothermie de surface en France.



La brochure [«Géothermie de surface : une énergie performante et durable pour les territoires»](#) a été éditée par l'ADEME, le BRGM et leurs partenaires en janvier 2019. Elle fait partie de la collection «Les bonnes raisons de choisir la géothermie de surface».



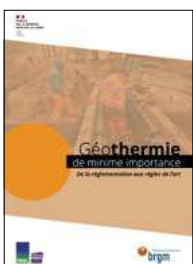
La brochure [«Géothermie de surface : une énergie performante et durable pour les entreprises»](#) a été éditée par l'ADEME, le BRGM et leurs partenaires en juillet 2022. Elle fait partie de la collection «Les bonnes raisons de choisir la géothermie de surface».



La brochure [«Géothermie de surface : une énergie performante et durable pour les piscines et centres aquatiques»](#) a été éditée par l'ADEME, le BRGM et leurs partenaires en juillet 2021. Elle fait partie de la collection «Les bonnes raisons de choisir la géothermie de surface».



La brochure [«Géothermie de surface : une énergie performante et durable pour le secteur sanitaire et médico-social»](#) a été éditée par l'ADEME, le BRGM et leurs partenaires en juin 2023. Elle fait partie de la collection «Les bonnes raisons de choisir la géothermie de surface».



Ce [vademecum](#) rédigé par le BRGM en 2021 est à destination des maîtres d'œuvre, bureaux d'études, entreprises de forage concernés pas la mise en œuvre d'un projet de géothermie ainsi que des particuliers, collectivités et entreprises ayant choisi une solution de géothermie de surface pour répondre à leurs besoins.



Cette [brochure réalisée par l'ADEME](#) en 2015 est principalement destinée aux maîtres d'ouvrage des secteurs privés et publics, aux prescripteurs, aux aménageurs, promoteurs, architectes, bureaux d'études... Son contenu pédagogique est illustré par différents exemples d'opérations sur tout le

territoire français et de nombreux témoignages de porteurs de projets qui se sont lancés avec succès dans la mise en œuvre d'une installation de géothermie.



Ce [guide édité par l'ADEME en juin 2019](#) donne toutes les clés pour réussir un projet de qualité en géothermie de surface (ouvrage payant).



Ce guide technique publié par l'AFPG en 2020 a pour vocation de présenter le concept de la [« boucle d'eau tempérée »](#) alimentée énergétiquement par une ressource géothermique. Destiné aux maîtres d'ouvrage et à tout donneur d'ordres, ce document présente la technologie de la boucle d'eau tempérée à énergie géothermique et explique comment réussir le montage d'une opération sur les plans technique, économique, environnemental et juridique.

Afin de réussir la transition énergétique de leur territoire », les élus et représentants des collectivités peuvent s'appuyer sur deux fiches concernant le développement de la [« géothermie de surface »](#) et de la [« géothermie profonde »](#). Ces fiches ont été élaborées conjointement par le ministère de la Transition écologique et l'ADEME.

► Pour la géothermie profonde



Ce [guide technique, rédigé par l'ADEME et le BRGM](#) en 2010, s'adresse aux maîtres d'ouvrage publics et privés ainsi qu'à leurs conseils, intéressés par la mise en œuvre de la géothermie pour l'alimentation d'un réseau de chaleur. Il concerne aussi bien les collectivités désireuses de développer un nouveau réseau de chaleur que celles qui souhaitent alimenter un réseau existant par la géothermie.



Réalisé dans le cadre du partenariat ADEME/BRGM sur la géothermie, [ce document](#) dresse un bilan exhaustif de la filière de géothermie profonde en France (synthèse des opérations avec leur production, synthèse des actions/projets de R&D menés à ce jour et valorisation de l'expérience acquise, étude des coûts d'opération de géothermie profonde, étude technico-économique des solutions à mettre en œuvre pour dé-risquer au mieux un projet, notamment pour l'exploration de nouveaux aquifères).

Astrid Cardona Maestro, référente nationale géothermie de surface à l'ADEME

