

QUESTIONS
RÉPONSES

Géothermies



AVANT-PROPOS

Questions Réponses Géothermies



La lutte contre le changement climatique dans laquelle nous devons tous nous engager et l'enjeu de notre indépendance énergétique dans un contexte de forte instabilité géopolitique nécessitent la mobilisation de toutes les énergies renouvelables et, notamment, de l'énergie de la Terre, la **GÉOTHERMIE**.

Cette énergie fait appel à des technologies différentes selon les ressources géothermiques exploitées et les usages attendus. Dans cet ouvrage nous traiterons de toutes les **GÉOTHERMIES** (géothermie de surface sur nappe ou sur sondes ; géothermie profonde à usage direct ou pour alimenter un réseau de chaleur urbain ; géothermie profonde de haute énergie ; etc.).

Seule énergie renouvelable capable de produire à la fois de la chaleur, du froid, du rafraîchissement et de l'électricité, avec une haute performance énergétique, une disponibilité 24 heures sur 24 et sans impact visuel en surface, la géothermie présente de multiples atouts.

Cette énergie, largement disponible dans notre sous-sol, peu onéreuse et non émettrice de CO₂, encouragée par les pouvoirs publics, intéresse de plus en plus de particuliers, de bailleurs sociaux, de collectivités et d'entreprises, soucieux de réduire leur facture énergétique et de bénéficier d'une énergie décarbonée.

Alors même que le Gouvernement a publié son plan d'actions en faveur du déploiement des géothermies, les acteurs de la filière, représentés par le Syndicat des énergies renouvelables (SER), apportent, à travers ce document, des réponses aux questions que nos concitoyens peuvent se poser sur cette énergie renouvelable, parfois méconnue, dans un format pédagogique et illustré d'exemples concrets.

La commission géothermies du Syndicat des énergies renouvelables tient à remercier l'Agence de la transition écologique (ADEME), l'Association française des professionnels de la géothermie (AFPG) et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) pour leurs contributions à cette publication.

SOMMAIRE



INTRODUCTION À LA GÉOTHERMIE

- 06 PETITE HISTOIRE DE LA GÉOTHERMIE
- 09 QUELS SONT LES ATOUS DE LA GÉOTHERMIE ?
- 10 QUELS SONT LES TYPES DE GÉOTHERMIES ET LEURS APPLICATIONS ?
- 12 QU'EST-CE QUE LA GÉOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE ?

ÉTAT DES LIEUX ET DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE EN FRANCE

- 18 QUELLE PLACE POUR LA GÉOTHERMIE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?
- 19 QUEL DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE AUJOURD'HUI ?
- 21 CHIFFRES CLÉS 2022 DE LA GÉOTHERMIE EN FRANCE
- 22 QUELLES PERSPECTIVES DE CROISSANCE ?

LA GÉOTHERMIE DE SURFACE

- 27 À QUI S'ADRESSE LA GÉOTHERMIE DE SURFACE ?
- 29 QUELLES SONT LES RESSOURCES UTILISÉES PAR LA GÉOTHERMIE DE SURFACE ?
- 31 QUELLES SONT LES TECHNOLOGIES DE GÉOTHERMIE DE SURFACE QUI PERMETTENT D'UTILISER L'ÉNERGIE DU SOUS-SOL ?
- 34 COMMENT FONCTIONNE UNE POMPE À CHALEUR (PAC) GÉOTHERMIQUE ?
- 35 QUEL MODÈLE DE PAC GÉOTHERMIQUE CHOISIR ?
- 38 QUELS SONT LES AVANTAGES DES PAC GÉOTHERMIQUES ?
- 39 QUELLES ÉTAPES POUR INSTALLER UN SYSTÈME DE GÉOTHERMIE DE SURFACE ?
- 41 COMMENT FINANCER UN PROJET DE GÉOTHERMIE DE SURFACE ?
- 43 QUEL EST LE COÛT DES INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE DE SURFACE ?
- 47 QUELLE EST LA DURÉE DE VIE DES INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE DE SURFACE ?

LA GÉOTHERMIE PROFONDE

- 50 À QUI S'ADRESSE LA GÉOTHERMIE PROFONDE ?
- 51 QUELLES SONT LES RESSOURCES UTILISÉES PAR LA GÉOTHERMIE PROFONDE ?
- 57 COMMENT FONCTIONNENT LES INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE PROFONDE ?
- 67 QUELLES SONT LES ÉTAPES POUR DÉVELOPPER UNE INSTALLATION DE GÉOTHERMIE PROFONDE ?
- 69 COMMENT FINANCER UN PROJET DE GÉOTHERMIE PROFONDE ?
- 70 QUEL EST LE COÛT DES INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE PROFONDE ?
- 71 QUELLES SONT LES DURÉES DE VIE DES INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE PROFONDE ET QUE SE PASSE-T-IL À LA FIN DE LA DURÉE D'EXPLOITATION ?



INTRODUCTION À LA GÉOTHERMIE¹



¹ Du grec "Geo" (terre) et "Thermos" (chaud), la GÉOTHERMIE désigne à la fois :

- la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre,
- l'énergie thermique issue de la Terre,
- et les technologies qui visent à utiliser cette source d'énergie naturelle.

Petite histoire de la géothermie



Les premières traces de l'utilisation de la chaleur naturelle de la Terre remontent à près de 20 000 ans avant J-C. Au fil des civilisations, la pratique des bains thermaux s'est multipliée et, depuis un siècle, les utilisations de la géothermie se sont développées pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments ou pour les usages industriels.

→ ENTRE 20 ET 15 000 ANS AV. J-C

Les régions volcaniques ont constitué très tôt des pôles d'attraction. La présence de sources d'eau et de vapeurs chaudes permettait déjà de se chauffer, de cuire des aliments ou de se baigner comme en témoigne le site archéologique de Niisato au Japon sur lequel des outils et des armes en pierre volcanique datant de la troisième ère glaciaire ont été découverts.

→ DÈS 3500 ANS AV J-C

Avec l'apparition des premières civilisations, les bains thermaux utilisant la chaleur naturelle de la Terre se répandent, tant au Japon qu'en Amérique, en Nouvelle-Zélande et en Europe. Les Étrusques, puis les Romains, font de ces bains publics un lieu de rencontres et d'échanges.

→ EN 1330

La source du Par à Chaudes-Aigues, située entre les Monts du Cantal et l'Aubrac, dont la température s'élève à 82 °C, est la plus chaude d'Europe. Les archives mentionnent que, dès 1330, un réseau distribuait de l'eau chaude à quelques maisons, moyennant le versement d'une taxe au seigneur local. Cette source servait également à certains usages artisanaux comme le lavage de la laine et des peaux.

À la même époque, dans la région de Volterra en Toscane, les "lagoni", petits bassins d'eau chaude d'où s'échappe de la vapeur à plus de 100 °C, étaient utilisés pour l'extraction du soufre et de l'alun².

→ EN 1818

En Toscane, l'ingénieur français, François de Larderel, met au point une technique permettant de recueillir la vapeur émise par les lagoni. Extraite à une pression suffisante, cette vapeur alimente les chaudières d'évaporation nécessaires à l'extraction de l'acide borique naturellement présent dans des boues. La technique sera perfectionnée autour de 1827, puis en 1833, lorsque seront effectués les premiers travaux de forage. Ils permettront d'augmenter la quantité de vapeur qui, plus tard, conduira à produire de l'électricité.

→ EN 1833

Le premier forage géothermique français est réalisé. Il s'agit de l'actuelle fontaine du puits de Grenelle, située à Paris. Construit en sept ans, ce forage atteignait 548 mètres de profondeur.

² Composé chimique utilisé en médecine, en teinturerie, etc.

→ AU DÉBUT DU XX^E SIÈCLE

On assiste à l'invention des premières pompes à chaleur géothermiques³.

→ EN 1904

Dans la ville de Larderello (fondée en l'honneur de François de Larderel), le scientifique italien, Piero Ginori Conti, invente la première turbine électrique fonctionnant à partir des vapeurs géothermales.

→ EN 1964

A Paris, une installation utilise pour la première fois l'aquifère⁴ de l'Albien⁵ pour chauffer la toute nouvelle Maison de la Radio.

→ EN 1969

À Melun (Île-de-France), une opération qui utilise l'eau chaude de l'aquifère du Dogger⁶ est lancée. Par la suite, plusieurs installations de géothermie profonde verront le jour, principalement en Île-de-France, grâce à la présence du Dogger qui possède des conditions géologiques propices à la production de chaleur.

En France, à la suite des crises pétrolières des années 1970, la géothermie connaît une croissance importante.

→ EN 1986

En Guadeloupe, à Bouillante, est mise en service la première des deux installations géothermiques françaises qui produit actuellement de l'électricité.

→ EN 1987

Un programme européen de recherche est lancé pour développer de la géothermie profonde de haute énergie⁷ en Alsace, à Soultz-sous-Forêts.

→ ENTRE 1989 ET 2008

A partir de 1989, la géothermie profonde connaît en France une période d'arrêt qui durera une vingtaine d'années. Une seule opération sera réalisée pendant cette période et l'essentiel des aides publiques pour cette filière seront consacrées au maintien du fonctionnement des installations existantes et à leur extension.

L'intérêt environnemental et énergétique de la géothermie profonde et le savoir-faire acquis par la filière permettront à partir de 2007/2008 de préparer une relance de l'activité. Depuis 2007, plus d'une trentaine de nouvelles opérations ont ainsi été réalisées essentiellement en région parisienne. Cette région présente, aujourd'hui, la plus grande densité au monde d'installations de géothermie profonde couplées à des réseaux de chaleur.



³ Voir page 34.

⁴ Voir page suivante.

⁵ L'Albien est le dernier étage stratigraphique (= couche de terrain de même âge) du Crétacé inférieur, entre - 113 et - 100,5 millions d'années. Il succède à l'Aptien et précède le Cénomaniens, premier étage du Crétacé supérieur.

⁶ Voir page 55.

⁷ Voir page 11.

→ EN 2008

Le premier kilowattheure⁸ d'électricité issu de la géothermie en métropole a été injecté sur le réseau électrique à Soultz-sous-Forêts en Alsace.

Par ailleurs, si les pompes à chaleur géothermiques installées dans le secteur individuel ont connu une rapide progression dans les années 2000, elles voient leurs ventes s'effondrer depuis 2008, notamment du fait de la baisse des aides publiques accordées à ces équipements⁹.

→ EN 2016

Le site géothermique de Rittershoffen en Alsace est mis en service. Il s'agit de la plus grande installation de géothermie profonde au monde productrice de chaleur pour un usage industriel. Elle couvre 25 % des besoins en chaleur de la bioraffinerie "Roquette Frères" de Beinheim.

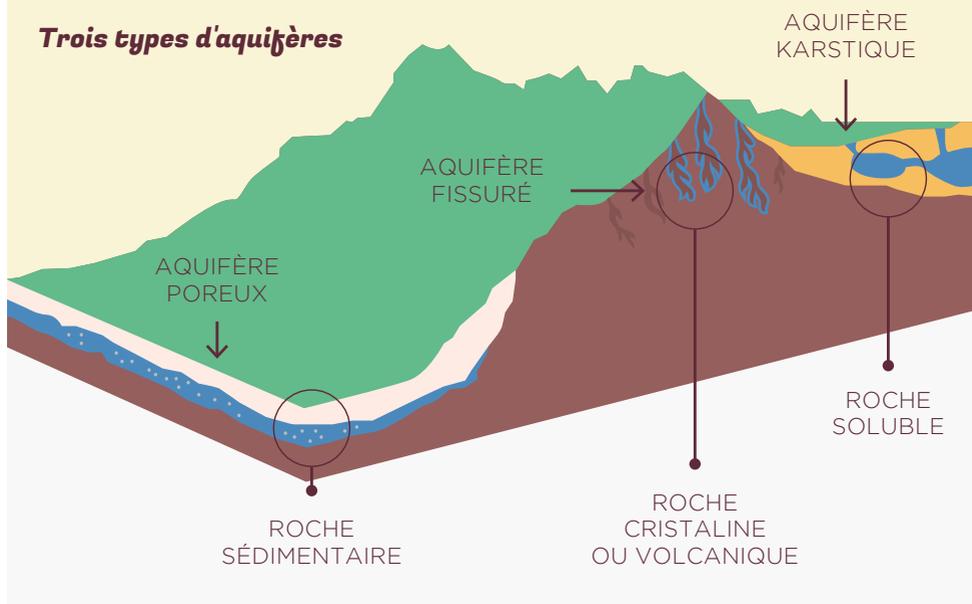
→ EN 2023

Le Gouvernement publie un Plan d'actions ambitieux pour accélérer le développement de toutes les géothermies en France. L'objectif est de multiplier par 4 l'énergie produite par géothermie d'ici 2030.

QU'EST-CE QU'UN AQUIFÈRE ?

Un **aquifère** est un sol ou une roche réservoir naturellement poreuse ou fissurée, contenant une nappe d'eau souterraine et suffisamment perméable pour que cette eau puisse y circuler librement.

Trois types d'aquifères



⁸ 1 gigawattheure (GWh) = 1 000 mégawattheures (MWh) = 1 000 000 kilowattheures (kWh) = 86 tonnes équivalent pétrole (tep).

⁹ Voir page 20.

Quels sont les atouts de la géothermie ?



L'énergie thermique de la Terre est inépuisable à l'échelle du temps humain. À ce titre, la géothermie fait partie de la famille des énergies renouvelables.

Avec un impact esthétique limité sur les paysages, la géothermie constitue une énergie performante, locale, disponible 24 heures sur 24, capable de produire à la fois de la chaleur, de l'électricité et du froid. Sa capacité à produire du froid, mais également du frais, sans contribuer à la création d'îlot de chaleur urbain¹⁰, avec peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre, en fait un atout majeur dans un contexte de lutte contre le dérèglement climatique et d'augmentation des épisodes de canicule.

Par ailleurs, la géothermie favorise l'indépendance énergétique de la France, qui dispose d'un potentiel considérable¹¹ en termes de ressource utilisable. Elle constitue une source d'énergie locale à fort potentiel, capable de répondre aux besoins énergétiques de millions de personnes, et ce, sans transport puisqu'elle se situe sous nos pieds.

Energie de territoire, la géothermie permet de développer l'économie locale. En 2019, la filière a généré 2 500 emplois directs et indirects et une valeur ajoutée de 280 millions d'euros¹².



¹⁰ Avec une pompe à chaleur géothermique (PAC géothermique), la chaleur du logement est transférée dans le sous-sol et non dans l'air extérieur. Cela permet en plus de réaliser un stockage inter-saisonnier de l'énergie : l'hiver, on extrait les calories du sous-sol pour chauffer son logement et, l'été, on utilise la climatisation pour recharger le sol en calories (remarque : la calorie est unité de mesure de quantité de chaleur).

¹¹ Voir page 29 (Potentiel de la géothermie de surface) & voir page 51 (Potentiel de la géothermie profonde).

¹² D'après EY & SER, Evaluation et analyse de la contribution des énergies renouvelables à l'économie de la France et de ses territoires, 2020.

Quels sont les types de géothermies et leurs applications ?



On distingue généralement deux grands types de géothermie : la géothermie de surface et la géothermie profonde.

Géothermie de surface

Pompes à chaleur (PAC) géothermiques
Température inférieure à 30 °C

Géothermie de basse énergie
Température entre 30 °C et 150 °C

Géothermie profonde

Géothermie de haute énergie
Température supérieure à 150 °C

La géothermie de surface

La **géothermie de surface** (appelée aussi géothermie de très basse énergie) désigne l'utilisation de la chaleur du sous-sol à faible profondeur (moins de 200 mètres) et à faible température (moins de 30 °C), *via* **une pompe à chaleur (PAC) géothermique**¹³.

Il est possible, soit de pomper l'eau des aquifères avec un système ouvert (l'eau est intégralement réinjectée dans l'aquifère d'origine), soit d'utiliser un système souterrain de circulation en boucle fermée (sonde géothermique ou système géothermique, cf. page 32) pour acheminer la chaleur du sous-sol jusqu'à la surface.

On peut également produire du froid, par l'utilisation d'une PAC réversible¹⁴, ou du frais par géocooling¹⁵.

Le géocooling fait partie des techniques qui consistent en l'utilisation "directe" de la température du sous-sol pour assurer le rafraîchissement naturel d'un bâtiment sans fonctionnement de la pompe à chaleur géothermique.

Ainsi, la géothermie de surface permet de couvrir les besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de climatisation et de rafraîchissement pour des bâtiments neufs ou rénovés.

La majeure partie des projets de géothermie de surface est qualifiée au sens du code minier de **Géothermie de Minime Importance (GMI)**¹⁶.

¹³ Voir page 34.

¹⁴ Voir page 36.

¹⁵ Voir page 37.

¹⁶ Voir page 12.

La géothermie profonde

La **géothermie profonde** concerne l'exploitation directe de l'énergie du sous-sol au moyen de forages, pour produire de la chaleur, du froid ou de l'électricité. C'est l'eau présente dans des aquifères¹⁷ profonds que l'on exploite à l'aide de doublets de forages¹⁸ et qui sert de vecteur pour transférer la chaleur vers la surface.

La géothermie profonde s'adresse à des horizons géologiques situés à plusieurs centaines, voire quelques milliers, de mètres de profondeur.

Les ressources géothermiques pour la production d'électricité se rencontrent principalement dans des aquifères discontinus¹⁹, qui offrent des débits d'exploitation importants et sont présents dans des zones de volcanisme actif ou récent entre 500 et 1 500 mètres de profondeur. En France, ces ressources sont potentiellement présentes dans les DROM insulaires (Guadeloupe, Martinique, Réunion, Mayotte). On distingue alors les gisements de **haute énergie** (température du fluide extrait supérieure à 150 °C) et ceux de **moyenne énergie** (température du fluide extrait comprise entre 90 et 150 °C). Leur exploitation fait appel à des technologies de production d'électricité différentes.

Les ressources géothermiques profondes valorisées pour la production de chaleur - on parle alors de géothermie, ou de gisements, de **basse énergie** - se rencontrent généralement dans des formations sédimentaires, très étendues, de haute porosité et perméabilité, situées entre 500 et 2 500 mètres de profondeur. La température des eaux de ces gisements est typiquement comprise entre 30 et 90 °C. En France, on rencontre ce type de ressources dans le Bassin parisien ou le Bassin aquitain. Leur chaleur est couramment valorisée au moyen d'un doublet de forages pour le chauffage urbain, le chauffage de serres, de piscines et d'établissements thermaux, l'aquaculture ou le séchage.

Pour la production de chaleur, on notera également l'existence de ressources géothermiques très profondes qui s'adressent à des réservoirs à faible perméabilité (bassins d'effondrement, zones périphériques des champs géothermiques de haute énergie, etc.), fracturés naturellement et qu'il est nécessaire de stimuler par voie hydraulique ou chimique pour en augmenter la perméabilité. Les centrales produisent de l'électricité ou de la chaleur ou les deux (en cogénération). C'est le cas en France du Bassin rhénan où les températures atteintes pour ce type de ressources sont de l'ordre de 150 à 200 °C, pour des profondeurs comprises entre 2 500 et 5 000 mètres.

¹⁷ Terrain perméable, poreux, permettant l'écoulement d'une nappe souterraine et le captage de l'eau.

¹⁸ Un doublet est constitué de deux petits puits proches, l'un de pompage, l'autre de réinjection, mis simultanément en action dans un même aquifère, notamment pour restituer à cet aquifère l'eau pompée après usage (voir page 57).

¹⁹ Aquifères naturellement fracturés.

Qu'est-ce que la Géothermie de Minime Importance ?



La **Géothermie de Minime Importance (GMI)**²⁰ désigne un statut administratif qui permet de réaliser les travaux de forages suivant une procédure accélérée sous certaines conditions :

- Les forages et l'installation de l'échangeur géothermique doivent être réalisés par une entreprise disposant d'une attestation de qualification²¹ délivrée par un **organisme accrédité**²² ;
- La profondeur du forage est inférieure à 200 mètres ;
- La puissance thermique prélevée dans le sous-sol, pour l'ensemble de l'installation, doit être inférieure à 500 kW.

Pour les activités de captage sur nappe d'eau souterraine (systèmes ouverts), la température de l'eau prélevée est inférieure à 25 °C ; les débits de prélèvement et de réinjection sont inférieurs à 80 m³/h et la totalité des eaux prélevées est réinjectée dans le même aquifère²³.

En plus de ces critères, pour être considérée comme appartenant au régime de la GMI, l'installation doit être située dans les zones vertes ou orange définies dans l'article 22-6 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006.



Les zones vertes correspondent aux zones dans lesquelles les installations ne présentent pas de risques environnementaux significatifs et doivent être simplement déclarées en tant que GMI.

Les zones oranges correspondent aux zones dans lesquelles les installations ne présentent pas de risque et doivent être déclarées mais, également, approuvées par un expert en tant que GMI. La déclaration doit être prise en charge par le foreur. Environ 95 % des demandes d'installation en zone orange sont accordées par les experts.

Quant **aux zones rouges**, elles désignent les **zones dans lesquelles les installations de géothermie de surface peuvent être réalisées, mais nécessitent des études approfondies et un avis des services de l'Etat.**

Elles ne peuvent donc être qualifiées de GMI. Pour ces installations géothermiques en zone rouge, une demande d'autorisation complète conforme au **code minier** est nécessaire.

²⁰ Les décrets n° 78-498 du 28 mars 1978 et n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifiés réglementent la GMI.

²¹ À ce jour, la seule qualification est Qualiforage, portée par Qualit'ENR. Voir page 39.

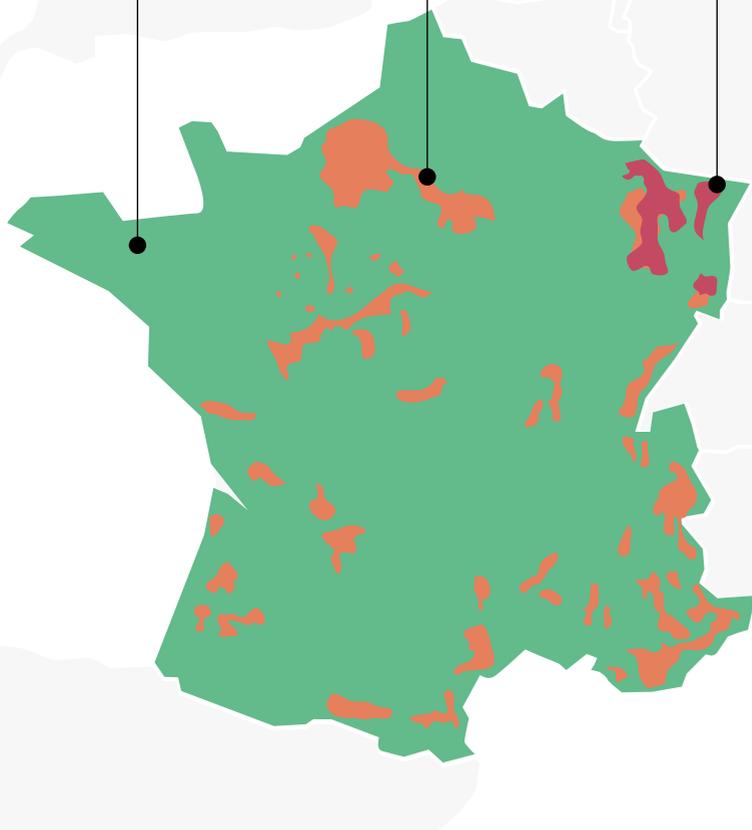
²² L'accréditation est accordée par le comité français d'accréditation ou un organisme signataire de l'accord européen multilatéral relatif à la coordination européenne des organismes d'accréditation.

²³ Voir l'article 4.2 de l'arrêté du 25 juin 2015 concernant les échangeurs géothermiques.

**ZONES
VERTES**

**ZONES
ORANGES**

**ZONES
ROUGES**



**GÉOTHERMIE
PROFONDE
POUR LA
PRODUCTION
DE CHALEUR /
EAU CHAUDE
EN RÉSEAU**

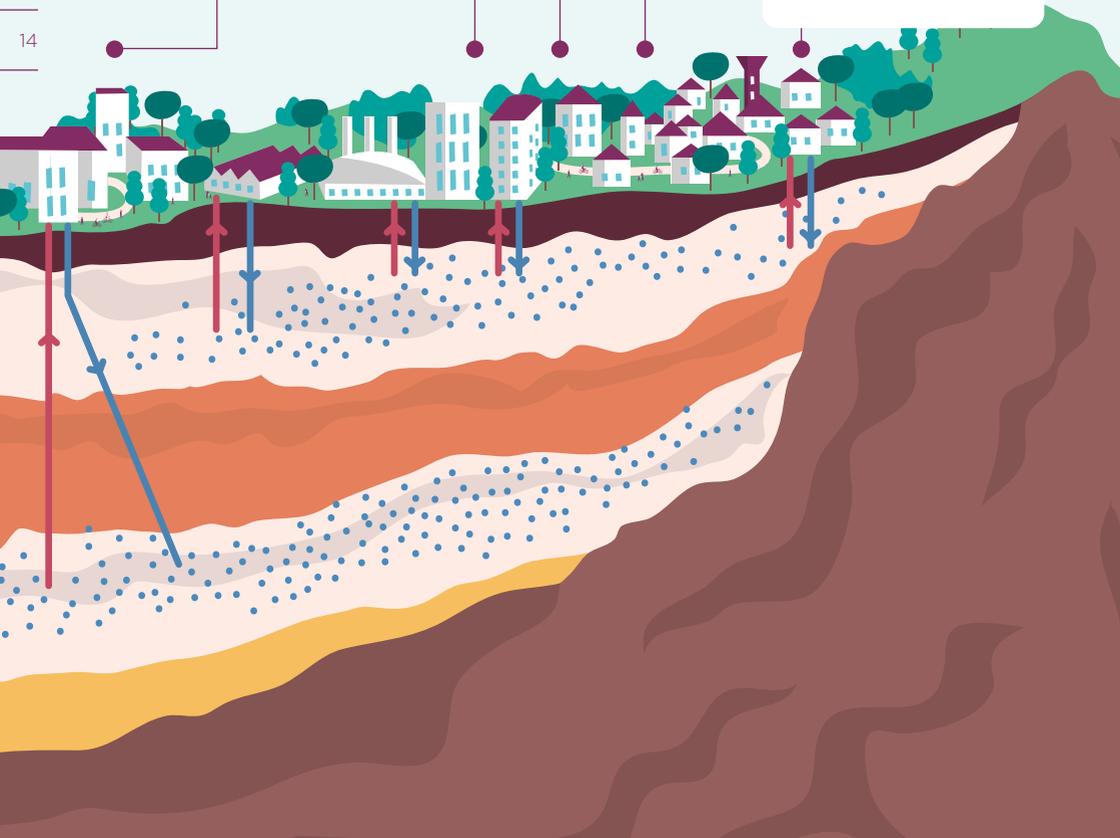
Le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter les réseaux de chaleur.

**GÉOTHERMIE
DE SURFACE
POUR LA
PRODUCTION
DE CHALEUR
ET DE FROID**

L'eau géothermale peut être utilisée, avec ou sans pompe à chaleur, pour le chauffage et la climatisation de serres agricoles, la pisciculture, des usages industriels, etc.

**GÉOTHERMIE
DE SURFACE
POUR LA
PRODUCTION DE
CHALEUR,
DE FROID ET DE
RAFRAÎCHIS-
SEMENT**

Les pompes à chaleur géothermiques sur aquifères superficiels ou sur sondes permettent le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude pour des immeubles, des bâtiments tertiaires et des maisons. Les bâtiments peuvent aussi être rafraîchis grâce au géocooling.



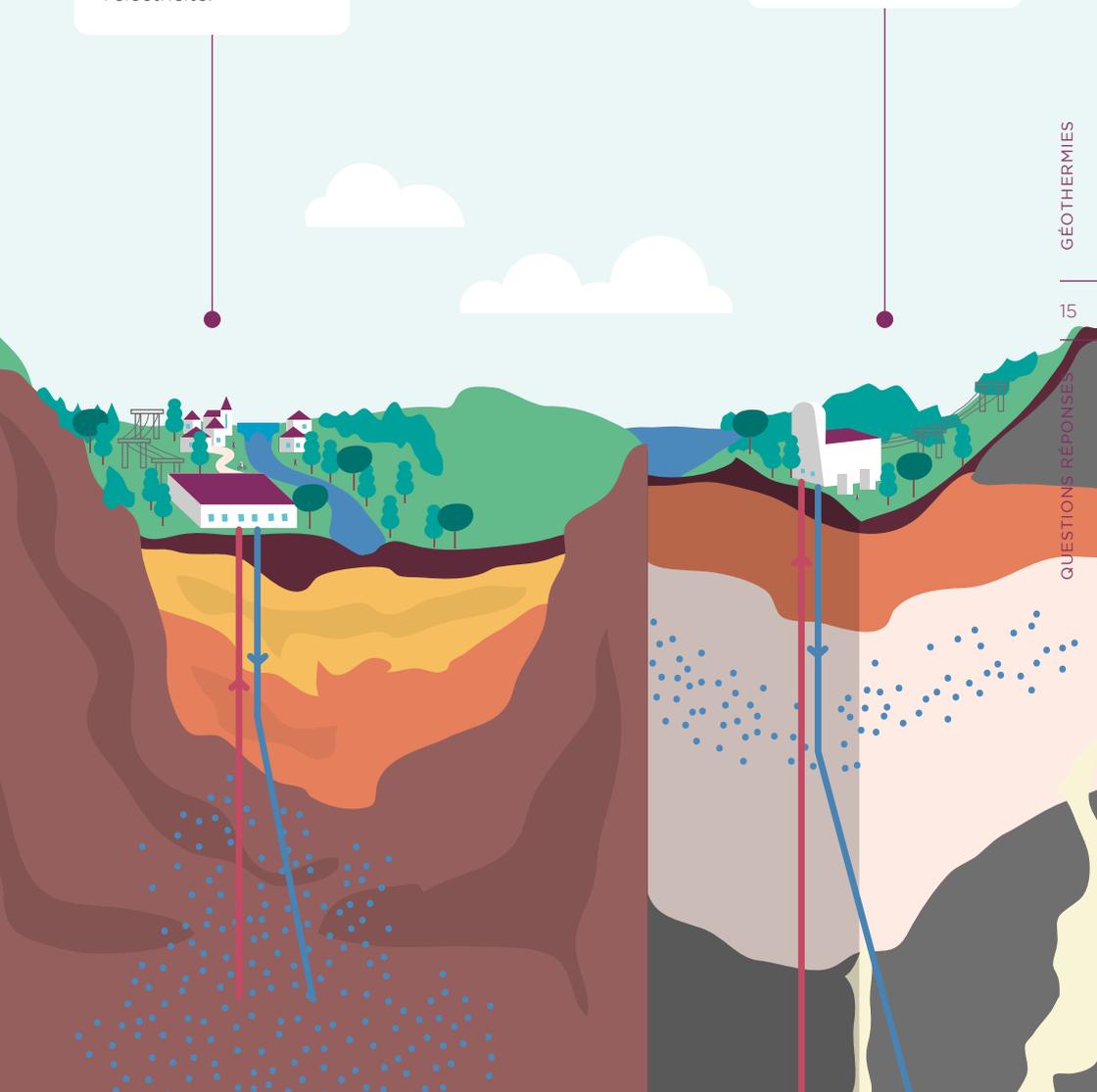
GÉOTHERMIE PROFONDE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ET DE CHALEUR

La température des milieux discontinus à grande profondeur permet de produire de la chaleur et/ou de l'électricité.

- TERRAINS SUPERFICIELS
- ROCHES PERMÉABLES CALCAIRE
- ROCHES PERMÉABLES GRÈS
- ROCHES IMPERMÉABLES
- GRANITE
- PRÉSENCE D'EAU
- ROCHE VOLCANIQUE
- CHAMBRE MAGMATIQUE

GÉOTHERMIE PROFONDE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

L'eau est captée à haute température, souvent sous forme de vapeur, pour la production d'électricité.





ÉTAT DES LIEUX ET DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOTHERMIE EN FRANCE



Quelle place pour la géothermie dans la transition énergétique ?



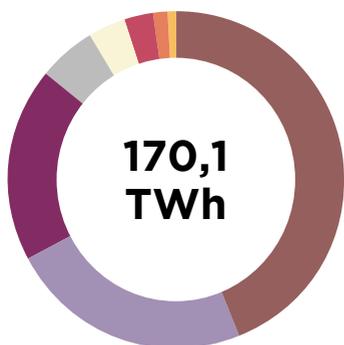
Principale source de production de froid renouvelable, cinquième source de production de chaleur renouvelable, la géothermie est une des sources d'énergie renouvelable dont dispose largement la France pour participer à la lutte contre le changement climatique, honorer ses engagements nationaux et internationaux en matière de transition énergétique et accroître sa souveraineté énergétique.

Fin 2022, la géothermie représente 2 % de la production nationale d'énergies renouvelables, pratiquement exclusivement sous forme de chaleur²⁴. Elle compte pour 3,9 % de la production de chaleur renouvelable totale²⁵.

La géothermie de surface représente près de 70 % de la production d'énergie produite par géothermie en France en 2022²⁶.

Part de chaque filière dans la production de chaleur renouvelable en France métropolitaine en 2022

Source > SER



45,3%	CHAUFFAGE AU BOIS DOMESTIQUE 77 TWh
22,9%	POMPE À CHALEUR AÉROtherMIQUE 39 TWh
18,3%	CHAUFFERIES BOIS (COLLECTIF, INDUSTRIEL & TERTIAIRE)E 31,1 TWh
5,3%	GAZ RENEUVABLES 9 TWh
3,5%	UNITÉ DE VALORISATION ENERGETIQUE DES DÉCHETS 6 TWh
2,7%	GÉOTHERMIE DE SURFACE 4,6 TWh
1,2%	GÉOTHERMIE PROFONDE 2,1 TWh
0,8%	CHALEUR SOLAIRE 1,3 TWh

²⁴ Source > SER et SDES.

²⁵ Fin 2021, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale de chaleur de la France a atteint 22,3 %.

²⁶ D'après le Panorama de la chaleur renouvelable et de récupération 2022. CIBE, FEDENE, SER, UNICLIMA, avec la participation de l'ADEME.

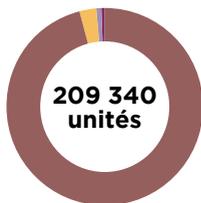
Quel développement de la géothermie aujourd'hui ?



Géothermie de surface

Nombre de PAC géothermiques installées par secteur au 31 décembre 2022

Source > SER, d'après AFIG



96%

INDIVIDUEL
201 201 UNITÉS

2,7%

TERTIAIRE
5 608 UNITÉS

0,8%

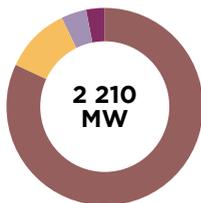
RÉSIDENTIEL
COLLECTIF
1 596 UNITÉS

0,5%

AGRICULTURE
INDUSTRIE
930 UNITÉS

Répartition des puissances installées des PAC géothermiques par secteur au 31 décembre 2022 (en MW)

Source > SER, d'après AFIG



82%

INDIVIDUEL
1 811 MW

11%

TERTIAIRE
246 MW

4%

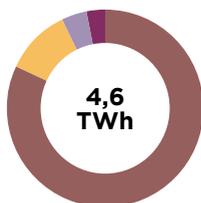
RÉSIDENTIEL
COLLECTIF
82 MW

3%

AGRICULTURE
INDUSTRIE
71 MW

Production de chaleur renouvelable des PAC géothermiques par secteur en 2022 (en TWh)

Source > SER, d'après AFIG



82%

INDIVIDUEL
3,75 TWh

11%

TERTIAIRE
0,50 TWh

4%

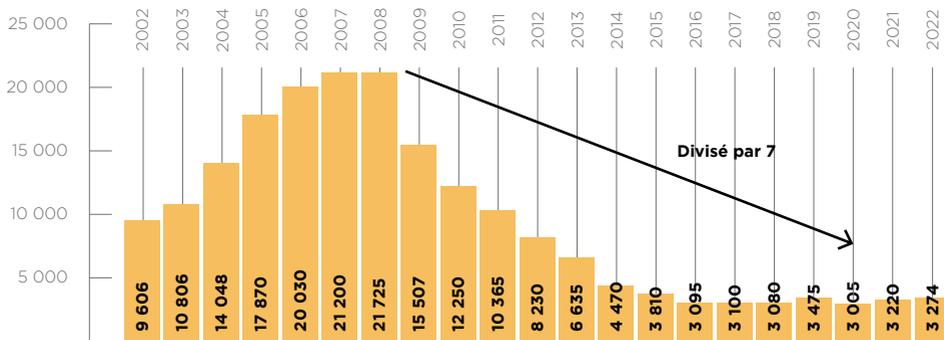
RÉSIDENTIEL
COLLECTIF
0,17 TWh

3%

AGRICULTURE
INDUSTRIE
0,14 TWh

Nombre de PAC géothermiques livrées dans le secteur individuel par an (P < 30 KW)

Source > SER, AFPG, Observ'ER, AFPAC, SDES, UNICLIMA, BRGM et ADEME

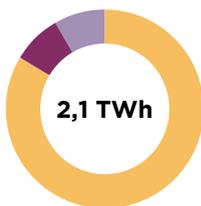


La diminution des ventes de PAC géothermiques dans le secteur individuel depuis 2009 est notamment due à la crise économique de 2008 qui a entraîné une chute de la construction neuve particulière, cible privilégiée pour la géothermie de surface, et à l'émergence des PAC aérothermiques, moins coûteuses à l'investissement.

Géothermie profonde

Production de chaleur renouvelable de la géothermie profonde par bassin géologique en 2022 (en TWh)

Source > SER, d'après AFPG et BRGM



- 82% ○ BASSIN PARISIEN 1,7 TWh
- 9% ○ BASSIN AQUITAIN 0,2 TWh
- 9% ○ AUTRES BASSINS (BASSIN DU SUD-EST ET FOSSE RHÉNAN) 0,2 TWh

Production de chaleur renouvelable de la géothermie profonde par usage en 2022 (en TWh)

Source > SER, d'après AFPG et BRGM



- 86% ○ INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES POUR LE CHAUFFAGE URBAIN 1,8 TWh
- 9% ○ INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES POUR L'INDUSTRIE 0,2 TWh
- 5% ○ INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES POUR L'AGRICULTURE ET LA PISCICULTURE 0,1 TWh

Il existe également, dans une bien moindre mesure, d'autres usages de la géothermie profonde qui ne figurent pas dans le graphique ci-dessus : piscines, thermes, chauffage de l'eau chaude sanitaire, co-productions pétrole/géothermie.

Chiffres clés 2022 de la géothermie en France²⁷



3,9%

DE LA PRODUCTION
DE CHALEUR RENOUVELABLE
SOIT 6,7 TWh

0,1%

DE LA PRODUCTION
D'ÉLECTRICITÉ RENOUVELABLE
SOIT 0,1 TWh

209 340

POMPES À CHALEUR
GÉOTHERMIQUES
INSTALLÉES

79

INSTALLATIONS
DE GÉOTHERMIE PROFONDE
DE CHAUD ET DE FROID
dont 55 en Île-de-France

2

CENTRALES GÉOTHERMIQUES
ÉLECTROGÈNES
Bouillante en Guadeloupe
Soulz-Sous-Forêts en Alsace

4,6 TWh

DE PRODUCTION THERMIQUE
PAR LES PAC
GÉOTHERMIQUES

2,1 TWh

DE PRODUCTION THERMIQUE
PAR LA GÉOTHERMIE
PROFONDE

120 GWh

DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE
PAR LA GÉOTHERMIE
PROFONDE

250 000

EQUIVALENTS LOGEMENTS
CHAUFFÉS PAR GÉOTHERMIE PROFONDE

2 500

EMPLOIS DIRECTS ET INDIRECTS
DANS LA FILIÈRE GÉOTHERMIE

1 million

DE FRANÇAIS CHAUFFÉS OU RAFRAÎCHIS
PAR GÉOTHERMIE DE SURFACE

280 millions €

DE VALEUR AJOUTÉE EN 2019

²⁷ Le watt (W) est une unité de mesure de la puissance énergétique d'une installation. 1 kilowatt (kW) = 1 000 W & 1 mégawatt (MW) = 1 000 kW.

Quelles perspectives de croissance ?

Le ministère de la Transition énergétique a fixé les objectifs à atteindre en matière de développement de la géothermie dans le Décret n° 2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la **Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)**, qui regroupe les objectifs affichés par l'Etat en matière de politique énergétique.

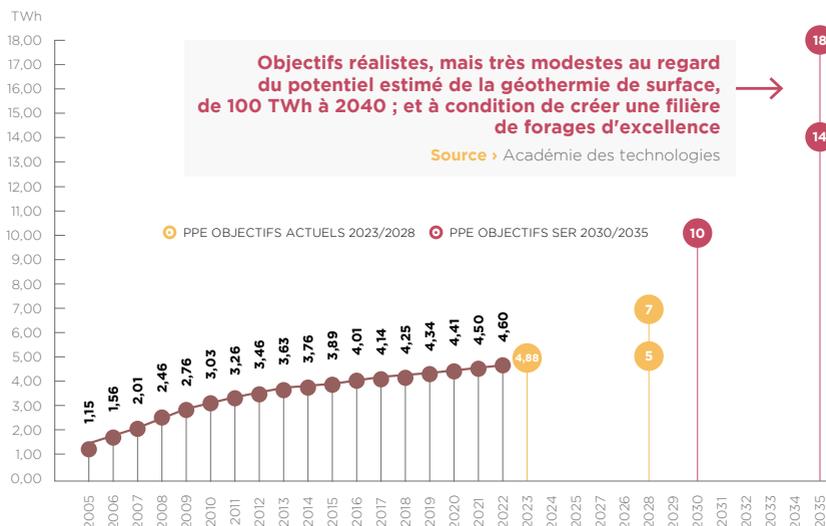
En France métropolitaine, l'actuelle PPE détermine les objectifs pour les périodes 2019/2023 et 2024/2028. Dans le cadre de la prochaine PPE, qui doit être adoptée au plus tard le 1^{er} juillet 2024 et va définir des objectifs de développement des énergies renouvelables pour la période 2030-2035, la géothermie sera appelée à jouer un rôle plus important dans le développement de la chaleur renouvelable.

Production de chaleur issue de la géothermie de surface

Pour les acteurs de la filière, représentés par le SER, il est possible d'atteindre l'objectif haut de l'actuelle PPE en 2028, soit 7 TWh, puis 10 TWh en 2030 et entre 14 et 18 TWh de production de chaleur issue de la géothermie de surface en 2035, contre 4,6 TWh en 2022²⁸.

Production de chaleur renouvelable des PAC géothermiques et objectifs PPE (en TWh)

Source > SER, d'après AFPG

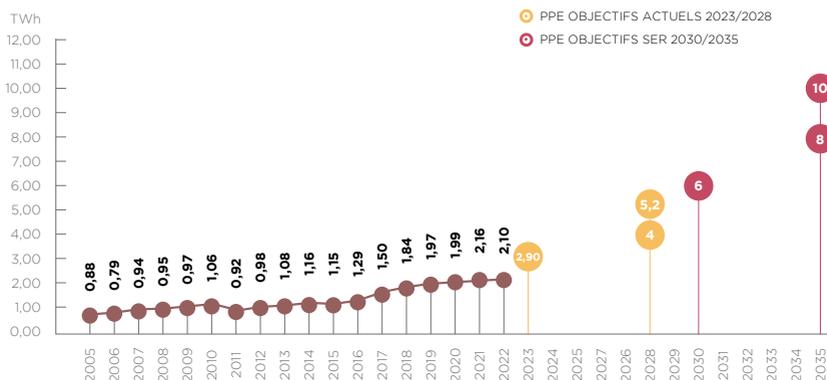


Production de chaleur issue de la géothermie profonde

Si des mesures rapides et efficaces sont mises en œuvre, l'objectif haut actuel de la PPE en 2028 pourra être atteint, soit 5,2 TWh, puis 6 TWh en 2030 et entre 8 et 10 TWh de production de chaleur issue de la géothermie profonde en 2035, contre 2,1 TWh en 2022²⁹.

Production de chaleur renouvelable par géothermie profonde et objectifs PPE (en TWh)

Source > SER, d'après AFPG et BRGM



La production d'électricité par géothermie profonde

L'actuelle PPE ne fixe pas d'objectif pour le développement de la production d'électricité par géothermie en France métropolitaine et le gouvernement a, pour l'instant, suspendu le soutien à cette filière en abrogeant le mécanisme de soutien qu'il lui avait attribué. Le SER évalue le potentiel à 57 MW en 2028 puis entre 100 et 130 MW en 2033, sur la base de l'analyse des projets actuellement en file d'attente.

À long terme, après un retour d'expérience technico-économique approfondi des installations existantes, il sera pertinent d'étudier collectivement la réintroduction d'un soutien économique adapté à ces installations.

Dans les territoires d'outre-mer, la situation est différente. Les PPE sont propres à chaque territoire et, pour certains d'entre eux, la géothermie pourrait contribuer de façon significative au mix électrique.

²⁹ Source > SER, d'après AFPG et BRGM.

C'est le cas de la Guadeloupe, par exemple, où la géothermie devrait fournir prochainement 13 à 14 % de l'électricité produite dans l'archipel, avec l'extension de la capacité du site de Bouillante et probablement plus de 30 % d'ici à 2030 avec l'émergence de nouveaux projets. Par ailleurs, La Réunion évoque une possibilité de réaliser une première production d'électricité de 5 MW.

Un autre enjeu de la géothermie profonde : le lithium

Le lithium est une ressource essentielle pour la transition énergétique grâce à sa capacité de stockage de l'énergie électrique *via* l'utilisation de batteries lithium-ion, utilisées pour les véhicules électriques, par exemple.

La production de lithium par géothermie profonde constitue un enjeu véritablement stratégique pour l'industrie française.

La demande mondiale en lithium va tripler d'ici à 2030. Or, 86 % de l'approvisionnement en Europe provient actuellement d'importations.

La géothermie profonde offrirait à l'Europe et à la France la possibilité d'extraire leur propre minerai.

En effet, de récentes études ont permis d'étudier la possibilité de son extraction à partir des eaux géothermales.

Le lithium est fortement présent dans les eaux géothermales qui circulent en profondeur au sein des granites et des grès. En Alsace, zone la plus explorée, la teneur en lithium dans l'eau géothermale profonde varie entre 150 et 200 milligrammes par litre. D'autres sites géothermiques, comme les Pyrénées et le Massif central ou le Trias dans le Bassin parisien, ont également des teneurs significatives.

Parmi les entreprises françaises intéressées par cette nouvelle perspective, l'une d'elles propose un procédé de filtrage qui permet d'extraire plus de 95 % du lithium contenu dans ces eaux. Étudiée en laboratoire, puis validée à l'étape préindustrielle sur plusieurs sites opérationnels, cette technologie ne rejette pas de déchet et ne provoque aucune perte en eau pompée. Une extraction de 80 % du lithium circulant à 300 m³/h dans la boucle primaire d'un doublet géothermique³⁰ (données de l'installation de Rittershoffen) permettrait de produire annuellement environ 300 tonnes de lithium, soit de l'ordre de 1 500 tonnes d'équivalent carbonate de lithium (LCE) par an, correspondant à la quantité nécessaire pour la fabrication de 55 000 batteries de véhicules électriques. Dans l'hypothèse où ce procédé serait étendu à une dizaine d'installations géothermiques, la demande française annuelle de lithium serait satisfaite : elle représente environ 6 % de la production mondiale qui, en 2016, s'élevait à 215 000 tonnes.

³⁰ Voir page 57.





LA GÉOTHERMIE DE SURFACE



À qui s'adresse la géothermie de surface ?

La **géothermie de surface** intéresse de plus en plus de particuliers, de grandes copropriétés, de collectivités et d'entreprises, soucieux de réduire leur facture énergétique et leurs émissions de CO₂.

La géothermie est une solution pour les constructions neuves et la rénovation.

Si la géothermie de surface est compatible avec la construction de bâtiments neufs, elle constitue également une solution applicable à la rénovation. Pour la rénovation de bâtiments existants, il faut s'assurer de la cohérence entre le choix des émetteurs de chaleur (radiateurs, plancher chauffant, etc.) et la pompe à chaleur géothermique. Il est également préconisé de vérifier que l'isolation du bâtiment est suffisante. Une bonne isolation permettra de diminuer la température restituée par les émetteurs de chaleur, rendant l'installation encore plus performante.



→ Pour aller plus loin

- Guide "Géothermie, pour chauffer et rafraîchir sa maison", publié en 2019, par l'Agence de la transition écologique (ADEME) sur la géothermie de surface pour le particulier.
- Guide de l'ADEME sur la géothermie de surface dans le collectif et tertiaire.
- Brochure coéditée par l'ADEME et le BRGM sur les avantages de la géothermie de surface pour les collectivités.
- Brochure coéditée par l'ADEME et le BRGM sur les avantages de la géothermie de surface pour les entreprises.

UN SYSTÈME DE GÉOTHERMIE DE SURFACE EST-IL COMPATIBLE AVEC DE VIEUX SYSTÈMES DE CHAUFFAGE ?

Cela dépend des systèmes de chauffage. Là encore, c'est à l'installateur de la PAC géothermique de vérifier la compatibilité entre l'équipement géothermique et le système de chauffage en place.

Il est parfois nécessaire de changer les radiateurs s'ils ne fonctionnent qu'à haute température.



LA HALLE AUX GRAINS

La ville de Blois

En 1985, la ville de Blois (Centre-Val de Loire) a choisi la géothermie de surface dans le cadre de la rénovation de sa Halle aux grains, classée aux monuments historiques, et de sa transformation en salle de spectacles et de congrès. La discrétion de la géothermie justifiait ce choix. Associée aux économies de consommation énergétique, cette décision s'avère toujours judicieuse et rentable, plus de 30 ans après sa réalisation.



Chiffres clés

4 880 m²

DE SURFACE

2 forages

DE 70 ET 90 MÈTRES DE PROFONDEUR

191 000 €

EN 1985, PUIS 101 k€ en 2011
POUR LE RENOUELEMENT
DE LA POMPE À CHALEUR
APRÈS 26 ANS DE FONCTIONNEMENT

UNE CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ

DIVISÉE PAR **2,5**

PAR RAPPORT À UNE SOLUTION
ÉLECTRIQUE CLASSIQUE

186 tonnes

DE CO₂ ÉVITÉES PAR AN (PAR RAPPORT
À UNE SOLUTION GAZ NATUREL)

2 131 MWh

D'ÉNERGIE FINALE ÉCONOMISÉE
GRÂCE AUX CERTIFICATS D'ÉCONOMIE
D'ÉNERGIE DE LA VILLE

Quelles sont les ressources utilisées par la géothermie de surface ?



En géothermie de surface, la ressource utilisée est la chaleur naturelle de la Terre accessible directement dans le sol ou la roche ainsi que dans les aquifères superficiels, juste sous nos pieds. La géothermie de surface fait appel à deux technologies, pouvant atteindre 200 mètres :

→ Si des **aquifères** sont exploitables à faible profondeur, l'eau est pompée *via* un forage de production puis réinjectée dans l'aquifère d'origine *via* un forage de réinjection : il s'agit de la **géothermie sur nappe**.

→ Sinon, le **sous-sol** transmet sa chaleur *via* un système enterré en circuit fermé dans lequel circule un fluide caloporteur (de l'eau ou de l'eau glycolée³¹) : il s'agit alors de la **géothermie sur sondes ou par systèmes géothermiques tels que les corbeilles, les murs, les pieux ou le captage horizontal**.

Pour chauffer le bâtiment, une pompe à chaleur géothermique utilise les fluides de l'une ou l'autre technologie. La faible température de ces fluides (entre 10 et 15 °C) permet d'assurer également un rafraîchissement direct par **géocooling**³².

³¹ L'eau glycolée est une eau normale de réseau à laquelle on a ajouté un % de glycol, par exemple 20 % afin que cette eau ne puisse geler, même si elle est stagnante.

³² Voir page 37.

LE GISEMENT FRANÇAIS DE LA GÉOTHERMIE DE SURFACE

Il est possible d'installer une pompe à chaleur géothermique sur près de 90 % du territoire pour des forages sur nappe ou sur sondes et sur près de 100 % du territoire si, dans les zones en rouge (cf. carte GMI, page 13), on déploie des échangeurs géothermiques compacts (corbeilles ou murs) qui, réalisés à moins de 10 mètres de profondeur, ne nécessitent pas de déclaration. Par conséquent, si la ressource en eau contenue dans des aquifères n'est pas présente partout, le sous-sol peut transmettre sa chaleur *via* la géothermie sur sondes et par corbeilles ou murs quasiment partout. La géothermie de surface chauffe et/ou rafraîchit déjà un million de Français en 2022, mais son potentiel reste encore trop faiblement utilisé.



PART DU TERRITOIRE
MÉTROPOLITAIN PROPICE
À LA GÉOTHERMIE
DE SURFACE

ÉPUISE-T-ON LA RESSOURCE GÉOTHERMIQUE SUR LE LONG TERME ?

La ressource géothermique ne s'épuise pas. En effet, c'est le rôle du dimensionnement de définir et d'adapter la technologie géothermique en fonction des besoins du client. Ainsi, si la ressource est utilisée correctement, il n'y a aucun risque d'épuisement ou de baisse de température significative de la ressource. Dans le cadre des sondes géothermiques verticales, la température du sol diminue localement et très légèrement pour atteindre un palier au bout de 30 ans avec une perte de l'ordre de quelques degrés. De plus, et dès le début du projet, les installations sont dimensionnées en prenant en compte cette diminution de température à venir. Il n'y a donc pas de problème d'épuisement de la ressource.

Aucune diminution durable de la température de la nappe d'un aquifère ou d'un sous-sol, liée à la géothermie, n'a pu être constatée jusqu'à maintenant. En outre, l'installation d'un système de refroidissement géothermique pour la climatisation ou le rafraîchissement permet de restituer au sous-sol en été une partie des calories prélevées en hiver.

33 Biseau salé = Partie d'un aquifère côtier envahi par l'eau salée, généralement de l'eau de mer, comprise entre la base de l'aquifère et une interface de séparation eau douce / eau salée : le coin d'eau salée est sous l'eau douce.

EST-CE-QUE LE FORAGE PEUT ÊTRE NOCIF POUR LES NAPPES PHRÉATIQUES ?

Rappelons que le forage doit être réalisé par un foreur agréé ayant la mention Qualiforage (liste des foreurs sur le site Qualit'ENR) et selon les normes en vigueur. Cela signifie que le foreur a suivi une formation lui permettant de connaître la législation et les démarches obligatoires à suivre. De plus, dans le cadre de la pose de sondes géothermiques verticales, la cimentation du puits est réalisée au plus tôt, empêchant la communication éventuelle entre deux aquifères. Les risques ne se rencontrent que pendant le forage (période relativement courte). Il est important de préciser que les mêmes problèmes peuvent exister lors de la réalisation d'un forage d'eau classique de captage d'alimentation en eau potable, et qu'il s'agit donc de techniques éprouvées.

Par ailleurs, les risques géologiques, tels que les mouvements de terrain (affaissement, soulèvement, effondrement), la pollution des sols et des nappes, la remontée de nappe ou le biseau salé³³, sont pris en compte lors de l'établissement de la carte de la Géothermie de Minime Importance et l'exploitation n'est possible qu'avec un permis minier dans les zones où ces risques sont significatifs. Ces derniers sont également minimisés par l'obligation imposée par la réglementation de faire réaliser les travaux par une entreprise qualifiée.

Quelles sont les technologies de géothermie de surface qui permettent d'utiliser l'énergie du sous-sol ?



Une installation de géothermie de surface se compose :

- d'un **dispositif de captage** de calories qui achemine l'énergie captée depuis le sous-sol vers la surface,
- d'une **pompe à chaleur** qui valorise cette énergie en adaptant la température aux besoins,
- d'un **circuit secondaire** de valorisation, notamment les émetteurs,
- et d'un **dispositif de régulation** qui permet de contrôler le fonctionnement de la pompe à chaleur et d'en optimiser les performances.

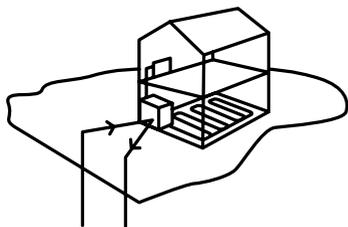
L'énergie géothermique peut-être puisée en surface (0 à 200 mètres), directement dans le sol/la roche ou bien dans un aquifère. Il existe plusieurs technologies.

LES FLUIDES UTILISÉS DANS LES INSTALLATIONS DE GÉOTHERMIE DE SURFACE

Une pompe à chaleur fonctionne avec un circuit interne en boucle fermée, composé d'un fluide frigorigène (fluide qui se vaporise à température très basse). La réglementation européenne oblige les fabricants à utiliser des fluides de plus en plus respectueux de l'environnement. Du côté du "sous-sol", le fluide qui circule dans le circuit de captage est l'eau de la nappe pour la géothermie sur nappe ou l'eau "du robinet", éventuellement en mélange avec un antigel de qualité alimentaire et biodégradable pour les installations avec sonde(s) géothermique(s) verticale(s), captage horizontal, corbeilles géothermiques, fondations thermoactives, etc. Ce fluide dit "caloporteur" circule en circuit fermé. Enfin, bien que ne relevant pas directement de la géothermie de surface, les installations de pompes à chaleur valorisant l'énergie des eaux usées, de l'eau de mer ou des eaux de surface (lac ou rivière) sont assimilées à la géothermie de surface en raison de leur principe de fonctionnement.



Captage sur nappe d'eau

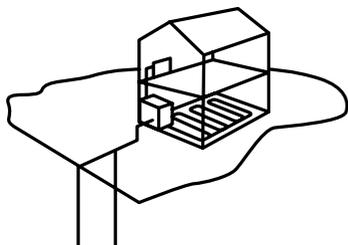


Un premier forage d'alimentation permet le pompage de l'eau souterraine dans la nappe d'un aquifère superficiel vers la surface jusqu'à un échangeur (dit échangeur de barrage) puis vers la pompe à chaleur géothermique. Un second forage de réinjection permet le retour de cette eau dans le même aquifère. Cette eau, dite froide, doit être réinjectée à une distance suffisante du forage d'alimentation afin de ne pas refroidir la ressource puisée et de maintenir ainsi, dans le temps, une température constante.

Une nappe présente dans un aquifère superficiel peut alimenter plusieurs logements en fonction du débit de pompage.

Cette technologie optimise les performances car, au-delà de quelques mètres de profondeur, la température de l'eau reste stable indépendamment des saisons.

Captage par sonde géothermique verticale (SGV)



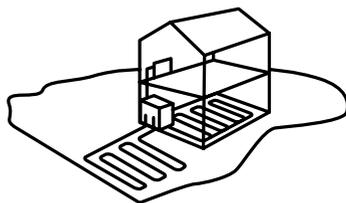
Un ou plusieurs forages (sous le bâtiment ou en périphérie de celui-ci)

sont nécessaires pour enterrer et cimenter des sondes géothermiques composées d'une boucle en forme de U à l'intérieur de laquelle circule un fluide caloporteur. Ce liquide circule en circuit fermé et permet donc un échange thermique avec le sol sans qu'il entre en contact avec ce dernier.

Une sonde peut être enterrée jusqu'à 200 mètres de profondeur afin de capter la chaleur ou le froid. Si plusieurs sondes sont nécessaires, cela s'appelle un champ de sondes.

Cette technologie optimise les performances car, passés quelques mètres de profondeur, la température du sol ne varie plus en fonction des saisons.

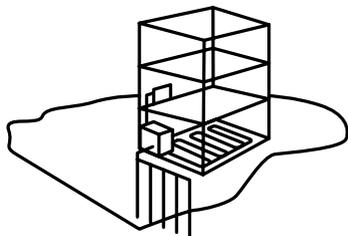
Captage horizontal



Aucun forage n'est nécessaire puisqu'il s'agit de placer un circuit fermé de tuyaux remplis de fluide caloporteur à une faible profondeur (de 80 à 120 centimètres sous la surface). L'énergie stockée dans le sol est principalement due au rayonnement solaire et à l'infiltration de l'eau dans le sol.

Cette technologie est peu coûteuse, mais demande plus d'espace. Elle nécessite de prévoir une surface de terrain réservée (environ deux fois la surface de l'habitation à chauffer, selon le niveau d'isolation du bâtiment). Il s'agit ici de travaux de terrassement : il n'est donc pas nécessaire de faire appel à un foreur, ni d'effectuer des démarches administratives particulières.

Captage par fondations thermoactives

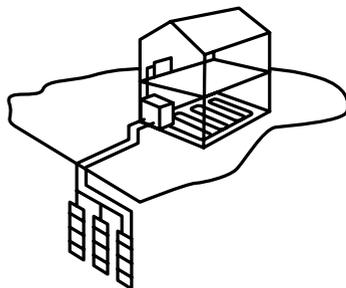


Cette technologie utilise les pieux du bâtiment en fixant un tube sur le ferrailage de la fondation. Il s'agit d'un réseau de tubes dans lequel circule le fluide caloporteur en circuit fermé. La fondation devient un équipement qui permet le transfert de chaleur et de froid. Cette technique réduit le coût de l'investissement lié au captage. Dans ce cas également, il n'est pas obligatoire de faire appel à un foreur, ni d'effectuer des démarches administratives particulières.

Cette technologie est principalement utilisée pour les bâtiments neufs de grande taille.



Captage par échangeurs compacts : corbeilles ou murs géothermiques



Il s'agit ici de réaliser un ou plusieurs trous de quelques mètres de profondeur (3 à 4 mètres pour les corbeilles géothermiques), dans lesquels sont placés des tubes enroulés en forme de spirale, et où circule le fluide caloporteur en circuit fermé. La spirale permet d'augmenter la surface d'échange thermique tout en diminuant la superficie et la profondeur nécessaires pour l'installation.

Un forage n'est pas nécessaire, une pelle mécanique est souvent suffisante. Il faut compter plusieurs corbeilles ou murs géothermiques pour subvenir aux besoins thermiques d'une habitation. Dans ce cas également, il n'est pas obligatoire de faire appel à un foreur qualifié ni d'effectuer des démarches administratives particulières au titre du code minier.

Comment fonctionne une pompe à chaleur (PAC) géothermique ?



Une **pompe à chaleur (PAC)** est un équipement qui fonctionne sur le principe de la thermodynamique qui consiste à transférer les calories d'un milieu (sol, air, eau) vers un autre milieu (bâtiment). Le fluide qui circule dans la PAC est un fluide frigorigène qui permet d'optimiser le transfert de chaleur entre la source primaire et le milieu à réchauffer ou à refroidir (ballon d'eau chaude, plancher chauffant, radiateur, ventilo convecteur, etc.). Les performances énergétiques de la PAC se traduisent *via* son **coefficient de performance (COP)**.

Il existe deux grands types de pompes à chaleur :

→ **les PAC aérothermiques** (voir encadré) qui captent la chaleur dans l'air.

→ **les PAC géothermiques** qui captent la chaleur dans la terre.

Les pompes à chaleur géothermiques utilisent la chaleur du sous-sol ou l'eau d'un aquifère. Elles fonctionnent grâce à des capteurs enfouis dans la terre.

Il existe trois types de captage différents :

→ **le captage horizontal au sol à faible profondeur**. Des capteurs sont enterrés horizontalement sous terre à environ un mètre de profondeur ou à 2 à 3 mètres de profondeur pour les échangeurs géothermiques compacts.

→ **le captage vertical en sous-sol**. Plusieurs sondes sont enterrées à la verticale, jusqu'à 100, voire 200 mètres, de profondeur.

→ **le captage vertical sur nappe phréatique**. Les forages sont réalisés sur une nappe phréatique et y puisent son eau. Cette eau retourne ensuite dans la même nappe.

LES PAC AÉROTHERMIQUES

Les PAC aérothermiques exploitent la chaleur présente dans l'air pour produire du chaud et/ou du froid renouvelables, dans les maisons individuelles, les logements collectifs et les bâtiments tertiaires.

On distingue :

→ **Les PAC air/air** qui échangent la chaleur entre l'air extérieur et l'air intérieur.

→ **Les PAC air/eau** qui échangent la chaleur entre l'air extérieur et l'eau du réseau de chauffage du logement et/ou de l'eau chaude sanitaire.

Certains modèles sont réversibles, c'est-à-dire qu'ils peuvent produire du chaud ou du froid.

La performance d'une PAC aérothermique se dégrade lorsque la température extérieure diminue.

Une température très basse (à partir de -10 ou de -20 °C selon les modèles) peut même la rendre inutilisable. Un appoint de chauffage peut donc être nécessaire afin d'apporter un confort thermique suffisant.

Comparées à la climatisation par géothermie, les PAC aérothermiques participent aux îlots de chaleur urbains. Elles consomment plus d'électricité et peuvent générer des nuisances sonores.

Quel modèle de PAC géothermique choisir ?



Les différents modèles de pompe à chaleur géothermique

La famille des pompes à chaleur géothermiques se compose de quatre modèles :

PAC Sol/Sol	PAC Sol/Eau	PAC eau glycolée/Eau	PAC Eau/Eau
La PAC capte les calories du sol grâce à la circulation d'un liquide frigorigène qui part directement dans le circuit de chauffage	La PAC capte les calories du sol pour les envoyer vers la pompe à chaleur	La PAC capte la chaleur du sol grâce à la circulation d'eau ou d'eau glycolée dans un échangeur géothermique fermé	La PAC capte les calories dans une nappe phréatique pour les envoyer vers la pompe à chaleur
Captage horizontal qui nécessite une grande surface de terrain	Captage horizontal qui nécessite une grande surface de terrain	Captage horizontal ou vertical	Captage vertical qui doit atteindre une nappe phréatique
COP de 3 à 4	COP de 3 à 4	COP de 4 à 7	COP de 4 à 7

Source > SER, d'après AFPAC et AFPG

Le choix du type de pompe à chaleur géothermique dépend surtout de l'espace disponible à l'extérieur du bâtiment.

COP : COEFFICIENT DE PERFORMANCE

La performance énergétique d'une pompe à chaleur est mesurée en laboratoire par son coefficient de performance (COP) : il correspond au rapport entre l'énergie produite et l'énergie consommée pour faire fonctionner la PAC.

Le règlement européen sur l'écoconception exige un COP minimum de 3 pour la mise sur le marché des PAC, autrement dit elles doivent *a minima* produire 3 fois plus d'énergie qu'elles n'en

consomment pour chauffer un bâtiment.

Plus le COP est élevé, plus la pompe à chaleur est performante et plus la facture d'énergie est réduite.

UN APPAREIL DONT LE COP S'ÉLÈVE À 3,5 CONSOMME 100 KWH D'ÉLECTRICITÉ POUR PRODUIRE 350 KWH DE CHALEUR OU DE FROID.

La géothermie de surface est une énergie compétitive³⁴

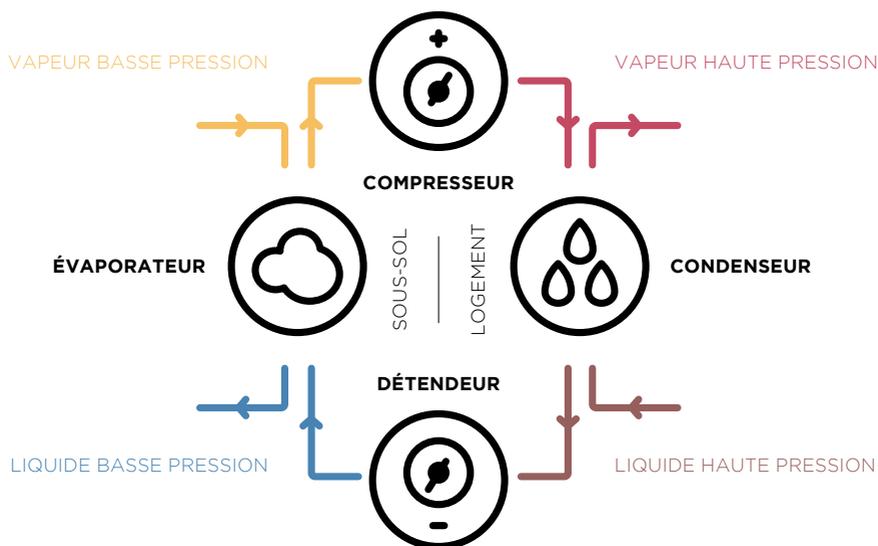
La géothermie est une énergie renouvelable performante dont les technologies sont matures. Le COP moyen d'une PAC géothermique est de 4 à 5 pour les installations de grande taille. Autrement dit, pour 1 kWh d'électricité consommée par la pompe à chaleur, 4 à 5 kWh de chaleur sont produits. Sachant qu'un particulier consomme en moyenne 10 MWh de chaleur par an, la PAC géothermique consommera de l'ordre de 2,5 MWh d'électricité. De plus, avec du géocooling, la consommation d'énergie diminuera car, pour 1 kWh d'électricité consommée, ce procédé permettra de produire entre 30 et 50 kWh de rafraîchissement.

La faible variation de température de la ressource géothermale permet aux PAC géothermiques de fonctionner en permanence avec un COP élevé.

Fonctionnement d'une PAC géothermique en mode chaud (voir le schéma ci-dessous)

Le fluide frigorigène passe d'abord dans l'évaporateur, où il se vaporise³⁵ à basse pression et basse température grâce au transfert thermique avec la source de chaleur. Il circule ensuite dans le compresseur pour être comprimé à haute pression, ce qui augmente sa température. Arrivé dans le condenseur, le fluide échange ses calories avec le milieu récepteur et redevient liquide. En sortie du condenseur, le fluide sous forme liquide est à haute pression et un peu refroidi. Il entre, alors, dans le détendeur qui diminue sa pression et sa température.

Ce cycle thermodynamique nécessite une source d'énergie électrique externe et permet un transfert thermique optimal.



³⁴ D'après AFPG, La géothermie en France, Étude de Filière 2023.

³⁵ Passe de l'état liquide à l'état gazeux.

Les pompes à chaleur géothermiques réversibles

Ces PAC sont capables d'inverser ce cycle de fonctionnement et donc de produire du froid en captant la chaleur du logement pour la restituer au sous-sol. De plus, certaines PAC géothermiques peuvent être utilisées en mode **Thermo-Frigo-Pompe**, ce qui consiste à produire simultanément de la chaleur et du froid grâce à l'ajout d'un système de régulation et des modifications hydrauliques nécessaires.

LE GÉOCOOLING (OU RAFRAÎCHISSEMENT PASSIF)

En France, à partir de quelques mètres de profondeur, la température reste constante toute l'année. Selon la région et l'altitude, elle est comprise entre 8 °C et 16 °C.

Durant certaines périodes de l'année, lorsque seul un léger rafraîchissement est nécessaire (en intersaison ou en début d'été notamment), la géothermie de surface peut utiliser uniquement la fraîcheur de la source géothermique (8 à 16 °C) pour rafraîchir le bâtiment de manière directe et sans passer par la mise en route de la pompe à chaleur : **c'est le géocooling**.

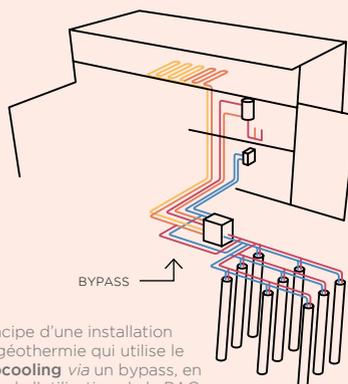
Le principe du géocooling est donc de faire circuler, via un échangeur thermique, le fluide caloporteur, qui provient du système géothermique, directement dans le réseau du bâtiment. La pompe à chaleur est alors contournée grâce à un "bypass". Elle peut également continuer à produire de l'eau chaude sanitaire en parallèle.

Pour une installation fonctionnant en chauffage l'hiver et en rafraîchissement l'été, l'intérêt majeur du géocooling est le rechargement du sol en calories durant la saison estivale. En effet, la température dans un bâtiment l'été étant supérieure à celle du sous-sol, des calories sont stockées dans le sol.

Ce rechargement permet une augmentation du rendement annuel de l'installation.

Durant des périodes de forte chaleur, le géocooling peut ne plus suffire. Il faut alors réutiliser la pompe à chaleur géothermique en mode réversible, permettant ainsi la production de froid.

Le géocooling peut fonctionner dans tous les types d'équipements de géothermie de surface, d'une installation pour le particulier jusqu'au réseau qui connecte plusieurs bâtiments collectifs. Il fonctionne avec différents types d'émetteurs : à eau (plancher chauffant basse température, plafond rafraîchissant, radiateur à eau, etc.) ou à air (ventilo-convecteur, poutres ventilées, etc.).



Principe d'une installation de géothermie qui utilise le **géocooling** via un bypass, en plus de l'utilisation de la PAC (Source : ADEME-BRGM)

Quels sont les avantages des PAC géothermiques ?



Un système écologique

Les pompes à chaleur géothermiques puisent leur énergie dans la terre. C'est un système non polluant qui utilise une énergie renouvelable, locale et très peu émettrice de CO₂.

Un système économique

Si les PAC géothermiques représentent un investissement non négligeable, leur coût d'exploitation est peu élevé. Elles permettent de réduire les factures de chauffage et constituent un investissement rentabilisé autour de 5 à 10 ans (cf. page 42).

Un système performant

Les PAC géothermiques fonctionnent en toute saison et ne nécessitent pas de chauffage d'appoint supplémentaire.

EN FONCTIONNEMENT, LES POMPES A CHALEUR (PAC) FONT-ELLES DU BRUIT ?

Les pompes à chaleur peuvent faire un peu de bruit lorsque le compresseur se déclenche.

Comme pour le rendement énergétique, un label de qualité atteste des performances acoustiques du matériel. Ainsi, la marque NF-PAC de l'AFAQ-AFNOR indique la conformité des PAC aux différentes normes en vigueur ainsi que le respect des performances fixées dans le référentiel N°414 d'AFNOR Certification, dont le niveau acoustique.

Le bruit d'une PAC géothermique est facile à éviter, car celle-ci peut être isolée dans un local technique contrairement à une PAC aérothermique dont le module de captage sur air, pouvant être bruyant, doit être placé à l'extérieur d'un bâtiment.



Quelles étapes pour installer un système de géothermie de surface ?



Comment savoir s'il est possible de réaliser un projet de géothermie de surface ?

Pour savoir s'il est possible d'installer un équipement de géothermie de surface :

→ un particulier contactera un **installateur de pompes à chaleur ou un maître d'œuvre** réalisant des installations en géothermie (voir la liste sur le site Qualit'ENR rubrique "trouver un professionnel Quali'PAC" ou sur le site Qualibat "qualifications 5231/5232/5263/5264" ou encore sur le site Qualifélec "module 48"),

→ une collectivité ou une entreprise, qui souhaite réaliser une installation de plus grande envergure, contactera

un **bureau d'études thermiques et/ou un bureau d'études "sous-sol"**

(cf. qualifications OPQIBI 10.07 "Étude des ressources géothermiques" et 20.13 "Ingénierie des installations de production utilisant l'énergie géothermique", reconnues RGE).

Dans les deux cas, des professionnels qualifiés aideront à monter les projets.

En parallèle, la question des besoins à satisfaire grâce à la géothermie doit être posée : chauffage, mais aussi eau chaude sanitaire, climatisation ou encore rafraîchissement ?

Se référer à des professionnels qualifiés

Il est important de se référer à des professionnels qualifiés lorsqu'il s'agit d'installer une pompe à chaleur géothermique, tant au niveau des études que de la réalisation. Pour faciliter le choix et garantir leur efficacité, les pouvoirs publics et l'ADEME ont mis en place la mention "Reconnu Garant de l'Environnement" (RGE) qui a pour objectifs :

- d'améliorer les compétences des professionnels ;
- d'aider les particuliers et les maîtres d'ouvrage à trouver les professionnels les plus compétents ;
- de mettre en place une éco-conditionnalité des aides publiques pour les travaux de performance énergétique.

Les professionnels disposant de la mention RGE garantissent de proposer les systèmes les plus adaptés et justifient des assurances obligatoires. Ils sont régulièrement audités et contrôlés sur leurs réalisations.



Études
Conseils



Installation /
Pose de la pompe à chaleur



Installation /
Pose des échangeurs
souterrains

Quelles démarches effectuer ?

Si l'installation de géothermie entre dans le cadre de la Géothermie de Minimale Importance (GMI), une simple **déclaration des forages** auprès du site officiel de télédéclaration du ministère de la Transition écologique suffit. Elle remplace la demande d'autorisation qui était obligatoire dans le passé. Ce nouveau cadre réglementaire simplifie les démarches.

Pour ce qui est de l'**installation d'une PAC géothermique, aucune démarche** n'est à réaliser sauf, bien sûr, dans le cas d'une installation industrielle de type SEVESO³⁶.

Quels sont les délais pour réaliser un projet de géothermie de surface ?

La durée complète de l'étude d'un projet de géothermie de surface prend en compte une étape d'étude de projet et une étape de travaux.

La durée dépend du type de technologie envisagée et de la taille du dispositif (le logement d'un particulier n'a pas les mêmes besoins qu'un bâtiment collectif ou tertiaire).

En moyenne, la durée des travaux chez un particulier est d'une à deux semaines (plus courte dans le cas d'une sonde). Pour les équipements plus conséquents, la durée des travaux est en moyenne d'un à trois mois (un peu plus pour les gros chantiers), sans compter l'étape des études de faisabilité et de dimensionnement.

Que reste-t-il en surface après les travaux ?

La présence d'une foreuse pour la durée du ou des forages (de quelques jours pour un particulier à quelques semaines dans le cas de la réalisation d'un champ de sondes) peut nécessiter quelques dizaines de mètres carrés.

Une fois l'installation terminée, il ne restera rien en surface à l'exception d'un regard de visite³⁷. Pour une installation sur nappe en zone inondable, le regard doit être situé au-dessus de la surface naturelle afin de limiter les risques de contamination des nappes. Il faut, de plus, garder un accès aux forages d'eau pour les nettoyer en cas de colmatage (obstruction). Pour les installations en boucles fermées (sondes, échangeurs horizontaux, corbeilles, etc.), les collecteurs sont souvent installés dans un regard enterré. Dans le cas de fondations thermoactives, il n'y a aucun impact en surface puisqu'elles sont situées sous le bâtiment.

Lorsque les travaux sont terminés, la surface, située au-dessus de l'installation, notamment des systèmes horizontaux, peut-être engazonnée et végétalisée en évitant les plantes à racine profonde.

³⁶ La directive Seveso est le nom générique d'une série de directives européennes qui imposent aux États membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs, appelés "sites Seveso", et d'y maintenir un haut niveau de prévention.

³⁷ Un regard de visite est un ouvrage maçonné rond ou rectangulaire qui se situe au-dessus d'une canalisation et dont le but est de permettre la visite et l'entretien d'une conduite souterraine, d'un aqueduc ou d'un égout.

Comment financer un projet de géothermie de surface ?



En France, la géothermie de surface dispose de différentes aides financières pour permettre à cette énergie renouvelable de se développer à grande échelle.

Pour les particuliers

En plus d'éventuelles **aides locales** pouvant être proposées par les collectivités territoriales, un particulier peut notamment prétendre à plusieurs **aides nationales** (dont certaines sont cumulables).

→ **MAPRIMERÉNOV'**

Les particuliers disposent d'un soutien appelé MaPrimeRénov' pour financer l'achat d'une pompe à chaleur géothermique. Ce dispositif est applicable uniquement pour les logements déclarés comme "habitations principales ayant plus de deux ans". Les montants de MaPrimeRénov' varient entre 1 200 € et 10 000 € en fonction du type d'équipement et des revenus du foyer.

→ **HABITER MIEUX**

Délivrée par l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat (ANAH), cette aide confère aux particuliers un accompagnement-conseil et une aide financière pour des travaux apportant un gain énergétique d'au moins 25 %, pour le changement d'une chaudière ou pour l'isolation de leur logement.

→ **COUP DE POUCE CHAUFFAGE**

Délivrée par l'Etat, cette prime aide les ménages à sortir des énergies fossiles pour le chauffage. Elle est versée par les entreprises signataires de la charte "Coup de Pouce Chauffage". Depuis mars 2023, cette aide est portée à 5 000 €, sans conditions de revenus, (contre 4 000 € auparavant pour les ménages les plus modestes, et 2 500 € pour les plus aisés) pour le remplacement d'une chaudière à énergie fossile par une PAC géothermique eau/eau.

→ **ECO-PRÊT À TAUX ZÉRO**

Délivré par les banques signataires d'un contrat avec l'Etat, ce prêt permet aux ménages de financer des travaux lourds de rénovation énergétique. Le montant peut aller jusqu'à 30 000 €.



→ LES CERTIFICATS D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE (CEE)

Le dispositif des CEE constitue l'un des principaux instruments de la politique de maîtrise de la demande énergétique. Depuis 2006, l'État oblige les vendeurs d'énergie (électricité, gaz, carburant, etc.) à réaliser des économies d'énergie auprès des consommateurs (ménages, professionnels, etc.). Un objectif pluriannuel est défini pour chaque opérateur. En fin de période, les obligés ne justifiant pas de l'accomplissement de leurs obligations par la détention du montant de CEE adéquat sont pénalisés financièrement. Les CEE sont générés par la mise en place ou le financement d'actions d'économie d'énergie par les obligés. Ces derniers peuvent acheter et vendre des CEE sur un marché d'échange pour compléter leurs obligations.

Pour l'habitat collectif, les collectivités, les associations ou les entreprises qui souhaitent entreprendre un projet de géothermie de surface de plus grande envergure

→ LE FONDS CHALEUR DE L'ADEME

L'ADEME donne accès au **Fonds chaleur** pour financer des études de faisabilité et des installations produisant de la chaleur ou du froid renouvelable par géothermie. Des appels à projets sont lancés plusieurs fois par an et dans chaque région. De 2009 à 2020, plus de 6 000 projets sur l'ensemble des filières EnR&R thermiques éligibles au Fonds chaleur ont été soutenus.

Sont éligibles³⁸ les installations collectives de pompes à chaleur géothermiques (sur sondes, sur nappe superficielle, sur échangeurs compacts et sur fondations thermoactives). Le montant du financement dépend de la taille de l'installation (en fonction de la production de chaleur renouvelable). Une aide forfaitaire complémentaire est attribuée pour le géocooling.

Le mécanisme de garantie des projets de géothermie de surface

→ AQUAPAC

La **garantie AQUAPAC** est une assurance délivrée par SAF-ENVIRONNEMENT³⁹ pour les maîtres d'ouvrages, bureaux d'études, entreprises, prestataires ou exploitants pour couvrir les risques hydrogéologiques liés à l'exploitation énergétique d'un aquifère à moins de 200 mètres de profondeur et pour une puissance thermique de PAC supérieure à 30 kW. Elle comporte deux volets : la garantie recherche en phase projet et la garantie pérennité en phase d'exploitation de l'installation.



³⁸ Les projets de géothermie éligibles au Fonds chaleur de l'ADEME sont listés sur le site internet suivant : expertises.ademe.fr/energies/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/fonds-chaleur-bref.

³⁹ La SAF-ENVIRONNEMENT, filiale de la Caisse des Dépôts et Consignations est chargée par les pouvoirs publics de mettre en œuvre et de gérer les Fonds de garanties des risques géologiques et géothermiques.

Quel est le coût des installations de géothermie de surface ?



L'investissement initial pour un particulier

Le coût d'un système de géothermie de surface varie surtout en fonction de la profondeur du captage sous terre et de la puissance installée.

En moyenne, en 2020, il faut compter **entre 15 000 € et 20 000 €** (hors aides).

Pour un particulier, la puissance moyenne d'une pompe à chaleur s'élève à 8 kW pour des besoins en chaleur de 16 MWh/an.

Pour une maison de 130 m² occupée par 4 personnes, les coûts moyens⁴⁰ sont les suivants :

	Géothermie sur échangeurs compacts géothermiques	Géothermie sur sondes géothermiques verticales	Géothermie sur eau de nappe superficielle
Profondeur	0 à 10 m	10 à 200 m	0 à 10 m
Captage	3 000 €	9 000 €	4 000 €
PAC	10 000 €	10 000 €	10 000 €
Total	13 000 €	19 000 €	14 000 €
Total réel, après déduction de MaPrimeRénov'	9 900 €	14 500 €	11 000 €

Cas particulier : pour des installations de puissance supérieure à 50 kW, les premiers coûts concernent **la réalisation des études d'accompagnement du projet (5 000 à 10 000 €, voire 20 000 €, qui peuvent inclure la réalisation du premier forage** qui sera bien évidemment réutilisé par la suite).

Il s'agit d'études en géosciences (caractérisation du sous-sol, présence d'une nappe d'eau, quantité, débit, etc.) et thermiques (besoins en chaud et/ou en froid des locaux, puissances appelées sur l'année, capacité calorifique du sous-sol, etc.).

⁴⁰ Source > bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/1862-geothermie-pour-chauffer-et-rafraichir-sa-maison-9791029709029.html

Les études sur le dimensionnement sont rapides et peu coûteuses. En outre, des aides sont disponibles si besoin (Fonds chaleur, par exemple). Quant au coût du forage, il diffère selon qu'il s'agit de nappe ou de sonde. Pour les **sondes**, il faut compter de **80 à 110 €/mètre linéaire de forage**, et pour une **nappe entre 400 et 1 000 €/mètre linéaire de forage**, sachant que, dans ce cas, la réglementation impose la réalisation d'au moins deux forages (l'un de production et l'autre de réinjection). L'achat et l'installation de la PAC et de ses équipements est compris entre **500 et 1 000 € HT/kW**.

Le coût de fonctionnement

Le coût d'investissement d'une installation de géothermie de surface est plus élevé que celui d'une chaudière au gaz mais son coût de fonctionnement est très faible puisque la chaleur du sol est accessible gratuitement. De plus, la pompe à chaleur géothermique ne consomme que très peu d'électricité : le coût annuel moyen pour un particulier est compris entre **1 et 3 €/m²**.

Par ailleurs, la production de frais de manière quasi gratuite par géocooling ne nécessite que très peu d'investissement supplémentaire.

L'entretien d'une pompe à chaleur géothermique

Comme tout système de chauffage, une pompe à chaleur géothermique demande à être entretenue pour maintenir sa performance et sa longévité. Un entretien par un spécialiste doit être réalisé tous les ans *via* un contrat de maintenance. En outre, les pompes à chaleur possédant plus de 2 kg de réfrigérant ont l'obligation d'être contrôlées tous les ans afin de vérifier l'étanchéité du circuit frigorifique et éviter toute fuite⁴¹. Le coût de l'entretien chez le particulier varie de **150 à 250 €**.

Légalement, si sa puissance se situe entre 4 kW et 70 kW, l'entretien d'une PAC doit être effectué tous les deux ans par un professionnel et tous les 5 ans si sa puissance est supérieure à 70 kW.

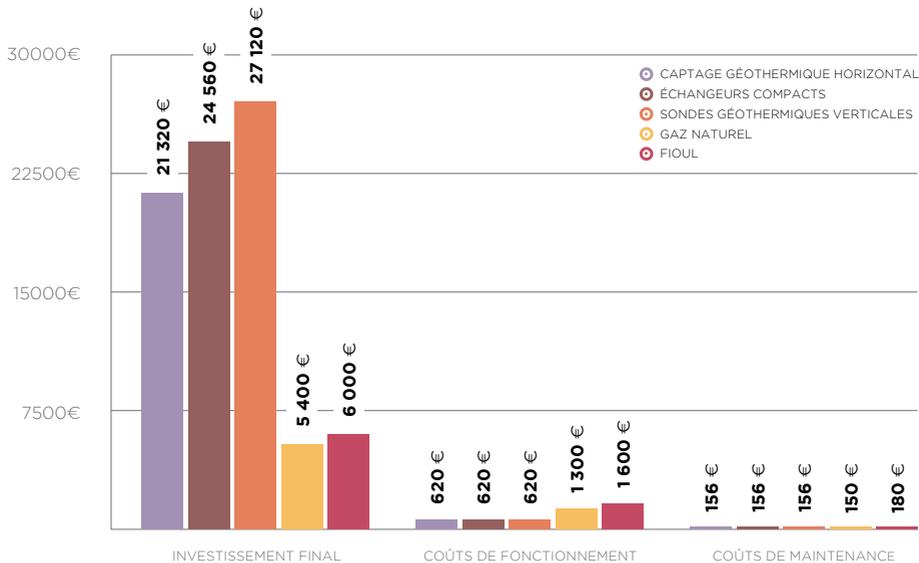
Comparaison des coûts d'une installation de chauffage avec un système géothermique et une installation au gaz / fioul

Les systèmes géothermiques à **captage horizontal** sont rentables pour les particuliers disposant d'un grand terrain. En tenant compte de l'ensemble des coûts, une installation sur capteurs horizontaux devient économiquement plus intéressante qu'une chaudière à gaz à partir de la 13^{ème} année d'utilisation avec les prix du gaz de 2020 (voir graphique ci-après) ; et de la 5^{ème} année seulement dans le cas d'un système avec production de froid.

A noter que ces temps de retour sur investissement diminuent lorsque le prix des énergies fossiles augmente.

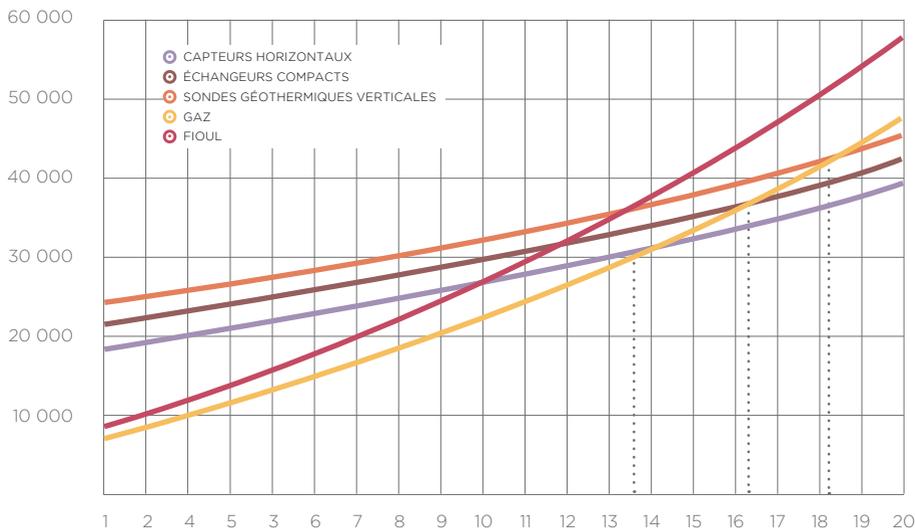
Coûts moyens des installations de chauffage chez le particulier

Source > AFPG, étude technico-économique de la géothermie de surface 2020⁴¹



Coûts cumulés pour le particulier des systèmes géothermiques et des solutions gaz et fioul (en euros TTC)

Source > AFPG, étude technico-économique de la géothermie de surface 2020⁴²



42 Le prix du gaz qui a servi de référence à ces études était celui qui prévalait avant la crise énergétique de 2022.

En tenant compte de l'ensemble des coûts, un **système géothermique par échangeurs compacts** devient économiquement plus intéressant qu'une chaudière à gaz à partir de la 16^{ème} année d'utilisation ; et de la 8^{ème} année seulement dans le cas d'un système avec production de froid.

En tenant compte de l'ensemble des coûts, un **système sur sondes géothermiques verticales**, devient économiquement plus intéressant qu'une chaudière à gaz à partir de la 18^{ème} année d'utilisation et de la 10^{ème} année seulement dans le cas d'une production de froid.

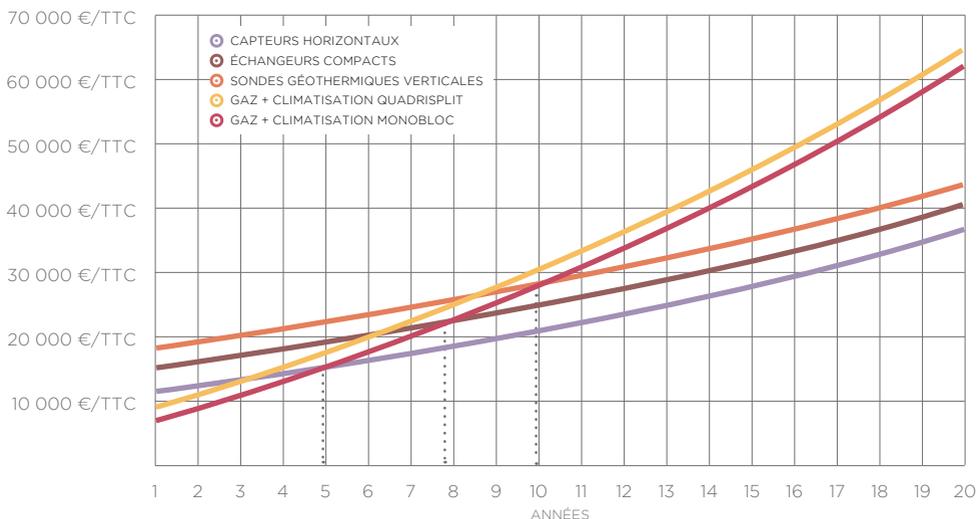
Les systèmes géothermiques sur nappe et sur champ de sondes sont très rentables pour les installations de plus grosse puissance (au-delà de 50 kW) et donc particulièrement adaptés aux secteurs collectif ou tertiaire.

En moyenne, une installation géothermique de surface devient plus économique qu'une solution gaz naturel en dix ans avec des prix du gaz de 2020. L'investissement est nettement optimisé lorsque le système produit également du froid.

Enfin, à titre de comparaison, depuis le 1^{er} juillet 2022, l'installation de nouvelles chaudières au fioul est interdite. Et depuis le 1^{er} janvier 2022, la Réglementation Environnementale RE 2020 impose des limites d'émissions de gaz à effet de serre qui rendent la pose de chaudière à gaz presque impossible dans les maisons neuves et très compliquée à partir de 2025 dans les bâtiments collectifs et tertiaires neufs.

Coûts cumulés de 5 solutions pour le particulier combinant chauffage et rafraîchissement (en euros TTC)

Source > AFPG, étude technico-économique de la géothermie de surface 2020⁴³



43 Le prix du gaz qui a servi de référence à ces études était celui qui prévalait avant la crise énergétique de 2022.

Quelle est la durée de vie des installations de géothermie de surface ?



Les **forages d'eau pour les installations de captage sur nappe** ont une durée de vie moyenne de 50 ans, sous réserve d'en assurer un suivi et un entretien régulier.

Les **tubes** utilisés pour les sondes peuvent atteindre des durées de vie au-delà de 100 ans, notamment lorsque celles-ci sont en polyéthylène haute densité (PEHD).

Une **pompe à chaleur géothermique** a une durée de vie d'environ 25 ans.

50
ans

FORAGES
D'EAU

100
ans

TUBES
PEHD

25
ans

PAC
GÉOTHERMIQUES





LA GÉOTHERMIE PROFONDE



À qui s'adresse la géothermie profonde ?



La **géothermie profonde** intéresse de plus en plus de grandes copropriétés, collectivités et entreprises, soucieuses de réduire leur facture énergétique et de bénéficier d'une énergie décarbonée, en particulier en étant couplée à un réseau de chaleur.



LE RÉSEAU DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE

Villes de Gonesse et Villiers-le-Bel



Villiers-le-Bel et Gonesse (Val d'Oise) ont fait partie des villes pionnières en se lançant dans la géothermie au milieu des années 1980. En 1985, un réseau de chaleur, alimenté en partie par un doublet géothermique, est mis en service et alimente alors près de 3 100 logements et des équipements publics. Le puits producteur de géothermie puise de l'eau à 67 °C dans l'aquifère du Dogger à 1 700 mètres de profondeur verticale, à un débit de 260 m³/h. En 2017, un nouveau puits producteur est foré, portant ainsi le débit d'exploitation à 320 m³/h. Ce nouveau forage permet d'assurer le raccordement des nombreux programmes de construction sur les deux villes avec une couverture du réseau de chaleur en énergies renouvelables de 58 % en 2020.

Chiffres clés

7 700

ÉQUIVALENTS LOGEMENTS
DESSERVIS PAR L'INTERMÉDIAIRE
DE 73 SOUS-STATIONS

38 GWh

DE PRODUCTION DE CHALEUR
EN 2020

2 216 mètres

DE LONGUEUR FORÉE

67 °C

DE L'EAU PRÉLEVÉE
POUR UN DÉBIT MAXIMAL
DE 320 M³/H

9,5 millions €

D'INVESTISSEMENT EN 2017
POUR LE FORAGE DU NOUVEAU Puits
PRODUCTEUR ET LE RECHÈMISAGE
DES DEUX Puits EXISTANTS

8 000 tonnes

DE CO₂ ÉVITÉES PAR AN (PAR RAPPORT
À UNE SOLUTION GAZ NATUREL)

LE DOUBLET DE GÉOTHERMIE PROFONDE

Aéroport d'Orly



Fin 2010, une installation de géothermie est réalisée sur le site de l'aéroport de Paris-Orly (Val-de-Marne), pour assurer le chauffage d'une partie de ses installations (aérogare et bâtiments tertiaires). Les deux puits inclinés et orientés du doublet, atteignent une profondeur de près de 1 800 mètres (aquifère du Dogger). La puissance thermique délivrée par l'installation s'élève à 10 MW (300 m³/h d'une eau à 74 °C réinjectée après échange à 35 °C environ).

La valorisation de la chaleur s'effectue par échange thermique sur un échangeur à plaques en titane. Ce dernier transmet la chaleur au circuit d'eau chaude et de chauffage de l'aéroport.

À terme, le doublet géothermique permettra de réduire la consommation de combustible fossile de 4 000 tonnes équivalent pétrole (tep) et évitera le rejet dans l'atmosphère d'environ 9 000 tonnes de CO₂ par an.



Quelles sont les ressources utilisées par la géothermie profonde ?



La **géothermie profonde, de moyenne ou de haute énergie**, utilise l'eau chaude naturellement présente dans le sous-sol, sous forme de liquide ou de vapeur.

Pour la **géothermie profonde de moyenne énergie**, l'eau est puisée :

→ dans des **aquifères profonds** (entre 800 et 4 000 mètres), à partir d'un doublet de forages⁴⁴ qui va pomper, puis réinjecter l'eau géothermale dans le sous-sol pour un usage direct en réseau de chaleur notamment.

Pour la **géothermie profonde de haute énergie**, la ressource est puisée :

→ dans les **fossés d'effondrement** pour la production d'électricité et/ou de chaleur par cogénération,

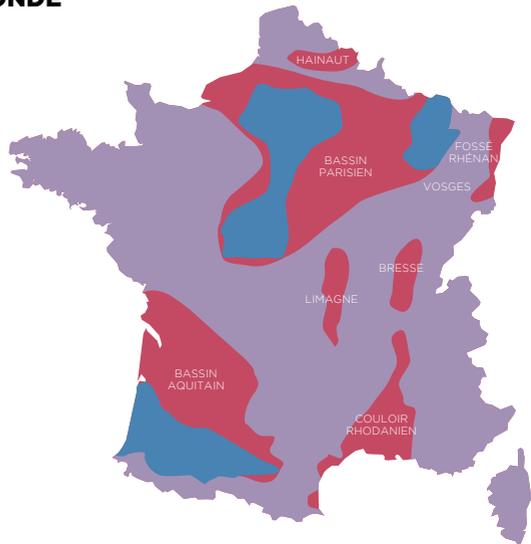
→ dans les **zones volcaniques** pour la production d'électricité.

L'évaluation des ressources passe par une phase d'exploration qui vise à délimiter les zones les plus favorables et implique différentes disciplines scientifiques, telles que la géologie, l'hydrogéologie, la géochimie, la géophysique, etc.

LE GISEMENT MÉTROPOLITAIN DE LA GÉOTHERMIE PROFONDE

Source > BRGM

- BASSINS SÉDIMENTAIRES PROFONDS CONTINUS
- AQUIFÈRES CONTINUS PROFONDS, RESSOURCES PROUVÉES OU PROBABLES (T > 70°C)



⁴⁴ Un doublet est constitué de deux puits proches en surface, l'un de pompage, l'autre de réinjection, mis simultanément en action dans un même aquifère, notamment pour restituer à cet aquifère l'eau pompée après usage.

Géothermie profonde de moyenne énergie

→ LES AQUIFÈRES PROFONDS

La France possède un fort potentiel de géothermie profonde de moyenne énergie. En effet, de nombreux aquifères profonds (situés principalement dans les bassins sédimentaires) sont présents sur le territoire. Environ un million de Français sont déjà alimentés par cette ressource. Hormis le Bassin parisien et, dans une moindre mesure, le Bassin aquitain, la plupart des aquifères profonds sont actuellement inexploités en France alors qu'ils pourraient produire assez de chaleur pour des millions de logements.

Géothermie profonde de haute énergie

→ LES ZONES VOLCANIQUES

Les zones à volcanisme actif et récent peuvent enregistrer des températures allant jusqu'à 350 °C, à des profondeurs entre 2 000 et 3 000 mètres. En France, l'essentiel des gisements se situe dans les territoires d'Outre-mer. Une installation électrique, composée de deux unités, fonctionne à Bouillante en Guadeloupe, à partir de forages d'environ 1 000 mètres de profondeur. Des zones potentiellement intéressantes ont été identifiées en Martinique, à La Réunion et à Mayotte.

→ LES FOSSÉS D'EFFONDREMENT

En dehors des zones volcaniques, les fossés d'effondrement constituent aussi des zones favorables à la production de chaleur et/ou d'électricité. Ces vastes compartiments souterrains se sont affaîsés après un bombement de la croûte terrestre et présentent

des températures supérieures à 110 °C au-delà de 2 500 mètres.

En France, ils se situent, pour l'essentiel, dans les vallées du Rhin et du Rhône et dans le Massif central.

La technologie dédiée à ce type de milieu a connu d'importantes avancées, notamment grâce à un programme de recherche européen conduit entre 1987 et 2010 sur le site pilote de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin), dans le Fossé rhénan. Basée au début sur de la fracturation hydraulique alors appelée technologie HDR (Hot Dry Rocks), elle a été réorientée, suite à l'échec de ce concept, vers la technologie EGS (Enhanced ou Engineered Geothermal System) qui proposait d'améliorer la perméabilité d'un réservoir.

Aujourd'hui, au vu de son ambiguïté, la technologie EGS est également tombée en désuétude pour laisser place à une technologie plus classique d'exploitation d'un réservoir d'eau géothermale profonde existant, mais dont la complexité nécessite de déployer toutes les technologies d'exploration ou de développement de la connexion puits/réservoir issues principalement des milieux pétroliers. Le démonstrateur de Soultz, désormais installation de production d'une capacité de 1,5 MW électrique, est constitué de trois forages à 5 000 mètres, qui permettent d'utiliser une eau à 200 °C en fond de puits et de la réinjecter dans le sous-sol à 70 °C.

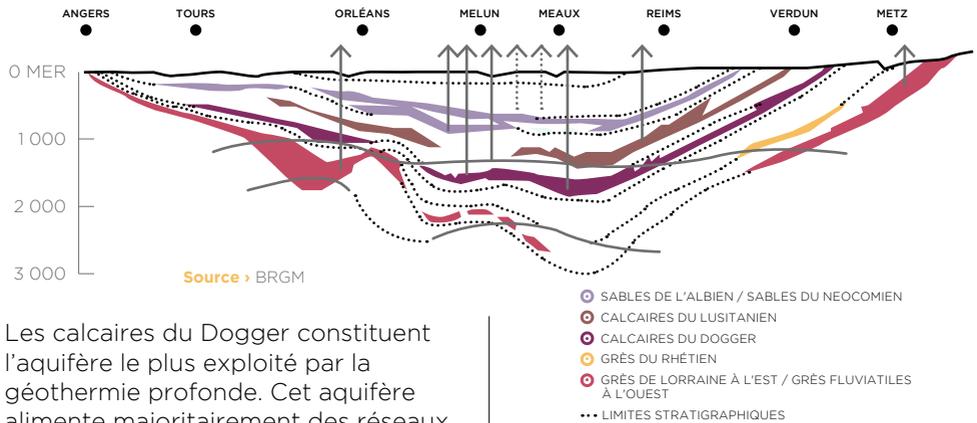
À Rittershoffen (Bas-Rhin), l'installation géothermique (projet ECOGI) est la première application industrielle de cette technologie en fossé d'effondrement. Elle utilise l'eau captée à 177 °C à 2 500 mètres de profondeur pour alimenter en chaleur un procédé industriel.

FOCUS SUR LES BASSINS EXPLOITÉS PAR LA GÉOTHERMIE PROFONDE EN FRANCE

Le Bassin parisien

L'Île-de-France est la région du monde la plus dense en installations géothermiques. Le Bassin parisien est composé de cinq aquifères d'eaux souterraines dont le nom provient des ères géologiques où ils se sont formés : les calcaires du Dogger, les sables de l'Albien et du Néocomien, les calcaires du Lusitanien, les grès du Rhétien.

Coupe géologique des aquifères du Bassin parisien



Les calcaires du Dogger constituent l'aquifère le plus exploité par la géothermie profonde. Cet aquifère alimente majoritairement des réseaux de chaleur urbains. Il se situe à une profondeur comprise entre 1 600 et 2 300 mètres et sa température oscille entre 56 °C et 85 °C, ce qui est particulièrement favorable pour la production de chaleur par simple échange thermique. Aujourd'hui, 48 opérations de géothermie profonde exploitent l'aquifère du Dogger. Les sables de l'Albien et du Néocomien sont situés respectivement à 650 mètres et entre 850 et 1 000 mètres de profondeur. Ils présentent des températures plus faibles (28 °C à 38 °C). Ces températures n'étant pas assez élevées pour assurer le chauffage à la température usuelle, il est donc nécessaire de recourir à l'utilisation de pompes à chaleur géothermiques en complément dans la centrale de production.

Sept opérations de géothermie profonde exploitent actuellement l'Albien et le Néocomien pour alimenter des réseaux de chaleur urbains d'Île-de-France :

- Tours Mirabeau Cristal (Albien) ;
- Fort d'Issy-les-Moulineaux (Albien) ;
- Le Plessis Robinson (Néocomien) ;
- Eau de Paris sur la ZAC Clichy Batignolles (Albien) ;
- Plateau de Saclay (2 opérations à l'Albien) ;
- Et récemment Saint-Germain-en-Laye (récupération de chaleur sur un puits de production à l'Albien).

En 2022, les 55 opérations de géothermie profonde dans le Bassin parisien produisent 1 700 GWh, soit environ 200 000 équivalents-logements alimentés uniquement en énergie renouvelable.

Le Bassin aquitain

Les aquifères du Bassin aquitain sont exploités par 22 opérations de géothermie profonde dont la plupart existent depuis les années 1980. Parmi ces opérations, certaines sont d'anciens forages pétroliers transformés en installations de géothermie profonde. La température des réservoirs exploités dans le Bassin varie entre 25 °C et 73 °C. Cette chaleur renouvelable alimente majoritairement le chauffage de serres, de thermes et la pisciculture. En 2022, l'ensemble des opérations du Bassin aquitain a produit 156 GWh de chaleur, soit l'équivalent du chauffage de 30 000 logements.

Bassin du Sud-Est et Fossé rhénan

Le Bassin du Sud-Est est actuellement exploité par une installation qui produit, en 2022, près de 12 GWh de chaleur.

En Alsace, les eaux à plus de 170 °C de l'aquifère du Fossé rhénan permettent à l'installation géothermique ECOGI de Rittershoffen de répondre à 25 % des besoins de chaleur d'une bioraffinerie voisine. D'une puissance installée de 24 MW, le site produit annuellement près de 190 GWh de chaleur, évitant l'émission de 46 000 tonnes de CO₂ chaque année.

Dans la région des Hauts-de-France, l'aquifère du Bassin du Hainaut, déjà exploité en Belgique, mais pas encore en France, s'élève à des températures comprises entre 50 et 80 °C.

L'EAU EST-ELLE PUISÉE DANS LA NAPPE PHRÉATIQUE ? S'AGIT-IL D'EAU POTABLE ?

Les aquifères utilisés par la géothermie profonde sont majoritairement des réserves d'eau saline millénaire, situées à plusieurs kilomètres de profondeur. **Ce ne sont donc pas des nappes d'eau potable.**

Afin d'éviter toute communication entre l'eau géothermale, les eaux des nappes profondes et les eaux de la nappe alluviale, un puits est pourvu de **6 couches d'étanchéité** avec 3 tuyaux en acier emboîtés, appelés cuvelages ou tubage. Ces puits sont étanches et isolés du terrain ou des nappes d'eau potable par trois gaines de ciment adaptées et injectées sur toute leur hauteur qui constituent des gaines étanches multicouches jusqu'aux grandes profondeurs. Seule, la partie productrice est laissée en "trou ouvert" ou équipée d'une crépine⁴⁵ pour capter le fluide. Les matériaux sont spécialement sélectionnés pour résister à la salinité de l'eau géothermale ainsi qu'aux fortes différences de températures qui peuvent exister.

⁴⁵ Une crépine joue un rôle de filtre. Elle permet à l'eau de circuler et de rester propre et exempte de particules tout en prévenant l'érosion du terrain. Il existe plusieurs types de crépines selon l'application.

Comment fonctionnent les installations de géothermie profonde ?



La géothermie profonde sur réseau de chaleur

Une opération de géothermie profonde nécessite la réalisation **d'un ou plusieurs forages** permettant d'acheminer la ressource en eau à la surface. La technique de forage choisie dépend surtout de la nature des terrains traversés (terrains meubles, terrains durs, présence de fractures et de cavités, etc.).

→ LE DOUBLET DE FORAGES

Depuis 40 ans, la France est le premier pays à avoir généralisé la technique du doublet de forages. En assurant la réinjection de l'eau géothermale, elle évite tout impact sur l'environnement et garantit la pérennité de la ressource. Cette technique est largement mise en œuvre dans l'aquifère du Dogger notamment.

Le doublet se compose d'un **forage de production** et d'un **forage de réinjection**.

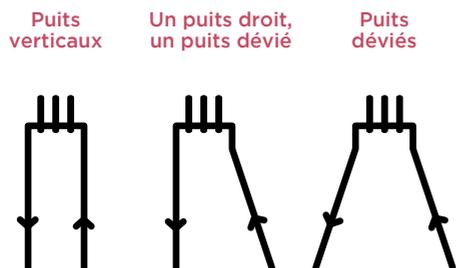
Afin de ne pas refroidir la ressource, les points de prélèvement et de réinjection de l'eau se trouvent à une distance suffisante l'un de l'autre (1 kilomètre minimum).

Pour éviter de multiplier les plateformes de forage et, si la profondeur de la ressource le permet, des puits dont la trajectoire est déviée dans le sous-sol (puits déviés) peuvent être réalisés. Une seule plateforme de forage suffit alors pour positionner les puits de production et de réinjection.

Un puits de géothermie profonde est constitué de **cuvclages successifs** qui remontent jusqu'à la surface et protègent de tout contact avec l'eau captée en profondeur dans les couches aquifères traversées.

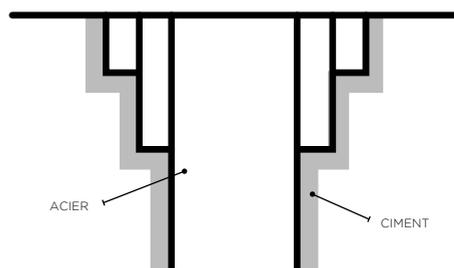
Différentes formes de doublets géothermiques

Source > BRGM



Cuvclages autour d'un puits de géothermie

Source > www.geothermieprofonde.info



Afin d'éviter toute pollution superficielle, les eaux de ruissellement sont collectées par une géomembrane étanche installée sous la plateforme de forage. Un système de conduites recueille les fluides pollués vers des déshuileurs, puis des bacs de rétention.

Une plate-forme de forage nécessite une emprise au sol de l'ordre de 5 000 m². En zone urbaine, les appareils de forage utilisés sont compacts pour limiter l'emprise au sol et silencieux pour pouvoir travailler jour et nuit avec un minimum de nuisances pour les riverains. Après les forages, une zone de 1 000 m² seulement est nécessaire pour les opérations de maintenance.

→ LE CHOIX DE LA LOCALISATION DES FORAGES

Le choix de la localisation des sites de forage dépend de plusieurs critères : la présence d'une ressource aquifère, la proximité d'un nombre suffisant d'utilisateurs pour la chaleur, le classement au regard de l'environnement de la zone visée et la disponibilité d'un terrain pour les installations.

Dans le cas particulier de la géothermie profonde de haute énergie, l'installation, qui produit de l'électricité et de la chaleur par cogénération, doit absolument être située à proximité directe des différents consommateurs d'énergie. De plus, pour trouver des circulations d'eau dans les roches très profondes, il faut viser des zones naturellement fracturées.

Deux nouvelles cibles pour ce type de géothermie sont, d'une part la production couplée de chaleur et de lithium et, d'autre part la fourniture de chaleur en milieu rural pour des usages industriels et agroalimentaires.

Ces nouveaux usages apportent une réponse à la reconquête d'une souveraineté aussi bien énergétique qu'alimentaire.

Le fluide extrait par un forage de production est amené à la centrale géothermique. Grâce à un système d'échangeurs thermiques, l'énergie du fluide géothermal est transférée au réseau de chaleur qui la distribue en surface. Le fluide, "déchargé" de son énergie, retourne à l'aquifère par le forage de réinjection. Le circuit dans lequel circule l'eau géothermale est appelé boucle primaire ; le circuit comprenant le réseau de chaleur est appelé boucle secondaire.

Si la température de la ressource n'est pas suffisante pour l'usage prévu, une autre source de production de chaleur pourra apporter le complément sous forme d'appoint (exemple : pompe à chaleur, chaufferie biomasse, etc.).



UNE INSTALLATION DE GÉOTHERMIE PROFONDE EST-ELLE BRUYANTE ?

En cours d'exploitation, aucune gêne sonore

Une installation de géothermie profonde est composée de divers équipements.

Pour les installations qui produisent uniquement de la chaleur, leur fonctionnement n'émet aucun bruit.

Pour les installations avec production d'électricité, la turbine et les tours aéroréfrigérantes, lorsqu'il y en a, sont les seules qui puissent générer des émissions sonores. Ces éléments sont parfaitement intégrés dans la conception des projets. La turbine est confinée à l'intérieur d'un bâtiment insonorisé et n'émet donc aucun bruit en dehors de son enceinte.

Les tours restent à l'extérieur, mais sont spécialement dimensionnées pour minimiser leurs émissions sonores et rester en dessous de 70 dB(A)⁴⁶ à 20 mètres, soit à peu près le bruit d'un aspirateur domestique.

Les premières habitations étant généralement situées à plusieurs centaines de mètres des installations, les riverains ne ressentent aucune gêne.

⁴⁶ Le dB(A) est utilisé pour mesurer les bruits environnementaux. Il s'agit d'un décibel pondéré A qui constitue une unité du niveau de pression acoustique. En effet, l'oreille et le cerveau humain interprètent l'intensité d'un son en partie en fonction de sa hauteur tonale. Par conséquent, les sonomètres sont programmés pour mesurer le dBA, "A" représentant un facteur appliqué pour refléter la manière dont l'oreille humaine entendrait et interpréterait le son qui est mesuré.

En cours de travaux, un impact très faible à proximité des habitations

Les appareils de forage ont été spécialement conçus pour travailler en environnement urbain avec un minimum de nuisances. Le treuil de forage, principale source de nuisance sur un appareil classique, a été remplacé par un concept de vérins hydrauliques silencieux. Les tiges de forage sont manipulées par un bras automatique, limitant les bruits de métal classique existant en mode manuel.

Pendant les travaux, l'émergence sonore du forage est quasi-nulle aux abords du chantier. Elle est estimée avant chaque projet. A titre d'exemple, la valeur moyenne du bruit produit par un tel chantier réalisé en zone rurale en Alsace affichait 55 dB(A) à 100 mètres pendant les huit mois de forage (24h/24), alors que les mesures du fond sonore préexistant affichaient des valeurs de 65 dB(A) le jour et 60 dB(A) la nuit. L'impact est donc très faible à proximité des habitations.

Par ailleurs, lors des travaux de forage, la circulation induite de camions, de jour comme de nuit, s'élevait à 5 à 8 par jour pendant les opérations et à 20 camions par jour en moyenne lors de l'acheminement ou du repli de la machine de forage, principalement dans la journée.

RISQUES SISMIQUES HORS BASSINS SÉDIMENTAIRES (GÉOTHERMIE DE HAUTE ÉNERGIE)

Contrairement à la géothermie de surface, le risque sismique en géothermie profonde, située hors des bassins sédimentaires (Bassin parisien et aquitain), nécessite une attention particulière.

La sismicité locale peut être augmentée à l'issue des forages profonds lors des stimulations qui consistent, à la fin du forage, à améliorer la connexion puits/réservoir. À cette occasion, des volumes d'eau contenant un produit, très souvent des acides⁴⁷ destinés à dissoudre les sédiments dans les failles, sont injectés afin d'améliorer la circulation de l'eau en profondeur. Ces injections, parfois à haute pression avec un maximum autorisé de 100 bar, peuvent être à l'origine de microséismes⁴⁸ sur une courte durée.

⁴⁷ Les températures très élevées et la pression dans les roches à ces profondeurs ne permettent pas à un écosystème de s'y développer. Il n'y a donc pas d'impact.

⁴⁸ Ces "micro-séismes" sont de très basse énergie, et donc non perceptibles en surface par l'Homme. En effet, l'énergie de ces ondes sismiques s'affaiblit d'autant plus que le forage est profond ou éloigné.

L'injection d'acide est sans conséquence sur l'environnement puisque le milieu dans lequel les volumes d'eau sont injectés est naturellement acide. Il y a donc une neutralisation du produit dans le milieu. La réinjection de fluide froid (10 à 15 °C) dans la roche chaude, qui n'a lieu que lors des phases de stimulation, peut également provoquer des fissures par contraction de la roche. Lors de l'exploitation, c'est un fluide moyennement refroidi (de l'ordre de 70 °C) qui est réinjecté.

Les études précises réalisées avant les forages et leur exécution à grande profondeur par des professionnels qualifiés, généralement issus du secteur pétrolier, évitent ce risque. Par ailleurs, un important système de surveillance sismologique est mis en place autour des installations de géothermie profonde pour mesurer et prévenir d'éventuelles secousses.

QUELS SONT LES RISQUES POUR LES HABITATIONS ?

Il n'y a aucun risque pour les logements voisins d'une installation de géothermie profonde, hormis un faible risque sismique pendant la phase des travaux de connexion des puits au réservoir dans les sous-sols de type bassin d'effondrement.

Les travaux et l'exploitation de la ressource sont strictement encadrés et la réglementation française est l'une des plus exigeantes en la matière : voir la partie qui détaille les étapes et autorisations en amont nécessaires en page 67.

Les travaux sont dûment vérifiés par les services de l'Etat.

→ FONCTIONNEMENT DE L'ÉCHANGEUR DE CHALEUR EN GÉOTHERMIE

L'échangeur de chaleur est l'équipement clé de l'installation de géothermie puisqu'il transmet l'énergie du fluide géothermal, puisée dans l'aquifère, au réseau de chaleur en surface.

Les échangeurs peuvent être de différents types. Néanmoins, les échangeurs à plaques donnent les meilleures performances. Ces matériels sont constitués de plaques embouties de faible épaisseur, assemblées verticalement les unes à la suite des autres. Les espaces entre les plaques sont alternativement traversés par le circuit primaire (fluide géothermal) et par le circuit secondaire (eau du réseau de chaleur). Un autre type d'échangeur appelé échangeur à tubes, plus adaptés à un nettoyage régulier, est utilisé quand le fluide géothermal est trop chargé en minéraux.

→ FONCTIONNEMENT DES POMPES À CHALEUR EN RELÈVE

Pour augmenter les performances d'un réseau de chaleur, il peut être envisagé de lui associer une pompe à chaleur (PAC) qui permettra d'exploiter au maximum l'énergie géothermale disponible, en abaissant la température de retour dans la boucle géothermale.

Une PAC permet également d'exploiter des ressources dont les températures sont trop faibles pour pouvoir être utilisées directement.

→ L'UTILISATION D'UN APPOINT À LA GÉOTHERMIE

Pour atteindre le niveau de température requis par le réseau de chaleur, une autre énergie renouvelable (bois énergie, biogaz, solaire thermique, etc.) peut compléter la production de chaleur géothermique. Cet appoint peut être réalisé, soit directement dans l'installation géothermique (appoint centralisé), soit *via* les chaufferies préexistantes sur le réseau (appoint décentralisé).

L'appoint peut aussi servir de secours en cas d'arrêt de l'installation géothermique.

LA GÉOTHERMIE PROFONDE EST-ELLE UNE ÉNERGIE PERFORMANTE ?

La géothermie profonde, couplée à un réseau de chaleur, présente une grande efficacité énergétique : les réseaux de chaleur géothermiques d'Île-de-France possèdent un coefficient de performance égale à 20 : pour 1 kWh d'énergie consommée, on restitue 20 kWh en sortie. De plus, la géothermie profonde se substitue à la consommation de combustibles fossiles. Ainsi, la géothermie profonde en Île-de-France permet d'éviter en moyenne l'émission de 320 000 tonnes de CO₂ par an, soit l'équivalent de 320 000 vols en avion entre Paris et New York.

→ LA DISTRIBUTION DE LA CHALEUR VIA LES RÉSEAUX DE CHALEUR

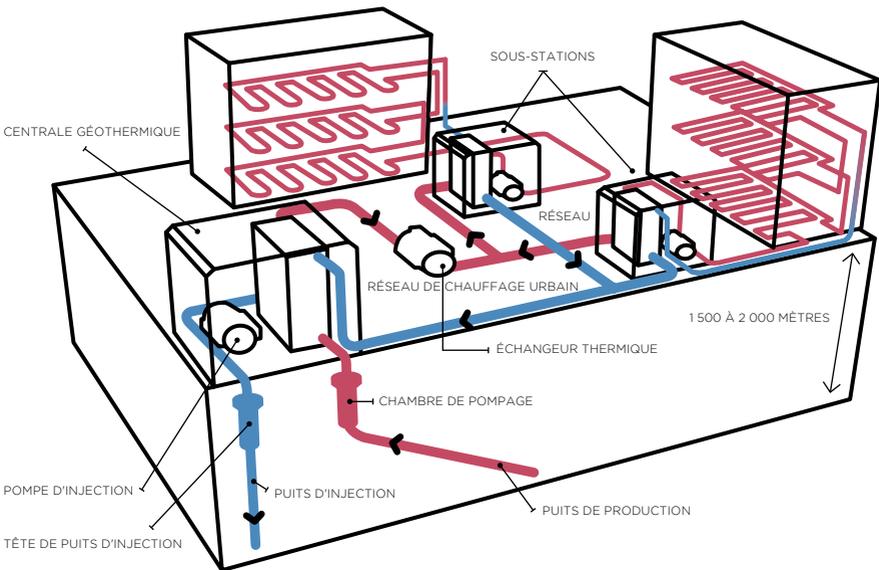
Un réseau de chaleur est un système centralisé, constitué d'une unité de production de chaleur, d'un réseau de canalisations et de sous-stations.

Il permet d'acheminer la chaleur géothermique jusqu'aux consommateurs. La chaleur est prélevée du sous-sol par une installation de géothermie profonde qui échange la chaleur entre l'aquifère exploité et un circuit primaire. Dans ce réseau de canalisations, la chaleur (température minimale de 60 °C) est véhiculée par de l'eau chaude sous pression ou, plus rarement, de la vapeur qui circule en circuit fermé.

La chaleur est acheminée vers les sous-stations, en sortie desquelles l'eau refroidie est reconduite vers l'unité de production. Ces sous-stations permettent l'échange thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire *via* un échangeur thermique. Le circuit secondaire alimente ensuite directement les consommateurs en chaleur (jusqu'à 90 °C maximum pour le chauffage et jusqu'à 60 °C pour l'eau chaude sanitaire).

Principe d'un réseau de chaleur géothermique

Source > AFIG



FOCUS SUR LES BOUCLES D'EAU TEMPÉRÉES

Pour faire un parallèle avec les réseaux de chaleur urbains classiques, qui utilisent la géothermie profonde, il existe également des réseaux appelés **boucles d'eau tempérées à énergie géothermique (BETEG)**, qui, eux, font appel plutôt à la géothermie de surface.

Ces boucles distribuent de l'eau basse température (généralement inférieure à 30 °C) qui alimente des sous-stations équipées de pompes à chaleur géothermiques produisant ainsi l'énergie nécessaire aux bâtiments. Le système est dit "décentralisé" car, au lieu d'une centrale unique qui alimente le réseau, plusieurs sous-stations équipées d'une production *via* une ou plusieurs PAC l'alimentent également. Cette technique permet de valoriser l'énergie entre une diversité d'usagers. Par exemple, une entreprise ayant besoin de froid peut rejeter sa chaleur sur la boucle qui servira à chauffer un autre bâtiment. Les réseaux équipés d'un système numérique avancé de gestion de l'énergie permettent d'anticiper les flux énergétiques entre consommateurs et producteurs de chaleur et de piloter ainsi la production et le stockage d'énergie de façon efficiente. On parle de **smart grid thermique**.

Ce type de réseau autorise un stockage inter-saisonnier sur aquifère ou sur champ de sondes géothermiques verticales. Il s'agit alors de charger et décharger la ressource exploitée (aquifère ou sous-sol) en calories en fonction de la saison. En hiver, une partie des calories du milieu est déchargée pour alimenter la boucle en chaleur. A l'inverse, en été, avec la production de froid, la chaleur dans la boucle est injectée pour recharger le milieu en calories.

Comme les réseaux de chaleur, les boucles d'eau tempérées peuvent aussi être alimentées par d'autres sources d'énergies renouvelables comme la récupération de calories des eaux de surface (lac, fleuve, mer, océan) et des eaux usées.

Ce type de réseau est adapté aux écoquartiers et aux zones d'aménagement concerté (ZAC). Il existe aujourd'hui en France 16 BETEG, dont 6 en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

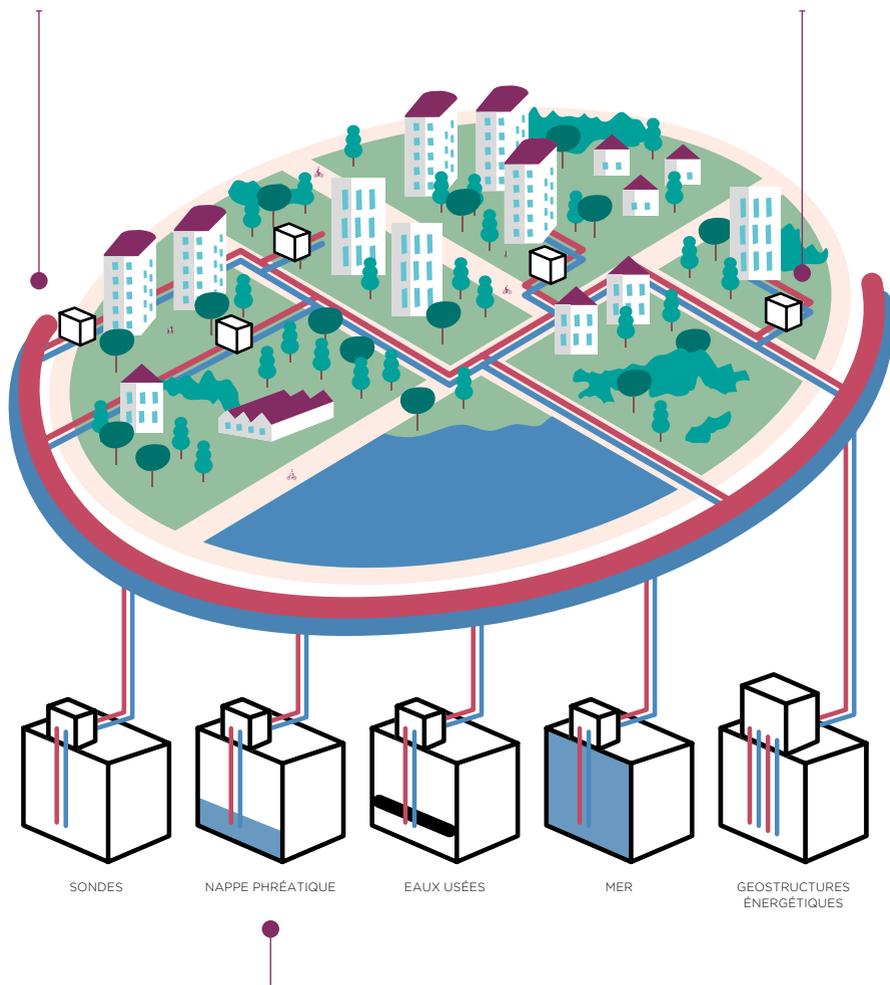


→ LA BOUCLE

La boucle géothermique est constituée d'un réseau unique permettant d'alimenter les pompes à chaleur eau/eau décentralisées. Elle peut sur le même réseau **transporter du chaud et du froid**.

→ LES POMPES À CHALEUR EAU/EAU

Les pompes à chaleur eau/eau permettent de transférer l'énergie de la ressource vers le bâtiment et inversement. Elles produisent du chauffage, du froid et de l'eau chaude sanitaire parfois simultanément.



→ LA RESSOURCE

Une ressource disponible 24/24h, 365 j/an. Elle apporte 75 % de part d'énergie renouvelable dans les bâtiments. La température moyenne de la ressource est comprise entre 0 °C et 25 °C.

La production d'électricité géothermique en contexte volcanique

En contexte volcanique, une centrale géothermique de production d'électricité à vapeur d'eau et à condensation est composée d'**ouvrages en sous-sol** (les puits de production et de réinjection), de **conduites de transport** du fluide géothermal, et de la **centrale** avec ses différents équipements.

→ LES OUVRAGES EN SOUS-SOL

On distingue également les **puits de captage** de la ressource (ou **puits de production**) et les **puits de réinjection**, par lesquels le fluide géothermal, après l'exploitation de son contenu énergétique pour produire de l'électricité, est réinjecté *via* une pompe dans le réservoir géothermique à une distance suffisamment importante de la zone de captage.

L'intérêt de la réinjection est de maintenir le réservoir sous pression et d'éviter le rejet en surface du fluide géothermal, chargé en minéraux dissous.

Les puits de production et de réinjection sont de même architecture et sont forés selon la technique du **forage rotary** (un tricône muni de molettes dentées tourne à vitesse élevée et, sous l'effet cumulé du poids et de la vitesse, broie la roche).

Une fois réalisé, chaque puits est équipé d'une tête de puits.



→ LA CENTRALE ET SES DIFFÉRENTS ÉQUIPEMENTS

• Les conduites de transport du fluide géothermal

Généralement présent sous forme liquide dans le réservoir, le fluide géothermal se transforme partiellement en vapeur lors de sa remontée vers la surface résultant d'une perte de sa pression. Arrivé en tête de puits, le fluide se présente donc sous la forme d'un **mélange d'eau et de vapeur d'eau**, recueilli en tête de puits et acheminé jusqu'à la centrale par une **conduite calorifugée** qui empêche les pertes de chaleur.

• Séparateur eau/vapeur et sécheur

Avant son arrivée à la centrale, le fluide est acheminé dans un **séparateur** qui permet de séparer les deux phases. La phase vapeur est ensuite dirigée dans un **sécheur** qui élimine toute trace d'eau liquide restante avant d'être envoyée vers la centrale par une conduite calorifugée. La phase liquide est réinjectée dans le réservoir géothermique dans des **puits de réinjection**.

• Turbine et alternateur

La **turbine** constitue le cœur de la centrale géothermique. Elle convertit l'énergie contenue dans le fluide en **courant électrique alternatif** selon le principe de l'induction (un rotor à aimant et un stator à bobine électrique) adapté à la fréquence électrique voulue sur le réseau.

• Refroidissement du fluide géothermal et condensation de la vapeur

Afin d'améliorer le rendement de conversion de l'énergie thermique contenue dans le fluide géothermal en énergie électrique, il est nécessaire d'assurer la condensation de la vapeur géothermale à la sortie de la turbine, et donc son refroidissement. Pour cela, il est indispensable de disposer d'une **source froide** qui peut être de l'eau présente sur le site ou l'air ambiant.

Selon la nature de la source froide, il existe différents systèmes de refroidissement.

Le système de **refroidissement à l'eau** est constitué d'un condenseur alimenté en eau de refroidissement par de l'eau présente sur le site (eau de rivière, eau de mer, ou eau d'un aquifère superficiel), ou de l'eau présente sur le site refroidie dans une **tour de refroidissement**, si l'eau est de mauvaise qualité ou n'existe pas en quantité suffisante.

En l'absence d'eau sur le site, il est nécessaire de recourir à un système de refroidissement à air.

• Transport de l'électricité : les équipements électriques

L'électricité produite est injectée dans le **réseau de distribution** d'électricité *via* un **transformateur** qui élève la tension de l'électricité sortie d'alternateur.

Quelles sont les étapes pour développer une installation de géothermie profonde ?



Obtenir les titres miniers et autorisation de travaux

Pour développer un site de géothermie profonde qui valorise l'énergie du sous-sol au-delà de 200 mètres de profondeur ou 30 °C ou encore plus de 500 kW d'extraction ou d'injection de calories, il est nécessaire d'obtenir de l'État (sauf dans le cas de la Géothermie de Minime Importance - voir p.13) :

→ d'abord un **titre minier d'exploration**, qui est, soit une **Autorisation de Recherches (AR)**, soit un **Permis Exclusif de Recherches (PER)** selon la connaissance existante de l'aquifère profond visé ;

→ puis, une **autorisation d'ouverture de travaux miniers (DAOTM)** pour réaliser les forages nécessaires à la recherche puis à l'exploitation ;

→ enfin, un **titre minier d'exploitation**, qui est un **Permis d'Exploitation (PEX)** si la puissance thermique extraite est inférieure à 20 MWth ou une **Concession d'exploitation (CC)** si la puissance thermique extraite est supérieure à 20 MWth.

Titres miniers depuis le 1^{er} janvier 2020

RÉGIME LÉGAL DES MINES (= CODE MINIER)

EXPLORATION	EXPLOITATION
AUTORISATION DE RECHERCHES (AR)	GÉOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE (GMI)
PERMIS EXCLUSIF DE RECHERCHES (PER)	PERMIS D'EXPLOITATION (PEX) PUISSANCE PRIMAIRE < 20 MWth
	CONCESSION (CC) PUISSANCE PRIMAIRE > 20 MWth

Quelles sont les étapes pour réaliser un projet de géothermie profonde ?

La **phase d'obtention des titres miniers** varie entre un an (AR + DAOTM simultanées) à trois ans dans le cas extrême (PER, exploration de la zone non connue, puis DAOTM).

La **préparation du chantier** est d'environ trois mois. Elle comprend les fouilles archéologiques préalables, le forage des avant-puits, la plateforme, le bassin de rejet.

Le **forage profond** : en moyenne 120 jours, soit 240 jours pour un doublet. Pour le bassin parisien, il faut environ 40 jours par puits.

La **construction de l'installation en surface** : environ 18 mois (ingénierie, commandes, construction, installation et mise en service).

La **durée globale de la phase chantier** est de près de deux ans avant la mise en service.

Comment sont contrôlées les installations de géothermie profonde ?

Les opérateurs de géothermie profonde assurent la surveillance en continu des installations en mobilisant des équipes et des technologies dédiées.

La surveillance des puits est réalisée par des capteurs de surface et un contrôle de l'intégrité des tubages et de leur cimentation tous les trois à cinq ans selon la nature du puits, respectivement injecteur et producteur.

Pour la protection de la nappe, un système de piézomètres⁴⁹ analyse ponctuellement et périodiquement les eaux phréatiques.

Pour les risques sismiques, un réseau de géophones⁵⁰ assure la surveillance en temps réel des événements liés à l'activité de forage et d'exploitation dans le sous-sol.

Pour les risques de mouvements de sol, des capteurs sont installés en surface et permettent de connaître l'altitude de l'installation grâce à des satellites.

Pour les risques de fuites de gaz présents en sous-sol, des capteurs autour de l'installation détectent les fuites éventuelles en temps réel.

Par ailleurs, toute installation de géothermie profonde est soumise aux campagnes de surveillance périodique prévues par l'autorisation d'exploiter et contrôlées par l'État.



⁴⁹ Un piézomètre mesure la pression des liquides.

⁵⁰ Un géophone est un capteur, généralement de forme tubulaire, permettant l'enregistrement et/ou la mesure du vecteur vitesse des vibrations sismiques au travers du sol.

Comment financer un projet de géothermie profonde ?



En France, les projets de géothermie profonde peuvent bénéficier de plusieurs aides financières pour permettre à cette énergie renouvelable de se développer à grande échelle.

→ LE FONDS CHALEUR DE L'ADEME

Les projets de géothermie profonde pour la production de chaleur et de froid, avec ou sans réseau de chaleur, peuvent bénéficier du Fonds chaleur de l'ADEME pour les études et les investissements.

→ TAXE SUR LA VALEUR AJOUTÉE (TVA) À TAUX RÉDUIT

Les réseaux de chaleur alimentés à plus de 50 % par des énergies renouvelables ou de récupération, dont la géothermie, bénéficient d'un taux de TVA réduit à 5,5 %.

Le mécanisme de garantie des projets de géothermie profonde

Le **fonds de garantie géothermie**, abondé par l'ADEME et géré par la SAF-ENVIRONNEMENT⁵¹, couvre financièrement les maîtres d'ouvrage contre les risques géologiques liés à l'exploitation d'aquifères profonds (supérieurs à 200 mètres de profondeur).

Le soutien public à la production d'électricité par géothermie profonde

Pour la production d'électricité, il existait (cf. page 22) un mécanisme de soutien de l'Etat. Son montant était fixé dans le cadre d'une négociation entre le porteur de projet de l'installation et la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE).



⁵¹ La SAF-ENVIRONNEMENT, filiale de la Caisse des Dépôts et Consignations est chargée par les pouvoirs publics de mettre en œuvre et de gérer les Fonds de garanties des risques géologiques et géothermiques.

Quel est le coût des installations de géothermie profonde ?

Par comparaison avec les installations utilisant des énergies fossiles, les réseaux de chaleur géothermiques sur aquifères profonds se caractérisent par des investissements élevés mais par des coûts d'exploitation faibles et stables.

Par exemple, pour une opération comprenant deux forages (doublet) dans l'aquifère du Dogger en Île-de-France, l'investissement moyen total en 2011 a été de 13 M€ : 8,4 M€ pour la partie sous-sol, 2,5 M€ pour l'installation et 2,1 M€ pour le poste "assurances, maîtrise d'œuvre".

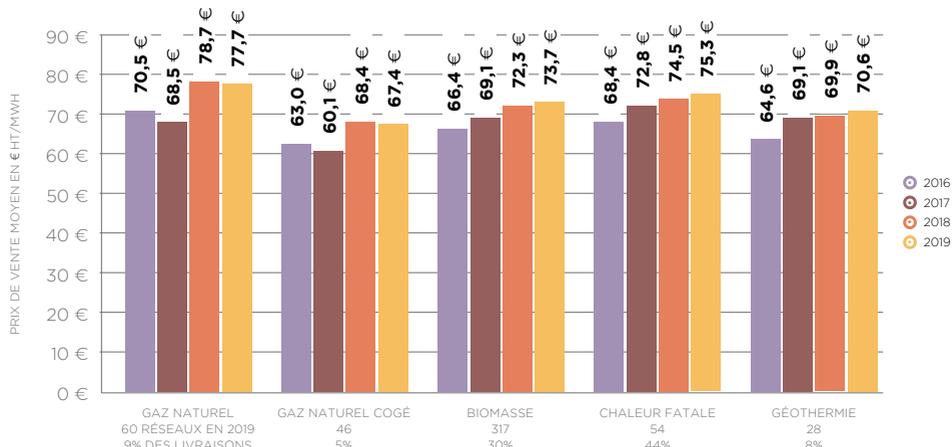
Le coût d'exploitation de 410 000 €/an (ADEME-BRGM, 2011) est en revanche très modeste pour une installation de cette taille.

Comme le montre le graphique ci-dessous, **le coût de production de la chaleur des réseaux géothermiques est très modéré, se situant en 2017 à 69,1 €/MWh** (ADEME-AMORCE, 2019).

C'est pourquoi, les réseaux de chaleur alimentés par géothermie constituent un véritable atout dans la lutte contre la précarité énergétique. Il est à noter que plus l'enlèvement de chaleur annuel sera élevé, plus le coût du MWh thermique sera faible. Il peut être divisé par deux si l'enlèvement se fait à 8 000 heures/an comme, par exemple, pour des applications de chaleur industrielle.

Évolution du prix de vente moyen de la chaleur de 2016 à 2019 en fonction de l'énergie majoritaire utilisée par le réseau

Source : Enquêtes annuelles des réseaux de chaleur et de froid, SDES / SNCU / AMORCE, éditions 2017 à 2020⁵². Analyse : AMORCE



⁵² Le prix du gaz qui a servi de référence à ces études était celui qui prévalait avant la crise énergétique de 2022.

Quelles sont les durées de vie des installations de géothermie profonde et que se passe-t-il à la fin de la durée d'exploitation ?



Les équipements de forage ont une durée de vie d'une trentaine d'années. Ils nécessitent une surveillance de la qualité du métal et une gestion des éventuels dépôts sur les parois tous les cinq ans. La corrosion issue de la circulation de l'eau géothermale est contrôlée et traitée si nécessaire.

Lorsque l'épaisseur de tubage est jugée trop faible, les puits peuvent être rechemisés par la pose et la cimentation d'un nouveau tubage de diamètre plus petit dans le puits. Une nouvelle période de 30 années d'exploitation peut démarrer.

Les pompes d'extraction de l'eau géothermale et de réinjection ont une durée de vie de trois à cinq ans et sont régulièrement changées.

Lorsque les puits arrivent en fin de vie, ils sont "bouchés" avec du ciment pour garantir la stabilité du sous-sol et l'imperméabilité des éventuelles nappes d'eau traversées. Après la procédure d'obturation, ils restent sous la surveillance du détenteur pendant une certaine durée, puis de l'Etat. Pour assurer la continuité de fourniture d'énergie géothermale, de nouveaux puits peuvent être réalisés dans un périmètre proche.





SYNDICAT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

40/42 RUE LA BOÉTIE

75008 PARIS

+33 (0)1 48 78 05 60

CONTACT@ENR.FR

WWW.ENR.FR



SYNDICAT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Soutenu par

