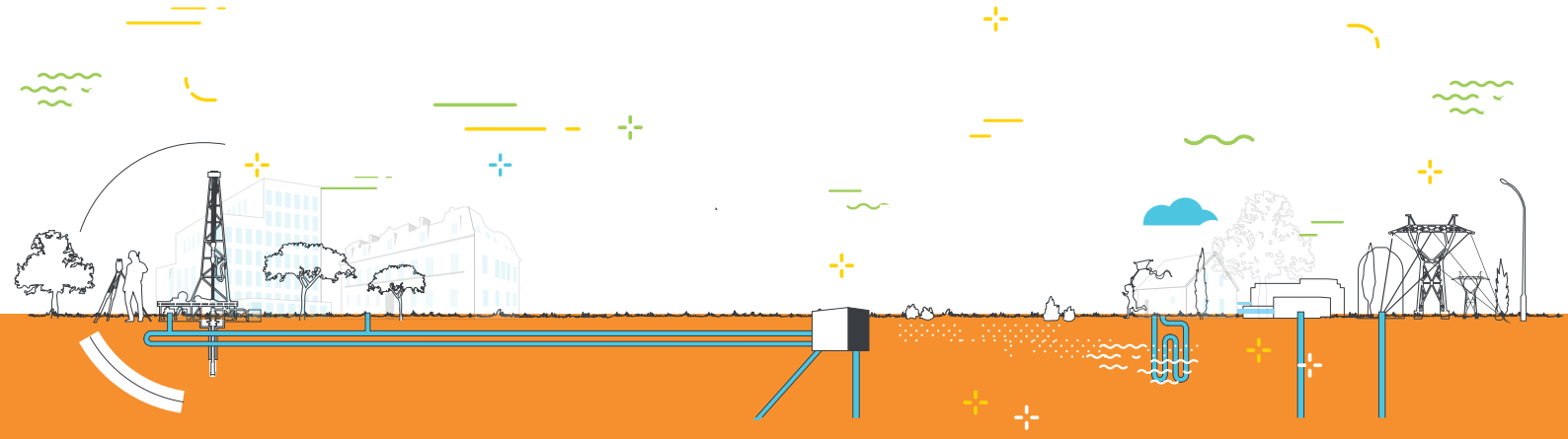




La géothermie, **l'énergie de demain, dès aujourd'hui !**



LA GÉOTHERMIE EN FRANCE

Étude de filière 2021

5e édition - septembre 2021

afpg
ASSOCIATION FRANÇAISE
DES PROFESSIONNELS DE LA GÉOTHERMIE

Sommaire

Contextualisation p.3

Introduction p.4

Voies d'avenir p.49



Géothermie de surface

Principes et usages p.6

Les innovations en géothermie de surface p.10

Etat de la production française en 2020 p.12

Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre p.17

Bilan et perspectives p.23



Géothermie profonde – Production de chaleur

Principes et usages p.29

Innovations en géothermie profonde p.30

État de la production française en 2020 p.34

Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre p.39

Bilan et perspectives p.42



Géothermie profonde – Centrales électrogènes

Principes et usages p.45

Les centrales géothermiques électrogènes en fonctionnement p.46

Les projets de développement p.47

Bilan et perspectives p.48

Glossaire

Bassin sédimentaire
Dépression de la croûte terrestre dans laquelle se sont accumulés des matériaux sédimentaires, formant progressivement des couches de roches sédimentaires.

Cogénération
La cogénération est la production simultanée de 2 formes d'énergies à partir d'un même process. On parle souvent de cogénération électricité/chaleur, pour laquelle on valorise la chaleur résiduelle issue de la production de l'électricité.

Coproduction
La coproduction permet de produire simultanément 2 formes d'énergies – typiquement électricité et chaleur. Contrairement à la cogénération, ce n'est pas l'énergie résiduelle issue de la production d'électricité qui est valorisée mais une partie de la source d'énergie primaire. En pratique, dans une centrale géothermique électrogène, une partie de la vapeur extraite du sol sert à la production d'électricité, tandis que l'autre partie est valorisée sous forme de chaleur (par exemple dans un réseau de chaleur urbain).

Équivalent-logement
Grandeur énergétique représentant la consommation d'un logement moyen, d'environ 70 m², occupé par une famille de quatre personnes. Il sert de référence commune pour exprimer les quantités de chaleur livrées (chauffage et ECS) quelles que soient les caractéristiques des bâtiments desservis (logement, bureaux, hôpitaux, gymnases...). Conventionnellement, 1 équivalent-logement = 10 MWh/an.

Production
Grandeur indiquant l'énergie convertie par un système sur une période donnée. Par exemple, une production exprimée en kWh/an mesure la quantité d'énergie (en kWh) convertie pendant un an.
En présence d'une pompe à chaleur (PAC), on distingue l'énergie calorifique (dont profite le consommateur) de l'énergie géothermique (frigorifique, renouvelable). Ces deux énergies sont reliées de la façon suivante :

$$E_{géothermique} = (E_{calorifique} - E_{consoPAC}) = E_{calorifique}(1 - \frac{1}{SCOP_{PAC}})$$

où le SCOP désigne le coefficient de performance saisonnier de la PAC géothermique.

Puissance installée
Grandeur indiquant la quantité maximale d'énergie pouvant être convertie par unité de temps. Elle s'exprime en Watt (W). On peut distinguer les différentes formes de puissance : on parle par exemple de watts thermiques (Wth) et de watts électriques (We).
En présence d'une pompe à chaleur (PAC), on distingue la puissance calorifique (dont profite le consommateur) de la puissance géothermique (frigorifique, renouvelable). Ces deux puissances sont reliées de la façon suivante :

$$P_{géothermique} = (P_{calorifique} - P_{consoPAC}) = P_{calorifique}(1 - \frac{1}{COP_{PAC}})$$

Réservoir aquifère
Roche suffisamment poreuse et perméable pour pouvoir contenir des fluides (ici, de l'eau). Ces roches (calcaires, dolomies, grès) ont un intérêt économique si leurs volumes sont suffisants et si elles sont recouvertes de couches imperméables empêchant les fluides de s'échapper.

Le rôle de l'AFPG

Créée en 2010, l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) œuvre activement pour structurer la filière de la géothermie en France et à l'export, et représenter ses acteurs auprès des pouvoirs publics.

Cette étude s'inscrit dans sa mission d'information sur l'état actuel de la géothermie en France. Elle a pour objectif d'exposer les derniers grands chiffres de la filière afin de les mettre en perspectives avec les objectifs gouvernementaux. Seront également présentés les principales aides et réglementations en vigueur, les innovations récentes ainsi que les freins au développement de la filière à travers des avis d'experts.

Respecter nos engagements climatiques

Si la France est aujourd'hui capable de produire une des électricités les plus décarbonées du monde, il lui reste à confirmer sa transition énergétique dans de nombreux autres secteurs si elle veut tenir ses engagements climatiques, que ce soit à l'échelle nationale, européenne ou internationale. Un de ces secteurs majeurs est la chaleur.

Aujourd'hui, la chaleur représente près de 50 % de la demande énergétique nationale. Cependant, elle demeure très majoritairement d'origine fossile et constitue donc une part importante de nos émissions de gaz à effet de serre.

La Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (LTECV) prévoyait que 33 % de la chaleur consommée en France en 2020 soit d'origine renouvelable. On a de loin pas atteint cet objectif.

Afin de tenir nos engagements pour 2030, il est donc essentiel d'inverser la tendance et de développer massivement des moyens de production décarbonés. La géothermie fait partie du bouquet énergétique qui permettra de répondre à cet enjeu.

La géothermie en France

La France fut l'un des pays pionniers dans le développement de la géothermie et en demeure un leader : le Bassin parisien présente la plus grande densité d'opérations de géothermie profonde au monde.

Si aujourd'hui la géothermie ne représente que 4 % de la production de chaleur renouvelable en France métropolitaine, notre pays recèle un potentiel largement sous-exploité.

Dans un monde à entropie croissante, il ne fait aucun doute qu'il faille suivre l'exemple de nos voisins et développer cette énergie abondante, décarbonée et pilotable.

Partenaires ayant contribué à l'étude

ADEME - Agence de la transition écologique
www.ademe.fr

AFPAC - Association Française pour la Pompe à Chaleur
www.afpac.org

BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières
www.brgm.fr

Observ'ER - Observatoire des énergies renouvelables
www.energies-renouvelables.org/accueil-observ-er.asp

SER - Syndicat des Énergies Renouvelables
www.enr.fr

UNICLIMA - Syndicat des Industries Thermiques, Aérauliques et Frigorifiques
www.uniclima.fr

La géothermie, une énergie à haut potentiel

La géothermie permet d'exploiter l'énergie contenue dans le sol afin de fournir de la chaleur aussi bien que du froid. Elle peut même parfois être utilisée pour générer de l'électricité comme c'est le cas en Guadeloupe ou en Islande, en Italie, aux Etats-Unis...

Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable, pilotable et décarbonée.

Une installation géothermique permet de répondre aux besoins de chaud et de froid, du particulier aussi bien que des bâtiments collectifs et tertiaires et ce, de manière ininterrompue.

Avec une très faible empreinte au sol, la géothermie s'intègre en outre parfaitement au paysage. L'énergie est produite localement et donc créatrice d'emplois non délocalisables dans les territoires où elle est implémentée – notamment en milieu rural.

La géothermie a pour elle de nombreux atouts justifiant sa place dans le mix énergétique :

- Elle ne dépend pas d'un combustible fossile ce qui lui permet un coût de fonctionnement moindre et un amortissement de son installation en moyenne en 10 ans ;
- Elle est directement capable de fournir du froid renouvelable ;
- Ce n'est pas une énergie intermittente, ce qui simplifie son intégration au mix énergétique ;
- Elle permet du stockage thermique intersaisonnier ;
- En période caniculaire, elle permet de rafraîchir l'intérieur sans rejeter de la chaleur en extérieur et ne participe donc pas aux îlots de chaleur urbains ;
- Elle conserve un très haut rendement énergétique tout au long de l'année, du fait de la variation négligeable de température du sous-sol.

C'est également un secteur en plein renouvellement avec d'importantes perspectives de développement dans les années à venir :

- Le déploiement d'échangeurs compacts novateurs, démocratisant la solution ;
- L'emploi de nouveaux matériaux composites, prolongeant la durée de vie des installations ;
- Le développement de techniques de forage plus performantes améliorant les débits prélevés et, de fait, la puissance extraite ;
- Une excellente intégration aux Smart-grid thermiques ;
- La mutualisation des puits géothermiques qui permettront d'extraire du lithium en parallèle de la chaleur, ressource essentielle à la transition énergétique.

Des installations à toute échelle

On distingue deux types de géothermie :

- La **géothermie de surface**, à des profondeurs maximales de quelques centaines de mètres. Elle permet de produire de la chaleur et du froid renouvelables, à l'aide d'un dispositif intermédiaire appelé Pompe à Chaleur (PAC). Elle représente près de 75 % de la puissance installée de la filière en France.
- La **géothermie profonde**, à des profondeurs allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Elle exploite l'eau géothermale présente dans des nappes d'eau souterraines ou des réservoirs aquifères pour alimenter des réseaux de chaleur mais également dans certains cas pour produire de l'électricité – voire les deux en même temps.

Géothermie de surface



Principes et usages

La géothermie de surface désigne les technologies exploitant une ressource géothermale de température inférieure à 30°C, se situant généralement à moins de 800 m de profondeur. Elle s'appuie sur la chaleur contenue dans le sous-sol, qui est une source d'énergie renouvelable, locale et disponible à toute heure et à toute saison.

Selon son dimensionnement, un système géothermique permet de couvrir, en partie ou en totalité, les besoins du particulier, des secteurs collectifs ou des secteurs tertiaires (hôpitaux, bureaux, écoquartiers ...), à savoir :

- Le chauffage
- L'eau chaude sanitaire
- La climatisation
- Le rafraîchissement

Une installation de géothermie de surface est constituée de 3 éléments principaux :

- un dispositif de captage : il amène les calories du sous-sol à la surface
- un dispositif de production : il valorise l'énergie du sous-sol afin de couvrir les besoins de chaud et/ou de froid
- un dispositif de régulation : il permet de gérer les différents modes de fonctionnement

L'installations de tels dispositifs permet de diminuer considérablement la facture énergétique par rapport à une solution conventionnelle.

Les dispositifs de captage

· Le captage sur nappes

En présence d'une nappe d'eau possédant un débit suffisant et située à une profondeur raisonnable, ce dispositif permet de capter les calories de l'eau.

Deux (ou trois) forages sont nécessaires pour la mise en œuvre de cette technique : un forage d'alimentation pour pomper l'eau à la surface, et un (ou deux) forage(s) pour réinjecter l'eau refroidie (ou réchauffée dans le cas de la climatisation).

Il s'agit d'un captage extrêmement modulable : selon les caractéristiques de la ressource, il peut alimenter une maison (aquifère superficiel) ou un quartier entier (aquifère profond pour alimenter une boucle d'eau tempérée).

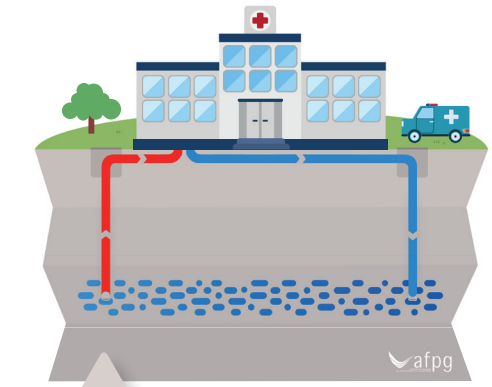


Schéma de principe du captage sur nappe

· Le captage par sondes géothermiques verticales (SGV)

Une sonde géothermique verticale est constituée d'une boucle (« tube en U »), ou couramment de deux boucles («double-U») dans laquelle circule en circuit fermé un fluide caloporteur. Cette sonde est insérée dans un forage, qui est ensuite cimenté pour éviter toute fuite et optimiser le captage des calories du sol.

La puissance extraite (ou puissance frigorifique) est de l'ordre de 50 W par mètre linéaire de forage lorsqu'elles sont sollicitées environ 2 000 heures par an. Sur des bâtiments récents, la durée annuelle de sollicitation est souvent plus faible : la puissance linéaire extraite peut ainsi être significativement plus importante.

Il est possible d'installer plusieurs sondes afin d'augmenter la puissance installée et de répondre à un besoin plus important. On parle alors de champ de sondes géothermiques verticales (CSGV).

Contrairement au captage sur nappe, qui nécessite la présence d'une ressource d'eau souterraine en quantité et qualité suffisantes, les sondes géothermiques sont déployables sur la quasi-totalité du territoire.

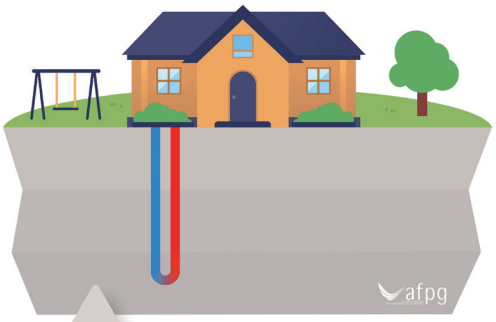


Schéma de principe du captage par SGV

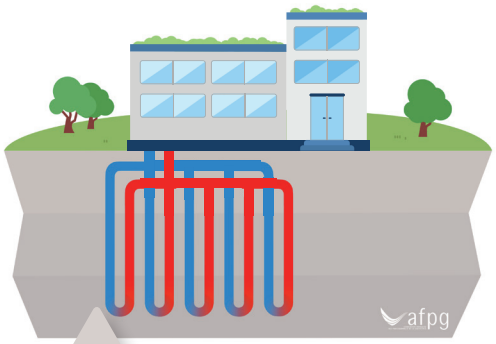


Schéma de principe du captage par CSGV

· Le captage horizontal

Ce système est constitué de tubes situés entre 80 cm et 120 cm de profondeur, dans lesquels circule de l'eau glycolée en circuit fermé. A cette profondeur, l'énergie captée est principalement d'origine géosolaire (rayonnement solaire, ruissellement des eaux de pluie). La mise en place de ce type de captage est très rapide et peu coûteuse, mais nécessite une superficie importante.



Schéma de principe du captage horizontal

· Les fondations thermoactives

Cette technique consiste à intégrer dans les fondations d'un bâtiment – par exemple dans les pieux – un système de captage d'énergie constitué d'un réseau de tubes dans lequel circule de l'eau glycolée en circuit fermé. Les fondations thermoactives servent à la fois d'éléments de portage du bâtiment et d'échangeurs de chaleur avec le terrain environnant permettant le chauffage et le refroidissement du bâtiment.

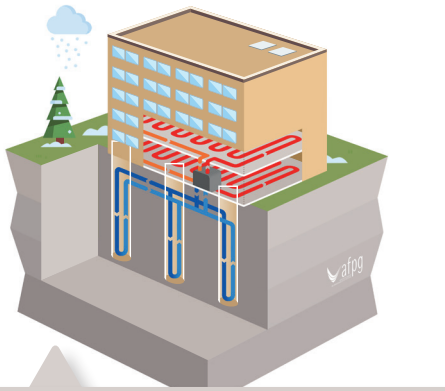


Schéma de fonctionnement des fondations thermoactives

Les échangeurs compacts

Ces échangeurs sont installés à quelques mètres de profondeur et sont des alternatives aux sondes verticales et aux nappes horizontales. S'ils sont encore assez peu déployés aujourd'hui, leur utilisation est particulièrement adaptée aux besoins du particulier ainsi qu'aux bâtiments de taille moyenne (< 500 m²) construits récemment ou bien rénovés. Il en existe de différentes sortes, comme les « murs géothermiques », qui s'installent dans une tranchée, ou encore les « corbeilles géothermiques », qui feront l'objet d'une partie détaillée.



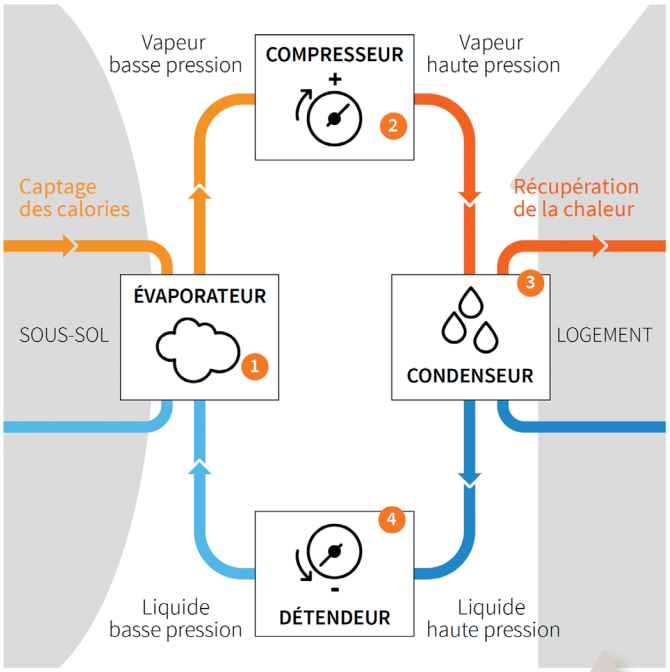
Schéma de principe d'un mur géothermique

Le dispositif de production : la pompe à chaleur (PAC)

Une pompe à chaleur (PAC) est un dispositif thermodynamique permettant de transférer les calories d'un milieu vers un autre. Ce dispositif permet par exemple de réchauffer une eau à 50°C à partir d'une ressource à 10°C.

Le schéma suivant résume le fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique à compression.

LE CYCLE THERMODYNAMIQUE D'UNE POMPE À CHALEUR



1 Évaporation
Le fluide frigorigène est évaporé à basse pression (BP) et à basse température, en utilisant l'énergie de la source de chaleur (capteur horizontal, capteur vertical ou forage sur eau de nappe).

2 Compression
La vapeur du fluide frigorigène est comprimée à une pression supérieure au moyen du compresseur électrique, ce qui entraîne une élévation de la température.

3 Condensation
La vapeur du fluide frigorigène à haute pression (HP) est condensée à haute température par dissipation de sa chaleur dans l'émetteur (plancher chauffant, radiateurs, ventilo-convecteurs, etc.).

4 Détente
Le fluide frigorigène liquide est détendu depuis une pression élevée (HP) à une pression basse (BP). Il s'en suit une chute de la température, et le cycle recommence.

Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique à compression (ADEME, AFPG)

Les performances d'une PAC sont indiquées par son coefficient de performances, ou COP. Il s'agit du ratio entre la puissance apportée sous forme de chaleur au logement et la puissance électrique absorbée par la PAC. En géothermie, les COP sont de l'ordre de 5 : c'est-à-dire que pour 1 kW d'électricité absorbée par la PAC, cette dernière produit 5 kW de chaleur ou 4 kW de froid. Concrètement, cela permet de diviser par 5 la facture énergétique payée par l'utilisateur.

Le dispositif de production

Il permet de gérer les différents modes de fonctionnement de la PAC géothermique. Outre la production d'ECS et la climatisation, il existe 2 autres modes :

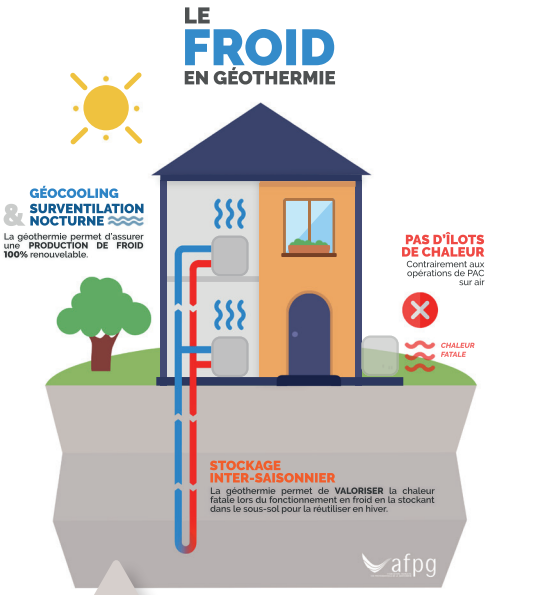
· Le mode Thermo-Frigo-Pompe

Il s'agit d'un mode de production simultanée de chaud et de froid, ce qui permet un rendement de 700 % à 1200 %. Des ballons de stockage intermédiaires de chaud et de froid sont adossés à la PAC géothermique. On le retrouve principalement dans le secteur du tertiaire.

· Le geocooling (ou rafraîchissement)

Le geocooling permet de « rafraîchir » un bâtiment par simples échanges thermiques. On ne passe alors pas par la PAC (on parle de « bypass »), et on apporte directement la fraicheur du sous-sol à la surface. Puisque la PAC ne fonctionne pas, les rendements sont extrêmement élevés : de l'ordre de 3000 % à 5000 % (30 à 50 kWh de froid apportés pour 1 kWh d'électricité consommée).

Le rafraîchissement ou la climatisation par géothermie se font sans rejeter de chaleur à l'extérieur. Le froid par géothermie trouve donc tout son intérêt en période de canicule où, contrairement à d'autres modes de climatisation plus répandus, il ne participe pas à l'apparition d'îlots de chaleur, c'est-à-dire à une hausse globale de la température dans les zones fortement peuplées.



Principe d'une installation de géothermie utilisant le geocooling

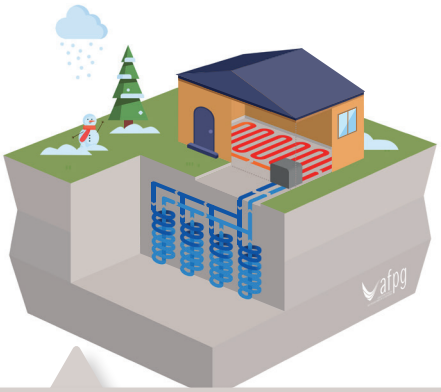
Les innovations en géothermie de surface

Un échangeur compact : la corbeille géothermique

La corbeille géothermique fait partie de la famille des échangeurs géothermiques compacts constituant une alternative aux sondes et aux nappes. Il s'agit d'un échangeur géothermique hélicoïdal implanté dans le proche sous-sol : le fluide caloporteur descend dans un tube sous forme de ressort et remonte par le centre de la spirale.

D'une hauteur généralement comprise entre 2 et 3 m, ces échangeurs sont installés à quelques mètres de profondeur (< 10 m). Ainsi, des outils de terrassement classiques comme une pelle mécanique suffisent à réaliser l'opération de pose. Une tarière suffit même pour les corbeilles de petit diamètre.

Comme les échangeurs compacts sont installés à moins de 10 m de profondeur, ils ne nécessitent pas de démarche administrative particulière (demande d'attestation ou de déclaration) hormis les démarches classiques en vigueur pour tous les travaux de terrassement.



Principe des corbeilles géothermiques

D'une puissance unitaire de l'ordre de 700 à 1200 W, la plupart des installations recensées en France comportent entre 8 et 15 corbeilles (jusqu'à 40). Sur cette base, on peut estimer qu'une installation type a des besoins en puissance de l'ordre de 10 à 15 kW. Cette solution semble donc tout particulièrement adaptée aux besoins du particulier ainsi qu'aux bâtiments de taille moyenne (< 500 m^2) construits récemment ou bien rénovés.

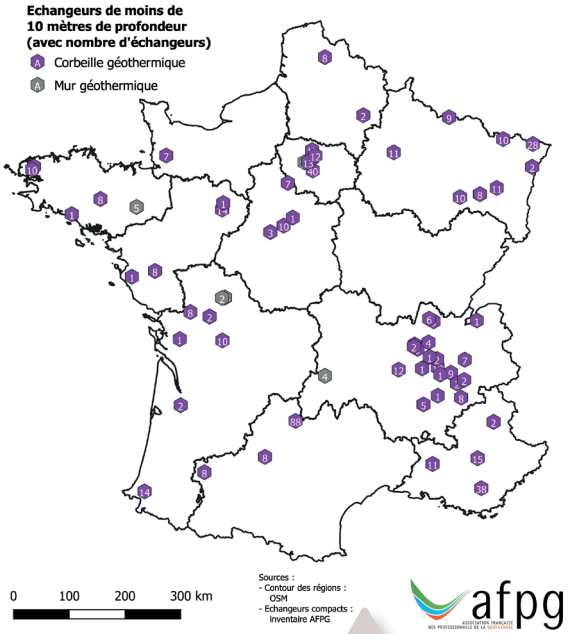


Corbeille en cuivre, sur le site du BRGM (Orléans)



Forage avec une tarière sur le site du BRGM (Orléans)

Cette carte, non exhaustive, illustre la dynamique émergente des échangeurs compacts en France. L'enjeu est maintenant d'en démocratiser l'usage pour relancer le secteur individuel.



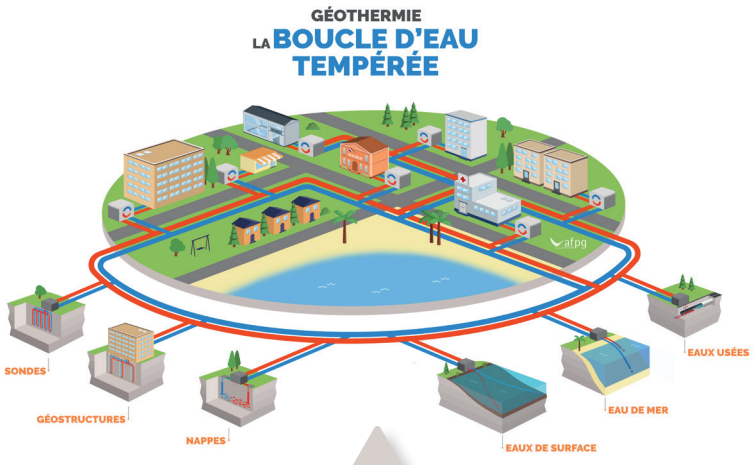
Localisation des installations (AFPG, d'après les déclarations de membres)

Un réseau de chaleur intelligent : la boucle d'eau tempérée

Ce système peut être assimilé à un réseau de chaleur urbain avec, comme différence principale, la température de l'eau circulant dans la boucle, qui est généralement comprise entre 5°C et 30°C, contre plus de 50°C dans un réseau de chaleur. L'autre point de différence majeur est la fonction de production décentralisée qui permet d'assurer le chauffage, la production d'ECS et de froid adaptés à chaque bâtiment.

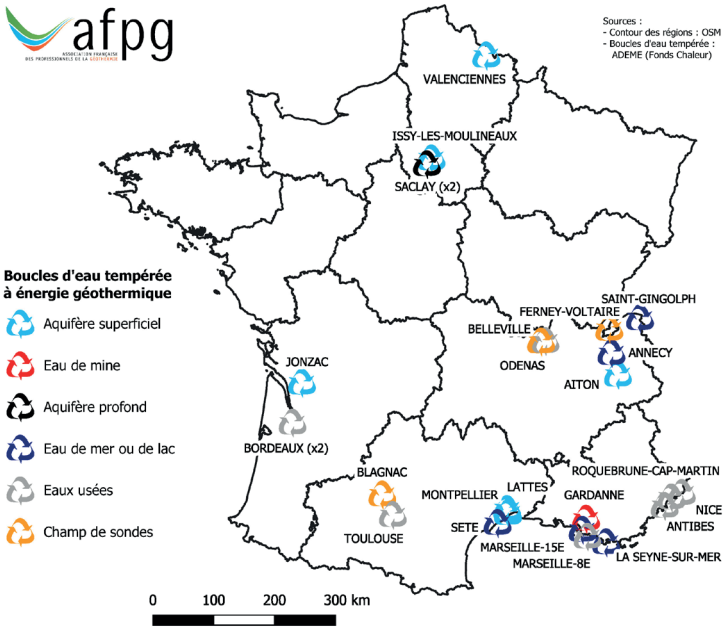
La boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG) présente de nombreux avantages :

- Une performance énergétique, économique et environnementale ;
- Une adaptabilité à tout type de besoins (chaud et/ou froid, ECS) ;
- Une capacité de stockage thermique intersaisonnier ;
- La possibilité de disposer de plusieurs sources d'énergies sur une même boucle (géothermie sur nappe ou sondes, récupération de chaleur sur eaux usées, eau de mer, eau de stations d'épuration, eau de lac, de rivière, ...) susceptibles d'être reliées en plusieurs phases selon l'évolution des besoins à satisfaire ;
- Une valorisation intelligente de l'énergie entre les différents consommateurs avec leurs besoins spécifiques (par exemple, un bâtiment avec des besoins de froid pourra rejeter ses calories sur la boucle afin qu'elles servent à chauffer un autre bâtiment).



Principe d'une boucle d'eau tempérée géothermique

C'est pour cela que la BETEG peut être qualifiée de « smart grid thermique ».



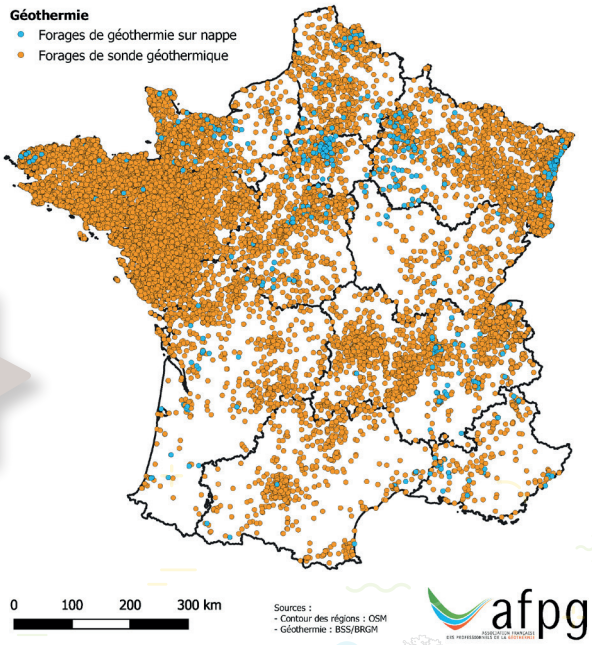
Les projets de boucles d'eau tempérée se sont multipliés au cours des dernières années. Du fait de leurs hautes performances environnementales, ces installations sont particulièrement adaptées pour l'approvisionnement énergétique de nouveaux éco-quartiers et de ZAC (Zone d'Aménagement Concerté).

L'ADEME accompagne cette technologie à travers ses dispositifs d'aides, notamment ses appels à projets NTE (Nouvelles Technologies Emergentes) jusqu'en 2018 et depuis 2019 le Fonds Chaleur. Jusqu'à aujourd'hui, ce sont 19 installations de boucles d'eau tempérée qui ont bénéficié du soutien de l'ADEME, aussi bien pour la création de nouvelles boucles que pour l'extension de boucles déjà existantes. L'ADEME a également participé au financement d'une étude de faisabilité en 2020 dans le Loiret.

Etat de la production française en 2020

Installations géothermiques très basse énergie

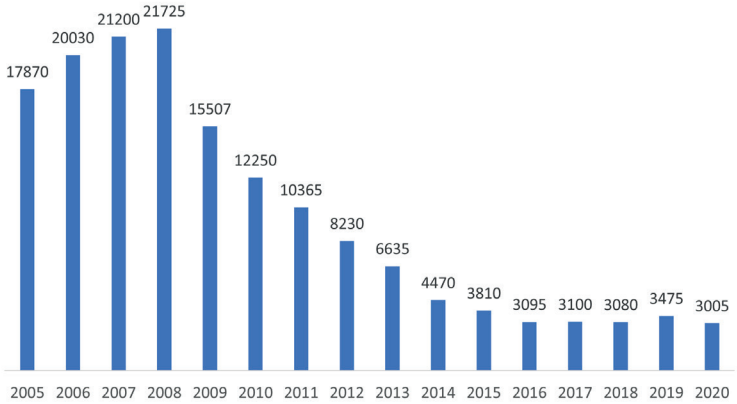
La carte ci-contre permet de visualiser la large diffusion des installations géothermiques très basse énergie en France. Si la banque des données du sous-sol répertorie plus de 50 000 points, il reste très difficile d'estimer précisément le nombre d'installations, du fait de la diffusivité du marché.



Carte des installations géothermiques de très basse température assistée par pompes à chaleur (BRGM)

Marché des PAC géothermiques : secteur individuel

En avril 2021, Observ'ER (l'Observatoire des Energies Renouvelables) a publié une étude intitulée ***Suivi du marché et des prix 2020 des pompes à chaleur individuelles***. Cette étude présente l'évolution du marché des pompes à chaleur individuelles d'une puissance inférieure à 30 kW. Les résultats illustrent la forte décroissance de ce segment de marché.



Evolution des ventes de PAC individuelles (P < 30 kW) (Observ'ER)

En 2020, ces ventes ont atteint un niveau historiquement bas, ceci pouvant en partie s'expliquer par la crise sanitaire, responsable du report d'un certain nombre de projets . Par ailleurs, il s'agit des PAC installées qui regroupent à la fois les nouvelles installations et les renouvellements d'anciennes PAC géothermiques.

A titre de comparaison, le marché des PAC aérothermiques a enregistré plus de 900 000 ventes en 2020, soit une croissance de 10,4% par rapport à 2019 (croissance en diminution par rapport à 2018). Le marché des chauffe-eau thermodynamiques a enregistré près de 110 000 ventes en 2020, soit 7,5% de moins qu'en 2019.

Comme le présente le tableau ci-dessous, ces installations se localisent principalement dans des habitats existants, c'est-à-dire dans le secteur de la rénovation.

Marché 2020	Neuf	Existant
PAC (sol/sol, sol/eau, eau glycolée/eau)	18 %	82 %
PAC (eau/eau)	20 %	80 %
Total	18 %	82 %

Répartition du marché individuel par type d'opération (Observ'ER)

On distingue plusieurs catégories de PAC géothermiques :

- Les PAC sol/sol, sol/eau et eau glycolée/eau regroupent les technologies à détente directe et principalement les sondes géothermiques verticales.
- Les PAC eau/eau concernent les circuits ouverts des PAC sur nappes.

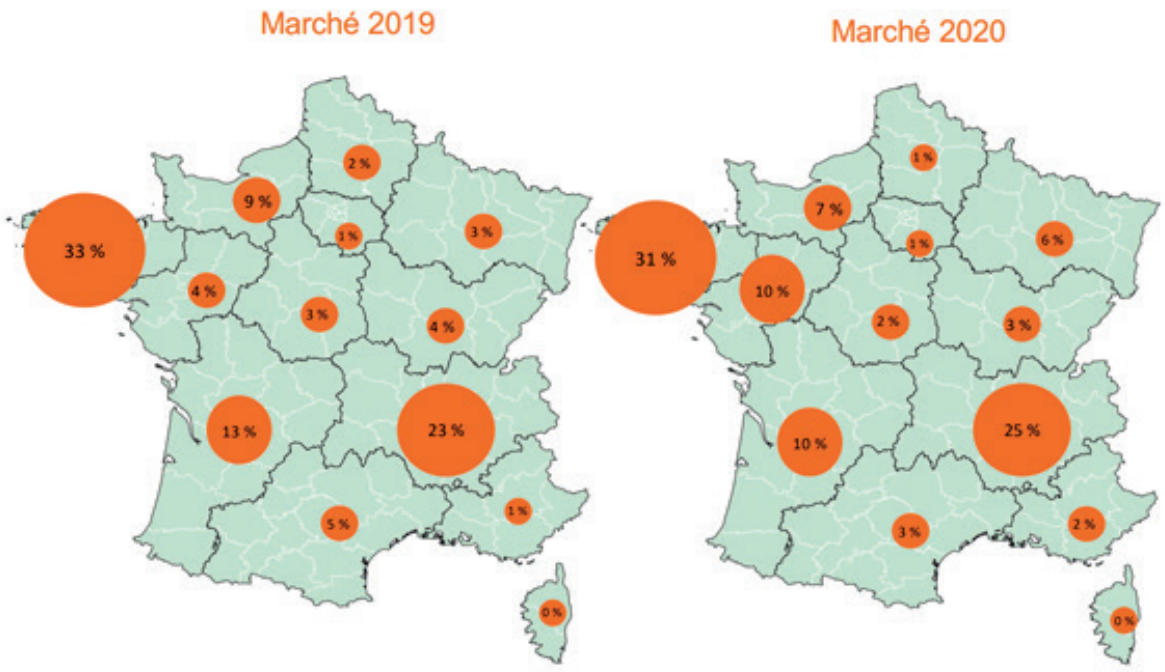
Marché 2020	< 5 kW	> 5 et < 10 kW	> 10 kW et < 20 kW	> 20 kW et < 30 kW
PAC (sol/sol, sol/eau, eau glycolée/eau)	6 %	50 %	37 %	7 %
PAC (eau/eau)	0	14 %	66 %	21 %
Total	5 %	42 %	43 %	10 %

Répartition du marché individuel par classe de puissance (Observ'ER)

On peut ainsi estimer à environ 37 MW la puissance de PAC géothermiques installées en 2020 dans le secteur du particulier, dont 28 MW pour les PAC sur eau glycolée et à détente directe, et 9 MW pour celles

sur nappes, ce qui correspond à un gain de production géothermique annuel de 57 GWh sur une base de 2 070 h de fonctionnement annuel (réglementation européenne) et un SCOP de 4.

L'étude Observ'ER présente également des informations relatives à la répartition géographique de ces ventes selon les régions.



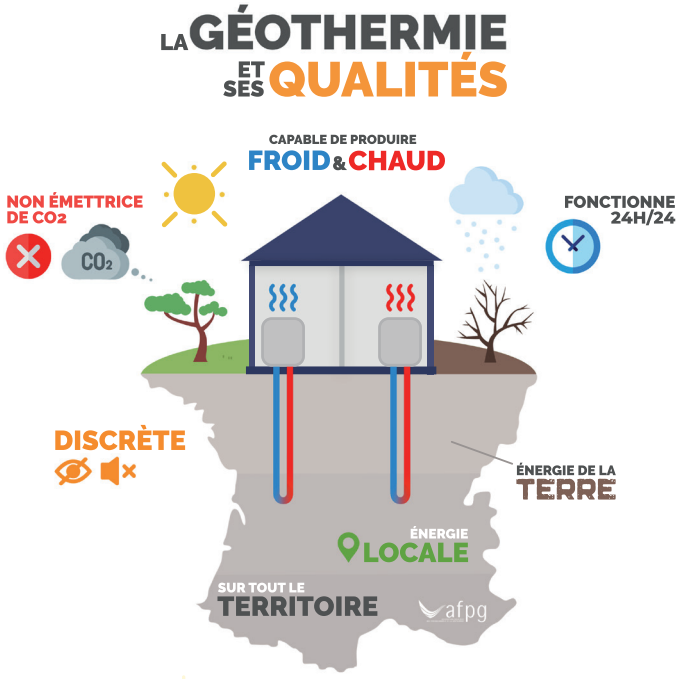
Répartition géographique des ventes de PAC individuelles (P < 30 kW) en 2019 et 2020 (Observ'ER)

On retrouve en 2020 les mêmes tendances que pour les années antérieures avec un marché relativement dynamique dans les régions Bretagne, Auvergne - Rhône-Alpes et Nouvelle-Aquitaine.

En conclusion, les ventes de PAC géothermiques individuelles se cantonnent à un marché de niche. Il s'agit d'une solution demeurant assez méconnue et trop rarement préconisée par les chauffagistes.

Si la PAC géothermique peine à concurrencer la PAC aérothermique ou le chauffe-eau thermodynamique en termes de coûts d'installation, elle présente de nombreux avantages qu'il est nécessaire de rappeler :

- Elle est plus facile et moins chère à entretenir, sa durée de vie est accrue ;
- Elle est silencieuse et invisible ;
- Elle demeure la plus performante d'un point de vue énergétique, avec une capacité de production de froid incomparable,•
  Elle ne contribue que très faiblement à l'effet «îlot de chaleur urbain» lors du fonctionnement en froid.

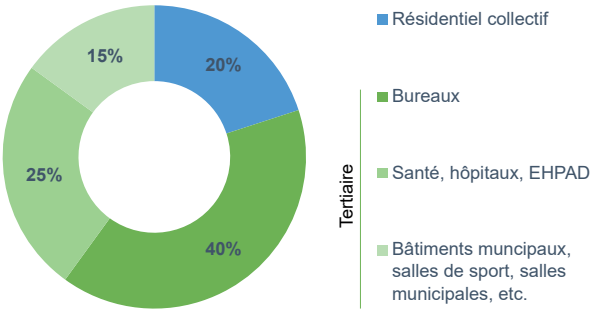


Marché des PAC géothermiques : secteurs résidentiel et tertiaire

Contrairement au marché des PAC géothermiques individuelles, le marché du collectif progresse d'année en année. Sa progression actuelle est estimée à environ 10 % par an. Il est notamment porté par les travaux de rénovation, pour lesquels l'efficacité de la géothermie est de plus en plus reconnue en termes de normes énergétiques.

Les usages sont nombreux. Les dernières études d'Observ'ER permettent d'en estimer les proportions, comme représenté sur le schéma ci-contre.

A cela s'ajoutent quelques installations industrielles et agricoles qu'il est difficile de dénombrer.



On estime qu'en moyenne une installation de géothermie de surface dans le secteur du résidentiel et du tertiaire comporte deux pompes à chaleur.

Les données de la BSS (Banque de données du sous-sol) permettent alors d'estimer la puissance moyenne des installations suivant les usages :

Puissance moyenne (kW)	**Résidentiel collectif**	**Tertiaire**
par PAC	100	55
par installation	200	110

Répartition du marché individuel par classe de puissance (Observ'ER)

En appliquant un taux de croissance de +10 %/an au marché de 2018 (Observ'ER - Étude sur le marché des installations de pompes à chaleur géothermiques collectives), on estime qu'il y a eu respectivement 110 et 445 nouvelles installations dans le secteur du résidentiel et du tertiaire en 2020. On en déduit l'estimation des ventes suivante :

Marché 2020	**Résidentiel collectif**	**Tertiaire**
Nouvelles installations	110	445
Ventes de PAC géothermiques	220	890

Répartition du marché individuel par classe de puissance (Observ'ER)

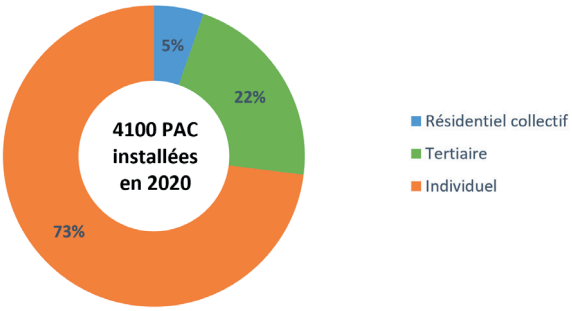
On peut ainsi estimer à environ 71 MW la puissance de PAC géothermiques installées en 2020 dans le secteur du résidentiel et du tertiaire, dont près de 70 % via des sondes géothermiques, 23 % via des installations sur nappe et 7 % via d'autres types d'opérations (eaux usées, STEP, eau de mer et géostructures).

Cela correspond à un gain de production géothermique annuelle de 110 GWh sur une base de 2 070 h de fonctionnement annuel (réglementation européenne) et un SCOP de 4.

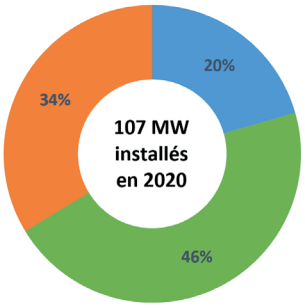
Comme pour le secteur individuel, ces installations se font principalement en rénovation (à hauteur de 60 %).

Bilan Général

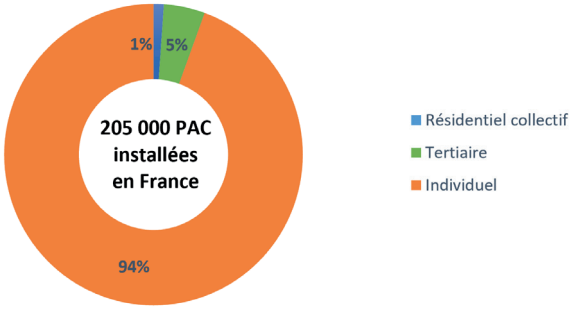
En 2020, voici la répartition des nouvelles PAC par secteur de marché:



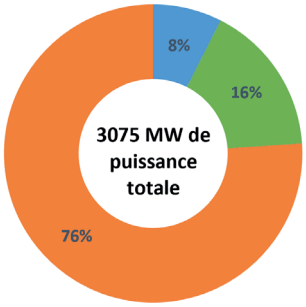
Répartition par usage des PAC installées en 2020



Répartition par usage de la puissance installée en 2020



Répartition par usage des PAC installées depuis 2001



Répartition par usage de la puissance installée depuis 2001

Ainsi, le marché de la géothermie de surface est aujourd'hui principalement porté par le secteur tertiaire. Cette nouvelle tendance contraste avec le parc total de PAC, principalement constitué de PAC individuelles, dont le marché s'est depuis amoindri.

La méthodologie de calcul détaillée est présentée plus loin dans ce document.

Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre (Source : SER 2020)

En 2019, 20,8 % de notre consommation finale de chaleur et de froid était d'origine renouvelable.

Les objectifs anciennement fixés pour 2020 était de 33 %. On sait donc aujourd'hui que ces objectifs n'ont pas été atteints.

La nouvelle Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) fixe de nouveaux objectifs pour 2030 ; 38 % de notre consommation finale de chaleur et de froid devra être d'origine renouvelable.

La géothermie représente aujourd'hui 4 % de la production de chaleur renouvelable en France métropolitaine (1 % Géothermie profonde, 3 % Géothermie de Surface), soit environ 1 % de la chaleur totale produite en France.

Afin de respecter nos engagements, il est donc nécessaire d'insuffler une nouvelle dynamique au marché de la chaleur renouvelable en France, dont celui de la géothermie. C'est suivant cette perspective que de nombreux dispositifs d'aide et réglementations se sont développés. Cette étude fait l'état des principaux, à savoir :

- Le Fonds Chaleur
- La Garantie AQUAPAC
- La réglementation GMI
- Les qualifications des professionnels (mention RGE, etc.).
- Les CEE
- Les aides au particulier (MaPrimeRénov, éco-prêt à taux zéro, Coup de pouce Chauffage, Habiter Mieux)

Le Fonds Chaleur

Mis en place en 2009, le Fonds Chaleur participe au développement de la chaleur renouvelable issue de la biomasse, de la géothermie, du solaire thermique, du biogaz, des énergies de récupération ainsi que sa distribution grâce aux réseaux de chaleur liés. Il concerne également les installations de production de froid renouvelable (géocooling, pompes à chaleur géothermiques en montage thermofrigopompe…), et, depuis 2019, les boucles d'eau tempérée. Il est destiné à l'habitat collectif, aux collectivités, aux entreprises et aux associations.

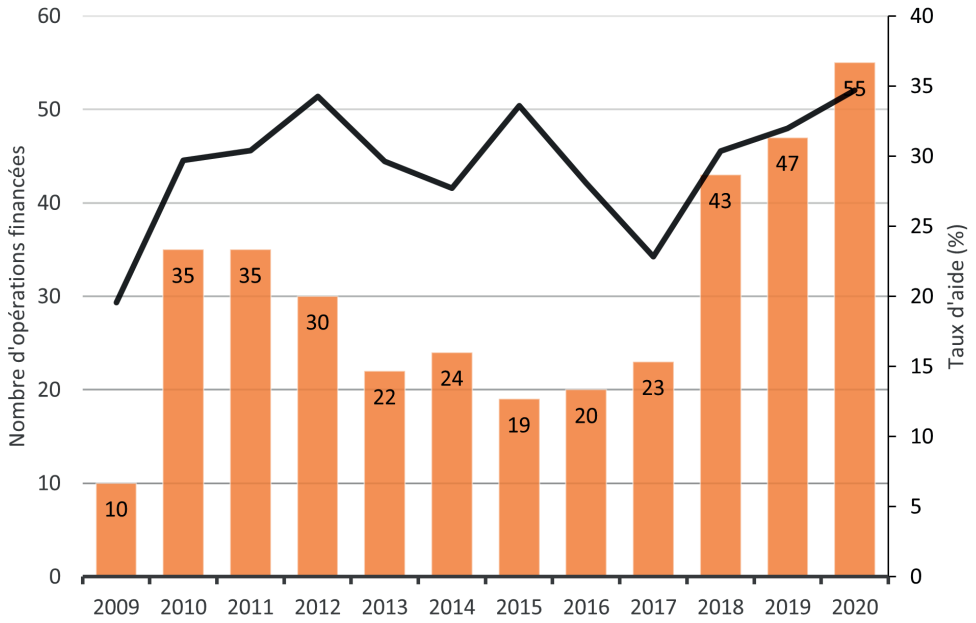
Géré par l'ADEME, ce fonds doit insuffler une dynamique forte à la production de chaleur renouvelable, avec toujours en ligne de mire l'objectif de lever à 38 % la part des énergies renouvelables dans notre consommation finale de chaleur et de froid en 2030.

Sur la période 2009-2020, le Fonds Chaleur a été doté de 2,6 milliards € pour soutenir plus de 6 000 réalisations représentant 9,4 milliards € de travaux et une production totale de chaleur EnR&R de 35,5 TWh/an (soit plus de 3 millions tep/an). Il a d'ailleurs été reconnu pour son efficacité par la Cour des Comptes. Ces éléments ont motivé la poursuite de ce dispositif pour soutenir des projets de qualité, de leur conception à leur réalisation.

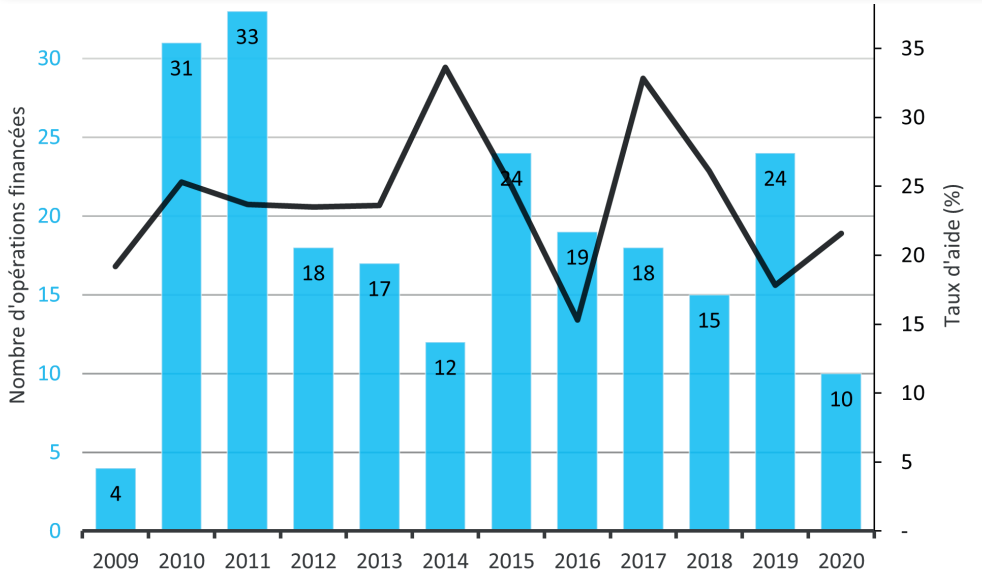
Concernant la géothermie de surface, ce sont 678 opérations qui ont bénéficié du Fonds Chaleur entre 2009 et 2020. Les données prévisionnelles du Fonds Chaleur permettent d'estimer la puissance calorifique installée correspondante. Elles sont de l'ordre de :

- 361 opérations sur sondes : 37 500 000 € d'aide apportée pour 51,8 MW de puissance installée.
- 224 opérations sur nappe : 29 300 000 € d'aide apportée pour 104,6 MW de puissance installée.
- 19 opérations sur eau de mer : 12 600 000 € d'aide apportée pour 46,7 MW de puissance installée.
- 74 opérations sur eaux usées : 26 600 000 € d'aide apportée pour 80,3 MW de puissance installée.

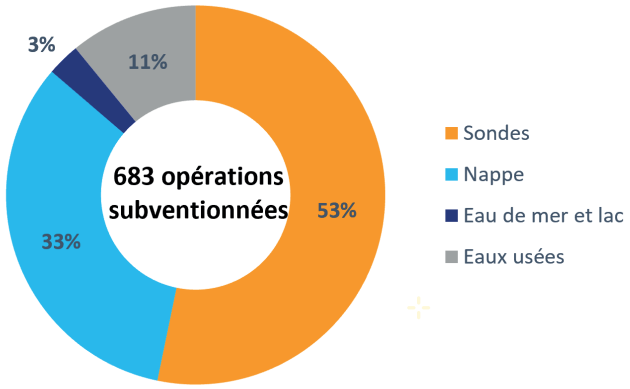
L'ADEME contribue également au financement des études de faisabilité. En 2020, 108 études ont bénéficié du Fonds chaleur, représentant plus de 1 740 000 € d'investissement de la part du Fonds Chaleur (géothermie de surface et géothermie profonde confondues).



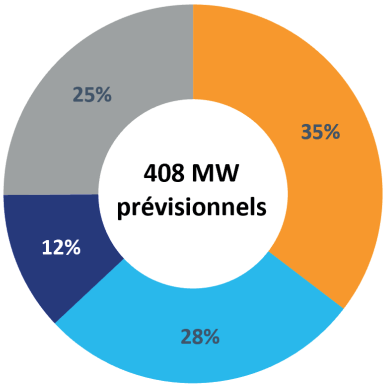
Opérations de géothermie sur sondes financées par le Fonds Chaleur (AFPG d'après les données du Fonds Chaleur)



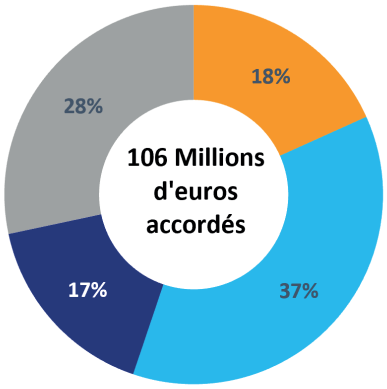
Opérations de géothermie sur nappe superficielle (<200m) financées par le Fonds Chaleur (AFPG d'après les données du Fonds Chaleur)



Répartition des opérations de géothermie ayant bénéficié du Fonds Chaleur

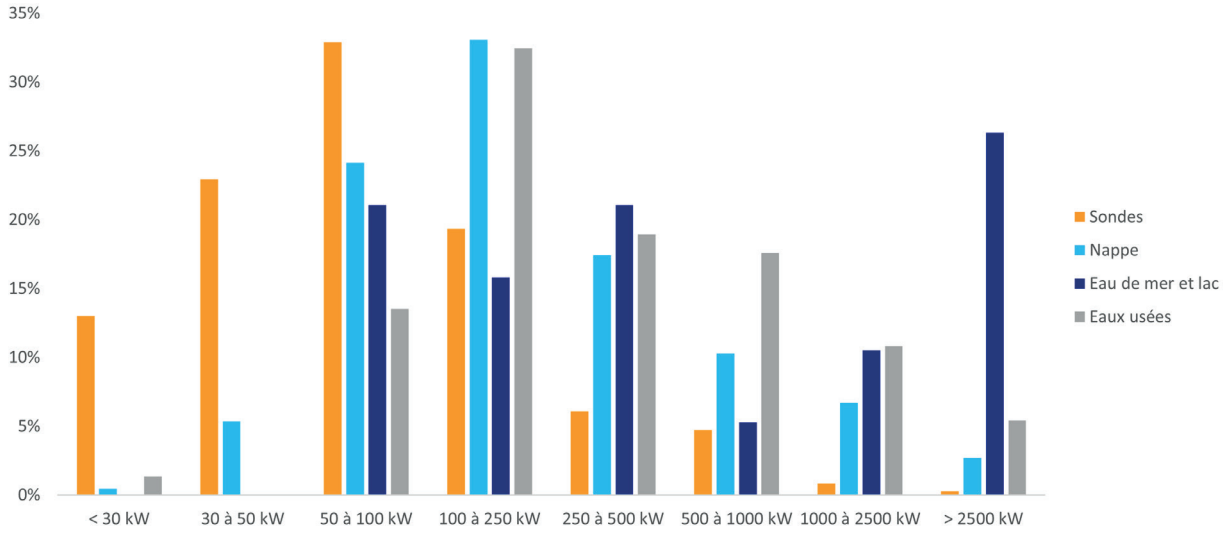


Répartition de la puissance prévisionnelle associée



Répartition des montants accordés par l'ADEME

Plus de la moitié des installations ayant bénéficié du Fonds Chaleur depuis 2009 sont des champs de sondes, d'une puissance moyenne prévisionnelle de 140 kW. Moins nombreuses, les installations sur nappe, d'une puissance moyenne de 470 kW, couvrent 37 % de la puissance installée.



Répartition des gammes de puissance par technologie

Lorsque la ressource est disponible, les installations sur nappe, eau de mer et eaux usées permettent de mobiliser davantage de puissance pour un coût plus avantageux de captage de la ressource. En revanche, les champs de sondes sont déployables sur quasiment l'ensemble du territoire, permettent de répondre aux besoins de plus petites installations et présentent également des coûts d'entretien largement inférieurs.

Les aides de l'ADEME sont principalement octroyées par ses directions régionales. Le dépôt des dossiers de demande pour le Fonds Chaleur peut se faire dans le cadre d'appels à projets régionaux, ou bien au fil de l'eau via la plateforme ADEME de services ***agirpourlatransition***.

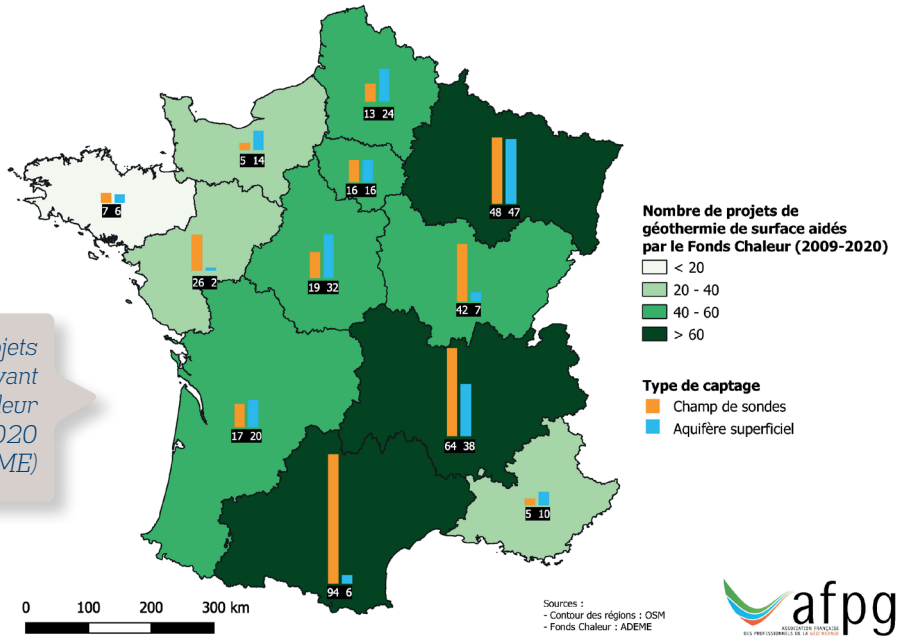


Figure 6 : Bilan des projets de géothermie de surface ayant bénéficié du Fonds Chaleur entre 2009 et 2020 (AFPG d'après données ADEME)

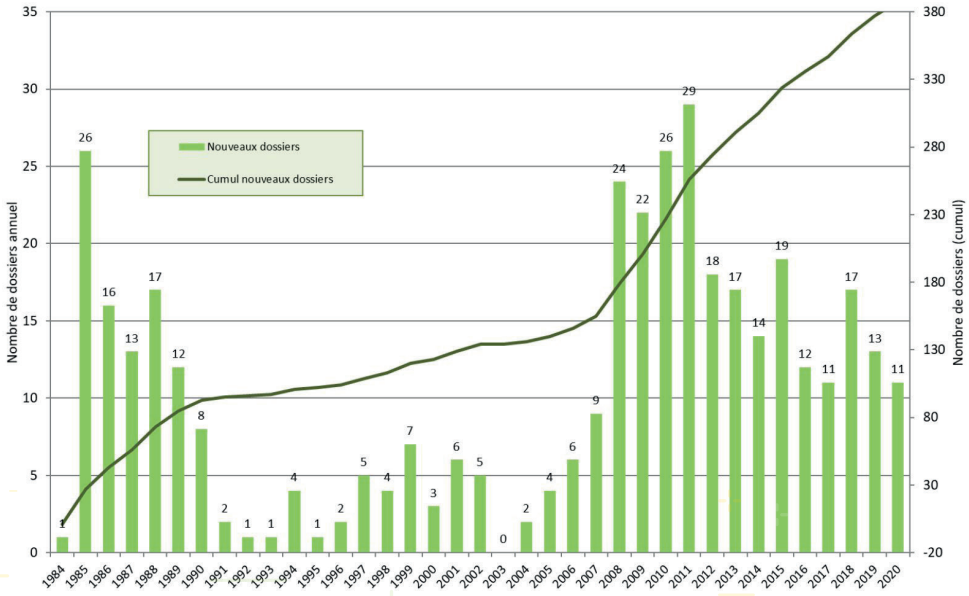
La Garantie Aquapac

Crée en 1983 par l'ADEME, le BRGM et EDF, la garantie AQUAPAC est un dispositif dont l'objectif est d'encourager le déploiement de la géothermie sur nappe de très basse énergie. Elle s'applique donc aux exploitations sur aquifère situées en général à moins de 200 m de profondeur pour des puissances thermiques comprises entre 30 et 500 kW.

Elle regroupe deux garanties :

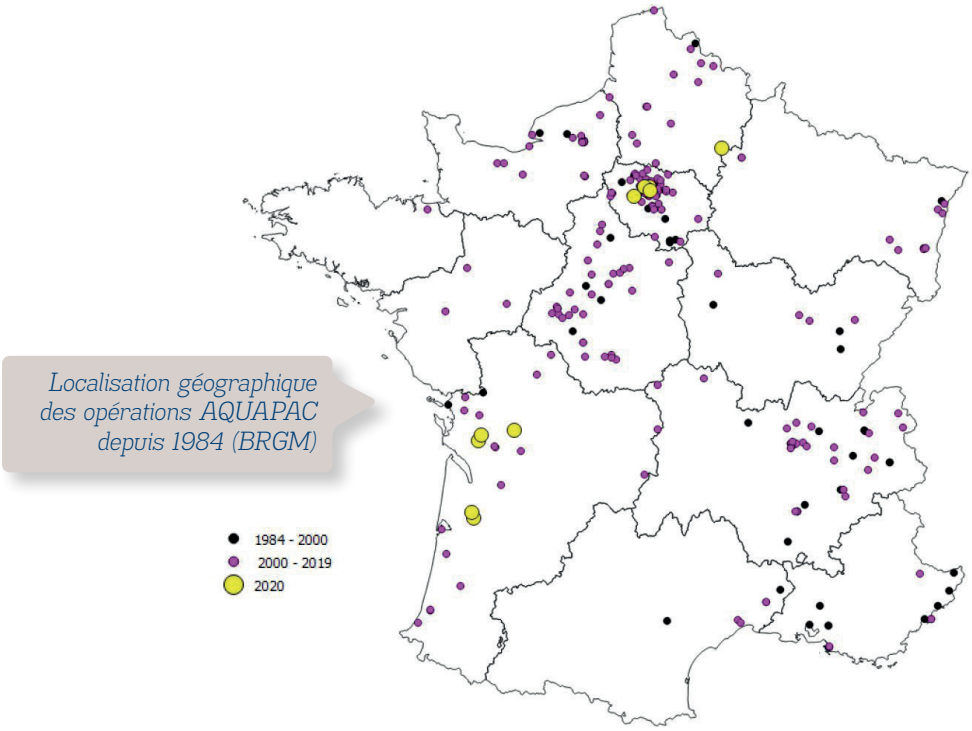
- La garantie « recherche », qui couvre le risque d'échec relatif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante.
- La garantie « pérennité », qui couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource durant les dix premières années d'exploitation.

Depuis sa création, plus de 370 dossiers ont fait l'objet d'une instruction AQUAPAC. Le graphique suivant montre l'évolution du nombre de dossiers déposés depuis 1984, en corrélation avec l'activité géothermique en France.



Evolution des dossiers de Garantie AQUAPAC (BRGM)

Seules les opérations de géothermie sur nappe assistée par pompe à chaleur sont concernées par cette garantie. Ces dernières se trouvent principalement au niveau des terrains géologiques sédimentaires, à savoir le bassin parisien et le bassin aquitain.



Localisation géographique des opérations AQUAPAC depuis 1984 (BRGM)

La réglementation GMI

En vigueur depuis 2015, le décret sur les gîtes géothermiques de minime importance (GMI) permet de sécuriser, simplifier et réduire les délais de réalisation de nombreux projets de PAC. Cette réglementation résulte d'une concertation entre les pouvoirs publics et les professionnels de la géothermie.

Ce texte permet d'exclure du Code minier les ouvrages géothermiques de moins de 10 m de profondeur et facilite la plupart des opérations de faibles puissances par la création d'un régime déclaratif allégé et dématérialisé (télé-déclaration).

Il s'applique aux ouvrages de moins de 200 m de profondeur, prélevant moins de 500 kW au sous-sol. Pour les échangeurs ouverts, le débit d'eau prélevé doit être inférieur à 80 m^3/h. L'eau ne doit pas excéder 25°C en sortie des ouvrages de prélèvement et doit être rejetée dans son aquifère d'origine.

Ce décret s'appuie sur 4 arrêtés :

- une cartographie réglementaire (définition de trois zones verte, orange, rouge) ;
- les prescriptions générales (pour la réalisation des ouvrages) ;
- l'obligation de qualification des entreprises de forage (Qualiforage).
- l'agrément des experts en hydrogéologie (pour les opérations situées en zone orange) ;

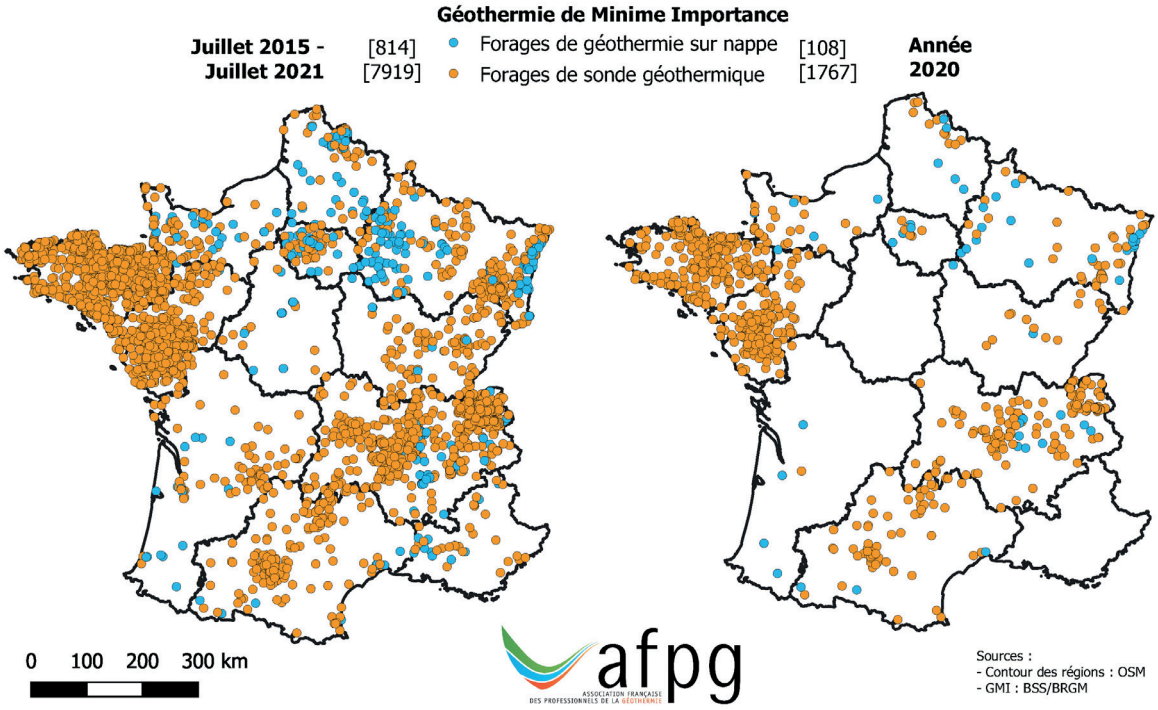
Concernant la cartographie, les maîtres d'ouvrage doivent vérifier que leur projet se trouve dans une zone adéquate en consultant la cartographie nationale ou la cartographie régionale plus précise, quand celle-ci a été établie à l'échelle régionale.

Ces cartographies présentent 3 zones :

- des zones ne présentant pas de risques, dites « vertes » ;
- des zones « oranges » dans lesquelles, en l'absence de connaissances suffisantes ou compte tenu des risques déjà identifiés, il doit être joint à la déclaration l'attestation d'un expert hydrogéologue agréé. Dans l'immense majorité des cas, les projets en zone orange aboutissent.
- des zones à risque significatif, dites zones « rouges » où le projet ne pourra être réalisé qu'après autorisation de l'installation au titre du Code minier.

Des études sont actuellement en cours à l'échelle régionale pour mettre à jour cette carte. Certaines régions sont déjà disponibles (IDF, Centre) ; d'autres le seront d'ici à 2024.

Cette carte de France présente les forages géothermiques déclarés en GMI en 2020, d'après les informations fournies par le BRGM qui gère la collecte de ces données. Il est à noter que ces forages ne représentent pas l'intégralité des forages réalisés en 2020, mais seulement ceux rentrant dans le cadre de la GMI.



Position et répartition régionale des forages GMI en France en 2020 (AFPG d'après BRGM)

Aujourd'hui, les concertations entre les pouvoirs publics et les professionnels de la géothermie se poursuivent pour adapter le décret GMI en fonction des évolutions techniques et environnementales.

Les qualifications des professionnels

L'objectif de la mention RGE (Reconnu Garant de l'Environnement) est de permettre aux maîtres d'ouvrage d'identifier plus facilement les professionnels ayant démontré leur compétence en matière de travaux d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, à travers notamment l'installation d'énergies renouvelables.

Il existe deux catégories de mentions RGE : RGE Travaux et RGE Études.

La mention RGE Travaux s'adresse aux entreprises réalisant des travaux d'amélioration de la performance énergétique chez les particuliers. Concernant la géothermie, il existe plusieurs certifications RGE, correspondant aux différentes étapes d'un projet :

- Forage : qualification RGE Qualiforage délivrée par Qualit'ENR. Elle certifie la compétence d'une entreprise de forage à travers deux modules : un pour les forages sur sondes et un pour les forages sur nappes.
- Pompe à chaleur : plusieurs qualifications, délivrées par Qualibat, Qualit'ENR et Qualifelec.

La mention RGE Études concerne les prestations d'études ou de maîtrise d'œuvre réalisées pour des bâtiments ou installations d'énergies renouvelables de taille conséquente. Concernant la géothermie, des qualifications sont délivrées par l'OPQIBI et I.Cert.

Le CEE : Dispositif des Certificats d'économies d'énergie

Ce dispositif repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie en CEE (1 CEE = 1 kWh cumac d'énergie finale) imposée par les pouvoirs publics aux fournisseurs d'énergie. Ceux-ci sont ainsi incités à promouvoir activement l'efficacité énergétique auprès des consommateurs d'énergie : ménages, collectivités territoriales ou professionnels. En cas de non-respect de leurs obligations, les fournisseurs d'énergie sont tenus de verser une pénalité libératoire pour chaque kWhc manquant.

Ce dispositif favorise donc, entre autres, le développement de la géothermie.

Aides au particulier

De nombreux dispositifs d'aides visent à encourager le particulier à améliorer les performances énergétiques de son logement :

- **MaPrimeRénov** est une aide à la rénovation énergétique. Son montant est calculé en fonction des revenus et du gain écologique des travaux ;
- **Le Coup de pouce chauffage** facilite le remplacement d'une ancienne chaudière (charbon, fioul, gaz hors condensation) par une PAC eau/eau ;
- **L'éco-prêt à taux zéro** permet de financer des travaux lourds de rénovation énergétique en résidence principale ;
- **L'accompagnement Habiter Mieux**, pour conseiller et participer financièrement aux travaux améliorant les performances énergétiques d'un logement.

Bilan et perspectives

Méthodologie de calcul

Cette partie résume la méthodologie qui a été redéfinie avec l'aide de nos partenaires (ADEME, BRGM, Observ'ER, SDES, SER, UNICLIMA). Elle s'adresse à ceux qui souhaiteraient connaître la méthodologie de calcul employée, ayant permis d'aboutir aux conclusions présentées ci-dessous.

Secteur individuel :

On estime à 195 000 le nombre de PAC géothermiques individuelles en fonctionnement.

Ce chiffre résulte de la somme des ventes enregistrées par Observ'ER entre 2005 et 2020.

A cela ont été rajoutées les ventes de 2003 et 2004 à partir des données de l'AFPAC (majorées de 20 %, ce qui correspond à l'écart type Observ'ER/AFPAC des autres années : Observ'ER recense une plus grande part du marché. Leur méthodologie est détaillée dans leurs études).

Au total, on somme sur les 20 dernières années pour corréler à un taux de renouvellement des PAC de 20 ans. Ce taux de renouvellement sera probablement revu à la hausse afin de corréler avec la réalité (à noter que la réglementation européenne fixe un taux de renouvellement de 17 ans, jugé trop faible pour la géothermie).

On estime par ailleurs à 12 kW la puissance moyenne des PAC individuelles (contre 15 kW de puissance réglementaire). Ce chiffre résulte de la moyenne des puissances observées sur les ventes des dernières années. Il est en cohérence avec les données de la BSS et et fait consensus au sein des partenaires de la filière.

Secteur tertiaire :

On estime à 9 200 le nombre de PAC géothermiques en fonctionnement dans le secteur tertiaire.

En raison de l'absence d'étude régulière portant sur le nombre de ventes annuelles dans ce secteur, ce chiffre est une estimation basée sur une méthode employée par le SDES (Service de la donnée et des études statistiques).

Cette méthode repose sur la considération de la surface tertiaire alimentée par des PAC géothermiques :

En 2019, on estime à 57,5 millions de m^2 cette surface (données SDES). On estime que 10% de ce parc est couvert par des PAC géothermiques (Etude CEREN 2011). En appliquant une puissance moyenne de 80W/m et de 55kW/PAC (estimation BSS), on estime à 8 360 le nombre de PAC géothermiques en fonctionnement dans le secteur tertiaire.

En ajoutant les ventes de 2020 (estimation basée sur les ventes de 2018), on aboutit à environ 9 200 PAC géothermiques en fonctionnement dans le secteur tertiaire.

Secteur résidentiel collectif :

En considérant que le secteur résidentiel représente en moyenne 20 % du mix des ventes résidentiel/tertiaire, on estime à 2 300 le nombre de PAC géothermiques dans ce secteur.

Production d'énergie :

Pour évaluer la production d'énergie à partir de la puissance installée, on considère 2 070 h de fonctionnement à puissance nominale (réglementation européenne).

Ce temps de fonctionnement réglementaire est certainement surévalué. Des études ultérieures pourront permettre de réviser ce temps réglementaire.

La réglementation européenne fixe également un coefficient de performance de 3,5. Ce coefficient de performance a été réhaussé à 4 pour être plus représentatif des performances réelles des PAC géothermiques.

On applique ensuite directement la formule :

$$Energie_{Produite} = \left(\sum_{i} N_{PACi} * P_i * T_i\right) * \left(\frac{SCOP - 1}{SCOP}\right)$$

Avec : $i \in$ {Individuel, Collectif, Tertiaire}
N_{PACi} : Le nombre de PAC du secteur i
P_i : La Puissance moyenne de la PAC du secteur i
T_i : Le Temps de fonctionnement moyen de la PAC du secteur i
$SCOP$: Le coefficient de performance saisonnier

Avec :

Secteur	Nombre de PAC	Temps de fonctionnement (h)	SCOP	Puissance moyenne (kW)
Individuel	195 000	2 070	4	12
Tertiaire	9 200	2 070	4	55
Résidentiel Collectif	2 300	2 070	4	100

Paramètres méthodologiques

Voies d'affinement de la méthodologie :

Pour affiner la méthodologie retenue, des études complémentaires peuvent être menées sur différents axes de recherche :

- **Une évaluation détaillée de la production de froid renouvelable :**

  Une grande valeur ajoutée de la géothermie de surface par rapport à d'autres solutions énergétiques est sa capacité à mobiliser du froid.

  Si aujourd'hui cette production de froid est considérée négligeable chez le particulier et le collectif, elle a été prise en compte dans les 2 070 h de fonctionnement du secteur tertiaire.

  A nouveau, une étude approfondie pourra être menée pour une meilleure considération de ce froid renouvelable (hypothèses de fonctionnement, SCOP différée, géocooling, etc.).

- **Une correction du taux de renouvellement des PAC géothermiques individuelles :**

  Si les ventes de PAC géothermiques individuelles ne remontent pas, la prise en compte d'un taux de renouvellement de 20 ans conduirait à un effondrement du parc dans les prochaines années (en effet, on commence à soustraire les pics de vente des années 2002 à 2012 ; là où, en parallèle, les ventes annuelles en individuel se stabilisent à 3 000).

  Concrètement, considérer un parc de PAC individuelles décroissant signifie qu'il y a davantage de particuliers décidant de remplacer leur installation géothermique par une nouvelle solution énergétique que de nouvelles installations.

  Si ce genre de cas peut exister, il faut en évaluer la proportion réelle.

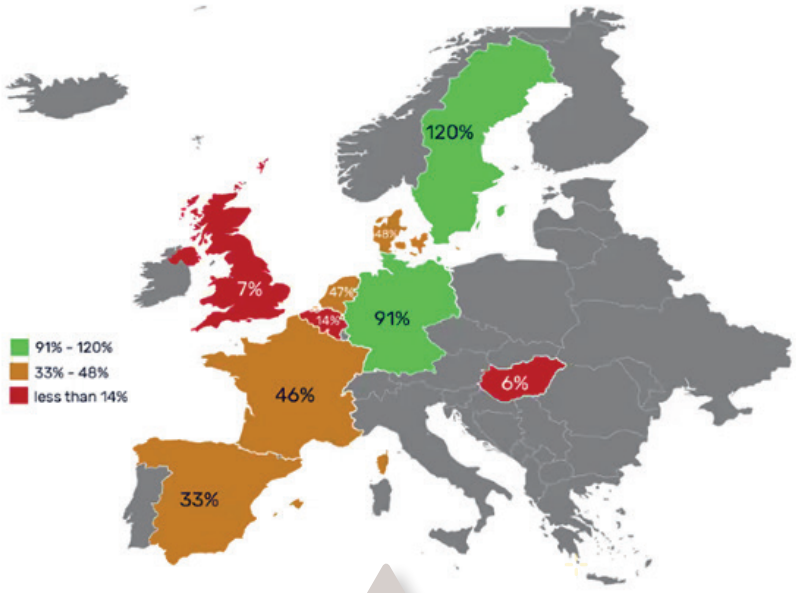
- **La réalisation d'études de marché des PAC géothermiques dans le secteur résidentiel et tertiaire :**

  L'absence d'étude régulière portant sur le marché des PAC géothermiques dans le secteur résidentiel et tertiaire génère des incertitudes importantes.

  Il serait préférable de pouvoir mesurer ce marché chaque année pour pouvoir évaluer précisément le nombre d'installations actuellement en fonctionnement.

Présentation des résultats

L'AFPG estime à environ 205 000 le nombre de PAC géothermiques installées en France en 2020.



Atteinte des objectifs de la PPE en géothermie de surface (AFPG d'après les objectifs fixés par le Ministère de la Transition écologique)

En raison de la forte décroissance qu'a connu le marché de la PAC géothermique en France depuis 2010, la France n'est pas parvenue à atteindre ses objectifs pour 2020.

En se référant à la méthodologie de calcul évoquée en début de partie, on peut estimer la quantité d'énergie géothermique mobilisée annuellement, côté sous-sol.

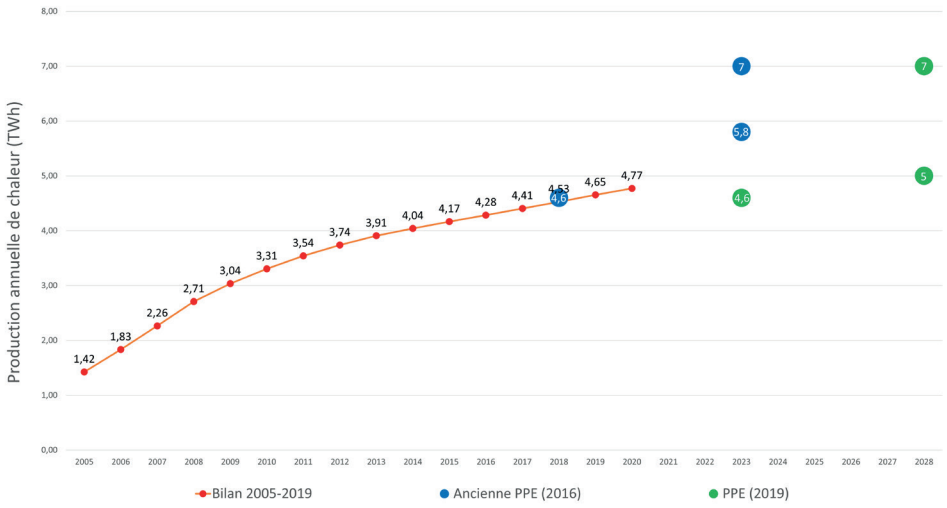
Secteur	Nombre de PAC	Puissance calorifique installée (MW)	Production d'EnR en 2020 (TWh/an)
Individuel	195 000	2 340	3,63
Tertiaire	9 200	230	0,36
Résidentiel Collectif	2 300	506	0,78
Total	206 500	3 076	4,77

Bilan de la filière géothermie de surface

Cette valeur est à comparer aux objectifs fixés par le Ministère de la Transition écologique. Ces objectifs sont énoncés dans la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), élaborée en 2015 dans le cadre de la loi de transition énergétique pour la croissance verte révisée en 2019.

La PPE fixe le cap en termes de politique énergétique à moyen et long termes, en établissant notamment des objectifs chiffrés de production d'énergie pour les différentes filières, selon 2 scénarios (objectifs « haut » et « bas »).

Il est à noter que les objectifs fixés pour 2023 par la PPE 2016 ont été revus à la baisse en 2019. Cette correction de l'objectif résultait d'une précédente sous-évaluation de l'énergie géothermique mobilisée, depuis revue à la hausse avec la prise en considération du mix résidentiel-tertiaire dans la nouvelle méthodologie.



Energie géothermique mobilisée annuellement, côté sous-sol (TWh)

Après d'importants progrès dans les années 2000, l'effondrement des ventes de PAC individuelles a conduit à un ralentissement de la croissance qui n'est désormais portée que par le secteur du tertiaire et du résidentiel collectif.

Si la dynamique actuelle s'inscrit dans le respect des objectifs fixés par l'ancienne PPE 2016, il est nécessaire de relancer la croissance si l'on veut espérer atteindre les nouveaux objectifs hauts fixés pour 2028.

Pour soutenir le déploiement de la géothermie de surface, différents axes de développement sont préconisés :

· Développer l'animation en région

Dans l'optique d'une structuration toujours plus grande de la filière géothermique, la présence d'animateurs de proximité est un enjeu primordial. Ces animateurs jouent en effet un rôle de relais d'informations auprès de différents publics dans les territoires.

Les régions dans lesquelles des animateurs dédiés à la promotion de la géothermie sont en place présentent une dynamique plus marquée de développement de la filière. Actuellement, seules 4 régions disposent de cet appui : Centre-Val-de-Loire, Hauts-de-France, Grand-Est (depuis 2019) et l'île de France (depuis 2021). Le déploiement d'animateurs régionaux sur l'ensemble du territoire apparaît ainsi comme une priorité.

· Ajuster les aides apportées à la production de chaleur

Le déploiement des nouveaux échangeurs compacts à grande échelle pourraient donner un nouveau souffle à la filière. Pour en faciliter la démocratisation, des discussions sont actuellement en cours avec l'ADEME pour rendre ces nouveaux systèmes éligibles au Fonds Chaleur.

· Préserver le cadre de la GMI

Les mises à jour de la carte réglementaire de la GMI aux échelles régionales inquiètent de nombreux professionnels : ce qui devait être une nouvelle simplification des démarches administratives est, dans certaines régions, perçue comme comme un nouveau frein au développement de la filière.

En effet, les critères de classification retenus ne sont pas homogènes et se superposent parfois à d'autres (mauvaise prise en compte de la qualification des foreurs, multiplication des aléas, etc.). Concrètement, la multiplication des zones rouges serait un réel frein au développement de la géothermie de surface.

L'AFPG participe actuellement aux COPIL régionaux d'élaboration de ces premières cartographies, pour garantir la pérennité du développement de la géothermie de surface tout en garantissant la maîtrise du risque environnemental.

· S'appuyer sur la nouvelle réglementation énergétique RE 2020

Le passage de la RT 2012 à la RE 2020 a renforcé les exigences en termes de performances énergétiques et d'impact environnemental pour les constructions neuves. Cette nouvelle réglementation doit permettre l'émergence de bâtiments dits à énergie positive (BEPOS), c'est-à-dire produisant plus d'énergie qu'ils n'en consomment.

Les professionnels de la géothermie ont activement contribué à l'élaboration de cette réglementation, afin qu'elle prenne mieux en compte l'apport de la géothermie de surface, qui constitue une source d'énergie primordiale dans cet objectif de décarbonation de la production d'énergie dans le secteur du bâtiment.

Géothermie profonde

Production de chaleur



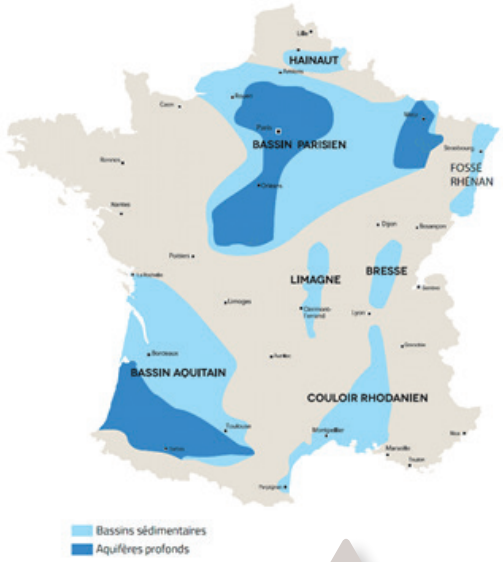
Principes et usages

Les installations de géothermie profonde exploitent de l'eau géothermale à une température généralement comprise entre 30 et 90°C, se trouvant le plus souvent entre 400 et 2000 m de profondeur, où il peut y avoir présence de nappes d'eau souterraines (aussi appelées réservoirs aquifères).

Cette eau, quand elle est présente en quantité suffisante, peut alors être exploitée comme énergie géothermique. Elle est contenue dans des roches sédimentaires poreuses et/ou fracturées (sables, grès, calcaires, craie). Ces roches se trouvent dans des bassins sédimentaires qui peuvent présenter une extension régionale importante.

La France possède deux principaux bassins sédimentaires (le Bassin parisien et le Bassin aquitain) et cinq plus restreints qui contiennent de nombreuses nappes d'eau souterraines, empilées les unes sur les autres et séparées par des roches imperméables.

Au total, près d'un tiers du territoire français possède une ressource de géothermie profonde valorisable.



Cartographie des bassins sédimentaires français (BRGM)

Dans la plupart des cas, l'exploitation de ces eaux souterraines chaudes se fait, comme pour les nappes de surface, par l'intermédiaire d'un puits producteur et d'un puits injecteur.

En profondeur, les deux puits sont espacés de plus de 1 000 m afin d'éviter que l'eau refroidie en surface et réinjectée dans le puits injecteur ne refroidisse l'eau pompée dans le puits producteur (phénomène de « bulle froide »).

Cette énergie peut ensuite être valorisée de différentes manières :

- Par un réseau de chaleur urbain (incluant des écoles, des hôpitaux, des théâtres, etc.),
- Par d'autres applications :
  - industrielles (procédés utilisant la vapeur, l'air chaud ou l'eau chaude) ;
  - agricoles (chauffage de serres, pisciculture, séchage, …) ;
  - aqualudiques (piscines, centres nautiques, thermes…).

Moyennant un entretien régulier des puits et des équipements, la durée de vie d'une telle installation est de 30 ans. Un rechemisage (installation d'un nouveau tubage à l'intérieur du tubage existant) permet ensuite de prolonger cette durée de vie de 20 ans. A l'issue de cette période, les puits sont rebouchés et, si la ressource de chaleur est toujours exploitable, de nouveaux puits peuvent être forés.

Selon l'étude ADEME 2020 des coûts de la chaleur renouvelable en France, la géothermie profonde présente des coûts de production très compétitifs. Il s'agit même de la chaleur renouvelable jugée la moins chère (15-55€/MWh) en sortie de centrale de production, à l'exception de la chaleur fatale issue des usines d'incinération de déchets.

Pour un nouveau projet, le prix médian s'établie autour de 38 €/MWh en sortie de centrale de production.

Comment fonctionne un réseau de chaleur ?

Afin de distribuer efficacement l'énergie tirée du sous-sol, il est nécessaire d'avoir un nombre de consommateurs important. C'est le rôle du réseau de chaleur qui permet de fournir de la chaleur aux différents clients raccordés (immeubles, bureaux, commerces, …).

Cette chaleur est transportée sous forme d'eau chaude (température comprise entre 60°C et 110°C), voire d'eau surchauffée (entre 110°C et 180°C, principalement pour des applications industrielles), ou plus rarement de vapeur (réseau de la CPCU à Paris). Il est à noter que la tendance actuelle vise à distribuer l'eau à la température la plus basse possible, en adéquation avec les émetteurs basse température, notamment pour les bâtiments labélisés BBCA (Bâtiments Bas Carbone) et HQE (Haute Qualité Environnementale).

La chaleur est produite au niveau d'une centrale qui alimente le circuit secondaire de distribution. Un système d'échangeurs permet de séparer le circuit primaire d'eau géothermale qui circule entre les deux puits du circuit secondaire de distribution (eau du réseau). Des sous-stations composées d'échangeurs de chaleur assurent l'interface entre le circuit secondaire et les circuits d'alimentation d'un ensemble de bâtiments.

Si l'eau géothermale n'est pas suffisamment chaude pour un usage direct, c'est-à-dire par simple échange de chaleur, il est possible d'utiliser une pompe à chaleur raccordée sur l'échangeur géothermal afin de rehausser cette température et de diminuer celle de l'eau réinjectée, augmentant la quantité d'énergie géothermique prélevée.

Ces pompes à chaleur ont des puissances comprises entre 500 kW et 12 MW. Elles sont adaptées à la plage de température correspondant à l'eau géothermale (30°C à 90°C) et aux régimes de températures du chauffage urbain auquel elles sont raccordées.

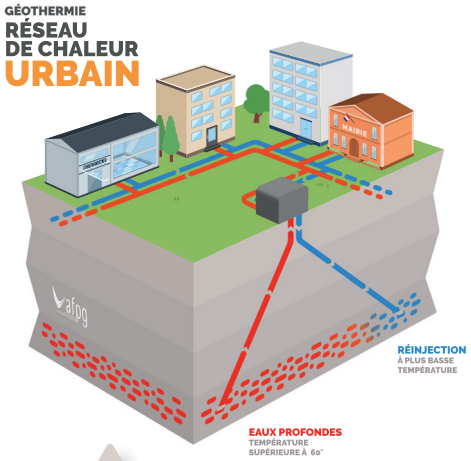


Schéma de principe d'un réseau de chaleur

Exemple : la centrale géothermique de Bagneux

La centrale géothermique de Bagneux alimente depuis 2016 un réseau de chaleur de 12 km, desservant 10 000 équivalents-logements. Elle permet de répondre à 60 % des besoins du réseau, couvrant différents types d'infrastructures (logements, écoles, piscines, théâtres, etc.).

L'eau géothermale, avoisinant les 65°C, est captée à près de 1 600 mètres de profondeur, dans l'aquifère du Dogger.

L'été, un simple échangeur permet de répondre à 100 % des besoins d'eau chaude sanitaire (ECS) du réseau.



Inauguration de la centrale géothermique de Bagneux le 11 octobre 2016 (DALKIA)

L'hiver, deux pompes à chaleur sont mises en fonctionnement. Elles réhaussent la température du circuit secondaire à 75°C pour pouvoir répondre au dimensionnement des émetteurs.

Innovations en géothermie profonde

Les technologies permettant la production de chaleur par géothermie profonde présentent une maturité certaine, portée par des acteurs à la compétence reconnue. Ce cadre stable permet à des innovations d'émerger, afin d'exploiter au mieux les ressources du sous-sol.

La chaleur en milieu continental fracturé : la centrale ECOGI de Rittershoffen

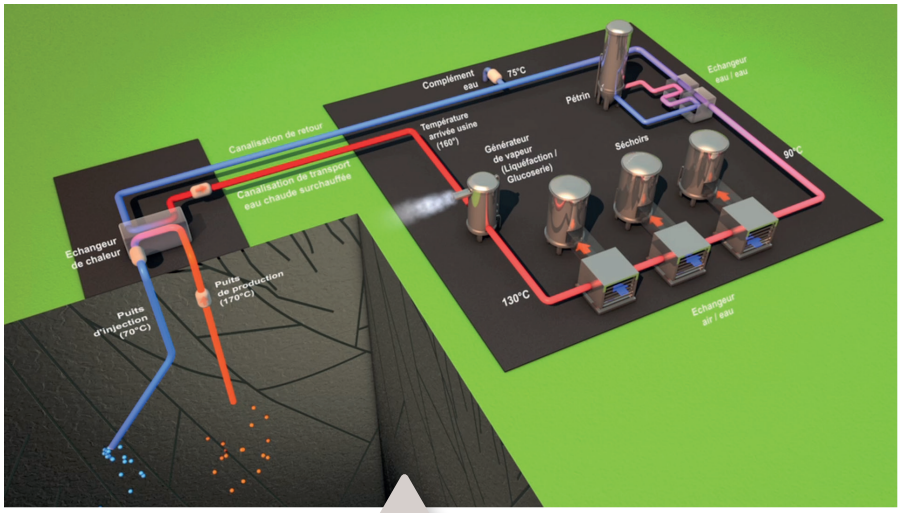


Schéma de fonctionnement de la centrale ECOGI (ÉS Géothermie, 2015)

La réalisation de la centrale alsacienne a ouvert la voie à l'exploitation de nouveaux réservoirs dans des zones continentales naturellement fracturées appelées graben ou fossé d'effondrement.

Inaugurée en juin 2016 à Rittershoffen en Alsace, la centrale ECOGI est la première centrale de géothermie profonde à vocation industrielle au monde dans ce type de sous-sol. La technologie déployée s'est beaucoup appuyée sur le savoir-faire pétrolier, notamment pour le nettoyage du fond de puits. Cette technique dite de stimulation s'appuie sur des traitements chimiques doux mis en œuvre pour nettoyer les dépôts minéraux pouvant obstruer la connexion du puits dans un réservoir d'eau chaude naturellement fracturé.

Forte des résultats de ses recherches effectuées sur le site voisin de Soultz-sous-Forêts, la société ÉS-Géothermie a développé cette technologie permettant de couvrir 25 % des besoins en chaleur (24 MW) de la bio-raffinerie « Roquette Frères », située à Benheim, à 15 km du forage.

Cette centrale permet d'économiser environ 46 000 tonnes de CO_2 chaque année (par rapport à l'ancienne solution de chaudière au gaz naturel), ce qui équivaut aux émissions annuelles de 31 000 voitures.

Le forage sub-horizontal : Cachan

Réalisé en 2017 par Dalkia et Geofluid, le forage du doublet de Cachan 3 est le premier forage sub-horizontal géothermique du monde.

Ce chantier inédit met à l'œuvre une technique permettant d'augmenter la production d'un doublet géothermique jusqu'à 450 m³/h, ce qui représente une progression d'environ 50 % par rapport aux derniers doublets réalisés en gros diamètre. Cela a été rendu possible grâce à une architecture innovante des puits : ils ont en effet été forés avec une déviation de près de 90°, au lieu des 40° traditionnels, améliorant les surfaces de drainage dans l'aquifère traversé et augmentant ainsi le potentiel de chaleur valorisable.

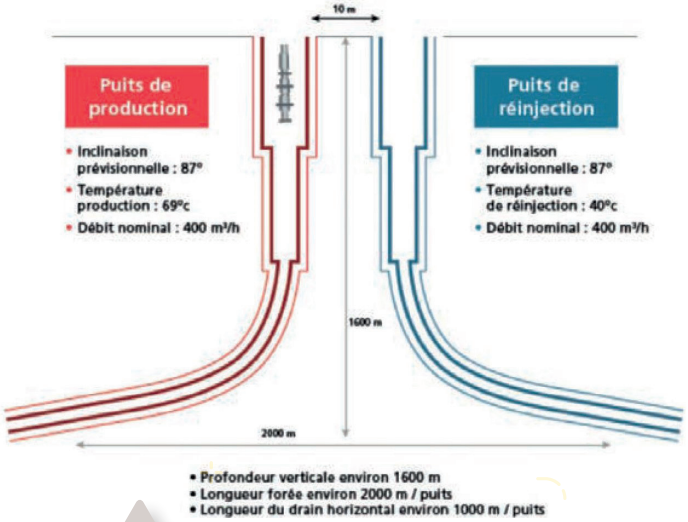


Schéma de principe du forage sub-horizontal de Cachan (Dalkia)

Le forage multi-drains : Vélizy-Villacoublay

La technologie multi-drains a été expérimentée pour la première fois en Octobre 2020 à Vélizy-Villacoublay par ENGIE sur le Dogger. Ces forages sont l'exemple d'une innovation technologique au service de la transition énergétique. Ils permettront au réseau de chaleur de la ville, Vélidis, d'apporter aux habitants chauffage et eau chaude avec 66 % d'énergie renouvelable. À terme, l'émission de plus de 22 000 tonnes de CO_2 sera évitée chaque année, ce qui équivaut aux émissions annuelles de 15 000 voitures.

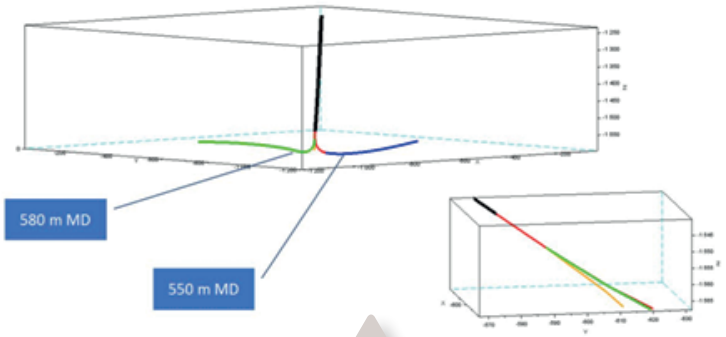


Schéma de l'innovation vélizienne deux drains appelée aussi la patte d'oie (ENGIE)

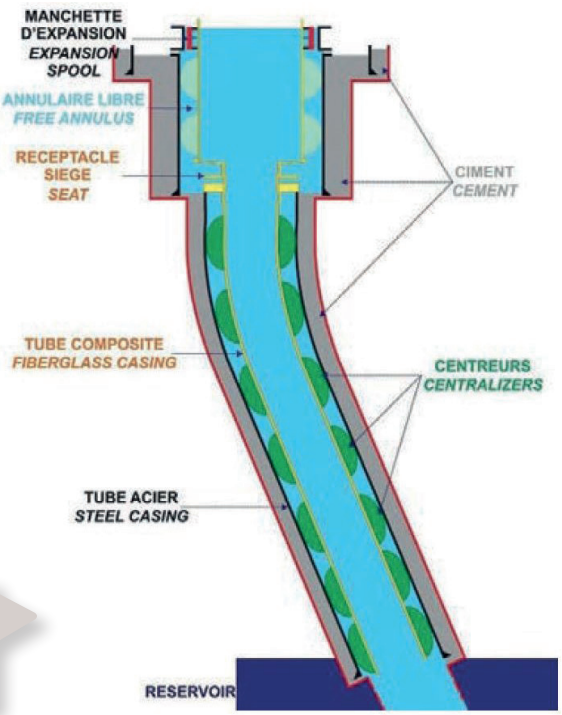
Composé de deux drains en U et d'une jambe de sédimentation, le puits de forage traverse cinq fois les niveaux producteurs et maximise ainsi le volume de réservoir drainé naturellement. Le débit atteint 400 m^3/h pour une puissance géothermique de 16 MW et 12 000 équivalents logements. Cela représente un gain de productivité de 80 % par rapport à un doublet standard, pour un surcoût de l'ordre de 20 %.

Cette première centrale de démonstration valide un nouveau potentiel de développement de plus de 200 MWth à l'Ouest de l'Ile-de-France où la transmissivité de l'aquifère est plus faible par rapport à la partie la plus profonde du bassin à l'Est.

Les matériaux composites

L'utilisation de matériaux composites pour le tubage des puits est une solution de plus en plus envisagée par les maîtres d'œuvre car ils offrent une protection contre la corrosion bien supérieure (contrairement à l'acier utilisé traditionnellement).

Des opérations menées à La Courneuve-Sud et à Melun l'Almont dans les années 90 ont permis de confirmer l'efficacité de cette technologie, qui a été employée récemment lors du rechemisage des doublets de Chevilly-Larue et L'Haÿ-les-Roses en 2015, et lors du forage du nouveau puits de Bonneuil-sur-Marne en 2018.



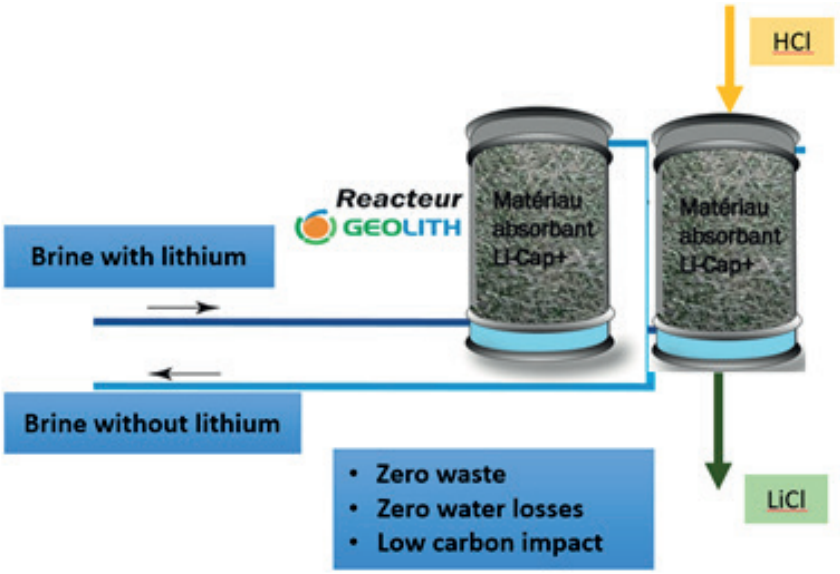
Principe de tubage composite installé à Bonneuil-sur-Marne (GPC IP)

L'extraction de lithium

Une des idées pour améliorer la rentabilité des puits en géothermie profonde est d'extraire des coproduits existant dans les eaux géothermales pompées, notamment le lithium qui est abondant dans les gîtes géothermiques profonds de la vallée rhénane.

Plusieurs sociétés françaises travaillent sur le concept : Eramet, Aidionics, Géolith et Lithium de France.

Fondée en 2016, Géolith cherche à développer un procédé industriel permettant de mener à bien cet objectif. Ils ont développé des « filtres » à lithium capable d'extraire le métal présent en faible quantité dans l'eau (quelques milligrammes par litre) avec un taux de capture supérieur à 95 %. Le métal sera ensuite raffiné avant de pouvoir être valorisé.



Présentation de Géolith

Ce procédé réversible ne rejette aucun déchet et ne génère pas de perte d'eau. Il a déjà fait ses preuves en laboratoire sous des conditions de température et de pression typiques d'une installation géothermale. Des prototypes ont été installés sur un site opérationnel au Royaume-Uni afin de valider l'étape préindustrielle.

Géolith estime pouvoir produire jusqu'à 100 tonnes de lithium à l'horizon 2025, une première étape vers l'indépendance européenne de la ressource.

Concrètement, sur une centrale en Alsace, la concentration en lithium de l'eau géothermale est de l'ordre de 150 ppm. Ainsi, équiper une installation fonctionnant à 300 m^3/h, pendant 8 000 h/an, avec un taux de capture de 80 %, permettrait d'extraire près de 300 tonnes de lithium par an, soit 1 500 tonnes de carbonate de lithium équivalent (LCE).

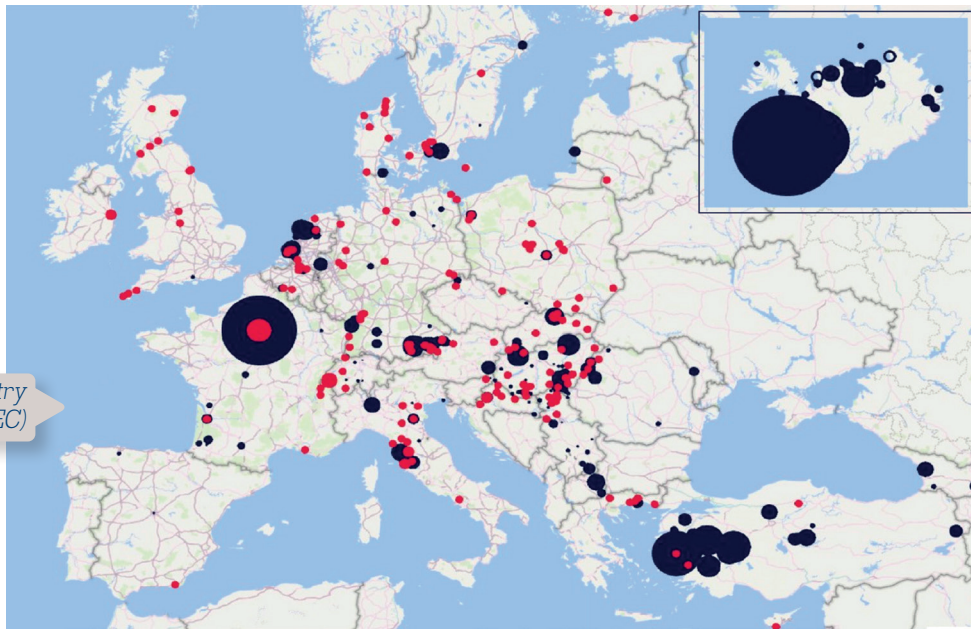
A titre de comparaison, il faut environ 15 kg de carbonate de lithium pour équiper une voiture électrique (batterie 24 kWh, 160 km d'autonomie). **Une installation équipée dans cette centrale pourrait donc suffire à extraire le lithium nécessaire à la production de 100 000 voitures électriques chaque année.**

Plus globalement, on estime qu'**une dizaine de centrales géothermiques équipées suffiraient à répondre à la demande française annuelle de lithium de 2017.**

État de la production française en 2020

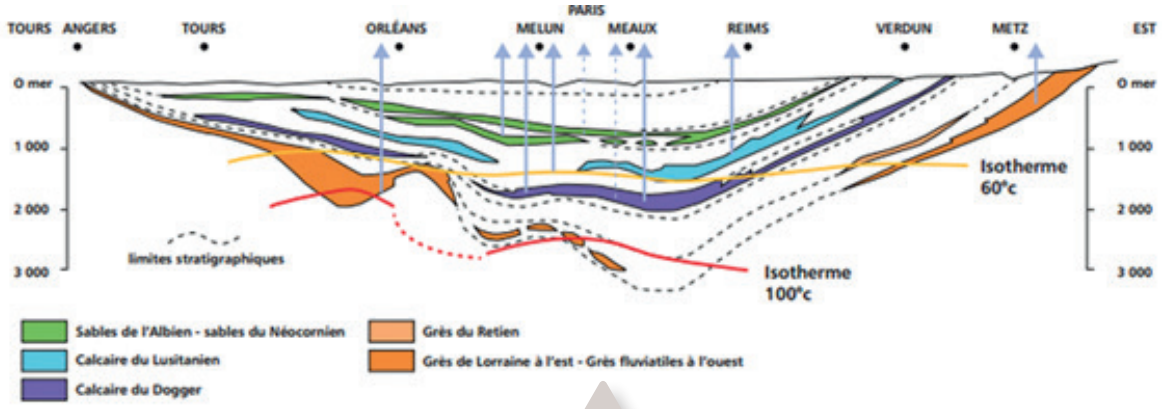
Le Bassin Parisien

L'Île-de-France est la région présentant la plus grande densité d'opérations de géothermie profonde au monde.



Geothermal Country Report 2020 (EGEC)

Le Bassin parisien compte six nappes d'eau pouvant être utilisées pour la géothermie, à savoir, par profondeur croissante : les sables de l'Albien et du Néocomien, les calcaires du Lusitanien, les calcaires du Dogger, les grès du Rhétien et les grès du Trias.



Coupe du Bassin Parisien (ADEME, BRGM)

En 1969, la réalisation du doublet de Melun a permis la première exploitation géothermique au Dogger pour un réseau de chaleur.

Cet aquifère comporte des caractéristiques particulièrement favorables, avec une température comprise entre 56°C et 85°C à l'aplomb de la région Ile-de-France, entre 1 600 et 2 300 m de profondeur et fournissant des débits importants.

Le Dogger parisien est aujourd'hui l'aquifère le plus exploité au monde, avec près de 49 installations de géothermie profonde en fonctionnement.

Près de la moitié ont été installées au début des années 1980, en réponse aux chocs pétroliers. Puis, après 20 ans d'arrêt du développement, les opérations de forage ont repris suite aux mesures du Grenelle de l'Environnement (2007), si bien que la capacité de puissance installée a doublé entre 2010 et 2020.

Des centrales exploitant les eaux de l'Albien (environ 650 m de profondeur) et du Néocomien (environ 850 à 1 000 m de profondeur) alimentent également des réseaux de chaleur. Elles sont systématiquement assistées par des PAC du fait des basses températures (entre 28°C et 38°C dans le centre du Bassin parisien).

Des études sont également menées pour valoriser la chaleur des eaux de l'aquifère du Trias, encore assez peu connu, car plus profond que le Dogger.

Au niveau du Bassin parisien, il existe également cinq installations hors Île-de-France : à Châteauroux, pour un réseau de chaleur urbain avec une eau géothermale à 34°C, et en Lorraine, pour quatre installations de chauffage, de thermes et de pisciculture avec des températures comprises entre 25°C et 45 °C.

Département	Nombre d'opérations	Production géothermique en 2020 (MWh/an)	Production totale en 2020 (MWh/an)	Part de la géothermie dans la production de chaleur	Equivalents-logements 100% EnR
Paris (75)	4	21 000	37 600	56%	2 100
Seine-et-Marne (77)	12	412 000	624 000	66%	41 200
Essonne (91)	4	156 000	206 000	76%	15 600
Hauts-de-Seine (92)	3	75 000	133 000	56%	7 500
Seine-Saint-Denis (93)	7	220 000	343 000	64%	22 000
Val-de-Marne (94)	19	1 129 000	1 782 000	63%	112 900
Val-d'Oise (95)	1	36 000	68 000	53%	3 600
Sous-total IDF	**50**	**2 049 000**	**3 193 600**	**64%**	**204 900**
Indre (36)	1	6 000	8 000	75%	600
Meurthe-et-Moselle (54)	2	7 100	7 100	100%	710
Moselle (57)	1	5 200	5 200	100%	520
Total Bassin parisien	**54**	**2 067 300**	**3 213 900**	**64%**	**206 730**

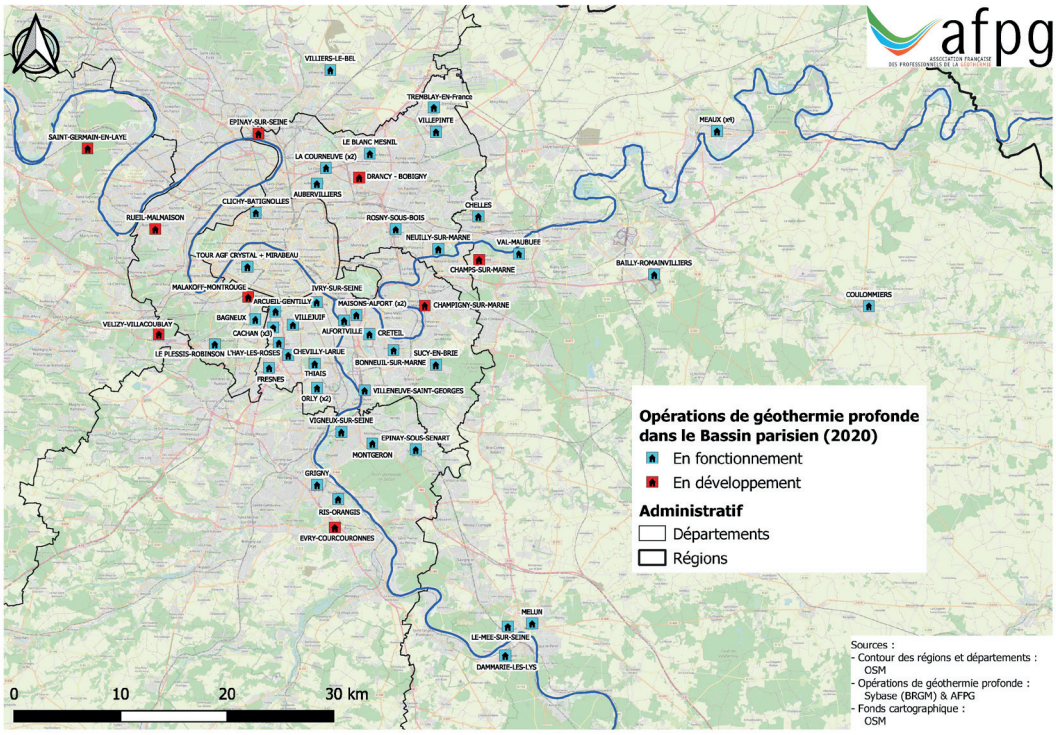
Bilan des installations de chaleur issues de la géothermie profonde dans le Bassin parisien (AFPG)

Au total, le Bassin parisien comporte 54 installations de géothermie profonde, couvrant plus de 200 000 équivalents logements en 100 % EnR. En 2023, cela devrait représenter près d'un million d'habitants chauffés par géothermie profonde.

De nombreux projets sont actuellement en cours de développement. Certaines centrales commenceront à produire dès la fin de l'année 2021.

Opérations prévues	Début d'exploitation	Puissance attendue (MW)	Production géothermique attendue (MWh/an)	Equivalents-logements 100% EnR
Champs-sur-Marne	2021	18	62 100	6 200
Velizy-Villacoublay	2021	18	62 100	6 200
Saclay Moulon	2022	3	10 350	1 050
Saclay Polytechnique	2022	3	10 350	1 050
Rueil-Malmaison	2022	14,5	50 025	5 000
Bobigny - Drancy (2 doublets)	2022	26	89 700	9 000
Saint-Germain-en-Laye	2022	2,5	8 625	900
Champigny-sur-Marne	2023	13,5	46 575	4 700
Malakoff - Montrouge	2023	23	79 350	8 000
Evry-Courcouronnes	2023	10	34 500	3 450
Epinay-sur-Seine - Villetaneuse	> 2023	13,5	46 575	4 650
Total prévisionnel Bassin parisien		**109**	**376 050**	**37 600**

Prochaines opérations prévues dans le Bassin parisien (AFPG)



Le Bassin Aquitain

Dans le Bassin aquitain, on dénombre une vingtaine d'installations datant, pour la grande majorité, des années 1980. Ces réseaux sont plutôt dédiés à la pisciculture, au chauffage de serres et aux thermes. Les températures varient entre 25°C et 73°C pour la ressource géothermale.

Certaines installations ont la particularité de bénéficier de la réhabilitation d'anciens forages pétroliers, reconvertis pour l'utilisation de l'eau géothermale. Cette pratique est extrêmement intéressante en termes d'investissement mais elle nécessite que les utilisateurs potentiels de la chaleur soient situés à faible distance des puits.

Le tableau et la carte ci-dessous comptabilisent l'ensemble des opérations du Bassin Aquitain.

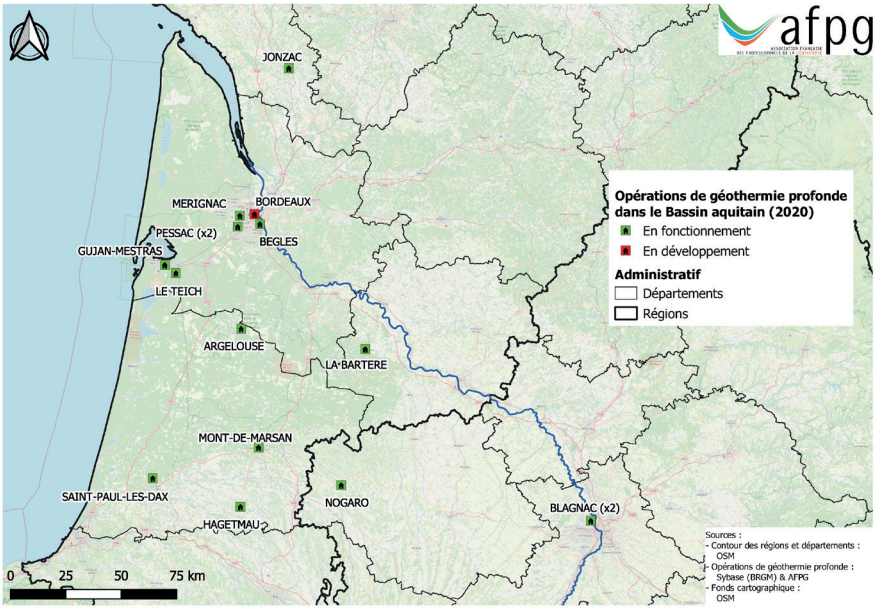
Département	Nombre d'opérations	Production géothermique en 2020 (MWh/an)	Equivalents-logements 100% EnR
Charente-Maritime (17)	2	14 500	1 450
Haute-Garonne (31)	2	16 500	1 650
Gers (32)	1	18 500	1 850
Gironde (33)	7	66 000	6 600
Landes (40)	4	47 000	4 700
Lot-et-Garonne (47)	1	N.C	N.C
Total Bassin aquitain	**17**	**162 500**	**16 250**

Bilan des installations de chaleur issue de la géothermie profonde dans le Bassin aquitain (AFPG)

Ainsi, l'équivalent de près de 65 000 habitants sont chauffés par géothermie profonde en Aquitaine.

Deux nouvelles installations sont prévues prochainement :

- Bordeaux PGE, démarrage attendu pour 2022, avec une puissance estimée à 6 MW ;
- Bordeaux Grand Parc, attendu pour 2023, avec une puissance estimée à 3,5 MW.



Les autres bassins exploités

Parmi les cinq autres bassins sédimentaires français, seuls trois sont actuellement exploités pour la géothermie profonde.

- Quatre sites sont en activité pour chauffer des serres, des piscines ou faire de la pisciculture dans le Couloir rhodanien (bassin du sud-est) (30°C < T° < 52°C).
- Un site est recensé pour chauffer des serres en Limagne (T° = 43°C).
- La centrale ECOGI dans le Fossé rhénan, évoquée précédemment, pour faire de la chaleur industrielle.

Département	Contexte géologique	Nombre d'opérations	Production géothermique en 2020 (MWh/an)	Equivalents-logements 100% EnR
Hérault (34)	Bassin du Sud-Est	4	35 000	3500
Puy-de-Dôme (63)	Limagne	1	11 500	1150
Bas-Rhin (67)	Fossé Rhénan	1	193 000	19300
Total		**6**	**239 500**	**23 950**

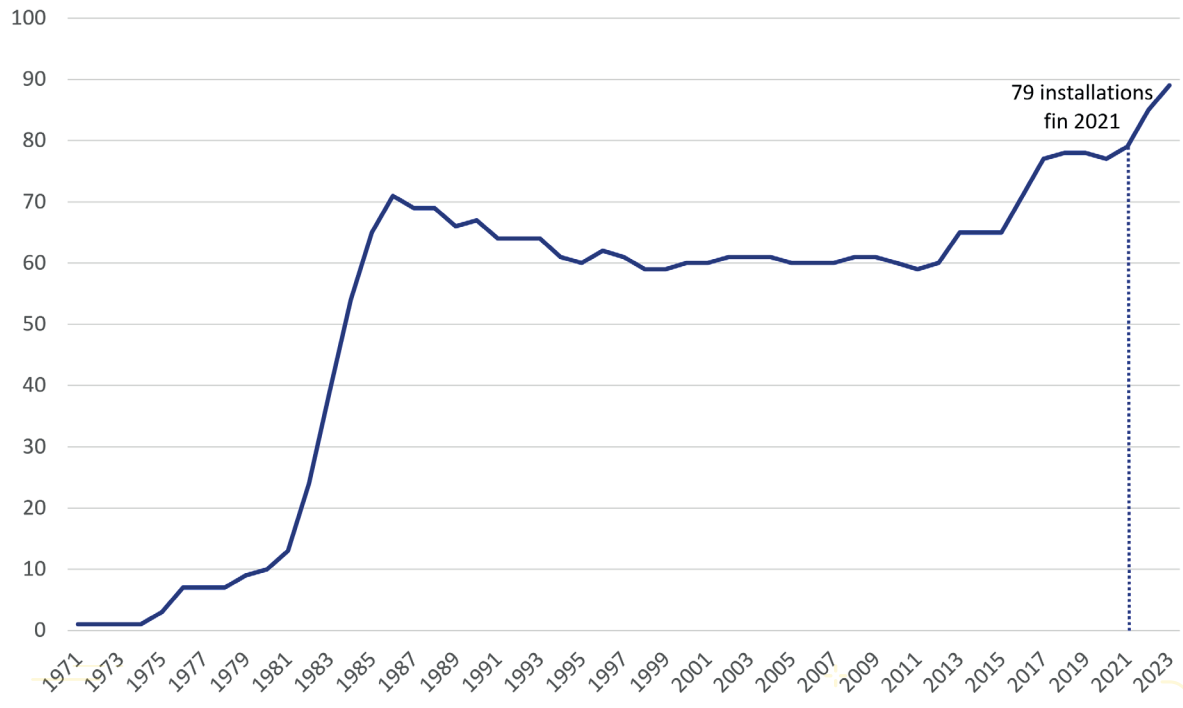
Bilan des installations de chaleur issue de la géothermie profonde, hors Bassins parisien et aquitain (AFPG)

Ainsi, l'équivalent de près de 100 000 habitants sont chauffés par géothermie profonde en dehors du Bassin parisien et du Bassin aquitain.

Bilan Global

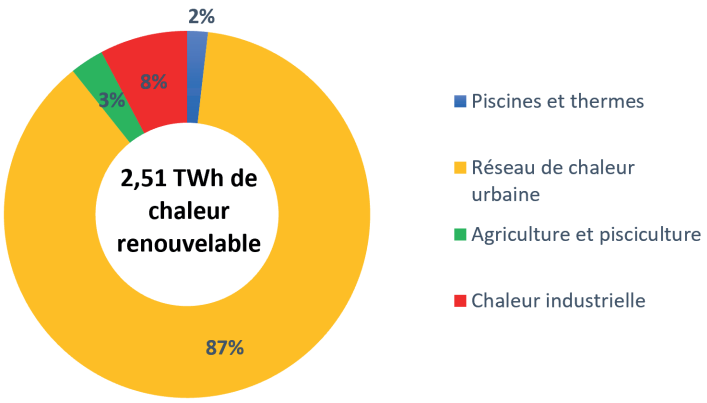
Depuis 2010, la France a doublé sa puissance installée en géothermie profonde. En 2020, cette puissance avoisine les 700 MWth avec près de 80 installations en fonctionnement. En 2023, ce nombre devrait passer à 90.

Déjà plus de 40 nouveaux projets ont été identifiés à l'horizon 2030.



Evolution du nombre d'installations en géothermie profonde

En 2020, ces installations ont généré près de 2,5 TWh de chaleur renouvelable. Le graphe ci-dessous en présente les principaux usages (à noter que les réseaux de chaleur peuvent également alimenter des piscines, des écoles, des hôpitaux, des théâtres).



Répartition des usages de la chaleur en géothermie profonde

Au total, la production de chaleur renouvelable par géothermie profonde en France s'élève à 247 000 équivalents-logements en 2020, soit l'équivalent de près d'un million d'habitants chauffés par géothermie profonde.

Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre

Dans le même manière que pour la géothermie de surface, de nombreux moyens sont mis en œuvre pour permettre à la géothermie profonde d'atteindre ses objectifs en termes de production de chaleur. Cette étude fait l'état des principaux, à savoir :

- Le Fonds Chaleur de l'ADEME,
- Le Fonds de garantie SAF-Environnement
- La TVA à taux réduit,
- La Loi Hulot,
- Les groupes de travail et de réflexion (CT-GAP, GT Réseaux de chaleur et de froid).

Le Fonds Chaleur

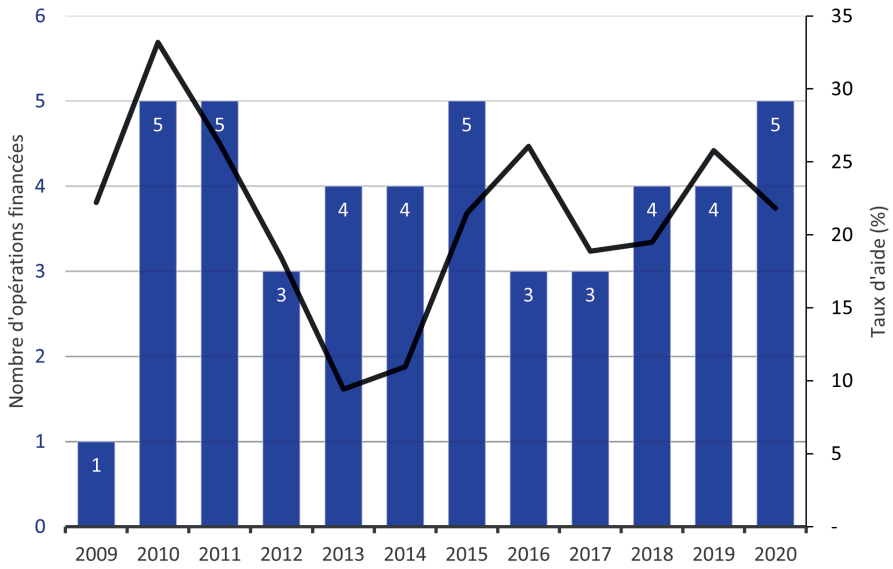
Comme pour la géothermie de surface, on retrouve le Fonds Chaleur. Dans le cas de la géothermie profonde, l'aide fournie par l'ADEME comporte :

- Une **aide à la chaleur renouvelable**, calculée par analyse du coût de revient et par comparaison avec une solution fossile de référence ;
- Une **aide au réseau**, pour les installations concernées.

Ces aides sont conditionnées par des critères de qualité et d'efficacité :

- respect de la réglementation thermique ;
- souscription au fonds de garantie SAF (couverture du risque géologique) ;
- bonnes performances énergétiques (COP et SCOP) ;
- taux d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) supérieur à 60 % pour les réseaux.

Entre 2009 et 2020, ce sont 46 installations de géothermie profonde qui ont bénéficié de l'aide du Fonds Chaleur, pour un montant d'aide total de près de 140 millions d'euros..



Opérations de géothermie profonde financées par le Fonds Chaleur (AFPG d'après les données du Fonds Chaleur)

Le Fonds SAF Environnement

Le Fonds SAF-Environnement est un fonds permettant d'anticiper des risques qui pourraient être rencontrés dans les projets de géothermie sur nappe profonde. Il présente une double garantie :

- à court terme, il couvre le risque d'absence ou d'insuffisance de la ressource en eau chaude visée,
- à long terme, il couvre le risque de perte de productivité de la ressource en eau, en cours d'exploitation.

Le fonds est principalement doté financièrement par l'ADEME et les cotisations des maîtres d'ouvrage.

Une extension de ce fonds de garantie est en cours de finalisation avec les ministères de l'Economie et des finances et de la Transition écologique. Elle prévoit d'étendre la garantie avec une couverture des investissements remboursés à hauteur de 90% en cas d'échec des forages profonds, et ceci sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Ce nouveau fonds va permettre de favoriser l'exploitation du potentiel des aquifères peu connus. Cette initiative s'inscrit dans l'actuel projet de la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie), qui prévoit en 2028 de multiplier la puissance géothermique installée par 2,5 par rapport à 2018

La TVA à taux réduit

Comme pour l'électricité et le gaz, la facture énergétique d'un réseau de chaleur se divise en 2 postes :

- **La part variable (R1) :** Ce terme couvre l'achat de combustible. Il résulte du produit de la consommation de l'abonné par le prix de la chaleur (€/MWh). Il est fonction de la consommation mais dépend également du prix des combustibles utilisés et du rendement du réseau. Habituellement soumis à une TVA classique (20 %), il bénéficie d'une **TVA réduite à 5,5 % pour tout réseau de chaleur alimenté à plus de 50 % par des énergies renouvelables et de récupération.**
- **La part fixe (R2) :** Ce terme couvre les investissements relatifs aux différentes infrastructures et à leur maintenance. La nature capitalistique d'un réseau de chaleur induit une part « abonnement » élevée par rapport aux autres solutions de chauffage : il peut parfois atteindre 70 % du prix de la chaleur. L'abonnement (R2) est soumis à une TVA réduite (5,5 %).

La loi Hulot

Adoptée en décembre 2017, cette loi signe la fin de production des hydrocarbures en France pour 2040. Elle impose également aux exploitants de réaliser, avant 2035, un schéma de transition de leur exploitation vers une exploitation géothermique de leurs puits.

Le Cluster GEODEEP

Sous l'impulsion de l'ADEME, une étude de structuration de la filière géothermie profonde a été réalisée en 2013 et 2014. Suite à cette démarche, l'AFPG a créé en son sein un regroupement d'entreprises (cluster) dénommé GEODEEP ayant pour but de développer cette filière, particulièrement à l'export.

Ce sont donc une vingtaine d'industriels français qui se sont regroupés au sein du Cluster GEODEEP «**The French Geothermal Cluster for Heat and Power**» pour promouvoir la géothermie profonde, source de chaleur renouvelable pour les réseaux de chaleur et pour la production d'électricité. La filière haute énergie est en marche pour explorer de nouvelles pistes énergétiques pour la France et faire valoir son expertise à l'export face à la concurrence internationale. Cette stratégie repose notamment sur la création d'un fonds assurantiel qui permettra de garantir le risque géologique de projets de géothermie en zone volcanique dans les DROM et à l'export. Il est appelé Fonds de Garantie Géothermique français (FGGF)

Le CT-GAP

Le Comité Technique de la Géothermie sur Aquifères Profonds (CT-GAP) est un groupe de réflexion réunissant les différents acteurs de la chaîne de valeur de la filière de géothermie profonde (bureaux d'étude, exploitants, foreurs, organismes publics…).

Mis en place en 2014 à l'initiative de l'ADEME, du BRGM et de l'AFPG, ce comité est un outil précieux pour le développement de la filière, qui passe par des actions coordonnées et une bonne appréhension des enjeux actuels.

Le CT-GAP est structuré autour de deux thèmes prioritaires : le retour d'expérience des chantiers de forage et de réhabilitation et l'innovation et la prospection pour de nouvelles ressources géothermiques. C'est notamment grâce au travail de ce groupe qu'ont été rédigées des fiches de bonnes pratiques sur le forage, l'entretien et l'abandon des puits géothermiques.

Le GT Réseaux de chaleur et de froid

Groupe de travail interministériel mis en place en 2019, le Groupe de Travail sur les Réseaux de chaleur et de froid a pour objectif de trouver des solutions pour faire de la filière française des réseaux de chaleur une filière d'avenir.

L'AFPG a, avec les services décentralisés de l'Etat et l'ADEME, le pilotage de la mesure 22 dont le but est de développer la géothermie sur des réseaux existants. Il a notamment permis le ciblage de six régions (Auvergne-Rhône-Alpes, Centre-Val-de-Loire, Grand-Est, Hauts-de-France, Ile-de-France, Nouvelle-Aquitaine) pour lesquelles des réseaux sont géothermisables.

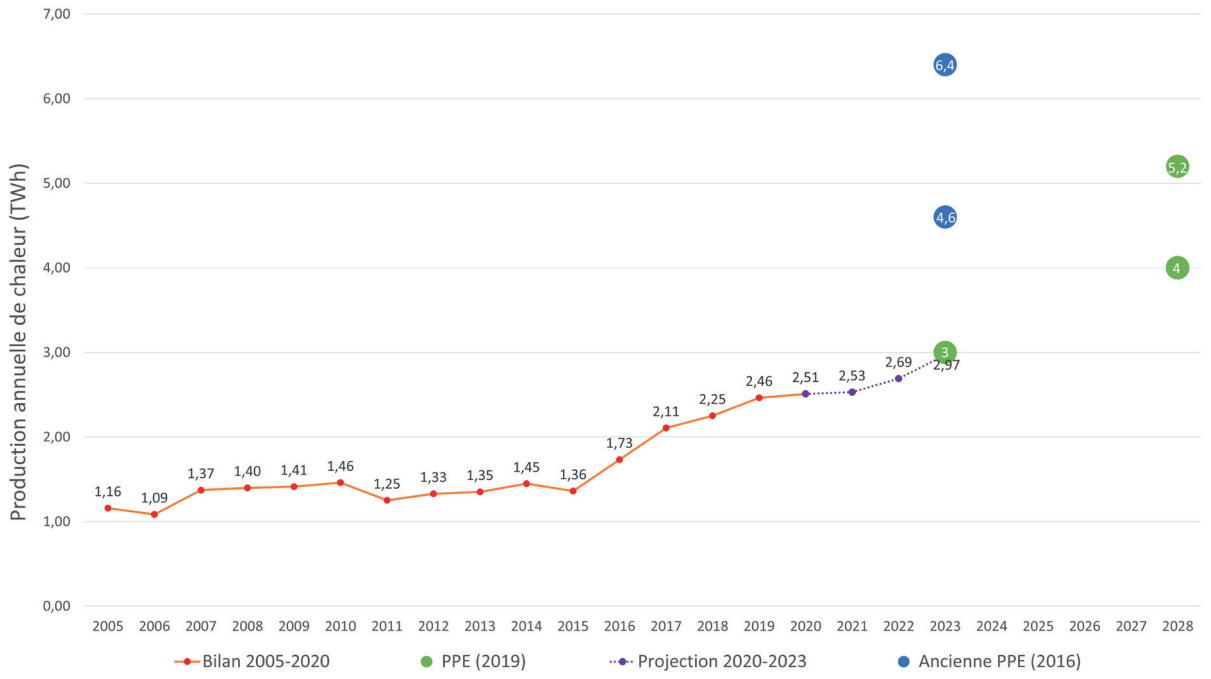
Des grandes métropoles ont été sensibilisées aux réseaux de chaleur et à leur verdissement ; un cahier des charges « type » sur l'exploration en géothermie est en cours de finition et des études sur le potentiel géothermique de ces zones sont en cours de réalisation. Certaines données sur le potentiel géothermique sont déjà publiées sur le site ***geothermies.fr.***

Bilan et perspectives

La production de chaleur renouvelable doit répondre aux objectifs fixés par le Ministère de la Transition écologique. Ces objectifs sont énoncés dans la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), dans le cadre de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte.

La PPE fixe le cap en termes de politique énergétique à moyen et long termes, en établissant notamment des objectifs chiffrés de production d'énergie pour les différentes filières, selon deux scénarios (objectifs « haut » et « bas »).

Il est à noter que les objectifs fixés pour 2023 par la PPE 2016 ont été revus à la baisse en 2019, si bien que ces objectifs tendent aujourd'hui à être respectés.



Energie géothermique mobilisée annuellement, côté sous-sol (TWh)

Si la crise sanitaire a pu retarder le début de l'exploitation de certaines installations, la production devrait s'accroître dans les prochaines années avec le démarrage de nouvelles centrales.

Méthodologie :

Aujourd'hui, la majorité des installations de géothermie profonde sont répertoriées sur Sybase, une base de données tenue par le BRGM. Cette base de données est amenée à évoluer régulièrement, et notamment en prenant en compte les opérations hors Dogger francilien. Le graphique ci-dessus pourra donc être corrigé en conséquence.

Pour atteindre ces objectifs, différents axes de développement sont préconisés :

· Poursuivre l'innovation dans la conception de nouveaux projets

De réels progrès sont en cours en géothermie profonde :

- Les forages multi-drains promettent une augmentation de la productivité de 80 % sur certaines aquifères, et donc un développement de la géothermie profonde dans de nouvelles zones ;
- Le déploiement des premiers systèmes à extraction de lithium par eau géothermale assure une rentabilisation des puits accrue et un regain de souveraineté énergétique ;
- Des méthodes d'exploration plus complètes sont développées pour mieux connaître les sous-sols encore peu exploités et mieux maîtriser les risques, notamment le risque de sismicité induite.

Il est essentiel de poursuivre ces voies de recherches pour libérer le potentiel géothermique français.

· Valoriser les aquifères profonds peu connus

Il existe à ce jour un énorme potentiel de chaleur géothermique encore sous-exploité – voire non exploité – dans certaines nappes du Bassin parisien (Albien, Néocomien, Trias), mais aussi au niveau de Bassin aquitain et dans des régions telles que le Grand Est, les Hauts-de-France ou la Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Les fonds de garantie couvrant les aléas géologiques jouent un rôle essentiel dans la valorisation de ces aquifères.

· Poursuivre les opérations de « verdissement » des réseaux de chaleur

La Loi de transition énergétique pour la croissance verte fixe des objectifs ambitieux en termes de production de chaleur issue d'EnR&R. Dans cette optique, le déploiement de nouveaux réseaux de chaleur verte doit s'accompagner d'un important travail de « verdissement » des réseaux existants.

En 2019, les réseaux de chaleur utilisent à 59,4 % des énergies entrantes d'origine renouvelable ou de récupération (source : Fedene & SCNU 2020). Cette part s'élevait à 31,0 % en 2009 et continue d'augmenter chaque année, ce qui est encourageant.

· Développer un outil incitatif de valorisation de la chaleur

La vente de chaleur renouvelable ne bénéficie pas des mêmes facilités commerciales que la vente d'électricité renouvelable. Aussi, sous l'impulsion de l'EGEC et de l'AFPG, la Commission européenne travaille sur une recommandation pour les états membres d'une mise en place d'un contrat de vente de chaleur renouvelable. Des travaux de mise au point de ce type de contrat seront certainement à l'étude de 2022 en France.

Géothermie profonde

Centrales électrogènes



Principes et usages

Les centrales dites « électrogènes » exploitent les ressources géothermiques profondes pour produire de l'électricité, éventuellement couplée à de la chaleur (on parle alors de cogénération ou de coproduction).

La production économiquement rentable d'électricité est possible à partir d'un fluide géothermal qui arrive en surface à une température minimale d'environ 120°C. Certains prototypes expérimentaux peuvent produire de l'électricité dès 80°C mais, à ces températures, le rendement complet de l'installation est trop bas pour permettre le déploiement de cette technologie à grande échelle.

Aujourd'hui, principalement deux types de réservoirs sont susceptibles d'accueillir des centrales géothermiques électrogènes :

- Les réservoirs situés en zone volcanique
- Les réservoirs fracturés situés au niveau des bassins d'effondrement

Les réservoirs situés en zone volcanique

Les premières centrales géothermiques électrogènes ont vu le jour dans des zones volcaniques où la température du sous-sol dépasse allégrement 200°C sans avoir à forer au-delà de quelques centaines de mètres de profondeur. C'est le cas de la Toscane en Italie, de l'Islande ou de la Guadeloupe avec la centrale de Bouillante par exemple.

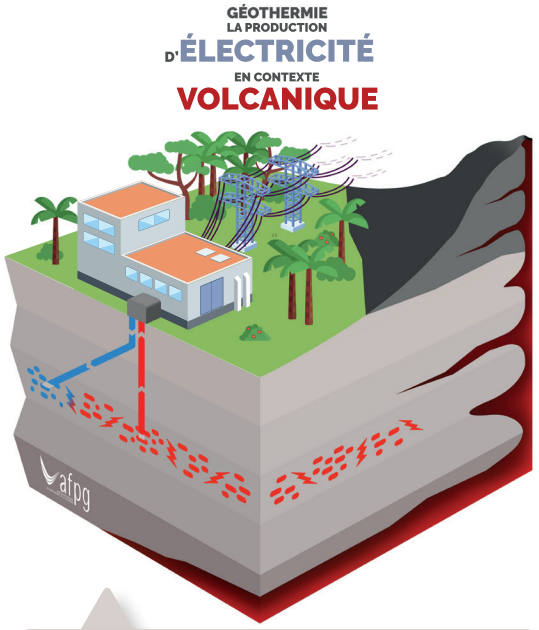


Schéma de principe d'une centrale électrogène en zone volcanique

Les réservoirs fracturés situés au niveau des bassins d'effondrement

Ces zones géologiques naturellement faillées, faiblement perméables et profondes de plusieurs milliers de mètres, contiennent parfois un fluide géothermal.

Le principe de l'EGS (Enhanced Geothermal System) permet d'améliorer la circulation du fluide dans ces réservoirs géothermiques particuliers.

La France fait figure de leader mondial dans ce domaine, avec la centrale de Soultz-sous-Forêts en Alsace, berceau de la recherche sur l'EGS qui, après avoir été opérée en tant que site pilote pendant plus de 20 ans, est entrée en phase d'exploitation industrielle en 2016 (1,7 MWe installé).

Cette technologie EGS ouvre des perspectives très intéressantes à des pays ou des régions ne disposant pas de contexte volcanique, leur donnant ainsi accès à une source d'énergie renouvelable, locale et disponible toute l'année sans interruption.

Néanmoins, ce procédé peine à se démocratiser. En effet, il est difficile d'estimer les risques liés aux forages dans de tels milieux géologiques. A titre d'exemple, la centrale géothermique de Vendenheim a été arrêtée sur décision préfectorale à la suite d'un tremblement de terre de magnitude 3,5 ressenti au nord de Strasbourg le 4 décembre 2020.

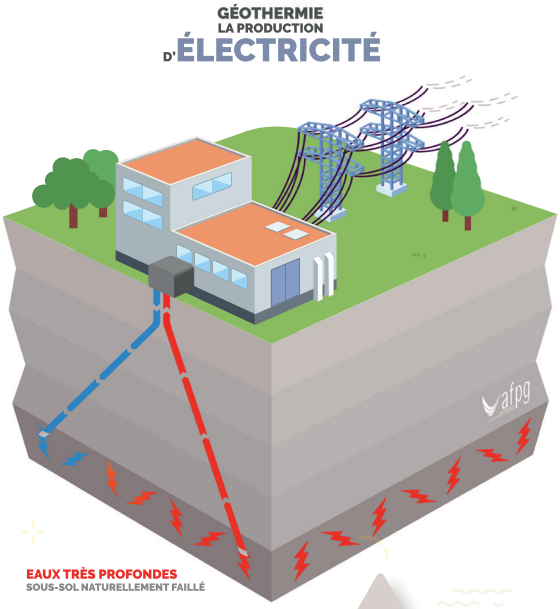


Schéma de principe d'une centrale électrogène en zone naturellement faillée

Les centrales géothermiques électrogènes en fonctionnement

En 2020, la France compte deux installations géothermiques électrogènes : la centrale de Bouillante en Guadeloupe et celle de Soultz-sous-Forêts en Alsace.

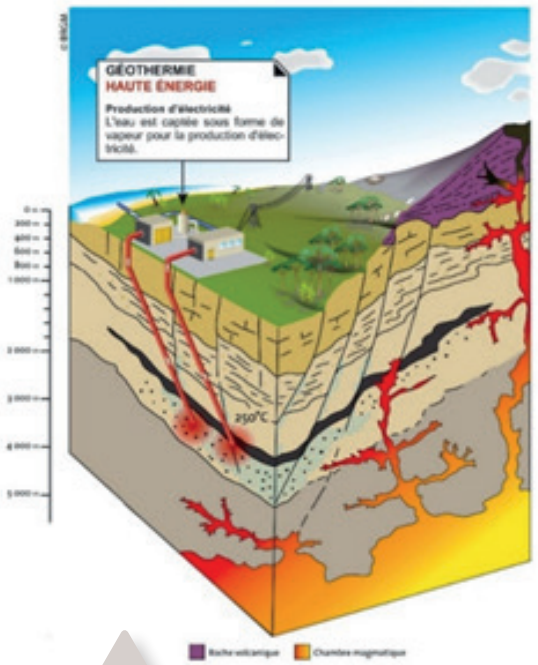
La centrale de Bouillante

La centrale de Bouillante a commencé à produire de l'électricité en 1984 avec une puissance installée de 4,5 MWe (unité de Bouillante 1). Cette mise en production a été précédée de nombreuses études et de forages d'essais réalisés dans les années 1960, qui ont révélé la présence d'une ressource à une température d'environ 250°C.

Au début des années 2000, de nouvelles études ont débuté. Après trois forages successifs, l'unité Bouillante 2 a été mise en service en 2005, pour un coût total de 33,2 M€. L'unité de Bouillante 1 a par ailleurs été totalement rénovée en 2013 pour un investissement de 4,4 M€.

Aujourd'hui, la centrale de Bouillante totalise une puissance installée de 15,5 MWe. En 2020, elle a produit 110 GWh d'électricité, ce qui correspond à environ 6 % des besoins de la population guadeloupéenne.

Un permis d'exploration a été déposé en 2017 afin de forer deux nouveaux puits à une profondeur comprise entre 1000 m et 1600 m. Cette nouvelle unité utilisera la technologie ORC (reposant sur un cycle de Rankine afin de maximiser la production d'électricité) et devrait être mise en service en 2022, apportant une puissance électrique supplémentaire de 10 MWe.

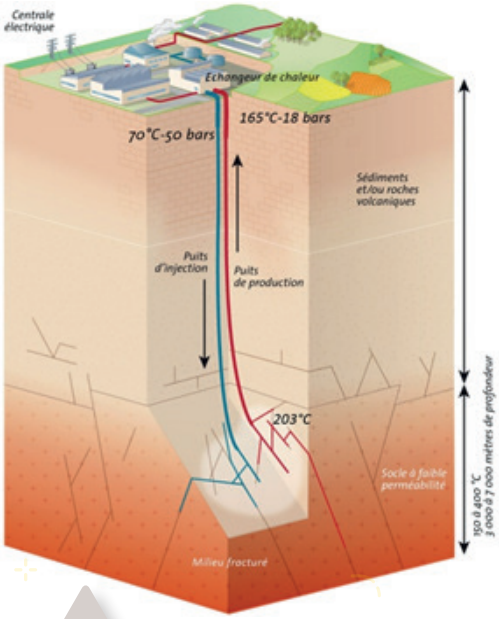


Principe de fonctionnement de géologique de la centrale de Bouillante (©ADEME-BRGM)

La centrale de Soultz-sous-Forêts

Le site de Soultz-sous-Forêts, au nord de l'Alsace, a été le lieu pendant 25 ans (de 1987 à 2012) d'un programme européen de R&D consacré à la géothermie EGS. Ce programme s'est traduit par la réalisation d'un pilote scientifique constitué de 4 puits (1 puits à 3 500 m et 3 puits à 5 000 m de profondeur) captant une ressource géothermale à 200°C et d'une centrale électrique de démonstration d'une puissance de 1,7 MWe, reconfigurée en 2016.

Le coût du programme européen de R&D – incluant le forage des 4 puits profonds - s'est élevé à environ 120 M€, avec une contribution d'environ 85 % partagée à peu près à parité entre l'Union Européenne, la France et l'Allemagne, et de 15 % provenant des industriels, réunis au sein d'un Groupement Européen d'Intérêt Économique (GEIE) appelé « Exploitation minière de la chaleur ».



Principe de fonctionnement d'une centrale EGS (ES Géothermie, 2015)

Les projets de développement

Projets dans les Départements et Régions d'Outre-Mer

La France a la chance de pouvoir développer des activités de géothermie en domaine volcanique sur son territoire grâce aux îles de la Réunion, de la Guadeloupe, de la Martinique et de Mayotte.

Quatre demandes de permis exclusifs de recherche (PER) sont en cours ou ont été déposées dans les DROM :

- en Guadeloupe, sous le nom de Vieux Habitants, au Sud de la centrale de Bouillante. Ce permis est accepté depuis le 10 mai 2016. Il est le terrain d'investigation de l'AMI Geotref (voir la partie sur les Appels à Manifestation d'Intérêt de l'ADEME)
- à La Réunion, sous le nom de Salazie-Cilaos.
- en Marinique : deux PER sont en cours d'instruction
- des études sont en cours à Mayotte



Cartographie des permis de recherche et concession pour des gites de géothermie haute température en outre-mer (AFPG d'après les données du Ministère de la Transition Ecologique)

Contrairement aux projets en métropole, ces installations géothermiques ne produiraient a priori que de l'électricité.

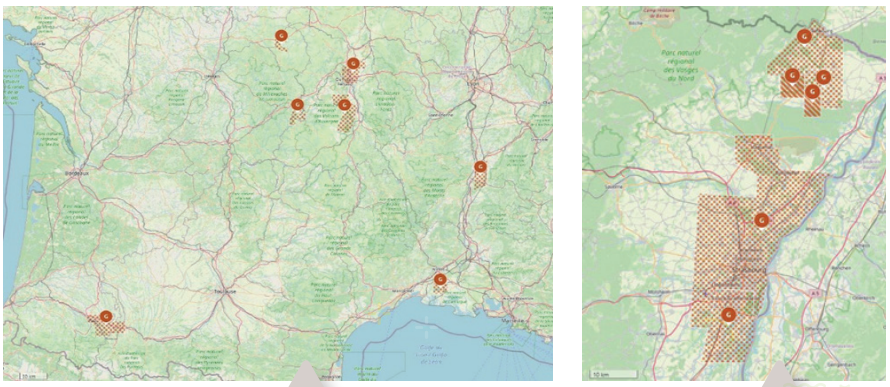
Les projets en métropole

On appelle gîte « haute température » une exploitation pour laquelle la température de l'eau exploitée est supérieure à 150 °C (ancien régime du Code minier avant 2019). De tels projets sont donc généralement conçus pour produire de l'électricité mais également de la chaleur par cogénération ou coproduction, ou de la vapeur destinée à des process industriels. La chaleur sera utilisée via des réseaux pour du chauffage urbain ou des installations diverses (serres, thermes, industries, …).

Actuellement, le territoire métropolitain est exploré par les industriels pour des recherches de gites géothermiques de haute température. Ces pratiques sont encadrées par le Code minier, à travers deux titres miniers :

- le permis exclusif de recherche pour la phase d'exploration,
- la concession pour la phase d'exploitation.

La cartographie des permis de recherche de gites géothermiques de haute énergie, délivrée par le Ministère de la Transition écologique indique la présence de 11 PER sur le territoire métropolitain, ainsi que deux concessions (site de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen).



Cartographie des permis de recherche et concession pour des gites de géothermie haute température en métropole (AFPG d'après les données du Ministère de la Transition écologique)

Zone	Nom du permis	Estimation de la puissance électrique installée (MWe)
Alsace	Wissembourg • Illkirch-Erstein • Strasbourg • Hatten-Rittershoffen	16
Massif Central et Limagne	Cézallier • La Sioule • Riom-Clermont-Métropole • Combrailles-en-Marche	24
Sud-Ouest	Pau-Tarbes	6
Couloir Rhodanien et Haute Savoie	Val-de-Drôme • Vistrenque	13
Total		**59**

Permis de recherche en 2020

Si l'intégralité des projets fonctionne selon les estimations de puissances, alors **la France métropolitaine comptera d'ici 2028 environ 60 MWe** géothermiques renouvelables pour une alimentation locale et continue en électricité et en chaleur. L'investissement prévisionnel total en cas de succès s'élève à près d'un milliard d'euros.

Le succès de ces projets permettra également aux entreprises françaises de montrer leur savoir-faire dans la technologie EGS et donc d'avoir de bons atouts pour s'exporter sur le marché international.

Bilan et perspectives

Si tous les projets exposés précédemment sont réalisés, alors d'ici 2028, la France serait équipée de 16 installations de géothermie électrogène, produisant plus de 160 MWe.

En pratique, il est probable que seule une faible proportion de ces permis donneront lieu à de réelles installations.

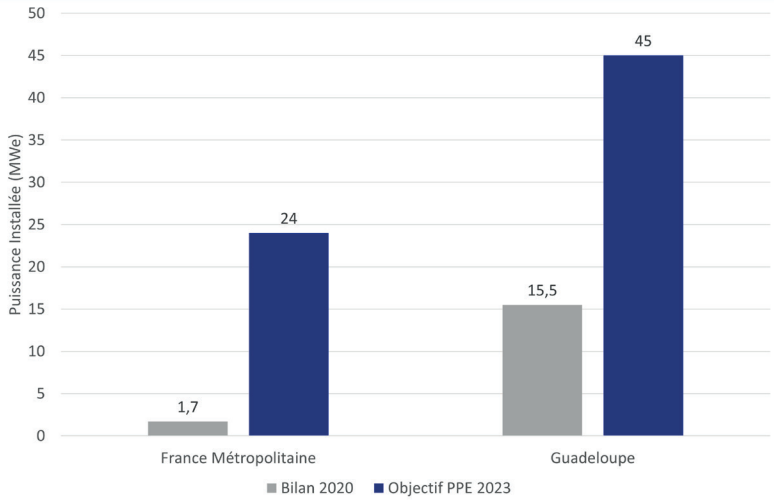
Zone	Nombre de projets	Puissance électrique (MWe)
Installations existantes en 2020	2	17
Permis en métropole	11	59
Permis de recherche en outre-mer	3	90
Total France 2028	**16**	**166**

Projection optimale de la puissance électrique attendue

Cette projection à plus de 160 MWe électriques d'ici 2028 dépasse largement les objectifs fixés par la dernière Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE).

En effet, la trajectoire établie par la PPE pour la géothermie électrogène doit amener la puissance installée en métropole à 24 MWe d'ici à 2023 (l'objectif pour 2028 est également de 24 MWe).

La Guadeloupe possède, quant à elle, sa propre PPE, publiée en 2017 dans la continuité de son plan énergétique. Elle doit atteindre les 70 % d'EnR dans la production brute d'électricité en 2023 (contre 28 % en 2018). Cela peut s'expliquer par sa dépendance coûteuse aux importations de combustibles fossiles et par un gisement renouvelable important.



Puissance électrique géothermique installée en France

Néanmoins, la dynamique actuelle de la filière électrogène suggère que les objectifs fixés par la PPE ne seront pas respectés en 2023. Une inversion de cette tendance est nécessaire pour espérer respecter ces mêmes objectifs en 2028. Cette inversion pourrait être insufflée par l'intérêt stratégique de la production de lithium.

Voies d'avenir

Développer les réseaux de froid géothermique

Le réchauffement climatique s'accompagne de pics caniculaires de plus en plus fréquents. Au-delà du désagrément causé, ces pics peuvent entraîner des accidents de santé graves et même mortels. Il est donc certain que les besoins de refroidissement vont augmenter dans les années à venir.

Actuellement, les principaux systèmes de climatisation se superposent souvent à des systèmes de chauffage déjà existants (chaudière à gaz, bois, etc.). Ils sont de plus pour la plupart fortement consommateurs d'électricité et participe à la formation d'îlots de chaleur urbains : le froid en intérieur se crée par rejet de chaud à l'extérieur, ce qui, de fait, diminue le rendement énergétique et augmente encore davantage les besoins de refroidissement.

Pour éviter cela, il est impératif que la politique française et européenne en matière d'énergie renouvelable prenne en compte et encourage le développement du froid renouvelable. Sur ce point, la géothermie présente un immense potentiel, aussi bien pour le secteur du particulier que pour les réseaux de froid :

- Le géocooling permet un rafraîchissement à très haut rendement énergétique ;
- Le chaud n'est pas rejeté en extérieur, il est stocké pour l'hiver ;
- Le système de refroidissement ne se superpose pas à un système de chauffage déjà existant, tout peut être initialement dimensionné via une PAC réversible.

Protéger l'esprit d'entreprise en allégeant les procédures

Une récente réforme du Code minier inquiète fortement les professionnels. Le 10 Mai 2021, Jean-Jacques Graff, Président de l'AFPG, s'est exprimé dans une tribune intitulée « La réforme du Code minier est une catastrophe pour l'avenir de la géothermie ». Il écrit notamment :

« La réforme en cours a rajouté des contraintes supplémentaires à la géothermie qui est considérée à l'égal de l'extraction de l'or en Guyane ou du nickel en Nouvelle-Calédonie. La mesure la plus impactante est la garantie trentenaire qui impose à l'opérateur de suivre les ouvrages durant 30 ans après la fin de leur exploitation. Cette contrainte à elle seule risque de plomber toute une filière. Normalement lorsqu'un

puits est en fin d'exploitation, il est rebouché selon un protocole strict et contrôlé par les autorités, il est ensuite rendu au propriétaire du sous-sol, à savoir l'Etat. D'après ce projet de Loi, il faudrait contrôler l'ouvrage durant 30 années après sa fin de vie, ce qui voudra dire maintenir une activité durant de longues années sur un site, ce qui se traduira par une charge d'autant plus conséquente que l'opérateur aura eu de centrales en exploitation. […]

[…] Aller trop loin dans l'alourdissement des procédures d'instruction ne permettra pas de développer la géothermie au niveau demandé par la Programmation pluriannuelle de l'énergie.».

De façon générale, la géothermie est trop souvent assimilée à un risque et non à une EnR. L'évolution du Code minier ne simplifie pas la visibilité des porteurs de projets, il s'agit d'un nouveau frein réglementaire au développement de la filière. Il est impératif de trouver les bons ajustements entre les pouvoirs publics et les professionnels lors de la rédaction des ordonnances d'application qui traduiront la loi.

Relocaliser notre production de lithium

Le lithium est aujourd'hui devenu une ressource stratégique essentielle à la transition énergétique, notamment en raison de ses applications dans le stockage de l'électricité au moyen de batteries. Son marché est en forte croissance depuis 2010 et la demande mondiale de lithium est amenée à tripler d'ici à 2030.

Dans ce contexte, l'Europe a fixé comme priorité de sécuriser son approvisionnement, actuellement constitué à 86 % d'importations. Plusieurs dirigeants européens se sont exprimés en faveur de la création d'une filière européenne de production de batteries électriques, pour laquelle le gouvernement français a débloqué en 2019 un budget de 700 millions d'euros.

Cette piste de recherche est absolument essentielle au bon développement de la filière électrogène, en difficulté depuis la suppression du tarif de rachat de l'électricité en 2019 (anciennement 246 €/MWh).

A propos du lithium, Jean-Jacques Graff, Président de l'AFPG, écrit :

« C'est une filière très prometteuse, plusieurs projets portés par des acteurs français sont en cours de tests. ***Les quantités disponibles dans les eaux de certaines régions françaises sont gigantesques et, compte tenu qu'il faut extraire le lithium à des températures plutôt basses, le mariage de raison entre la géothermie et le lithium paraît tout naturel. […]*** *En Allemagne de grosses ambitions sur la production du lithium géothermal ont permis de mobiliser de gros financements, les permis d'exploration fleurissent à une vitesse qui fait rêver de l'autre côté du Rhin. […] ».*

Insuffler une nouvelle dynamique aux énergies renouvelables

Jean-Jacques Graff, Président de l'AFPG, écrit enfin :

« Si nos dirigeants souhaitent réindustrialiser le pays et développer fortement les énergies renouvelables, il faut alors doter les pouvoirs publics d'outils plus efficaces et plus souples que ceux qui existent actuellement. ***Un vrai Plan Marshall des énergies renouvelables devrait impulser des actions qui permettraient de développer de nouveaux pans industriels*** *et donner de l'espoir à une jeunesse de plus en plus inquiète et durement touchée par la crise sanitaire qui fait rage depuis une année. Cette crise a eu au moins l'avantage de mettre en exergue la fragilité des pays, comme la France, qui se sont fortement désindustrialisés durant les dernières décennies.*

Il est temps de prendre le virage pour retrouver la trajectoire que nous avons perdue et ne pas repousser nos objectifs 2030 à 2050 […] ».

Sources annexes

Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

Espace institutionnel sur les géothermies (ADEME et BRGM)
www.geothermie-perspectives.fr

EGEC - European Geothermal Council
www.egec.org

Ministère de la Transition écologique (espace géothermie)
www.ecologie.gouv.fr/geothermie

Qualit'EnR
www.qualit-enr.org

Syndicat national des entrepreneurs de puits et de forages pour l'eau et la géothermie
www.sfeg-forages.fr

Sybase (BRGM)
sybase.brgm.fr

environ
205 000
pompes à chaleur géothermiques en fonctionnement

dont **4 100** unités vendues en 2020

4,77 TWh
de chaud et de froid issus de la géothermie de surface

marché individuel
stabilisation des ventes annuelles autour de **3000 unités**

marché du collectif
progression portée par le **secteur de la rénovation**

Géothermie de surface

afpg
ASSOCIATION FRANÇAISE DES PROFESSIONNELS DE LA GÉOTHERMIE

Géothermie profonde Production de chaleur

80 **opérations** de chaud et de froid
incluant une part importante de géothermie dans leur mix énergétique

1 000 000
personnes chauffées en France

2,46 TWh **chaleur issue de la géothermie profonde**

- **87%** *réseau de chaleur urbain*
- **8%** *chaleur industrielle*
- **3%** *agriculture / pisciculture*
- **2%** *piscines / thermes / centres nautiques*

Géothermie profonde Centrales électrogènes

2 **centrales électrogènes**
- **15,5 MWe** à Bouillante en Guadeloupe
- **1,7 MWe** à Soultz-sous-Forêts en Alsace

14 **permis de recherche**
166 MWe en étude

extraction de lithium par géothermie

1 centrale électrogène = 100 000 batteries lithium de voitures électriques

premiers démonstrateurs opérationnels **en 2023**