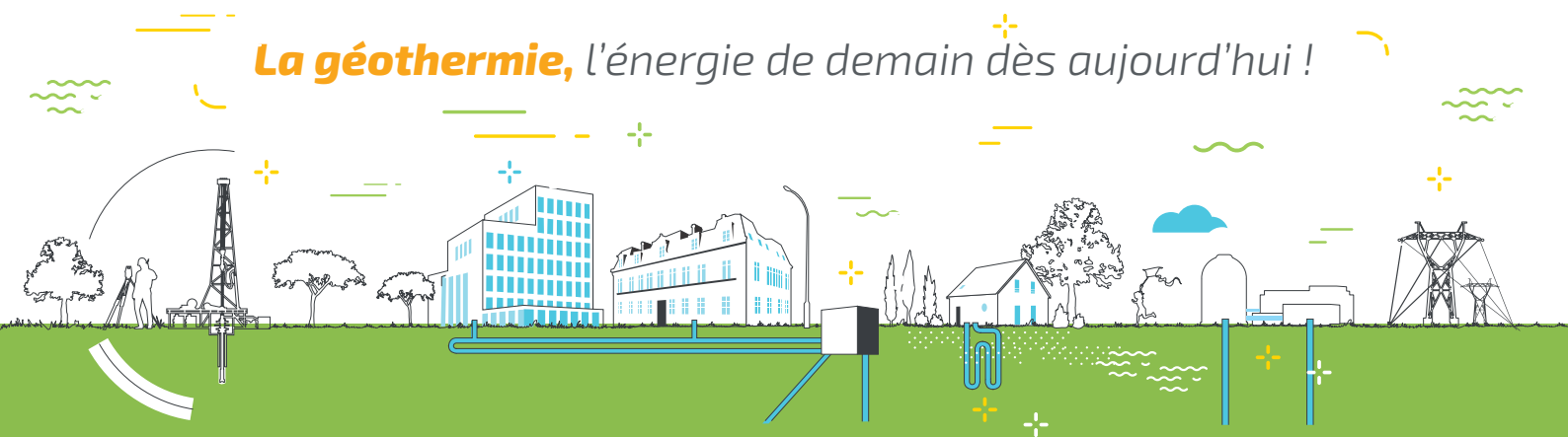




**La géothermie**, l'énergie de demain dès aujourd'hui !



LA GÉOTHERMIE EN FRANCE  
**ÉTUDE DE FILIÈRE**  
**2019**

## • Sommaire

1	<b>La géothermie, une source d'énergie renouvelable polyvalente</b>	3
2	<b>La géothermie de surface</b>	4
2.1	Fonctionnement et usages	5
2.2	Marché 2018 des systèmes géothermiques	10
2.3	Aides et réglementation	13
2.4	Bilan et perspectives	17
3	<b>La géothermie profonde</b>	20
3.1	<b>Les centrales fournissant exclusivement de la chaleur</b>	21
3.1.a	Fonctionnement et usages	21
3.1.b	Etat de la production française en 2018	23
3.1.c	Etat de la filière et projection	27
3.1.d	Les outils à la disposition de la filière française pour soutenir le développement des réseaux de chaleur géothermiques	30
3.2	<b>Les centrales électrogènes</b>	32
3.2.a	Fonctionnement et usages	32
3.2.b	Les centrales géothermiques électrogènes en fonctionnement en France	34
3.2.c	Les projets en France	36
3.2.d	Réglementation et perspectives	41
4	<b>La géothermie, un atout pour la transition énergétique</b>	43

## • Liens utiles

Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

Amorce  
[www.amorce.asso.fr](http://www.amorce.asso.fr)

Association Française des Professionnels de la Géothermie  
[www.afpg.asso.fr](http://www.afpg.asso.fr)

Association Française pour les Pompes à Chaleur  
[www.afpac.org](http://www.afpac.org)

Bureau de Recherche Géologiques et Minières  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

Espace institutionnel sur la géothermie réalisé par l'ADEME et le BRGM  
[www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr)

Observ'ER  
[www.energies-renouvelables.org/accueil-observ-er.asp](http://www.energies-renouvelables.org/accueil-observ-er.asp)

European Geothermal Energy Council  
[www.egec.net](http://www.egec.net)

FEDENE  
[www.fedene.fr](http://www.fedene.fr)

Ministère de la Transition écologique et solidaire (espace géothermie)  
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/geothermie>

Qualit'Enr  
[www.qualit-enr.org](http://www.qualit-enr.org)

Syndicat des Energies Renouvelables  
[www.enr.fr](http://www.enr.fr)

Syndicat des Foreurs d'Eau et Géothermie  
[www.sfeg-forages.fr](http://www.sfeg-forages.fr)

## • 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 chaleur 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).

**Fossé d'effondrement** : Structure tectonique constituée de failles normales de même direction, limitant des compartiments de plus en plus abaissés en allant vers le milieu de la structure. Également appelé graben, on en connaît de toutes tailles : le fossé rhénan et les Limagnes en sont des exemples typiques. Il est à noter que la formation d'un graben exige une extension (ou distension) de la région.

**Production** : Grandeur indiquant l'énergie produite par un système sur une période donnée. Par exemple, une production exprimée en kWh/an mesure la quantité d'énergie (en kWh) produite pendant un an.

**Puissance installée** : Grandeur indiquant la quantité maximale d'énergie produite par unité de temps. Elle s'exprime en W, qui mesure le nombre de joules produits par seconde. On peut distinguer les différentes formes d'énergie : on parle par exemple de watts thermiques (Wth) et de watts électriques (We)

**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.

# 1

## La géothermie, une source d'énergie renouvelable polyvalente

La géothermie est une énergie renouvelable capable de fournir du froid, de la chaleur et de produire de l'électricité. Elle permet d'exploiter l'énergie contenue dans le sol, à plus ou moins grande profondeur (la température augmentant avec la profondeur).

On distingue ainsi 2 catégories :

- 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).

- La géothermie profonde, à de profondeurs allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Elle peut permettre la production de chaleur à grande envergure (par exemple pour alimenter un quartier), mais également d'électricité – voire les 2 en même temps.

La géothermie a pour elle de nombreux atouts qui en font une filière incontournable de la production d'énergie renouvelable en France et dans le monde.

Elle fournit une énergie décarbonée tout au long de l'année et ce quelles que soient les conditions extérieures. A partir d'une certaine profondeur, la température du sol ne dépend en effet pas des aléas climatiques, ce qui en fait une source stratégique dans un contexte de dérèglement climatique et d'intégration toujours plus grande de sources d'énergies intermittentes. La géothermie s'intègre en outre parfaitement au paysage, avec une très faible empreinte au sol (une grande partie des infrastructures est enterrée). C'est une énergie produite localement, créatrice d'emplois non délocalisables dans les territoires dans lesquels elle est implémentée – notamment en milieu rural.

Créée en 2010, l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) œuvre activement pour, entre autre, structurer la filière de la géothermie en France 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.

# LA GÉOTHERMIE DE SURFACE



## 2.1 FONCTIONNEMENT 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 et le plus souvent à moins de 200 mètres. 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 énergétique de géothermie permet de couvrir tout ou partie des besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de climatisation ou de rafraîchissement, à destination du particulier ou des secteurs du collectif et du tertiaire (hôpitaux, bureaux, écoquartiers, ...).

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 du bâtiment
- un dispositif de régulation : il permet de gérer les différents mode de fonctionnement

### Les différents types 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.

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

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, voir détails p 8.).

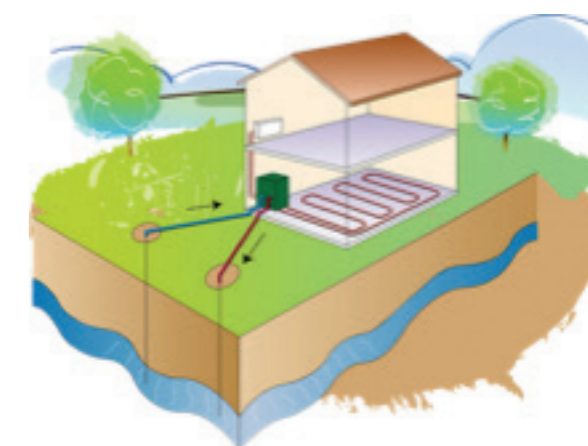


FIG 1 | Schéma de principe du captage sur nappes

#### • Le captage par sondes géothermiques verticales (SGV)

Une sonde géothermique verticale est constituée d'une boucle (« tube en 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 favoriser le captage des calories du sol.

La puissance extraite (ou puissance frigorifique) est de l'ordre de 50 W par mètre linéaire de forage avec une protection d'environ 2000 heures par an. Sur des bâtiments récents, la durée annuelle de sollicitation est souvent plus faible : la puissance linéaire extraite pourrait ainsi être significativement plus importante.

Bien que les 2 types de captage mentionnés ci-dessus représentent la grande majorité des installations, il existe également d'autres techniques pouvant s'appliquer dans des situations précises.

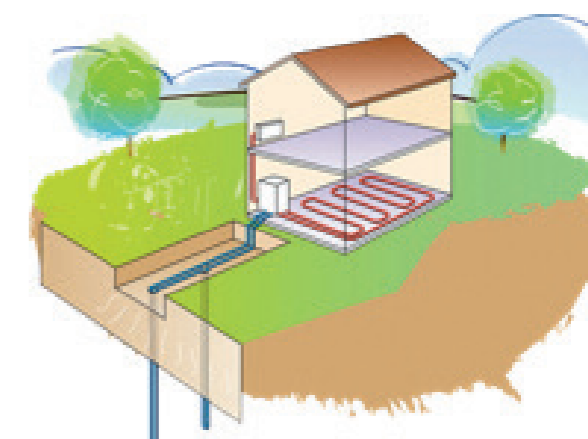


FIG 2 | Schéma de principe du captage par SGV

## • Le captage horizontal

Ce système est constitué de tubes situés entre 80 cm et 120 cm de profondeur, dans lequel 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.

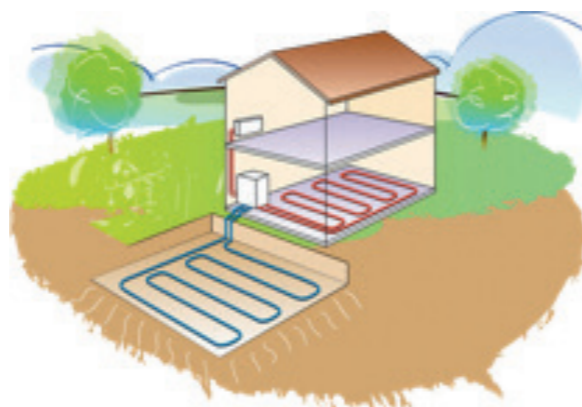


FIG 3 | Schéma de principe du captage par horizontal

## • 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.

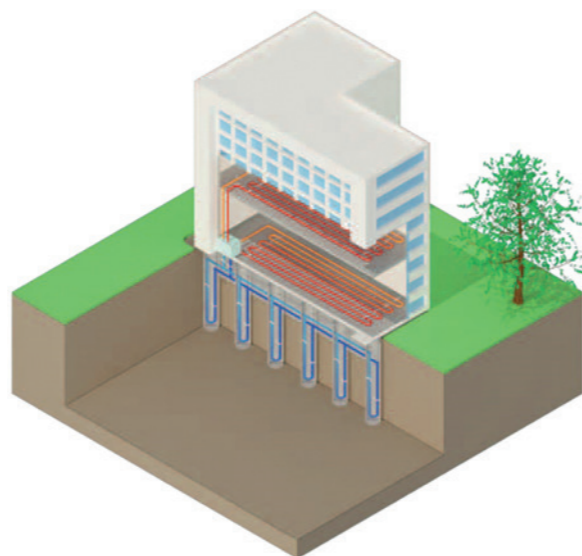


FIG 4 | Schéma de fonctionnement des fondations thermoactives (© geothermie-perspectives.fr, ADEME-BRGM)

## • Les échangeurs compacts (ou « corbeilles géothermiques »)

Ces échangeurs sont installés à quelques mètres de profondeur. Le fluide caloporteur descend dans un tube sous forme de ressort et remonte par le centre de la spirale.

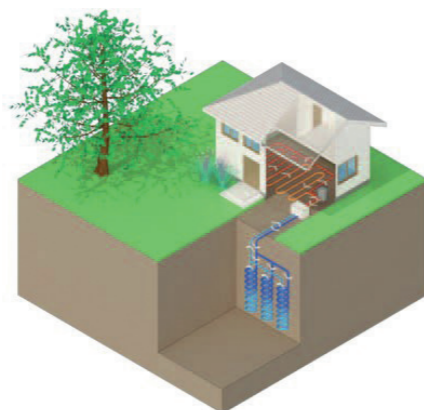


FIG 5 | Schéma de principe des échangeurs compacts (© geothermie-perspectives.fr, ADEME-BRGM)

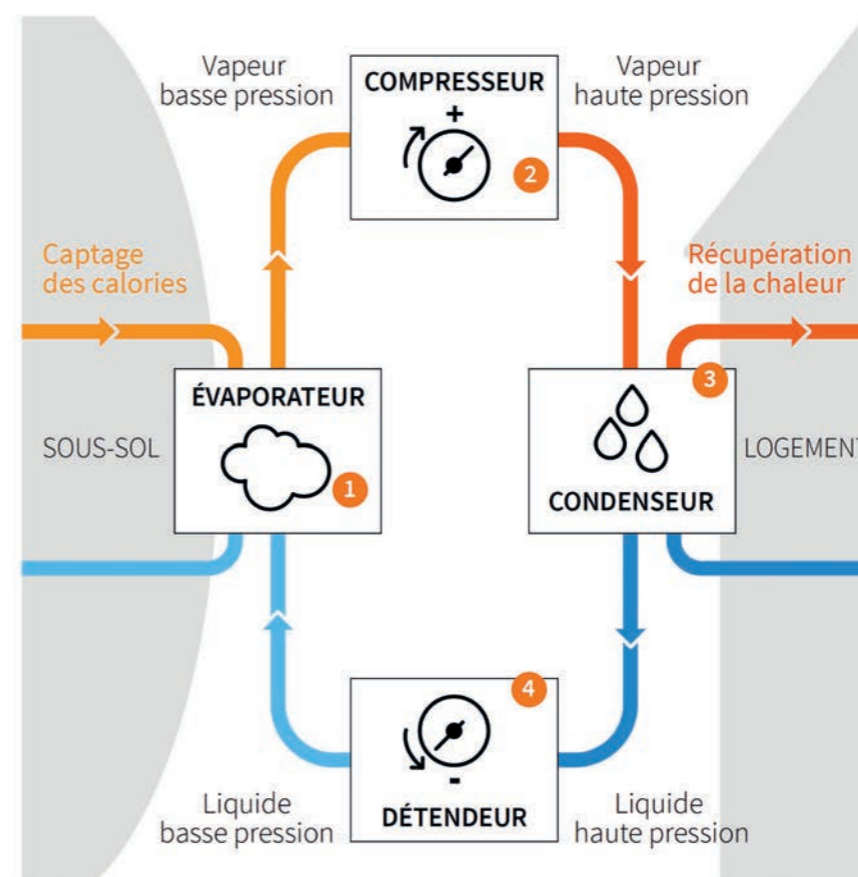
## Le fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)

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.

FIG 6 | Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique à compression (ADEME, AFPG)

### 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.

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, elle produit 5 kW de chaleur** et 4 kW de froid.

Outre le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation, les PAC géothermiques peuvent fonctionner selon 2 autres modes :

### • Le mode Thermo-Frigo-Pompe

Il s'agit d'un mode de production simultanée de chaud et de froid (chaud + froid mais aussi ECS + froid) sans exploiter la ressource géothermique (rendement de 700 % à 1 200 %). 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

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 fraîcheur du sous-sol à la surface. Puisque la PAC ne fonctionne pas, les rendements sont extrêmement élevés : de l'ordre de 3 000 % à 5 000 % (30 à 50 kWh de froid apportés pour 1 kWh d'électricité consommée).

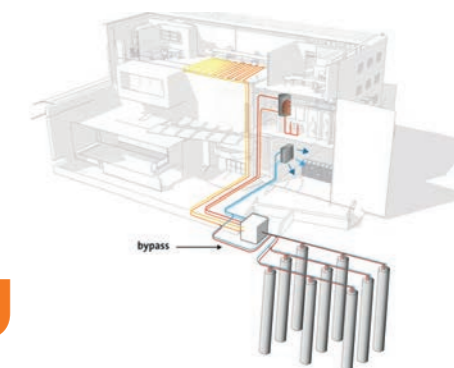


FIG 7 | Principe d'une installation de géothermie utilisant le geocooling (ADEME, BRGM)

## Les boucles 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, selon les besoins de chaque bâtiment raccordé, le chauffage, la production d'ECS et la production de froid.

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

- performances énergétique, économique et environnementale ;
- adaptabilité à tout type de besoins (chaud et/ou froid, ECS) ;
- stockage d'énergie inter-saison et à court terme ;
- 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 ;
- 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).

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

FIG 8 | Principe d'une boucle d'eau tempérée géothermique (AFPG)

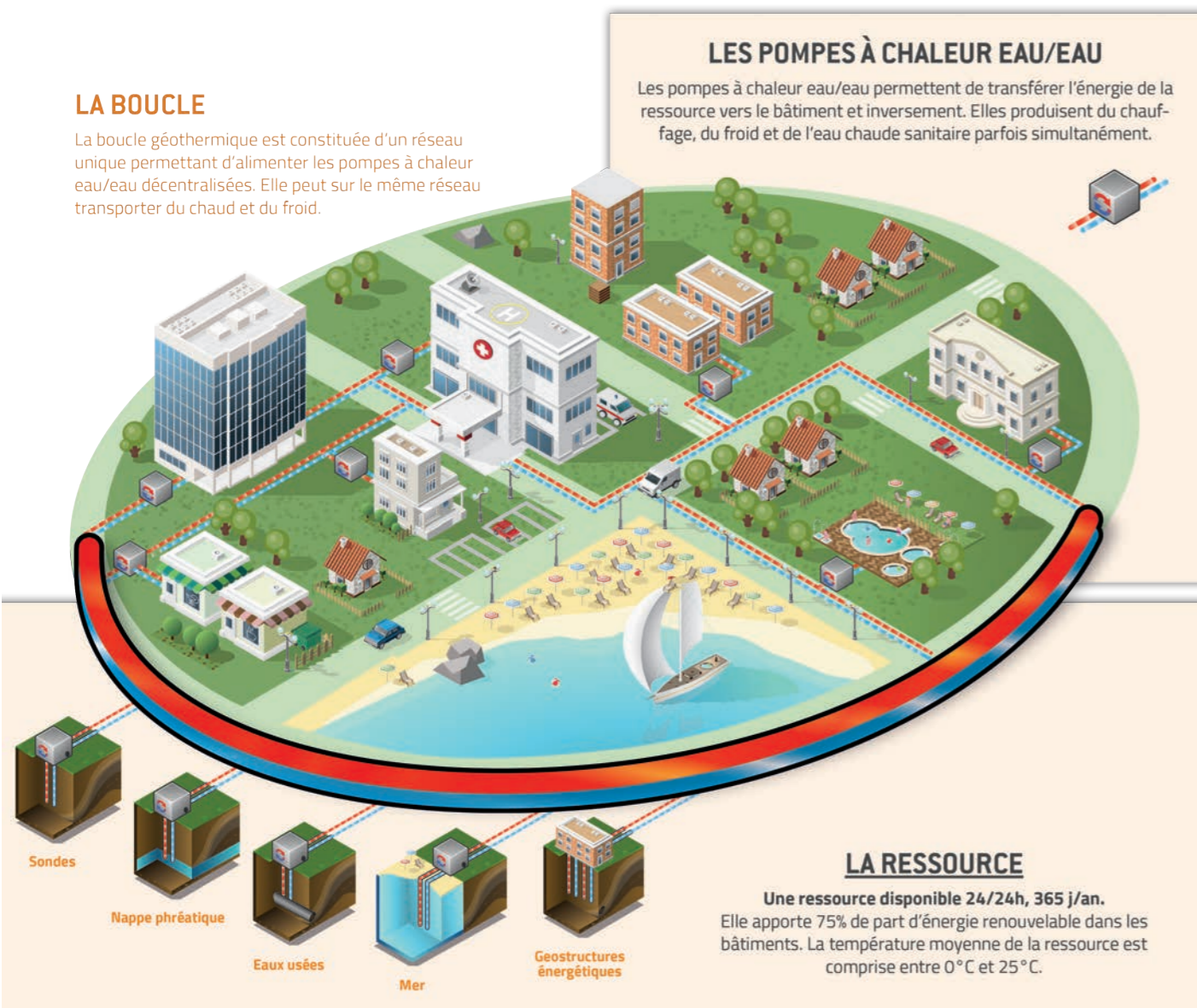
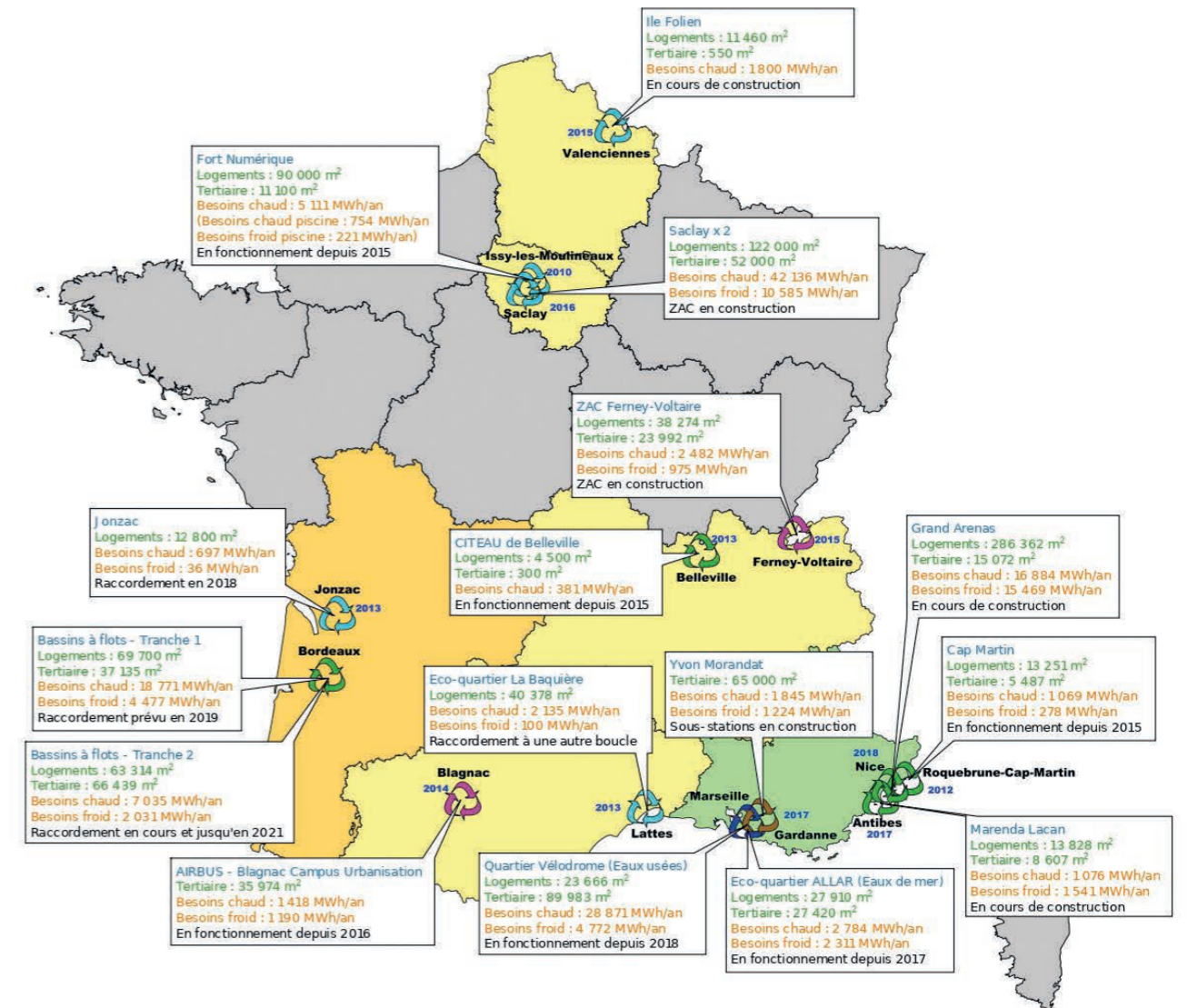


FIG 9 | Présentation des 16 boucles d'eau tempérée subventionnées par l'ADEME en France (AFPG)



### Présentation des 16 boucles d'eau tempérée subventionnées par l'ADEME sur le territoire français

#### Légende

##### Energie alimentant la boucle

- Eaux de nappes
- Champ de sondes
- Eaux de mines ennoyées
- Eaux usées
- Eaux de mer

##### Nombre de boucles par région

- Aucune
- 1 à 2
- 3 à 4
- 5 et plus

Source :  
Carte de France : Gouvernement  
Boucle d'eau tempérée : ADEME

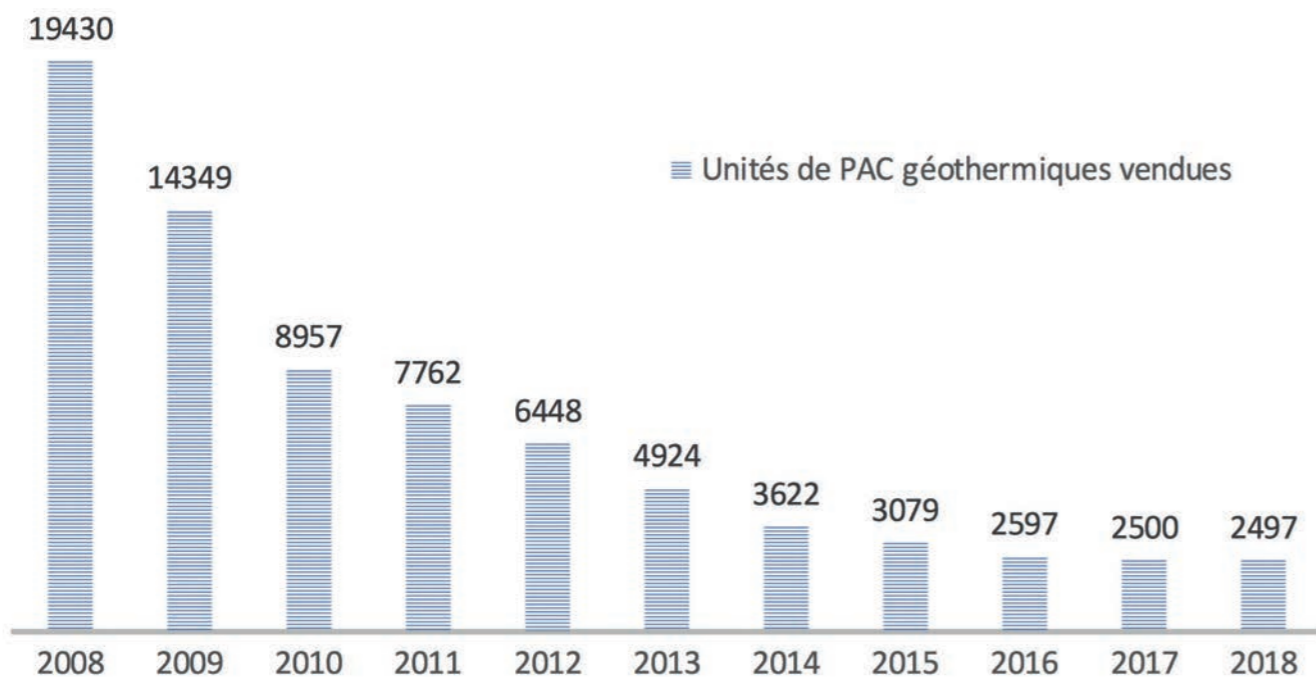
## 2.2 MARCHÉ 2018 DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES

### Les ventes de PAC géothermiques

Chaque année, l'AFPAC (Association Française pour les Pompes A Chaleur) publie des statistiques sur les ventes de PAC en France. Elles concernent les appareils de puissance comprise entre 2 et 50 kW.

L'année 2018 a vu les ventes de PAC géothermiques se stabiliser par rapport à 2017, avec un **peu moins de 2500 unités vendues**. Ces chiffres confirment les difficultés éprouvées par ce marché, alors que ceux des PAC aérothermiques (plus de 99 000 unités vendues) et des chauffe-eau thermodynamiques (plus de 100 000 unités vendues) continuent leur progression : respectivement +14,8 % et +17 % par rapport à 2017.

FIG 10 | Evolution des ventes de PAC géothermiques (P = 2 à 50 kW) entre 2008 et 2018 (AFPAC d'après PAC & Clim'info)



### Marché des PAC géothermiques individuelles

En avril 2019, Observ'ER (l'Observatoire des Energies Renouvelables) a publié une étude intitulée *Suivi du marché et des prix 2018 des pompes à chaleur individuelles*. Les résultats confirment la tendance indiquée par l'AFPAC, à savoir une stabilisation des ventes à un niveau faible.

Il est à noter que les chiffres d'Observ'ER sont pris sur un périmètre plus large que ceux donnés par l'AFPAC, d'où ces chiffres sensiblement plus élevés.

FIG 11 | Evolution des ventes de PAC individuelles (P < 30 kW) entre 2016 et 2018 (Observ'ER)

PAC géothermiques individuelles (nb d'unités vendues)	2016	2017	2018	Evolution
PAC sol/sol	2 445	2 530	2 433	-4%
PAC sol/eau				
PAC eau glycolée/eau				
PAC eau/eau	650	570	647	+14%
<b>TOTAL</b>	<b>3 095</b>	<b>3 100</b>	<b>3 080</b>	<b>-0,6%</b>

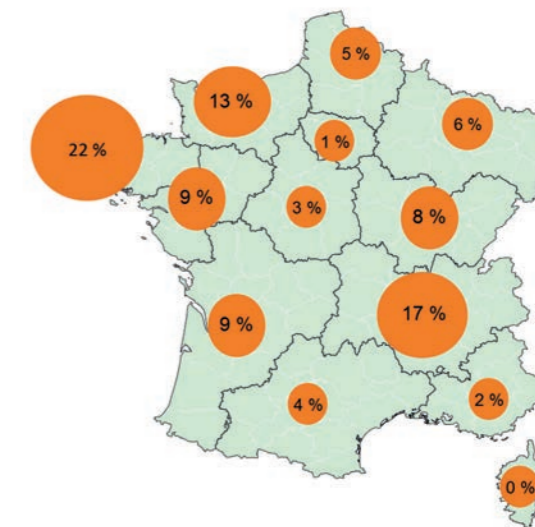
Les différentes catégories de PAC indiquées dans le tableau peuvent être regroupées par type de captage :

- PAC sol/sol, sol/eau : utilisent une technologie à détente directe
- PAC eau glycolée/eau : concernent essentiellement les sondes géothermiques verticales
- PAC eau/eau : concernent les PAC sur nappes

En croisant ces chiffres avec les informations données par Observ'ER sur la répartition des ventes de PAC par puissance, **on peut estimer à environ 36 MW la puissance de PAC géothermiques installées en 2018 dans le secteur du particulier**, dont 27 MW pour les PAC sur eau glycolée et à détente directe, et 9 MW pour celles sur nappes, ce qui correspond à **une production moyenne annuelle de 65 GWh** sur une base de 1 800h de fonctionnement annuel.

L'étude Observ'ER donne également des informations sur la répartition géographique de ces ventes selon les régions.

FIG 12 | Répartition géographique des ventes de PAC individuelles (P < 30 kW) en 2018 (Observ'ER)



### Marché des PAC géothermiques collectives et tertiaires

Le marché du collectif concerne les PAC d'une puissance supérieure à 30 kW, destinées notamment au tertiaire et aux grands établissements (hôpitaux, écoles, mairies, ...).

**On peut estimer le nombre d'opérations de géothermie collective réalisées en 2018 à 600 et 322 pour le tertiaire. Cela correspond à une puissance installée d'environ 130 MW, soit une production annuelle de chaleur renouvelable d'environ 270 GWh.**

	PAC 2017 (données Panorama 2018)	Nombre d'opérations 2018 (Observ'ER)	Nombre de PAC 2018 (AFPG)	Puissance moy en kW	Heures annuelle	Energie Gwh (AFPG)
<b>Collectif</b>	100	322	644	100	2070	133 GWh
<b>Tertiaire</b>	473	598	1196	55	2070	136 GWh
Total	573	920	1840			269 GWh

#### Bilan des opérations de géothermie collectives et tertiaires en 2018 (Observ'ER & AFPG)

Contrairement au marché des PAC géothermiques individuelles, le marché du collectif & tertiaire progresse légèrement d'années en années. 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.

FIG 13 | Répartition des opérations de géothermie collective par type de chantier en 2018 (Observ'ER)

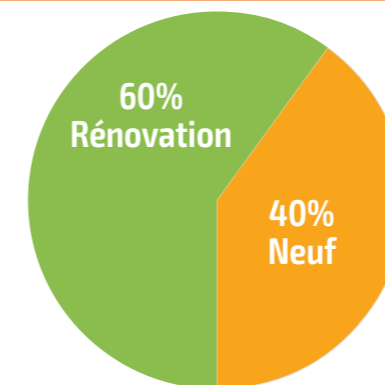
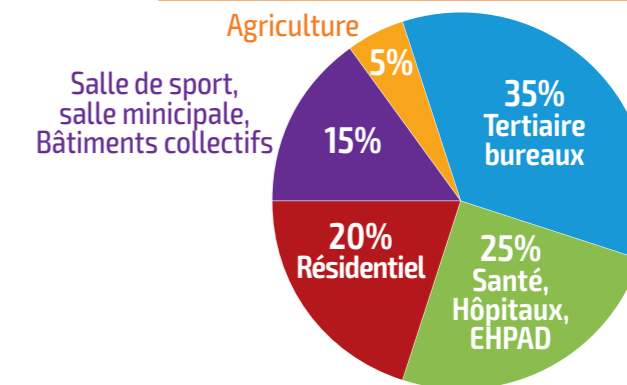


FIG 14 | Répartition des opérations de géothermie collective par type d'établissement en 2018 (Observ'ER)

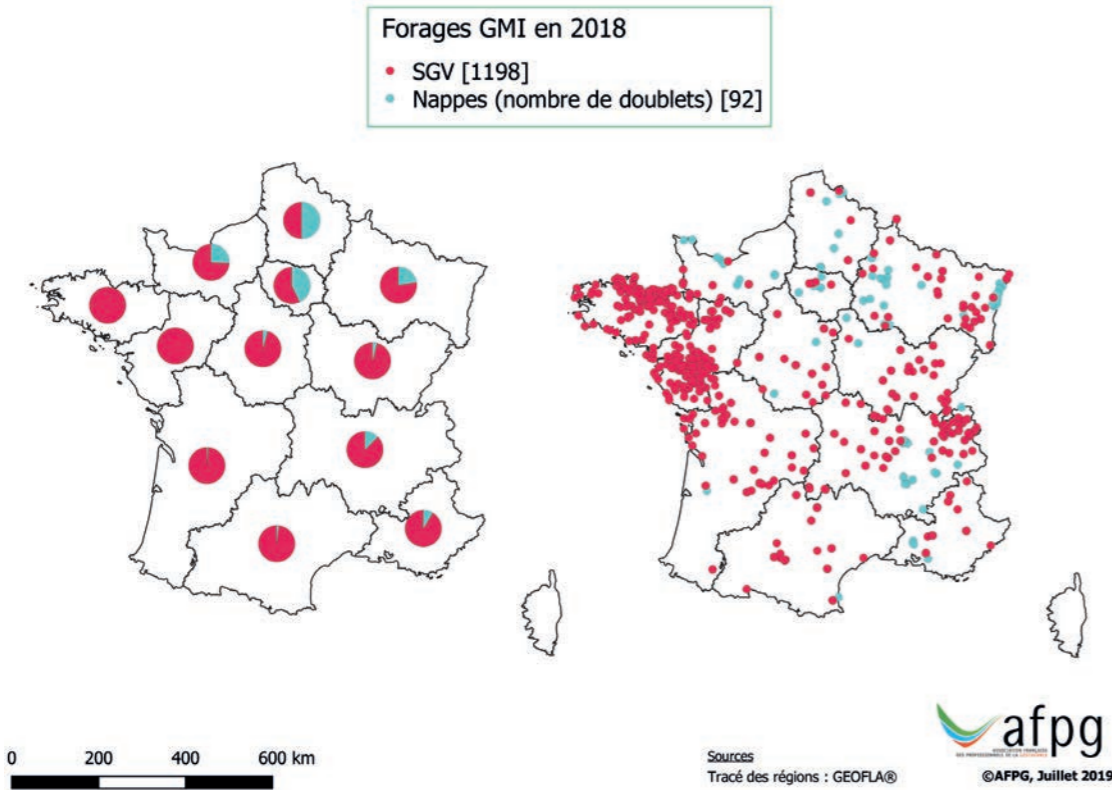


## Répartition des opérations de GMI selon les régions

Mis en place en 2015, le régime GMI (*Géothermie de Minime Importance*) est une simplification du code minier. A ce titre, tout forage de géothermie rentrant dans cette catégorie (profondeur entre 10 m et 200 m, moins de 500 kW soutirés au sous-sol, débit inférieur à 80 m<sup>3</sup>/h pour le captage sur nappes, réalisation par un foreur qualifié au sens de la réglementation) doit être télé-déclaré sur le site *géothermie-perspectives* (voir détails p 16.)

Voici la carte de France des forages géothermiques déclarés en GMI en 2018, obtenue 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 2018, mais seulement ceux rentrant dans le cadre de la GMI. Cela exclut notamment les opérations de grande envergure.

FIG 15 Position et répartition régionale des forages GMI en France en 2018 (AFPG d'après BRGM)



En 2018, les régions les plus actives en termes de GMI sont :

- **Géothermie sur nappes** : Grand-Est (33 %), Auvergne-Rhône-Alpes (26 %) et Hauts-de-France (14 %), soit 3 régions regroupant 73 % des forages sur nappes.
- **Géothermie sur SGV** : Bretagne (26 %), Pays-de-la-Loire (23 %), Auvergne-Rhône-Alpes (14 %), soit 3 régions regroupant 63 % des forages sur SGV.

## 2.3 AIDES ET RÉGLEMENTATION

Le tableau ci-dessous résume les principales aides disponibles pour les installations de géothermie de surface à la date de rédaction de l'étude (juillet 2019). Il peut également exister des dispositifs territoriaux, notamment au niveau des régions.

FIG 16 Principales aides disponibles en 2019 pour les solutions de géothermie de surface (AFPG d'après Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, ADEME et ANAH)

Aide	Délivrée par	Description	Destinataire	Montant	Conditions d'éligibilité	Remarques
<b>CITE (Crédit d'impôt pour la Transition Énergétique)</b>	État	Le CITE s'applique aux dépenses d'isolation du logement ou d'équipements permettant de réduire sa consommation d'énergie.	Particuliers	Crédit d'impôt sur le revenu de 30 % des dépenses réalisées pour certains travaux (après déduction des autres aides perçues par le ménage). Plafonné	<ul style="list-style-type: none"> <li>Logement principal achevé depuis + de 2 ans.</li> <li>Certains travaux doivent être réalisés par une entreprise certifiée RGE.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taux de 30 % fixe quelle que soit la technologie concernée.</li> <li>Cumulable avec l'éco-PTZ.</li> </ul>
<b>COUP DE POUCE CHAUFFAGE</b>	État	Cette prime a pour but d'aider les ménages à sortir des énergies fossiles pour leur chauffage. Elle est versée par les entreprises signataires de la charte "Coup de Pouce Chauffage", mise en place dans le cadre des CEE (Certificats d'Économie d'Énergie).	Particuliers	2500 € pour le remplacement d'une chaudière (charbon, fioul, gaz hors condensation) par une PAC eau/eau (4000 € pour les ménages modestes).	Aide accessible à tous les ménages.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cumulable avec : "Habiter mieux agilité" de l'ANAH.</li> <li>Reste à charge peut bénéficier de : CITE; éco-PTZ.</li> <li>Non cumulable avec : aides ADEME; "Habiter mieux sérénité" de l'ANAH.</li> </ul>
<b>HABITER MIEUX</b>	ANAH (Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat)	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Habiter Mieux sérénité</b> : accompagnement-conseil et aide financière pour un ensemble de travaux apportant un gain énergétique d'au moins 25 %.</li> <li><b>Habiter Mieux agilité</b> : aide financière pour l'un des 3 travaux suivants : changement de chaudière, isolation des murs, isolation des combles.</li> </ul>	Particuliers	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Habiter Mieux sérénité</b> : aide aux travaux + prime "Habiter Mieux" + aide forfaitaire pour l'accompagnement.</li> <li><b>Habiter Mieux agilité</b> : aide aux travaux</li> </ul> Il existe 2 catégories pour les aides : "ressources modestes" et "ressources très modestes".	<ul style="list-style-type: none"> <li>Habiter dans un logement dont on est propriétaire.</li> <li>Ne pas dépasser un certain niveau de ressources.</li> <li>Logement de plus de 15 ans.</li> <li>Ne pas avoir bénéficié d'un PTZ depuis 5 ans.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aides cumulables avec le CITE et l'éco-PTZ.</li> <li>Pour l'offre "agilité" : possibilité de revendre les CEE (Certificats d'Économie d'Énergie) obtenus grâce aux travaux.</li> </ul>
<b>ÉCO-PRÊT À TAUX ZÉRO (éco-PTZ)</b>	Banques ayant signé un contrat avec l'État	Ces prêts alloués aux ménages permettent de financer les travaux lourds de rénovation énergétique en résidence principale.	Particuliers (individuel ou copropriété)	Jusqu'à 30 000 €.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concerne la mise en œuvre d'un "bouquet de travaux" ou des travaux permettant d'atteindre un niveau de performance énergétique minimal.</li> <li>Travaux réalisés par un professionnel certifié RGE.</li> <li>Résidence principale achevée avant 1990.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de critère sur les ressources ni sur les montants des travaux</li> <li>Cumulable avec les aides de l'ANAH, les CEE et le CITE.</li> </ul>
<b>FONDS CHALEUR</b>	ADEME	Aider au financement des installations produisant de la chaleur renouvelable, des réseaux de chaleur liés à ces installations et dans certaines conditions la production de froid renouvelable.	Collectivités, entreprises et associations	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>PAC sur nappes et sondes</b> : Selon la taille, aide forfaitaire ou analyse du coût de revient à partir de la production d'énergie renouvelable de l'installation (en MWh ENR/an) + aide forfaitaire complémentaire pour le geocooling.</li> <li><b>TFP et BETEG</b> : analyse économique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Production minimum de MWh ENR/an.</li> <li>Nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale minimum.</li> <li>Performances minimum des PAC.</li> <li>Travaux réalisés par des entreprises qualifiées.</li> </ul>	Non cumulable avec : CEE (délivrés pour le même objet que le Fonds Chaleur) ; projets domestiques; CITE.
<b>GARANTIE AQUAPAC</b>	SAF - Environnement	Assurance qui couvre les risques hydrogéologiques liés à la possibilité d'exploitation énergétique d'une ressource aquifère, puis au maintien de ses capacités dans le temps (garantie de recherche et garantie de pérennité).	Maîtres d'ouvrages ou leurs mandataires bureaux d'études, entreprises, prestataires de services, exploitants	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Garantie de recherche</b> : égale au coût prévisionnel des études préalables et de la réalisation des travaux de sous-sol.</li> <li><b>Garantie de pérennité</b> : égale au coût de l'ensemble des ouvrages.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aquifère situé à moins de 200 m de profondeur.</li> <li>Puissance thermique de PAC supérieure à 30 kW.</li> </ul>	Le montant des garanties est calculé après déduction des subventions.

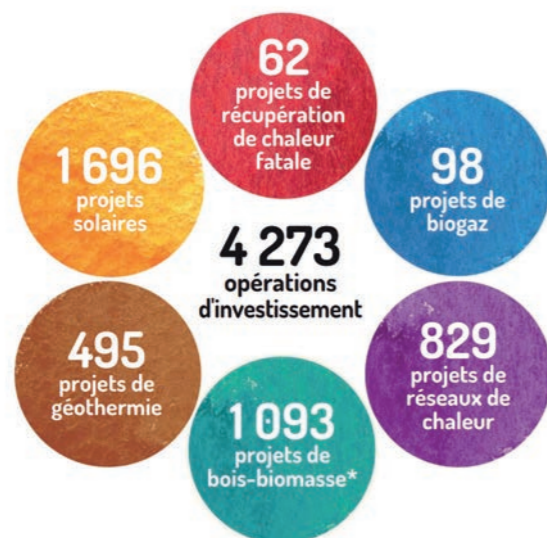
## Le Fonds Chaleur

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 (geocooling, 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 filière de la chaleur renouvelable, avec en ligne de mire **l'objectif de 38 % d'énergie renouvelable dans la consommation finale de chaleur et de froid en 2030**, fixé par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. **Cette part s'élevait en 2017 à 21,2 %<sup>1</sup>** - encore loin des 33 % attendus pour 2020 dans le Paquet Energie-Climat.

Sur la période 2009-2017, 4273 opérations ont bénéficié du financement du Fonds Chaleur, avec 1,75 milliards d'euros engagés par l'ADEME pour soutenir ce programme, sur un total de 5,78 milliards d'euros d'investissement.<sup>2</sup>

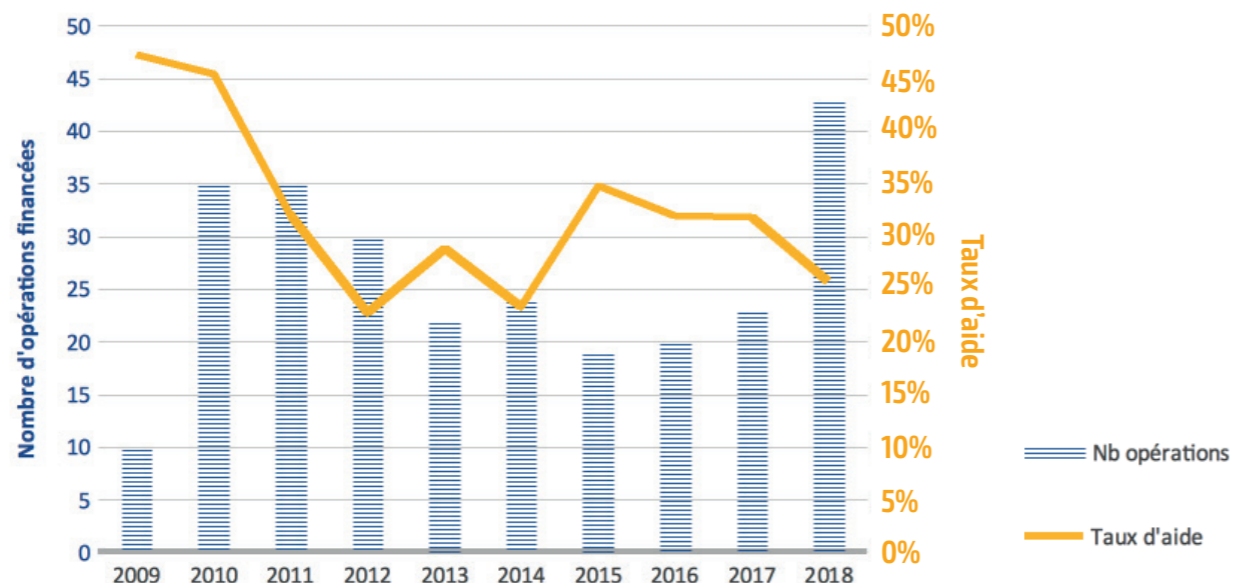
FIG 17 Bilan des opérations d'investissement du Fonds Chaleur entre 2009 et 2017 (ADEME)<sup>3</sup>



Concernant la géothermie de surface, ce sont **261 opérations sur sondes et 192 opérations** sur nappes qui ont bénéficié du Fonds Chaleur entre 2009 et 2018 :

- opérations sur sondes : 23 130 000 € d'aide apportée pour 39 300 MWh/an de production d'EnR ;
- opérations sur nappe : 22 900 000 € d'aide apportée pour 139 000 MWh/an de production d'EnR.

FIG 18 Bilan 2009 - 2018 des opérations de géothermie sur sondes financées par le Fonds Chaleur (AFPG d'après données ADEME)

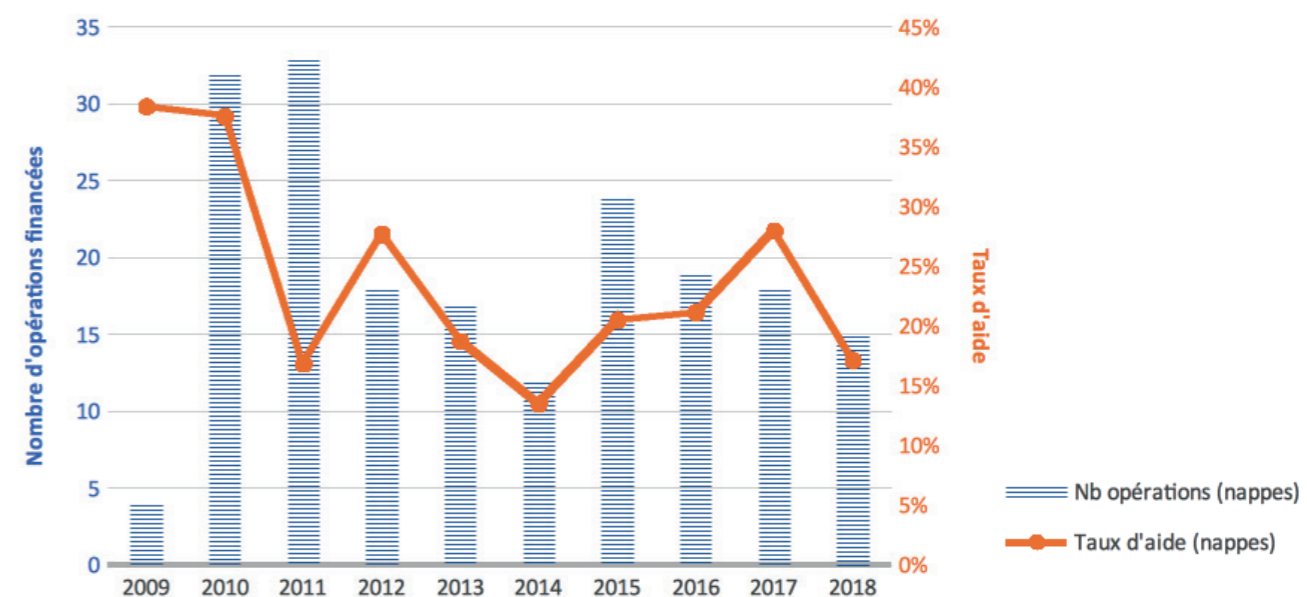


1 - Source : Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Les énergies renouvelables en France en 2017, calculs prévision

2 - Source : ADEME, Le Fonds Chaleur, Outil majeur de la transition énergétique, Bilan 2009 - 2017

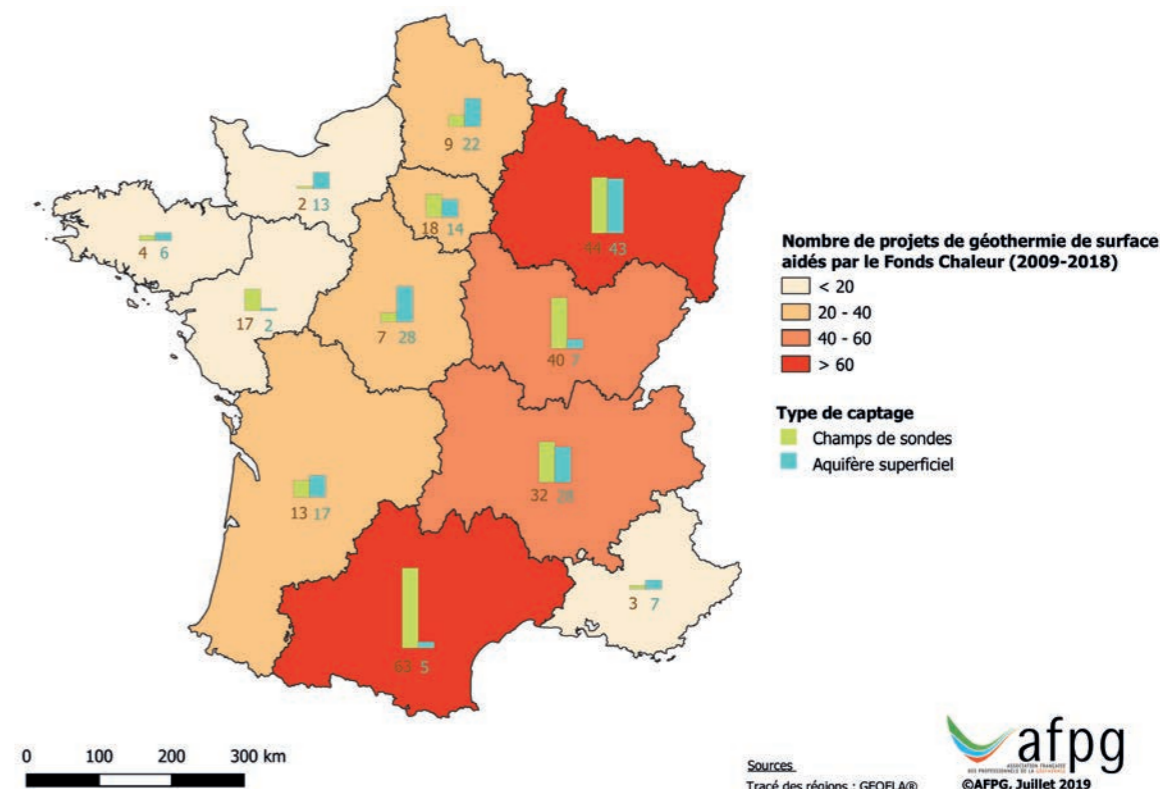
3 - Les 495 projets de géothermie regroupent les catégories suivantes : PAC sur champs de sondes, PAC sur aquifère superficiel, PAC sur eaux usées, PAC sur eau de mer et géothermie profonde.

FIG 19 Bilan 2009 - 2018 des opérations de géothermie sur nappe financées par le Fonds Chaleur (AFPG d'après données ADEME)



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.

FIG 20 Bilan des projets de géothermie de surface ayant bénéficié du Fonds Chaleur entre 2009 et 2018 (AFPG d'après données ADEME)



Depuis 2016, un nouveau dispositif d'attribution du Fonds Chaleur est expérimenté par l'ADEME : **les contrats de développement des énergies renouvelables thermiques**. Il s'articule autour d'un accord entre l'ADEME et le bénéficiaire de l'aide, qui s'engage à réaliser sur la période du contrat (généralement 3 ans) un groupe de projets d'EnR thermiques, avec des objectifs en termes de production de chaleur et de nombre d'installations.

Il existe 2 types de contrats : **les contrats patrimoniaux**, portés par un opérateur sur son patrimoine propre (au moins 3 installations), et les **contrats territoriaux**, portés principalement par des « personnes morales publiques » (collectivités, établissements publics, métropoles, syndicats, ...) sur un territoire (au moins 10 installations).<sup>4</sup>

4 - Source : ADEME, Fiche descriptive - Contrat de développement des ENR thermiques, 14 août 2018



## La réglementation GMI

Après plusieurs années de concertation entre les pouvoirs publics et les professionnels, le décret sur les gîtes géothermiques de minime importance (GMI) a été publié au journal officiel le 10 janvier 2015 et est entré en vigueur le 1er juillet 2015. Il permet de sécuriser, simplifier et réduire les délais de réalisation de nombreux projets de PAC tout en assurant un meilleur encadrement de la filière.

Ce texte permet d'exclure du code minier la plupart des ouvrages géothermiques de moins de 10 m de profondeur, et facilite la plupart des opérations de petites 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<sup>3</sup>/h, avec une température inférieure à 25°C en sortie des ouvrages de prélèvement, et l'eau rejetée dans son aquifère d'origine.

Ce décret s'appuie sur 4 arrêtés :

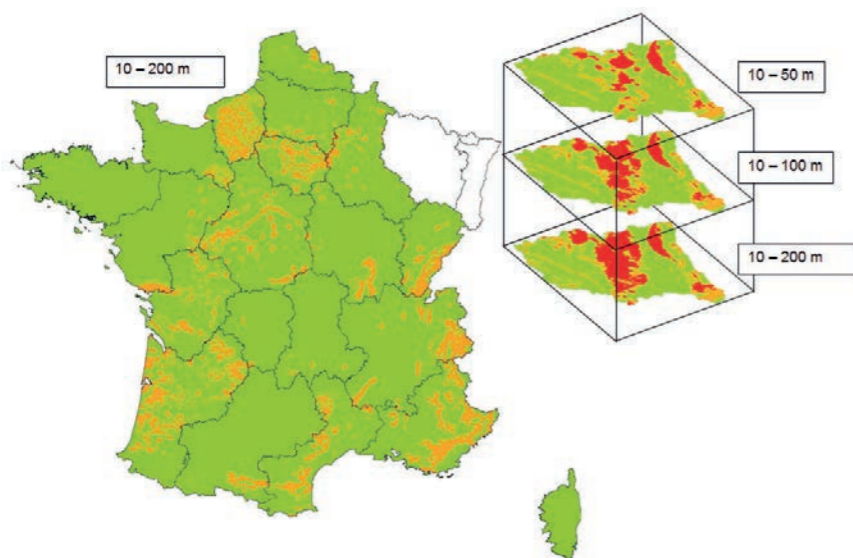
- une cartographie réglementaire (définition de trois zones verte, orange, rouge) ;
- l'agrément des experts (cas des zones orange) ;
- les prescriptions générales (pour la réalisation des ouvrages) ;
- l'obligation de qualification des entreprises de forage (*Qualiforage*).

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 par la Région.

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 agréé, qui garantit l'absence de risques graves du projet.
- des zones à risque significatif, dites zones « rouges » où le projet ne pourra être réalisé qu'après autorisation de l'installation au titre du code minier.

FIG 21 | Carte réglementaire pour la géothermie de minime importance avec décomposition par profondeur des régions Alsace et Lorraine (BRGM, 2015)



Cette simplification administrative permet une amélioration de la qualité des forages. En effet, les procédures de télé-déclaration ne sont possibles que si les travaux de forage sont réalisés par un foreur qualifié, ce qui se traduit aujourd'hui par une qualification RGE QUALIFORAGE.

## 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 2 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.<sup>5</sup> Concernant la géothermie, il existe plusieurs certifications RGE, correspondant aux différentes étapes d'un projet :

- **Forage** : certification RGE *Qualiforage* délivrée par Qualit'ENR. Elle certifie la compétence d'une entreprise de forage, à travers 2 modules : un pour les forages sur sondes et un pour les forages sur nappes.
- **Pompe à chaleur** : plusieurs certifications, 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 certifications sont délivrées par l'OPQIBI et I.Cert.<sup>5</sup>

## 2.3 BILAN ET PERSPECTIVES

**L'AFPG estime le parc de PAC géothermiques installées en France à environ 175 000 unités à fin 2018 pour une puissance installée de 1,9 GW (soit environ 3,4 TWh de chaleur produite) :**

- secteur individuel : 1,4 GW installés pour 2,5 TWh de production annuelle de chaleur
- secteur collectif : 0,5 GW installés pour 0,9 TWh de production annuelle de chaleur

Afin de contextualiser ces données, il est intéressant de les comparer aux objectifs fixés par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Ces objectifs sont énoncés dans la PPE (*Programmation Pluriannuelle de l'Energie*), élaborée en 2015 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 en termes de production d'énergie pour les différentes filières, selon 2 scénarios (objectifs « haut » et « bas »). Ainsi, la PPE de 2016 couvrirait deux périodes respectivement de trois et cinq ans : 2016-2018 et 2019-2023.

Un nouveau projet de PPE est actuellement en cours de validation. Il porte sur les périodes 2019-2023 et 2024-2028, et sera en phase avec la SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone). Il est à noter qu'au vu du rythme actuel de la progression de la filière géothermie de surface, les objectifs fixés pour 2023 par la PPE 2016 ont été revus à la baisse.

FIG 22 | Bilan et perspectives (PPE) de la production de chaleur par géothermie de surface en France (AFPG et Ministère de la Transition Écologique et Solidaire)<sup>6</sup>



5 - Source: ADEME, <https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/labels-certifications/entreprises-batiment/dossier/devenir-professionnel-reconnu-garant-lenvironnement-rge/obtenir-qualification-rge-etudes>  
6 - Les chiffres de production 2005-2016 proviennent du projet de PPE du Ministère. Le chiffre 2018 correspond à la production de chaleur estimée dans le cadre de notre étude.

## Pour atteindre ces objectifs, 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 locaux est un enjeu primordial. Ces animateurs jouent en effet un rôle de relais d'informations et de conseils, tant auprès des particuliers que des acteurs institutionnels publics et privés.

Les régions dans lesquels des animateurs dédiés à la promotion de la géothermie sont en place présentent une dynamique plus marquée de développement de la filière. Actuellement, seules 2 régions disposent de cet appui : Centre-Val-de-Loire et Hauts-de-France (sur les 3 départements de l'ancienne Picardie). Le déploiement d'animateurs locaux sur l'ensemble du territoire apparaît ainsi comme une priorité.

### • Ajuster les aides apportées à la production de chaleur

Les professionnels de la géothermie travaillent depuis plusieurs années pour faire en sorte que les aides de l'État soient dirigées vers les systèmes offrant les meilleures performances environnementales et énergétiques. Certaines problématiques ont été soulevées par la Cour des Comptes dans son rapport « Le soutien aux énergies renouvelables » de mars 2018, au sujet notamment du CITE :

« **L'éligibilité des chaudières à combustible à haute performance au CITE pose question** dans un contexte où le prix des énergies fossiles est particulièrement bas [...] ».

« Par ailleurs, s'il est compréhensible que pour des questions de lisibilité et de gestion, un taux unique de 30 % soit accordé pour l'ensemble des équipements éligibles depuis le 1er septembre 2014, cette solution est défavorable aux technologies les plus chères à l'achat, même si sur le long terme elles se révèlent plus performantes et génèrent le plus d'économies pour les ménages. Ainsi, dans le cas de la géothermie très basse énergie, les coûts d'investissement initiaux peuvent représenter un obstacle au développement de la filière : or, avec un taux unique, le crédit d'impôt ne permet pas de développer les filières les plus efficaces. **Dans ce cas, cela revient à favoriser les pompes à chaleur aérothermiques, moins performantes que les pompes géothermiques, ce qui constitue un usage inefficace de cette dépense fiscale.** »

Une réforme du CITE est programmée pour 2020. Elle prévoit notamment le remplacement du système de crédit par une aide forfaitaire pour les ménages modestes distribuée par l'Agence nationale de l'habitat (Anah). Cette aide devrait exclure les chaudières gaz du périmètre des aides pour les ménages aux revenus intermédiaires, et favoriser les systèmes de production de chaleur et de froid les plus performants. Pour les pompes à chaleur, la géothermie permettrait de bénéficier d'une aide plus importante que l'aérothermie.

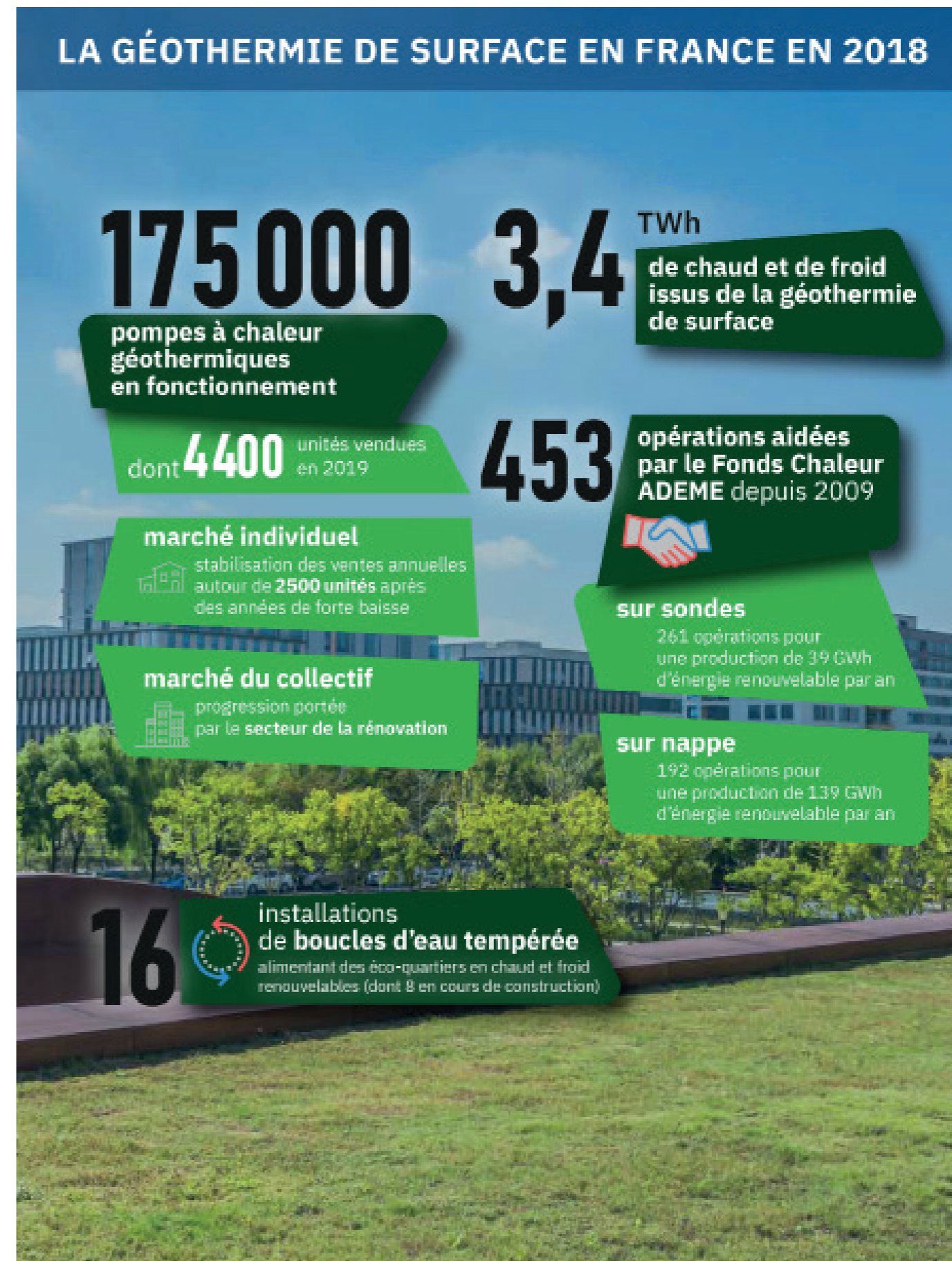
### • S'appuyer sur la nouvelle réglementation énergétique RE 2020

Le passage de la RT 2012 à la RE 2020 doit permettre de renforcer les exigences en termes de performances énergétiques et d'impact environnemental pour les constructions neuves. Expérimentée depuis 2016 à travers le label E+C- (Bâtiment à Énergie Positive et Réduction Carbone), cette nouvelle réglementation devrait 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 contribuent activement 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.

### • Créer un Comité technique

Le nombre important de thématiques à traiter en géothermie de surface ainsi que la rapide évolution des normes, de la réglementation et de technologie a conduit l'AFPG à lancer en octobre 2019 un Comité technique qui aura la vocation d'être un espace d'échanges entre les différents acteurs de la filière



# LA GÉOTHERMIE PROFONDE

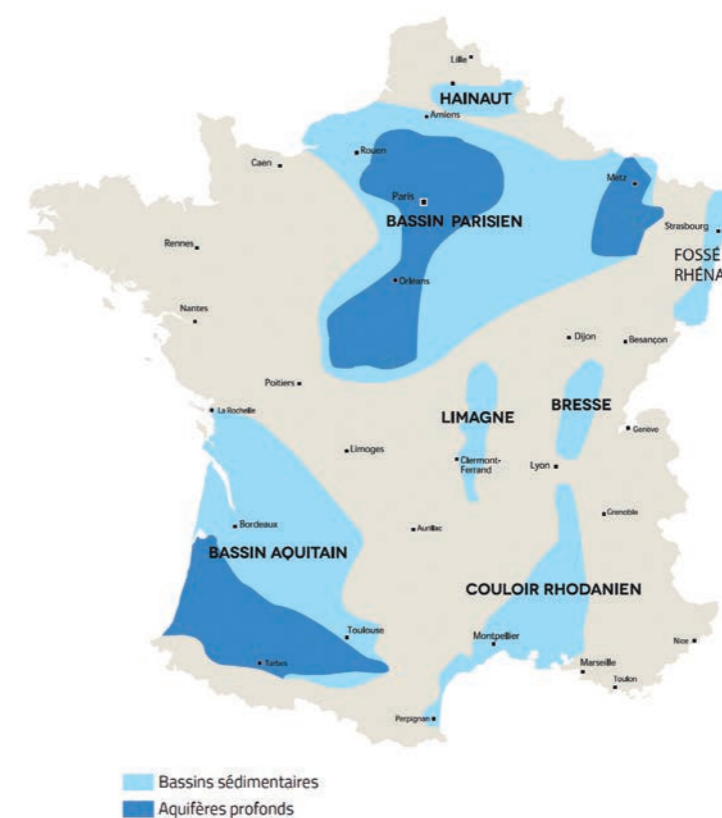


## 3.1 LES CENTRALES FOURNISSANT EXCLUSIVEMENT DE LA CHALEUR

### 3.1.a Fonctionnement et usages

Ce type d'installation exploite 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 ou **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 et cinq plus restreints qui contiennent de nombreuses nappes d'eau souterraines, empilées les unes sur les autres et séparées par des roches imperméables.

FIG 23 | Cartographie des bassins sédimentaires français (BRGM)



L'exploitation de ces eaux souterraines chaudes se fait principalement par **doublets**, c'est-à-dire un puits qui pompe l'eau (puits producteur) et un second qui la réinjecte dans la même nappe (puits injecteur ou réinjecteur), tout en veillant à respecter un espacement suffisant au niveau du réservoir aquifère entre les deux puits, afin de ne pas refroidir l'eau pompée (phénomène de « bulle froide » créée par la réinjection). Dans certains cas particuliers, on effectue un pompage sans réinjection. Cela est possible lorsque l'eau prélevée est peu chargée en sel minéraux et respecte les normes environnementales de surface. Ce mode d'exploitation, qui a été parfois employé dans le Bassin Aquitain, est à l'heure actuelle soumis à autorisation et doit rester exceptionnel, pour ne pas dépressuriser voire épuiser la ressource profonde (risque de perte de productivité à plus ou moins long terme).

En surface, différents usages de cette énergie apportée par la géothermie sont possibles :

- pour les réseaux de chauffage urbain
- pour d'autres applications consommatrices d'énergie thermique :
  - industrielles
  - agricoles (chauffage de serres, pisciculture, séchage, ...)
  - services de santé, loisirs, éducation (piscines, centres nautiques, thermes...)

## Comment fonctionne un réseau de chaleur ?

Afin de distribuer efficacement cette énergie tirée du sous-sol, il est nécessaire d'avoir un nombre de consommateurs important. C'est le rôle d'un réseau de chaleur – également appelé réseau de chauffage urbain –, qui permet de fournir de la chaleur aux différents clients raccordés. 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).<sup>7</sup> Il est à noter que la tendance actuelle vise à la distribution d'eau à la température la plus basse possible, en adéquation avec les émetteurs basse température, notamment pour les bâtiments labélisés BBCE (Bâtiments Bas Carbone) et HQE (Haute Qualité Environnementale).

Contrairement à la boucle d'eau tempérée, il s'agit d'un **système centralisé**. La chaleur est produite au niveau d'une centrale, qui alimente le circuit primaire de distribution. Un système d'échangeur permet de séparer le circuit hydraulique du doublet (eau géothermale) du circuit primaire de distribution (eau du réseau). Des sous-stations composées d'échangeurs de chaleur assurent l'interface entre le circuit primaire et les circuits secondaires.

FIG 24 | Schéma de principe d'un réseau de chaleur (ADEME Île-de-France)



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 géothermique 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 10 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.

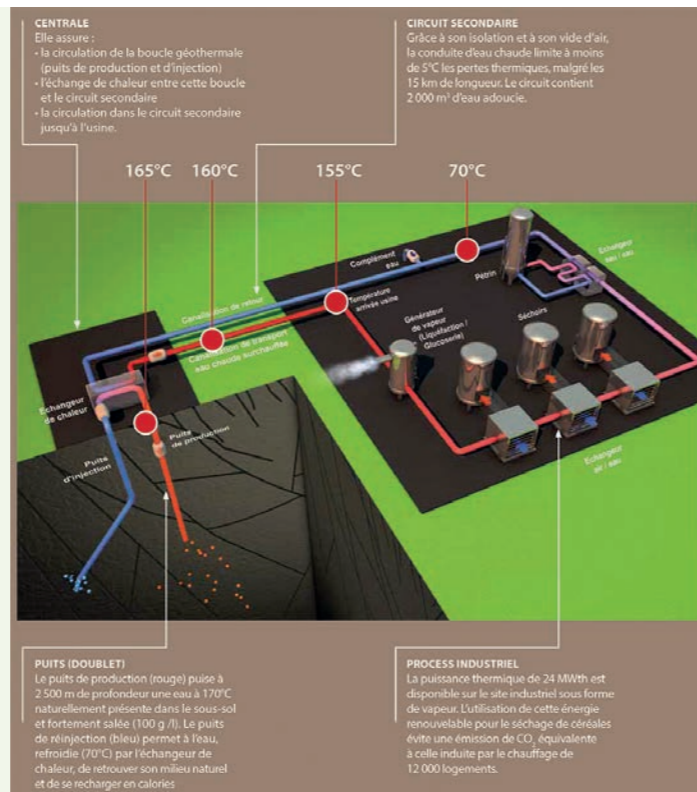
FIG 25 | Schéma de fonctionnement de la centrale ECOGI (ÉS Géothermie, 2015)

### ZOOM SUR... La centrale ECOGI : une avancée majeure pour la production de chaleur industrielle

Inaugurée en juin 2016 à Rittershoffen en Alsace, la centrale ECOGI est la première centrale de géothermie profonde à vocation industrielle au monde à utiliser l'EGS (*Enhanced Geothermal System*). Cette technologie s'appuie sur des traitements chimiques doux pour nettoyer les dépôts minéraux obstructifs dans un réservoir d'eau chaude naturellement fracturé.<sup>8</sup> L'objectif est d'améliorer la connexion des forages au réservoir.

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

Porté par Électricité de Strasbourg, Roquette Frères et la Caisse des dépôts et consignations, ce projet a bénéficié du financement du Fonds Chaleur ADEME. L'investissement total réalisé est de 55 M€. Il permet d'économiser environ 46 000 tonnes de CO2 par an (par rapport à une chaudière au gaz naturel, qui était la solution employée auparavant), ce qui équivaut aux émissions annuelles de 31 000 voitures.



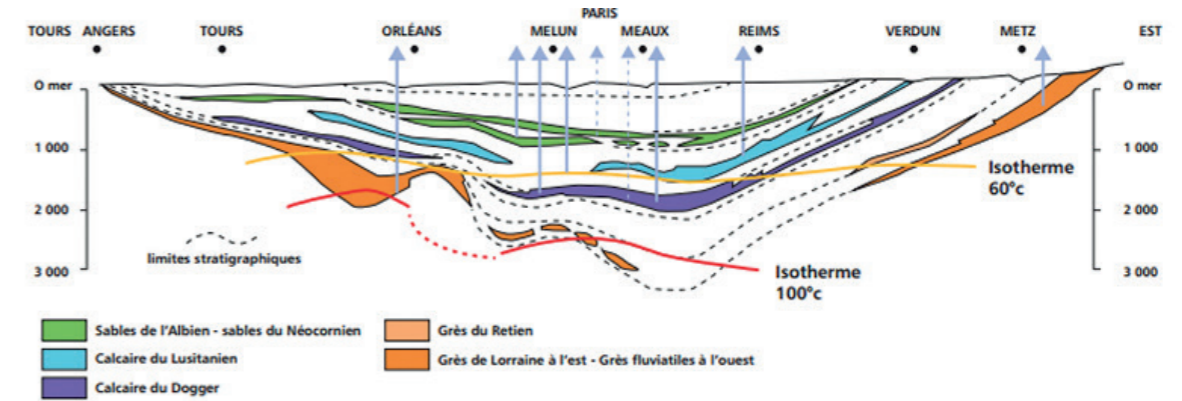
7 - Source : CEREMA, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/constitution-dun-reseau-de-chaleur>  
8 - Source : ÉS, <https://geothermie.es.fr/geothermie/>

## 3.1.b Etat de la production française en 2018

### 3.1.b.i) Le Bassin Parisien

Le Bassin Parisien compte cinq 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.

FIG 26 | Coupe du Bassin Parisien (ADEME-BRGM)



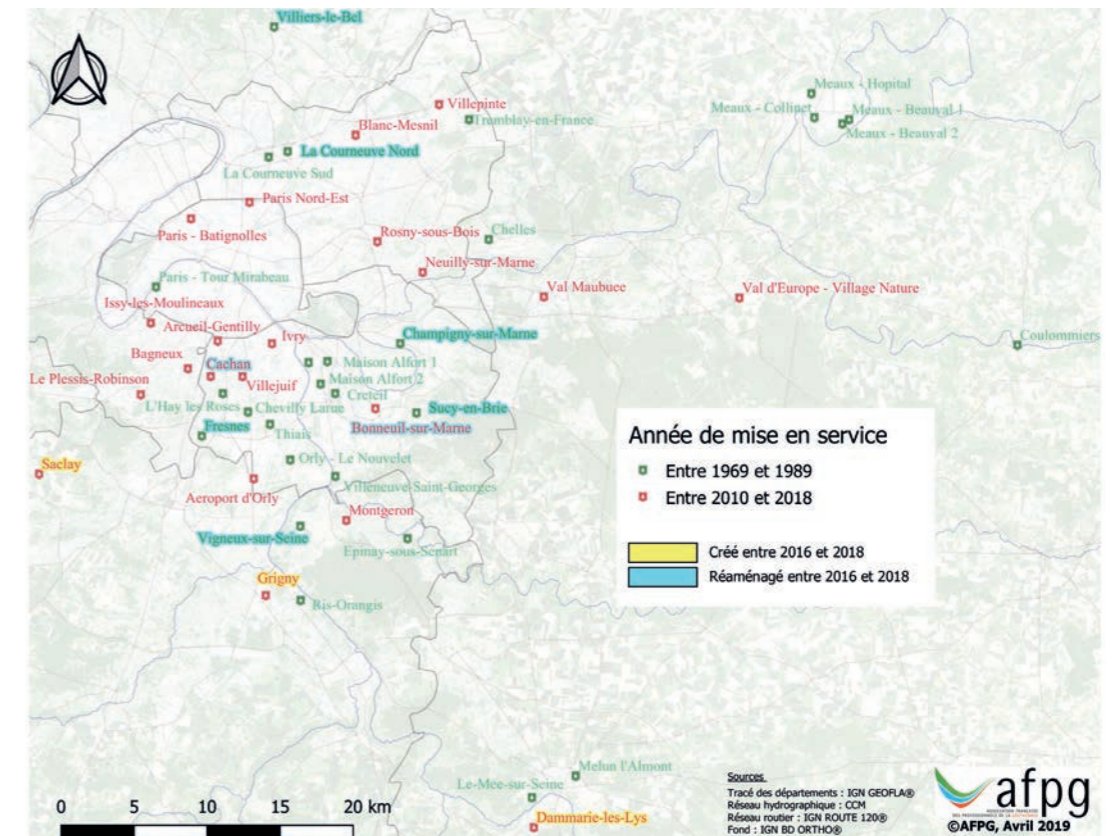
La plus exploitée est celle des calcaires du Dogger, dont les températures varient entre 56°C et 85°C à l'aplomb de la région Île-de-France, entre 1600 et 2300 m de profondeur.

Viennent ensuite les eaux présentes dans les sables de l'Albien (environ 650 m de profondeur) et du Néocomien (environ 850-1000 m de profondeur) qui sont également utilisées pour des réseaux de chaleur et systématiquement assistés par des PAC du fait de leurs températures (entre 28°C et 38°C dans le centre du Bassin Parisien).

Île-de-France est la région présentant **la plus grande densité d'opérations de géothermie au monde** :

- 46 au niveau du Dogger, avec l'objectif d'une multiplication par deux dans les douze prochaines années
- 6 pour l'Albien et le Néocomien : Paris Mirabeau, Issy-les-Moulineaux, Le Plessis Robinson, Paris-Batignolles, Saclay 1 et Saclay 2

FIG 27 | Localisation des réseaux de chaleur géothermiques en Île-de-France (AFPG)



## ZOOM SUR... Le Dogger : un aquifère exploité depuis les années 70

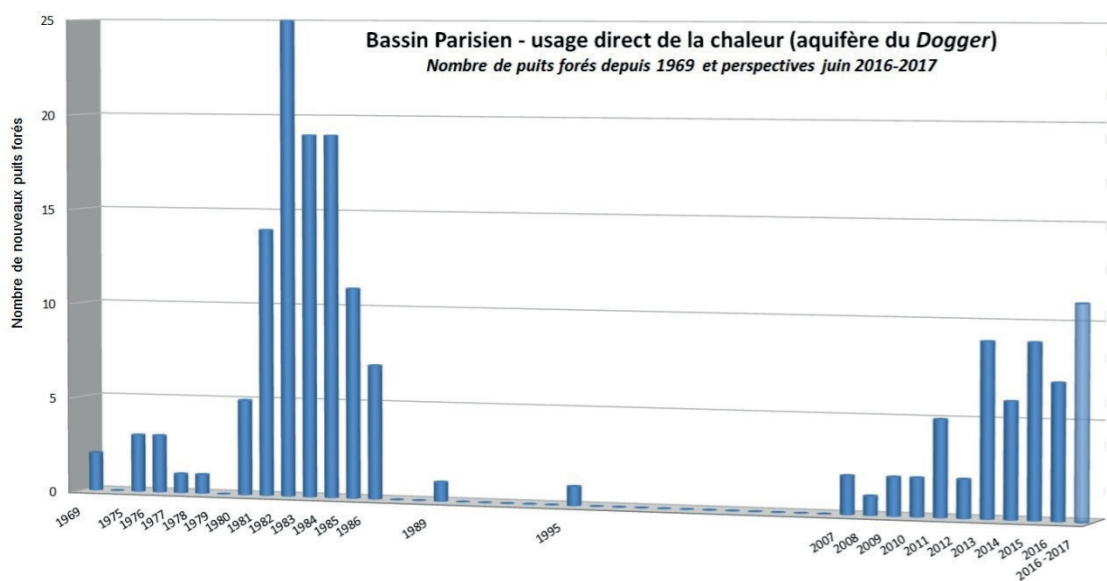
Le Dogger constitue la principale ressource du Bassin Parisien, qui a pu bénéficier de ses caractéristiques particulièrement favorables pour atteindre sa position de leader mondial dans le domaine des réseaux de chaleur géothermiques.

Les eaux du Dogger sont chargées en sels minéraux et sulfures qui ont une capacité de corrosion sur les matériaux de la boucle géothermale. Afin de minimiser le phénomène de corrosion, un traitement inhibiteur de corrosion est mis en œuvre sur l'eau géothermale. Une autre possibilité est le recours à des échangeurs à plaques en titane, mais aussi à des matériaux non métalliques (réseaux et tubage résines, fibre de verre...). Un exemple récent est le nouveau puits de production de Bonneuil-sur-Marne, foré en 2018 en remplacement de l'ancien.

Cette opération est un bon exemple des progrès réalisés depuis une quarantaine d'années. Les forages réalisés dans les années 80, du fait de leur durée de vie, ont besoin d'être réhabilités. Dans certains cas, il faut réaliser un nettoyage mécanique et hydraulique du puits, ou, de manière plus complexe, placer un nouveau tubage de diamètre inférieur dans le puits (rechemisage). Dans d'autres cas, il faut forer de nouveaux puits pour permettre à l'exploitation de conserver, voire d'améliorer sa puissance thermique.

A ce jour, il existe **46 opérations de géothermie profonde alimentées par les eaux du Dogger**. On peut distinguer 2 phases : les débuts de l'exploitation dans les années 1970 et 1980 (premier doublet réalisé en 1969 à Melun) ; puis une reprise de l'activité depuis 2007 (grâce aux mesures du Grenelle de l'Environnement), pour réhabiliter certains puits et en forer de nouveaux. Parmi les nouveaux puits forés depuis 2007, certains ont permis à des centrales et des réseaux déjà existants de poursuivre l'exploitation de l'énergie géothermique.

FIG 28 | Histogramme des forages de puits géothermiques au Dogger entre 1969 et projection à 2017 (BRGM, 2016)



Depuis 2016, 3 nouvelles opérations (doublet + réseau de chaleur) ont vu le jour, et 8 autres ont été réaménagées.<sup>9</sup>

La notion de réseaux « réaménagés » ou « rééquipés » regroupe des situations diverses : par exemple la transformation de deux doublets en un seul (comme à Cachan), ou le forage de nouveaux doublets avec l'abandon des anciens (comme à Vigneux).

FIG 29 | Réseaux de chaleur géothermiques : réalisations en Île-de-France entre 2016 et 2018 (AFPG)

Nom du site	Puissance géothermique installée (MWth)	Production géothermique en 2018 (MWh/an)	Production totale de chaleur en 2018 (MWh/an)	Pourcentage d'énergie géothermique dans la production	Equivalent-logements
<b>NOUVEAUX RÉSEAUX</b>					
<b>Dammarié-les-Lys (77)</b>	12	35 856	40 648	88%	3 871
<b>Saclay (91)</b>	5	0	0	N.C.	0
<b>Grigny (91)</b>	10	0	0	N.C.	0
<b>ANCIENS RÉSEAUX RÉÉQUIPÉS</b>					
<b>Vigneux-sur-Seine (91)</b>	10	11 274	36 497	31%	3 476
<b>La Courneuve Nord (93)</b>	4,1	25 000	29 625	84%	2 821
<b>Thiais (94)</b>	10	27 328	36 998	74,6%	3 524
<b>Champigny sur Marne (94)</b>	10,1	56 703	81 265	70%	7 740
<b>Fresnes (94)</b>	7,5	43 996	93 811	47%	8 934
<b>Bonneuil-sur-Marne (94)</b>	10	0	36 500	N.C.	3 476
<b>Cachan (94)</b>	18	N.C.	81 980	N.C.	7 808
<b>Villiers-le-Bel (95)</b>	6,22	9 714	83 172	12%	7 921

## Bilan des installations du Bassin Parisien

Au niveau du Bassin Parisien, il existe également 5 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.

Au total, le Bassin Parisien comporte 57 installations de géothermie profonde, délivrant de la chaleur à plus de **220 000 équivalents-logements**<sup>10</sup>, ce qui correspond à près de **600 000 personnes chauffées**.<sup>11</sup>

FIG 30 | Bilan des installations de chaleur issue de la géothermie profonde dans le Bassin Parisien (AFPG)

Département	Nombre d'opérations	Puissance géothermique installée (MWth)	Production géothermique en 2018 (MWh/an)	Production totale de chaleur en 2018 (MWh/an)	Part de la géothermie dans la production de chaleur	Equivalent-logements
<b>Paris (75)</b>	3	14,7	17 472	27 881	63%	2 655
<b>Seine-et-Marne (77)</b>	12	108,4	359 817	510 049	71%	48 576
<b>Essonne (91)</b>	7	61,0	86 520	230 043	38%	21 909
<b>Hauts-de-Seine (92)</b>	3	22,7	33 980	41 063	83%	3 911
<b>Seine-Saint-Denis (93)</b>	7	69,2	237 829	218 486	109%	20 808
<b>Val-de-Marne (94)</b>	19	208,3	608 393	1 239 929	49%	118 088
<b>Val-d'Oise (95)</b>	1	6,2	9 714	83 172	12%	7 921
<b>SOUS-TOTAL IDF</b>	<b>52</b>	<b>490,5</b>	<b>1 353 725</b>	<b>2 350 623</b>	<b>58%</b>	<b>223 869</b>
<b>Indre (36)</b>	1	4	10 600	12 700	83%	1 210
<b>Meurthe-et-Moselle (54)</b>	3	N.C.	5 861	6 161	95%	587
<b>Moselle (57)</b>	1	N.C.	5 233	5 233	100%	498
<b>TOTAL BASSIN PARISIEN</b>	<b>57</b>	<b>494,5</b>	<b>1 375 419</b>	<b>2 374 717</b>	<b>58%</b>	<b>226 164</b>

10 - Calcul à partir de la production totale des réseaux comportant une part importante de géothermie dans leur mix énergétique

11 - En considérant une densité d'occupation de 2,3 habitants par logements (Sources : Le parc de logements en France au 1<sup>er</sup> janvier 2017, INSEE ; Bilan démographique 2018, INSEE)

9 - Sont comptabilisées comme « nouvelles opérations » uniquement les installations créées ex nihilo, c'est-à-dire implantées dans des communes sans réseau de chaleur géothermique préexistant.

### 3.1.b.ii) 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 de thermes. Les températures varient entre 25°C et 73°C pour la ressource géothermale.

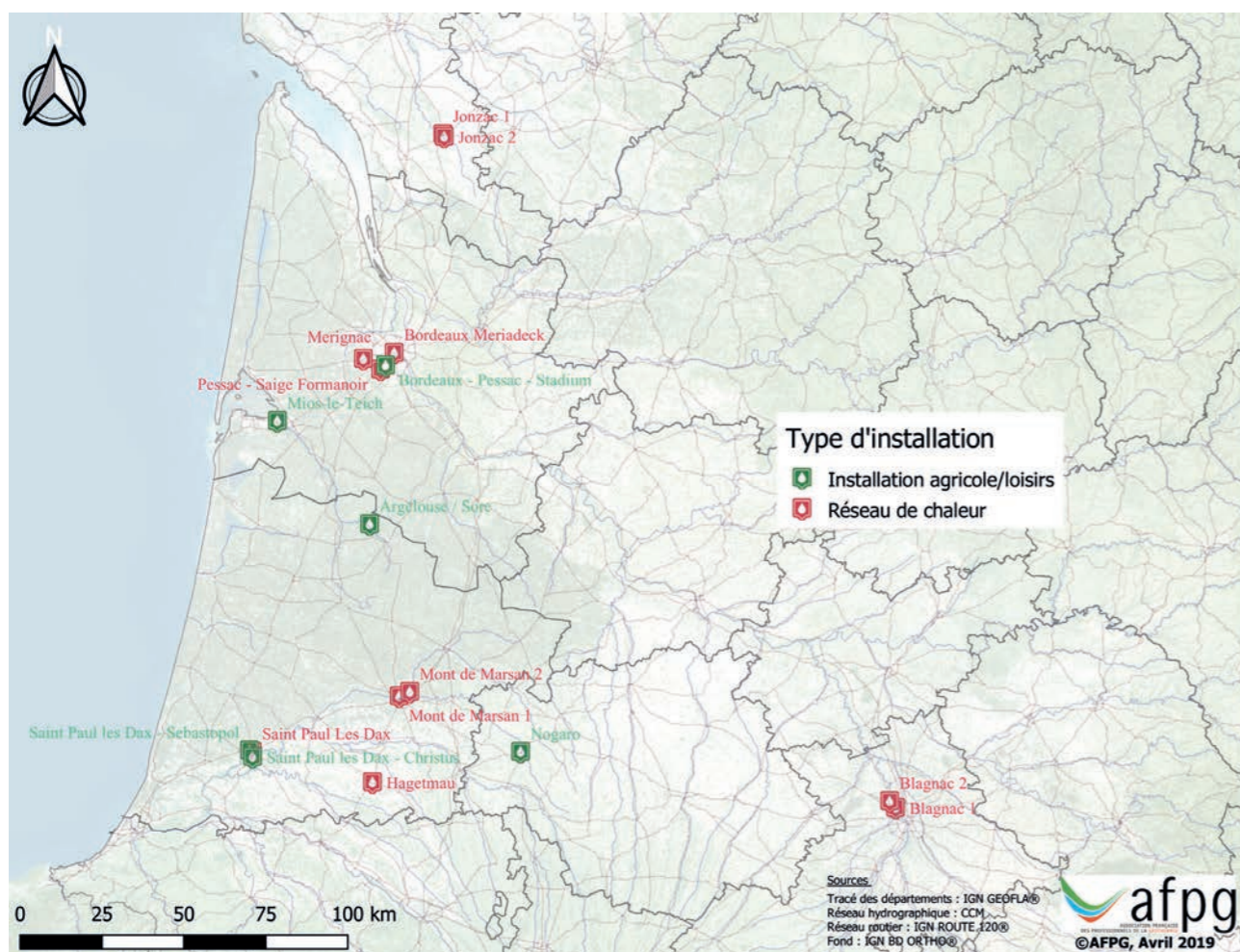
Certaines installations ont la particularité de bénéficier de la **réhabilitation d'anciens forages pétroliers**, reconvertis pour l'utilisation de l'eau géothermale. Cette pratique est extrêmement intéressante en termes d'investissement, mais elle nécessite que les utilisateurs potentiels de la chaleur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

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

FIG 31 Bilan des installations de chaleur issue de la géothermie profonde dans le Bassin Aquitain (AFPG)

Département	Nombre d'opérations	Puissance géothermique installée (MWth)	Production géothermique en 2018 (MWh/an)	Production totale de chaleur en 2018 (MWh/an)
Charente-Maritime (17)	2	3,1	14 475	23 744
Haute-Garonne (31)	2	5,2	N.C.	14 000
Gers (32)	1	N.C.	18 494	18 494
Gironde (33)	7	14,6	87 732	102 532
Landes (40)	5	5,2	51 066	55 766
<b>TOTAL BASSIN AQUITAIN</b>	<b>17</b>	<b>28,1</b>	<b>171 767</b>	<b>214 536</b>

FIG 32 Localisation des sites de production de chaleur géothermique dans le Bassin Aquitain en fin 2018 (AFPG)



### 3.1.b.iii) Les autres ressources exploitées : Couloir rhodanien, Limagne et fossé rhénan

Parmi les 5 autres bassins sédimentaires français, seuls trois sont actuellement exploités pour la géothermie profonde. Dans le **couloir rhodanien**, deux sites sont en activité pour chauffer des serres, des piscines ou faire de la pisciculture avec des températures d'eau géothermale comprises entre 30 et 52°C. En **Limagne**, deux sites sont recensés pour chauffer des serres avec une température de 43°C. Le **fossé rhénan** en Alsace possède, du fait de sa situation géologique particulière, un potentiel géothermique extrêmement intéressant, permettant de valoriser des eaux à plus de 150 °C sous forme de chaleur ou même d'électricité (voire les deux en même temps par cogénération).

FIG 33 Bilan des installations de chaleur issue de la géothermie profonde hors Bassins Parisien et Aquitain (AFPG)

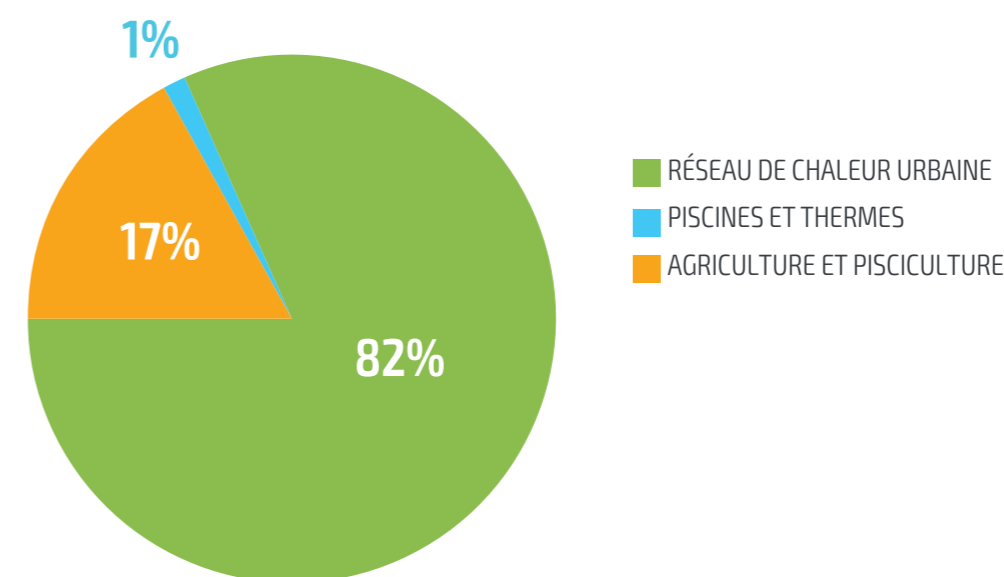
Département	Nombre d'opérations	Production géothermique en 2018 (MWh/an)	Production totale de chaleur en 2018 (MWh/an)
Languedoc-Roussillon (34)	2	34 476	34 476
Auvergne (63)	2	11 512	11 512
Grand-Est (67)	1	192 000	720 000
<b>TOTAL</b>	<b>5</b>	<b>237 988</b>	<b>765 988</b>

### 3.1.c Etat de la filière et projection

Au total, la chaleur produite par géothermie profonde en France en 2018 représente **1,75 TWh**.

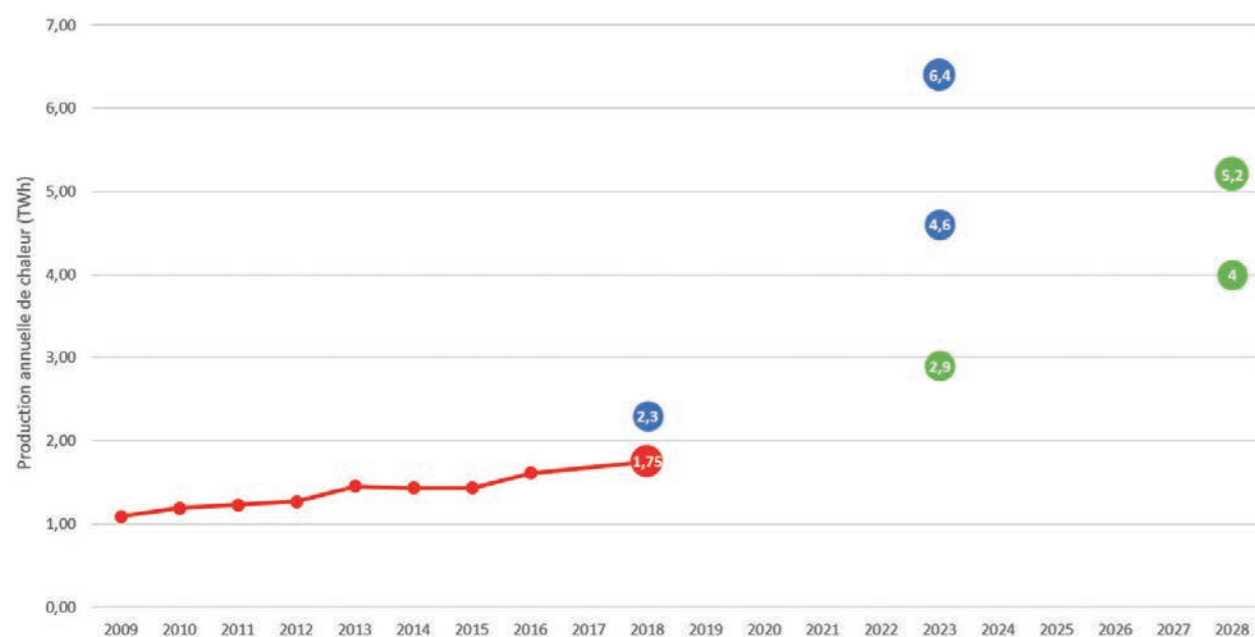
La répartition par usage est la suivante :

FIG 34 Répartition de la chaleur produite par géothermie profonde en France en 2018 (AFPG)



Afin de contextualiser ces données, il est intéressant de les comparer aux objectifs fixés par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire dans sa PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie). Il est à noter qu'au vu du rythme actuel de la progression de la filière géothermie profonde, les objectifs fixés pour 2023 par la PPE 2016 ont été revus à la baisse.

FIG 35 Bilan et perspectives (PPE) de la production de chaleur par géothermie profonde en France <sup>12</sup>



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

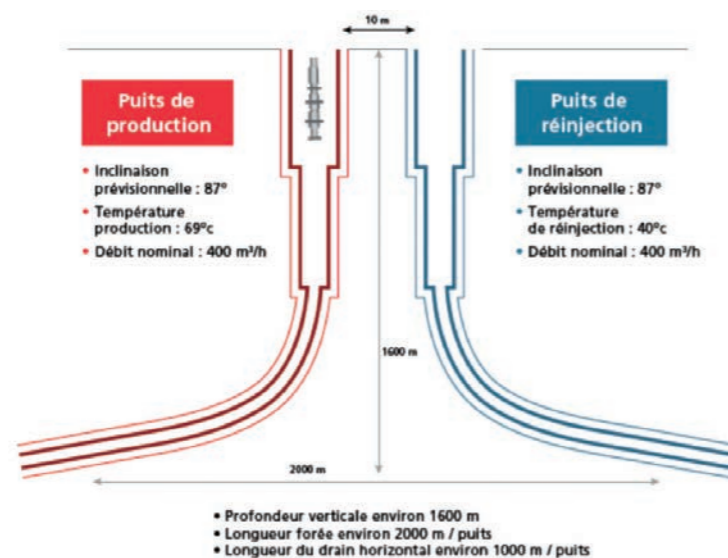
• Poursuivre l'innovation dans la conception de nouveaux projets

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.

L'EGS (Enhanced Geothermal System), par exemple, ouvre la voie à l'exploitation de nouveaux réservoirs dans des zones continentales naturellement fracturées.<sup>13</sup>

Le forage sub-horizontale du doublet de Cachan, réalisé en 2017, constitue également une avancée majeure pour la filière. Ce chantier inédit pour la géothermie dans le monde met à l'œuvre une technique permettant d'augmenter la production d'un doublet géothermique jusqu'à 450m<sup>3</sup>/h, ce qui représente une progression d'environ 50% par rapport aux derniers doublets réalisés en gros diamètre. Cela est rendu possible grâce à une architecture innovante des puits : ils sont en effet 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.<sup>14</sup>

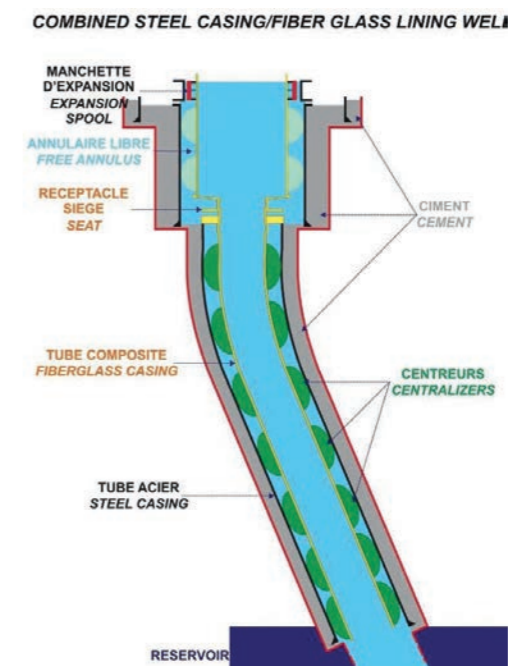
FIG 36 Schéma de principe du forage sub-horizontale de Cachan (Dalkia)



12 - Les chiffres de production 2009-2016 proviennent du projet de PPE du Ministère. Le chiffre de 2018 correspond à la production de chaleur estimée dans le cadre de notre étude  
13 - Pour plus de détails : voir « Zoom sur... La centrale ECOGI : une avancée majeure pour la production de chaleur industrielle », P 22  
14 - Source : Dalkia, Géothermie : 1er forage sub-horizontale au monde

Enfin, 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 à la corrosion bien supérieure 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'Hay-les-Roses en 2015, et lors du forage du nouveau puits de Bonneuil-sur-Marne en 2018.<sup>15</sup>

FIG 37 Principe de tubage composite installé à Bonneuil-sur-Marne (GPC IP)



• Valoriser les aquifères profonds peu connus

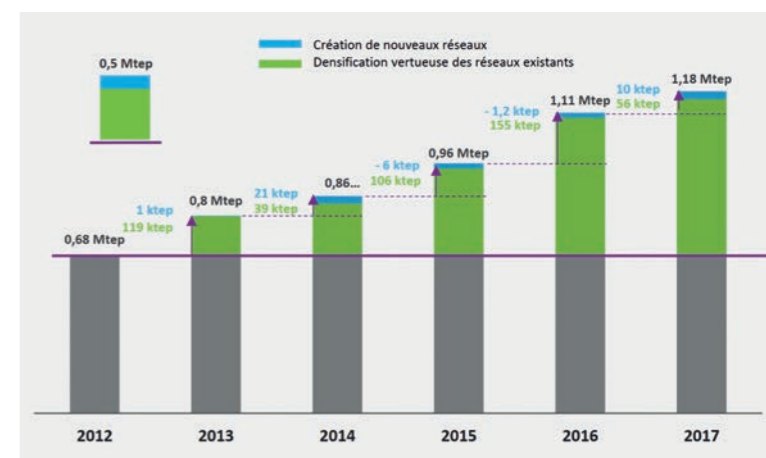
Il existe à ce jour un énorme potentiel de chaleur géothermique encore sous-exploité – voir non exploité – dans certaines nappes du Bassin Parisien (Albien, Néocomien, Trias), mais aussi au niveau de Bassin Aquitain et dans des régions telles que le Grand Est, les Hauts-de-France ou la Provence-Alpes-Côte d'Azur. Dans cette optique, les fonds de garantie couvrant les aléas géologiques jouent un rôle essentiel (fonds SAF environnement, fonds d'exploration des aquifères profonds préconisé par la PPE, fonds GEO-DEEP en cours de déploiement).

• Développer 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 (39,5 TWh de chaleur renouvelable livrée par les réseaux en 2030, contre 14 TWh aujourd'hui dont 1,5 TWh issus de la géothermie<sup>16</sup>). Dans cette optique, le déploiement de nouveaux réseaux de chaleur verte doit s'accompagner d'un important travail de « verdissement » des réseaux existants. En 2017, encore **44 % de la chaleur livrée par réseau était issue de sources fossiles**.<sup>16</sup>

Dans leur enquête de 2018 sur les réseaux de chaleur et de froid, le SNCU et la Fedene montrent d'ailleurs que l'augmentation de la quantité de chaleur renouvelable livrée ces dernières années est avant tout due à ce qu'ils appellent une **densification vertueuse** des réseaux existants, c'est-à-dire « le raccordement de clients à proximité de l'existant, l'extension de la couverture et l'augmentation de la part des énergies vertes des réseaux existants »

FIG 38 Evolution des livraisons de chaleur renouvelable et de récupération entre 2012 et 2017 (SNCU, FEDENE)



15 - Source : ADEME-BRGM, Guide de bonne pratique d'un forage géothermique en aquifère profond en Ile-de-France (Fiche 033 : utilisation des tubages en matériau composite en géothermie profonde)  
16 - Source : SNCU, Les réseaux de chaleur et de froid - Chiffres clés, analyses et évolution, édition 2018

A l'occasion du groupe de travail « chaleur et froid renouvelables » initié en mars 2019 par la secrétaire d'Etat auprès du ministre de la Transition écologique et solidaire Emmanuelle Wargon, l'AFPG a présenté une évaluation du potentiel de verdissement des réseaux actuels par géothermie. **Sur les 183 réseaux à énergie majoritairement fossile listés dans l'annuaire Via Sèva et complétés par les données en possession de ses membres, l'AFPG estime que près d'un tiers d'entre eux présentent un potentiel de production de chaleur par géothermie profonde** (présence d'aquifères profonds et/ou de bassins sédimentaires). Pour les réseaux restants et/ou les réseaux à besoins de froid, le recours à la géothermie est tout de même possible pour un grand nombre d'entre eux à travers des boucles d'eau tempérée. Les partenaires du club de la Chaleur renouvelable se sont donnés comme objectif de collaborer étroitement pour réussir la transition énergétique des réseaux identifiés.

### • Le complément de rémunération de la géothermie électrogène

Actuellement en cours de discussion dans le cadre de la nouvelle PPE, le complément de rémunération est un outil de développement indirect de la filière chaleur. L'objectif de ce dispositif est de développer sur les 10 ans de la PPE une vingtaine de projets de géothermie électrogène (130 MW électriques) qui pourraient cogénérer plus de 500 MW thermiques, sous forme de chaleur à destination de réseaux urbains (chauffage collectif) ou de réseaux ruraux (chauffage de procédés de type maraîchage, séchage, élevage...). La mise en place d'un complément de rémunération serait donc une réelle opportunité pour atteindre voire dépasser les objectifs de chaleur géothermiques de la nouvelle PPE.

## 3.1.d Les outils à la disposition de la filière française pour soutenir le développement des réseaux de chaleur géothermiques

### • Fonds SAF Environnement <sup>17</sup>

Mis en place au début des années 80 à l'initiative du Ministère de l'Industrie, ce fonds de garantie a été confié à la SAF Environnement – une filiale de la Caisse des Dépôts. Il couvre financièrement les maîtres d'ouvrage des aléas liés au « risque géologique », que l'on distingue en deux catégories :

- **Le risque Court Terme** : il s'agit du risque de ne pas trouver la ressource géologique escomptée (température et/ou débit insuffisants), ce qui a un impact sur la rentabilité du site.
- **Le risque Long Terme** : il s'agit des risques liés à l'exploitation du fluide géothermal (corrosion, colmatage, baisse de température et/ou de débit).

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

Ce dispositif innovant a joué un rôle crucial dans le développement des réseaux de chaleur géothermiques en Île-de-France entre 1981 et 1986, puis dans la reprise des activités depuis 2007, en faisant aujourd'hui la région la plus « géothermisée » au monde.

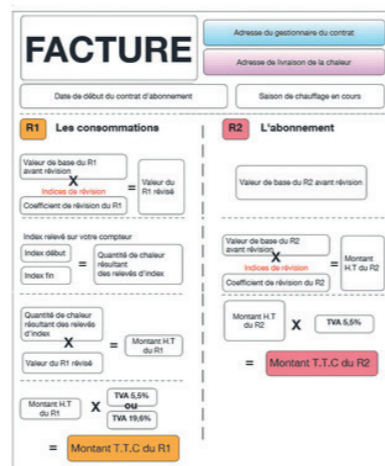
Les acteurs de la filière envisagent désormais l'extension de ce fonds de garantie pour l'adapter à **l'exploitation du potentiel des aquifères peu connus**. Cette initiative est inscrite dans le nouveau projet de la PPE (*Programmation Pluriannuelle de l'Énergie*).

### • 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%)

FIG 39 | Prix de la chaleur et facturation (FEDENE)



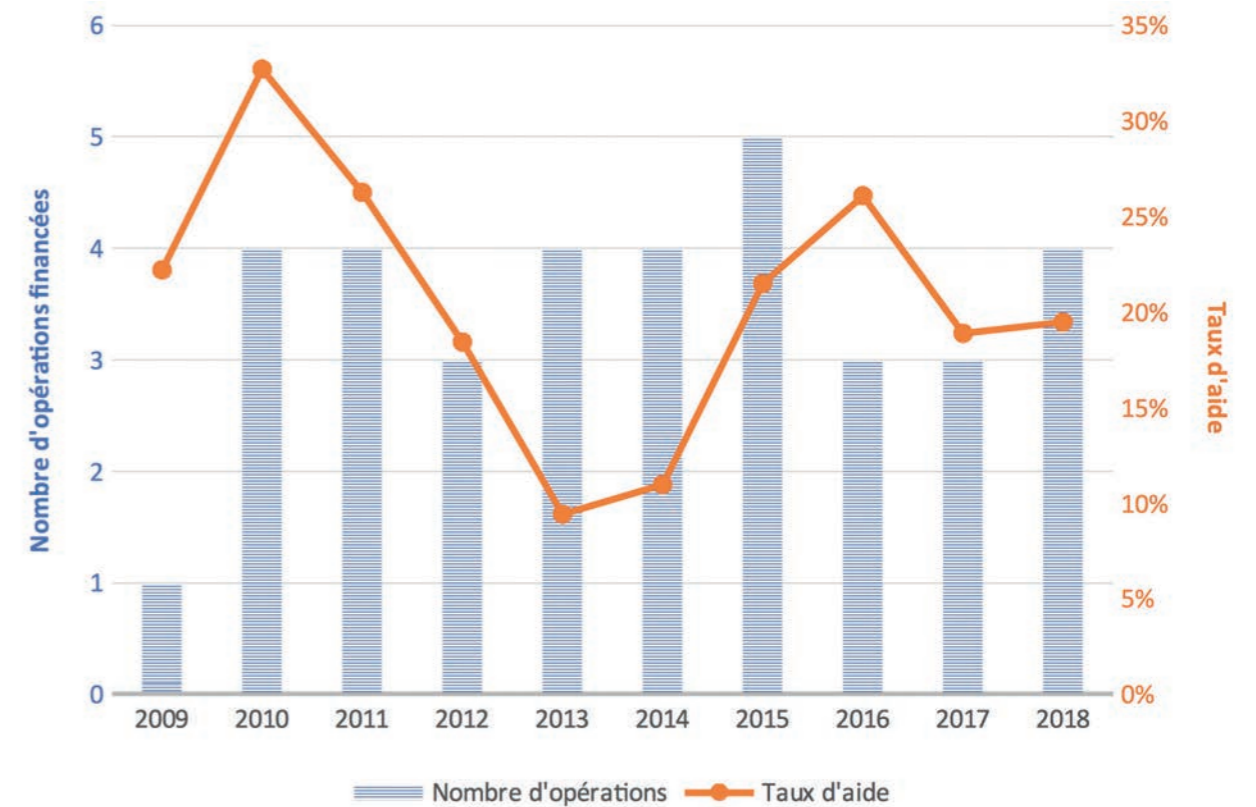
17 - Source : ADEME, Historique et bilan détaillés du système de Garantie Court et Long Termes des opérations de chaleur géothermique sur aquifères profonds mis en place en France au début des années 1980

### • Fonds Chaleur

Dans le cas de la géothermie profonde, l'aide fournie par l'ADEME prend la forme de subventions. Elle est constituée d'une aide à la chaleur renouvelable, calculée par analyse du coût de revient et par comparaison avec une solution fossile de référence, à laquelle peut être associée 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'EnR&R supérieur à 50% pour les réseaux.<sup>18</sup>

Entre 2009 et 2018, ce sont 35 installations de géothermie profonde qui ont bénéficié de l'aide du Fonds Chaleur, pour un montant d'aide total de près de 90 000 000 €.

FIG 40 | Bilan 2009 – 2018 des opérations de géothermie profonde financées par le Fonds Chaleur (AFPG d'après données ADEME)



### • 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 (bureaux d'études, exploitants, foreurs, organismes publics...). Mis en place en 2015 à l'initiative de l'AFPG, de l'ADEME et du BRGM, 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.

18 - Source : ADEME, Fiche Fonds Chaleur 2019 – Secteur géothermie sur aquifère profond



## 3.2 LES CENTRALES ÉLECTROGÈNES

### 3.2.a Fonctionnement 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 de manière économiquement viable.

Les réservoirs géothermiques se situent dans des contextes géologiques très différents, qu'on regroupe généralement en trois grands types.

#### 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. On y trouve un fluide géothermal (eau chargée en minéraux, vapeur et parfois quelques faibles quantités de gaz non condensables) qui circule dans des réservoirs naturels fortement fracturés et qui se réchauffe au contact des roches. C'est le cas de la Toscane en Italie, de l'Islande ou de la Guadeloupe avec la centrale de Bouillante par exemple.

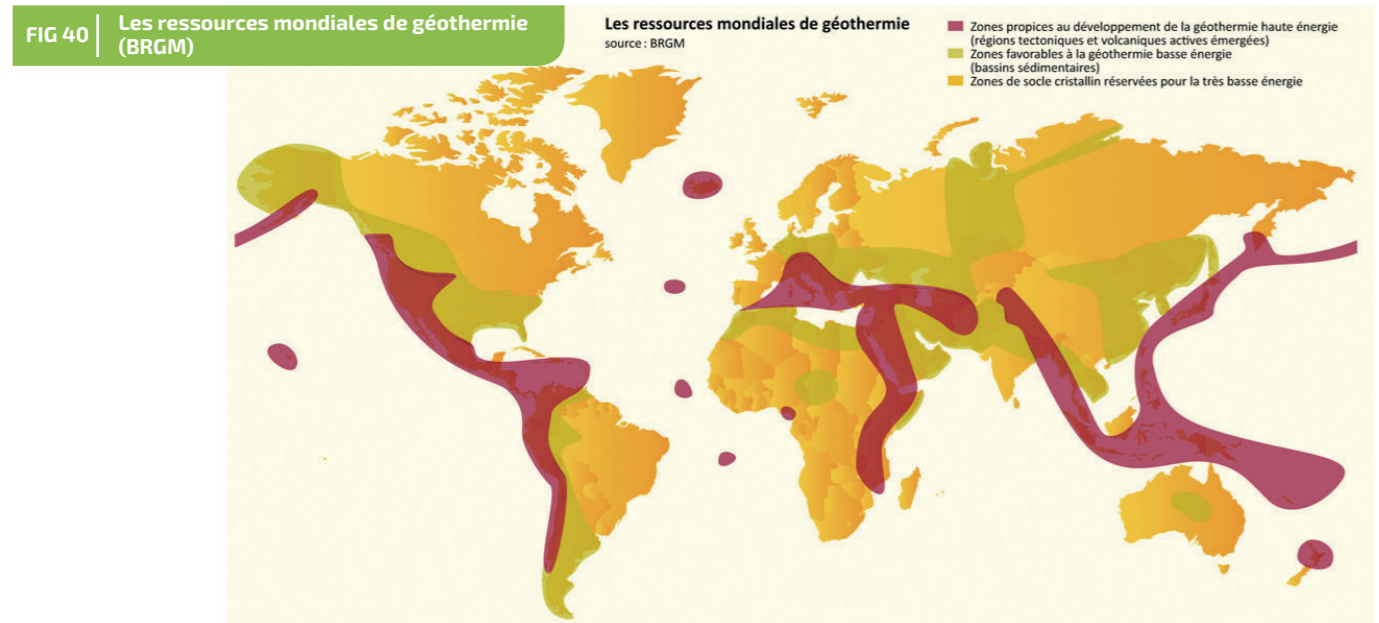
#### Les réservoirs fracturés situés au niveau des bassins d'effondrement

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, en augmentant la perméabilité, d'améliorer la circulation du fluide dans ces réservoirs géothermiques particuliers. Le nettoyage des sédiments qui obstruent les fractures souterraines naturelles est au cœur de cette technologie. 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.

#### Les réservoirs de type karstique

Ce type de réservoir peut se retrouver par exemple dans des bassins molassiques, comme celui qui se situe aux environs de Munich. Il s'agit de couches sédimentaires fortement perméables qui « plongent » en profondeur. Selon la profondeur visée, on peut obtenir une température relativement élevée.

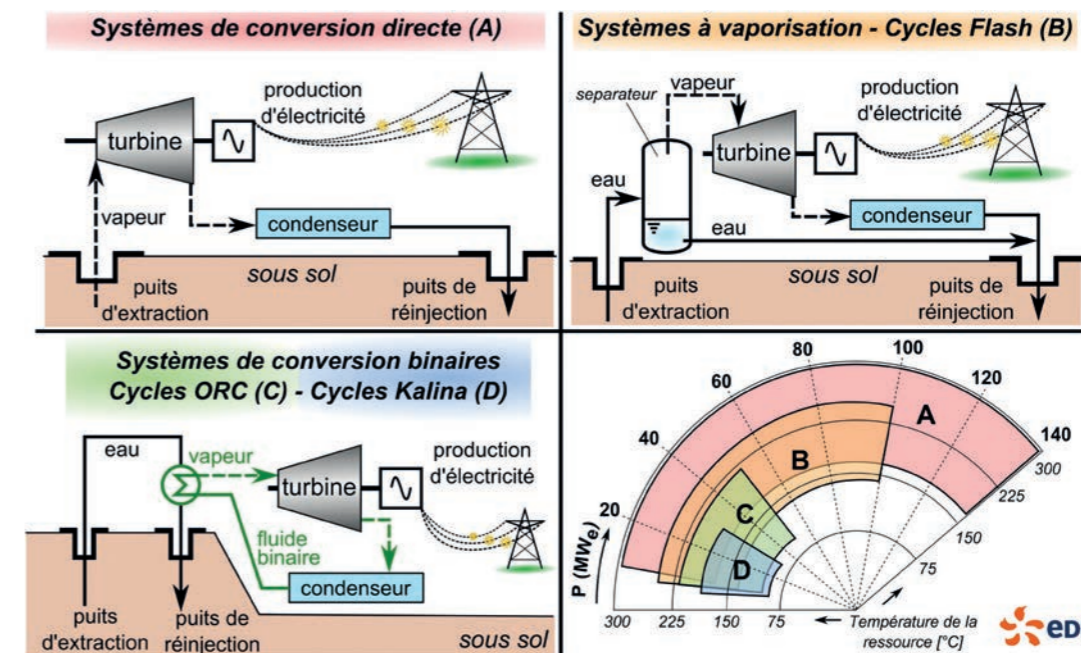


Différents systèmes existent pour valoriser la ressource géothermale profonde en électricité :

- directement avec la vapeur sèche issue naturellement de la ressource que l'on extrait du sol. Les gisements de vapeur sèche restent très peu nombreux ;
- par une centrale à **vaporisation par flash**. Le fluide géothermal présent dans le réservoir est généralement à dominante liquide et sous pression. Lors de sa remontée dans le forage, il perd de la pression et se vaporise partiellement ; c'est ce que l'on appelle la vaporisation par flash (*single-flash* en anglais). En tête de puits, le mélange eau-vapeur est séparé (dans un séparateur) et la vapeur est turbinée pour produire de l'électricité. L'eau séparée est soit réinjectée dans le sous-sol, soit admise dans une enceinte appelée *ballon de flashing* (ou *flash vessel* en anglais) dans laquelle on opère un abaissement de pression du fluide pour produire un supplément de vapeur (de la vapeur basse pression que l'on peut injecter alors dans les derniers étages de la turbine), tandis que l'eau résiduelle est réinjectée dans le sous-sol – on parle dans ce cas de détente *double-flash* (c'est le cas à Bouillante, pour l'unité Bouillante 1 qui est la plus petite installation au monde avec cette configuration). Le double-flash est généralement destiné aux ressources géothermales aux températures les plus élevées et concerne surtout de grosses unités ;
- en apportant de la chaleur à un fluide secondaire à bas point d'ébullition, qui fait ensuite tourner une turbine lors d'un cycle de Rankine (ORC : *Organic Rankine Cycle*). On parle alors de **centrale de type binaire** ;
- par la combinaison d'une des deux premières méthodes (flash ou vapeur sèche) avec une centrale de type binaire, ce qui donne lieu à une **centrale dite hybride**.

Le choix du système de production d'énergie dépend essentiellement de la température de la ressource. Lorsqu'elle est comprise entre 90°C et 180°C - situation courante pour les centrales utilisant l'EGS -, on utilise plutôt une centrale binaire dont la puissance électrique installée est typiquement comprise entre 1 MWe et 60 MWe. Les autres systèmes (vaporisation par flash, etc...) sont réservés à la valorisation de ressources supérieures à 180°C, donc plutôt en zone volcanique. Ils concernent des puissances typiquement comprises entre 10 MWe et 140 MWe. Toutefois, si le fluide géothermal est trop agressif (corrosion, dépôt, dégazage), il n'est parfois pas possible de le valoriser par flash. Dans ce cas, un cycle binaire s'impose, car il n'y a alors pas de contact entre le fluide et la turbine.

**FIG 41 | Les systèmes de conversion utilisés en fonction de la température de la ressource (EDF)**



## 3.2.b Les centrales géothermiques électrogènes en fonctionnement en France

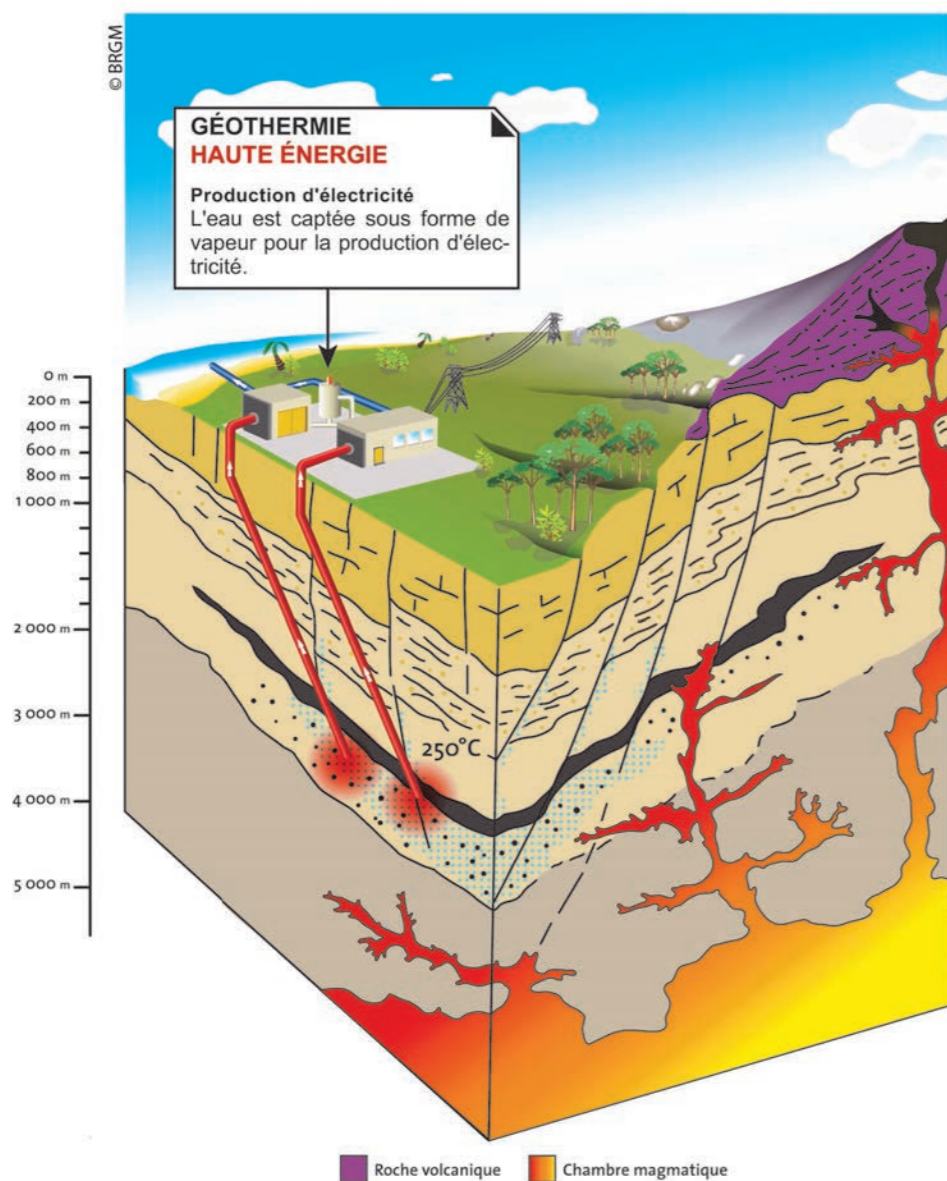
En 2019, la France compte deux installations géothermiques électrogènes : la centrale de Bouillante en Guadeloupe et celle de Soultz-sous-Forêts en Alsace.

### 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 forages d'essais réalisés dans les années 1960, qui ont révélé la présence d'une ressource à une température d'environ 250°. À partir de 2000, de nouvelles études ont débuté pour augmenter la puissance installée de 11 MWe supplémentaires. 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€. En 2016, l'exploitation de la centrale de Bouillante, unique unité française de production électrique en milieu volcanique, a été transférée au groupe américain ORMAT.

**La centrale de Bouillante, avec sa puissance installée totale de 15 MWe, a produit 112 GWh d'électricité en 2017, 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 1000m et 1600m. Cette nouvelle unité utilisera la technologie ORC, et devrait être mise en service en 2022, apportant une puissance électrique supplémentaire de 10 MWe.

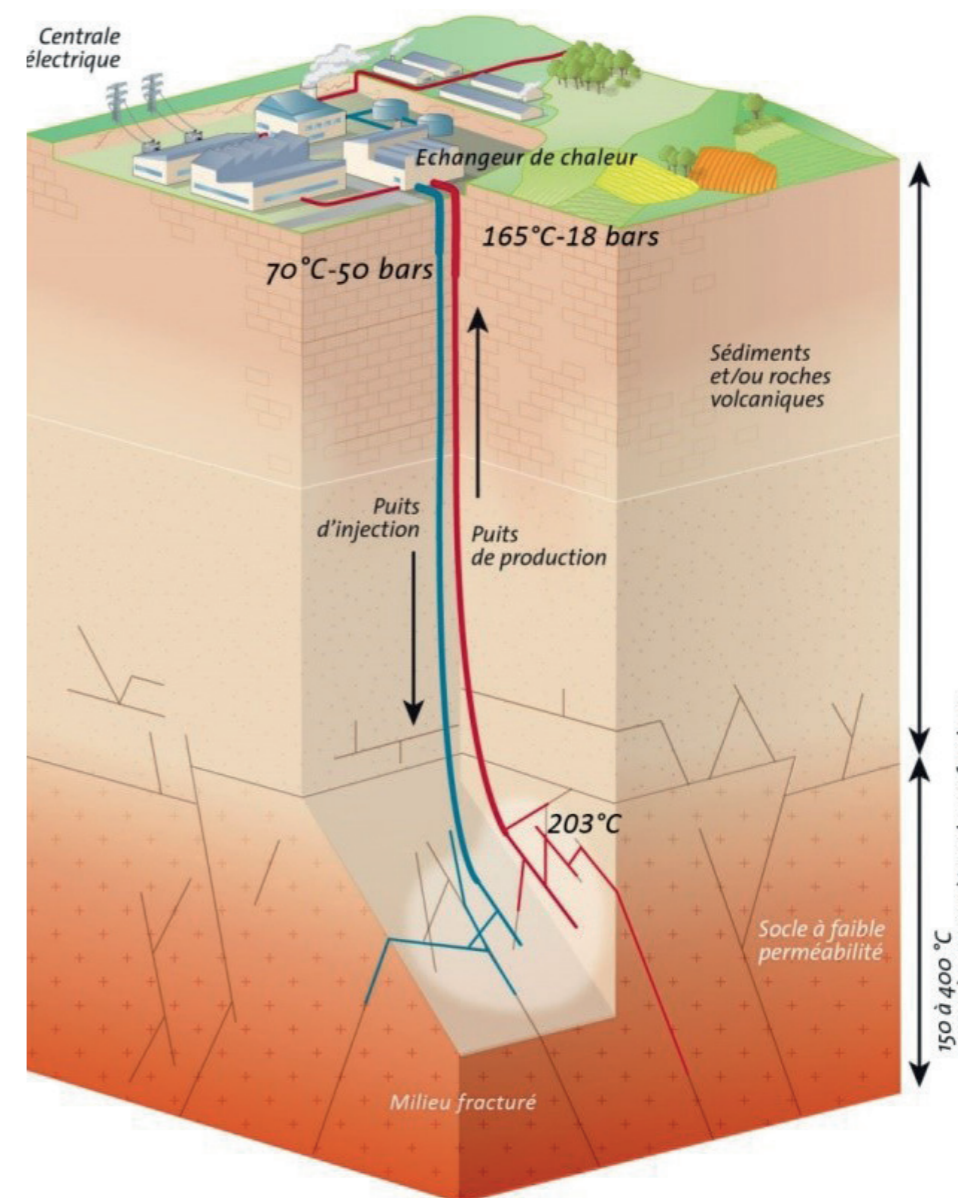
FIG 42 | Principe de fonctionnement géologique de la centrale de Bouillante (©ADEME-BRGM)



### 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 MW, reconfigurée en 2016. Cette centrale utilise la technologie ORC. Les travaux de recherche menés à Soultz ont permis de développer le concept EGS et les enseignements tirés du pilote scientifique ont pu être capitalisés pour concevoir de futurs projets industriels comme ce fut le cas en 2016 avec le projet de production de chaleur de Rittershoffen situé à une dizaine de kilomètres de Soultz. 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 ». Ce GEIE, créé en 1995 par Électricité de Strasbourg et Pfalzwerke, son homologue allemand du Palatinat, a repris en 2001 le rôle de maître d'ouvrage du site. Il est aujourd'hui composé d'Électricité de Strasbourg et de l'opérateur allemand EnBW.

FIG 43 | Principe de fonctionnement d'une centrale EGS (ES Géothermie, 2015)



## 3.2.c Les projets en France

### Historique de la création du 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 GEO-DEEP ayant pour but de développer cette filière, particulièrement à l'export.



L'étude de structuration de cette filière a notamment mis en évidence que le frein principal au développement de nouveaux projets de géothermie profonde était le manque de couverture financière en cas d'échec du projet (risque de ne pas trouver la ressource géothermique escomptée pour mener à bien les projets). Ce risque, appelé « risque géologique », est en fait un risque financier. Pour mettre en évidence une ressource géothermique exploitable, il est en effet nécessaire de réaliser un ou plusieurs forages et donc d'engager des financements qui peuvent être importants (environ une dizaine de M€ pour une campagne de forages d'exploration en milieu volcanique, par exemple). Pour faire face à ce risque géologique et permettre à une filière française structurée de développer des projets de géothermie haute énergie en France et à l'Export, le Cluster GEODEEP et l'ADEME travaillent à l'élaboration de deux fonds de garantie :

#### • Fonds de garantie EGS Geodeep

Le fonds de garantie EGS Geodeep est destiné aux projets utilisant la technologie EGS. Fondé sur un système de royalties sur les ventes d'électricité produite une fois l'installation en place, il sera destiné à des projets situés sur le territoire français métropolitain et sera doté de financements public et privé d'une hauteur totale de 50 M€. Actuellement en cours de notification par la commission européenne, il devrait être opérationnel au 2ème semestre 2019.

#### • Fonds de garantie volcanique Geodeep

Le fonds de garantie volcanique sera créé pour développer des projets de géothermie volcanique sur le territoire français et plus largement dans les zones à fort potentiel à l'export. Il pourra donc être un levier pour promouvoir le savoir-faire français dans le domaine volcanique.

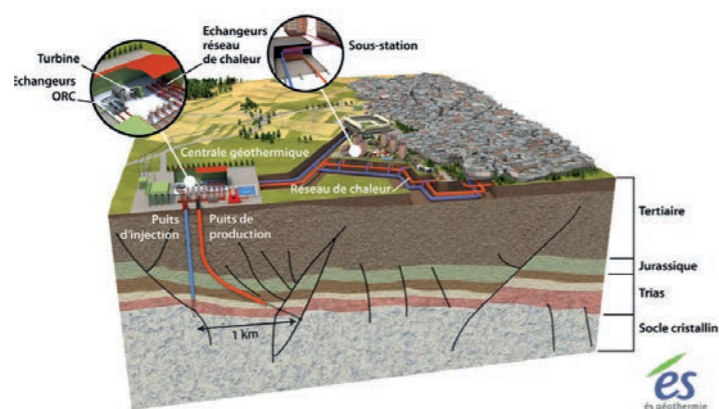
### Appel à Manifestation d'intérêt de l'ADEME

En parallèle de cette structuration de filière, l'ADEME avait lancé fin 2011 un Appel à Manifestation d'Intérêts (AMI) Géothermie, dans le cadre de l'action "Démonstrateurs en énergies renouvelables et décarbonées" des investissements d'avenir. Un projet dans le cadre de cet AMI est actuellement en cours : il s'agit du projet **Geotref**, localisé dans les Antilles en Guadeloupe. Piloté par la société Teranov et comprenant 2 autres entreprises et neuf laboratoires de recherche, il est surtout axé sur les méthodes d'exploration de réservoirs fracturés de type volcanique. Le site de Vieux-Habitants a été choisi pour héberger le démonstrateur de ce projet.

### Les projets en métropole

On appelle gîte « haute température » une exploitation pour laquelle la température de l'eau exploitée est supérieure à 150 °C. 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, ...).

FIG 44 | Principe du réseau de chaleur urbain à partir d'une centrale géothermique profonde de type EGS avec cogénération (ES Géothermie, 2015)

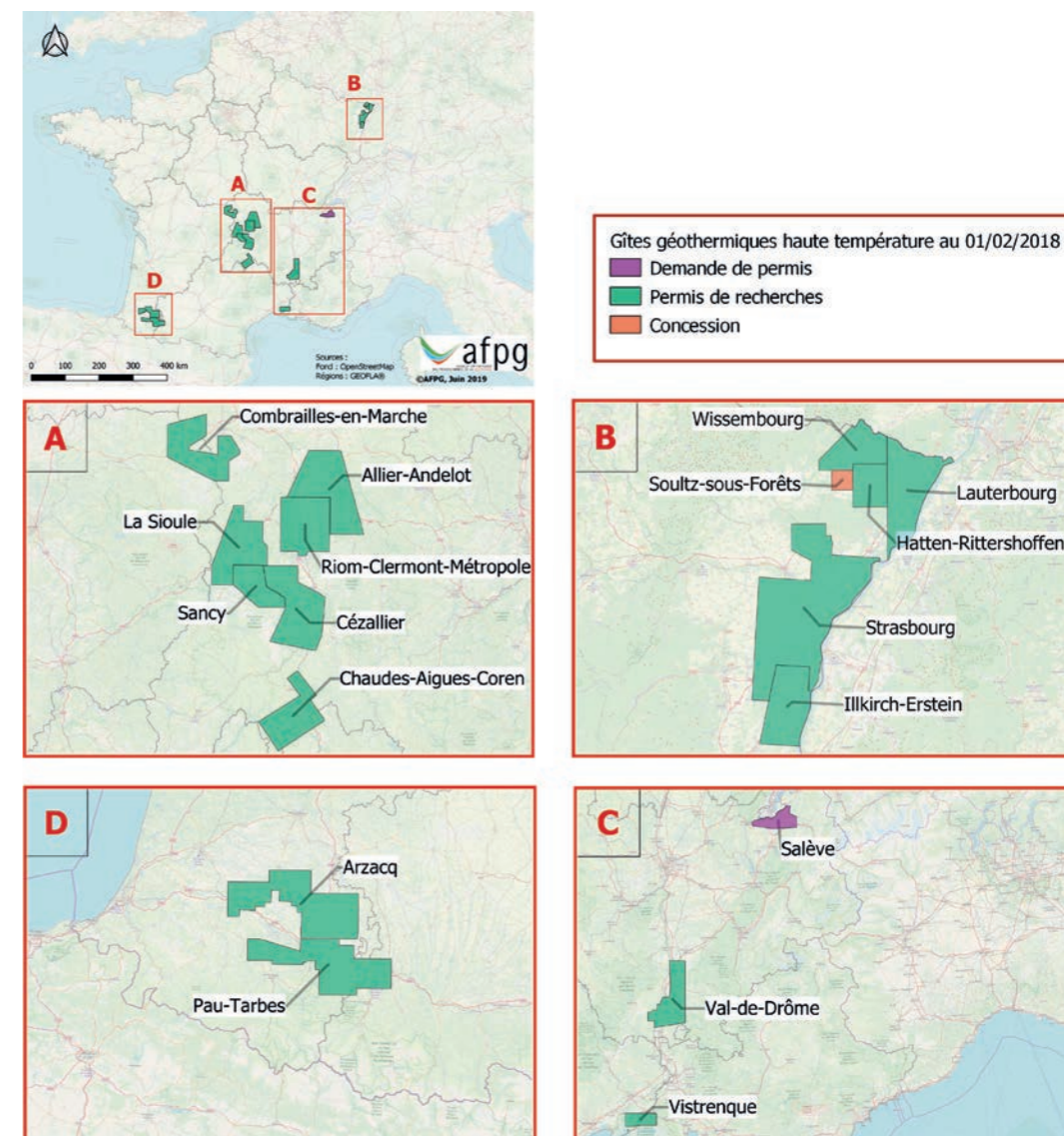


Actuellement le territoire métropolitain est exploré par les industriels pour des recherches de gîtes géothermiques de haute température. Ces pratiques sont encadrées par le code minier, à travers 2 titres miniers :

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

La cartographie des permis de recherche de gîtes géothermiques de haute énergie, délivrée par le Ministère de la Transition écologique et solidaire, indique la présence de **16 PER sur le territoire métropolitain**, ainsi que d'une demande de permis (site de Salève), d'une concession (site de Soultz-sous-Forêts) et d'une demande de concession (site de Hatten-Rittershoffen). Entre sa parution en février 2018 et le mois de juin 2019, les permis de Chaudes-Aigues-Coren et d'Allier-Andelot ont expiré, sans avoir été renouvelés.

FIG 45 | Cartographie des permis de recherche et concession pour des gîtes de géothermie haute température en métropole (AFPG d'après les données du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire)



Ces permis de recherche sont détenus par des entreprises membres de l'AFPG et du cluster GEODEEP. Il a donc été possible pour cette étude de marché de collecter des informations non publiques. Afin de respecter une certaine confidentialité, ces informations sont uniquement regroupées par zone géographique et non par projet.

Zone	Nom du permis	Date prévisionnelle de mise en service	Estimation de la puissance installée	Investissement prévisionnel
Alsace	Wissembourg Lauterbourg Illkirch-Erstein Strasbourg Hatten-Rittershoffen	2020 - 2028	55 MWe 120 MWth	345 M€
Massif Central et Limagne	Cézallier La Sioule Riom-Clermont-Métropole Sancy Combrailles-en-Marche	2023 - 2027	48 MWe 65 MWth	346 M€
Sud-Ouest	Pau-Tarbes Arzacq	2024 - 2028	13 Mwe 30 MWth	140 M€
Couloir Rhodanien et Haute Savoie	Val-de-Drôme Vistrenque	2021 - 2025	14 Mwe 30 MWth	140 M€

Si l'intégralité des projets fonctionne selon les estimations de puissances, alors la **France métropolitaine comptera d'ici 2028 environ 130 MWe et 250 MWth** 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.

### 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 et de la Martinique.

Deux demandes de permis 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.

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

FIG 46 | Cartographie des permis de recherche et concession pour des gîtes de géothermie haute température en outre-mer (AFPg d'après les données du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire)



La Martinique a fait l'objet de plusieurs phases d'exploration :

- exploration Eurafrep (1967-1970) ;
- première phase d'exploration du BRGM (1977-1985) ;
- seconde phase d'exploration du BRGM (2002-2003) ;
- troisième phase d'exploration du BRGM (2011-2013).

Le potentiel géothermique a été identifié sur deux sites, qui présentent toutefois quelques contraintes :

- Anses d'Arlet au sud de l'île : contraintes urbanistes et environnementales ;
- Montagne Pelée, au nord : problèmes d'accessibilité + Parc National + risque volcanique.

Dans le cadre du projet **Géothermie Caraïbe Phase 2, une étude de préfaisabilité environnementale** réalisée par le bureau d'étude EGIS-EAU en 2015 a cependant montré que l'implantation d'une centrale serait possible sur l'une ou l'autre des zones d'intérêt des Anses d'Arlet ou de la montagne Pelée.

Une centrale en cycle binaire d'une dizaine de MW sur les Anses d'Arlet serait ainsi envisageable.

**Les projections faites dans le cadre de la PPE sur les potentiels de développement de la géothermie en Martinique estiment que dans une perspective de scénario volontariste, 10 à 20 MW pourraient être mis en exploitation entre 2020 et 2030.**

Un programme est actuellement en cours sur le site des Anses d'Arlet. Piloté par le BRGM, il a pour but de mettre en œuvre une future campagne de forages d'exploration.

### Autres projets dans les Caraïbes

L'île de la Dominique, située entre la Guadeloupe et la Martinique, constitue l'un des autres principaux terrains où se concentrent les efforts des acteurs français de la géothermie profonde. Des projets d'envergure se multiplient, notamment en raison d'un coût de production de l'électricité à partir des énergies fossiles de plus en plus élevé et d'une volonté d'autonomie énergétique à l'horizon 2050.

Le projet « Géothermie Dominique » initié en 2005 devrait permettre à terme de créer une centrale géothermique d'une puissance de 100 MWe en Dominique. Elle assurerait une couverture complète des besoins de l'île (besoins électriques estimés à 20 MWe). Les 80 MWe restants seraient envoyés via des câbles sous-marins : 40 MWe vers la Guadeloupe et 40 MWe vers la Martinique. Ce projet représente environ 500 M€ d'investissements, 650 000 tonnes de CO2 évitées par an, des centaines d'emplois créés, pour une source d'électricité stable à coût réduit. La construction de la 1ère centrale géothermique issue de ce projet, d'une puissance de 7 MWe, devrait débuter en fin 2019.

FIG 47 | Le projet d'interconnexion électrique inter-îles Dominique-Antilles Françaises par câbles sous-marins avec production d'électricité par géothermie en Dominique (AFD)



Ce projet est lié au projet global de coopération INTERREG IV « Géothermie Caraïbe », dont la phase 2 a pris fin en 2015. Les objectifs de la phase 2 étaient :

- de prolonger l'accompagnement du Projet en Dominique ;
- de préparer les conditions de mise en œuvre d'un programme caribéen de développement de la géothermie ;
- d'aider à positionner une offre française sur la zone.

Afin de prolonger la Phase 2, la région Guadeloupe a lancé un nouveau projet au titre du programme INTERREG « Espace Caraïbe V », qui se traduit pour la géothermie par la création d'un « Centre Caribéen d'Excellence en Géothermie ». Les travaux pilotés par l'ADEME avec le concours de la Région Guadeloupe et de l'Organisation des Etats de la Caraïbe Orientale (OECS) devraient débiter à l'automne 2019.

## Projection globale à 2028

Si tous les projets exposés précédemment sont réalisés, alors **d'ici 2028, la France serait équipée de 18 installations de géothermie électrogène, produisant plus de 180 MWe.**

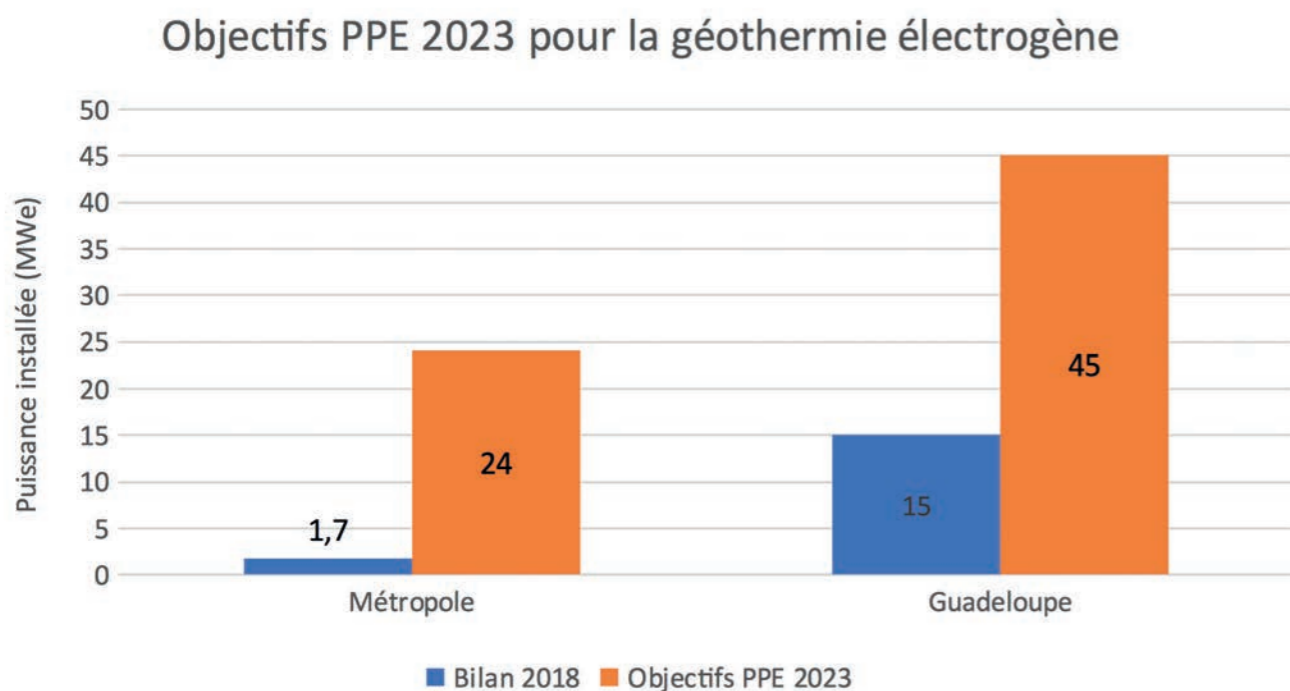
Zone	Nombre de projets	Puissance électrique (MWe)	Puissance thermique (MWth)	Investissements (M€)
Installations existantes en 2018	2	16,7	0	120
Extensions d'installations	1	10	0	N.A.
Permis en métropole	14	130	245	970
Permis de recherche en outre-mer	2	25	0	70
<b>Total France 2028</b>	<b>19</b>	<b>181,7</b>	<b>245</b>	<b>1 160</b>

Cette projection à plus de 180 MWe électriques d'ici 2028 dépasse largement les objectifs fixés par la dernière Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (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 Régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des Énergies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (PRERURE), adopté en 2010 et actualisé en 2012. Les objectifs de la Guadeloupe en termes d'énergies renouvelables sont plus ambitieux que ceux du territoire métropolitain : 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.

FIG 48 | Bilan et perspectives (PPE) de la production d'électricité par géothermie profonde en France



## 3.2.d Réglementation et perspectives

### La production de lithium grâce à la géothermie : une avancée prometteuse

Le lithium est amené à devenir une ressource centrale de la transition énergétique, notamment à travers ses applications dans le stockage de l'électricité au moyen de batteries. Le cabinet McKinsey estime que **la demande mondiale en lithium pourrait tripler entre 2017 et 2025**, portée notamment par le développement des mobilités électriques.<sup>19</sup>

Dans ce contexte, l'Europe a fixé comme priorité de sécuriser son approvisionnement, actuellement constitué à 86 % d'importations.<sup>20</sup> 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.

La filière géothermie a son rôle à jouer dans ce projet : des études anciennes avaient en effet démontré la présence de chlorure de lithium dans l'eau géothermale alsacienne, avec une teneur élevée de l'ordre de 150 à 200 mg/L. Plusieurs projets de recherche sont actuellement en cours, dont :

- EuGeLi (European Geothermal brines Lithium), lancé en 2019, et dont font notamment partie Eramet, Electricité de Strasbourg, BASF et PSA.
- Thermal1 : lancé en 2018 par un consortium regroupant Adionics, ES Geothermie, Fonroche Geothermie, ISTO.

Selon les estimations actuelles, **la production de 10 centrales géothermiques en Alsace suffirait à couvrir l'ensemble des besoins français actuels en termes de mobilités électriques.** Le premier démonstrateur devrait être opérationnel d'ici 2023.<sup>21</sup>

### La refonte du code minier

Actuellement, le code minier instaure une distinction entre les gîtes géothermiques haute température (ressource supérieure à 150 °C) et basse température (ressource inférieure à 150 °C). Les acteurs de la filière estiment que cette frontière arbitraire apporte une trop grande complexité administrative à leurs projets, pour lesquels ils doivent parfois demander 2 titres miniers sur un même périmètre.

L'article 67 de la *Loi pour un Etat au service d'une société de confiance* (dite *loi ESSOC*), adoptée en août 2018, ouvre la voie à des mesures de simplification du code minier dans le cadre de la géothermie. Une ordonnance du gouvernement français est attendue dans les prochains mois en vue de supprimer cette distinction entre haute et basse températures, en s'orientant vers 2 régimes distincts d'autorisation pour les titres miniers :

- un régime simplifié pour les projets situés en zone géologique connue et ne nécessitant qu'une phase d'exploration limitée,
- un régime plus complet pour les autres projets.

### L'avenir du soutien financier

Depuis décembre 2016, la filière électrogène de la géothermie bénéficie d'un complément de rémunération sur le tarif de rachat de l'électricité, s'appuyant sur le tarif de référence de 246 €/MWh. Plusieurs projets totalisant une quarantaine de MWe ont obtenu l'éligibilité à ce tarif.

Le nouveau projet de PPE publié en janvier 2019 prévoit la suppression de cette aide. Une telle mesure compromettrait grandement le développement de la filière et le futur des nombreux projets en cours sur le territoire français. Elle priverait la France d'un approvisionnement en électricité renouvelable (**et potentiellement en lithium**) non intermittent et peu émetteur en gaz à effet de serre, à l'origine de la création d'emplois locaux non délocalisables. De plus, une production significative de chaleur issue de la cogénération ou de la coproduction serait perdue, ainsi que la connaissance approfondie du sous-sol de plusieurs territoires.

L'AFPG s'est mobilisée pour améliorer ce projet, adressant à ce sujet une lettre ouverte signée par les présidents d'entités telles qu'AMORCE, la FEDENE, le SER, la Région Nouvelle-Aquitaine et la Région Grand-Est.<sup>22</sup> Des discussions sont actuellement en cours pour envisager une poursuite du complément de rémunération, sur la base d'un tarif de rachat dégressif et d'un engagement de réduction des coûts de la filière.

19 - Source : McKinsey&Company, Lithium and Cobalt - A Tale of two commodities, Metals and Mining, Juin 2018

20 - Source : Faisons le pari du lithium Made in Europe, L'Usine Nouvelle, 7 février 2019

21 - Source : Electricité de Strasbourg, Du Lithium dans le sous-sol alsacien, Les Dernières Nouvelles d'Alsace, Mars 2019

22 - Source : <http://www.afpg.asso.fr/lettre-ouverte-dans-les-echos-poursuivons-le-developpement-de-la-geothermie-electrogene/>

## LA GÉOTHERMIE PROFONDE EN FRANCE EN 2018

chaleur



79

opérations  
de chaud  
et de froid

dont 57

dans le  
bassin parisien

incluant une part  
importante de géothermie  
dans leur mix énergétique

320 000

équivalents-logements  
chauffés

1,75 TWh

chaleur issue  
de la géothermie  
profonde

82%  
réseau  
de chaleur urbain

17%  
agriculture /  
pisciculture

1%  
piscines /  
thermes



électricité

2

centrales  
électrogènes

15 MWe  
à Bouillante  
en Guadeloupe

1,7 MWe  
à Soultz-sous-Forêts  
en Alsace

16

permis  
de recherche

180 MWe  
projection à 2028

extraction  
de lithium  
par géothermie



10 centrales électrogènes  
= 100% des besoins  
français actuels de  
mobilités électriques



premiers  
démonstrateurs  
opérationnels en 2023

4

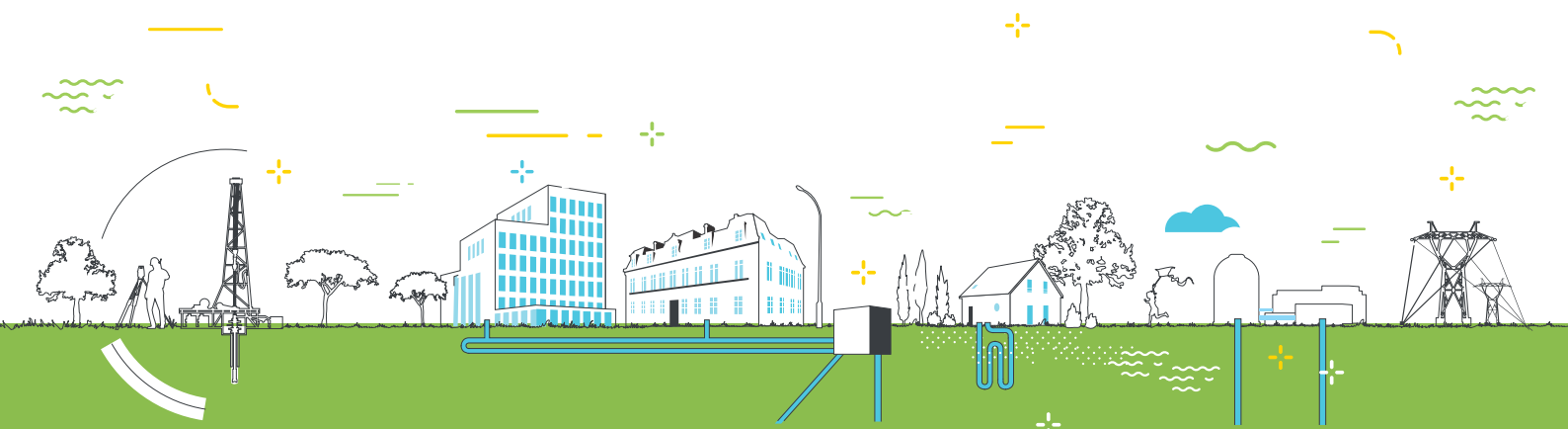
## La géothermie, un atout pour la transition énergétique

Afin d'atteindre ses objectifs énergétiques, la France doit continuer de s'appuyer sur la géothermie, et faire figure de leader dans ce secteur.

Au sein de l'Union Européenne, elle occupait en 2017 pour la géothermie la 4<sup>ème</sup> place en termes de capacité électrique installée (derrière l'Italie, le Portugal et l'Allemagne), la 1<sup>ère</sup> place en termes de capacité installée de réseaux de chaleur, et la 3<sup>ème</sup> place en termes de nombre de pompes à chaleur en fonctionnement (derrière la Suède et l'Allemagne) (source : EurObserv'ER).

En 2017, la géothermie était à l'origine de 93 000 emplois à travers le monde (source : IRENA). En 2016 en France, la filière représentait 2 340 ETP (Équivalents Temps-Plein), pour un marché total de 351 M€ (source : ADEME, IN NUMERI).

La France a la chance de bénéficier avec la géothermie d'une filière renouvelable mature et robuste, avec un important tissu industriel et un savoir-faire historique reconnu. Elle doit capitaliser sur ces atouts pour atteindre ses objectifs de décarbonation de son secteur énergétique.



## État de la filière en 2018 et comparaison avec les objectifs nationaux

PARC INSTALLÉ : Puissance installée totale (MW) et production d'énergie (TWh/an)		Chiffres 2018 (étude AFPG)	Croissance attendue entre 2018 et 2023	2023 (projet PPE 2019)	2028 (projet PPE 2019) Objectif bas	2028 (projet PPE 2019) Objectif haut
Géothermie de surface	Secteur individuel	MWth	1 400	35%	4,6	5,0
		TWh/an	2,5			
	Secteur collectif	MWth	500			
		TWh/an	0,9			
<b>TOTAL</b>	<b>TWh/an</b>	<b>3,4</b>			<b>7,0</b>	
Géothermie profonde	Chaleur	MWth	600	61%	2,9	4,0
		TWh/an	1,8			
	Electricité	MWe	17	41%	24	24
		TWh/an	0,12			

## L'AFPG

### La géothermie, l'énergie de demain dès aujourd'hui

L'Association Française des Professionnels de la Géothermie a été créée le 15 juin 2010 à Paris. L'AFPG compte en 2019 100 adhérents représentant les métiers de la géothermie en France et dans les DOM : foreurs, fabricants et installateurs de pompes à chaleur, gestionnaires de réseaux de chaleur, bureaux d'études, etc.

Elle est organisée en 2 filières :

- Géothermie de surface
- Géothermie profonde

L'AFPG s'est fixée comme objectif de promouvoir le recours à la géothermie, énergie renouvelable capable de produire de l'électricité et/ou de la chaleur et du froid. Ces missions se déclinent en quatre axes majeurs :

- **Représenter et fédérer** les professionnels de la filière en France métropolitaine et dans les DOM ;
- **Informers les collectivités**, les industriels et les particuliers des ressources et de la diversité de l'offre géothermique ;
- **Accompagner les pouvoirs publics** en matière de réglementation, de législation et de certification ;
- **Contribuer à l'émergence de nouvelles technologies** telles que la boucle d'eau tempérée à énergie géothermique.