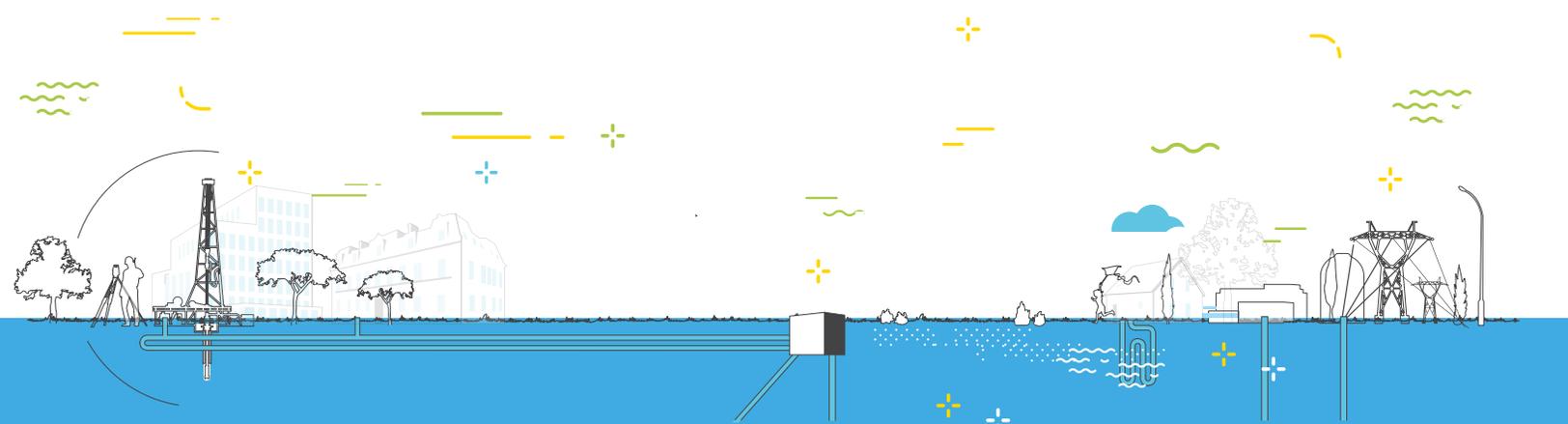




La géothermie, l'énergie de demain, dès aujourd'hui !



LA GÉOTHERMIE EN FRANCE

Étude de filière

2023

6^e édition - septembre 2023

Glossaire

Bassin sédimentaire

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

Cogénération

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

Coproduction

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

Équivalent-logement

Unité d'énergie à usage pédagogique permettant de représenter une quantité d'énergie. La définition de l'équivalent-logement est mise à jour régulièrement pour tenir compte de la rigueur climatique et de l'évolution du parc moyen de logement. En 2021, les besoins énergétiques de l'équivalent-logement sont évalués sur la base d'un logement de 70 m², à 12 MWh pour une rigueur climatique de 2500 DJU. Néanmoins, on peut approximer à 10 MWh/an la valeur d'un équivalent-logement en général.

Production

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

En présence d'une pompe à chaleur (PAC), on distingue l'énergie calorifique (dont profite le consommateur) de l'énergie géothermique (frigorifique, renouvelable). Ces 2 énergies sont reliées de la façon suivante :

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

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

Puissance installée

Grandeur indiquant la quantité maximale d'énergie pouvant être convertie par unité de temps. Elle s'exprime en Watt (W). On peut distinguer les différentes formes de puissance : on parle par exemple de watts thermiques (Wth) et de watts électriques (We).

En présence d'une pompe à chaleur (PAC), on distingue la puissance calorifique (dont profite le consommateur) de la puissance géothermique (frigorifique, renouvelable). Ces deux puissances sont reliées de la façon suivante :

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

Aquifère / Réservoir :

Roche poreuse et/ou fracturée, suffisamment perméable pour contenir et laisser circuler en son sein un fluide (de l'eau, dans le cas de la géothermie). Le terme nappe phréatique fait référence à la masse d'eau souterraine rencontrée en profondeur.

Liens utiles

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

AFPG - Association française des professionnels de la géothermie
www.afpg.asso.fr

BRGM - Bureau de recherches géologiques et minières
www.brgm.fr

Données et études statistiques
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

Espace institutionnel sur la géothermie
réalisé par l'ADEME et le BRGM
www.geothermies.fr

European Geothermal Council
www.egec.org

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

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

Qualit'EnR
www.qualit-enr.org

Sybase (base de données du BRGM)
<https://sybase.brgm.fr>

SER - Syndicat des énergies renouvelables
www.enr.fr

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

Sommaire

Contextualisation p.4 et 5

Introduction p.6 et 7



Géothermie de surface

I. Définition et utilisations p.10

II. Les innovations en géothermie de surface p.15

III. État de la production française en 2022 p.18

IV. Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre p.29

V. Pour soutenir le déploiement de la géothermie de surface p.37



Géothermie profonde

Introduction p.41

Production de chaleur

I. Principes et usages p.42

II. État de la production française en 2021 et 2022 de la géothermie profonde - Chaleur p.44

III. Innovations et évolutions en géothermie profonde p.50

IV. Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre p.52



Voies d'avenir pour les géothermies

I. Suivre les mesures du plan Marshall des ENR&R p.68

II. Développer la géothermie en zones rurales p.68

III. Développer la géothermie à destination des industriels p.68

IV. Intenses activités réglementaires p.69

V. Décarboner les modes de chauffage p.69

VI. Le mot du président p.70



Centrales électrogènes

I. Principes et usages p.55

II. Les centrales géothermiques électrogènes en fonctionnement p.56

III. Bilan p.58

Lithium géothermal p.59

Projets en développement et à venir p.61

Pour soutenir le développement de la géothermie profonde p.66



Contextualisation

Respecter nos engagements climatiques

Le rapport du Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) est clair. L'humanité doit réduire ses émissions de gaz à effet de serre qui ont déjà réchauffé la planète de 1,1°C depuis les années 1850-1900. Tous les pays, dont la France, doivent agir avec encore plus d'ampleur car chaque dixième de degré compte. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) parle notamment de décarboner complètement l'énergie utilisée à l'horizon 2050 (à l'exception du transport aérien) et de réduire de moitié les consommations d'énergie dans tous les secteurs d'activité, en développant des équipements plus performants.

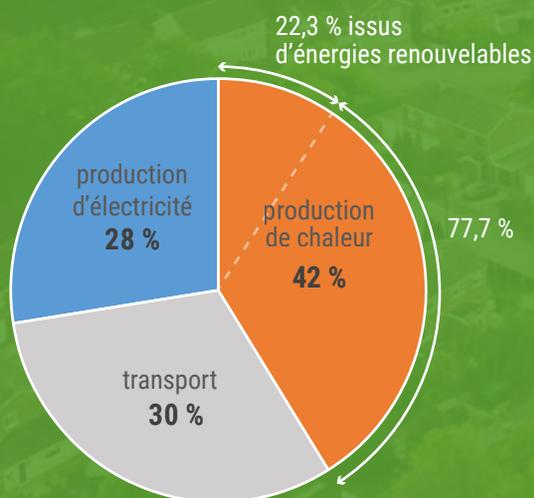
Aujourd'hui, 42 % de l'énergie est utilisée pour produire de la chaleur, 30 % pour le transport et 28 % pour l'électricité. Sur ces 42 %, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale de chaleur ne s'élevait qu'à 22,3 % en 2021 d'après le Panorama de la chaleur renouvelable (Syndicat des Énergies Renouvelables). D'après la loi sur La Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), la politique énergétique nationale a notamment pour objectifs de porter cette part à 38 % pour 2030.

Afin de tenir ces engagements, il est donc essentiel d'inverser la tendance et de développer massivement des moyens de production faiblement émetteurs de carbone, comme par exemple, la géothermie, qui est une énergie répondant bien aux enjeux de performance et de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, l'intégralité du territoire se prête au moins à une solution de géothermie.

La géothermie en France

La France fut l'un des pays pionniers dans le développement de la géothermie. **Mais aujourd'hui, notre pays recèle un potentiel encore largement sous-exploité avec seulement 1% de la consommation finale de chaleur en 2021**, tandis que le développement de la filière n'est pas assez important par rapport aux autres filières renouvelables. Mais au vu des enjeux climatiques et de la crise énergétique mondiale due notamment au conflit entre l'Ukraine et la Russie, il est temps que les politiques publiques orientent les différents acteurs. En ce sens, le plan d'action du gouvernement intitulé « Géothermie, un plan d'action pour accélérer », paru le 2 février 2023, met notamment en évidence des axes à suivre en faveur de la souveraineté énergétique de la France et la lutte contre le réchauffement climatique grâce à la géothermie. Les prochaines études de filière de l'AFPG montreront si la dynamique que l'État tente d'instaurer aura permis une évolution sur les années à venir.

Utilisation de l'énergie en 2021



d'après le Panorama de la chaleur renouvelable (Syndicat des énergies renouvelables), le Ministère de la Transition écologique et le Ministère de la Transition énergétique

Le plan d'action du 2 février 2023 du Ministère de la transition énergétique



Ce plan d'action présente la situation actuelle et décline une série de mesures prioritaires à engager pour les marchés des géothermies de surface et profonde en France métropolitaine, dans les Outre-mer et à l'export. La Ministre de la transition énergétique, Agnès Pannier-Runacher, donne notamment l'objectif de doubler le nombre d'installations

de pompes à chaleur géothermiques chez les particuliers d'ici 2025, mais aussi un objectif de plus de 40 % de projets de géothermie profonde lancés d'ici 2030. Pour cela, les grandes actions à effectuer selon le plan que nous vous invitons plus spécifiquement à lire sont :

- renforcer la capacité de forage en géothermie de surface pour répondre à la demande des secteurs résidentiel et tertiaire (formations, qualifications des foreurs),
- affiner le cadre réglementaire pour inciter au développement de projets de géothermie de surface (mise à jour de la cartographie, adaptation réglementaire),
- inciter à l'installation de pompes à chaleur géothermiques dans les secteurs résidentiel et tertiaire (rendre visible les professionnels en géothermie de surface, renforcer le coup de pouce chauffage, inciter les contrats de développement des énergies renouvelables...),

- identifier et valoriser des aquifères profonds sous-exploités, propices à la réalisation de doublets géothermiques pour réseaux de chaleur (améliorer la connaissance du sous-sol, réaménager les fonds de garantie couvrant les risques...),
- sensibiliser et faire monter en compétence les acteurs locaux, accompagner les porteurs de projets dans le déploiement de solutions géothermiques (animateurs géothermie dans toutes les régions de France, communication),
- susciter de nouveaux projets et encourager de nouveaux montages financiers en géothermie (renforcer les aides, nouvelles modalités de financements).

Le plan Marshall pour la chaleur renouvelable



En avril 2023, le club de la chaleur renouvelable (créé en 2003 et regroupant des acteurs de la chaleur renouvelable et de récupération, dont l'AFPG) a publié un « plan Marshall pour la chaleur renouvelable et de récupération » bien plus ambitieux que la loi, où l'objectif de 2030 est d'atteindre une consommation de chaleur issues des énergies renouvelable à hauteur de 54 % au lieu de 38 % comme l'indique la LTECV. Des mesures globales, ne concernant pas la seule géothermie, y sont décrites et seront également évoquées dans cette étude. Vous pouvez retrouver l'intégralité sur :

https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2023/04/20220420-Club-chaleur_PPE-1.pdf

Introduction

La géothermie, une énergie à haut potentiel

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

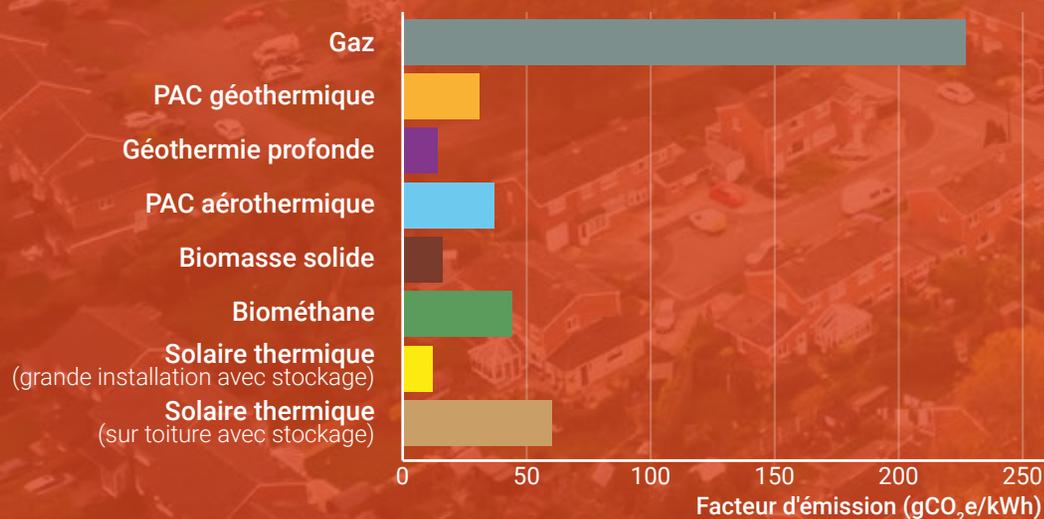
La géothermie a de nombreux atouts qui méritent que la filière se développe davantage dans ce contexte de réchauffement climatique :

- c'est une énergie inépuisable,
- elle est facilement pilotable, la ressource étant présente en continu quelle que soit la temporalité des besoins,
- les émissions de gaz à effet de serre sont minimes.

D'après Carbone 4, la géothermie de surface (avec PAC géothermique) serait 7 fois moins carbonée* que le gaz naturel ; et la géothermie profonde, 16 fois moins carbonée. L'empreinte carbone des différentes filières de la chaleur renouvelable, comparées au gaz, est présentée ci-après.

- il est possible de produire du chaud et du froid renouvelables, offrant donc une possibilité d'adaptation au changement climatique en permettant de faire face aux températures de plus en plus chaudes, et ce, en rejetant la chaleur dans le sol et non dans l'air : ainsi elle n'amplifie pas les îlots de chaleur urbains,
- le stockage thermique inter-saisonnier est possible,
- la géothermie est discrète, elle s'intègre parfaitement au paysage grâce à sa très faible emprise au sol et à l'absence d'éléments restant visibles depuis l'extérieur,
- l'énergie est produite localement et donc créatrice d'emplois non délocalisables dans les territoires où elle est implémentée – notamment en milieu rural,
- il n'y a par la suite pas de dépendance aux combustibles fossiles, ce qui permet aux installations de géothermie d'avoir un coût de fonctionnement moindre et stable avec un amortissement moyen de 10 ans malgré un investissement initial important,
- l'énergie est disponible 24h/24 et 7j/7,
- elle conserve un très haut rendement énergétique tout au long de l'année, du fait de la variation négligeable de la température du sol.

Empreinte Carbone des filières de production de chaleur renouvelable (d'après Carbone 4)



* Plus le COP sera élevé, moins l'empreinte carbone sera grande.

De quelle géothermie parle-t-on ?

Nous distinguons 2 filières géothermiques :

- 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) voire d'une alimentation directe (principe du froid passif par géocooling). Elle représente 70 % de la puissance installée de la filière surface en France et 70 % de la production de chaleur de la filière.
- la géothermie profonde, à des profondeurs allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Elle exploite l'eau géothermale présente dans des nappes d'eau souterraines pour alimenter des réseaux de chaleur mais également dans certains cas pour produire de l'électricité – voire les 2 en même temps.

A propos de l'AFPG

Créée en 2010, l'Association française des professionnels de la géothermie (AFPG) œuvre activement pour structurer la filière de la géothermie en France et représenter ses acteurs auprès des pouvoirs publics. Elle compte actuellement plus de 130 membres présents sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière géothermie.

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

Les différentes géothermies

10 → 30°C
0 à 200 m



Géothermie de surface, avec pompe à chaleur

30 → 100°C
200 à 2000 m



Géothermie profonde, basse température

Utilisation d'eau chaude pour :

- les réseaux de chaleur urbains
- les activités aquacultives
- les activités industrielles
- les activités agricoles

> 100°C



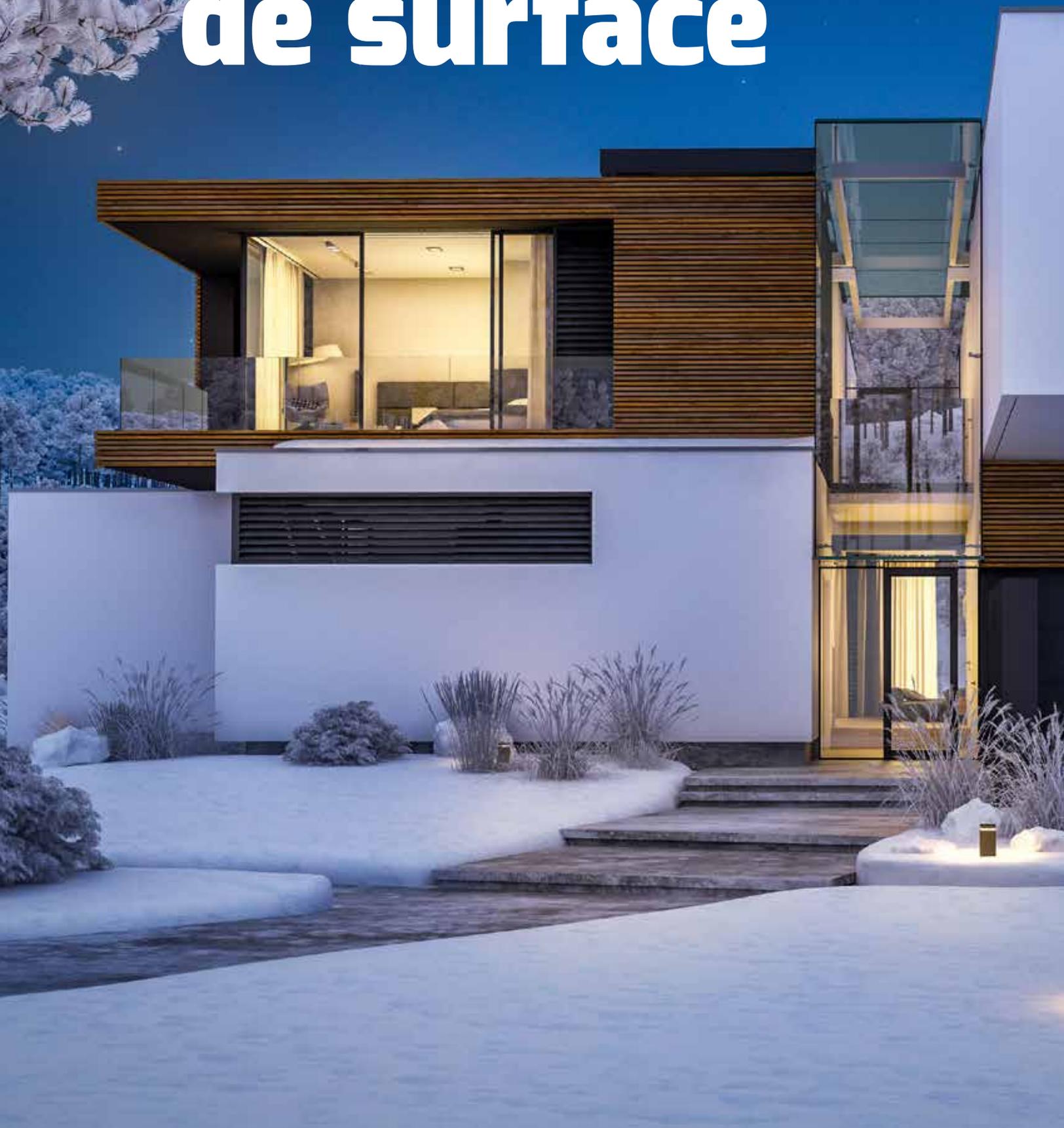
Géothermie profonde, haute température

jusqu'à ce qu'on puisse creuser

Utilisation de la vapeur d'eau



Géothermie de surface



I. Définition et utilisations

La géothermie de surface désigne les technologies exploitant une ressource géothermale de température naturellement inférieure à 30°C, se situant généralement à moins de 200 mètres de profondeur. Elle s'appuie sur la chaleur contenue dans le sous-sol, qui est une source d'énergie renouvelable, locale et disponible continuellement.

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. Les installations de géothermie de surface peuvent être à destination des secteurs résidentiels individuels et collectifs, tertiaire* mais aussi plus rarement industriels et agricoles.

Une installation de géothermie de surface est constituée des éléments principaux suivants :

- un dispositif de captage de la ressource : 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 (les pompes à chaleur permettent d'augmenter la température prélevée dans le sol),
- un dispositif de régulation : il permet de gérer les différents modes de fonctionnement.

La géothermie peut utiliser soit l'énergie d'une nappe phréatique (géothermie sur nappe), soit celle du sol (géothermie sur sonde).

1. Les dispositifs de captage

• Le captage sur nappe (système ouvert)

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 du sous-sol.

Deux ou trois forages sont nécessaires pour la mise en œuvre de cette technique : un forage de production pour pomper l'eau à la surface, et un ou deux forage(s) pour réinjecter l'eau refroidie (ou réchauffée dans le cas d'une production de froid). L'eau étant toujours redéversée dans sa nappe d'origine, il s'agit d'un système qualifié d'« ouvert » qui ne modifie en rien le volume d'eau dans la nappe (Figure 1).

Le captage est extrêmement modulable : selon les caractéristiques de la ressource, il peut alimenter une maison ou un quartier entier par l'intermédiaire de ce qu'on appelle une boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG - cf. II - 4).

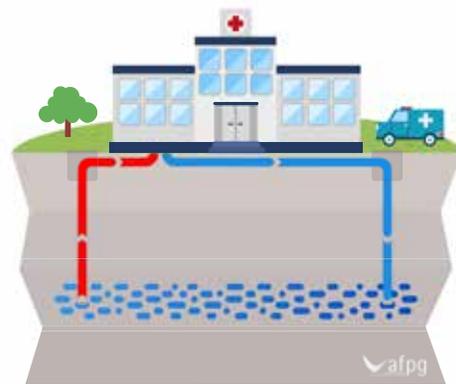


Figure 1 : Schéma de principe du captage sur nappes

• Le captage par sondes géothermiques verticales ou inclinées (système fermé)

Une sonde géothermique verticale ou inclinée est constituée d'une boucle (« tube en U ») dans laquelle circule en circuit fermé un fluide caloporteur (Figure 2). Cette sonde est insérée dans un forage, qui est ensuite cimenté pour éviter toute fuite et favoriser le captage des calories du sol. Cette technologie ne nécessite pas de nappe souterraine. Il suffit de forer le sol et d'y insérer ces sondes pour que le fluide à l'intérieur puisse se réchauffer via la chaleur de la Terre. C'est pourquoi, contrairement au captage sur nappe qui nécessite la présence d'un aquifère, la technologie sur sonde est possible sur la quasi-totalité du territoire.

* Le secteur tertiaire englobe tous les équipements collectifs, les services publics, les activités commerciales, les activités de services...
Exemple de tertiaire : théâtre, école, musée, ministère, magasin, restaurant...



Figure 2 : Schéma de principe du captage par système fermé

Pour 1 mètre linéaire foré, la puissance extraite est de l'ordre de 50 Watts lorsque la PAC fonctionne environ 2000 heures par an. Sur des bâtiments récents, la durée annuelle de sollicitation est souvent plus faible : la puissance linéaire extraite peut ainsi être significativement plus importante.

Puisqu'il est possible d'obtenir 50 Watts par mètre foré, la puissance extraite augmente avec la profondeur de la sonde, ou le nombre de sondes forées. Installer plusieurs sondes permet donc de répondre à un besoin de chaud ou de froid plus important. Dans le cas où plusieurs sondes sont installées, on parle de Champs de Sondes Géothermiques (CSG - Figure 3).

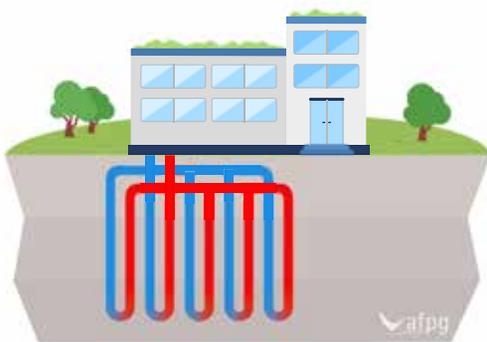


Figure 3 : Schéma de principe du captage par CSG

Bien que les deux 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.

• 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 (Figure 4). Les fondations thermoactives servent à la fois d'éléments de portage du bâtiment et d'échangeurs de chaleur avec le terrain environnant, ce qui permet d'assurer le chauffage et le refroidissement du bâtiment.



Figure 4 : Schéma de principe des fondations thermoactives



• Les échangeurs horizontaux

Ce système est constitué de tubes situés entre 80 cm et 120 cm de profondeur, dans lequel circule de l'eau glycolée (liquide caloporteur) en circuit fermé (Figure 5). A cette profondeur, l'énergie captée est principalement d'origine géosolaire (rayonnement solaire, ruissellement des eaux de pluie). Les tuyaux sont positionnés en « zig-zag » afin de maximiser la surface en contact avec le sol et ainsi imprégner au mieux sa chaleur ou froideur. La mise en place de ce type de captage est très rapide et peu coûteuse, mais nécessite une superficie importante.



Figure 5 : Schéma de principe du captage horizontal

• Les échangeurs compacts

Ces échangeurs sont installés à quelques mètres de profondeur et sont des alternatives aux sondes verticales, aux nappes et aux échangeurs horizontaux. Ils nécessitent souvent une emprise au sol plus importante mais ont l'avantage de pouvoir être mis en place sans forage. Il en existe de différentes sortes, comme les « murs géothermiques » ou encore les « corbeilles géothermiques » (respectivement Figures 6 et 7). On retrouve deux constructeurs principaux en France : Freeheat Caleosol et Elydan.



Figure 6 : Schéma de principe d'un mur géothermique



Figure 7 : Schéma de principe des corbeilles géothermiques

Les échangeurs horizontaux et compacts sont situés à moins de 10 mètres de profondeur. En termes de travaux, il ne s'agit plus de forage mais de terrassement. Les démarches administratives sont moindres par rapport à de la géothermie via forages, le Code Minier ne s'appliquant qu'à partir de 10 mètres de profondeur pour les échangeurs géothermiques.

S'ils sont encore assez peu déployés aujourd'hui, leur utilisation est plutôt adaptée aux particuliers : on en trouve toutefois aussi dans le secteur tertiaire, à plus forte raison lorsque le bâtiment est bien isolé. Par exemple en 2017, dans le département du Var, la construction d'un collège d'une capacité d'accueil de 700 élèves a été réalisé avec un système de chauffage reposant sur des corbeilles géothermiques (fournies par le constructeur Elydan). Le bâtiment est labellisé BBC effinergie (qui signifie basse consommation bas carbone) et Bâtiment Durable Méditerranéen qui justifie de la qualité du bâtiment.

2. Le dispositif de production : pompe à chaleur géothermique (PAC)

Une pompe à chaleur (PAC) est un dispositif thermodynamique servant à 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. La Figure 8 ci-dessous résume le fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique à compression.

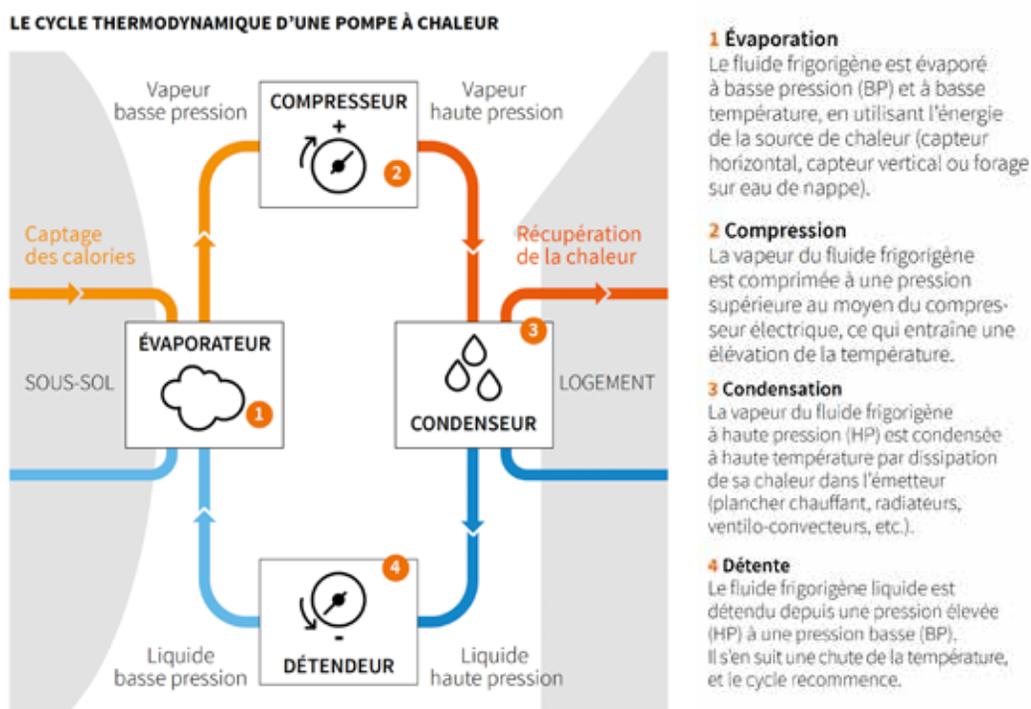


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique à compression (ADEME, AFPG)

Les performances d'une PAC sont indiquées par son coefficient de performances (COP). Il s'agit du ratio entre l'énergie apportée sous forme de chaleur au logement et l'énergie électrique absorbée par la PAC. En géothermie, les COP sont de l'ordre de 5 : c'est-à-dire que pour 1 kWh d'électricité absorbée par la PAC, elle produit simultanément 5 kWh de chaleur et 4 kWh de froid.

Outre les modes chauffage, production d'eau chaude sanitaire et climatisation, une installation de géothermie de surface peut également fonctionner en montage thermo-frigo-pompe ou avec du geocooling.

• Le mode Thermo-Frigo-Pompe

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



• Le geocooling (ou rafraîchissement passif)

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 (Figure 9). Puisque la PAC ne fonctionne pas, les rendements sont extrêmement élevés : de l'ordre de 3000 % à 5000 % (30 à 50 kWh de froid apportés pour 1 kWh d'électricité consommée).

Le rafraîchissement et la climatisation par géothermie, s'effectuent en réinjectant la chaleur dans le sol, contrairement à d'autres modes de climatisation plus répandus qui la rejettent dans l'air extérieur. Ils trouvent donc tout leur intérêt en période de canicule où ils ne participent pas à l'apparition d'îlots de chaleur, c'est-à-dire à une hausse globale de la température dans les zones fortement peuplées.

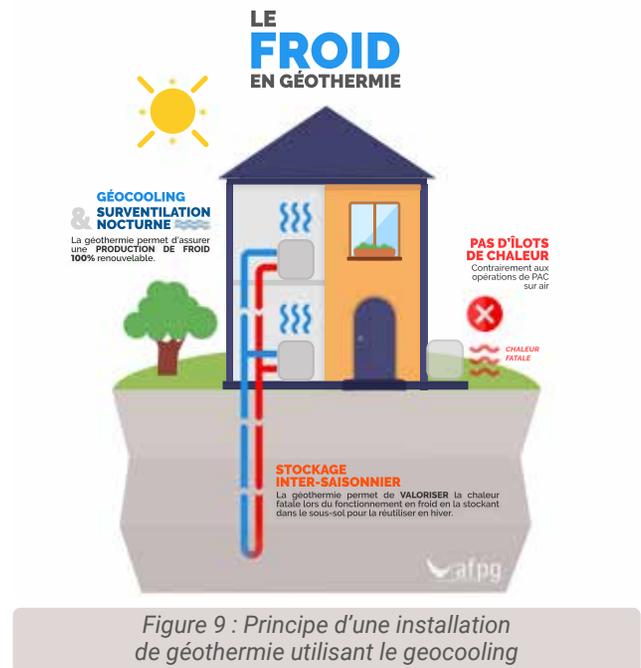


Figure 9 : Principe d'une installation de géothermie utilisant le geocooling

De plus, la réinjection des calories en été permet de renouveler totalement ou partiellement le stock de calories prélevées par la production de chaleur en hiver.

3. Le dispositif de régulation

Le dispositif de régulation est régi par des programmes informatiques permettant de rendre le système de chauffage et de refroidissement intelligent en assurant une communication entre le dispositif de captage et celui de production (y compris des équipements de type circulateurs et vannes). Le dispositif est intégré dans la pompe à chaleur ou dans l'armoire électrique de l'installation, et peut souvent être piloté à distance. C'est ce qu'on appelle la Gestion Technique Centralisée (GTC). La régulation est ajustée selon les besoins spécifiques du bâtiment, ce qui permet une optimisation énergétique et donc une diminution considérable de la facture énergétique.

II. Les innovations en géothermie de surface

1. Les sondes inclinées

La technologie des sondes inclinées est une innovation portée en France par la société Celsius Energy consistant à réaliser un échangeur géothermique en forme d'étoile, en forant les sondes à partir d'un même point à la surface (Figure 10). Cette solution permet d'exploiter un réservoir de la même manière que des forages verticaux, tout en réduisant considérablement la surface utilisée au sol par la foreuse et lors du raccordement. Cela favorise donc la faisabilité de chantier en milieux denses (urbain ou péri-urbains) qui présentent des contraintes techniques et spatiales, notamment pour les bâtiments en rénovation.

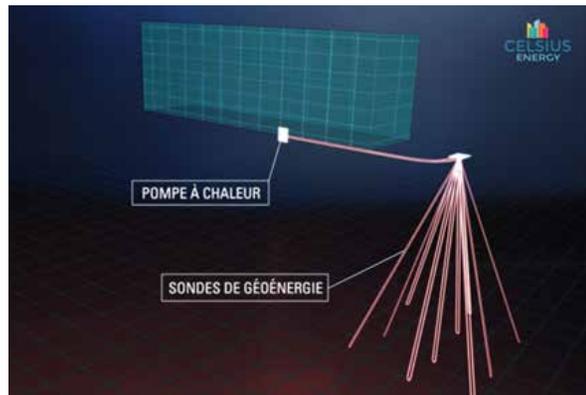


Figure 10 : Schéma d'une installation de géothermie avec échangeur géothermique à sondes inclinées

Comme pour les champs de sondes verticales, l'échangeur est relié à une pompe à chaleur, qui peut fournir à la fois du chaud et du froid. Un système de pilotage numérique utilise les données des capteurs installés dans les différentes composantes du système pour la gestion de la performance. Un démonstrateur de cette technologie est opérationnel depuis 2020 à Clamart (92) et plusieurs installations commerciales ont été réalisées (en Bretagne, Bourgogne-Franche-Comté, Auvergne-Rhône-Alpes et Île-de-France).

Ces cas d'étude et leur modélisation (Figure 11) ont permis de montrer qu'un échangeur de sondes inclinées peut avoir une performance équivalente à un champ de sondes verticales, voire une meilleure exploitation de la « batterie » thermique du sous-sol (production de chaleur et de froid, stockage quotidien et/ou saisonnier) du fait de la possibilité d'atteindre un plus grand volume de sous-sol grâce à la flexibilité dans le placement des sondes. Les contraintes foncières (notamment les limites de propriété) et d'exploitation (notamment la température minimale d'injection pour éviter le gel du sol) sont respectées par le dimensionnement et par le système de contrôle et de pilotage.

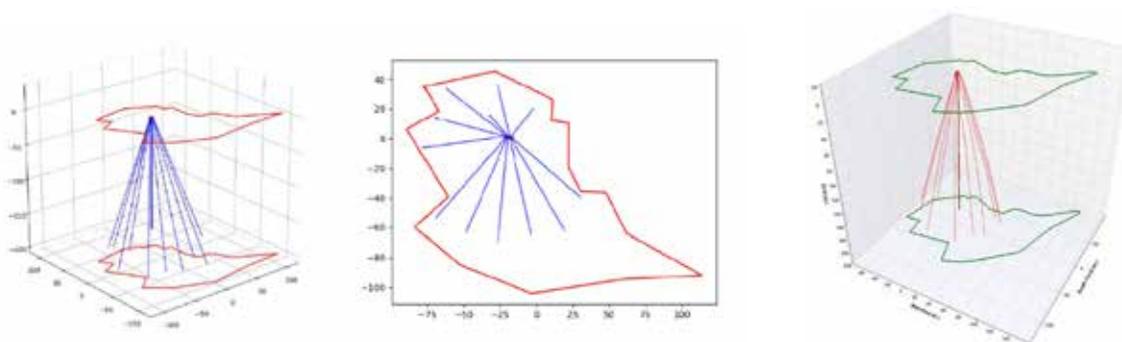


Figure 11: Placement des sondes par rapport à la parcelle cadastrale pour une installation Celsius Energy. Vue 3D (à gauche) et plan (au centre) des trajectoires prévisionnelles, résultats des mesures de direction et d'inclinaison sur l'échangeur réalisé (à droite)

2. Couplage solaire thermique et géothermie

La géothermie possède un grand avantage par rapport à toutes les autres énergies renouvelables : la chaleur peut être stockée dans le sous-sol grâce à la capacité calorifique des roches. C'est ce qu'on appelle le stockage d'Énergie Inter-saisonnier Souterrain Haute Température (SETIS-HT).

En été, les systèmes solaires thermiques peuvent produire beaucoup de chaleur par rapport à des besoins en chauffage et eau chaude sanitaire moins élevés qu'en hiver. Sans système de stockage, le surplus d'énergie produit en été est non utilisé et donc perdu. Le géostockage donne la capacité à de telles énergies d'optimiser leur efficacité et leur rentabilité, en minimisant leurs intermittences.

AB solar, une start-up productrice de chaleur et de froid renouvelables et peu carbonés, a mis au point le premier stockage d'énergie souterrain à haute température en France en septembre 2022. Ce projet, schématisé en Figure 12, appelé « Centrale Solaire sur Stockage d'Énergie Souterrain (C2SES) », alimente via un réseau de chaleur urbain un écoquartier de 67 logements de la ville de Cadaujac en Gironde, pour ses besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Le SETIS-HT est composé de 60 sondes géothermiques verticales de 32 mètres de profondeur. Elles permettent de stocker la chaleur produite par les capteurs solaires thermiques (eau à environ 85°C) disposés à proximité sur une surface de 950 m². Ce projet a, par ailleurs, été lauréat des Trophées de la géothermie en 2022.

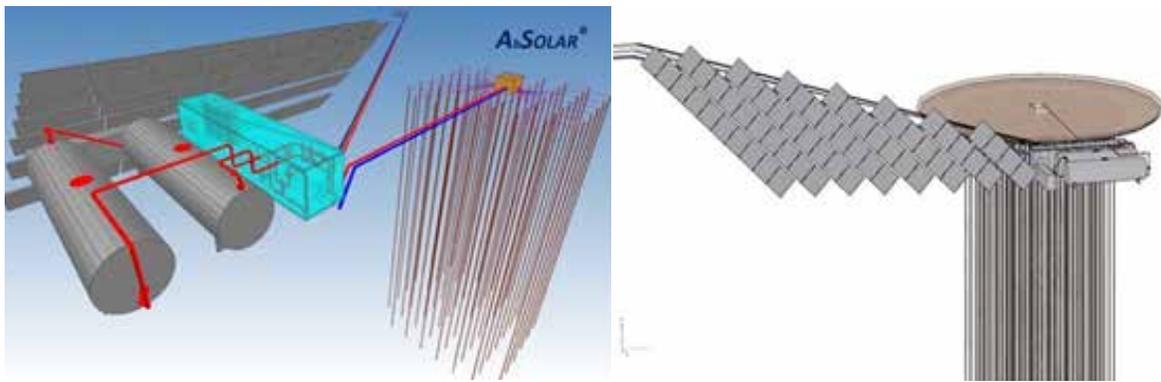


Figure 12 : Schéma de principe du projet C2SES

3. La géothermie moderne : pilotée par intelligence artificielle

En réunissant géostockage et Intelligence Artificielle (IA), il est également possible d'augmenter encore le rendement des systèmes de chauffage. Accenta, une entreprise proposant des services d'optimisation et de décarbonation des bâtiments grâce à l'intelligence artificielle, met en place une intelligence artificielle capable de prendre en compte de nombreux paramètres heures après heures (besoins en chauffage, température externe, occupation du bâtiment...) afin d'optimiser l'utilisation des systèmes géothermiques. Cela permet un meilleur dimensionnement du projet, et donc une diminution des coûts d'investissement mais aussi des coûts de fonctionnement. Allier le géostockage et l'intelligence artificielle est une voie d'avenir pour rendre les bâtiments performants et respectueux de l'environnement.

4. Les Boucles d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG)

Ce système peut être assimilé à un réseau de chaleur urbain avec, comme différence principale, la température de l'eau circulant dans la boucle. Celle-ci est généralement comprise entre 10°C et 25°C, contre plus de 50°C dans un réseau de chaleur. Ce qui distingue également les BETEG des réseaux de chaleur est la présence de sous-stations de production dans lesquelles sont installées une ou plusieurs pompes à chaleur qui vont échanger les calories ou frigories de l'eau circulant dans la boucle, en fonction des besoins de chaud et de froid des bâtiments desservis.

La BETEG présente de nombreux avantages :

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

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

La chaleur à valoriser peut provenir d'une nappe phréatique ou d'un champ de sondes, mais également de l'eau de mer, des eaux usées ou des puits de mine. La Figure 13, montre la répartition actuelle des différentes sources d'énergie.

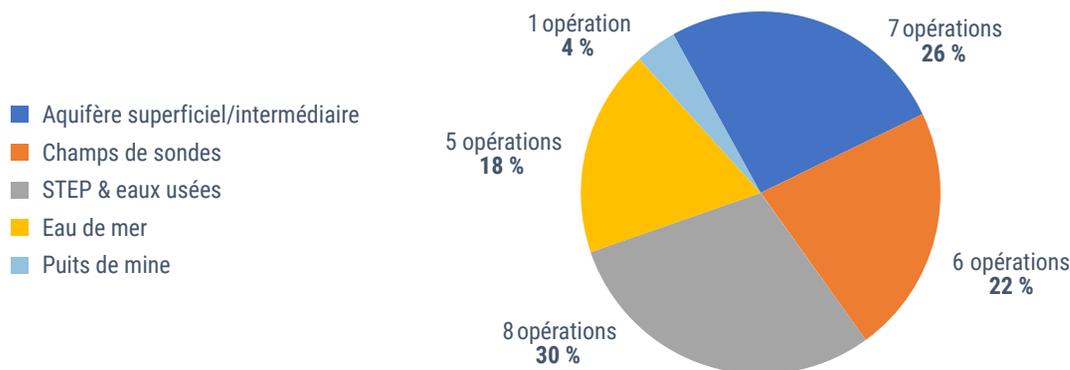


Figure 13 : Répartition des opérations de BETEG selon la ressource EnR&R valorisée (données ADEME - Fonds Chaleur)

En termes de distribution géographique, les BETEG sont présentées en Figure 14, ci-contre :



Figure 14 : Distribution des BETEG en France (données ADEME - Fonds Chaleur)

III. État de la production française en 2022

Cette partie fait état de la production en France Métropolitaine en 2022. En effet, aucune donnée de géothermie de surface n'est disponible pour les territoires ultra-marins.

Une caractérisation plus précise des installations déclarées, réalisée par le BRGM, permet aujourd'hui de distinguer les secteurs des opérations GMI avec une grande précision. C'est pourquoi, la production d'énergie en géothermie sera cette année distinguée selon 5 catégories différentes :

- le particulier,
- les logements et hébergements collectifs (résidences et hôtels),
- les exploitations agricoles, viticoles, forestières...,
- les activités industrielles (pour chauffer des process dans des usines),
- les bâtiments tertiaires (le reste des bâtiments : commerces, piscines, écoles, bureaux...).

1. Vue d'ensemble : les installations géothermiques très basse énergie

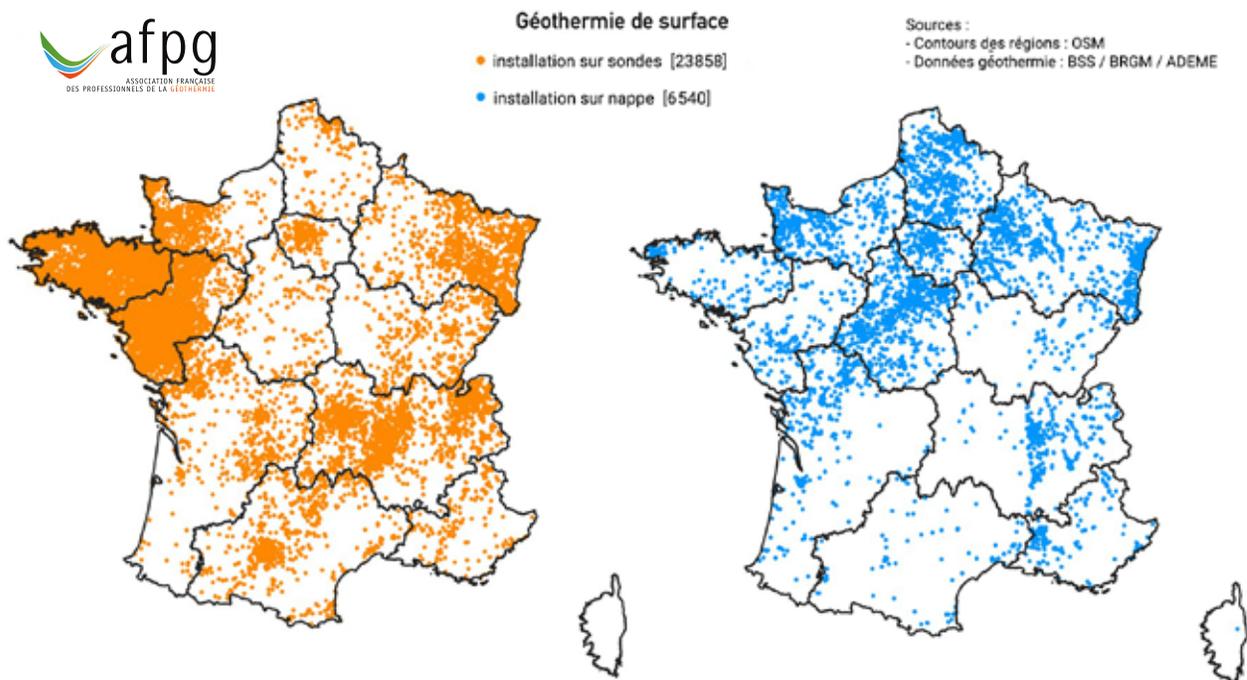


Figure 15 : Carte des installations en géothermie de surface recensées sur l'observatoire de la géothermie jusqu'au 20/04/2023

La carte ci-dessus permet de visualiser la dispersion des installations géothermiques très basse énergie en France Métropolitaine. Si la banque des données du sous-sol répertorie environ 30 000 installations, il reste très difficile d'estimer précisément le nombre d'installations, du fait de la difficulté de collecte des données antérieures au décret GMI de 2015.

2. Marché de la géothermie de surface : secteur résidentiel individuel

Le secteur individuel est le plus développé en France par rapport aux autres secteurs en termes d'installations géothermiques. Elle peut prendre différentes formes, chacune ayant besoin d'une pompe à chaleur pour fonctionner :

- géothermie avec forage (sonde ou nappe), visible via la GMI* ;
- géothermie sans forage car inférieure à 10 mètres (échangeurs horizontaux et compacts), non répertoriée dans la GMI.

Nous estimons qu'une installation chez le particulier a besoin d'une seule PAC pour répondre à ces besoins. De plus, nous considérons que la puissance moyenne d'une PAC chez le particulier est de 12 kW. Ces hypothèses restent similaires à celles prises les années précédentes.

Le marché des échangeurs horizontaux n'est actuellement pas quantifiable, et celui des échangeurs compacts n'est pas encore significatif (seulement 150 installations recensées en France en 2022). Afin de prendre en compte l'ensemble du marché, les ventes des pompes à chaleur sont donc des données jugées plus fiables.

Tous les ans, Observ'ER (l'Observatoire des Énergies Renouvelables) publie une étude sur le marché des pompes à chaleur individuelles. Cette étude se base sur des questionnaires envoyés à tous les acteurs

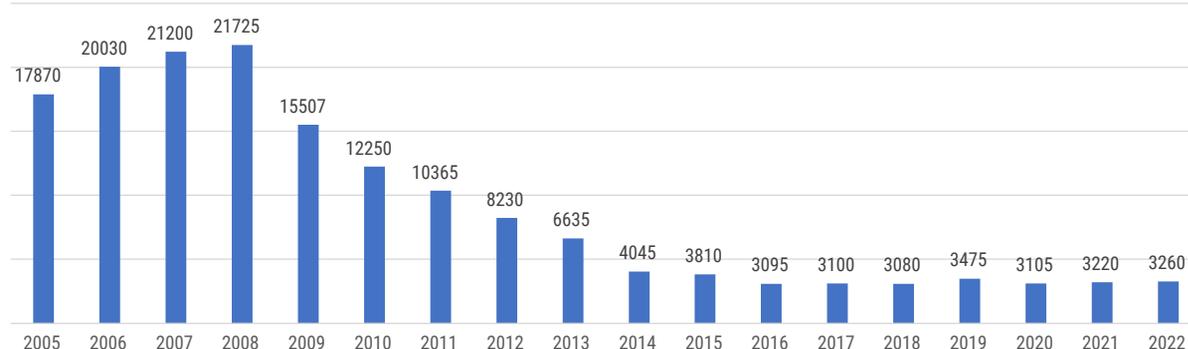


Figure 16 : Évolution des ventes de PAC géothermiques ($P < 30$ kW) (données Observ'ER)

intervenant sur le marché français métropolitain en tant que fabricants, distributeurs ou importateurs.

Les chiffres présentés (Figure 16) sont à prendre avec précaution car il s'agit des ventes de pompes à chaleur géothermiques d'une puissance inférieure à 30 kW. Or de nombreuses pompes à chaleur géothermiques à destination de bâtiment tertiaire (ou autre) fonctionnent également dans cette gamme de puissances. De même, des PAC dans le secteur individuel peuvent avoir une puissance supérieure à 30 kW et ne sont donc pas recensées dans l'étude réalisée par Observ'ER.

* La Géothermie de Minime Importance encadre les opérations de géothermie de surface respectant certains critères dont une profondeur de plus de 10 mètres, qui peuvent donc être recensées (cf. IV - 4 sur la GMI)

Grâce à la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) qui recense les opérations soumises à la GMI :

- des opérations « hors particuliers » avec P < 30 kW ont pu être retranchées,
- et les opérations dans l'individuel avec P > 30 kW ont pu être ajoutées.

Ces travaux détaillés, résumés dans le graphique 17 ci-dessous, ont permis d'apporter une plus grande précision aux données de l'étude de filière AFPG.

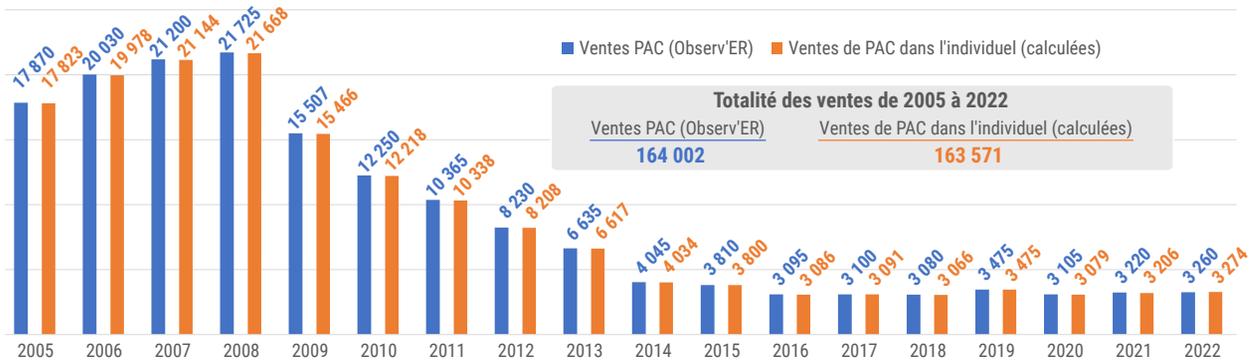


Figure 17 : Ventes de PAC dans le particulier retranchées des ventes hors particulier (calculées avec les données du BRGM)

Nous constatons qu'avec cette nouvelle approche, la tendance reste similaire et que la totalité des ventes de 2005 à 2022 est proche de celle affichée par l'étude Observ'ER, avec un écart de seulement 0,26 %.

Ainsi, nous pouvons considérer l'étude Observ'ER comme fiable en ce qui concerne les ventes de PAC géothermiques pour le marché de l'individuel.

A ce titre, nous bénéficions grâce à Observ'ER des données sur la répartition des ventes 2022 de PAC selon leur puissance et leur type (cf Tableau 1 ci-dessous).

Marché 2020	< 5kW	> 5 kW et < 10kW	> 10kW et < 20kW	> 20kW et < 30kW
PAC sol/sol				
PAC sol/eau	2 %	52 %	41 %	5 %
PAC eau glycolée/eau				
PAC (eau/eau)	14 %	35 %	44 %	7 %
Total	5 %	47 %	42 %	6 %

Tableau 1 : Répartition du marché des PAC (P < 30 kW) selon le type et par classe de puissance (données Observ'ER)

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

L'étude Observ'ER montre également des informations sur la répartition de ces ventes selon les régions (Figure 18).

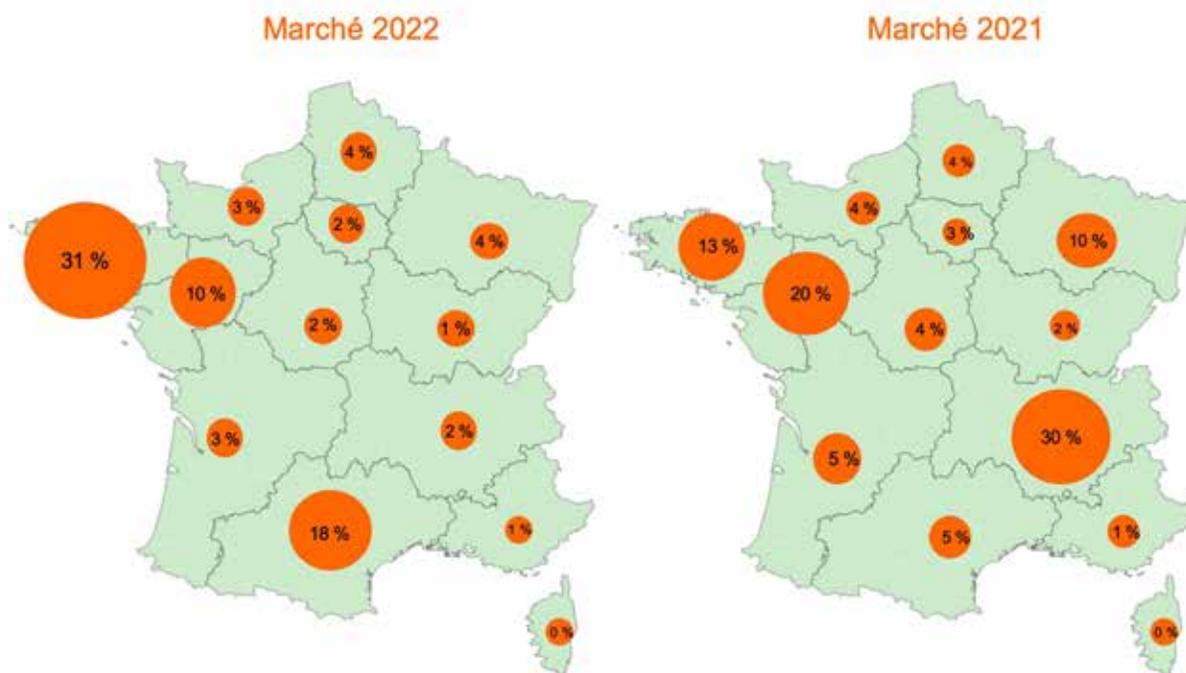


Figure 18 : Répartition géographique des ventes de PAC (P < 30 kW) en 2021 et 2022 (données Observ'ER)

Parmi ces ventes il est également possible d'estimer la part de PAC sur forage, la part de PAC sur échangeurs « par terrassement » (horizontaux et compacts) et la part de PAC achetées pour renouvellement, de 2018 à 2022* (Figure 19).

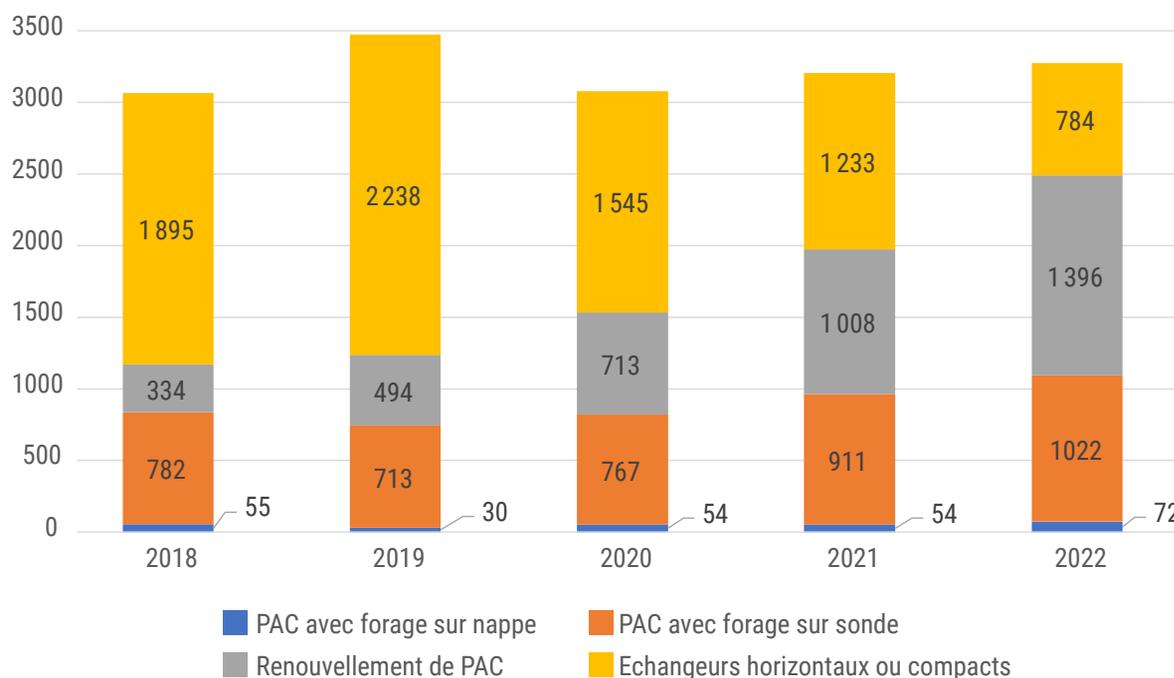


Figure 19 : Destination des ventes de PAC dans le secteur du particulier de 2018 à 2022 (données Observ'ER et BRGM)

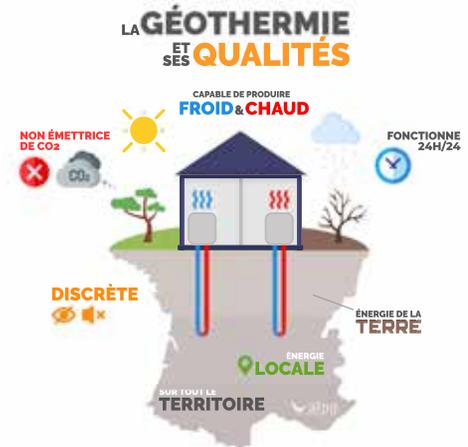
* Les données GMI sont disponibles à partir de 2015 (naissance de la réglementation), mais ne sont jugées fiables qu'à partir de 2018 en raison de l'inertie entre la création d'une réglementation et sa mise en place effective.

Nous pouvons voir que la plupart des ventes concernent les échangeurs horizontaux, puisque les échangeurs compacts sont encore rares sur le marché.

En conclusion, les ventes de PAC géothermiques individuelles constituent encore un marché de niche. Il s'agit d'une solution demeurant assez méconnue et trop rarement préconisée par les chauffagistes. A titre de comparaison, en 2022, les PAC aérothermiques dans l'individuel représentaient plus d'1 million de ventes.

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

- elle est plus facile et moins chère à entretenir, sa durée de vie est accrue (durée de vie moyenne de 26 à 27* ans pour la pompe à chaleur, et bien plus pour le reste de l'installation),
- elle est silencieuse et invisible,
- elle demeure la plus performante d'un point de vue énergétique, avec une capacité de production de froid incomparable,
- elle ne contribue pas à l'effet « îlot de chaleur urbain » lors du fonctionnement en froid,
- elle consomme moins d'électricité sur une année que la PAC aérothermique.



3. Marché de la géothermie de surface : les logements et hébergement collectifs

Concernant le marché « hors particulier », voici les hypothèses retenues :

- nous considérons que les échangeurs « par terrassement » (horizontaux et compacts) ne sont pas particulièrement utilisés car ils sont aujourd'hui souvent associés à une puissance assez faible (inférieure à 20 kW),
- grâce à la nouvelle caractérisation des installations déclarées en BSS, il nous est maintenant possible d'identifier les installations pour logements et hébergements collectifs (type hôtels, HLM...),
- nous considérons également, que la totalité des projets sont déclarés via la GMI et apparaissent donc dans la BSS,
- enfin, nous estimons qu'en moyenne une installation de géothermie de surface dans ce secteur fonctionne avec deux pompes à chaleur.

S'agissant d'une approximation, le parti pris a donc été de présenter les résultats des secteurs « hors particulier » en fonction du nombre d'installations et non pas selon les ventes de PAC, conduisant également à une plus grande précision. Les résultats sont affichés en Figure 20.

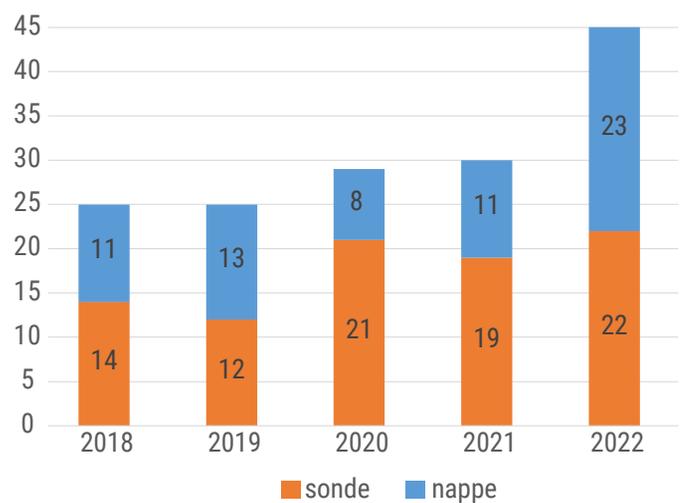


Figure 20 : Nombre de nouvelles installations à destination des logements et hébergements collectifs de 2018 à 2022 selon le type d'échangeur.

* Voir étude AFPG sur la durée de vie des PAC.

Les opérations étant très différentes entre elles, les puissances géothermales* moyennes par type de forage et par année sont présentées en Figure 21 ci-après :

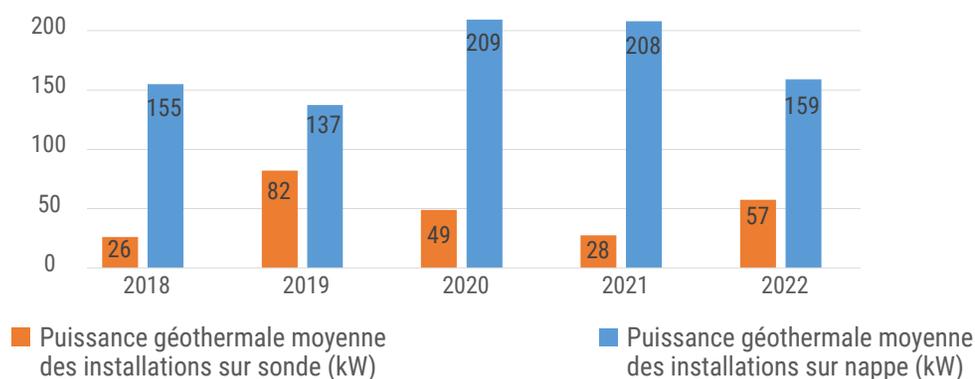


Figure 21 : Puissances moyennes prélevées au sol selon le type d'échangeur de 2018 à 2022

4. Marché de la géothermie de surface : le secteur agricole

Dans ce secteur, nous rassemblons toutes les activités agricoles et connexes, notamment l'élevage d'animaux, les cultures de plantes (fruits, légumes, céréales, fleurs...), la viticulture, la pisciculture, ainsi que les exploitations forestières.

De manière similaire au secteur collectif, nous pouvons observer les installations à partir de 2018 en fonction du type d'échangeur utilisé. Nous pouvons certes considérer qu'une installation fait appel à deux pompes à chaleur, il sera préférable dans un souci de précision de raisonner en termes d'installations.

Le marché dans le secteur agricole est très peu développé, et très hétéroclite : nous avons aussi bien affaire à des opérations atteignant 500 kW de puissance, qu'à des installations de 4 kW. Dans la Figure 22 ci-dessous, le nombre de barres équivaut au nombre d'installations, et la barre est d'autant plus haute que la puissance géothermale délivrée est grande.

La géothermie de surface est encore peu utilisée dans les domaines agricoles, elle est pourtant utile pour les exploitants qui peuvent s'affranchir des fluctuations des prix du gaz tout en agissant pour l'environnement.

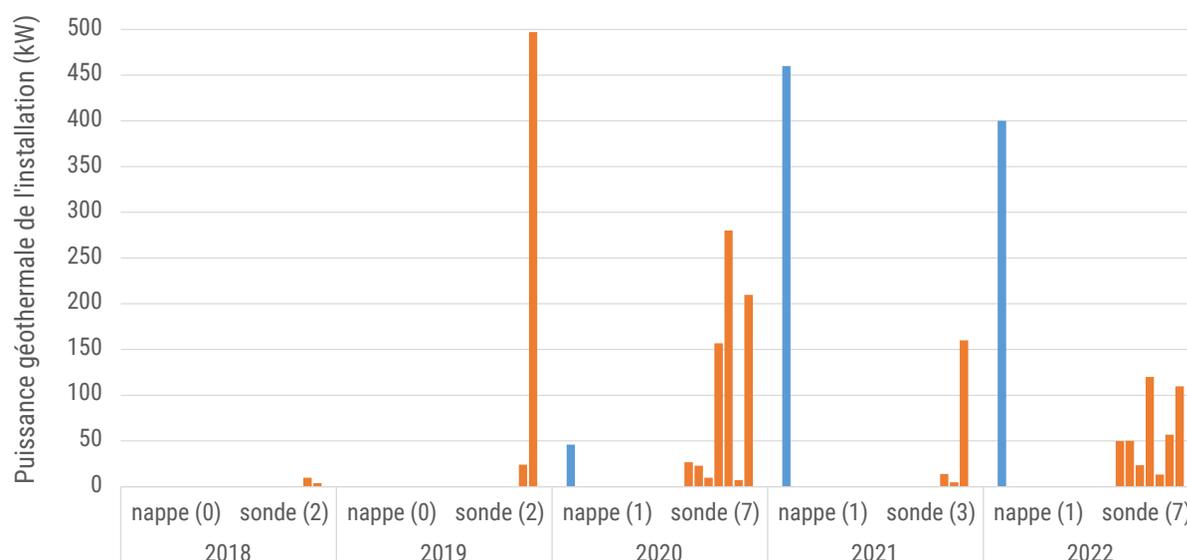


Figure 22 : Puissances et nombres de nouvelles installations à destination du secteur agricole selon le type d'échangeur de 2018 à 2022

* Puissance conférée par le sous-sol qui se distingue de la puissance en sortie de la pompe à chaleur.

Quelques exemples de géothermie de surface dans ce secteur :

- chauffer un poulailler,
- chauffer une serre,
- maintenir en température des caves à vin pour le processus de vinification.

5. Marché de la géothermie de surface : le secteur industriel

Le secteur industriel regroupe les installations servant à chauffer des process industriels dans des usines agro-alimentaires, cuirs et textiles, mécanique, papiers cartons, chimie etc. Comme pour les secteurs précédents, nous considérons qu'environ deux pompes à chaleur sont nécessaires pour une installation.

Nous pouvons désormais observer sur la Figure 23 ci-dessous, les différentes installations depuis 2018 :

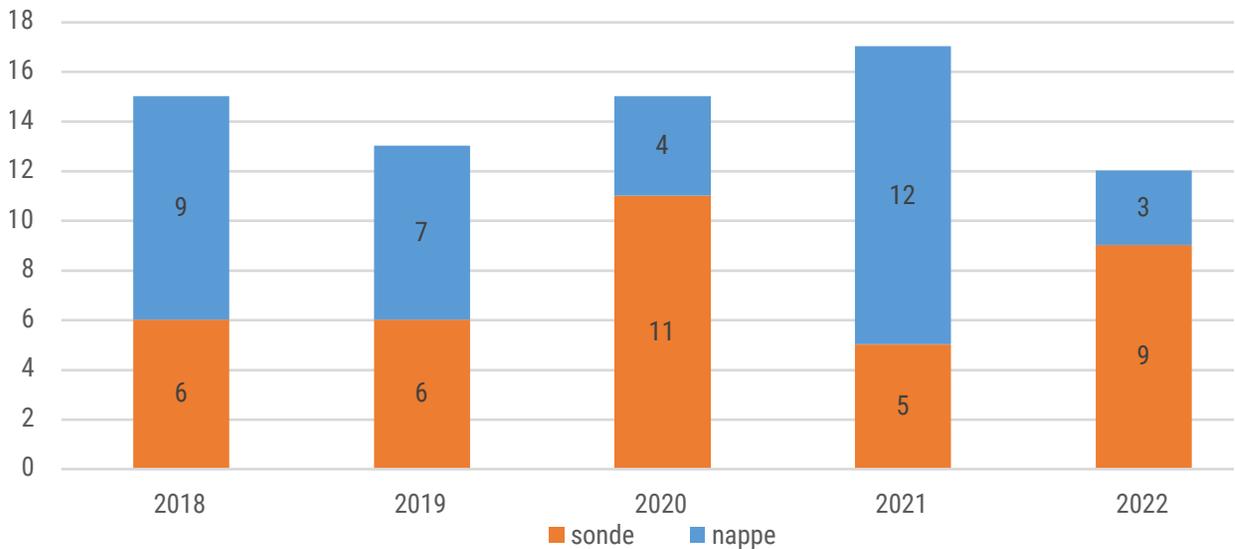


Figure 23 : Nombre de nouvelles installations à destination de l'industrie de 2018 à 2022 selon le type d'échangeur

Comme pour les installations agricoles, les installations à destination des industries peuvent nécessiter des puissances très variables en fonction de l'opération. La Figure 24 ci-dessous permet donc de visualiser les puissances moyennes utilisées dans ce secteur :

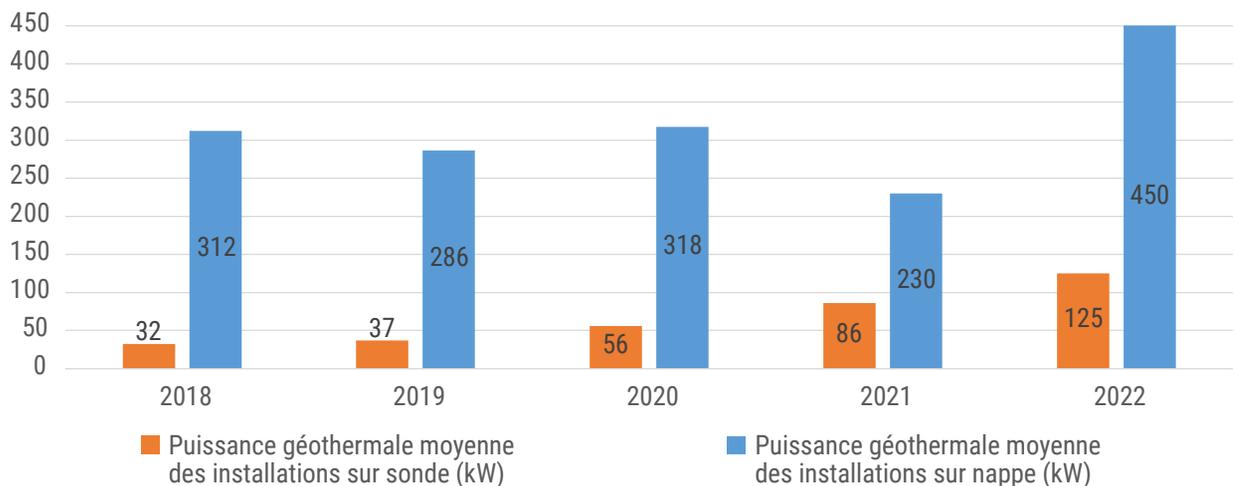


Figure 24 : Puissances moyennes prélevées au sol selon le type d'échangeur de 2018 à 2022

6. Marché de la géothermie de surface : le secteur tertiaire

Le secteur tertiaire est le plus important après celui du résidentiel individuel. Il est d'ailleurs intéressant de segmenter ce marché de manière plus précise, comme présenté dans la Figure 25 ci-dessous :

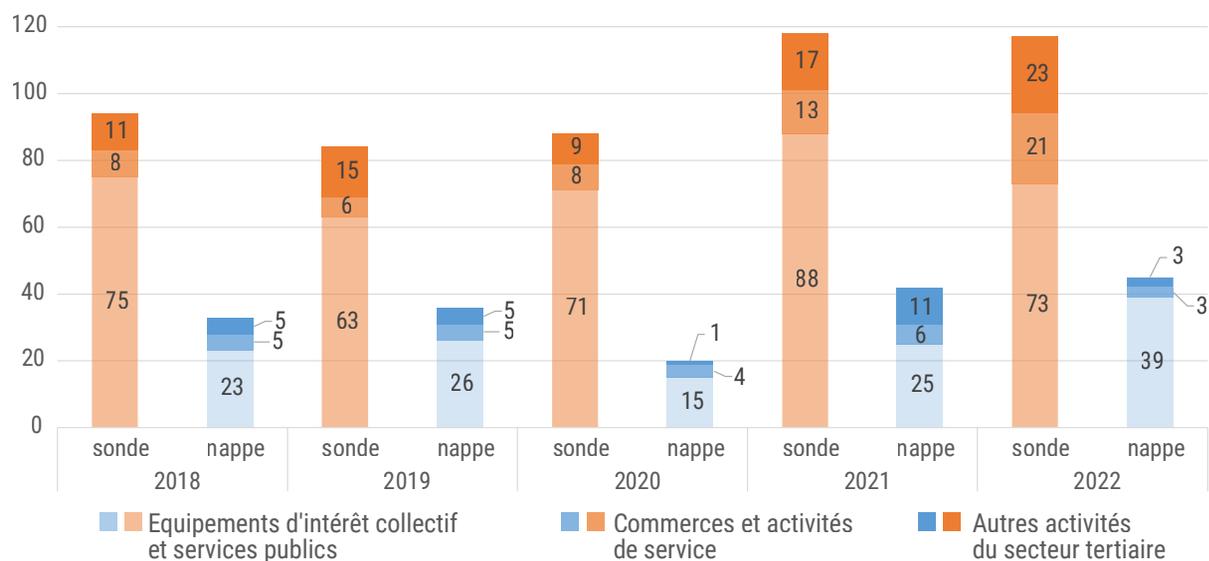


Figure 25 : Nombre de nouvelles installations à destination du secteur tertiaire en fonction du type d'échangeur de 2018 à 2022

Parmi les « équipements d'intérêt collectif et services publics », sont comptées les écoles, les piscines, les mairies... Les « commerces et activités de service » concernent les typologies de bâtiments suivantes : magasins, centres commerciaux, centres logistiques... Toutes les autres structures sont comptabilisées dans la catégorie « autres activités du secteur tertiaire » comme les bureaux d'entreprises.

Les puissances moyennes des installations de 2018 à 2022 sont présentées dans la Figure 26 ci-après :

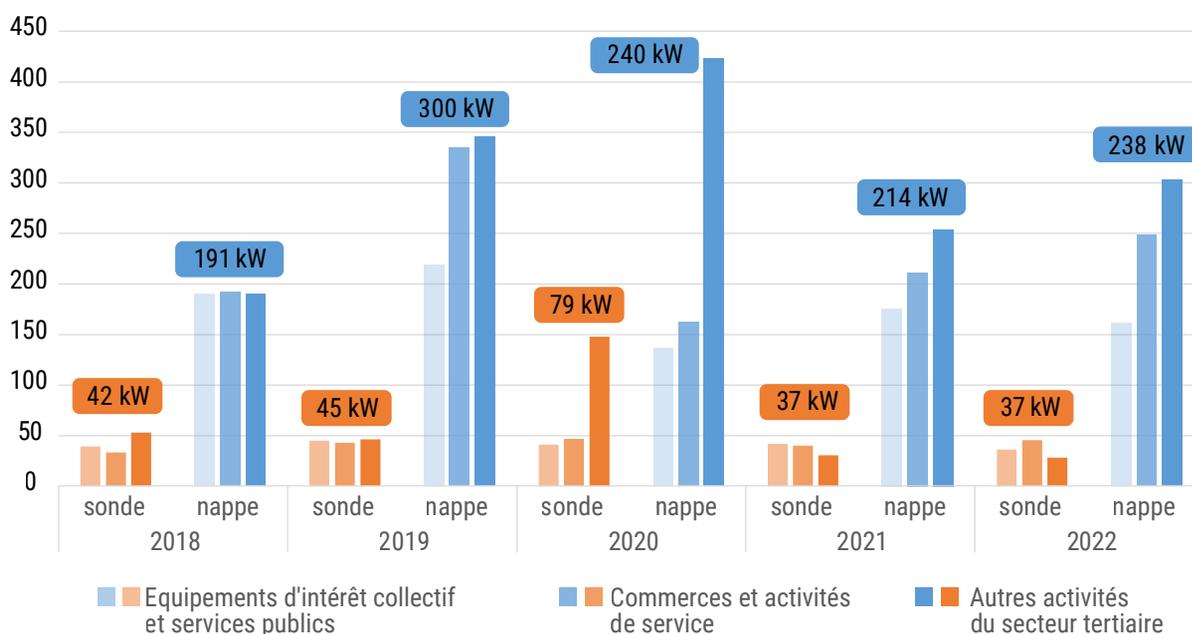


Figure 26 : Puissances géothermales moyennes selon les catégories du secteur tertiaire et selon le type d'échangeur de 2018 à 2022

7. Bilan général

En 2022, voici la répartition (Figure 27) des nouvelles installations par type de marchés :

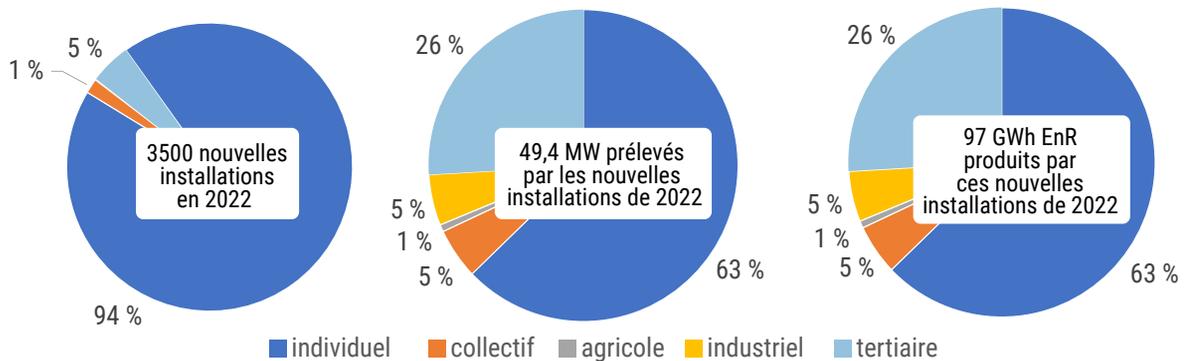


Figure 27 : Bilan sur les nouvelles installations de 2022 en France Métropolitaine

Les installations construites avant 2022 et encore en fonctionnement s'ajoutent à la production des nouvelles installations de 2022 pour atteindre 4,58 TWh/an. La Figure 28 ci-dessous donne un bilan général de la filière de géothermie de surface.

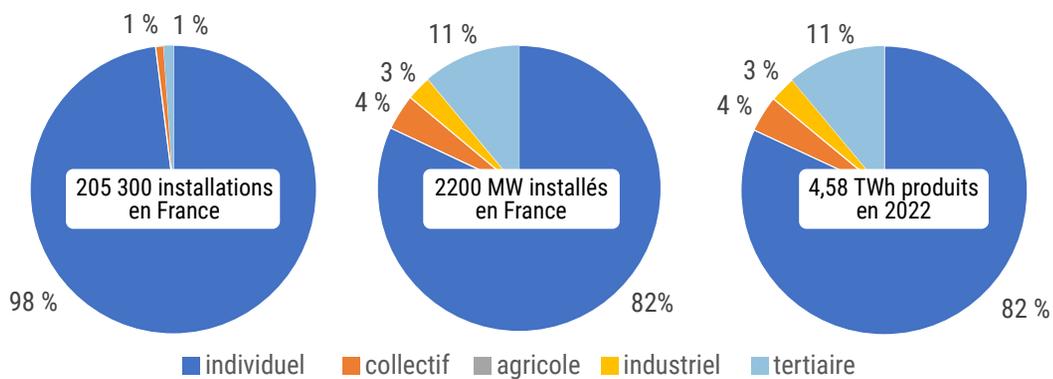


Figure 28 : Bilan des installations en fonctionnement en France métropolitaine en 2022

La nouvelle méthodologie nous permet d'avoir des valeurs fiables de 2018 à 2022. Elle permet également d'estimer des puissances moyennes pour chaque secteur, qui ont pu être utilisées pour corriger les valeurs antérieures à 2018. La méthodologie de calcul détaillée est présentée au III - 8. La Figure 29 ci-dessous, reprend les estimations de production de chaleur en géothermie de surface depuis 2005.

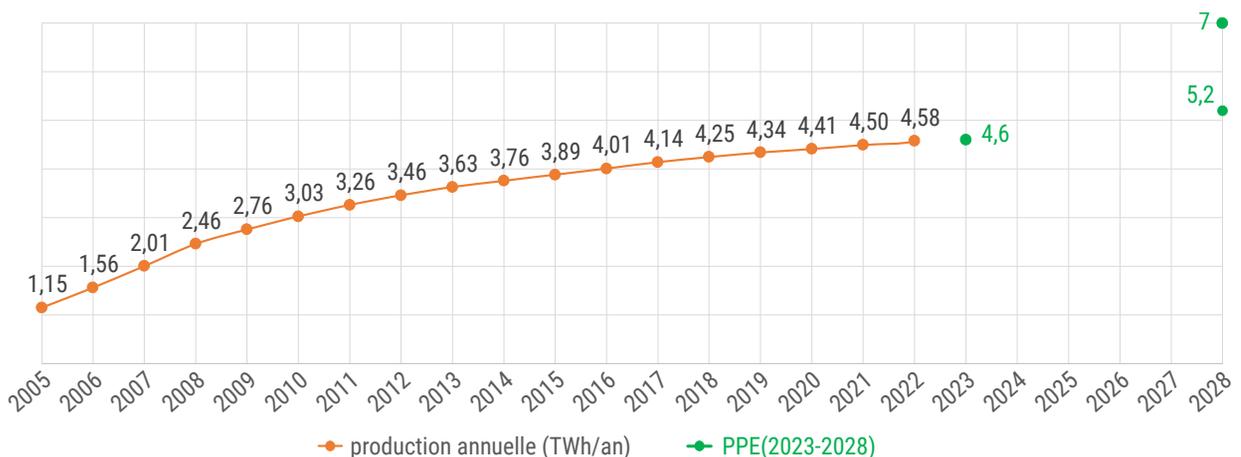


Figure 29 : Production annuelle (TWh/an) par géothermie de surface en France Métropolitaine depuis 2005 et objectifs PPE 2023-2028

La correction des nouvelles valeurs montre une diminution globale des chiffres annoncés dans la dernière édition de l'étude, mais qui dénote une plus grande précision sur le marché réel de la géothermie de surface. Aux vues de la tendance de la courbe, la PPE 2023 de 4,6 TWh sera sûrement atteinte.

8. Méthodologie

A l'image de la précédente édition, plusieurs entités se sont accordées sur la méthodologie à suivre pour estimer la quantité d'énergie d'origine géothermique annuellement mobilisée. L'AFPG tient à remercier les partenaires impliqués, et notamment l'ADEME, le SER, le BRGM, Observ'ER, le SFEG et l'AFPAAC.

• Distinction des opérations selon leurs secteurs :

Le BRGM a pu intégrer une nouvelle caractérisation pour distinguer les secteurs auxquelles appartiennent les opérations déclarées en GMI (depuis 2015). En effet, le BRGM possède les données de télédéclaration parmi lesquelles celles relatives au type d'usage du bâtiment. Ce champ n'étant pas rempli systématiquement car non obligatoire, le BRGM s'aide donc d'un autre outil : l'Observatoire de la Géothermie de Surface (ODGS). L'ODGS fonctionne à partir d'automatismes qui permettent de classer les opérations selon leurs catégories via des données de type SIRET et raison sociale. Le peu d'opérations restant sans catégories ont été déterminées par le BRGM et l'AFPG via leur géolocalisation, puisque la localisation exacte des opérations est déclarée en BSS.

• Énergie produite - Secteur individuel :

La méthodologie s'appuie sur les ventes de PAC Observ'ER avec une puissance de 30 kW. Le nombre d'opérations sur sonde et sur nappe peut être connu via les télédéclarations de la GMI qui apparaissent sur la BSS. Puis une loi de Weibull* (loi statistique représentant la durée de vie d'un système) est appliquée sur les ventes de PAC pour connaître chaque année le nombre de PAC qui tombent en panne. Nous supposons que l'ensemble des pompes à chaleur tombées en panne sont remplacées : si tel n'est pas le cas, le nombre de nouvelles installations sur échangeurs « par terrassement » en serait augmenté. Nous pouvons ainsi calculer le nombre d'installations sur échangeurs horizontaux et compacts de la manière suivante :

Nombre d'opérations sur échangeurs horizontaux ou compacts = Ventes de PAC – Nombre d'opérations sur sondes et nappe – Renouvellements.

Ce calcul donne une idée du nombre minimum d'échangeurs horizontaux vendus. Comme précisé précédemment, si aucune PAC tombée en panne n'est renouvelée, alors la part associée à ces échangeurs augmente.

L'énergie produite est calculée selon la formule :

$$\text{Énergie produite (kWh)} = \left(\sum N_{PAC} \times P_{PAC} \times T \right) \times \left(\frac{SCOP - 1}{SCOP} \right)$$

Avec :

- N_{PAC} : le nombre de PAC en fonctionnement,
- P_{PAC} : la puissance en sortie de la PAC (12 kW en moyenne),
- T : le temps de fonctionnement moyen de la PAC (2070 heures),
- SCOP : le coefficient de performance saisonnier ≈ 4 .

La puissance moyenne d'une PAC du secteur individuel est de 12 kW. Le SCOP est pris égal à 4, et le temps annuel de fonctionnement est de 2070 heures. Ces valeurs restent inchangées par rapport aux précédentes études.

Nota Bene : les valeurs « puissance moyenne restituée » et « SCOP » sont calées sur la base de la puissance moyenne échangée avec le sol pour les installations sur sondes chez les particuliers, afin d'être en cohérence avec celle-ci.

* Toutes les informations sur la durée de vie des PAC et sur la loi Weibull sont présentes dans une étude AFPG « ETUDE SUR LA DUREE DE VIE DES INSTALLATIONS DE GEOTHERMIE DE SURFACE » publiée en 2022.

• **Energie produite - Secteurs « hors particulier » :**

Pour les secteurs hors particulier, il a été facile de les distinguer grâce à la caractérisation effectuée par le BRGM. Des données sur les puissances des opérations étant également disponibles, l'énergie produite a pu être calculée par la simple formule : $Energie = Puissance \times Temps (2070 h)$.

• **Correction de la courbe de 2005 à 2018 :**

Grâce aux données de 2018 à 2022, nous avons estimé la part d'opérations agricoles et industrielles de 2005 à 2018, mais aussi les puissances moyennes pour chaque secteur, que nous avons appliquées aux années 2005 à 2018. La loi de Weibull a également été appliquée sur ces secteurs, mais le nombre de PAC à renouveler est très négligeable et ne fait pas varier la production globale, ni la puissance installée. C'est pourquoi cette étude ne prend en compte les renouvellements que pour le secteur individuel.

• **Limites de la méthodologie :**

Dans cette étude, nous considérons un temps de fonctionnement de PAC de 2070 heures qui s'appuie sur la méthodologie européenne. Il s'agit toutefois d'un sujet à approfondir dans les années à venir afin de se rapprocher encore plus de la réalité du marché français.

De plus, l'étude met en avant dans le secteur individuel une valeur de 12 kW en sortie de PAC (donc de 9 kW en entrée de PAC avec un COP de 4). Il est encore difficile d'estimer une puissance plus précise puisque le marché des échangeurs horizontaux représente une part des ventes non négligeable chaque année. Par ailleurs, il n'est pas possible de savoir si les PAC vendues pour renouvellement visent à remplacer des sondes, des nappes ou des échangeurs. Avec la méthodologie du BRGM, il nous est possible d'avoir une estimation de la puissance moyenne pour les opérations sur sonde et sur nappe, mais qui ne représente que 30 % du marché en moyenne. Ces valeurs sont exposées dans la Figure 30 ci-dessous.

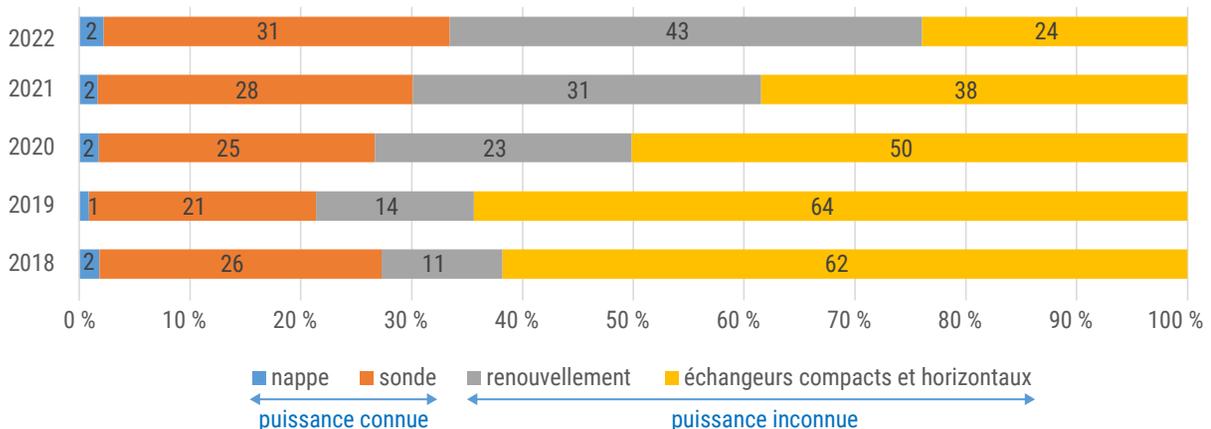


Figure 30 : Proportion des ventes de PAC dans l'individuel et connaissance des puissances

Sur l'ensemble des données que l'AFPG possède concernant les échangeurs compacts type corbeille ou mur, la puissance moyenne est de 8,4 kW en entrée de PAC (soit 11,2 kW en sortie de PAC avec un COP de 4) mais ce type de technologie représente seulement environ 1% des ventes de PAC dans l'individuel. La puissance des échangeurs horizontaux est inférieure à 20 kW mais aucune valeur moyenne ne peut à ce jour être mise en avant, faute d'étude sur le sujet. La valeur des 12 kW en sortie de PAC pour l'individuel est donc sûrement sous-évaluée. La Figure 31 ci-contre, donne les puissances moyennes des opérations GMI (nappe et sonde confondus) de 2018 à 2022.

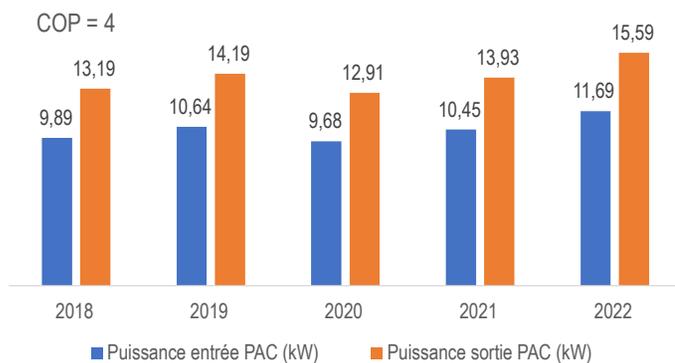


Figure 31 : Puissances moyennes des opérations GMI (nappe et sonde confondus) de 2018 à 2022

IV. Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre

- Le développement de la filière géothermie est guidée par des objectifs inscrits dans la loi, notamment la Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) qui cible l'atteinte, en 2030, de 38 % de chaleur renouvelable dans la consommation finale de chaleur contre 22 % en 2021. Le Club de la chaleur renouvelable propose un plan plus ambitieux, en accord avec l'urgence climatique : atteindre une part de 54 % en 2030, bien que cet objectif ne soit pas inscrit dans la loi.
- La LTECV encadre également la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) qui fixe des objectifs de production pour chaque énergie renouvelable. Concernant la géothermie de surface, la PPE 2023 prévoit une production de 4,6 TWh et celle de 2028 de 5 à 7 TWh.
- De plus, le décret tertiaire impose une réduction des consommations d'énergie progressive pour les bâtiments tertiaires dont la surface de plancher est supérieure ou égale à 1000 m². Les propriétaires ou locataires concernés ont deux solutions pour y parvenir :
 - une méthode relative (qui vise -40 % de réduction en 2030, puis -50 % en 2040 et enfin -60 % en 2050, par rapport à une année de référence postérieure à 2010 et de pleine exploitation) ou bien,
 - une méthode absolue (atteindre une réduction fixée par arrêté selon le type de bâtiment en 2030, puis 2040 puis 2050).

La géothermie se présente donc comme une bonne opportunité pour réduire les consommations, étant donné la performance des pompes à chaleur : pour 1 kilowattheure consommé, la PAC produit 4 à 6 kWh. Ainsi, pour répondre à un même besoin de chauffage, par exemple 100 kWh, une pompe à chaleur géothermique utilise environ 20 kWh d'électricité quand une chaudière gaz a besoin d'environ 110 kWh_PCS de gaz. L'énergie consommée pour le chauffage est ainsi divisée par 5,5.

- Enfin, le Plan d'action gouvernemental du 2 février 2023 évoque l'objectif de doubler le nombre d'installations de pompes à chaleur géothermiques chez les particuliers d'ici 2025.

Les moyens à mettre en œuvre pour accroître la géothermie sur le territoire sont multiples.

1. Les actions du plan du 2 février 2023

Le gouvernement indique dans son plan, des actions à mettre en place comme :

- créer des formations pour les foreurs de demain : formations initiales et continues spécialisées dans le forage géothermique de surface,
- mettre les exigences des activités de forage géothermique et d'eau aux mêmes niveaux de contrainte,
- finaliser la cartographie régionale des zones GMI (zones vertes, orange et rouges) (voir partie sur la GMI),
- adapter la réglementation pour les nouvelles solutions de géothermie comme le géostockage et les sondes inclinées,
- rendre visible les professionnels de la géothermie de surface (installateurs de PAC, foreurs qualifiés...). C'est d'ailleurs une action que réalise l'AFPG avec la cartographie GéoArtisan (voir partie GéoArtisan).
- renforcer le « coup de pouce chauffage CEE » afin d'augmenter le nombre de projets dans le secteur résidentiel,
- mobiliser des contrats de développement des énergies renouvelables subventionnés par l'ADEME pour le tertiaire. Il s'agit de contrats de 3 à 6 ans destinés aux collectivités, entreprises et associations, qui permet de rassembler des petits projets de chaleur renouvelable en un seul grand projet afin de bénéficier de subventions, ce qui n'aurait pas été possible si chaque projet avait demandé l'aide du Fonds Chaleur individuellement,
- continuer à collecter et analyser les données du sous-sol tout en les communiquant et, par extension, développer des outils d'aide à la décision basée sur ces données. ✦



2. Le Fonds Chaleur

Mis en place en 2009, le Fonds Chaleur est une mesure ayant pour but d'aider au financement des installations productrices de chaleur renouvelable (biomasse, biogaz, énergie solaire thermique, géothermie, chaleur de récupération, ...), les réseaux de chaleur ou BETEG liés à ces installations, mais aussi la production et la distribution de froid renouvelable (dans le cas par exemple du géocooling, des PAC géothermiques en thermofrigopompe et de la climatisation à l'eau de mer). Depuis le début de l'année 2022, les échangeurs compacts de type corbeilles et murs sont également éligibles au Fonds Chaleur.

Géré par l'ADEME, ce fonds est dédié aux secteurs du résidentiel collectif, du tertiaire ainsi que de l'industrie et de l'agroalimentaire. Il peut se cumuler notamment avec les crédits régionaux, le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER), et parfois aussi avec les Certificats d'Économies d'Énergie (CEE).

Sur la période 2009-2021, c'est 3,35 milliards d'euros qui ont été engagés par l'ADEME sur ce Fonds Chaleur pour accompagner et financer plus de 7000 opérations d'énergies renouvelables. 116 592 tonnes de CO₂ ont notamment été évitées. En 2022, le budget du Fonds Chaleur a été doté de 522 millions d'euros. Pour 2023, le Club de la chaleur renouvelable demande dans son plan Marshall un budget de 750 millions d'euros qui n'a pas encore été validé.

Concernant la géothermie de surface, ce sont 856 opérations qui ont bénéficié du Fonds Chaleur entre 2009 et 2022. Les Figures 32 à 37, donnent les différents chiffres issus des projets de géothermie de surface ayant bénéficié d'une aide via le Fonds Chaleur. Les données prévisionnelles du Fonds Chaleur permettent d'estimer la puissance installée correspondante. Elles sont de l'ordre de :

- 493 opérations sur sondes : 48,6 millions d'euros d'aide pour 63 MW de puissance installée,
- 262 opérations sur nappe : 38,3 millions d'euros d'aide pour 121 MW de puissance installée,
- 23 opérations sur eau de mer : 22,4 millions d'euros d'aide pour 62,8 MW de puissance installée,
- 80 opérations sur eaux usées : 30,3 millions d'euros d'aide pour 91 MW de puissance installée.

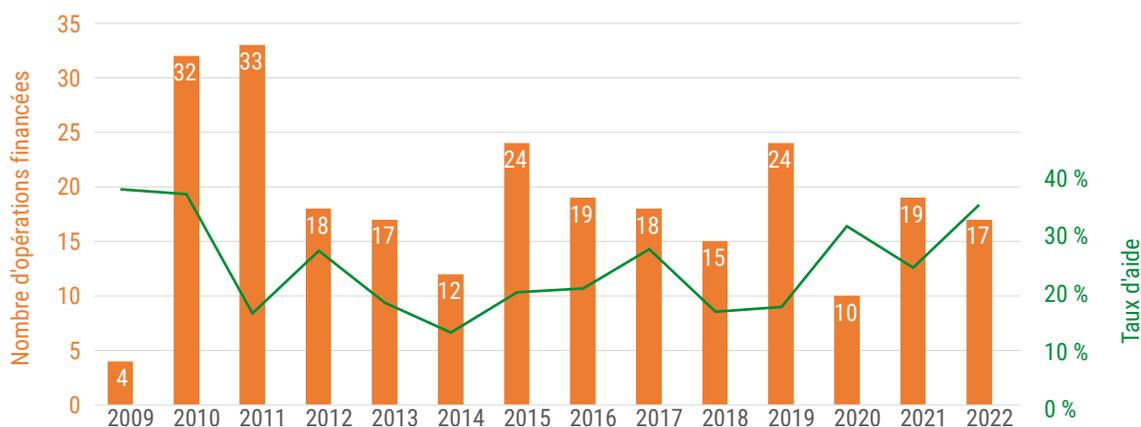


Figure 32 : Opérations de géothermie sur sondes financées par le Fonds Chaleur (données ADEME - Fonds Chaleur)

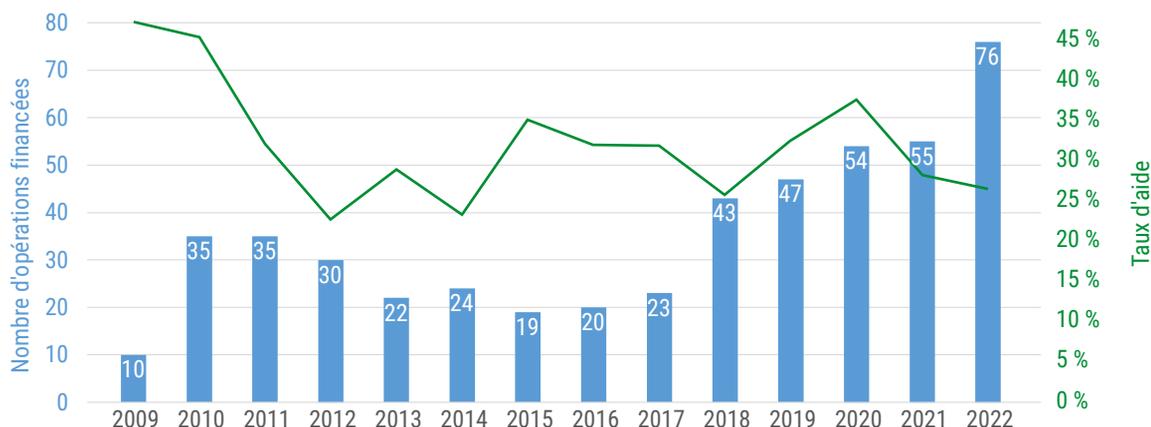


Figure 33 : Opérations de géothermie sur nappe superficielle (< 200 m) financées par le Fonds Chaleur (données ADEME - Fonds Chaleur)

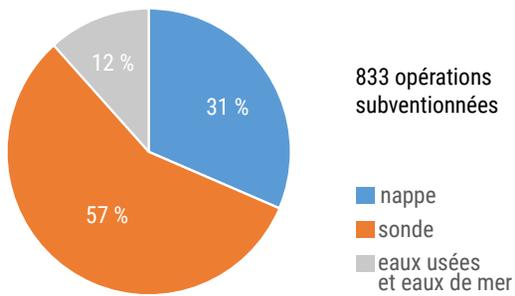


Figure 34 : Répartition des opérations de géothermie de surface ayant bénéficié du Fonds Chaleur de 2009 à 2022

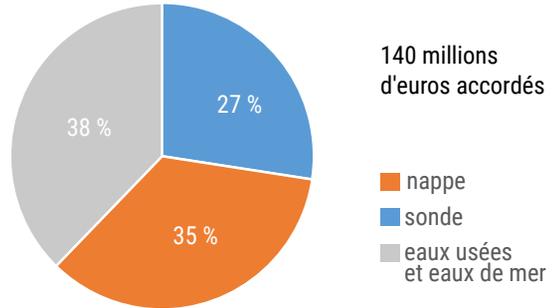


Figure 35 : Répartition des montants accordés par l'ADEME de 2009 à 2022

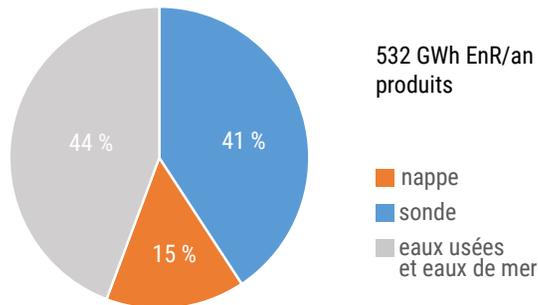


Figure 36 : Répartition de l'énergie renouvelable prévisionnelle des opérations subventionnées par le Fonds chaleur de 2009 à 2022

Ces chiffres montrent qu'il existe de nombreuses opérations sur sondes, mais que les opérations sur nappe et sur eaux usées ou de mer/lac sont les projets qui produisent le plus d'énergie. Nous pouvons notamment retrouver cette tendance sur la Figure 37 ci-dessous.

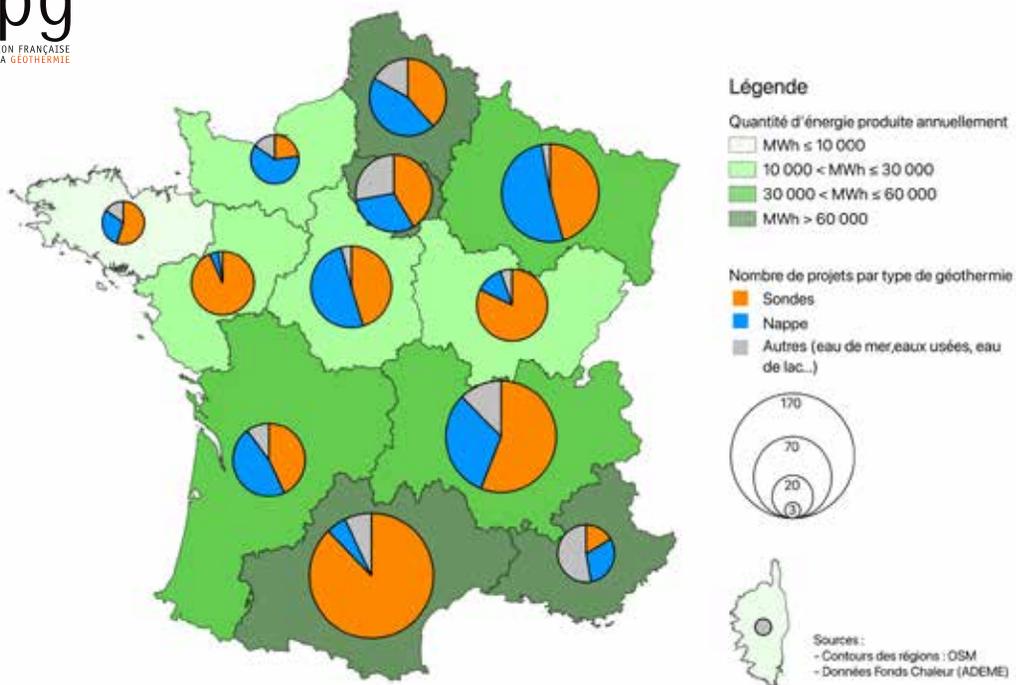


Figure 37 : Bilan des projets de géothermie de surface ayant bénéficié du Fonds Chaleur depuis 2009, selon les régions



Nous pouvons noter que les installations sur nappe et eaux de mer/eaux usées permettent de produire davantage d'énergie malgré un nombre d'opération inférieur à ceux des sondes. En revanche, les champs de sondes sont déployables sur la quasi-totalité du territoire, et permettent de répondre aux besoins de plus petites installations. Ils présentent également des coûts d'entretien largement inférieurs.

Concernant les BETEG, une trentaine d'opérations (déjà en service ou en cours de réalisation) a été financée par le Fonds Chaleur fin 2022 pour un montant total d'aide de 66,7 millions d'euros. Concernant la totalité des opérations, 52 kilomètres de BETEG ont été déployés et 166 GWh d'énergies renouvelables sont valorisées chaque année pour couvrir 203 GWh/an de besoins de chaud et de froid.

L'ADEME contribue également au financement des études de faisabilité depuis 2009. De 2019 à 2022, 560 études pour la géothermie de surface ont bénéficié du Fonds Chaleur, représentant 7,8 millions d'euros d'aides.

Les aides de l'ADEME sont principalement octroyées par ses directions régionales. Le dépôt des dossiers de demande d'aides Fonds chaleur peut s'effectuer dans le cadre d'appels à projets régionaux, ou bien au fil de l'eau via le site de l'ADEME : <https://fondschaleur.ademe.fr/geothermie/>.

3. Garantie Aquapac

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

Elle regroupe deux garanties :

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

Depuis sa création, plus de 420 dossiers ont fait l'objet d'une instruction AQUAPAC. Le graphique, Figure 38, suivant montre l'évolution du nombre de dossiers déposés depuis 1984, en corrélation avec l'activité géothermique en France. La Figure 39 montre la distribution de ces projets sur le territoire.

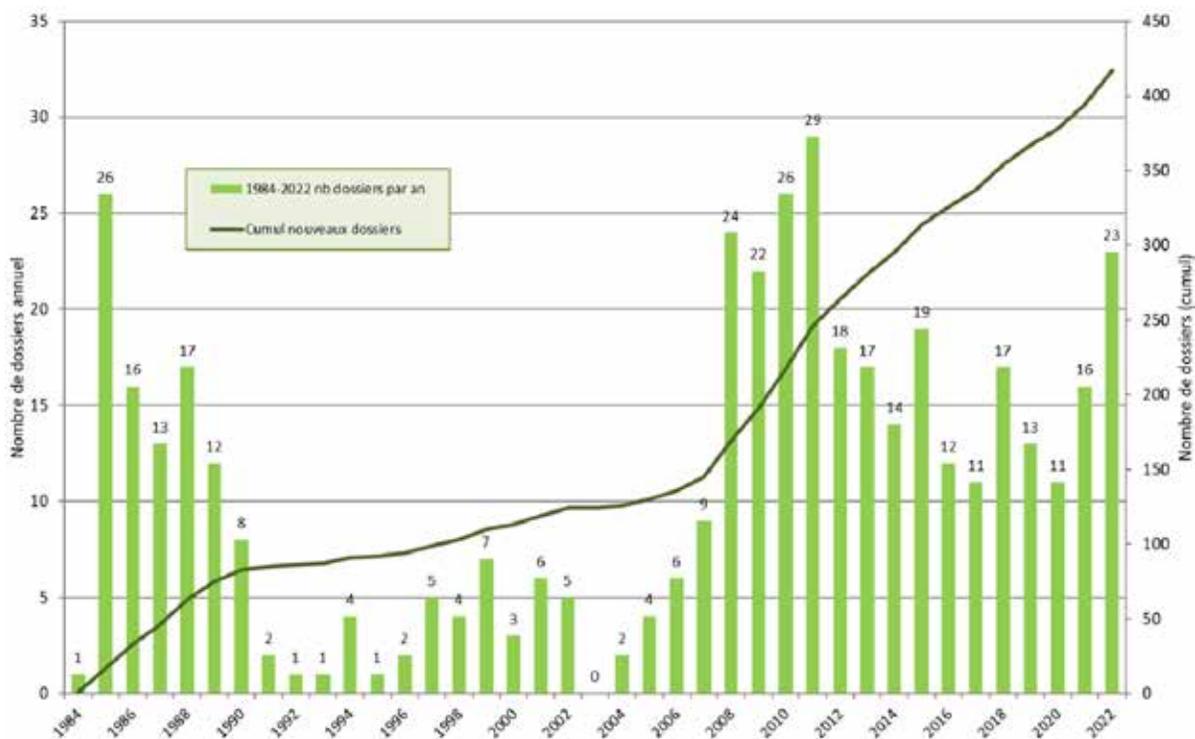


Figure 38 : Évolution des dossiers de Garantie Aquapac (BRGM)

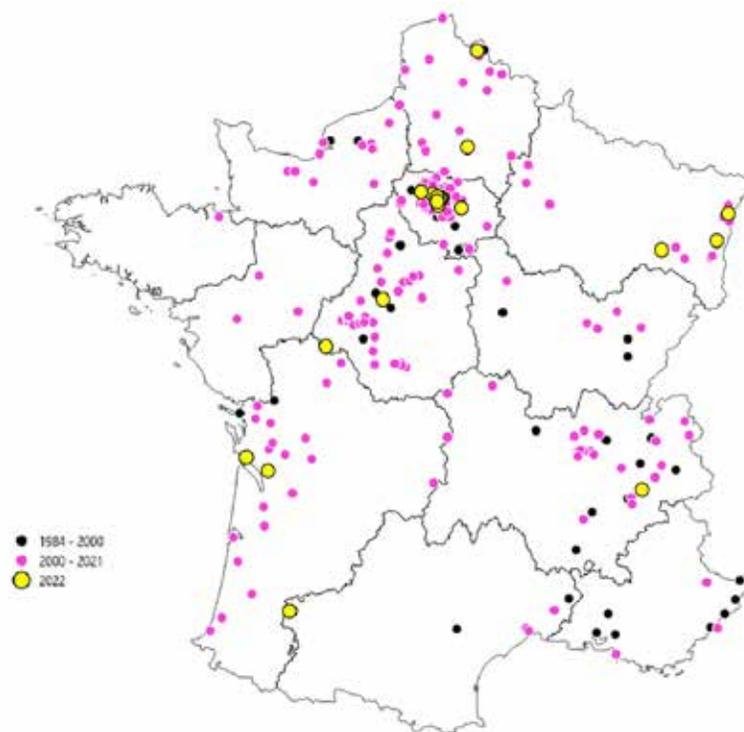


Figure 39 : Localisation géographique des opérations Aquapac depuis 1984

4. La réglementation de Géothermie de Minime Importance (GMI)

En vigueur depuis 2015, le décret sur les gîtes géothermiques de minime importance (GMI) permet d'alléger les procédures pour des exploitations de gîtes géothermiques selon certaines conditions par rapport au Code minier. La GMI concerne les opérations :

- dont la profondeur se trouve entre 10 et 200 mètres sous la surface sur sol,
- dont la puissance extraite au sous-sol est inférieure à 500 kW,
- dont la température est inférieure à 25°C en sortie d'ouvrage,
- dont le débit prélevé de la nappe (s'il s'agit d'une opération sur nappe) ne doit pas excéder 80 m³/h et dont l'eau est rejetée dans son aquifère d'origine.

Les projets respectant les critères ci-dessus ont un régime déclaratif allégé et dématérialisé : la télédéclaration.

Ce décret s'appuie sur 4 arrêtés :

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

Concernant la cartographie, les maîtres d'ouvrage doivent vérifier que leur projet se trouve dans une zone adéquate en consultant la cartographie nationale ou la cartographie régionale plus précise, quand celle-ci a été établie. La première phase de réalisation des cartes régionales est terminée. La deuxième phase est en cours de finalisation pour les régions Pays de la Loire, Occitanie et Normandie. La dernière phase sera terminée en 2023 et concerne les territoires suivants : Bretagne, Bourgogne-Franche-Comté, PACA, Corse et Hauts-de-France.



Ces cartographies présentent 3 zones :

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

Aucun projet de géothermie de surface n'a été réalisé en zone rouge à ce jour.

5. La certification des foreurs

L'ordonnance n°2022-1423 du 10 novembre 2022, en lien avec la loi « Climat et résilience », a introduit l'obligation de certification pour les prestations de travaux de forage exécutées pendant l'ouverture des travaux d'exploitation ou pendant les travaux d'arrêt d'un gîte géothermique en GMI, en remplacement de la qualification actuellement requise qui ne devrait plus être délivrée dès la fin du premier semestre 2024. A l'heure où ce document est rédigé, le calendrier prévu est une consultation publique avant la fin de l'année 2023 pour une application mi-2024 : de sorte que toutes les entreprises de forage intervenant en géothermie devraient être certifiées avant mi-2025.

De façon plus globale, les entreprises de forage devraient toutes être soumises à des exigences de certification, indépendamment de leur action dans le champ de la géothermie. Selon toute vraisemblance, les textes réglementaires ne paraîtront qu'après ceux relatifs à la géothermie, plus urgents du fait du vide qui serait créé par la fin de la qualification.

6. Les Certificats d'économie d'énergie

Dans le cadre de la loi POPE (programme fixant les orientations de la politique énergétique), les Certificats d'Économie d'Énergie sont des outils pour maîtriser la demande en énergie. Ce dispositif se base sur l'obligation des fournisseurs d'énergie à effectuer des économies d'énergie, qu'ils doivent réaliser à travers des travaux d'économies d'énergies sous peine d'amendes et de pénalités.

Ainsi, le fournisseur verse une « prime CEE » aux bénéficiaires pour leur permettre de réaliser des travaux, comme la mise en place d'une pompe à chaleur géothermique pour remplacer une chaudière à gaz. La prime CEE sera d'autant plus élevée que les économies d'énergies le seront. En aidant les bénéficiaires à réduire leurs consommations, les fournisseurs obtiennent des CEE qu'ils doivent acquérir en quantité suffisante sur une période donnée, pour prouver leurs économies d'énergie.

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

Le dispositif des CEE est cumulable avec l'écoprêt à taux zéro, le prêt avance Rénovation, MaPrimeRénov', et depuis le 1er juillet 2022 avec MaPrimeRénov'Sérénité. En revanche, il n'est pas cumulable avec certaines aides proposées par des collectivités territoriales.

7. Les aides aux particuliers

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

- MaPrimeRénov est une aide à la rénovation énergétique. Son montant est calculé en fonction des revenus et du gain écologique des travaux. Le budget MaPrimeRénov a d'ailleurs été renforcé depuis le 1^{er} janvier 2023 avec :
 - une augmentation du plafond budgétaire de MaPrimeRénov Copropriété de 15 000 € à 25 000 €,
 - le doublement des primes individuelles versées aux ménages très modestes (3 000 €) et modestes (1 500 €),
 - une augmentation des forfaits rénovations globales pour les ménages aux ressources intermédiaires (10 000 €) et supérieurs (5 000 €),

- une augmentation du plafond budgétaire des travaux dans le cadre de MaPrimeRénov' Sérénité (anciennement appelé « Habiter Mieux ») de 30 000 € à 35 000 €. Cette aide permet de financer des travaux de rénovation globale pour les propriétaires aux revenus modestes. L'aide s'applique si les travaux en question permettent un gain énergétique de 35 % minimum,
- le démarrage du dispositif MonAccompagnateurRénov', qui permet aux ménages de se faire accompagner par un interlocuteur tiers dans leurs projets de travaux, sur les points techniques, administratifs, financiers et sociaux.
- le Coup de pouce chauffage CEE facilite le remplacement d'une ancienne chaudière (charbon, fioul, gaz hors condensation) par une PAC géothermique. Désormais, 5 000 € d'aides sont octroyées pour les ménages, quel que soit le niveau de leurs revenus,
- l'éco-prêt à taux zéro permet de financer des travaux lourds de rénovation énergétique en résidence principale.

Malheureusement, il n'existe pas, à ce jour, de mécanisme significatif d'aide pour le particulier en construction neuve.

8. Le cluster « France Géoénergie »

L'AFPG a créé tout récemment un Cluster dédié à la géothermie de surface. Ce Cluster a pour objet la systématisation de la géothermie de surface (< 200 m) auprès des donneurs d'ordre, des maîtres d'ouvrage tant publics que privés (aménageurs, promoteurs, foncières, bailleurs sociaux, directions immobilières, Property et Facility managers, ...), de leurs conseils techniques, énergétiques et environnementaux, des entreprises générales de travaux et auprès des différents décideurs publics en les accompagnant dans l'opérationnel.

Une attention particulière sera apportée aux différentes filières de formation à la production de chaleur et de froid par géothermie.

Le Cluster assurera les missions suivantes :

- promouvoir le développement en France de la géothermie de surface (< 200 mètres), également dénommée « géoénergie »,
- mettre en lumière des outils et travaux existants et la création d'outils complémentaires relatifs à la performance énergétique des bâtiments dans un contexte réglementaire en perpétuelle évolution,
- promouvoir la géoénergie auprès des maîtres d'ouvrage publics et privés, des médias, du grand public, du monde académique et des élus, de ses avancées technologiques et des sites déjà existants (démonstrateurs), et ce pour tout type de bâtiment,
- en complément et en concertation avec les syndicats professionnels et entités représentatives de la filière, représenter les usagers de la géoénergie auprès des tiers, notamment des pouvoirs publics français et européens, ainsi que des autorités de régulation,
- informer sur les évolutions réglementaires, techniques et économiques de la géothermie de surface et de la réglementation relative à la construction et au logement,
- soutenir et accompagner des porteurs de projets de géoénergie au sein des territoires,
- lancer des actions de communication d'envergure, participer à des salons ciblés, colloques, séminaires et autres opportunités de valorisation de la filière,
- inciter et appuyer le déploiement des formations auprès des décideurs publics et privés, des services et entreprises techniques, des bureaux de contrôle, des étudiants,
- faire émerger des retours d'expérience sur la mise en œuvre opérationnelle de projets de géoénergie pour identifier les forces et freins,
- améliorer les interfaces entre les filières du bâtiment et de la géothermie de surface,
- approfondir et promouvoir les innovations permettant d'améliorer l'efficacité des installations de géoénergie avec d'autres sources d'EnR et technologies avancées (exemples : hybridation, BETEG, intelligence artificielle, etc.),
- populariser les solutions de tiers financement,
- créer et promouvoir le « Pacte géoénergie », symbole de l'engagement des acteurs.



9. La charte des Géoartisans

L'AFPG a mis en place une carte recensant au niveau national les installateurs de pompes à chaleur géothermiques (voir Figure 40 ci-dessous), puis dans un second temps les foreurs et entreprises de terrassement. En effet, il est actuellement difficile pour un porteur de projet de pouvoir les identifier. En échange de ce recensement qui leur donne de la visibilité, les professionnels doivent signer une charte où ces derniers s'engagent notamment à faire la promotion de la solution géothermique auprès de ses prospects sans la discriminer par rapport à d'autres solutions sur PAC. La charte les engage également à rendre compte des réalisations sur PAC géothermiques auprès de l'AFPG afin d'avoir un retour d'expérience chiffré d'année en année.

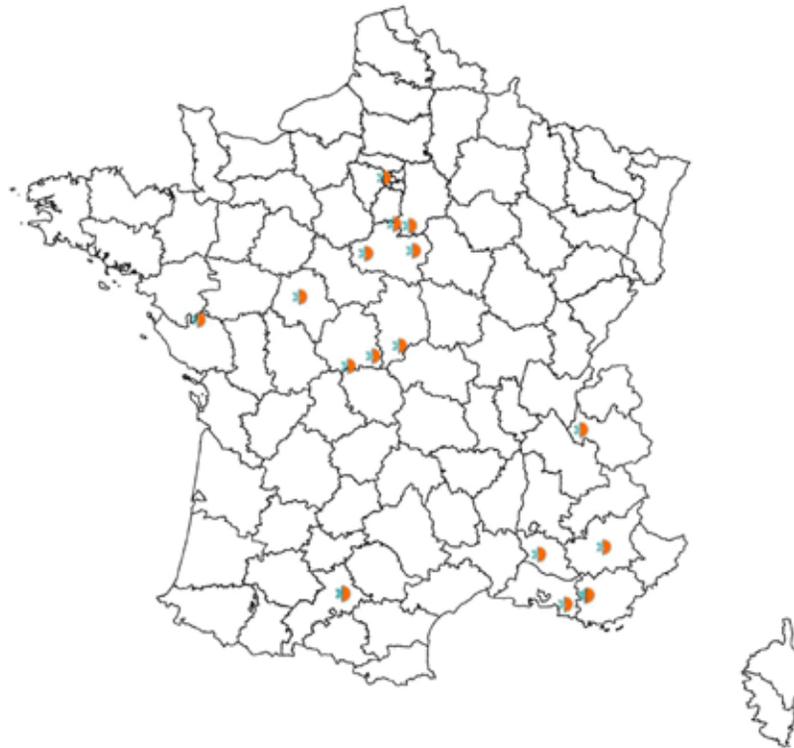


Figure 40 : Cartes des installateurs de pompes à chaleur géothermique de surface en France le 22 juillet 2023

Bien sûr, cette carte est amenée à se remplir au cours du temps. D'autres cartes existent montrant les entreprises de forage et de terrassement dont le nombre n'est pas encore significatif, mais qui devrait également évoluer au fur et à mesure que des entreprises signent la charte.

Il est important que l'AFPG mette en valeur les artisans qui ont un comportement éthique vis-à-vis de la géothermie.

V. Pour soutenir le déploiement de la géothermie de surface

1. Développement de l'animation en région

Il existe un réseau d'animateurs régionaux géothermie en France qui a pour objectif de déployer plus largement la géothermie sur l'ensemble des territoires. Leur mission est de promouvoir la géothermie, de sensibiliser et d'informer les potentiels porteurs de projet puis de les conseiller et de les accompagner, tout en favorisant les échanges avec les professionnels de la géothermie et les acteurs locaux. Enfin, l'animateur régional effectue un suivi des installations géothermiques en fonctionnement et en projet. Les cibles sont plus précisément les collectivités et les acteurs des secteurs industriel et tertiaire.

Aujourd'hui, seules 6 régions possèdent un animateur ou une animatrice géothermie, comme le montre la carte, Figure 41, ci-dessous. Pour permettre un essor de la géothermie de surface sur tout le territoire métropolitain, il est impératif de mettre en place des animateurs pour les 6 régions restantes. Concernant la Corse, l'ADEME a publié en février 2023 un Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI) pour mettre en place un animateur géothermie.

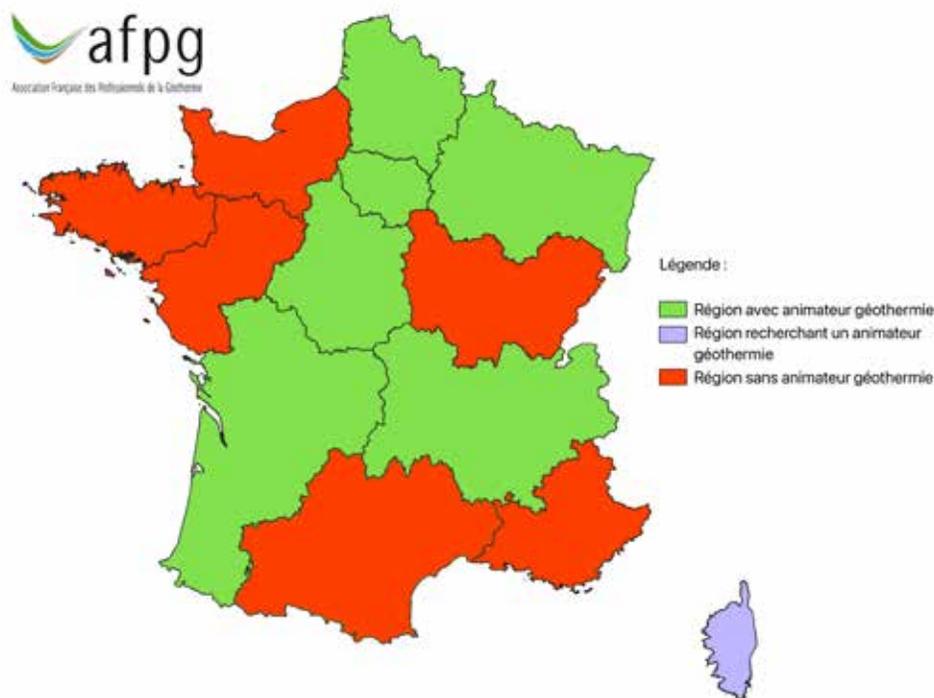


Figure 41 : Présence ou non d'un animateur géothermie dans les régions de France Métropolitaine en juillet 2023

2. Adaptation et préservation du cadre de la GMI

La Géothermie de Minime Importance a été créée afin de faciliter les projets de géothermie de surface par rapport aux projets soumis au Code Minier. Comme dit précédemment, la GMI est possible en zones vertes et orange, visibles sur carte. A la suite de différentes consultations, notamment une consultation publique en avril 2023, de nouvelles cartes ont été adoptées. Chaque carte est fonction de la profondeur de forage et intègre les trois zones (vertes, orange et rouges) de manière plus adaptée. Les cartes en Figures 42 et 43 ci-dessous, montrent l'étendue des 3 zones selon le type de géothermie.



Figure 42 : Cartes des zones réglementaires GMI pour les opérations sur sondes



Figure 43 : Carte des zones réglementaires GMI pour les opérations sur nappe

Le cadre GMI doit être préservé mais doit aussi pouvoir s'adapter aux différents contextes et aux connaissances acquises au fil du temps. L'AFPG est en lien régulier avec les services ministériels chargés de ce cadre pour discuter des évolutions souhaitables et de la possibilité de les mettre en œuvre.

3. Formations des foreurs en géothermie de surface

Comme énoncé dans le plan d'action géothermie du 2 février 2023, il faut développer une offre de formation dédiée aux métiers du forage géothermique de surface plus adaptée aux ambitions. Cela passe par le renforcement de la formation continue dont le nombre doit notamment croître pour satisfaire la demande liée au développement de la géothermie, que l'on souhaite croissante. Mais cela passe également par le développement des formations initiales, telles que les BTS, DUT et licences professionnelles en alternance notamment. Cette démarche permettra d'offrir aux jeunes une opportunité de s'engager dans la lutte contre le dérèglement climatique et la dépendance énergétique via leurs contributions à la transition énergétique, tout en leur offrant des perspectives professionnelles significatives. Cette initiative permet aussi de valoriser les filières professionnelles toutes aussi importantes que les formations d'ingénieurs, qui travaillent ensemble pour réaliser les projets. L'objectif via ces formations, est de pérenniser la filière géothermie en préparant les nouvelles générations de professionnels pour répondre aux défis environnementaux.

4. Inciter l'installation des PAC dans tous les secteurs

Comme le présente cette étude, la géothermie de surface n'est pas réservée aux particuliers, même si le marché le plus développé correspond à ce secteur. Les secteurs résidentiel, collectif, tertiaire, industriel et agricole peuvent aussi y recourir pour répondre à leurs besoins en chauffage.

Le plan Marshall publié par le Club de la chaleur renouvelable préconise que les bâtiments publics soient chauffés aux EnR, notamment à la géothermie, pour faire preuve d'exemplarité ; à l'image du Palais de l'Élysée qui devrait être chauffé d'ici un an par géothermie de surface.

De plus, comme démontré dans la présente étude, le secteur du particulier présente des ventes de pompes à chaleur géothermiques très faibles par rapport aux ventes de pompes à chaleur aérothermiques. L'État a pris une mesure positive en augmentant les aides à 5000 € pour inciter les particuliers à remplacer leur chaudière fioul ou gaz par des pompes à chaleur géothermiques quel que soit le revenu des ménages. Cependant, pour tirer réellement profit de cette mesure, il est essentiel en parallèle de sensibiliser les particuliers à l'existence de la géothermie en mettant en avant la multitude de technologies existantes permettant de s'adapter au contexte du logement. En effet, par manque de connaissances ou par préjugés, la géothermie est mise de côté, très souvent par les installateurs chauffagistes. Le plan Marshall propose donc une campagne de communication pour informer le grand public.

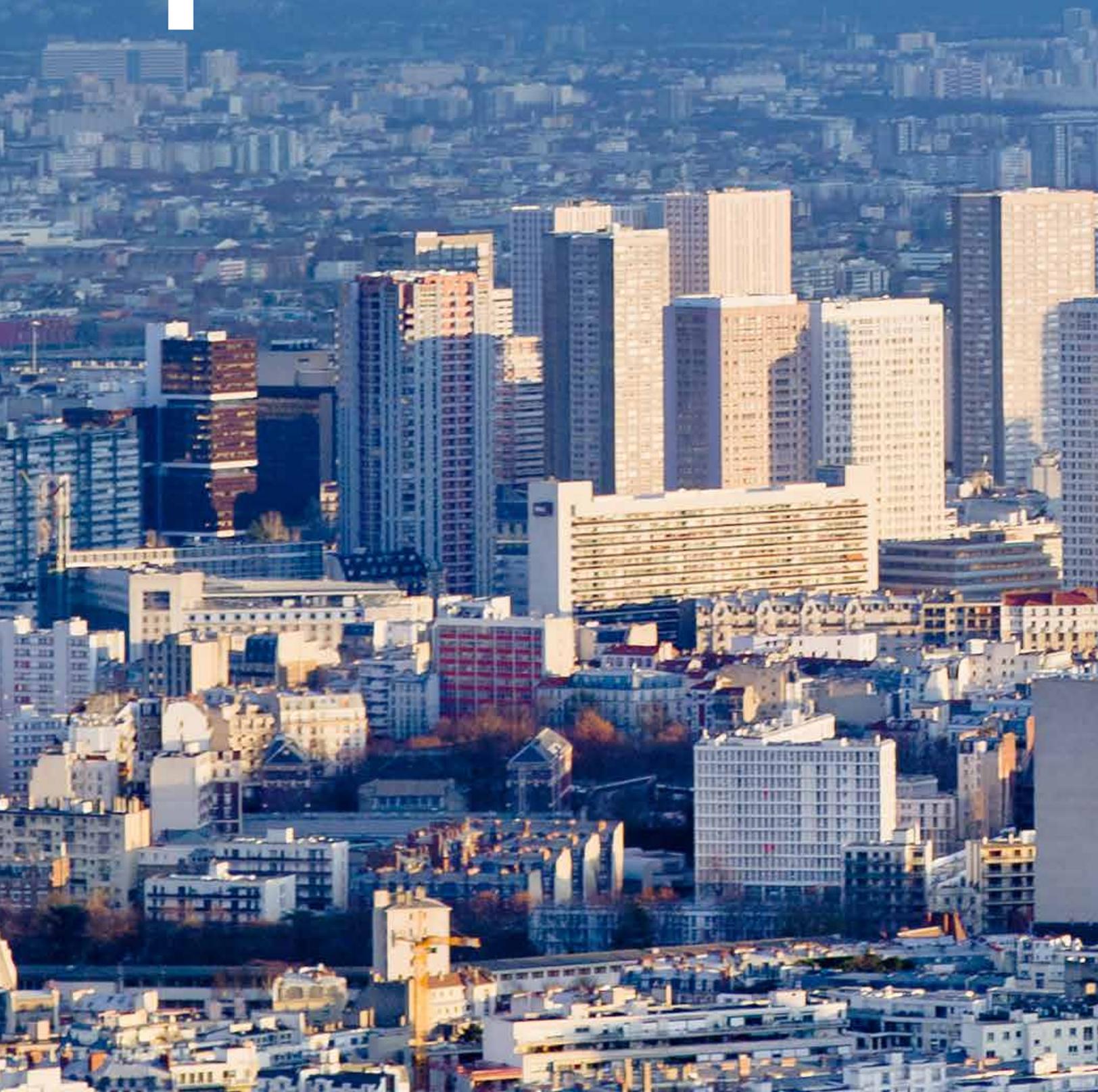
5. La RE2020 pour les bâtiments neufs

La réglementation environnementale RE2020, remplaçant la réglementation thermique 2012 est entrée en vigueur en 2022 et en 2023 (selon la typologie des nouveaux bâtiments). Cette réglementation introduit de nouveaux indicateurs, notamment :

- **Cep,nr** (consommation d'énergie primaire non renouvelable) qui permet de limiter le recours aux énergies non renouvelables,
- **Ic énergie** (Impact sur le changement climatique associé aux consommations d'énergie primaire) qui est l'analyse de cycle de vie concernant les émissions de gaz à effet de serre liés aux énergies consommées pendant le fonctionnement du bâtiment,
- **DH** (degré-heure d'inconfort) qui est le niveau d'inconfort perçu par les occupants en termes de température intérieure (au-delà de 26 ou 28°C).

La géothermie répond bien aux exigences de la RE2020, puisque c'est une énergie renouvelable, qui émet très peu de gaz à effet de serre durant le fonctionnement du bâtiment, et qui est capable de produire du chaud comme du froid pour permettre un confort pour les habitants. C'est pourquoi la RE2020 pourrait favoriser l'usage de pompes à chaleur géothermiques. Cependant, les effets de la RE2020 sur l'usage de la géothermie ne sont pas encore visibles actuellement puisque c'est une réglementation très récente, et beaucoup de nouveaux bâtiments soumis à cette réglementation sont encore en conception ou en travaux.

Géothermie profonde



Introduction

Les installations de géothermie profonde exploitent une eau géothermale à une température généralement comprise entre 30 et 90°C, se trouvant le plus souvent entre 400 et 2000 mètres de profondeur, et en présence d'une nappe d'eau souterraine (aussi appelées réservoirs aquifères). Dans de plus rares cas, la ressource géothermique peut être exploitée à plus grande profondeur et donc à plus haute température.

Lorsque cette eau est présente en quantité suffisante, elle peut être exploitée sous forme d'énergie géothermique. Elle est contenue dans des roches sédimentaires poreuses et/ou fracturées (sables, grès, calcaires, craie) se trouvant dans des bassins sédimentaires qui peuvent présenter une extension régionale importante. Dans d'autres contextes géologiques, la ressource en eau peut provenir majoritairement de la fracturation naturelle d'une roche métamorphique (exemple : gneiss) ou magmatique (exemple : granite).

La France possède deux bassins sédimentaires principaux (le Bassin parisien et le Bassin aquitain) et cinq plus restreints (Hainaut, Fossé rhénan, Limagne, Bresse, Couloir rhodanien) qui contiennent de nombreuses nappes d'eau souterraines, empilées les unes sur les autres et séparées par des roches imperméables (Figure 44).

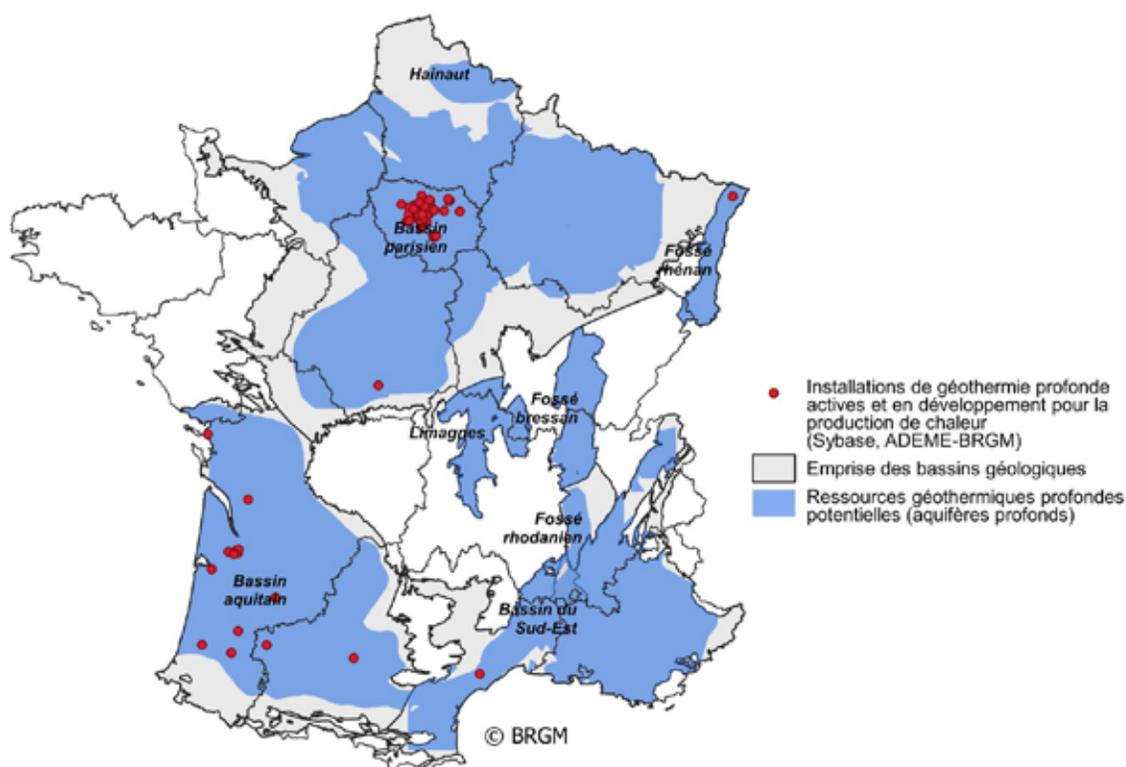


Figure 44 : Carte des bassins sédimentaires et aquifères profonds en France (BRGM)

Au total, près d'un tiers du territoire français possède une ressource de géothermie profonde connue valorisable. Des ressources restent probablement à découvrir.

Dans la plupart des cas, l'exploitation de ces eaux souterraines chaudes s'effectue, comme pour les nappes de surface, par l'intermédiaire d'un puits producteur (extraction de la ressource en eau pour en valoriser les calories) et d'un puits injecteur (réinjection de l'eau refroidie dans la nappe d'origine). En profondeur, les deux puits sont espacés de plus de 1 000 mètres afin d'éviter que l'eau réinjectée ne refroidisse l'eau pompée (phénomène de « bulle froide »).

En géothermie profonde, il est possible d'exploiter la chaleur de l'eau pour produire de l'eau chaude mais aussi d'exploiter la vapeur d'eau ou celle d'un fluide organique permettant de faire tourner une turbine et produire de l'électricité (parfois de la chaleur en même temps).

Production de chaleur

L'énergie géothermique peut être valorisée de différentes manières :

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

I. Principes et usages

1. Réseau de chaleur

Un réseau de chaleur est un système distribuant de la chaleur produite de façon centralisée (plutôt que de produire de nombreuses installations individuelles et disparates) à plusieurs usagers via un réseau de canalisations enterrées. Le réseau contient une ou plusieurs unités de production de chaleur (renouvelables ou non) comme une centrale à gaz, une centrale géothermique, une centrale biomasse ou encore une industrie de laquelle est récupérée la chaleur fatale. L'ensemble de ces équipements est schématisé dans la Figure 45 ci-dessous.

Avec le contexte actuel, les réseaux de chaleur sont voués à utiliser de plus en plus de chaleur issue des Energies Renouvelables et de Récupération (EnR&R) ; soit via la création de nouveaux réseaux vertueux, soit en verdissant les réseaux historiques. En 2021, le mix énergétique des réseaux de chaleur était constitué comme indiqué sur la Figure 46 ci-après.

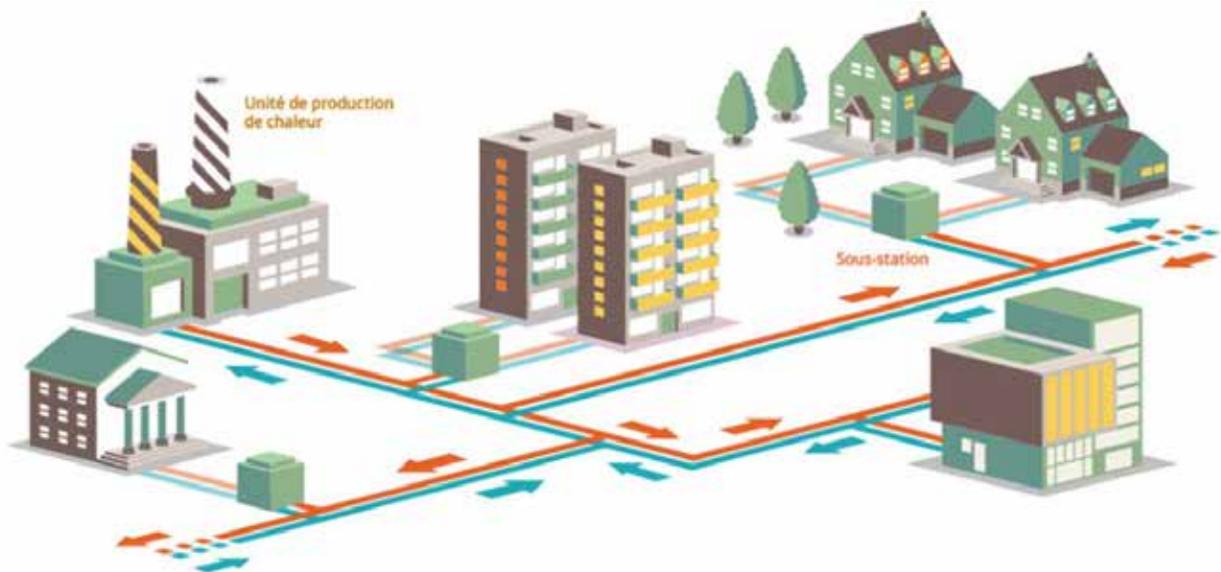


Figure 45 : Schéma d'un réseau de chaleur (ADEME)

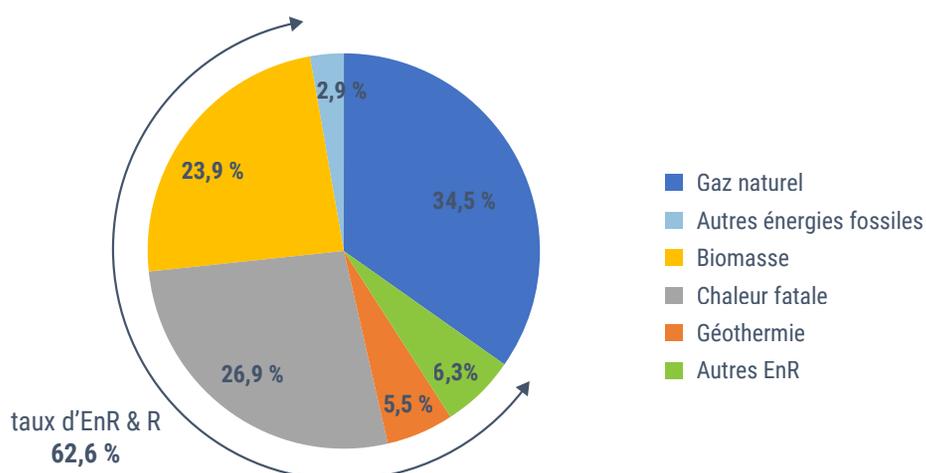


Figure 46 : Bouquet énergétique des réseaux de chaleur en France en 2021 (d'après France Chaleur Urbaine publication de 2022)

2. Généralités sur les centrales géothermiques

Moyennant un entretien régulier des puits (fonctionnement en doublet) et des équipements de la centrale géothermique, la durée de vie d'une telle installation est de 30 ans minimum. Un rechemisage des puits (installation d'un nouveau tubage à l'intérieur du tubage existant) permet ensuite de prolonger cette durée de vie de 20 ans. A ce stade, la foration d'un troisième puits est envisageable pour maintenir un niveau de production similaire à celui du doublet initial. A l'issue de cette période, les puits sont rebouchés et, si la ressource de chaleur est toujours exploitable, de nouveaux puits peuvent être forés. Dans le cadre de la fin de vie du triplet (et notamment des 2 puits rechemisés), un quatrième puits seulement est nécessaire pour refonctionner avec le troisième puits. Quoi qu'il arrive, le réseau de chaleur reste en place et peut accueillir d'autres sources d'énergie, en cas de besoin.

D'après l'enquête sur le prix de vente de la chaleur et du froid en 2021 (AMORCE), la géothermie profonde présentait un prix de vente moyen de 70,2 €HT/MWh sur les réseaux de chaleur : cela représente le prix de vente le plus bas par rapport à la quantité livrée sur les réseaux. A titre de comparaison, la chaleur fatale se vendait à 77,2 €HT/MWh et le gaz naturel (sans cogénération) à 90,6 €HT/MWh. La géothermie profonde est donc une énergie compétitive.

3. Exemple d'opération : Bordeaux PGE

La centrale géothermique de Bordeaux PGE (Plaine de Garonne Energie) a été mise en fonctionnement en début de l'année 2022 et exploite une eau proche de 45°C pour la réinjecter à 14°C avec des puits situés respectivement à 965,5 et 991 mètres de profondeur. Si des opérations en géothermie profonde existaient déjà pour alimenter quelques-uns des 15 réseaux de chaleur de la métropole en puits unique, l'opération PGE est le premier doublet à en alimenter un : le réseau de la Plaine de Garonne. La couverture EnR du réseau de chaleur est de 82 %.

La centrale, visible en Figure 47, a des appoints supplémentaires en cas de pic de demande (hiver) assurés par une chaudière biomasse en cours de construction et trois chaudières à gaz. L'opération permet ainsi de chauffer 28 000 équivalents-logements et d'éviter l'émission de 19 000 tCO₂e/an.



Figure 47 : Centrales géothermiques de Bordeaux PGE (Engie)

II. État de la production française en 2021 et 2022 de la géothermie profonde - Chaleur

Cette partie fait état des lieux de la production en France Métropolitaine. En effet, les territoires ultra-marins ne présentent pas de centrale géothermique en production de chaleur.

En réalité, la géothermie profonde en France pour la production de chaleur se concentre principalement en Île-de-France et en Nouvelle-Aquitaine. Seulement cinq opérations sont situées hors de ces deux zones.

Comme il est possible de le voir sur la carte, Figure 48 ci-dessous, (issue du rapport intégral sur le marché de la géothermie 2022 de l'European Geothermal Energy Council (EGEC)), l'Île-de-France est la région présentant la plus grande densité d'opérations de géothermie profonde en Europe.

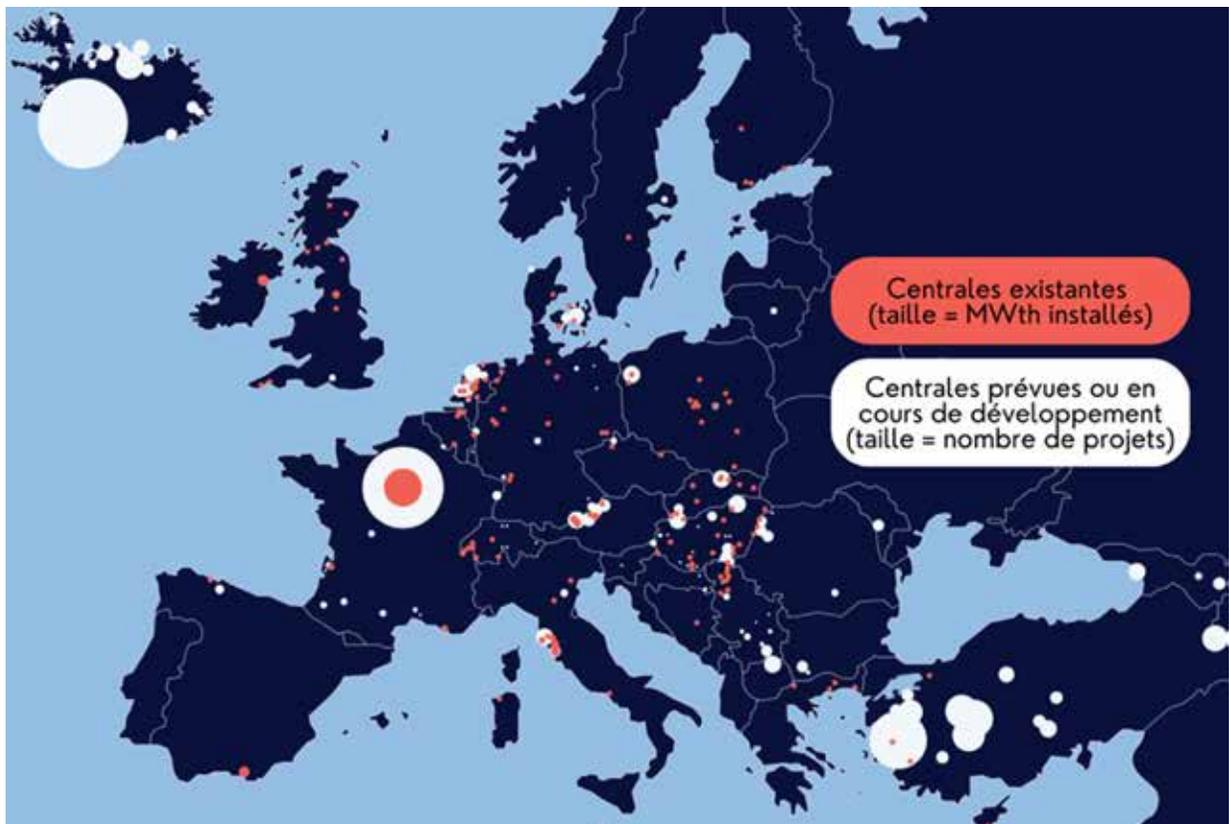


Figure 48 : Localisation des opérations de géothermie profonde en Europe (EGEC Geothermal Market Report - Full Report 2022)

1. Le Bassin parisien

Le Bassin parisien compte quatre 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 et les grès du Trias (voir Figure 49 ci-après).

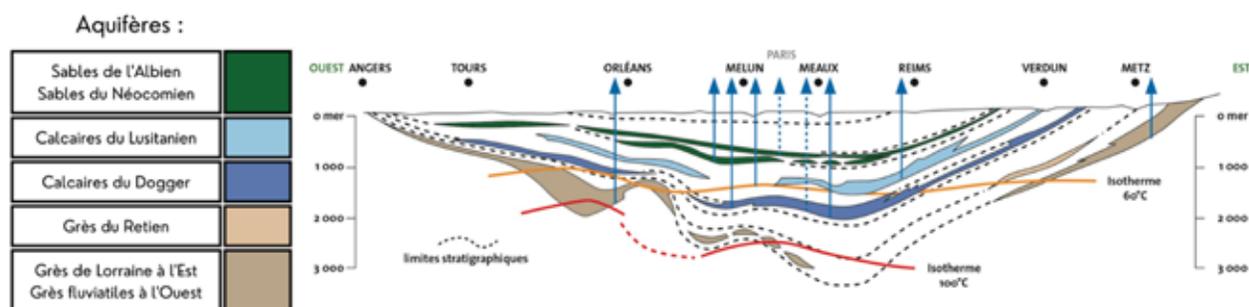


Figure 49 : Coupe du Bassin parisien

Le Dogger d'Île-de-France est aujourd'hui l'aquifère le plus exploité au monde, avec 49 installations de géothermie profonde en fonctionnement. De 2020 à 2022, cinq projets franciliens au Dogger ont été achevés avec succès : Bobigny-Drancy 2 (93), Champs-sur-Marne (77), Evry 2 (91), Rueuil-Malmaison (92) et Vélizy-Villacoublay (78).

D'autres réservoirs géothermiques que le Dogger sont exploités en Île-de-France. Quatre centrales exploitent l'Albien (environ 650 m de profondeur) avec un nouveau projet mis en service en 2022 : Saint-Germain-en-Laye (78). Seule la centrale du Plessis-Robinson (92) exploite le Néocomien (environ 850 à 1 000 m de profondeur). Ces opérations sont systématiquement assistées par des PAC du fait des basses températures (entre 28°C et 38°C dans le centre du Bassin parisien) pour alimenter les réseaux de chaleur.

Des études sont également menées pour valoriser la chaleur des eaux des aquifères du Trias, couche géologique encore assez peu connue car plus profonde que le Dogger. Une tentative d'exploitation a échoué (pour des raisons de forage) sur le projet de Bobigny-Drancy 2 et c'est finalement sur l'aquifère du Dogger que le projet s'est rabattu.

Le tableau 2 ci-dessous, dresse le bilan de la production géothermique en 2022 dans le Bassin parisien :

Département	Nombre d'opérations	Production géothermique en 2022 (MWh/an)	Part de la géothermie dans la production de chaleur	Équivalents-logements
Paris (75)	2	14 548	58 %	6 234
Seine-et-Marne (77)	12	396 983	74,90 %	52 978
Yvelines (78)	2	24 289	65 %	12 000
Essonne (91)	6	158 941	74,14 %	32 884
Hauts-de-Seine (92)	4	61 999	41,33 %	14 577
Seine-Saint-Denis (93)	9	262 534	65,36 %	42 796
Val-de-Marne (94)	18	73 7857	72,61 %	143 943
Val-d'Oise (95)	1	32 280	53,70 %	8 700
Total IDF	54	1 689 431	63 %	314 112
Indre (36)	1	7 945	N/A	1 117
Total Bassin parisien	55	1 697 376	63 %	315 229

Tableau 2 : Détails des opérations de géothermie profonde dans le Bassin parisien (AFPG, d'après données SYBASE – BRGM/ADEME)

La colonne « part de la géothermie dans la production de chaleur » correspond au pourcentage de chaleur produite par géothermie dans les réseaux de chaleur urbains, ces derniers pouvant être alimentés par d'autres énergies. Les réseaux de chaleur non-alimentés par géothermie ne sont donc pas pris en compte dans les pourcentages.

La colonne « Équivalents-logements » correspond au nombre d'équivalents logements raccordés au réseau alimenté en géothermie.

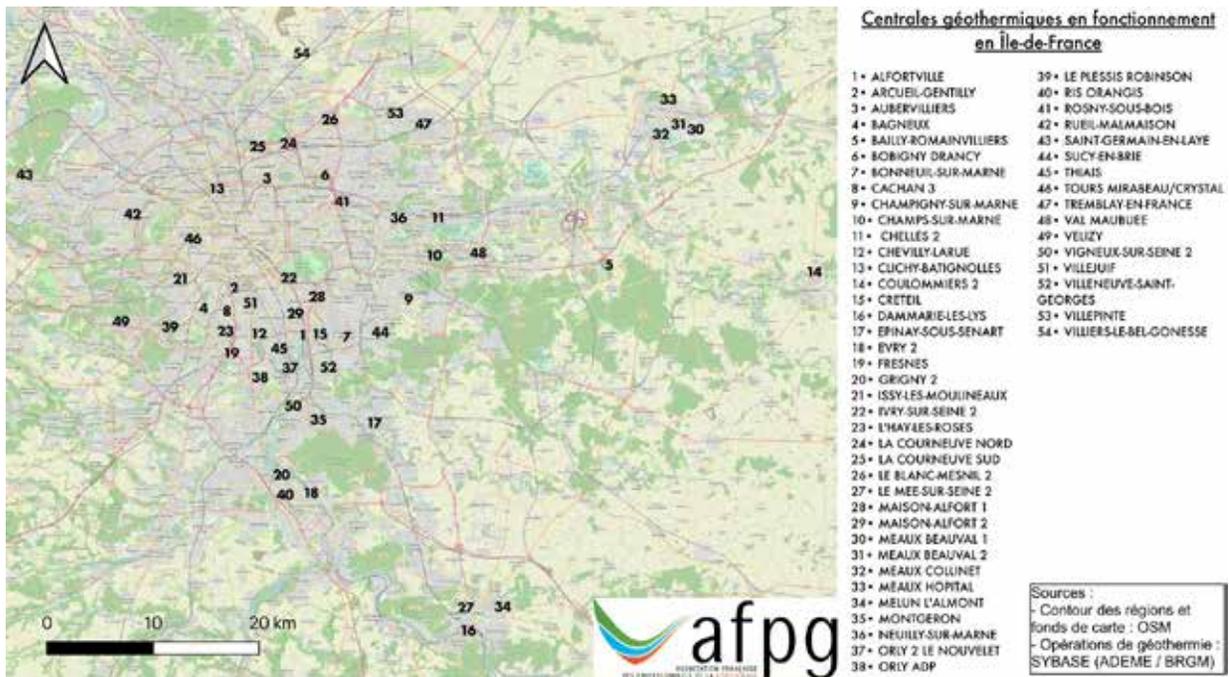


Figure 50 : Carte des centrales géothermiques d'Île-de-France

La carte de la Figure 50 ci-dessus, recense la localisation des différentes centrales géothermiques en Île-de-France.

2. Le Bassin aquitain

Dans le Bassin Aquitain, on dénombre 22 opérations datant, pour la grande majorité, des années 1980. L'opération Bordeaux PGE (présentée précédemment) est l'unique nouvelle opération depuis 2020 sur le Bassin Aquitain. Le tableau 3 ci-dessous, détaille le nombre d'opérations dans les différents départements.

Départements	Nombre d'opérations	Production géothermique 2022 (MWh/an)	Équivalents-logements 100 % EnR
Charente-Maritime (17)	2	4 241	450
Haute-Garonne (31)	1	14 189	1420
Gers (32)	1	18 494	1850
Gironde (33)	12	94 326	31026
Landes (40)	4	16859	1400
Lot-et-Garonne (47)	2	7 604	N/A
Total Bassin aquitain	22	155713	36146

Tableau 3 : Détail des opérations de géothermie profonde dans le Bassin aquitain

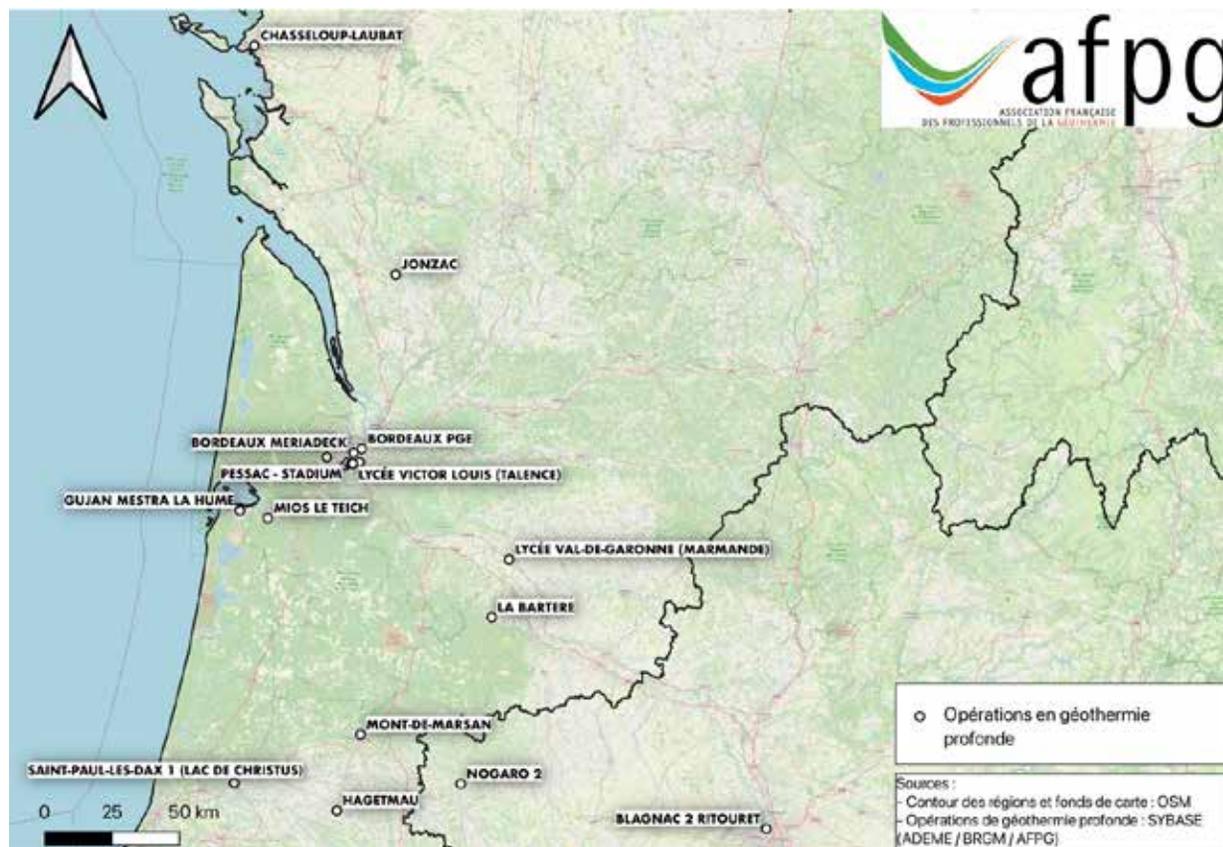


Figure 51 : Carte des opérations de géothermie profonde en fonctionnement en Nouvelle-Aquitaine

La carte Figure 51 ci-dessus, précise les localisations des différentes centrales de production en géothermie profonde dans le Bassin aquitain. Près de Bordeaux, la densité d'opérations est élevée. Les opérations non visibles sur la carte sont : Lycée Kastler (Talence), Pessac Saige Formanoir, Merignac BA106 et Bègles.

3. Autres bassins

Parmi les autres bassins sédimentaires français, l'étude AFPG comptabilisait habituellement six centrales géothermiques. Or il s'avère que quatre d'entre elles concernaient essentiellement des opérations mal connues et/ou relatives à de la géothermie de surface. Ainsi seules deux centrales actuellement exploitées pour la géothermie profonde, sont indiquées dans le tableau 4 ci-dessous :

Départements	Bassins	Nombre d'opérations	Production géothermique en 2022 (MWh/an)	Equivalents -logements 100 %EnR
Hérault (34)	Bassin du Sud-Est	1	11 576	1740
Bas-Rhin (67)	Fossé Rhénan	1	182 000	18200
	Total	2	193576	19940

Tableau 4 : Détail des opérations de géothermie profonde dans les autres bassins



4. Bilan et perspectives

En 2022, la France possède 79 installations en fonctionnement pour une puissance installée d'environ 695 MWth. Le graphique Figure 52 ci-dessous, montre l'évolution des ouvertures et fermetures des installations. Après un fort développement dans les années 1980-1985 (mise en place de près de 60 installations de géothermie), la filière a stoppé son développement pendant une trentaine d'années (fermeture d'une quinzaine d'opérations et exploitation de la cinquantaine d'autres). C'est finalement en 2009 que la filière recommence à se développer avec la création d'environ 30 nouvelles opérations (certaines en remplacement d'opérations historiques arrivées en fin de vie).

Remarque : la comptabilisation des projets ne prend plus en compte quatre opérations dont les statuts étaient peu connus mais qui s'avèrent être des opérations de géothermie de surface (Lodève Grandchamps, Lodève Fulcran, Aigueperse et Mas rouge Galière). C'est pourquoi, la courbe a évolué par rapport à l'édition 2021.

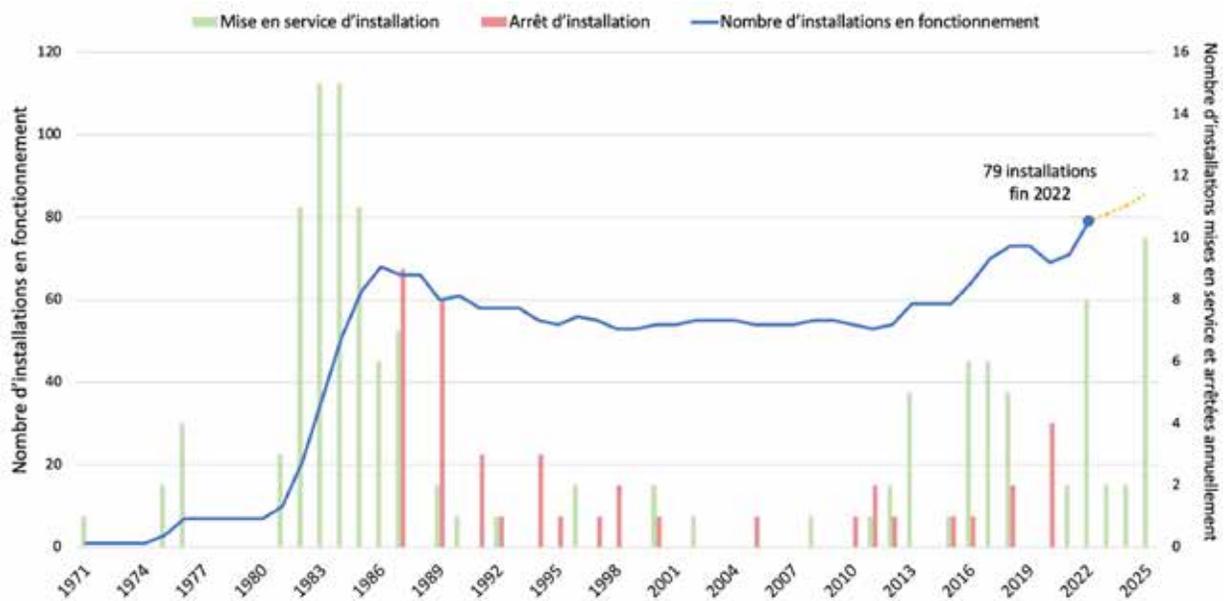


Figure 52 : Bilan du nombre de centrales géothermiques depuis 1971

Les installations de géothermie profonde se répartissent selon les usages, comme décrit sur la Figure 53 ci-dessous.

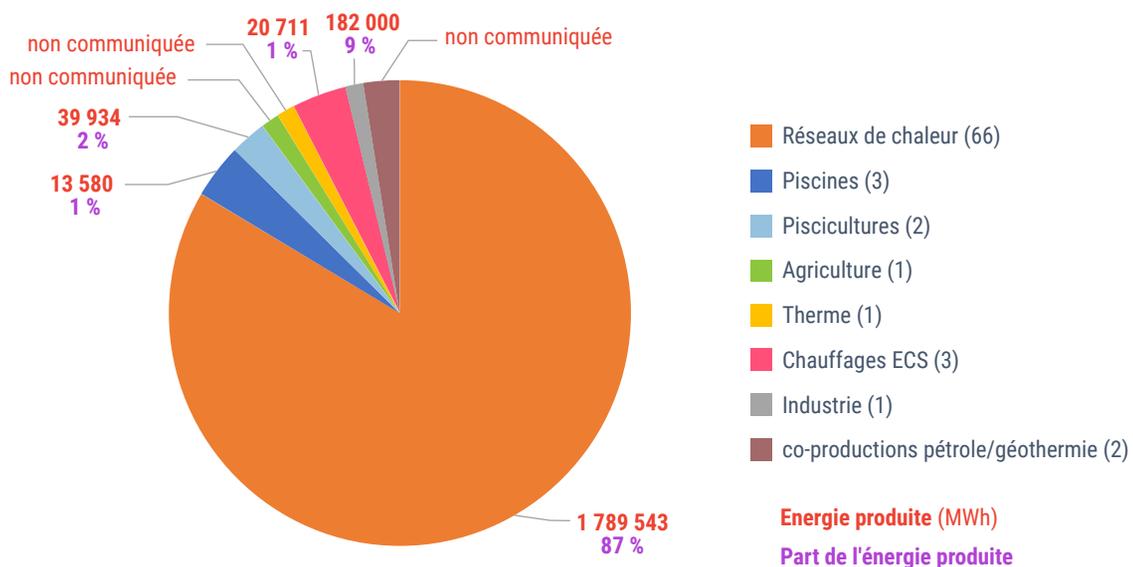


Figure 53 : Distribution des usages des centrales géothermiques en France

Les opérations de co-production pétrole/géothermie sont celles d’Arcachon et de la Teste de Buch en Gironde. Les puits de pétrole peuvent en effet valoriser les importantes quantités d’eau chaude présentes dans les réservoirs pétroliers pour co-produire du pétrole et de la chaleur de manière simultanée.

Le graphique, en Figure 54 ci-dessous, montre le nombre d’opérations à venir et l’avancement projets à fin 2022. Globalement, une centrale géothermique est mise en service deux ans après la foration des puits. Cela est néanmoins susceptible de varier en fonction de l’existence ou non du réseau de chaleur.



Figure 54 : Statut des opérations à venir en géothermie profonde au 31/12/2022

En 2022, comme le montre la Figure 55 ci-dessous, la production d’énergie par géothermie profonde en France a atteint 2,05 TWh alors qu’elle était de 2,16 TWh en 2021.



Figure 55 : Production annuelle en géothermie profonde en France de 2006 à 2022, prévisions jusqu’à 2026 et objectifs à atteindre selon la PPE2023-2028

Pour effectuer des calculs prévisionnels, l’hypothèse émise est qu’une opération au Dogger produit environ 50 GWh/an. De plus, cette estimation repose sur une approximation selon laquelle une opération est mise en fonctionnement environ deux ans après la date de début des forages.

La diminution de 5 % entre 2021 et 2022 peut s’expliquer par le fait que l’année 2022 a été la plus chaude jamais enregistrée en France. En effet, les températures douces de l’hiver 2022 induisent une baisse des besoins en chauffage. Par exemple pour le gaz, la baisse de consommation uniquement due aux températures plus douces (sans compter la baisse de consommation en raison des prix du gaz ou les consignes à 19°C du gouvernement) est de 3 % par rapport à l’année 2021 .

De plus, certaines centrales ont été arrêtées temporairement pour travaux au cours de l’année comme les centrales de : Ivry-Sur-Seine (94), La Courneuve Sud (93), Meaux Beauval 2 (77), Montgeron (91), Thiais (94) et Villepinte.

5. Méthodologie

Aujourd'hui, l'intégralité des installations de géothermie profonde en production de chaleur sont répertoriées sur une base de données gérée par le BRGM et l'ADEME, appelée SYBASE. Cette base de données est vouée à suivre les évolutions de la filière. D'ailleurs, à l'image de la géothermie de surface, une distinction s'effectuera désormais entre l'énergie géothermique prélevée du sous-sol, et l'énergie géothermique en sortie de PAC (s'il y en a une). En effet, la consommation électrique de ces PAC ne peut être considérée comme 100 % renouvelable et doit donc être déduite. En 2022, cette distinction n'a pas encore pu être réalisée de manière satisfaisante faute de données suffisamment précises.

III. Innovations et évolutions en géothermie profonde

1. Saint-Germain-en-Laye, une valorisation innovante de la chaleur du sous-sol

L'opération de Saint-Germain-en-Laye est un projet de production d'eau potable visant à sécuriser l'approvisionnement de l'agglomération et à remplacer un ancien forage devenu obsolète et non conforme au Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). L'innovation du projet réside dans le fait de valoriser également la chaleur (considérée alors comme chaleur fatale puisque perdue si non valorisée). Ce couplage eau potable/géothermie d'une puissance de 3 MW a été mis en fonctionnement en décembre 2021.

Un puits unique permet de récupérer l'eau de la nappe de l'Albien (à environ 630 mètres de profondeur) à une température de 28°C. La chaleur de cette eau pompée va être valorisée via deux échangeurs à chaleur (à plaques) et trois pompes à chaleur avant d'être transmise au réseau de la commune d'Enerlay. Le réseau de chaleur passe ainsi de 50 à 80 % d'énergies renouvelables. L'eau refroidie peut ensuite être traitée (unité de déferrisation à disposition) puis distribuée au réseau d'eau potable pour la consommation des habitants, contrairement à un doublet où l'eau serait réinjectée dans la nappe.



Figure 56 : Photo de l'Installation de Valorisation (Géo)Thermique de Saint-Germain-en-Laye

2. Campagnes d'exploration pour dérisquer l'ouest parisien et le synclinal de l'Arc.

En géothermie profonde, comme sur tout système géothermique cherchant à exploiter des eaux souterraines, le maître d'ouvrage fait face au risque de ne pas trouver la ressource escomptée (en température et surtout en débit). Il est donc primordial d'avoir la connaissance la plus fine possible du contexte géologique local avant de lancer les projets. C'est pour cette raison qu'il est question d'exploration, premièrement qualifiée de « régionale » (sur des milliers de kilomètres carrés), deuxièmement « locale » (sur des dizaines de kilomètres carrés) et troisièmement, à l'échelle d'un projet (quelques dizaines de kilomètres carrés). L'exploration de large échelle est à la charge de l'État quand l'exploration à l'échelle du projet incombe au porteur de projet ou à son délégataire.

Le BRGM a pour mission d'améliorer la connaissance du sous-sol en lien avec les ressources géothermiques profondes sur :

- l'ouest parisien – au niveau des aquifères de l'Albien, du Néocomien, de l'Oxfordien, du Dogger et du Trias (920 km²). Malgré une exploration pétrolière ancienne, les données acquises ne permettent pas de caractériser les réservoirs géothermiques potentiels. Une campagne d'acquisition géophysique est donc prévue,
- le synclinal de l'Arc (Fos/Mer, Marignane, Marseille), au niveau de l'Urgonien (930 km²).

D'autres territoires restent à explorer avec notamment le sud de l'Alsace (Mulhouse, Colmar, ...), les Hauts-de-France et dans un second temps des territoires comme Toulouse, Orléans, Montpellier...

3. Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde

Cette nouveauté concerne la géothermie profonde dans sa globalité, aussi bien en production de chaleur qu'en production d'électricité. En effet, dans certains contextes géothermiques particuliers, notamment les zones à fracturation naturelle, les activités de géothermie profonde peuvent être amenées à déstabiliser le sous-sol et induire une microsismicité (sismicité généralement non ressentie en surface). Dans les cas les plus extrêmes, ces secousses peuvent être ressenties par la population locale ; il est alors question de sismicité induite. Le cas le plus récent a été rencontré sur le site de Vendenheim en 2020 et 2021. À la suite de ces événements, l'AFPG en collaboration avec l'Association européenne de géothermie (EGEC), a transmis aux autorités un retour d'expérience sur les bonnes pratiques permettant de mieux maîtriser la sismicité et d'en prévenir tous risques.

En 2023, le BRGM et l'INERIS publient un guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde, à la demande de la direction générale de la prévention des risques (DGPR) en collaboration avec la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC). A destination de tous les acteurs de la filière (industriels, élus, administration), ce guide a pour but de donner les clés pour évaluer les risques de sismicité induits par la géothermie profonde, mais également pour réagir en cas de survenue de tels événements.

Après un rappel des différents contextes géologiques et des méthodes d'exploitation géothermique, le phénomène de sismicité induit est décrit. Basé sur les retours d'expérience de projets français, européens et mondiaux, l'aléa sismique est présenté et une méthode d'évaluation est proposée. Pour finir, les bonnes pratiques et les recommandations sont énoncées, et cela pour chaque étape d'un projet (prospection, forage, développement du puits, exploitation).



IV. Objectifs nationaux et moyens de mise en œuvre

Concernant les objectifs de la France, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) a assigné des objectifs de production à la filière géothermie profonde : 2,9 TWh à atteindre pour 2023, et 4 à 5,2 TWh pour 2028. Les nouvelles valeurs de la PPE ne sont pas encore officialisées mais fixeront des objectifs à 2030 / 2033.

Comme pour la géothermie de surface, le Plan de relance du 2 février 2023 indique des objectifs ambitieux, notamment celui de lancer plus de 40 % de nouveaux projets d'ici 2030.

Pour atteindre ces objectifs, des moyens financiers et des groupes de travail dédiés existent et seront mis en place. Les principaux outils et organisations œuvrant au développement de la géothermie sont détaillés dans ce chapitre.

1. Fonds chaleur

Les projets de géothermie profonde peuvent bénéficier des aides à l'investissement du Fonds Chaleur dont les conditions d'éligibilité sont visibles sur le site de l'ADEME : <https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/2022/installations-production-chaleur-a-partir-geothermie-profonde>.

Une aide plafonnée (€/MWh EnR) peut être attribuée si les conditions et critères d'éligibilité sont respectés. Cette aide est calculée par analyse de rentabilité en comparant la situation de référence utilisant des énergies fossiles, et la solution par géothermie.

Dans le cas où le projet prévoit la réalisation d'un réseau de chaleur (s'il est prévu qu'il soit alimenté au minimum par 65 % d'EnR&R) ou de son extension (s'il s'agit de l'extension d'un réseau produisant plus de 300 MWh EnR&R par an et de plus de 200 mètres linéaires), alors le projet peut bénéficier de l'aide pour les réseaux de chaleur et de froid. Si le projet produit moins de 20 000 MWh par an l'aide est fourni via forfait, sinon l'aide est calculée par analyse économique conventionnelle.

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),
- Pour les réseaux, l'alimentation globale en Énergies Renouvelables et de Récupération (EnR&R) doit être supérieure à 65 % pour la distribution de chaud, et supérieure à 50 % pour la distribution de froid.

La Figure 57 ci-après, montre qu'entre 2009 et 2022, ce sont 53 opérations en géothermie profonde qui ont bénéficié de l'aide, pour un montant d'aide total de près de 145 millions d'euros. L'aide peut être octroyée pour la création d'une centrale géothermique en tant que telle (avec forage), pour l'extension d'un réseau de chaleur, pour l'ajout d'une pompe à chaleur ou pour des travaux de rechemisage ou de renouvellement de puits.

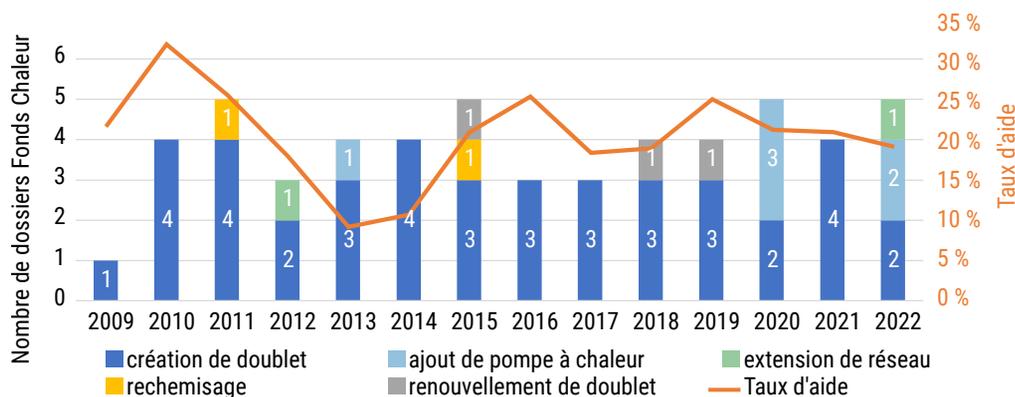


Figure 57 : Opérations de géothermie profonde financées par le Fonds Chaleur (données ADEME - Fonds Chaleur)

2. Fonds géothermie

Géré par la SAF-Environnement, le Fonds de garantie CT (court terme) et LT (long terme) géothermique est un fonds permettant d'anticiper des risques qui pourraient être rencontrés dans les projets de géothermie profonde produisant de la chaleur.

Le volet court terme couvre le risque en cas d'absence ou d'insuffisance de la ressource géothermique lors du forage. Le volet long terme couvre les risques géologiques ou de perte de productivité durant la phase d'exploitation.

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

Afin de soutenir de futurs projets en aquifères profonds peu connus et donc plus risqués (tels que le Trias en Île-de-France ou encore les aquifères du Bassin aquitain, d'Alsace, des Hauts-de-France et de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur), ce fonds a été augmenté pour être en capacité d'aller jusqu'à une augmentation de financement jusqu'à 100 M€ d'après l'ADEME. Dernièrement, une extension du fonds de 45 M€ a déjà été votée par le conseil d'administration de l'ADEME et l'ensemble du dispositif a été approuvé par la Commission européenne. Le nouveau Fonds de garantie fonctionnera à partir de cotisations des maîtres d'ouvrages échelonnées selon le risque de l'opération :

- segment 1 : Opérations dans une zone connue (par exemple dans le Dogger d'Île-de-France ; hypothèse de taux d'échec de 5 %),
- segment 2 : Opérations des régions géologiquement connues mais où le potentiel géothermique l'est moins (hypothèse de taux d'échec de 25 %),
- segment 3 : Opérations dans des zones à explorer (hypothèse de taux d'échec à 40 %).

En plus de cette extension du fonds géothermie, les prestations ont été améliorées avec :

- un taux de garantie sur doublet et sur toute la France à hauteur de 90 % (alors que la garantie se faisait puits par puits et avec une couverture à hauteur de 60 %, réhaussée à 90 % par la Région Île-de-France),
- une assiette maximum de 3 millions d'euros par kilomètre foré (avec un maximum de 3 kilomètres forés),
- des études de dérisking indemnisées à hauteur de 80 % en cas d'échec (avec un plafond d'1 million d'euros).

3. TVA 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 %).

4. Cluster Geodeep

L'AFPG assure depuis juin 2014 la coordination et l'animation du Cluster GEODEEP, « the French Geothermal Cluster for Heat and Power » composé d'une vingtaine d'entreprises, allant d'entreprises de taille internationale à des bureaux d'études spécialisés dans la caractérisation du sous-sol et l'ingénierie de la géothermie profonde. La feuille de route de GEODEEP s'articule autour de trois axes d'intervention :

- l'animation d'un collectif d'entreprises désireuses de s'impliquer dans une stratégie export,
- la représentation institutionnelle, lobbying et promotion du savoir-faire français,
- l'identification d'opportunités commerciales pour les thématiques « électricité », « chaleur & froid », « boucle d'eau tempérée », « géostockage ».

Impliqués dans diverses activités (projet européen, congrès internationaux, workshop thématiques...) auprès de nombreux partenaires (EGEC, IGA, IEA TCP géothermie, IRENA, ...), les membres de GEODEEP optimisent leur participation dans des appels d'offres internationaux et contribuent à promouvoir le savoir-faire français à l'export.

Depuis avril 2023, Sylvain BROGLE actuel Délégué général du Cluster a également été élu au poste de Président de l'IGA (International Geothermal Association).

5. CT-GAP

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

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

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

Le comité technique réoriente actuellement ses sujets de travail pour intégrer des thématiques nouvelles en lien avec l'ouverture sur des projets hors Dogger d'Île-de-France (Bassin aquitain, Bassin rhénan, extraction de lithium dissous dans certaines eaux géothermales, ...).

Centrales électrogènes

I. Principes et usages

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

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

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

- les réservoirs situés en zone volcanique,
- les réservoirs fracturés situés au niveau des bassins d'effondrement.

1. Les réservoirs en zones volcaniques

Les premières centrales géothermiques électrogènes ont vu le jour dans des zones volcaniques où la température du sous-sol dépasse allégrement 200°C sans avoir à forer au-delà de quelques centaines de mètres de profondeur. C'est le cas de la Toscane en Italie, de l'Islande ou de la Guadeloupe avec la centrale de Bouillante par exemple. Le schéma figure 58 ci-dessous, illustre ce type de production d'électricité.

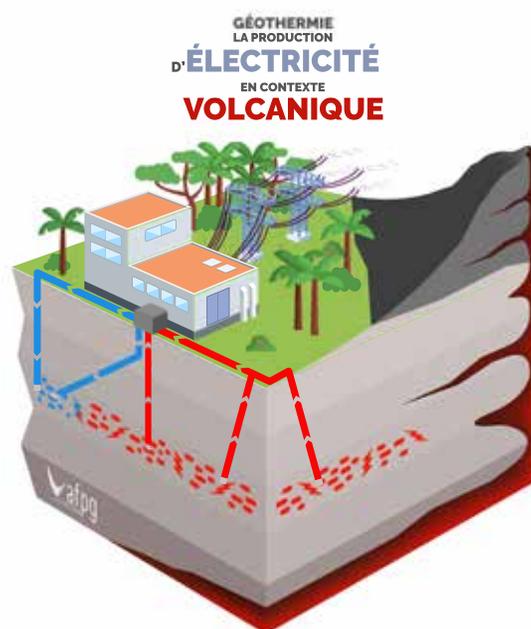


Figure 58 : Schéma de principe d'une centrale électrogène en zone volcanique

2. 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.

Il est parfois nécessaire de nettoyer les fonds de puits pour améliorer la circulation du fluide dans ces réservoirs géothermiques.

La France fait figure de leader mondial dans ce domaine, avec la centrale de Soultz-sous-Forêts en Alsace, berceau de la recherche dans ce type de géologie 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).

La technologie développée ouvre des perspectives très intéressantes vers 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.

Si les centrales géothermiques du GEIE EMC à Soultz-sous-Forêts (électrogène) ou d'ECOGI à Rittershoffen (production de chaleur) fonctionnent parfaitement avec un taux de disponibilité supérieur à 90 % depuis 2016 sans générer de sismicité ressentie, l'arrêt de la centrale GEOVEN de Vendenheim sur décision préfectorale à la suite d'un tremblement de terre de magnitude 3,5 ressenti au nord de Strasbourg fin 2020, a brutalement freiné le développement de cette filière française pourtant en plein essor. Les acteurs de la géothermie se sont mobilisés ainsi que les pouvoirs publics pour définir les contours de l'exploitation géothermique dans ce type de géologie. Les conclusions de ces travaux sont actées dans le guide de sismicité abordé en partie production de chaleur III – 3.

II. Les centrales géothermiques électrogènes en fonctionnement

1. Focus sur la centrale de Bouillante



Figure 59 : Photo de la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe (BRGM)

La centrale de Bouillante (voir la localisation Figure 59) a débuté sa production d'électricité en 1984 avec une puissance installée de 4,5 MWe (unité de Bouillante 1). Avant cela, de nombreuses études et forages d'essais ont été réalisés dans les années 1960, révélant la présence d'une ressource à une température pouvant atteindre 260°C.

L'unité Bouillante 2, d'une puissance de 11 MW, a ensuite 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€.

Comme le montre la Figure 60 ci-dessous, la centrale a produit en 2022 : 96,43 GWh.

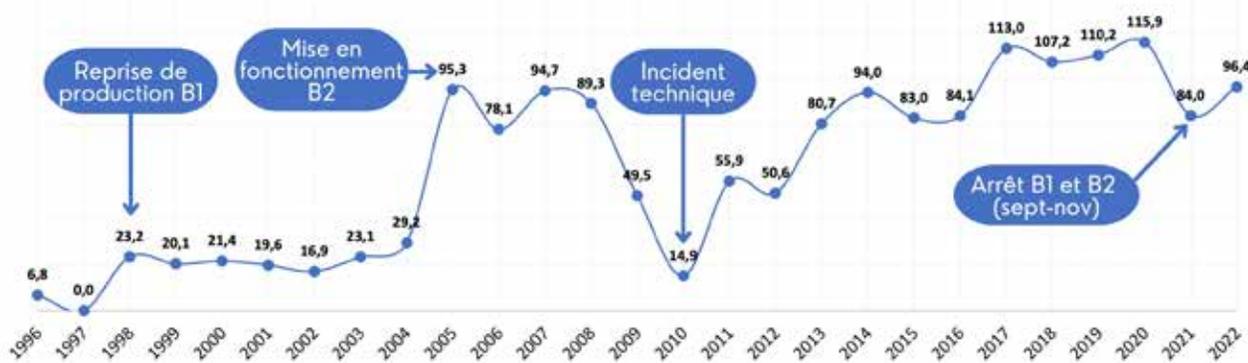


Figure 60 : Production électrique nette annuelle (GWh/an) de la centrale de Bouillante depuis 2005

Ces deux unités fonctionnent en valorisant la phase vapeur pour faire tourner une turbine. L'eau restante (sous forme liquide) est en partie réinjectée au sous-sol et en partie rejetée dans la baie de Bouillante.

Une nouvelle unité (Bouillante 1 bis) d'une puissance de 10 MW, dont les travaux ont débuté en 2022, devrait être mise en service pour fonctionner simultanément avec B1 et de B2 aux alentours de 2025. Sur cette nouvelle unité, trois puits ont été forés : un puits de production à 500 mètres de profondeur et deux puits de réinjection situés à 1500 mètres de profondeur. L'unité B1 bis permettra de valoriser l'eau séparée destinée aujourd'hui à être rejetée en mer.

La centrale de Bouillante est aujourd'hui la seule centrale électrique géothermique de la Caraïbe et représente entre 6 et 7 % de la consommation électrique de la Guadeloupe.

La PPE de Guadeloupe prévoit pour 2023 d'atteindre 28 MW, et pour 2028 d'atteindre 78 MW, un très grand enjeu.

2. Focus sur la centrale de Soultz-sous-Forêts

Le site de Soultz-sous-Forêts (photo Figure 61 ci-contre), au nord de l'Alsace, a été pendant 25 ans (de 1987 à 2012) le lieu d'un programme européen de R&D consacré à la géothermie HDR (Hot Dry Rock) / EGS (Enhanced Geothermal System). Ce programme s'est traduit par la réalisation d'un pilote scientifique constitué de 4 puits (1 puits à 3 500 m et 3 puits à 5 000 m de profondeur) captant une ressource géothermale à 200°C et d'une centrale électrique de démonstration d'une puissance de 1,7 MWe, reconfigurée en 2016. La PPE prévoit d'atteindre une puissance de 2 MW à partir de 2023. Des études sont d'ailleurs lancées afin de forer deux nouveaux puits (en doublet).



Figure 61 : Photo de la centrale de Soultz-sous-Forêts (ÉS)

Le coût du programme européen de R&D – incluant le forage des 4 puits profonds - s'est élevé à environ 100 M€, avec une contribution d'environ 85 % partagée à peu près à parité entre l'Union Européenne, la France (ADEME) et l'Allemagne (BMWi/BMU), et de 15 % provenant des industriels, réunis au sein d'un Groupement Européen d'Intérêt Économique (GEIE) appelé « Exploitation minière de la chaleur ». La table 5 ci-dessous donne la production annuelle d'électricité de la centrale de Soultz-sous-Forêts depuis 2017.

Années	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Production (MWh)	7 740	7 654	6 285	4 120	6 339	5 903

Tableau 5 : Production électrique nette annuelle (MWh/an) de la centrale de Soultz-sous-Forêts depuis 2017

III. Bilan

La production totale électrique en France est présentée par le graphique Figure 62 ci-dessous.



Figure 62 : Production électrique annuelle (GWh) par géothermie profonde en France de 2017 à 2022

La PPE ne prévoit actuellement pas d'objectifs de production d'électricité via la géothermie profonde.

Lithium géothermal

Optimiser la production géothermique profonde et relocaliser la production de lithium

I. Principes et usages

L'extraction des ressources minérales a largement contribué au développement des industries telles que la construction, l'électronique et l'automobile, en fournissant des technologies de plus en plus complexes à la société. Parmi ces ressources, le lithium occupe une place essentielle dans nos batteries (de téléphones portables, ordinateurs, voitures électriques, ...). Les principaux producteurs mondiaux de lithium, sont l'Australie, l'Amérique du Sud (et ses salars) et la Chine. Ces derniers ont recouru à des extractions peu en accord avec les défis actuels : à savoir une production respectueuse de l'environnement et une production répondant à la demande et aux besoins d'électrification pour sortir des énergies fossiles. En effet, l'extraction par évaporation des lacs salés est relativement longue (10 mois à 2 ans) et consommatrice d'eau. Quant à l'extraction minière à ciel ouvert, elle nécessite une grande emprise au sol, dégrade la qualité de l'air et fait appel à des procédés très énergivores.

En France, il est envisageable de relocaliser la production de lithium tout en réduisant son impact environnemental. En effet, du lithium dissous est présent dans de nombreux réservoirs géothermiques profonds. Si ces réservoirs sont déjà exploités par des installations géothermiques (que ce soit en production de chaleur ou d'électricité), il est cohérent d'optimiser la production de chaleur en extrayant le lithium géothermal. De nombreuses entreprises comme Eramet, ES, Adionics, Géolith et Lithium de France, s'efforcent de développer et d'industrialiser cette filière innovante. Cela permettrait d'accélérer la transition énergétique de la France et de promouvoir des solutions plus vertueuses dans le domaine de l'extraction et de l'utilisation du lithium.

Plus précisément, il s'agit de coupler une unité d'extraction de lithium à la centrale géothermique qui, après extraction des calories de l'eau via un échangeur de chaleur, pourra extraire le lithium dissous dans l'eau (saumure géothermale) via un système de filtration (Cf Figure 63). Le lithium est ensuite dirigé vers une autre unité pour y être purifié et donc améliorer sa concentration. La saumure est ensuite réinjectée dans le sous-sol, avec une concentration en lithium moindre.

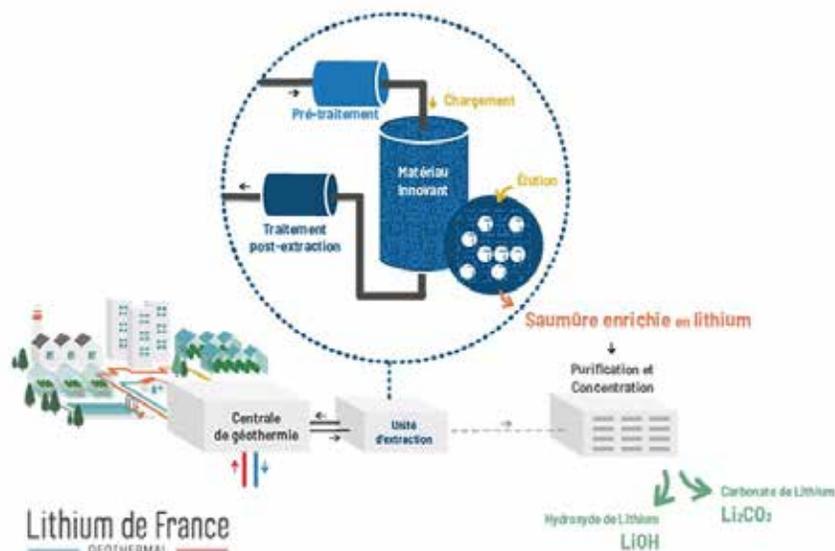


Figure 63 : Schéma de principe de l'extraction du lithium géothermal des saumures (Lithium de France)

II. Innovation

Le projet «Eugeli» (European Geothermal Lithium Brine) a été lancé en 2019 en tant que premier pilote d'extraction directe de lithium géothermal. L'objectif était d'extraire du carbonate de lithium des eaux géothermales de la centrale de Soultz-sous-Forêts, située dans le Fossé rhénan. Ce projet repose sur une unité composée de colonnes remplies d'un matériau actif qui extrait sélectivement le lithium des eaux géothermales (à l'image d'un filtre). Le résultat obtenu est une solution concentrée en lithium, qui est ensuite purifiée et précipitée sous forme de carbonate de lithium prêt à être utilisé dans la fabrication de batteries.

Les premiers kilogrammes de lithium ont été extraits avec succès. Une première en Europe, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle filière européenne qui ne demande qu'à croître. Pour la centrale de Soultz-sous-Forêts, la production pourrait atteindre environ 2000 tonnes de carbonate de lithium par an qui permettrait de produire 140 000 voitures électriques à 160 km d'autonomie (une telle voiture ayant besoin de 14,4 kg de carbonate de lithium dans sa batterie). Ce processus permet de produire de la chaleur localement, de l'électricité et du lithium, de manière à minimiser les émissions de CO₂.

III. Cluster Lithium

L'AFPG a créé un cluster dédié au lithium géothermal visant à réunir des opérateurs produisant des saumures, des équipementiers, des bureaux d'études, des organismes R&D ou encore des industriels du lithium dans le but de travailler sur le développement de cette nouvelle filière et de porter ce sujet auprès des pouvoirs publics et d'autres parties prenantes. Ce groupe de travail pérenne permettra d'échanger des informations entre ses membres dans les thématiques telles que les évolutions du marché, la technologie ou encore la réglementation. Le cluster dénommé Alliance Lithium sera en mesure de représenter la filière en France et à l'international.

IV. Promouvoir la filière lithium géothermale : étudier, communiquer, développer, industrialiser

Pour l'instant, aucun objectif national n'existe en termes de production de lithium géothermal car la filière est très récente et peu connue.

Plus généralement, dans le cadre de France 2030, il existe une stratégie nationale d'accélération sur les batteries qui ne mentionne pas spécifiquement le lithium géothermal mais parle de « soutenir la recherche et l'innovation pour développer de meilleures batteries » via le PEPR Batteries (programmes et équipements prioritaires de recherche) d'un budget de 45,7 millions d'euros.

Concernant l'électrification du parc automobile, plus aucune voiture thermique ne sera vendue dans l'Union Européenne à horizon 2035 (proposition votée par le parlement européen en juin 2022). Le gouvernement français atteste que de 2023 à 2030, 2 millions de véhicules électriques seront produits. Il a même débloqué 1 milliard d'euros pour soutenir les projets innovants dans la filière automobile.

Sachant cela, le gouvernement pourrait ouvrir de nouveaux financements pour soutenir la recherche sur ce sujet spécifique et trouver d'autres moyens pour encourager des acteurs à se lancer dans ces projets innovants, et pourquoi pas informer le grand public quand la filière sera plus mature.

Projets en développement et à venir

I. Projets en développement en production de chaleur et d'électricité

1. Les évolutions du Code minier

On appelle gîte géothermique une ressource souterraine dans laquelle il est possible d'extraire de l'énergie sous forme thermique. Le gîte peut être concerné par deux titres miniers d'exploitation selon la puissance thermique maximale prélevable au sous-sol sur tout son périmètre, dite « puissance primaire » :

- si la puissance primaire est inférieure à 20 MW, le gîte est dit « basse température » et est concerné par le titre minier « permis d'exploitation ».
- si la puissance primaire est supérieure à 20 MW, le gîte est dit « haute température » et est concerné par le titre minier « concession ».

Anciennement dans le Code minier (avant décembre 2019), la distinction se faisait sur la température de l'eau exploitée avec un seuil de 150°C mais ce critère était devenu moins pertinent pour les zones où la température était moins prévisible.

Une période exploratoire est obligatoire avant la délivrance de l'un de ces titres miniers. Cette période est elle aussi concernée par deux titres miniers :

- l'« autorisation de recherches (AR) » dans les cas où l'exploration du sous-sol requise est faible (voire inexistante), notamment dans les zones où la ressource géothermique est connue,
- le « permis exclusif de recherches (PER) » dans les cas où l'exploration est nécessaire pour améliorer les connaissances sur la ressource.

Les travaux miniers sont encadrés par le titre minier « DAOTM » (Demande d'autorisation d'Ouvertures de Travaux miniers) et ont évolué depuis le 1^{er} juillet 2023 vers une autorisation environnementale.

2. Projet dans les départements et régions d'Outre-Mer

La France a la chance de pouvoir développer des activités de géothermie en domaine volcanique sur son territoire grâce aux îles de la Réunion, de la Guadeloupe, de la Martinique et de Mayotte. Sept demandes de permis exclusifs de recherches (PER) sont en cours ou ont été déposées dans les DROM (Figures 64 à 67).

En Guadeloupe, il y a deux permis exclusifs de recherches (en plus de la concession de Bouillante attribuée à Géothermie Bouillante) :

- Vieux-Habitants (renommé Sud Karukéra) dont le permis exclusif de recherches a été octroyé en mai 2016 à la société Géothermie de Guadeloupe pour une durée de 5 ans. À la suite d'une demande de prolongation de 5 ans en janvier 2021, une consultation avait lieu début 2023 pour son renouvellement,
- Sud-Soufrière correspondant à une demande de permis exclusif de recherches qui a été déposée en septembre 2020 par Albioma pour une durée de 5 ans avec une consultation publique entre décembre 2022 et janvier 2023.

En Martinique, il y a également 2 permis exclusifs de recherches en demande (tous deux d'une durée de 5 ans) :

- Cœur Martinique (anciennement Sud Carbet) dont le permis a été déposé le 19 octobre 2020 par TLS Geothermics et Storengy, et qui était en consultation début 2022,
- Pointe Sud-Ouest dont le permis a été déposé le 24 juillet 2020 par TLS Geothermics et Storengy, et qui était en consultation début 2021.

Sur l'Île de la Réunion, il existe deux demandes de permis exclusifs de recherches :

- Cafres-Palmistes dont le permis a été déposé par ENGIE en mars 2021,
- Piton des Neiges dont le permis a été déposé par Albioma en mars 2022.

A Mayotte, un permis exclusif de recherche a été déposé par Albioma en juin 2020.



Figure 64 : Localisation des deux permis exclusifs de recherches et de la concession de Bouillante en Guadeloupe (Camino)



Figure 65 : Localisation des deux demandes de permis exclusifs de recherches en Martinique (Camino)



Figure 66 : Localisation des deux permis exclusifs de recherche déposés sur l'Île de la Réunion (Camino)



Figure 67 : Localisation du permis exclusif de recherche déposé à Mayotte (Petite Terre) (Camino)

3. Projets en métropole

Les seules concessions du territoire métropolitain sont celles de « Sultz » (gérée par l'Exploitation Minière de la Chaleur depuis septembre 2015) et de Rittershoffen (gérée par Électricité de Strasbourg et Roquette Frères depuis mai 2021) en Alsace.

Actuellement, le territoire métropolitain est exploré par les industriels pour des recherches de gites géothermiques de haute température. La liste des PER en cours au 31/12/2022 est donnée dans le tableau 6 ci-dessous.

Dénomination du titre	Titulaire du titre	Département(s) concerné(s)	Statut
GRAND-EST			
Wissembourg	Électricité de Strasbourg	67	Octroi en 2011, prolongation en instruction
Strasbourg	2gré	67	Octroi en 2013, prolongation en instruction
Illkirch-Erstein	Électricité de Strasbourg	67	Octroi en 2013, prolongation en instruction
Les Sources	Lithium de France	67	Octroi en 2022, en cours de validité
Les Poteries	Lithium de France	67	Octroi en 2023, en cours de validité
AUVERGNE-RHONE-ALPES			
Val-de-Drôme	2gré	26	Octroi en 2014
Cézallier	2gré	15 / 43 / 63	Octroi en 2014, prolongation en instruction
Riom-Clermont-Métropole	2gré	63	Octroi en 2016, prolongation en instruction
Combraille-en-Marche	TLS Geothermics / Storengy	03 / 23 / 63	Octroi en 2017, prolongation en instruction
La Sioule	TLS Geothermics / Storengy	63	Octroi en 2017, prolongation en instruction
Sioule-Miouze	Geopulse	63	Octroi en 2020, en cours de validité
Pouzol-Servant	TLS Geothermics / Storengy	03 / 63	Demande de permis (2019)
Calidana	Storengy	73	Demande de permis (2022)
NOUVELLE-AQUITAINE			
Pau-Tarbes	2gré	64 / 65	Octroi en 2013, prolongation possible en 2023

Tableau 6 : Permis exclusifs de recherches en France Métropolitaine (Camino)



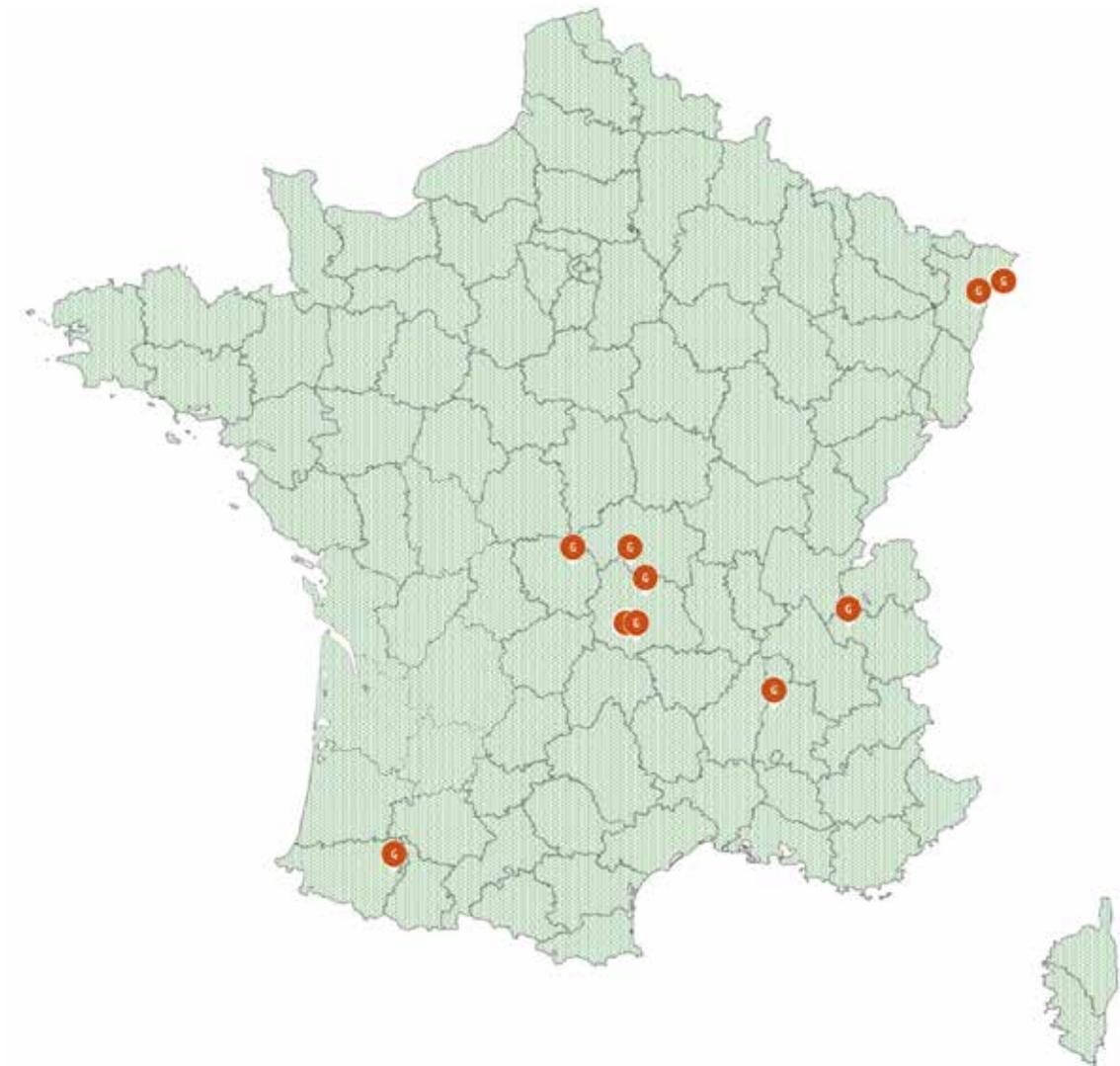


Figure 68 : Localisation des permis exclusifs de recherches en France Métropolitaine (Camino)

La carte en Figure 68 donne la localisation des PER en géothermie. Il est à noter qu'en 2023, plusieurs nouvelles demandes de PER ont été déposées en Grand-Est et en Île-de-France.

II. Projets pour le lithium géothermal

Des entreprises comme Lithium de France, Electricité de Strasbourg (ES), 2gré et Vulcan Energie France s'intéressent au lithium géothermal et ont déposé des demandes de permis exclusif de recherches de lithium dont la liste figure dans le tableau 7 ci-dessous.

Nom du permis	Entreprise	PER	Surface (km ²)	Début	Fin
Illkirch	ES	Octroyé	143	20/01/2023	20/01/2028
Outre-Forêt	ES	Octroyé	395	30/04/2022	30/04/2027
Les Cigognes	Vulcan Energie France	Demandé	-	-	-
Kachelhoffa minéral	Vulcan Energie France	Demandé	-	-	-
Les Poteries Minérales	Lithium de France	Demandé	151,75	-	-
Les Sources Alcalines	Lithium de France	Octroyé	157,76	24/07/2023	24/07/2028
Plaine du Rhin	2gré	Demandé	572	-	-
Limagne	2gré	Demandé	707	-	-

Tableau 7 : Récapitulatif des PER lithium géothermal en France (Camino)

La carte Figure 69 ci-dessous, donne la localisation de ces premiers PER de lithium.



Figure 69 : Carte des permis exclusifs de recherches en lithium géothermal (Camino)

Pour soutenir le développement de la géothermie profonde

Déployer le plan d'action du 2 février 2023

Dans le plan d'action publié le 2 février 2023 par le ministère de la transition énergétique, plusieurs actions concernant la géothermie profonde y sont inscrites, notamment :

- améliorer la connaissance du sous-sol via des données d'imagerie du sous-sol, de forages, des campagnes sismiques 2D ou autres innovations d'exploration d'aquifères profonds. En effet, développer la géothermie sur tout le territoire est un enjeu possible si la connaissance du sous-sol le permet. Or, il existe à ce jour un énorme potentiel sous-exploité en France, notamment hors Ile-de-France,
- réaménager le Fonds de Garantie Géothermie (géré par la SAF-Environnement) pour couvrir le risque géologique de façon uniforme sur l'ensemble du territoire français,
- mettre en place un fonds de garantie si la ressource géothermique n'est finalement pas valorisable pour les projets industriels ou agro-alimentaires, notamment pour inciter le développement de la géothermie en milieu rural.

Voies d'avenir pour les géothermies



I. Suivre les mesures du plan Marshall des ENR&R

Le plan Marshall pour développer les énergies renouvelables et de récupération (ENR&R) indique des actions à suivre aussi bien en géothermie de surface qu'en profonde afin d'atteindre 54 % de chaleur issue des Energies Renouvelables et de Récupération (EnR&R) dans la consommation finale de chaleur. Présenté au gouvernement le 21 avril 2023, il propose les actions suivantes :

- augmenter le budget du Fonds chaleur à 750 millions d'euros au lieu de 520 millions d'euros en 2023, pour atteindre un montant de 2,99 milliards d'euros en 2030,
- définir une stratégie territoriale de chauffage dans tous les documents d'urbanisme et d'habitat,
- effectuer une campagne de communication nationale à l'attention du grand public autour de la géothermie notamment,
- établir un plan Etat et collectivités exemplaire (afin de faire en sorte que l'état et les collectivités se chauffent avec des énergies renouvelables),
- généraliser la réalisation d'études de faisabilité publiques de création de réseaux de chaleur dans toutes les collectivités de plus de 10 000 habitants,
- inscrire le dispositif MaPrimeRenov' dans une trajectoire pluriannuelle,
- élargir les missions du dispositif France Renov à l'information, la promotion et l'accompagnement de projets de particulier en matière d'équipement de chaleur renouvelable individuelle ou collective.

II. Développer la géothermie en zones rurales

En géothermie de surface, de nombreuses installations de géothermie sont présentes en zones rurales mais pratiquement toujours à destination des particuliers. La nouvelle méthodologie présentée dans cette étude, permettant de distinguer près de 7 catégories d'usages, a permis de montrer que la géothermie de surface peut également être à destination de l'activité agricole (culture, élevage, production de vin...). Que ce soit pour élever des animaux ou cultiver des plantes, la température impacte directement la qualité des produits. Il est bon de montrer que les énergies renouvelables et notamment la géothermie peuvent tout à fait répondre aux besoins en chauffage, tout en régulant les factures énergétiques et en ayant un impact positif sur l'environnement.

Concernant la géothermie profonde, les installations se situent principalement dans le Bassin parisien et le Bassin aquitain. Mais de nombreuses activités agricoles et industrielles se situant en zones rurales pourraient avoir recours à la géothermie profonde pour répondre à leurs besoins de chaleur.

III. Développer la géothermie à destination des industriels

— En géothermie de surface, comme en géothermie profonde les activités industrielles nécessitant de la chaleur ou du froid pour leur process peuvent se tourner vers les énergies renouvelables et de récupération, et notamment vers la géothermie. Ainsi, ces industries pourraient réduire leurs émissions de gaz à effet de serre tout en maîtrisant mieux leur facture énergétique sur le long terme. Cela permettra également



d'améliorer l'image de marque de ces entreprises en montrant un engagement auprès de clients, de plus en plus regardant sur le point de vue environnemental.

A l'instar de la centrale Rittershoffen (amidonerie « Roquette Frères ») en Alsace, qui permet d'éviter la libération de 46000 tCO₂/an par rapport à l'ancienne solution chaudière au gaz naturel, d'autres industriels pourraient envisager la géothermie.

IV. Poursuivre les travaux réglementaires

Durant les 18 derniers mois, de nombreuses modifications de la réglementation en géothermie profonde et en géothermie de surface ont eu lieu.

La Loi Climat et Résilience a permis d'introduire plusieurs modifications essentielles dans le code minier, notamment la mise en place d'une garantie financière applicable à tous les opérateurs ainsi qu'une garantie trentenaire durant laquelle les opérateurs seront encore responsables de tous dysfonctionnements occasionnés après la fermeture d'un ouvrage. D'autres évolutions concernant les titres miniers ont été discuté durant l'été 2023.

Concernant les autorisations de travaux, la géothermie est passée depuis le 1er juillet 2023 sous autorisation environnementale dont le principal changement consistera à avoir une approche plus globale que jusqu'à présent.

Enfin, nous pouvons noter la sortie du tant attendu guide des bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité élaboré par le BRGM et l'INERIS sous le pilotage de la DGPR et avec l'appui de la DGEC. Ce risque est désormais encadré, notamment avec les nombreux retours d'expérience qui ont été faits par des opérateurs français et européens qui ont travaillé sur le sujet sous l'égide de l'AFPG et de l'EGEC.

Concernant la filière de géothermie de surface, de nombreux chantiers ont été ouverts en GMI, notamment avec la mise en place exigée de la certification des foreurs. L'AFPG participe à l'ensemble des groupes de travail pour améliorer le processus réglementaire tout en préservant l'environnement.

Outre ces évolutions réglementaires, il est également primordial que les services de l'État en charge des instructions puissent être dotés de moyens humains supplémentaires. Les retours de terrain montrent très souvent que ce ne sont pas les délais d'instruction qui sont spécifiquement longs, mais surtout le manque de moyens pour instruire les dossiers.

V. Décarboner les modes de chauffage

Cette étude est aussi un outil pour rappeler l'importance du chauffage dans la consommation d'énergie et donc dans les émissions de gaz à effet de serre de la France. En effet, certains articles parlent même de la chaleur renouvelable, comme étant la grande oubliée des débats sur l'énergie. En 2021, pour répondre aux besoins de chaleur de 708 TWh, seulement 158 TWh provenait de chaleur renouvelable et de récupération. Le plan Marshall des ENR&R propose de passer à 304 TWh, ce qui pourrait permettre d'éviter l'émission de 62 millions de tonnes de CO₂ chaque année.



VI. Le mot du président

Passer à la vitesse supérieure !

« Le prix des énergies fossiles est resté très longtemps assez bas, particulièrement celui du gaz, ce qui n'a pas encouragé les maîtres d'ouvrage à opter pour une production de chaleur renouvelable. Le contexte géopolitique a bouleversé le marché énergétique et conduit depuis début 2022 à une envolée des prix du gaz sur une période suffisamment longue pour marquer les esprits, conduisant à une prise de conscience chez bon nombre de citoyens et d'acteurs du monde professionnel. Aussi, depuis le début de l'année 2023, les demandes en faveur de la géothermie sont en très forte augmentation.

L'ADEME avec l'élaboration d'une Feuille de route Géothermie et la Ministre de la Transition énergétique avec le lancement du Plan Géothermie étaient tous les deux dans le bon tempo. Grâce à eux et aux efforts de la filière, nous disposons aujourd'hui d'un Plan de 50 actions qui contribuera largement au développement de la géothermie, avec en ligne de mire, une multiplication par 2, voire 3 la production d'énergie géothermique dans les 10 années à venir !

C'est un vrai défi pour les acteurs de notre filière, il va falloir bâtir les outils pour réussir à transformer l'essai. Cela passera par des embauches, de la formation, de l'achat d'équipements, de l'élaboration de nouveaux outils financiers ou réglementaires et ... de gros efforts de visibilité pour encore mieux faire connaître la géothermie à tous.

L'AFPG et ses partenaires sauront accompagner la filière de géothermie pour réussir ce passage à la vitesse supérieure ! ».



Éditeur : **AFPG** • 77 rue Claude Bernard 75005 Paris

Directeur de la publication : **Jean-Jacques Graff**

Coordinatrice du projet : **Margot Antivilo**

Graphisme et mise en page : **Philippe Lapointe**

L'AFPG remercie l'ensemble des contributeurs et contributrices ayant permis la réalisation de ce document au sein du **BRGM**, de l'**ADEME**, du **SER**, de la **FEDENE**, de l'**AFPAC**, d'**Observ'ER** et du **SFEG**.

Imprimé chez **ABSURDE Impression à Strasbourg**

Dépôt légal : **octobre 2023**



205 300

installations en géothermie de surface

4,58^{TWh}

de chaud et de froid issus de la géothermie de surface

dont **3 500** nouvelles installations en 2022

dont



3 300 installations dans le secteur du particulier



45 installations dans le secteur du collectif



5 installations dans le secteur agricole



12 installations dans le secteur industriel

162 installations dans le secteur tertiaire

Géothermie de surface



Géothermie profonde

Production de chaleur

79

opérations de chaud et de froid

1 000 000

de personnes chauffées en France

2,05^{TWh}

produits par géothermie profonde

Production d'électricité

2

centrales électrogènes

15,5 MW à Bouillante en Guadeloupe

1,7 MW à Soultz-sous-Forêts en Alsace

Lithium géothermal

Projets Eugeli à Soultz-sous-Forêt

production de **2 000 tonnes** de carbonate de lithium par an

= **140 000** batteries de lithium



Projets futurs

22

permis de recherche en Métropole

7

permis de recherche dans les territoires ultra-marins