

LA GÉOTHERMIE

RÉSUMÉ

L'énergie géothermique est issue de la chaleur accumulée en profondeur depuis plusieurs milliards d'années dans la terre et due principalement à la désintégration d'éléments radioactifs tels que l'uranium, le thorium et le potassium présents dans les roches du noyau terrestre et en partie au refroidissement du noyau. Elle est récupérée à des profondeurs s'étageant entre des dizaines ou des centaines (voire milliers) de mètres.

L'énergie géothermique « de surface » est issue de la chaleur accumulée dans les premiers mètres du sous-sol suite à son réchauffement par l'énergie du soleil. La récupération de l'une ou l'autre de ces deux formes d'énergie est basée, soit sur le pompage d'eau chaude dans les aquifères profonds, soit sur l'introduction et la circulation à des profondeurs diverses d'un fluide qui se réchauffe au contact de la chaleur rencontrée.

L'exploitation de cette énergie, directement sous forme de chaleur ou convertie en électricité, nécessite des équipements et des installations plus ou moins lourdes selon la localisation de la chaleur, sa température et l'exploitation qui en est faite. Il en résulte une multiplicité de techniques et de modes de valorisation.

- **La géothermie très basse énergie**

Cette technologie est utilisée dans de petites installations qui peuvent être mises en place au niveau d'un quartier ou d'une maison individuelle. Le principe consiste à récupérer la chaleur des sous-sols (de 10 à 15 °C) via des capteurs enterrés et de la coupler à des pompes à chaleur (PAC).

- **La géothermie basse énergie ou basse température**

Cette technologie utilise la chaleur du sous-sol terrestre ou des eaux chaudes souterraines de moyenne profondeur (de quelques centaines et 2000 m) avec des températures comprises entre 20 °C et 90 °C. Ces prélèvements permettent de satisfaire aux besoins de chauffage urbain de bâtiments publics et de logements et sont utilisés pour le chauffage de piscines, d'établissements thermaux, de parcs de loisirs, de serres agricoles, de champignonnières, de bassins de pisciculture, ...

- **La géothermie moyenne énergie ou moyenne température**

L'énergie récupérée provient de gigantesques poches d'eau chaude ou de vapeurs humides (entre 100 à 150 °C) et situées dans des zones volcaniques à une profondeur inf. à 1000 m ou dans des zones sédimentaires à une profondeur sup. à 2000 m. Cette eau chaude prélevée est envoyée dans une centrale thermique comprenant un échangeur de chaleur avec un fluide caloporteur intermédiaire pour produire de l'électricité..

- **La géothermie haute énergie ou profonde**

Le principe est le même que dans le système précédent, sauf que l'eau thermale prélevée dans des nappes situées dans les régions volcaniques, entre 1500 et 3000 mètres de profondeur dépasse 160 °C et peut servir directement, sous forme de vapeur, à faire tourner des turbines générant de l'électricité.

- **La géothermie marine ou thalassa-thermie**

Cette technique consiste à utiliser la mer comme source de très basse énergie, L'eau est puisée à une profondeur de 1 km à proximité des côtes. Des échangeurs et des pompes à chaleur permettent de chauffer ou de refroidir de l'eau douce qui est ensuite acheminée vers les bâtiments à chauffer ou climatiser.

Atouts et perspectives de la géothermie

Cette énergie se développe là où existent des plaques volcaniques et où le magma du noyau est relativement proche de la surface. Elle assure une production continue et stable d'électricité et de chaleur dans les zones à activité volcanique importante, a contrario des énergies renouvelables classiques. Elle permet la cogénération c'est-à-dire la production simultanée de chaleur et d'électricité. Exceptée la géothermie profonde, elle est faiblement productrice de CO2 et présente peu d'impact sur l'environnement en surface. Basées sur la fracturation hydraulique ou sur la stimulation chimique, les techniques de forage en grande profondeur peuvent néanmoins induire des risques de sismicité.

1. INTRODUCTION

Le mot géothermie désigne la science qui étudie les phénomènes thermiques internes à la Terre et la technologie qui vise à exploiter ces phénomènes. L'énergie géothermique est celle qu'on peut extraire de la chaleur de la Terre (voir figure 1).

L'énergie géothermique profonde est issue de la chaleur accumulée depuis plusieurs milliards d'années dans la terre. Elle est due principalement à la désintégration d'éléments radioactifs tels que l'uranium, le thorium et le potassium présents dans les roches du noyau terrestre et en partie au refroidissement du noyau. Cette énergie est récupérée à des profondeurs s'exprimant généralement en dizaines ou centaines (voire milliers) de mètres.

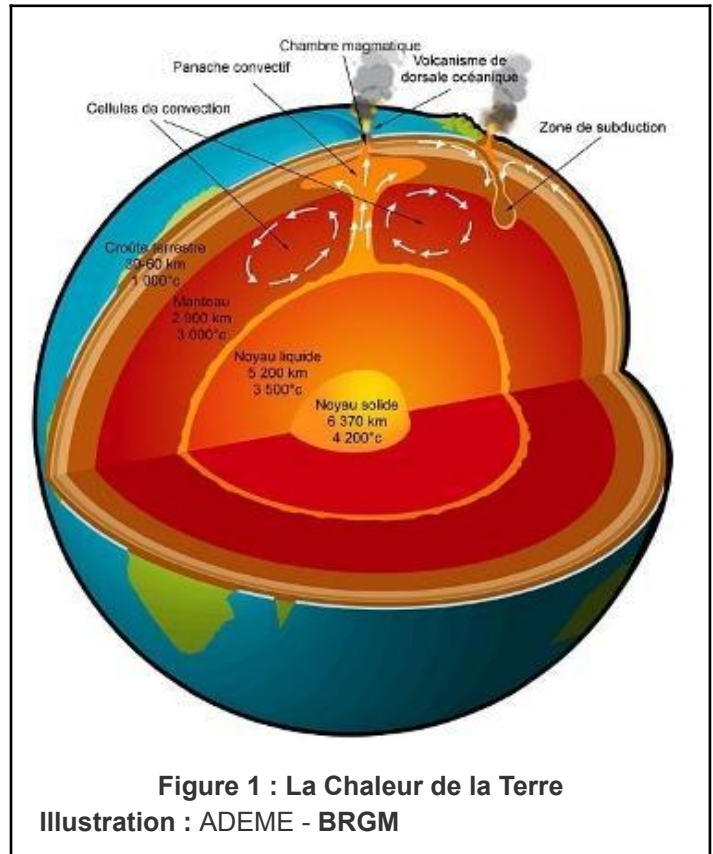
L'énergie géothermique « de surface » est, quant à elle, issue de la chaleur accumulée dans les premiers mètres du sous-sol suite à son réchauffement par l'énergie du soleil.

La récupération de l'une ou l'autre de ces deux formes d'énergie est basée principalement soit sur le pompage d'eau chaude dans les aquifères profonds soit sur l'introduction et la circulation à des profondeurs diverses d'un fluide qui se réchauffe au contact de la chaleur rencontrée et remonte chargé de calories.

L'exploitation de cette énergie, directement sous forme de chaleur ou convertie en électricité, nécessite des équipements et des installations plus ou moins lourdes selon la localisation de la chaleur, sa température et l'exploitation qui en est faite.

À l'inverse des énergies renouvelables intermittentes ou cycliques, la géothermie fournit de l'énergie en flux continu sans variations diurnes, saisonnières, ni climatiques.

Disponible 24h/24, produite et utilisée en local, elle est peu carbonée sur le cycle de vie des installations. Son impact sur l'environnement est faible, et ses réserves sont très importantes.



2. TYPES ET MODES D'EXPLOITATION DES RESSOURCES GÉOTHERMIQUES

La température moyenne à 5 m sous le niveau du sol en France et grâce aux apports solaires est sensiblement stationnaire autour 10 à 14 °C tout au long de l'année.

Dans les 30 km de la croûte terrestre, la chaleur stockée augmente ensuite très vite : le gradient thermique est de 3,3 °C / 100 m en moyenne en France avec des pointes à 10 °C / 100 m en Alsace. Elle peut atteindre 1000 °C / 100 m dans les zones volcaniques et les zones de rift (Islande, Nouvelle Zélande) ! Les roches ou nappes peuvent atteindre 150 °C à quelques milliers de mètres de profondeur.

On distingue différentes filières et différents modes d'exploitation selon l'origine de la chaleur et la profondeur d'extraction. Le tableau suivant synthétise ces différentes applications.

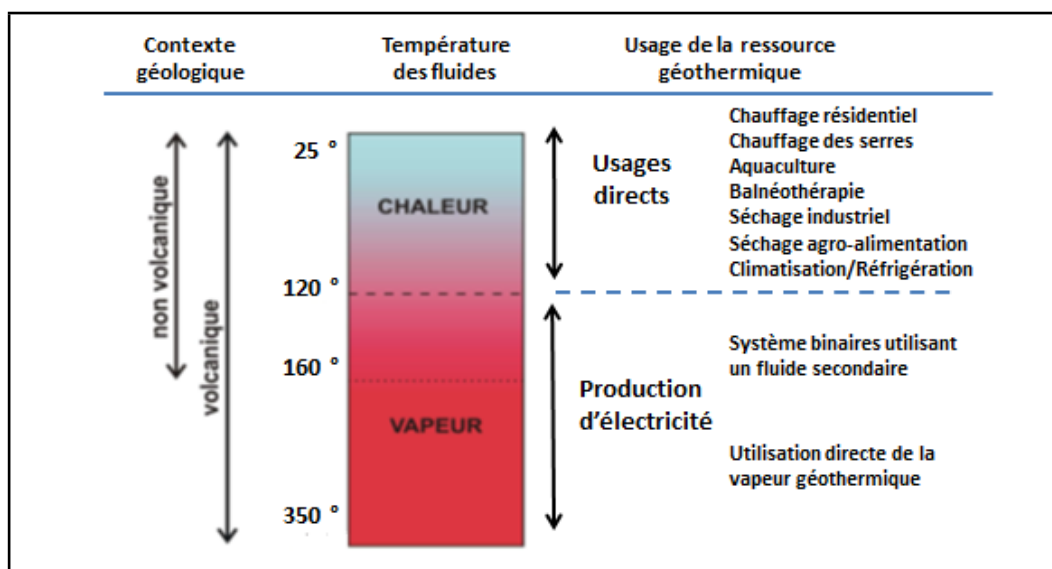


Tableau 1 : Différentes applications de la géothermie

2.1. LA GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

La géothermie de très basse énergie est utilisée dans de petites installations qui peuvent être mises en place au niveau d'un quartier ou d'une maison individuelle.

Pour récupérer la faible chaleur des sous-sols (température de 10°C à 15 °C), on emploie des capteurs géothermiques enterrés, capables de prélever la chaleur des terrains qu'ils traversent couplés à des pompes à chaleur (PAC) (voir figure 2).

Ces capteurs (composés de tubes dans lesquels circule en circuit fermé de l'eau mélangée avec de l'antigel) peuvent être enterrés :

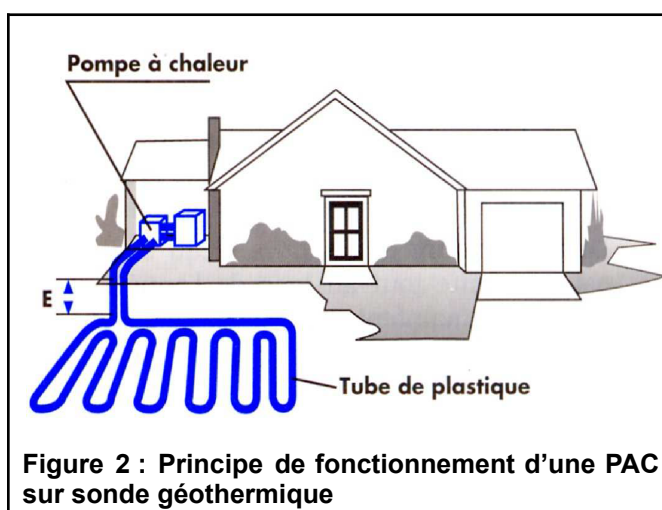
- soit horizontalement entre 60 cm et 1,2 m de profondeur sur une surface sensiblement le double de celle de l'habitation à chauffer
- soit verticalement (entre 30 et 150 m de profondeur) si l'espace disponible est insuffisant.

Les calories alimentant ces capteurs sont récupérées dans une pompe à chaleur (PAC) qui fournit de l'eau chaude pour assurer le besoin en chauffage.

Le fonctionnement peut être réversible, c'est-à-dire que l'on peut injecter des calories dans le sol pour climatiser (refroidir) un logement.

Selon le besoin (chauffage ou climatisation) les PAC peuvent fournir ou restituer à l'environnement environ trois fois plus d'énergie qu'elles n'en demandent (3 kWh pour une consommation électrique de 1 kWh).

Le dimensionnement des capteurs doit être étudié pour assurer la reconstitution du capital énergétique du sol.



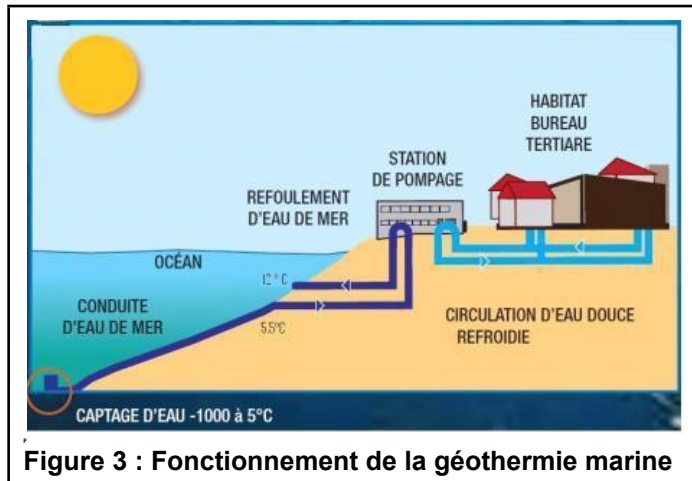
En général cela implique, pour ne pas voir geler les sols, de limiter les besoins énergétiques en gardant une période de relaxation annuelle.

Cette technique a un certain succès puisqu'en 10 ans la vente de ces systèmes est passée de 30 000 à plus de 400 000 unités en Europe.

Une source de chaleur complémentaire est en train de se développer en utilisant la mer comme source de très basse énergie, c'est la **géothermie marine** encore appelée **thalasso-thermie**.

Elle vise à exploiter la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide des fonds marins. L'eau est pompée à 5 °C dans la mer à une profondeur de 1 km et sur la côte.

Des échangeurs et des pompes à chaleurs permettent de chauffer ou de refroidir de l'eau douce qui est ensuite acheminée vers les bâtiments à chauffer ou climatiser (voir figure 3).



Selon ce principe les deux réalisations suivantes ont été conçues :

- Le centre Thassalia de Cofely à Marseille qui produit plus de 15 MW d'eau chaude ou froide qui alimentent 500 000 m³ de bâtiment pour le chauffage et la climatisation.
- Les complexes construits sur l'île de la Réunion pour climatiser les bâtiments publics des communes de Saint-Denis et de Sainte-Marie.

2.2. LA GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE OU BASSE TEMPÉRATURE

La géothermie de basse énergie utilise la chaleur du sous-sol terrestre ou des eaux chaudes souterraines de moyenne profondeur avec des températures comprises entre 20 °C et 90 °C (voir figure 5 en page suivante).

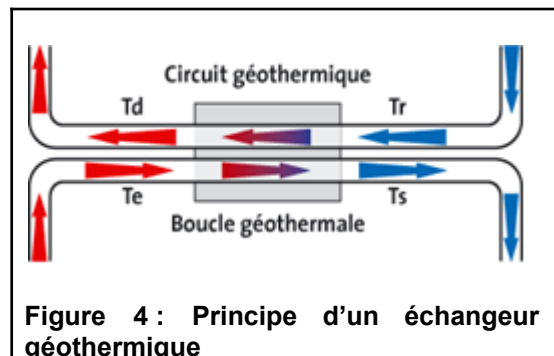
On effectue alors des prélèvements compris entre quelques centaines de mètres jusqu'à plus de 2000 m. À ces profondeurs, la nature géologique des sous-sols et la détection des nappes d'eau est déterminante.

On s'appuie alors sur des Atlas géothermiques qui précisent la profondeur de la nappe, son hydrochimie (en particulier pouvoir corrosif de l'eau), sa température et sa transmissivité (débit exploitable).

Les eaux sont souvent très minéralisées (sels et sulfates) et peuvent être à l'origine de corrosion dans les circuits de distribution.

Les équipements comportent des pompes de relevage puissantes et à fort débit associées à des échangeurs géothermiques en matériau anti-corrosion comme le titane si l'eau des nappes est très corrosive (voir figure 4).

L'eau, refroidie, peut être réinjectée à distance du lieu de prélèvement pour ne pas refroidir l'eau chaude extraite.



Ces prélèvements permettent de satisfaire aux besoins de chauffage urbain de bâtiments publics et de logements et sont utilisés aussi pour d'autres applications telles que le chauffage de piscines, d'établissements thermaux, de parcs de loisirs, de serres agricoles, de champignonnières, de bassins de pisciculture, de locaux de séchage de bois.

Ce type de géothermie existe dans plusieurs régions en France comme la région parisienne.

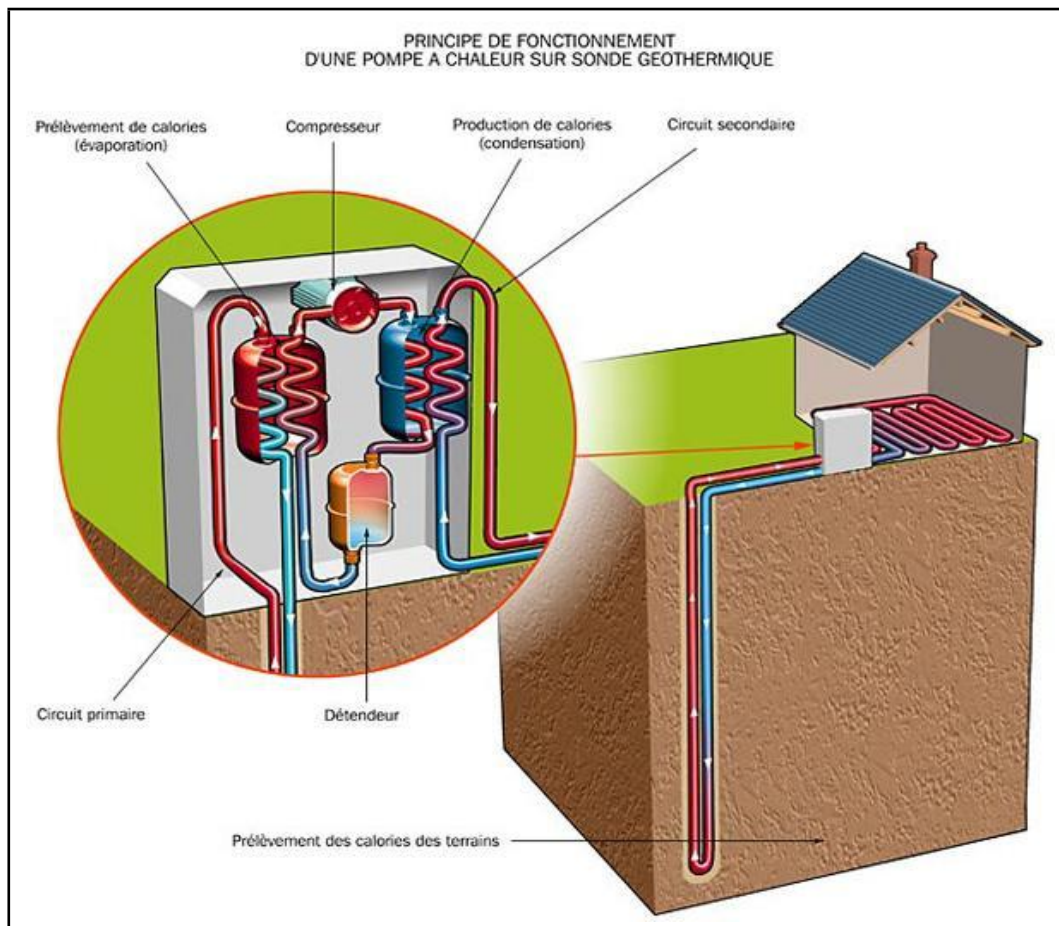


Figure 5 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique

2.3. LA GÉOTHERMIE MOYENNE ÉNERGIE ET MOYENNE TEMPÉRATURE

L'énergie récupérée provient de gigantesques poches d'eau chaude ou de vapeurs humides dont le niveau de température est compris entre 100 à 150 °C et situées dans des zones volcaniques à une profondeur inférieure à 1000 m ou dans des zones sédimentaires à une profondeur supérieure à 2000 m.

Cette eau géothermale peut être employée sous forme liquide dans la production d'électricité : c'est la géothermie de moyenne énergie.

Les centrales utilisent de l'eau maintenue sous pression (pour éviter qu'elle n'entre en ébullition) qui circule au sein d'un échangeur de chaleur. En se chauffant au contact des tuyaux pleins d'eau, un liquide caloporteur entre en ébullition et se vaporise. Le gaz ainsi obtenu fait tourner un turbo-alternateur qui produit de l'électricité.

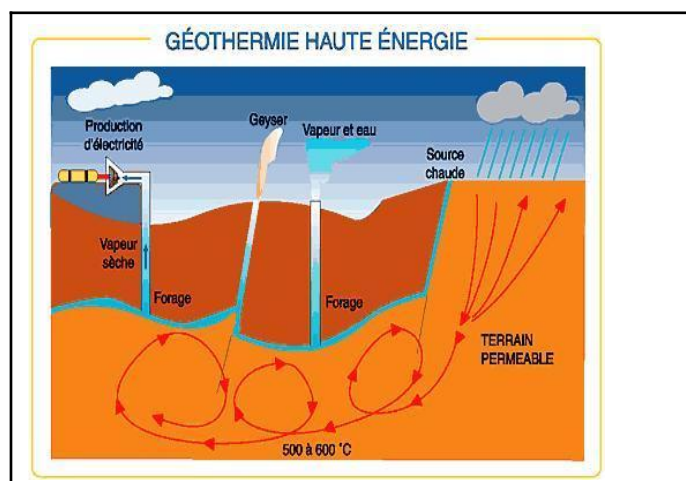
2.4. LA GÉOTHERMIE HAUTE ÉNERGIE OU PROFONDE

Si la température de l'eau géothermale dépasse 160 °C, cette eau peut servir directement, sous forme de vapeur, à faire tourner des turbines générant de l'électricité : on parle de géothermie haute énergie.

Les centrales de haute énergie captent l'eau des nappes situées dans les régions volcaniques, entre 1500 et 3000 mètres de profondeur (voir figure 6).

Dans 95 % des cas, l'eau du gisement est disponible sous forme liquide.

Figure 6 : Principe d'une géothermie haute énergie ►



La baisse de pression subie par le fluide dans les tuyaux lors de sa remontée vers la surface provoque la vaporisation d'une certaine proportion du fluide initial. En surface, on sépare l'eau liquide de la vapeur sèche.

Cette vapeur est envoyée sur une turbine à vapeur pour produire de l'électricité, tandis que l'eau liquide peut être vaporisée à nouveau par une baisse de pression plus poussée. L'eau liquide résiduelle est réinjectée dans le réservoir. Ce principe permet de faire de la cogénération c'est-à-dire de la production conjointe d'électricité et de chaleur, issue de la récupération des condensats de la vapeur.

La technologie dite Système Géothermique Stimulée utilise la température élevée des roches sèches profondes (plus de 5000 m) en injectant de l'eau grâce à un premier puits. Pour augmenter les surfaces de contact entre la roche sèche et l'eau et donc augmenter le rendement du processus, il est souvent nécessaire de fragmenter cette roche.

Un deuxième puits permet de récupérer l'eau infiltrée et réchauffée à environ 200 °C. Un système d'échangeur et de turbine à gaz permet de produire de l'électricité. Le prototype franco-allemand de Soultz dans le Bas-Rhin, construit entre 1987 et 2008, permet d'injecter actuellement dans le réseau électrique une puissance de 1,5 MW.

Les faibles flux thermiques permis (60 mW/m²) par les roches sèches premièrement imposent de développer le système sur de très grandes surfaces puis une fois les roches refroidies par la circulation de l'eau, il faudra un temps relativement long pour qu'elles se réchauffent à nouveau.

En résumé, la figure 7 ci-après résume les principales utilisations de la géothermie.

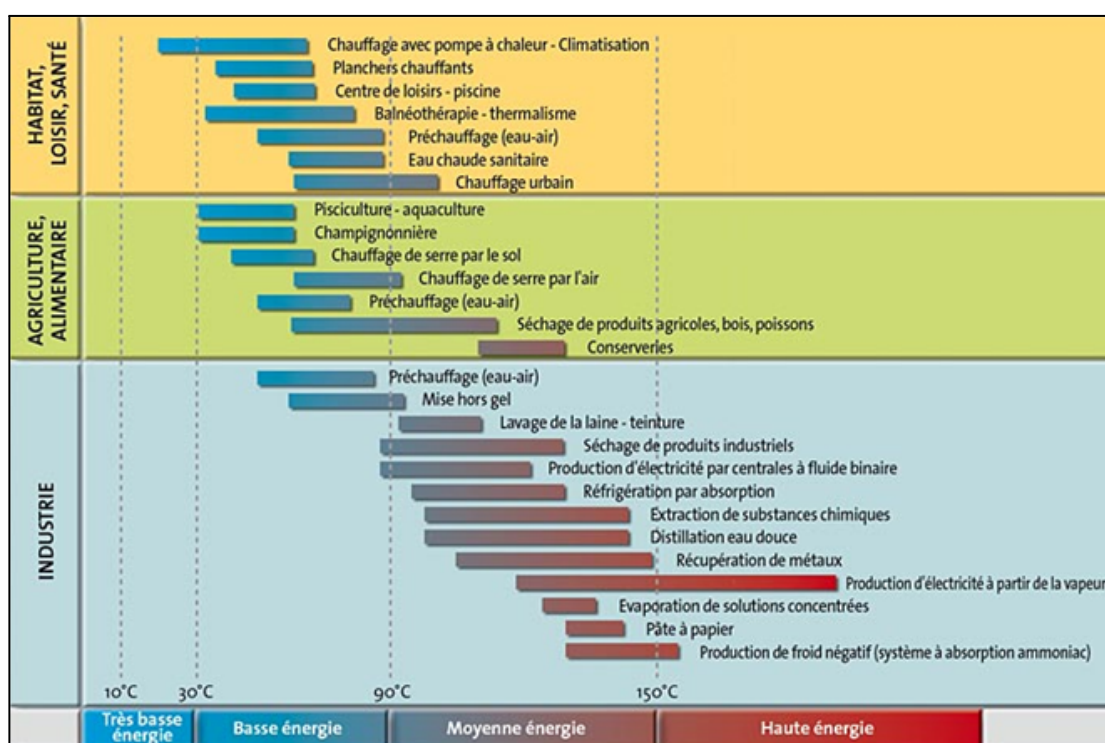


Figure 7 : Utilisations diverses de la chaleur pour l'ensemble des gammes de température de 10 °C à 150 °C

3. LA GÉOTHERMIE EN FRANCE ET DANS LE MONDE

La température moyenne à 5 m sous le niveau du sol en France et grâce aux apports solaires est sensiblement stationnaire autour 10 à 14 °C tout au long de l'année.

Depuis l'antiquité, l'énergie d'origine géothermique a été utilisée dans de nombreuses régions volcaniques avec en particulier l'exploitation de l'eau chaude dans les thermes et dans des bâtiments équipés de planchers chauffants.

Le premier réseau de distribution de chaleur géothermique connu se trouve en France à Chaudes Aigues où dès 1330 a été mis en place un réseau de distribution d'eau chaude naturelle (eau à 82 °C) destiné à alimenter plusieurs maisons.

La géothermie basse énergie utilisée pour le chauffage s'est développée aux Etats Unis dès le 19^e siècle puis en Islande où a été installé le premier vrai réseau de chauffage urbain qui chauffe aujourd'hui la quasi-totalité de la capitale.

En France, le premier forage géothermique est le puits artésien de Grenelle à Paris, réalisé sur huit années entre 1833 et 1841, pour capter la nappe à 30 °C des sables albiens, à 548 m de profondeur. La première expérience significative a permis d'exploiter l'un des aquifères profonds du bassin parisien dès 1969. Progressivement cette technique a été utilisée également pour le chauffage des serres et la pisciculture.

Les ressources mondiales en géothermie haute température (production d'électricité) se concentrent dans un nombre limité de pays, autour des zones volcaniques actives du globe (voir tableau 2).

Elles sont surtout localisées en Asie, dans les îles du Pacifique, en Afrique de l'Est et des Grands Lacs, en Amérique du Nord, dans les Pays Andins de l'Amérique du Sud, en Amérique Centrale et aux Caraïbes.

Les trois premiers producteurs sont les États-Unis, les Philippines (qui produisent 28 % de leur électricité à partir de la géothermie) et l'Indonésie. Cette dernière possède le plus grand potentiel (27 GW, soit 40 % du potentiel mondial).

L'un des centres de production géothermique les plus importants est situé aux États-Unis.

The Geysers, à environ 145 km au nord de San Francisco, a démarré la production en 1960 et dispose d'une puissance de 2000 MW électriques. L'ensemble qui comporte 21 centrales électriques utilise la vapeur de plus de 350 puits.

La géothermie est la source d'énergie principale de l'Islande, mais les Philippines en sont le plus gros consommateur. Trois centrales électriques fournissent environ 17 % (2004) de la production d'électricité du pays. De plus, la géothermie de très basse énergie permet le chauffage d'environ 87 % des habitations de l'île.

Cette technique s'est aussi développée dans la zone du Rift en Afrique. Trois centrales ont récemment été construites au Kenya, produisant une puissance électrique de l'ordre de 150 MW et il est prévu d'augmenter cette puissance à 576 MW en 2017, couvrant ainsi 25 % des besoins en électricité.

Néanmoins, si la technique des systèmes géothermiques stimulés (voir § 2.4) se développe, elle permettra d'accroître considérablement les aires géographiques de production.

La France métropolitaine était en 2008 le troisième pays européen utilisateur de géothermie à fins d'usages directs (voir gisement potentiel indiqué sur la figure 8).

Grâce aux efforts de l'AFME (maintenant l'ADEME) et du BRGM, la commune de Fresnes et du Blanc-Mesnil en région parisienne utilisent la géothermie pour leur chauffage urbain (cela représente cinquante mille logements).

Par ailleurs, comme évoqué au § 2.4, plus récemment a été foré l'un des puits les plus profonds (environ 5 km) à Soultz-sous-Forêts dans des granits fracturés, cette unité étant « un pilote scientifique loin de la rentabilité économique », selon le BRGM.

La centrale de Bouillante, près du volcan de la Soufrière en Guadeloupe, est la seule référence française en matière de géothermie haute température. Elle produit 10 % du besoin de l'île en électricité en utilisant deux puits distincts de forage produisant 25 et 70 GWh d'énergie électrique.

Tableau 2

Pays	Production (TWh)	Part de la production mondiale
États-Unis	19,6	27,9 %
Philippines	10,2	14,6 %
Indonésie	7,9	11,2 %
Nouvelle-Zélande	6,2	8,8 %
Mexique	5,8	8,3 %
Italie	5,6	7,9 %
Islande	5,2	7,4 %
Japon	2,5	3,6 %
Salvador	1,5	2,2 %
Kenya	1,5	2,1 %
reste du monde	4,2	6,0 %
Total mondial	70,4	100 %

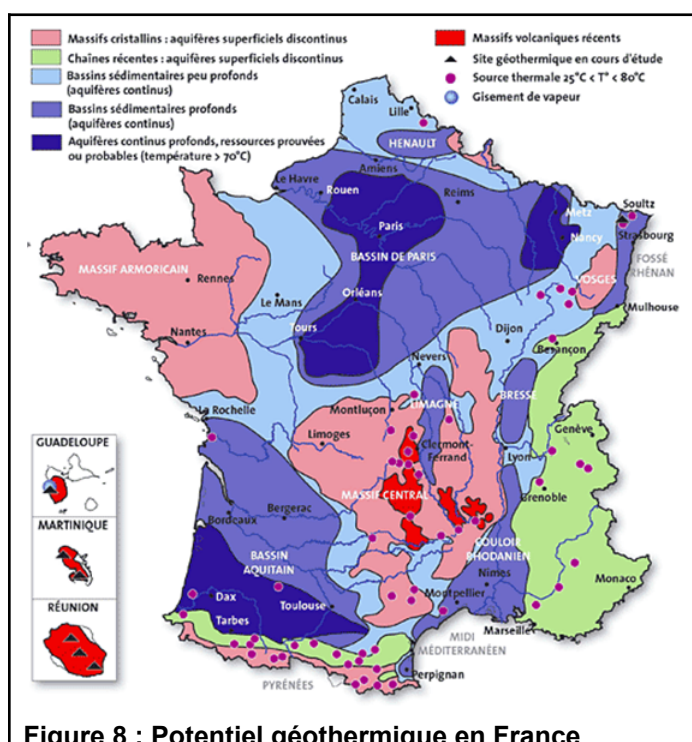


Figure 8 : Potentiel géothermique en France

Des travaux d'exploration montrent la possibilité d'atteindre une puissance de 200 MW à l'horizon 2020 pour l'ensemble de la Guadeloupe, la Martinique, la Réunion et la Dominique.

4. LES ATOUTS ET PERSPECTIVES

Cette énergie se développe là où existent des plaques volcaniques et où le magma du noyau est relativement proche de la surface. Elle assure une production continue et stable d'électricité et de chaleur dans les zones à activité volcanique importante, a contrario des énergies renouvelables classiques

Elle permet la cogénération c'est-à-dire la production simultanée de chaleur et d'électricité.

Excepté la géologie profonde qui nécessite des forages, elle est faiblement productrice de CO₂ et présente peu d'impact sur l'environnement en surface.

Les techniques de forage en grande profondeur nécessitent toutefois des investissements importants. Basées sur la fracturation hydraulique ou sur la stimulation chimique, ces techniques ne sont pas sans risque pour l'environnement en profondeur. Les réinjections d'eau froide sont nécessaires pour assurer une circulation d'eau chaude continue et demandent une maintenance complexe dans le cas de pompes d'eaux corrosives. Des risques de sismicité induite sont fréquents.

De plus, la zone exploitée se refroidit progressivement et, du fait d'un flux thermique très faible, la roche ne se réchauffe pas assez rapidement pour envisager une production électrique pérenne.

La production d'électricité par géothermie sur le long terme devrait connaître une croissance faible dans le monde mais significative dans les régions géodynamiques actives : Amérique Centrale, Asie du Sud Est, Afrique de l'Est, et îles océaniques. La puissance électrique installée dans le monde a atteint 8 GW à la fin du XXe siècle.

Au total, une vingtaine de pays dans le monde produisent de l'électricité géothermique, pour une puissance électrique d'environ 11 GW. Celle-ci joue un rôle essentiel dans certains pays comme les Philippines, où elle représente 17 % de l'électricité produite ou l'Islande (30 %).

On prévoit pour 2030 un quasi doublement de la puissance mondiale installée.

5. COÛTS

L'ADEME a évalué dans son rapport 2017 [Voir Réf. ADEME] le coût de production de la géothermie. Pour la France, le coût de production de la filière géothermique profonde est estimé entre **66 €/MWh** et **120 €/MWh**. Cette plage de variation s'explique notamment par le coût d'investissement dépendant de l'accès à la ressource du productible et du coût du réseau de chaleur associé ainsi que du taux d'actualisation¹. Le coût des forages est quant à lui fortement dépendant de l'activité pétrolière (disponibilité des machines de forage et des services associés).

Ces coûts de production sont à comparer avec ceux des autres sources d'énergie indiqués dans la [fiche argumentaire "Coût de production de l'électricité en France"](#) ainsi que ceux fournis dans le rapport ADEME cité en référence.

6. RÉFÉRENCES

<http://www.brgm.fr/activites/geothermie/differents-types-geothermie>

<http://www.energiealternative.fr/geothermie.html>

<http://www.ecosociosystemes.fr/geothermie.html>

<http://www.energie-geothermique.info/>

http://sigesrm.brgm.fr/IMG/pdf/georama_12.pdf

<http://www.mtaterre.fr>

<http://www.planete-energies.com/fr>

ADEME – Coût des énergies renouvelables en France-édition 2017. <https://presse.ademe.fr> > uploads > 2017

¹ Le taux d'actualisation est le coût d'opportunité du capital investi, c'est-à-dire le rendement qu'il serait possible d'obtenir en investissant ailleurs le même capital. Ce taux intègre une prime de risque liée au projet, qui traduit sa probabilité d'échec. À priori le risque est différent selon les filières, notamment du fait de leur maturité, et le taux d'actualisation devrait donc être différent selon les filières.