

## L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

### 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. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre.

L'énergie géothermique proprement dite 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'exprimant généralement en dizaines ou centaines (voire milliers) de mètres.

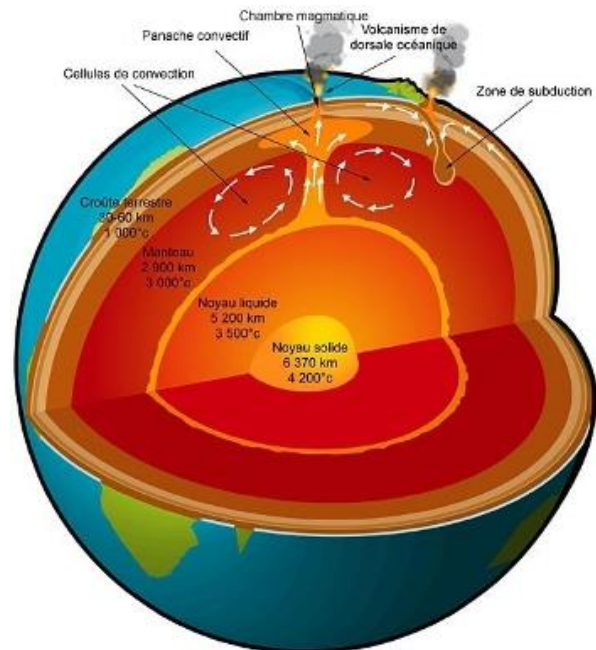
L'énergie géothermique « de surface » est, quant à elle, issue de la chaleur accumulée dans les premiers mètres du sous-sol suite à son réchauffement par l'énergie du soleil.

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.

A 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 décarbonée, a peu d'impact sur l'environnement et ses réserves sont très importantes.



La Chaleur de la Terre  
Illustration : ADEME - BRGM

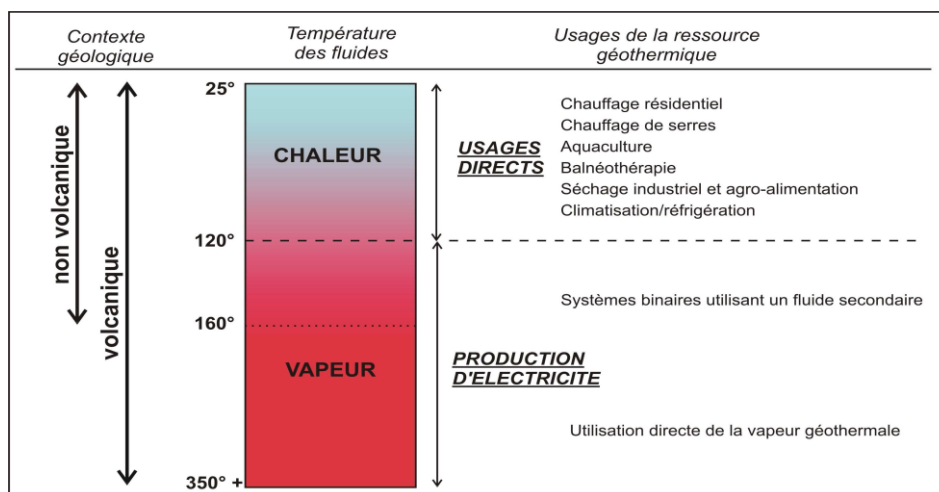
### 2. TYPES ET MODES D'EXPLOITATION DES RESSOURCES GÉOTHERMIQUES

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 jusqu'à 10°C/100 m en Alsace. Les roches ou nappes peuvent atteindre 150°C à quelques milliers de mètres de profondeur.

La chaleur peut atteindre 1000°C /100 m dans les zones volcaniques et les zones de rift (Islande, Nouvelle Zélande) !

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 :



## 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).

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 récupérées par ces capteurs sont récupérées dans une pompe à chaleur (PAC) qui fournit de l'eau chaude selon un besoin de chauffage.

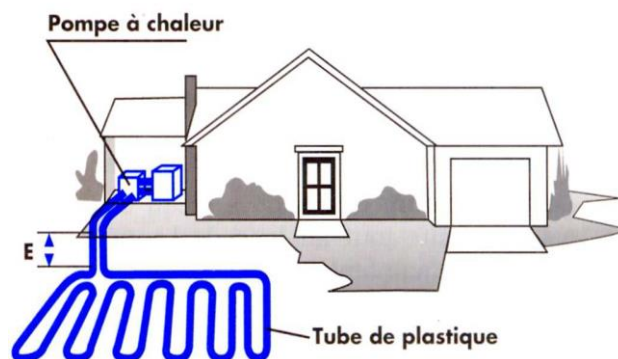
Le fonctionnement peut être réversible, c'est-à-dire que l'on peut injecter des calories dans le sol pour climatiser (refroidir) un logement.

Les PAC ont l'avantage de fournir environ trois fois plus d'énergie qu'ils n'en demandent pour fonctionner (chauffage de 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 (retour à la normale) annuelle.

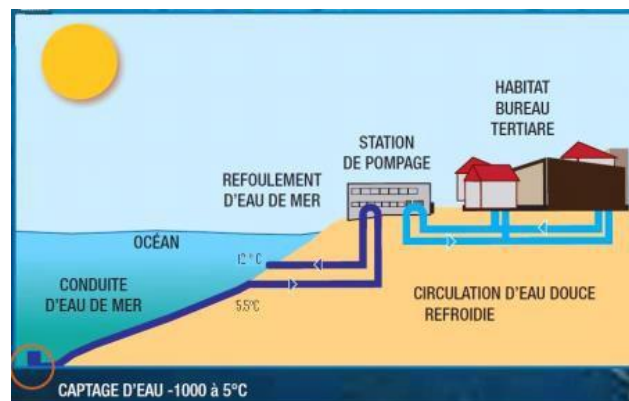
Cette technique a un certain succès puisqu'en 10 ans la vente de ces systèmes est passée de 30 000 à plus de 140 000 unités en Europe.



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**.

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.



Le projet Thassalia de Cofely à Marseille vise pour 2020 de produire plus de 15 MW d'eau chaude ou froide qui alimenteront 500 000 m<sup>2</sup> de bâtiment pour le chauffage et la climatisation.

Un autre projet est actuellement lancé sur l'île de la Réunion pour climatiser les bâtiments publics des communes de St-Denis et de Ste-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.

On effectue alors des prélèvements compris entre quelques centaines de mètres jusqu'à plus de 2000 m.

A ces profondeurs, la nature géologiques 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 le pouvoir corrosif de l'eau), sa température et sa transmissivité (débit exploitable).

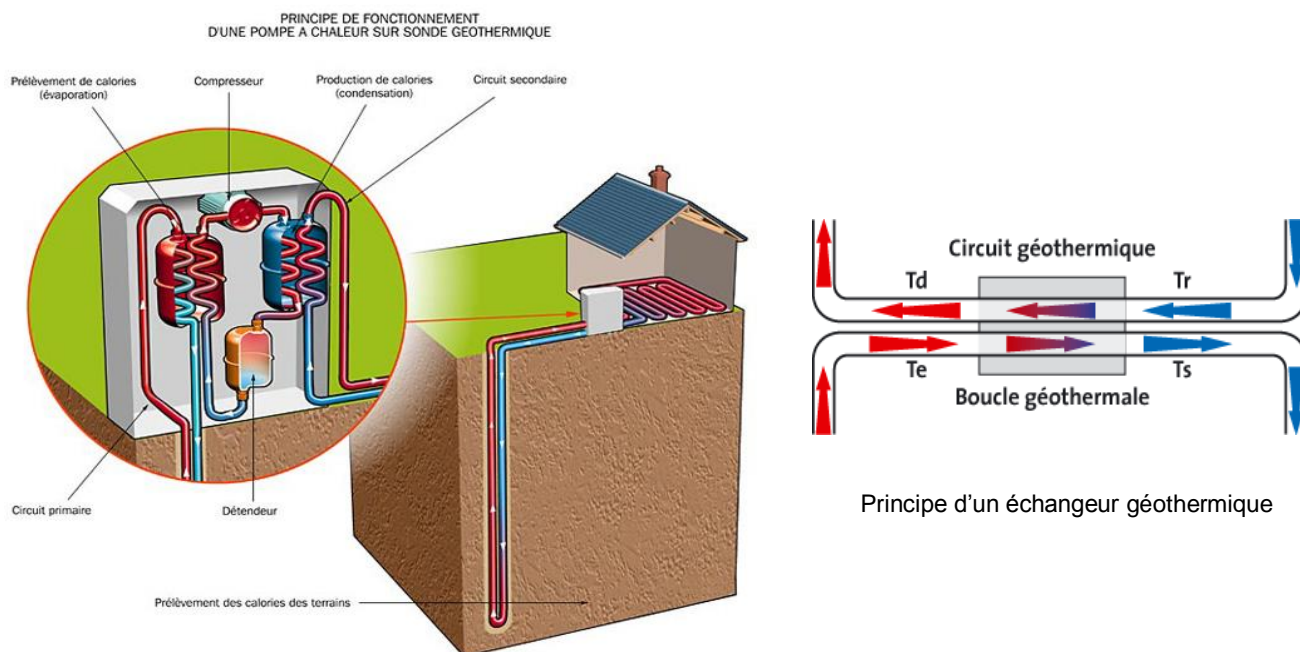
Les eaux sont souvent très minéralisées (sels et sulfates) et peuvent être à l'origine de corrosion dans les circuits de distribution.

Les équipements comportent des pompes de relevage puissantes et à fort débit associées à des échangeurs géothermique en matériau anti corrosion comme le titane si l'eau des nappes est très corrosive.

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.



### 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 situé 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.

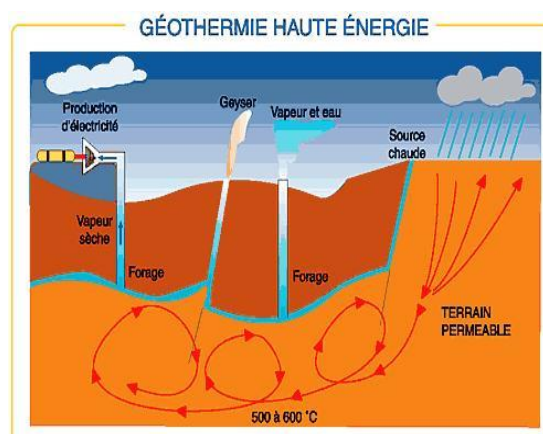
Les centrales utilisent de l'eau maintenue sous pression (pour éviter qu'elle n'entre en ébullition) qui circule au sein d'un échangeur de chaleur. En se chauffant au contact des tuyaux pleins d'eau, un liquide caloporteur entre en ébullition et se vaporise. Le gaz ainsi obtenu fait tourner un turbo-alternateur 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 1 500 et 3 000 mètres de profondeur.

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



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.

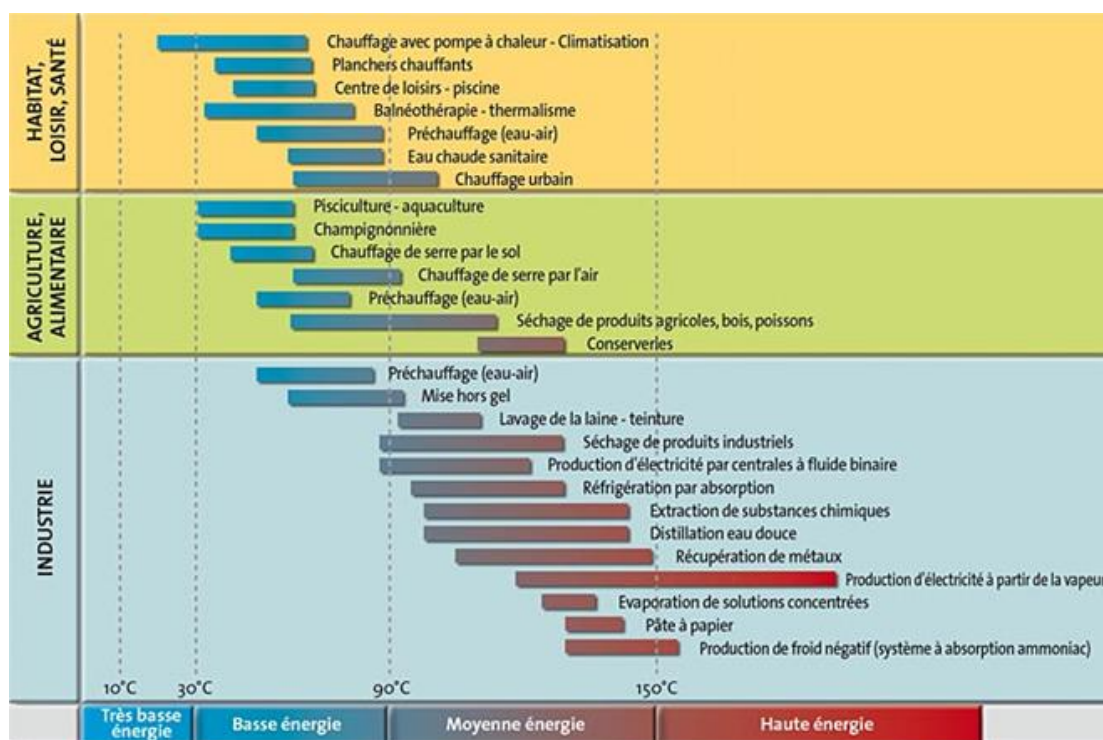
Ce principe permet de faire de la cogénération c'est-à-dire de la production conjointe d'électricité et de chaleur, issue de la récupération des condensats de la vapeur.

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 puit.

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 puit 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 une puissance de 1,5 MW.

Les faibles flux thermiques permis (60 mW/m<sup>2</sup>) 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.



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

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<sup>e</sup> 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.

Parmi les premiers usages industriels de la géothermie, on peut citer l'extraction du sel durant le 18<sup>e</sup> siècle en Islande. Mais son application à une échelle vraiment industrielle date du 19<sup>e</sup> siècle grâce à une meilleure connaissance du sous-sol, des techniques de forage et des systèmes d'exploitation de l'énergie.

Toutefois, la production d'électricité géothermique n'est devenue significative qu'à partir des années 1970, dans un contexte de crises pétrolières et d'un souci d'indépendance énergétique des pays en voie de développement.

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.

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. Ce dernier 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 2 000 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.

### Principaux pays producteurs d'électricité géothermique (2012) (Source : EurObserv'ER, 2013)

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 %

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.

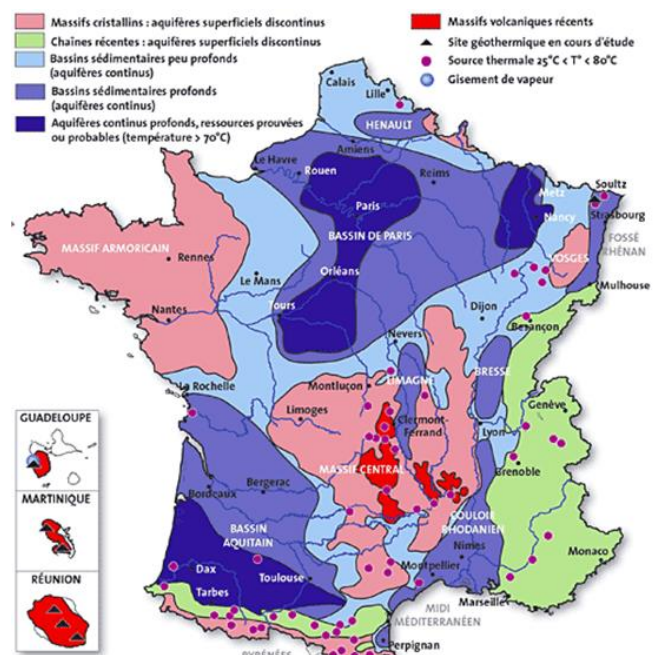
La France métropolitaine était en 2008 le troisième pays européen utilisateur de géothermie à fins d'usages directs.

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.

Des travaux d'exploration montrent la possibilité d'atteindre une puissance 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, a contrario des énergies renouvelables classiques dans les zones à activité volcanique importante.

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

Elle n'est pas productrice de CO<sub>2</sub> 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 existent.

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.

Au total, une vingtaine de pays dans le monde produisent de l'électricité géothermique, pour une puissance électrique d'environ 11 000 MW. 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 2020 un quasi doublement de la puissance mondiale installée.

#### 5. 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/les-quatre-types.html>

[http://sigesrm.brgm.fr/IMG/pdf/georama\\_12.pdf](http://sigesrm.brgm.fr/IMG/pdf/georama_12.pdf)

<http://www.mtaterre.fr>

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