Chapitre 5 : LA GÉOTHERMIE

Sur Terre, deux sources d'énergies peuvent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine : l'énergie solaire et l'énergie géothermique.
L'énergie solaire est à l'origine des vents (énergie éoliennes), des courants marins (hydroliennes) et du cycle de l'eau (barrages hydrauliques). Elle est aussi est à la base des chaînes alimentaires par l'intermédiaire des végétaux et donc à l'origine des combustibles fossiles dont la production est extrêmement lente (millions d'années).

A l'inverse l'énergie thermique de la Terre contribue peu aux températures de surface. Néanmoins, elle est étroitement associée au mouvement du manteau et constitue le moteur de la tectonique des plaques. (première S)

1- Gradients et flux géothermiques

De nombreuses manifestations à la surface du globe attestent que la température de la Terre croît avec la profondeur :

- comme les geysers (projection d'eau chauffée à plus de 100°C),
- les sources hydrothermales (source de Chaudes-Aigues : 82°C),
- les éruptions volcaniques (température de la lave jusqu'à 1200°C)
- ou tout simplement les mines d'exploitation,

Le géotherme terrestre et ses points d'ancrage

Les points d'ancrage du géotherme

1- 100 à 150 km = changement de rigidité de la péridotite à 1300 °C

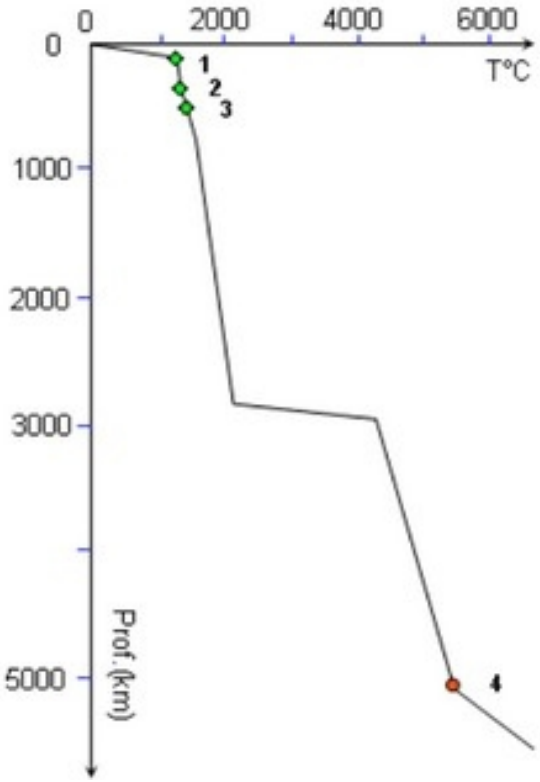
2- 410 km = saut de vitesse des ondes sismiques = transition olivine-spinelle à 1400 °C

3- 670 km = saut de vitesses des ondes sismiques = transition spinelle-perovskite à 1600 °C

4- 5150 km = cristallisation du fer à 4800 °C

Les gradients géothermiques

Manteau : 0,3 °C/km
Noyau externe : 0,55 °C/km

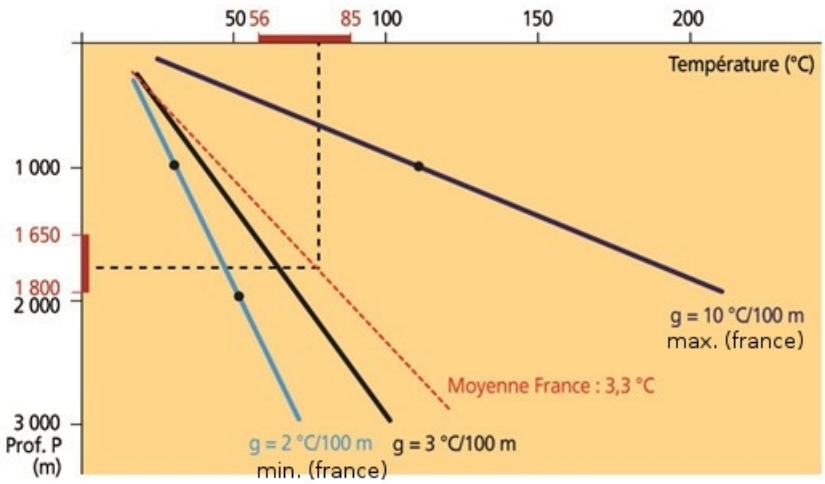


(doc. 1B p. 230)

géotherme : c'est la courbe qui représente les températures des roches à différentes profondeurs.

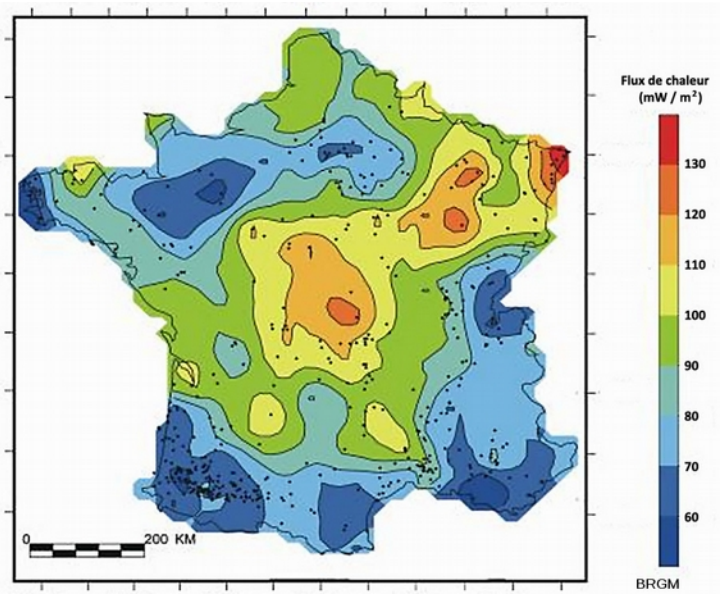
Gradient géothermique : c'est la variation de températures en fonction de la profondeur. En moyenne, la température augmente de 3°C tous les 100 mètres dans la croûte continentale mais la valeur du gradient géothermique varie beaucoup en fonction des zones terrestres :

Il est plus faible dans l'asthénosphère, le manteau inférieur et le noyau supérieur
Il est fort dans la lithosphère, la couche limite entre manteau et noyau ainsi que dans le noyau interne.

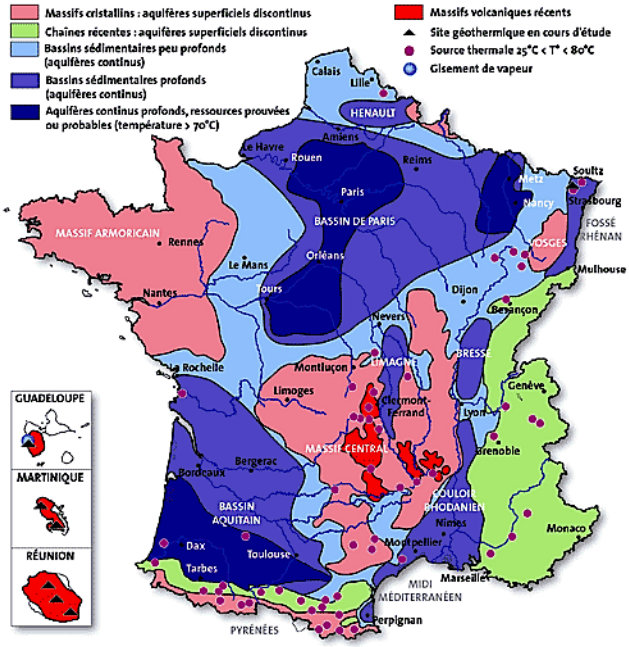


Variation du géotherme français

Le géotherme varie aussi latéralement selon l'épaisseur de la lithosphère ou l'activité tectoniques des zones considérées : En France, il varie de 100 °C/km dans le nord de l'Alsace à seulement 20°C/km au pied des Pyrénées.



Carte flux géothermique français (doc 1b p.225)



Carte du contexte géologique français

Voir Doc 1 p.227 : carte du flux géothermique mondial

Le **flux géothermique** est la quantité d'énergie thermique dissipée par la surface terrestre. Il dépend du gradient géothermique mais aussi de la conductivité thermique des roches.

Sa valeur moyenne est de **65 Mw.m-²** mais il est très variable selon le contexte géodynamique :

- faible sur les continents (30 km d'épaisseur de croûte)
- modéré dans les océans (6 à 8 km de croûte) mais aussi dans des bassins sédimentaires à faible épaisseur de croûte
- élevé dans les zones volcaniques : dorsales, arcs volcaniques de subduction, points chauds ...

Globalement, le flux géothermique est plus important au niveau des océans, essentiellement au niveau des dorsales océaniques et en particulier lié à l'hydrothermalisme qui y est associé.

2- L'origine de la chaleur interne de la Terre

La chaleur de la Terre provient essentiellement de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches notamment l'uranium 235 et 238, le thorium 232 et le potassium 40. Les noyaux de ces atomes sont capables de se fragmenter spontanément (fission nucléaire). Cette **désintégration** produit un rayonnement et de l'énergie thermique.

Doc1a p.226 : quantité d'éléments des différentes enveloppes
Doc 1c p.227 : contribution des différentes enveloppes

De part son volume, Le manteau libère l'essentiel de l'énergie radioactive. Ces désintégrations ont commencé à la formation de la planète mais c'est un processus très lent et il reste donc encore beaucoup d'isotopes radioactifs non désintégrés dans le globe.
Exemple : La période radioactive (demi-vie) de l'uranium 238 est de 4,5 milliards d'années : la moitié s'est désintégrée seulement depuis la naissance de la Terre.

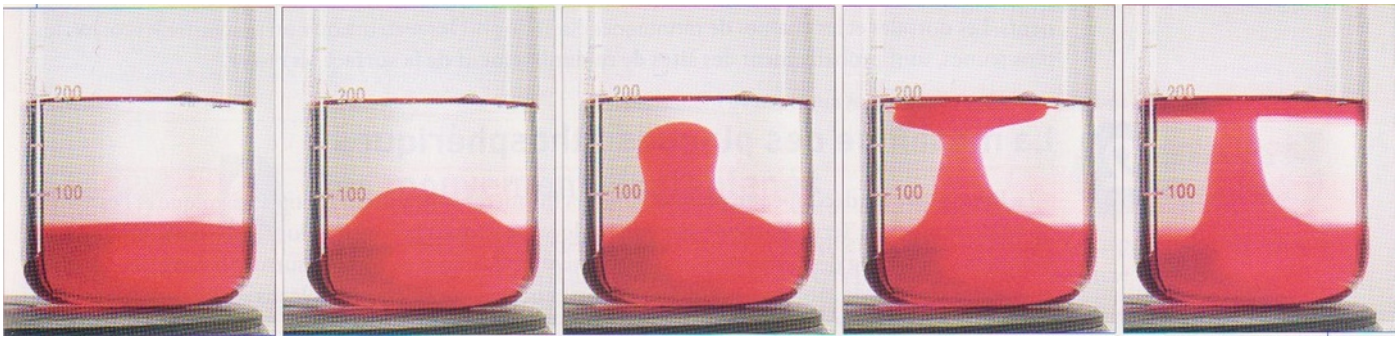
La chaleur primitive issue de l'accrétion terrestre ainsi que la solidification du noyau externe participe également à l'énergie thermique que la Terre évacue

3- le transfert d'énergie thermique dans le globe

Le transfert de la chaleur de la profondeur vers la surface de la Terre se produit principalement par deux mécanismes : la conduction et la convection.

8 doc. 2 p228
La réalisation d'une expérience provoquant des transfert de chaleur de type conductif (chauffage de la couche superficielle de l'eau) montre un fort gradient de température entre les sondes haute et basse.
La réalisation d'une expérience provoquant des transfert de chaleur de type convectif (chauffage de la couche profonde de l'eau) montre un faible gradient de température entre les sondes haute et basse.
Les transfert de chaleur de type convectif sont plus efficaces que les transfert de type conductif.

La **conduction** est un transfert de chaleur de proche en proche, sans déplacement de matière. Ce mécanisme est à l'œuvre dans les enveloppes solides de la Terre (lithosphère, noyau interne) et entraîne un fort gradient géothermique. L'efficacité de la conduction dépend de la conductivité thermique des roches.

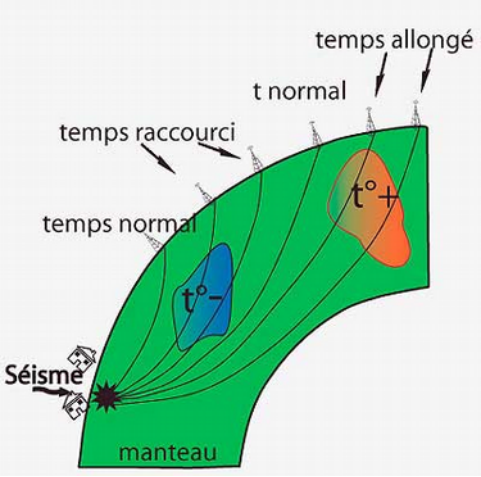


Mise en évidence d'une évacuation de chaleur par convection (source de chaleur en dessous)

La **convection** est un transfert de chaleur par déplacement de matière dont la température varie peu. La matière d'une zone chaude (moins dense) en bas s'élève vers une zone froide alors que la matière froide (plus dense) à tendance à descendre. Il se forme alors une **cellule de convection.**
Ce mode de transfert très efficace est à l'œuvre dans les enveloppes liquide et visqueuse de la Terre.

4- Vers un modèle global : La machine thermique terrestre

La tomographie sismique a permis de mettre en évidence des échanges de matière circulaires formant des cellules de convection à l'échelle de la planète.



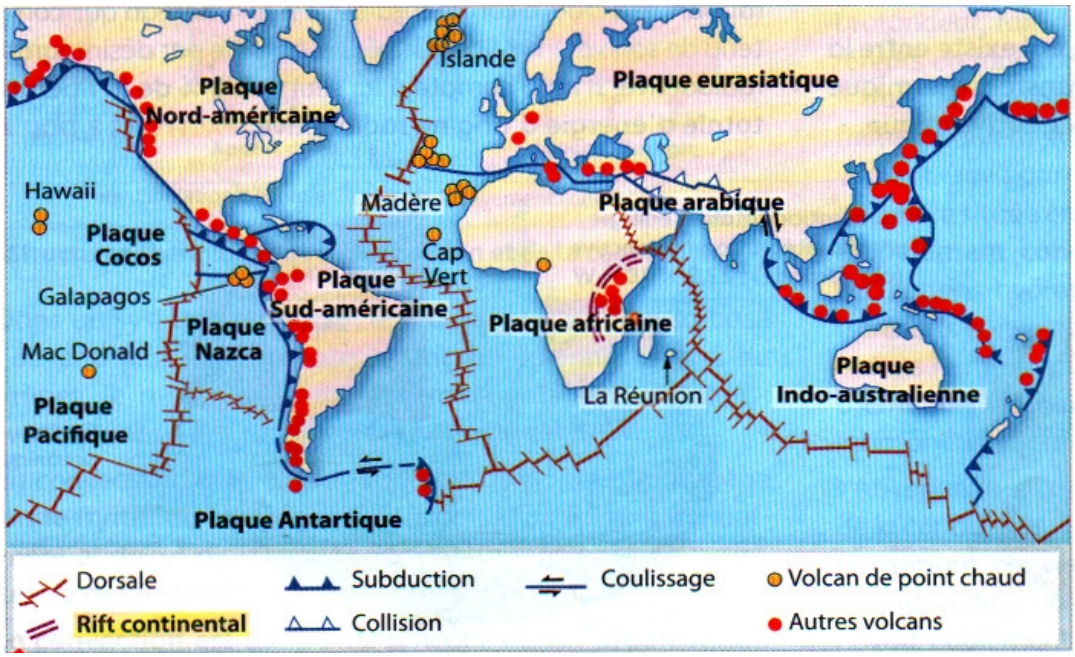
Principe de la tomographie sismique
L'étude des variations de vitesse de propagation des ondes sismiques selon les zones traversée avant d'être captée par des sismomètres permet de mettre en évidence les anomalies thermiques.

Voir doc. p. 231

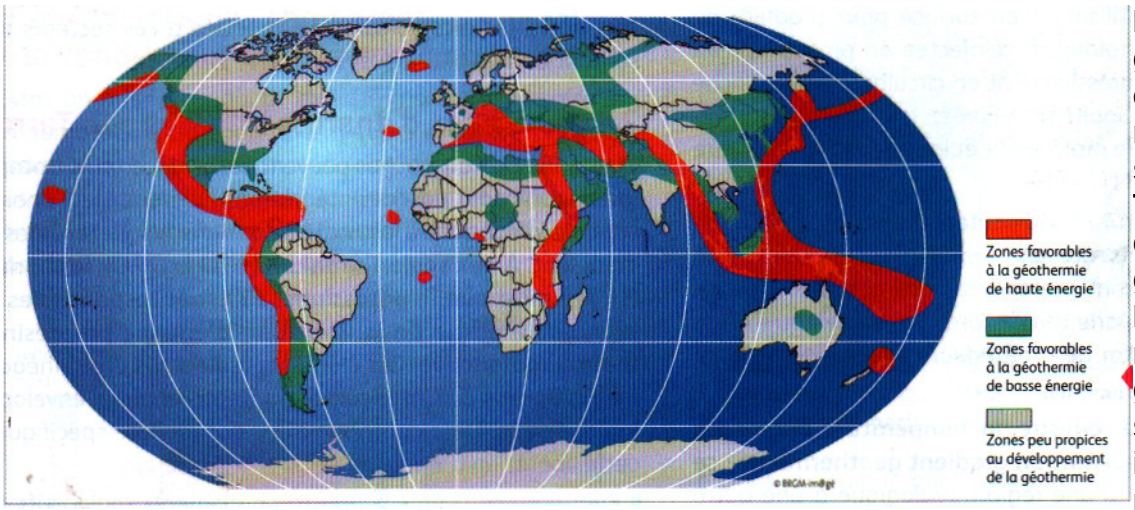
Les remontées et les descentes de matériel ne se font pas au même endroit et s'inscrivent dans le processus de tectonique des plaques :

- Du matériel chaud remonte au niveau des dorsales océaniques (flux géothermique important)
- Les points chauds dus à la remontée rapide vers la surface de matériel chaud et peu dense depuis la limite du manteau et du noyau. Ce matériel entre en fusion au niveau de la lithosphère et vient la perforer, formant des édifices volcaniques caractéristiques (trapps, alignements insulaires comme Hawaï.)
- Du matériel froid descend au niveau des zones de subduction (flux géothermique faible des fosses océaniques).

L'énergie interne est donc transférée par convection de la profondeur vers la surface. Au niveau de la lithosphère, la chaleur est évacuée par conduction tout comme à l'interface noyau/manteau.
Schéma bilan p. 237
L'évacuation de la chaleur de la Terre se fait par des mouvements de matières qui sont le moteur de la tectonique des plaques.



Répartition du volcanisme actuel dans les régions émergées de la Terre et frontières des plaques lithosphériques



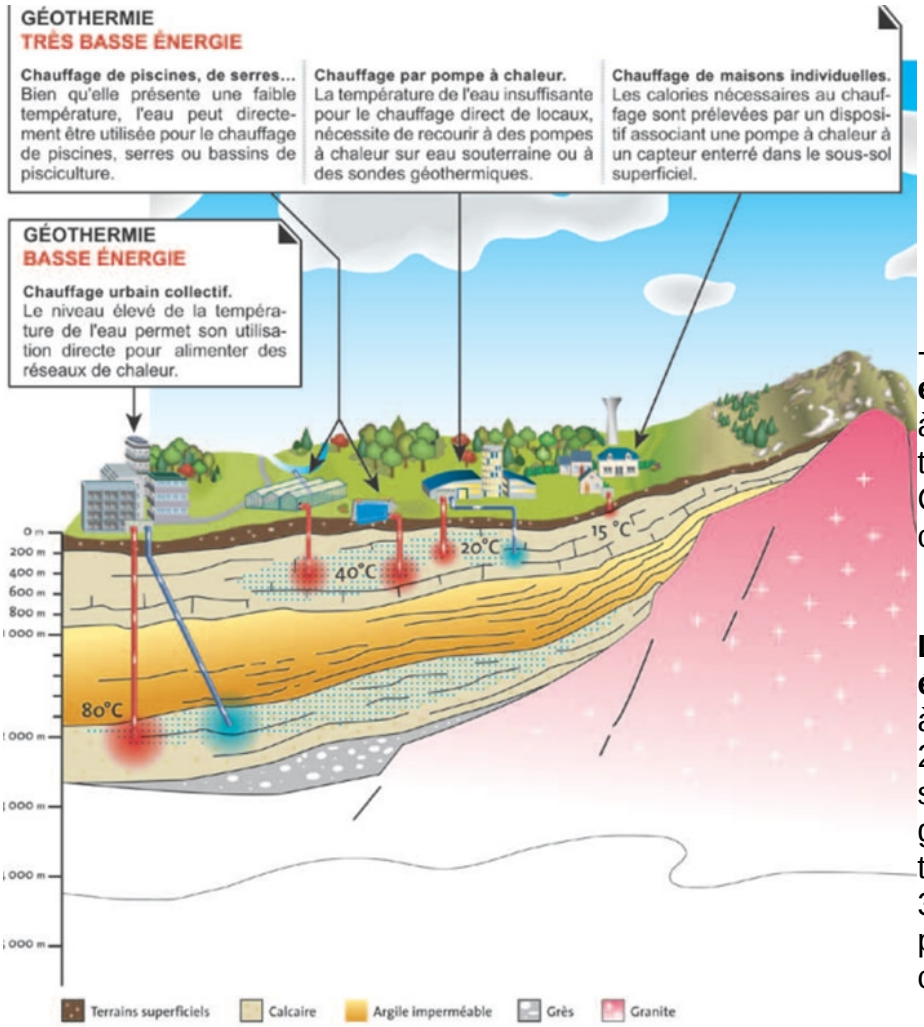
Le flux géothermique est inégalement réparti à la surface de la Terre selon le contexte géodynamique. Donc, les ressources géothermiques sont également inégalement réparties.

5- La géothermie

La géothermie consiste à utiliser la chaleur interne de la Terre pour produire de la chaleur et de l'électricité.

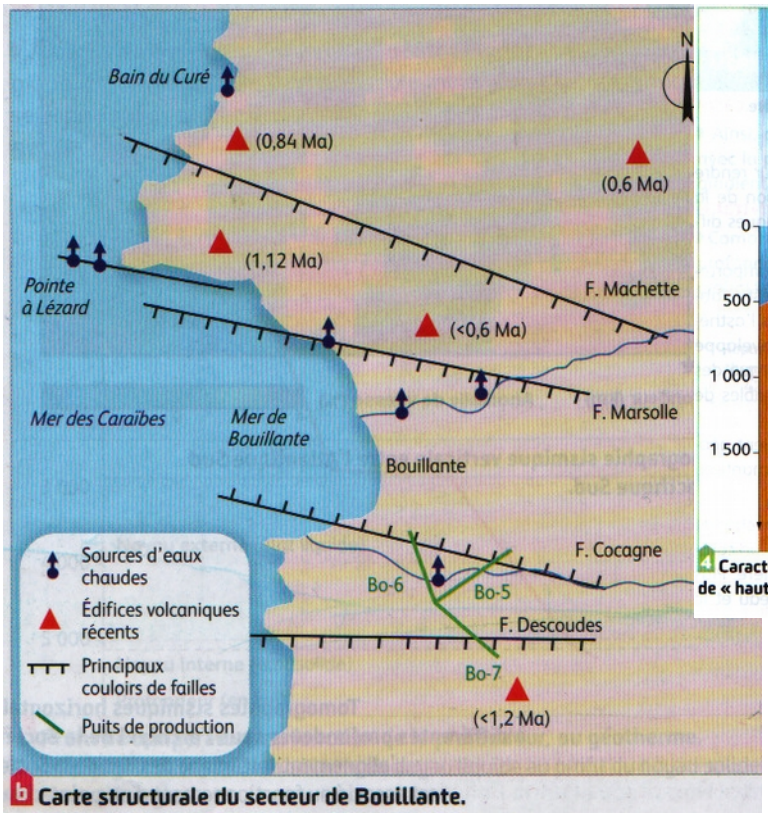
L'utilisation de la géothermie est fondée sur un principe simple : l'eau des aquifères (nappe d'eau souterraine) plus ou moins profonds se réchauffent du fait de l'existence d'un gradient géothermique particulier. On peut alors pomper l'eau et récupérer les kW accumulés. On peut alors réinjecter l'eau dans l'aquifère de façon à ce que la zone soit géologiquement stable et que l'aquifère soit toujours alimenté.

Il existe différents classes d'installations géothermiques :

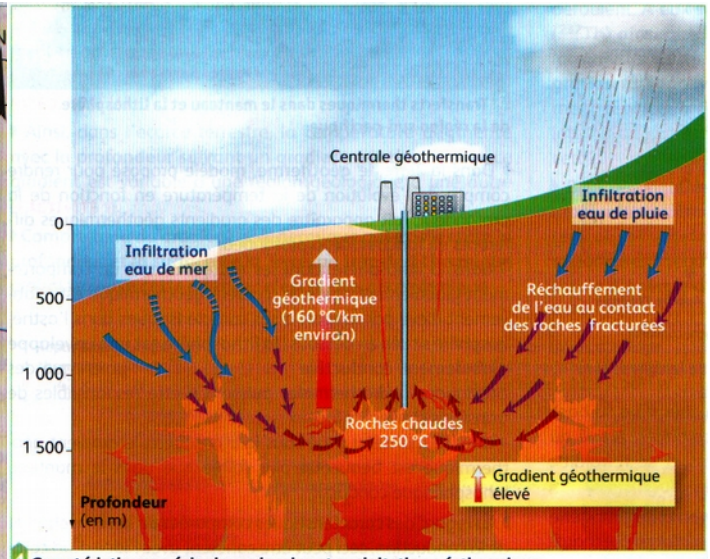


- **La géothermie de très basse énergie** qui exploite les aquifères à moins de 100m et d'une température inférieure à 30°C. Cette géothermie permet le chauffage individuel.

La géothermie de basse énergie qui exploite des nappes à une profondeur de 1500 à 2500m dans les bassins sédimentaires (gradient géothermique de 30°C/km) La température est comprise entre 30 et 90°C et l'utilisation est principalement destinée au chauffage collectif.



b Carte structurale du secteur de Bouillante.

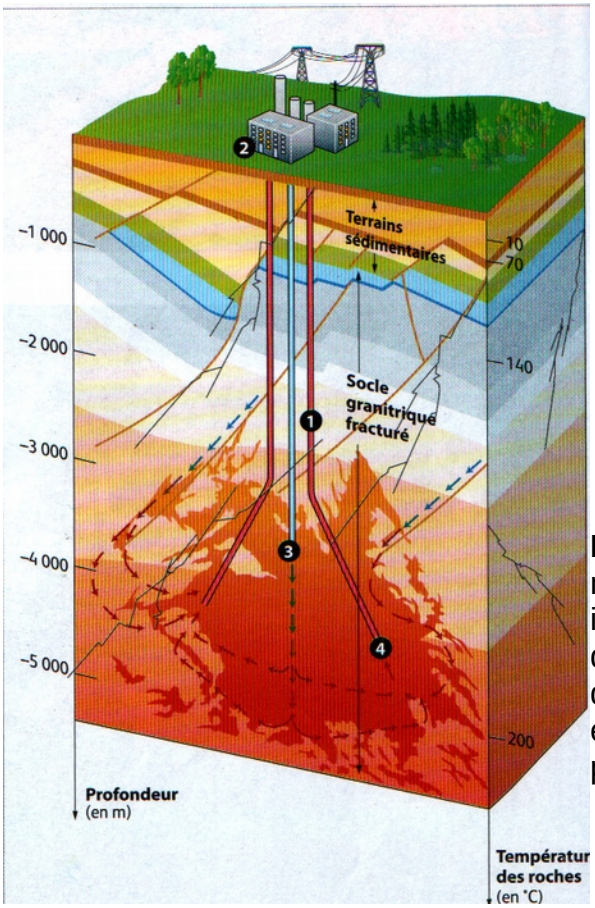


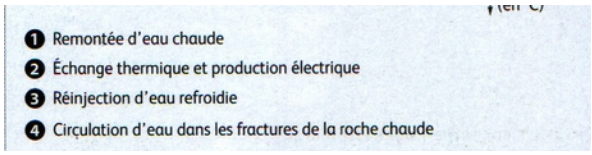
4 Caractéristiques géologiques locales et exploitation géothermique de « haute énergie » sur le site de Bouillante (Guadeloupe).

La géothermie haute énergie, qui exploite des aquifères dont la température, supérieure à 90°C, permet la production d'électricité :

- soit à très grande profondeur (2000 à 4000m) dans des bassins sédimentaires.
- soit situés dans les régions à fort gradient géothermique : zones de volcanisme de subduction ou de points chauds, zones de rifting, ... (température supérieure à 150°C)

NB : On sépare parfois cette classe en 2 : géothermie de moyenne température (entre 90 et 150°C) et géothermie de haute énergie (supérieure à 150°C).





La géothermie profonde des roches sèches nécessite la création d'un gisement géothermique par injection d'eau à grande profondeur (3000 à 5000m) dans des zones à fort gradient géothermique. L'eau d'une température de 200°C est remontée en surface, elle se vaporise (diminution de pression) et permet la production d'électricité.

En France, on dénombre seulement 65 installations dédiées au chauffage urbain réalisées pour l'essentiel dans les années 1980. Elles assurent la couverture des besoins d'environ 200 000 équivalent-logements.
La France possède un bon potentiel géothermique dans certaines régions, notamment les bassins sédimentaires (bassin parisien, bassin aquitain), le fossé rhénan (rifting interrompu où la profondeur du Moho est particulièrement faible) et le massif central (zone volcanique de type point chaud) mais il est encore très largement sous-exploité.

Dans le monde, on compte 350 centrales géothermiques produisant de l'électricité, mais leur répartition est très hétérogène car seules les régions possédant un gradient géothermique élevé peuvent produire de l'électricité par géothermie. Cette production est de l'ordre de 50GW (Giga Watts), ce qui ne représente que 1% de la consommation énergétique mondiale.

L'énergie géothermique est une énergie renouvelable : le gradient géothermique de la Terre réchauffe en permanence les roches et l'eau qui s'y infiltre. Le prélèvement de cette énergie par l'Homme ne représente qu'une infime partie de l'énergie dissipée par la Terre et cette énergie est inépuisable à l'échelle humaine.