Géologie- L5 : Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

Introduction :

L'existence d'un **flux de chaleur d'origine interne** fait l'objet de nombreuses manifestations en surface (sources d'eaux chaudes, geysers, températures élevées dans les galeries des mines…..) et est connue depuis longtemps. Son hétérogénéité (et ses conséquences), elle, est appréhendée depuis peu de temps et semble constituer le principal moteur de la tectonique des plaques.

Quelles sont ses caractéristiques ?

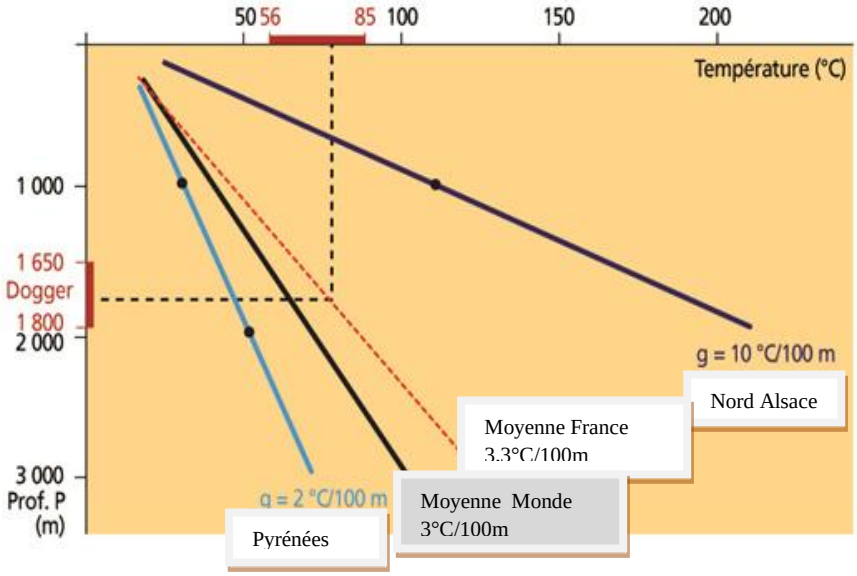
Quelle est son origine ?

Comment l'homme peut-il l'utiliser ?

I. Gradient et flux géothermique : conséquences d'une dissipation d'énergie interne.

A. Gradient géothermique ou « géotherme ».

- Définition: variation de la T en fonction de la profondeur.
- Quelques données françaises : des forages permettent de mesurer cette variation de la T en fonction de la profondeur : les données de mesures sont consignées dans le graphique suivant :

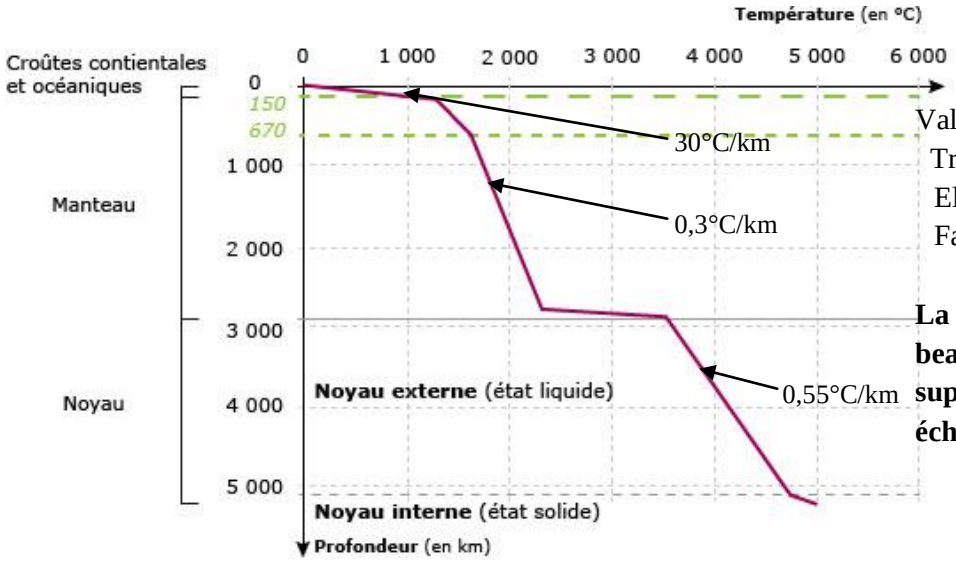


Valeurs du « géotherme » en France
- Très variable d'une région à l'autre

Elevée en Alsace

Très faible au pied des Pyrénées
- Valeur moyenne du géotherme français proche de la valeur du géotherme moyen mondial.

- Géotherme moyen et structure du globe :



Valeurs du « géotherme » en profondeur

Très variable d'une enveloppe à l'autre

Elevée au niveau lithosphérique

Faible au niveau mantellique et nucléaire

La température des enveloppes internes est beaucoup plus élevée que celle des enveloppes superficielles : il doit donc exister des échanges thermiques entre elles.

Les valeurs de ce gradient géothermique vont être en partie responsables des valeurs du flux géothermique.

B. Le flux géothermique.

- Définition : Quantité de chaleur provenant des enveloppes profondes du globe et traversant une unité de surface en un temps donné. S'exprime en W/m^2 et permet d'évaluer le transfert de chaleur vers la surface de la Terre. Il dépend de 2 facteurs :
  - Le géotherme (en K/m)
  - La conductivité des matériaux traversés (en W/m/K)

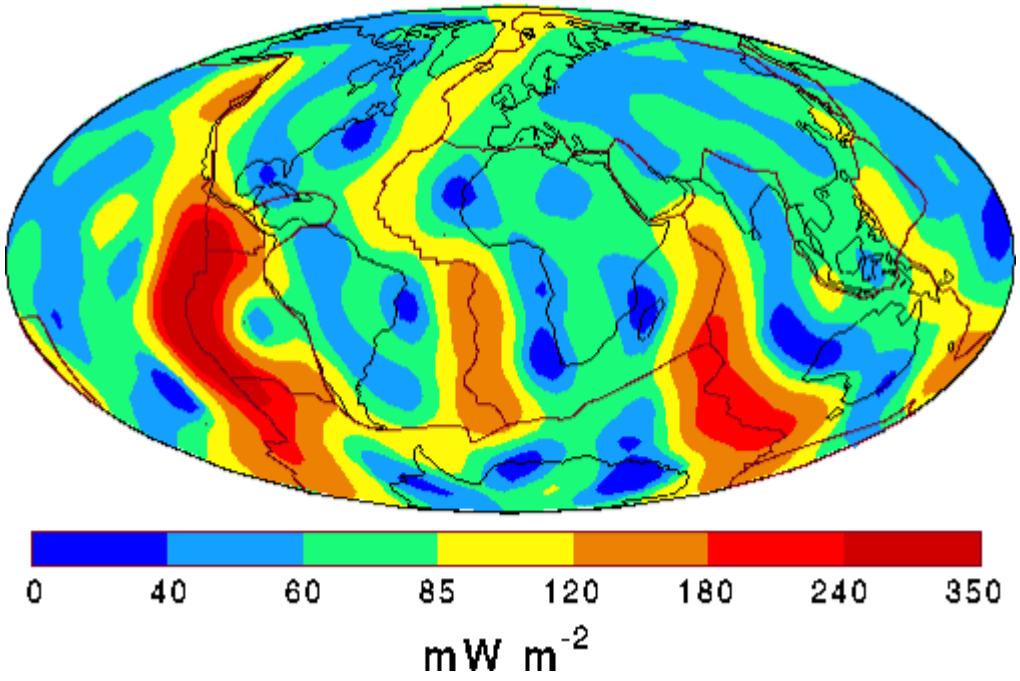
Avec flux géothermique = Géotherme x conductivité thermique

Type de matériau	Conductivité thermique (W/m/K)
Basalte/granite	1,7 à 2,5 / 2,5 à 3,8
Péridotite	4,2 à 5,8
calcaire	1,7 à 3,3
Argent	420
Eau	6

Les roches, à la différence des métaux, sont de mauvais conducteurs thermiques (ou des isolants relativement efficaces): elles freinent donc les transferts d'énergie interne et permettent ainsi une forme de stockage de chaleur à l'intérieur du globe. **La Terre perd donc sa chaleur très lentement.**

Le flux géothermique terrestre moyen est de l'ordre de 87 mW/m^2 mais est très inégalement réparti.

- Répartition du flux géothermique et contexte tectonique :



Dans le domaine océanique : **valeur moyenne 100 mW/m^2**

On observe des **anomalies positives** très importantes au niveau des *dorsales*, des *arcs volcaniques* des zones de subduction et des *points chauds*. Les marges passives expriment un flux plutôt faible voire des anomalies négatives.

Dans le domaine continental : **valeur moyenne 65 mW/m^2**

On observe plutôt des **anomalies négatives**.

La Terre perd donc sa chaleur principalement au niveau des océans.

RQ : En France, la situation géothermique est très contrastée.

II. Origine du flux géothermique.

A. Désintégration des éléments radioactifs terrestres.

- C'est la désintégration naturelle des isotopes radioactifs de certains éléments présents dans les enveloppes du globe qui génère de la chaleur (en plus de générer de la radioactivité). Ce sont principalement l'^{238}U, le ^{232}Th et le ^{40}K.
-

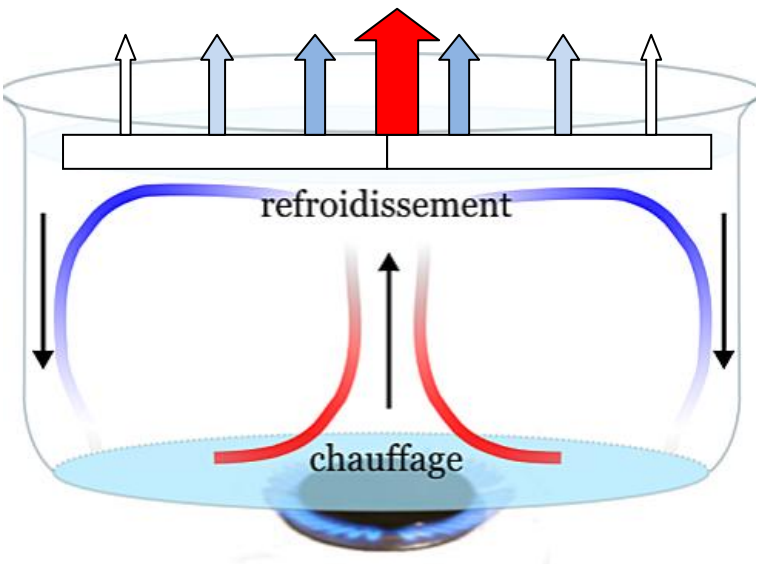
Site	Volume en km3	Radioactivité volumique ($cal.s^{-1}.km^3$)	Energie produite ($cal.s^{-1}$)	Bilan
Croûte continentale	7.10^9	165	$115,5.10^{10}$	$149,2.10^{10}$
Croûte océanique	2.10^9	16	$3,2.10^{10}$	
Manteau supérieur	31.10^{10}	1	31.10^{10}	
Manteau inférieur	59.10^{10}	4,2	$247,8.10^{10}$	$332,8.10^{10}$
Noyau	17.10^{10}	5	85.10^{10}	

Ce sont les croutes qui contiennent le plus d'éléments radioactifs mais par leurs masses respectives, c'est le noyau et le manteau qui produisent l'essentiel de la chaleur interne.
Une fois produite, la chaleur est transférée au sein des enveloppes terrestres vers la surface (froide).

B. Mécanismes de transfert de chaleur.

L'énergie thermique produite se transfère par 2 types de processus :

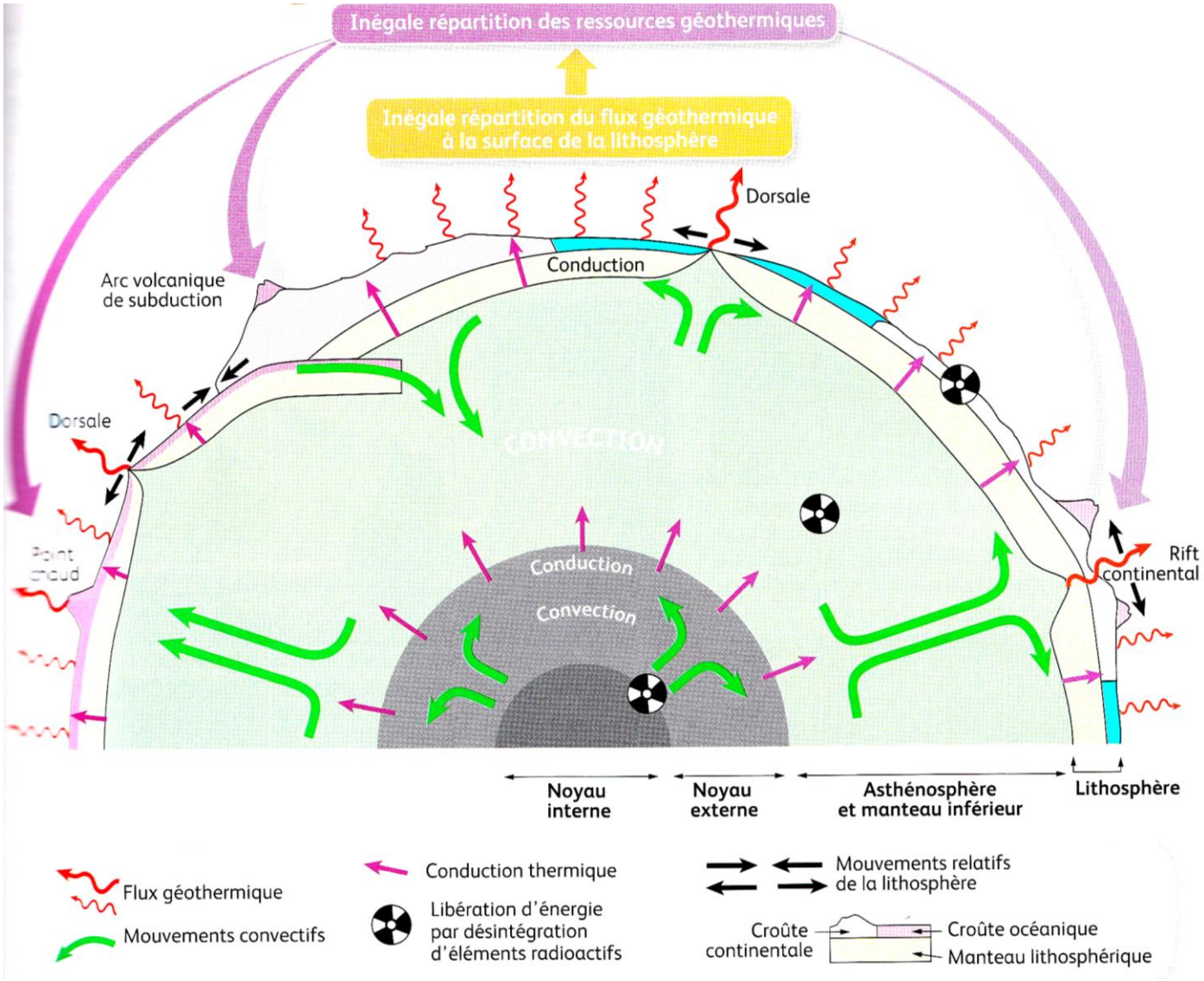
- **La conduction** : elle correspond à un transfert de chaleur de particule à particule sans déplacement de matière. C'est un processus peu efficace car qui dépend de la conductivité thermique des matériaux traversés.
- **La convection** : elle correspond à un transfert de chaleur avec déplacement de matière (qui conserve alors une grande partie de sa chaleur). Elle se met en place quand un matériau chaud et peu dense est surmonté d'un matériau plus froid et plus dense (configuration du manteau). Le matériau chaud a tendance à remonter et à se refroidir alors que le matériau froid a tendance à plonger et à se réchauffer. Ces deux mouvements antagonistes provoquent la **formation de cellules de convection**.



Ce modèle explique deux faits importants :

- **L'inégale répartition du flux géothermique en surface** : au niveau des dorsales, la perte de chaleur est très importante car liée à une remontée convective mantellique.
- **La mise en place de mouvements horizontaux et verticaux au sein du manteau**: la convection s'accompagnant d'un déplacement de matière, elle génère donc aussi un déplacement mécanique de la matière.

On peut donc représenter la Terre comme une machine thermique dont la modélisation est représentée ci-après.


Inégale répartition des ressources géothermiques
Inégale répartition du flux géothermique à la surface de la lithosphère
Dorsale
Conduction
Arc volcanique de subduction
Dorsale
CONVECTION
Point chaud
Conduction
Convection
Rift continental
Noyau interne
Noyau externe
Asthénosphère et manteau inférieur
Lithosphère
Flux géothermique
Mouvements convectifs
Conduction thermique
Libération d'énergie par désintégration d'éléments radioactifs
Mouvements relatifs de la lithosphère
Croûte continentale
Croûte océanique
Manteau lithosphérique

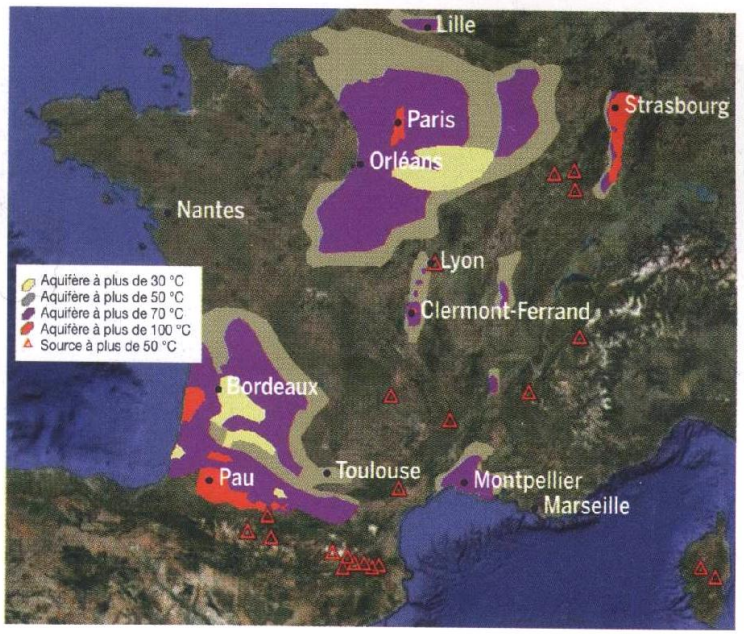
Bilan :

III. Utilisation de l'énergie géothermique par l'homme

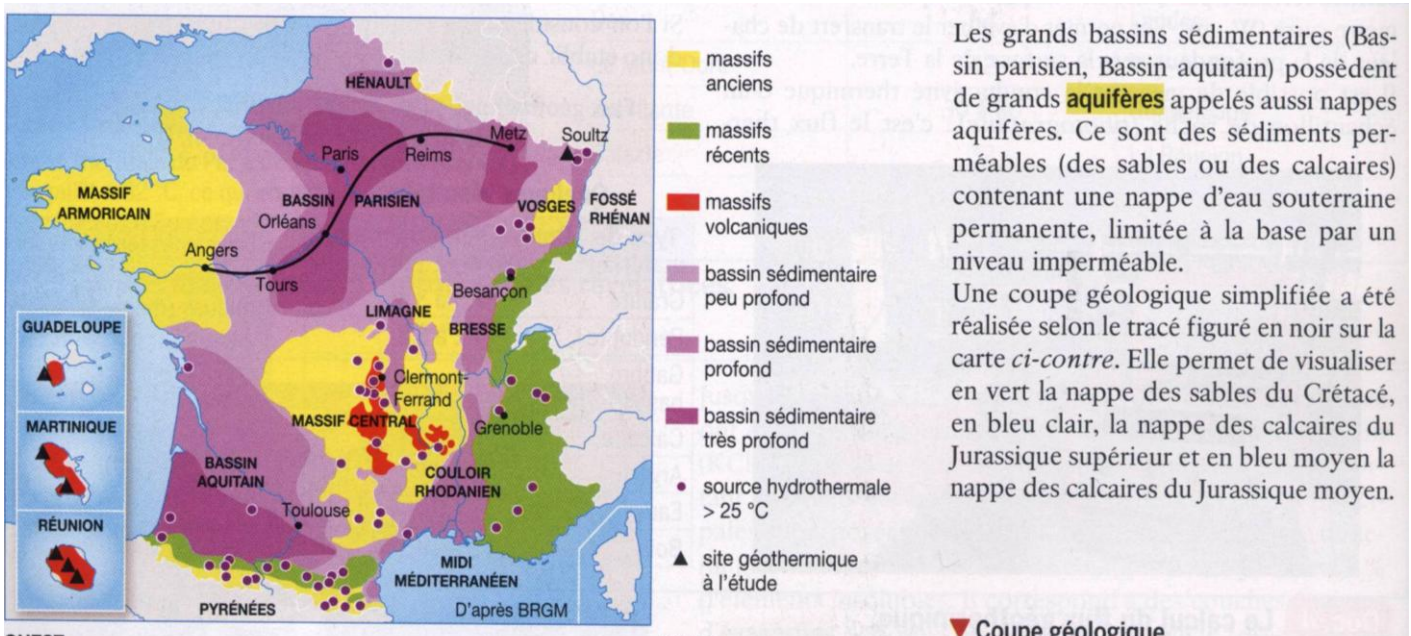
L'énergie géothermique peut être utilisée par l'homme avec deux objectifs principaux :

- La **production de chaleur pour le chauffage** par récupération de l'énergie thermique à faible profondeur dans le sous-sol : on parle de **géothermie « basse énergie »** (ou basse T). Cette technique pourra être mise en place dans des zones géographique où le flux géothermique est faible.
- La **production d'électricité** par récupération directe de fluides très chauds à grande profondeur : on parle de **géothermie « haute énergie »** (ou haute T). Cette technique pourra être mise en place dans des zones géographique où le flux géothermique est fort.

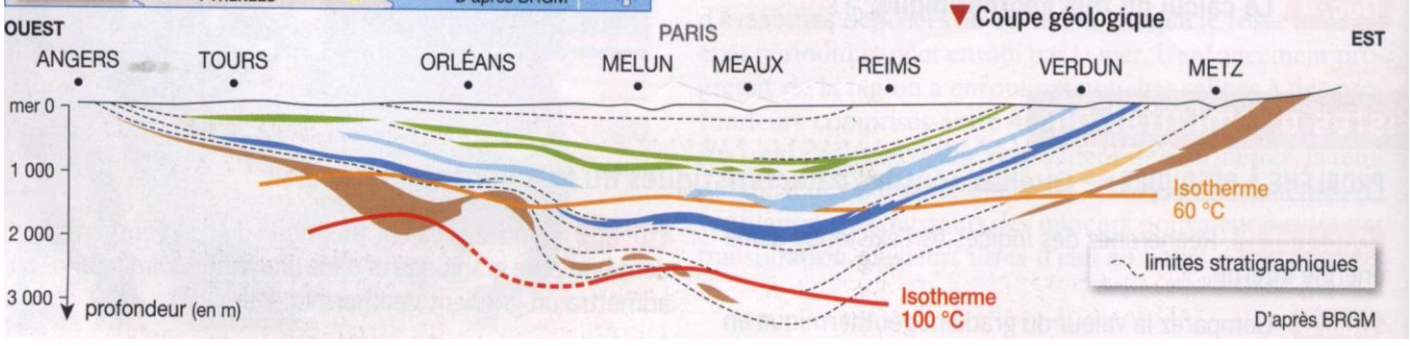
L'utilisation de la chaleur naturelle du sous-sol en tant que source d'énergie peut être de trois types :
– la **géothermie très basse énergie** qui exploite des aquifères peu profonds dont les eaux ont une température inférieure à 30 °C, ou qui utilise directement l'énergie thermique contenue dans les roches peu profondes du sous-sol (on utilise cette ressource pour le chauffage et la climatisation grâce à une pompe à chaleur) ;
– la **géothermie basse énergie** qui utilise des aquifères à des températures comprises entre 30 °C et 100 °C, la chaleur pouvant être directement utilisée pour le chauffage ;
– la **géothermie moyenne et haute énergie**, utilisant des fluides ou de la vapeur jusqu'à 250 °C, permet de produire de l'électricité par l'intermédiaire de turbines.



A. Géothermie basse énergie.

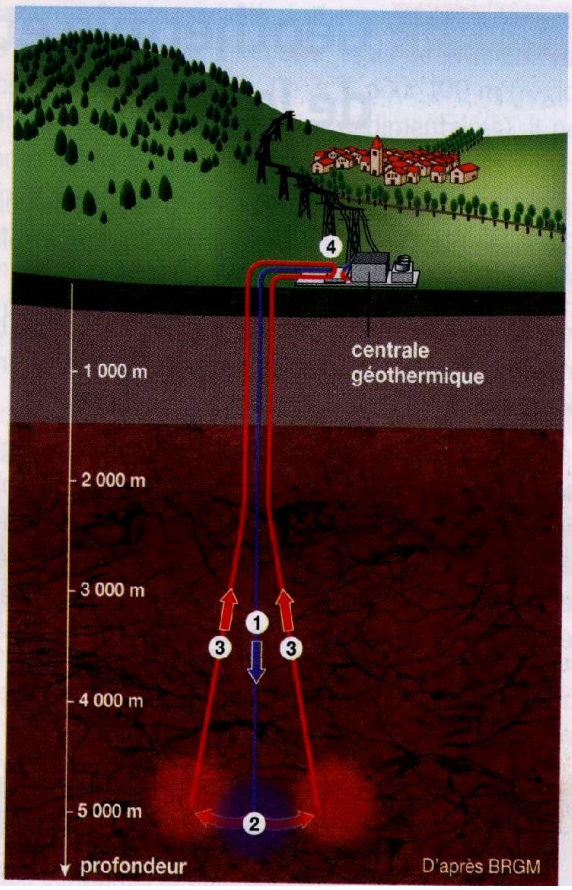


Les grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, Bassin aquitain) possèdent de grands **aquifères** appelés aussi nappes aquifères. Ce sont des sédiments perméables (des sables ou des calcaires) contenant une nappe d'eau souterraine permanente, limitée à la base par un niveau imperméable.
Une coupe géologique simplifiée a été réalisée selon le tracé figuré en noir sur la carte *ci-contre*. Elle permet de visualiser en vert la nappe des sables du Crétacé, en bleu clair, la nappe des calcaires du Jurassique supérieur et en bleu moyen la nappe des calcaires du Jurassique moyen.



B. Géothermie haute énergie.

Le Bassin rhénan est un fossé d'effondrement qui s'est rempli de dépôts au Tertiaire et au Quaternaire. Il présente le gradient géothermal le plus élevé de France métropolitaine : jusqu'à 10 °C par 100 mètres. À 5 km de profondeur, la température atteint 250 °C. Dans cette région, un programme de recherche a démarré en 1987 à Soultz-sous-Forêts, avec la perspective de pouvoir exploiter à terme l'énergie thermique des roches chaudes profondes (et non plus celle des aquifères).

Mais, en l'absence d'eau, cette énergie est difficile à capter. L'idée est donc venue de créer artificiellement des réservoirs géothermiques en profondeur, en fracturant les roches et en leur injectant de l'eau. Cette idée, inventée par les Américains dans les années 1970, correspond à ce que l'on appelle la «géothermie des roches chaudes fracturées». Le début de l'exploitation a commencé en 2008.

1. Injection d'eau froide à 5 000 m de profondeur par le puits central.
2. Circulation d'eau dans les fractures et réchauffement au contact de la roche chaude (200 °C).
3. Extraction de l'eau réchauffée du sous-sol par deux puits de production.
4. En surface, transformation par l'intermédiaire d'un échangeur thermique de l'eau chaude du circuit primaire en vapeur dans le circuit secondaire pour entraîner une turbine qui produit de l'électricité.