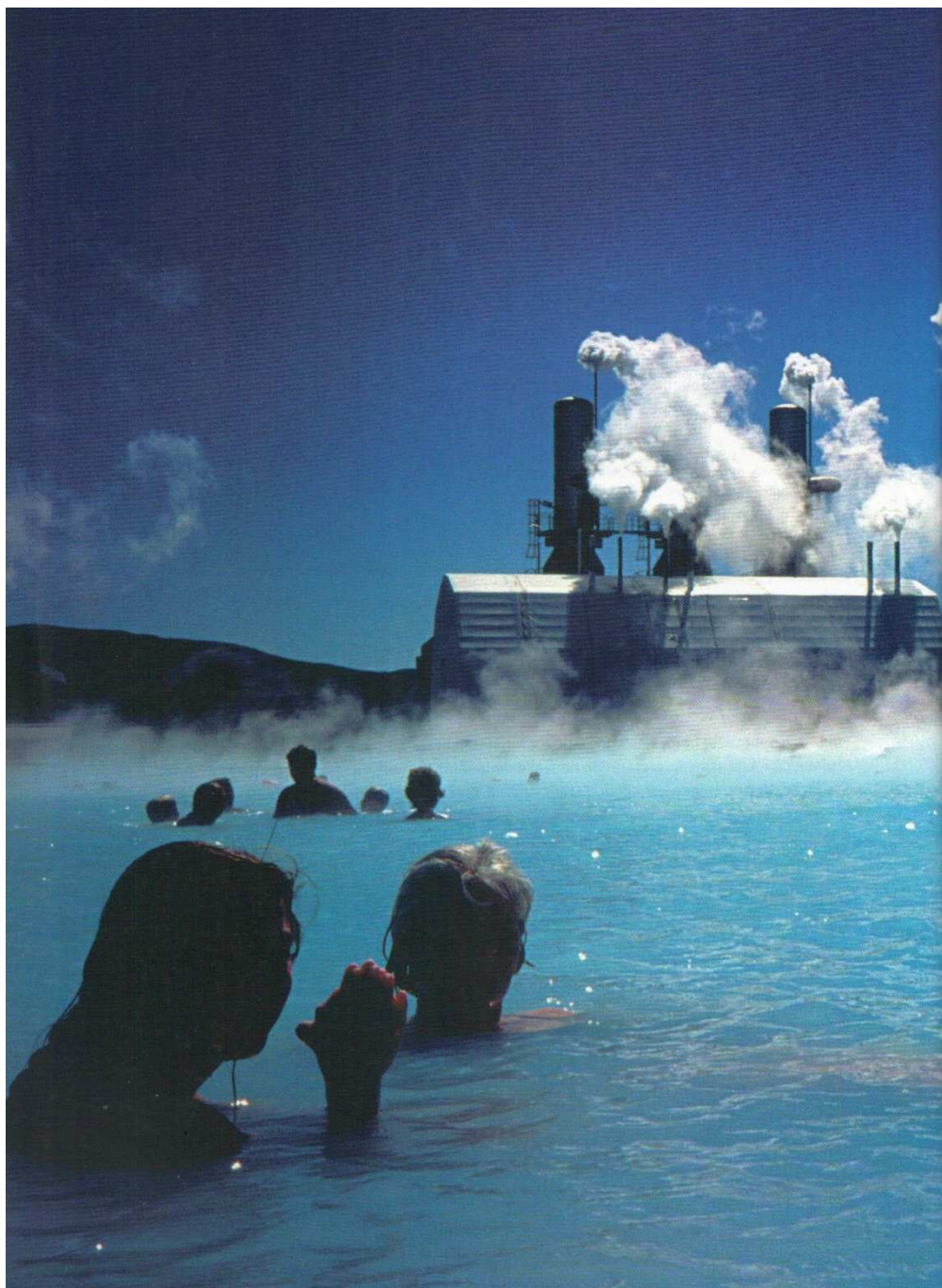


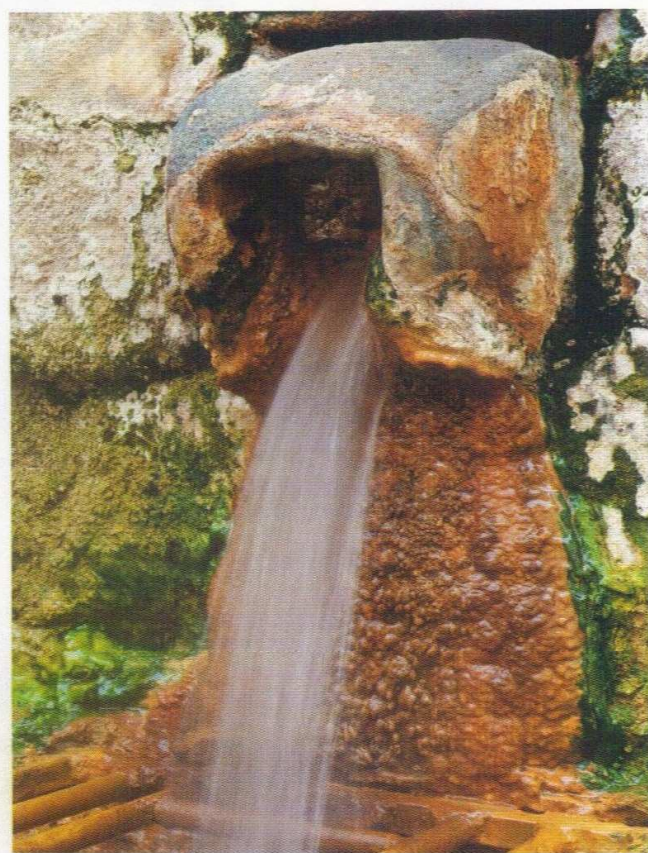
# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre



Lac de la station thermique  
du Blue Lagoon en Islande  
(eau chauffée par l'énergie  
géothermique)

# - I - Gradient géothermique et flux géothermique

## 1) Des manifestations locales d'un flux thermique d'origine interne



Source thermale du Par à Chaudes-Aigues (Cantal) : l'eau jaillit à 82 °C, ce qui en fait une des sources les plus chaudes d'Europe.

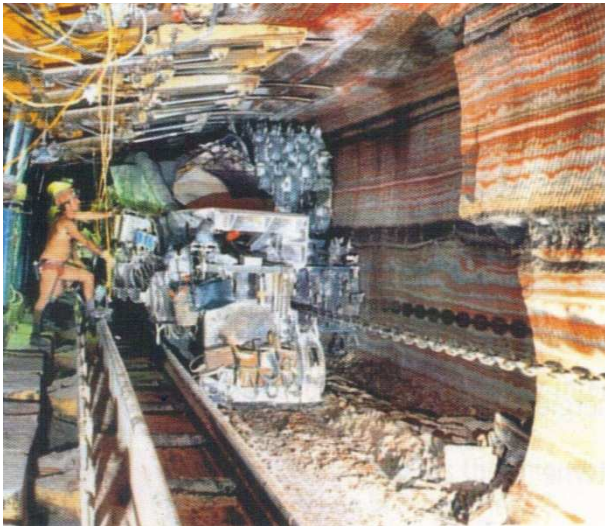
Les sources hydrothermales des fonds océaniques (« fumeurs noirs ») libèrent des fluides riches en éléments chimiques à très haute température (350 °C). Les **geysers** sont des sources d'eau chaude jaillissant par intermittence en projetant de l'eau et de la vapeur à une température de près de 200 °C. Ces deux exemples sont des manifestations évidentes de l'énergie interne du globe. En France, plus de 1200 sources thermales sont connues.

### Quelques stations thermales françaises

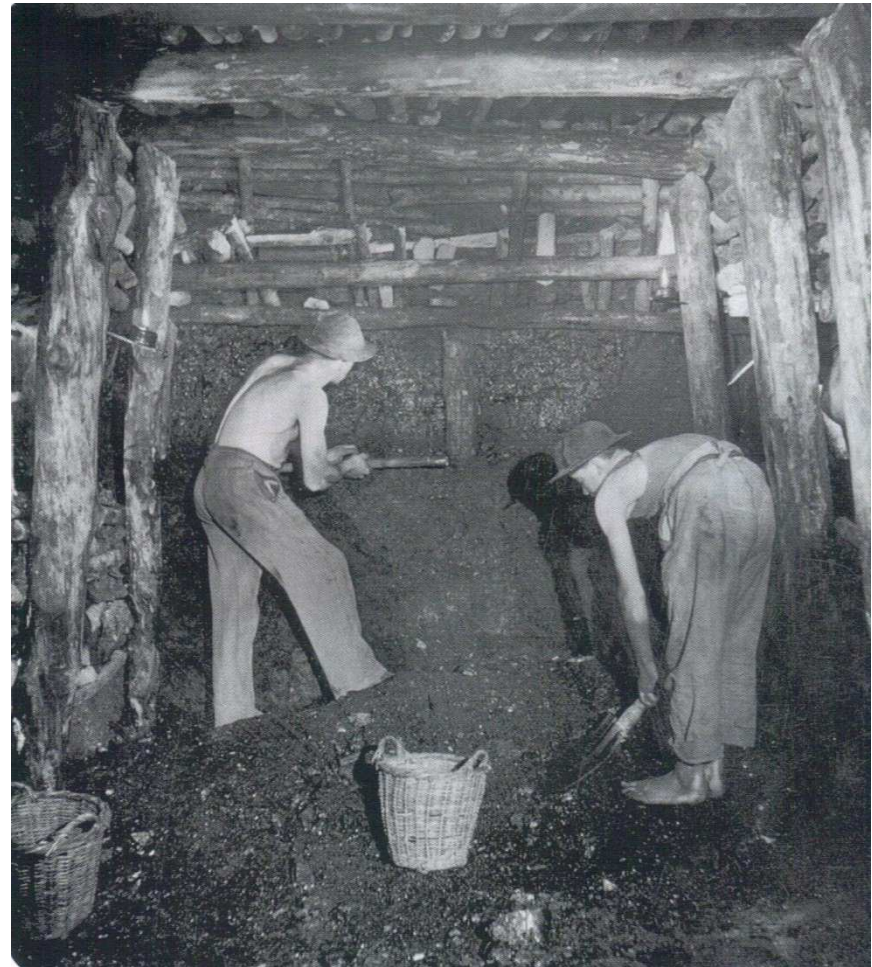
| Villes thermales | Température de l'eau des sources (en °C) | Départements     |
|------------------|--|------------------|
| Aix-en-Provence  | 33                                       | Bouches-du-Rhône |
| Bains-les-Bains  | 51                                       | Vosges           |
| Cauterets        | 53                                       | Hautes-Pyrénées  |
| Chaudes-Aigues   | 82                                       | Cantal           |
| Dax              | 64                                       | Landes           |
| Le Mont-Dore     | 42                                       | Puy-de-Dôme      |
| Bouillante       | 30 à 80                                  | Guadeloupe       |
| Salazie          | 32                                       | La Réunion       |

## Geyser Pohutu à Whakarewarewa (Nouvelle-Zélande)



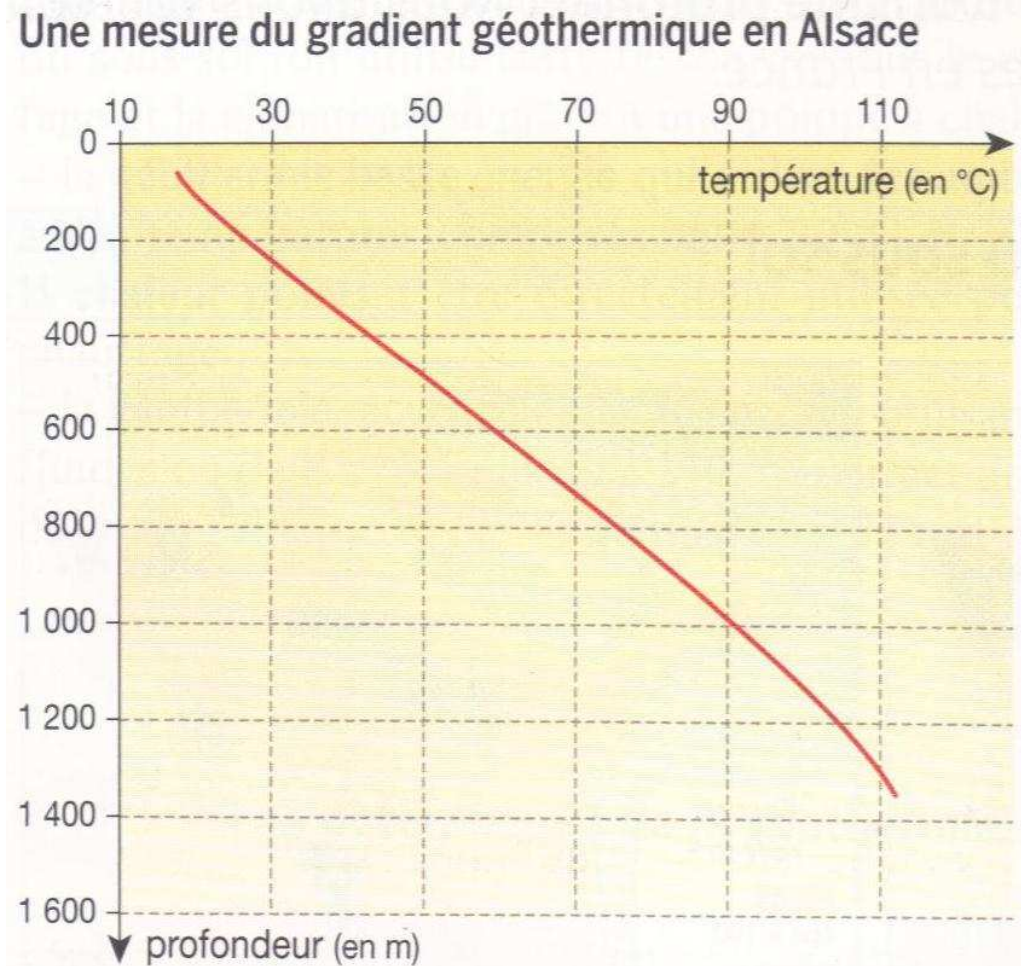


Mine de potasse alsacienne  
(extraction de chlorure de  
potassium)  
800 m, 47°C



Mine de charbon  
200 m, 35°C

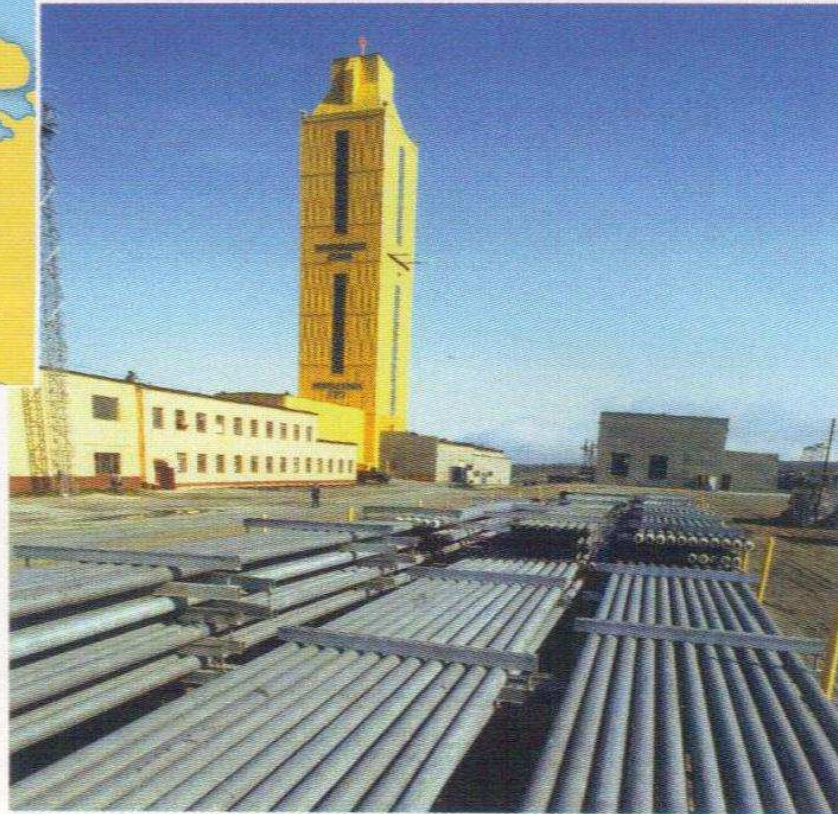
## 2) Mesure du gradient et du flux géothermiques



Alsace : 110°C pour 1300m  
soit  $110/1,3 = 84,6^{\circ}\text{C}/\text{km}$   
=> zone à fort gradient géothermique



Le forage le plus profond a été réalisé dans la péninsule de Kola, de 1970 à 1989. À la profondeur maximale de 12 262 mètres, la température enregistrée était de 180 °C.



La plate-forme du forage profond de Kola (le projet visait à atteindre le Moho)

Alsace : 110°C pour 1300m  
soit  $110/1,3 = 84,6^{\circ}\text{C}/\text{km}$   
=> zone à fort gradient géothermique

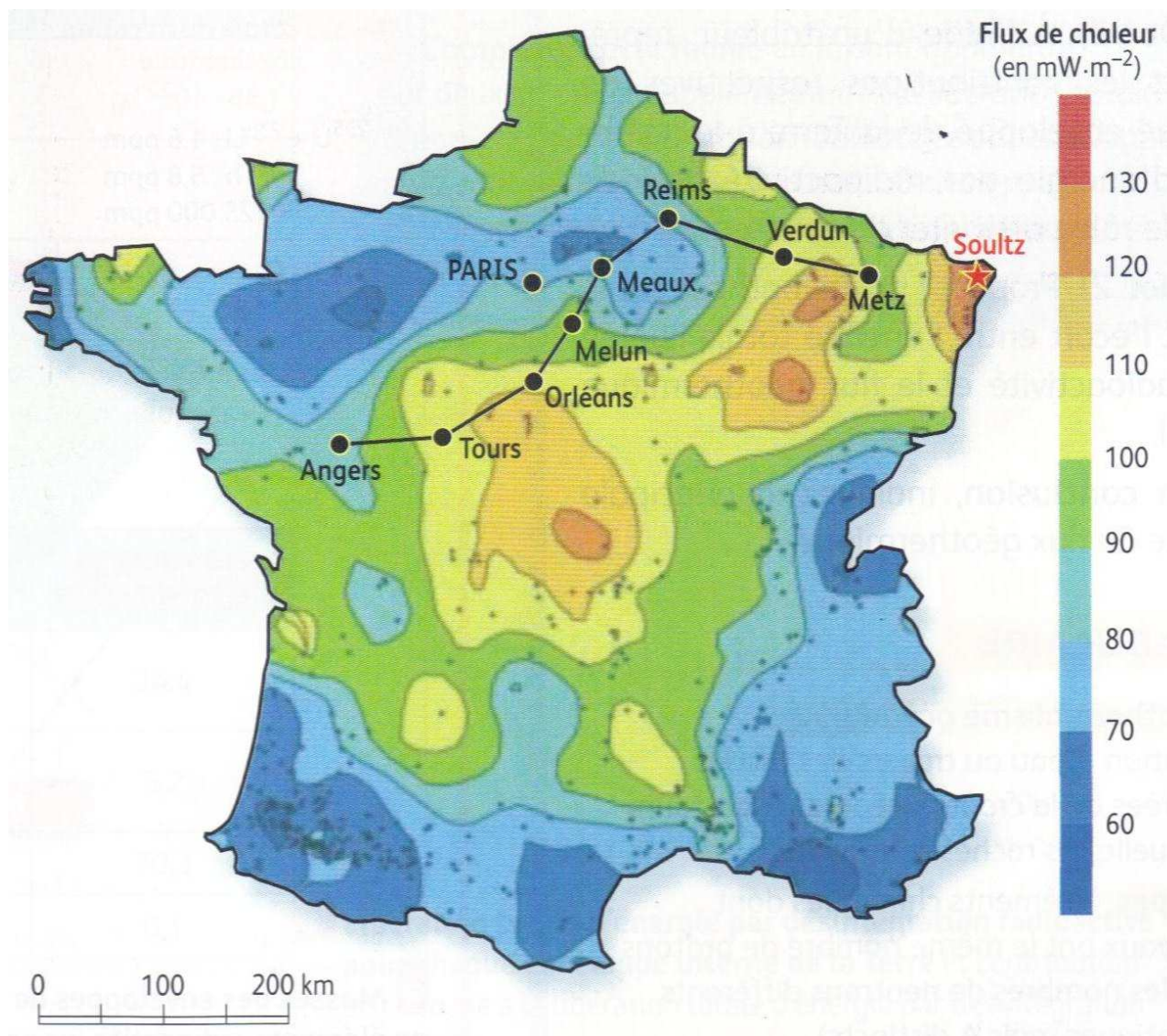
Kola : 180°C pour 12262m  
soit  $180/12,262 = 14,68^{\circ}\text{C}/\text{km}$   
=> zone à très faible gradient géothermique

## Gradient géothermique :

- variation de la température en fonction de la profondeur
- en moyenne :  $3^{\circ}\text{C}$  pour 100m, mais variable d'une région à l'autre avec des valeurs comprises entre 1 et  $10^{\circ}\text{C}$  pour 100m



## Carte du flux géothermique en France



## Conclusion

Le flux géothermique correspond à une certaine quantité d'énergie libérée à la surface du globe ; il s'exprime en  $W/m^2$  et dépend du gradient géothermique et de la conductivité thermique des roches du sous-sol. Il présente donc des valeurs différentes selon la région étudiée.

Flux géothermique ( $W/m^2$ ) = conductivité thermique ( $W/m/K$ ) x gradient géothermique ( $K/m$ )

# Bilan

La Terre libère de la chaleur d'origine profonde

De nombreuses manifestations à la surface du globe attestent de la présence de matériaux chauds en profondeur. C'est le cas des sources hydrothermales qui libèrent des fluides chauds, mais aussi des éruptions volcaniques qui sont des manifestations ponctuelles et brutales de la libération d'énergie interne. Enfin, l'augmentation de la température avec la profondeur est une réalité bien connue des mineurs : plus une mine est profonde, plus il y fait chaud.

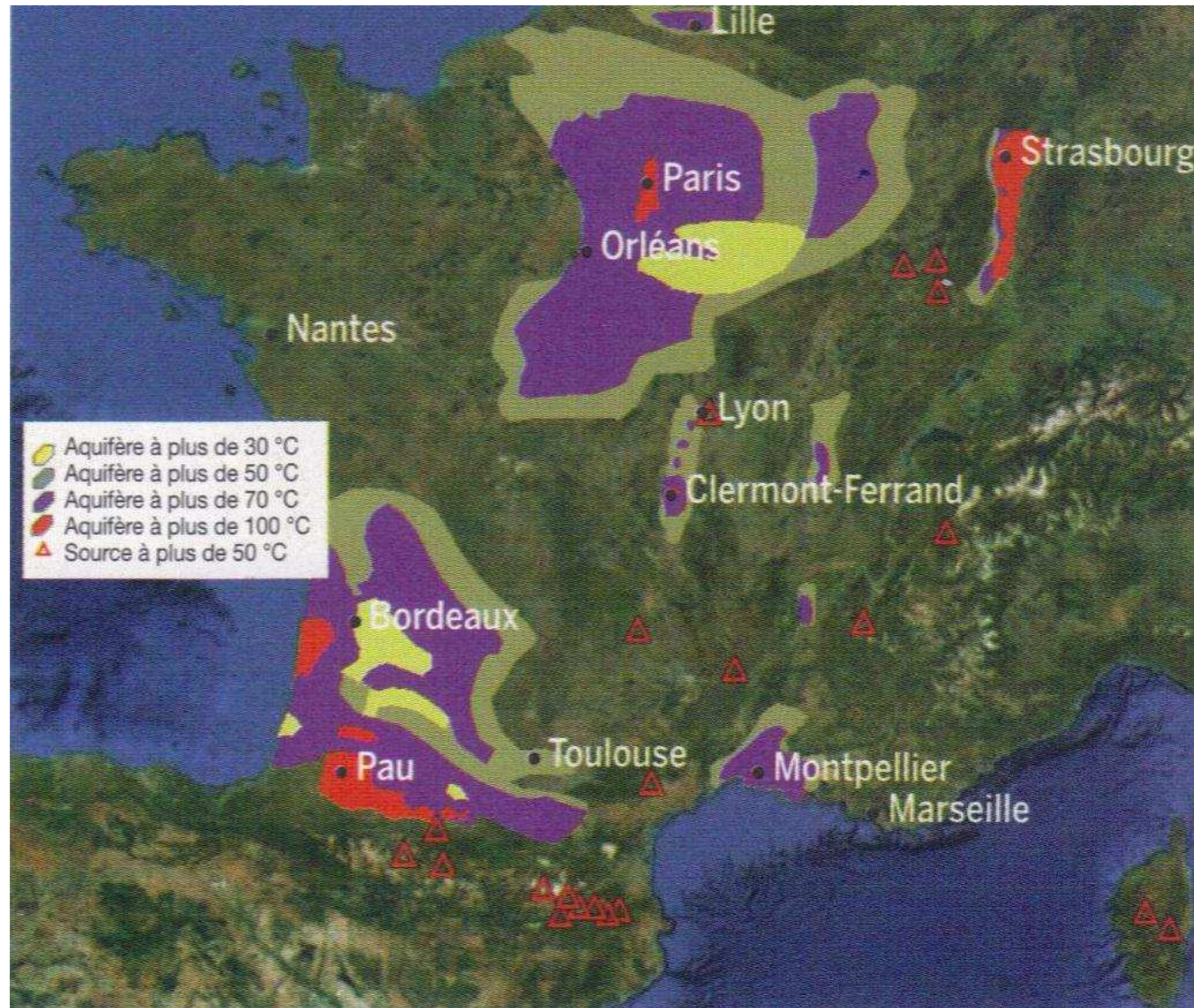
Le gradient et le flux géothermiques mesurent cette libération d'énergie

Des forages permettent de mesurer l'élévation de température avec la profondeur, ou gradient géothermique : sa valeur est en moyenne de 3°C pour 100 m, soit 30°C par km.

Le flux géothermique, mesuré en  $W/m^2$ , correspond à la dissipation d'énergie provenant des profondeurs de la Terre et traversant une surface donnée en un temps donné. Une telle mesure permet d'évaluer le transfert d'énergie thermique de la profondeur vers la surface. Il dépend du gradient géothermique mais aussi de la conductivité thermique des roches ; sa valeur moyenne est de  $65 \text{ mW}/m^2$ . 95% de la libération d'énergie interne est ainsi dissipée de façon diffuse, les 5% restant correspondant à des événements localisés et brefs : séismes et éruptions volcaniques.

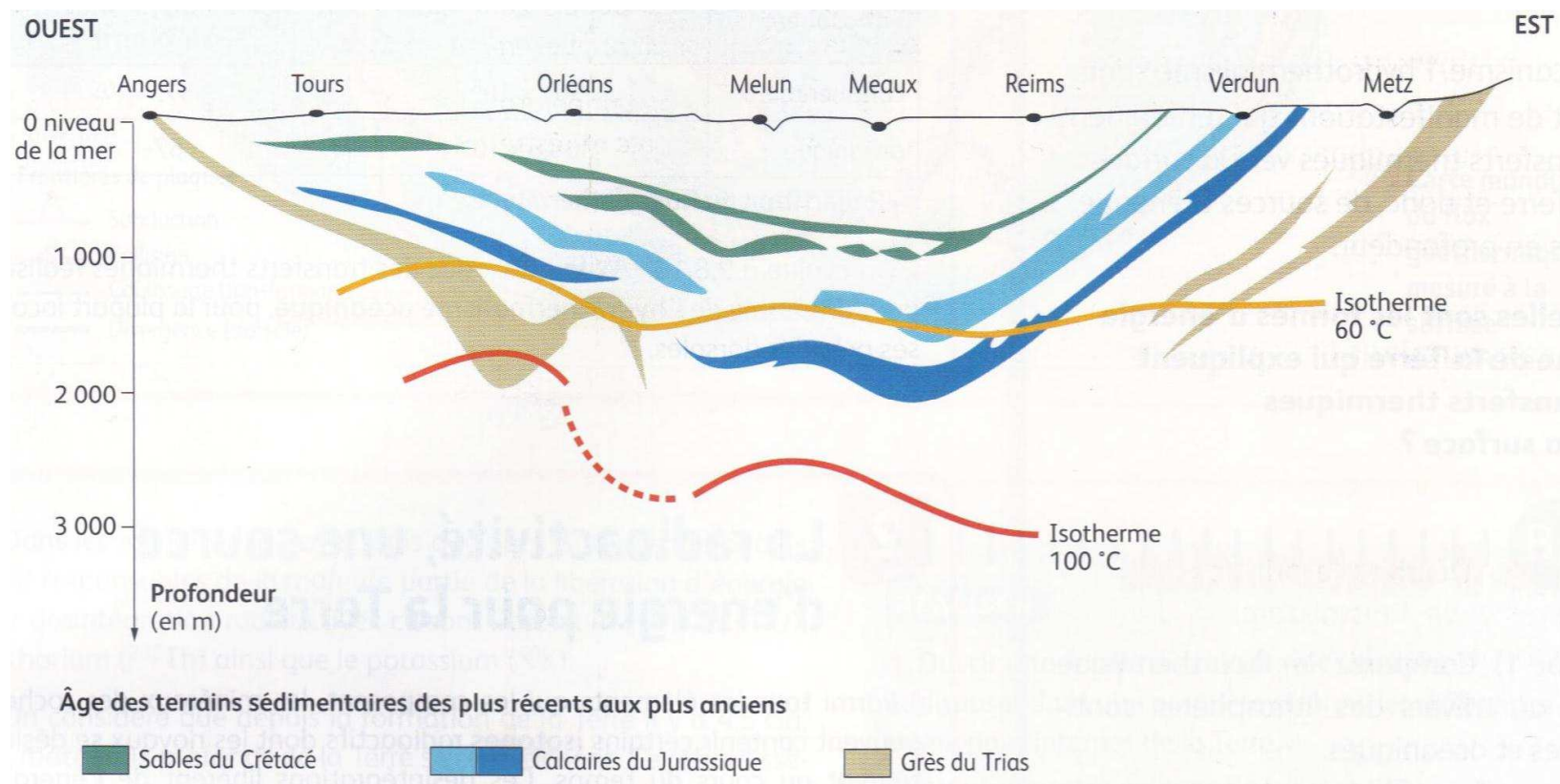
## - II - L'exploitation de l'énergie géothermique en France

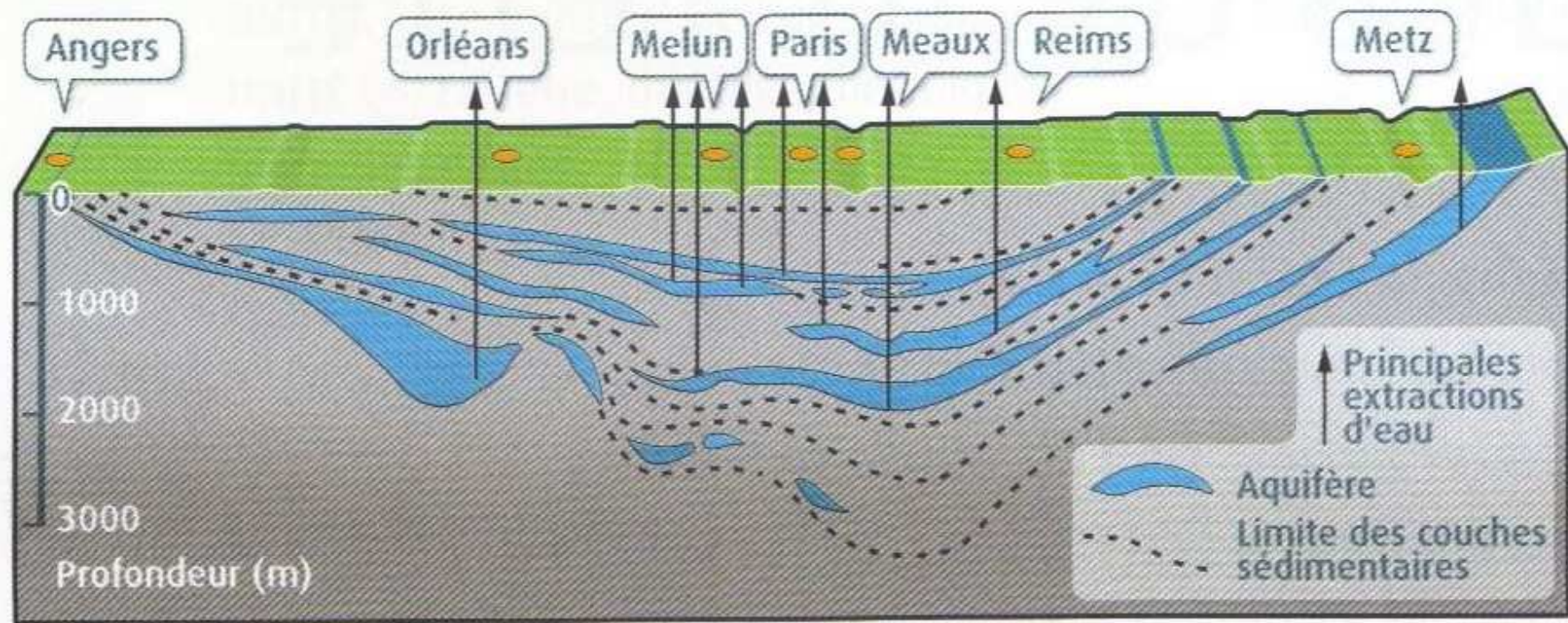
## Les potentialités de la géothermie en France



# 1) Géothermie « basse énergie » dans le bassin de Paris

# Coupe du bassin de Paris avec ses principaux aquifères géothermaux





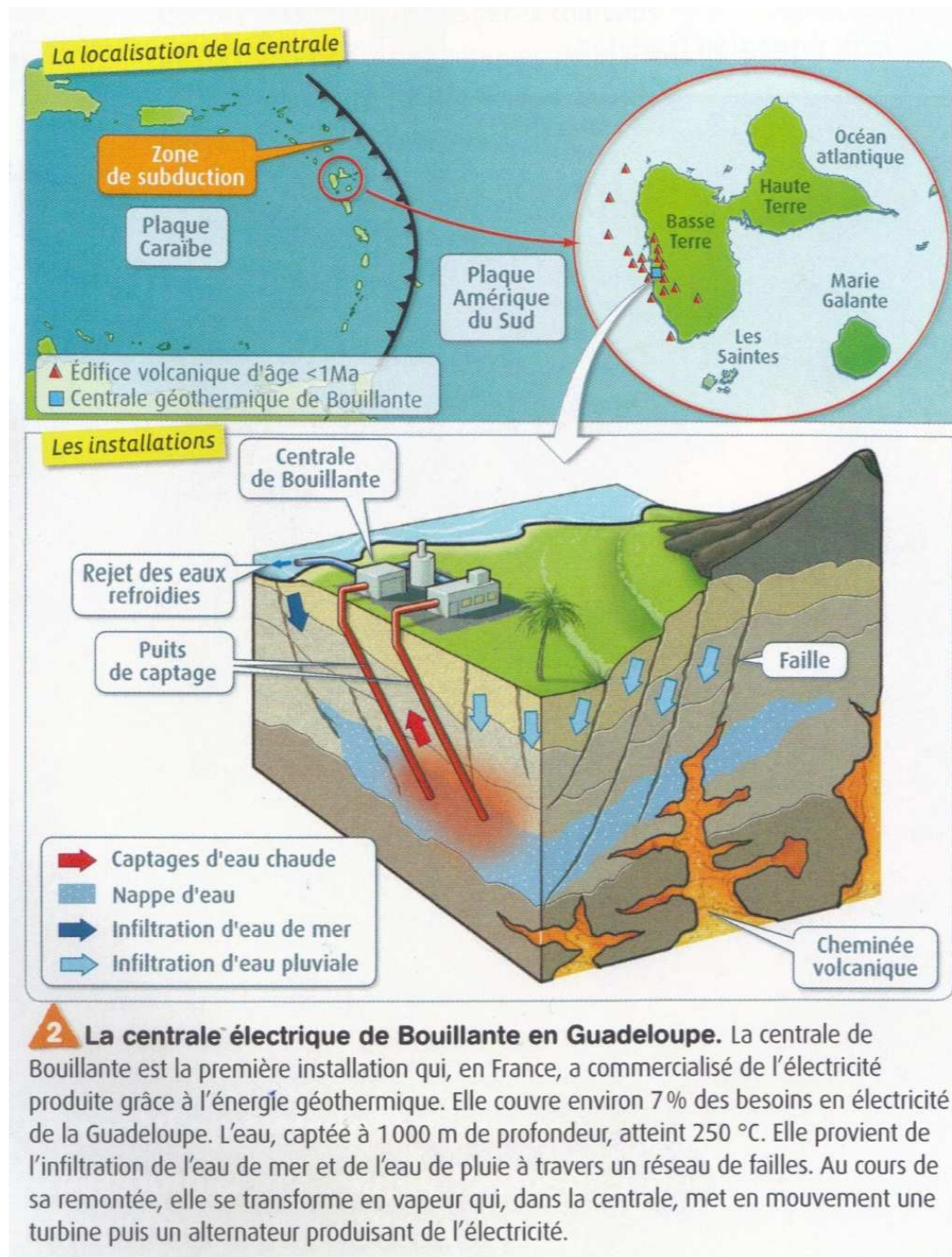
### L'exploitation de l'énergie

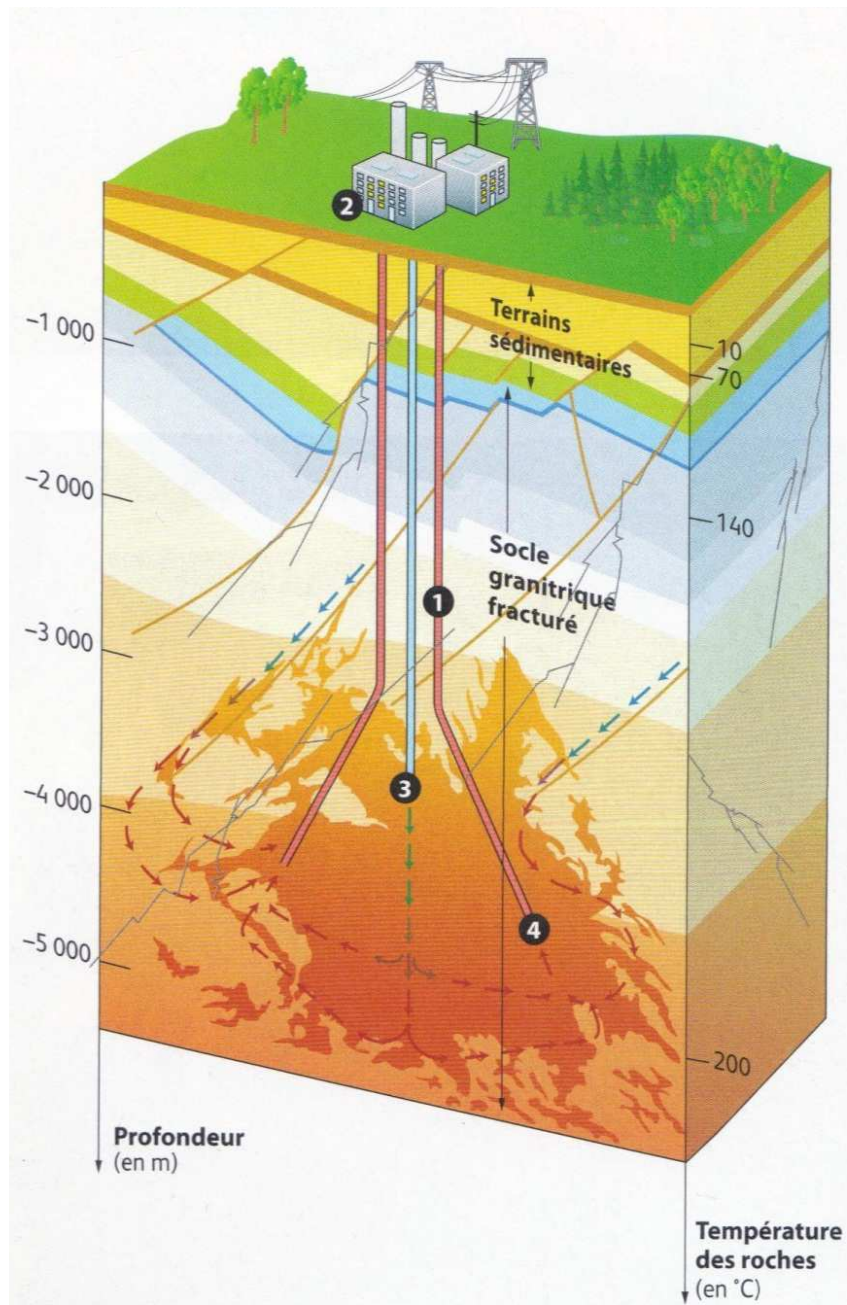
#### géothermique dans le Bassin

**parisien.** Le Bassin parisien compte 34 installations géothermiques. Elles puisent l'eau dans l'une des grandes couches de roches poreuses et perméables (ou aquifères) que compte ce bassin sédimentaire. Cette eau, d'une température de 56 à 85 °C, est directement utilisée dans les systèmes de chauffage collectif.




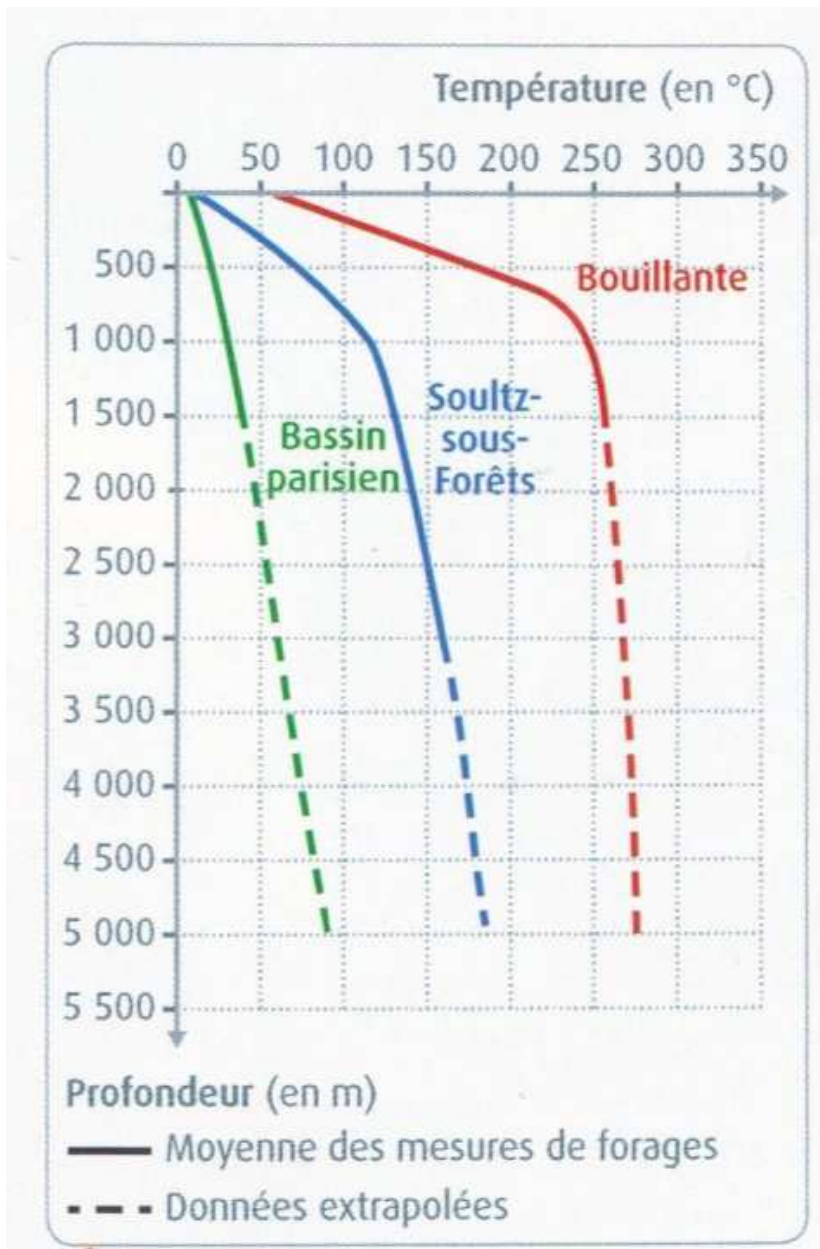
## 2) Géothermie « haute énergie »



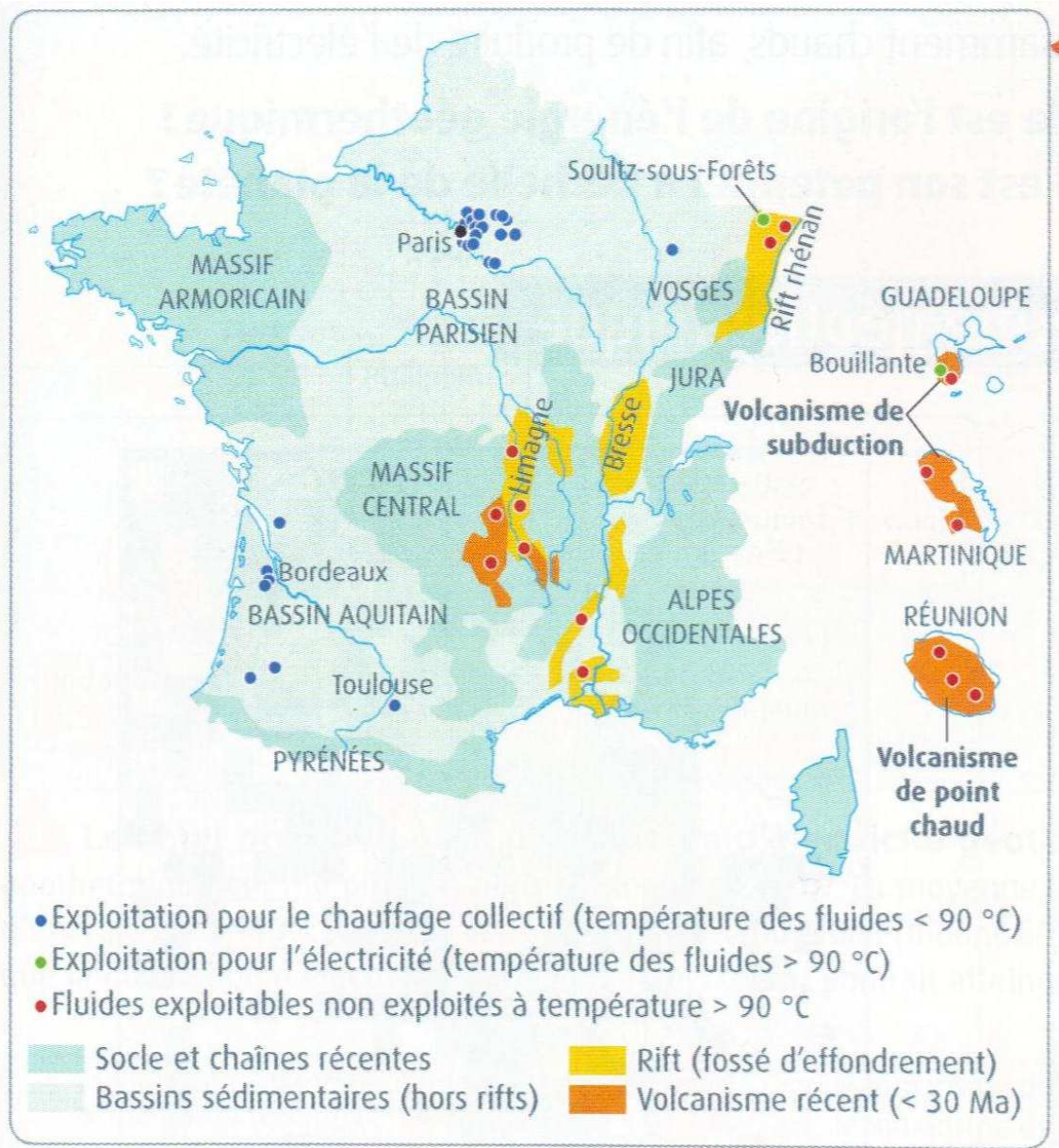


- 1 Remontée d'eau chaude
- 2 Échange thermique et production électrique
- 3 Réinjection d'eau refroidie
- 4 Circulation d'eau chaude dans les fractures de la roche chaude

 Coupe simplifiée du gisement hydrothermal de Soutz-sous-Forêts.

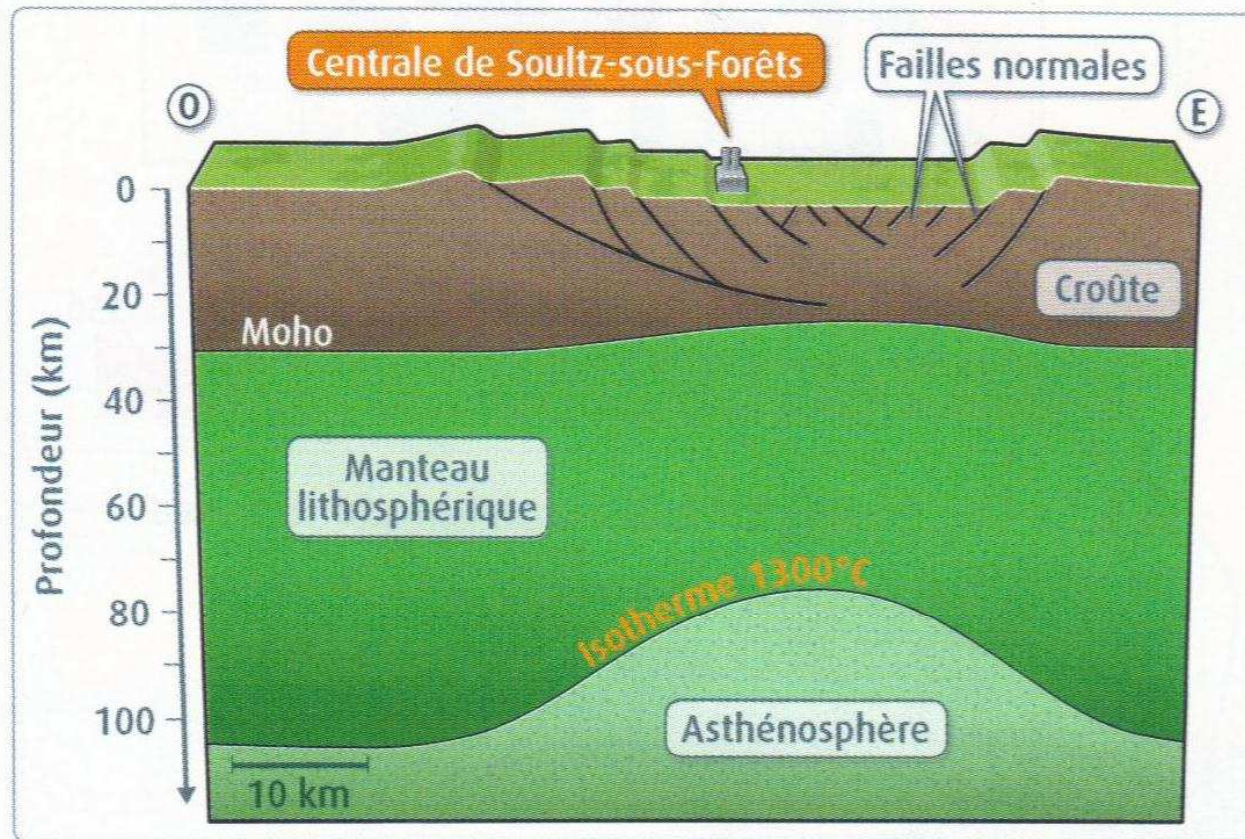


**3** Évolution de la température en fonction de la profondeur, ou **géotherme**, dans le Bassin parisien, à Bouillante et à Soutz-sous-Forêts (voir doc. 4). Sous les continents, l'augmentation de température avec la profondeur (**gradient géothermique**) est en moyenne de  $30 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$ . À Soutz et à Bouillante, le gradient entre 0 et - 1000 m est respectivement de  $120$  et  $250 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$ .



### Contextes géodynamiques français favorables à l'exploitation de l'énergie géothermique

4 Carte géologique simplifiée présentant les exploitations géothermiques de grande taille pour le chauffage collectif et l'électricité.



**5** Contexte géologique de la centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts : le rift rhénan. Il y a 35 Ma, une phase d'extension de la lithosphère continentale s'est produite en Europe de l'Ouest. Ce phénomène s'est accompagné d'une remontée de l'asthénosphère et d'une activité magmatique. Plusieurs fossés d'effondrement, ou rifts, sont les témoins de ce processus.



Interview de Jacques Varet, conseiller de direction au BRGM

**Les bassins sédimentaires contiennent d'importantes réserves d'eaux chaudes.** Leur

exploitation pour le chauffage collectif permet d'économiser  $4,5 \cdot 10^{14}$  J d'électricité par an, ce qui évite le rejet de plus de 400 000 tonnes de  $\text{CO}_2$ . Il est possible d'en faire beaucoup plus : si les réserves d'eau géothermale sont moins bien connues dans les régions où le socle cristallin affleure, il reste possible d'y construire des installations individuelles qui exploitent l'énergie géothermique récupérée par des fluides mis en circulation dans le sol à très faible profondeur.



Interview de Albert Genter, ingénieur géologue à Soultz-sous-Forêts.

**En métropole, les rifts présentent un fort potentiel pour la production d'électricité géother-**

**mique** car le gradient géothermique y est élevé. La centrale pilote de Soultz-sous-Forêts produit de l'électricité à partir de fluides traversant le socle granitique fracturé. Elle permet de tester de nouvelles technologies de pompage et de production. La production d'électricité géothermique présente l'intérêt d'être stable dans le temps et d'émettre 10 fois moins de  $\text{CO}_2$  que les techniques utilisant les combustibles fossiles. Mais elle ne peut satisfaire les besoins : l'électricité géothermique mondiale représente aujourd'hui 14% de la consommation annuelle d'électricité en France.

**6** Potentiel de l'énergie géothermique en France.

## Conclusion

Dans les bassins sédimentaires hors rift, comme le Bassin parisien ou aquitain, le gradient géothermique est égal à  $30 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ . L'eau prélevée, de température  $< 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , est utilisée pour le chauffage collectif (entre autre).

A l'aplomb des rifts continentaux et des zones de magmatisme de subduction et de point chaud, le gradient géothermique y est en général plus élevé. Les eaux prélevées sont de température  $> 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  et permettent de produire de l'électricité.

# Bilan

- L'énergie géothermique chauffe les roches et les fluides qui peuvent y circuler. L'Homme extrait ces fluides pour exploiter cette énergie.
- Dans les bassins sédimentaires comme le Bassin parisien ou le Bassin aquitain, le gradient géothermique (augmentation de température avec la profondeur) est voisin de  $30 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$  et les fluides extraits ont une température généralement inférieure à  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ils sont utilisés pour le chauffage collectif.
- Dans les zones à activité magmatique (subduction aux Antilles et point chaud à la Réunion), ou à l'aplomb des rifts, le gradient géothermique est plus élevé. Les fluides sont prélevés à des températures supérieures à  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  et permettent la production d'électricité.
- Pour le chauffage, l'énergie géothermique a, en France, un potentiel certain. En revanche, la production d'électricité d'origine géothermique ne représente encore qu'une très faible fraction de l'électricité consommée.

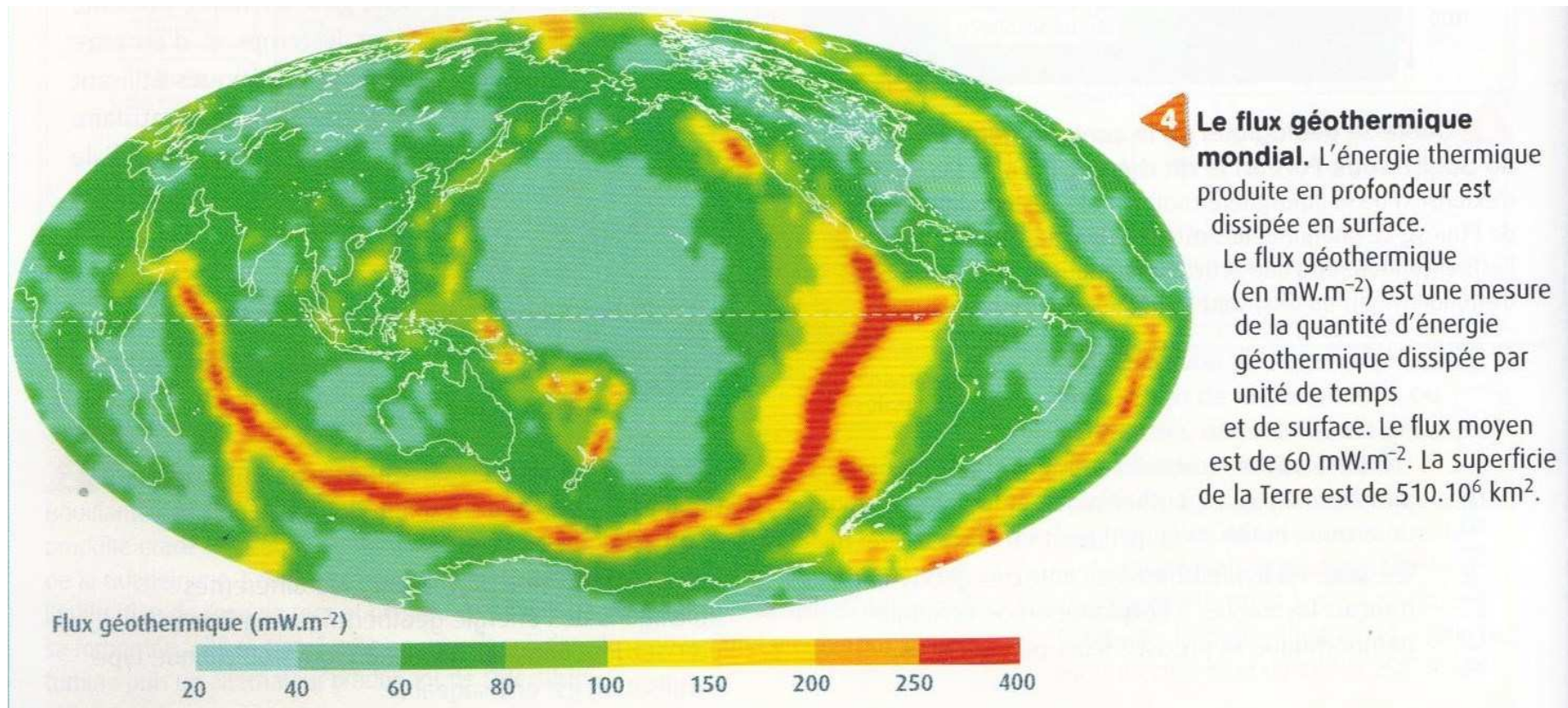
| Contextes géologiques                | Gradient géothermique                 | Profondeur d'extraction du fluide | Température du fluide prélevé                           | Quelques utilisations possibles  |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| Bassins sédimentaires (hors rifts)   | $30 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$   | 1500-2500 m                       | $45 \text{ }^\circ\text{C} - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chauffage collectif</li> <li>• Chauffage individuel et eau chaude sanitaire</li> </ul>                        |
| Zones de subduction<br>Points chauds | $> 30 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$ | 1000 m                            | $250 \text{ }^\circ\text{C}$                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Électricité</li> <li>• Chauffage collectif</li> <li>• Chauffage individuel et eau chaude sanitaire</li> </ul> |
| Rifts                                |                                       | 5000 m                            | $> 150 \text{ }^\circ\text{C}$                          |  |

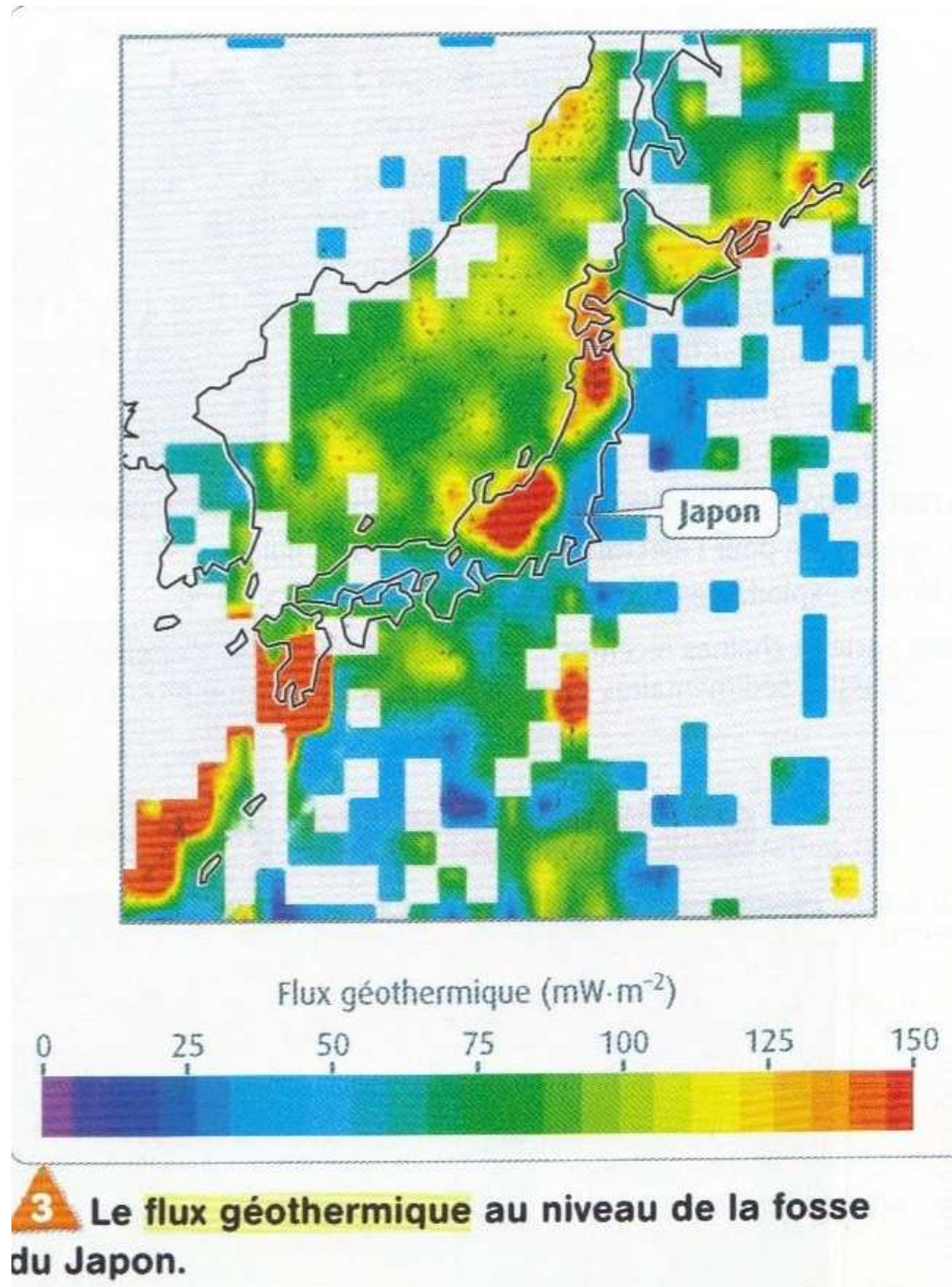
Les exploitations géothermiques françaises en relation avec leur contexte géologique.

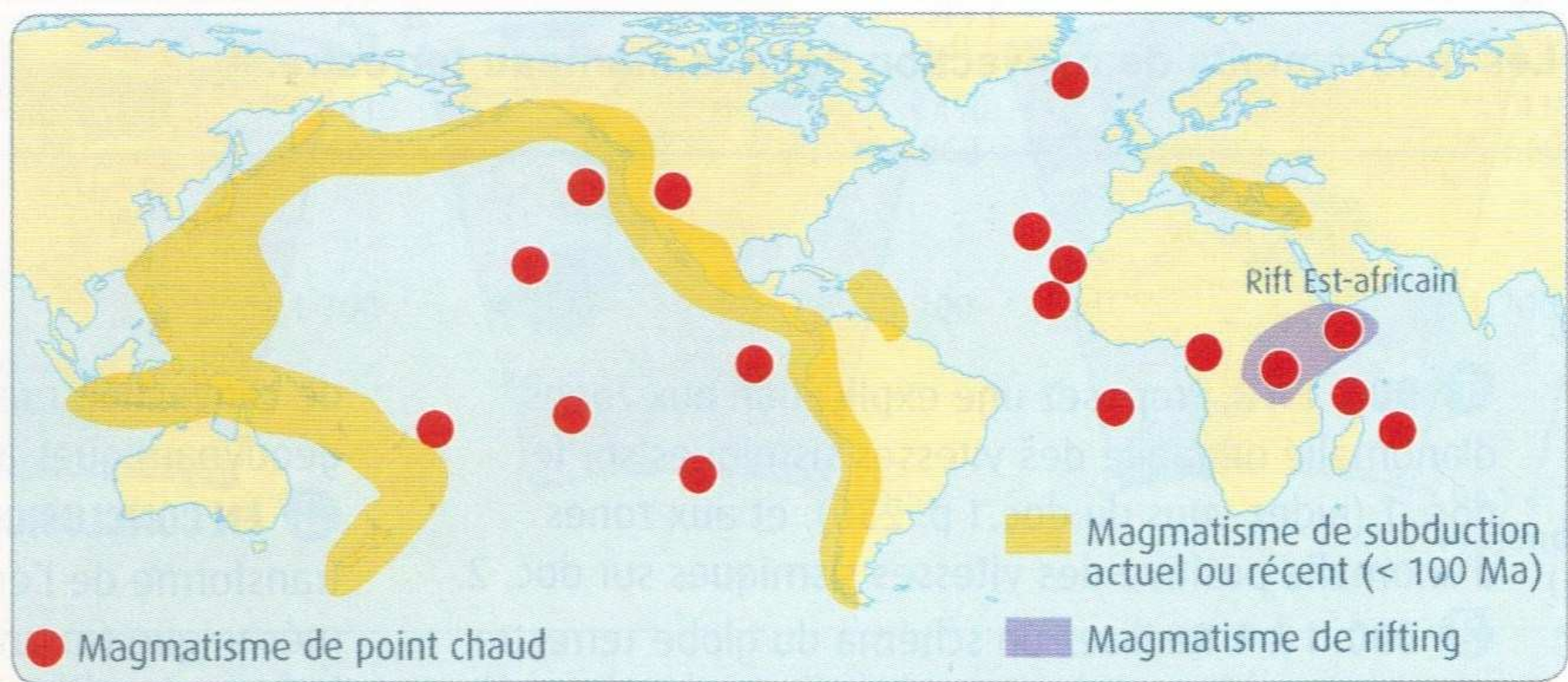


## - III - Flux géothermique et énergie de la Terre

### 1) Un flux géothermique hétérogène







**Principales zones propices à la production d'électricité géothermique.**

**Le flux géothermique mondial.** L'énergie thermique produite en profondeur est dissipée en surface.  
Le flux géothermique (en  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) est une mesure de la quantité d'énergie géothermique dissipée par unité de temps et de surface. Le flux moyen est de  $60 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . La superficie de la Terre est de  $510\cdot 10^6 \text{ km}^2$ .

$2,42\cdot 10^{17}$  J d'électricité d'origine géothermique ont été produits dans le monde en 2010. En moyenne, 5 J d'énergie géothermique sont nécessaires pour produire 1 J d'énergie électrique. Lors d'un congrès qui s'est tenu à Bali (Indonésie) en 2010, les spécialistes de la géothermie ont estimé que la production d'électricité d'origine géothermique pourrait atteindre  $4,2\cdot 10^{18}$  J en 2050.

Calcul de la quantité d'énergie géothermique prélevée en 2010 pour la production d'électricité.  
Comparaison avec la quantité totale d'énergie thermique dissipée.

## 2) L'origine de l'énergie interne du globe

Les différentes enveloppes terrestres contiennent des éléments radioactifs : uranium ( $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$ ), thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) et potassium ( $^{40}\text{K}$ ). Leur désintégration produit de l'énergie thermique :  $9,94 \cdot 10^{-5} \text{ W.kg}^{-1}$  pour  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$  réunis ;  $2,69 \cdot 10^{-5} \text{ W.kg}^{-1}$  pour  $^{232}\text{Th}$  ;  $2,79 \cdot 10^{-5} \text{ W.kg}^{-1}$  pour  $^{40}\text{K}$  ( $1\text{W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$ ). Cette source d'énergie interne – inépuisable à l'échelle de l'humanité – est à l'origine de 50 à 75 % de l'énergie thermique dissipée par la Terre.

### 1 La principale source d'énergie interne de la Terre.

| Enveloppes          | Masse (en kg)        | Concentrations des éléments (en ppm) |                      |                      |
|---------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
|                     |                      | $^{238}\text{U}$ et $^{235}\text{U}$ | $^{232}\text{Th}$    | $^{40}\text{K}$      |
| Croûte continentale | $1,38 \cdot 10^{22}$ | 1,60                                 | 5,80                 | 2,38                 |
| Croûte océanique    | $6,90 \cdot 10^{21}$ | $9,00 \cdot 10^{-1}$                 | 2,70                 | $4,76 \cdot 10^{-1}$ |
| Manteau             | $4,00 \cdot 10^{24}$ | $2,70 \cdot 10^{-2}$                 | $9,40 \cdot 10^{-2}$ | $3,90 \cdot 10^{-2}$ |
| Noyau               | $1,99 \cdot 10^{24}$ | $1,00 \cdot 10^{-5}$                 | $1,00 \cdot 10^{-4}$ | $1,19 \cdot 10^{-4}$ |

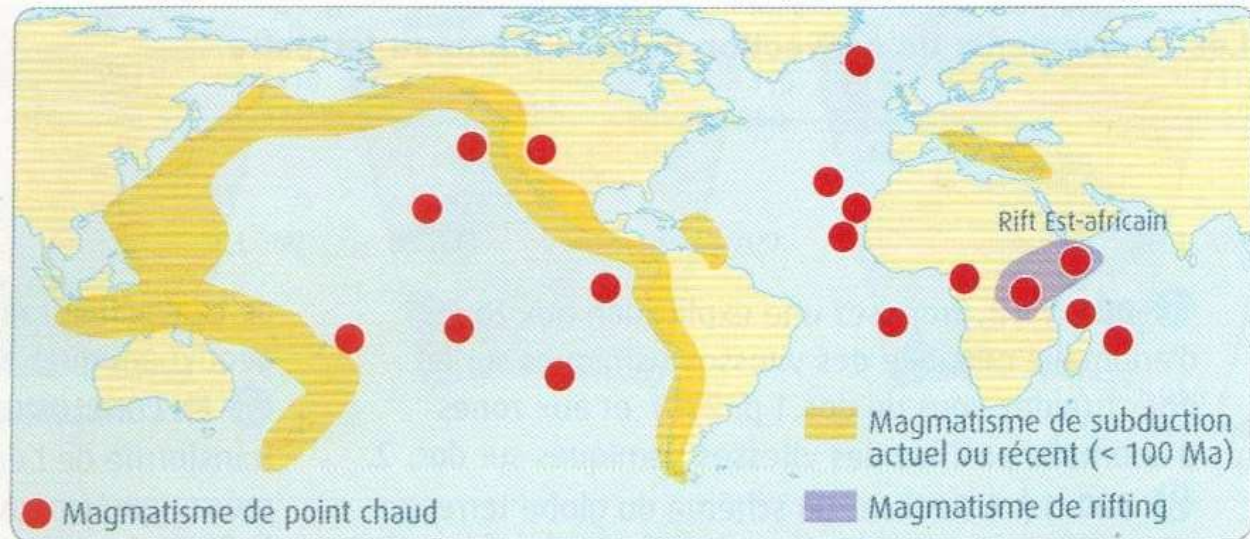
### 2 Concentration en éléments radioactifs dans les enveloppes terrestres. Ppm signifie « partie pour million » : 1 ppm d'uranium = 1 mg d'uranium par kg de roche.

# Conclusion

- L'énergie géothermique provient de la désintégration des substances radioactives contenues dans les roches. Le manteau en est le principal producteur. Cette énergie est dissipée vers la surface. Le flux géothermique émis à la surface est très variable. Il est fort au niveau des dorsales, en raison de la production de lithosphère nouvelle. Cependant, ces zones ne sont pas exploitables. Dans les zones de subduction, le flux faible résulte du plongement de la lithosphère âgée, devenue froide. En revanche, localement, le flux est fort à l'aplomb de l'arc volcanique. L'énergie géothermique est essentiellement prélevée dans ce contexte géodynamique (Ouest et Nord-Est de la ceinture péripacifique, Italie). L'énergie dissipée dans les contextes de point chaud et de rifting est peu exploitée, à l'échelle mondiale.
- L'Homme ne prélève qu'une petite partie de l'énergie dissipée. Bien qu'inégalement répartie, le potentiel d'exploitation de l'énergie géothermique reste fort.

# Bilan

- L'énergie géothermique provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches. Le manteau en est le principal producteur.
- Le **flux géothermique** (quantité d'énergie géothermique émise par unité de surface et de temps) résulte du transfert de l'énergie géothermique depuis les profondeurs vers la surface de la Terre. Au niveau des dorsales, le flux est fort (production de lithosphère). Au niveau des subductions, on observe une zone de flux faible (liée au plongement de plaque lithosphérique froide) et une zone de flux fort (associée à l'arc volcanique). Les principaux contextes géologiques propices à la production d'électricité géothermique sont les zones à fort flux géothermique (et à fort gradient géothermique) associées au magmatisme de subduction, au magmatisme de point chaud et au magmatisme de rifting. Certaines de ces zones ne sont pas encore exploitées pour la production d'électricité géothermique.
- Le prélèvement de l'énergie géothermique par l'Homme ne représente qu'une infime partie de l'énergie géothermique totale dissipée.



Principales zones propices à la production d'électricité géothermique.

## - IV - Le transfert de l'énergie thermique au sein de la planète

2 types de transfert thermique possibles :

- conduction : transfert de chaleur, dans un solide ou un fluide, qui résulte de la différence de  $T$  entre 2 régions d'un même milieu, ou entre 2 milieux en contact, et qui se réalise sans déplacement global de matière.

L'énergie thermique se transmet de proche en proche par modification de l'agitation des atomes.

Par ex, une barre de métal chauffée à une extrémité devient de plus en plus chaude à l'autre extrémité.

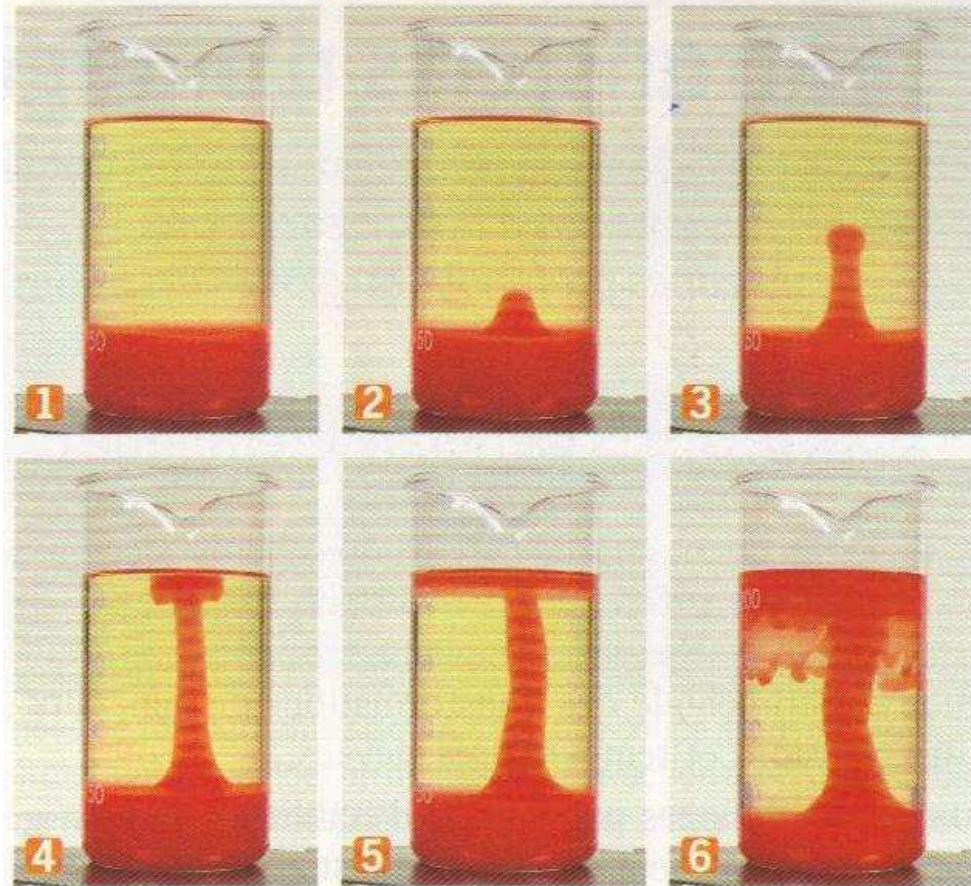


- convection : transfert thermique s'accompagnant de la mise en mouvement de la matière. Elle se met en place lorsque le matériau a le comportement d'un fluide et que, du fait d'un apport énergétique supérieur à ce qu'il peut évacuer par conduction, le matériau situé à la base s'échauffe, devient moins dense que le reste du matériau situé au-dessus et entame son ascension.

Dans le même temps, les matériaux plus froids et plus denses situés près de la surface de refroidissement du système ont tendance à descendre vers le fond.

# Mise en évidence de la convection

Modélisation du déplacement de matière par convection

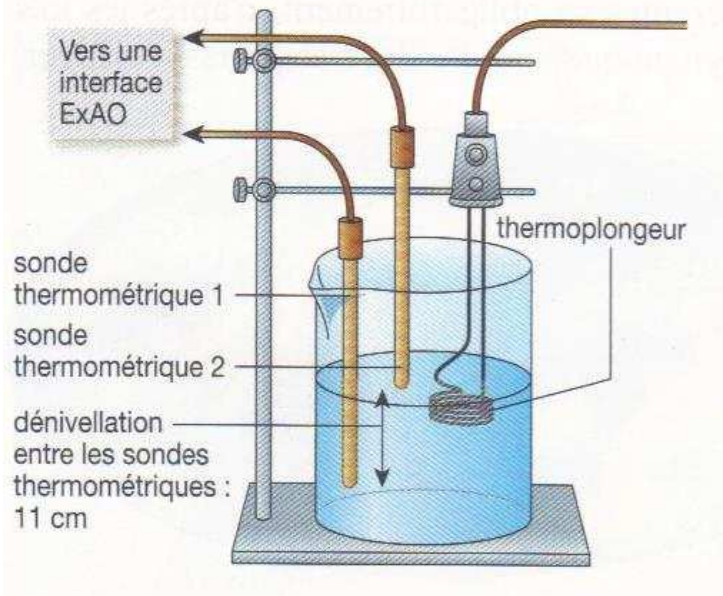


- 2 couches d'huile
  - on chauffe le dessous du bécher
  - l'huile du fond du bécher se réchauffe et se déplace verticalement
  - en remontant, l'huile se refroidit et plonge le long des parois du bécher
- => déplacements = mouvements de convection

# Efficacité des transferts de chaleur par conduction et convection

## ■ PROTOCOLE

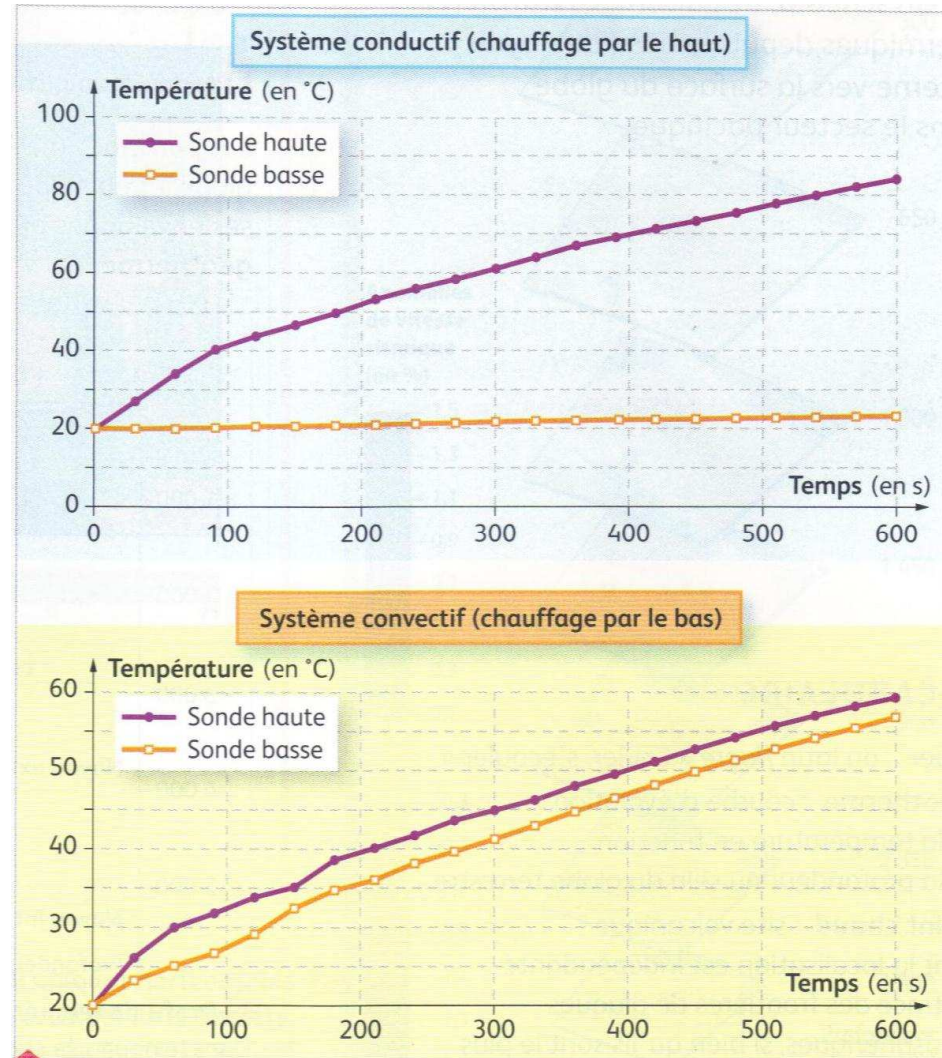
- Une première série de mesures est réalisée en positionnant les sondes et le thermoplongeur comme sur le *schéma ci-dessous*.
- Une seconde série de mesures est réalisée en descendant le thermoplongeur près du fond, au niveau de la sonde 1.



- 1<sup>ère</sup> série de mesures : pas de déplacement du liquide au sein du bécher. Les transferts de chaleur se font par conduction.
- 2<sup>ème</sup> série de mesures : déplacements du liquide dans le bécher. Les transferts de chaleur se font par convection.

# Transferts thermiques et profils de température

L'efficacité d'un transfert thermique au travers d'un matériau chauffé à sa base et refroidi à son sommet est d'autant plus grande que la différence de température qui s'établit entre sa base et son sommet est faible (mais que la différence de température est forte entre le fond du récipient chauffé et l'eau et entre l'eau et l'atmosphère).



# Conclusion

Dans un système conductif chauffé à sa base et refroidi à son sommet, le transfert thermique s'organise par transmission d'une agitation moléculaire de proche en proche sans déplacement du matériau. Dans un tel milieu, l'augmentation de la température avec la profondeur est quasi-constante.

Dans un système convectif, le matériau chauffé à sa base et devenu plus léger, monte le long de colonnes. Arrivé au sommet, le matériau s'étale latéralement et se refroidit : devenu plus lourd, il redescend.

En convection, la température est relativement homogène dans le matériau étudié, sauf près de ses surfaces d'échauffement et de refroidissement de sorte qu'entre ces deux secteurs, le gradient géothermique y est relativement faible.

La convection est donc plus efficace dans l'organisation d'un transfert thermique que la conduction.

# Bilan

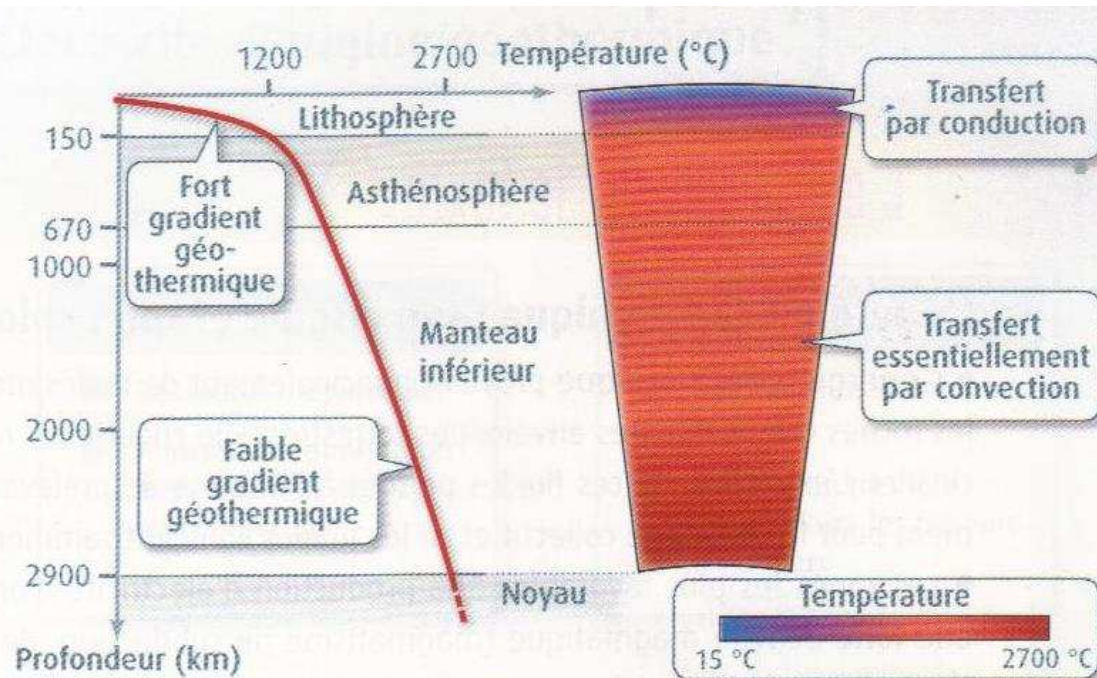
- L'énergie géothermique peut être transférée vers la surface selon deux modes :

- par **conduction**, sans mouvement de matière, comme on l'observe dans un fluide chauffé par son sommet.

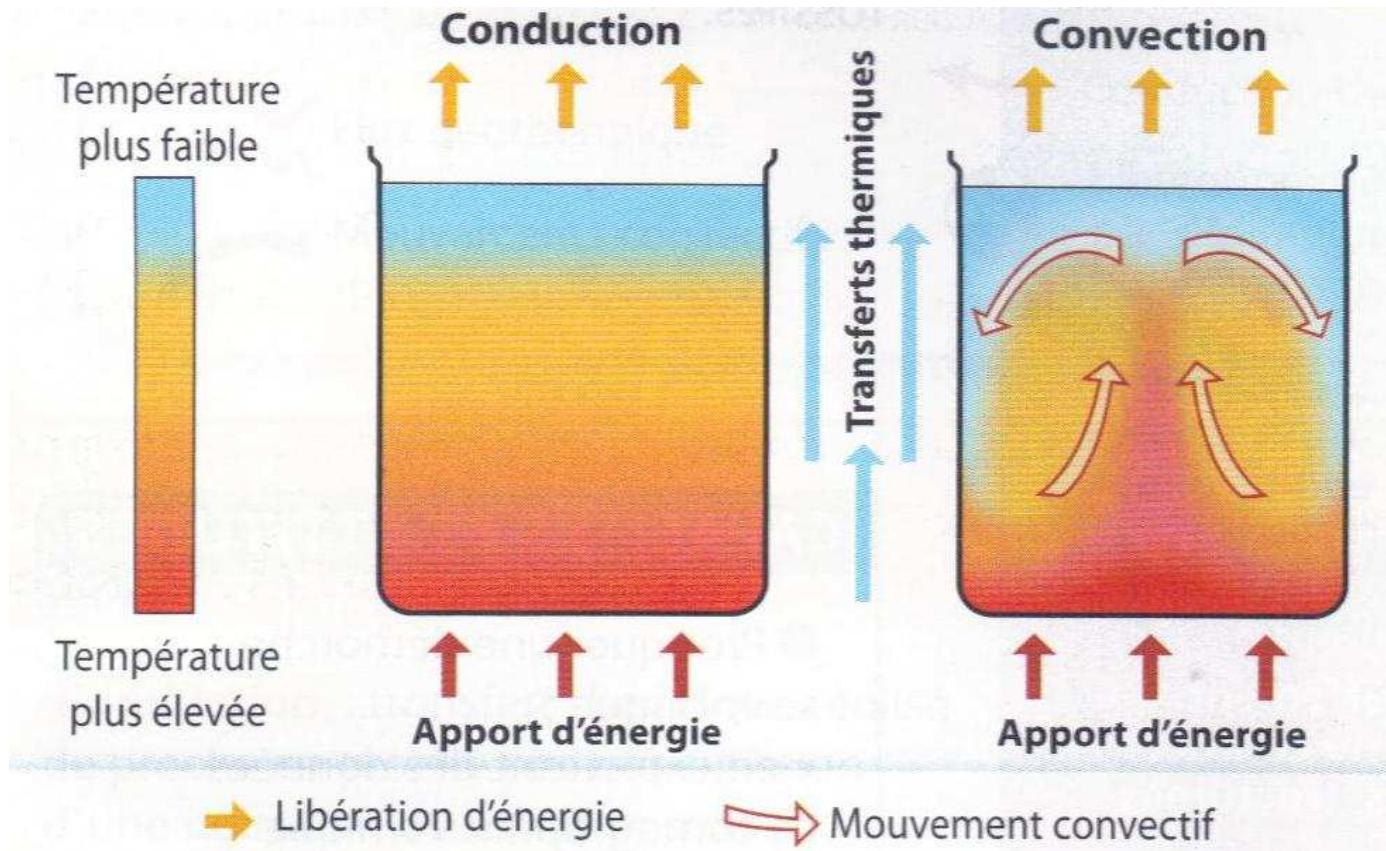
- par **convection**, impliquant des mouvements de matière, comme on peut l'observer dans un fluide chauffé par sa base. Les mouvements sont initiés par des différences de densité, contrôlées entre autre par la température. La matière chaude, moins dense que la matière froide, est animée de mouvements ascendants. En surface, elle se refroidit et plonge en profondeur.

- Le transfert d'énergie thermique est plus efficace par convection que par conduction : le **gradient thermique** est ainsi plus faible au sein d'un matériau animé de mouvements de convection.

- Au sein de la planète, le **gradient géothermique** est plus fort dans la lithosphère que dans le manteau sous-jacent. Le transfert de l'énergie géothermique s'effectue par conduction dans la lithosphère et essentiellement par convection dans manteau sous-jacent.



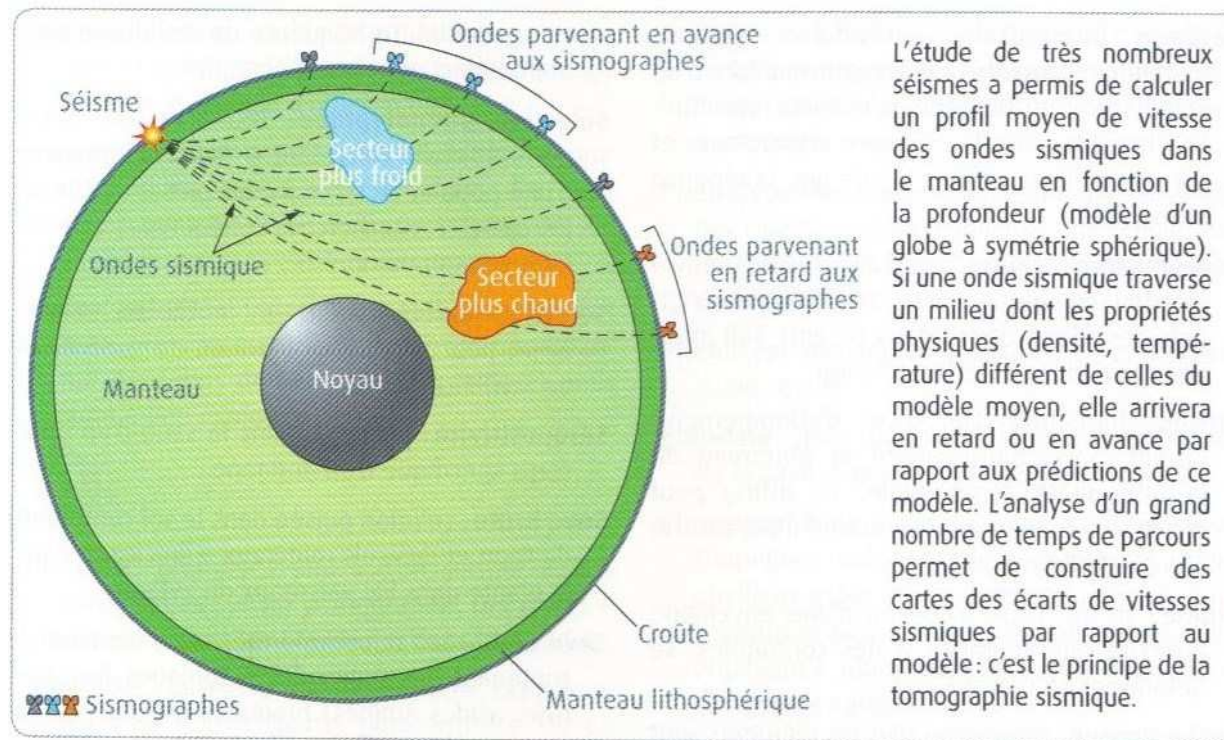
**Modalités de transfert de l'énergie thermique au sein du globe** (le noyau n'est pas représenté).



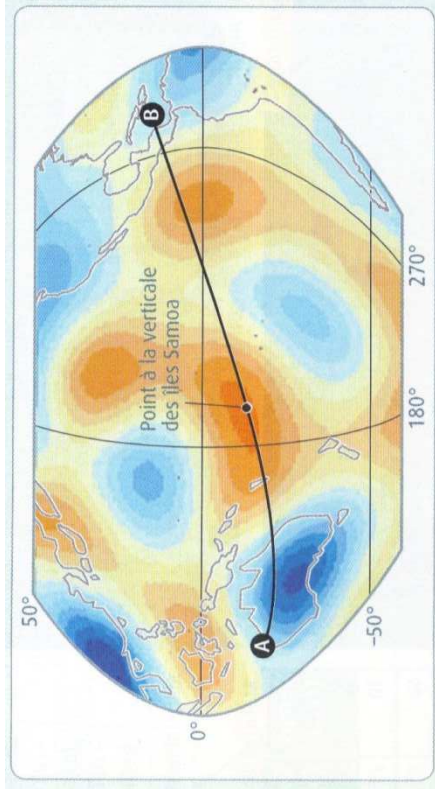
Structures thermiques de la conduction et de la convection

## - V - La Terre, machine thermique

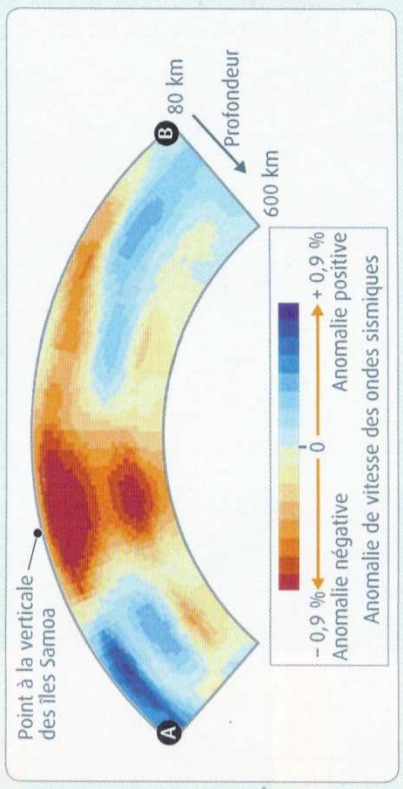
Tomographie sismique : technique permettant de cartographier l'intérieur du globe terrestre en 3 dimensions en utilisant les anomalies de vitesse des ondes sismiques.



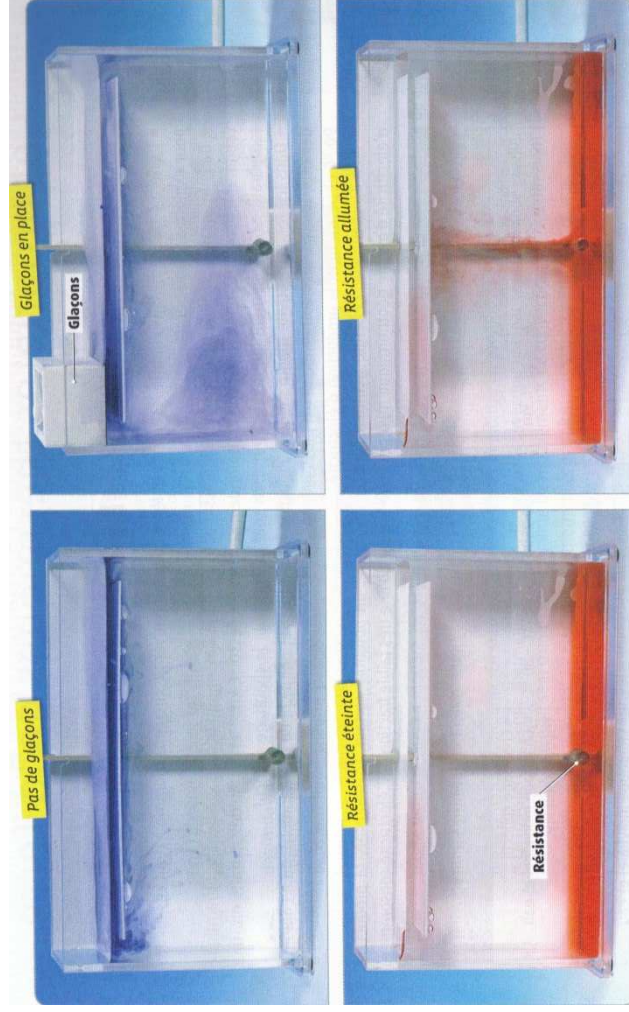




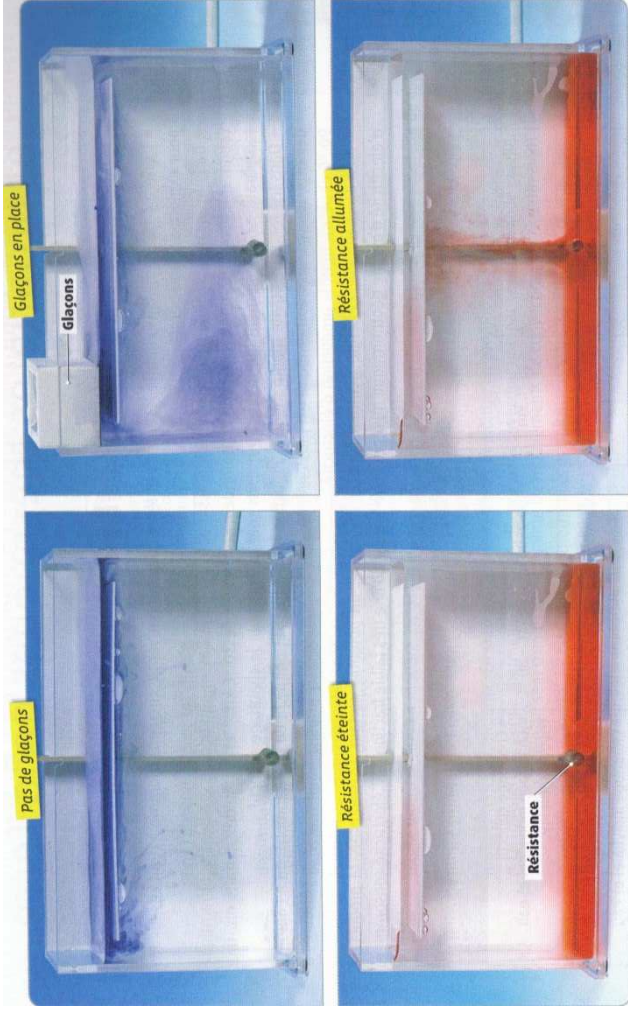
**Tomographie sismique à 200 km de profondeur sous l'océan Pacifique.**



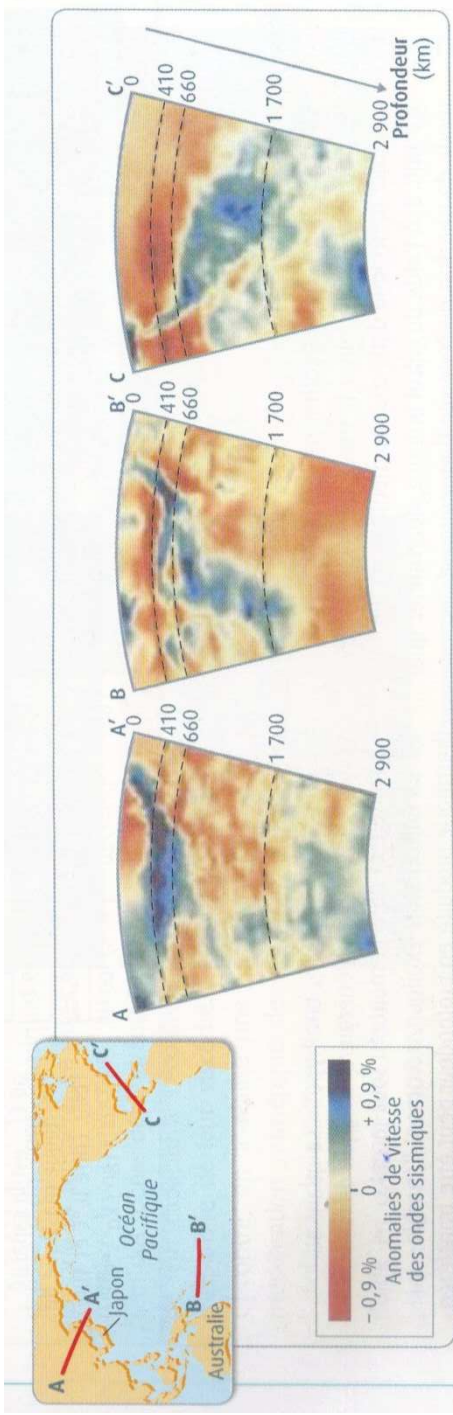
**Tomographie sismique entre 80 et 600 km de profondeur sous le trajet A-B.** La zone d'anomalie négative à l'aplomb des îles Samoa se prolonge jusqu'à 2 900 km de profondeur dans le manteau.



**3 Une modélisation analogique.** Dans un aquarium rempli d'eau, on a déposé au fond une couche d'eau colorée en rouge et, en surface, une couche d'eau colorée en bleu. Cette dernière peut être refroidie localement par des glaçons. Une résistance permet de chauffer localement la base de la couche rouge.

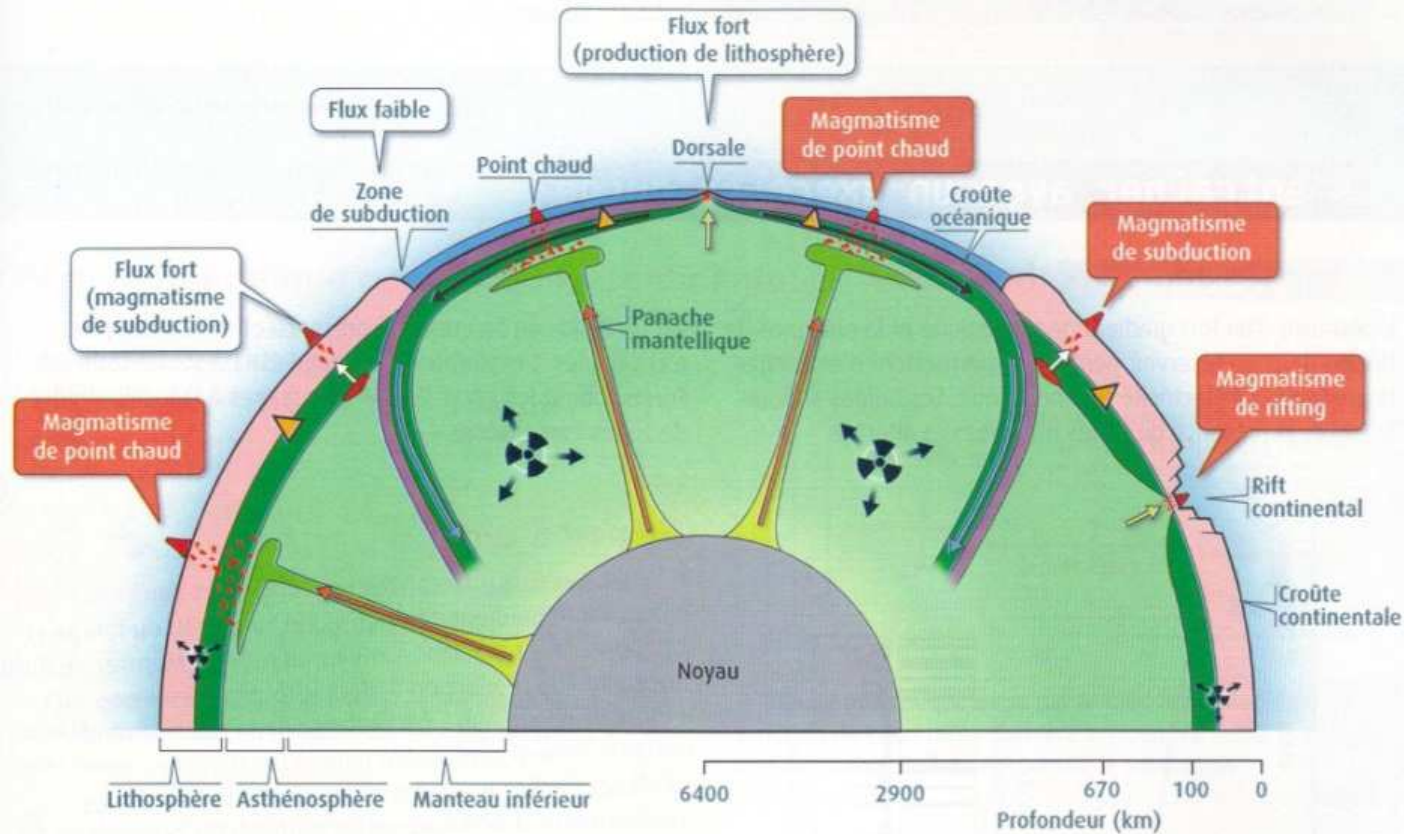


**3 Une modélisation analogique.** Dans un aquarium rempli d'eau, on a déposé au fond une couche d'eau colorée en rouge et, en surface, une couche d'eau colorée en bleu. Cette dernière peut être refroidie localement par des glaçons. Une résistance permet de chauffer localement la base de la couche rouge.



**2 Étude des marges de l'océan Pacifique par tomographie sismique.** Trois tomographies ont été réalisées entre 0 et 2900 km de profondeur à la verticale des trajets A-A', B-B' et C-C'.

## La Terre, machine thermique



\*L'épaisseur de la croûte continentale a été exagérée

Contexte favorable à la production d'électricité d'origine géothermique

Divergence des plaques de lithosphère océanique

Production d'énergie géothermique par désintégration d'éléments radioactifs

Ascension de matériau mantellique profond, solide et chaud (dissipation d'énergie géothermique par convection)

Plongement d'une lithosphère océanique âgée, refroidie et plus dense que le manteau sous-jacent (mouvement de convection descendant)

Remontée passive de matériau mantellique peu profond, solide et chaud

Dissipation d'énergie géothermique par conduction

# Conclusion

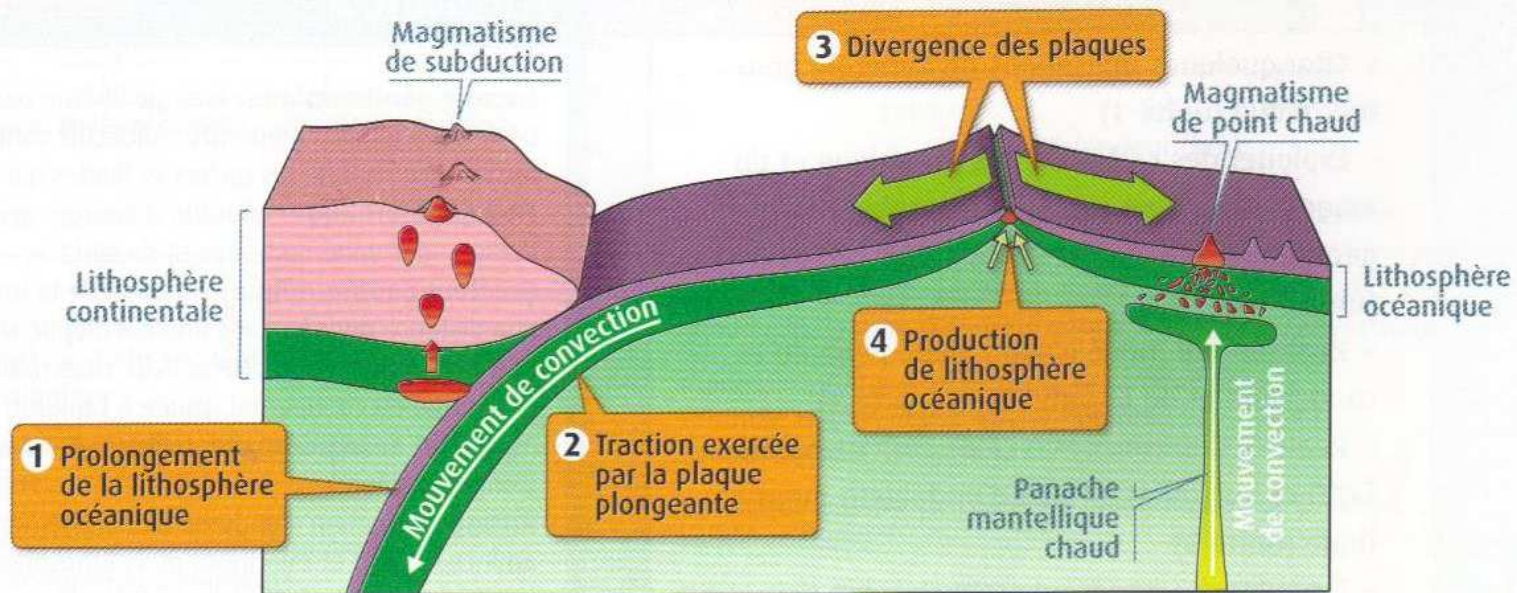
La dissipation de l'énergie géothermique entraîne des mouvements de convection ascendants dans le manteau, d'origine profonde, nommés panaches mantelliques.

L'énergie géothermique est dissipée par conduction au sein de la lithosphère, ce qui la refroidit. Lorsque celle-ci devient plus dense que l'asthénosphère, elle plonge alors, ce qui correspond à un mouvement de convection descendant. Cela exerce une traction sur toute la lithosphère océanique, à l'origine d'un mouvement de divergence des plaques au niveau de la dorsale.

La dissipation de l'énergie thermique est donc à l'origine du mouvement des plaques lithosphériques et des mouvements de convection dans le manteau sous-jacent.

# Bilan

- La **tomographie sismique** permet d'observer des mouvements ascendants de matière chaude et solide de grande ampleur au sein du manteau. Ces panaches mantelliques initiés en profondeur sont associés au magmatisme de point chaud. Ils sont à l'origine d'une dissipation d'énergie thermique par convection.
- La tomographie sismique permet aussi d'observer le plongement de la lithosphère océanique (devenue plus dense par son refroidissement) dans le manteau sous-jacent. Ce plongement, qui correspond à un mouvement de convection descendante, exerce une traction sur le reste de la plaque, contribuant, au niveau de la dorsale, à la divergence des plaques et à la remontée passive de matériau mantellique chaud, solide et peu profond. La fusion partielle de ce manteau produit du magma, dont le refroidissement crée une nouvelle lithosphère.
- La Terre est ainsi une **machine thermique**: la dissipation de l'énergie géothermique est associée à des mouvements du manteau et des plaques lithosphériques, à l'origine de l'activité sismique et magmatique du globe.



Quelques manifestations et conséquences de la convection au sein du manteau.

## L'énergie géothermique : son origine et son exploitation par l'Homme

- L'énergie géothermique provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches des différentes enveloppes terrestres. Elle chauffe les roches en profondeur et les fluides qui peuvent y circuler. L'extraction de ces fluides permet à l'Homme de prélever l'énergie géothermique et de l'utiliser notamment pour le chauffage collectif et, si les fluides sont suffisamment chauds, pour la production d'électricité.
- Les zones les plus favorables à la production d'électricité d'origine géothermique sont celles qui présentent une forte activité magmatique (magmatisme de subduction, de **point chaud** et de **rifting**). Le **gradient géothermique** y est supérieur au gradient géothermique moyen sous les continents.
- Le prélèvement de cette énergie ne représente qu'une infime partie de ce qui est dissipé en surface. Son exploitation, associée à d'autres énergies renouvelables, constitue une des alternatives aux énergies fossiles.

## Le transfert en surface de l'énergie géothermique

- Le transfert de l'énergie géothermique depuis les profondeurs de la Terre vers les enveloppes superficielles est à l'origine d'un **flux géothermique** qui est émis en surface. L'énergie géothermique est transférée par conduction dans la lithosphère (propagation de proche en proche, sans mouvement de matière) et essentiellement par convection (impliquant des mouvements de matière à l'état solide) dans le manteau sous-jacent.
- La convection au sein du manteau se manifeste par l'ascension de roches mantelliques chaudes et à l'état solide, et par le plongement de plaques de lithosphère océanique refroidie dans le manteau sous-jacent. L'énergie géothermique est ainsi transformée en énergie mécanique (mouvements de matière) : la Terre est donc une machine thermique.
- Le flux géothermique en surface reflète la dynamique du globe : le flux fort observé à l'aplomb des dorsales est associé à la production de lithosphère océanique ; les zones de subduction présentent à la fois un flux faible associé au plongement de la lithosphère océanique âgée et refroidie, et un flux fort associé à l'arc volcanique résultant du magmatisme de subduction.

## La production d'électricité d'origine géothermique

### Trois contextes favorables

- Zones de subduction
  - Points chauds
  - Rifts continentaux
- )
- Flux et gradient géothermiques forts
  - Activité magmatique

### Avantages

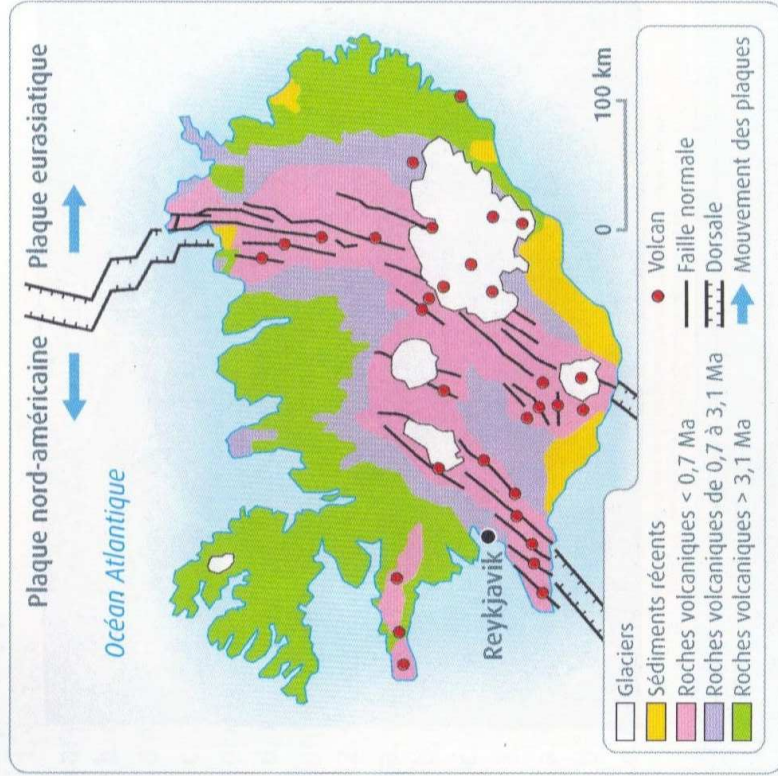
- Ressource inépuisable
- Permet une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> atmosphérique

### Limites

- Ressource inégalement répartie
- Production très loin de satisfaire les besoins mondiaux

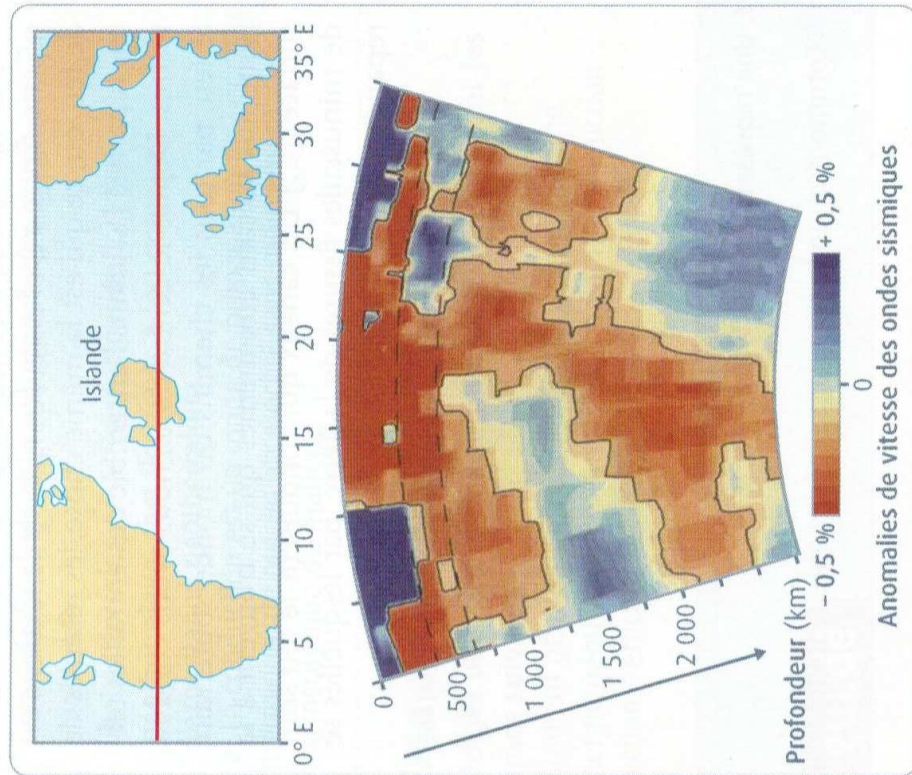
# Le potentiel d'exploitation géothermique en Islande ..... Mettre en relation des informations

En Islande, sixième pays producteur d'électricité géothermique, plus de 90% des habitations sont chauffées par géothermie.



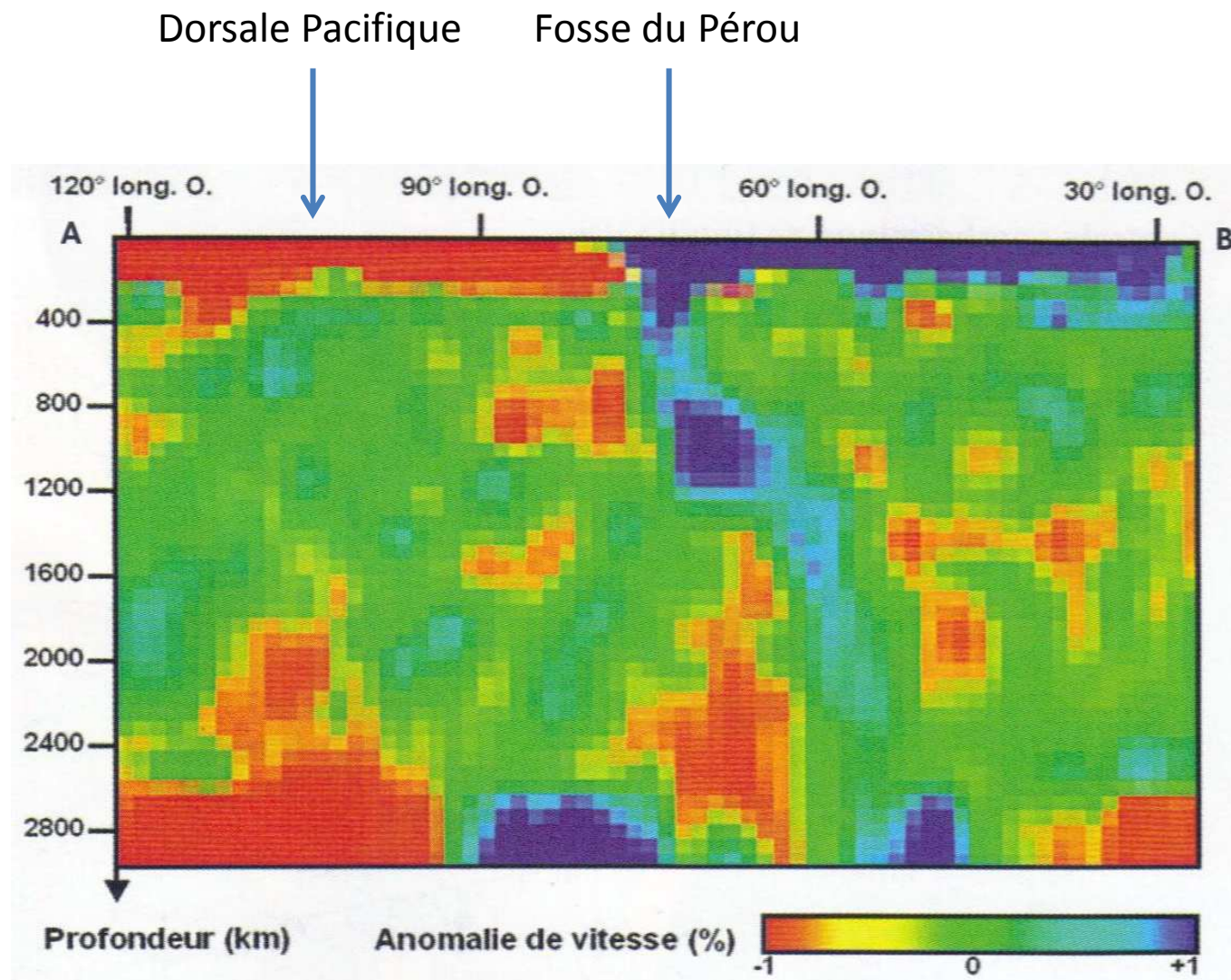
1. Carte géologique simplifiée de l'Islande.

● En exploitant les documents présentés, proposez une explication au fort potentiel d'exploitation géothermique en Islande.



2. Étude du manteau sous l'Islande par tomographie sismique.





Tomographie sismique verticale entre l'Atlantique sud et le Pacifique sud

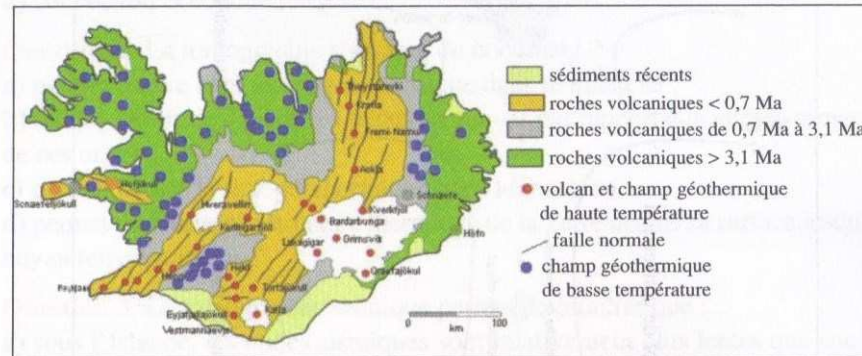
# Géothermie et propriétés thermiques de la Terre (sujet 2a)

L'énergie géothermique utilisable par l'homme est variable d'un endroit à l'autre. Certains pays sont situés dans des zones géographiques particulièrement favorables à l'exploitation de cette ressource énergétique. Par exemple, en Islande, la géothermie couvre plus de 90% des besoins énergétiques liés au chauffage individuel et plus de 20% de la production d'électricité.

**En exploitant les données présentées dans les documents, on cherche à comprendre pourquoi le contexte géodynamique dans lequel se trouve l'Islande permet à ce pays de bénéficier d'importantes ressources d'origine géothermique.**

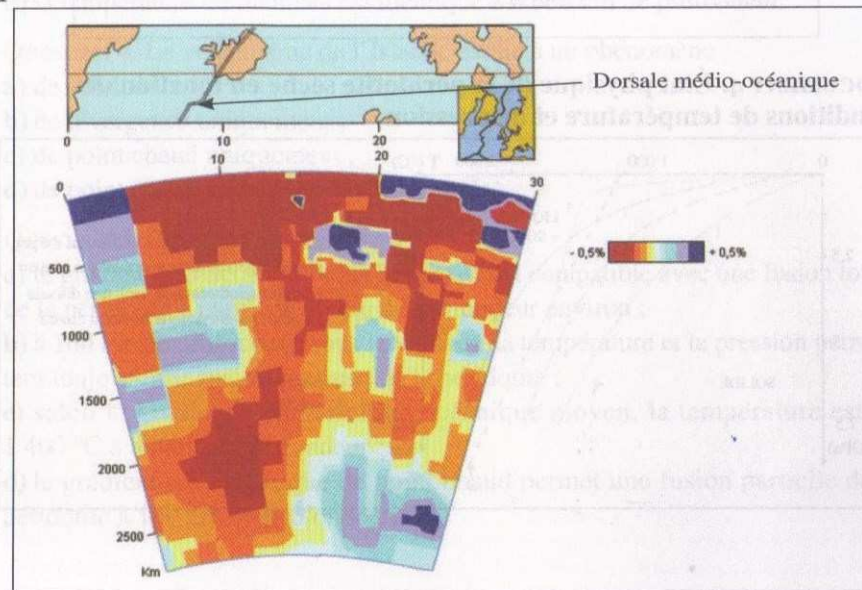
**Cochez la proposition exacte pour chaque question.**

### DOCUMENT 1. Carte géologique simplifiée de l'Islande



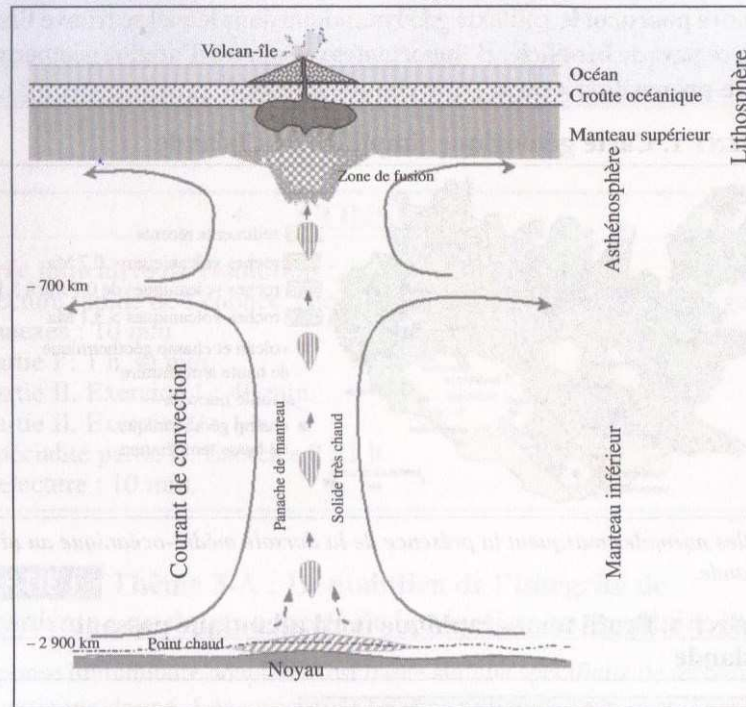
Les failles normales marquent la présence de la dorsale médio-océanique au niveau de l'Islande.

### DOCUMENT 2. Profil tomographique nord atlantique passant par l'Islande

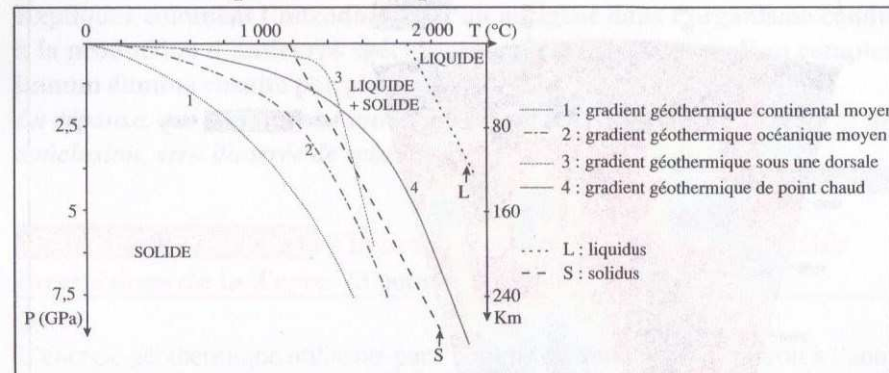


Anomalies de vitesse des ondes sismiques P par rapport à la vitesse moyenne.

**DOCUMENT 3. Modèle standard de l'origine d'un point chaud**



**DOCUMENT 4. État physique de la péridotite sèche en fonction des conditions de température et de pression**



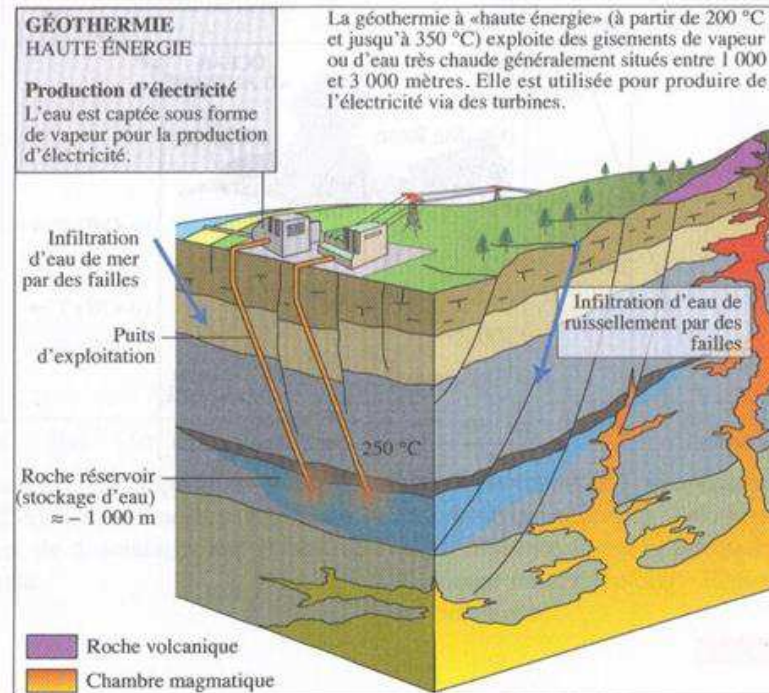
**PARTIE II. Exercice 2** Thème 2-A : Géothermie et propriétés thermiques de la Terre (5 points)

En 2009, la part de la géothermie dans la production d'électricité en France dépassait à peine 0,01 % de la production électrique totale. L'essentiel est fourni par l'usine de Bouillante en Guadeloupe qui dispose d'une capacité de 15 MW. La centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe fournit actuellement environ 7 % des besoins en électricité de l'île.

**Question**

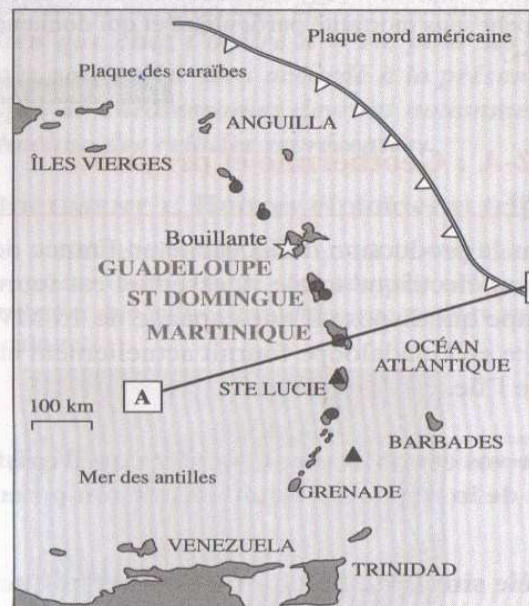
À partir des documents fournis et de vos connaissances, montrez qu'il existe un lien entre le contexte géologique de la région de Bouillante et son potentiel géothermique.

**DOCUMENT DE RÉFÉRENCE. Modèle simplifié du champ géothermique de Bouillante**

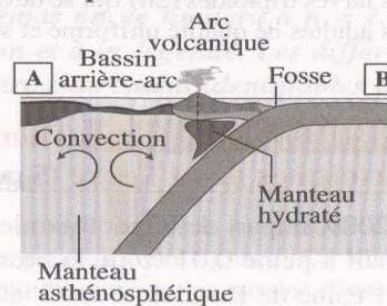


## DOCUMENT I. Situation géographique et contexte géologique de la Guadeloupe

### A - Situation géographique et géologique de la Guadeloupe.

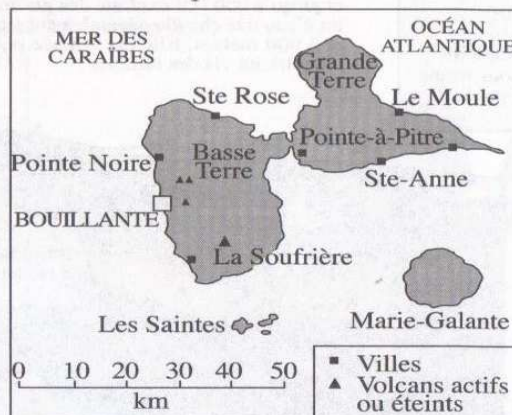


### Coupe idéalisée entre A et B

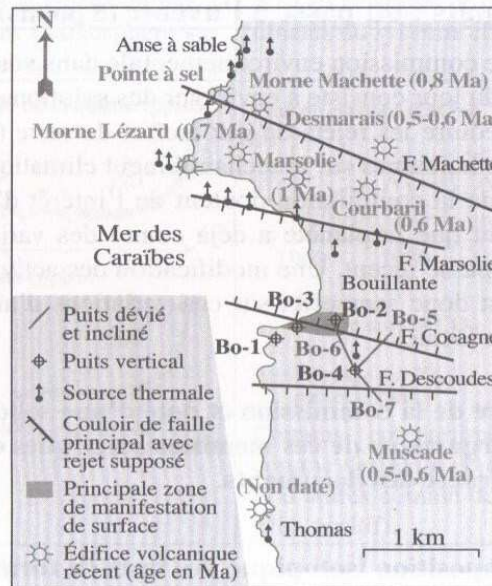


- ☆ Centrale géothermique en service
- ▲ Ressource géothermique identifiée
- Ressource géothermique potentielle
- ▽▽▽ Front de la subduction - Fosse

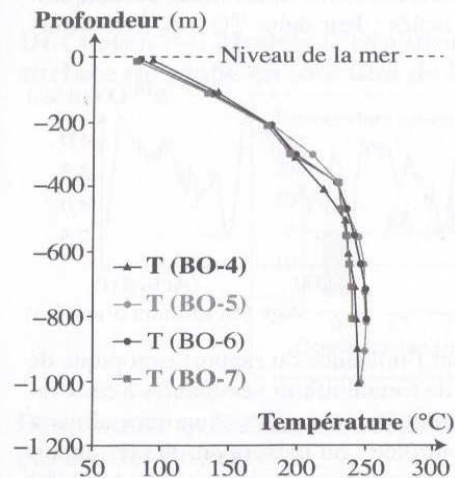
### B - La Guadeloupe : une île volcanique.



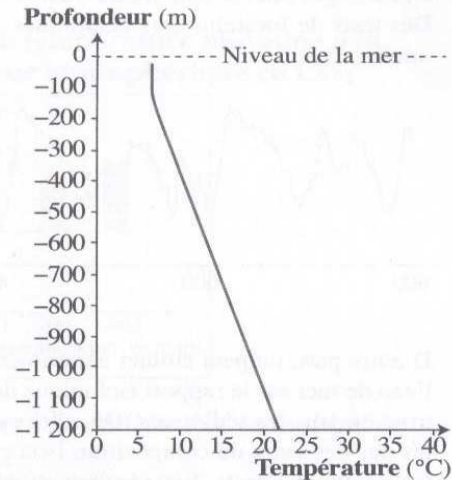
**DOCUMENT 2. Ressources géothermiques de la région de Bouillante (Guadeloupe)**



**DOCUMENT 3**



**A** - Évolution des températures mesurées pour différentes profondeurs (géotherme) au cours de 4 sondages sur le site de Bouillante.



**B** - Évolution de la température en fonction de la profondeur - Géotherme moyen de référence (mesures effectuées dans un forage minier profond). Région minière canadienne.