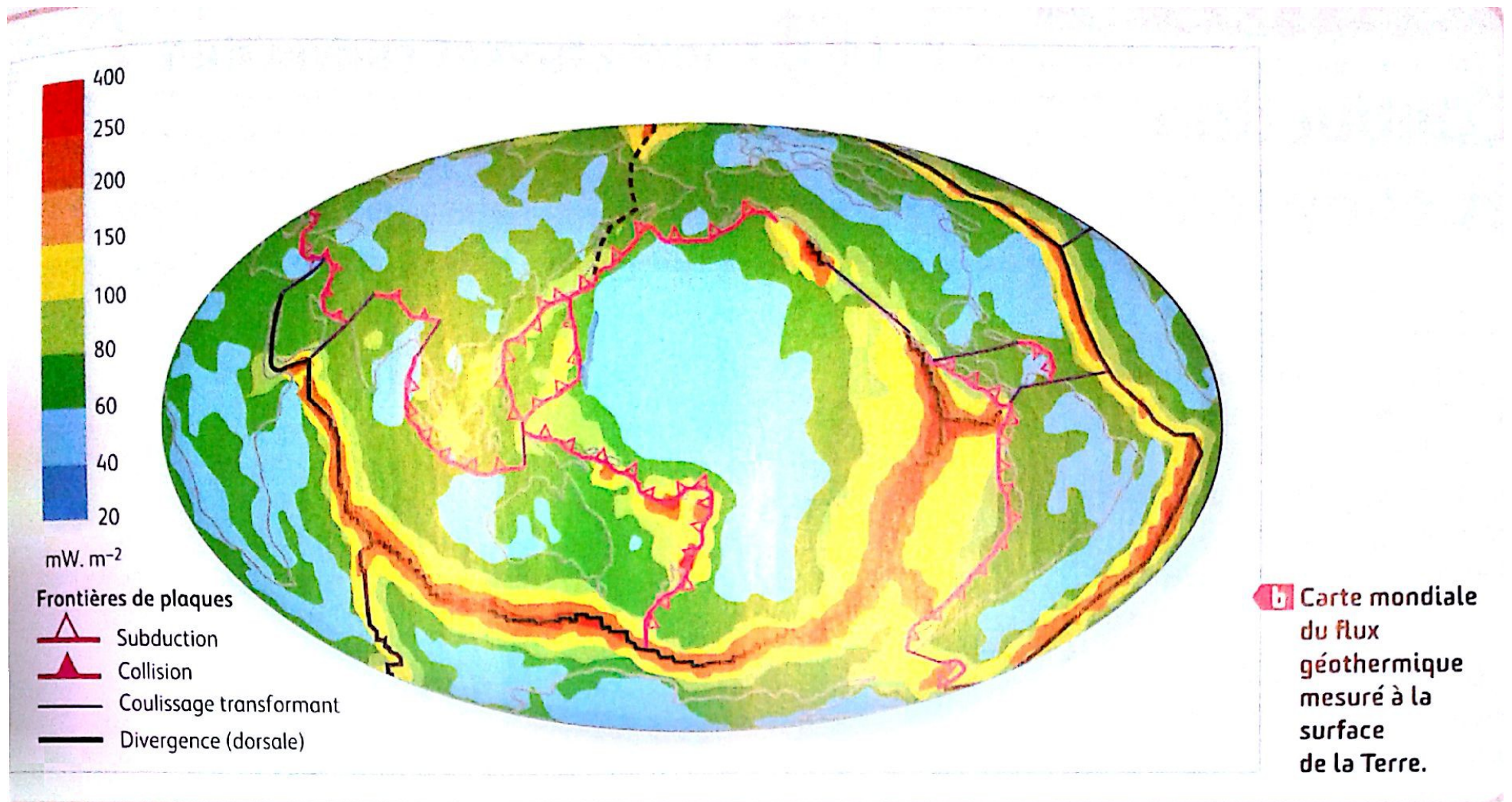


Géothermie



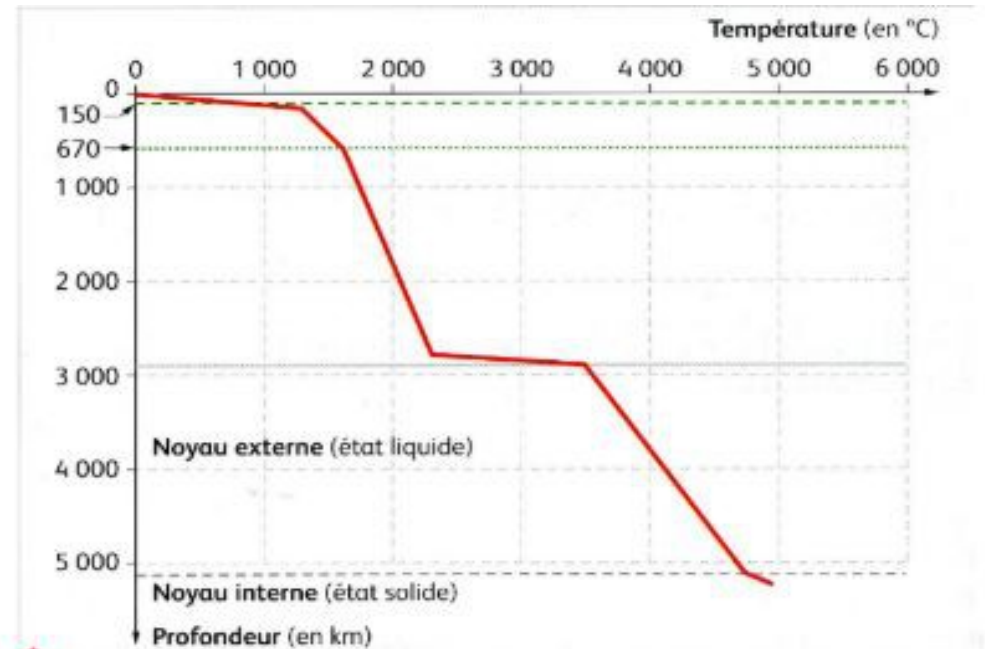
Flux de chaleur sur Terre



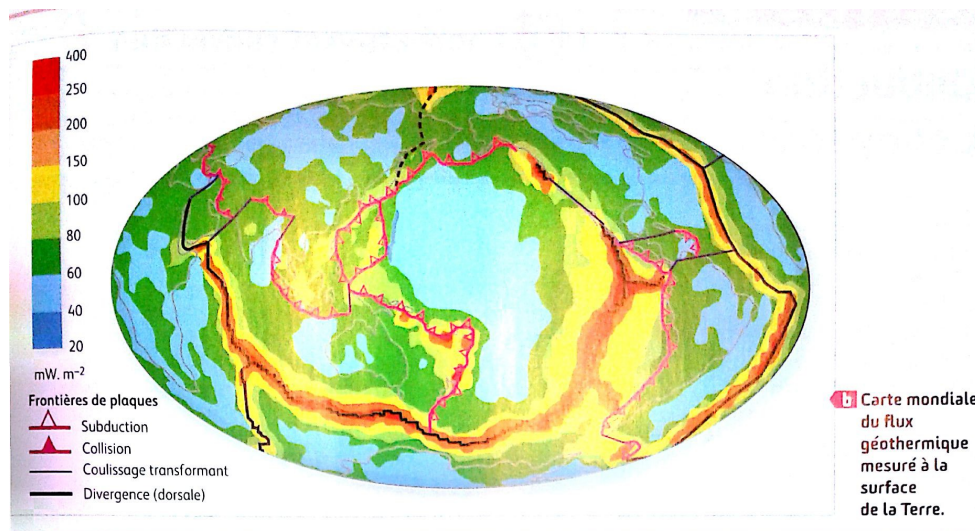
Flux de chaleur sur Terre

Le gradient géothermique

- C'est l'augmentation de la température terrestre avec la profondeur.
- Il est évalué à environ $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ dans la lithosphère, puis, en-dessous, il chute à $0,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$.



b Profil de température en fonction de la profondeur, ou géotherme. Dans le noyau, la cristallisation lente du noyau liquide au profit du noyau solide libère de l'énergie.



c Carte mondiale du flux géothermique mesuré à la surface de la Terre.

Flux de chaleur sur Terre

Le gradient géothermique

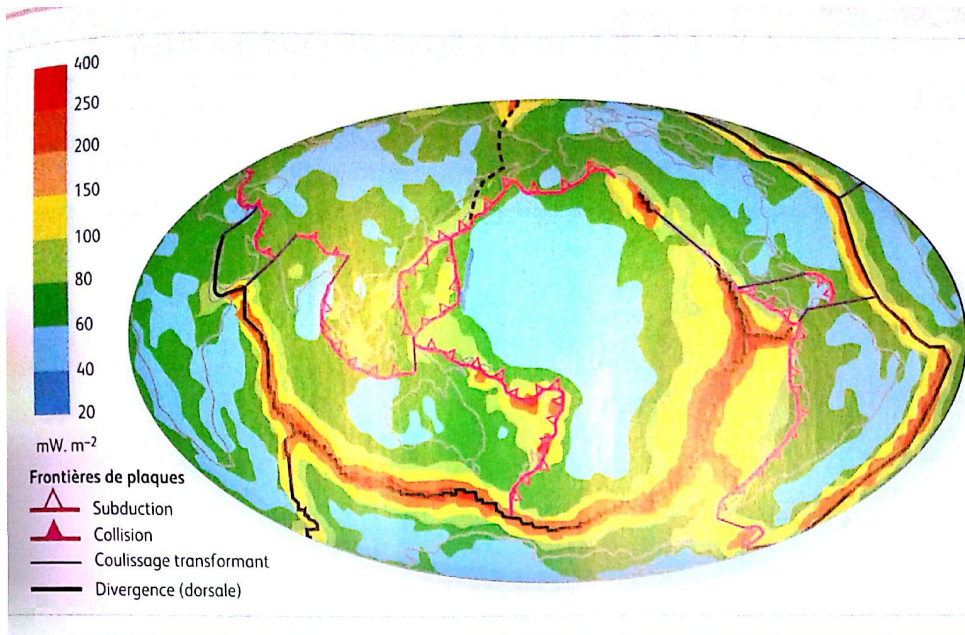
- C'est l'augmentation de la température terrestre avec la profondeur.
- Il est évalué à environ $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ dans la lithosphère, puis, en-dessous, il chute à $0,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Flux géothermique :

quantité d'énergie thermique (chaleur interne) dissipée à travers la surface du globe, par unité de surface et de temps (en $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$). En moyenne $65 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$

► transfert de chaleur des profondeurs chaudes de la Terre vers la surface plus froide

dépend donc directement du gradient géothermique et de la capacité des roches à conduire la chaleur



Carte mondiale du flux géothermique mesuré à la surface de la Terre.

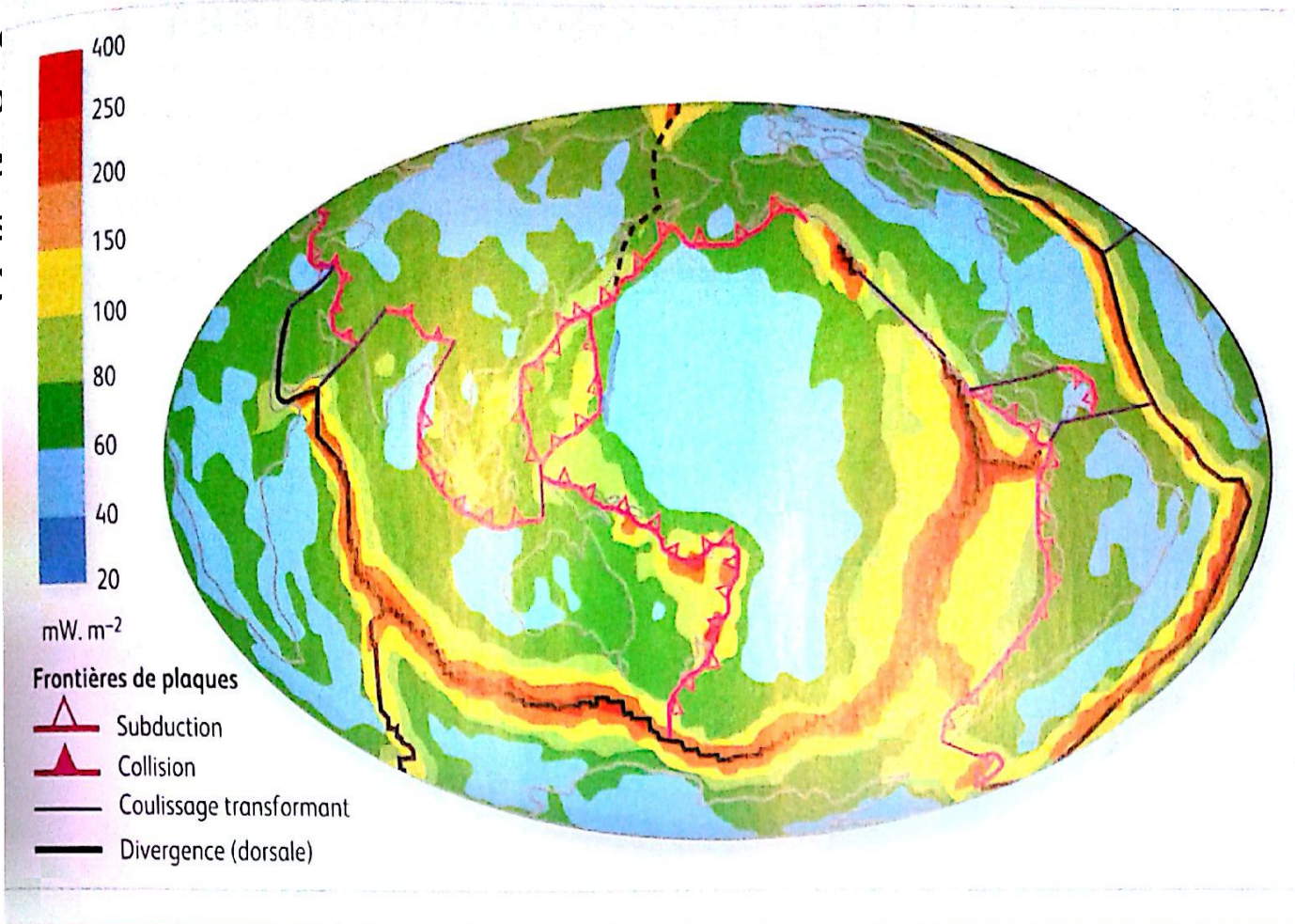
Flux de chaleur sur Terre

Le gradient géothermique

- C'est la variation de température en fonction de la profondeur.
- Il est en moyenne de 0,5°C par 100 mètres de profondeur.

Flux géothermique :

quantité d'énergie thermique (chaleur) qui s'échappe de la Terre à la surface du globe par unité de surface et de temps (en mW.m⁻²).
Il est plus élevé dans les zones de divergence des plaques tectoniques et plus faible dans les zones de subduction.



b Carte mondiale du flux géothermique mesuré à la surface de la Terre.

L'origine de la chaleur interne de la Terre

La radioactivité

- plus de 90% de la chaleur du globe.
- principaux éléments radioactifs l'uranium (^{238}U et ^{235}U), le thorium (^{232}Th) et le potassium (^{40}K).
- Le manteau est moins concentré en éléments radioactifs que la croûte, mais son important volume en fait le principal producteur d'énergie interne (2/3 de l'énergie totale)

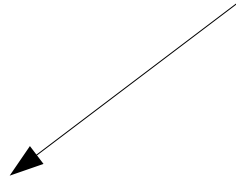
Les différentes enveloppes terrestres contiennent des éléments radioactifs : uranium (^{238}U et ^{235}U), thorium (^{232}Th) et potassium (^{40}K). Leur désintégration produit de l'énergie thermique : $9,94 \cdot 10^{-5} \text{ W.kg}^{-1}$ pour ^{238}U et ^{235}U réunis ; $2,69 \cdot 10^{-5} \text{ W.kg}^{-1}$ pour ^{232}Th ; $2,79 \cdot 10^{-5} \text{ W.kg}^{-1}$ pour ^{40}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}U et ^{235}U	^{232}Th	^{40}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.

L'origine de la chaleur interne de la Terre



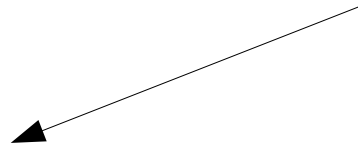
La radioactivité

- plus de 90% de la chaleur du globe.
- principaux éléments radioactifs l'uranium(^{238}U et ^{235}U), le thorium(^{232}Th) et le potassium(^{40}K).
- Le manteau est moins concentré en éléments radioactifs que la croûte, mais son important volume en fait le principal producteur d'énergie interne (2/3 de l'énergie totale)

Le refroidissement de la Terre

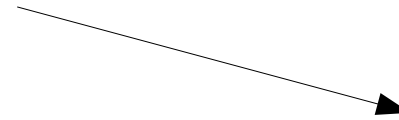
La Terre restitue lentement l'énergie accumulée au cours de sa formation par accrétion il y a 4,5Ga (chaleur primitive)

Transfert de chaleur au sein de la planète



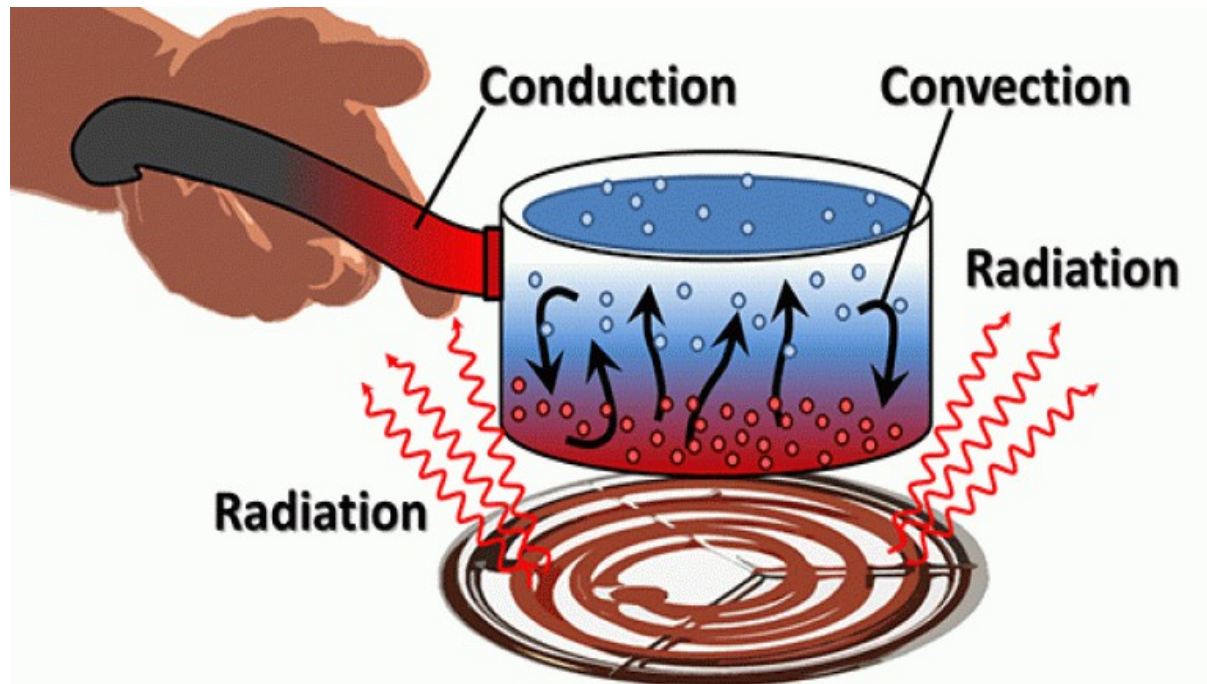
La conduction de chaleur

► C'est un transfert de chaleur de proche en proche, sans déplacement de matière, par agitation des atomes

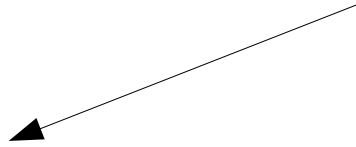


La convection de chaleur

► C'est un transfert de chaleur par déplacement de matière dans le milieu : les zones chaudes, moins denses, ont tendance à s'élever.

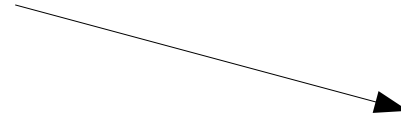


Transfert de chaleur au sein de la planète



La conduction de chaleur

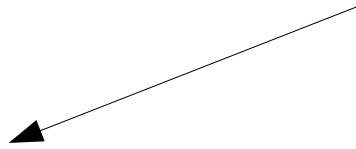
- ▶ transfert de chaleur de proche en proche, sans déplacement de matière, par agitation des atomes
- ▶ transfert peu efficace car la conductivité thermique des roches est faible → forts gradients thermiques entre 2 régions voisines ($30^{\circ}\text{C}/\text{km}$)



La convection de chaleur

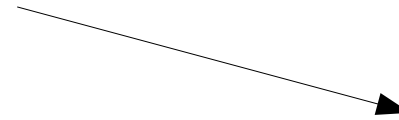
- ▶ transfert de chaleur par déplacement de matière dans le milieu : les zones chaudes, moins denses, ont tendance à s'élever.
- ▶ La matière en mouvement garde pratiquement sa température → mode de déplacement de la chaleur très efficace. → gradient thermique entre 2 régions voisines donc faible ($0,3^{\circ}\text{C}/\text{km}$). ▶ L

Transfert de chaleur au sein de la planète



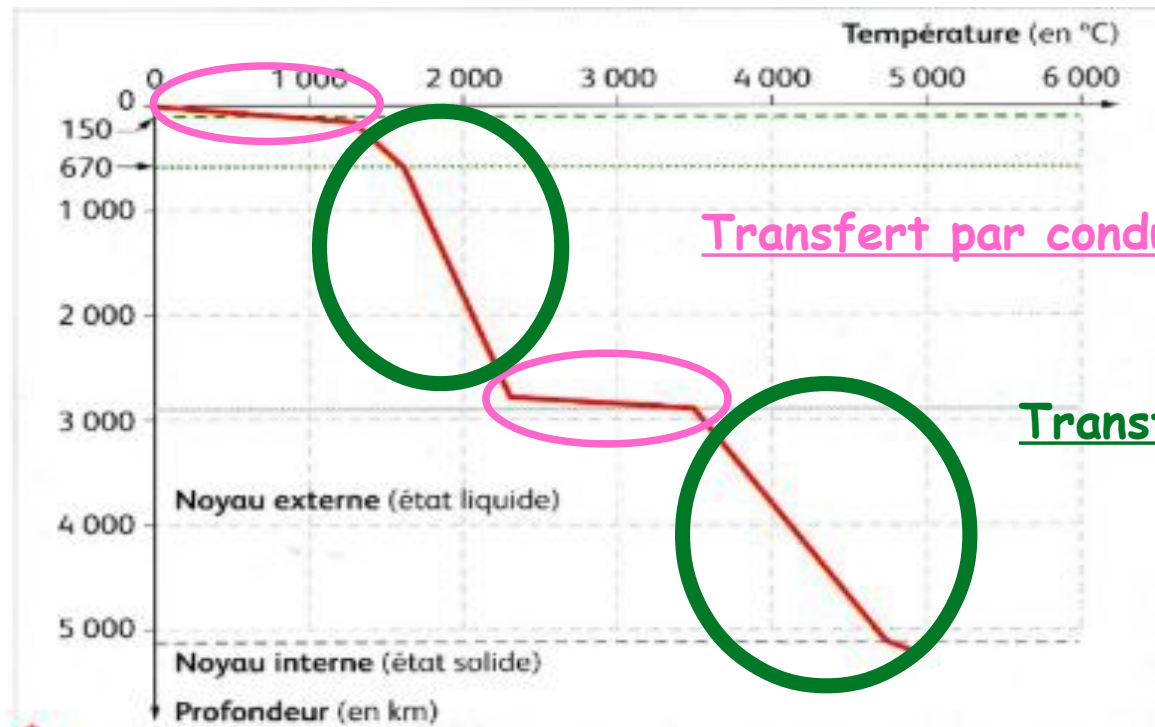
La conduction de chaleur

forts gradients thermiques entre 2 régions voisines ($30^{\circ}\text{C}/\text{km}$)



La convection de chaleur

.-> gradient thermique entre 2 régions voisines donc faible ($0,3^{\circ}\text{C}/\text{km}$). ▶ L

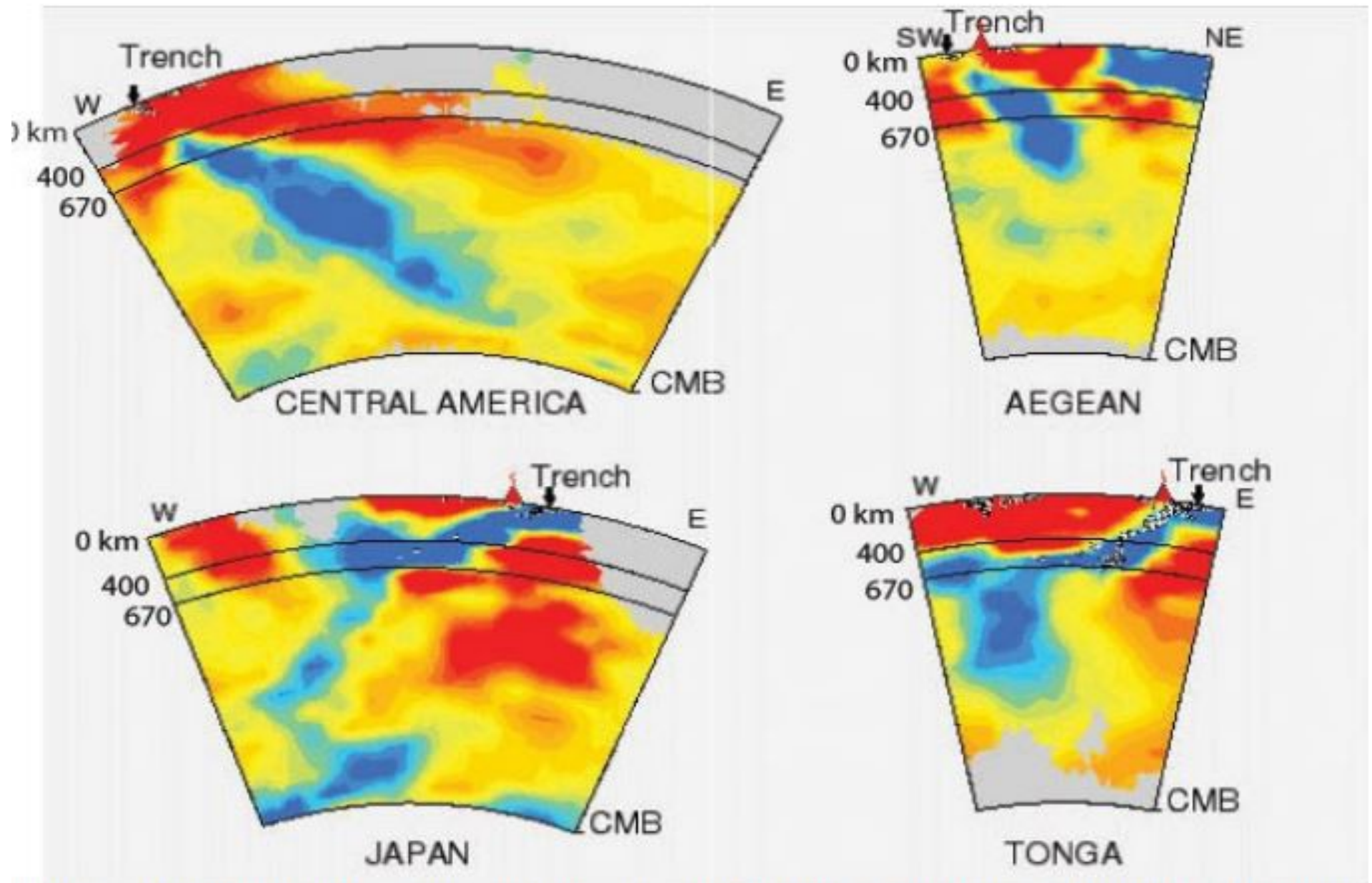


Transfert par conduction

Transfert par convection

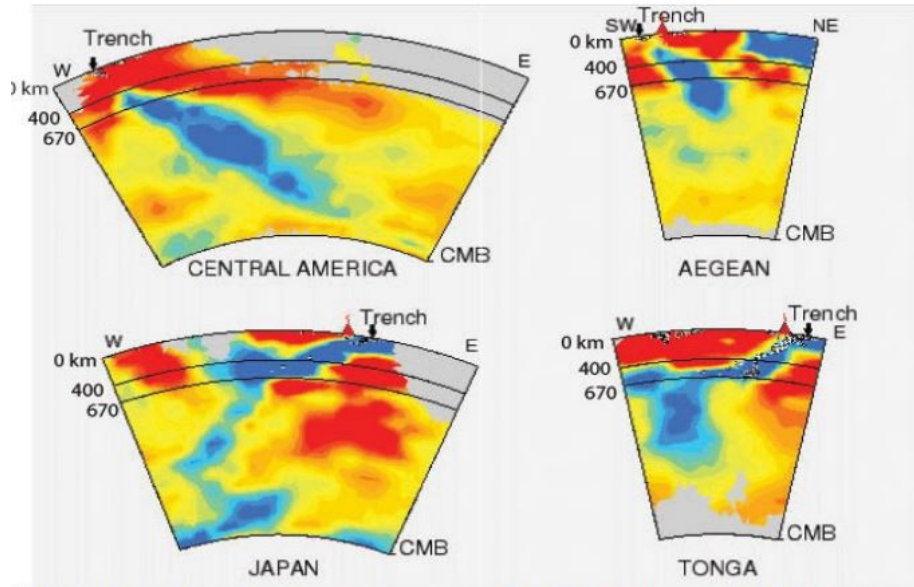
b Profil de température en fonction de la profondeur, ou géotherme. Dans le noyau, la cristallisation lente du noyau liquide au profit du noyau solide libère de l'énergie.

Transfert de chaleur au sein de la planète



Images tomographiques au niveau de l'Amérique centrale (Central America), Japon (Japan), Égée (Aegean) et Tonga.

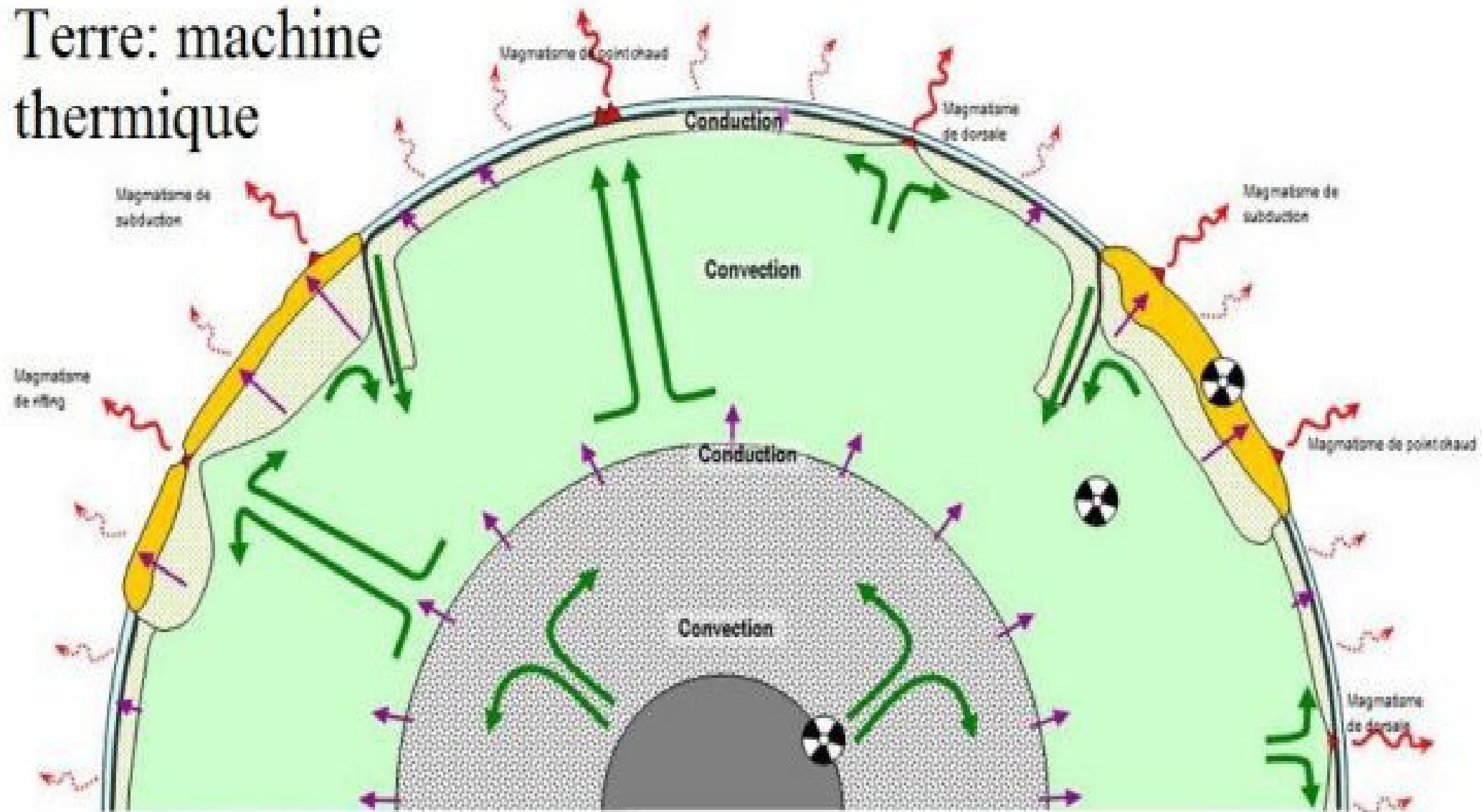
Transfert de chaleur au sein de la planète
















Images tomographiques au niveau de l'Amérique centrale (Central America), Japon (Japan), Égée (Aegean) et Tonga.

- On met ainsi en évidence une remontée de matériaux chauds du manteau au niveau des dorsales, ce qui provoque la fusion partielle des péridotites dans les chambres magmatiques, et la formation des basaltes et gabbros de la croûte océanique.
- Au niveau des zones de subduction, on constate un mouvement descendant de matière froide et dense vers les profondeurs.

Terre: machine thermique

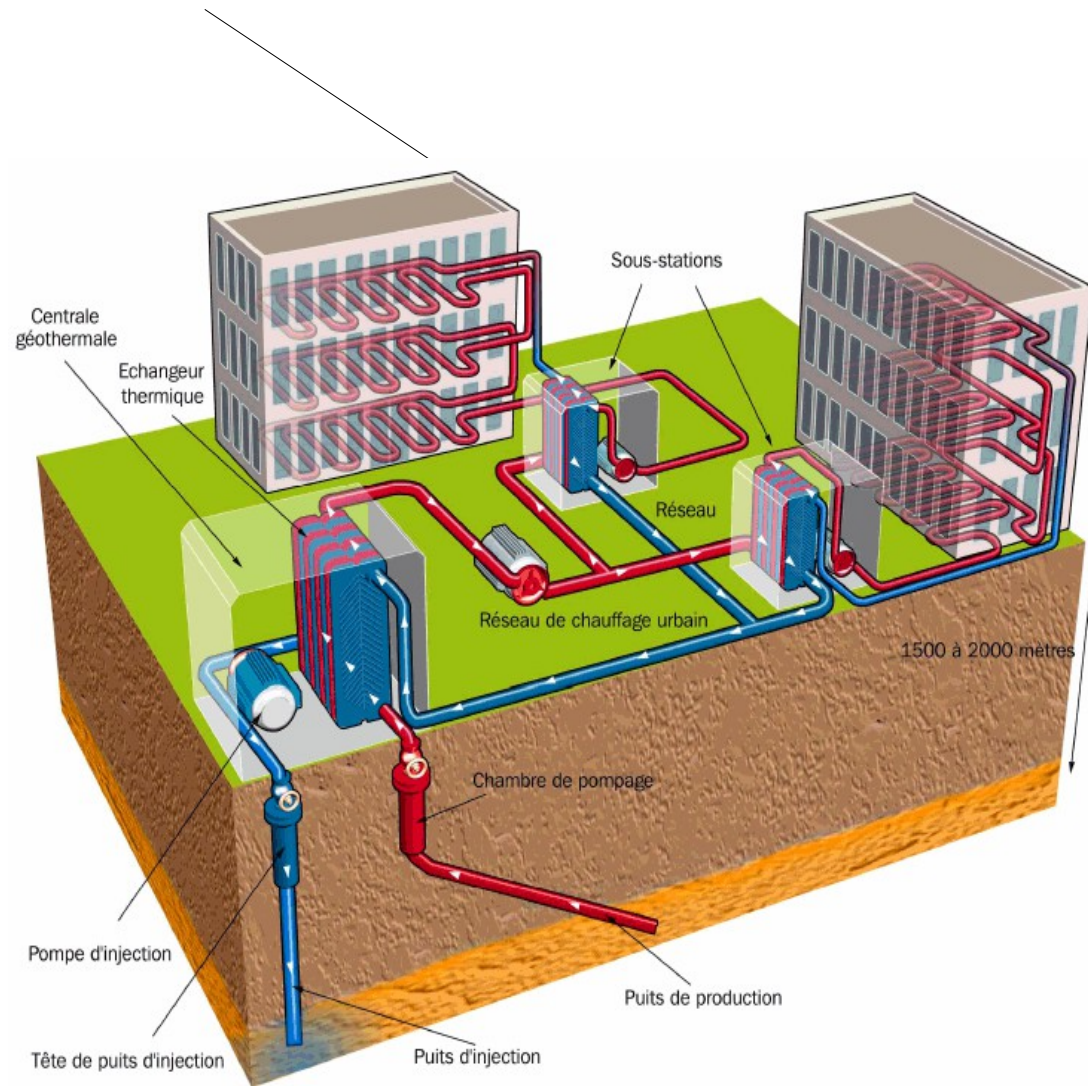


 Flux géothermique	 Mouvements convectifs	 Noyau interne	 Manteau lithosphérique
 Radioactivité (libération d'énergie)	 Conduction thermique	 Noyau externe	 Croûte continentale
 Volcans	 Magmatisme de rifting et de dorsale	 Manteau inférieur et asthénosphère	 Croûte océanique
		 Océan	

La géothermie, une énergie exploitée par l'Homme

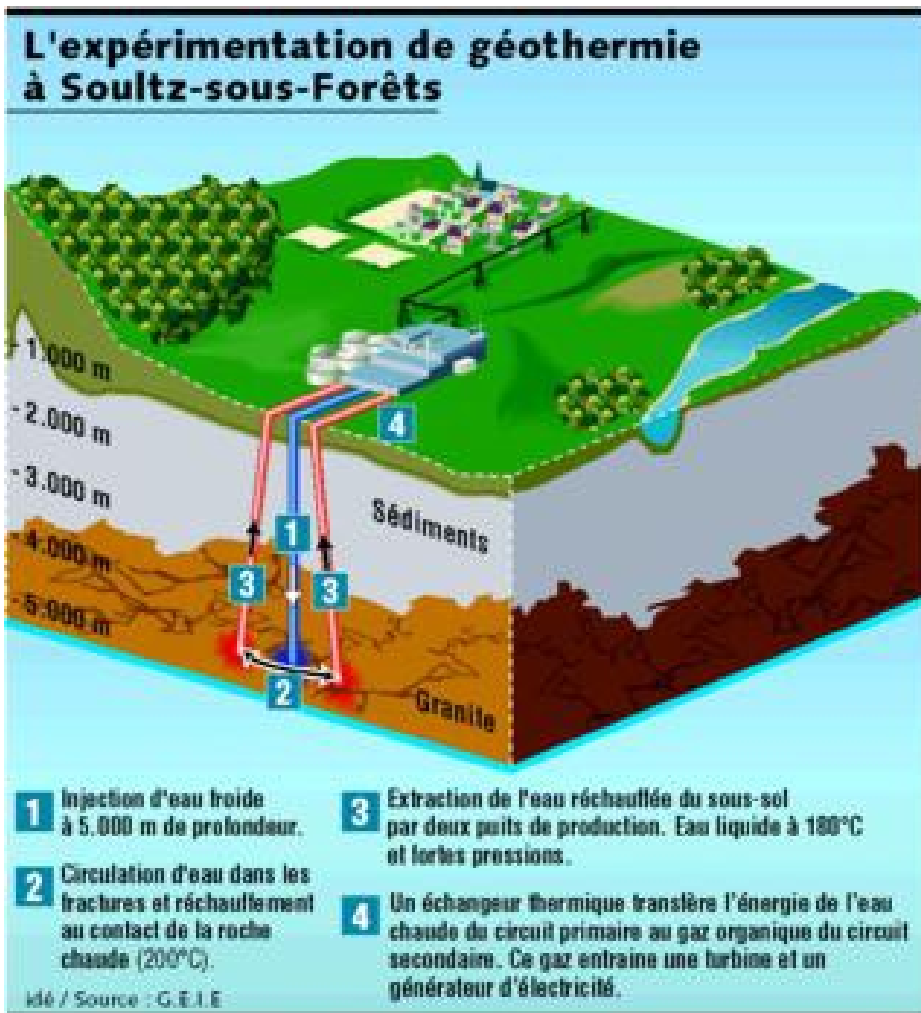
Géothermie de basse énergie

- ▶ Elle utilise la chaleur libérée par les eaux chaudes (30° - 100°C) des nappes phréatiques, situées dans des réservoirs peu profonds (ex: bassin parisien).
- ▶ Cette énergie thermique est utilisée pour les chauffages collectifs ou individuels
- ▶ L'eau chaude est prélevée par forage; l'eau refroidie est réinjectée dans le sous-sol: c'est un circuit fermé, on parle de boucle géothermale



La géothermie, une énergie exploitée par l'Homme

Géothermie de basse énergie

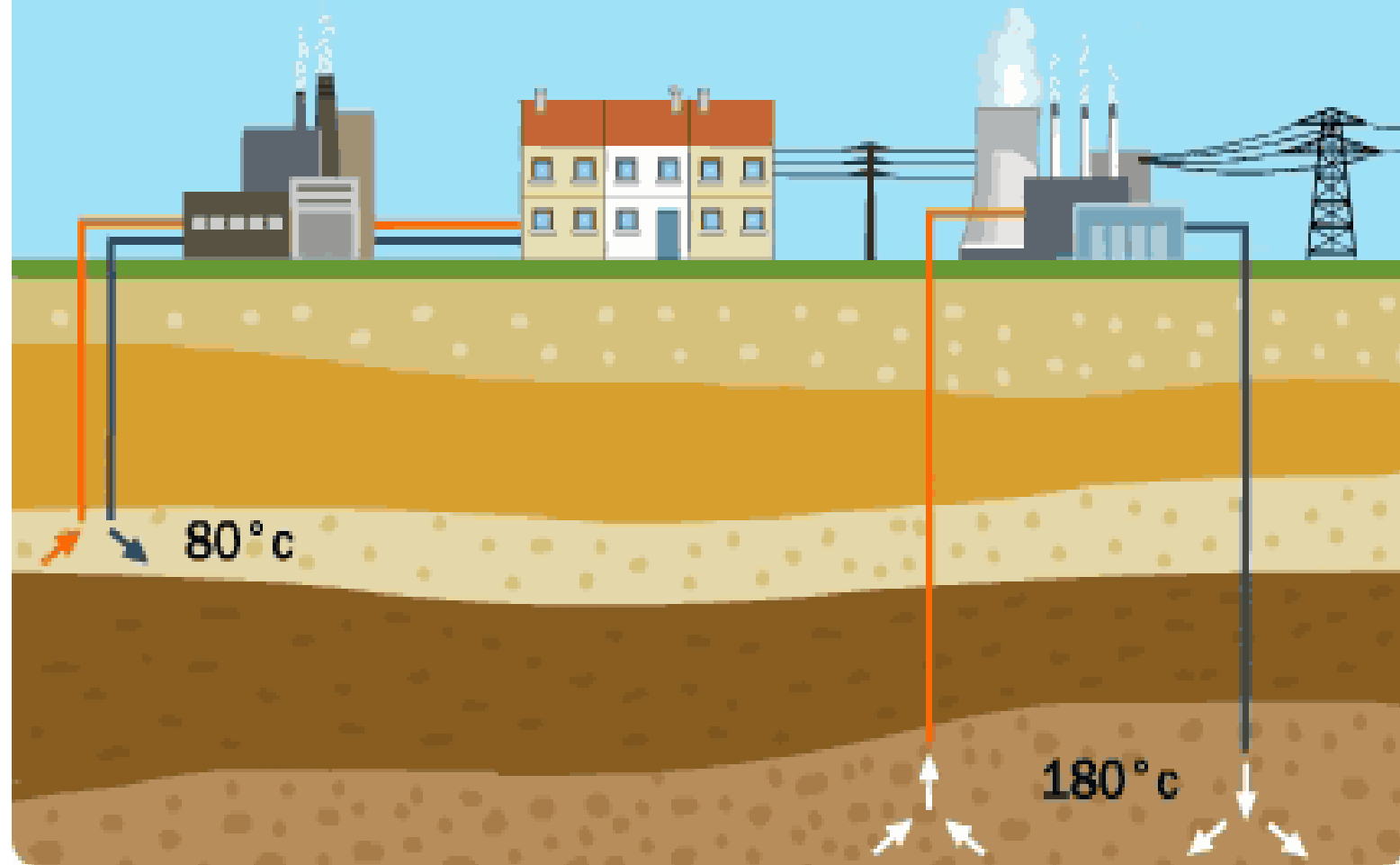


La géothermie de haute énergie

- Les régions concernées ont un fort gradient géothermique (sites volcaniques des zones de subduction, points chauds, rifts continentaux = zones d'étirement, de fracturation et d'effondrement de la croûte continentale).
- Les forages sont très profonds et permettent de récupérer l'eau qui s'est infiltrée et réchauffée à proximité d'un réservoir magmatique jusqu'à 300°C.
- Cette énergie thermique est utilisée pour les produire de l'électricité.

centrale de chauffage
(échangeur de chaleur)

centrale électrique
(turbine et générateur)



GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

Chauffage de piscines, de serres...
Bien qu'elle présente une faible température, l'eau peut directement être utilisée pour le chauffage de piscines, serres ou bassins de pisciculture.

Chauffage par pompe à chaleur.
La température de l'eau insuffisante pour le chauffage direct de locaux, nécessite de recourir à des pompes à chaleur sur eau souterraine ou à des sondes géothermiques.

Chauffage de maisons individuelles.
Les calories nécessaires au chauffage sont prélevées par un dispositif associant une pompe à chaleur à un capteur enterré dans le sous-sol superficiel.

GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

Chauffage urbain collectif.
Le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter des réseaux de chaleur.

GÉOTHERMIE PROFONDE

La température des roches chaudes fracturées à grande profondeur permet de produire de la vapeur pour l'alimentation des centrales électriques.

