

ATTENTION : EN ENCADRE ROUGE = CE QUI EST A SAVOIR ABSOLUMENT

Pb. Scientifique général du CHAP. 17 : Comment exploite-t-on l'énergie géothermique ? Quels processus produisent l'énergie géothermique ?

- CHAPITRE 17 - GEOTHERMIE ET PROPRIETES THERMIQUES DE LA TERRE

Acquis à mobiliser :

- **Revoir en 4^{ème} :**
 - Les manifestations du mouvement des plaques lithosphériques
 - Les zones de subduction

Introduction :

À la surface de la Terre, **deux sources d'énergie inépuisables** à l'échelle humaine sont disponibles : *l'énergie solaire* et *l'énergie géothermique*.

L'énergie solaire, indispensable au maintien d'une température compatible avec la vie sur notre planète, permet le fonctionnement des écosystèmes planétaires.

L'énergie provenant de l'intérieur du globe, ou **énergie géothermique**, constitue le moteur de la tectonique des plaques. Bien que représentant une puissance disponible des milliers de fois plus faible que l'énergie solaire, cette énergie peut s'avérer une ressource intéressante pour subvenir aux besoins des populations humaines.

La **géothermie** est donc **l'ensemble des techniques** qui permettent **d'exploiter l'énergie interne de la Terre**.

Problèmes :

- *Quelle est l'origine du flux géothermique traversant la surface du globe ?*
- *Quels sont les environnements géologiques propices à l'exploitation de la géothermie ?*
- *Comment s'organisent les transferts thermiques depuis l'intérieur de la Terre vers la surface ?*

Pb. Scientifique : Où et comment exploite-t-on l'énergie géothermique en France ?

I- Origine et exploitation de l'énergie géothermique

A- Exemples de l'utilisation de l'énergie géothermique

- **ACTIVITE 1 : DEUX EXEMPLES DE CENTRALES GEOTHERMIQUES**

Objectif : - Exploiter des données extraites des atlas régionaux des ressources géothermales en France, concernant la température des fluides extraits dans ces zones.

Pb. Scientifique : Quelle est l'origine de l'énergie géothermique ?

B- Origine et flux de l'énergie géothermique

- **ACTIVITE 2 : ORIGINE ET FLUX DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE**

Objectif : - Exploiter l'imagerie satellitale et les cartes de répartition mondiale du flux thermique pour replacer les exploitations actuelles dans le cadre structural : magmatisme de rifting, de subduction ou de points chauds.

1- Gradient et flux de l'énergie géothermique

• *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 kilomètre.

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 de chaleur de la profondeur vers la surface. **Il dépend du gradient géothermique** mais aussi **de la conductivité thermique** des roches ; sa valeur moyenne est de $65 mW.m^{-2}$.

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.

Gradient et flux géothermique varient selon le contexte géodynamique

Le flux géothermique présente des variations importantes d'une région à l'autre : il est, par exemple, un peu plus élevé au niveau des océans que sur les continents.

- Dans le domaine océanique, les zones à flux de chaleur élevé sont les dorsales océaniques d'une part, les arcs volcaniques liés à la subduction et les points chauds d'autre part. En revanche, le flux de chaleur est faible au niveau des zones stables (plateau continental et plaines abyssales) de même qu'au niveau des fosses associées à la subduction.

- Sur les continents, un flux géothermique élevé est observé dans les régions volcaniques mais aussi dans certains bassins sédimentaires où la croûte est amincie. Ainsi, en France métropolitaine, le flux géothermique est relativement élevé dans des bassins d'effondrement comme l'Alsace ou la Limagne.

En milieu continental, la conductivité thermique des roches K vaut environ $2,5 W.m^{-1}.K^{-1}$. Elle varie en fait entre $2,2 W.m^{-1}.K^{-1}$ pour les basaltes et $3,1 W.m^{-1}.K^{-1}$ pour les péridotites. A titre de comparaison, la conductivité thermique des métaux est environ $420 W.m^{-1}.K^{-1}$ (cas de l'argent), et celle de l'eau est environ $6 W.m^{-1}.K^{-1}$. Les roches sont donc plutôt de « mauvais » conducteurs thermiques, même si leur conductivité thermique est supérieure à celle du bois ($\sim 0,1 W.m^{-1}.K^{-1}$).

Les roches sédimentaires conduisent moins que les autres : dans un bassin sédimentaire, elles conservent la chaleur en profondeur.

L'essentiel de l'énergie est produit **dans le manteau** parce que son volume est très supérieur à celui de la croûte.

Le **gradient géothermique** est l'augmentation de température, en °C par km de profondeur.

- Connaissant la conductivité thermique des roches, on peut en déduire le **flux géothermique** : quantité d'énergie géothermique perdue par unité de temps et de surface
- Ce **flux thermique** atteint la surface en provenance des profondeurs de la Terre : **le flux géothermique**.
- **Gradients et flux varient** selon le contexte géodynamique.

2- L'origine de l'énergie géothermique

• Une origine principale : la désintégration d'éléments radioactifs

L'énergie géothermique provient principalement (à 90 %) de la **désintégration naturelle des éléments radioactifs** contenus dans les roches. A eux seuls, **l'uranium** (^{235}U et ^{238}U), **le thorium** (^{232}Th) et **le potassium** (^{40}K) sont responsables de la majeure partie de la libération d'énergie par désintégration radioactive.

Ces éléments radioactifs étant inégalement répartis à l'intérieur de la Terre, chaque enveloppe de la Terre contribue à cette libération d'énergie de manière spécifique, mais c'est le manteau, compte tenu de son volume, qui libère le plus d'énergie par désintégration radioactive (environ 70% de la libération totale d'énergie d'origine radioactive).

• La libération d'énergie par désintégration radioactive correspondant à un peu plus de la moitié de la puissance globale du flux en surface ($42. 10^{12}W$), il existe donc d'autres sources d'énergie : la **chaleur initiale** accumulée lors de l'accrétion de la Terre et **la chaleur libérée lors de la cristallisation du fer** à l'origine de la croissance de la graine solide à l'intérieur du noyau.

- Les roches produisent de **l'énergie thermique par désintégration radioactive** : elles contiennent des atomes radioactifs.
- Le flux thermique a pour **origine principale** la **désintégration des substances radioactives** contenues dans les roches.

Pb. Scientifique : *Quelle est le potentiel de cette énergie à l'échelle de la planète ?*

C- Exploitation de l'énergie géothermique

• **ACTIVITE 3 : EXPLOITATION DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE**

Objectif : - Exploiter des données extraites des atlas régionaux des ressources géothermales en France

1. Flux géothermique local et exploitations géothermiques

Les roches de l'écorce terrestre sont réchauffées en permanence du fait du transfert thermique dont elles font l'objet. L'eau qui s'infiltre et circule en profondeur au contact de ces roches se réchauffe et peut être exploitée.

Contextes géologiques	Gradient géothermique	Profondeur d'extraction du fluide	Température du fluide prélevé	Quelques utilisations possibles
Ex : Bassin Parisien, aquitain Ex : Bouillante (Guadeloupe) Ex : La Réunion	30 °C.km ⁻¹	1500-2500 m	45 °C - 80 °C	• Chauffage collectif • Chauffage individuel et eau chaude sanitaire
Zones de subduction Points chauds	> 30 °C.km ⁻¹	1 000 m	250 °C	• Électricité • Chauffage collectif
Rifts		5 000 m	> 150 °C	• Chauffage individuel et eau chaude sanitaire

Les exploitations géothermiques françaises en relation avec leur contexte géologique.

• Une ressource inépuisable à l'échelle humaine

L'énergie géothermique est utilisée par l'homme avec deux objectifs principaux : d'une part, **la production de chaleur** pour chauffage individuel, collectif et industriel, d'autre part, la **production d'électricité**.

• Deux grands types d'utilisation de l'énergie géothermique

- L'utilisation à des fins de chauffage

Il s'agit principalement d'extraire la chaleur contenue dans la croûte terrestre afin de l'utiliser pour les besoins en chauffage. Pour cela :

- on peut utiliser **l'énergie du sous-sol** (captée à quelques mètres ou quelques dizaines de mètres de profondeur) grâce à des pompes à chaleur pour les besoins du chauffage individuel ;

- on peut également récupérer de **l'énergie dans un aquifère**, nappe d'eau souterraine permanente située entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres de profondeur, et dont la température est comprise entre 30 et 100 °C (la principale utilisation dans ce cas est le chauffage urbain).

- L'utilisation pour la production d'électricité

Actuellement, on dénombre, dans le monde, 350 **centrales géothermiques** qui produisent de l'électricité, la plupart étant situées dans des zones de subduction, des zones de dorsales ou de points chauds.

- Dans les régions à très fort gradient géothermique, des forages (de 500 à 2000 m de profondeur en moyenne) permettent de **récupérer de la vapeur d'eau bouillante** qui jaillit avec suffisamment de pression pour alimenter une turbine. C'est, par exemple, le cas de la centrale de Bouillante en Guadeloupe.

- Une autre technique consiste à réaliser des forages de 5000 mètres de profondeur, assez proches l'un de l'autre, puis de fracturer les roches entre ces forages. L'eau aspirée par un des puits est à 200 °C environ ; elle est exploitée pour produire de l'électricité puis réinjectée dans le sous-sol par l'autre forage, en un cycle permanent. C'est le principe du fonctionnement de la centrale de Soultz-Sous-Forêts, dans le Bas Rhin.

2. Géothermie mondiale

En 2010, on a estimé que l'énergie géothermique utilisée dans le monde correspondait à une puissance installée d'environ 50 GW (gigawatt) pour le chauffage et seulement 7 GW pour la production d'électricité.

Au total, cela représente à peine **1 % de la consommation mondiale d'énergie**.

➤ En fait, ce prélèvement d'énergie géothermique par l'homme est infime par rapport à l'énergie interne dissipée par la Terre ; on peut donc considérer que cette énergie est **une ressource inépuisable à l'échelle humaine**.

Les **exploitations géothermiques** permettant une **production électrique** sont surtout **localisées dans des régions présentant une activité magmatique, donc dans un contexte favorable...**

Le prélèvement éventuel d'énergie par l'Homme ne représente qu'**une infime partie** de ce qui est dissipé.

L'Homme utilise l'énergie géothermique en prélevant de l'eau chaude dans le sous sol.

Il peut le faire quand le gradient géothermique est élevé.

L'énergie sert pour le chauffage ou pour produire de l'électricité.

Pb. Scientifique : Quels sont les contextes géodynamiques favorables à la géothermie ?

II- Les contextes favorables à la géothermie

- **ACTIVITE 4 : LES CONTEXTES GEODYNAMIQUES FAVORABLES A L'EXPLOITATION DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE**

Objectif : - Exploiter des données extraites des atlas régionaux des ressources géothermales en France

Comme le gradient, le flux varie selon le contexte géodynamique.

	Flux moyen (mW.m ⁻²)	Superficie (km ²)	Puissance (W)
Continents émergés	58,6	149,3. 10 ⁶	8,7. 10 ¹²
Plateaux continentaux	54,4	52,2. 10 ⁶	2,8. 10 ¹²
Croûte océanique	67	308,6. 10 ⁶	20,7. 10 ¹²
	Circulations hydrothermales		9,8. 10 ¹²
	TOTAL		42. 10 ¹²

La **remontée des magmas dans la croûte** permet d'augmenter la température des roches en profondeur et de disposer dans ces régions d'un **flux géothermique anormalement élevé** par rapport au flux moyen global, ce qui contribue à leur **potentiel géothermique**.

- La géothermie peut donc être développée dans les régions qui ont un **magmatisme actif** : la remontée du magma chauffe le sous-sol, et l'eau qui circule dans les failles.
- Contextes géodynamiques favorables:

Le flux est **plus élevé** dans les domaines océaniques que sur les continents :

- Dans les **domaines océaniques** : Les zones à **flux géothermique élevé** sont :

- les **zones en extension sur les continents (rifts)** : La production de magma est due à la décompression des péridotites, comme dans les dorsales. *Ex = Alsace*
- les **arcs volcaniques associés aux zones de subduction** : *Ex = Guadeloupe*
- les **points chauds** : des panaches de matière chaude remontent de la limite manteau noyau (*Ex = Hawaï*)

En revanche, le **flux géothermique est faible** au niveau des **zones stables** (plateau continental et plaine abyssale) de même qu'au niveau des **fosses associées à la subduction**.

- Sur les **continents**, un **flux géothermique élevé** est observé

- dans les **régions volcaniques**
- dans certains **rifts continentaux** où la croûte est amincie.

• *Les ressources géothermiques dépendent du contexte géologique*

Sur les continents, le gradient géothermique est en moyenne de 20 à 30 degrés par kilomètre, mais **ce gradient varie beaucoup selon les régions.**

- De 3 °C pour 100 m (régions granitiques et les grands bassins sédimentaires), il peut atteindre jusqu'à 1000 °C pour 100 m (dans les régions volcaniques, les zones de rift comme en Islande ou en Nouvelle-Zélande).
Une valeur intermédiaire de 10 °C pour 100 m environ se rencontre dans les bassins d'effondrement comme la Limagne ou l'Alsace.

Production électrique d'origine géothermique

Contextes géodynamiques favorables :

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

Avantages :

- Ressources inépuisables
- Diminution des émissions de CO₂

Limites :

- Ressources inégalement réparties
- Production insuffisante pour les besoins mondiaux

- **Gradients et flux varient** selon le contexte géodynamique.

- L'énergie géothermique utilisable par l'Homme est donc **variable** d'un endroit à l'autre.

- L'essentiel de l'énergie n'est actuellement pas exploité par l'Homme

Pb. Scientifique : Comment s'organisent les transferts thermiques depuis l'intérieur de la Terre vers la surface ?

III- Les 2 types de transferts thermiques

• **ACTIVITE 5 : LES DEUX TYPES DE TRANSFERT THERMIQUE**

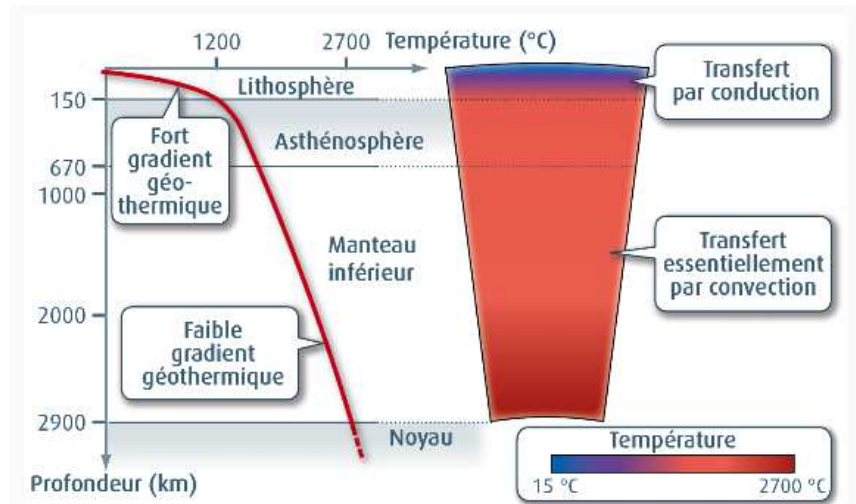
Objectif : - Réaliser des mesures de conduction et de convection à l'aide d'un dispositif ExAO et les traiter avec un tableur informatique.

TP : L'ENERGIE GEOTHERMIQUE : MESURES DE LA CONDUCTION ET DE LA CONVECTION

TP MANIPULATOIRE (LIVRE P. 231 ET 233)

Deux mécanismes peuvent organiser des transferts thermiques entre les enveloppes profondes de la Terre, dans lesquelles les désintégrations radioactives libèrent de l'énergie, et la surface de la lithosphère, traversée par le flux géothermique :

- **Par conduction** dans les matériaux non déformables : comme les roches conduisent mal la chaleur, **la lithosphère** freine les transferts d'énergie. Le transfert thermique s'organise par transmission d'une agitation moléculaire de proche en proche, **sans déplacement de matériau**. L'échange thermique entre une région froide et une région chaude se matérialise par un fort gradient géothermique. L'efficacité de ce transfert dépend de la conductivité du matériau.



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

- **Par convection** dans les matériaux déformables, impliquant **des déplacements de matière**. Les mouvements sont initiés par des différences de densité contrôlées par la température. La matière chaude moins dense que la matière froide est animée de mouvements ascendants. En surface, elle se refroidit devient plus dense et plonge en profondeur. C'est une méthode efficace de transfert de chaleur **dans l'asthénosphère**. Des **cellules de convection** s'organisent alors.

Deux mécanismes de transfert thermique existent dans la Terre : **la convection** et **la conduction**.

Le **transfert par convection** est beaucoup **plus efficace**.

Pb. Scientifique : Comment s'organisent les mouvements de convection et quelles sont leurs conséquences à l'échelle de la planète ?

IV- La Terre, machine thermique

- **ACTIVITE 6 : LES MOUVEMENTS DE CONVECTION ET LEURS CONSEQUENCES A L'ECHELLE DE LA PLANETE**

Objectifs : - Réaliser et exploiter une modélisation analogique de convection en employant éventuellement des matériaux de viscosité différente
Exploiter les imageries de tomographies sismiques.

A- Conduction et convection au niveau des enveloppes du globe

Dans la Terre, le **géotherme**, modèle proposé pour rendre compte de l'évolution de la température en fonction de la profondeur fait apparaître des gradients géothermiques différents en fonction de la profondeur :

- Un **gradient géothermique relativement élevé** dans la **lithosphère** (13°C/km) et au niveau de la **zone de transition noyau-manteau inférieur**.
- Un **gradient géothermique plus faible** dans le **manteau sous-jacent**

Au regard des caractéristiques comparées de la conduction et de la convection, le **transfert de l'énergie géothermique** s'effectue **par conduction dans la lithosphère** ainsi qu'au niveau de la zone de transition noyau-manteau, et **par convection dans le manteau**.

La **tomographie sismique** permet d'observer :

- Des *mouvements ascendants de matière* chaude d'origine peu profonde **au niveau des dorsales**.
- 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.
- Le *plongement de la lithosphère océanique* (devenue plus dense par son refroidissement) **dans le manteau sous-jacent**, donc des mouvements de convection descendants de matière froide pouvant affecter le manteau jusqu'à sa base.

B- Convection mantellique et dynamique lithosphérique

Le **plongement de la lithosphère océanique** dans le manteau sous-jacent **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.

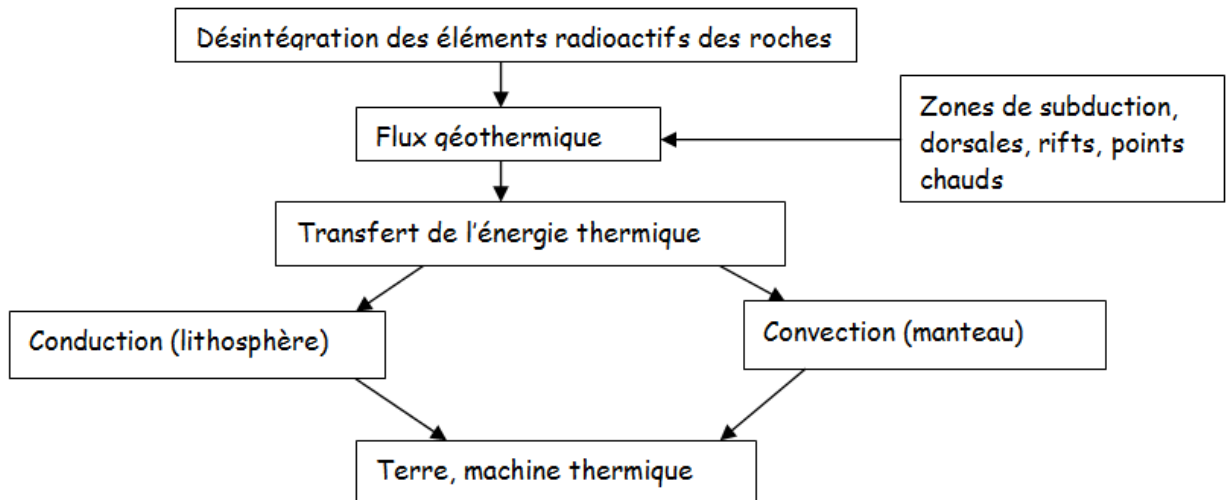
Le flux géothermique en surface reflète la dynamique du globe : le flux fort observé à l'aplomb des dorsales est associé à la production de lithosphère océanique. Les zones de subduction présentent à la fois un flux faible associé au plongement de la lithosphère âgée et froide et un flux fort associé à l'arc volcanique résultant du magmatisme de subduction.

La dissipation de l'énergie géothermique est associée à des mouvements du manteau et des plaques lithosphériques.

La Terre est une machine thermique (= système permettant la conversion de l'énergie thermique, en énergie mécanique, ici le déplacement de matériau solide).

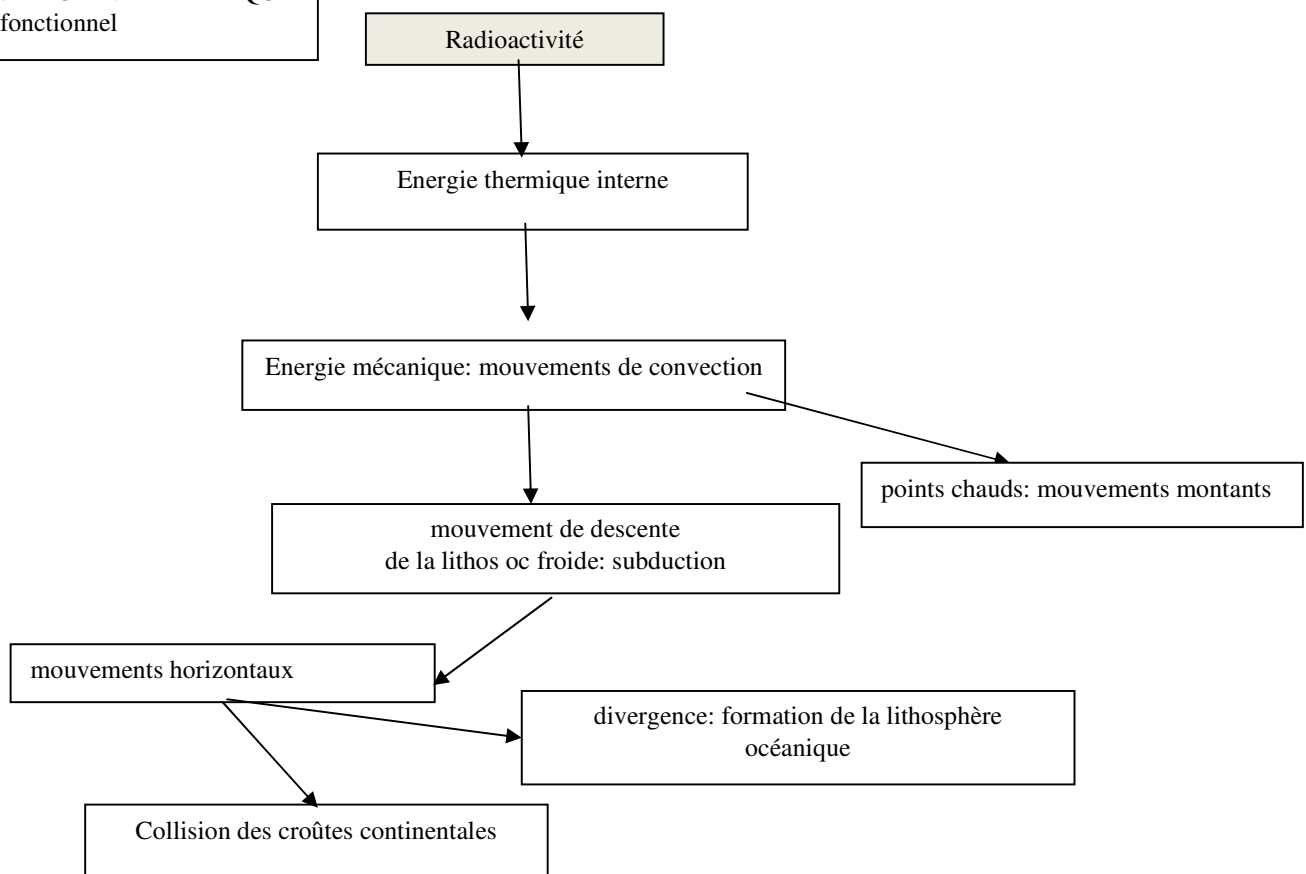
- À l'échelle globale, **le flux fort dans les dorsales** est associé **à la production de lithosphère nouvelle** ; au contraire, **les zones de subduction** présentent **un flux faible** associé au plongement de la lithosphère âgée devenue dense.
- La Terre est une machine thermique.

Bilan :Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

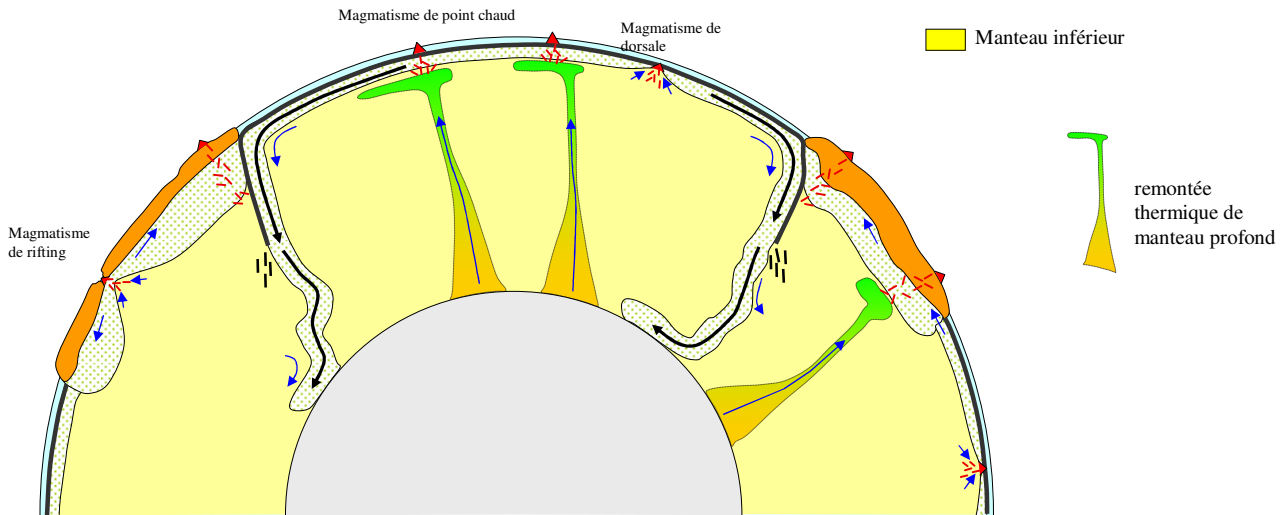


OU

LA TERRE : MACHINE THERMIQUE
Diagramme fonctionnel



Energie interne et tectonique des plaques



« Les principaux moteurs du mouvement de la lithosphère (**flèches noires** dont la taille est proportionnelle à la vitesse des déplacements) sont les subductions, tandis que les dorsales sont plutôt passives : elles ne font que combler l'écartement créé par le mouvement des plaques. Le manteau asthénosphérique est mis en mouvement par la lithosphère..... »- les rares parties **magmatiques** (liquides) du manteau ainsi que le volcanisme sont en **gris foncé**