

Thème 2A TP1: flux et gradients géothermiques

On cherche l'origine de la chaleur interne du globe terrestre et les modalités de transfert de cette chaleur à travers les enveloppes de la Terre.



Lycée E. Delacroix Tale S

Des manifestations locales d'un flux thermique d'origine interne



Sources chaudes de Grand Prismatic Spring
(parc du Yellowstone, point chaud)



P1010152.MOV

Rappels: les enveloppes internes du globe terrestre... du feu?

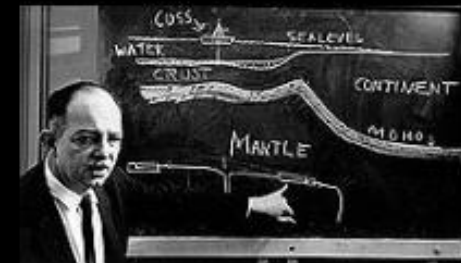
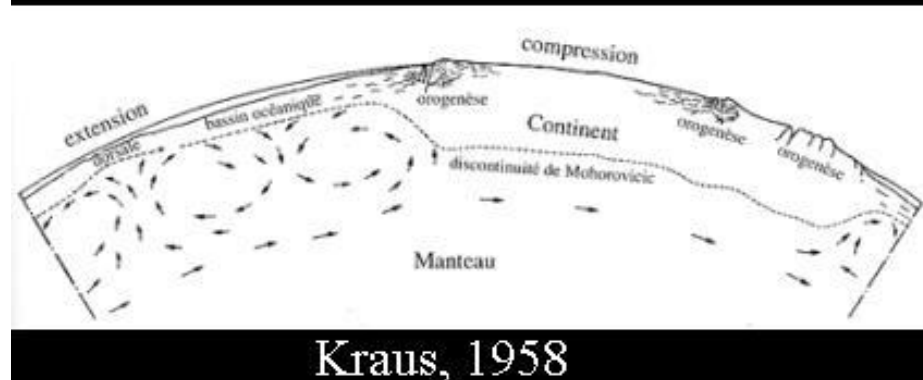
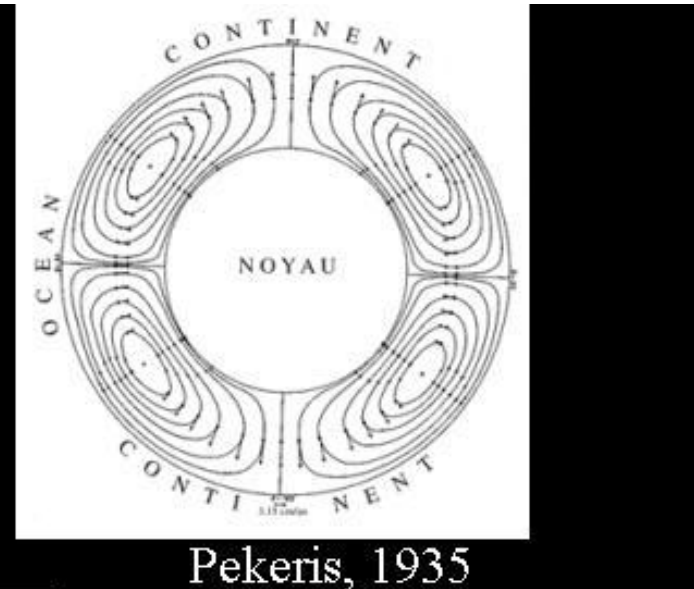
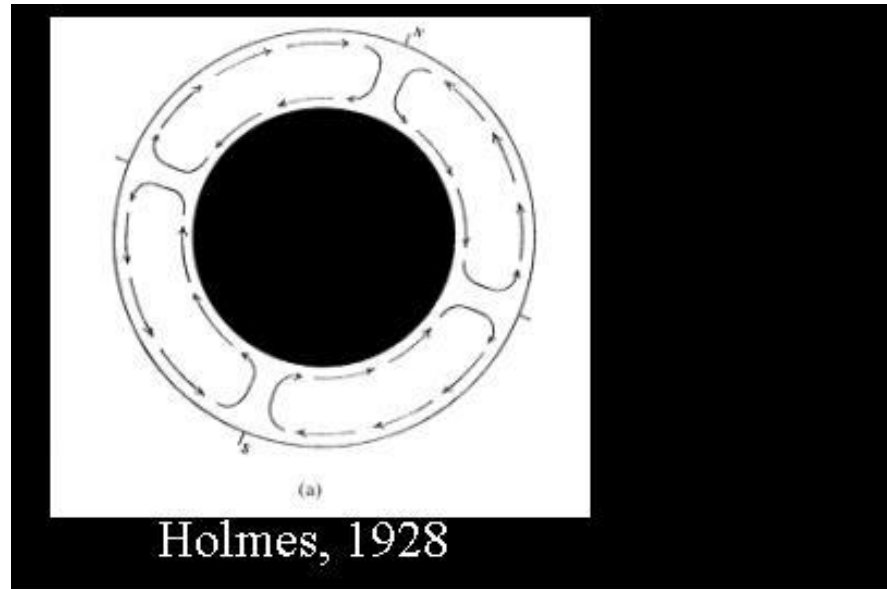


L'enfer, situé au centre de la Terre, vu par un artiste du Moyen Age.



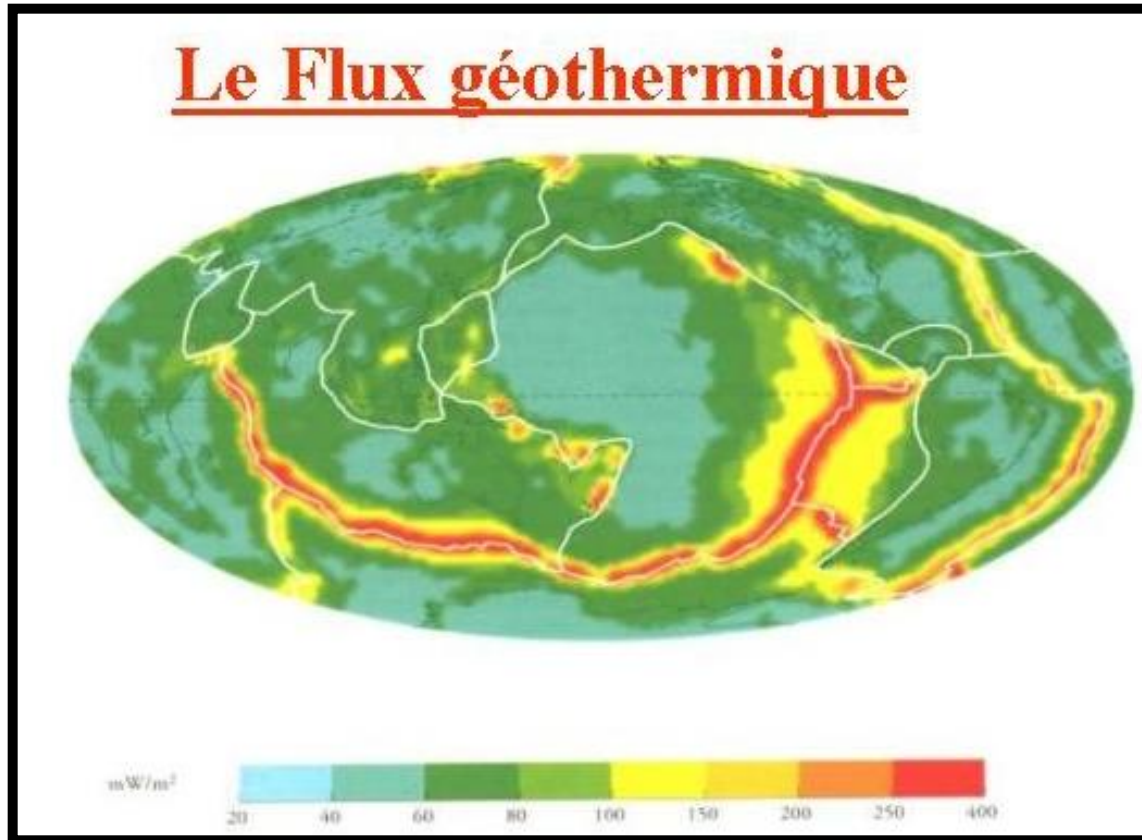
Le centre de la Terre imaginé au 17^{ème} siècle.

Rappels: historique de la convection mantellique

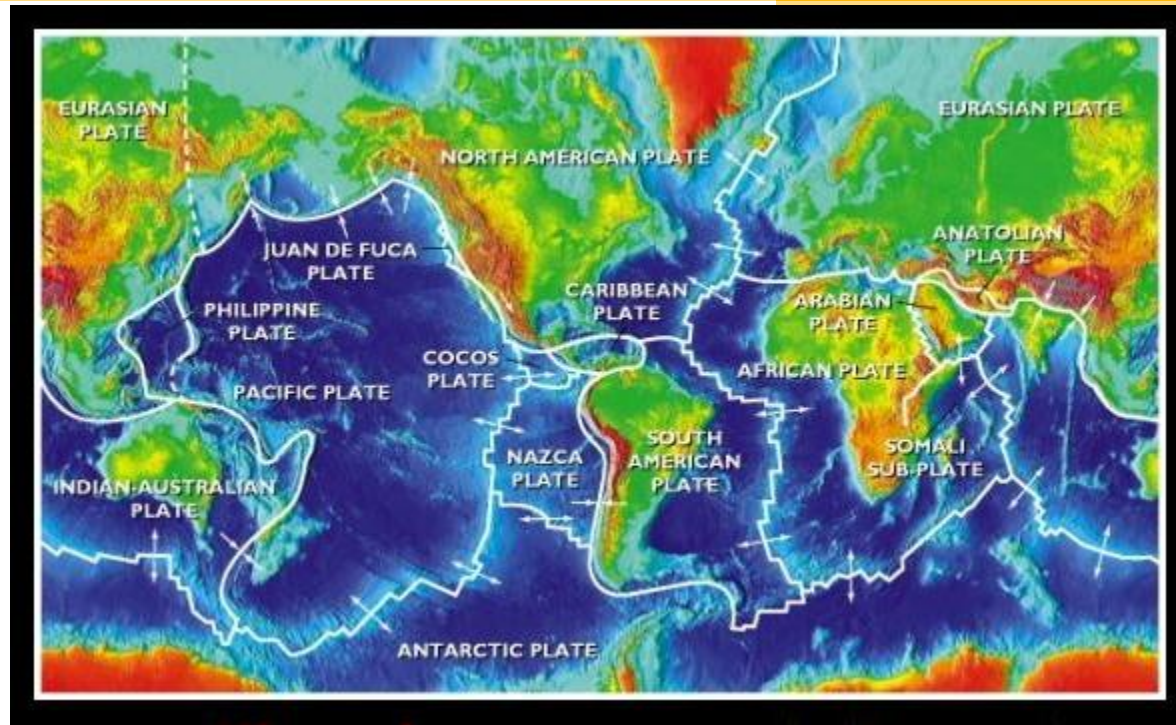


Depuis longtemps, les géologues font convecter le manteau: Pourquoi?

Le Flux géothermique

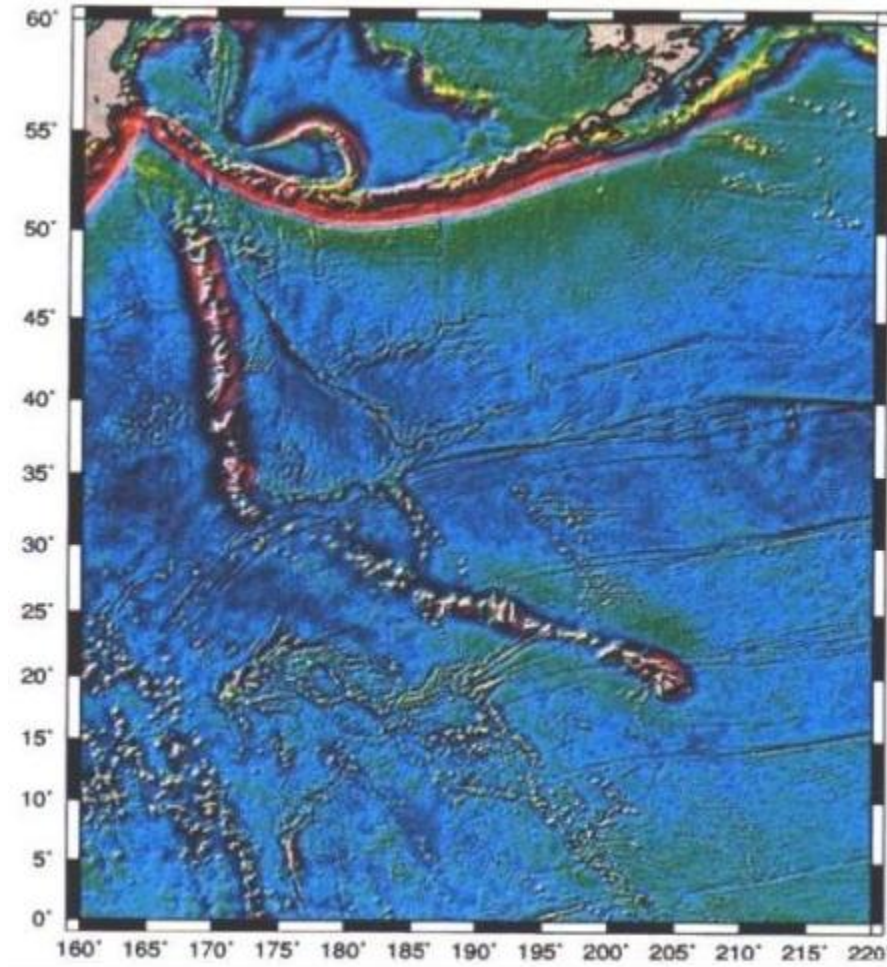


Pourquoi? Parce qu'il sort de la chaleur de la surface. Il en sort $44 \cdot 10^{12}$ W, dont une grosse moitié provient de la radioactivité (U, Th, K) , et parce que...



... parce qu'il y a des mouvements à la surface du globe terrestre.

Or MOUVEMENT et CHALEUR => CONVECTION

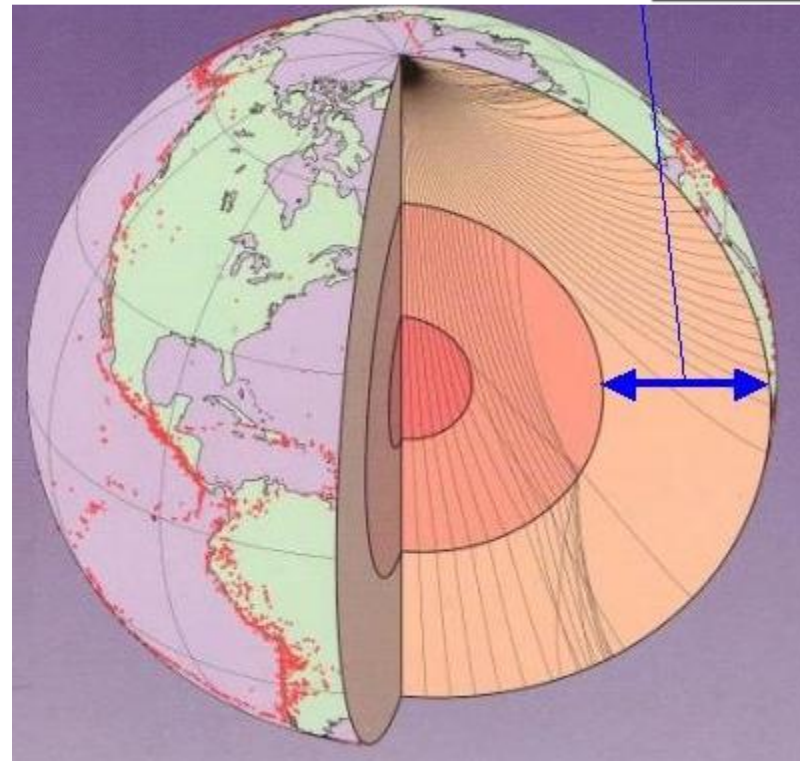


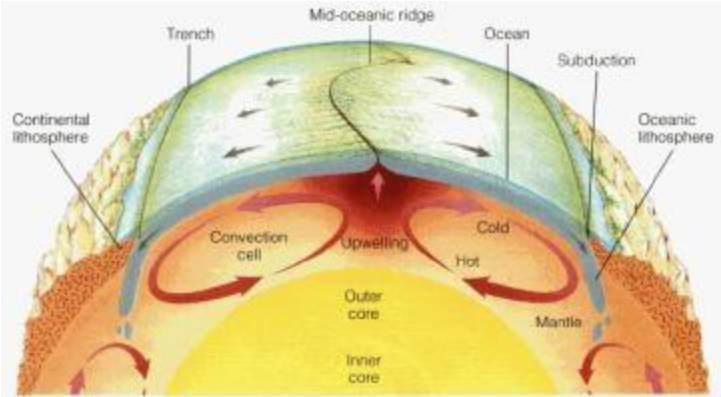
Il y a également
des « sorties »
ponctuelles de
matière chaude
(les points chauds)

=> Autre type de
convection

Si il y a convection: cela doit se passer dans le manteau et le noyau.

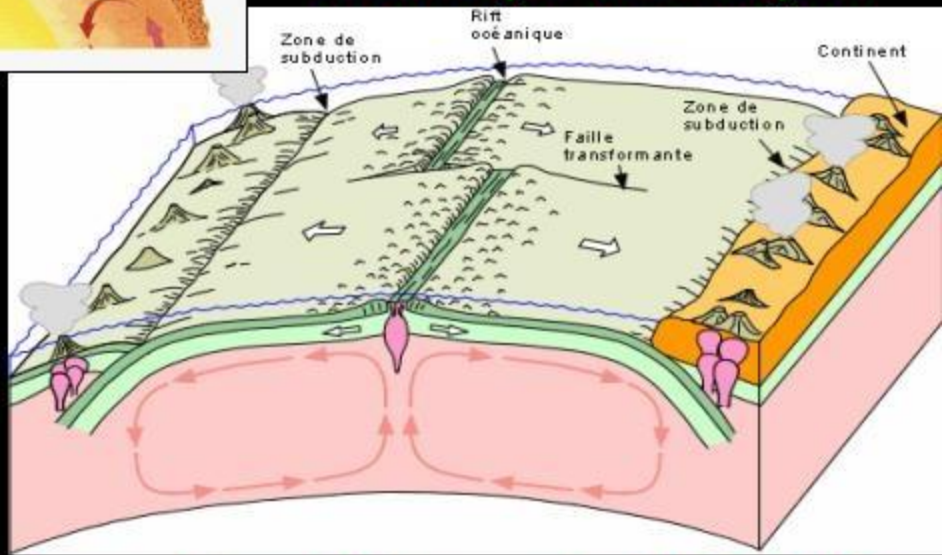
C'est dans le manteau qu'a lieu la convection: à l'état **SOLIDE!!!**





Et entre 1960 et 1970, toutes ces observations et bien d'autres ont donné lieu à ce qu'on appelle désormais la Tectonique des Plaques

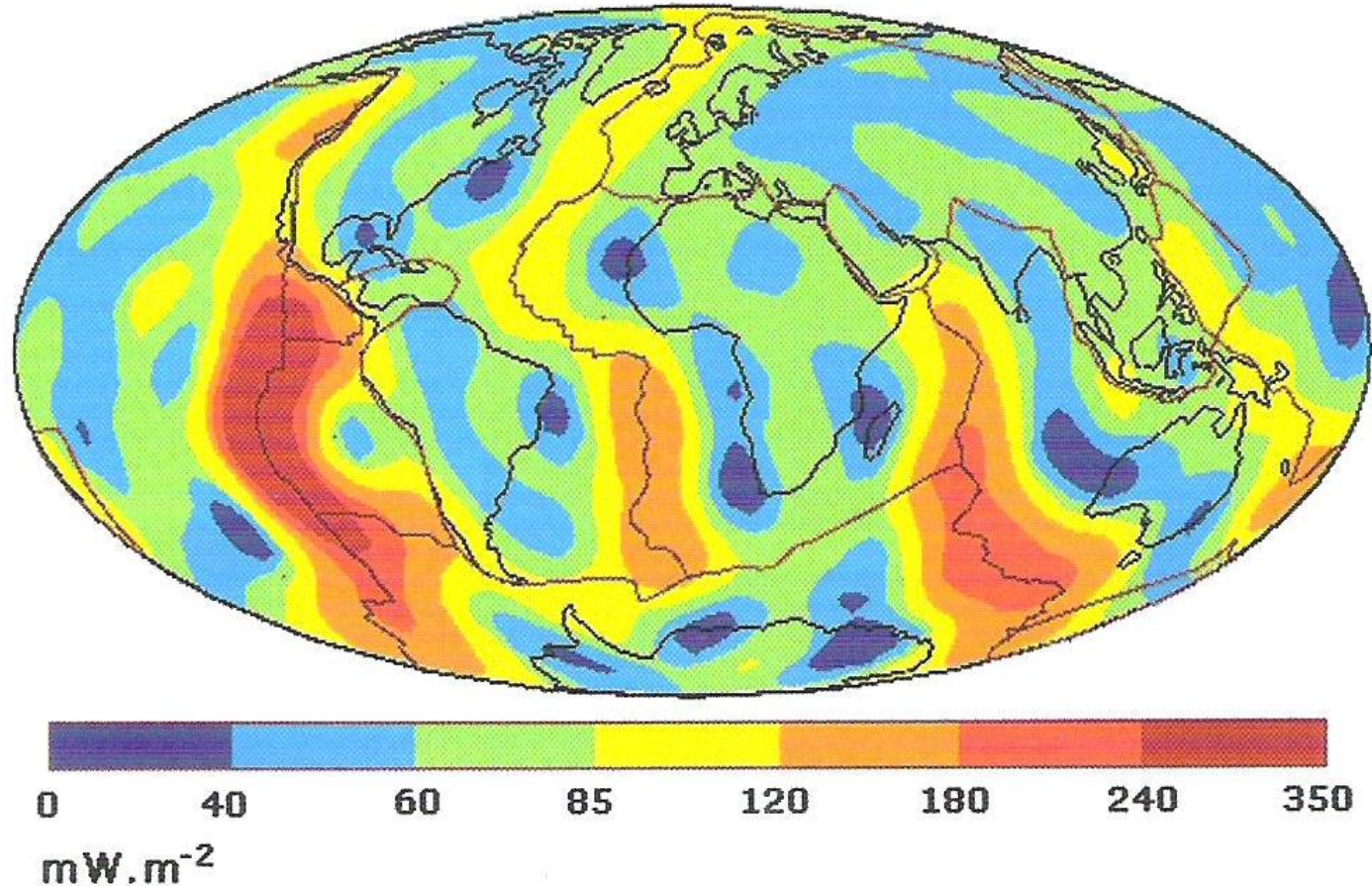
<http://www.to.univ-montp.fr/PPE/2006/12/mantecoreaction.pdf>
http://www.ppl.univ.ca/~personnel/boymis/boymis/planet_earth.html
<http://www.geobv.su.se/edu/low/vokanser/2002/06/kano/teknik.html>



Et tout le monde connaît ces schémas, légitimes entre 1960 et 1970, où il fallait convaincre une communauté de naturalistes réticents, extrêmement maladroits et pleins de sous-entendus erronés en 2005

Les anomalies du flux géothermique et les contextes tectoniques

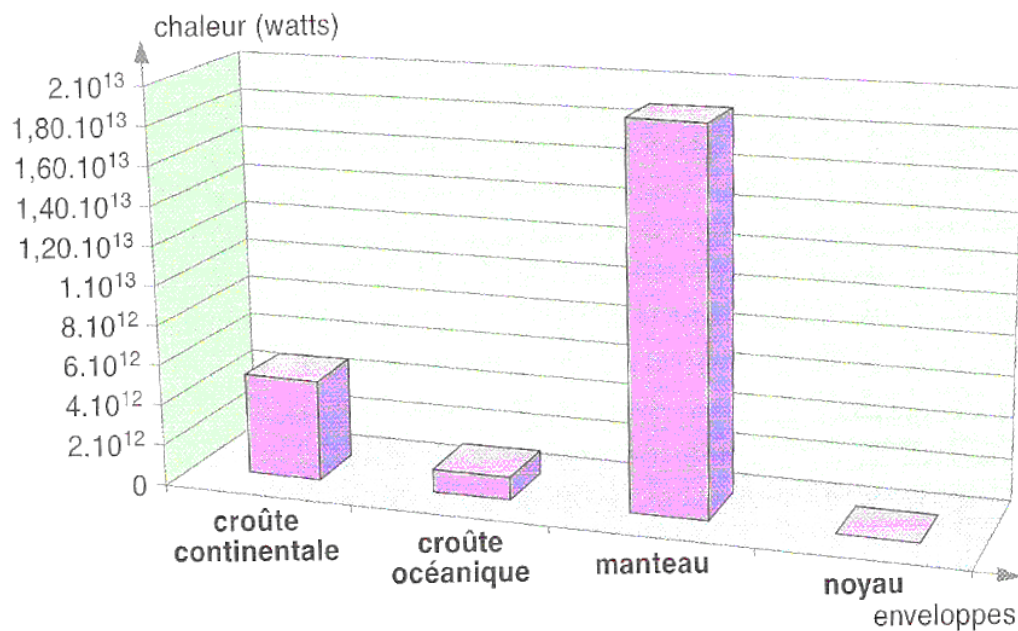
Le flux de chaleur mesuré ici en surface résulte de l'énergie interne produite de façon permanente dans la masse du globe. Ce flux est en moyenne de $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. Il correspond à une augmentation moyenne de la température avec la profondeur de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ par km dans la lithosphère et de $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ par km dans le manteau (gradient* géothermique).



Document 1 : Taux de chaleur dégagée par les isotopes radioactifs* pour les différentes enveloppes terrestres.

Il est difficile d'estimer les quantités d'énergie produites à l'intérieur de la Terre car on ne dispose pas de mesures directes. Depuis la découverte de la radioactivité, on sait que la chaleur interne a essentiellement pour origine la désintégration d'éléments radioactifs, comme l'uranium, le thorium, le potassium qui sont présents dans la croûte et le manteau.

Le taux de chaleur dégagée par ces éléments est bien connu ; en revanche, on ne connaît pas encore précisément les masses présentes à l'intérieur de la Terre



**Isotope : Chacun des différents types d'atomes d'un même élément, différant par leur nombre de neutrons mais ayant le même nombre de protons et d'électrons.*

Le manteau dégage la majorité de la chaleur du globe terrestre ($1,8 \times 10^{13}$ W). Cette chaleur provient essentiellement de la désintégration des éléments radioactifs tels que Ur, Th et K.

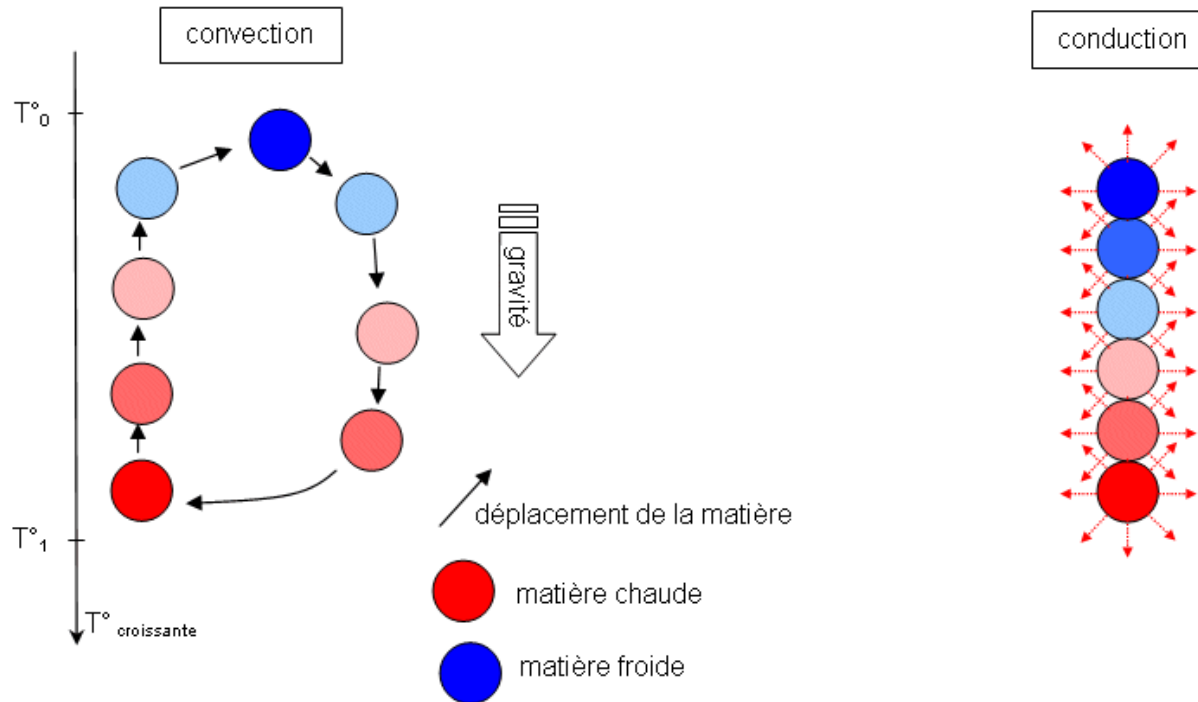
Document 2 : Concentrations en éléments radioactifs dans différentes enveloppes terrestres (ppm : parties par million)

Enveloppes terrestres	Concentration		
	Uranium (ppm)	Thorium (ppm)	Potassium (%)
Croûte continentale	1.6	5.8	2.0
Croûte océanique	0.9	2.7	2.4
Manteau supérieur	0.007	0.013	0.009
Manteau inférieur	0.020	0.81	0.024

Le manteau est significativement moins concentré en éléments radioactifs que la croûte continentale (par 5,8 ppm de Th dans la croûte pour seulement 0,823 ppm pour le manteau). Or la chaleur interne du globe terrestre provient essentiellement du manteau, en effet cette enveloppe est très volumineuse (80%) par rapport à la croûte (0,7%). La quantité d'éléments radioactifs est donc beaucoup plus grande dans le manteau, en particulier dans le manteau inférieur.

NB: Ur, Th, K sont magmatophiles, ainsi lors de la formation de la croûte continentale (entre -2 et -1 Ga) à partir de la fusion partielle du manteau, ces éléments allés préférentiellement dans le magma et donc ont été intégré dans la croûte.

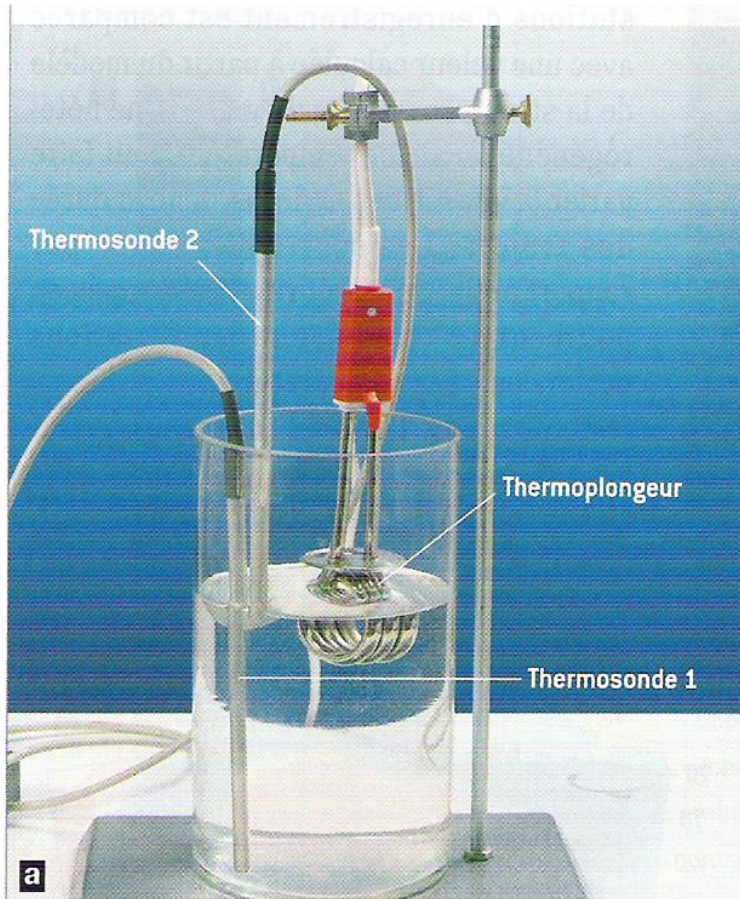
Document 3 : les modes de transfert de chaleur



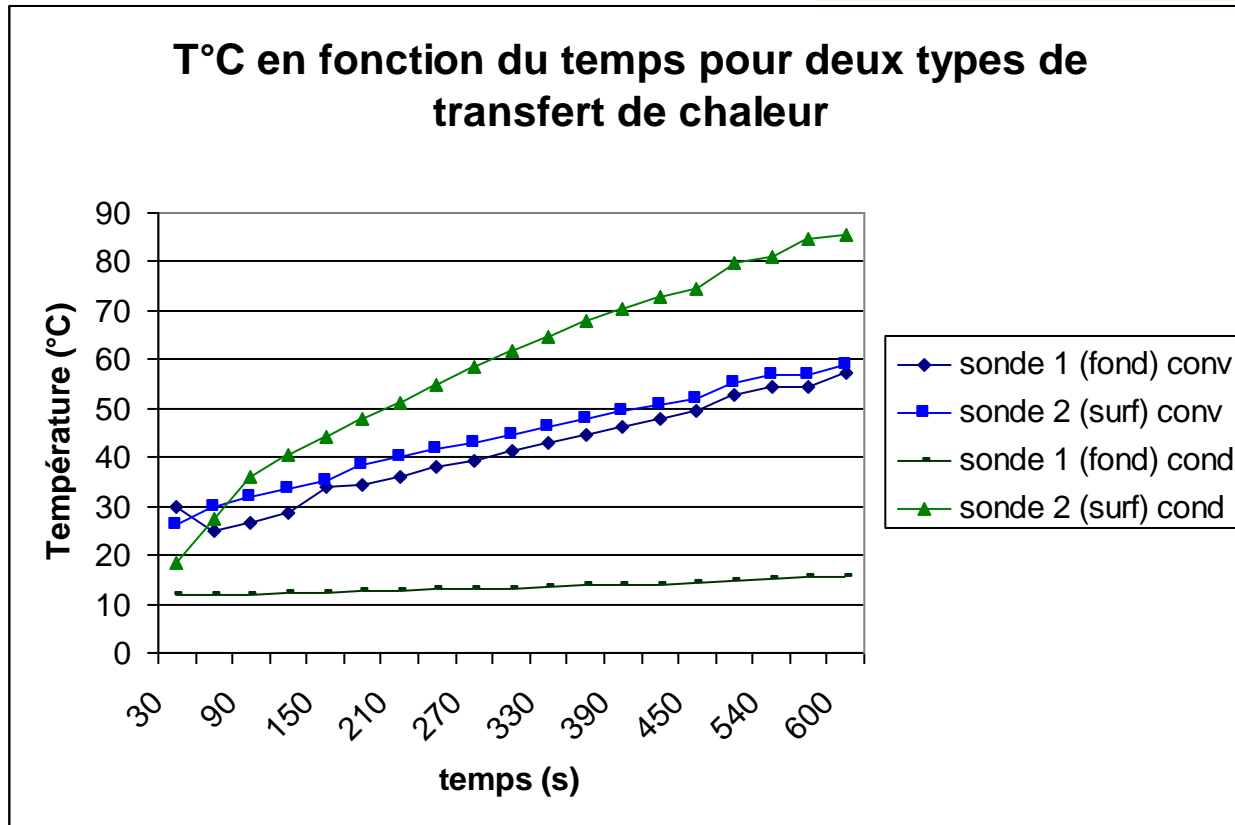
La conduction est un mécanisme où la chaleur se transmet de proche en proche au sein d'un milieu. La chaleur, à l'échelle atomique, correspond à une agitation des atomes ; les atomes agités, en « heurtant » leurs voisins, augmentent leur niveau de désordre, donc leur température.

La convection est un mode de transport de la chaleur qui s'accompagne de mouvements de matière : c'est le déplacement des atomes qui provoque le transfert de chaleur, donc l'élévation de température.

Document 4 : Expérience analogique des deux modes de propagation de la chaleur



Temps (sec)	Température mesurée (°C)			
	Convection		Conduction	
	Sonde 1 (au fond)	Sonde 2 (en surface)	Sonde 1 (au fond)	Sonde 2 (en surface)
30	29,9	26,2	11,7	18,4
60	24,8	30	11,7	27,5
90	26,7	31,8	11,8	36,2
120	28,6	33,4	12,1	40,7
150	34,0	35,1	12,1	44,0
180	34,2	38,4	12,6	47,8
210	35,9	40,1	12,6	51,1
240	37,9	41,6	12,9	54,8
270	39,4	43,1	13,1	58,6
300	41,3	44,7	13,1	61,8
330	43,1	46,4	13,6	64,5
360	44,5	47,8	13,9	67,9
390	46,4	49,5	14,0	70,3
420	48,0	50,6	14,0	72,7
450	49,6	52,0	14,4	74,6
510	52,9	55,1	14,8	79,7
540	54,4	56,7	15,0	81,1
570	54,4	56,7	15,4	84,6
600	57,2	59,1	15,5	85,7



*Flux géothermique : Le **flux géothermique** est la quantité de chaleur dégagée en surface du globe par unité de temps et par unité de surface. (mW/m^2). Sa valeur moyenne à la surface du globe est de $60 \text{ mW}/\text{m}^2$.

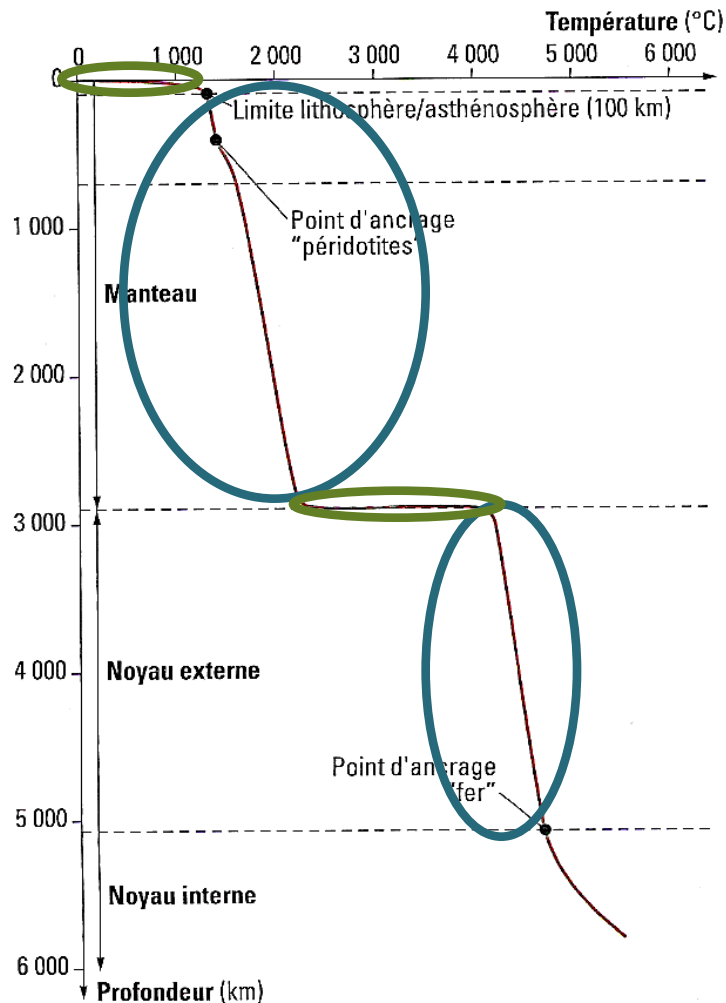
*Gradient géothermique : différence de température entre deux points de l'espace ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)

Gradient thermique mode convection en fin d'expérience: $0,17^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$

Gradient thermique mode conduction en fin d'expérience: $70,2^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$

⇒ La **convection** est un mode de transfert de chaleur plus efficace que la **conduction**.

Document 5 : le gradient géothermique de la Terre en profondeur

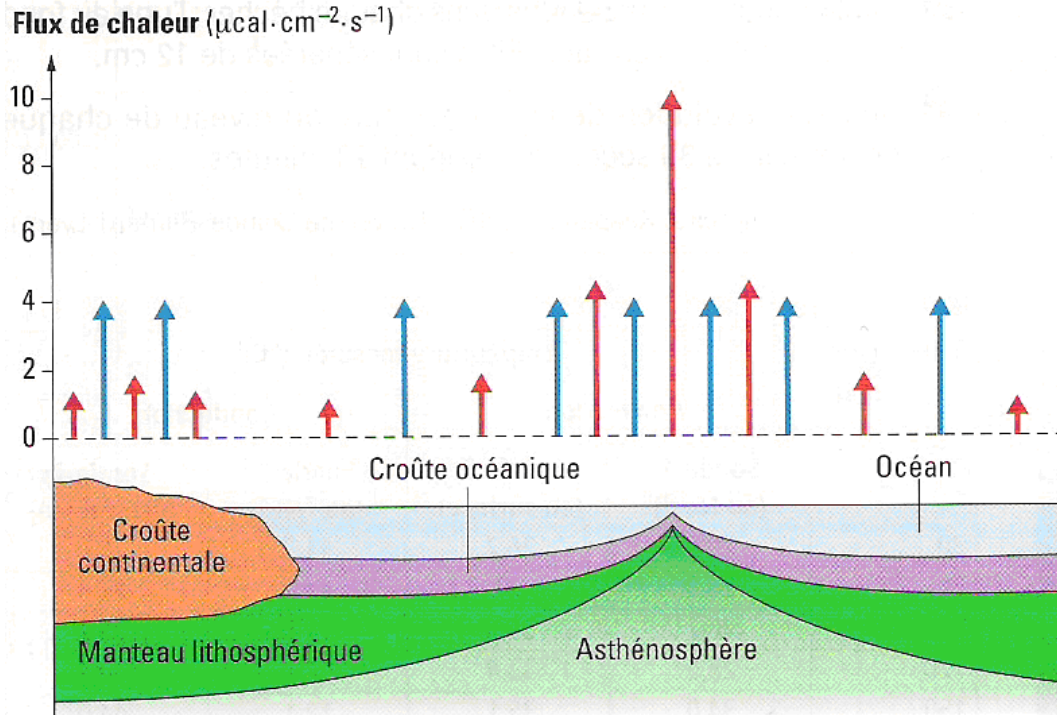


◀ **Quelques données.** En étudiant le comportement de certains minéraux ou corps purs en conditions de haute pression, les géologues peuvent estimer la température pour quelques profondeurs remarquables (points d'ancrages). Mais si le gradient de température dans les parties profondes de la Terre était le même que dans la lithosphère, la température à la profondeur des points d'ancrage serait très supérieure aux estimations précédentes. Pour relier entre eux les points d'ancrages, on tient compte de l'existence de différents modes de propagation de la chaleur dans les roches.

Gradient géothermique très faible => transfert de chaleur par convection

Gradient géothermique très fort => transfert de chaleur par conduction

Le flux géothermique théorique par conduction (flèches bleues) et le flux mesuré au niveau du plancher océanique (flèches rouges).

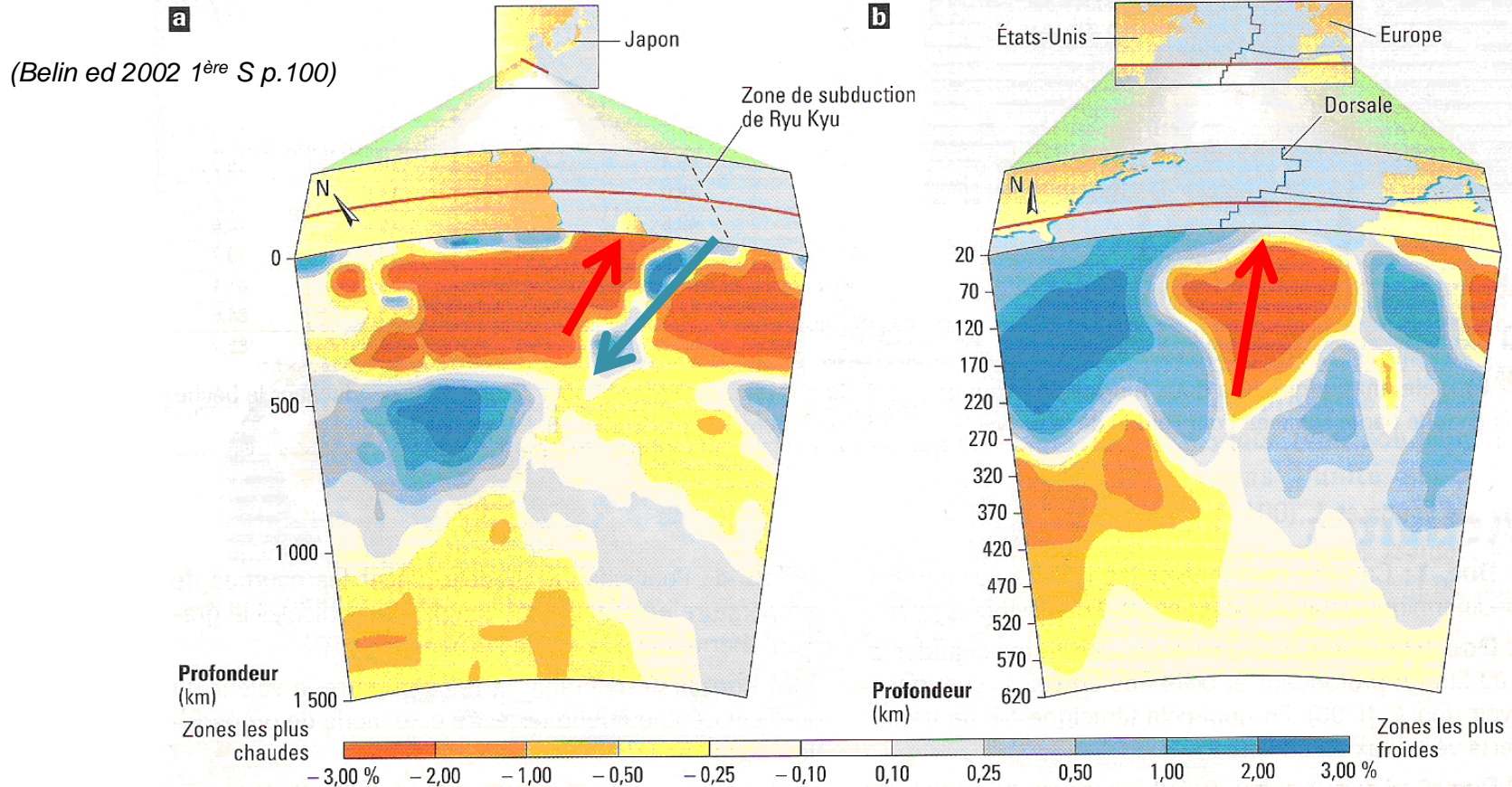


La tomographie sismique. La durée du trajet d'ondes sismiques de l'épicentre aux stations d'enregistrement est comparée avec une valeur calculée à partir du modèle de la structure interne du globe. Une hétérogénéité locale de température peut faire varier la vitesse des ondes et donc la durée des trajets. Les écarts de vitesse par rapport au modèle théorique (exprimés en pourcentage) traduisent des variations profondes de la température.

(Belin ed.2002 1^{ère} S p.100)

Les dorsales sont les frontières de plaques au sein desquelles on enregistre les plus fortes anomalies positives du **flux géothermique**. Ceci révèle une remontée de chaleur efficace et donc une convection sous l'axe de la dorsale. En effet sous la dorsale, on assiste à une remontée du manteau asthénosphérique très chaud (isothermes 1200°C proche de la surface).

Images de tomographie sismique : a. au niveau d'une zone de subduction (Ryu Kyu, Japon) ; b. au niveau de l'Atlantique central.



La tomographie sismique, sorte de scanner de la Terre, permet de mettre en évidence des zones d'ascension d'un matériau chaud (points chauds, magmatisme de la plaque chevauchante des zones de subduction, dorsale) et également des zones d'enfouissement d'un matériau froid (plaque plongeante des zones de subduction).

Holmes et la théorie des mouvements de convection mantelliques: l'importance de la radioactivité comme source de chaleur



**Arthur Holmes
(1890-1965)**

Wegener va néanmoins trouver un soutien dans la communauté scientifique de l'époque. En 1928, l'écossais Holmes propose une explication nouvelle à l'origine de la dérive continentale. Pour lui, les matériaux du manteau, surchauffés par la radioactivité et devenus « fluides », se déplacent lentement en profondeur.

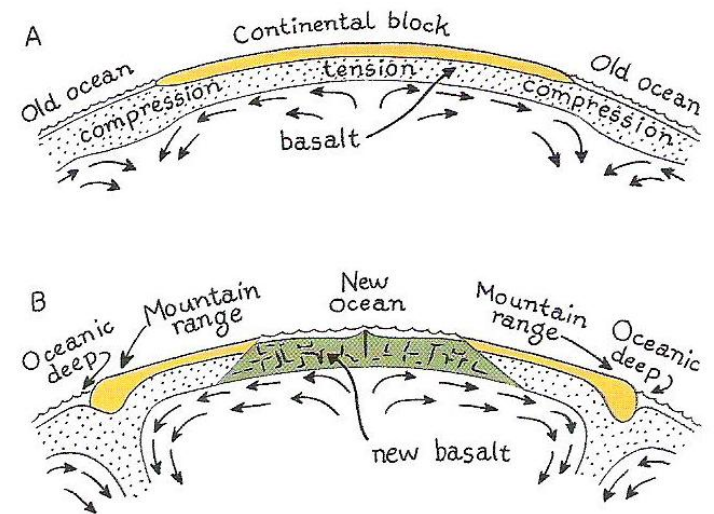
Ces **mouvements de convection** sous la croûte continentale provoquent sa fracturation et le magma basaltique montant dans les fractures forme le nouveau plancher océanique. Puisque le volume du globe terrestre est constant, Holmes envisage aussi l'existence de zones de destruction de la croûte terrestre qui compensent le mécanisme de formation.

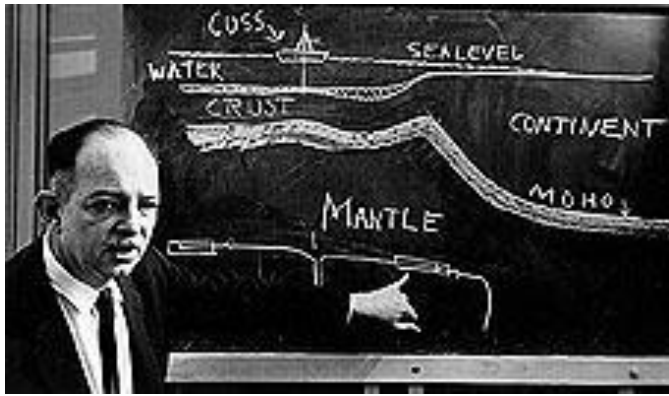
Mais cette hypothèse séduisante (et proche des conceptions actuelles) n'emporte pas l'adhésion immédiate du monde scientifique.

« J'ai examiné assez longuement la théorie du professeur Holmes sur les courants de convection, et je n'ai trouvé aucun test qui pourrait l'appuyer ou la contredire. Autant que je peux voir, elle ne contient rien de fondamentalement impossible,

mais l'association de conditions devant être réunies pour qu'elle puisse fonctionner appartient plutôt au domaine de l'extraordinaire. »

D'après Harold Jeffreys en 1931.



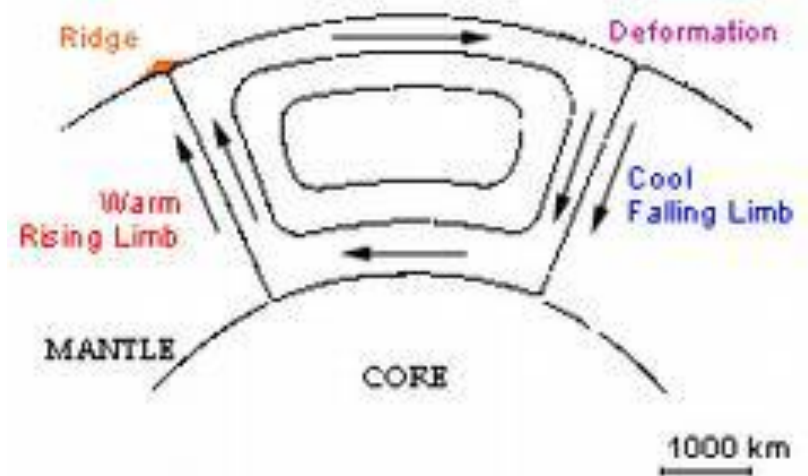


Harry Hammond Hess

Hess et l'hypothèse du « double tapis roulant »

Modèle de convection de Hess (1960)

Le manteau terrestre était animé de mouvements de convection : les dorsales mettaient en évidence les courants ascendants et les fosses océaniques les courants descendants



Ainsi la boucle est bouclée, la convection démontrée!

La température croît avec la profondeur (gradient géothermique) ; un flux thermique atteint la surface en provenance des profondeurs de la Terre (flux géothermique). Gradients et flux varient selon le contexte géodynamique.

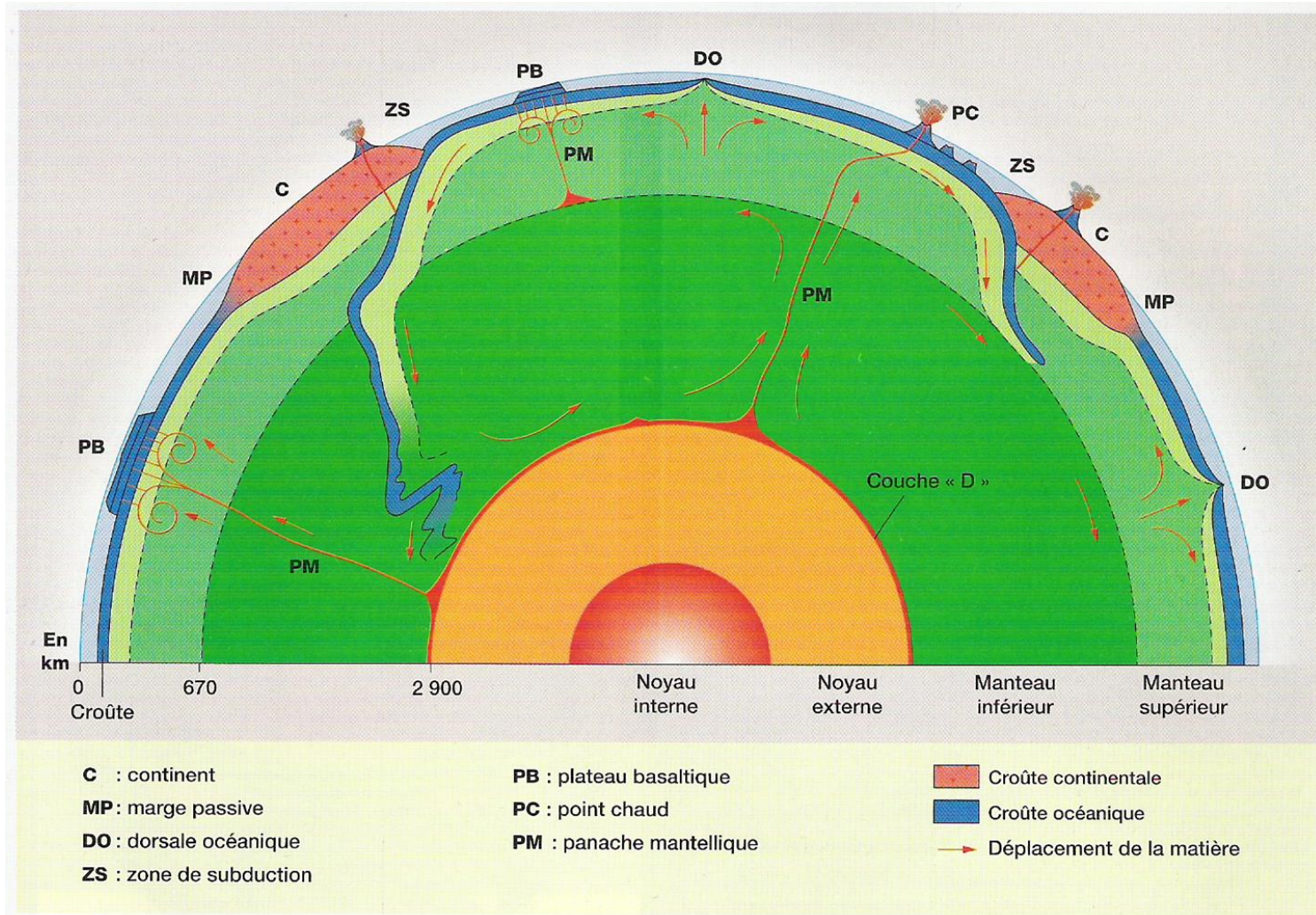
En outre la chaleur interne du globe terrestre provient essentiellement de la désintégration d'éléments radioactifs (Ur, Th, K) dans le manteau inférieur (la chaleur latente de cristallisation de la graine et celle initiale lors de l'accrétion planétaire peuvent également être évoquées mais restent minoritaires).

Cette chaleur est transférée vers la surface selon deux modes: **conduction et convection**. La convection a lieu dans les enveloppes à comportement ductile comme le manteau (notamment l'asthénosphère), et est très efficace en termes de transfert de chaleur (faible gradient géothermique). La conduction de la chaleur interne affecte la lithosphère au comportement cassant et est moins efficace.

Ainsi des anomalies positives du flux géothermique sont enregistrées en surface au niveau des dorsales (remontée de l'asthénosphère et fusion partielle), au niveau des points chauds et au niveau de la plaque chevauchante (volcanisme). Les anomalies négatives du flux s'enregistrent essentiellement au niveau des fosses des zones de subduction (plongement d'une plaque froide).

Ainsi la tectonique des plaques repose sur des mouvements mantelliques en cellules de convection de hauteurs variables (modèle à 1, 2 ou 1¹/₂ couches): une ascension au niveau des dorsales et des points chauds et un plongement au niveau des zones de subduction. Les modèles de Harry et de Hess sont désormais confirmés notamment grâce aux données de la tomographie sismique.

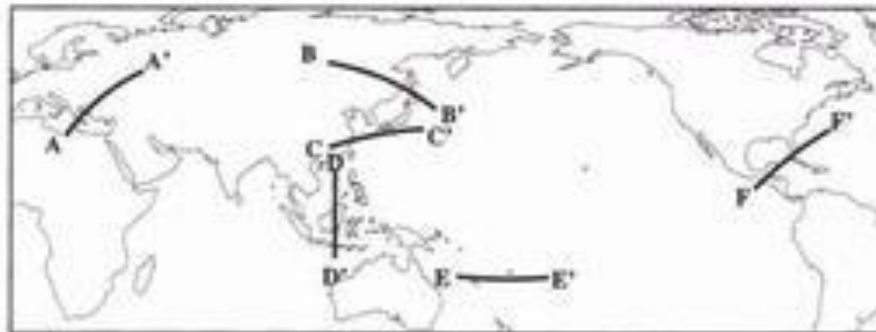
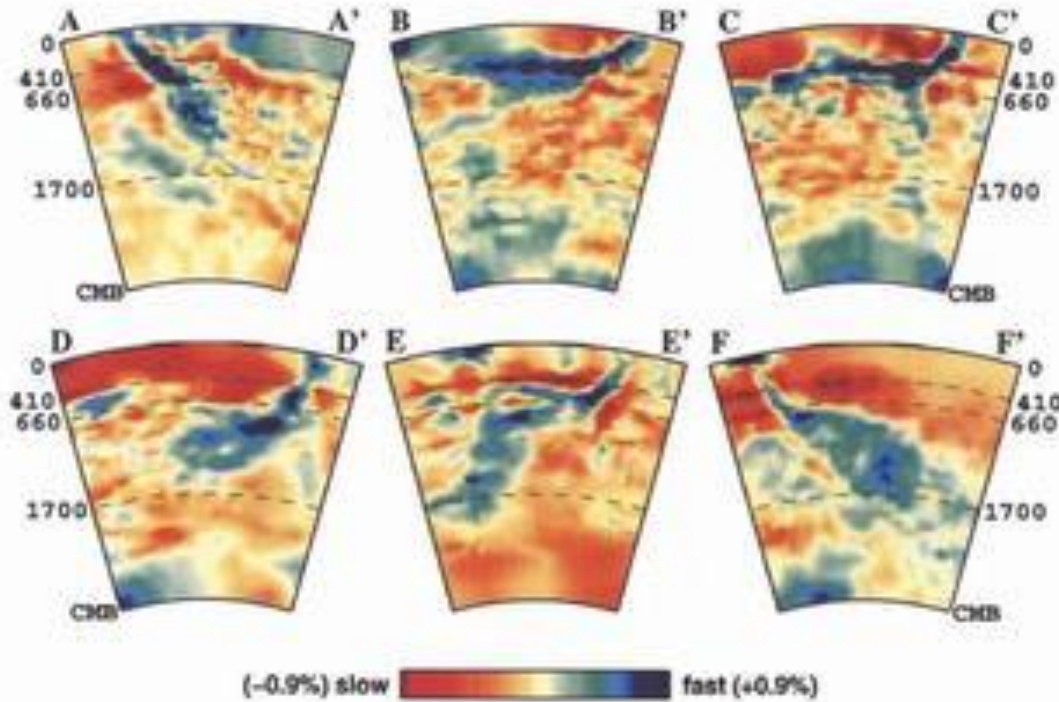
Schéma bilan sur la convection mantellique



Pour aller plus loin...

Convection à une ou deux couches?

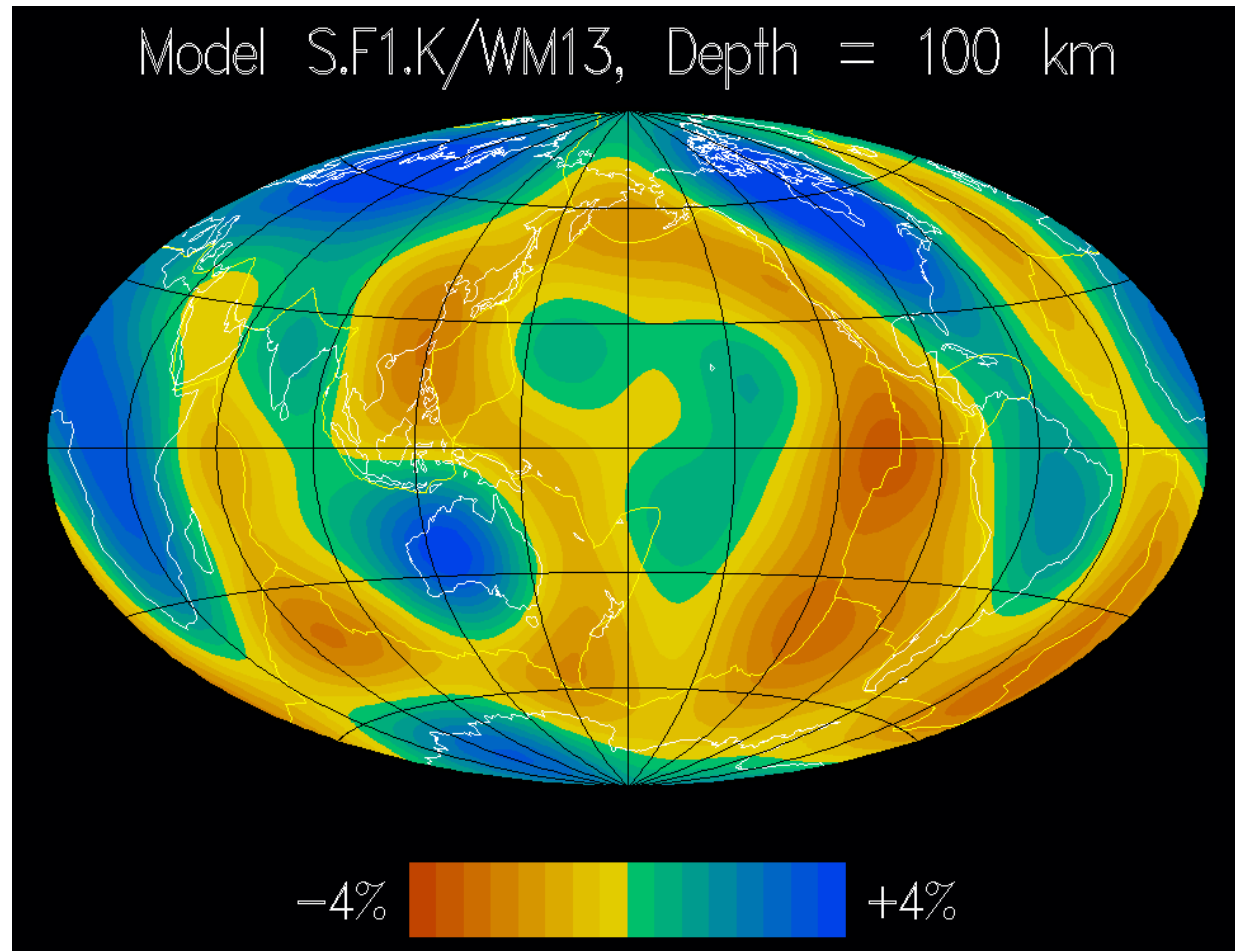
C'est par les techniques de tomographie sismique au début des années 90 que l'on a pu obtenir des images correspondant aux zones anormalement froides dans le manteau, c'est-à-dire aux plaques océaniques subduites.



On constate que le panneau plongeant (slab) semble s'étaler sur la zone de transition pour la zone des Iles Kouriles (coupe B-B'), alors qu'il pénètre dans le manteau inférieur sous l'Amérique centrale (coupe F-F').

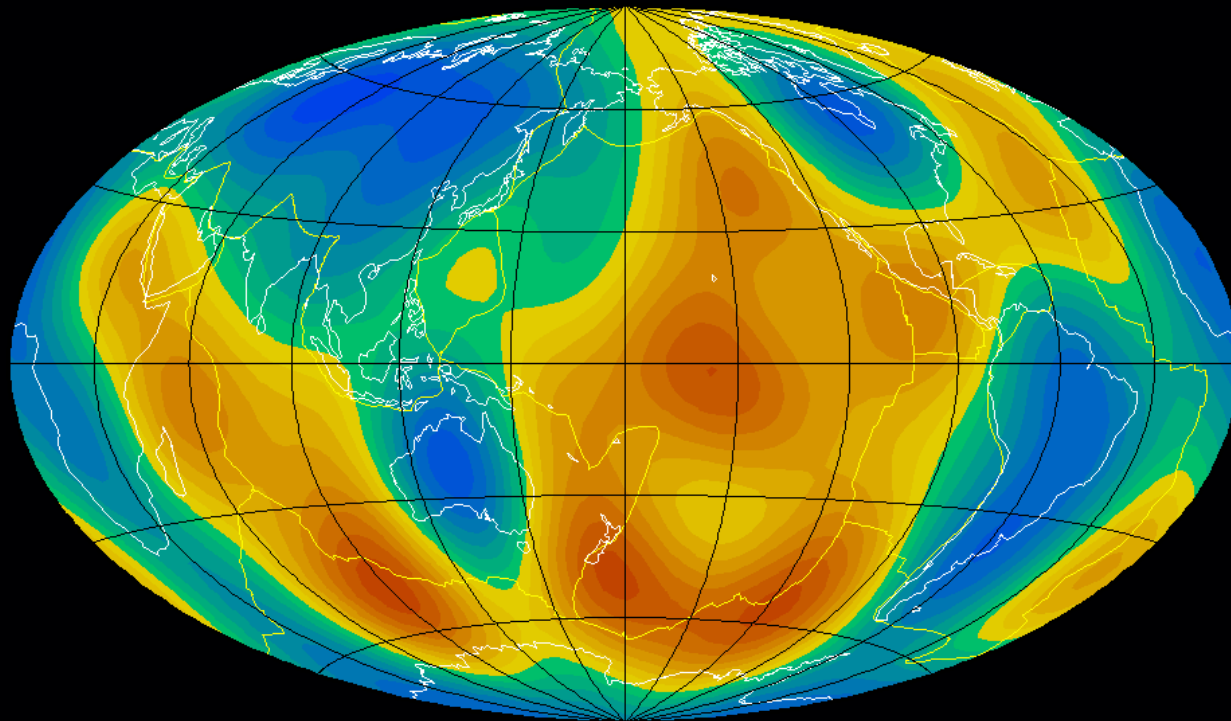


$$\frac{1}{V_S} \frac{dV_S}{dT} \approx 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$



On peut relier des variations de vitesses d'ondes sismiques à des gradients thermiques. On constate ainsi des hétérogénéités à 100 km de profondeur.

Model S.F1.K/WM13, Depth = 350 km

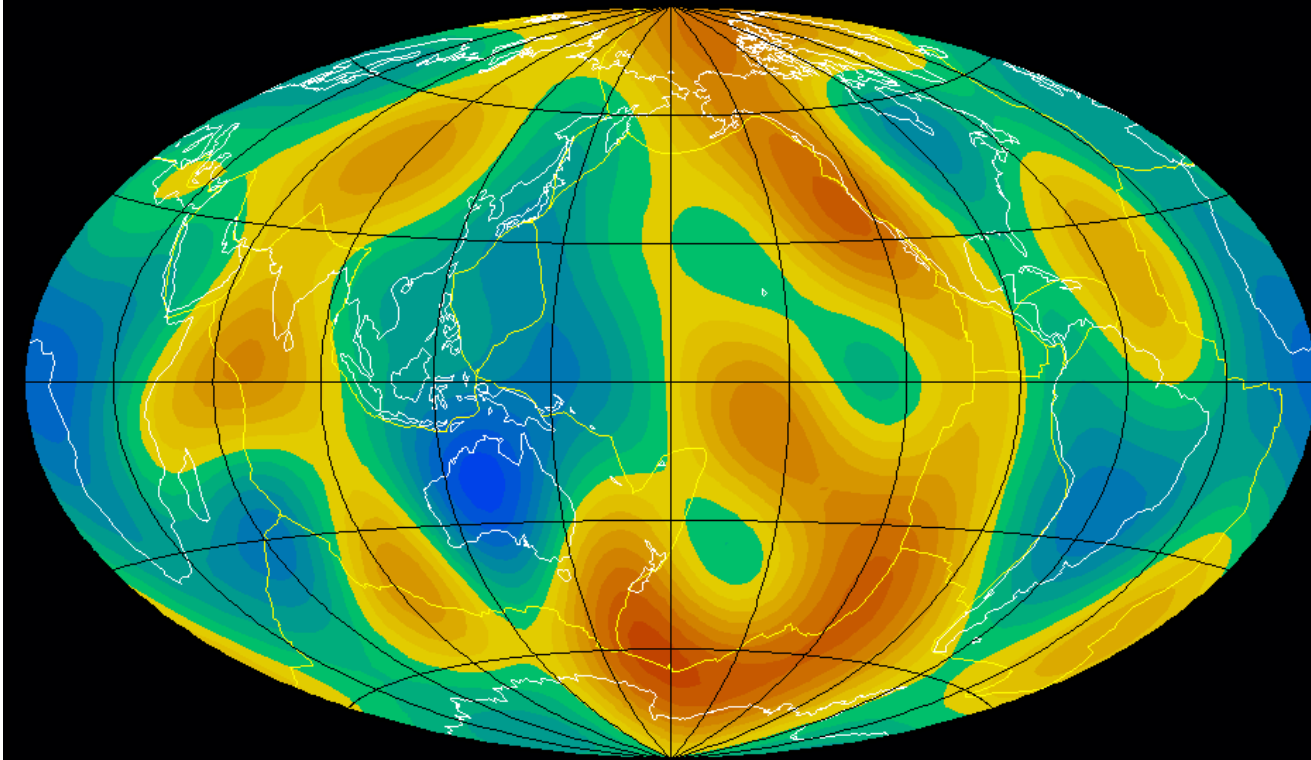


-2%  +2%



des hétérogénéités à 350 km de profondeur ...

Model S.F1.K/WM13, Depth = 600 km



-1.5%

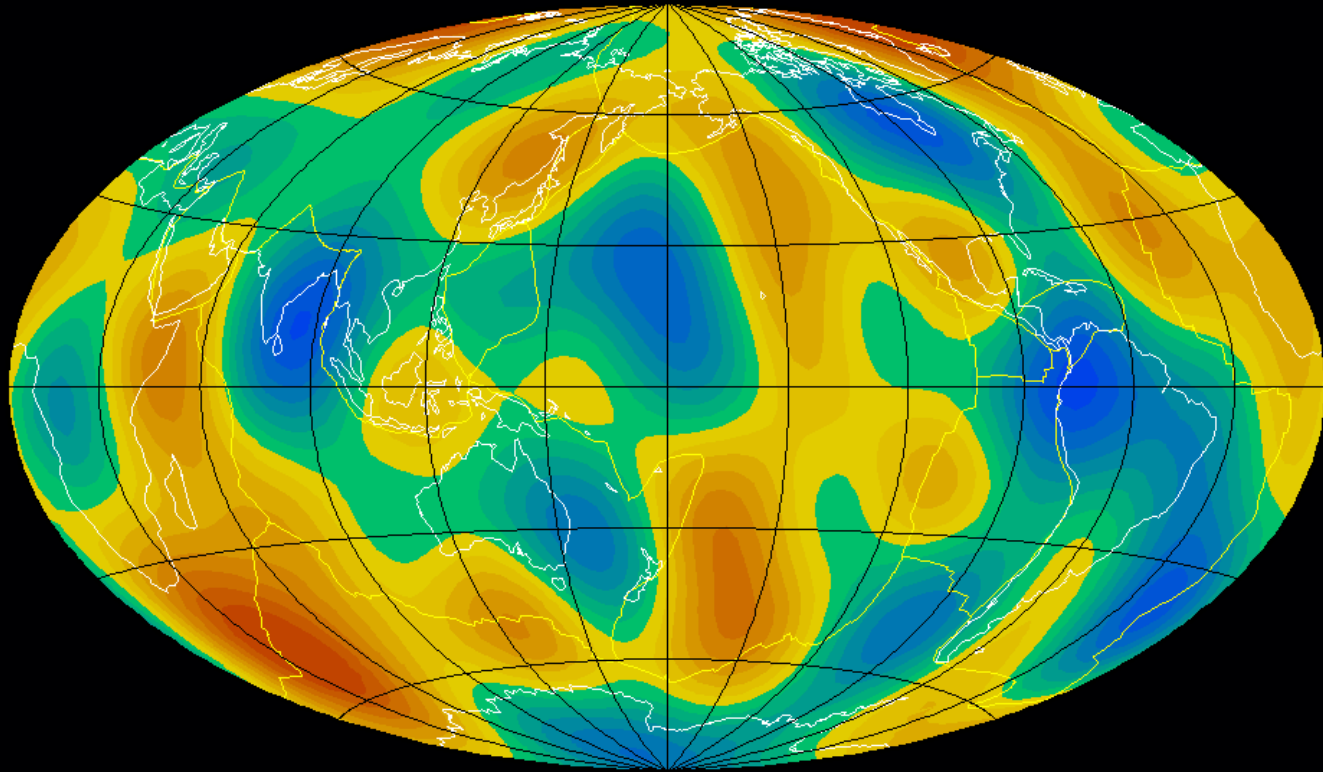


+1.5%



des hétérogénéités à 600 km de profondeur ...

Model S.F1.K/WM13, Depth = 1400 km



-1%



+1%



Et même des hétérogénéités à 1400 km de profondeur !