



**Partie2 : La  
dynamique interne  
de la Terre.**

**Chapitre 01  
La structure du globe  
terrestre.**

**Thème La Terre, la vie et l'organisation du vivant.**

La surface de la lithosphère n'est pas plane : elle comporte des reliefs positifs (=montagnes) ou des reliefs négatifs (bassins sédimentaires ou plaines abyssales). Seule une partie de la croûte continentale est émergée formant les continents. La croûte océanique est toujours immergée.

**Comment expliquer la dualité continent-océan ?**

Des techniques permettent l'étude de la structure de notre planète....

.

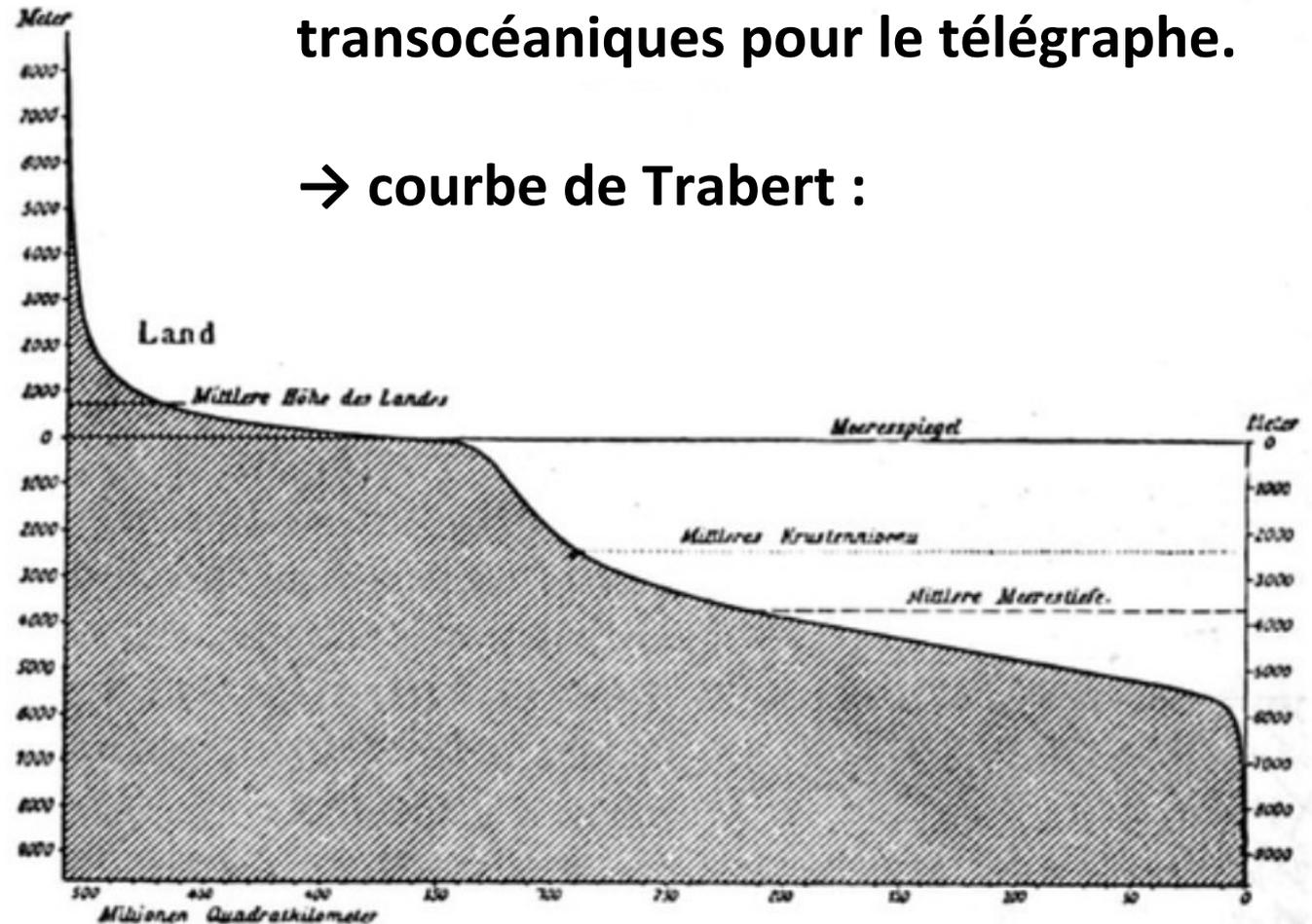
**- comprendre les technologies permettant l'étude de la structure de la Terre**  
**.comprendre la structure Terrestre.**

**I – Les couches superficielles terrestres : Des contrastes entre les continents et les océans.(post TP10)**

**1.) Des différences d'altitude :**

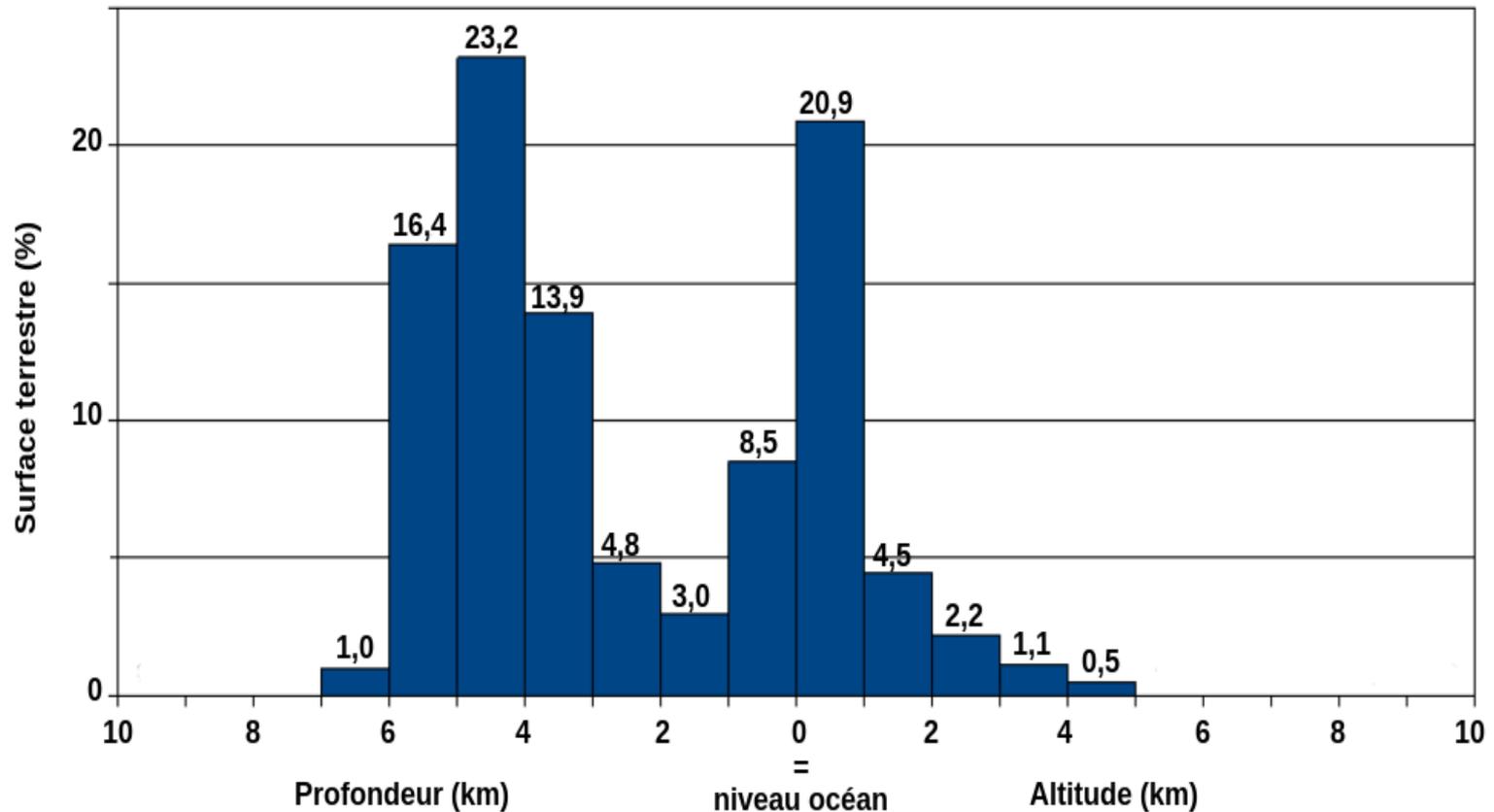
19<sup>ème</sup> siècle : campagnes de mesure de profondeur océanique sont menées pour poser des câbles transocéaniques pour le télégraphe.

→ courbe de Trabert :

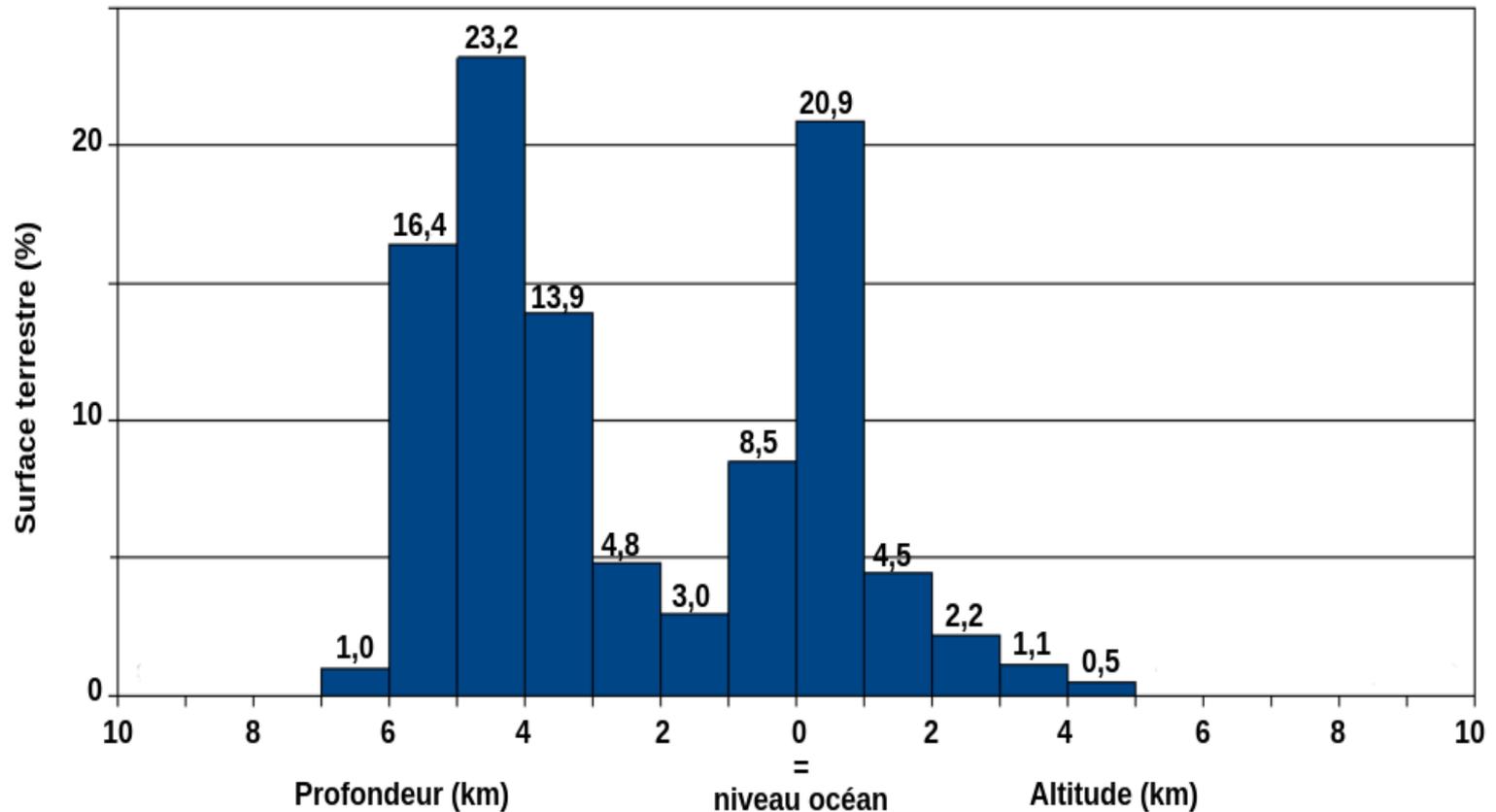


Hyposemetrische Kurve der Erdoberfläche, nach Krümmel.

Elles ont contribué à établir une répartition statistique des reliefs sur Terre → courbe hypsométrique "moderne" est le fruit d'Otto Krümmel en 1897 : En ordonnée, l'altitude ou la profondeur considérée au-dessus ou en dessous du niveau de la mer ("Meeresspiegel"). En abscisse, de gauche à droite, la surface terrestre cumulée en millions de kilomètres carrés



L'allure bimodale de cette courbe conduit à admettre l'existence de 2 croûtes de nature différente, confirmée par le prélèvement d'échantillons de roches.



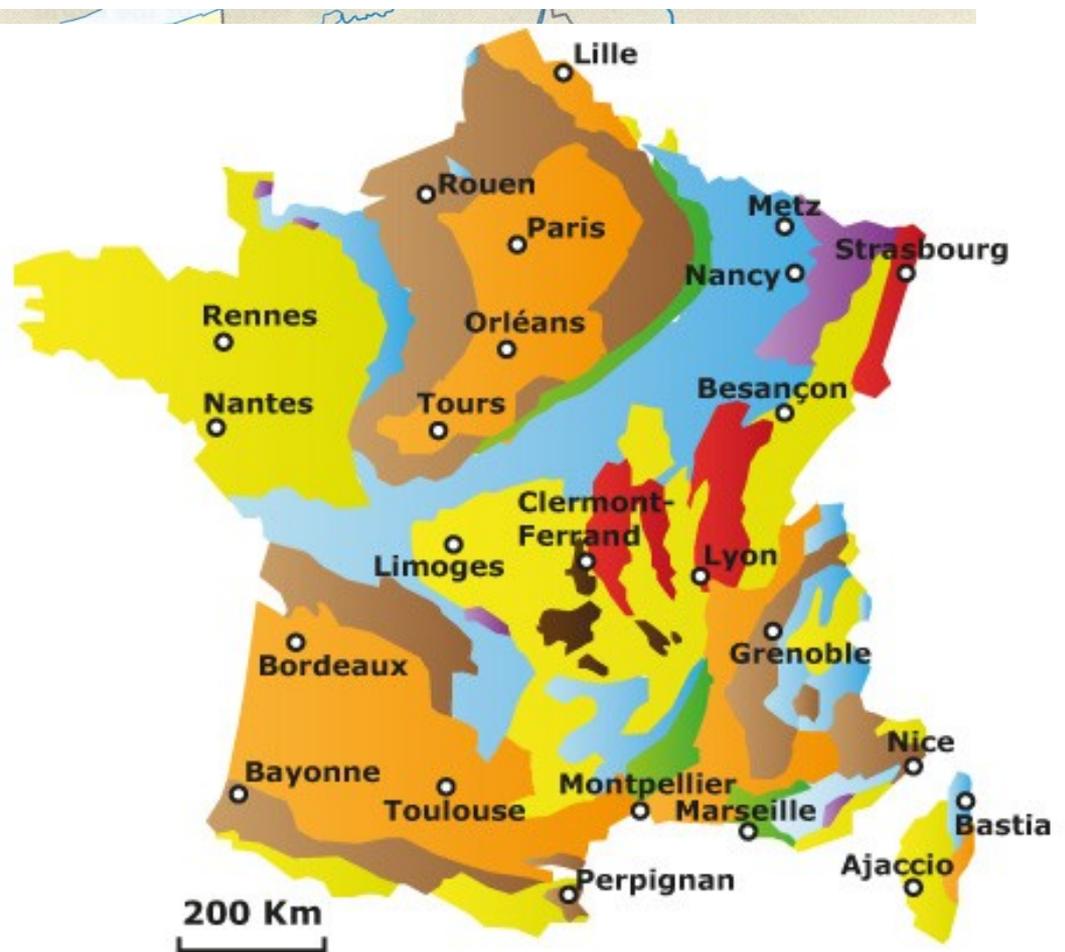
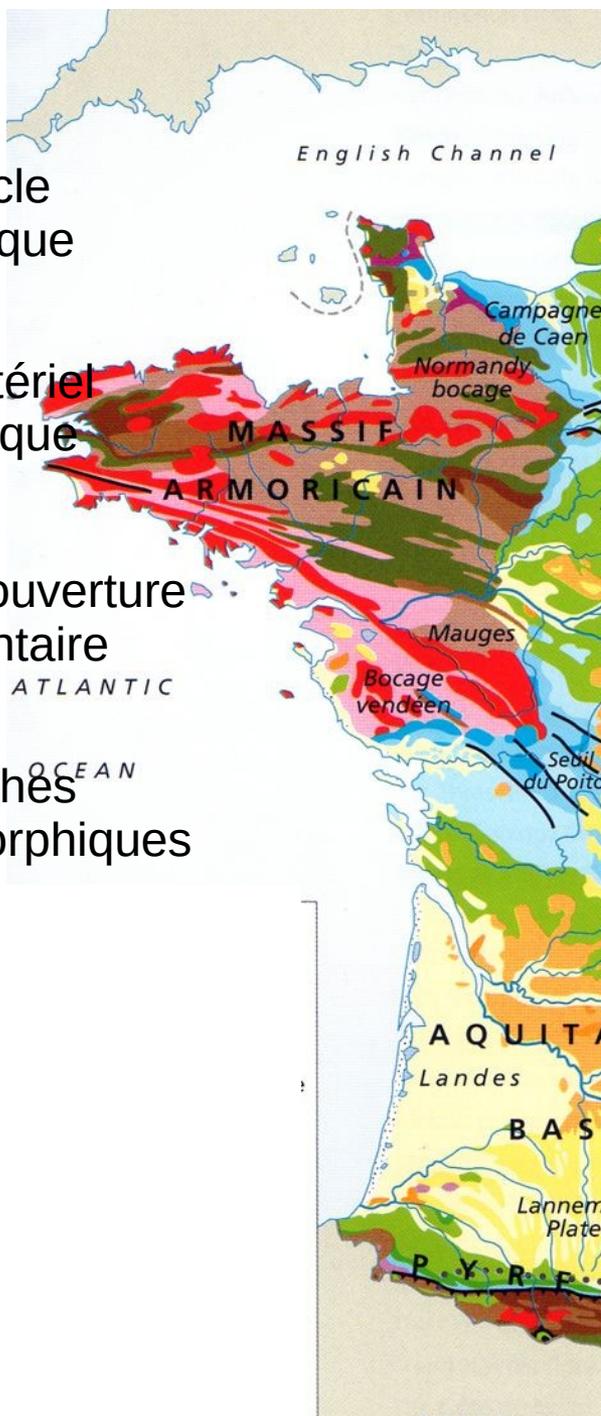
## 2.) Les caractéristiques de la croûte continentale

Du socle granitique

De matériel volcanique

De la couverture sédimentaire

Des roches métamorphiques



### Bassins sédimentaires

- Quaternaire et tertiaire
- Fossés tertiaires
- Crétacé supérieur

- Crétacé inférieur
- Jurassique
- Trias et Permien

### Chaînes de montagnes

- Socle Primaire anté-triasique  
Roches granitiques  
et métamorphiques

### Volcans

- Volcans

**Les caractéristiques de la croûte continentale sont connues à la fois par les échantillons prélevés en surface ou lors d'un forage et par des études géophysiques notamment par à l'aide de la sismique-réflexion.**

**Les études sismiques ont montré que la croûte était constituée de deux ensembles superposés, une croûte supérieure rigide et une croûte inférieure ductile.**

**La croûte continentale supérieure (CCS),  
épaisse d'une 15 km,  
roches très diversifiées.**

**En surface, on observe des roches sédimentaires et  
des roches volcaniques. ( 1 à 2 km)**

**roche représentative de la CCS est le granite.**

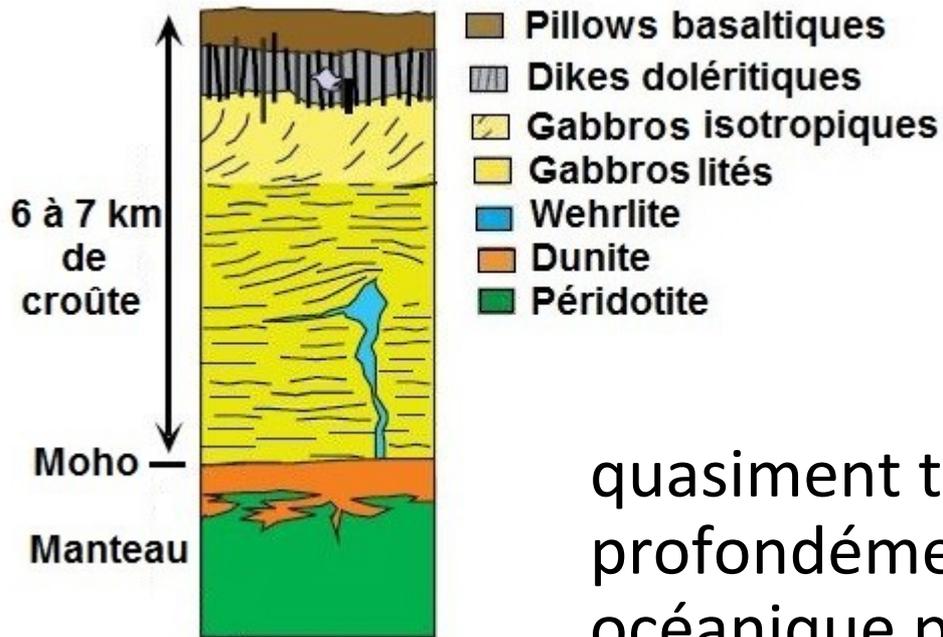
**L'observation microscopique d'une lame mince de  
cette roche permet d'observer sa structure  
holocristalline(grenue ou microgrenue) signant son  
origine magmatique et un refroidissement lent à  
quelques kilomètres de profondeur. Les minéraux  
formant ce type de roche sont essentiellement du  
quartz, des micas et des feldspaths (orthose ou  
plagioclase). La densité moyenne de la CCS est de  
l'ordre de 2,7.**

**La croûte continentale inférieure (CCI) épaisse de 15 km environ est constituée de roches métamorphiques en raison des fortes températures et pressions qui règnent au-delà de 15 km de profondeur. Elle possède une densité plus élevée (2,9) que la CCS.**

**La croûte continentale est donc principalement formée de roches voisines du granite, d'une épaisseur plus grande et d'une densité plus faible que la croûte océanique.**

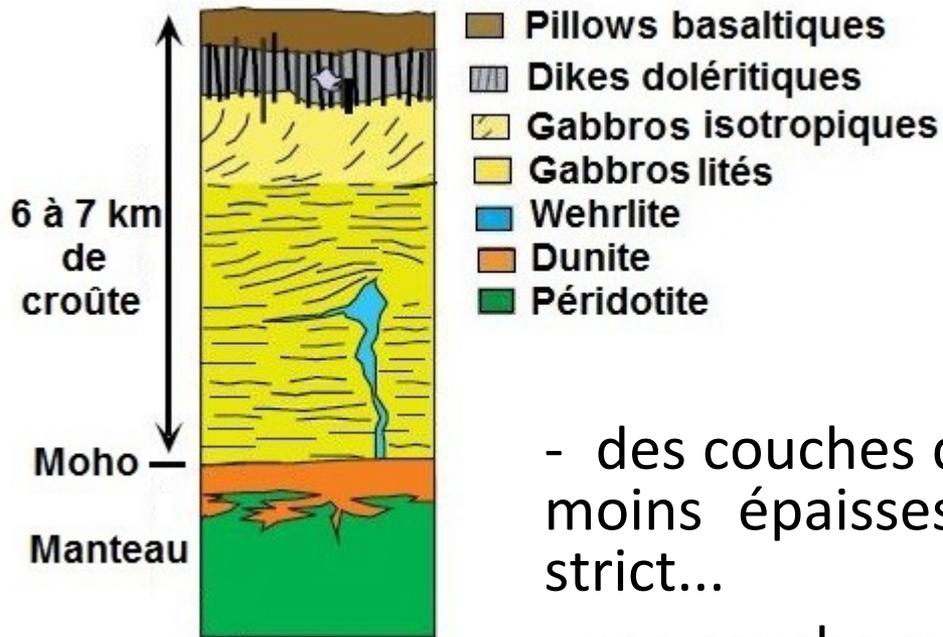
### 3.) Les caractéristiques de la croûte océanique

quasiment toujours immergées profondément  
prélevées grâce à des campagnes de forages ou de  
dragage de surface.



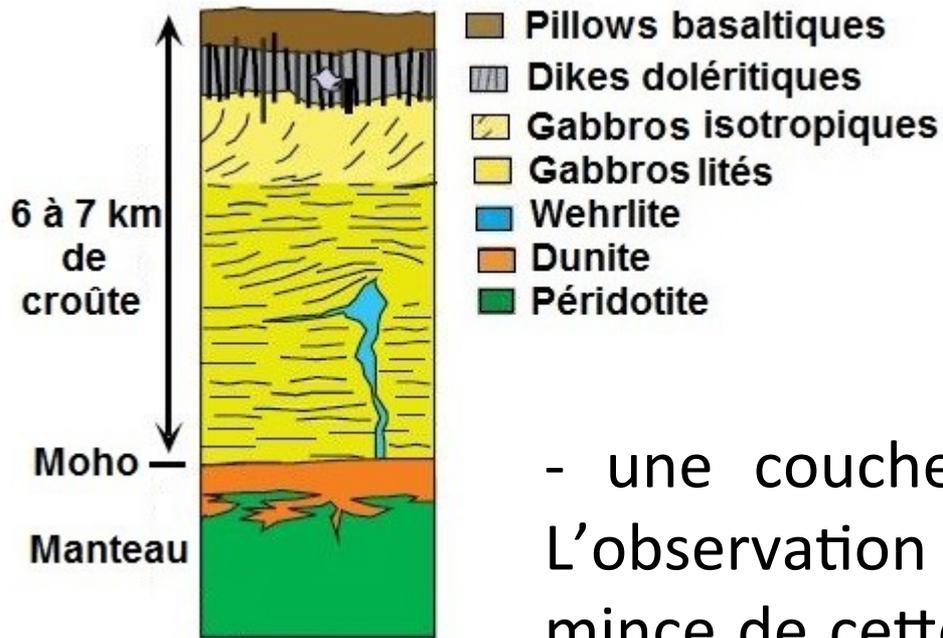
quasiment toujours immergées profondément, les roches de la croûte océanique peuvent être prélevées grâce à des campagnes de forages ou de dragage de surface.

La structure est la suivante : on distingue, comme le montre le schéma simplifié du modèle de Penrose ci-contre :

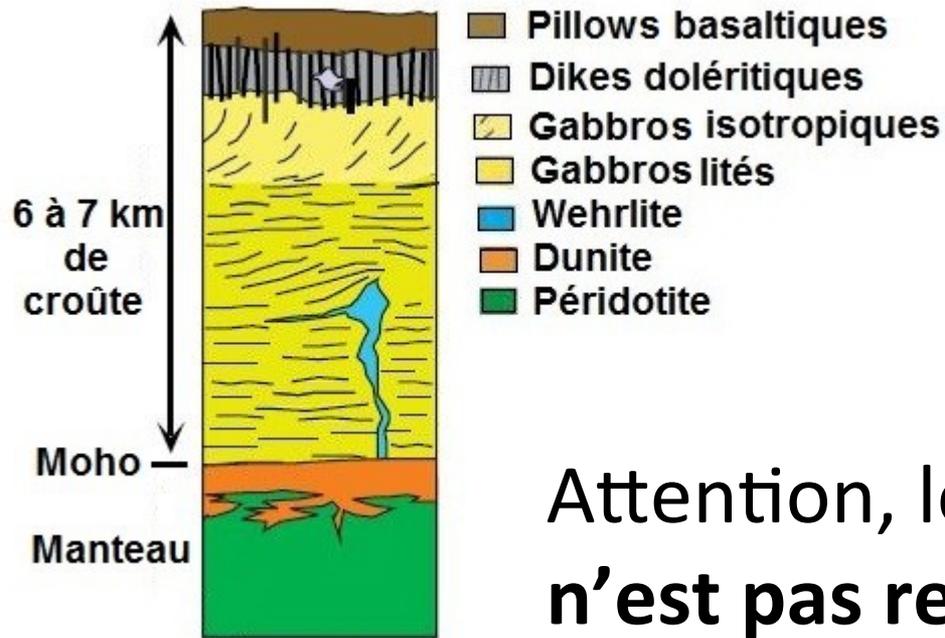


- des couches de **roches sédimentaires** plus ou moins épaisses déposées sur la croûte sens strict...

- une couche superficielle de cette croûte est constitué de **basalte**. L'observation microscopique d'une lame mince de cette roche permet d'observer sa structure **hemicristalline** (mélange de verre et de cristaux) signant son origine magmatique et un **refroidissement rapide proche de la surface**. Les minéraux formant ce type de roche sont essentiellement des **pyroxènes et de l'olivine dans certains cas et des feldspaths (surtout plagioclase)**. La **densité** moyenne du basalte est de l'ordre de **2,7 à 3**.



- une couche de **gabbro** plus profonde. L'observation microscopique d'une lame mince de cette roche permet d'observer sa structure **holocristalline** (grenue ou microgrenue) signant son origine magmatique et un refroidissement lent loin de la surface. Les minéraux formant ce type de roche sont **essentiellement des pyroxènes et des feldspaths (surtout plagioclase)**. La **densité** moyenne du gabbro est de l'ordre de **2,9 à 3,1**.



Attention, le modèle de **Penrose** n'est pas représenté de façon régulière au niveau de toutes les croûtes océaniques(loin de là...) . Ces quelques forages superficiels montrent l'hétérogénéité.



## 4.) Bilan de la comparaison et effet sur le relief

quasiment toujours immergées profondément  
prélevées grâce à des campagnes de forages ou de  
dragage de surface.

Caractéristiques:	Croute océanique	Croute continentale
Densité :	2,9	2,7/2,8
Age :	0 – 200 Ma	0 – 4Ga
Roches caractéristiques:	basalte/gabbro	Granite : 0-15km R.métamorphiques : 15-30km
Minéraux majoritaires:	Pyroxène et plagioclase	Quartz, micas et Feldspaths(Orth et plagio)(granite)
Relief	Négatif, niveau privilégié - 4800m	Positif, niveau privilégié + 300m

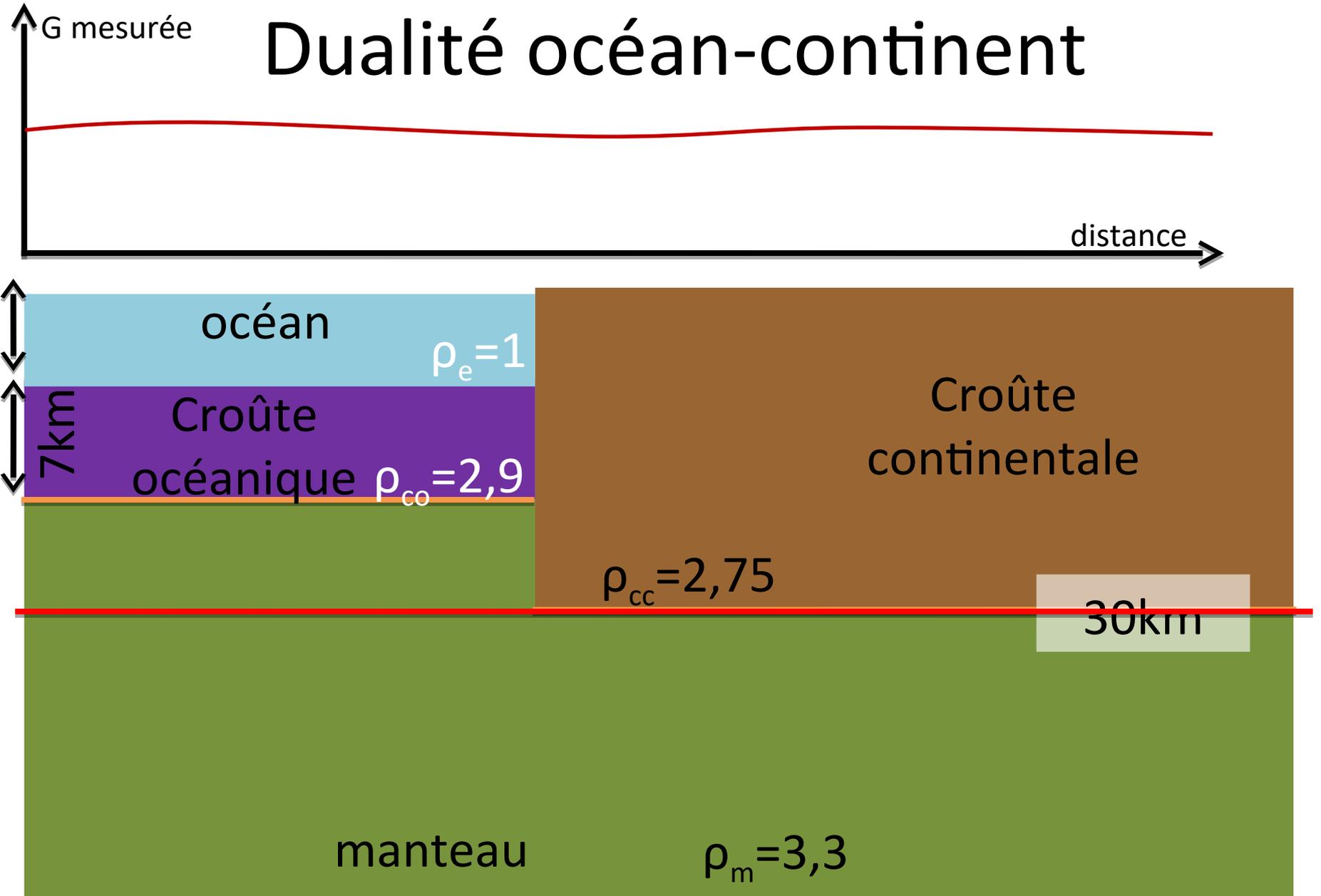
**La croûte continentale est principalement formée de roches voisines du granite, d'une épaisseur plus grande et d'une densité plus faible que la croûte océanique.**

**→ on distingue habituellement deux couches : CCS et CCI...**

# isostasie

état d'équilibre réalisé à une profondeur dite profondeur ou niveau de compensation pour laquelle, la pression de charge est la même en tout point

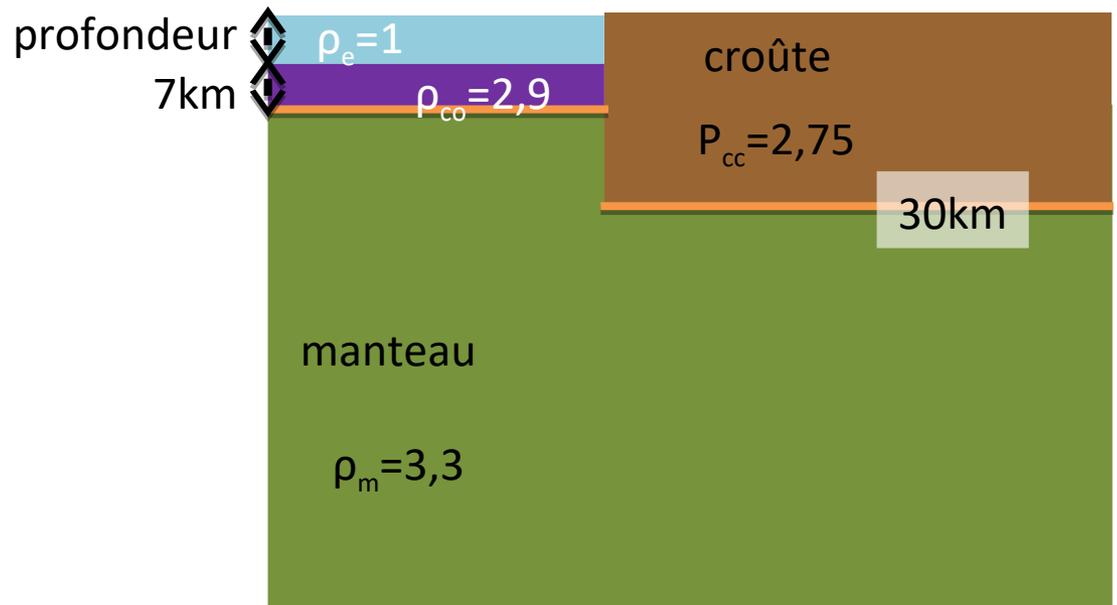
# Dualité océan-continent



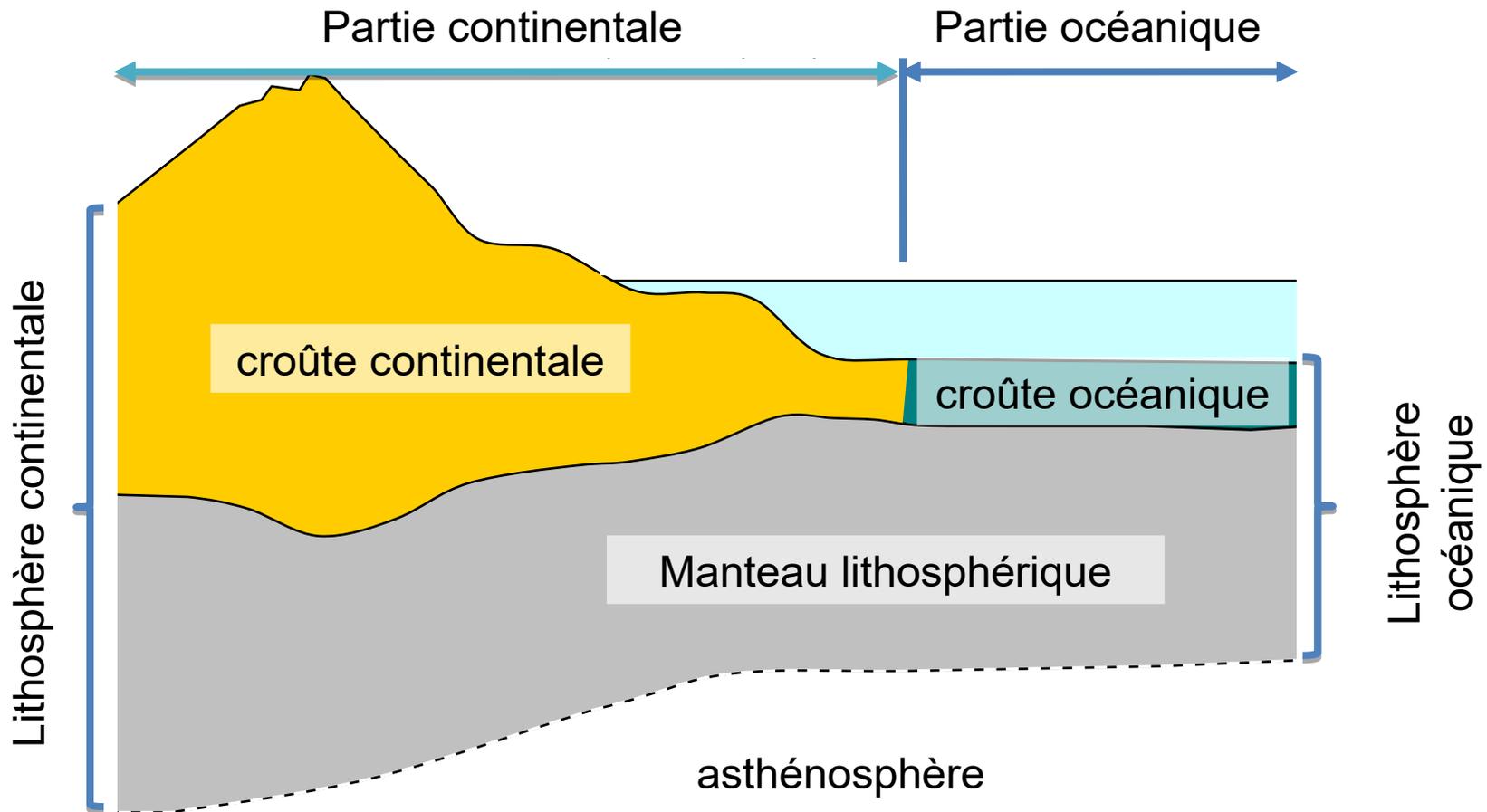
La CO est plus enfoncée que la CC dans le manteau car sa  $\rho_{co}=2,9$ .

$$30 \times 2,75 = \text{profondeur} \times 1 + (7 \times 2,9) + (30-7-\text{profondeur}) \times 3,3$$

Profondeur = 5,9 km. C'est bien la profondeur des plaines abyssales.



Bilan : La croûte terrestre n'a pas une composition homogène ; cc et co ont une composition différente et la croûte continentale, moins dense, s'oppose à la croûte océanique, plus dense → ceci explique la différence d'altitude entre continents et océans, la courbe bimodale, reflet d'un contraste géologique, d'une dualité des cc et co.

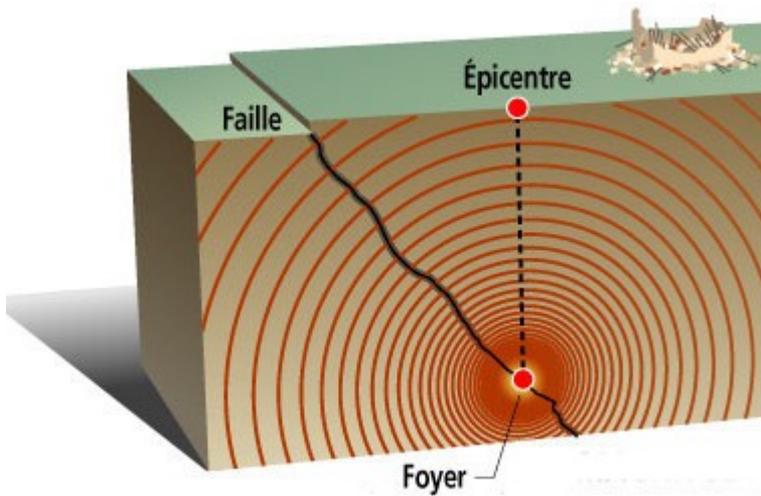


Les forages ne dépassent pas la profondeur de qq km (un peu plus de 12 km sur le forage de Kola en Russie, plus profond du globe, entre 1970 et 1989 -12262m) ; pour comprendre la structure profonde du globe, une autre approche est nécessaire.

**II- L'apport des études  
sismologiques et thermiques à la  
connaissance du globe terrestre .**

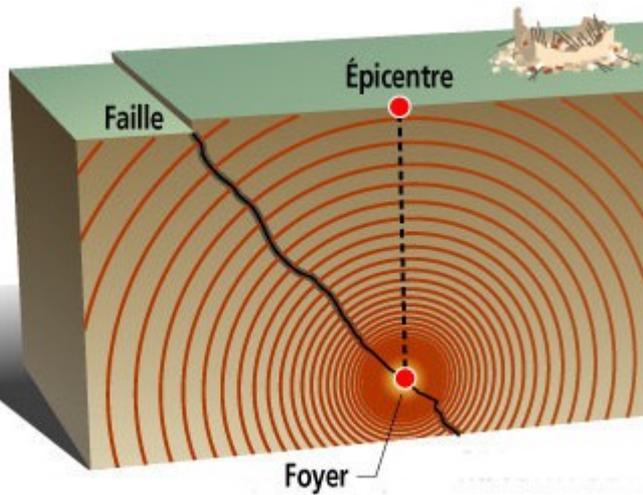
**(post TP11)**

**1.) Les ondes sismiques**



Les **ondes sismiques** sont émises dans toutes les directions de l'espace depuis un **foyer sismique** qui correspond au lieu de la **rupture brutale d'une roche** , au niveau d'une faille après avoir emmagasinée de l'énergie sous forme d'une contrainte...

Il existe différentes **deux grands types d'ondes** émises par un foyer sismique: les ondes de volume et les ondes de surface.



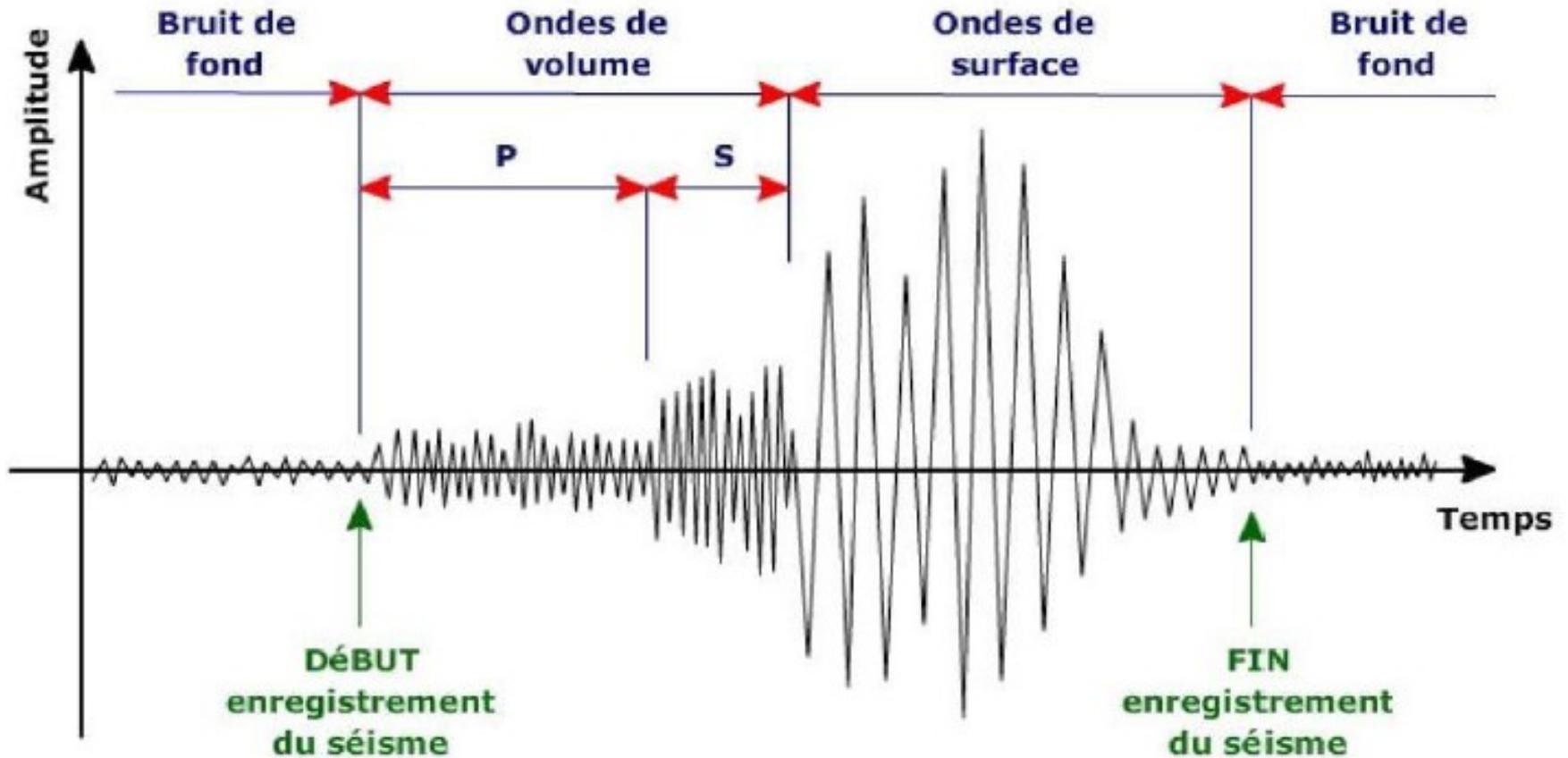
Il existe **deux types d'ondes de volume** : les ondes P, dites de **compression**, et les ondes S, dites de **cisaillement**.

Les ondes P sont des ondes de dilatation, pour lesquelles le mouvement des particules a lieu dans la direction de propagation de l'onde. Elles sont analogues à la propagation du son dans l'air. Les ondes S correspondent à un cisaillement et à une rotation des particules lors du passage de l'onde.

**Les ondes de surfaces sont des ondes sismiques guidées entre la surface et les interfaces peu profondes.**

**sont dites “dispersives”, c’est à dire que leur vitesse de propagation dépend de leur fréquence. Les courbes de dispersion que l’on peut obtenir sont utilisées pour étudier la structure fine de la lithosphère. Les ondes de surface sont un outil privilégié en tomographie sismique.**

Ces ondes peuvent être enregistrées lors de leur passage grâce à un sismomètre, l'enregistrement se nomme un sismogramme :



**II- L'apport des études  
sismologiques et thermiques à la  
connaissance du globe terrestre .**

**(post TP11)**

**2) Comportements des ondes.**

**La vitesse** à laquelle voyagent les ondes P (VP ) et S (VS), dépend des **propriétés physiques du milieu traversé**. Elles s'expriment en fonction des **modules de cisaillement  $\mu$ , du coefficient de compressibilité K, et de la densité du milieu :**

$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}},$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

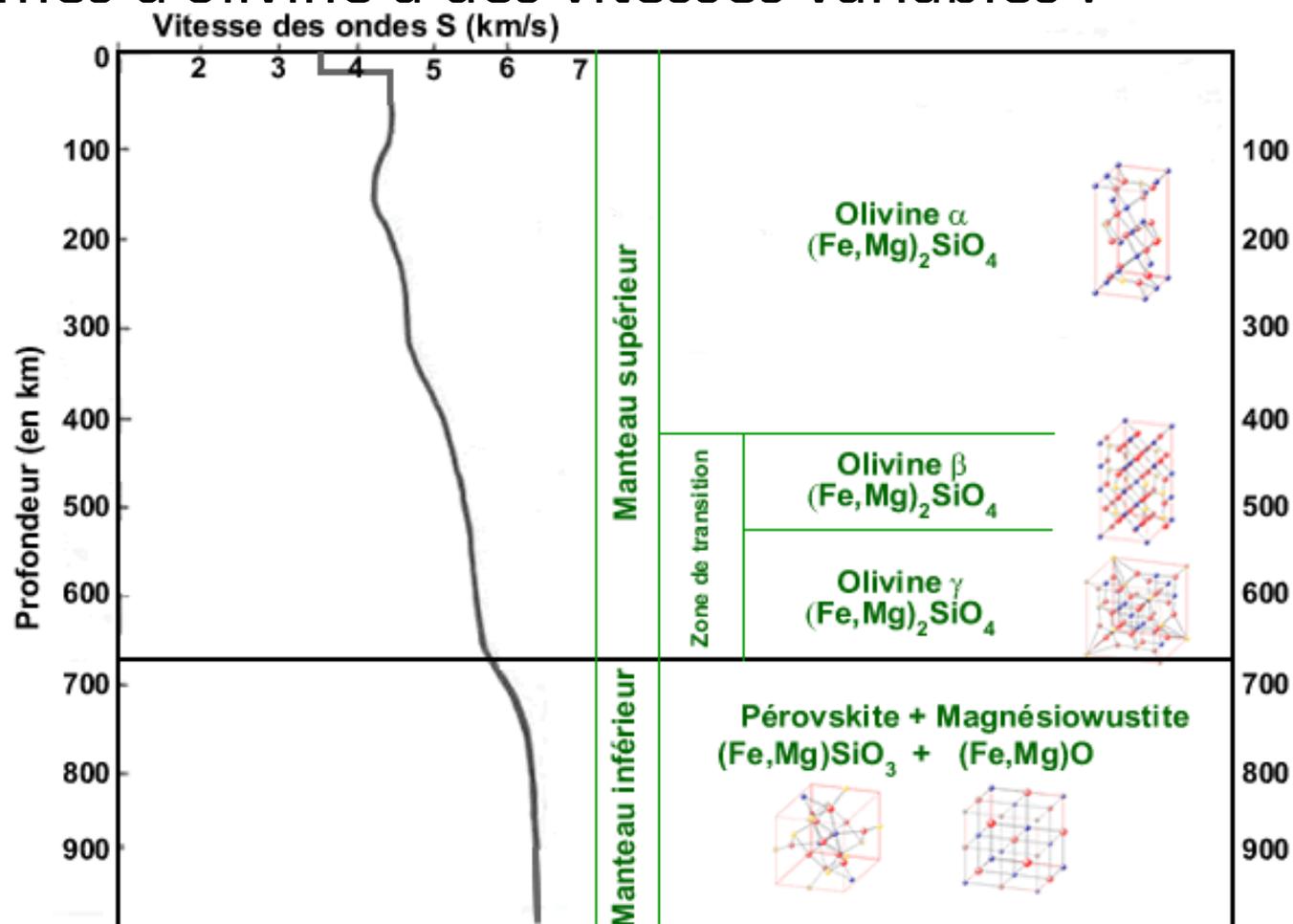
Le module de cisaillement d'un liquide est nul  $\rightarrow$  les liquides ne propagent pas les ondes S.

au sein des matériaux solides, les ondes vont adopter des vitesses variables selon les propriétés de la couche traversée. La densité et la compressibilité dépendent de la Température, on aura donc, pour un même matériaux, des vitesses différentes des ondes pour des températures différentes.

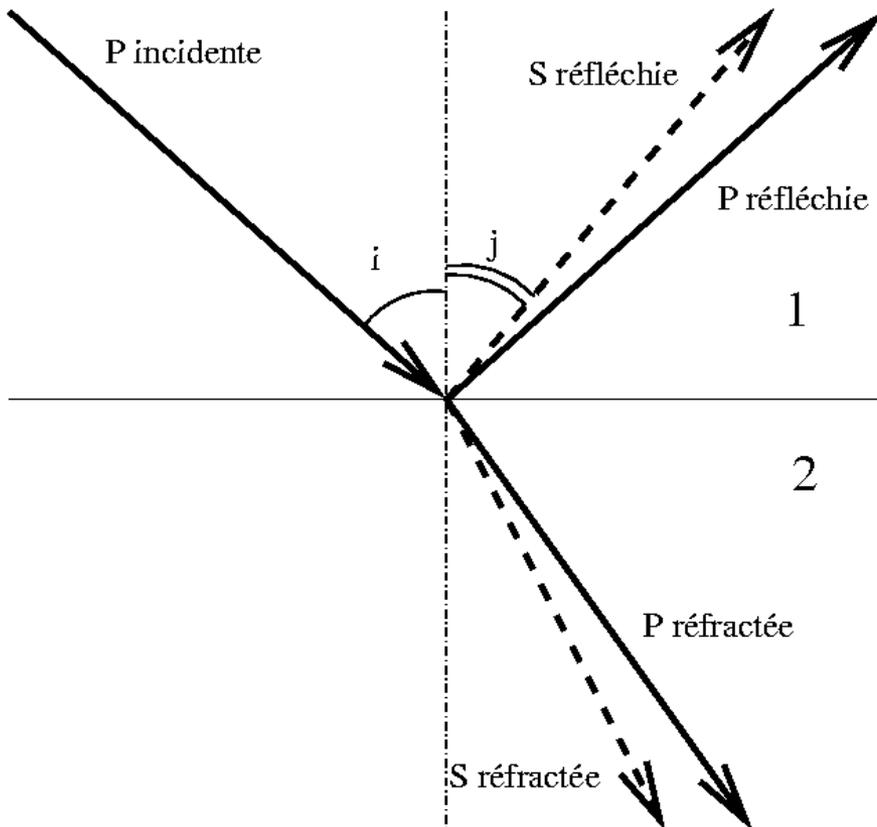
$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}},$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

Ces caractéristiques influençant la vitesse des ondes sont aussi influencées notamment par la structure des minéraux. Par exemple, les ondes traversent les différentes formes d'olivine à des vitesses variables :

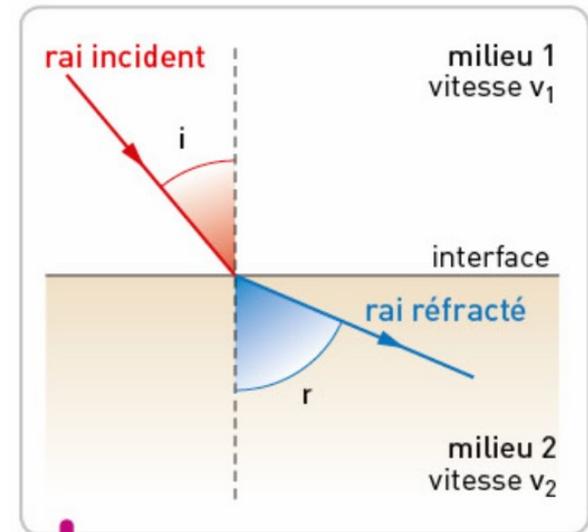


De plus, à l'interface entre deux milieux aux caractéristiques changeant brutalement, le trajet des ondes est bouleversé. On peut avoir des ondes réfléchies ou bien réfractées. (Lois de Snell-Descartes :)



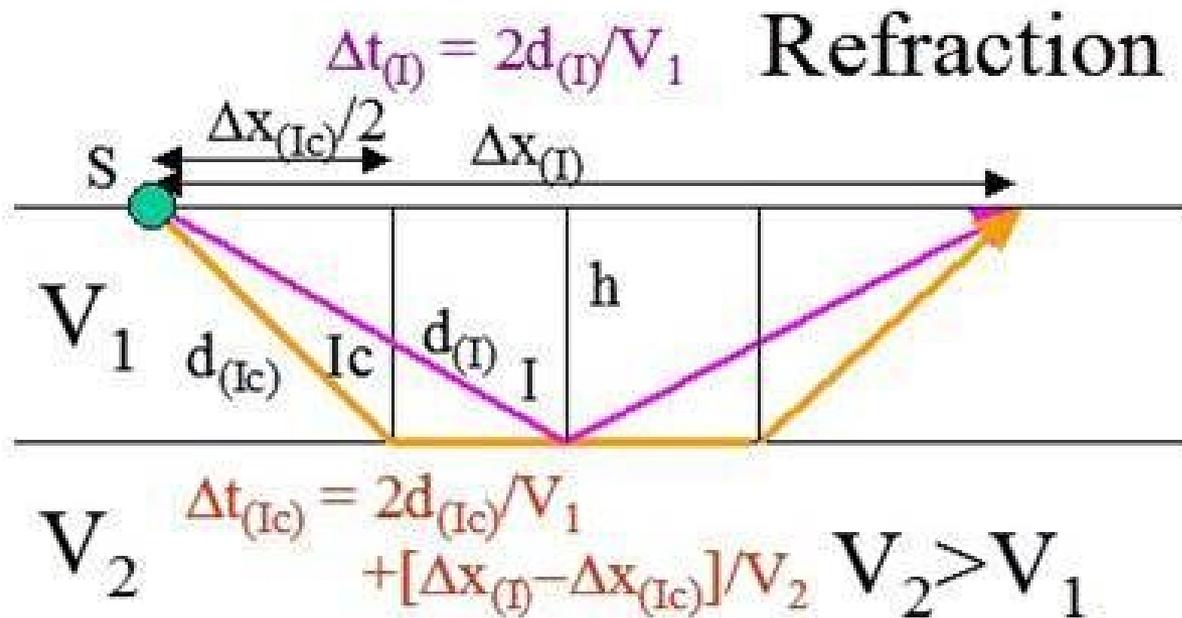
$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

avec  $n=c/v$   
 $V$ =vitesse d'une onde  
dans un milieu  
 $c$ =vitesse de la lumière



Loi de Snell-Descartes et discontinuités.

Comme en optique encore, sous incidence critique et dans les conditions de vitesse le permettant ( $V$  milieu inférieur  $>$   $V$  milieu supérieur), le rai subit une réfraction totale, et voyage à l'interface « dans » la discontinuité à la vitesse du milieu inférieur rapide, générant des ondes coniques.



**II- L'apport des études  
sismologiques et thermiques à la  
connaissance du globe terrestre .  
(post TP11)**

**3) Utilisation des propriétés des  
ondes pour construire un modèle.**

# A – Une symétrie centrale.

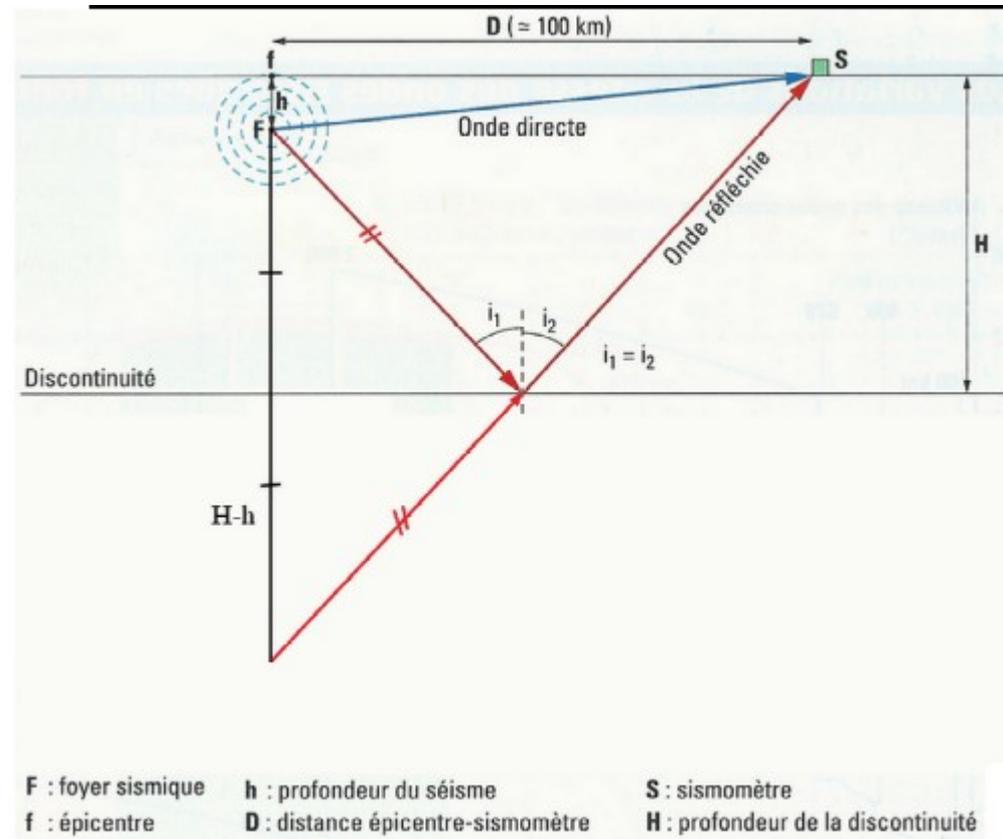
quelle que soit la localisation géographique d'un séisme, les lois de transmission des ondes sismiques restent les mêmes ; ceci prouve que la structure du globe présente une symétrie sphérique : la Terre est constituée de couches concentriques dont on peut déterminer la nature en fonction de la vitesse des ondes qui les traversent.

# B – Dédutions des ondes réfléchies.

sismogrammes de stations proches de l'épicentre montrent des ondes P directes mais aussi des ondes P indirectes →

discontinuité marquant la limite entre croûte terrestre et manteau: le Moho(ou discontinuité de Mohorovic).

30 km sous un continent, 7 km sous un océan.



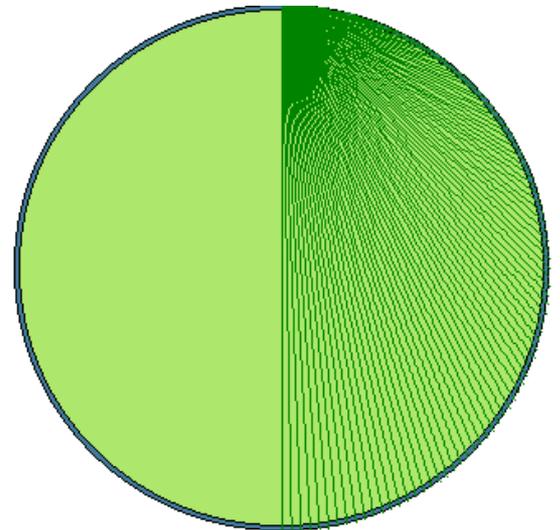
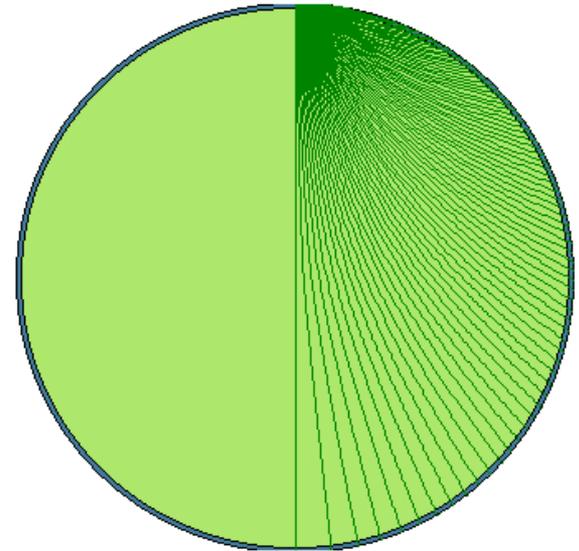
# C – Dédutions des ondes réfractées.

## Un modèle à penser....

Le modèle "Une couche" présente une sphère homogène mais où la vitesse des ondes augmente proportionnellement avec la profondeur, les rais sont incurvés :

Si on décide que la vitesse a une valeur constante (ici 10 km/s) en modifiant avec la souris la position des ronds bleus. On obtient alors un modèle où les rais sont droits :

La pression et la température augmentant en profondeur, les coef de compressibilité et les densités vont varier.. la vitesse aussi. Le modèle 1 est donc le mieux adapté.



# C – Dédutions des ondes réfractées.

début XX ème siècle Gutenberg remarque que les sismogrammes de stations éloignées de l'épicentre montrent que dans les stations situées à moins de 11 500 km on enregistre des ondes P et S directes. Entre 11 500 et 14 500 km (distance angulaire de  $142^\circ$ ) de distance épicentre-station, les ondes P et S directes disparaissent (zone d'ombre en anneau), et au-delà de 14 500 km, les ondes P réapparaissent.



# C – Dédutions des ondes réfractées.

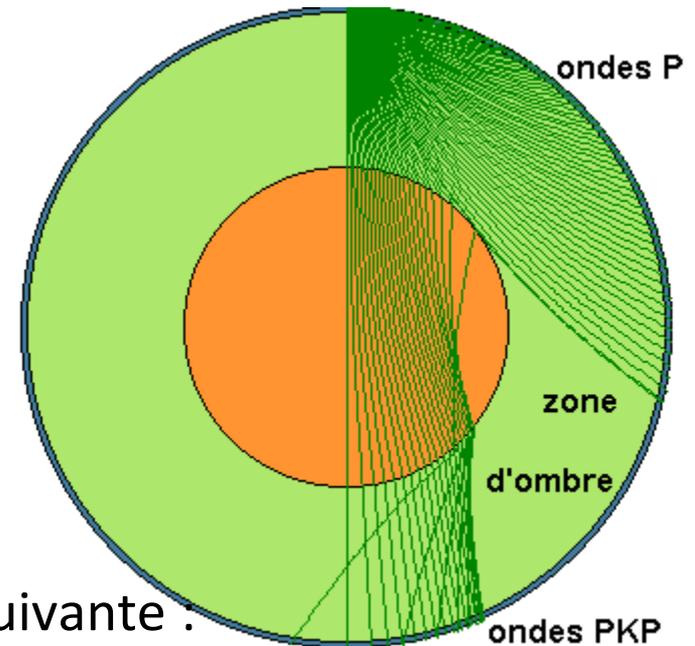
Le modèle "Deux couches avec saut" présente une sphère hétérogène, avec le manteau traversé par les ondes P, et le noyau traversé par les ondes PKP où elles subissent une réfraction :

En tomographie, on utilise la nomenclature suivante :

Les Ondes P traversant le manteau se nomment P ; le noyau externe : K ; le noyau interne : I

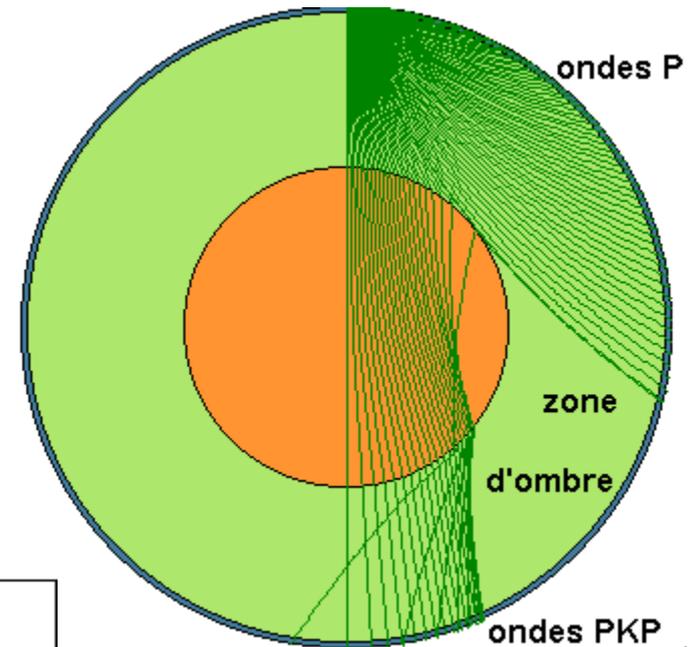
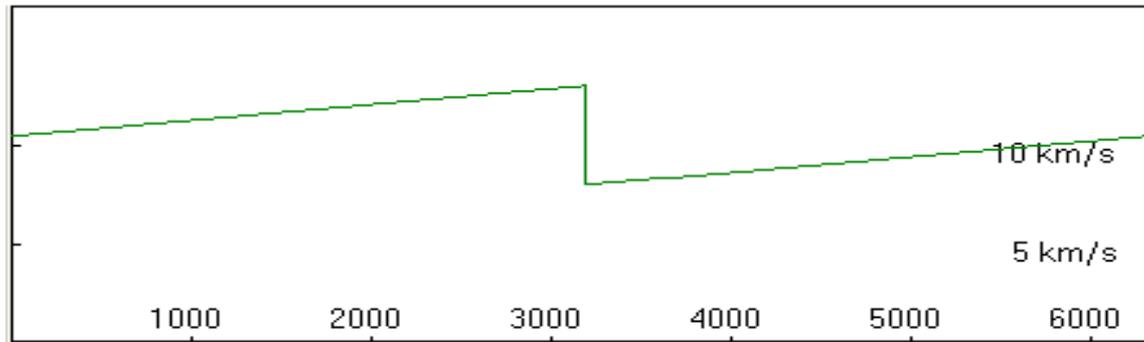
Les Ondes S traversant le manteau se nomment S ; le noyau externe : pas d'onde S ; et le noyau interne : J

exemples : onde PP est une onde P qui réfléchit sur une discontinuité du manteau avant de réapparaître en surface où elle est détectée. onde PKP sera une onde P qui ressort en surface après avoir traversé le noyau externe liquide.

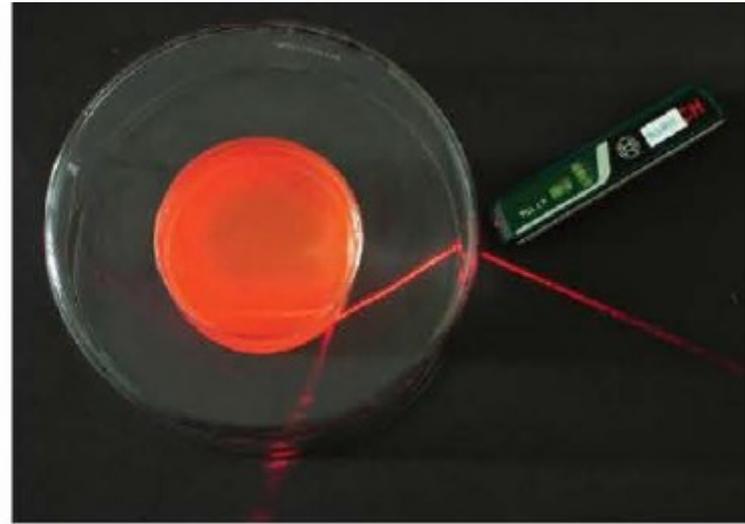
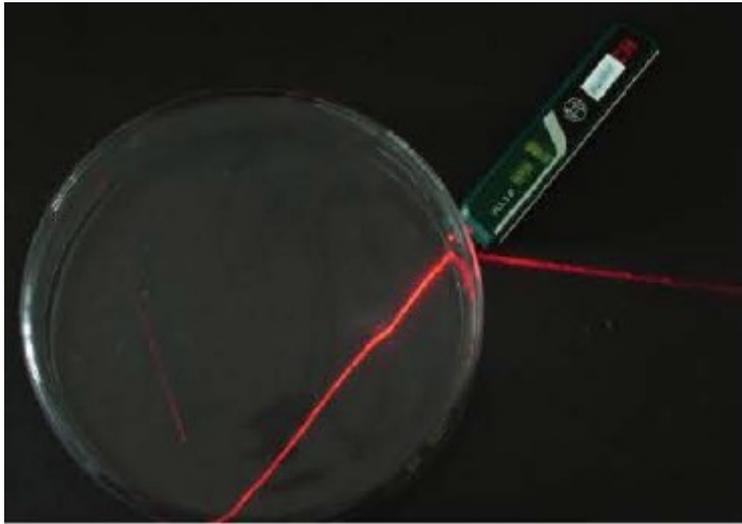


# C – Dédutions des ondes réfractées.

Le modèle "Deux couches avec saut" présente une sphère hétérogène, avec le manteau traversé par les ondes P, et le noyau traversé par les ondes PKP où elles subissent une réfraction :



Ce modèle permet d'expliquer la zone d'ombre... Le fait que les ondes S disparaissent peut être expliqué par la nature liquide de la sphère centrale...(cisaillement nul)



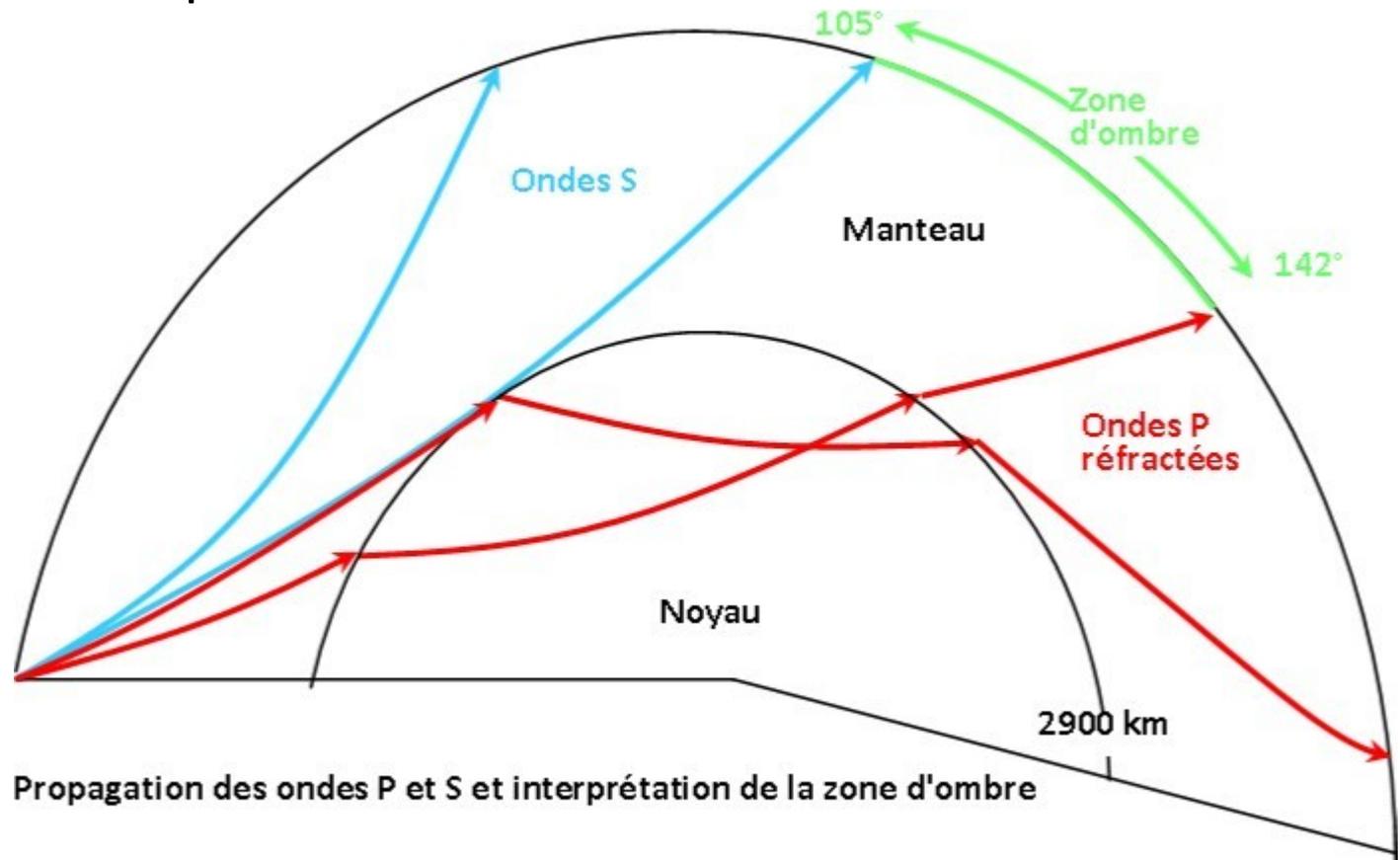
### Rq : Du labo à l'interprétation du réel :

à la rupture entre deux couches différentes, les ondes peuvent être déviées comme le montre le modèle laser. Ce comportement peut expliquer l'existence de zones d'ombre des ondes P et permettre de situer l'interface manteau-noyau ou discontinuité de Gutenberg à 2885km de profondeur.



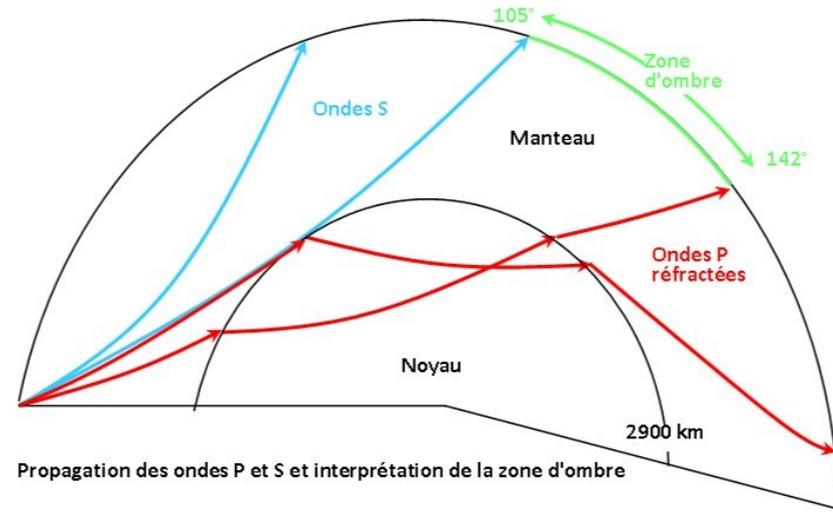
# C – Dédutions des ondes réfractées.

La réfraction des ondes P à l'interface Manteau / Noyau explique une partie du phénomène....

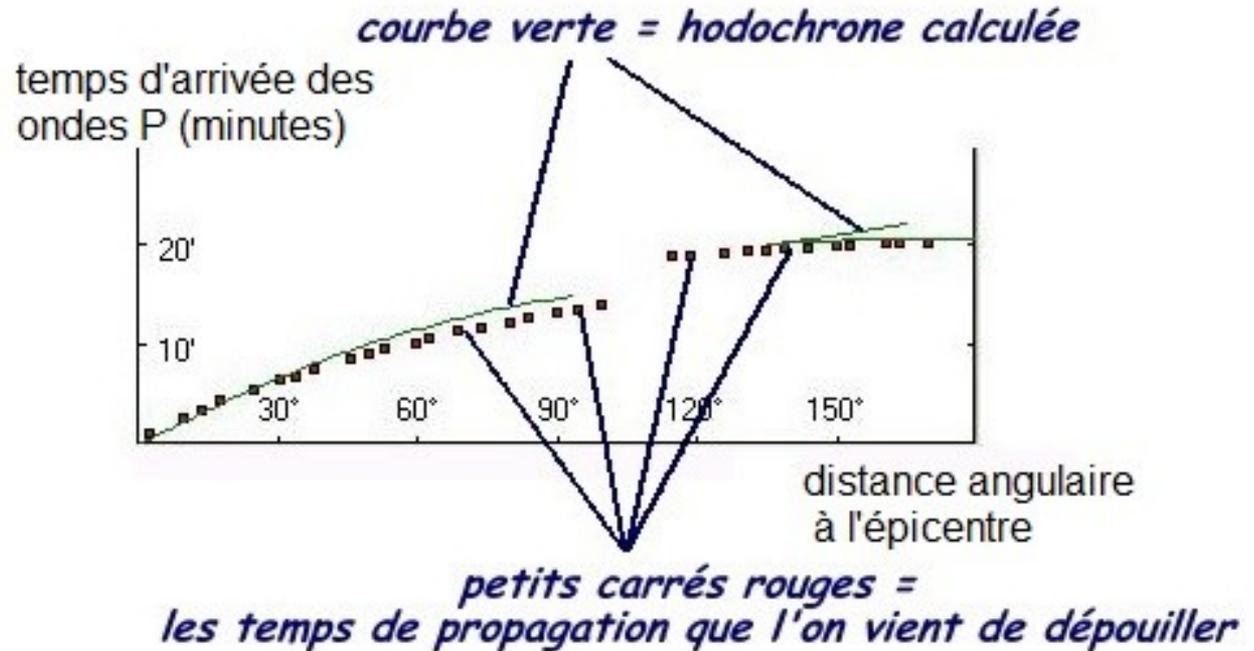


# C – Déductions des ondes réfractées.

la limite manteau-noyau ou discontinuité de Gutenberg (découverte en 1912) se situe à 2 900 km de profondeur. Au-delà de 11 500 km, les ondes S ne réapparaissent pas, elles ne sont donc pas transmises par le noyau ; comme ce sont des ondes de cisaillement ne se propageant pas dans les liquides, on peut admettre que le noyau, du moins dans sa partie externe, se comporte comme un liquide.

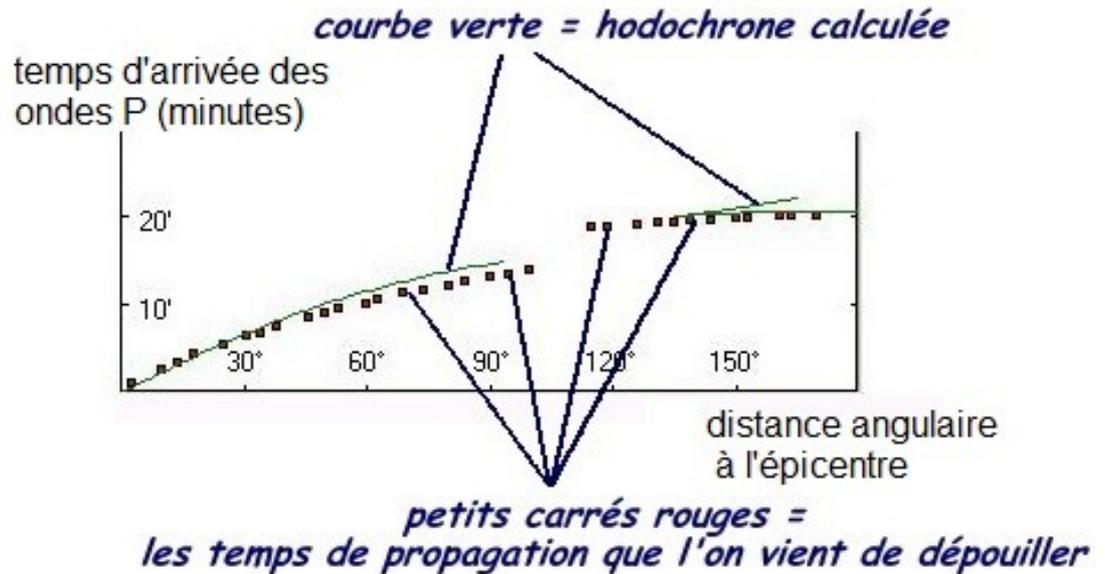


# C – Dédutions des ondes réfractées.



Le « réel » (temps d'arrivée des ondes aux différentes stations, lus sur les sismogrammes) ne correspond pas tout à fait aux prédictions du modèle (temps de propagation calculés d'après le profil de vitesse des ondes P associé au modèle).

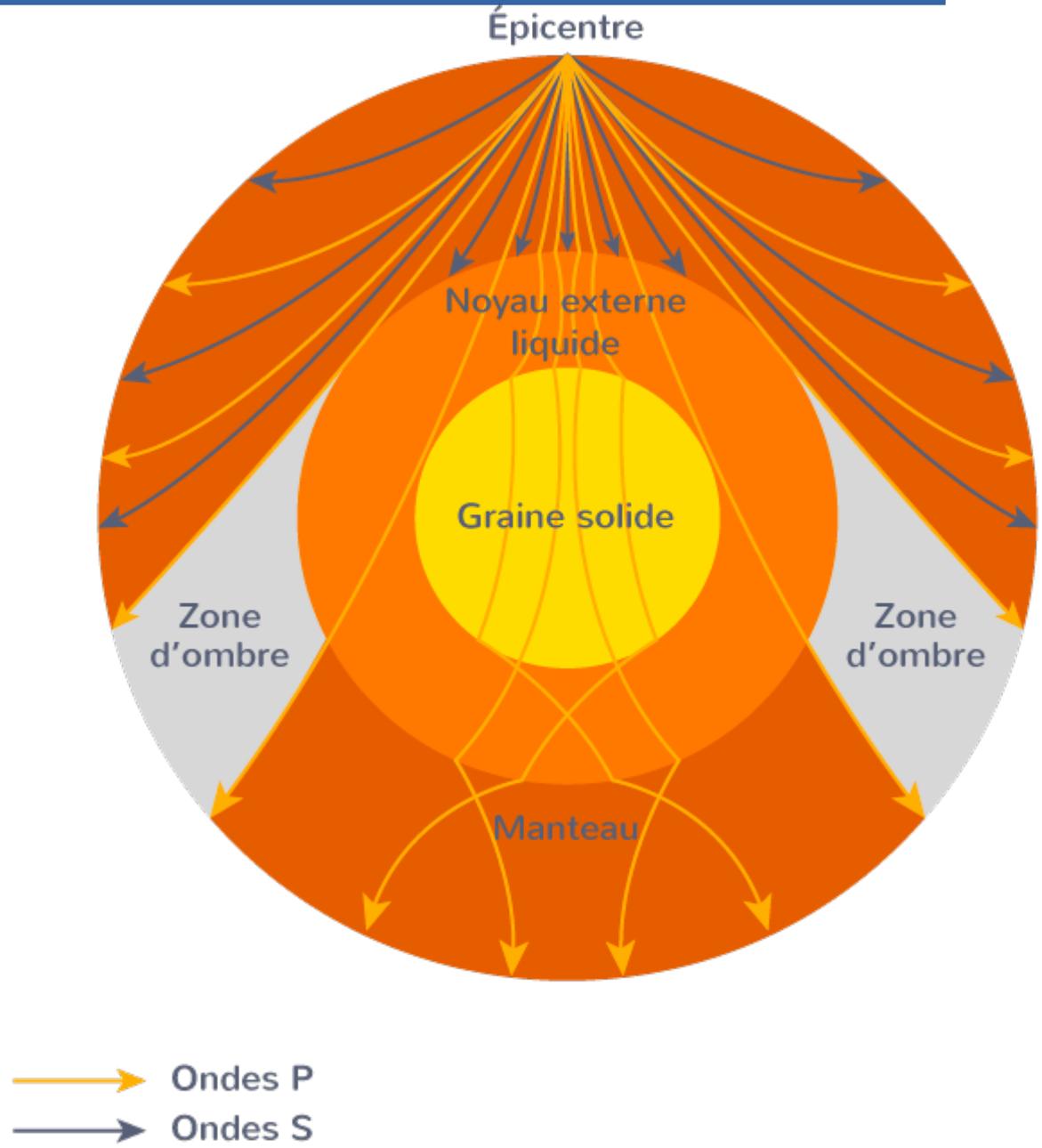
# C – Dédutions des ondes réfractées.



Deux défauts sont observés. D'une part, les temps effectifs sont légèrement inférieurs à ceux prévus par le modèle, en particulier pour les stations situées entre  $45^\circ$  et  $100^\circ$  de distance angulaire par rapport à l'épicentre. D'autre part, dans la réalité, des arrivées d'ondes P sont enregistrées dans certaines stations, qui, selon le modèle, ne reçoivent pas ces ondes. Ce modèle de structure de globe à deux enveloppes séparées par une discontinuité n'est pas validé.

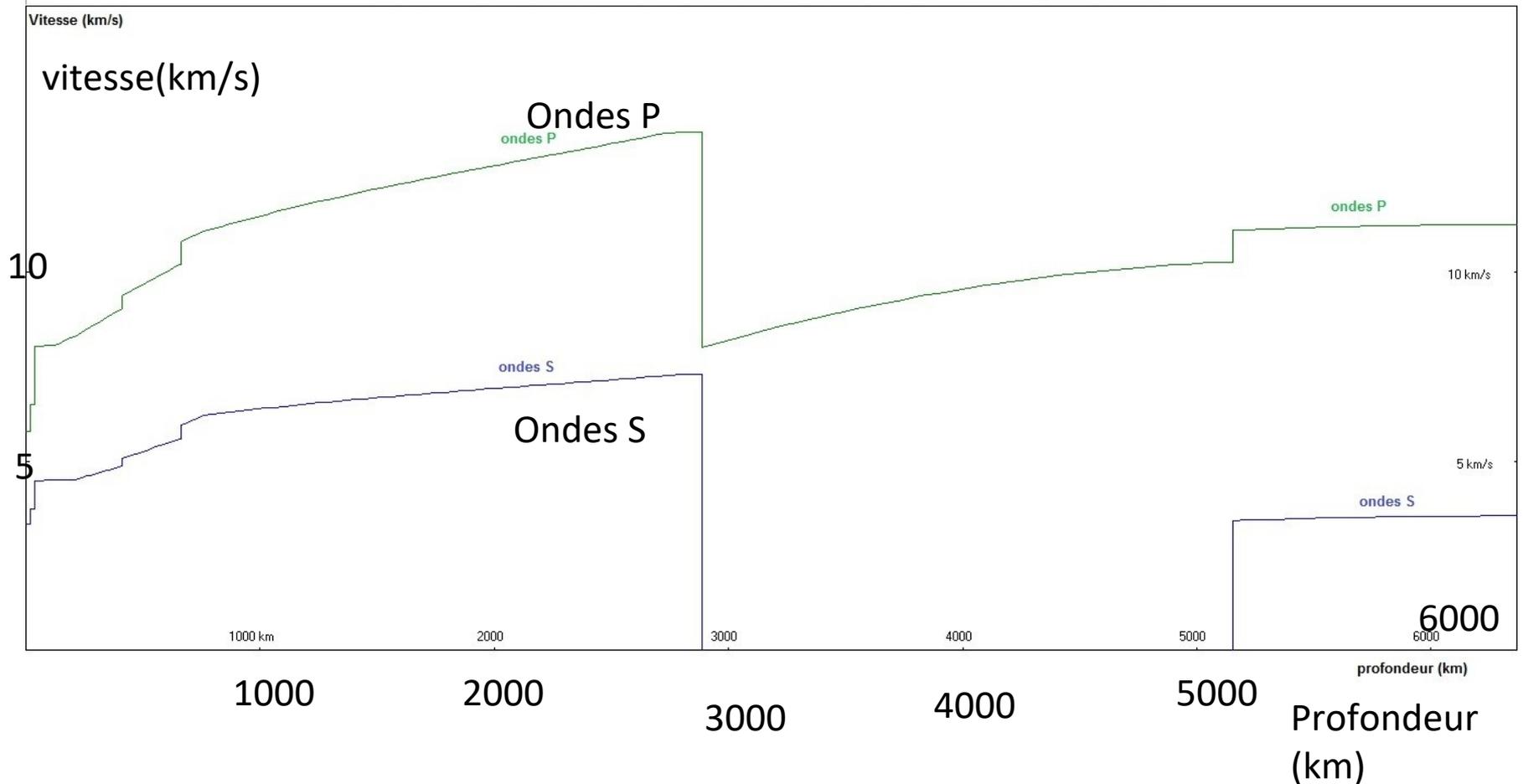
# C – Dédutions des ondes réfractées.

Le modèle "vrai" intègre en plus une graine solide. Ce modèle correspond aux observations, notamment celles des vitesses des ondes P et S en fonction de la profondeur....



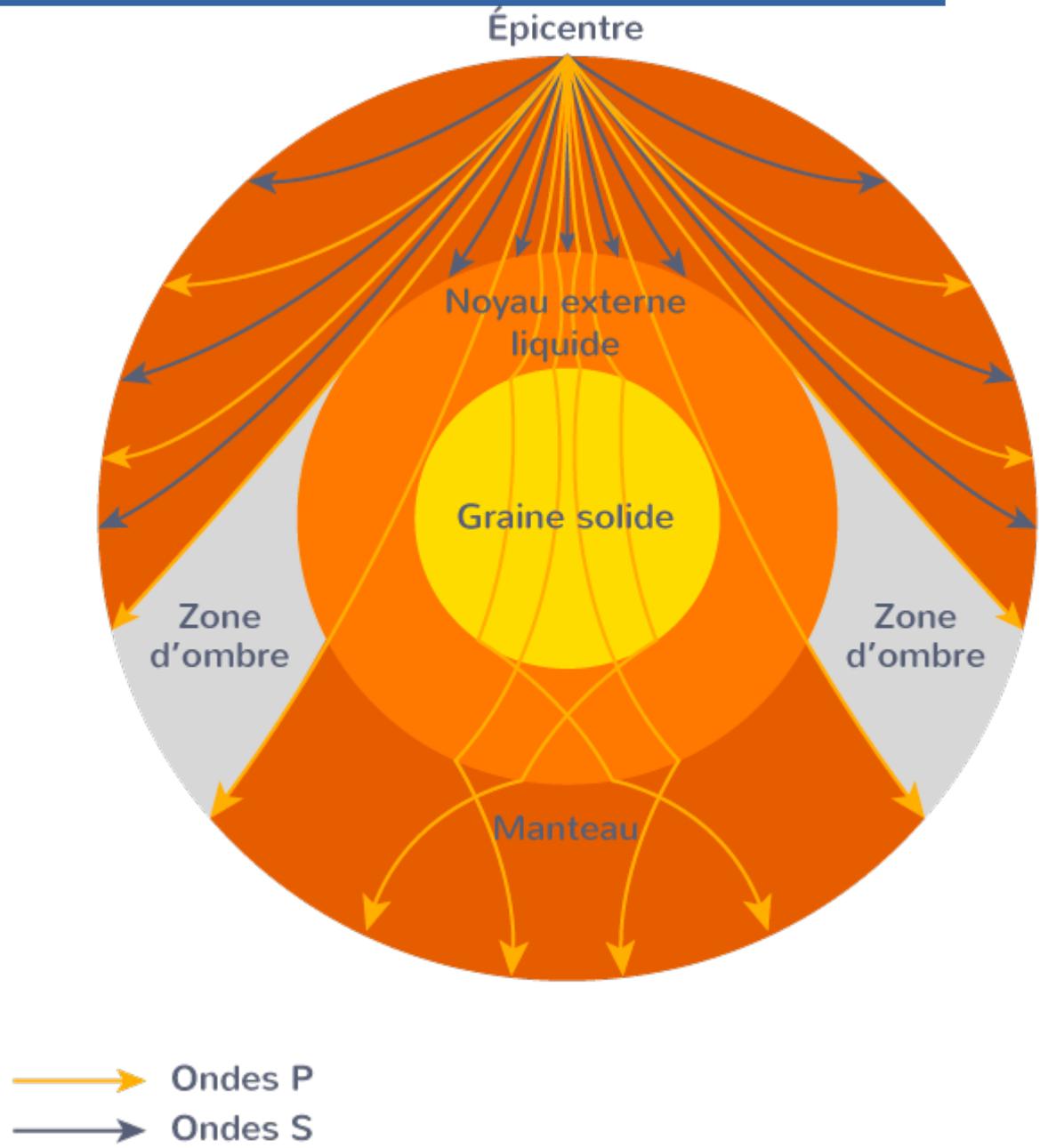
# C – Dédutions des ondes réfractées.

Profil des vitesses des ondes sismiques P et S en fonction de la profondeur



# C – Dédutions des ondes réfractées.

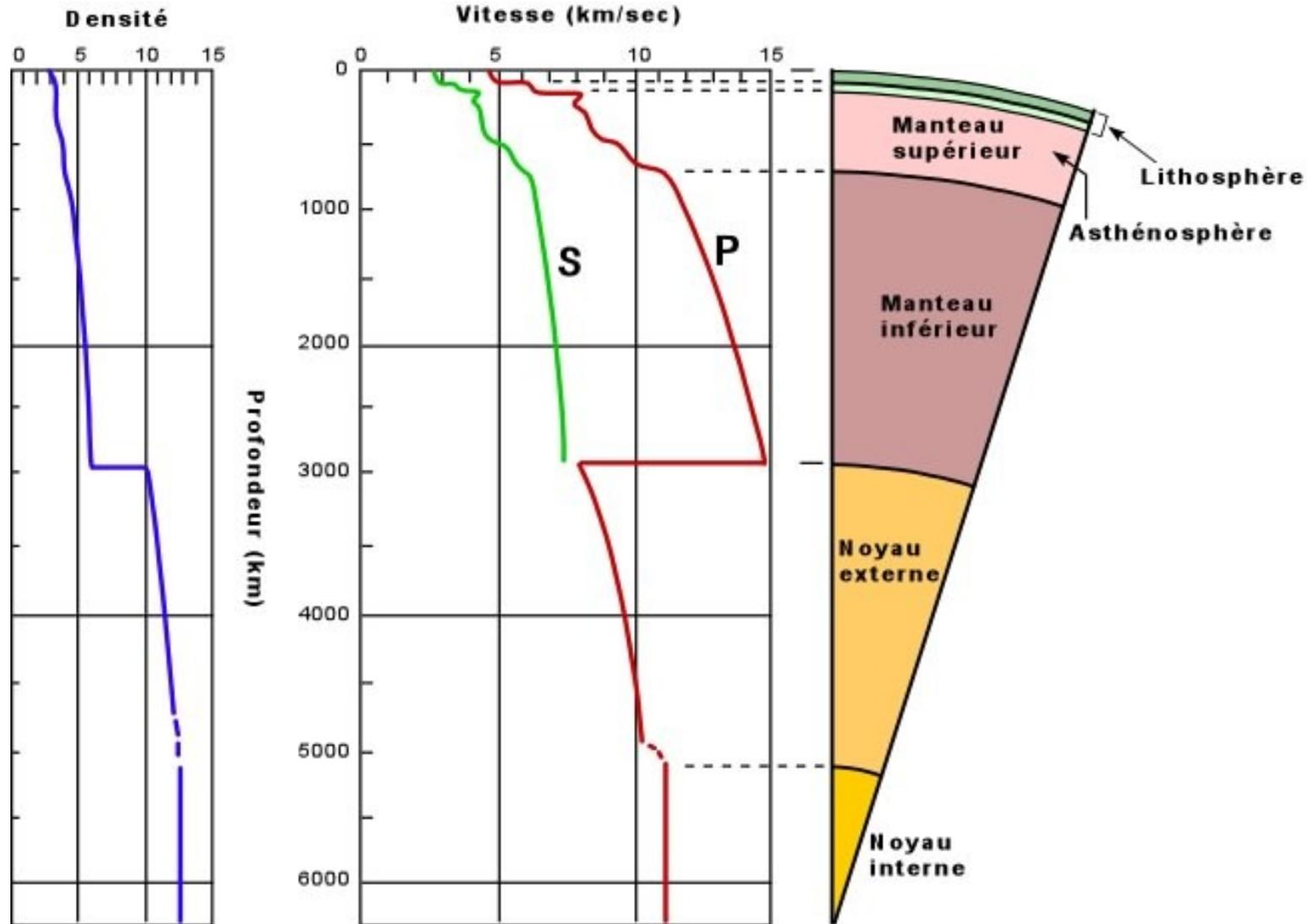
Une analyse fine des données sismiques a en 1936 permis de mettre en évidence une discontinuité vers 5100 km délimitant un noyau externe d'un noyau interne ou graine, solide : c'est la discontinuité de Lehman.



# D- Construction du modèle de la structure interne du globe.

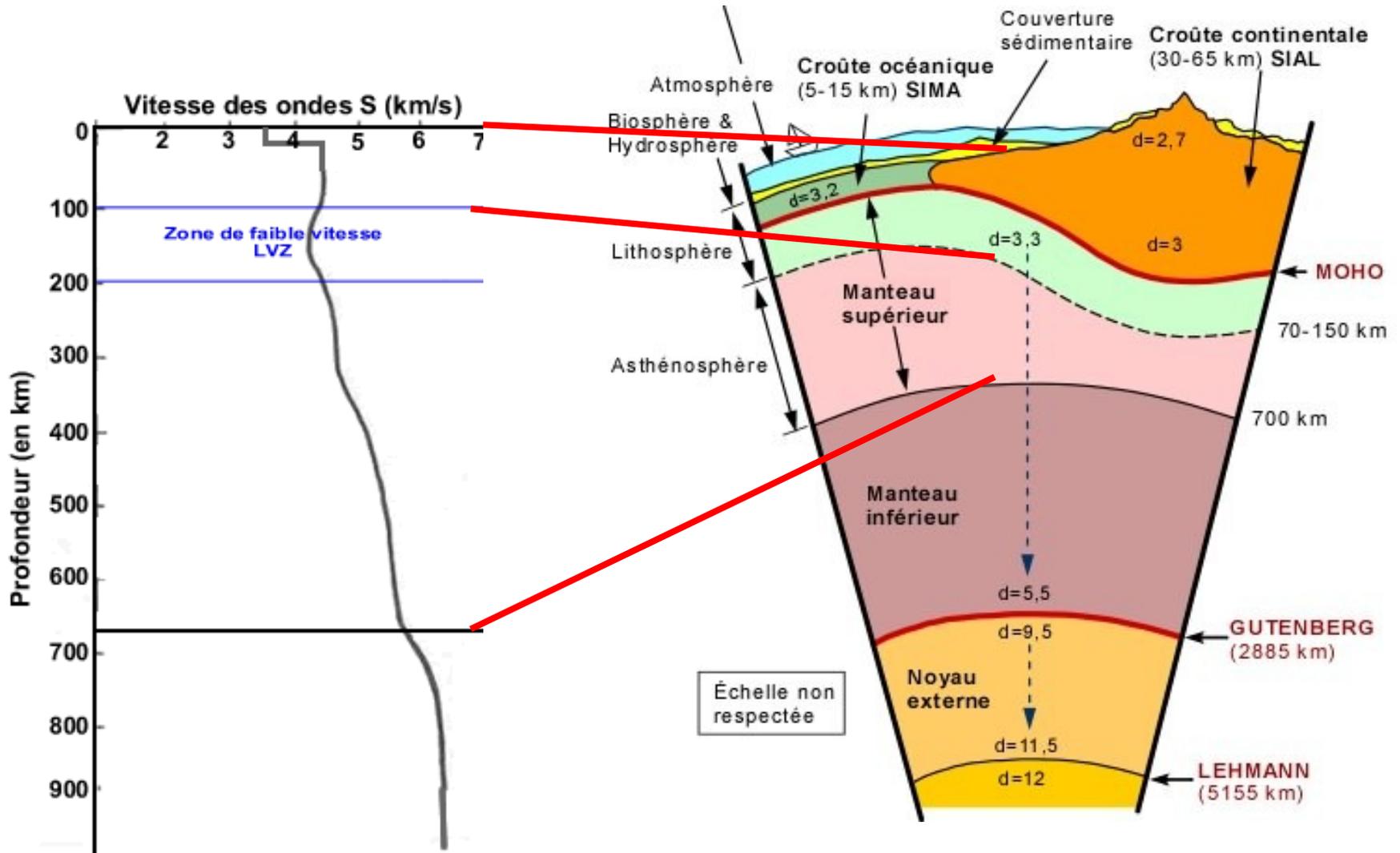
# D- Construction du modèle de la structure interne du globe.

Toutes ses informations permettent de projeter un modèle de structure de la Terre : le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model) :



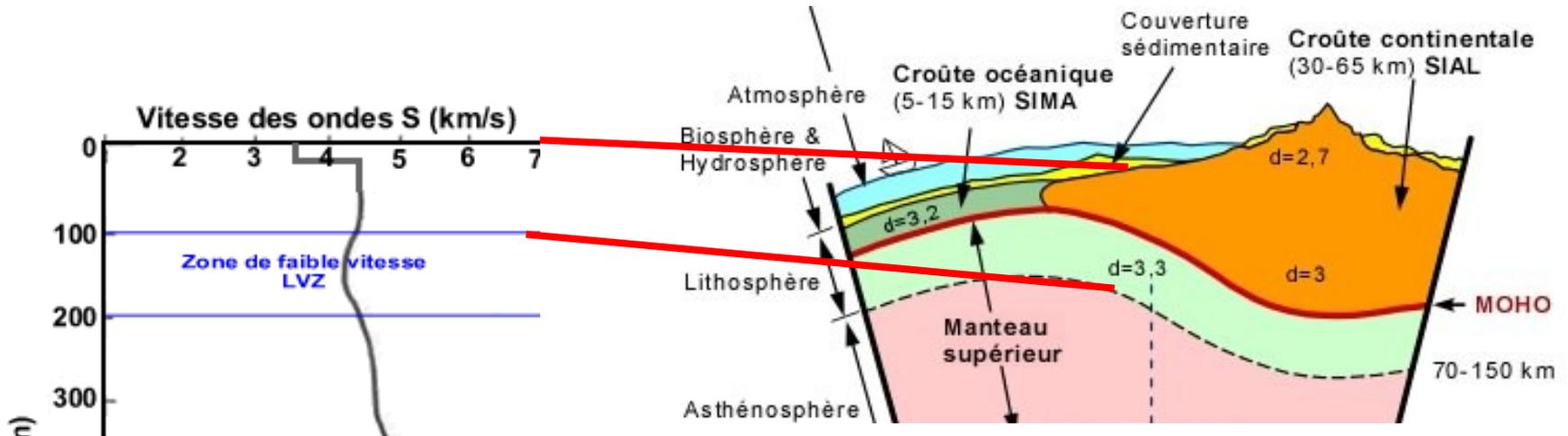
# D- Construction du modèle de la structure interne du globe.

le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model) : proche de la surface...



# D- Construction du modèle de la structure interne du globe.

le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model) : proche de la surface...



une **zone de moindre vitesse** la **LVZ** (Low Velocity Zone) → zone où le manteau a une **moindre densité** = manteau asthénosphérique.

**Au-dessus**, le manteau est **rigide**, dense, c'est le **manteau lithosphérique**.

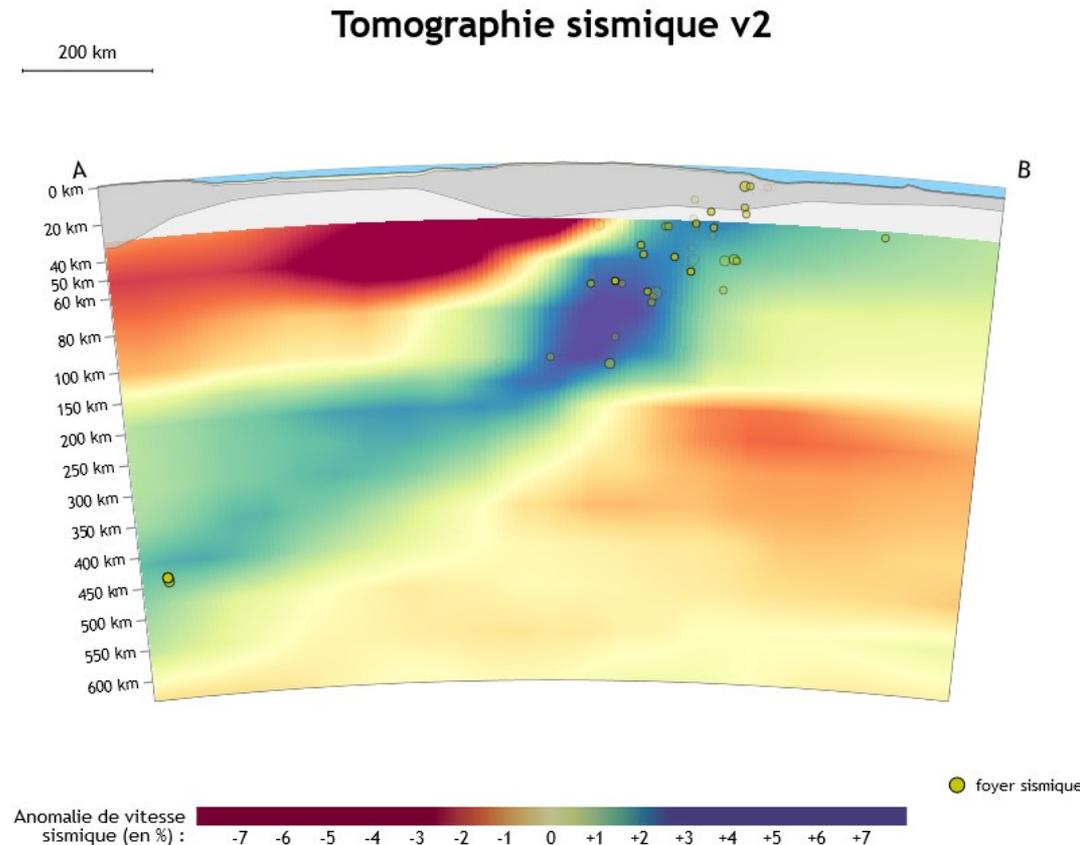
La **lithosphère** comprend la **croûte** et la **partie supérieure rigide du manteau** et se distingue de l'**asthénosphère** (manteau supérieur ductile) par son comportement mécanique, liée à la température du manteau : la **limite inférieure de la lithosphère** correspond à l'**isotherme 1300°C** (qui explique le **ralentissement brutal des ondes** = conditions de P/T voisines de celles nécessaires à la fusion de la péridotite mantellique  $\approx 1600\text{ K}$ .) ; elle est située à une centaine de km de profondeur, moins sous un océan (0 à 80/90 km), plus sous un continent (120 à 150 km).

# D- Construction du modèle de la structure interne du globe.

Années 60, 3 sismologues montrent que les **ondes sismiques se propagent plus rapidement le long d'un plan incliné repérable dans les zones de fosses océaniques**, que dans le manteau environnant ;(par tomographie sismique)  
ils interprètent ces données par le plongement d'un panneau froid, rigide et cassant, d'une centaine de km d'épaisseur, qu'ils nomment lithosphère dans un manteau plus chaud, plus ductile, l'asthénosphère.

→ schéma de profil Ouest Est sous le Japon.... En tomographie sismique

source :



Imagerie : NASA (visible earth)

Modèle utilisé pour la tomographie : GAP-P4

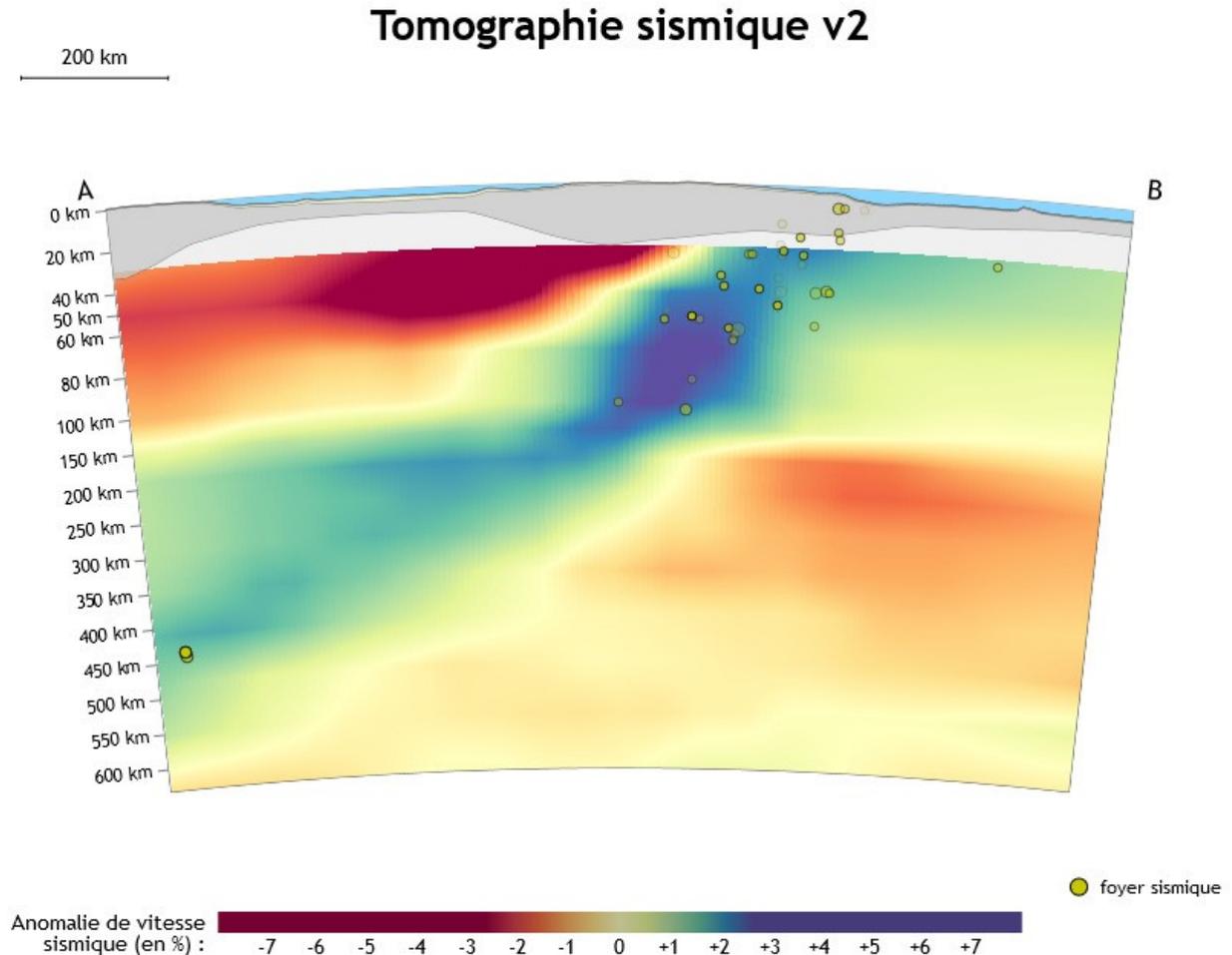
Modèle utilisé pour le Moho : CRUST1 (REM)

academia  
Nite

Auteur : P. COSENTINO

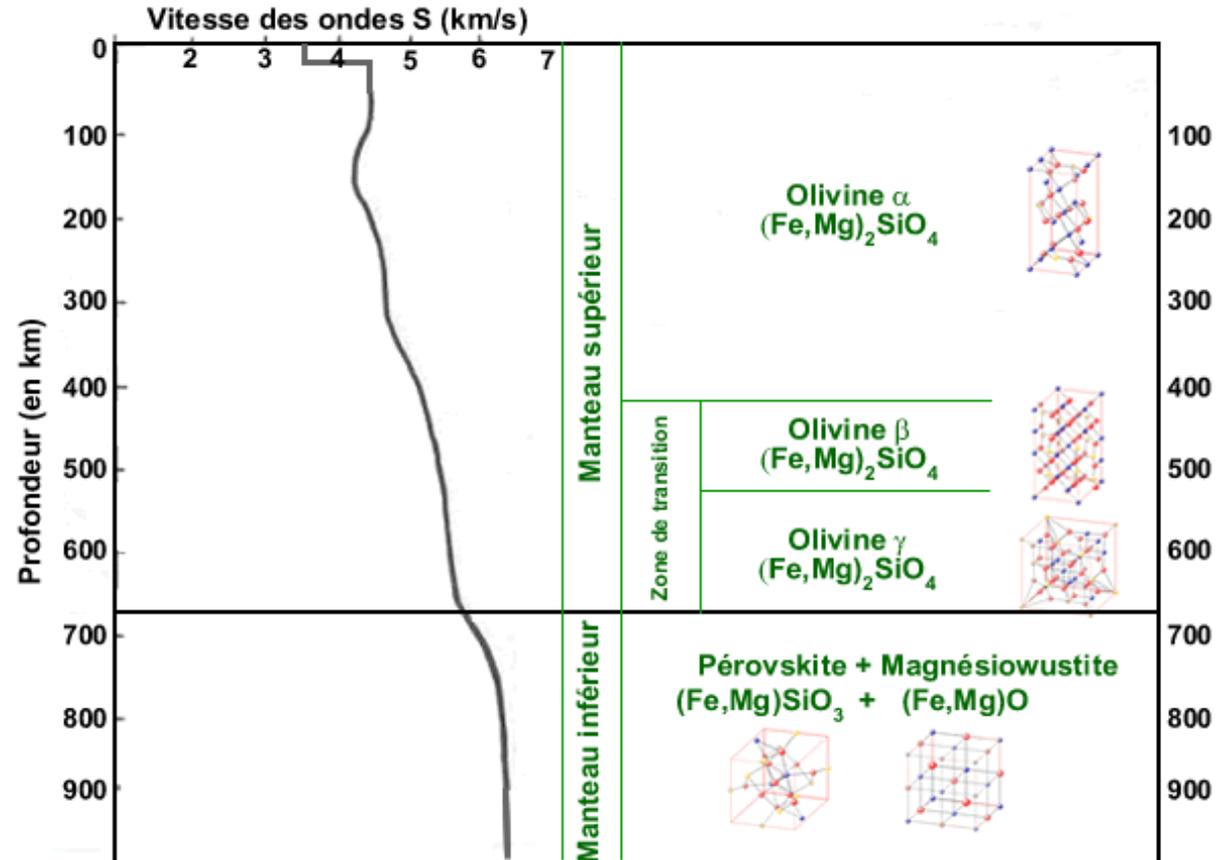
# D- Construction du modèle de la structure interne du globe.

La répartition des foyers sismiques selon un plan appelé **plan de Benioff** appuie cette interprétation. Ce plan se superpose en effet avec la zone d'anomalies de vitesse positives.



## D- Construction du modèle de la structure interne du globe.

Un mot sur la composition des couches profondes du globe, pour compléter : Le **manteau** est formé d'une roche, la **péridotite**. Sa structure cristalline changeant de forme (isot 1900°C) vers 670km de profondeur, les ondes accélèrent : c'est le début du manteau inférieur.



## 4-La chaleur du globe et ses transferts

**Il existe un Gradient géothermique** = profil terrestre de température en fonction de la profondeur.

**Pour l'estimer :**

**Gradient géothermique moyen dans les premiers kilomètres : mines et les forages**

Ensuite : calcul ou déduction (Varie en fonction du contexte géodynamique ( $\approx 30 \text{ K.km}^{-1}$   $\rightarrow$  dorsale,  $\approx 10 \text{ K.km}^{-1} \rightarrow$  Zsubduct) et étude des vitesses des ondes compte tenu de la pression estimée et de la nature des matériaux.

**Isotherme  $1300^\circ\text{C}$  vers 100km : début de LVZ**

**Isotherme  $1900^\circ\text{C}$  (ou 1900K... Gros doute) vers 670km:** limite Manteau sup/ manteau inf.

noyau externe débute à **2900km**  $\rightarrow$  **fer liquide** (env **4000K** avec les conditions de P)

La graine est solide et débute à **5100km.**

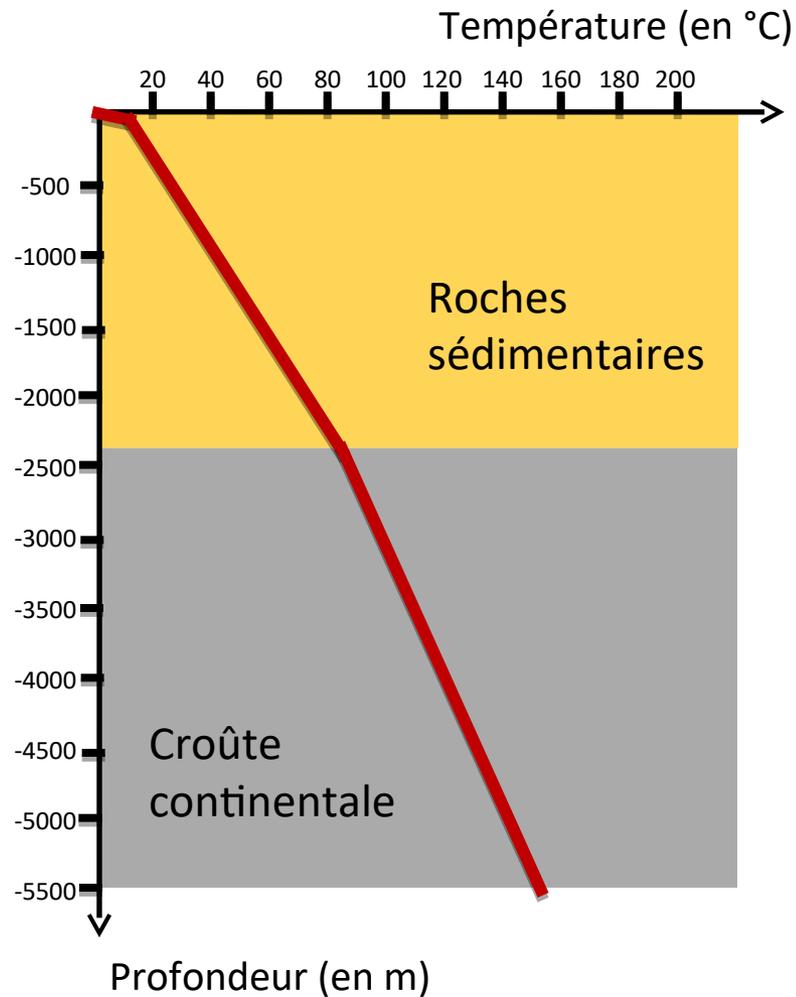
$\rightarrow$  **limite  $\approx 5500 \text{ K.}$**

**Petite parenthèse bien sympathique pour en apprendre plus....**

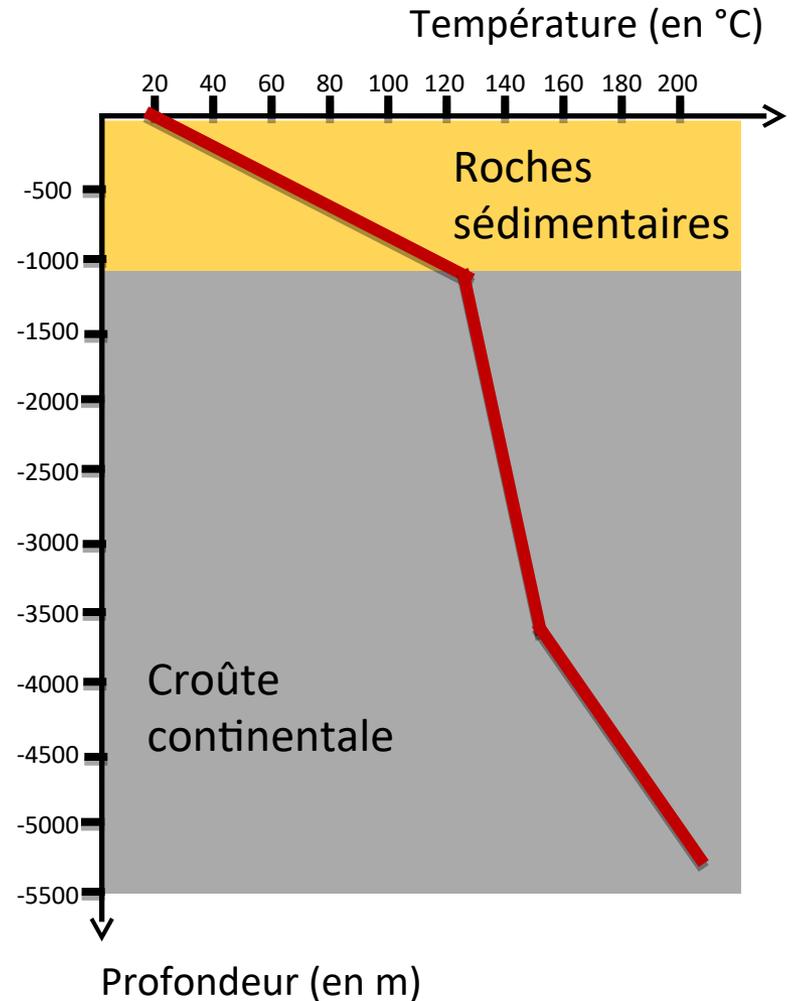
Les gradients géothermiques proches de la surface sont variables :

# En France

Bassin parisien

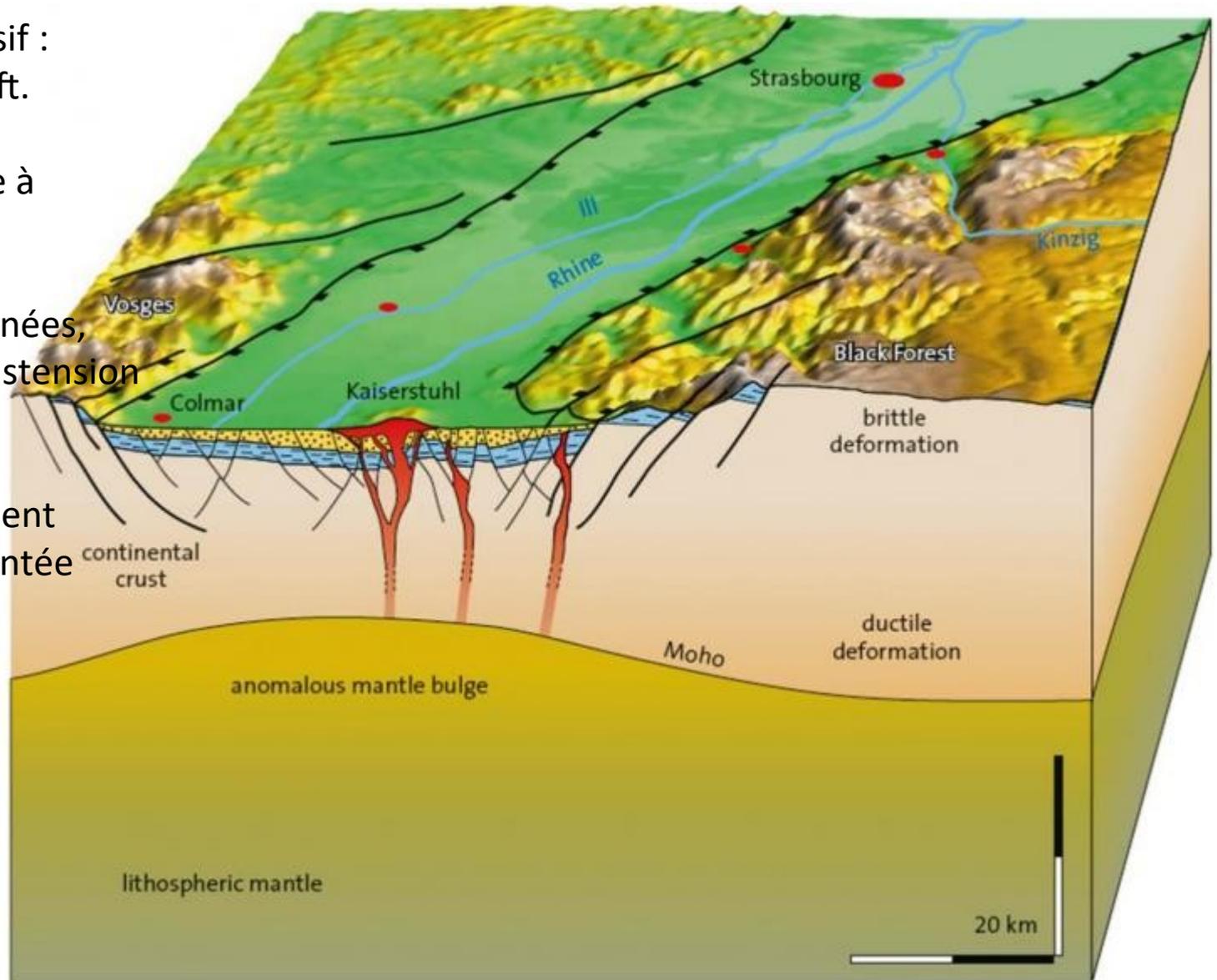


Bassin rhénan

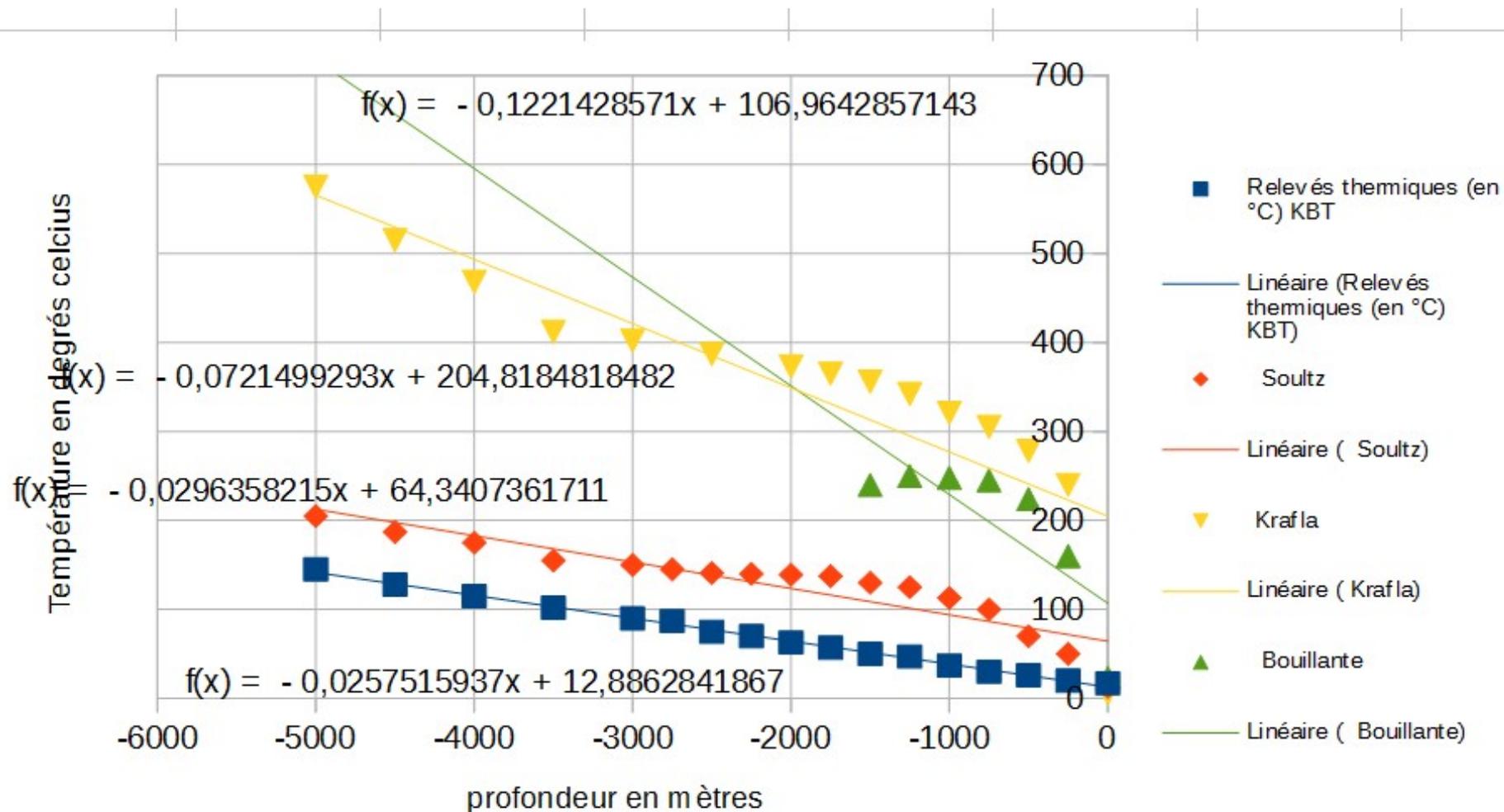


En + : Explication de ce gradient thermique particulièrement élevé au niveau du fossé rhénan

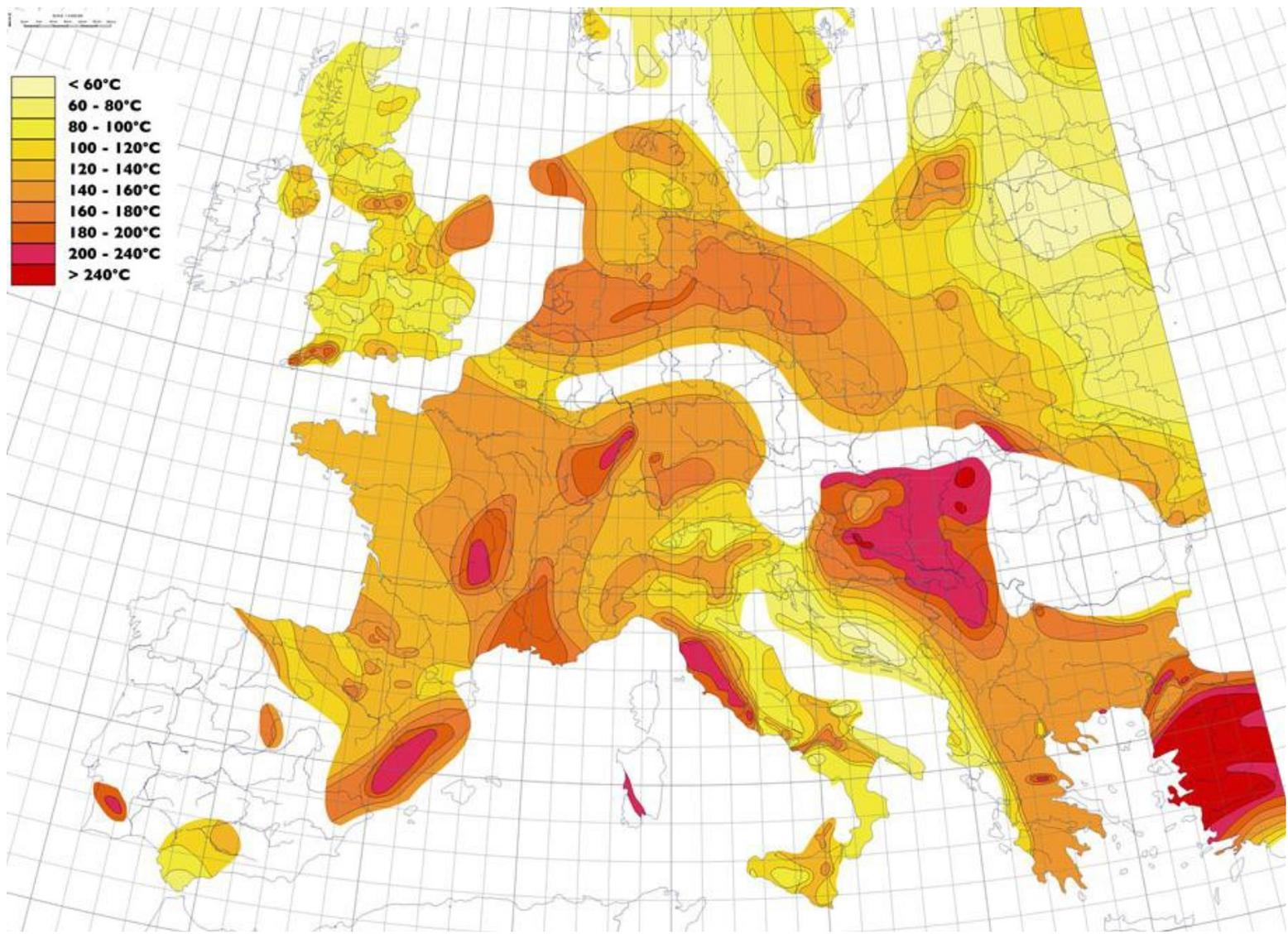
Contexte extensif :  
qui forme un rift.  
Cette structure,  
qui s'est formée à  
l'Oligocène  
il y a environ  
25 millions d'années,  
est due à une distension  
de la croûte  
qui a permis  
son amincissement  
et donc la remontée  
du manteau  
sous l'Alsace.



# Une grande hétérogénéité de ce gradient en fonction des lieux...



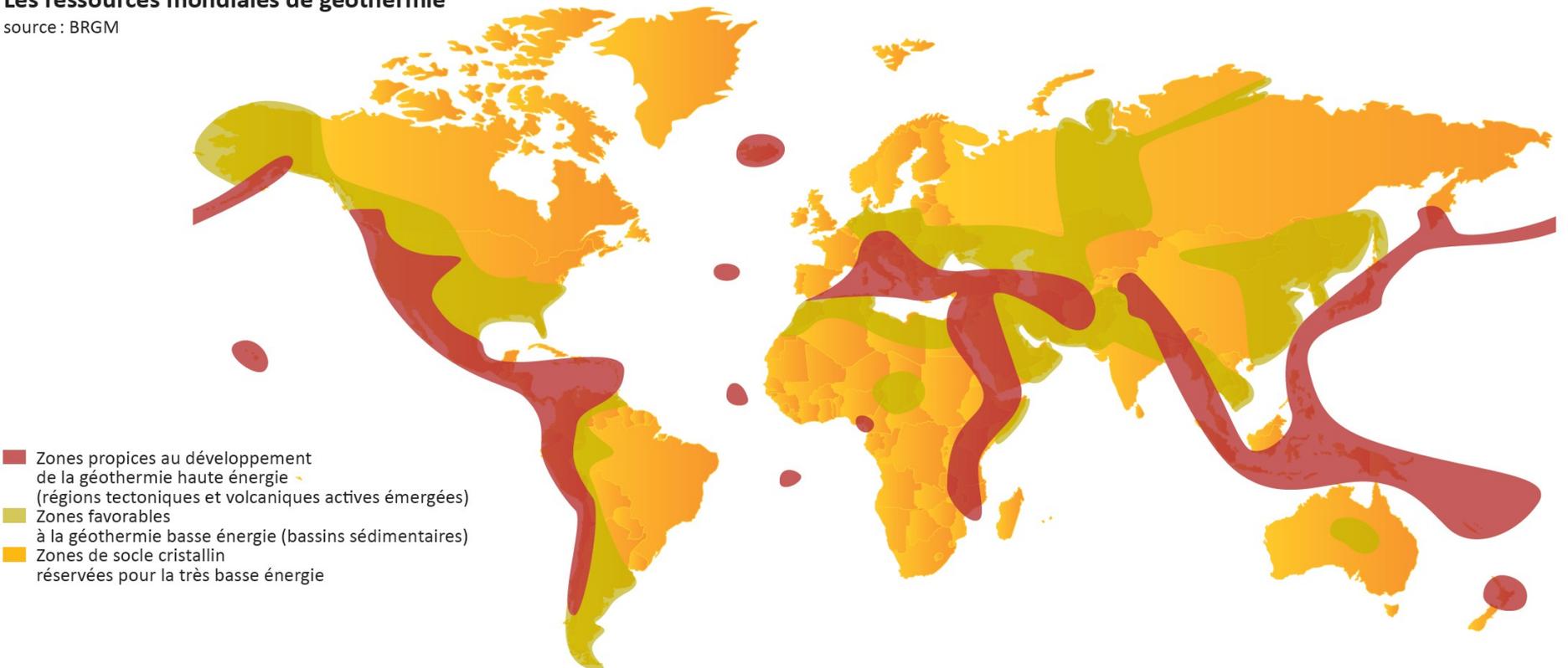
# En Europe, à 5km de profondeur.



# Dans le monde

## Les ressources mondiales de géothermie

source : BRGM



## 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.

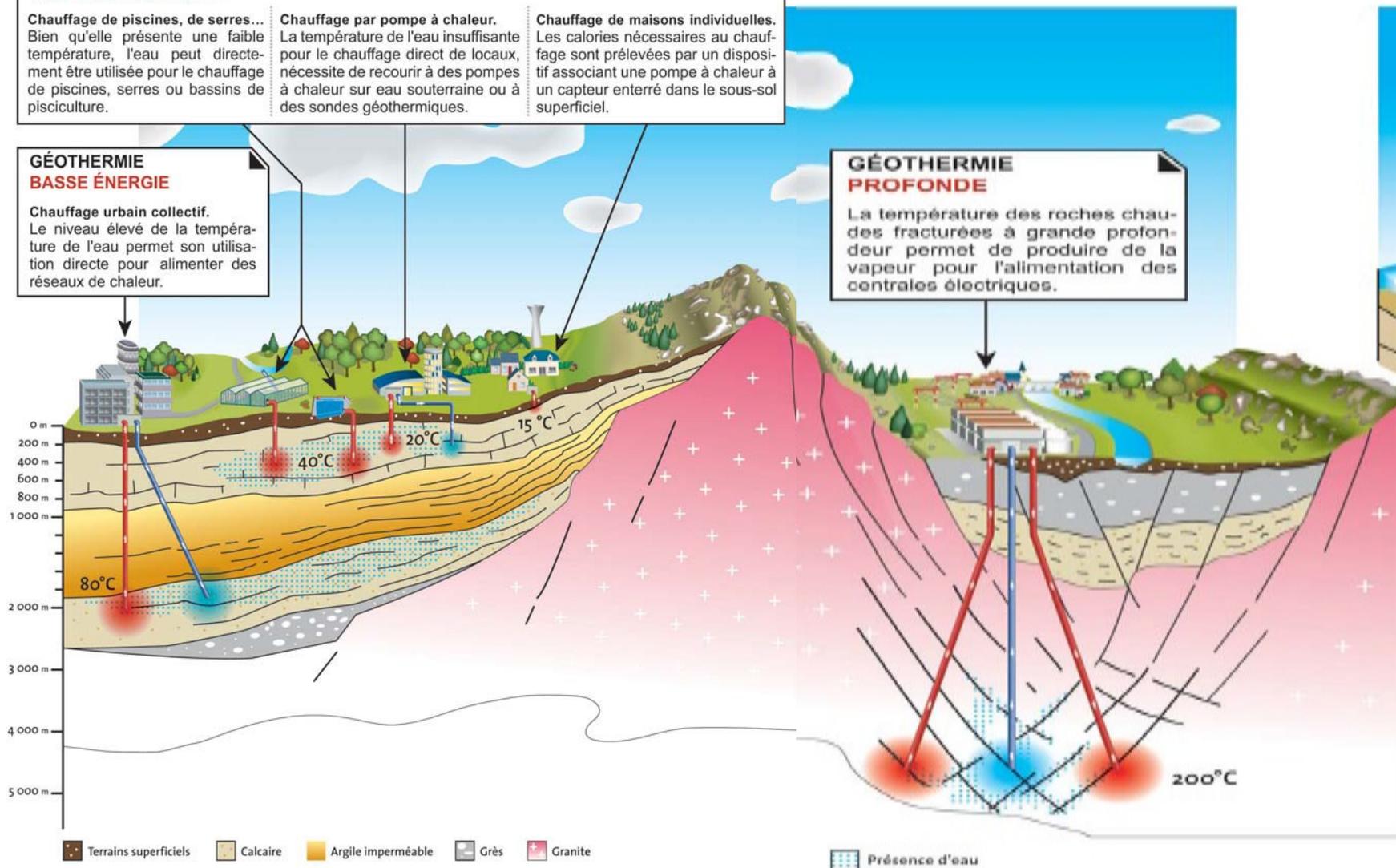
**Chauffage de maisons individuelles.**  
Les calories nécessaires au chauffage sont prélevées par un dispositif associant une pompe à chaleur à un capteur enterré dans le sous-sol superficiel.

## 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.



Par modélisations :

Dans le cas de roches du manteau, on estime le gradient adiabatique (si il n'y a aucun échange thermique avec un autre système) à  $0,3^{\circ}\text{C}$  par km. Dans le cas du noyau, il est de l'ordre de  $0,55^{\circ}\text{C}$  par km.

Si on se base sur ces estimations, on peut donc extrapoler la température en tout point du manteau, à partir des points d'ancrage. En remontant depuis 5 150 km ( $5\,000\text{K} = 4\,700^{\circ}\text{C}$ ) dans le noyau liquide, et en descendant depuis 670 km ( $1.600^{\circ}\text{C}$ ) dans le manteau, on peut alors estimer la température à la limite manteau-noyau (2.900 km).

On arrive ainsi aux valeurs suivants :

côté manteau :  $1\,600 + (2\,900 - 670) \times 0,3$  soit  $2\,200^{\circ}\text{C}$

côté noyau :  $4\,700 - (5\,150 - 2\,900) \times 0,55$  soit  $3\,450^{\circ}\text{C}$

# 1600 Température (en K)

1 000 2 000 3 000 4 000 5 000

5 à 200km  
(retenir 120km)

Manteau lithosphérique

670 km



Profondeur (km)

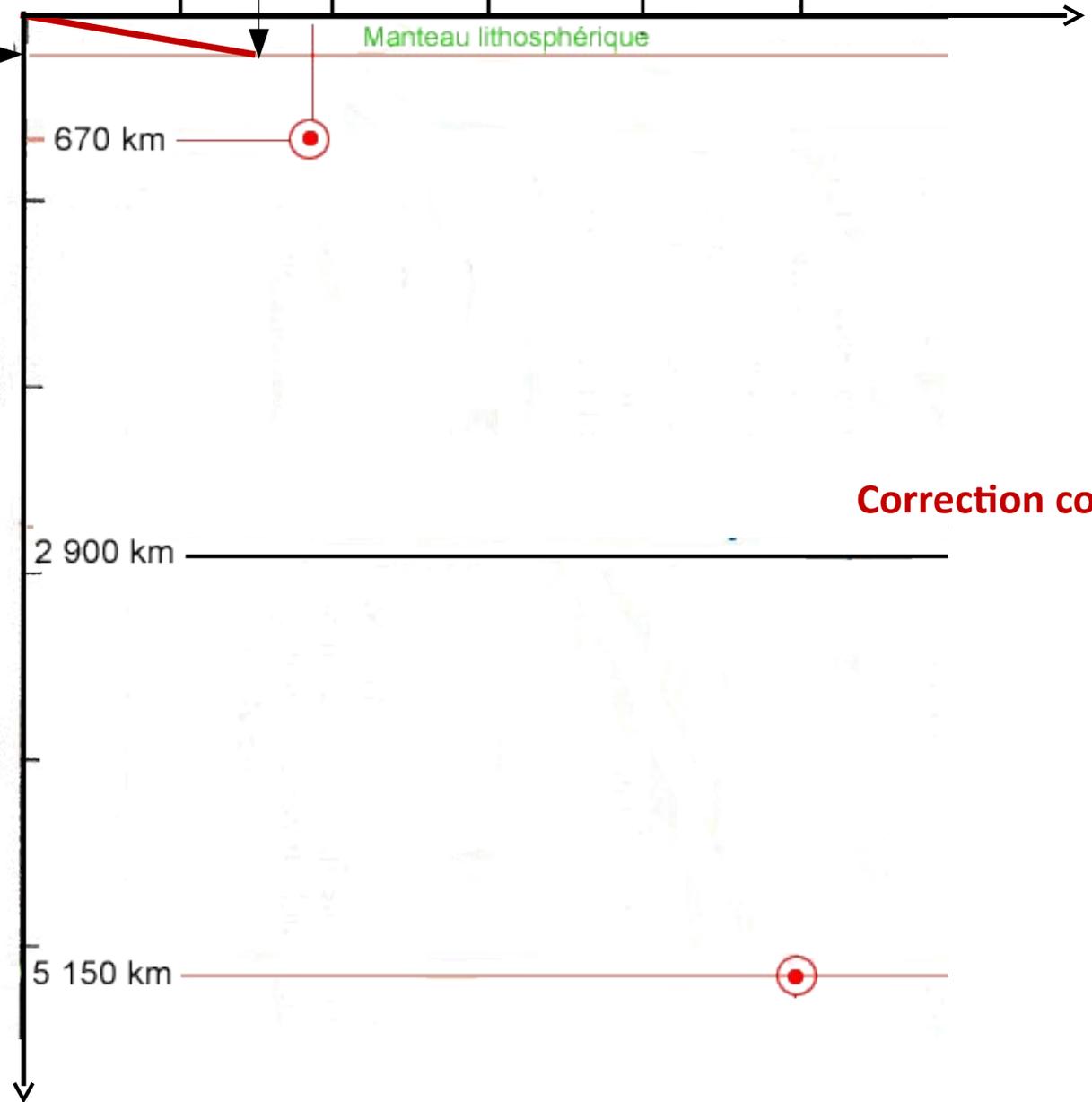
2000

2 900 km

4000

5 150 km

Correction consigne 6...



Pour constater l'hétérogénéité de la profondeur du début de la lvz(plafond) qui marque le plancher de la lithosphère

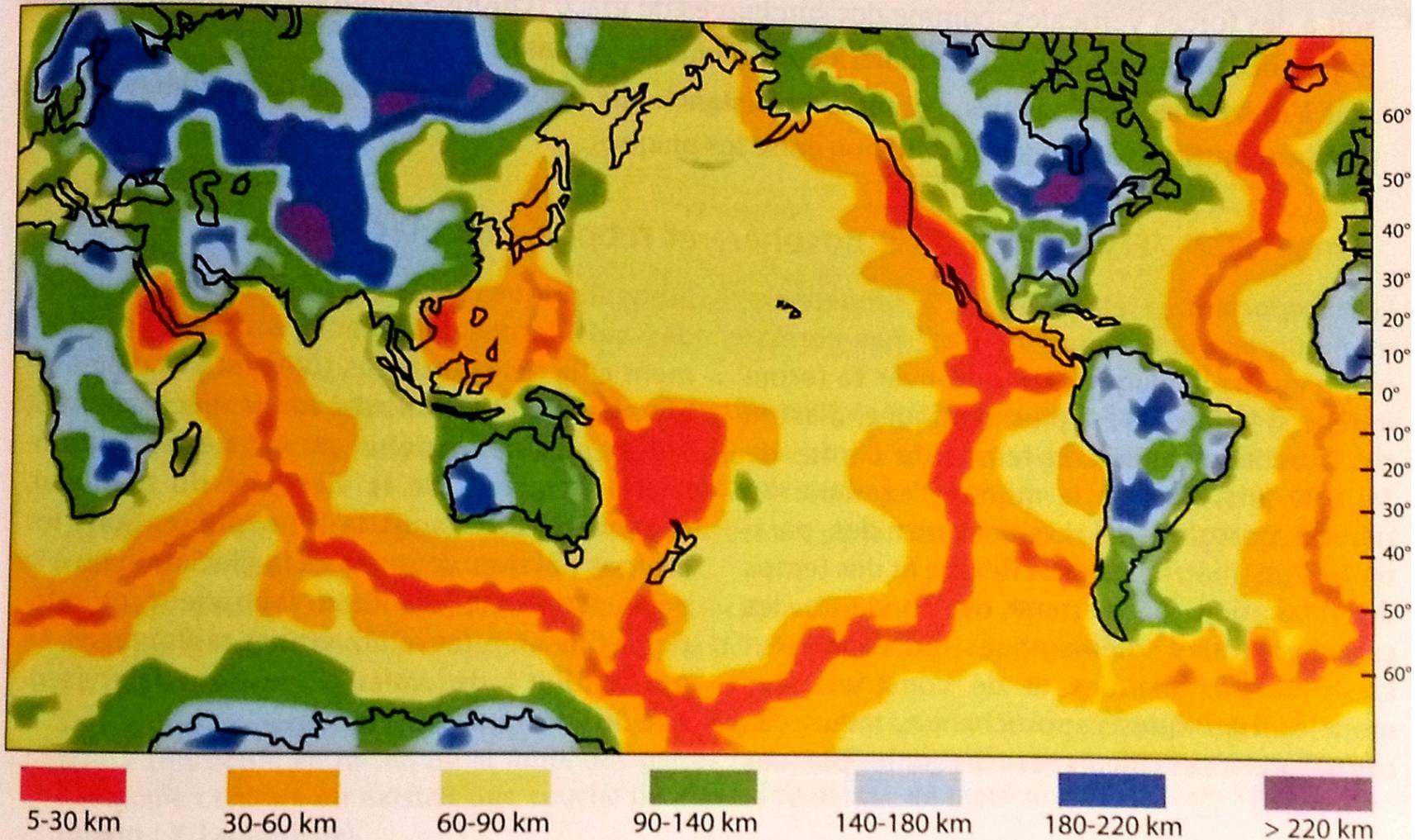
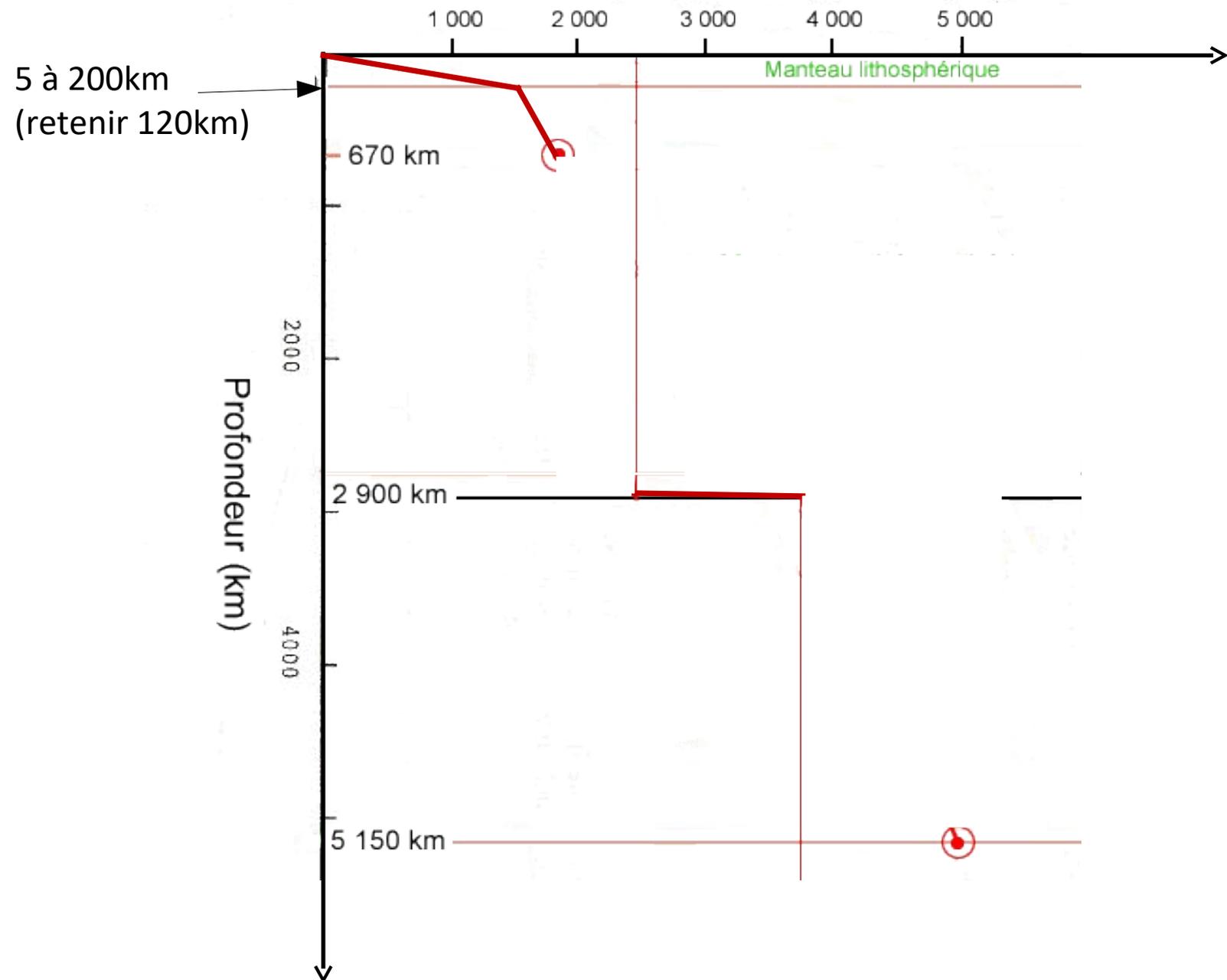


Figure 8.2 Carte de l'épaisseur de la lithosphère mondiale.

Source : pommerol renard

# Température (en K)



1 000 2 000 3 000 4 000 5 000

Manteau lithosphérique

5 à 200km  
(retenir 120km)

670 km

Profondeur (km)

2000

4000

2 900 km

5 150 km

**L'étude tomographique de la Terre montre des anomalies de vitesse qui précisent(ou remettent en question..) le modèle PREM.**

**Il existe plusieurs modes de transferts thermiques :**

**Le rayonnement inefficace dans les matériaux du sous sol...**

## tomographie sismique

*La tomographie sismique, équivalent des scanners en médecine, détecte des anomalies de vitesse de propagation des ondes sismiques. Une accélération de la vitesse correspond à une température plus basse, par rapport à la moyenne à cette profondeur, et une diminution de la vitesse à une température plus élevée.*

## **Conduction:**

les atomes des zones chaudes vibrent plus que les atomes des zones froides. Ces vibrations se transmettent de proche en proche.

pas de mouvement macroscopique de matière.

**transfert peu efficace** (=lent) donc gradient thermique important.

## **Convection :**

Dans une matière déformable, les zones s'échauffant auront tendance à monter (masse vol.  $\searrow$ ) tandis que les zones plus froides auront tendance à descendre (masse vol.  $\nearrow$ ).

Mouvement de matière

**transfert efficace** (=rapide) donc gradient thermique est faible.

# Viscosité / déformabilité

• La viscosité mesure la déformabilité d'un corps : plus un corps est visqueux plus il est rigide (et donc non déformable)

Par exemple le granite est plus visqueux que la confiture

• Eau : liquide :  $10^{-3}$  Pa.s très faible viscosité

• Glace à  $-1^{\circ}\text{C}$ :  $10^{11}$  Pa.s

• Glace à  $-20^{\circ}\text{C}$  :  $10^{13}$  Pa.s

• Lithosphère :  $10^{23}$  Pa.s très forte viscosité

• Asthénosphère :  $10^{19}$  Pa.s viscosité plus faible (mais forte!)

Pour ceux qui aiment plus la géophysique que la bio :... Un Pascal eq. À  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  donc la visc est en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (ancienne unité de Poiseuille)

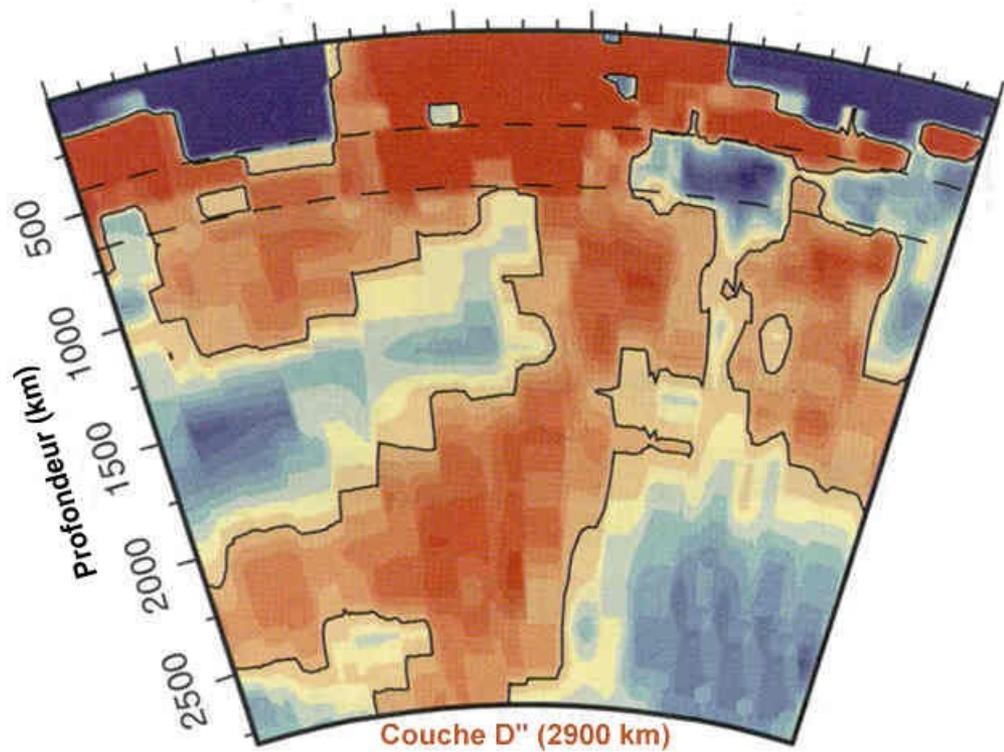
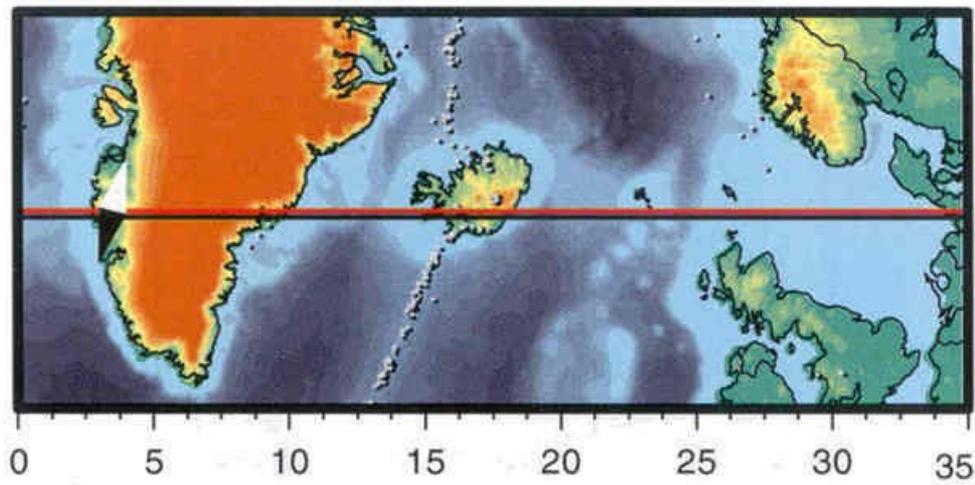


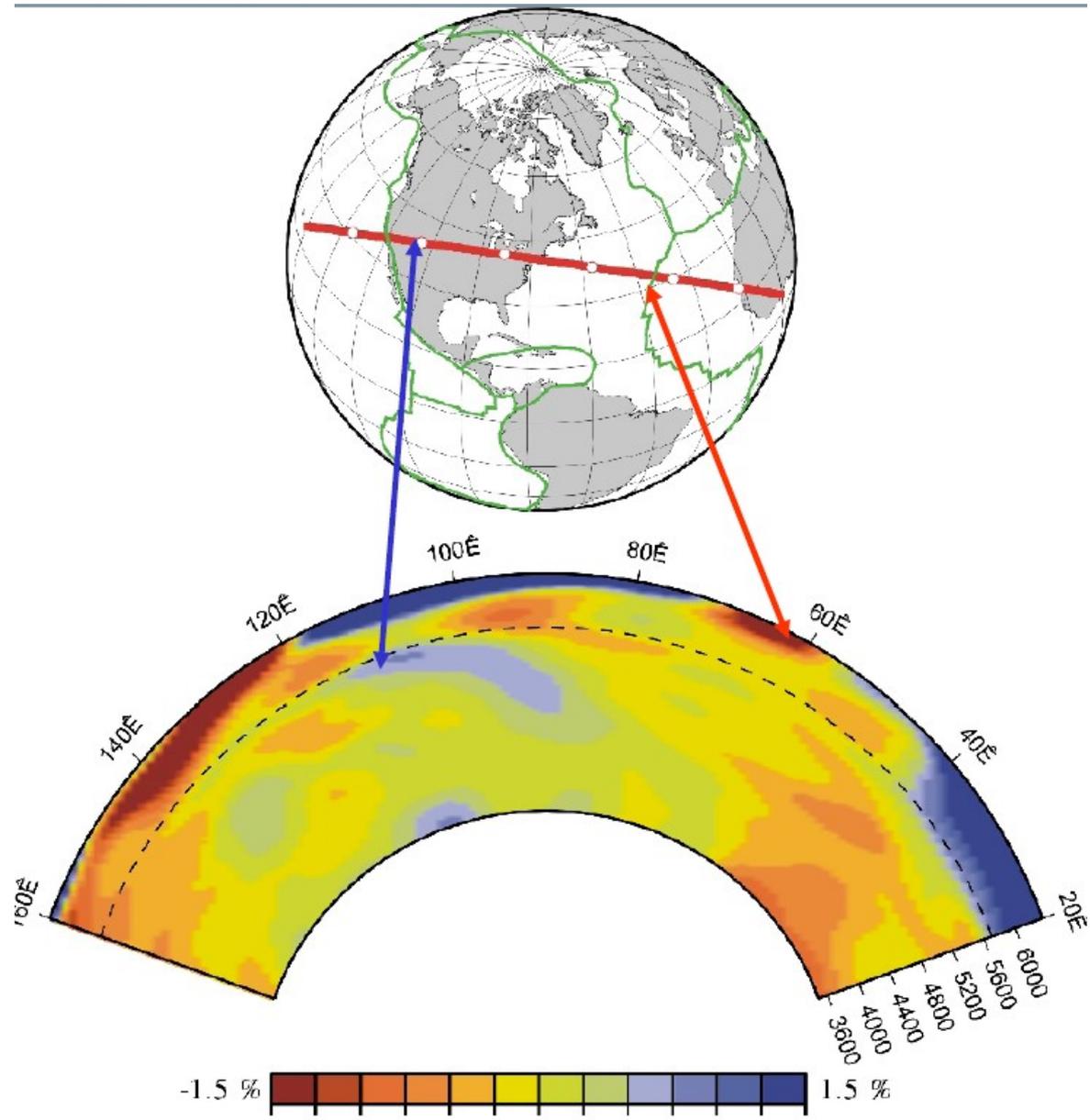
**Cette image d'un glacier est là pour nous rappeler que les solides peuvent être visqueux, et qu'ils peuvent donc se déformer**

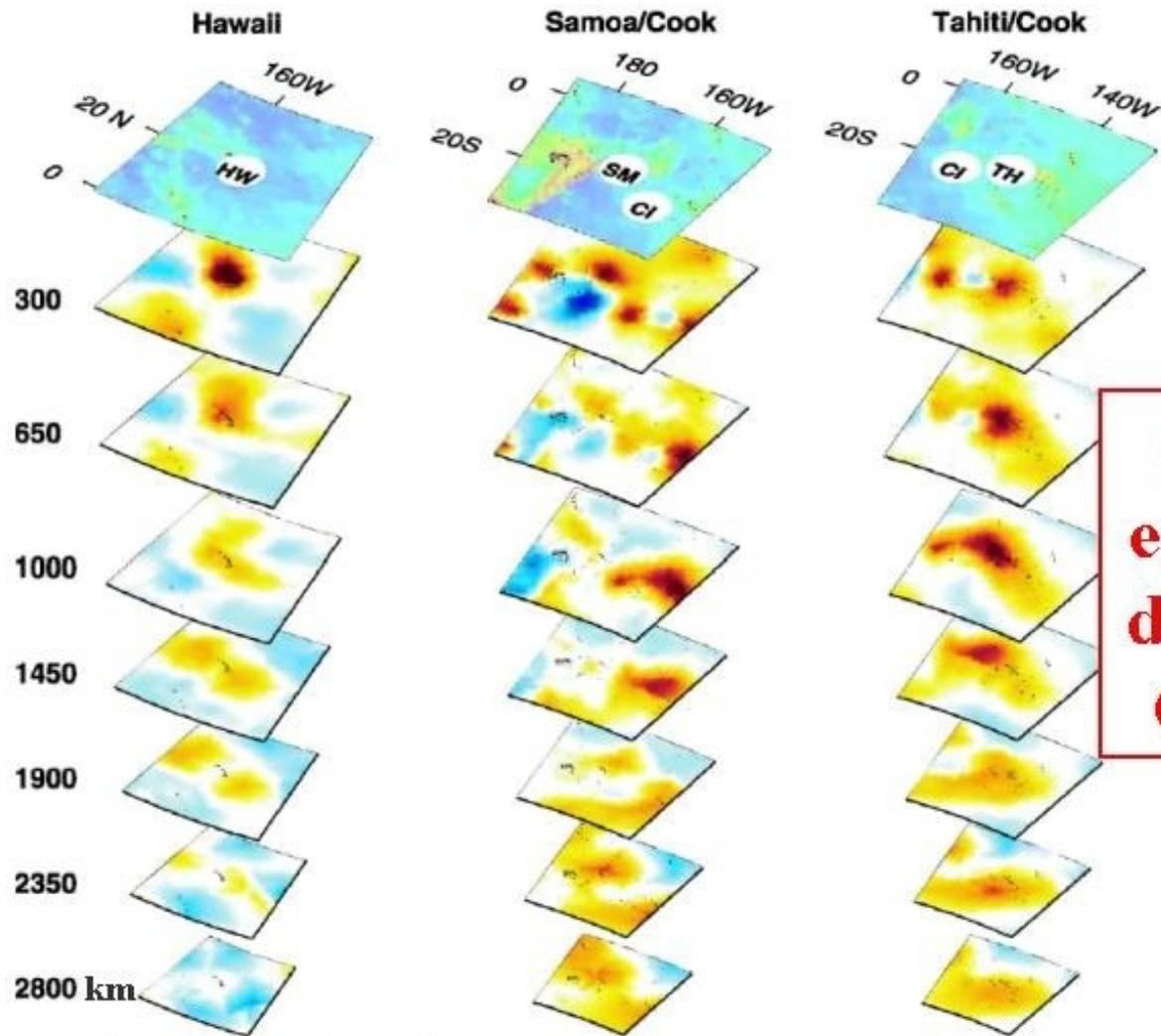
Donc le manteau est capable de « convecter »  
mais très lentement !!!

→ compatible avec la vitesse calculée pour le  
déplacement des plaques

On peut représenter cette convection grâce à  
des modèles très approximatifs.(on l'a vu, la  
source d'énergie est répartie un peu partout...)





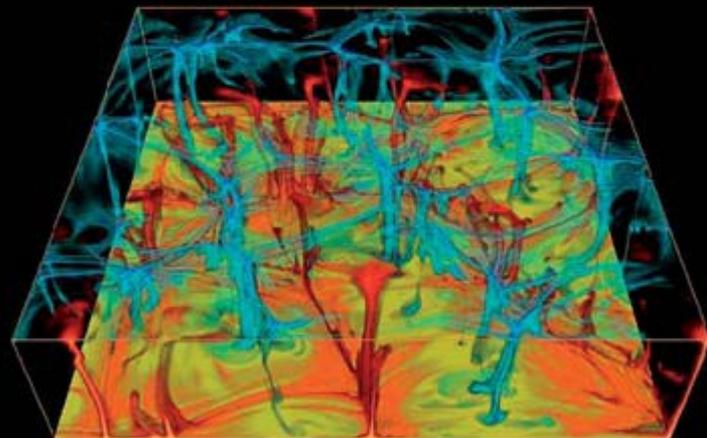
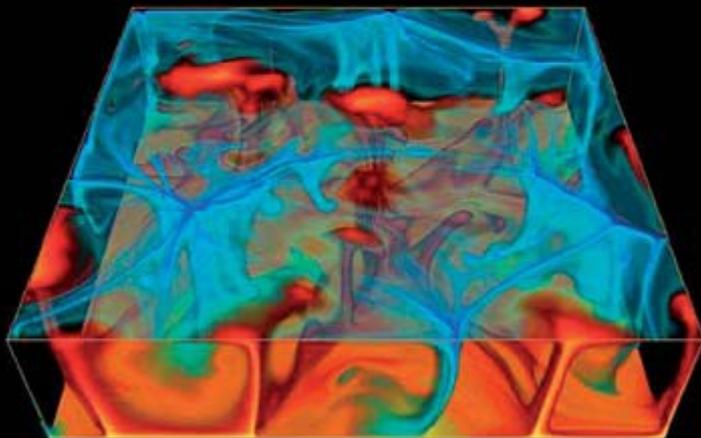
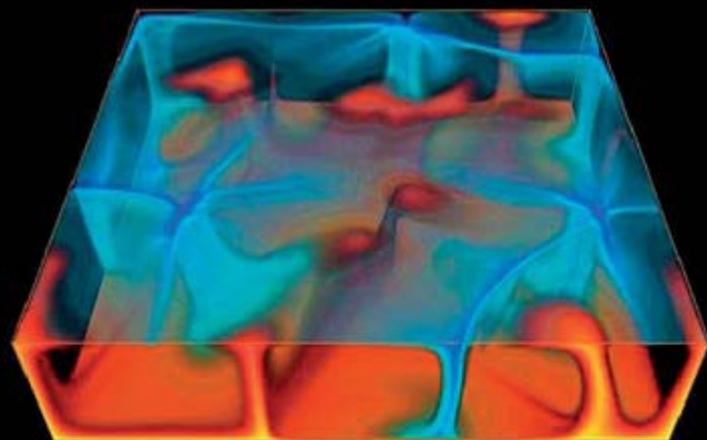
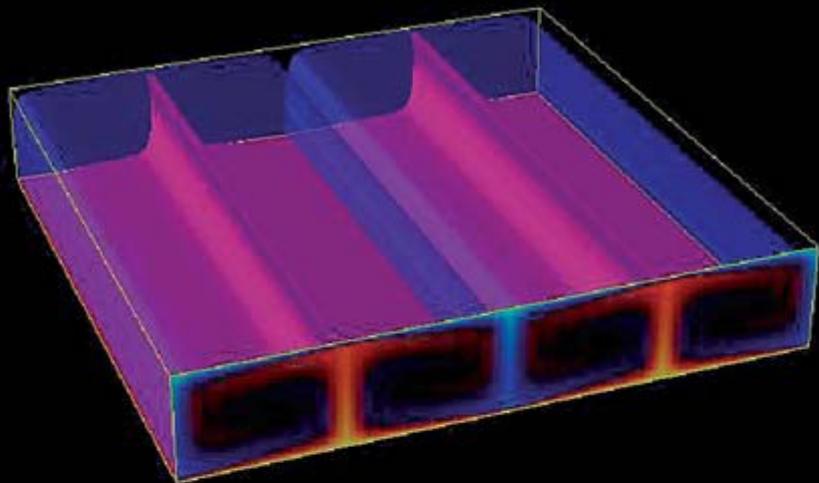


Raffaella Montelli,<sup>1\*</sup> Guust Nolet,<sup>1</sup> F. A. Dahlen,<sup>1</sup> Guy Masters,<sup>2</sup>  
E. Robert Engdahl,<sup>3</sup> Shu-Huei Hung<sup>4</sup>

16 JANUARY 2004 VOL 303 SCIENCE

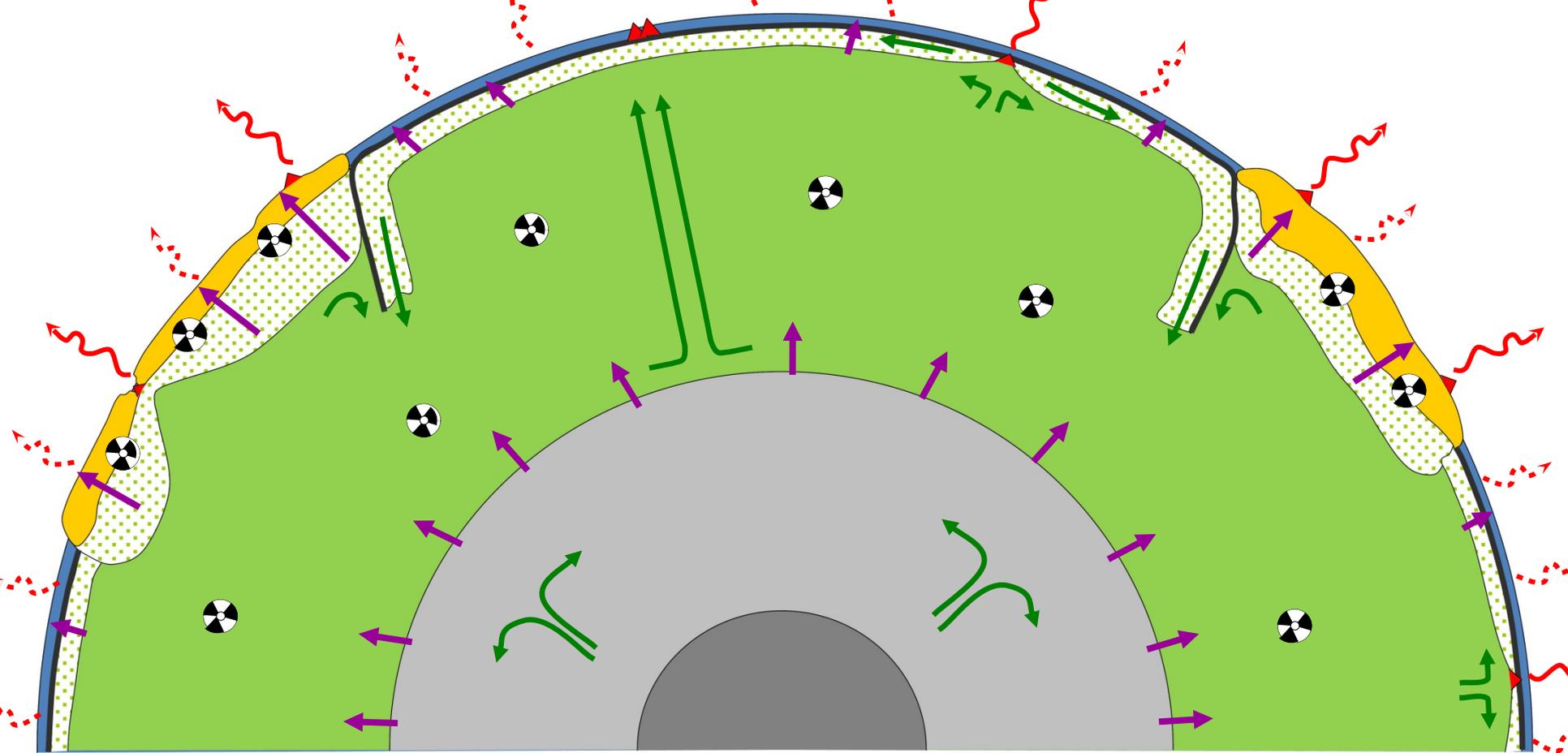
**Les points chauds...**

Ainsi, il apparaît que la Terre se comporte comme une véritable «**machine thermique**», qui produit de l'énergie thermique et la transforme en mouvement avant de l'évacuer. **Deux mécanismes de transfert thermique existent dans la Terre : la convection et la conduction.**



# Terre, machine thermique

(échelle d'épaisseur de la lithosphère non respectée...)



Flux géothermique	Mouvements convectifs	Noyau interne	Manteau lithosphérique
Radioactivité	Conduction thermique	Noyau externe	Croûte continentale
magmatisme		asthénosphère et Manteau inférieur	Croûte océanique
		Océan	



La distribution hétérogène du flux géothermique, semblable à celle des reliefs, de la sismicité et du volcanisme, suggère l'existence d'un **lien** entre la dissipation de l'énergie **interne** du globe et la **tectonique des plaques**.

# BAC is your futur 2.2

A Chaudes Aigues, en Auvergne, il existe depuis 1332, un réseau de chauffage urbain. Depuis cette époque, la ville continue d'être chauffée par un système de géothermie et a développé un centre de thermalisme.

**À partir de l'exploitation des documents mis en relation avec vos connaissances, expliquer l'origine de ce phénomène de géothermie locale.**

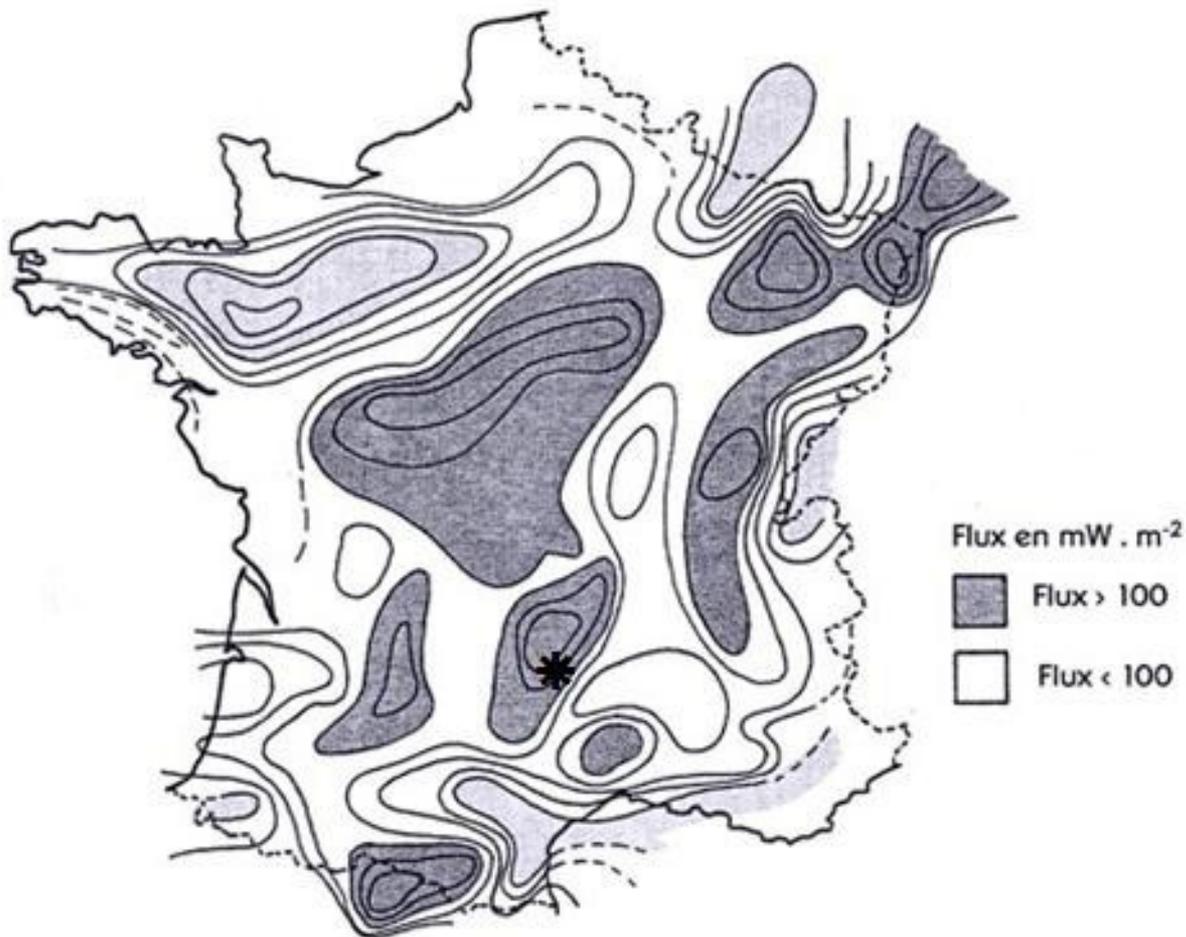
# Document 1 : localisation géographique de la source du Par à Chaudes Aigues



Cette source fournit toute l'année de l'eau dont la température varie entre 80 et 82°C. Le débit moyen de cette source est de  $17\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

# Document 2 : carte du flux géothermique en France

\* Chaudes Aigues



# Document 3 : coupe schématique de la lithosphère au niveau de l'Auvergne

