

# Génèse, structure et dynamique du manteau

Yanick Ricard  
CNRS/Université de Lyon/ENSL

Il y avait une fois, il y a -4566 millions d'années.....

une nébuleuse....



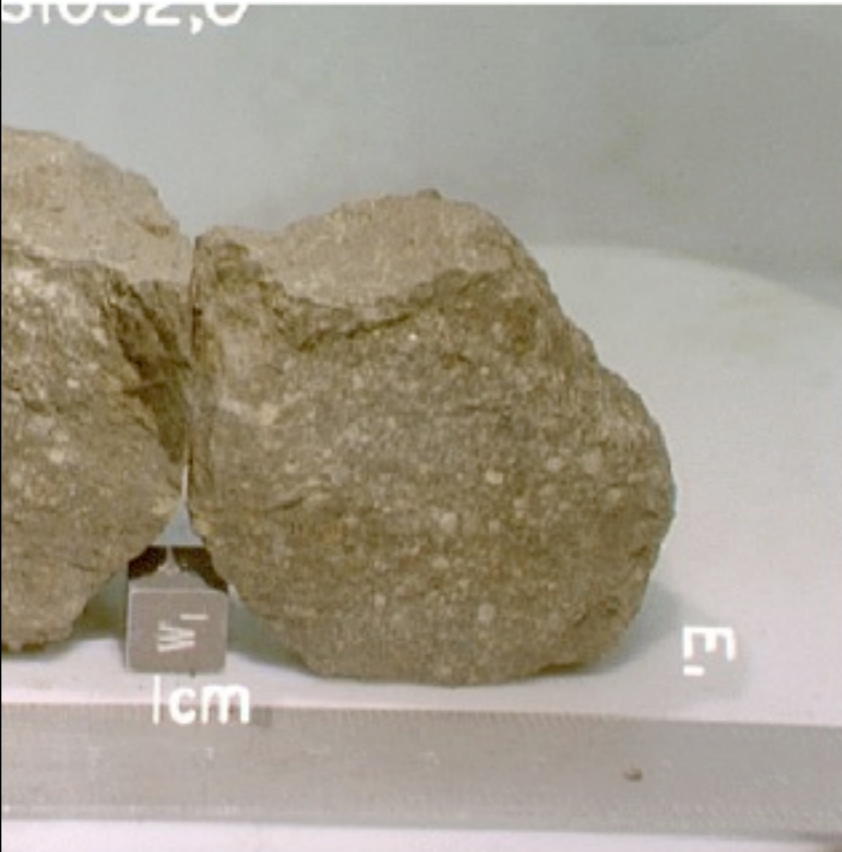
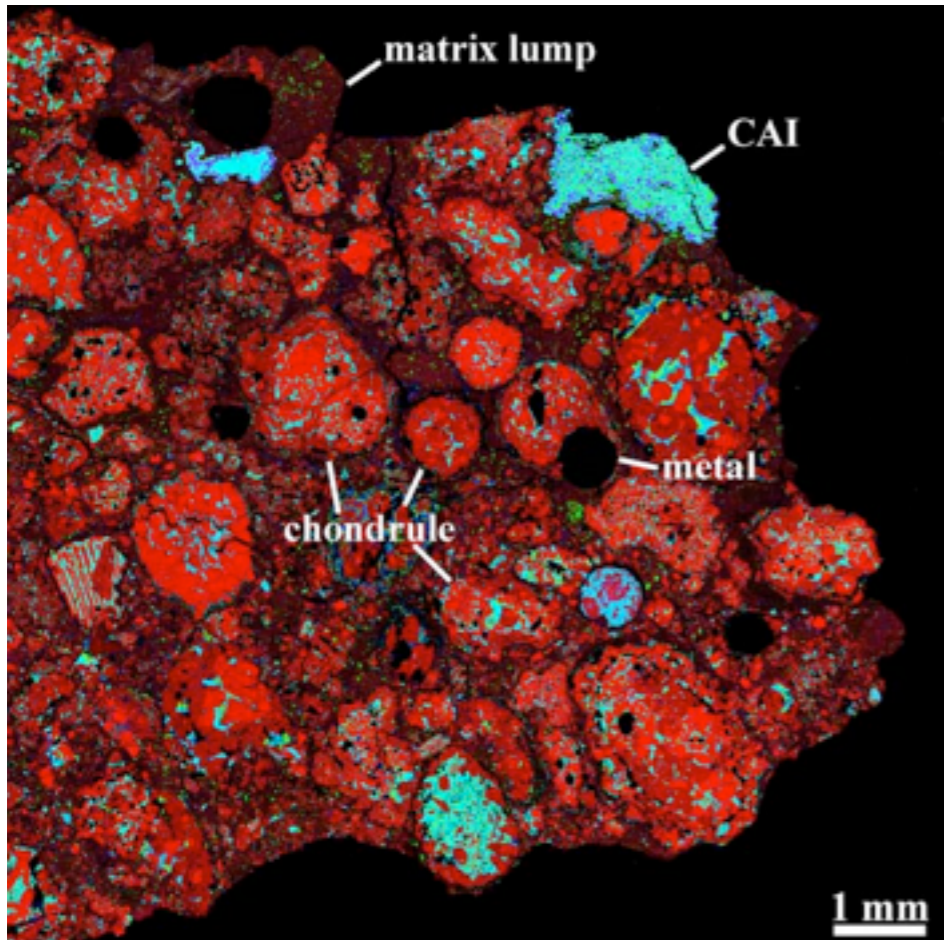
Nébuleuse  
d'Orion

qui s'est effondré et a formé  
soleil, planètes et satellites



certains briques initiales  
existent encore...

Météorites: chondrite

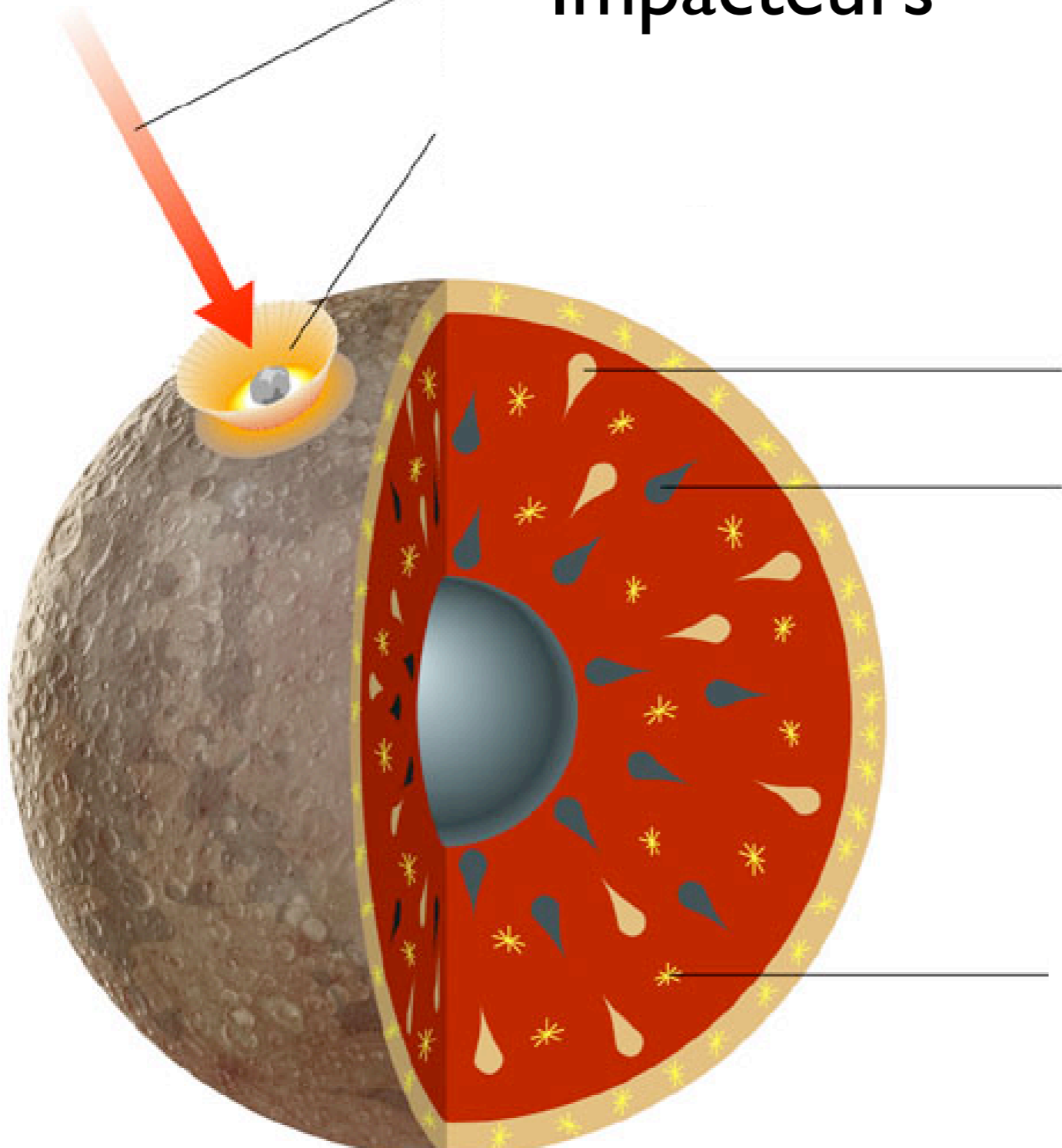


La  
montre  
U-Pb



-4566 Ma, les plus anciens témoins

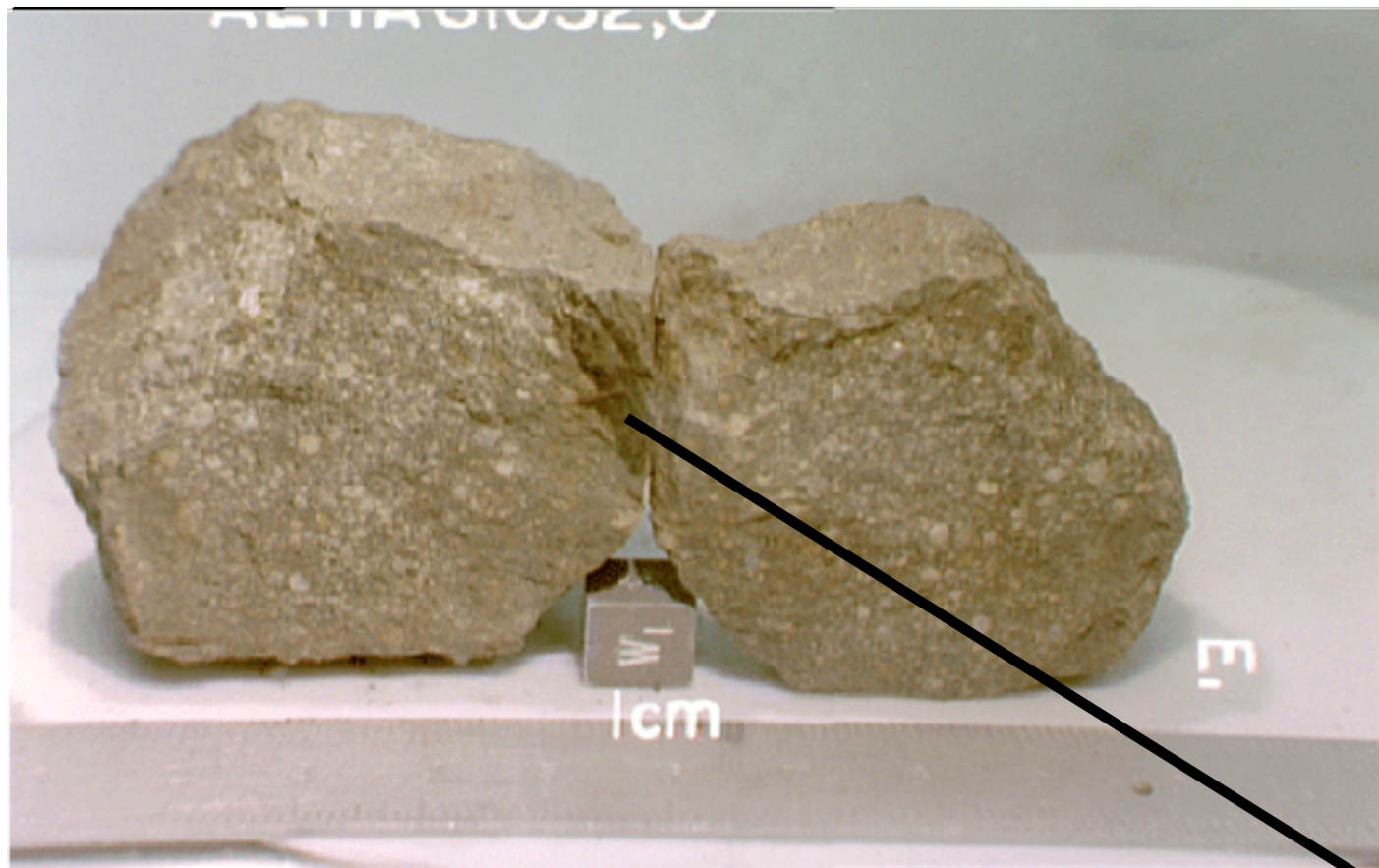
Impacteurs



Le léger remonte...

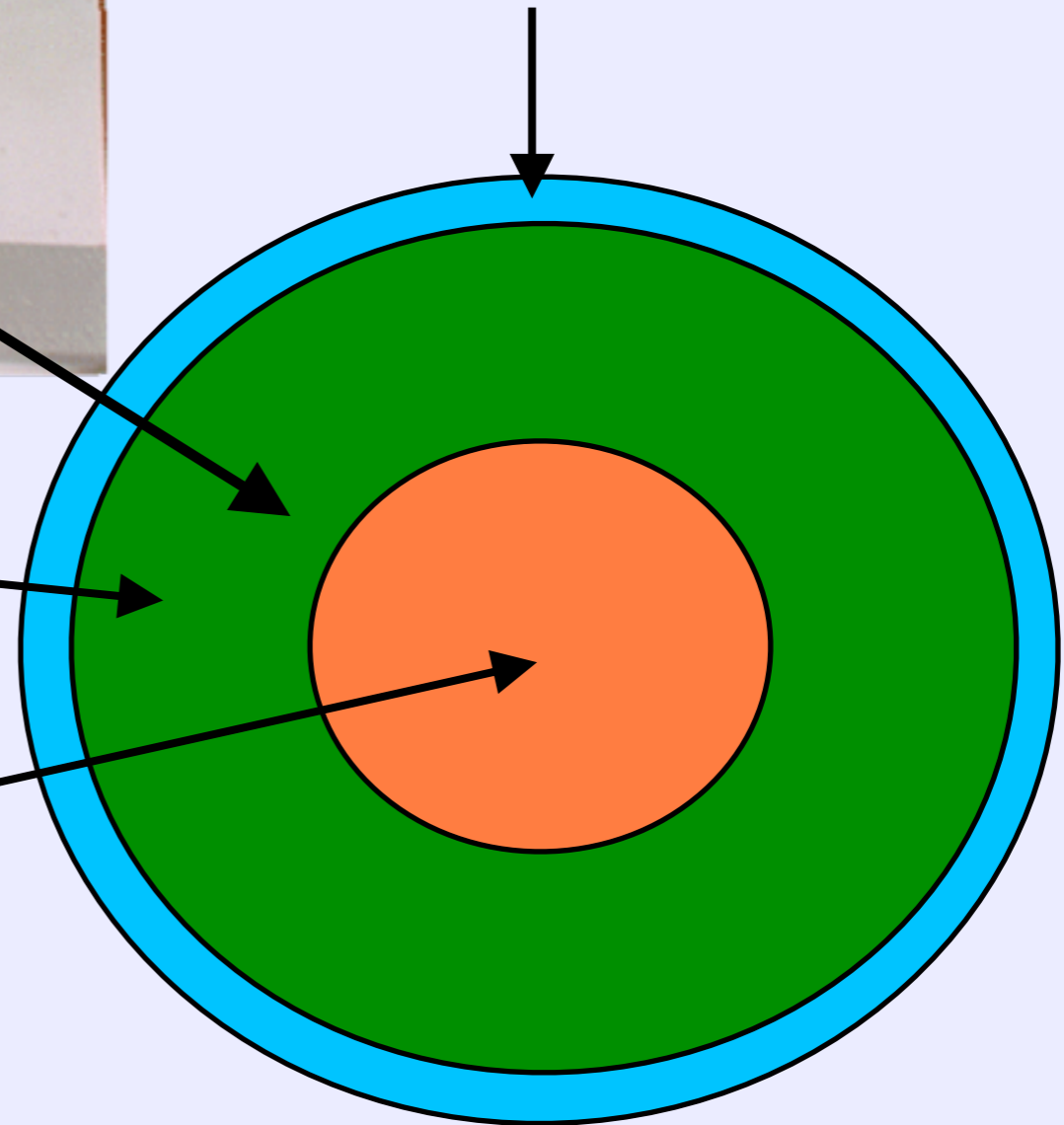
et le lourd plonge

Energie radioactive



Chondrite  
Atmosphère et  
océans

Silicates  
Fer et alliages



Le noyau s'est formé à +30 ma

## Radioactivité «éteinte» Hafnium-Tungstène

Hafnium-----> Tungstène (1/2 vie de 9 ma)

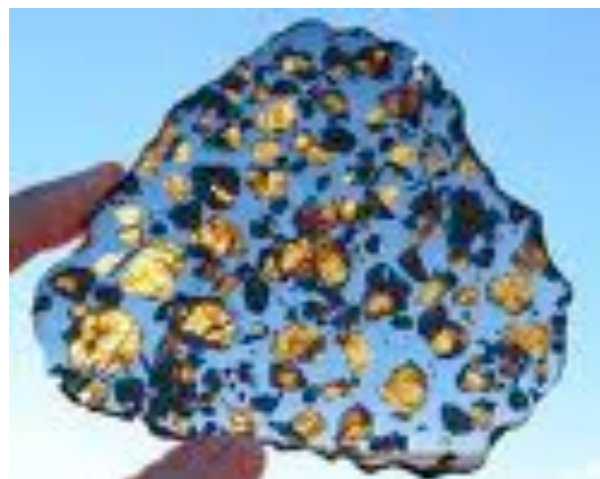
Le Tungstène sidérophile «aime le fer» (il est lessivé si du fer est présent), l'Hafnium lithophile «aime les silicates»

Si le Tungstène est dans le noyau, le noyau s'est formé après la mort de l'Hafnium,

Si du Tungstène est dans le manteau, le noyau s'est formé avant la mort de l'Hafnium,

La montre Hafnium-Tungstène



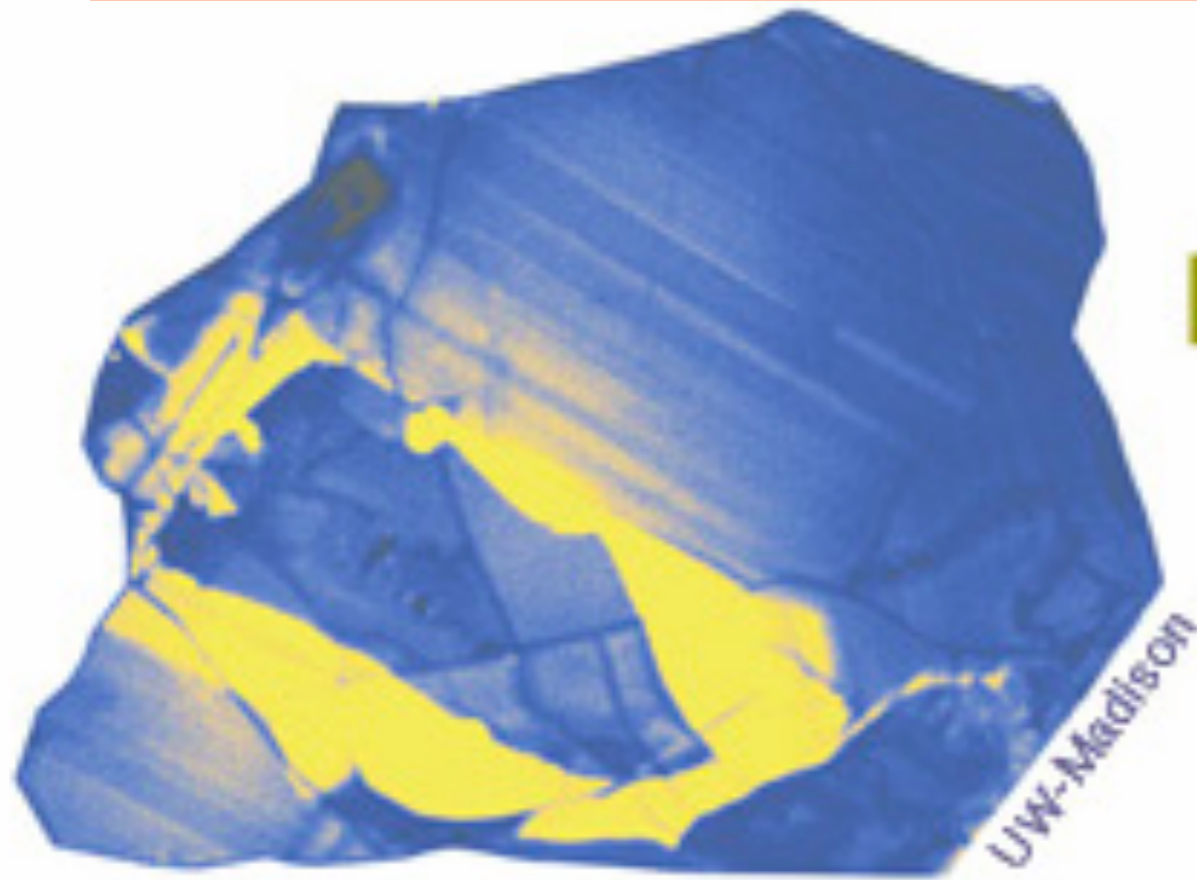


**Pallasite**

La lune s'est formée vers  
+60 ma lorsque la Terre a été  
percutée par un objet de la  
taille de Mars



Les plus anciens témoins  
(zircons) -4000 ma (+500 ma)  
semblent déjà indiquer la  
présence de croûte et  
d'océans

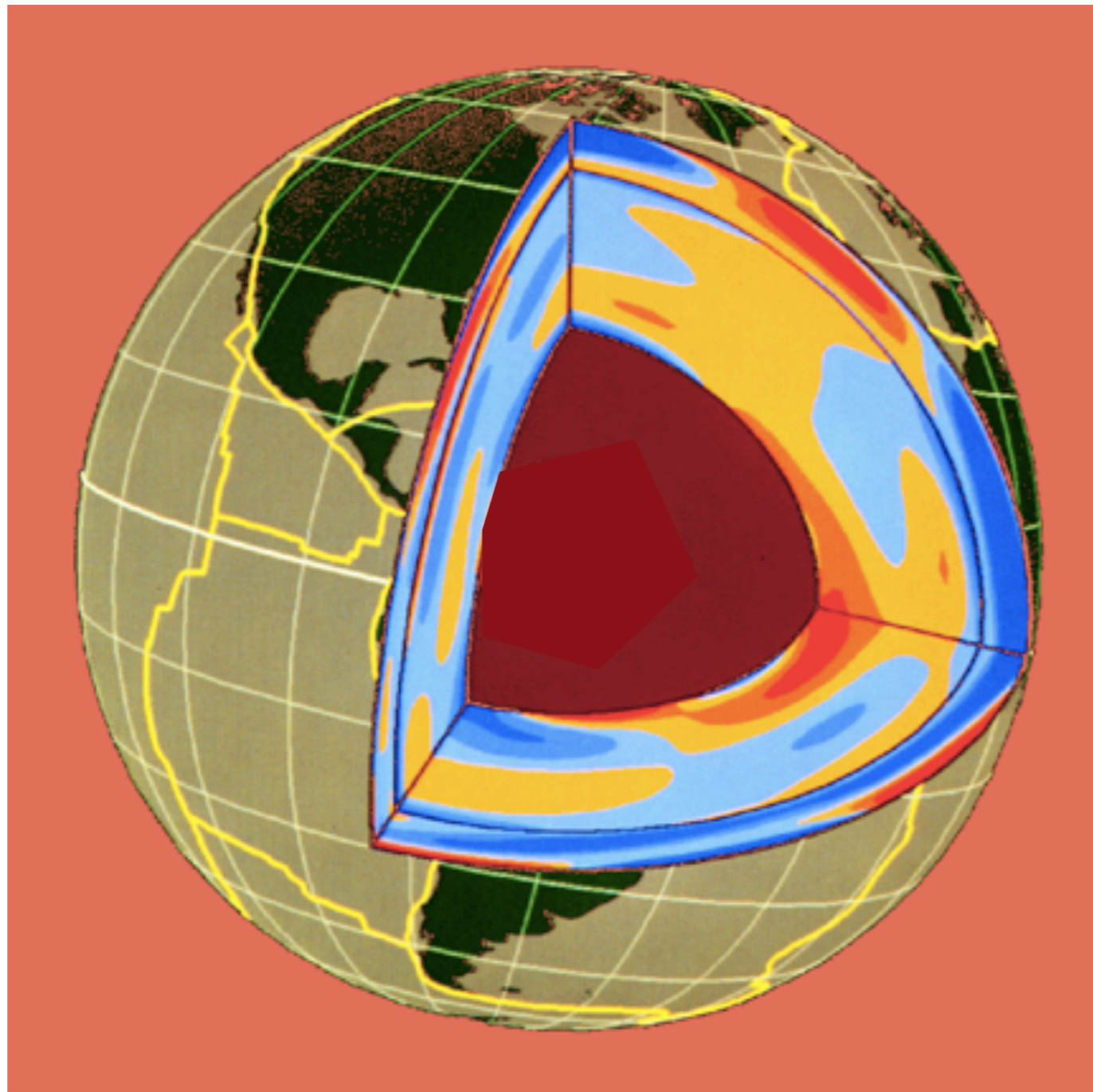


The  
Earliest  
Piece  
of the  
Earth

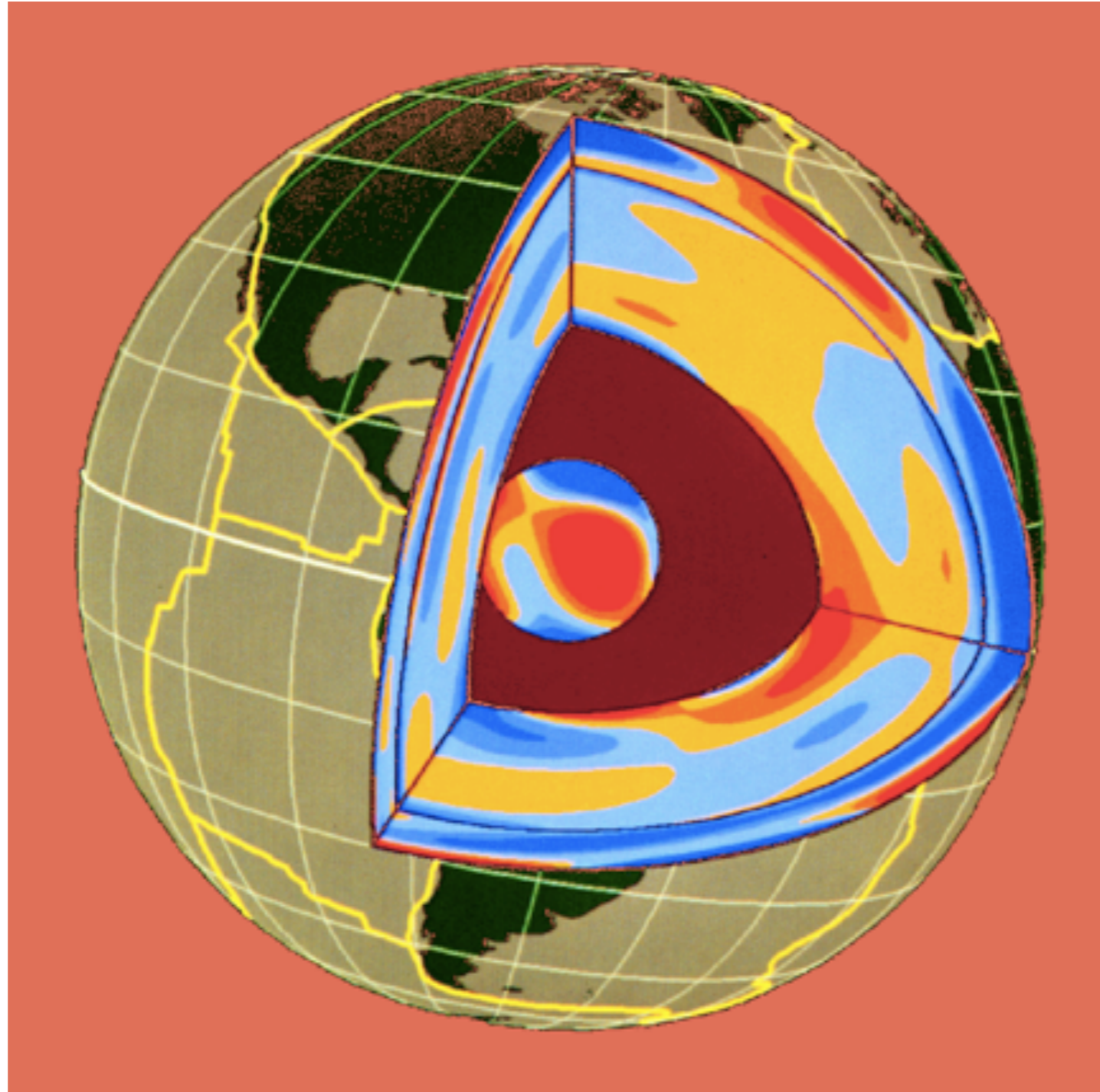
0.2 mm

Zircons de Jack Hill (Australie)

-4000 ma, le cadre est fixé, ou presque...



En se refroidissant une graine de fer solide s'est formée il y a -1500 ma





4566 ma plus tard

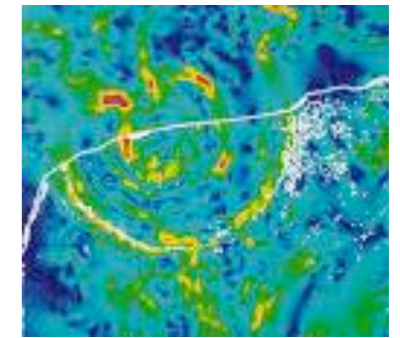
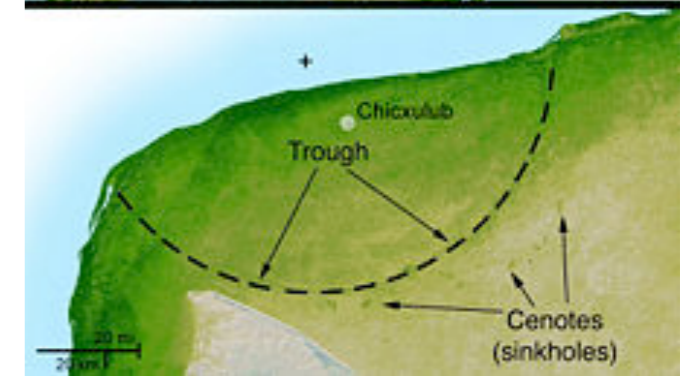
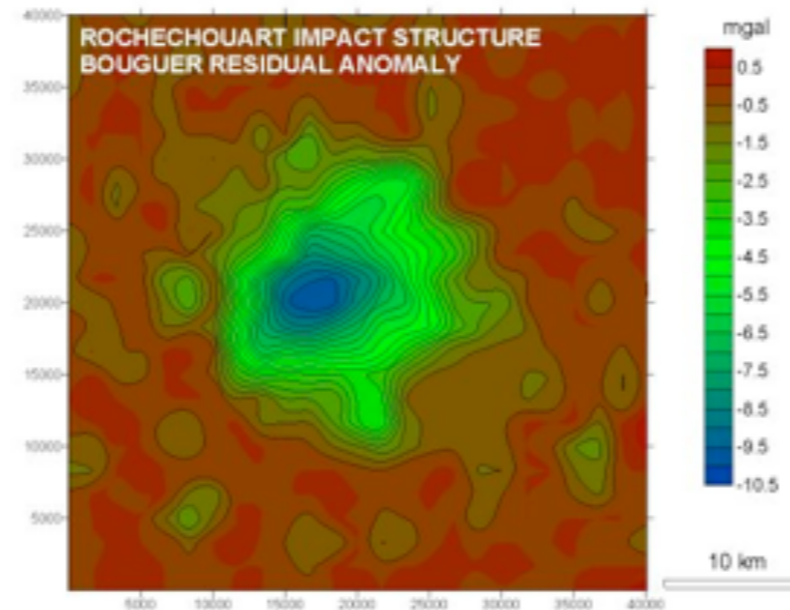


Et quelques météorites tombent toujours...



Meteor  
Arizona

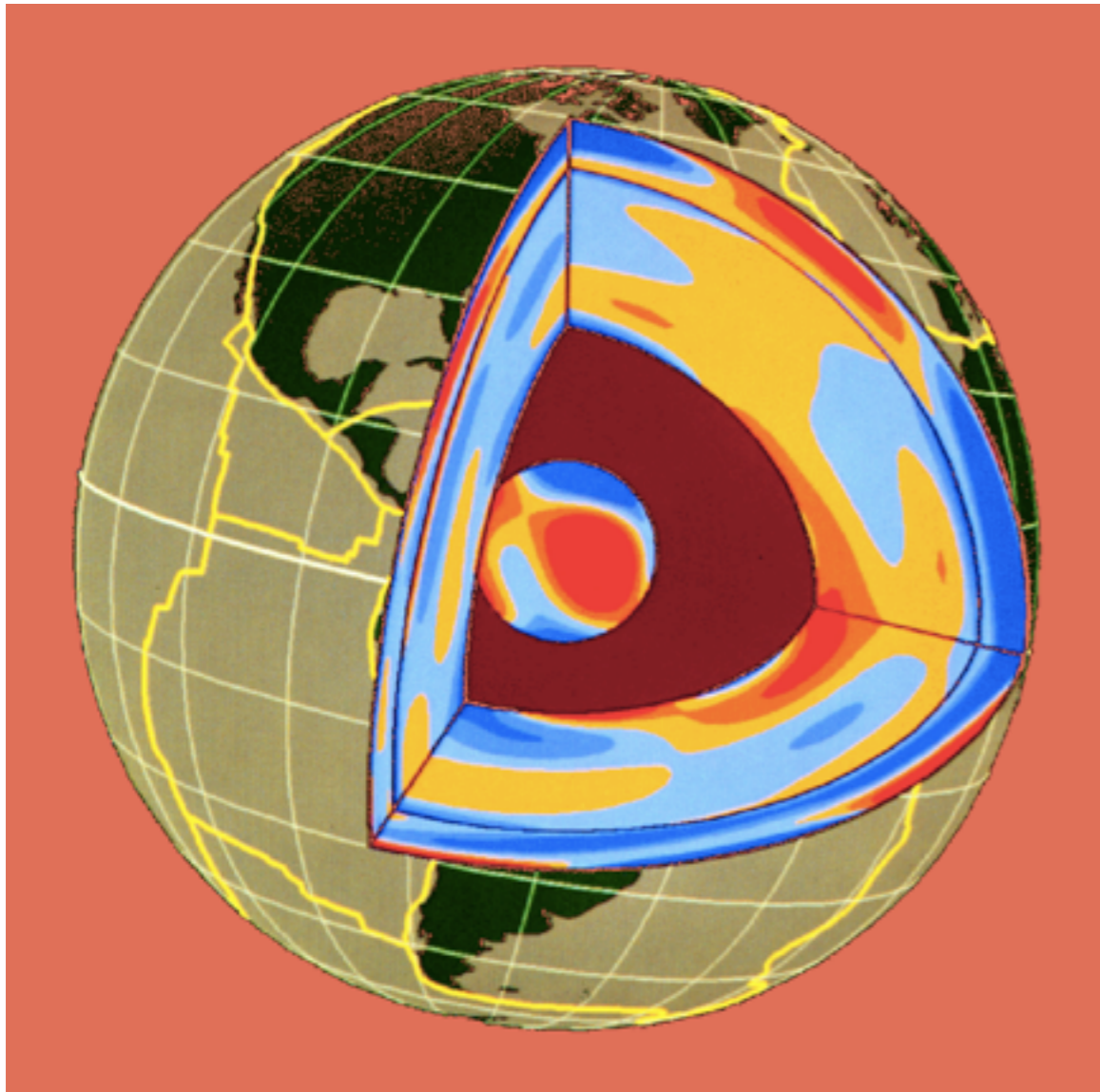
Manicouagan



Chicxulub

Rochechouart

La sismologie nous montre une planète  
essentiellement solide



6371 km

Un manteau de roches  
solides (silicates)

3000 km

Un noyau  
de fer  
liquide

1000 km

Une graine de fer solide

L'écume du manteau

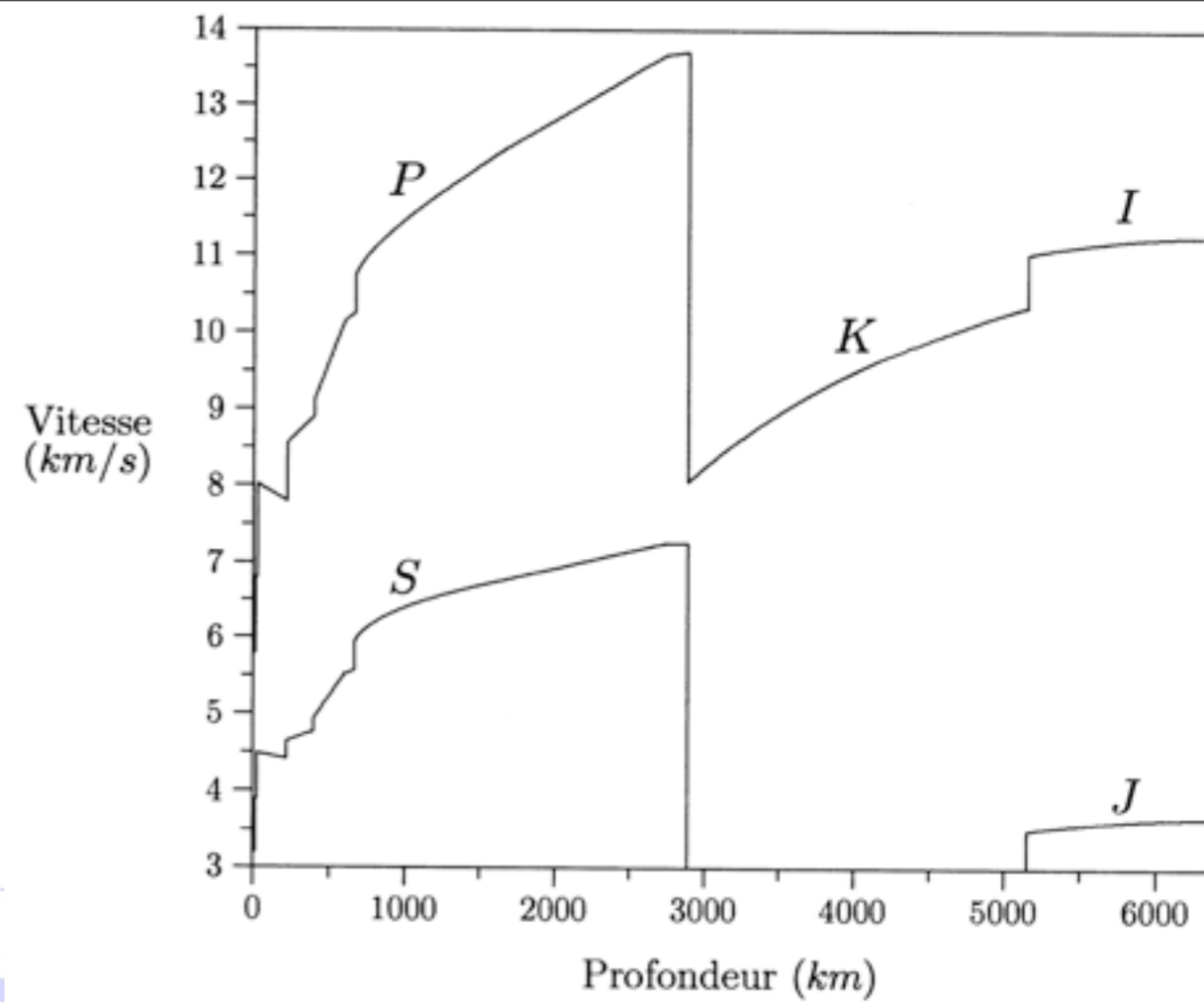
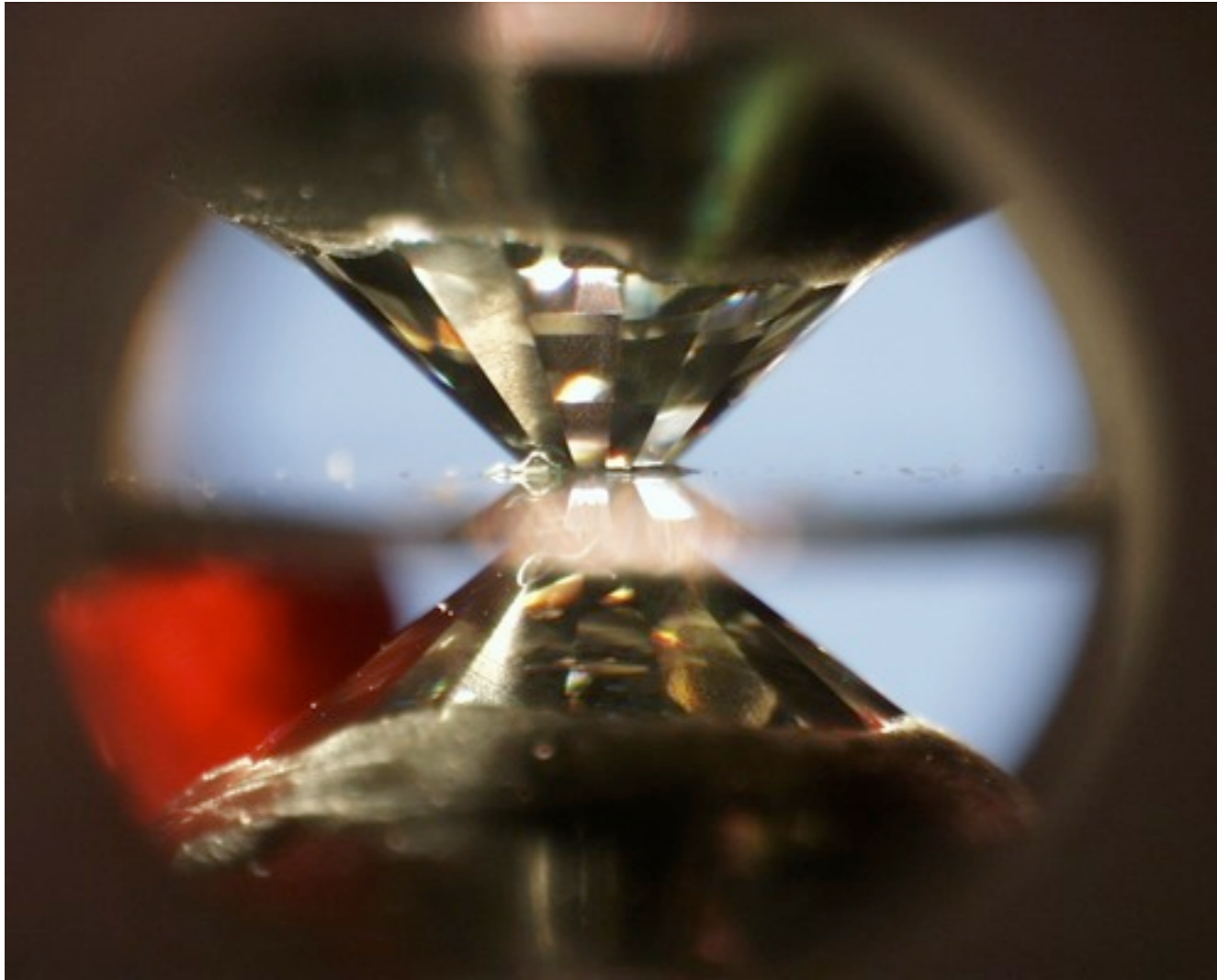


La croute  
océanique

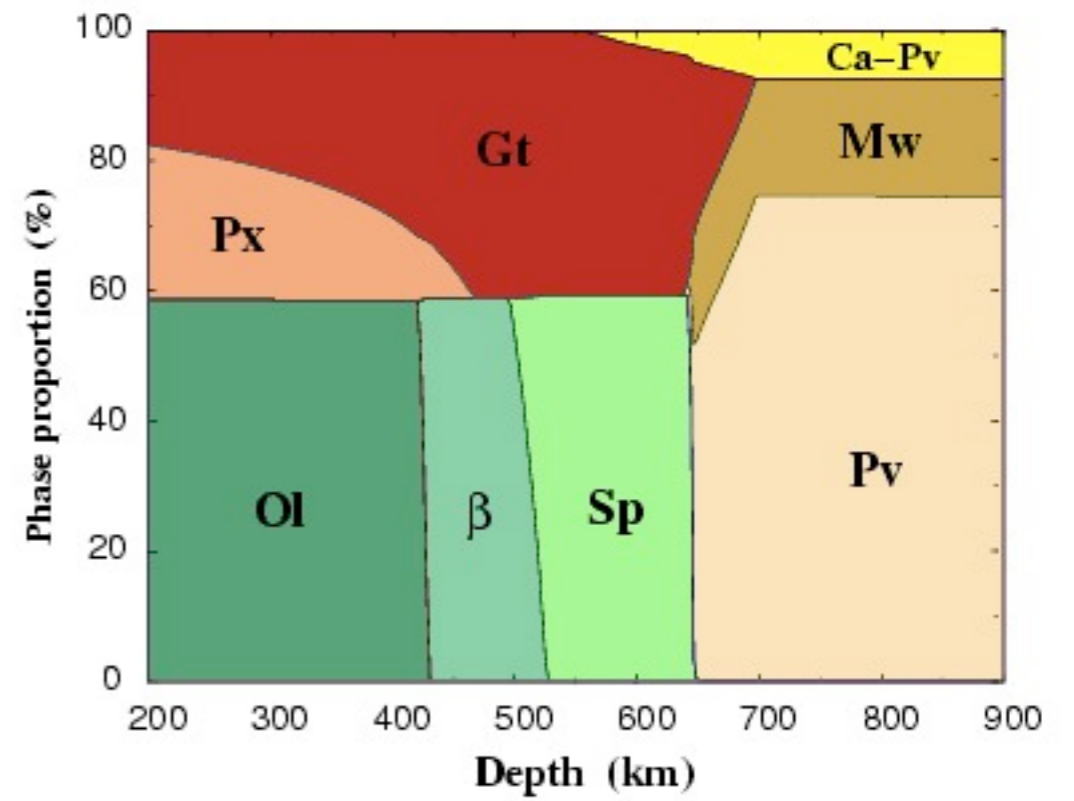
La croute  
continentale  
30 km (le granite)

Le manteau  
3000 km (la  
péridotite)

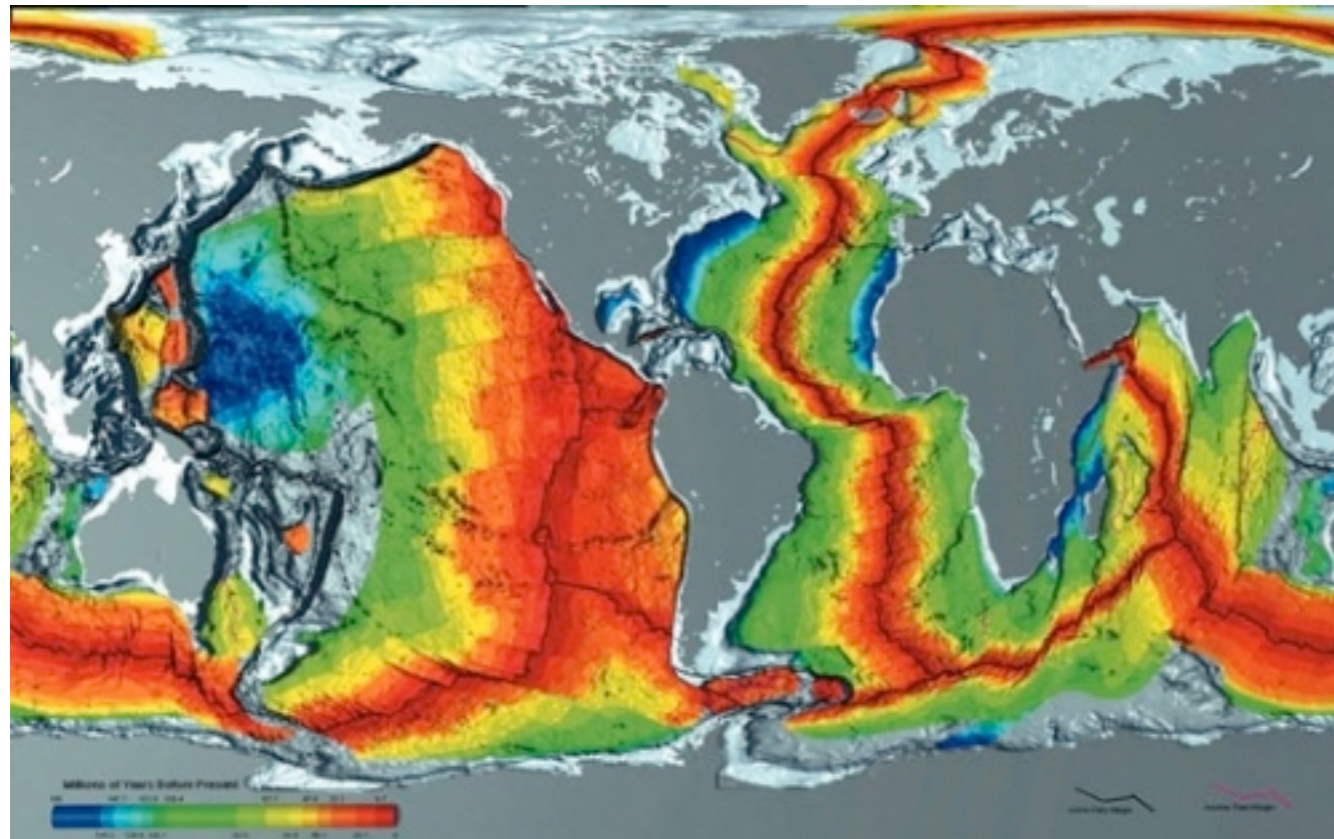




**Computed Pyrolite Phase Diagramme**

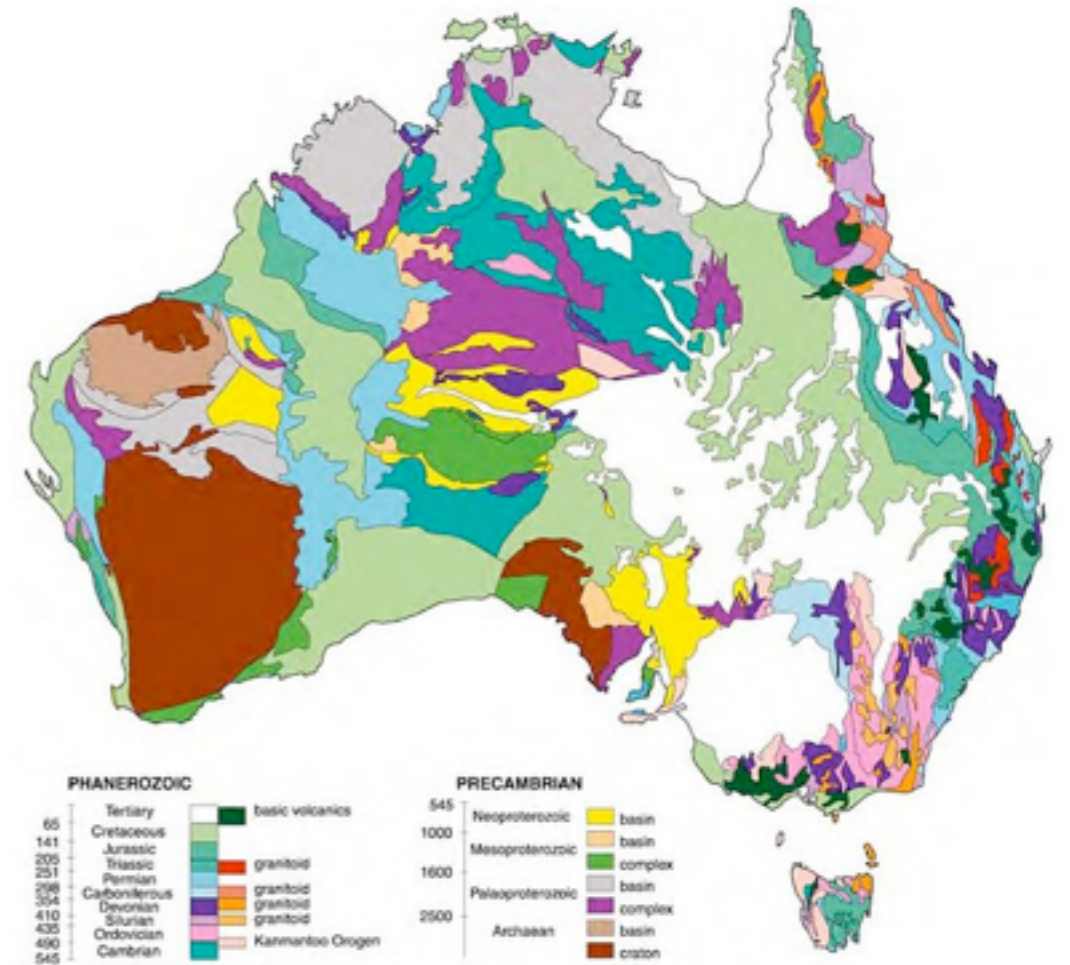




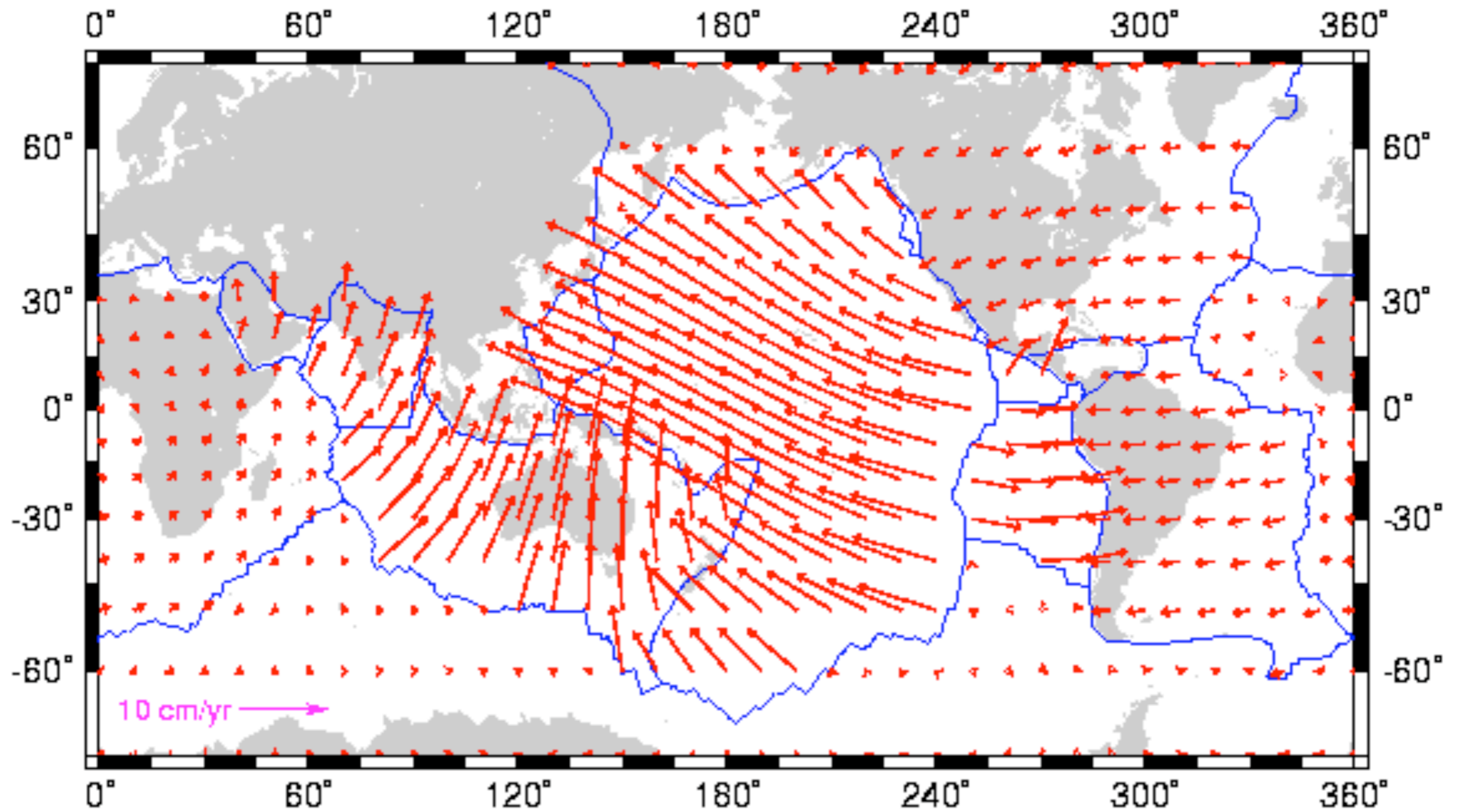


Des oceans «jeunes et simples» (< 160 ma)

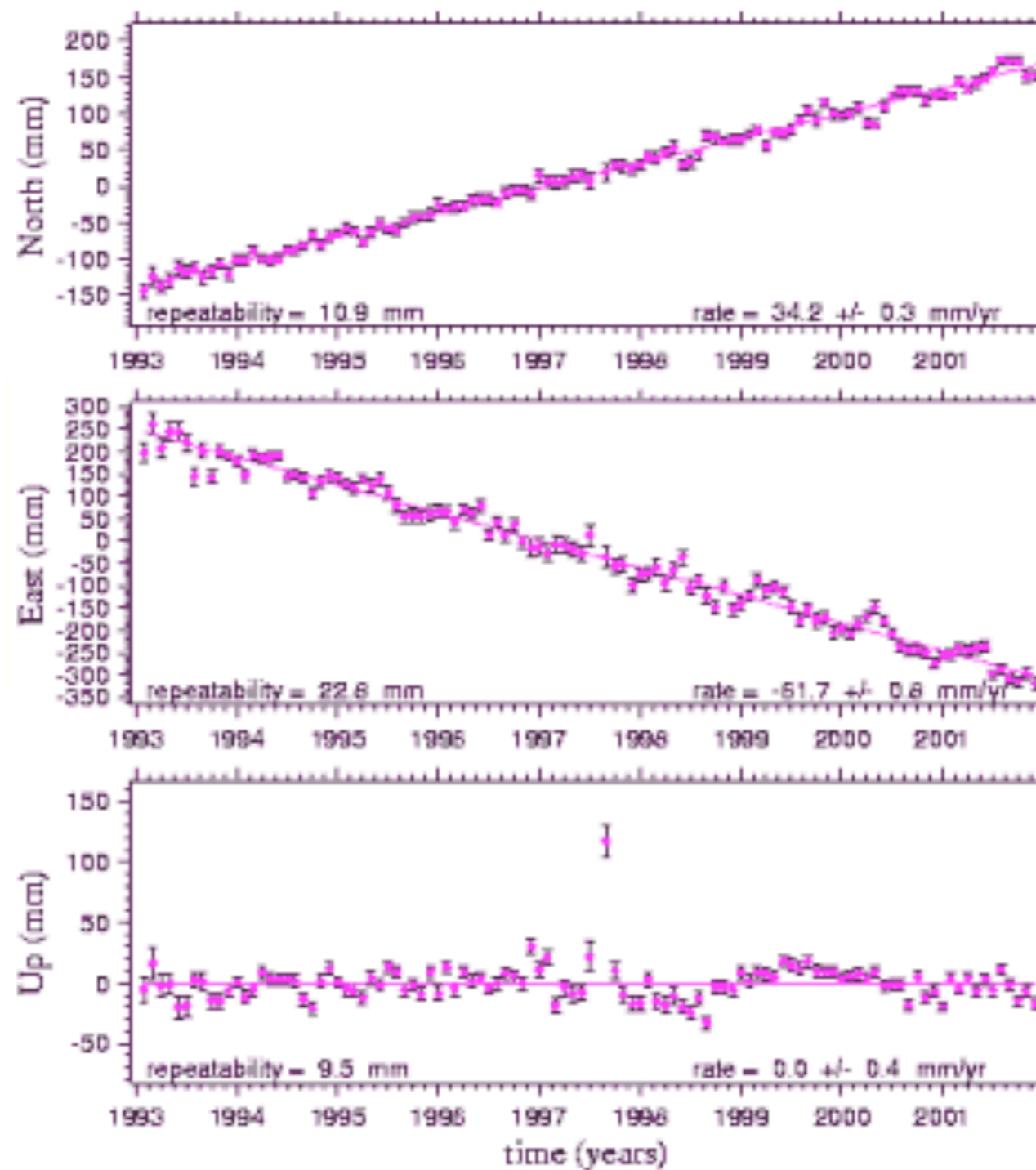
Des continents «vieux et compliqués» (jusqu'à 3000 ma)



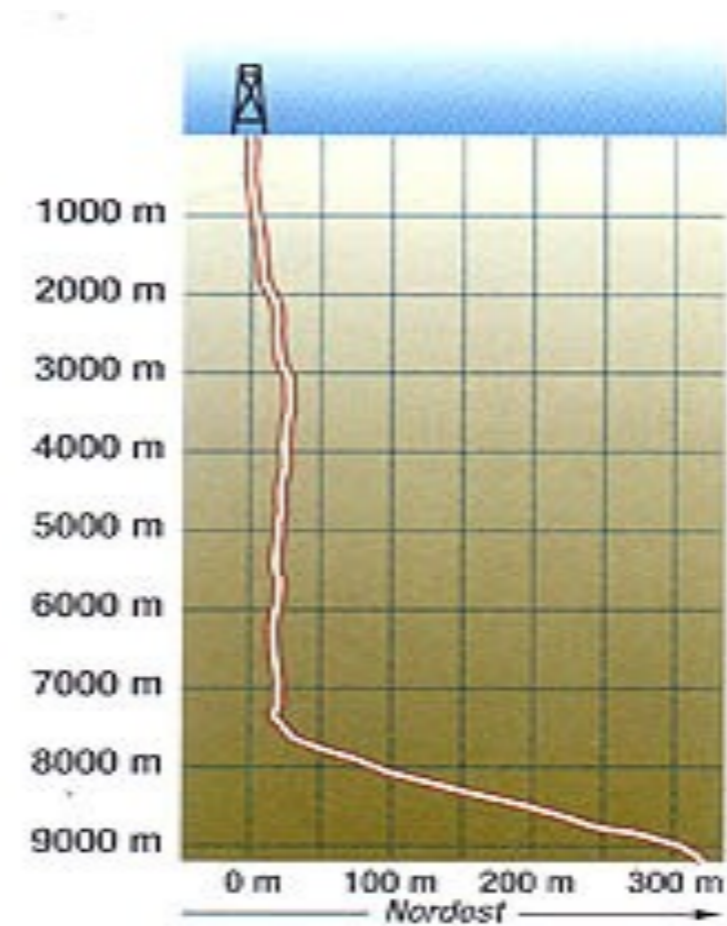
## Modèle de la tectonique des plaques



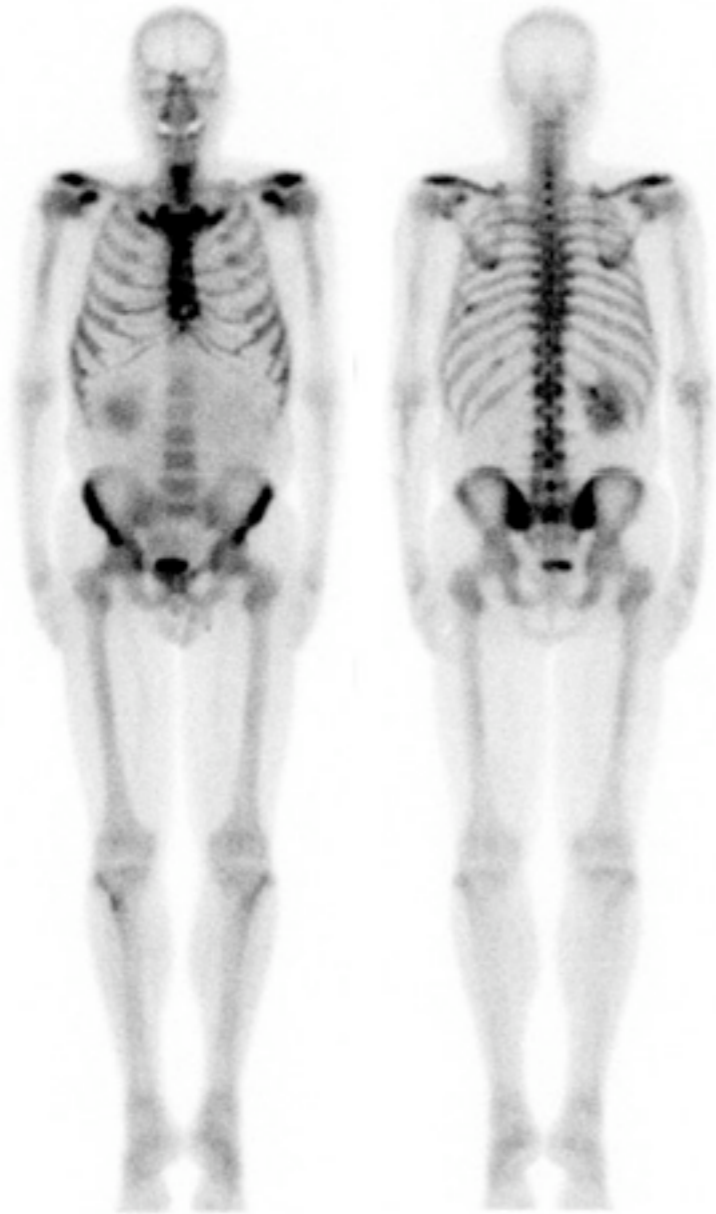
# Distance France- Pacifique mesurée par GPS



# Forages, KTB, de la presqu'île de Kaula...

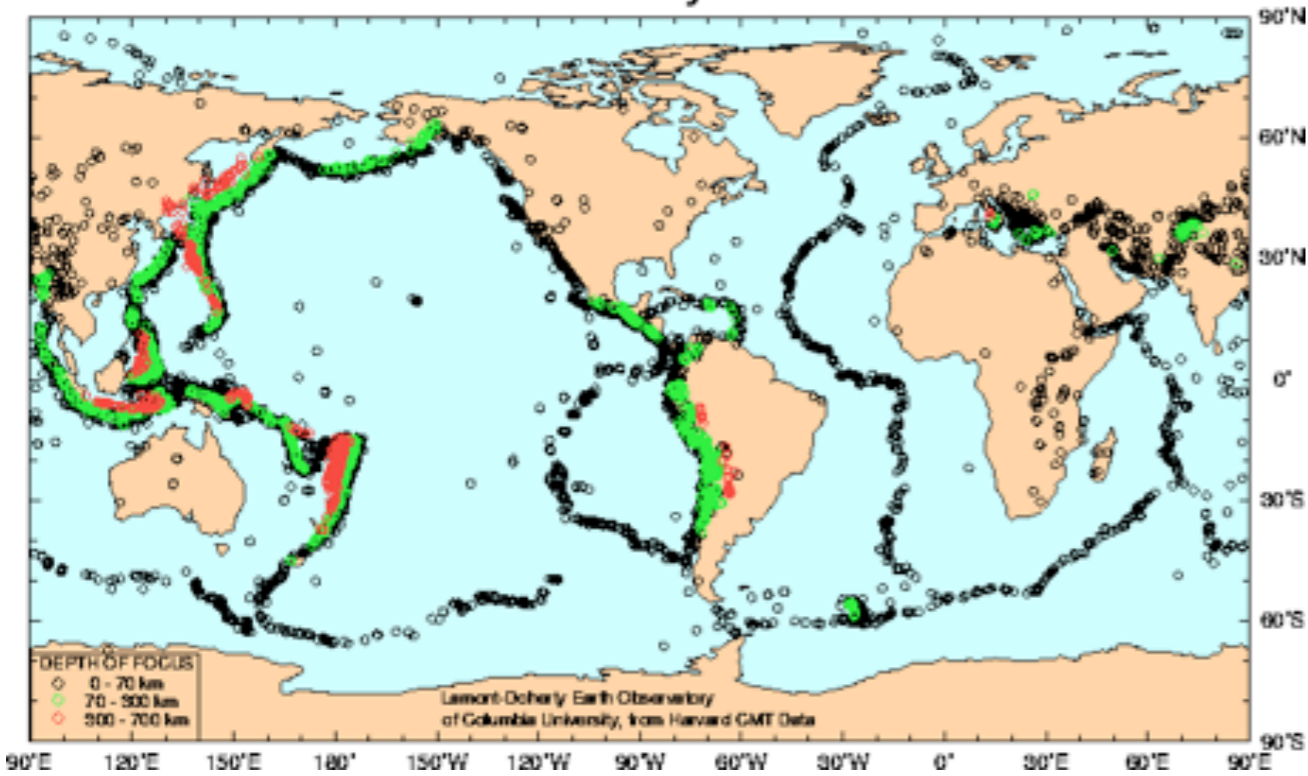


Voir l'intérieur d'une planète ??



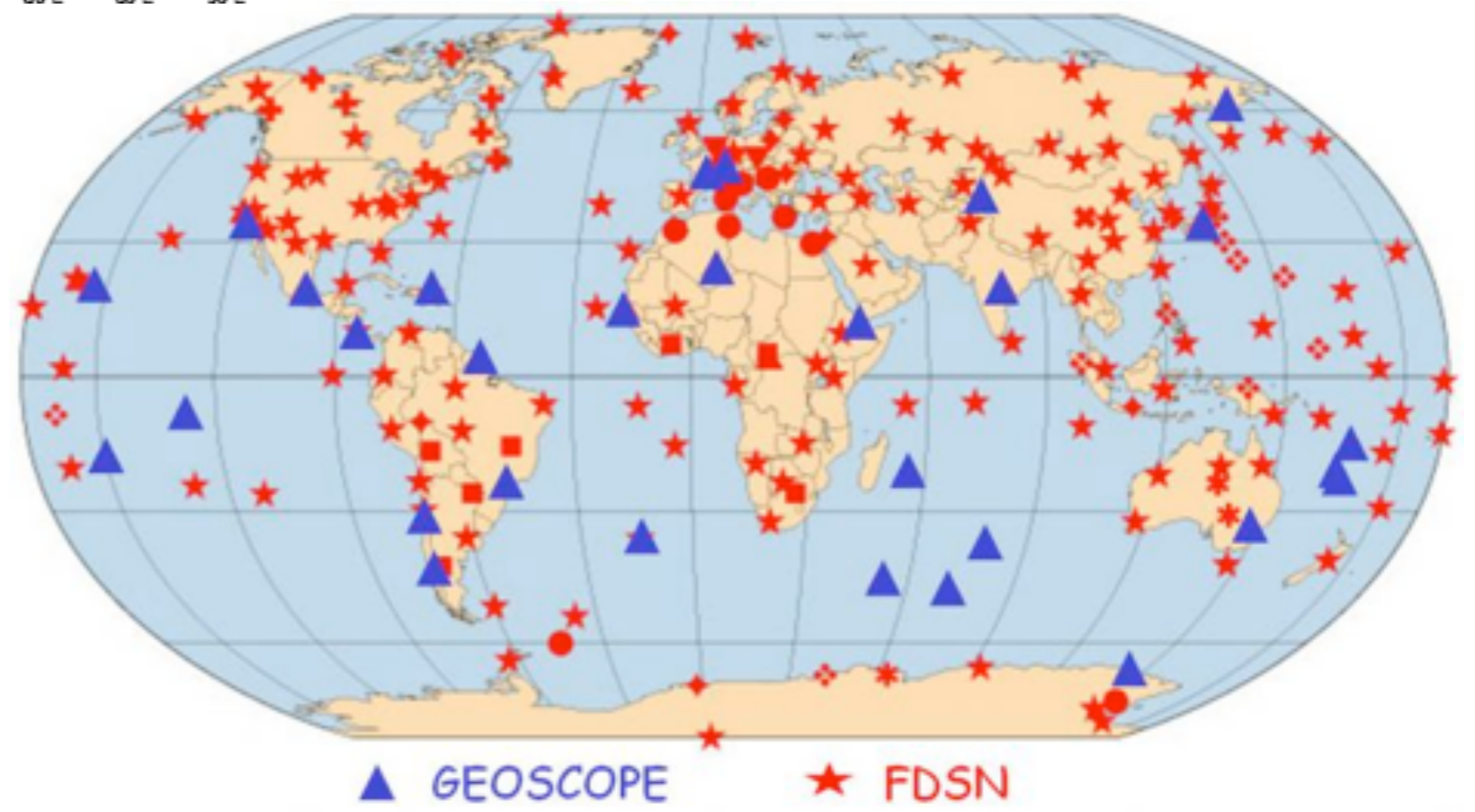
Imagerie  
médicale  
d'atténuation  
(Rayon X)

# World Seismicity 1977-1992



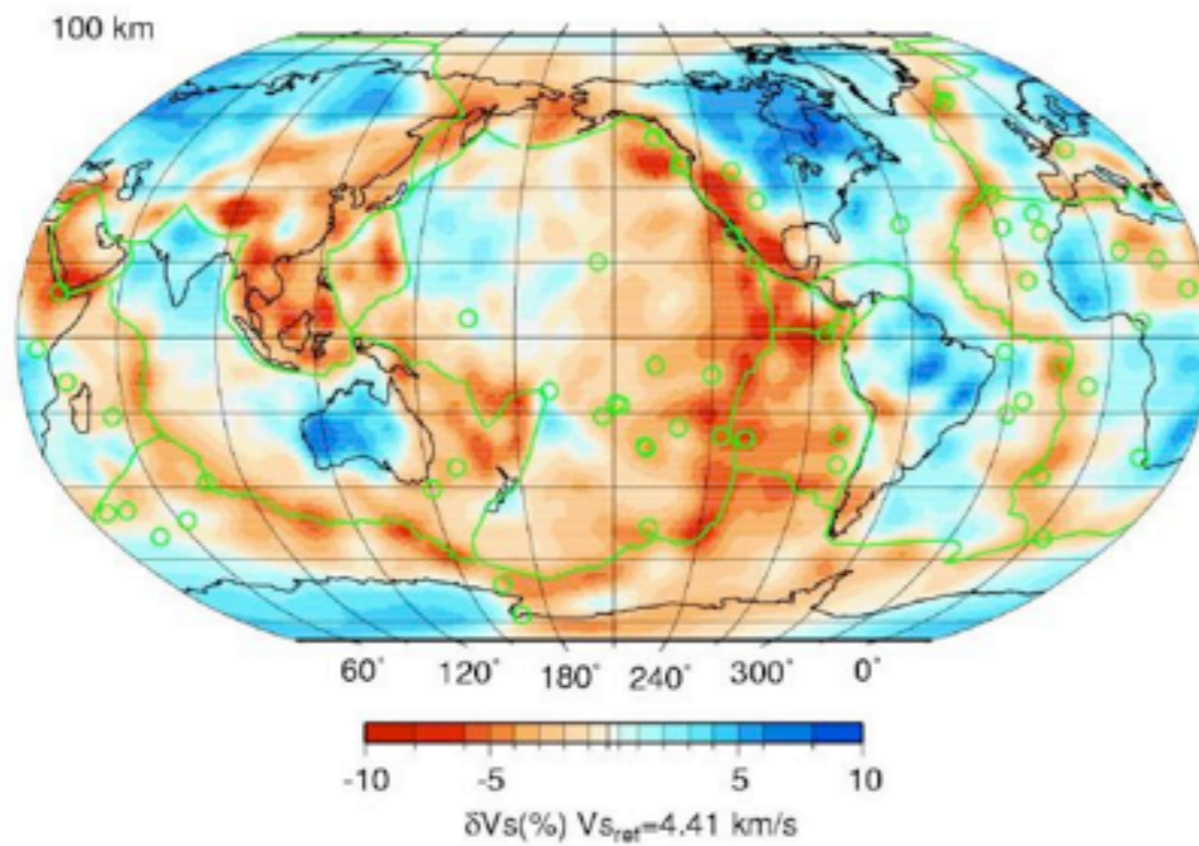
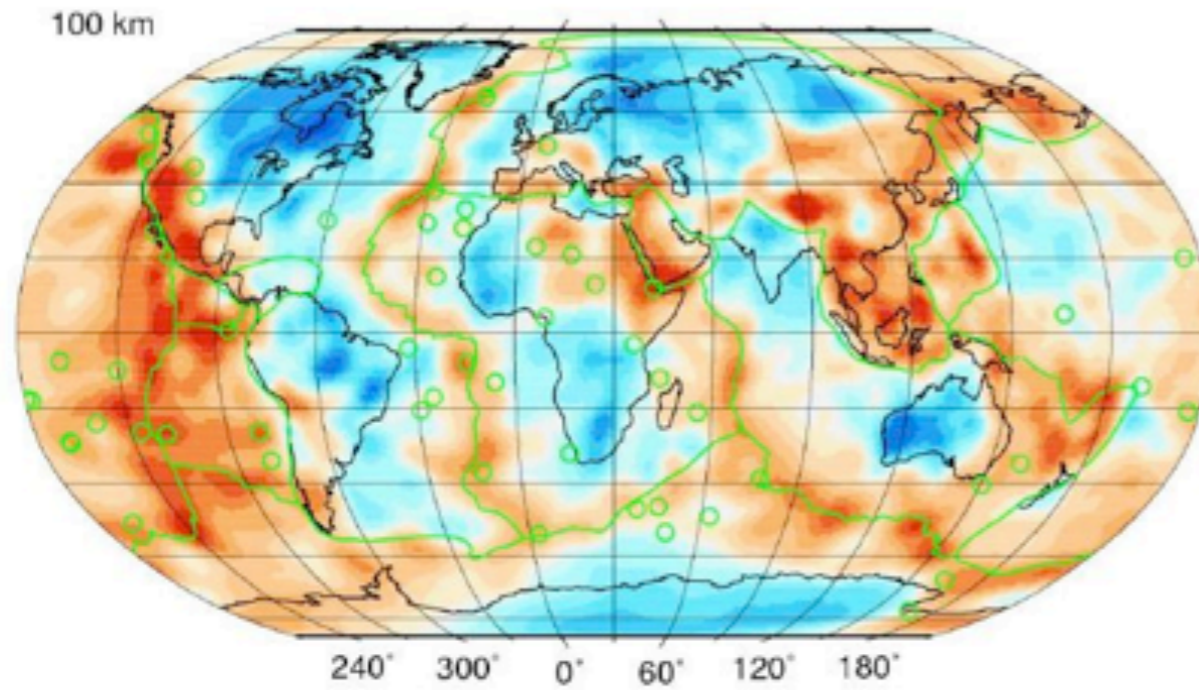
Des séismes (émetteurs)

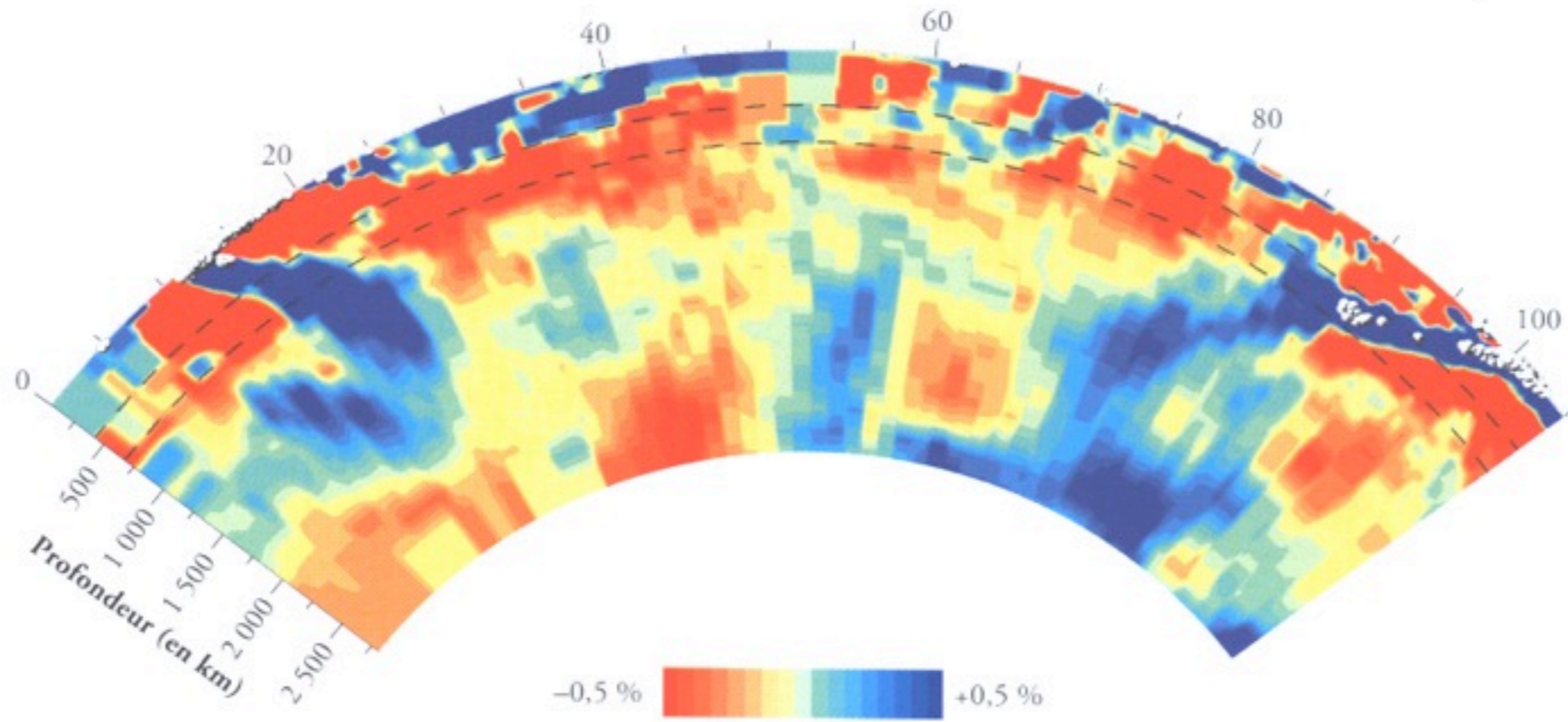
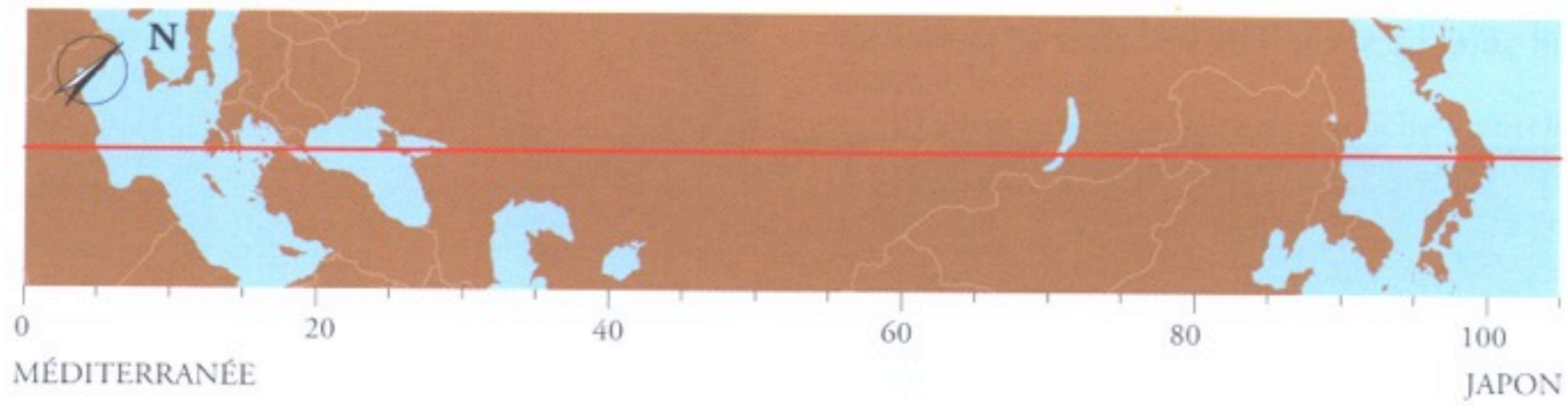
Des stations (récepteurs)



# Tomographie sismique

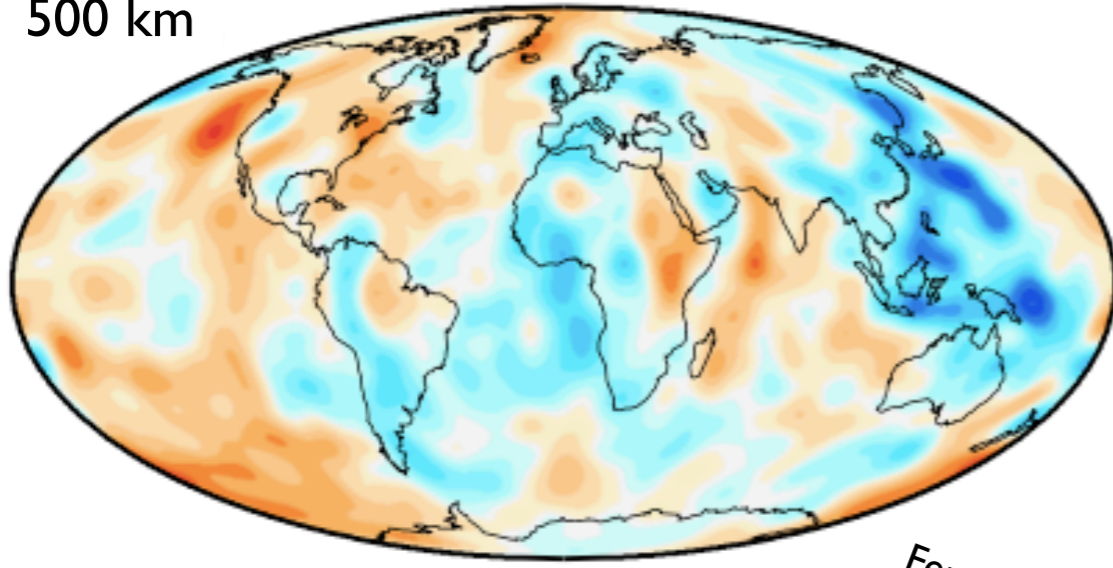
100 km de  
profondeur



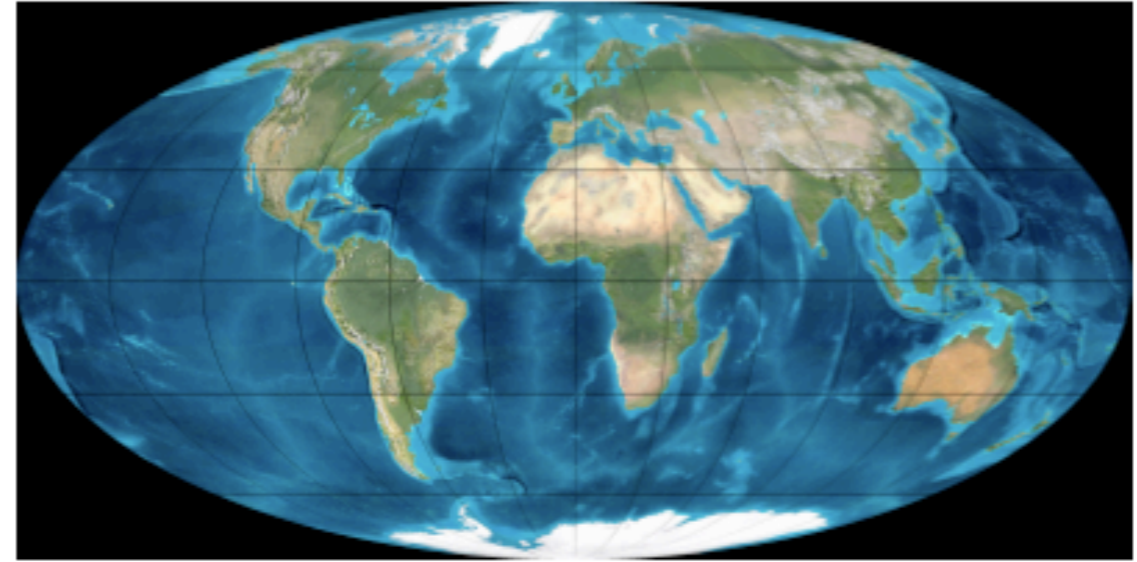




500 km



**PRESENT**

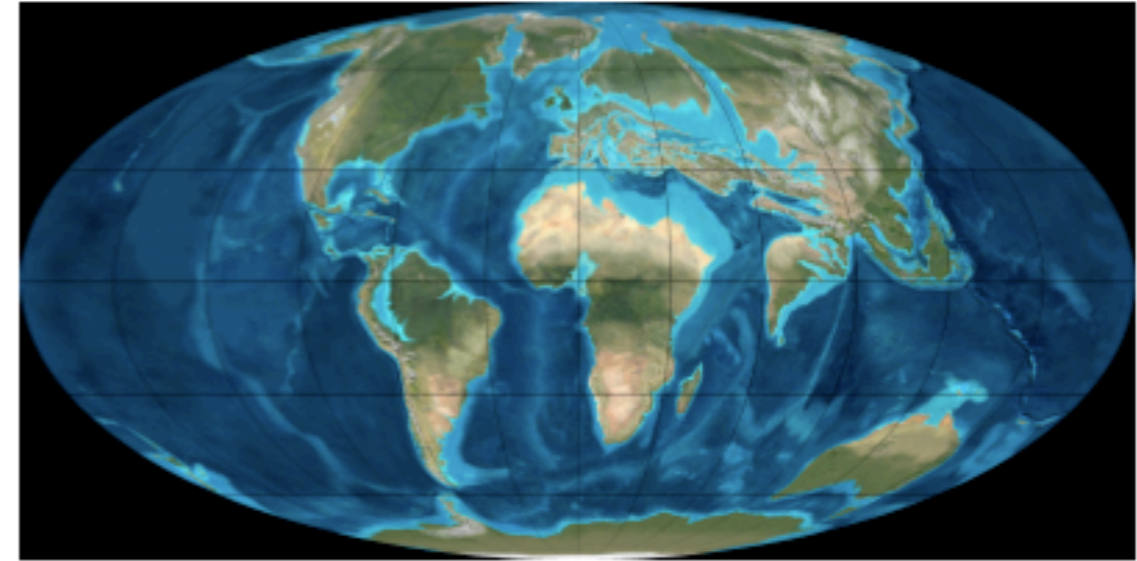
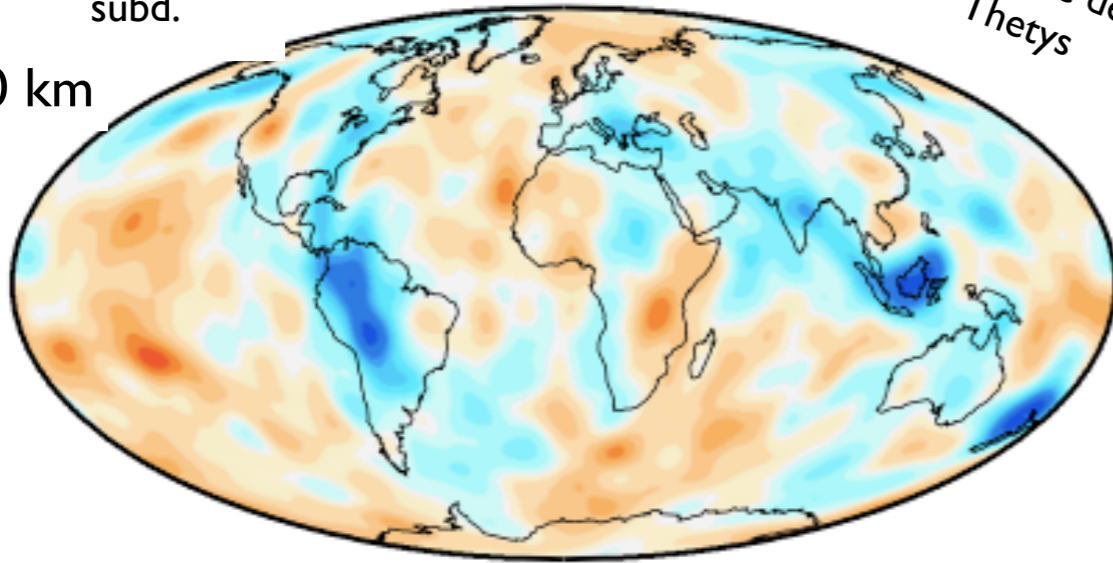


Farallon  
subd.

*Fermeture de la  
Thetys*

**EOCENE 50 MA**

1000 km

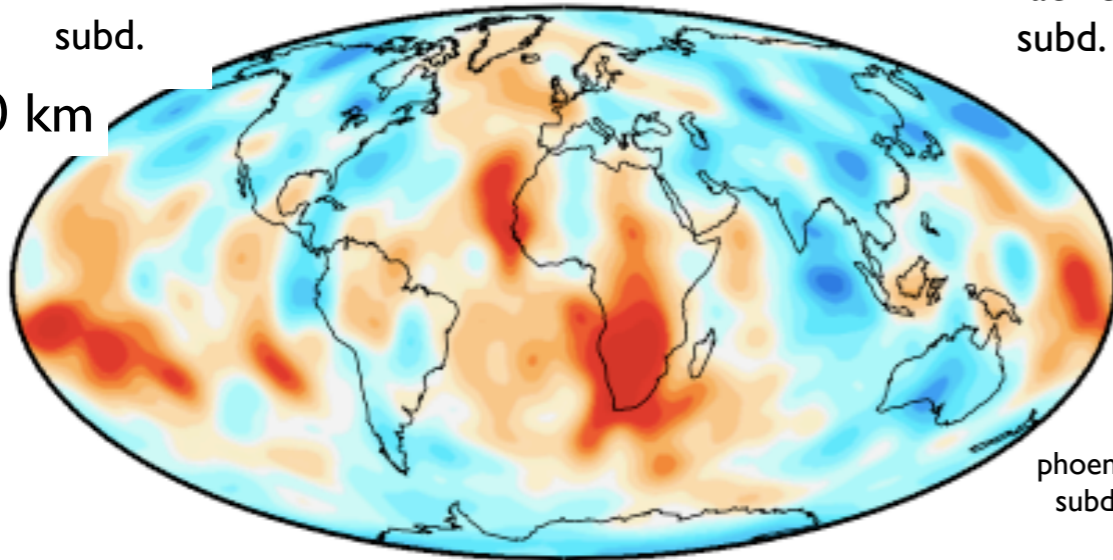


**CRETACEOUS 95 MA**

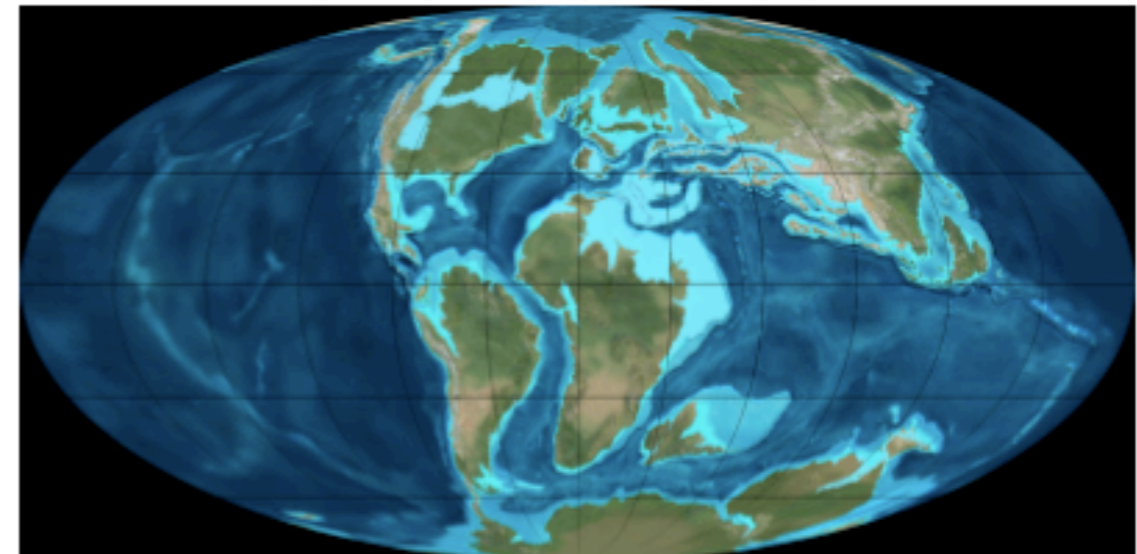
Kula  
subd.

Pacific  
subd.

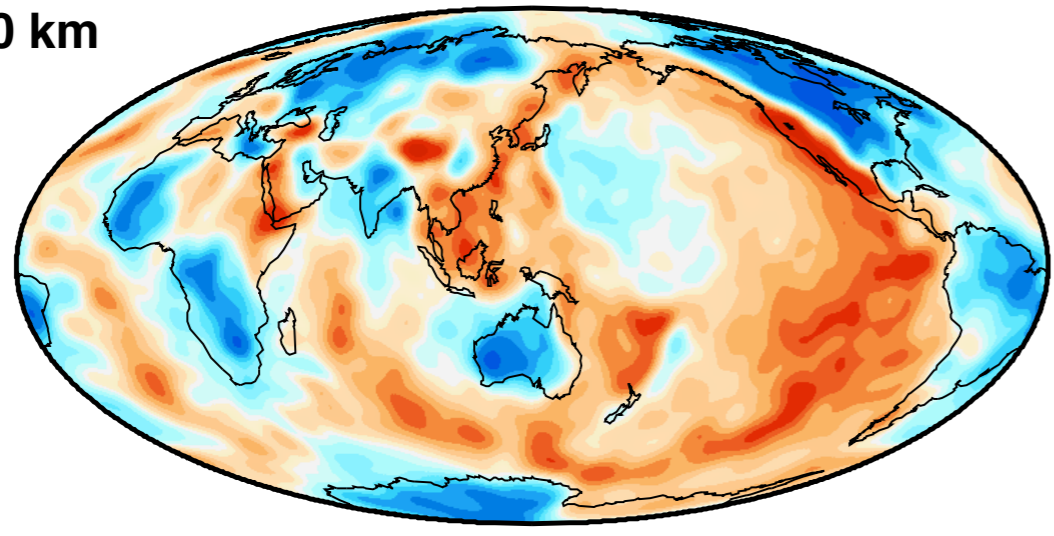
2000 km



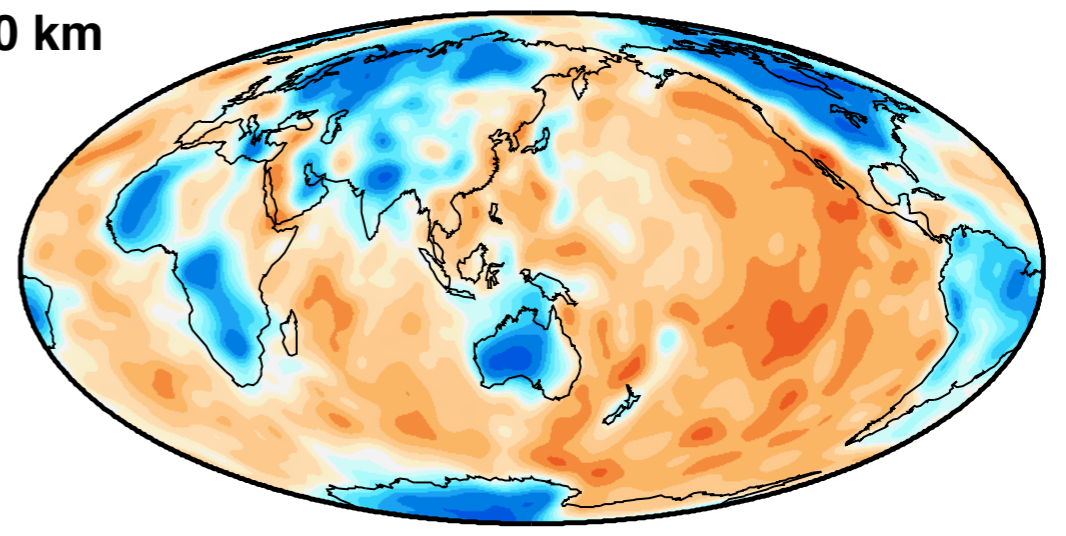
phoenix  
subd.



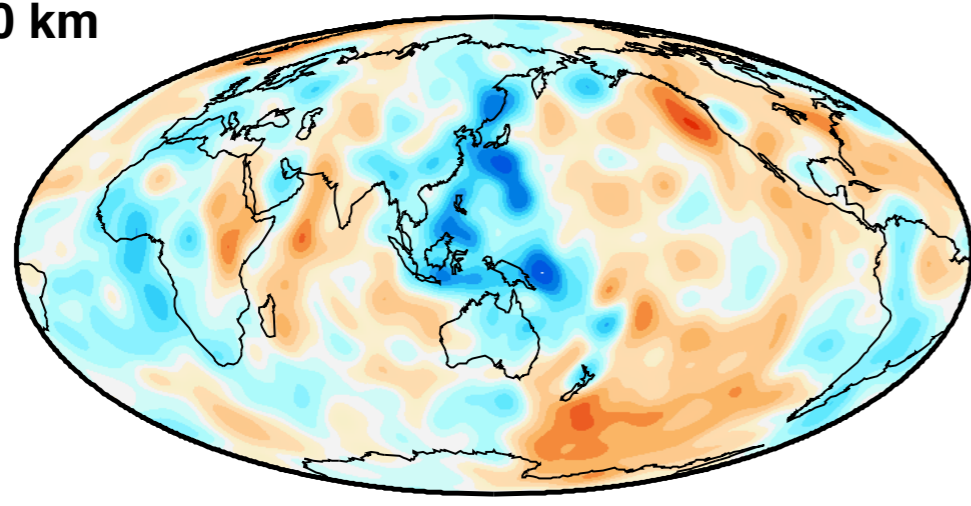
100 km



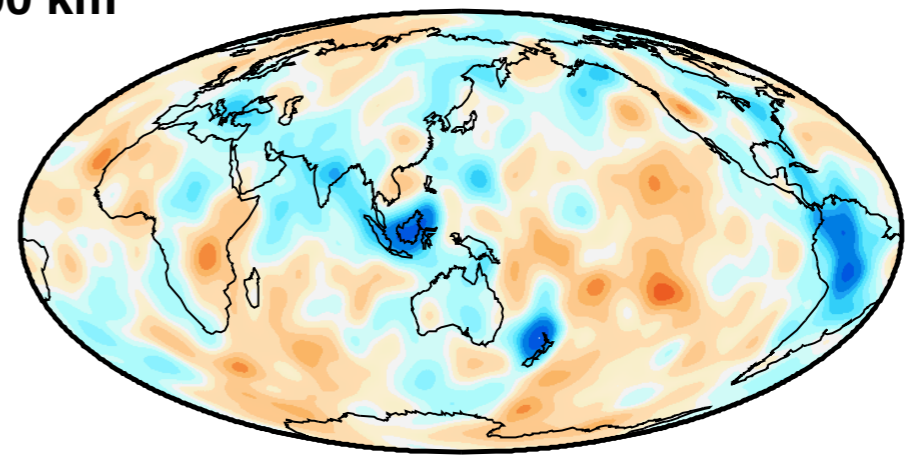
150 km



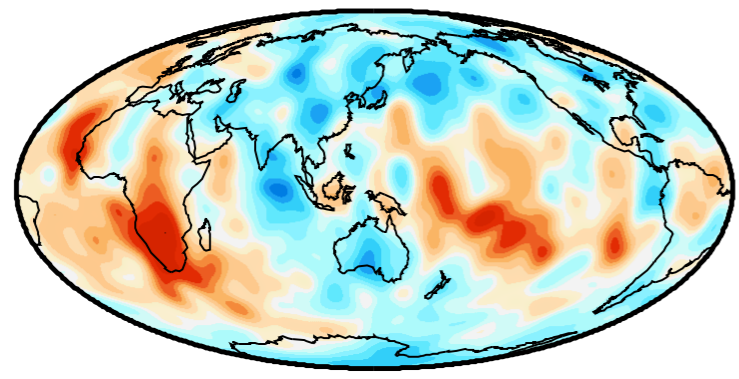
550 km



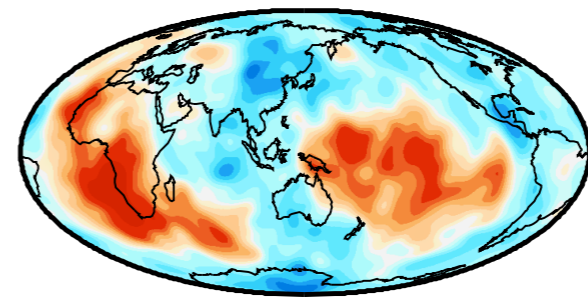
1000 km



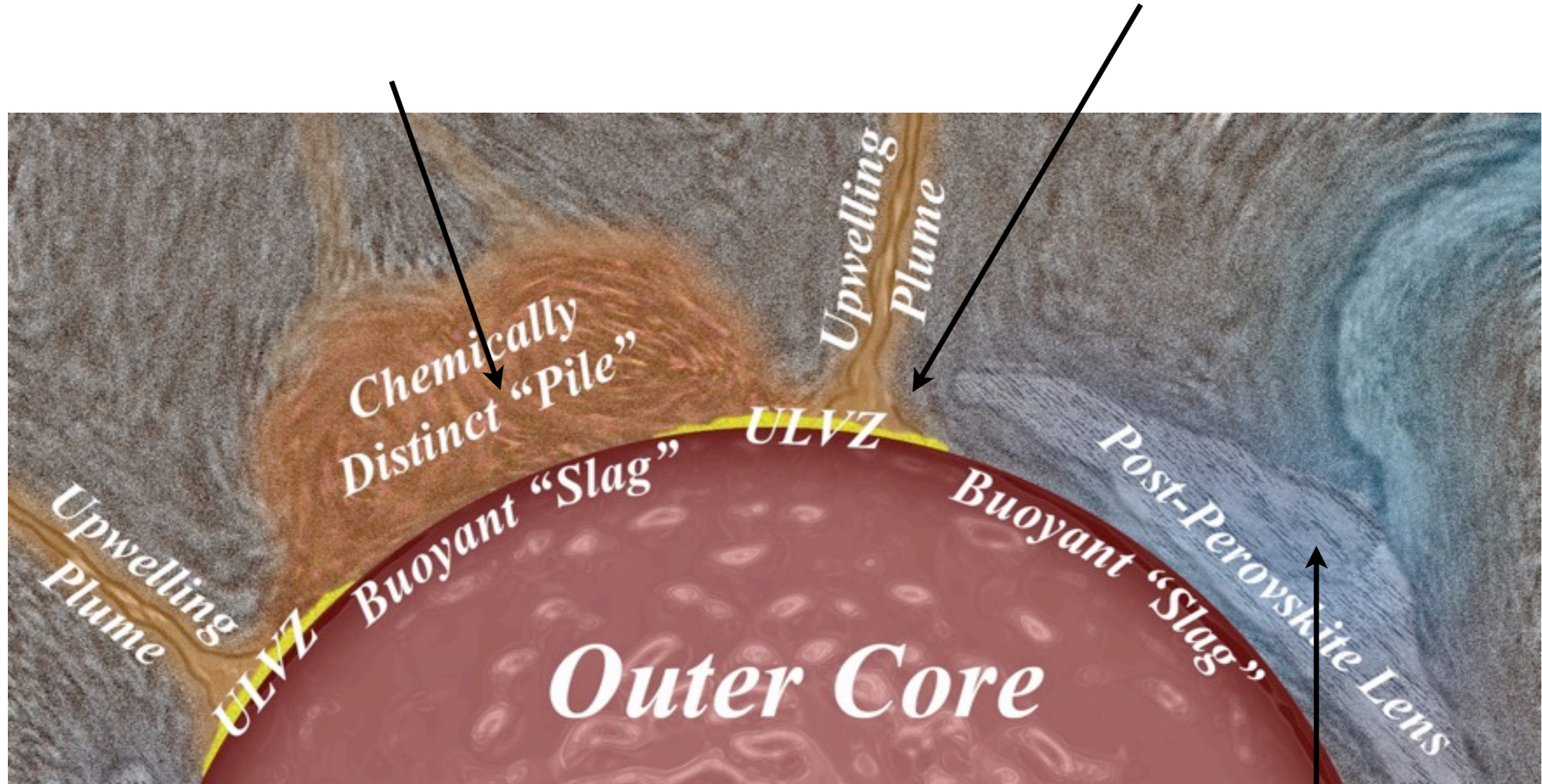
2000 km



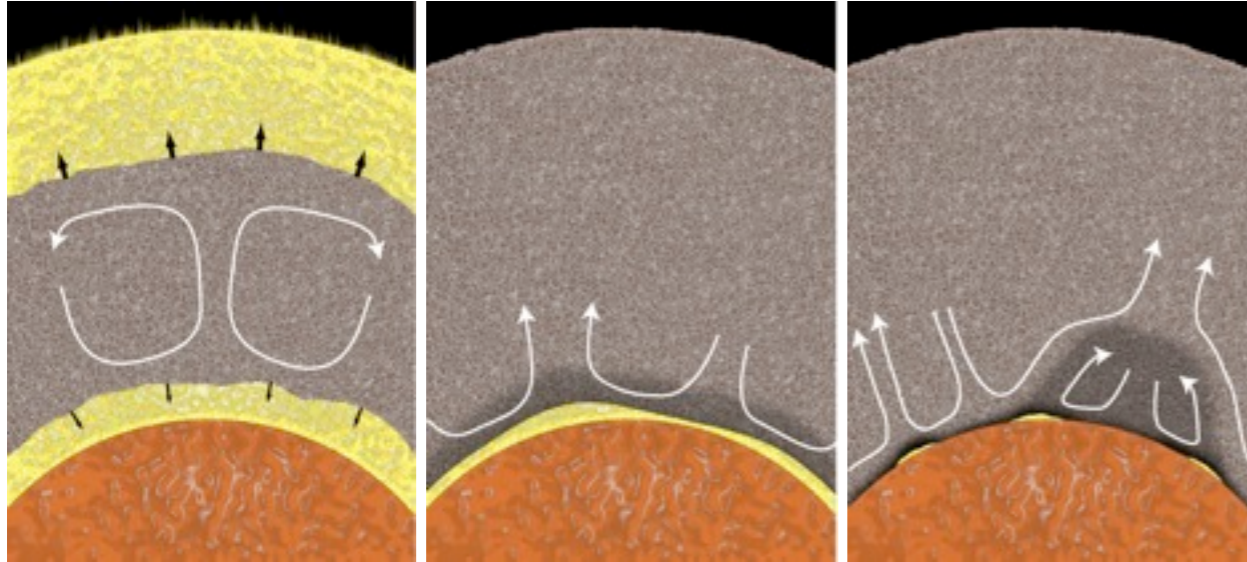
CMB



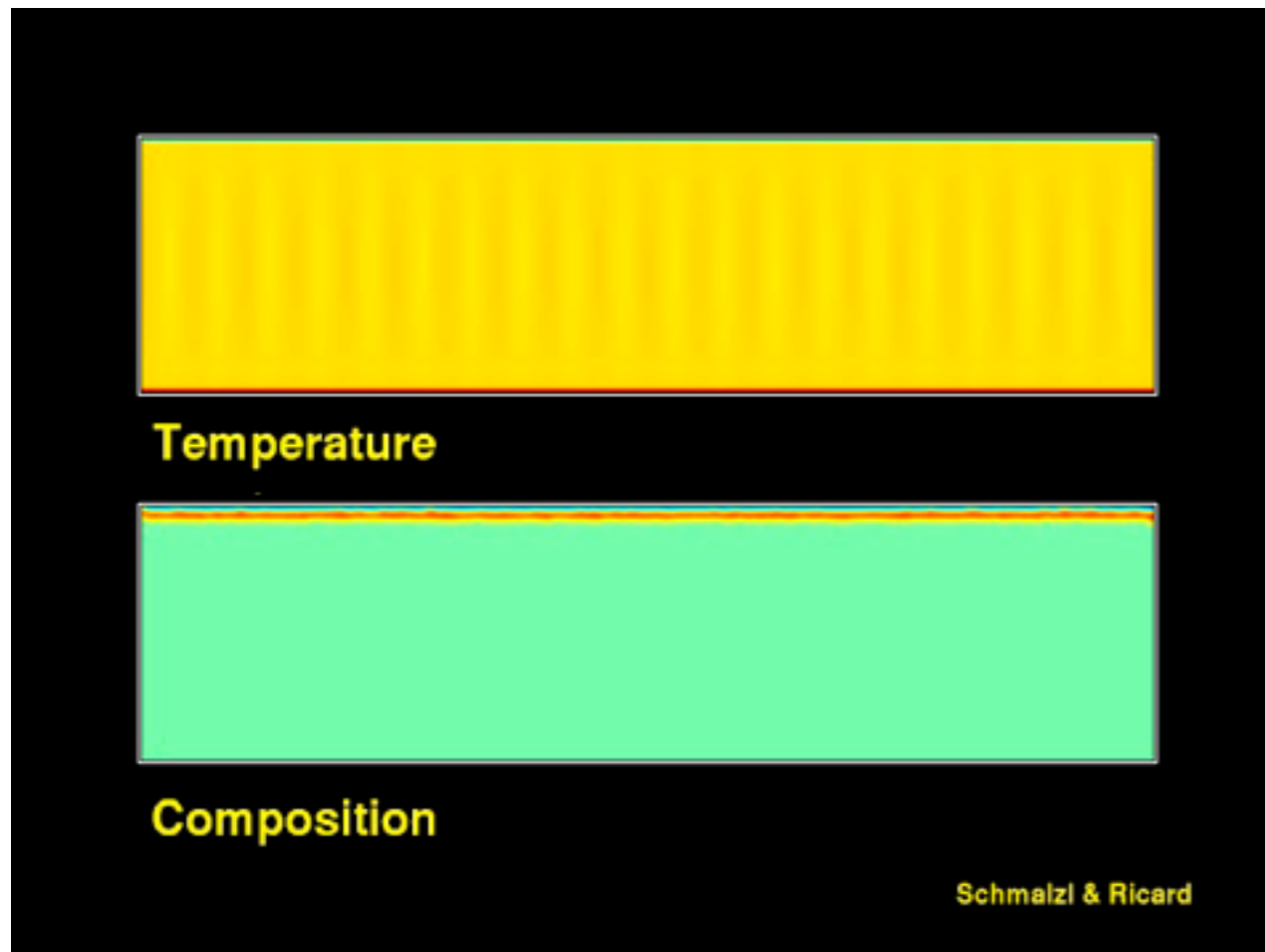
Des zones chimiquement distinctes ? Des zones fondues ?



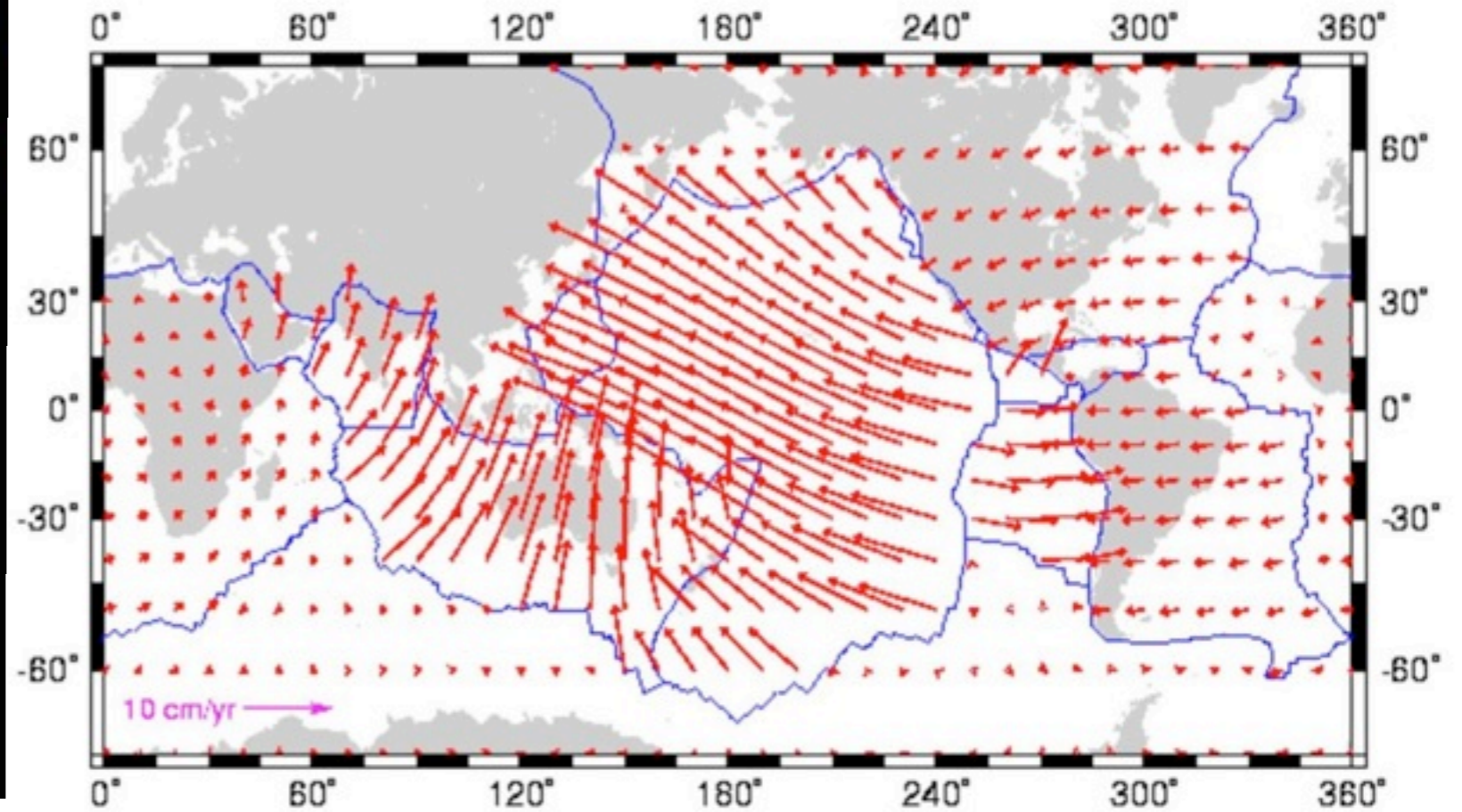
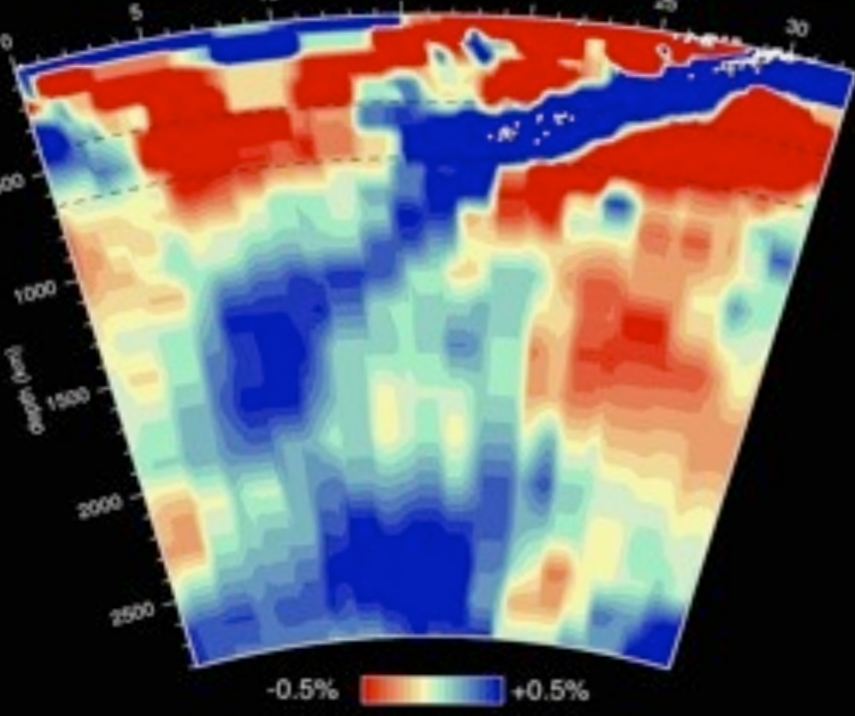
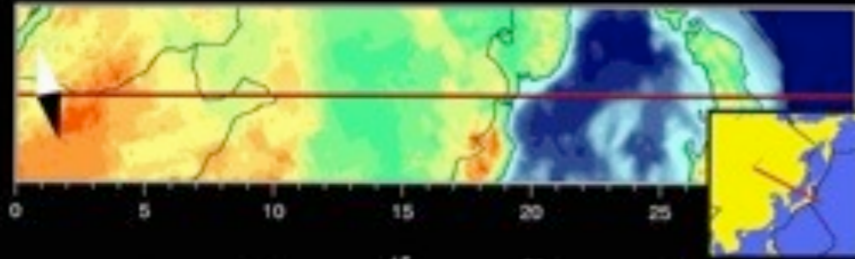
Un nouveau changement de phase ?



Un souvenir des temps  
Hadéen?



Une conséquence de  
la tectonique des plaques ?



Solide mais déformable?



Liquide

Solide





Déformable

Solide

Le caractère «déformable»:  
un problème de temps...



Une mesure de la  
«déformabilité»  
(viscosité): le rebond  
post-glaciaire





Finlande



Baie d'Hudson

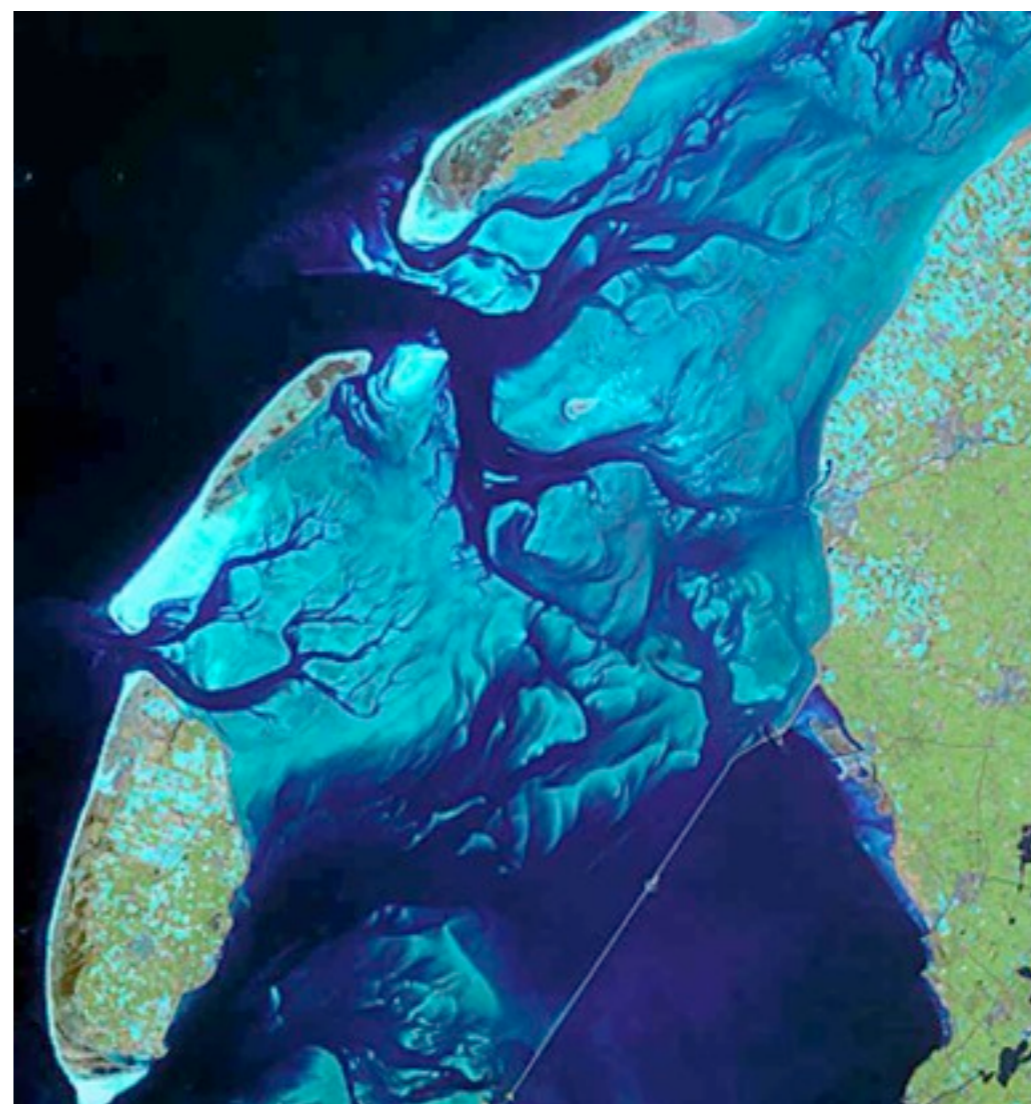


Ecosse

# Bretagne



# Hollande



## Viscosité (Pa s)

De l'eau 0.01 (et du noyau liquide)

De l'huile 1

De la glace 1 000 000 000 000 000

Du manteau 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000

Force motrice:  
Archimède

$$\alpha\rho\Delta Tg$$

Résistance:  
Dissipation  
de la chaleur

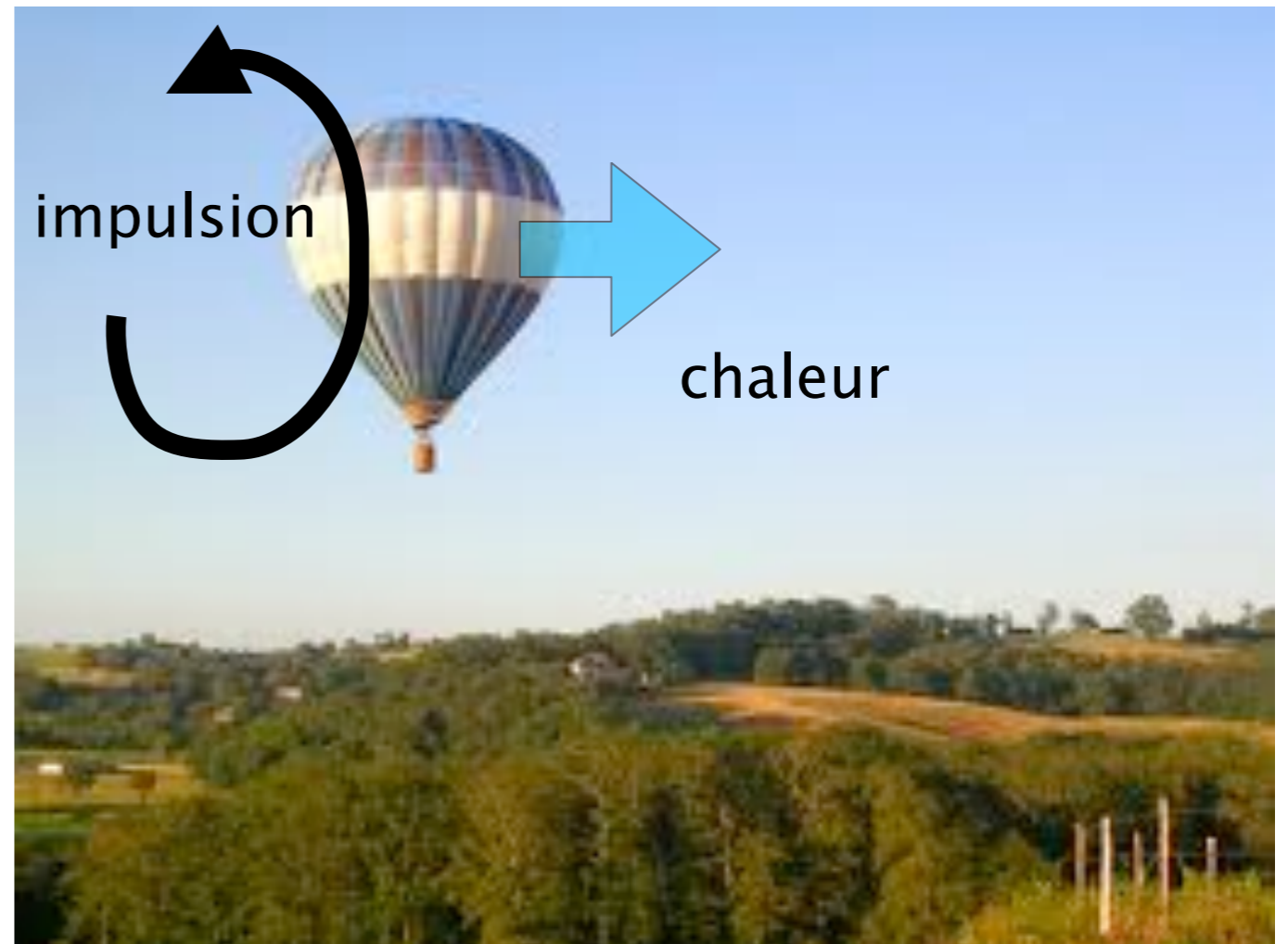
 $\kappa$ 

Dissipation de  
l'impulsion

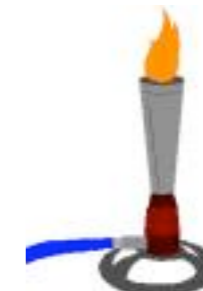
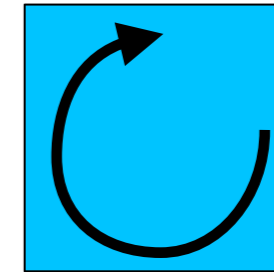
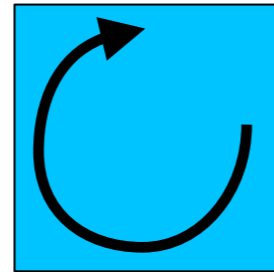
 $\eta$ 

Le nombre de Rayleigh

$$Ra = \frac{\rho g \alpha \Delta T h^3}{\eta \kappa}$$



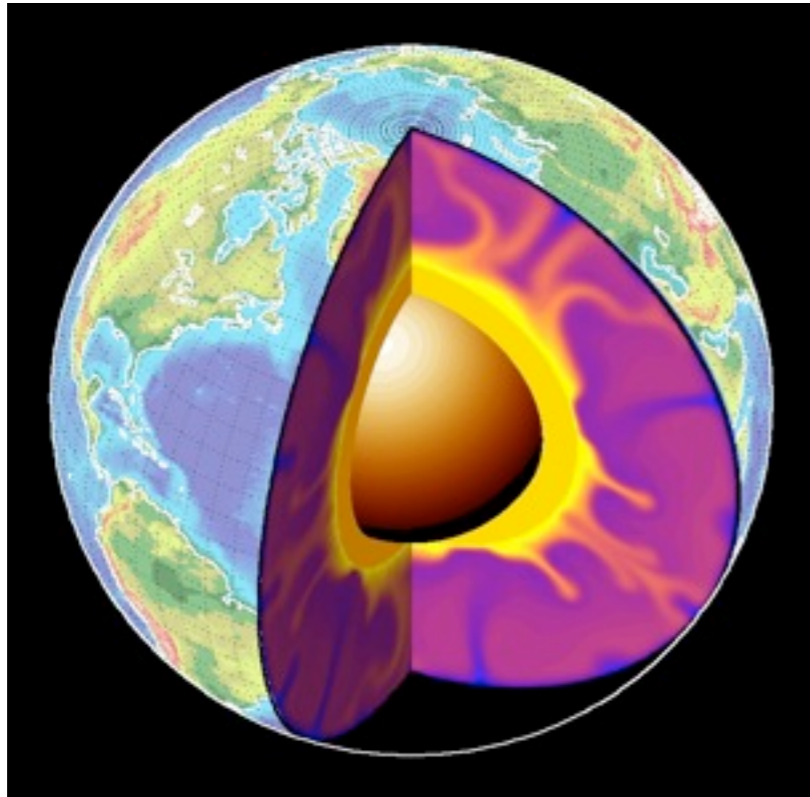
# Stabilité/Instabilité



Stable

Instable

Stable... ou instable



Même rapport entre effets résistants et effets moteurs



$$\begin{aligned} \rho &= 3200 \text{ kg m}^{-3} \\ \alpha &= 10^{-5} \text{ K}^{-1} \\ \Delta T &= 2000 \text{ K} \\ \eta &= 10^{21} \text{ Pa s} \\ \kappa &= 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s} \\ g &= 10 \text{ m s}^{-2} \\ h &= 3000 \text{ km} \end{aligned}$$

Les planètes sont difficile à déformer



$$\begin{aligned} \rho &= 1000 \text{ kg m}^{-3} \\ \alpha &= 210^{-4} \text{ K}^{-1} \\ \Delta T &= 80 \text{ K} \\ \eta &= 10^{-3} \text{ Pa s} \\ \kappa &= 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s} \\ g &= 10 \text{ m s}^{-2} \\ h &= 2.8 \text{ cm} \end{aligned}$$



$Ra = 3.5 \times 10^7$  mais elles sont grosses!!

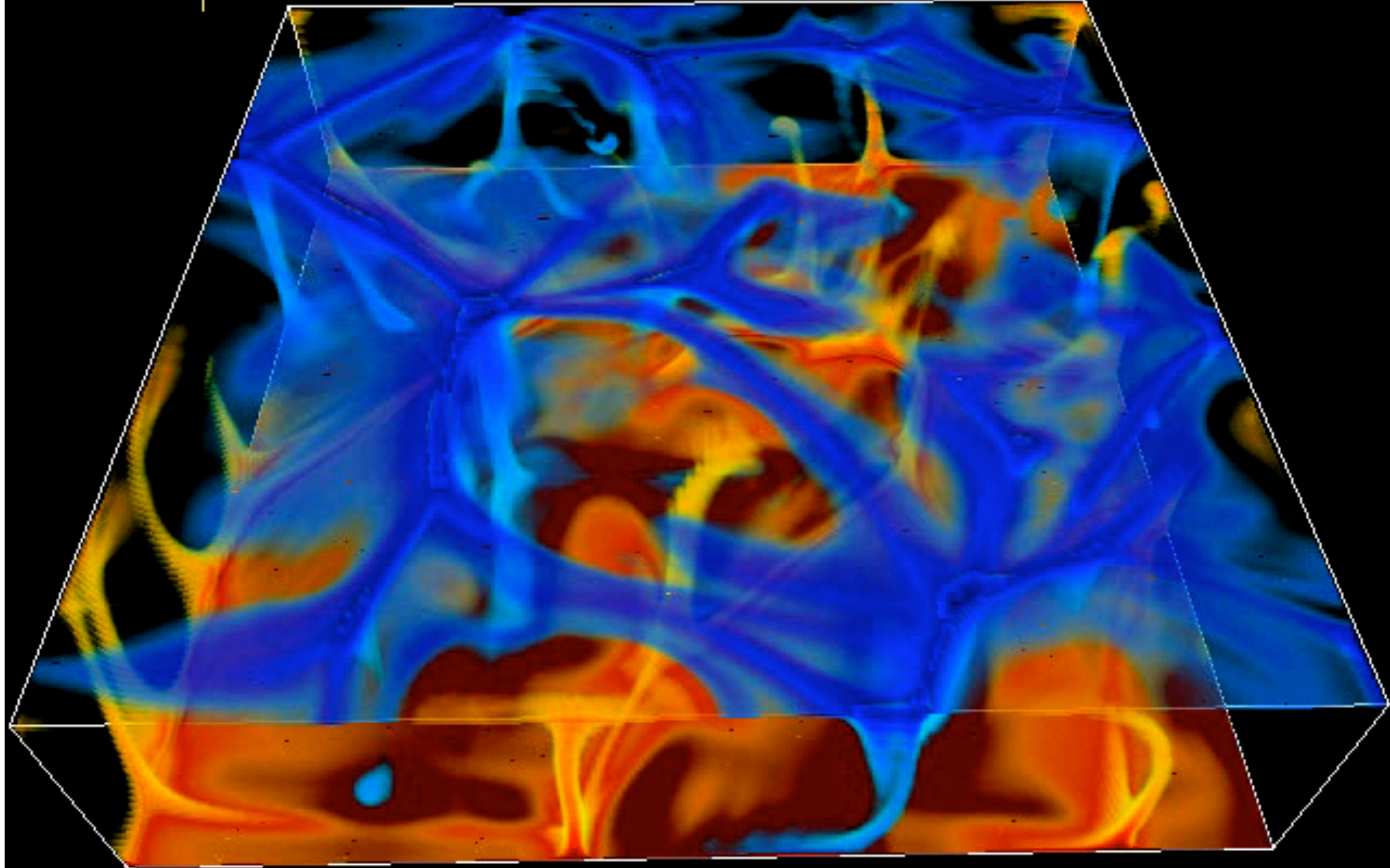
$Ra = 3.5 \times 10^7$

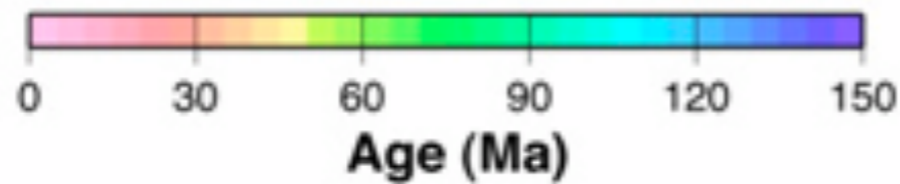
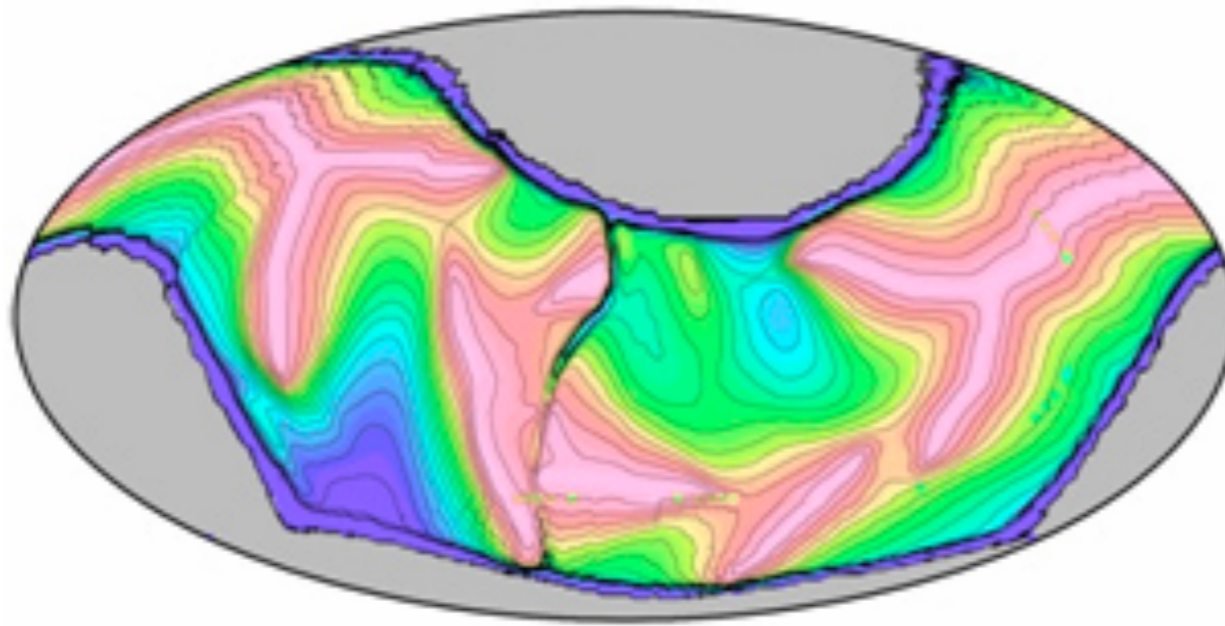
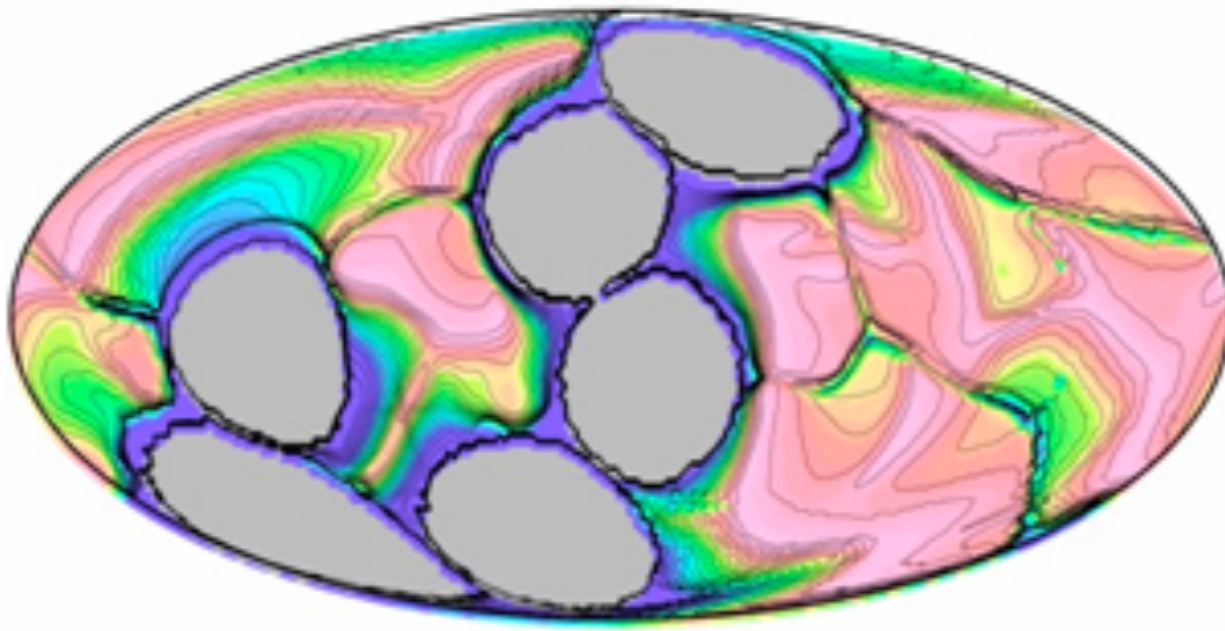
Bien que solide, extraordinairement peu déformable (très visqueux), les lois de la physique montrent que le manteau terrestre doit se mettre spontanément en mouvement pour évacuer sa chaleur: c'est le phénomène de la «convection»



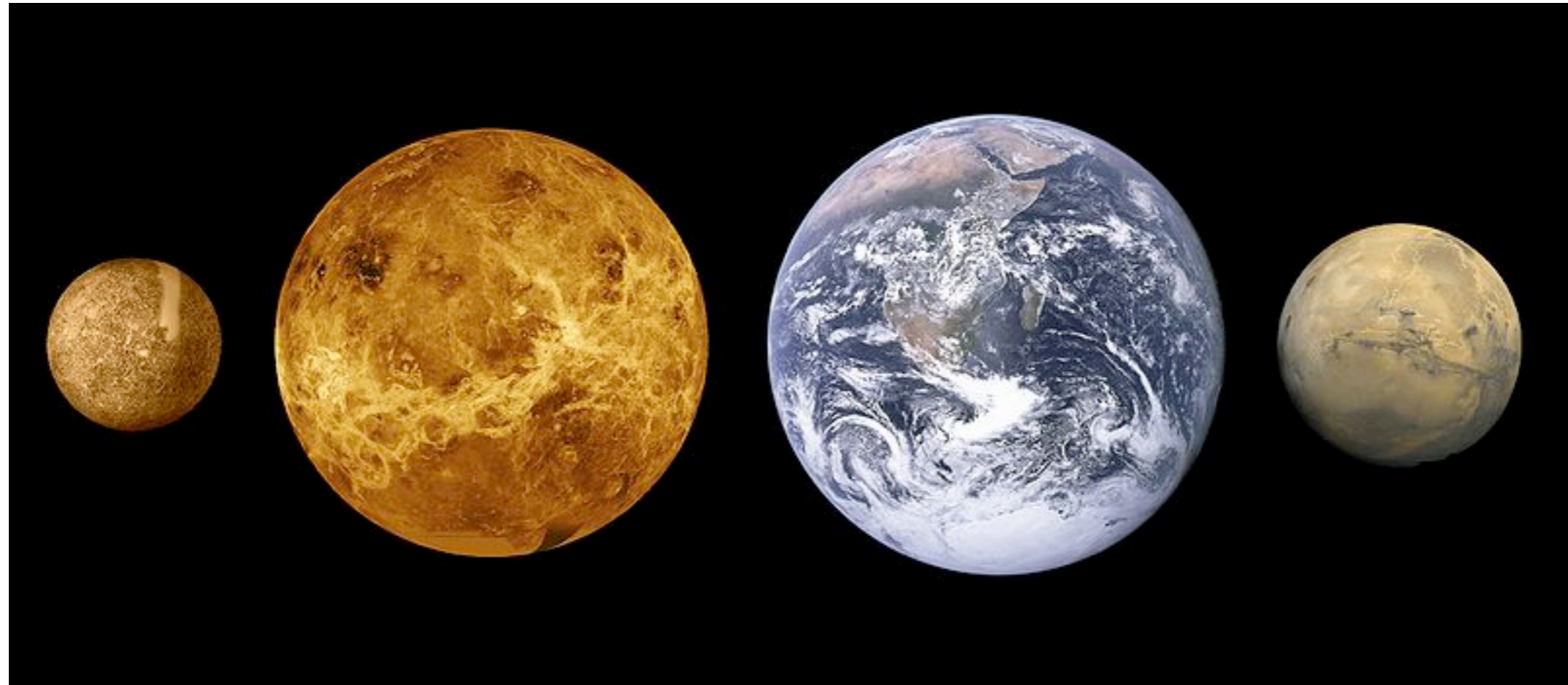


Nstep = 100      Time = 0.000027



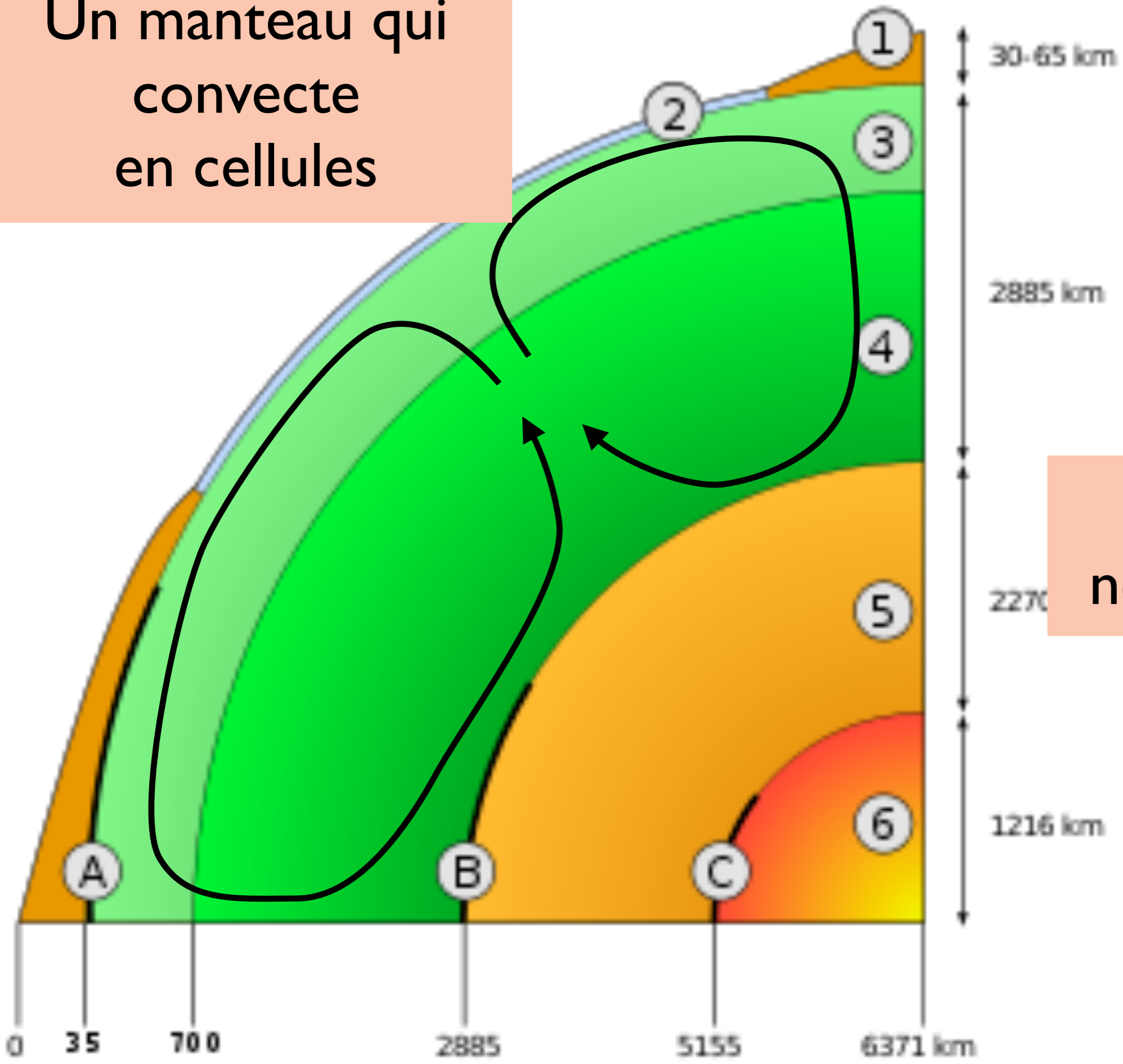


Des progrès rapides ont été faits sur la simulation de la convection «avec plaques»



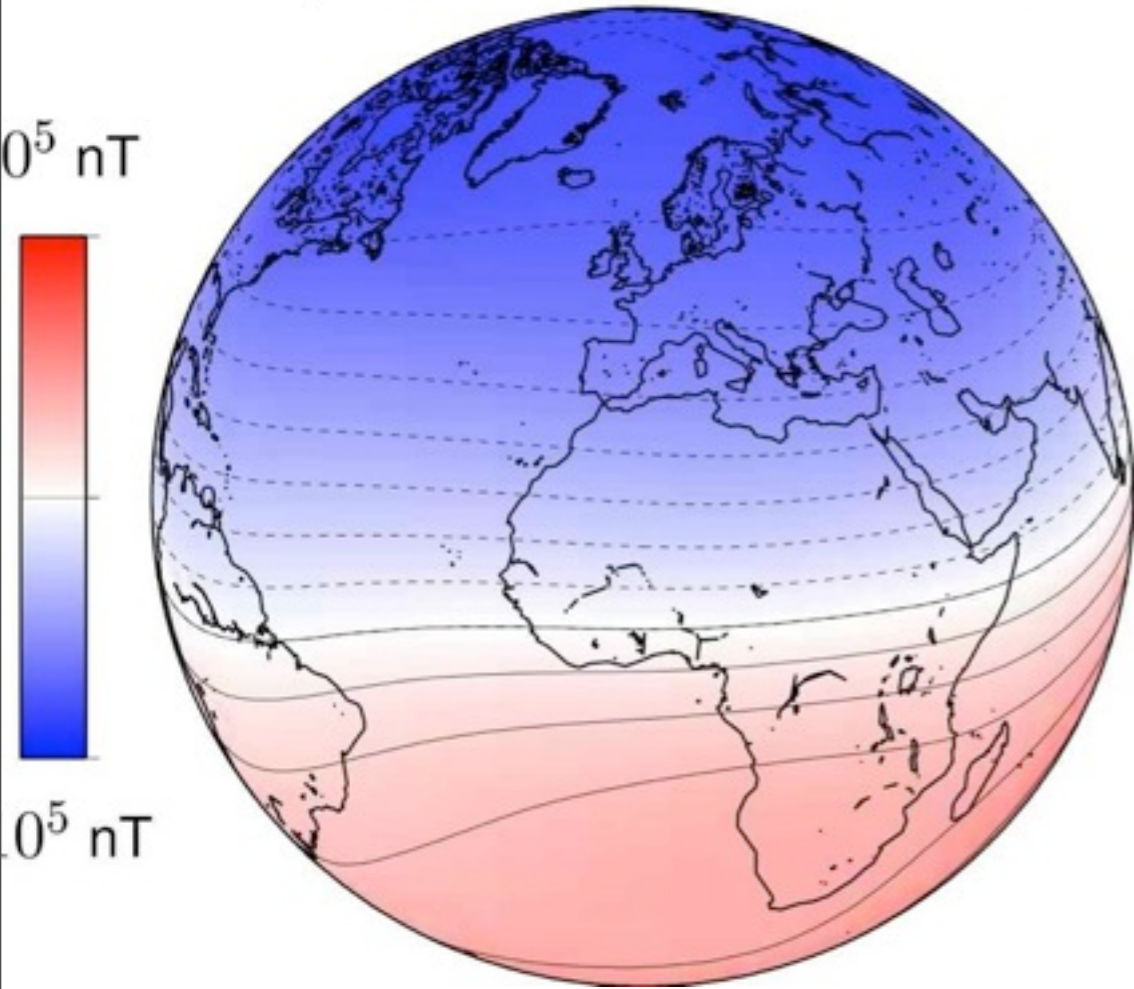
mais pourquoi seule la Terre a  
une tectonique des plaques?

Un manteau qui convecte en cellules

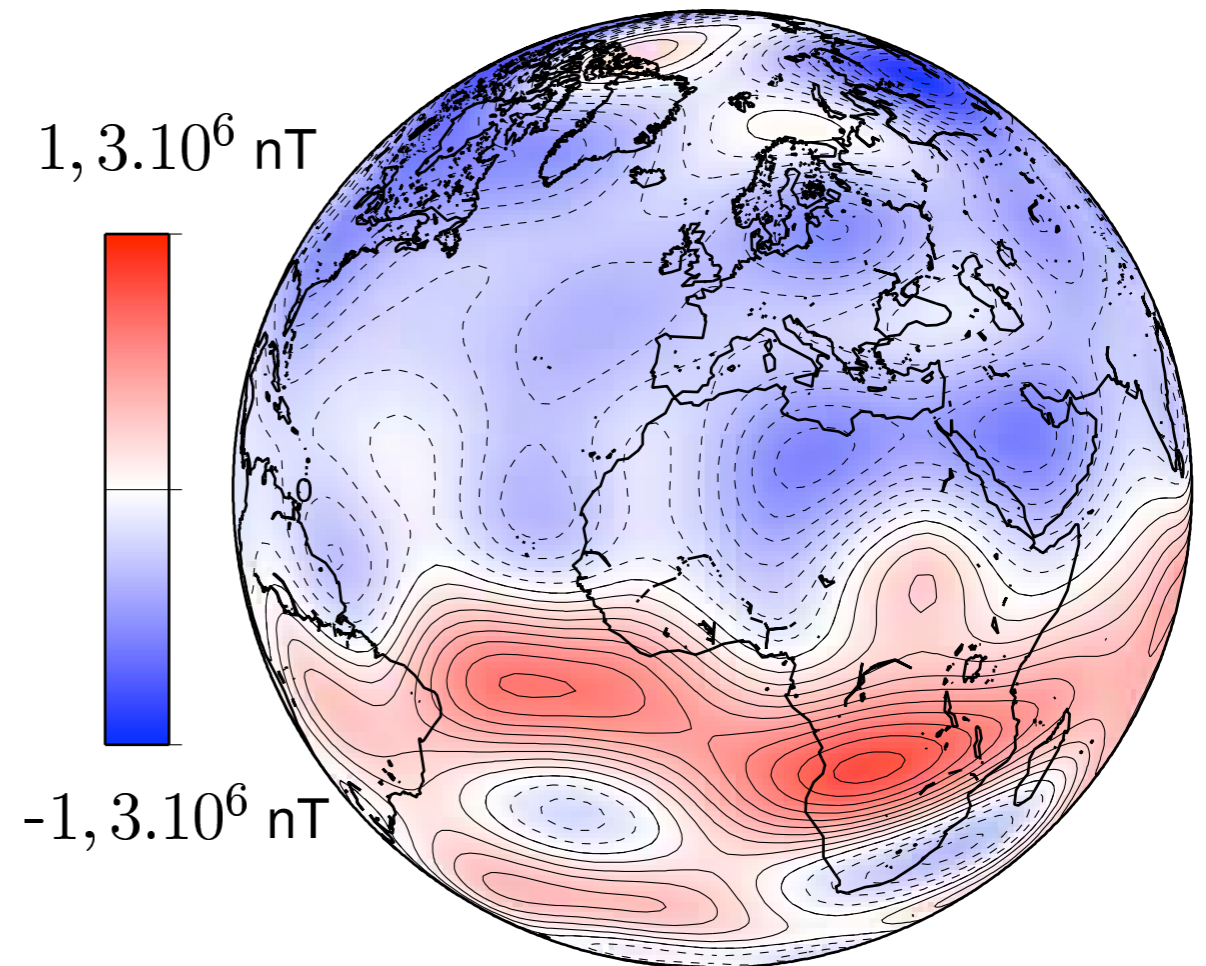


Et le noyau??

$B_r$  à la surface de la Terre



$B_r$  à la surface du noyau



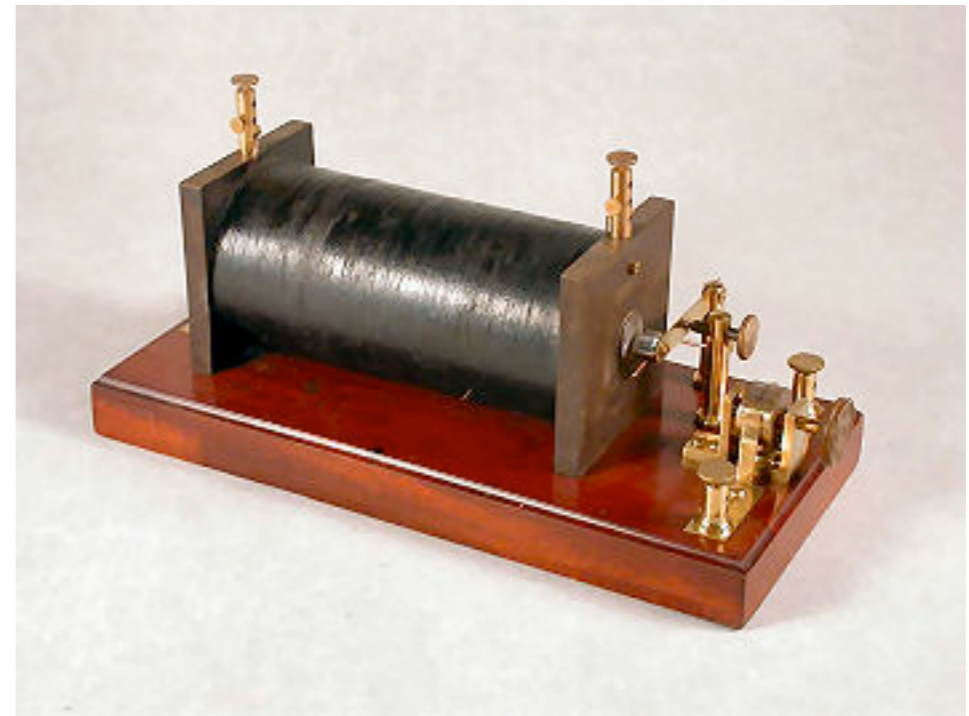
Dans le noyau se forme le champ magnétique

Un fluide très peu  
visqueux  
dominé par la  
rotation...



cyclone Katrina

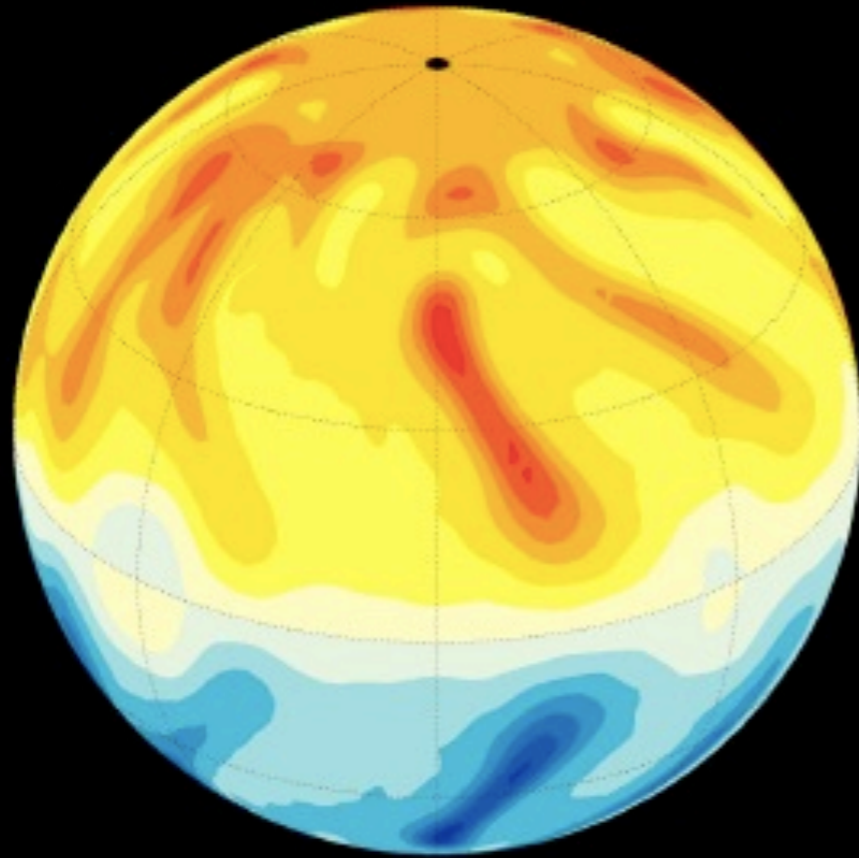
Un conducteur qui  
s'enroule en  
spirale...



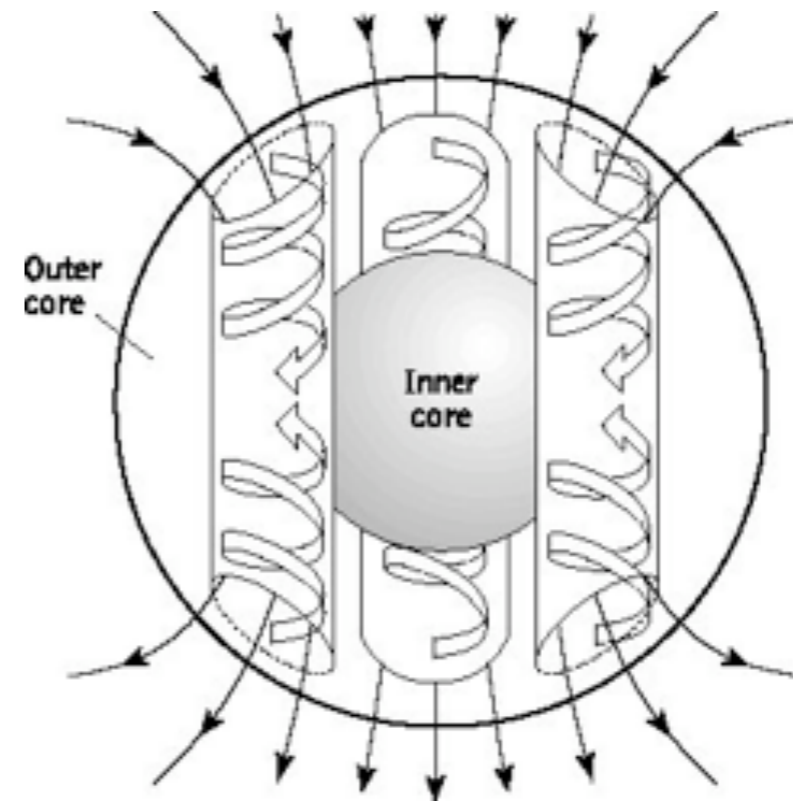
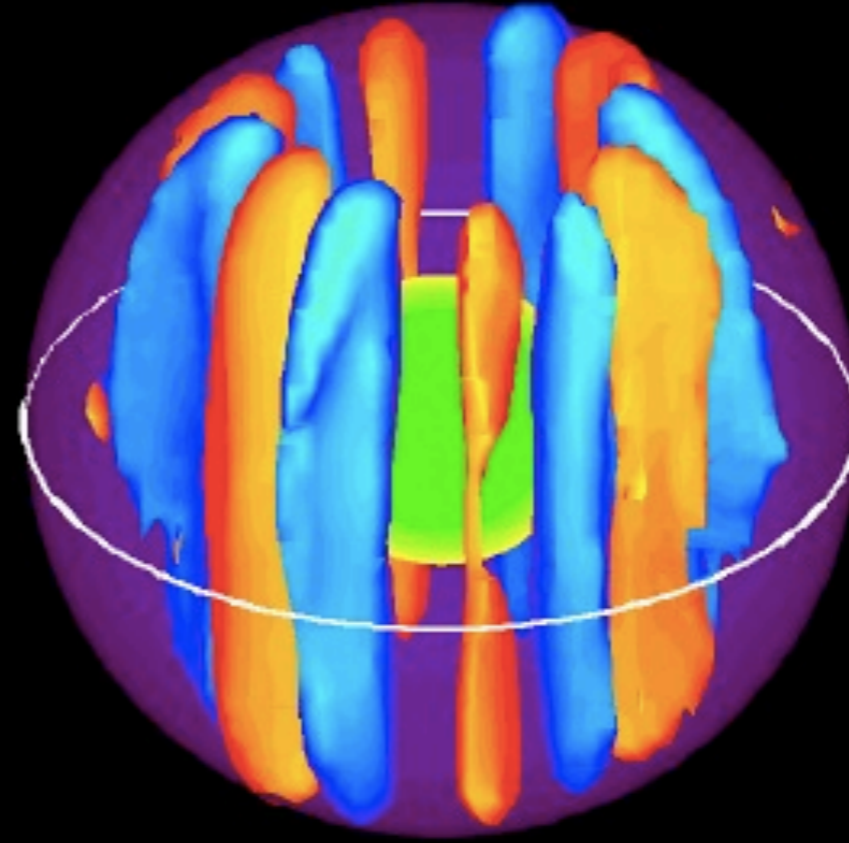
bobine électrique

# Numerical Dynamo Model -- 3D Structure

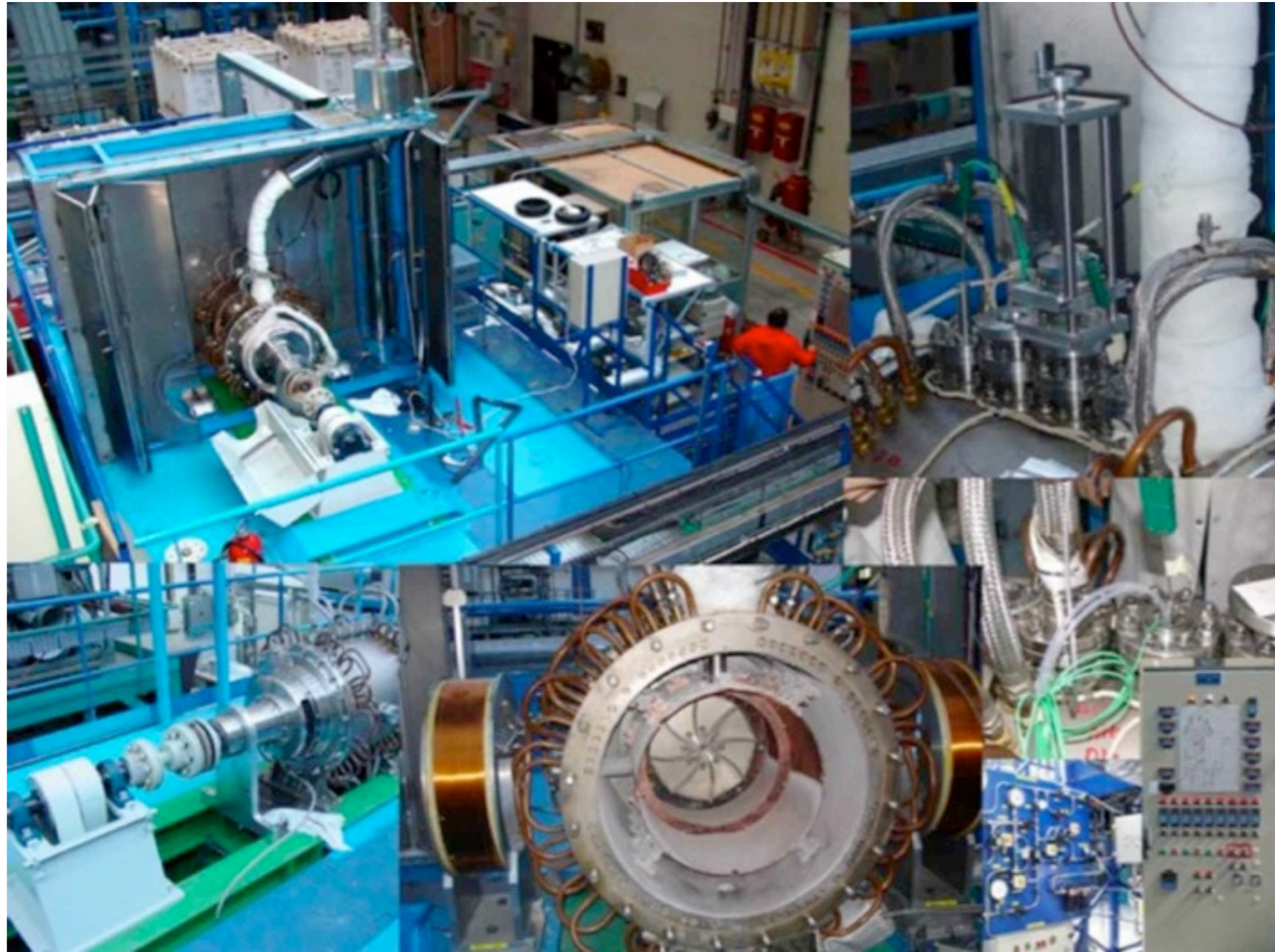
CMB  
Radial  
Field



Axial  
Vorticity

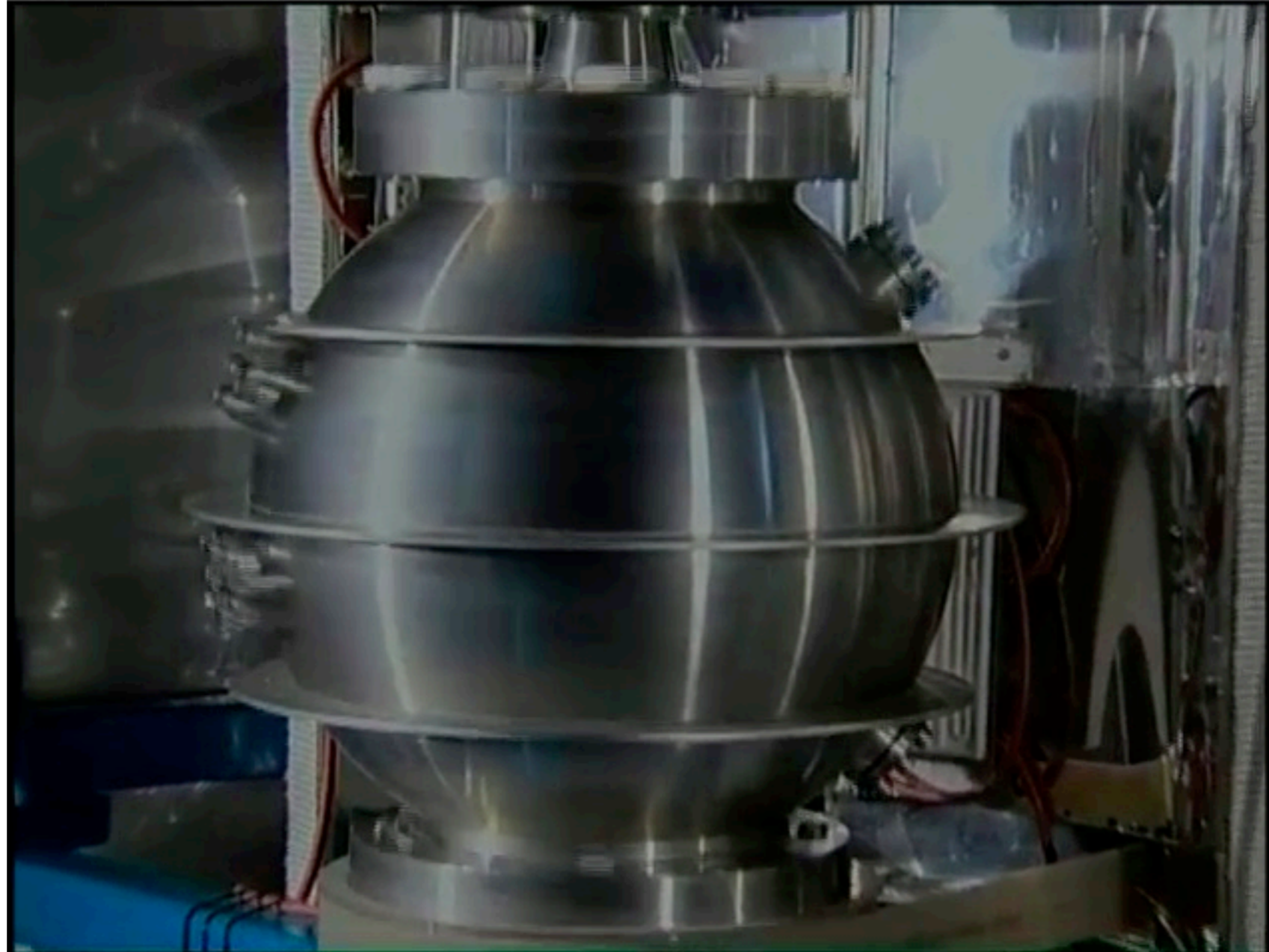


# ENSL-CEA Cadarache

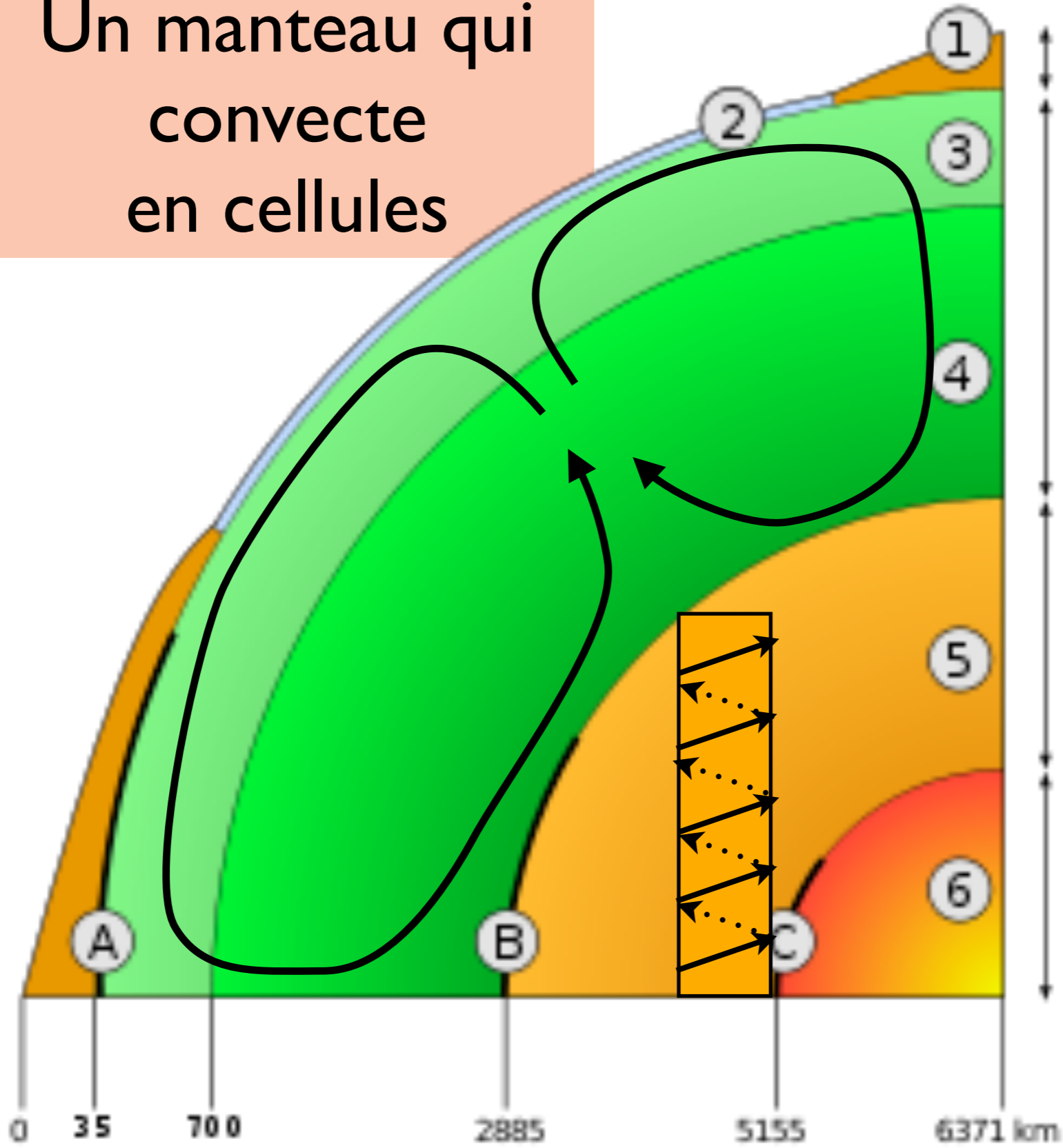




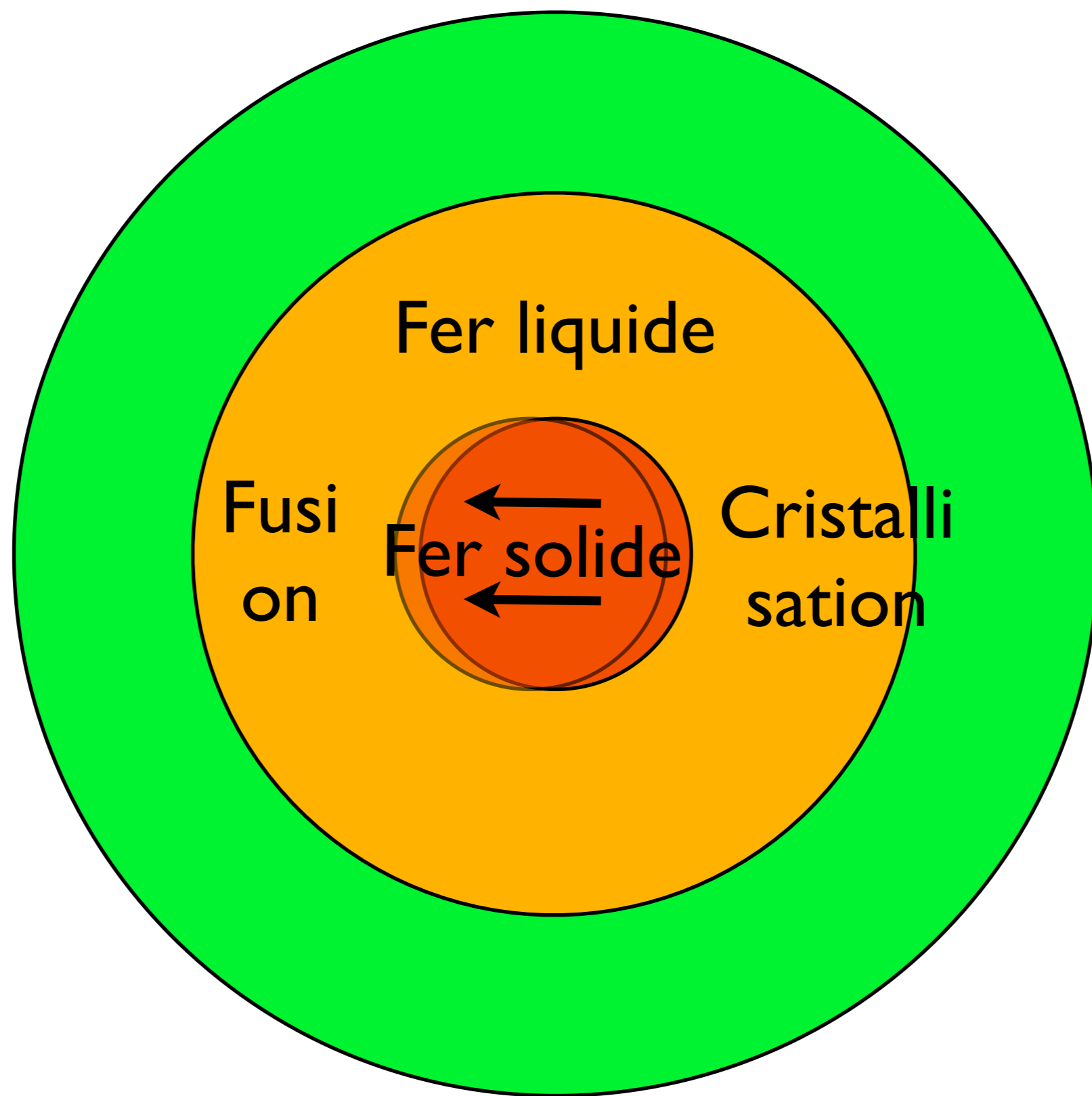
# Univ-Grenoble



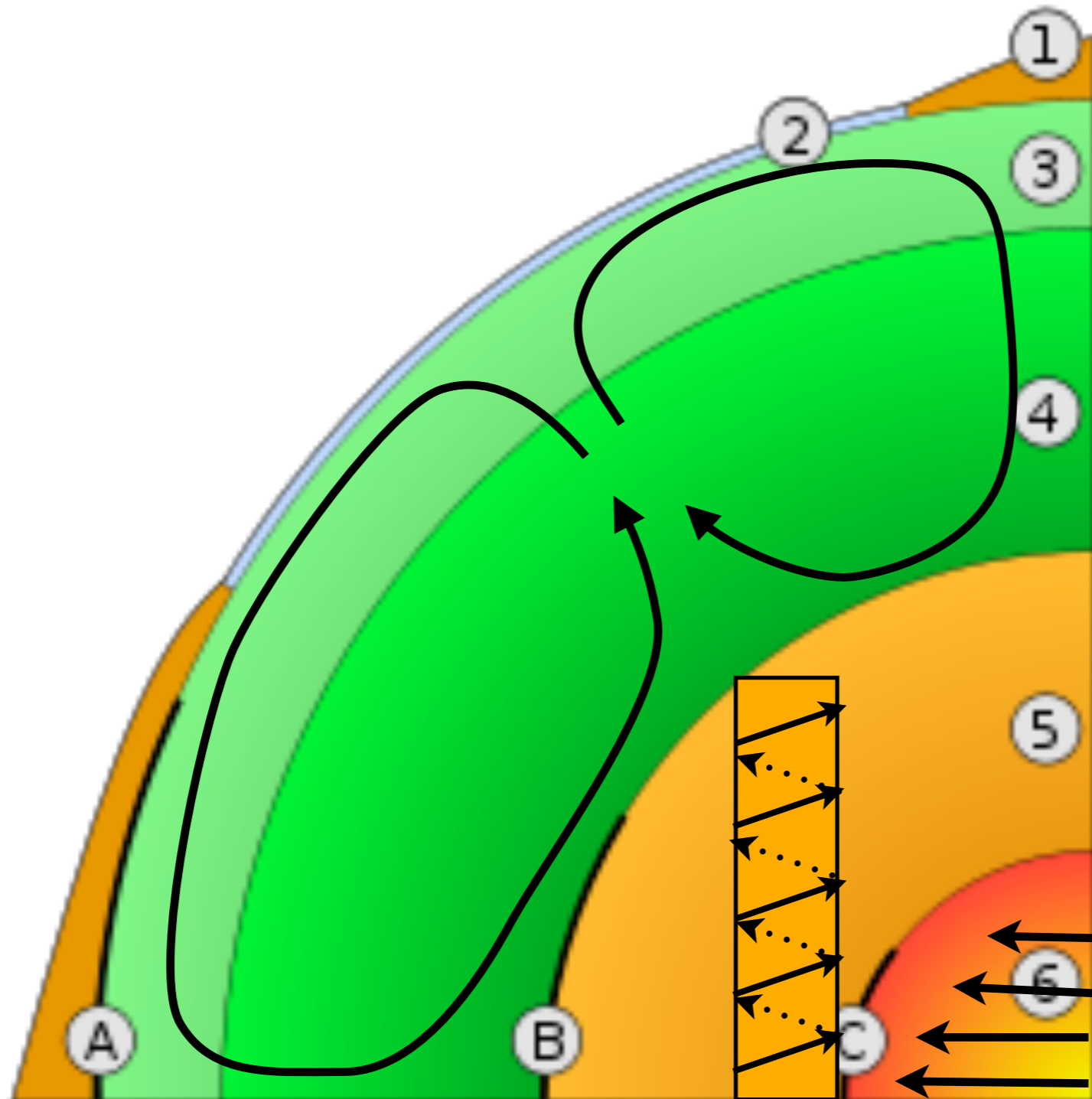
Un manteau qui convecte en cellules



Un noyau qui convecte sous forme de spirales alignées avec l'axe de rotation



# Une planète incroyablement active



Un temps géologique incroyablement long

## Une planète économe



Le Français dépense 6 kW  
en moyenne un habitant de la  
planète  
utilise 2 kW

ps: le soleil fournit 3000 fois plus d'énergie

Des continents qui se  
déplacent, des  
montagnes qui  
surgissent, un champ  
magnétique qui nous  
enveloppe, utilisent  
40 Terawatt ou  
40 000 000 000 000  
watts ou  
6 kW/habitants



