

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....



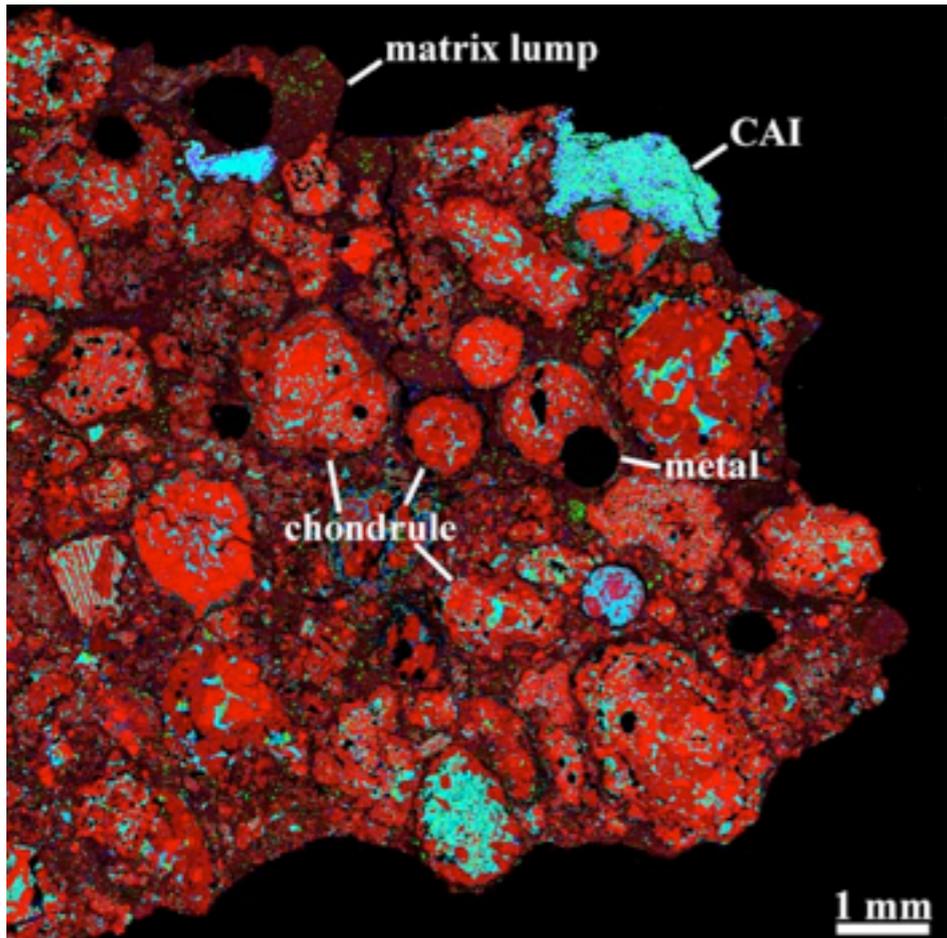
Nébuleuse
d'Orion

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



certains briques initiales
existent encore...

Météorites: chondrite



La
montre
U-Pb



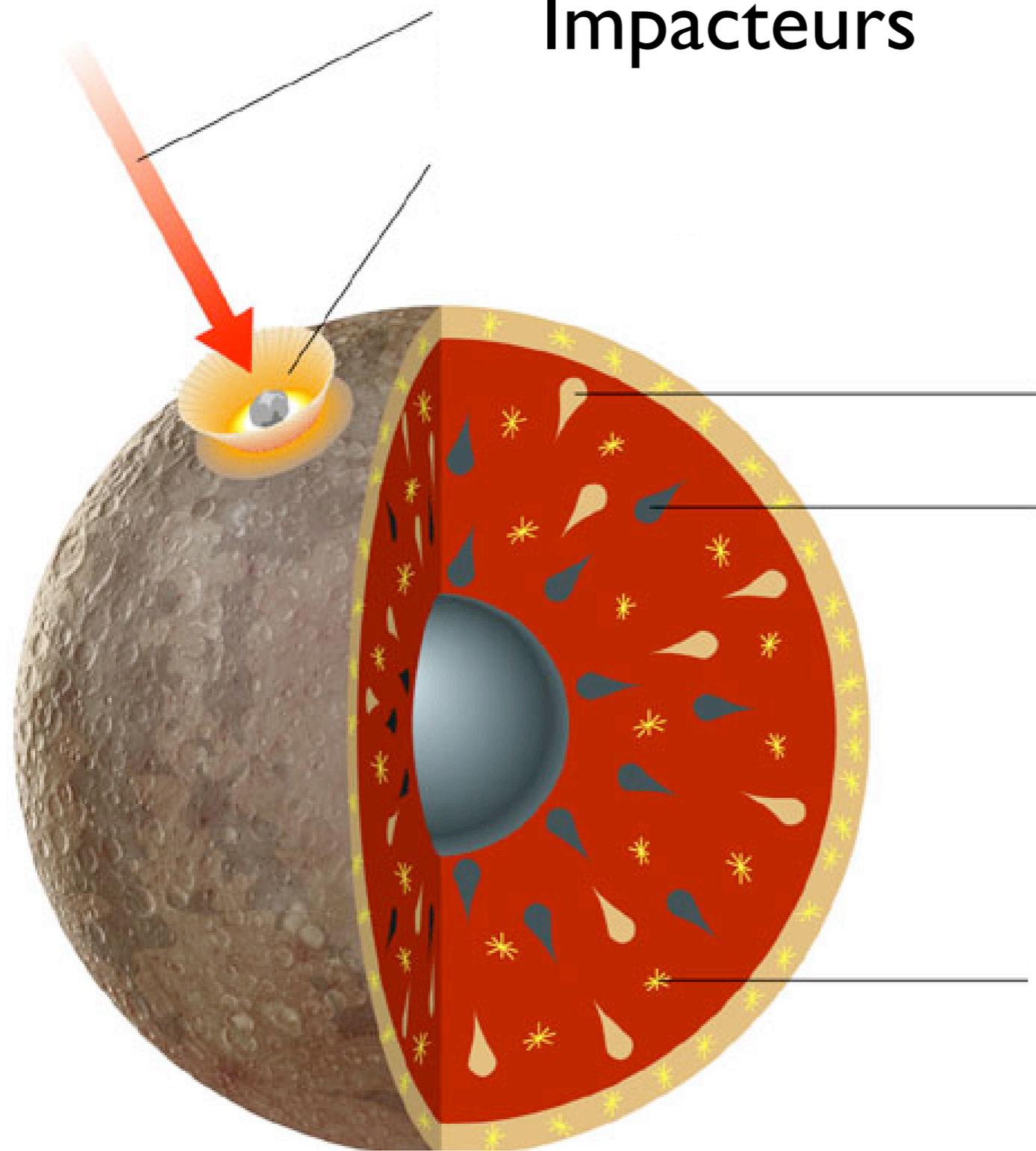
-4566 Ma, les plus anciens témoins

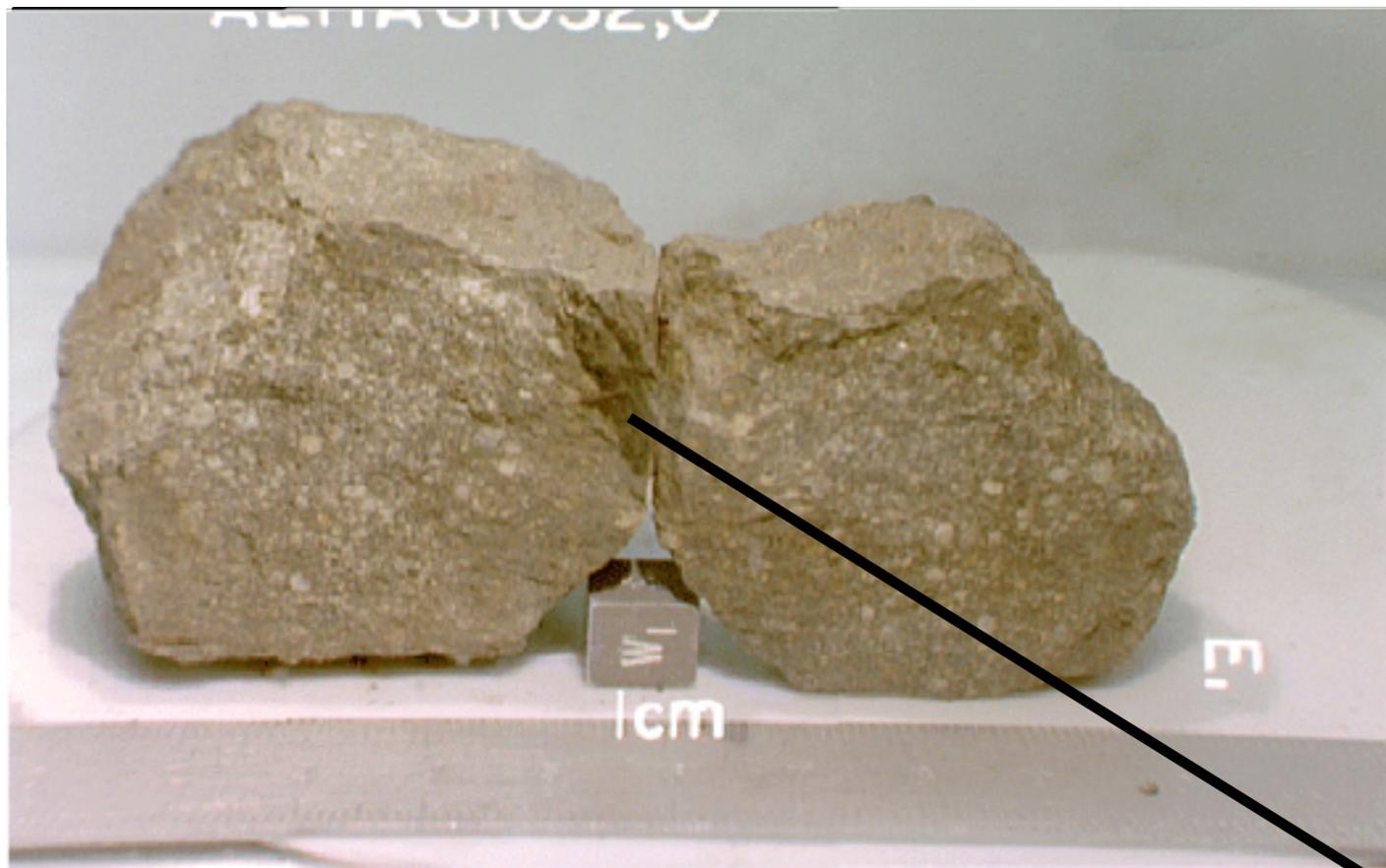
Impacteurs

**Le léger
remonte...**

et le lourd plonge

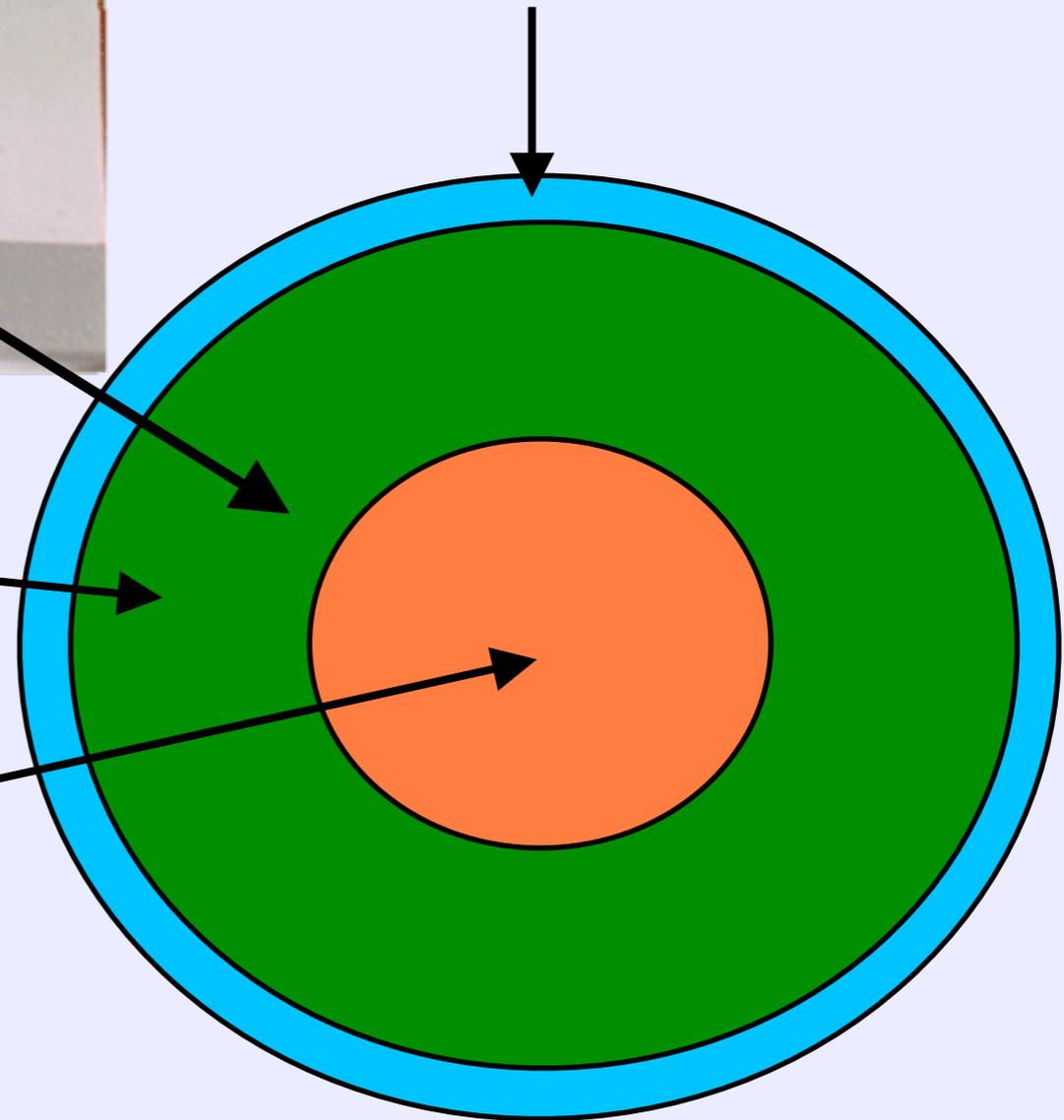
**Energie
radioactive**





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

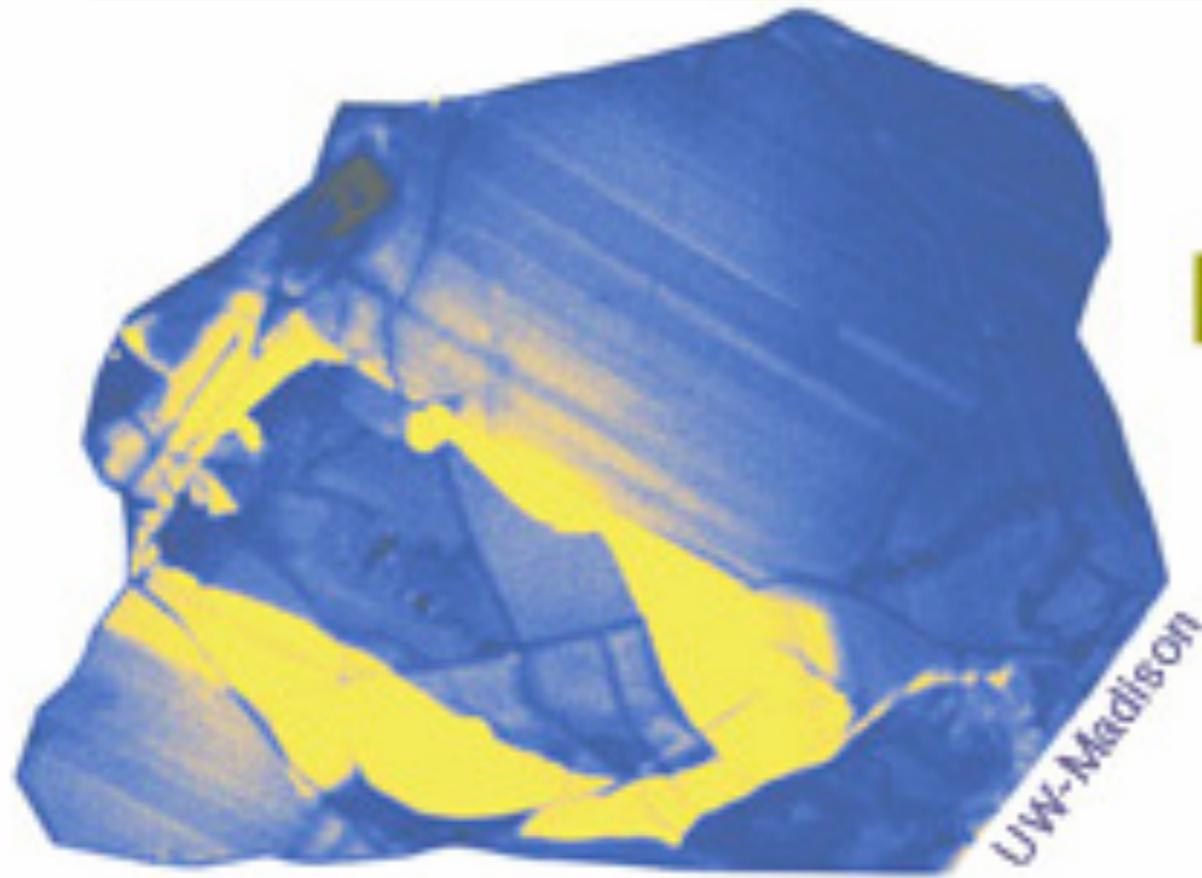




Pallasite

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

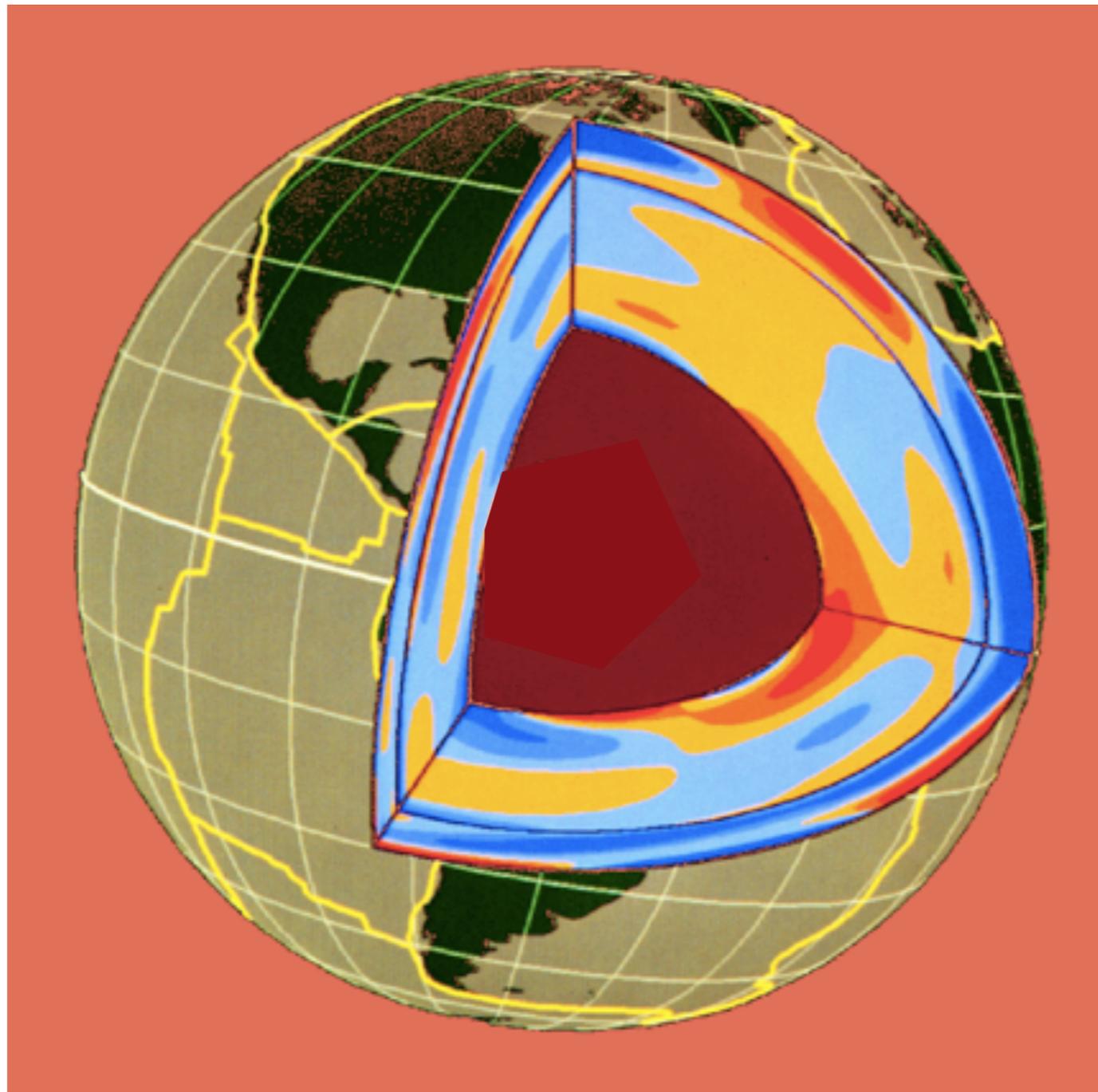


The
Earliest
Piece
of the
Earth

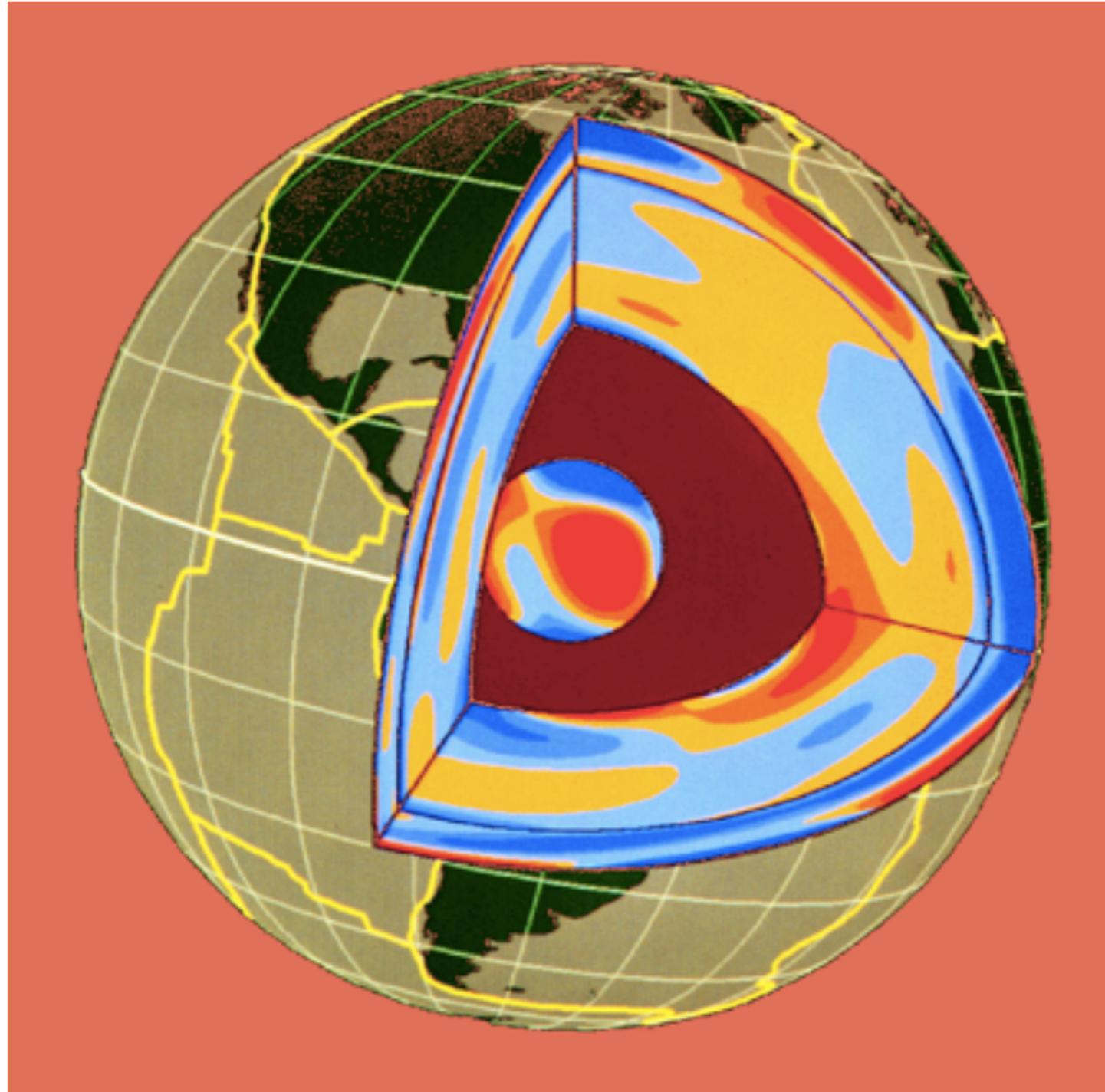
0.2 mm

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

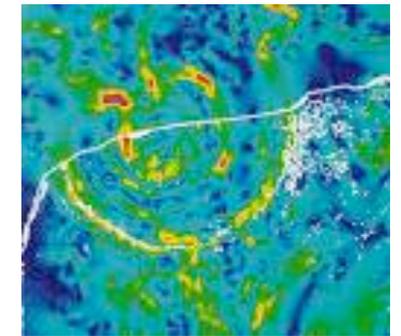
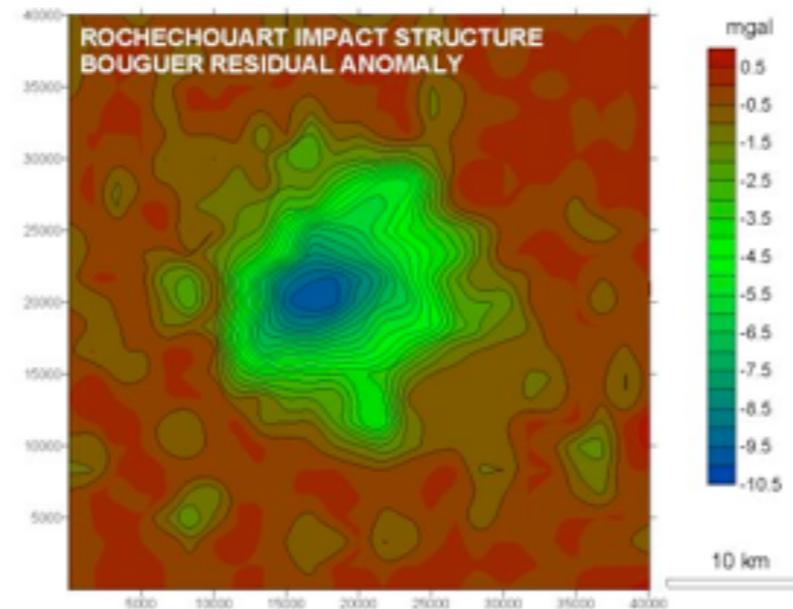


Et quelques météorites tombent toujours...



Meteor
Arizona

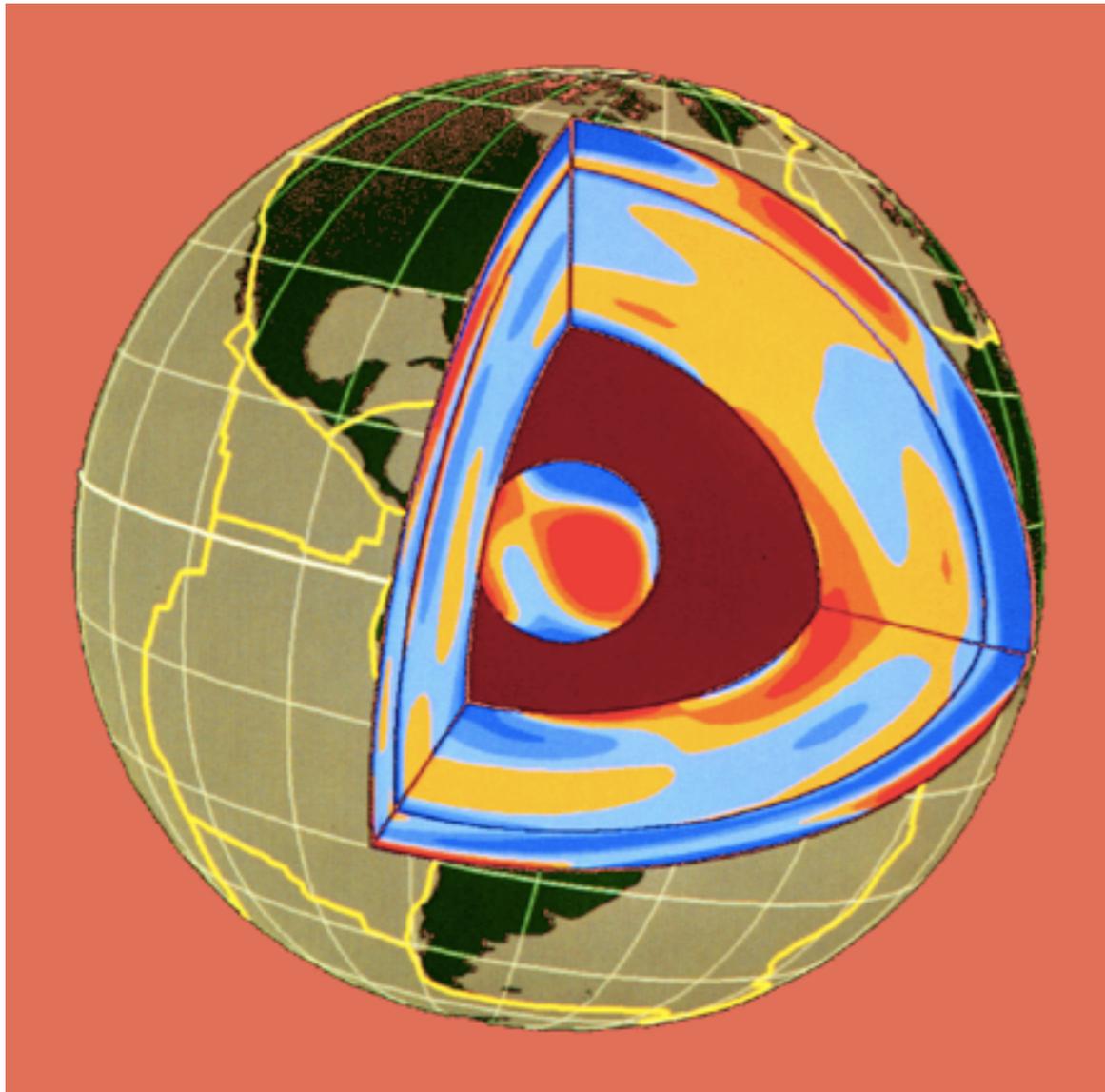
Manicouagan



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

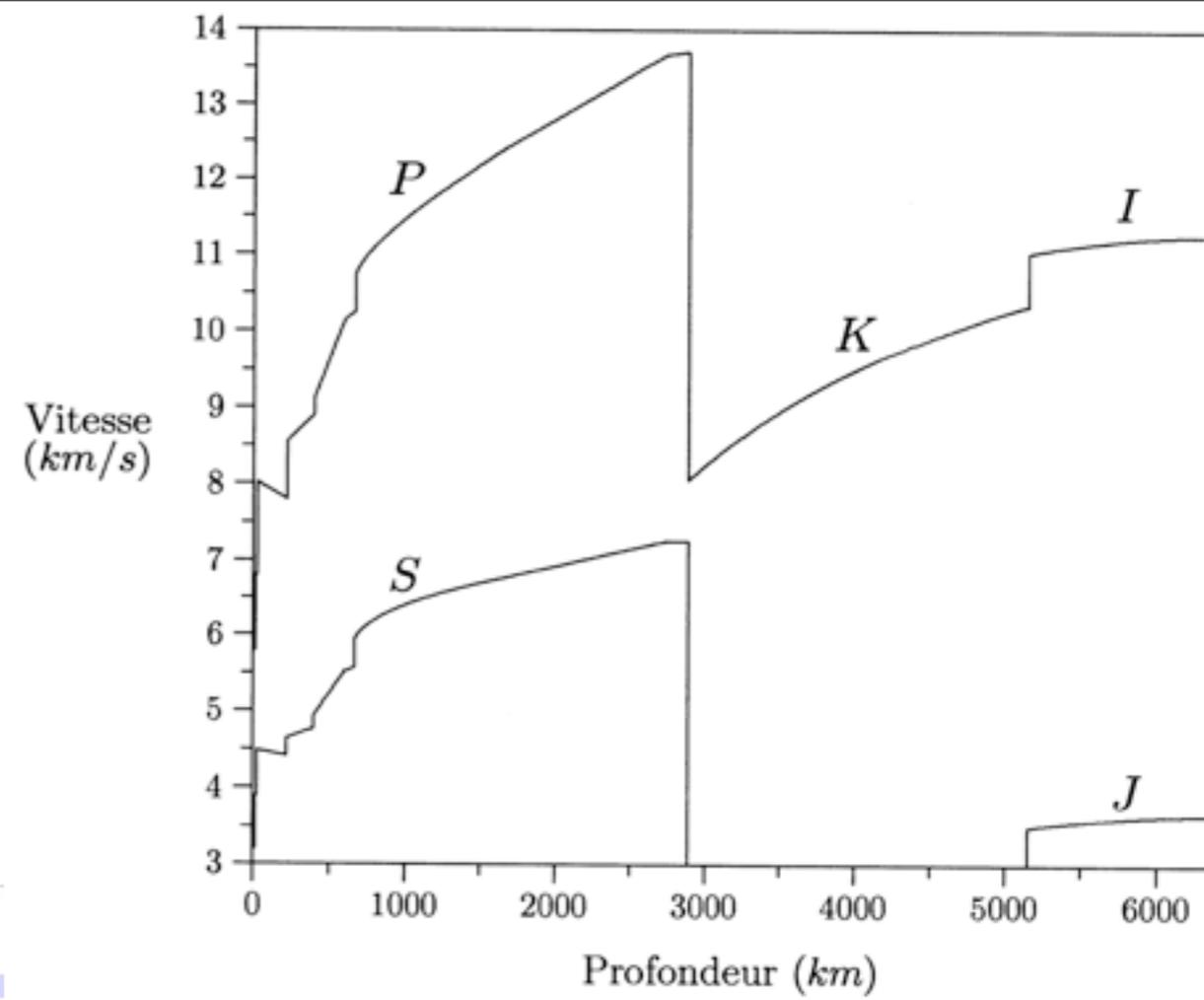
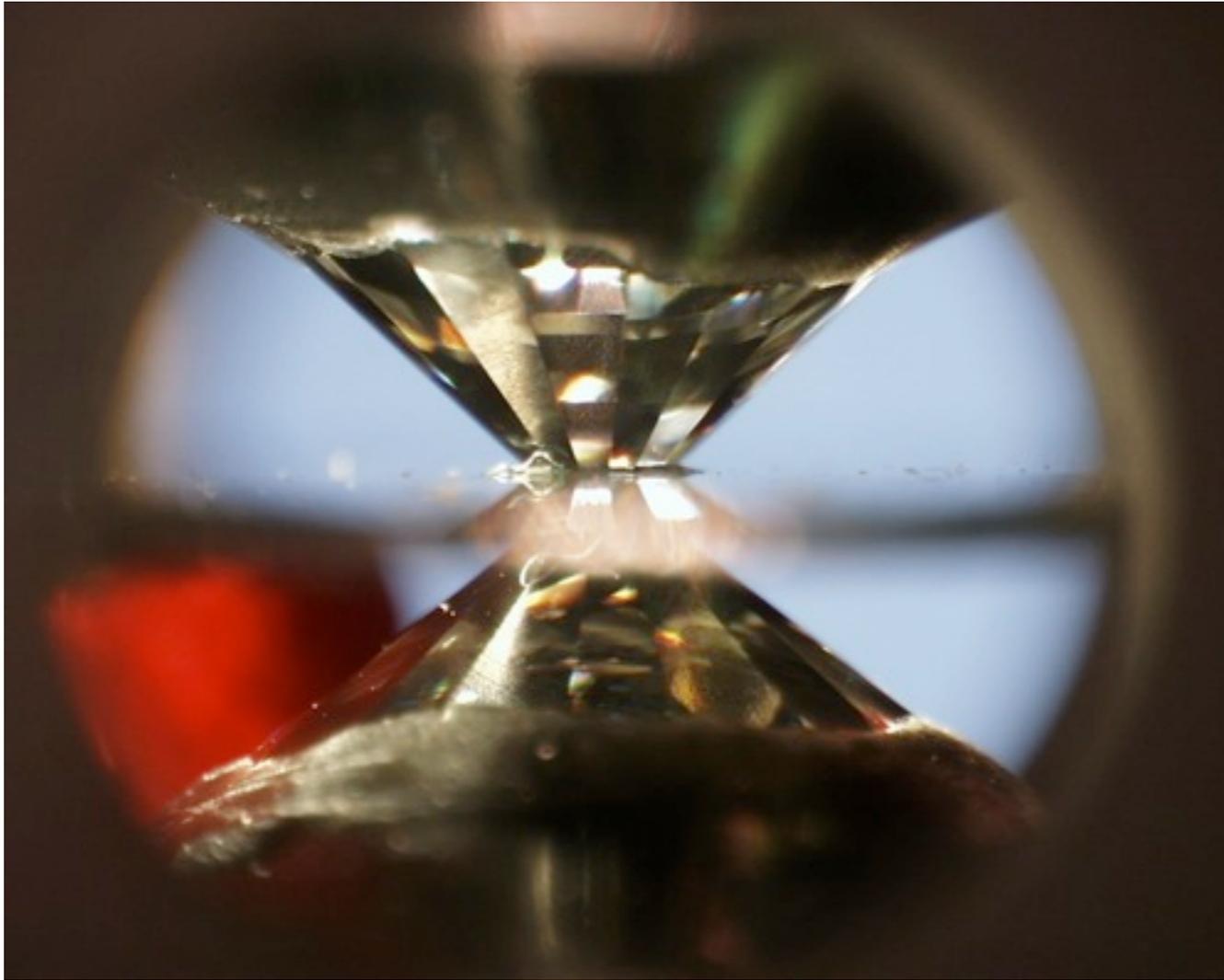


La croute
océanique

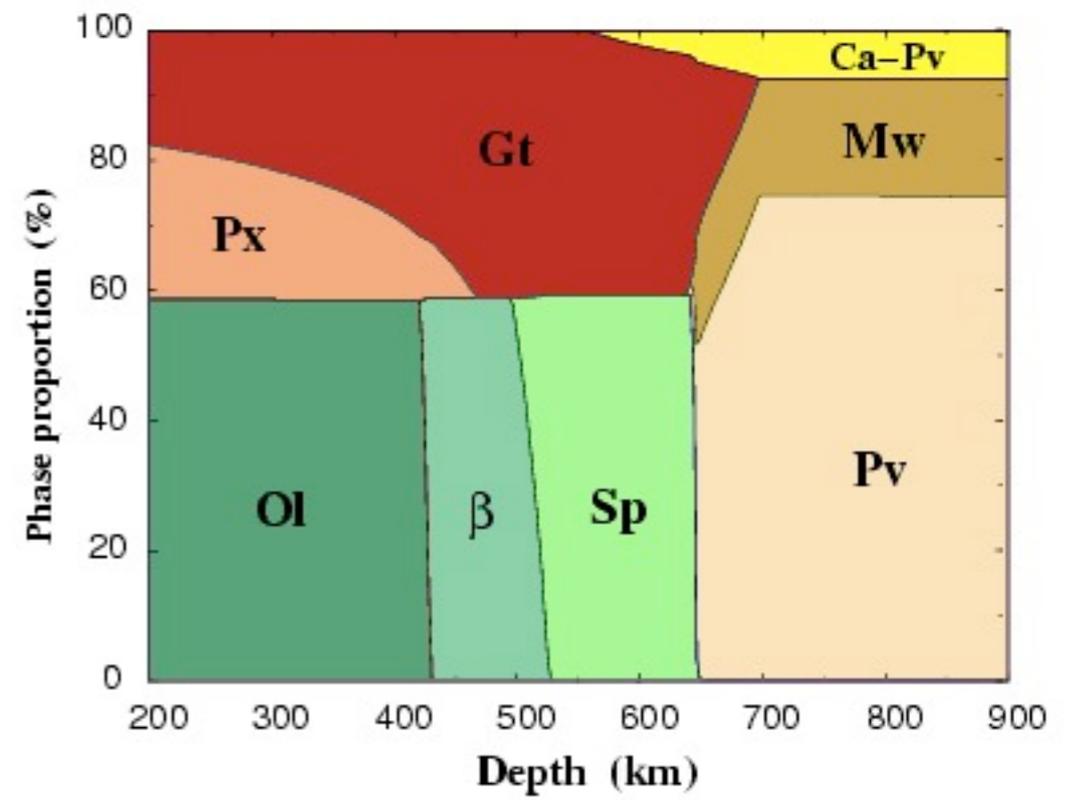
La croute
continentale
30 km (le granite)

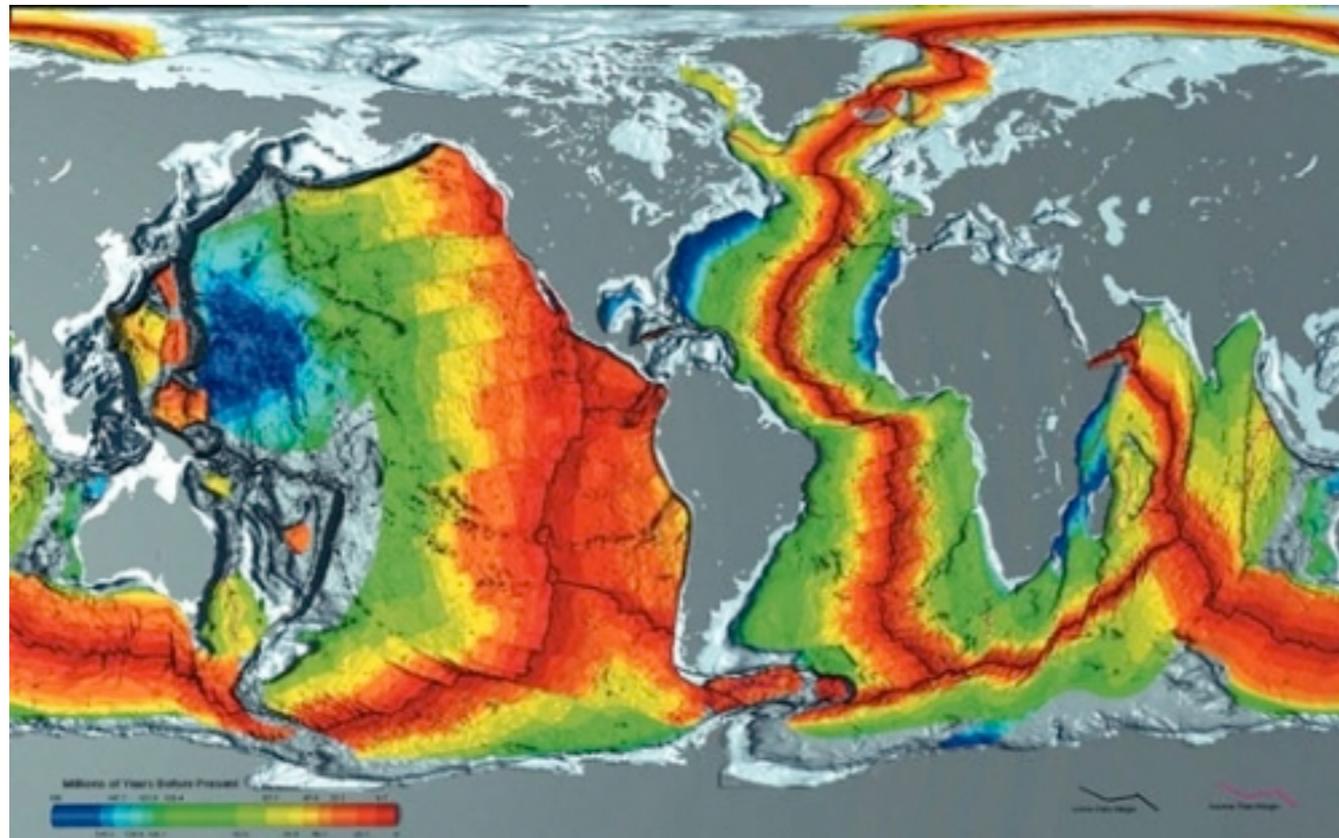
Le manteau
3000 km (la
péridotite)





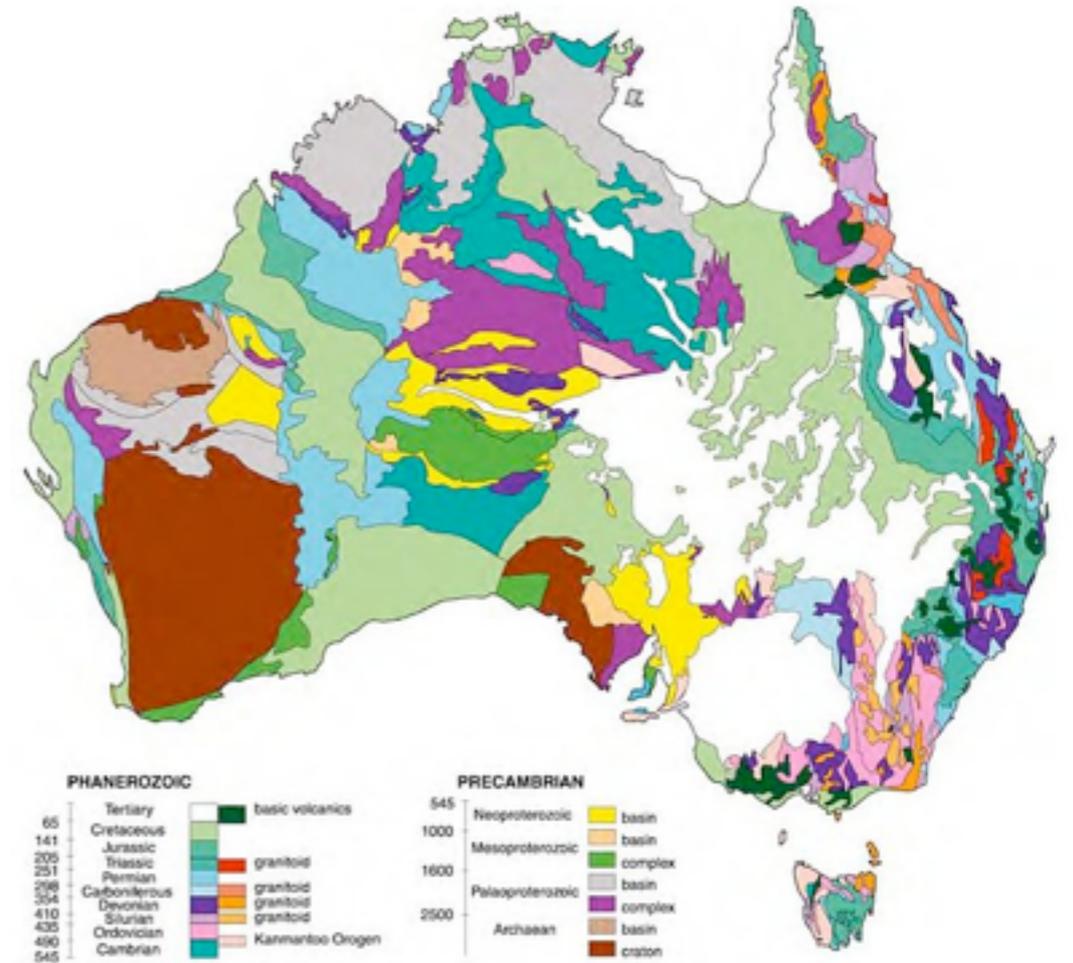
Computed Pyrolite Phase Diagramme



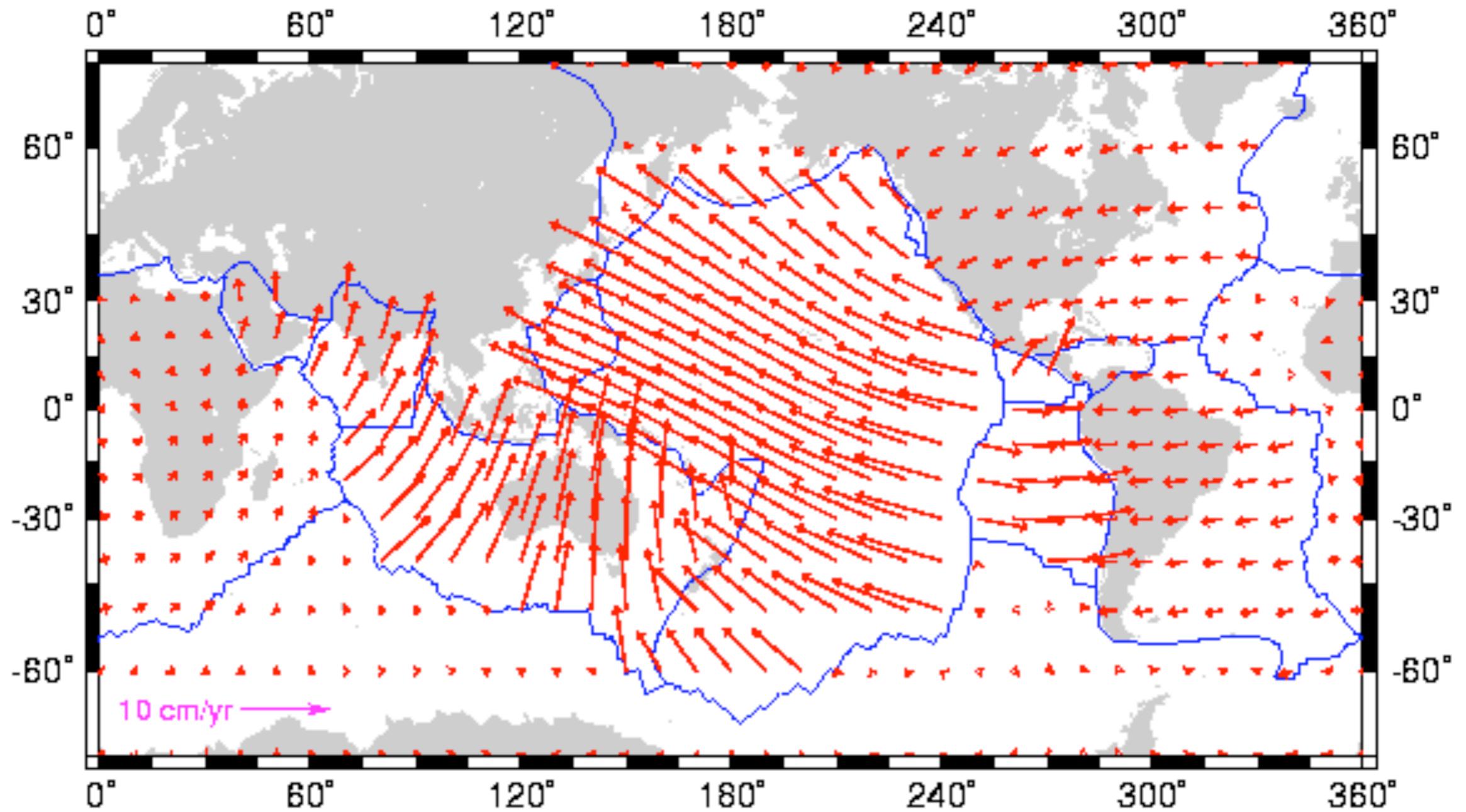


Des oceans «jeunes et simples» (< 160 ma)

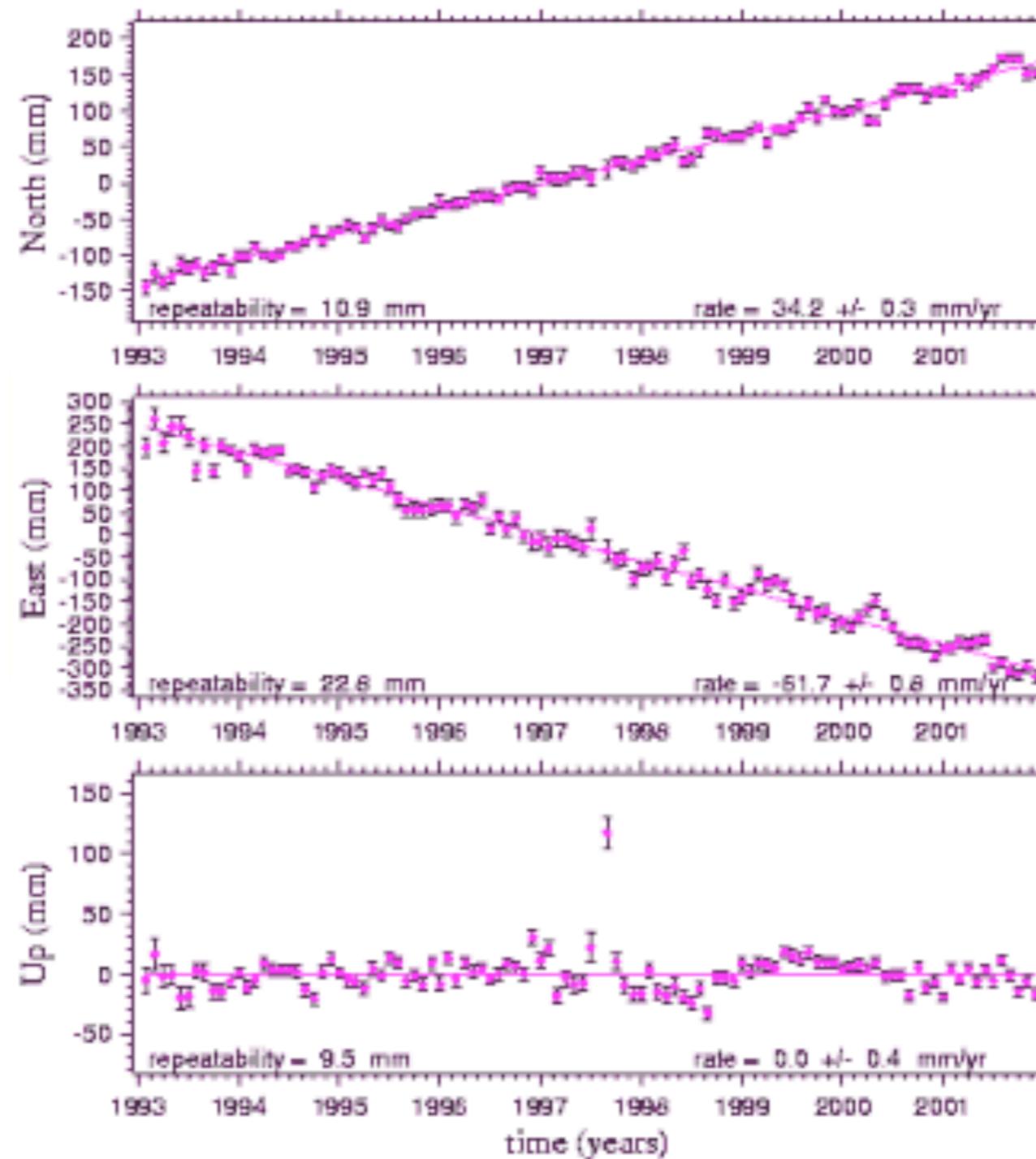
Des continents «vieux et compliqués» (jusqu'à 3000 ma)



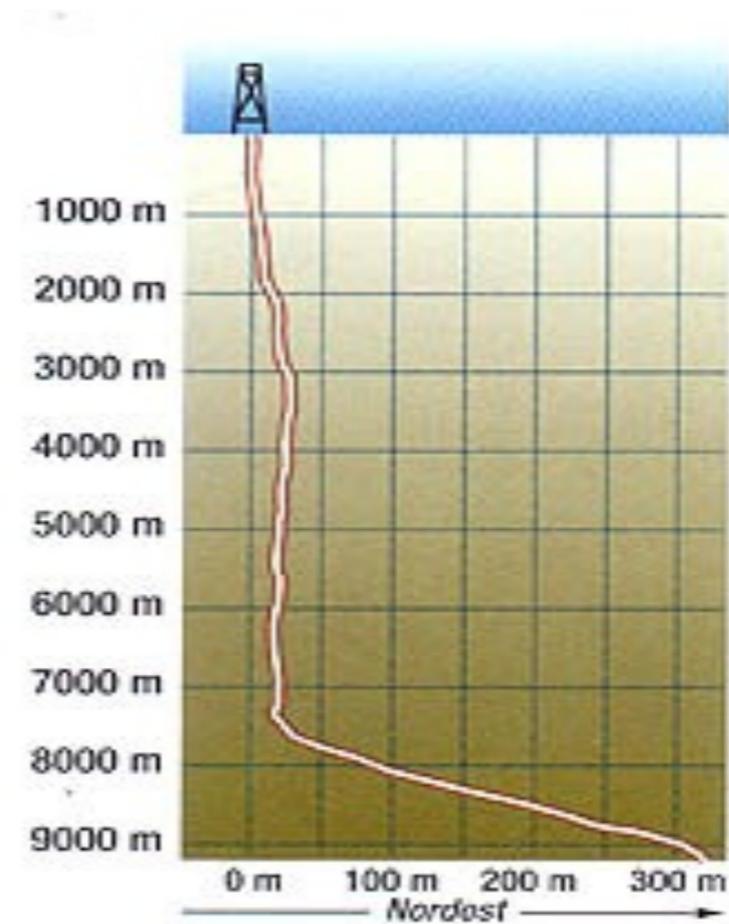
Modèle de la tectonique des plaques



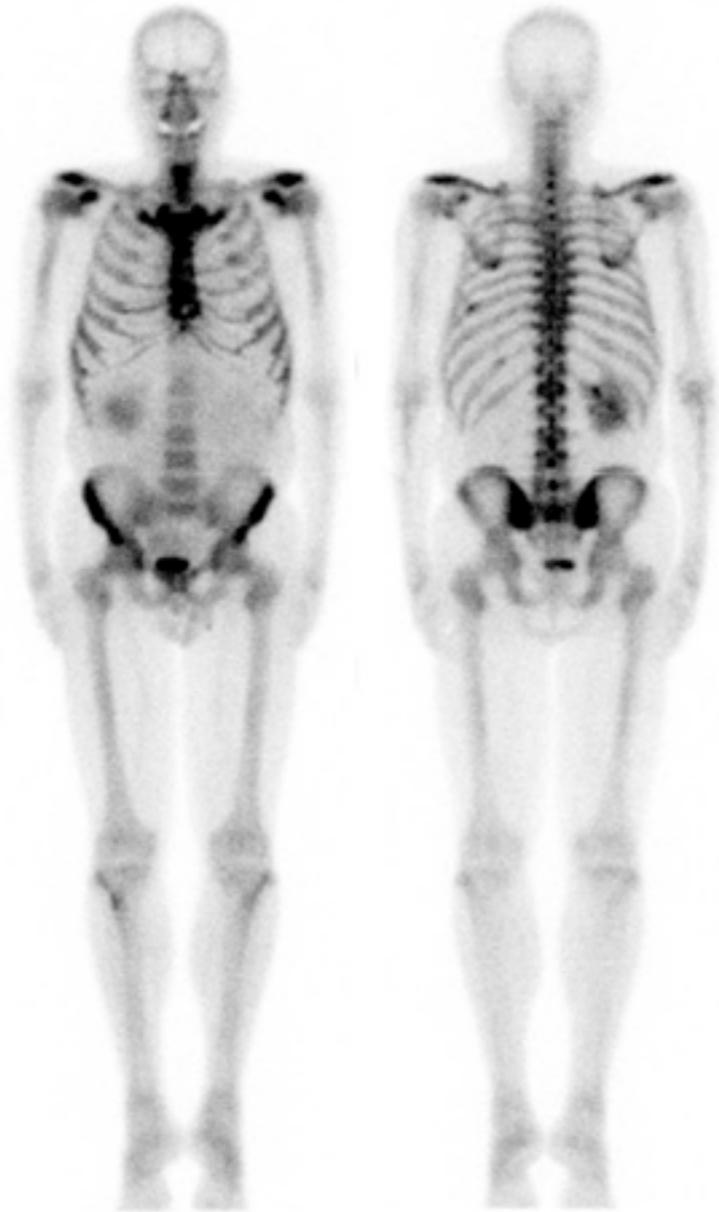
Distance France- Pacifique mesurée par GPS



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

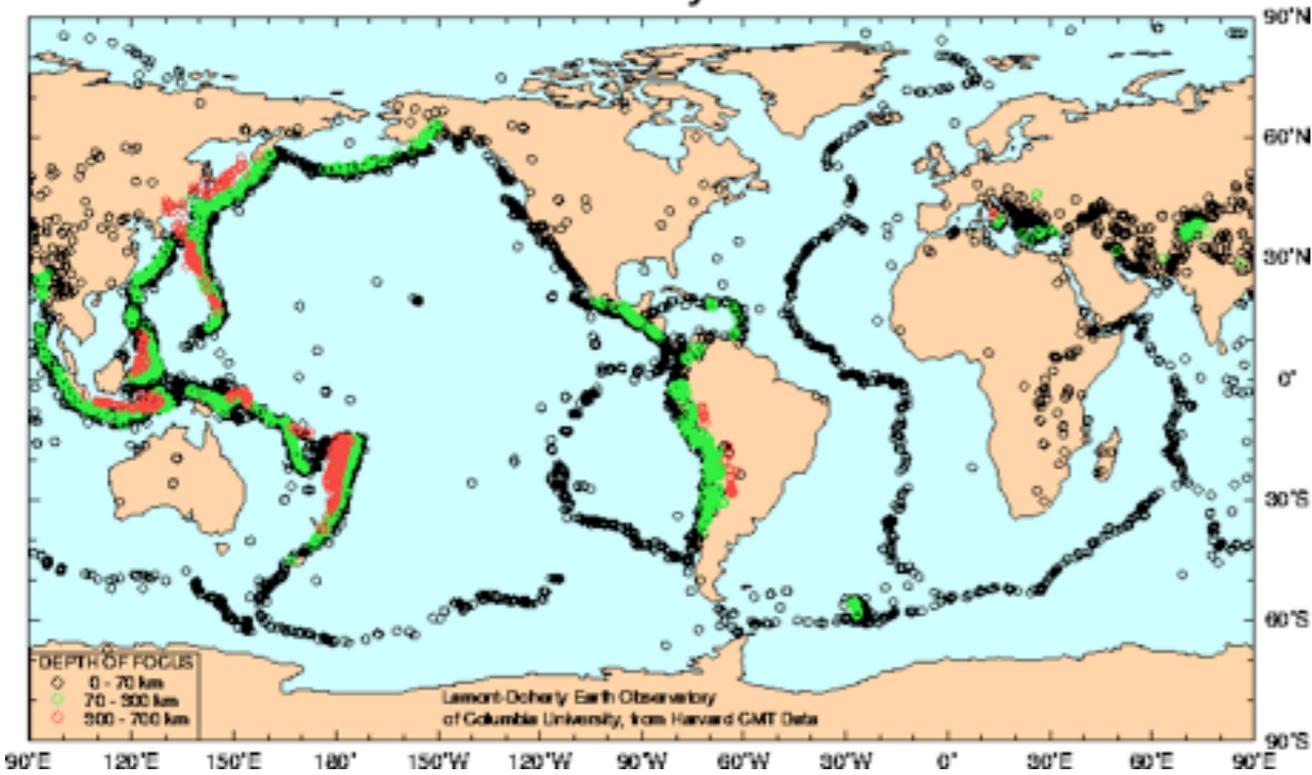


Voir l'intérieur d'une planète ??



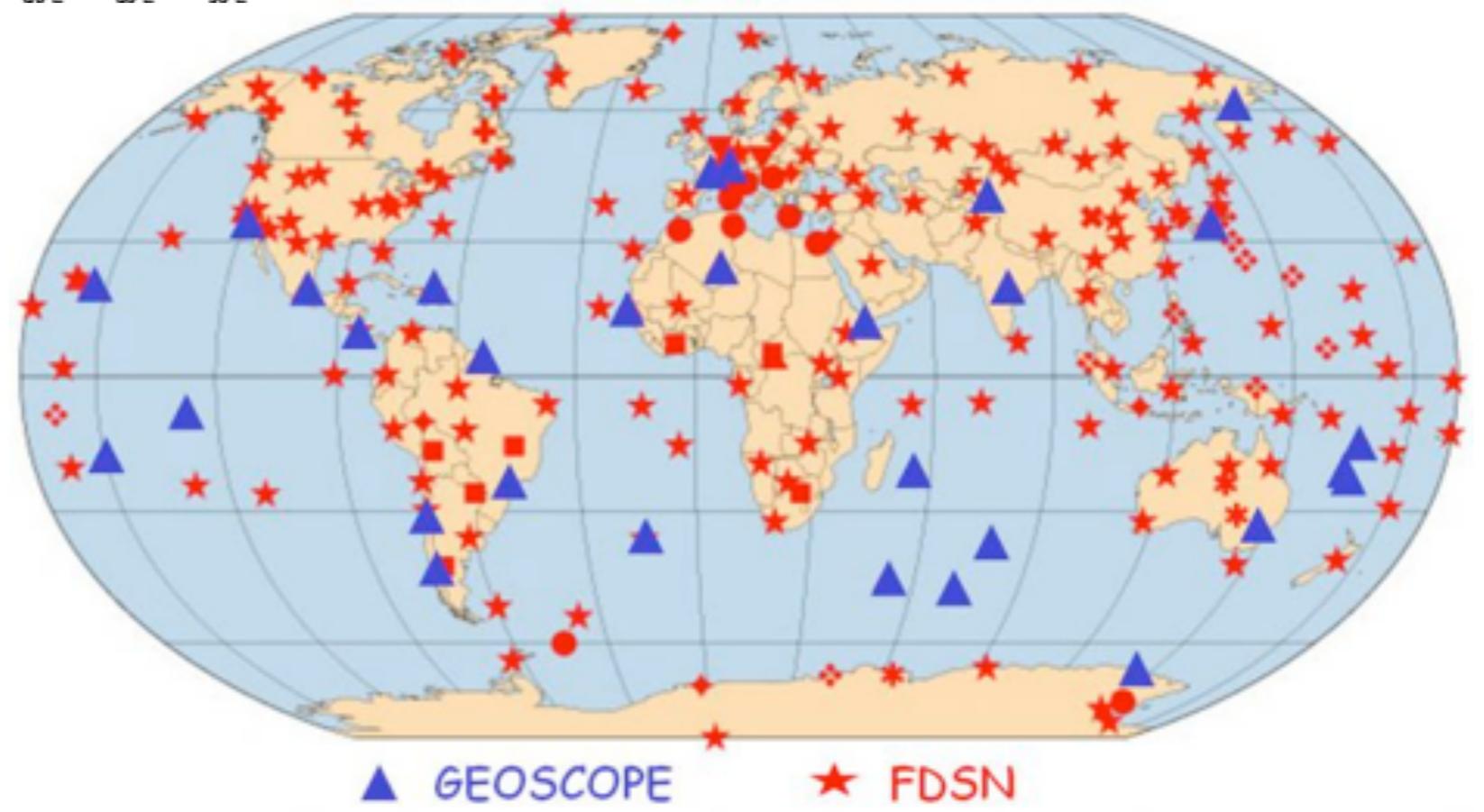
Imagerie
médicale
d'atténuation
(Rayon X)

World Seismicity 1977-1992



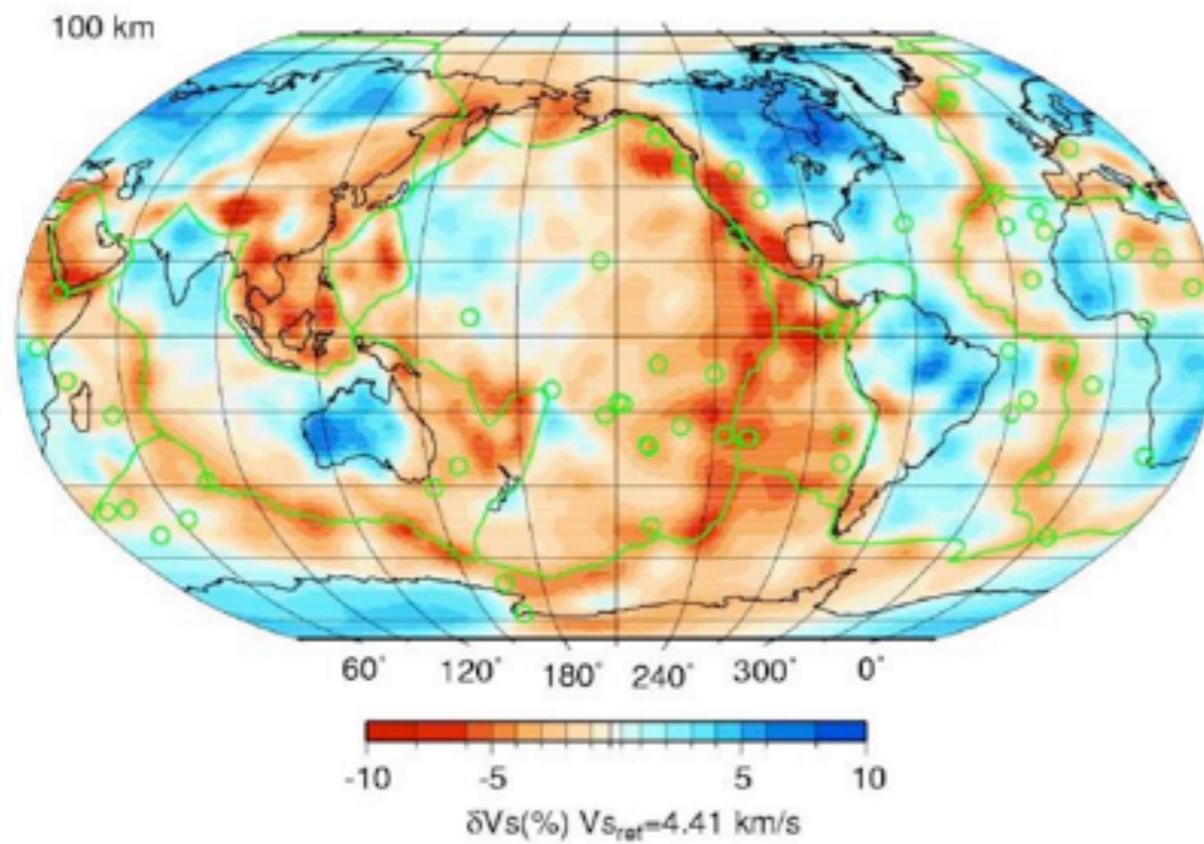
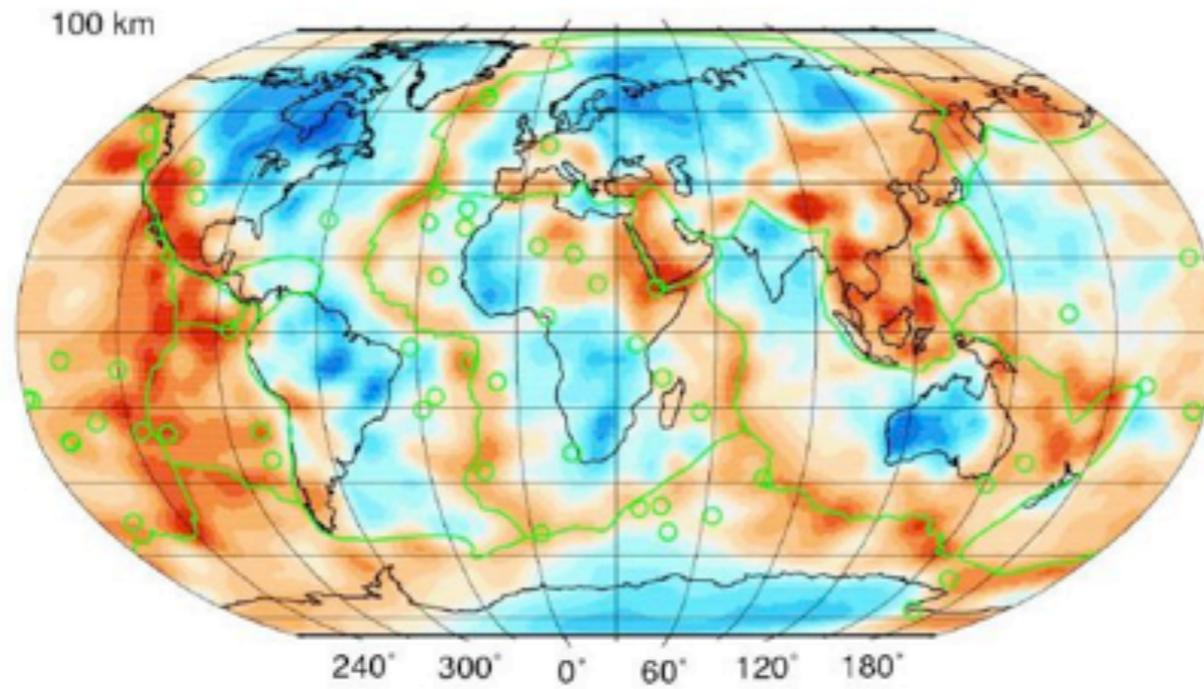
Des séismes (émetteurs)

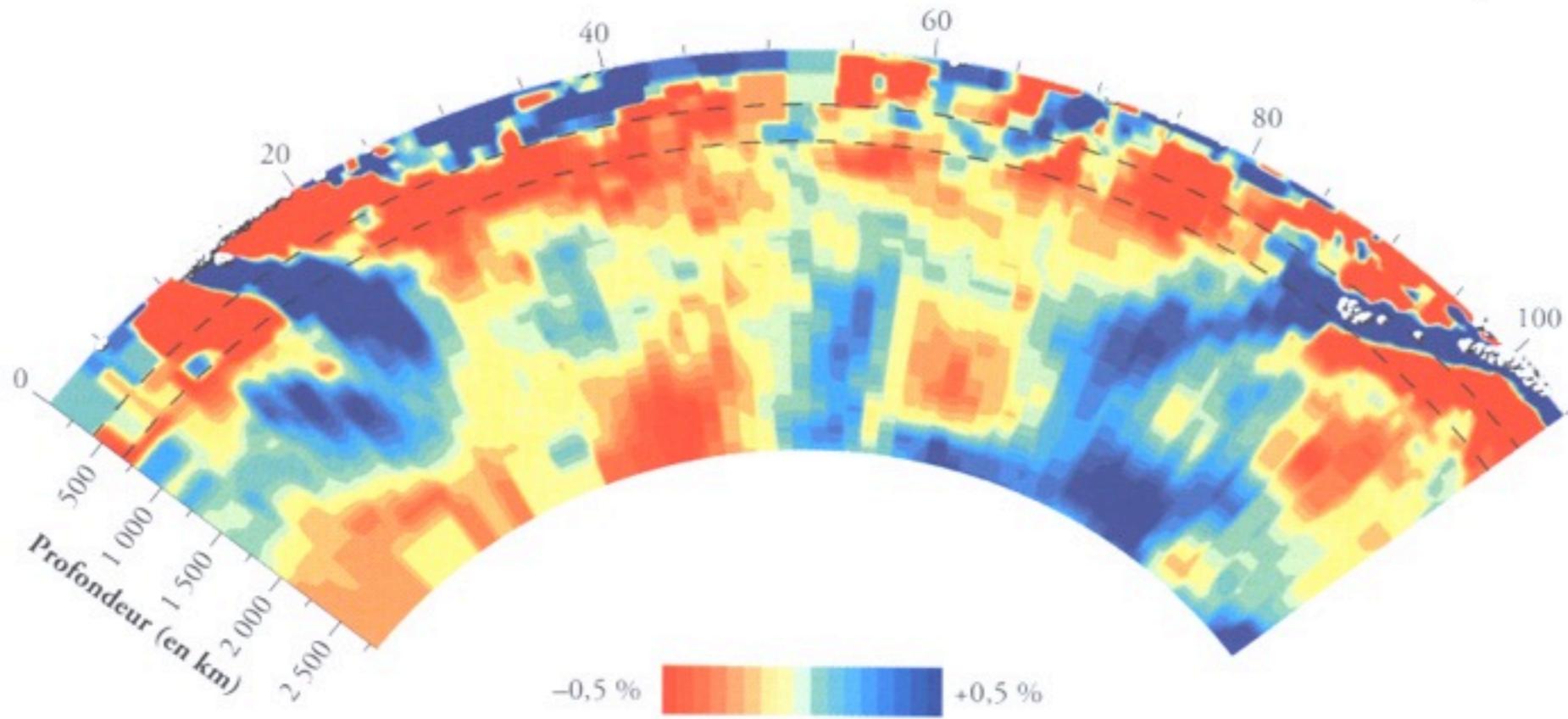
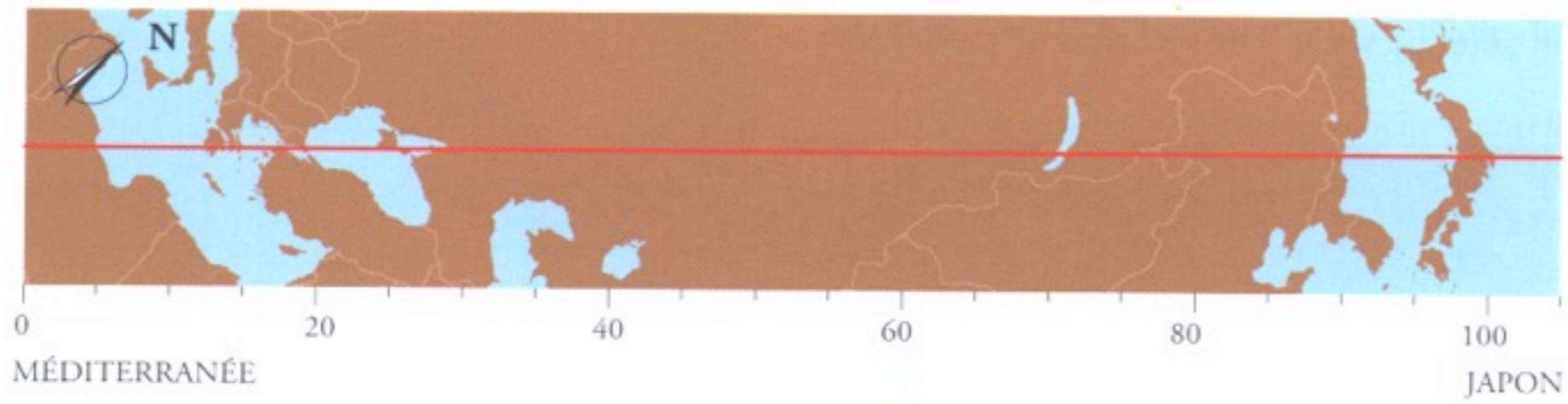
Des stations (récepteurs)



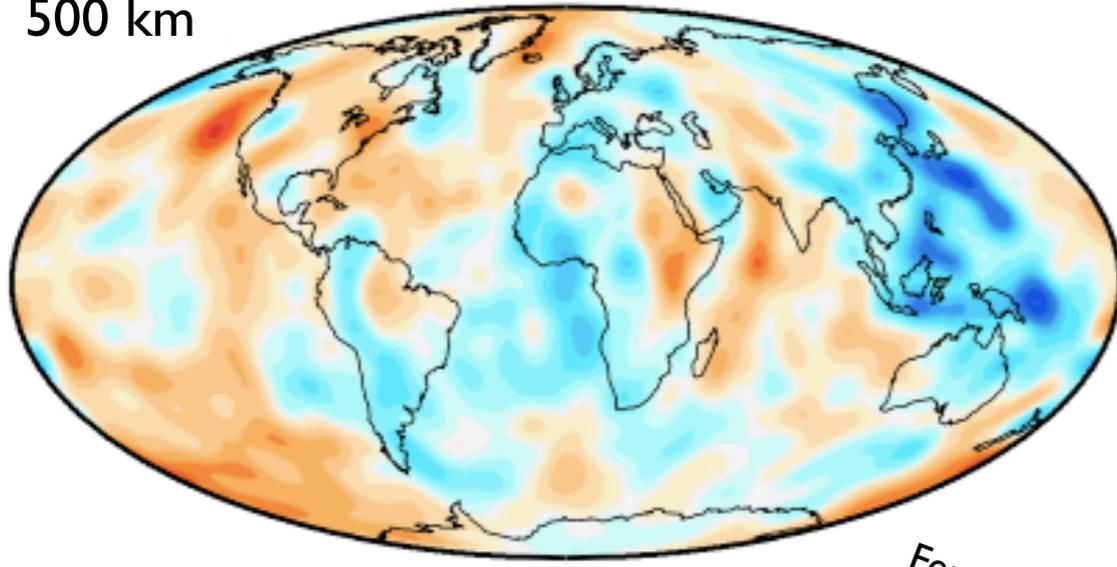
Tomographie sismique

100 km de
profondeur

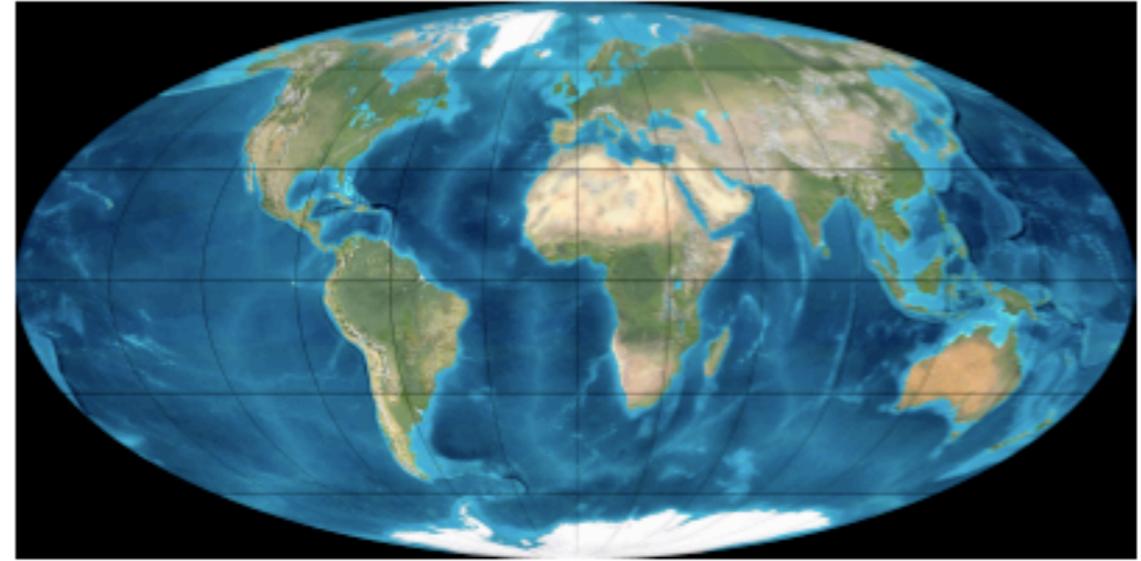




500 km



PRESENT

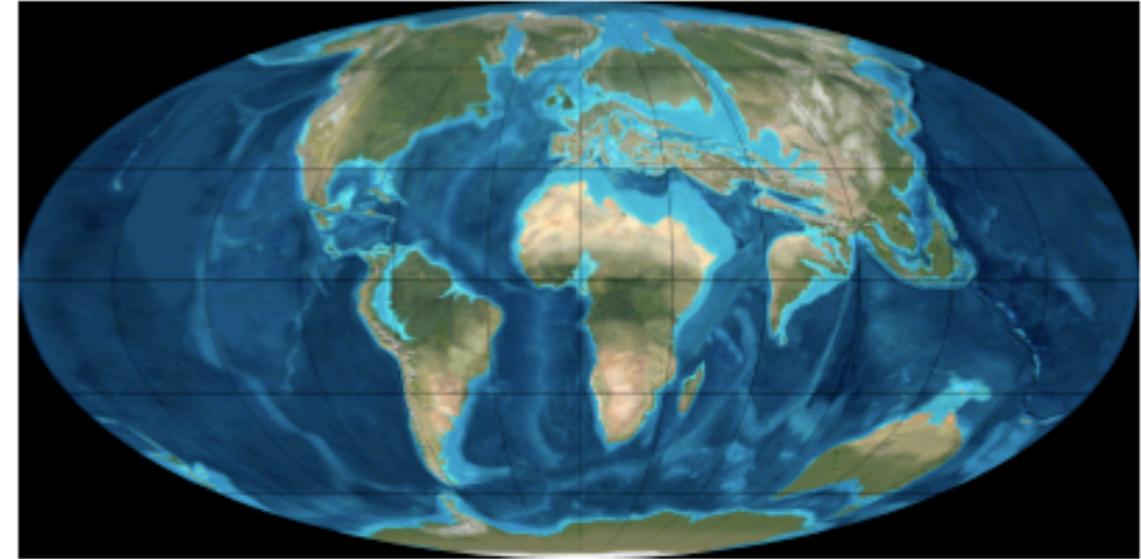
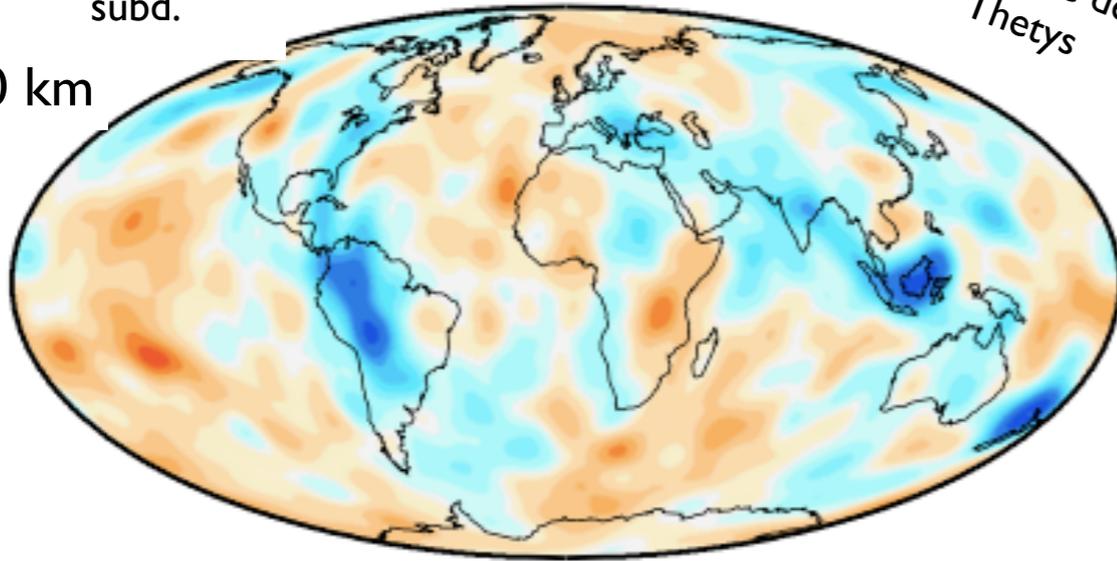


Farallon
subd.

*Fermeture de la
Thetys*

EOCENE 50 MA

1000 km

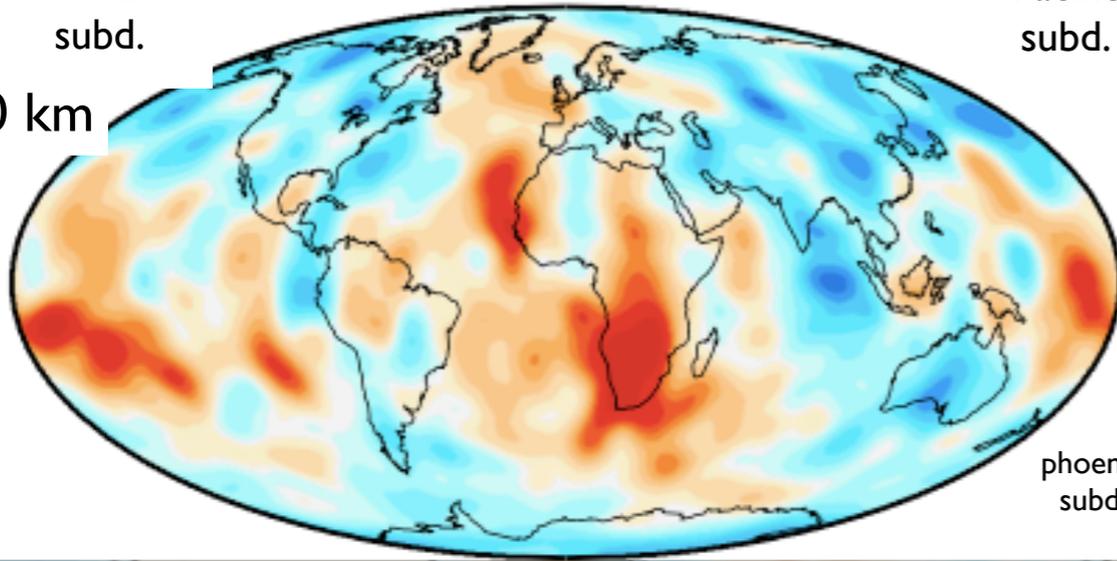


CRETACEOUS 95 MA

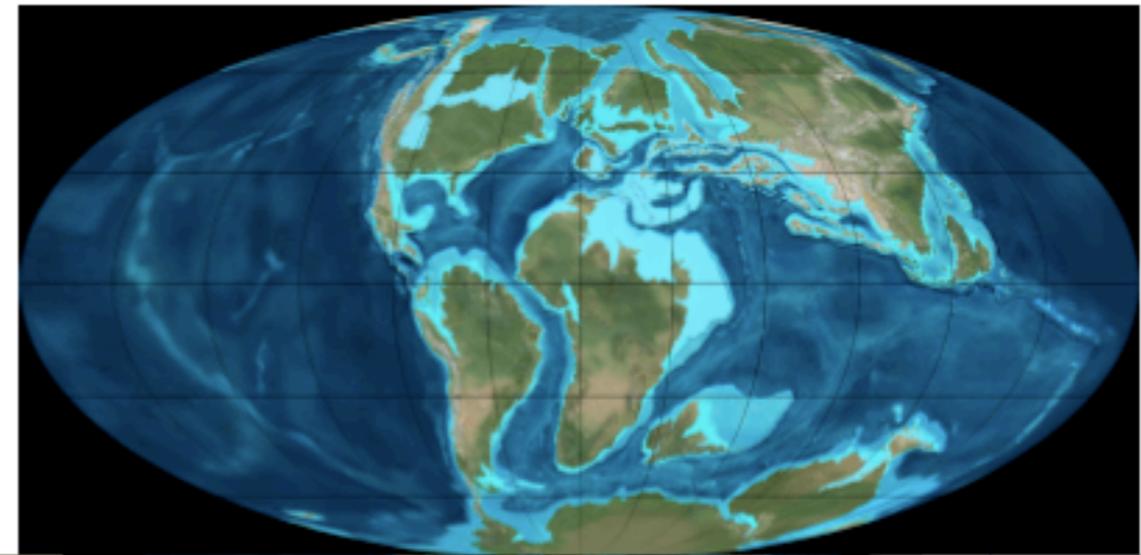
Kula
subd.

Pacific
subd.

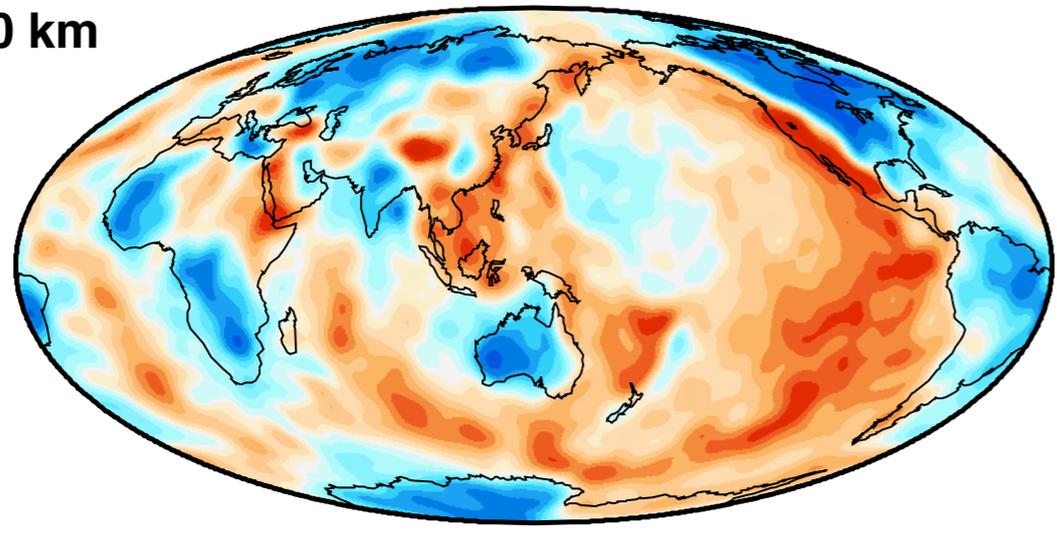
2000 km



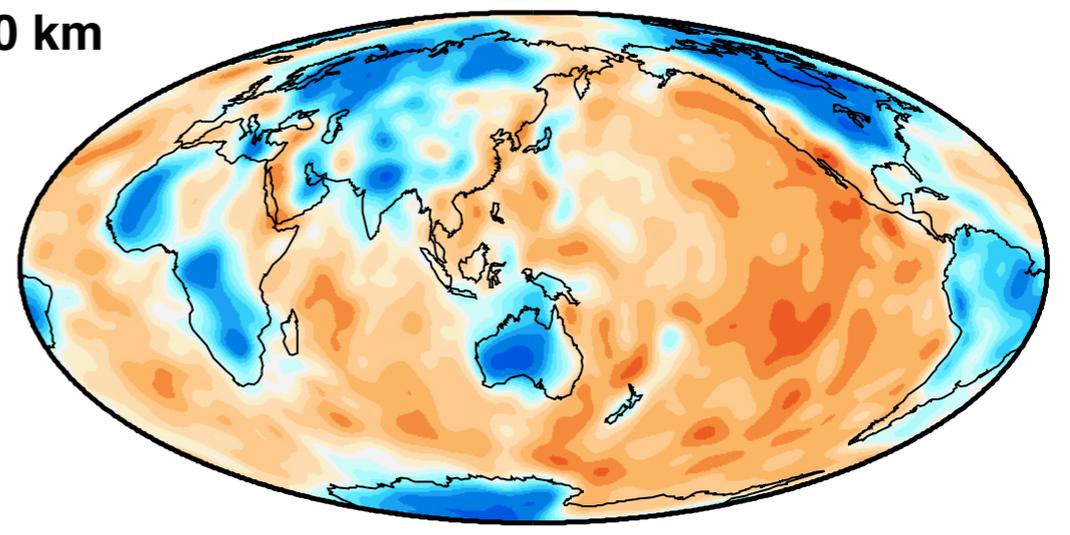
phoenix
subd.



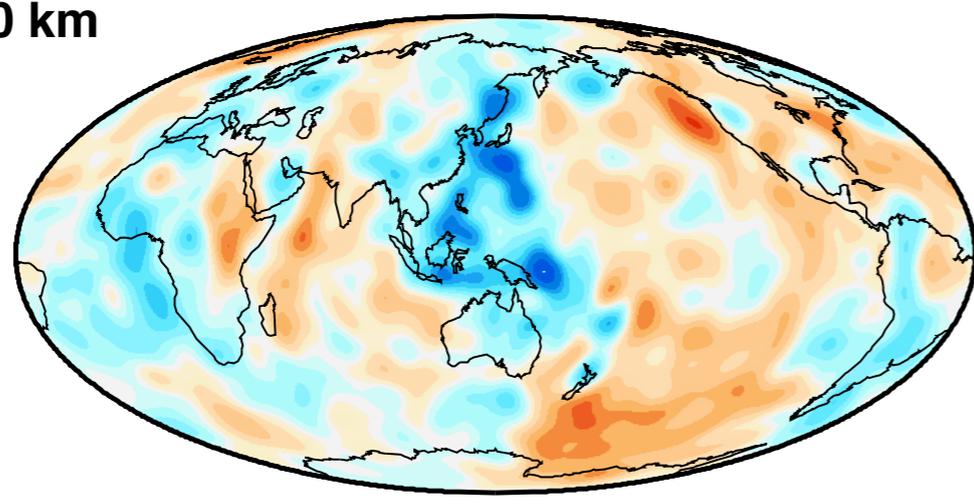
100 km



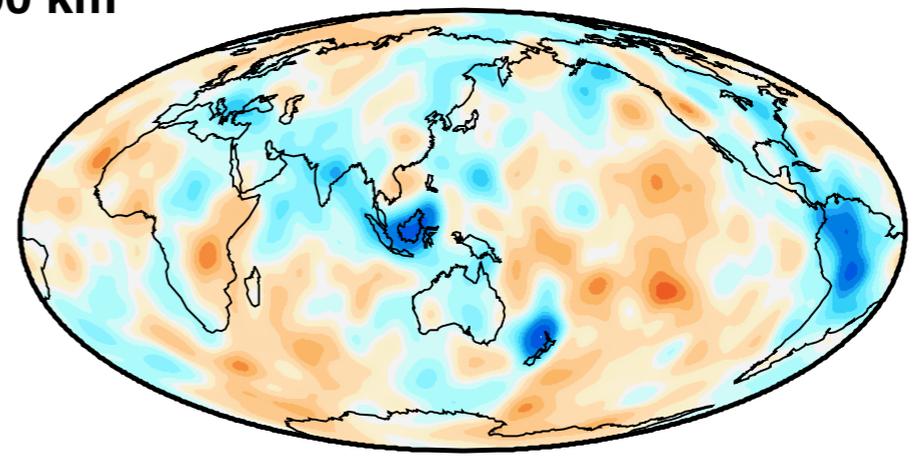
150 km



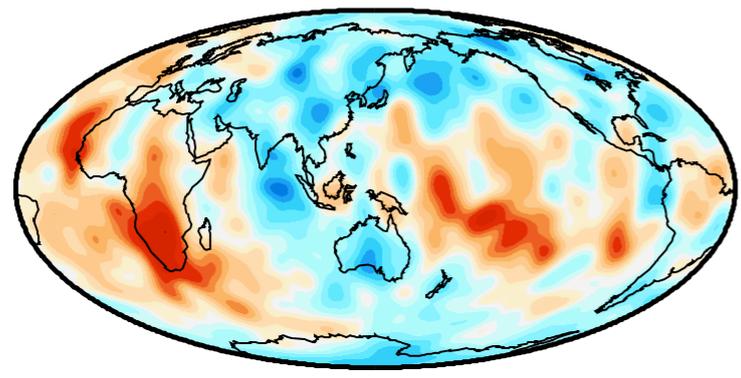
550 km



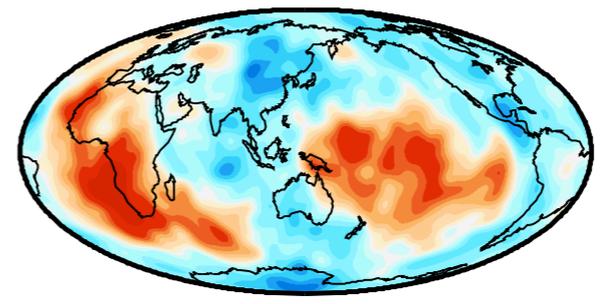
1000 km



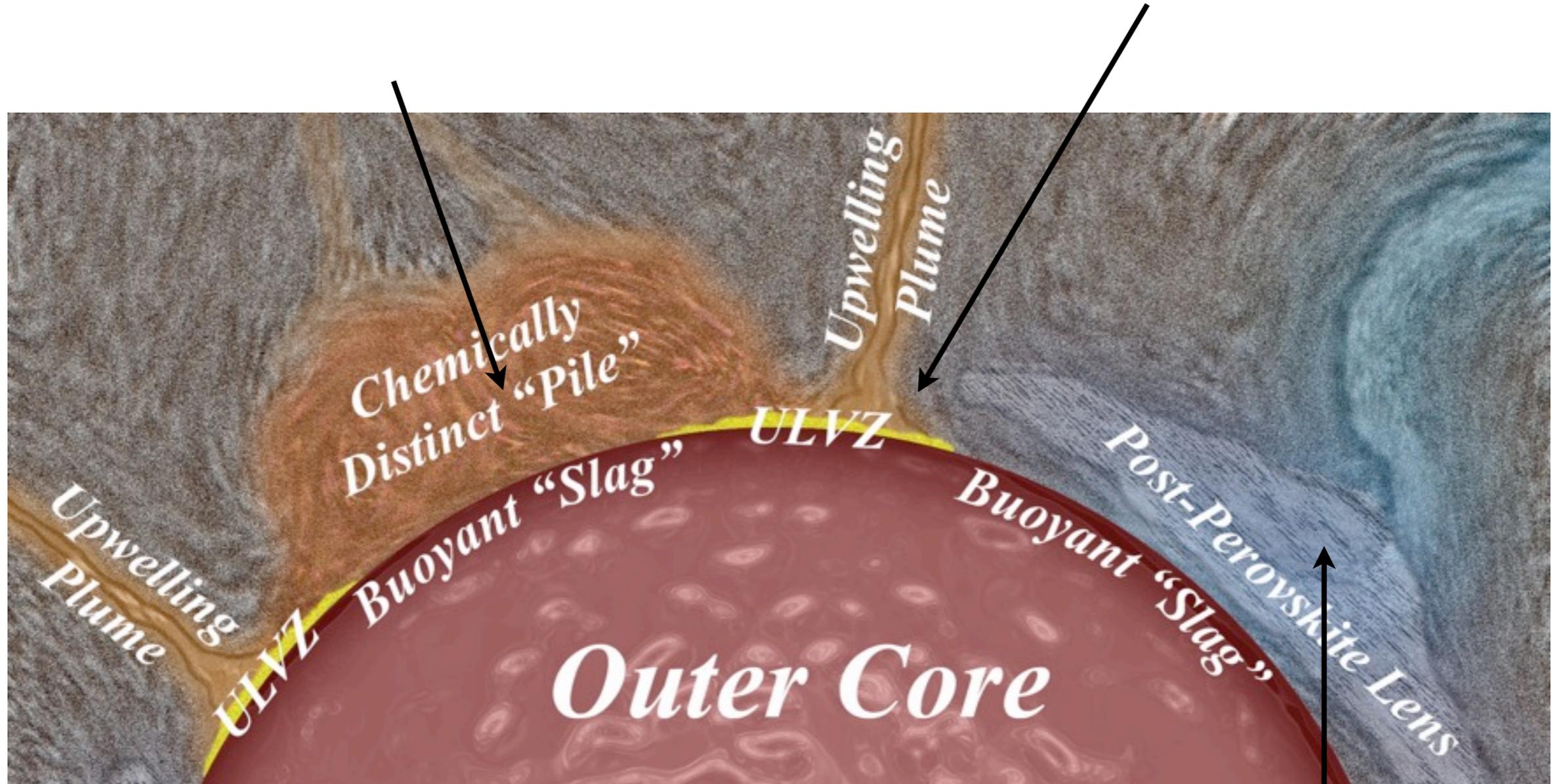
2000 km



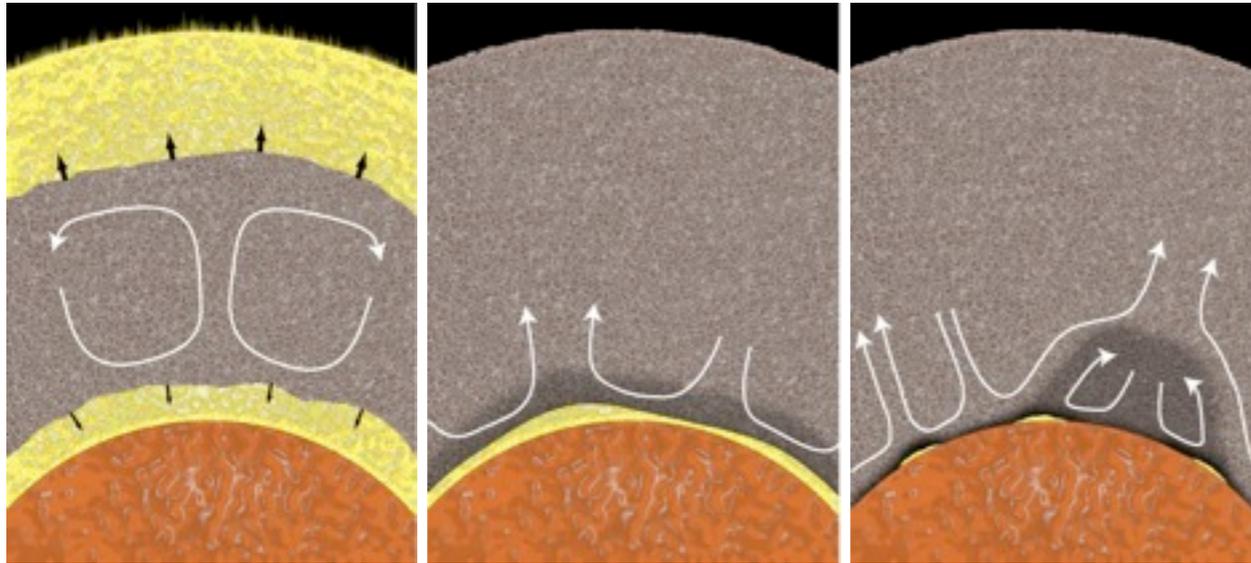
CMB



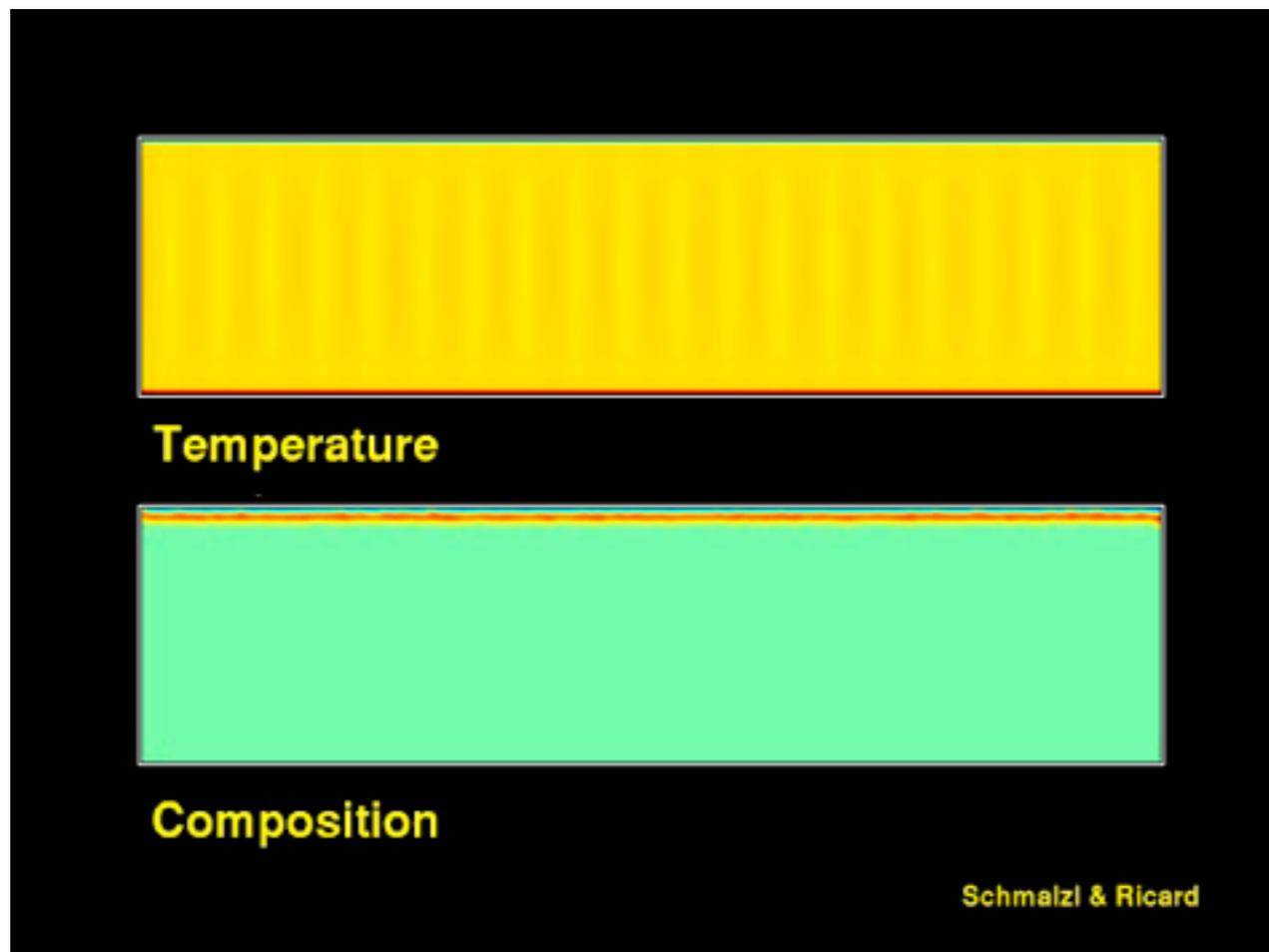
Des zones chimiquement distinctes ? Des zones fondues ?



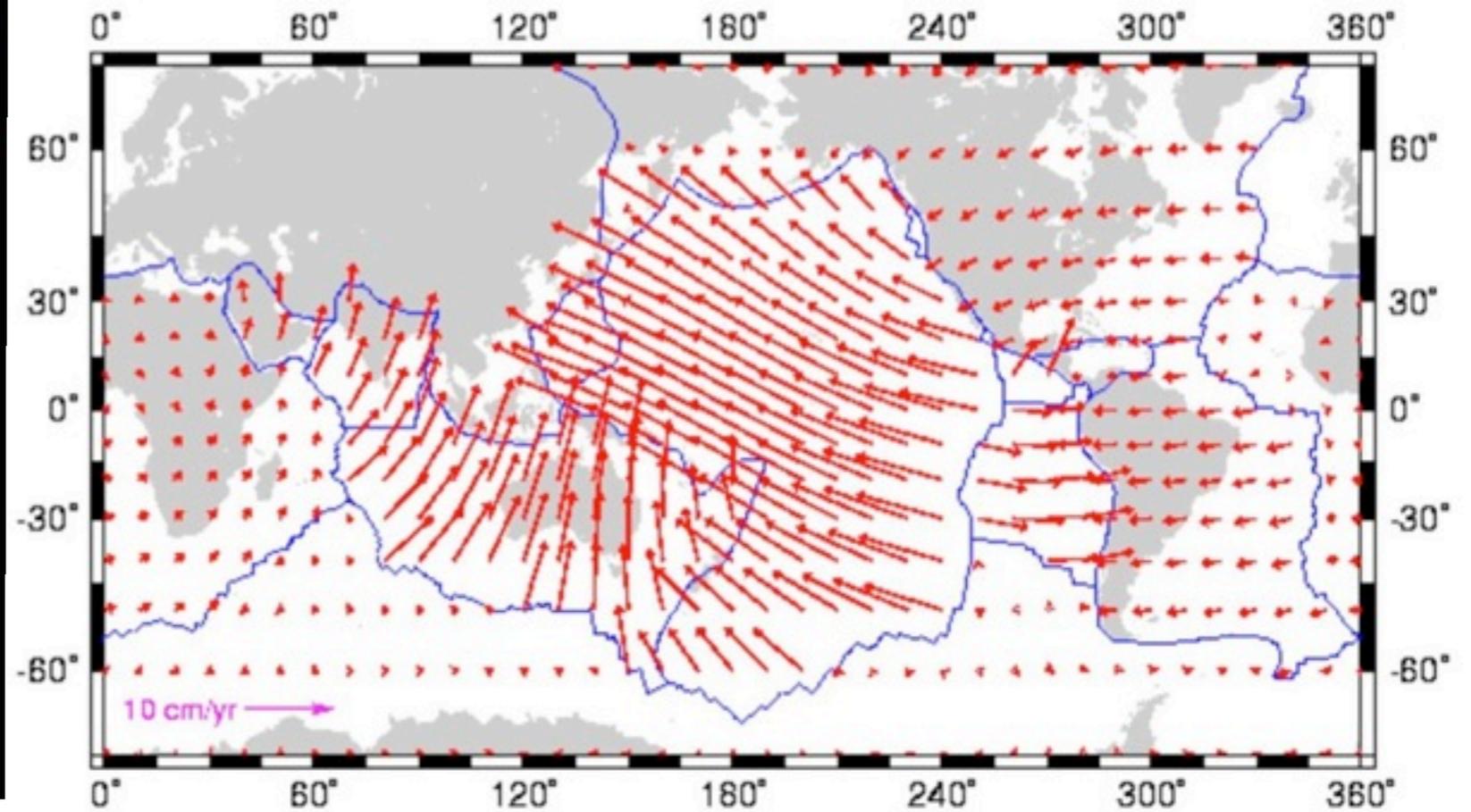
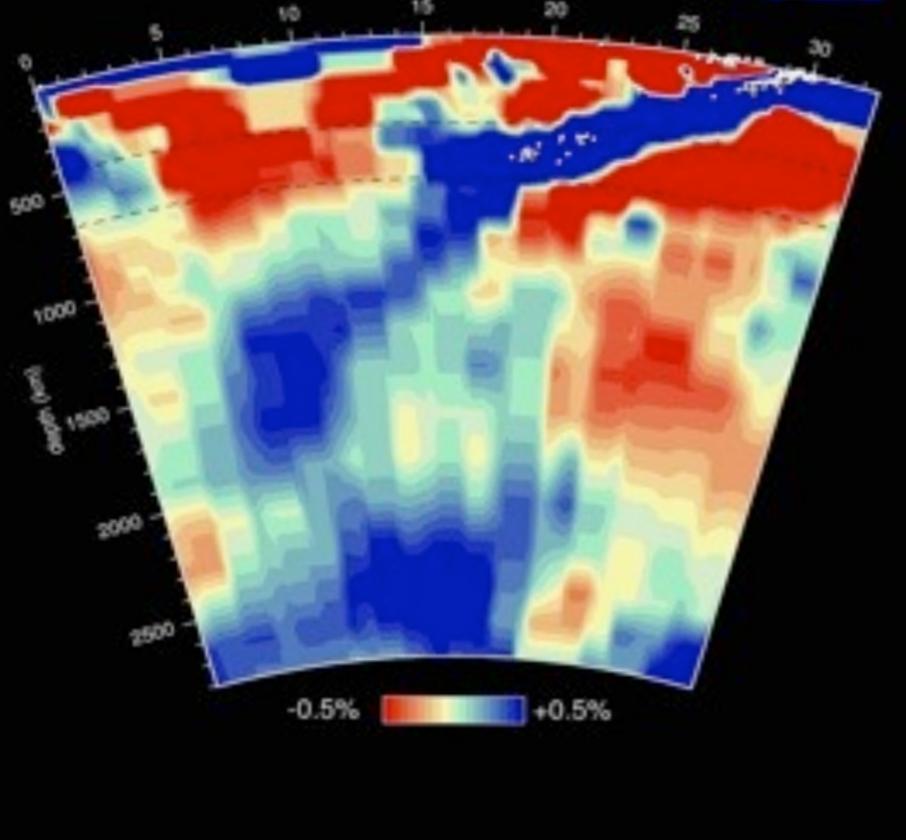
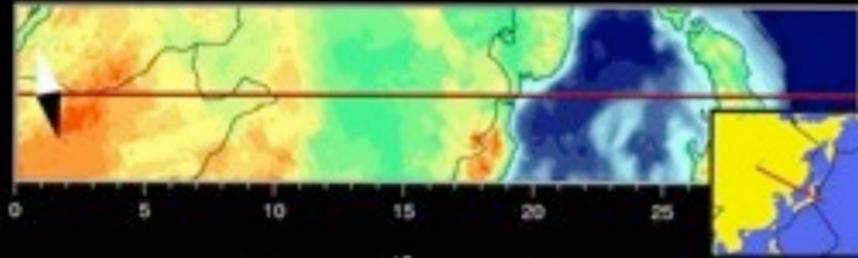
Un nouveau changement de phase ?



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



Force motrice:
Archimède

$$\alpha\rho\Delta Tg$$

Résistance:
Dissipation
de la chaleur

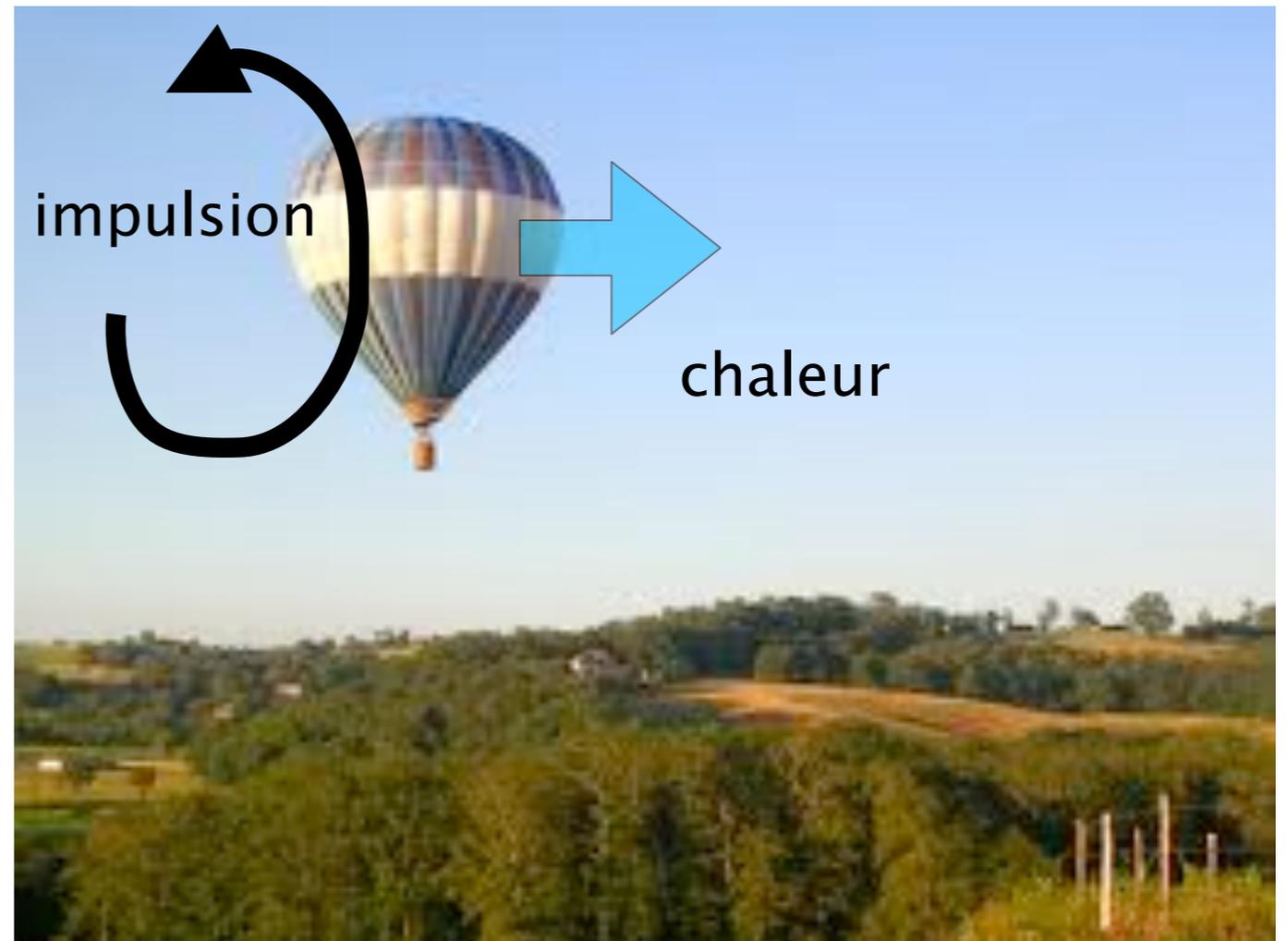
κ

Dissipation de
l'impulsion

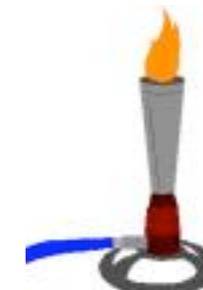
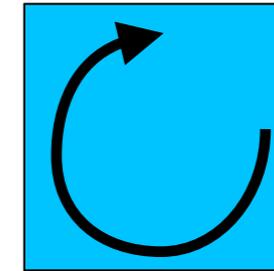
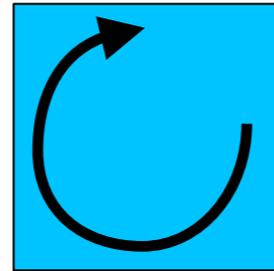
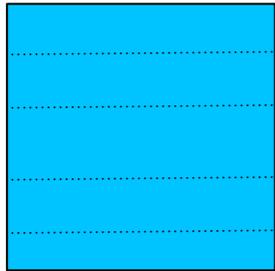
η

Le nombre de Rayleigh

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



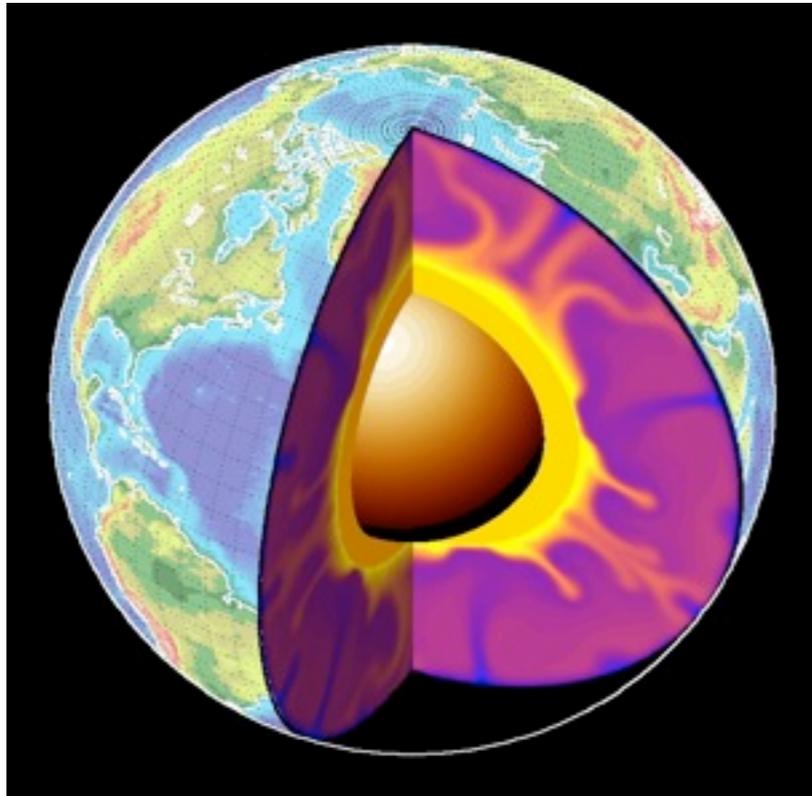
Stabilité/Instabilité



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



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



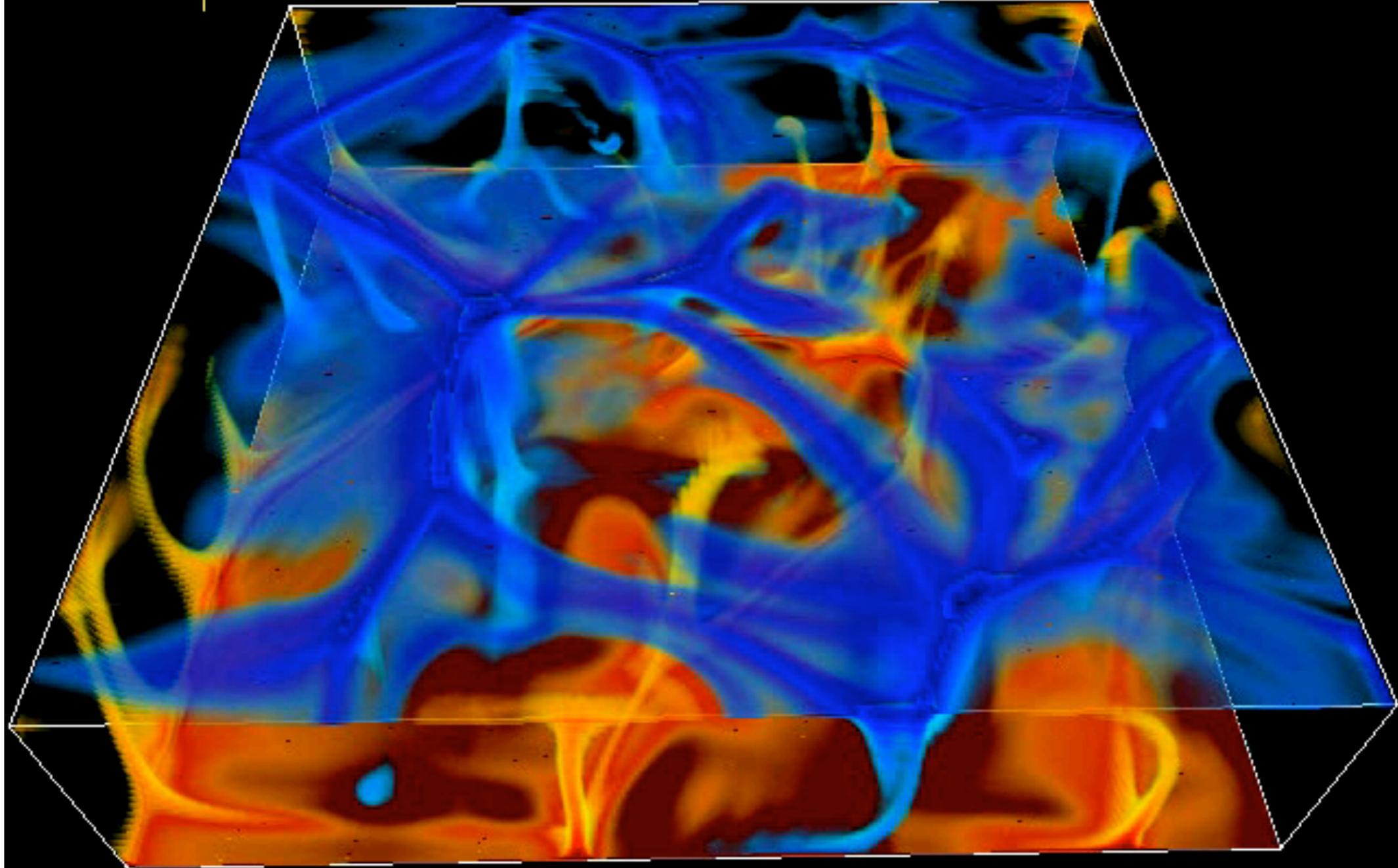
$$Ra = 3.5 \times 10^7$$

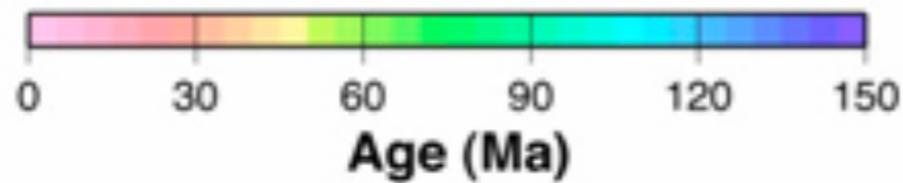
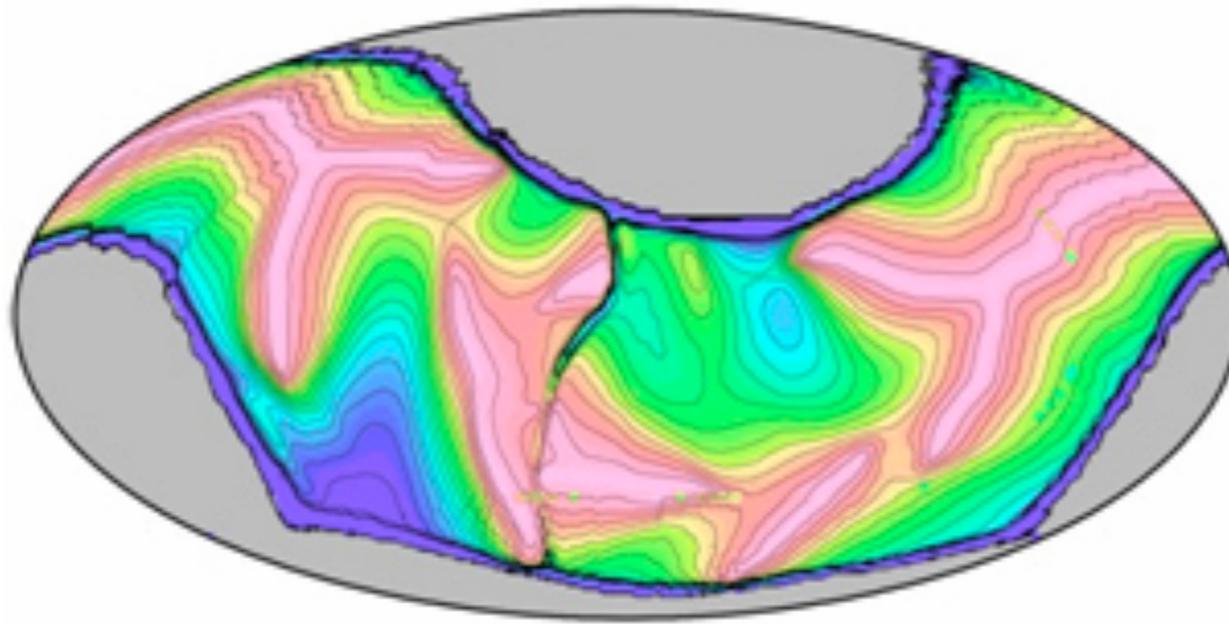
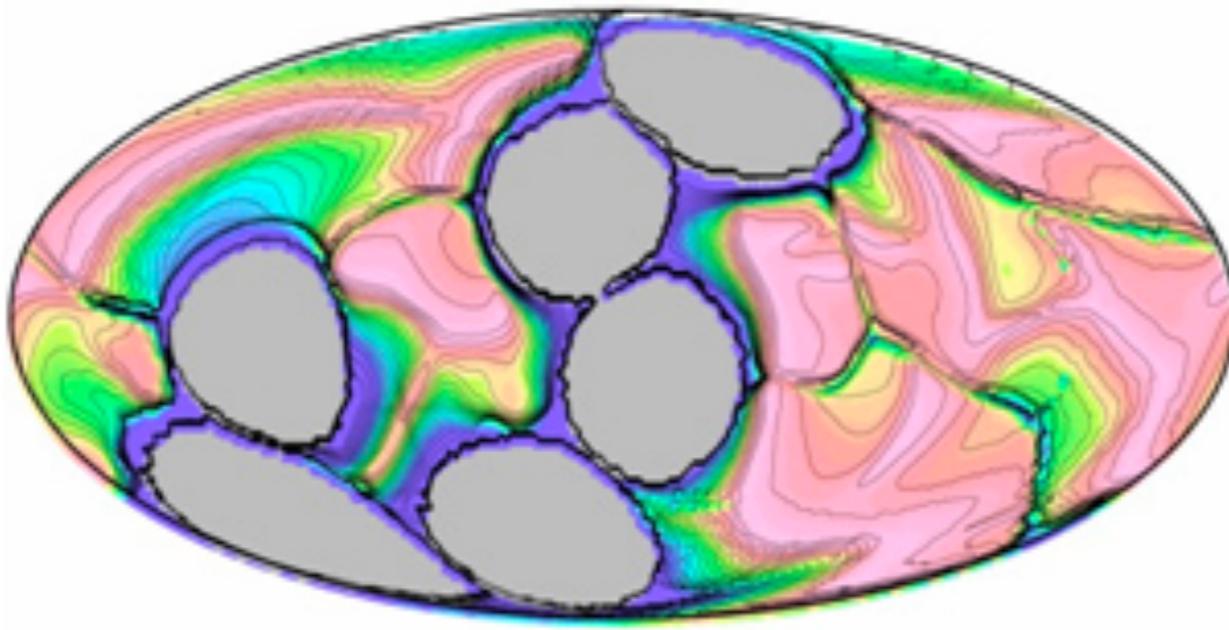
mais elles sont grosses!!

$$Ra = 3.5 \times 10^7$$

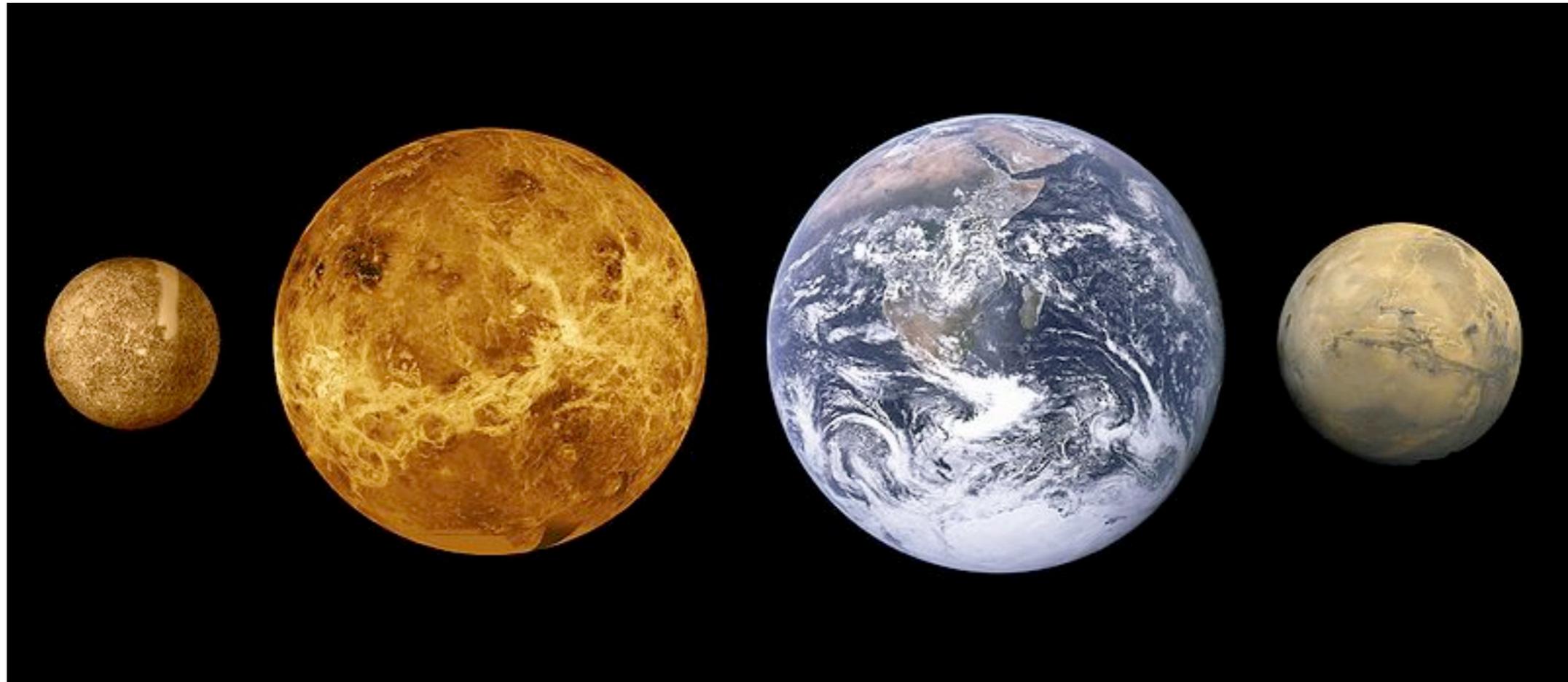
Bien que solide, extraordinairement peu déformable (très visqueux), les lois de la physique montrent que le manteau terrestre doit se mettre spontanément en mouvement pour évacuer sa chaleur: c'est le phénomène de la «convection»

Nstep = 100 Time = 0.000027



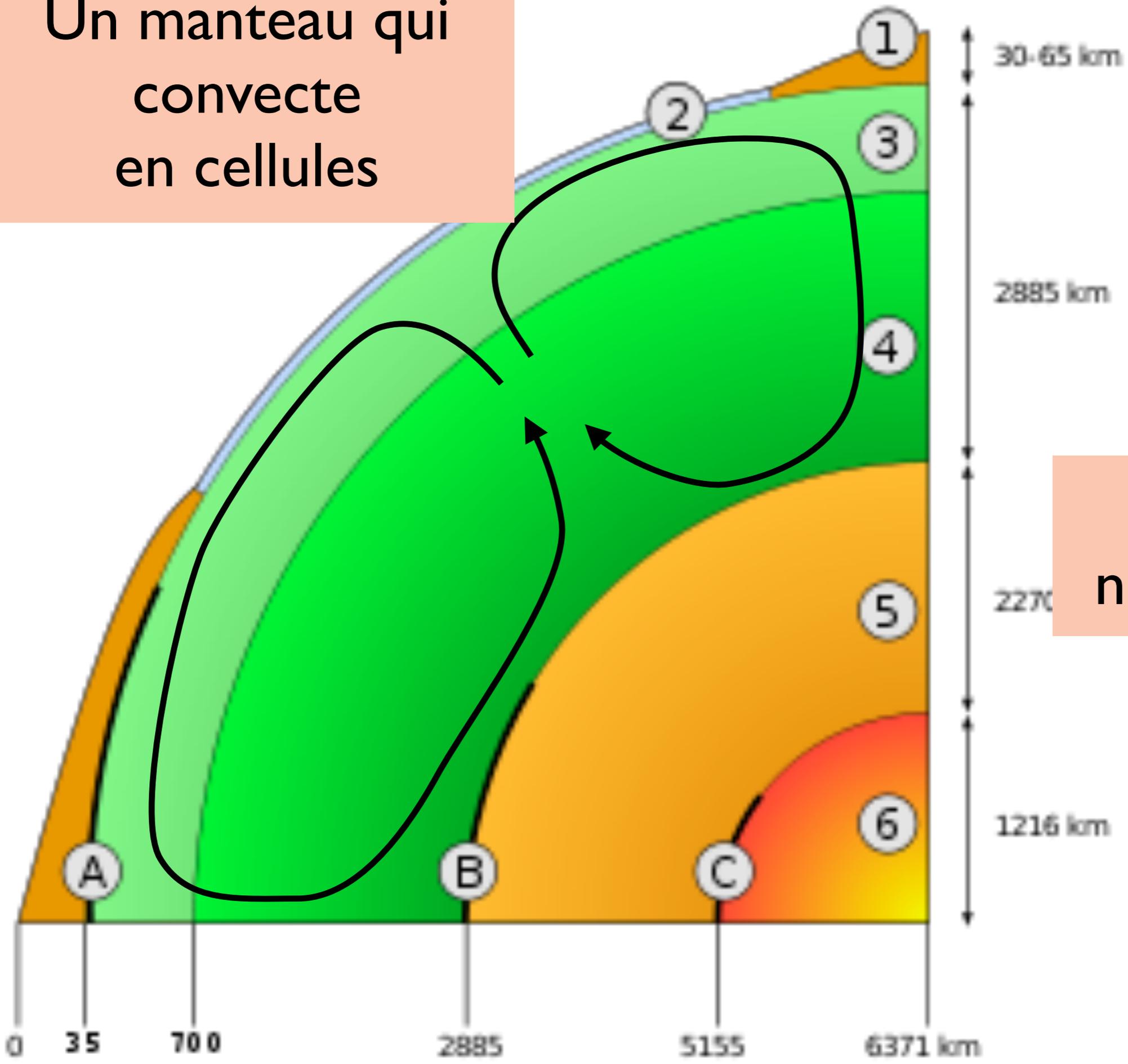


Des progrès rapides ont été faits sur la simulation de la convection «avec plaques»



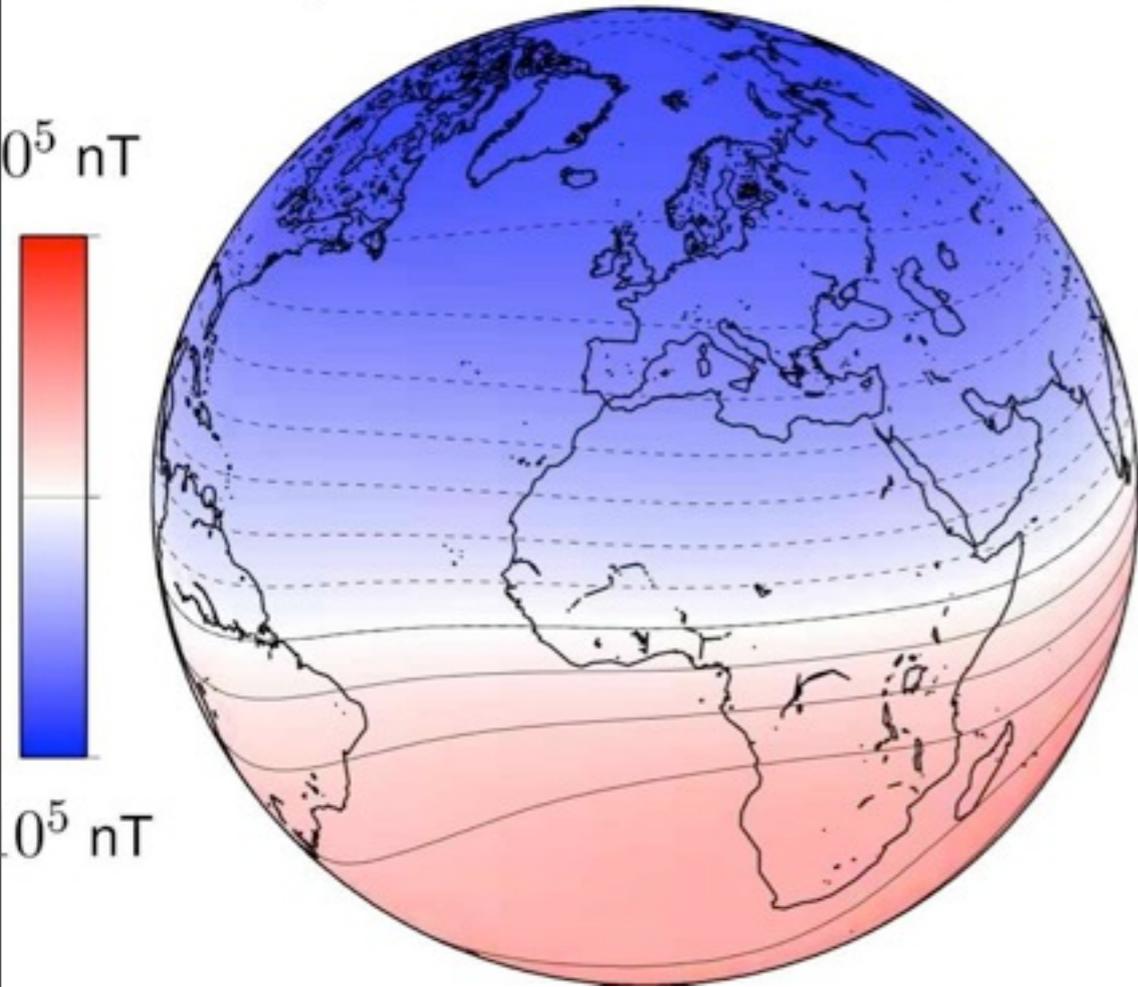
mais pourquoi seule la Terre a
une tectonique des plaques?

Un manteau qui convecte en cellules

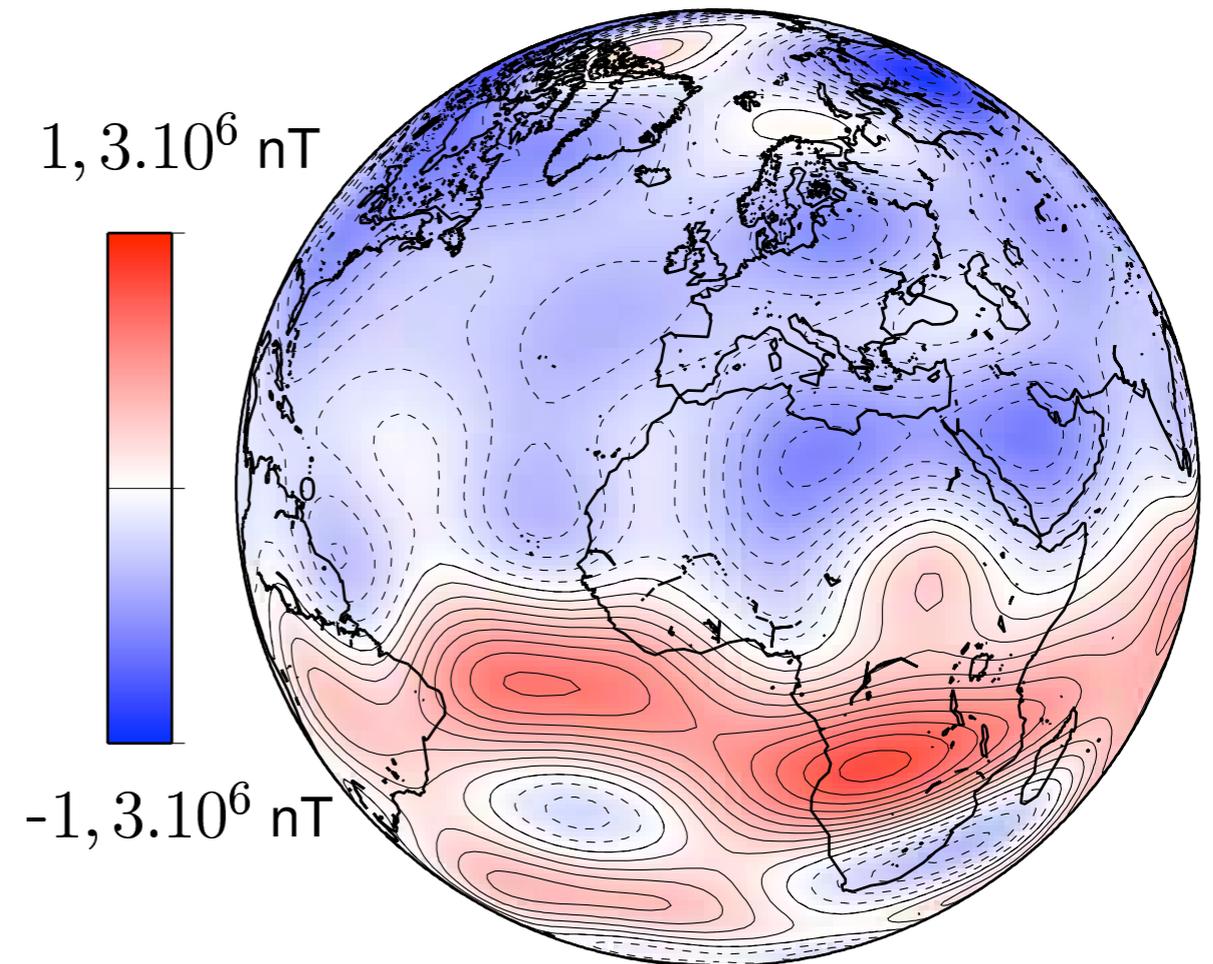


Et le noyau??

B_r à la surface de la Terre



B_r à la surface du noyau



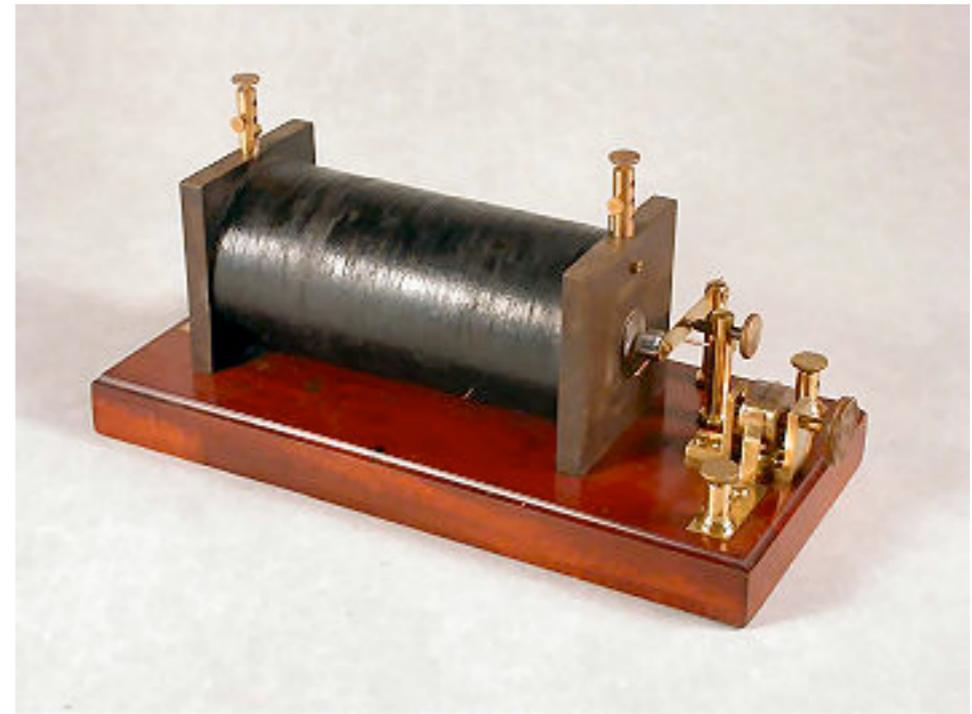
Dans le noyau se forme le champ magnétique

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



cyclone Katrina

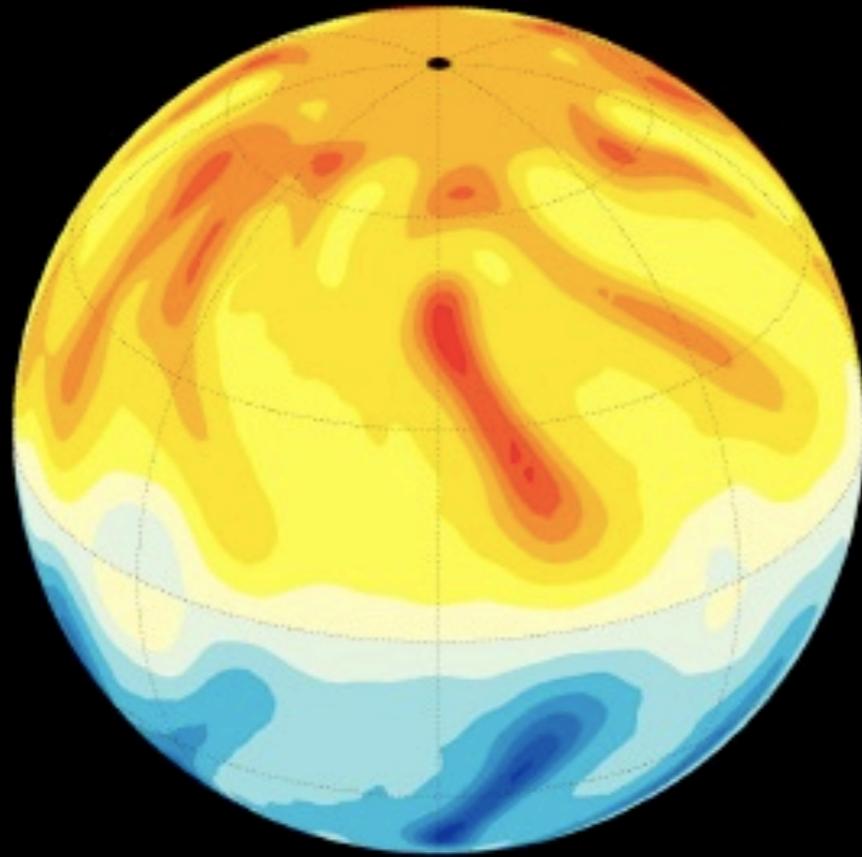
Un conducteur qui
s'enroule en
spirale...



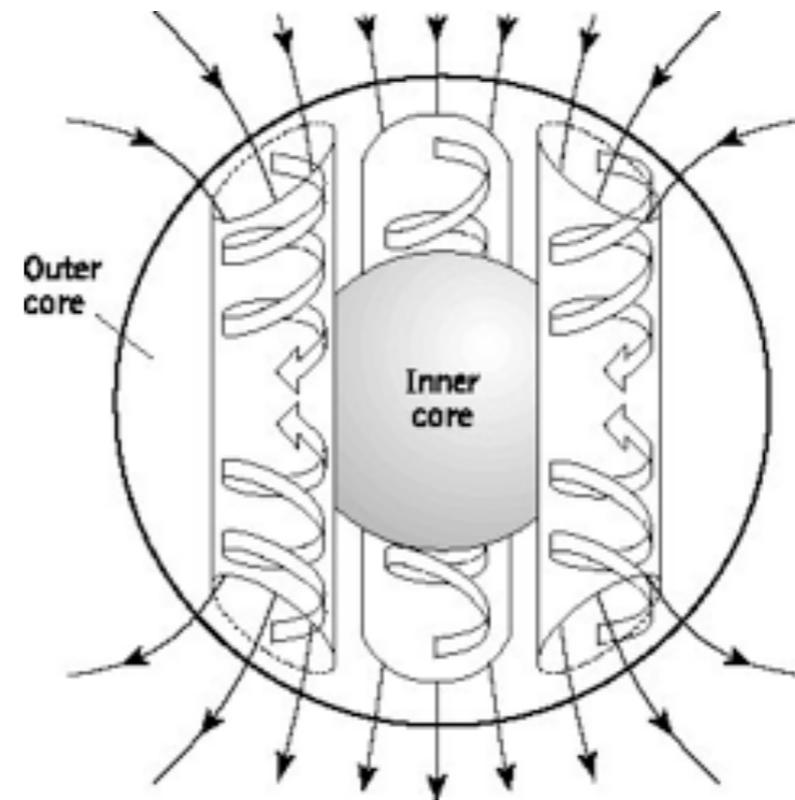
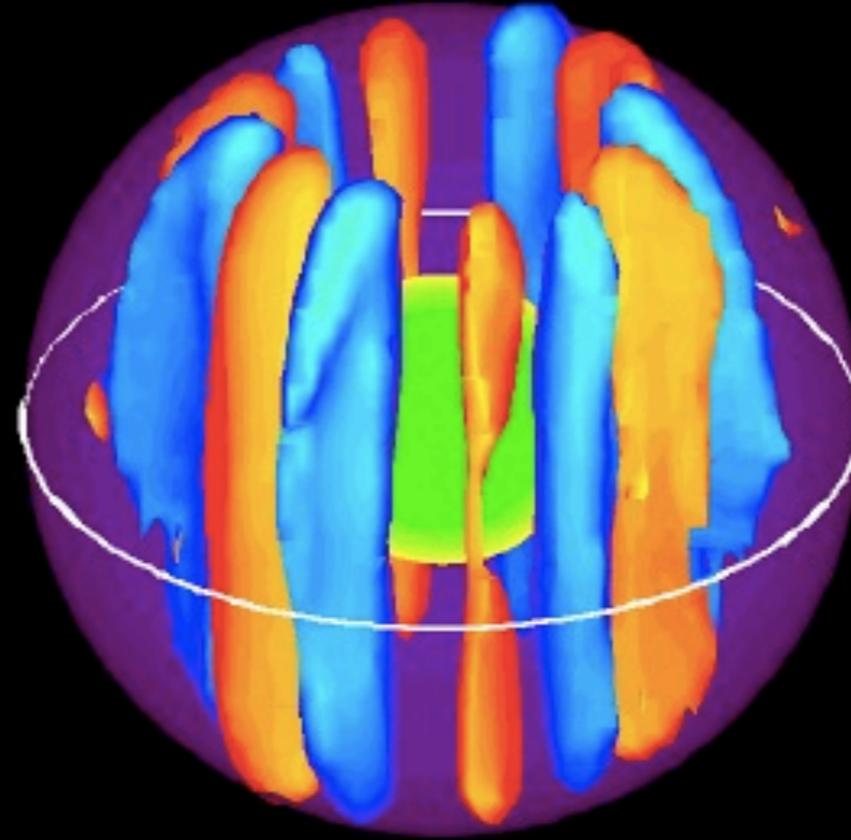
bobine électrique

Numerical Dynamo Model -- 3D Structure

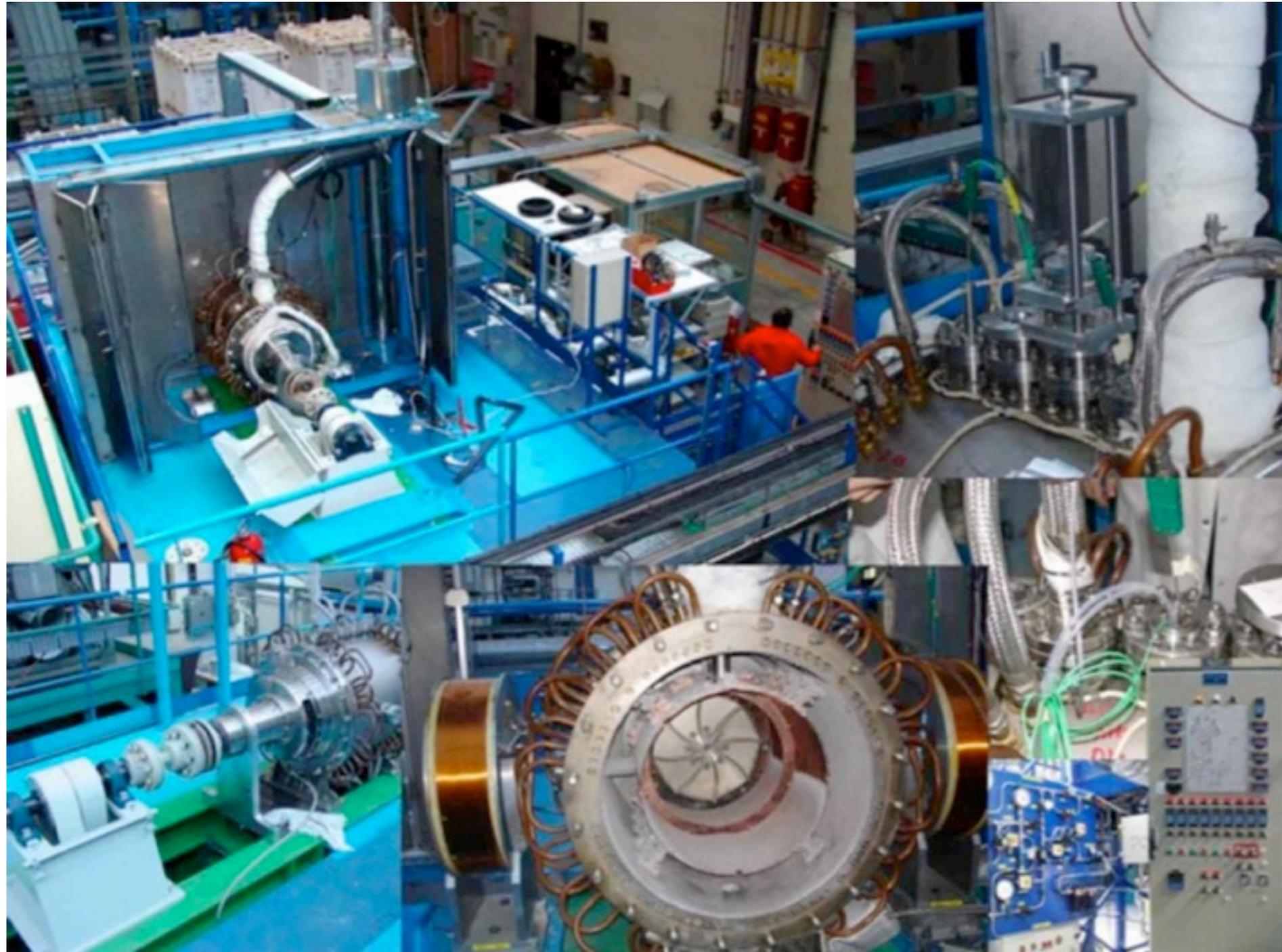
CMB
Radial
Field



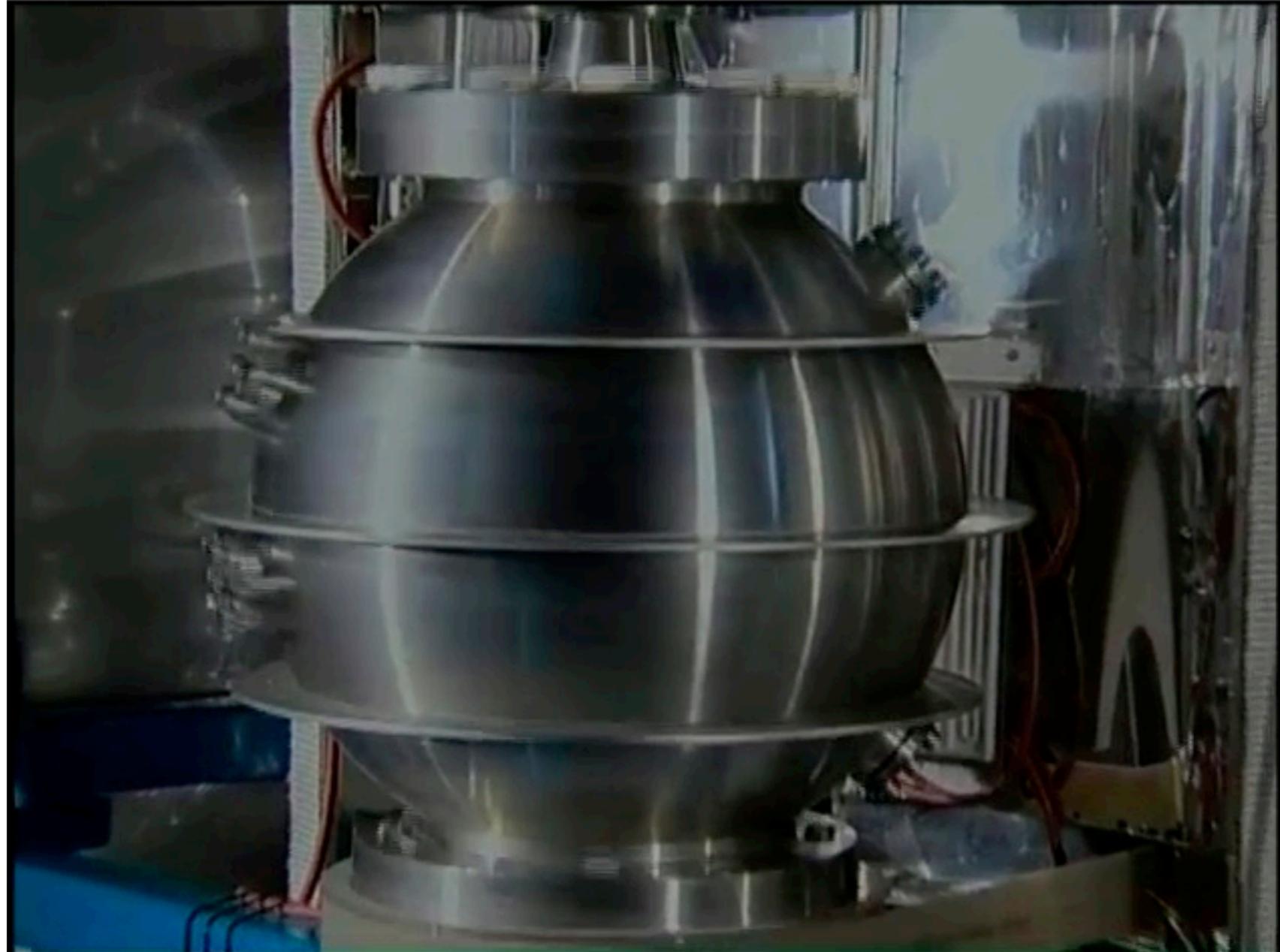
Axial
Vorticity



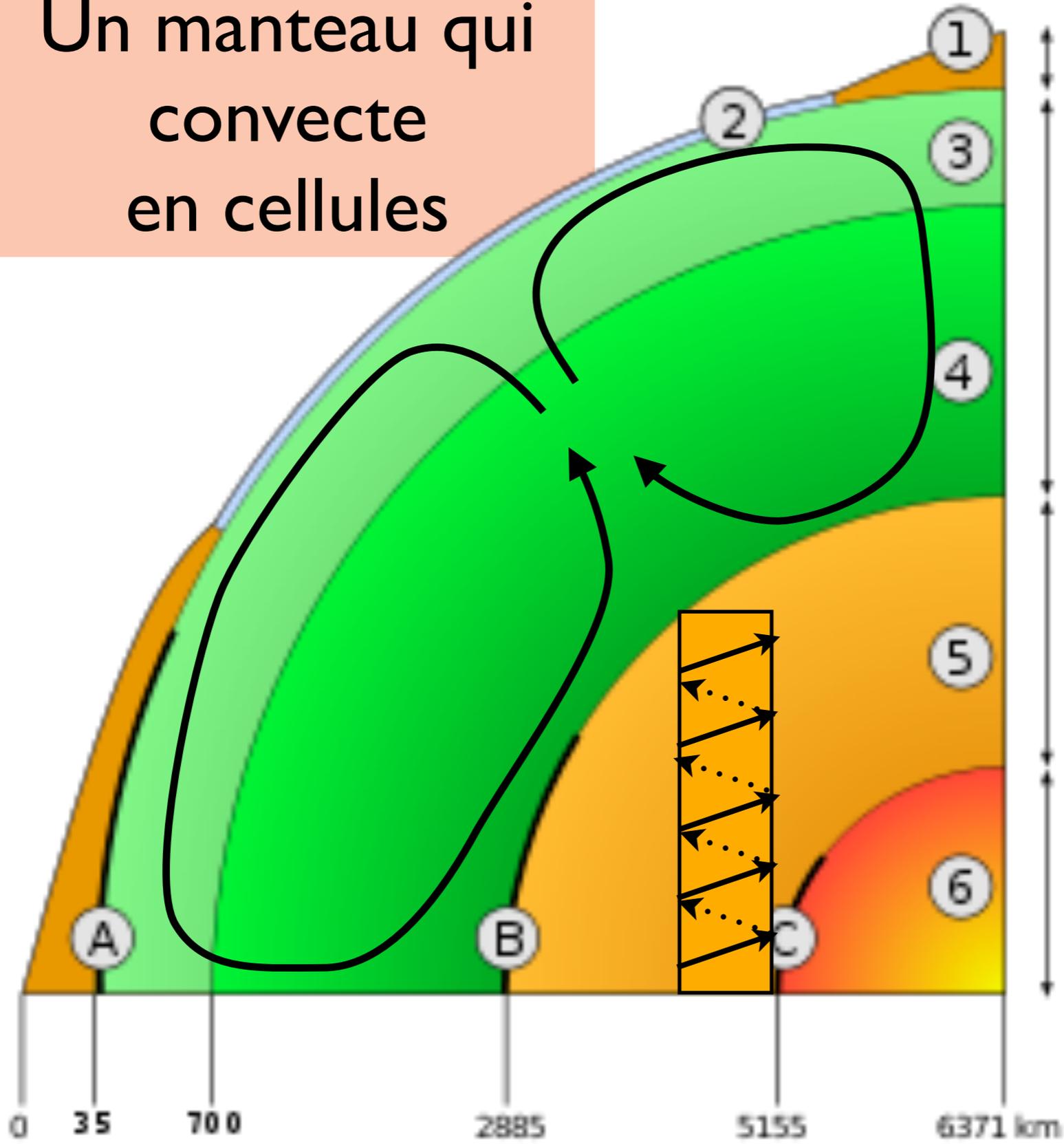
ENSL-CEA Cadarache



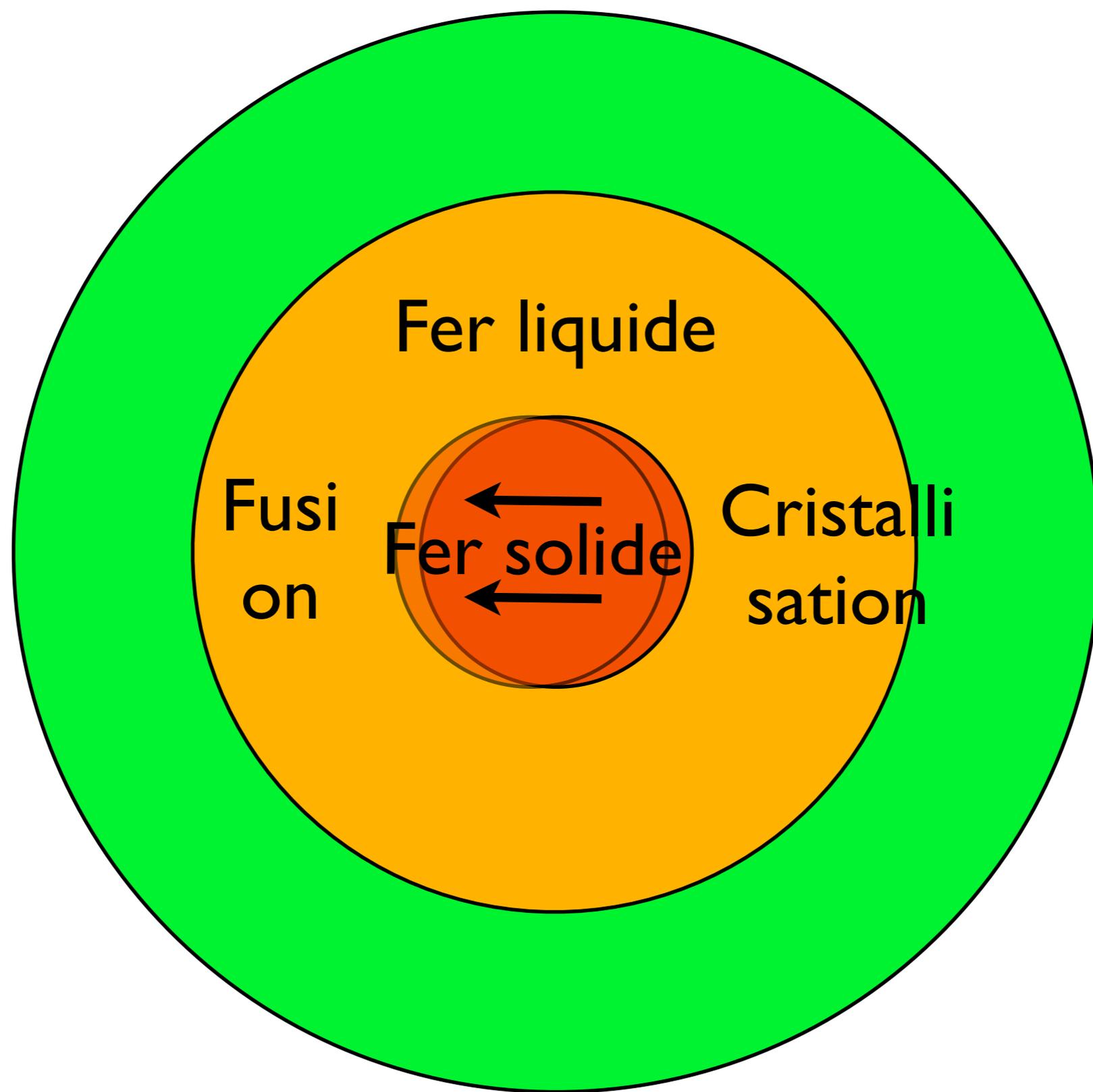
Univ-Grenoble



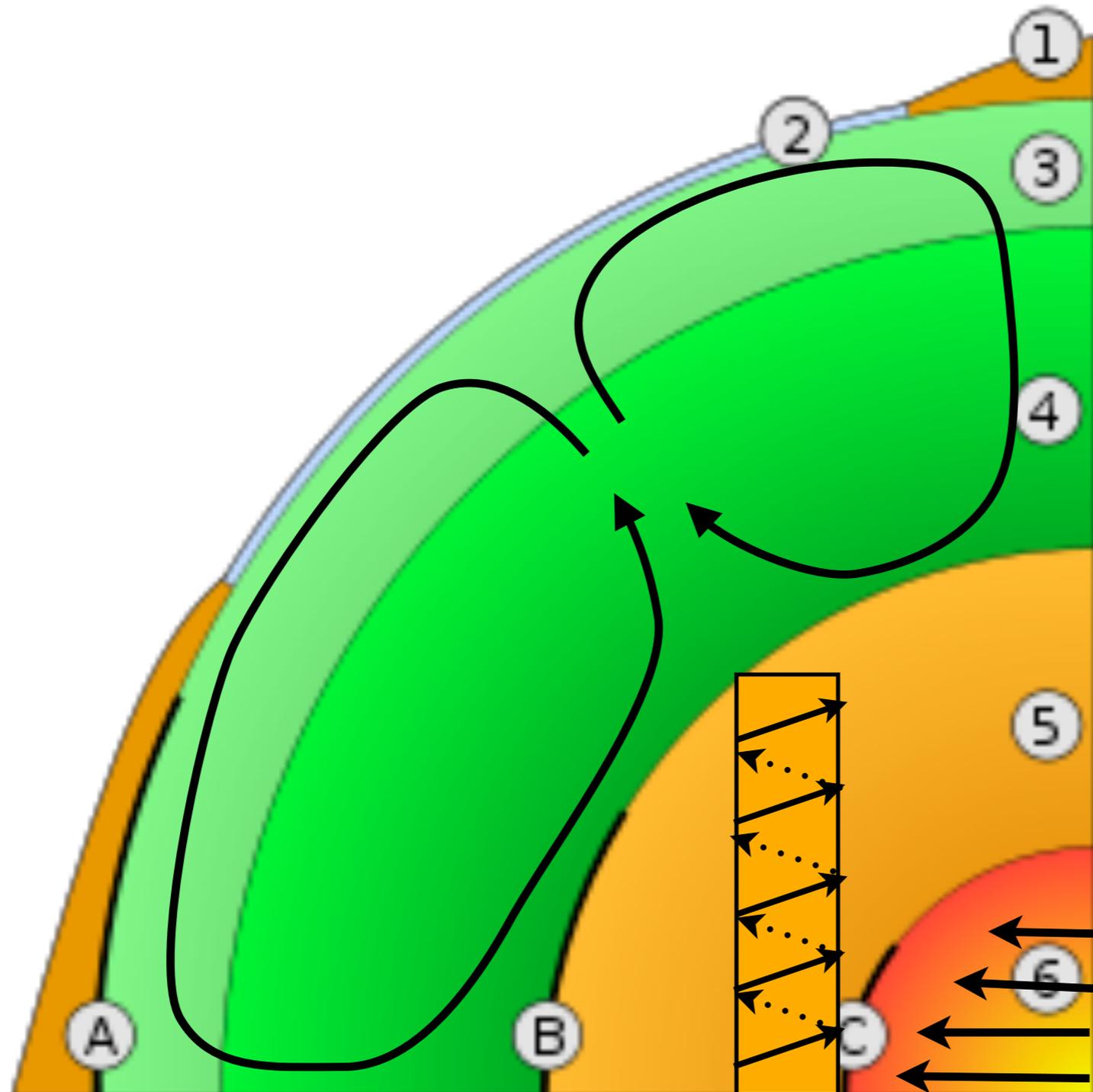
Un manteau qui convecte en cellules



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

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

ps: le soleil fournit 3000 fois plus d'énergie

