

Anisotropie sismique et écoulement dans le manteau terrestre

□

1- Introduction

Barbara Romanowicz
Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre
Collège de France
4 Octobre 2016

Colloque associé au cours:



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

CHAIRE DE PHYSIQUE DE L'INTÉRIEUR
DE LA TERRE

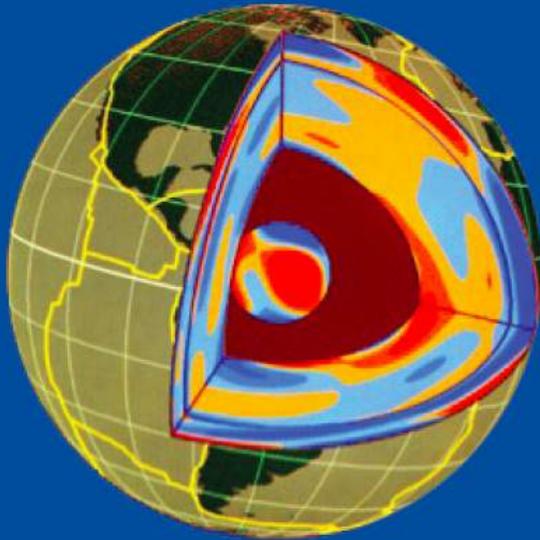
Année académique 2016-2017

Pr Barbara ROMANOWICZ

Flow in the deep Earth

**Colloque en anglais - Workshop in English
organisé avec Patrick Cordier, Université de Lille**

Jeudi 1^{er} et vendredi 2 décembre 2016
Amphithéâtre Maurice Halbwachs

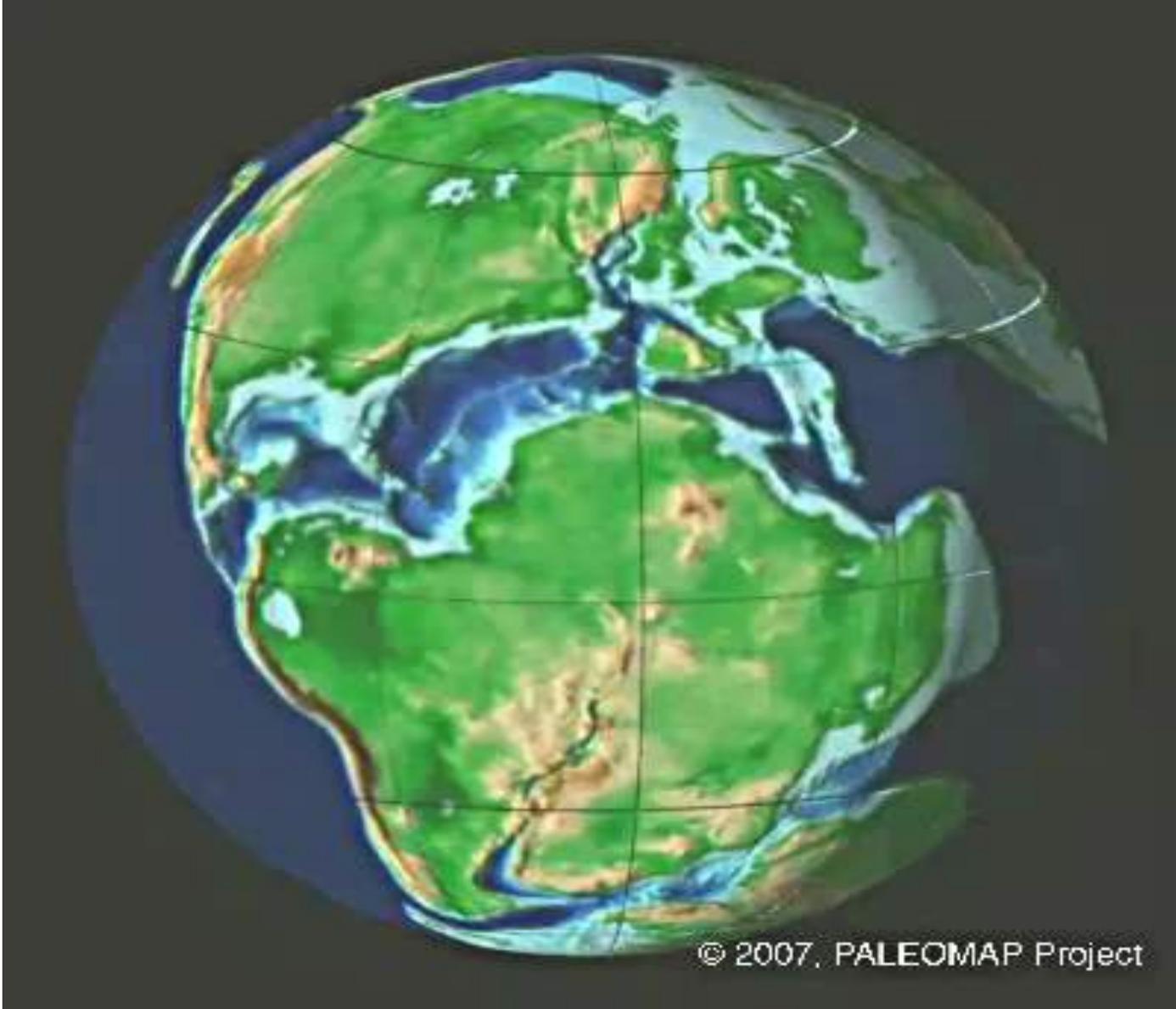


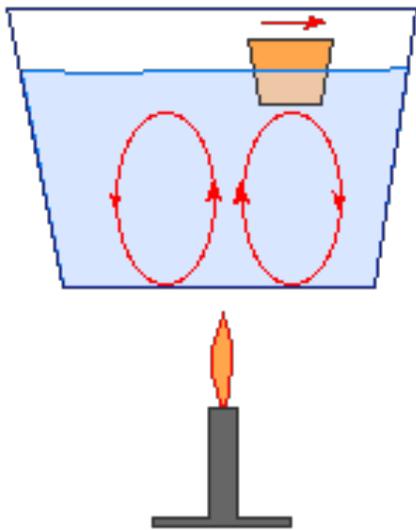
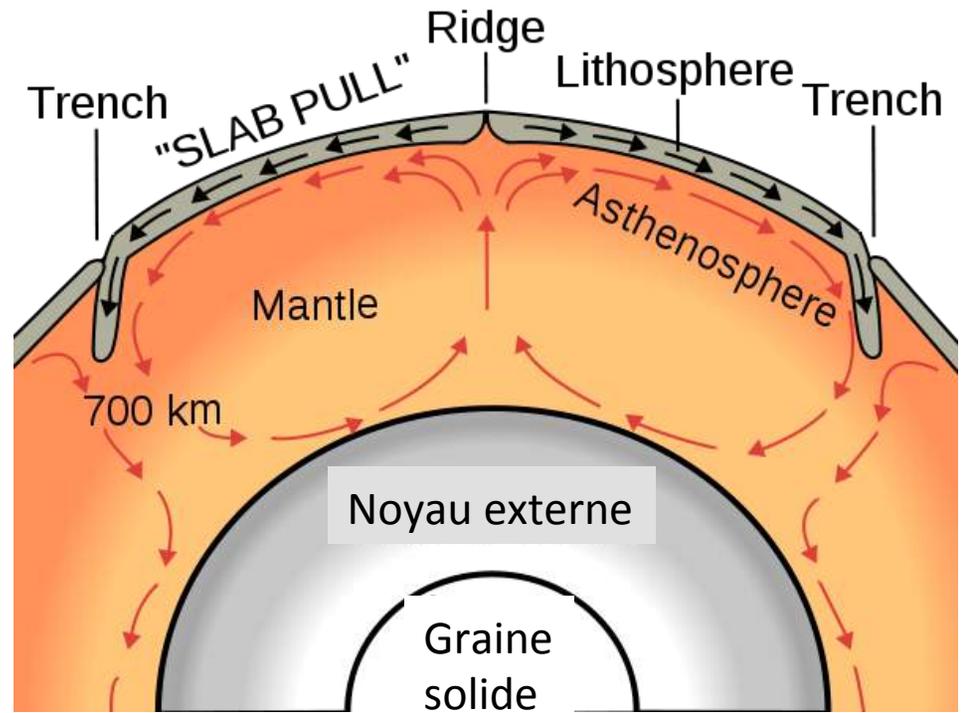
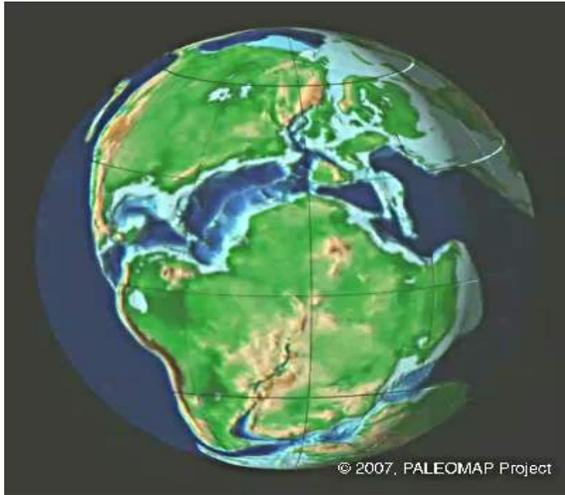
1er et 2 Décembre 2016, 9h à 18h
Amphithéâtre Maurice Halbwachs

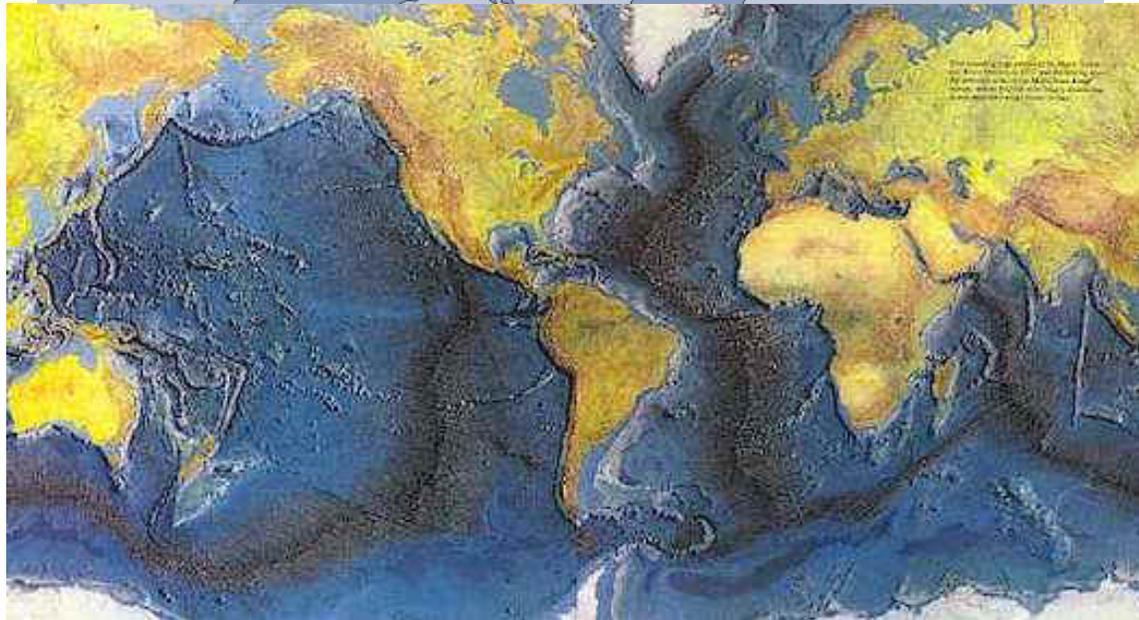
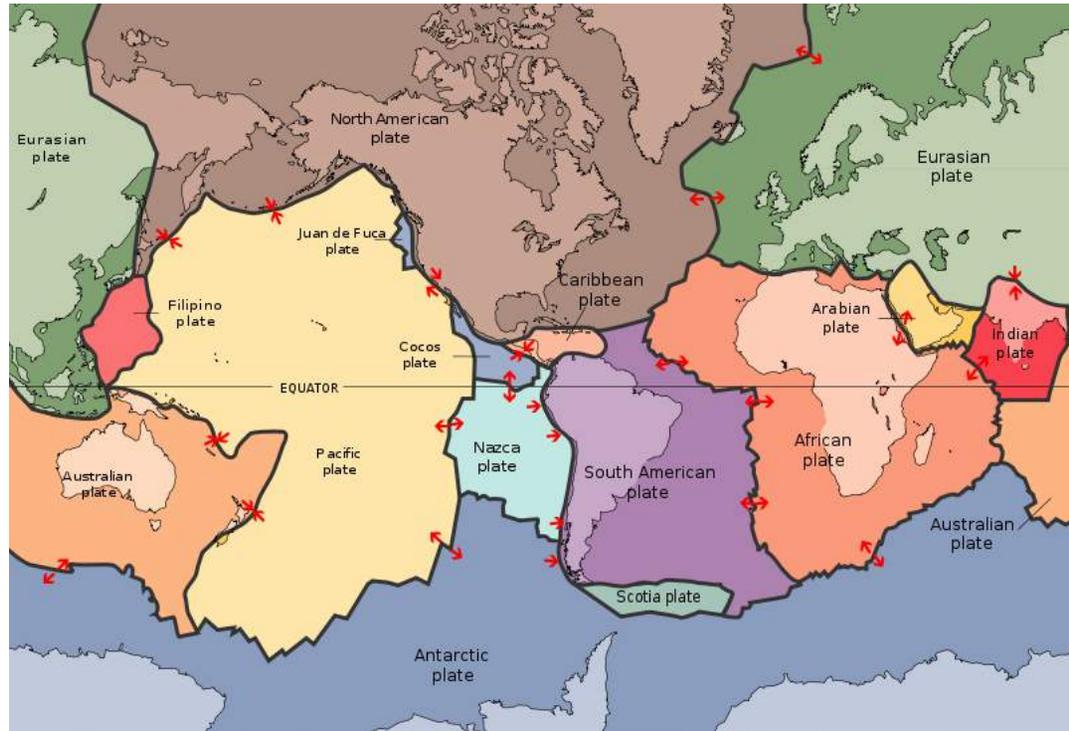
Plan et calendrier du cours:

Les mardis 4,18,25 Octobre 15,22,29 Novembre 2016 – 16h00:17h30
Amphithéâtre Halbwachs

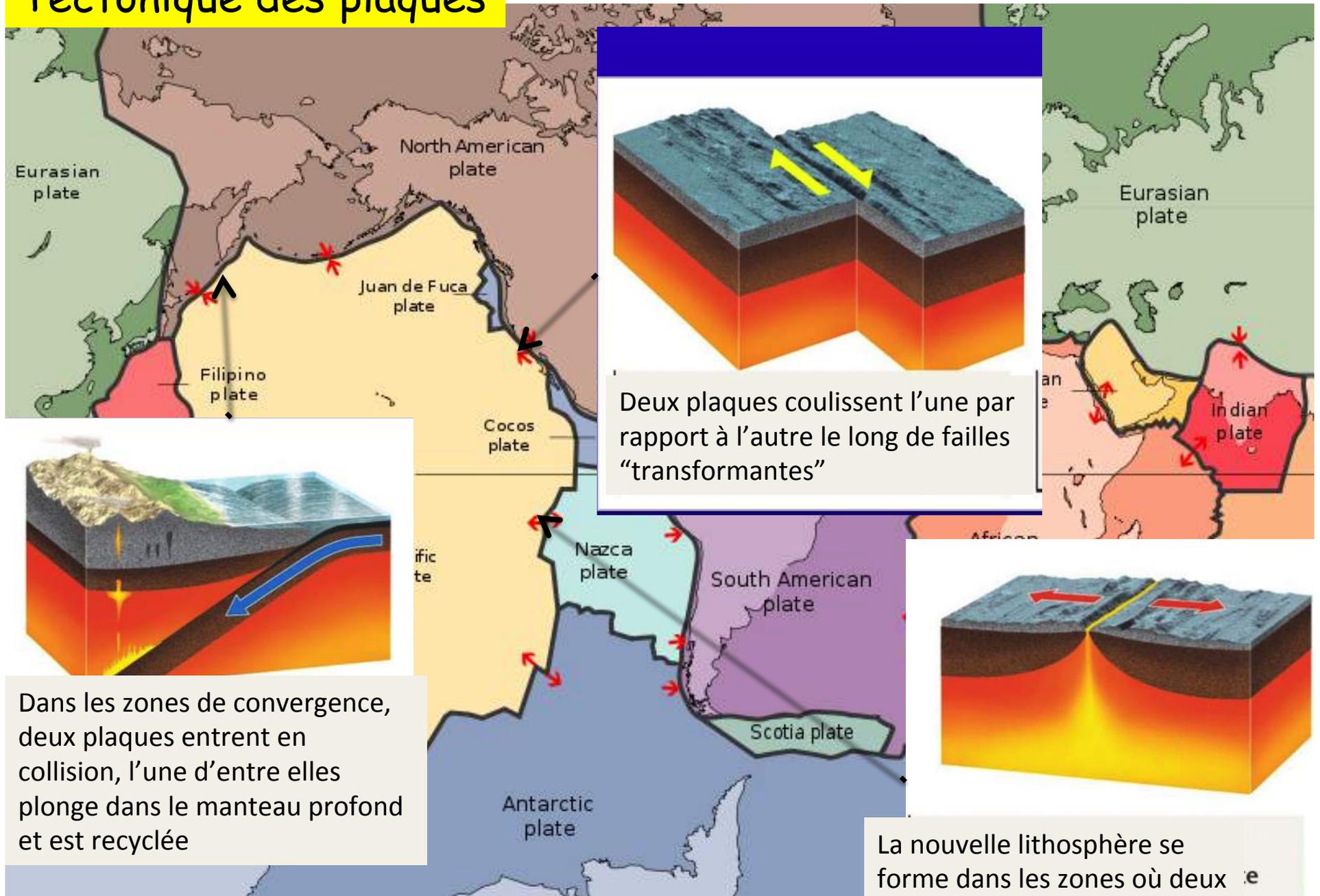
- 4 X 2016: Introduction:
 - Tectonique des plaques
 - Structure interne de la Terre
- 18 X et 25 X 2016: Le manteau supérieur:
 - Anisotropie sismique, minéralogie et dynamique
- 15 XI et 22 XI 2016: Le manteau inférieur:
 - Anisotropie sismique, minéralogie
- 29 XI 2016: Dynamique du manteau profond: une approche multidisciplinaire







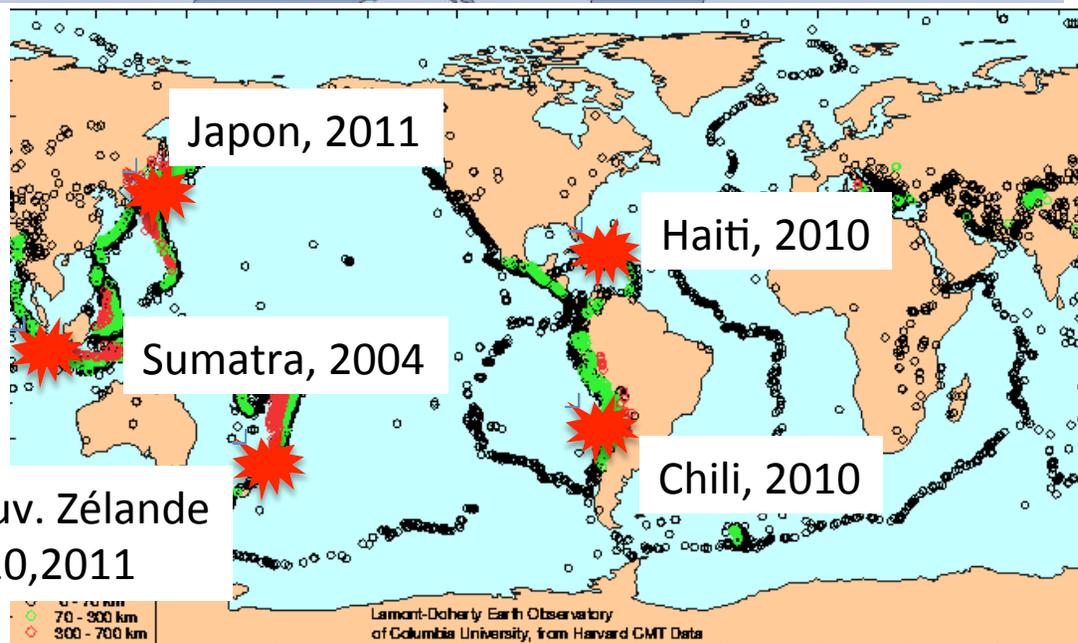
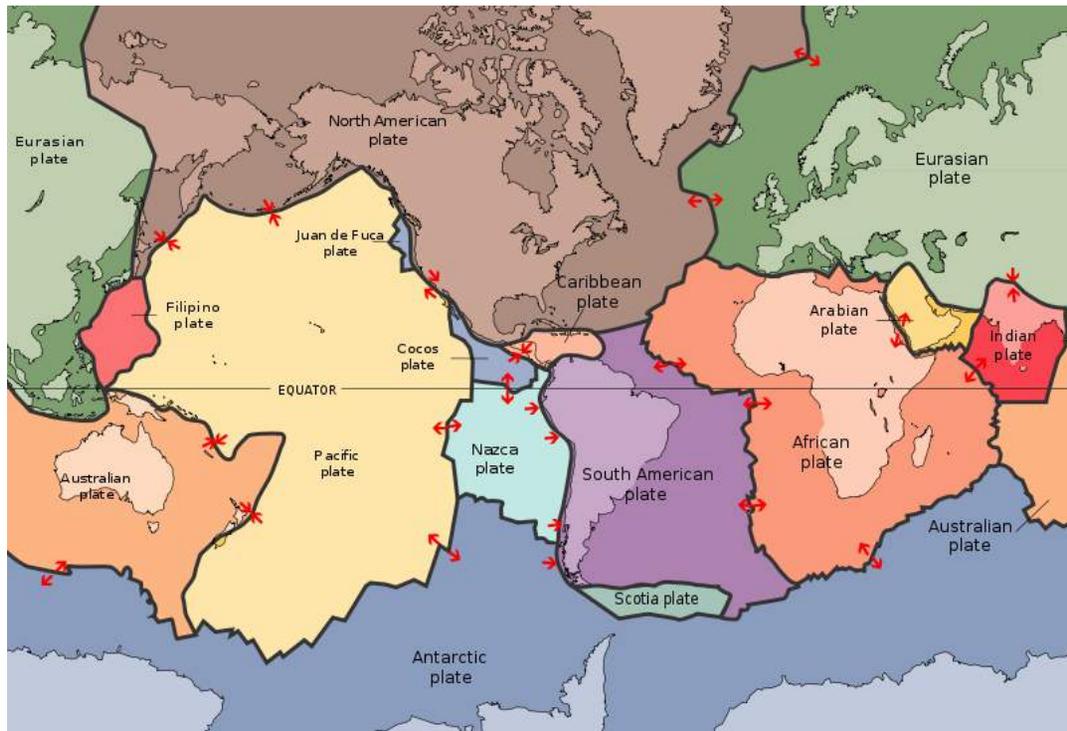
Tectonique des plaques

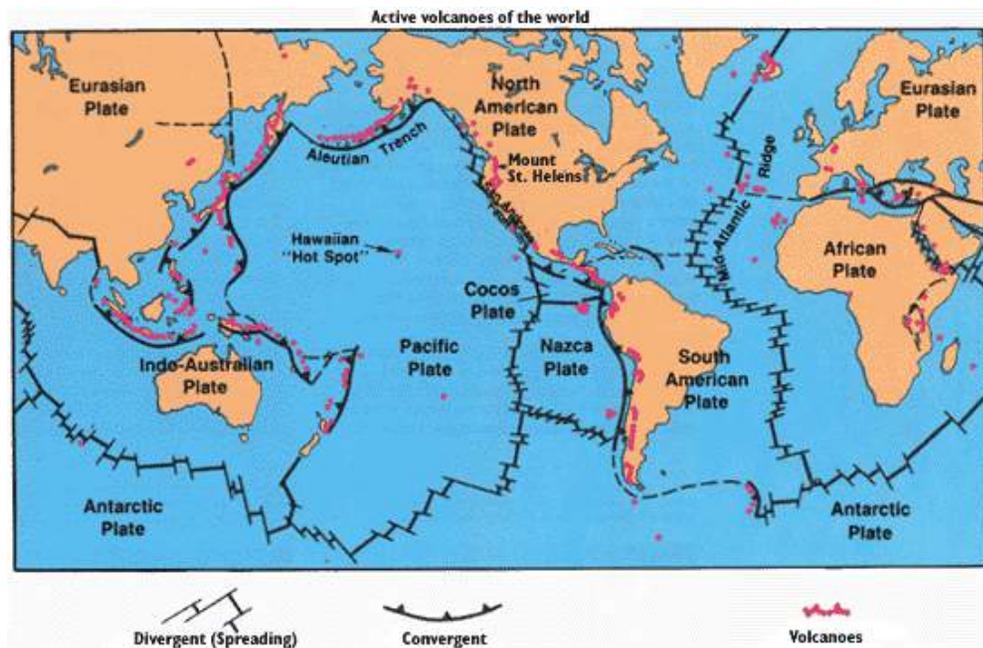
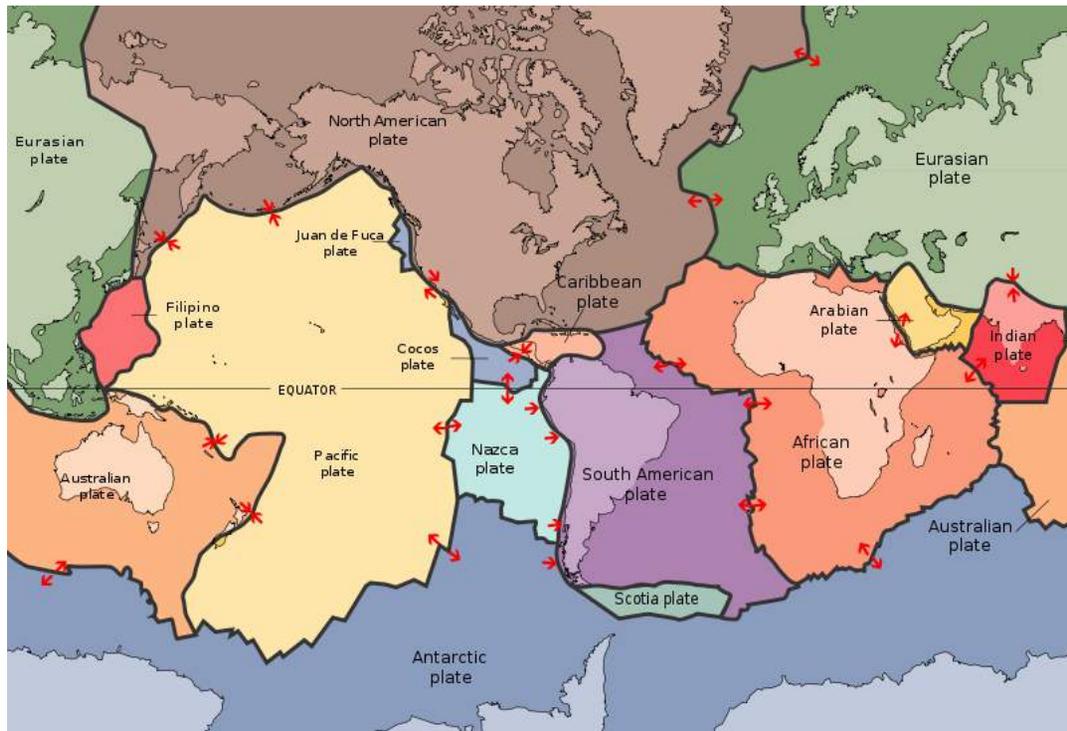


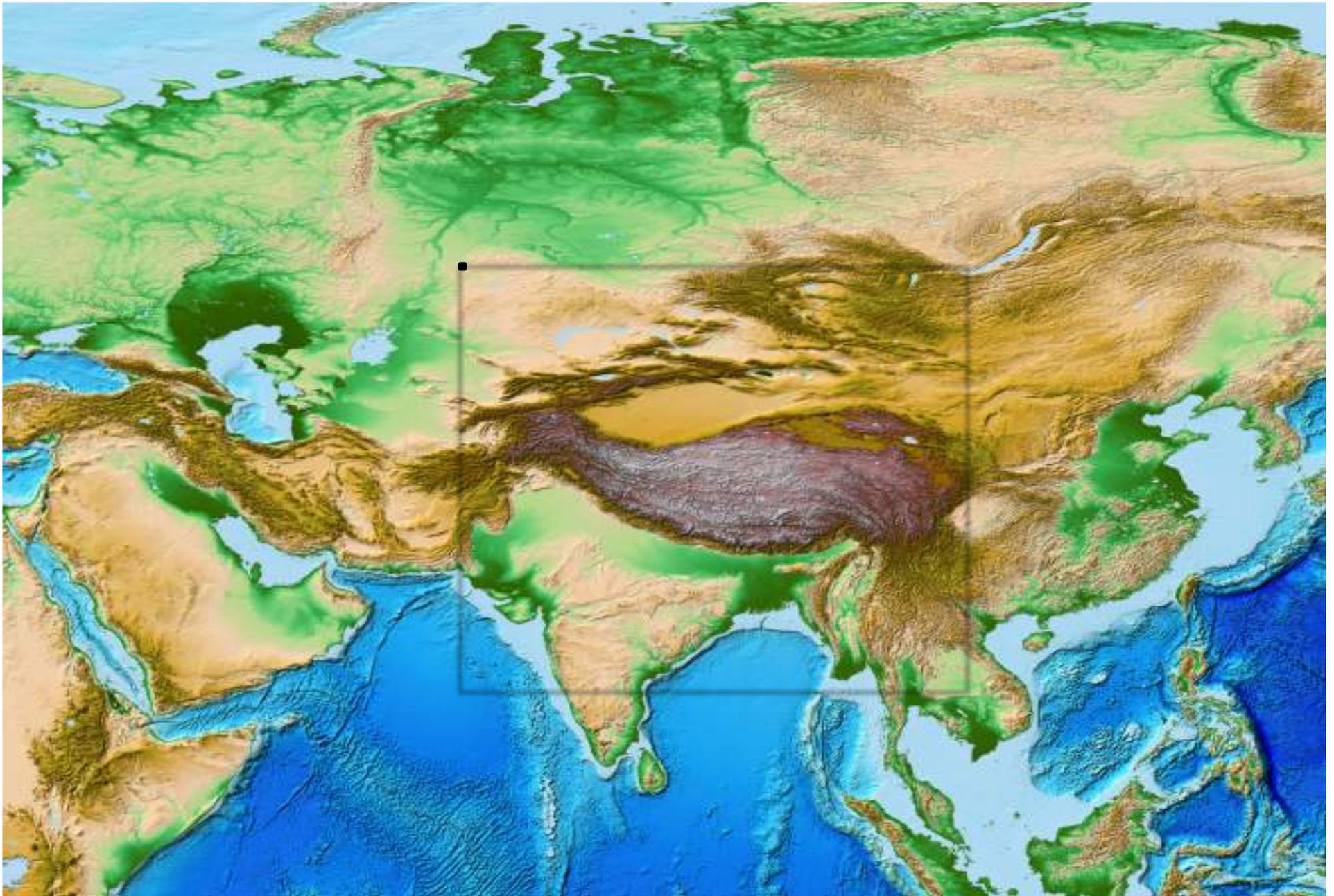
Deux plaques coulisent l'une par rapport à l'autre le long de failles "transformantes"

Dans les zones de convergence, deux plaques entrent en collision, l'une d'entre elles plonge dans le manteau profond et est recyclée

La nouvelle lithosphère se forme dans les zones où deux plaques s'écartent (dorsales),

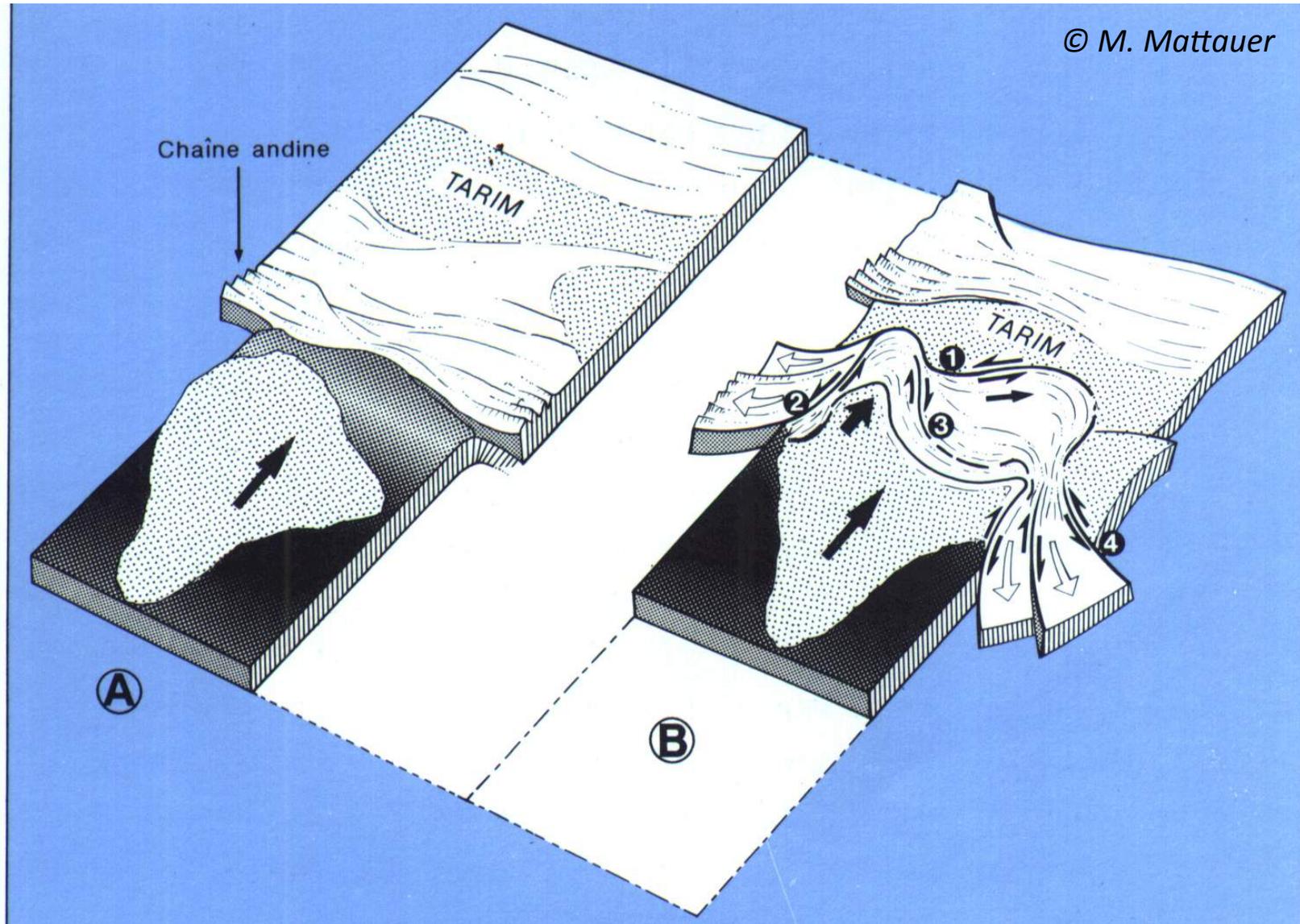




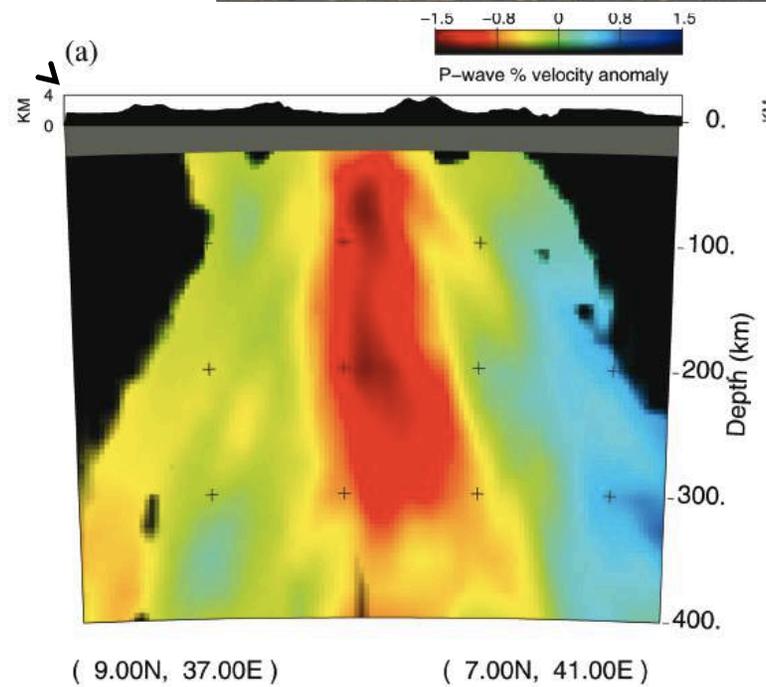


Topographie de l'Eurasie

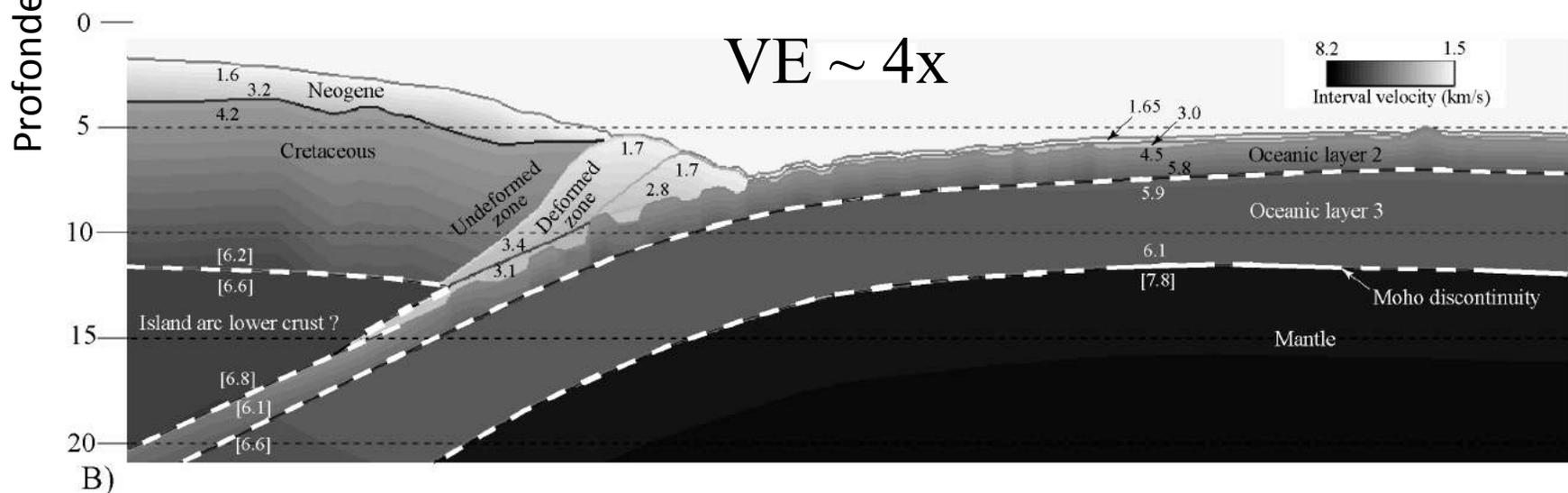
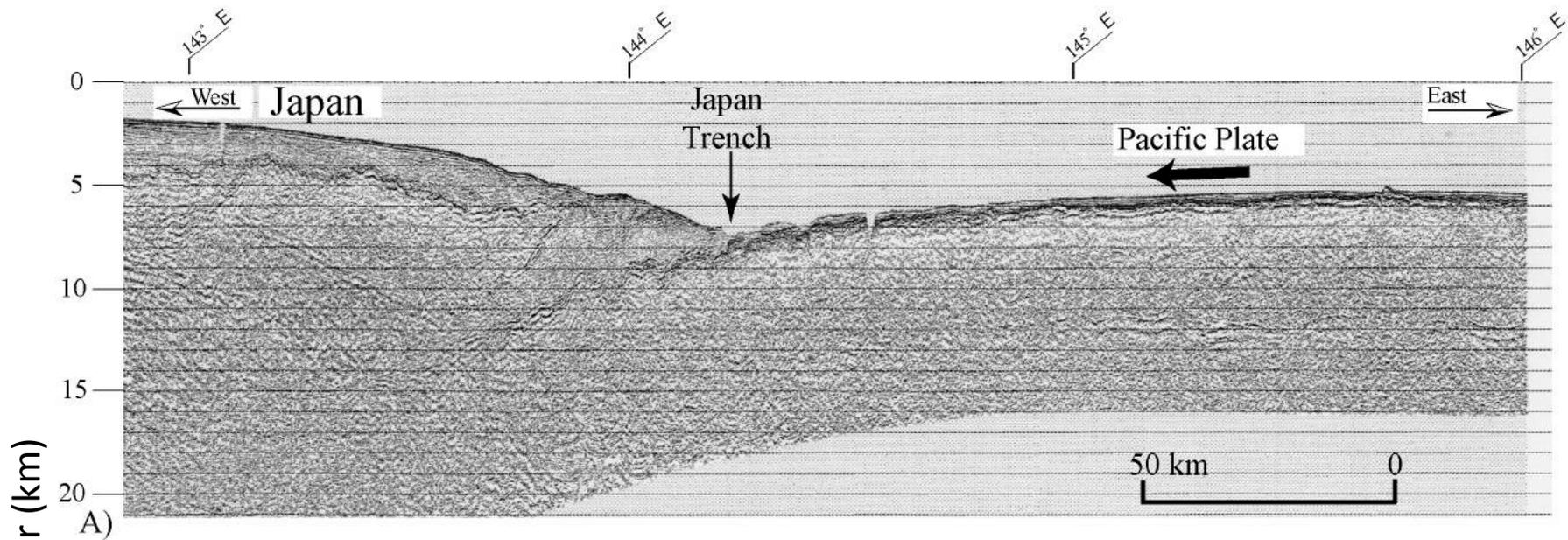
Déformation de la lithosphère au cours de la collision continentale Inde-Eurasie



Déformation sur une dorsale continentale: rift Est-Africain



Déformation au cours de la subduction

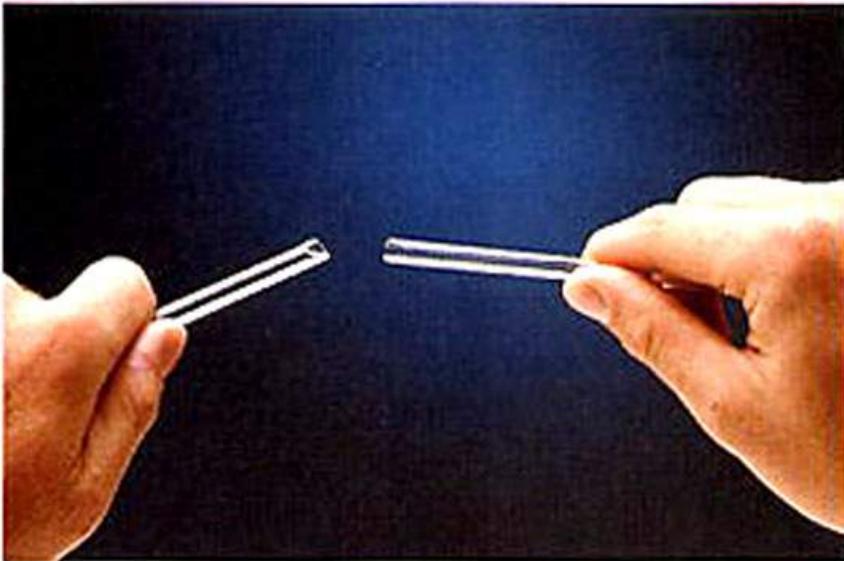


Faille de San Andreas (Californie) - Carrizo Plain





La température a un effet important sur les propriétés de déformation des roches



A froid: une barre de verre se fracture et se casse



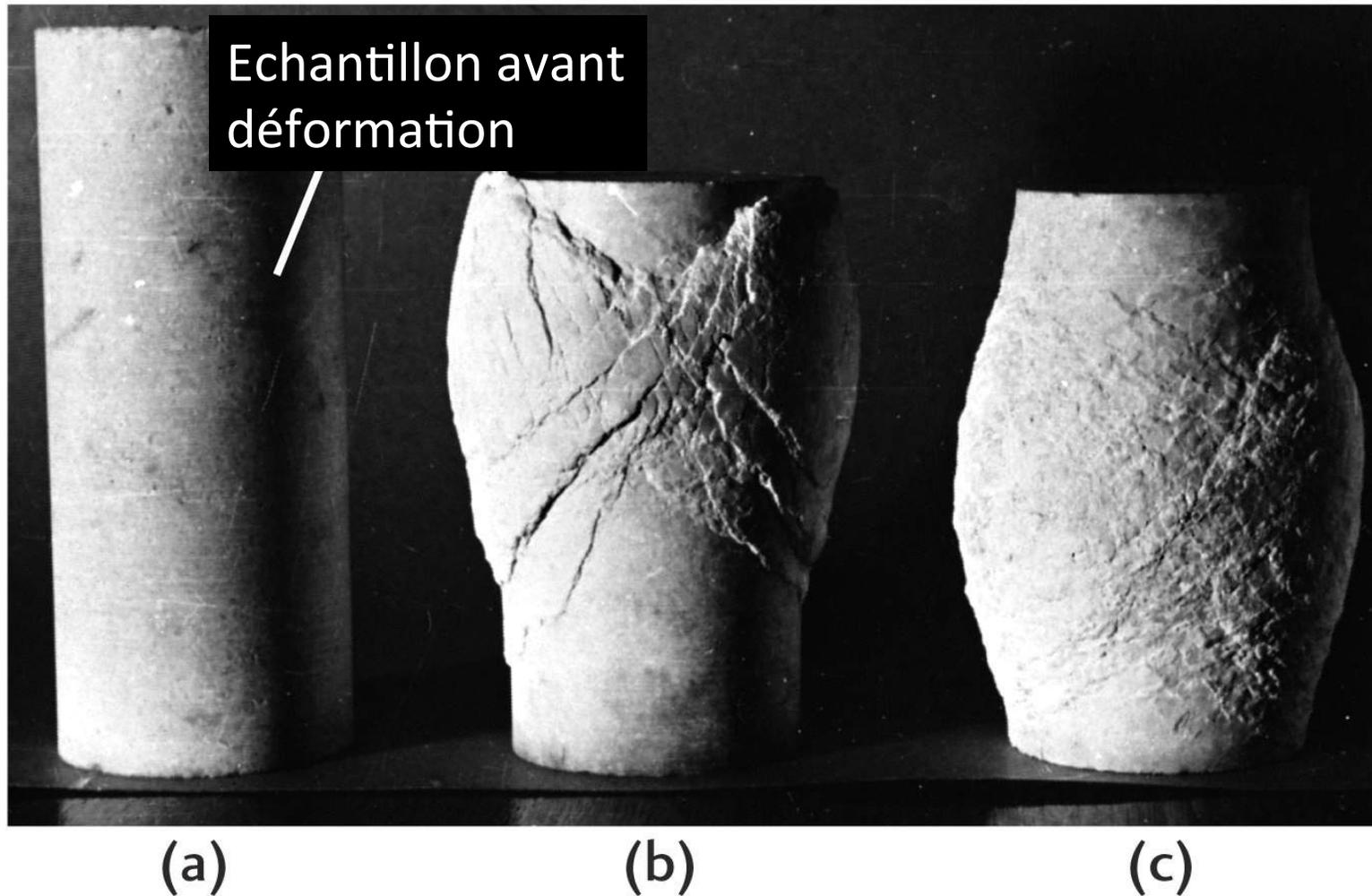
A chaud: elle se déforme de manière plastique mais ne casse pas

Marbre déformé sous torsion

Paterson apparatus, ETH, Burlini

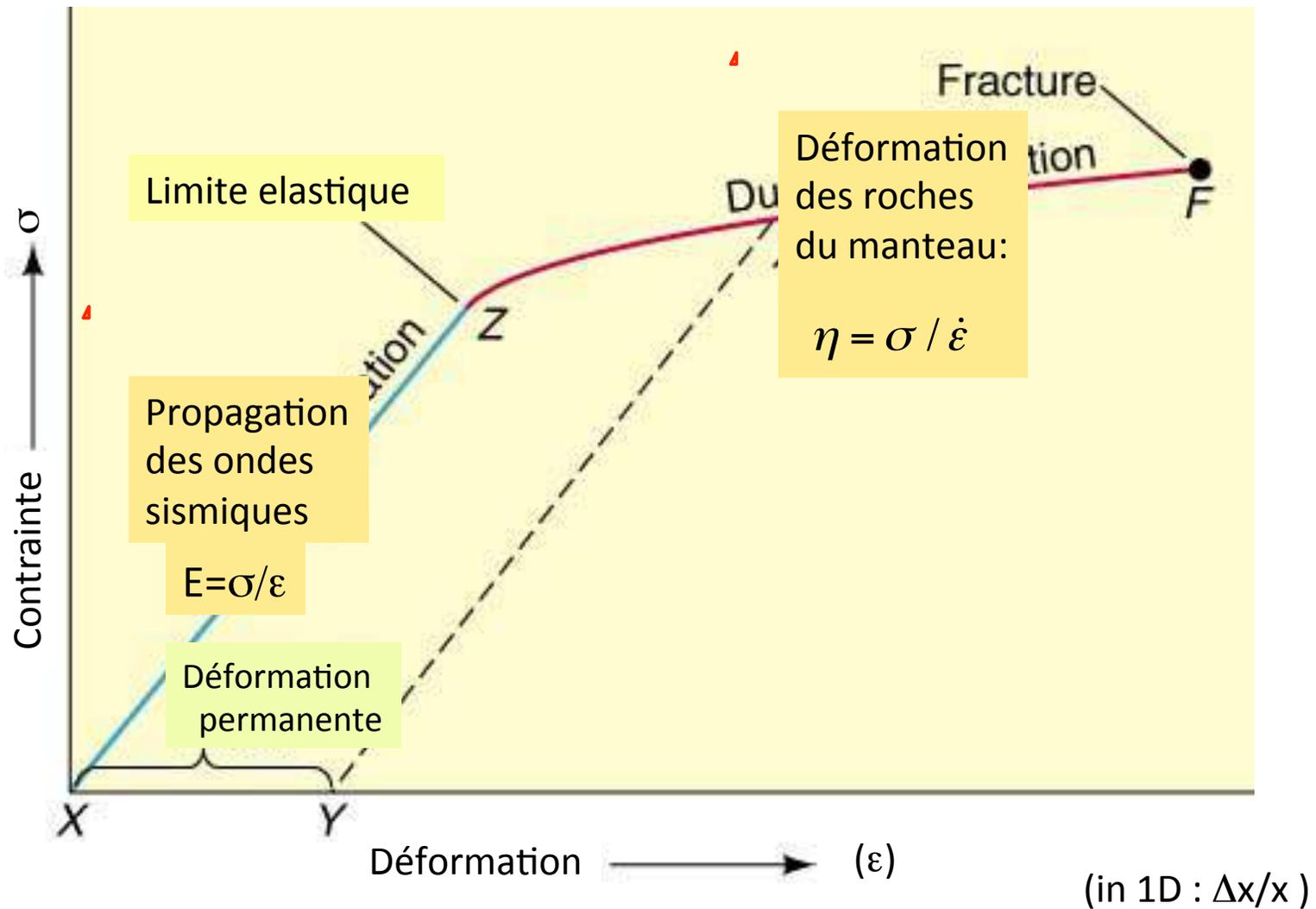


La pression ambiante a aussi des effets importants:



Si on applique une pression uniaxiale à un échantillon de roche à pression ambiante: (b) -> celle-ci se fracture
A haute pression ambiante (c), la déformation est plastique

Déformation élastique et plastique(ductile)



Lorsque la limite élastique est atteinte, la déformation est permanente même si la contrainte appliquée est annulée

Déformation visco-élastique

- Déformation élastique dans les solides:

- Contraintes faibles et temps courts: déformation instantanée:
 - *Passage des ondes sismiques*
- Lorsque la contrainte est supprimée, la roche revient à son état initial
- Loi de Hooke: déformations (ϵ) proportionnelles aux contraintes (σ)
- Constantes élastiques (E):

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

1D: $\epsilon = dL/L$

3D: $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$

σ et ϵ sont des tenseurs de second ordre et le tenseur des constantes élastiques est de 4e ordre. Dans le cas général, il y a 21 constantes indépendantes
 σ Unité: le Pascal (Pa)

• Relation linéaire entre ϵ et σ !!

Déformation visco-élastique

Déformation visco-élastique:

- Contraintes fortes ou contraintes faibles pendant un temps long
- La déformation est graduelle, la roche ne revient pas à son état initial

- Convection dans le manteau terrestre
- Déformation de la lithosphère
- Viscosité:

$$\eta = \frac{\sigma}{2\dot{\epsilon}}$$

Unités: Pa-s (η = constante dans un fluide "Newtonien")

- Lois de fluage: $\frac{d\epsilon}{dt} = A\sigma^n d^{-m} \exp[-(E + PV^*) / RT]$

- Régime des "dislocations": $m=0$

- Régime de la "diffusion": $n=1$ et $m=2$ ou 3

T: température
P: pression
A: constante
d: taille des grains

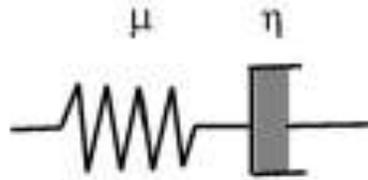
– Temps de Maxwell:

- Temps caractéristique qui détermine le comportement (élastique aux temps courts, visqueux aux temps longs):

$$\tau = \frac{\eta}{\mu}$$

· η Viscosité
· μ > Module élastique

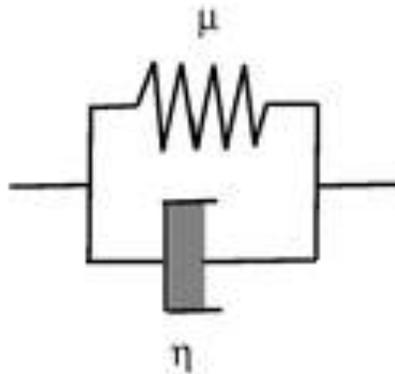
(a) Maxwell model



Comportement visqueux:

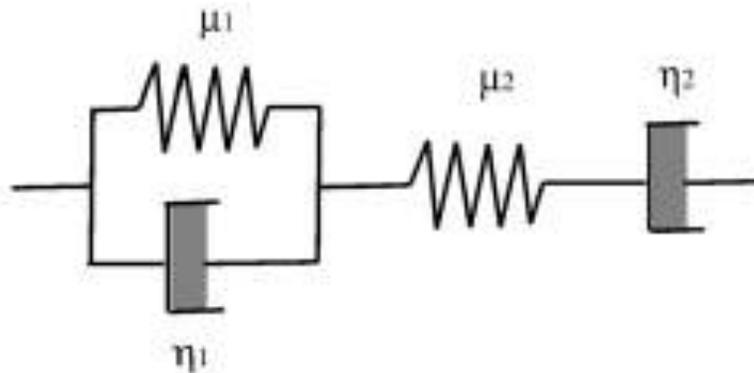
$$\tau \gg t_M$$

(b) Kelvin-Voigt model



$$\tau \geq t_M$$

(c) Burgers model



Passage du fluage
transitoire au régime
stationnaire

Dans la terre: distribution
de temps caractéristiques

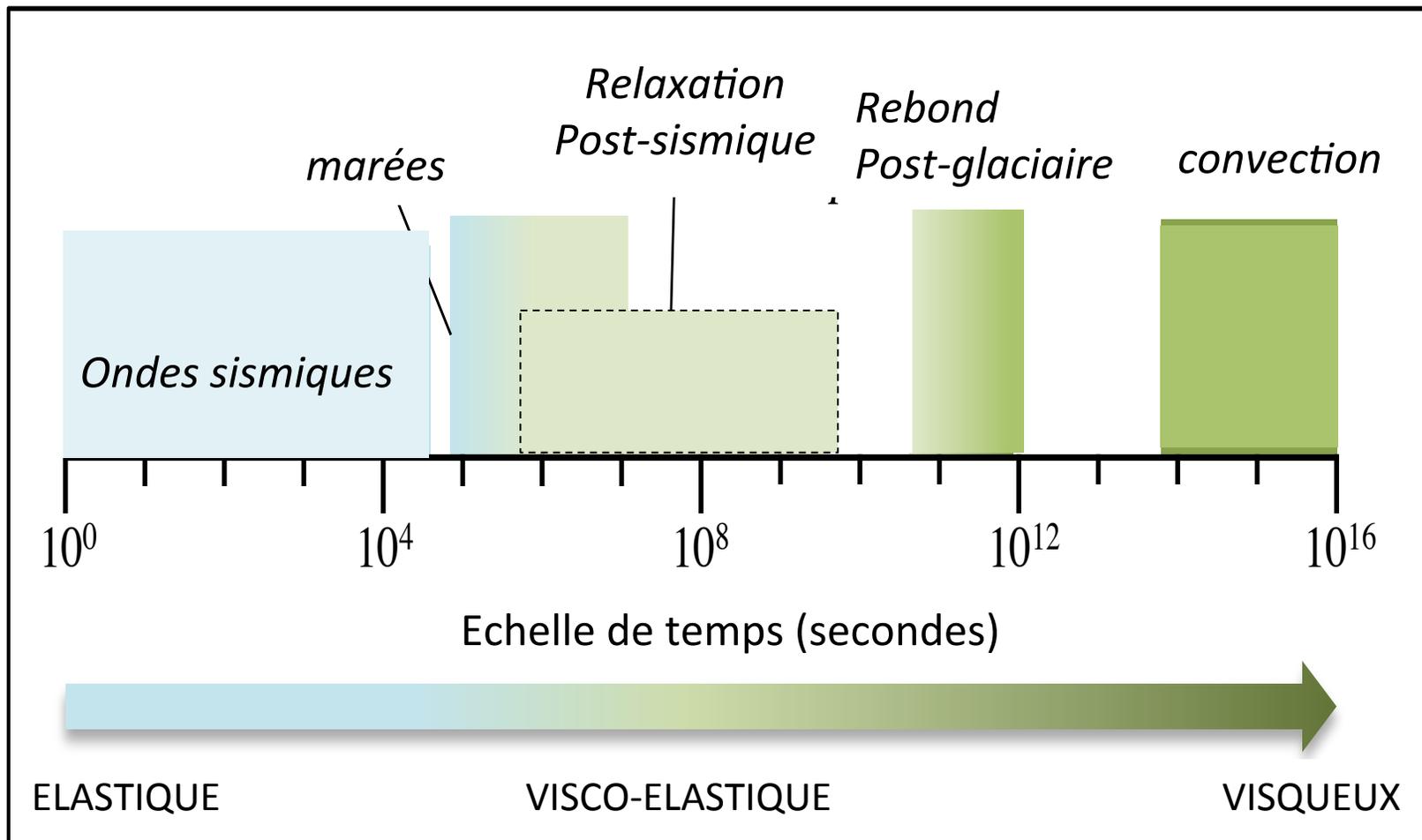
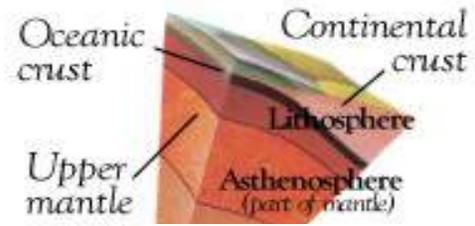
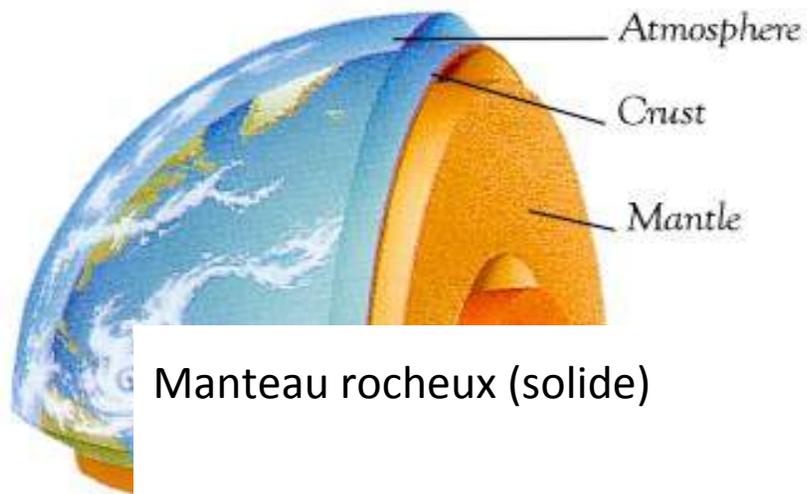


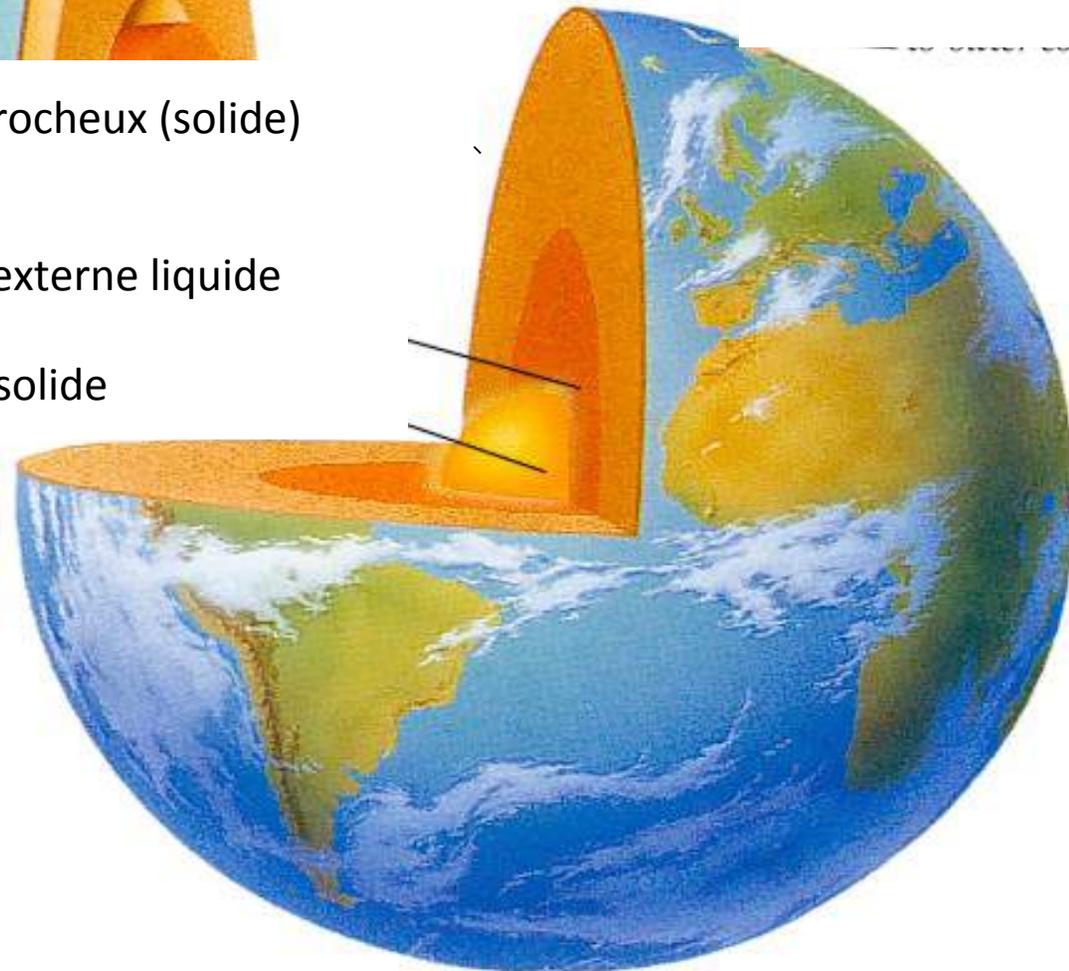
Figure: courtesy Harriet Lau



Manteau rocheux (solide)

Noyau externe liquide

Graine solide



VOYAGE AU CENTRE

DE

LA TERRE

PAR

JULES VERNE

AUTEUR DE CINQ SEMAINES EN BALLON

SEPTIÈME ÉDITION



BIBLIOTHÈQUE
Alfred P. Pinche
SAN FRANCISCO

PARIS

BIBLIOTHÈQUE
D'ÉDUCATION ET DE RÉCRÉATION

J. HETZEL, 18, RUE JACOB

1864

Tous droits réservés.



Jules Verne, Planche 30: ...Je m'imaginai voyager à travers un diamant... (1864)

— En effet, & voilà un fait que la science n'a pas soupçonné.

— La science, mon garçon, est faite d'erreurs, mais d'erreurs qu'il est bon de commettre, car elles mènent peu à peu à la vérité.

— Et à quelle profondeur sommes-nous ?

— A une profondeur de trente-cinq lieues.

Kola 1970-1989 – profondeur: 12.3 km
Photographié en 2007

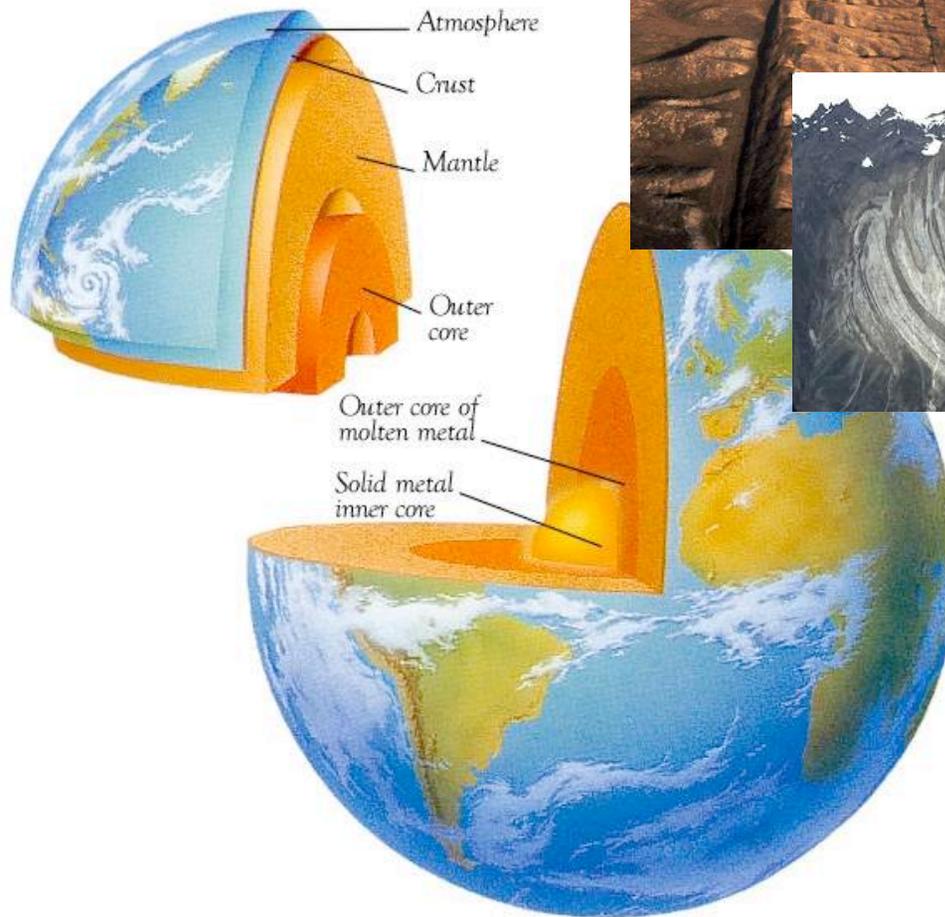


Rayon de la terre: 6,371 km

Comment étudier la déformation à l'intérieur du manteau?

- Pas ou très peu d'observations directes- méthodes indirectes:
 - Sismologie (imagerie)
 - Nature et propriétés de déformation des minéraux du manteau
 - Géodynamique
 - Gravité/géodésie → viscosité

Observations directes deviennent de plus en plus rares plus la profondeur est grande...



*Profondeurs <10 km
Beaucoup d'observations*



*Déjà moins pour la
croûte intermédiaire
et profonde*

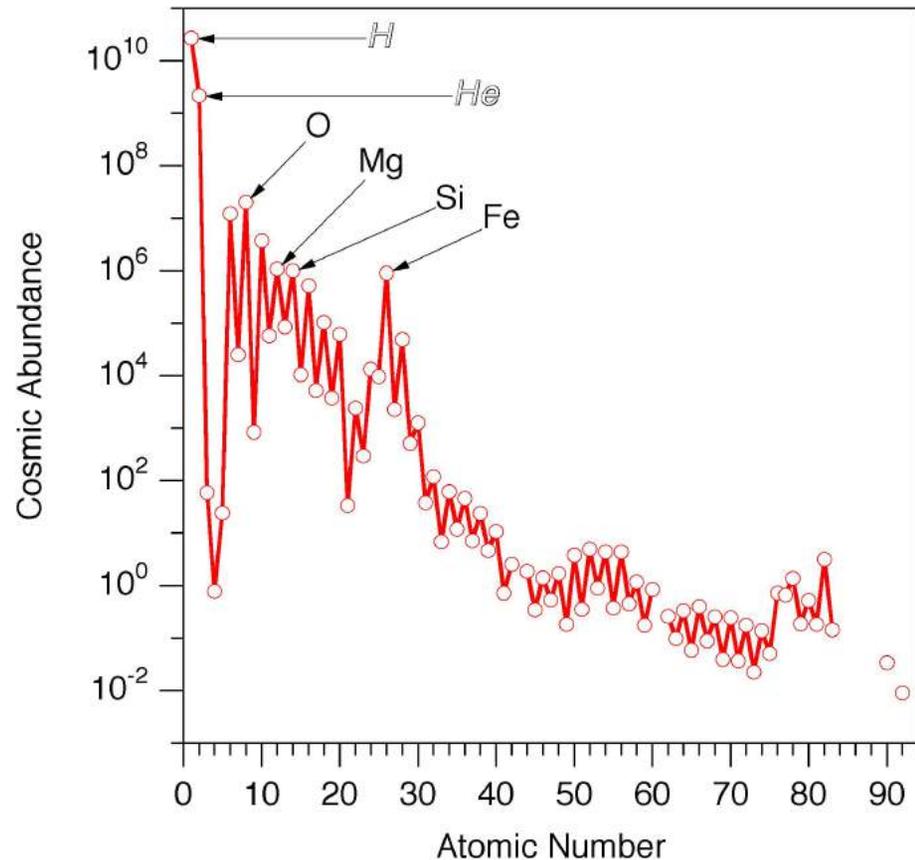


*Rare pour la
lithosphère et le
manteau supérieur*



Composition de l'intérieur de la Terre

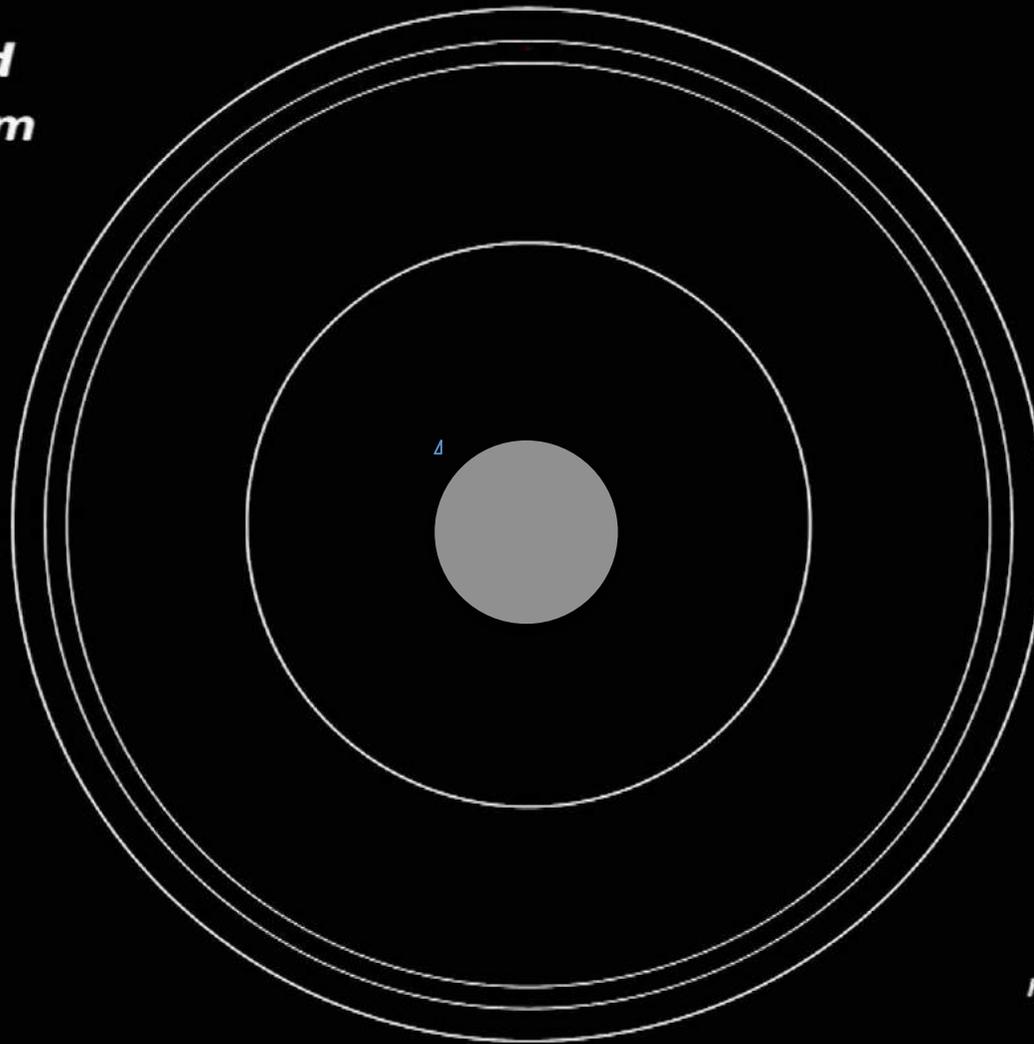
- Informations extra-terrestres:
 - Nucléosynthèse
 - Météorites
- Observations à la surface
 - Xénolithes
 - Sources des magmas
- à l'intérieur de la Terre:
 - Propriétés Physiques
- Importante différenciation:
 - Terre solide-hydrosphère-espace
 - Croûte-manteau-noyau



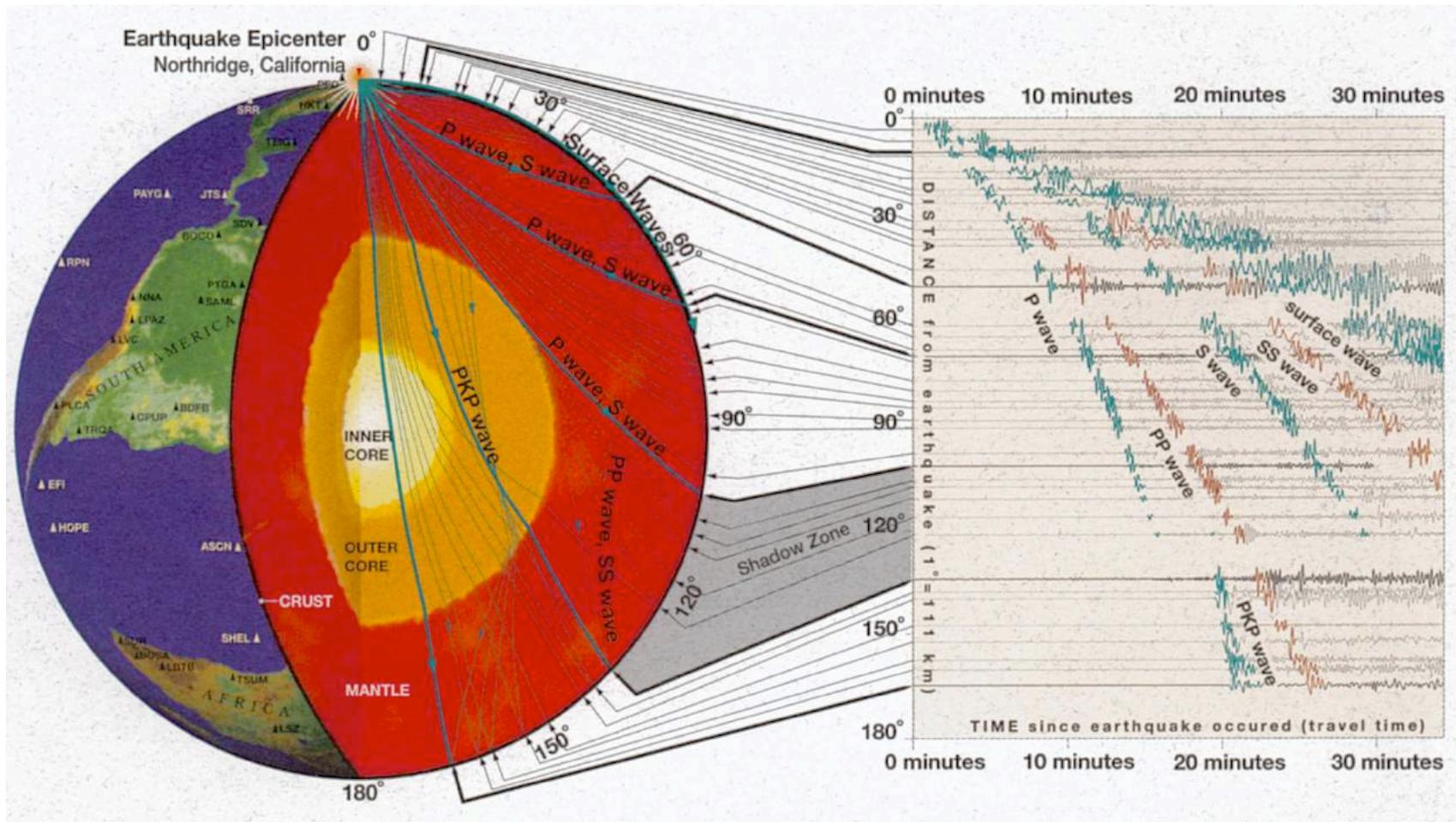
→ Pyrolite/Lherzolite/Peridotite/...

Imagerie sismique

SH-wavefield
Depth: 500 km
T = 15 s



<http://web.utah.edu/thorne>



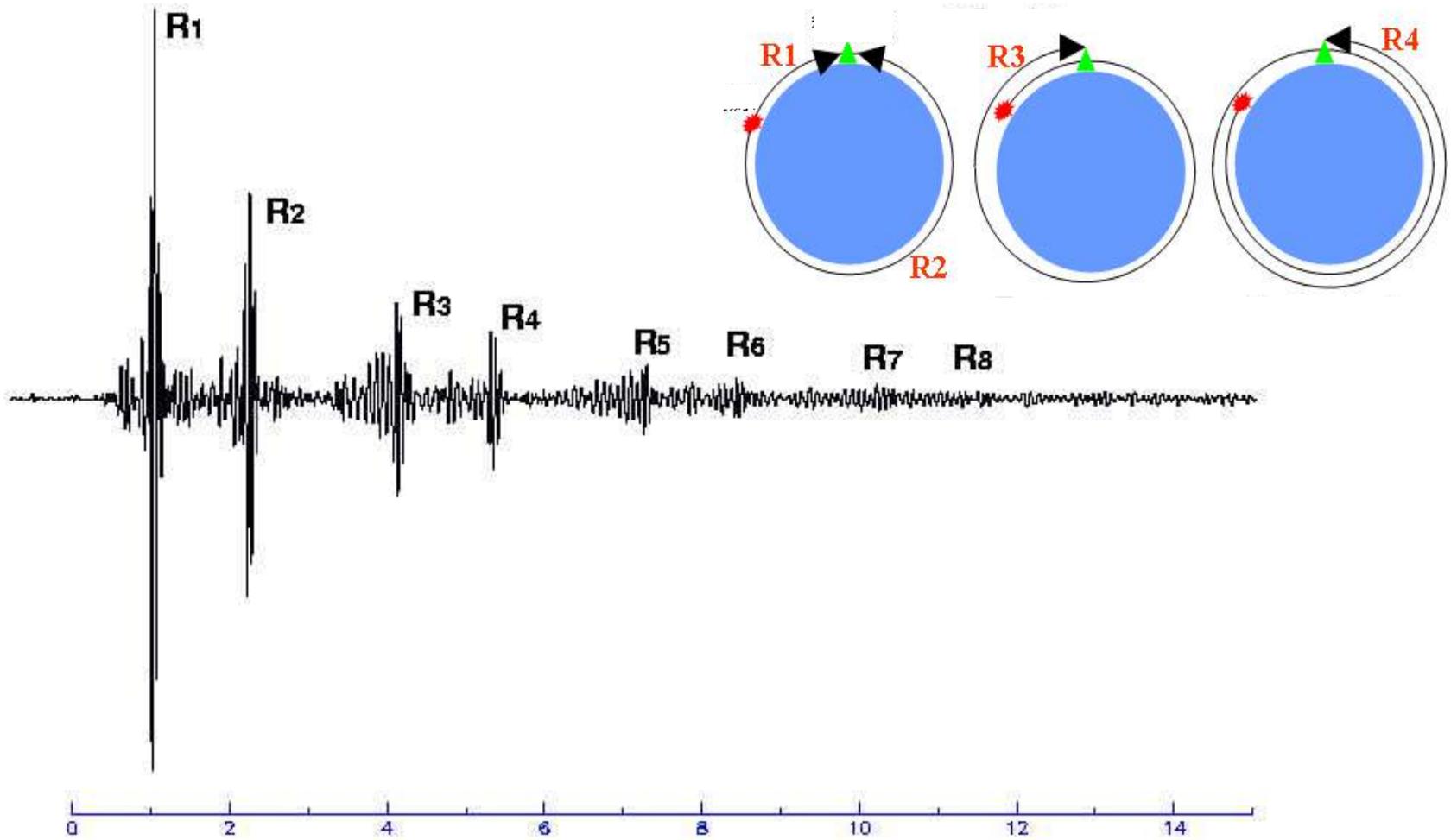
->Les ondes sismiques se propagent à des vitesses différentes suivant la nature du milieu et la température

->Elles se réfléchissent et se réfractent sur les discontinuités de structure, telle la limite noyau-manteau, la surface de la terre, les discontinuités du manteau supérieur

A très longue période → modes propres de la Terre

station: CMB
channel: LHZ

1996/07/11 21:46:39.7 h=15.0km $\Delta=109.7^\circ$ $\phi=32.3^\circ$
Burma-China Border Region Mw=6.8



HEURES

Oscillations propres de la terre engendrées par le séisme de Sumatra du 26 Décembre 2004

M_w 9.2

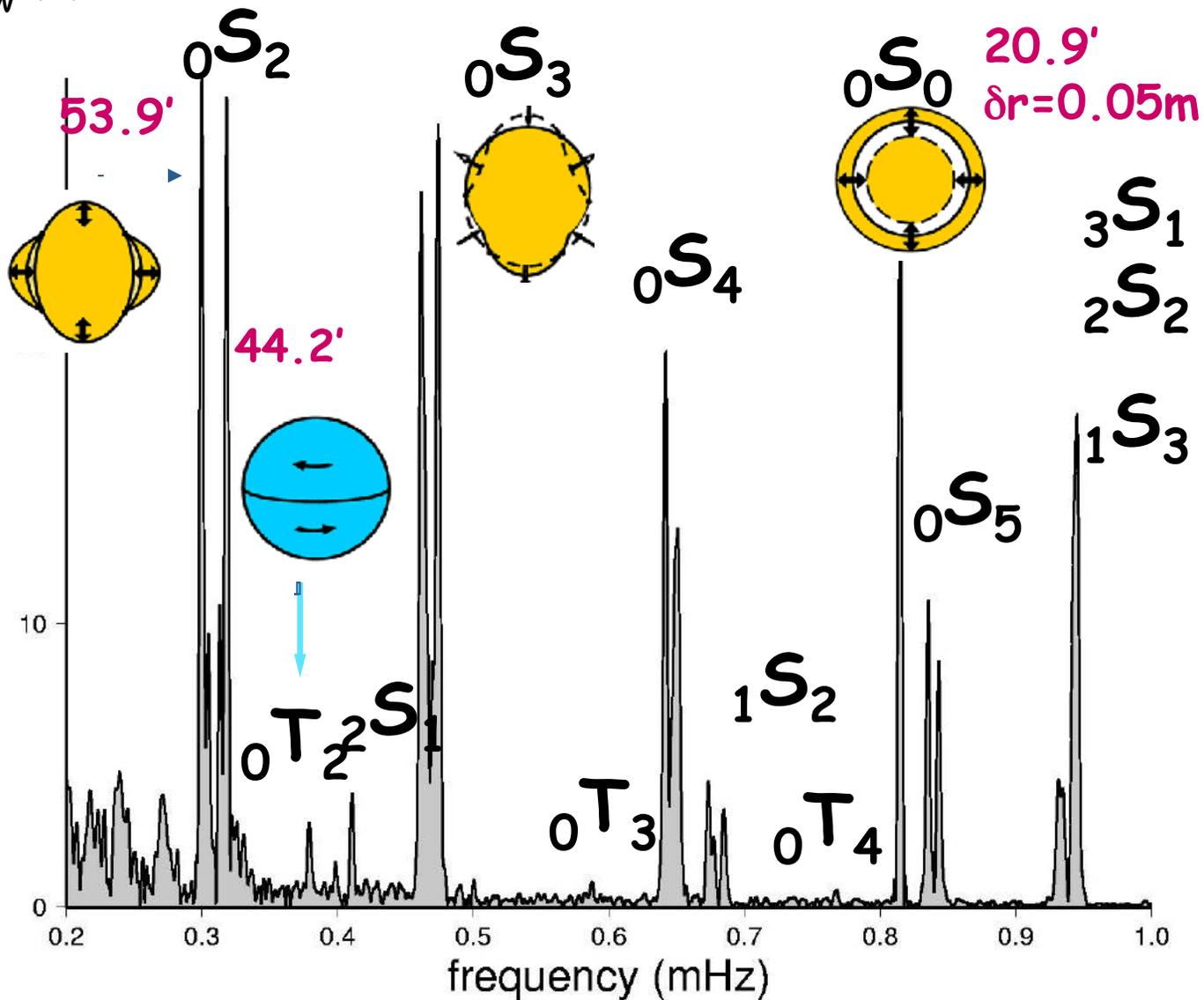
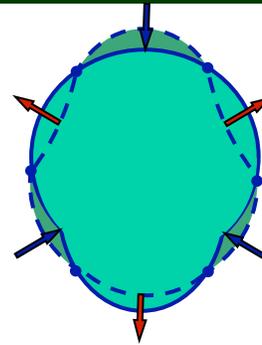
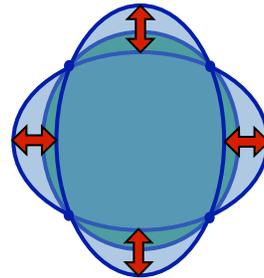
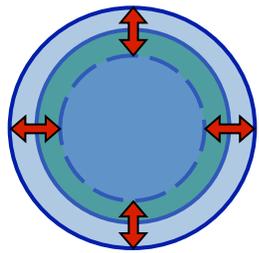
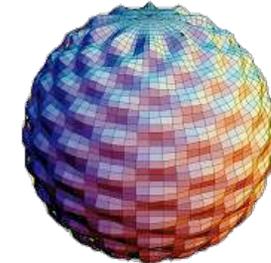


Image: G. Roult, IPG, Paris

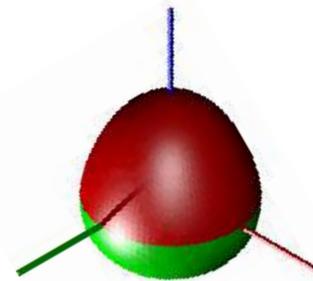
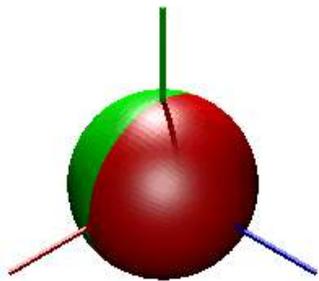
Oscillations propres sphéroïdales: exemples:



...



...



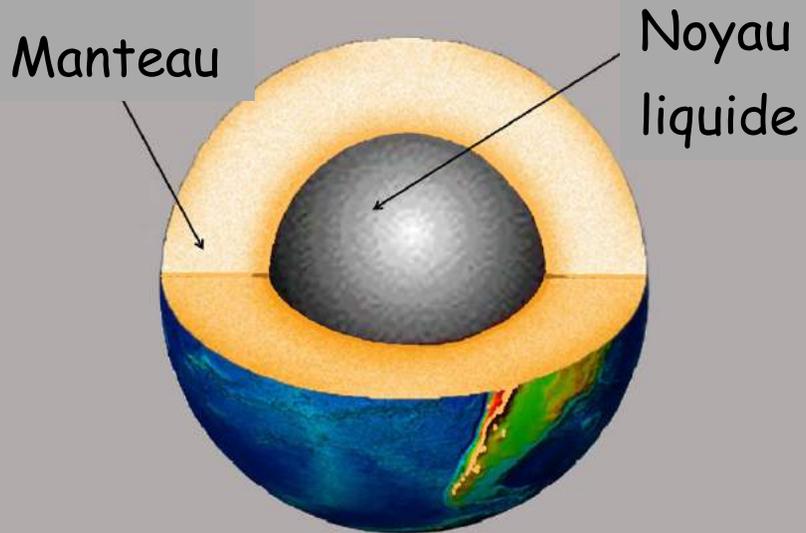
${}_0S_0$: « balloon » or ${}_0S_2$: « football » mode
 « breathing » : (Fundamental, 53.9
 minutes)
 radial only
 (20.5 minutes)

${}_0S_3$:
 (25.7
 minutes)

...

${}_0S_{29}$:
 (4.5 minutes)

Rem: ${}_0S_1$ = translatic

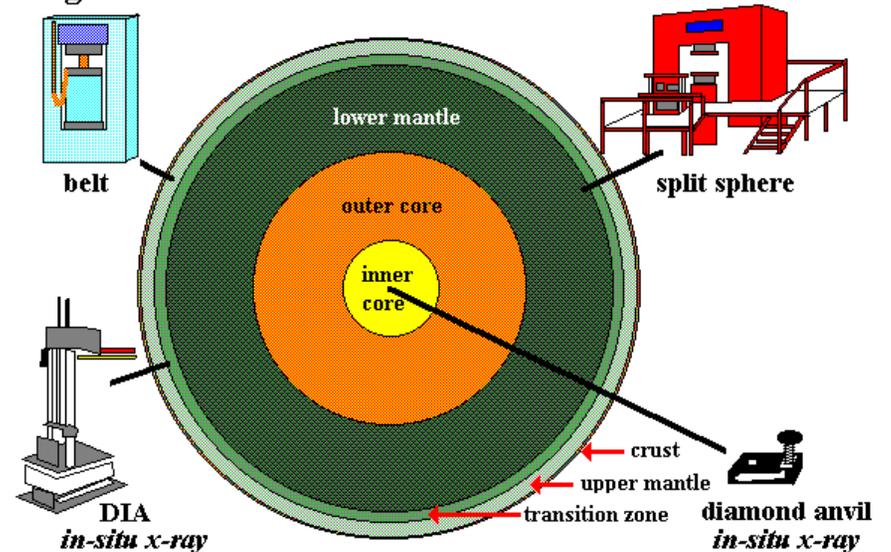


L'intérieur de la terre vue en ~1910

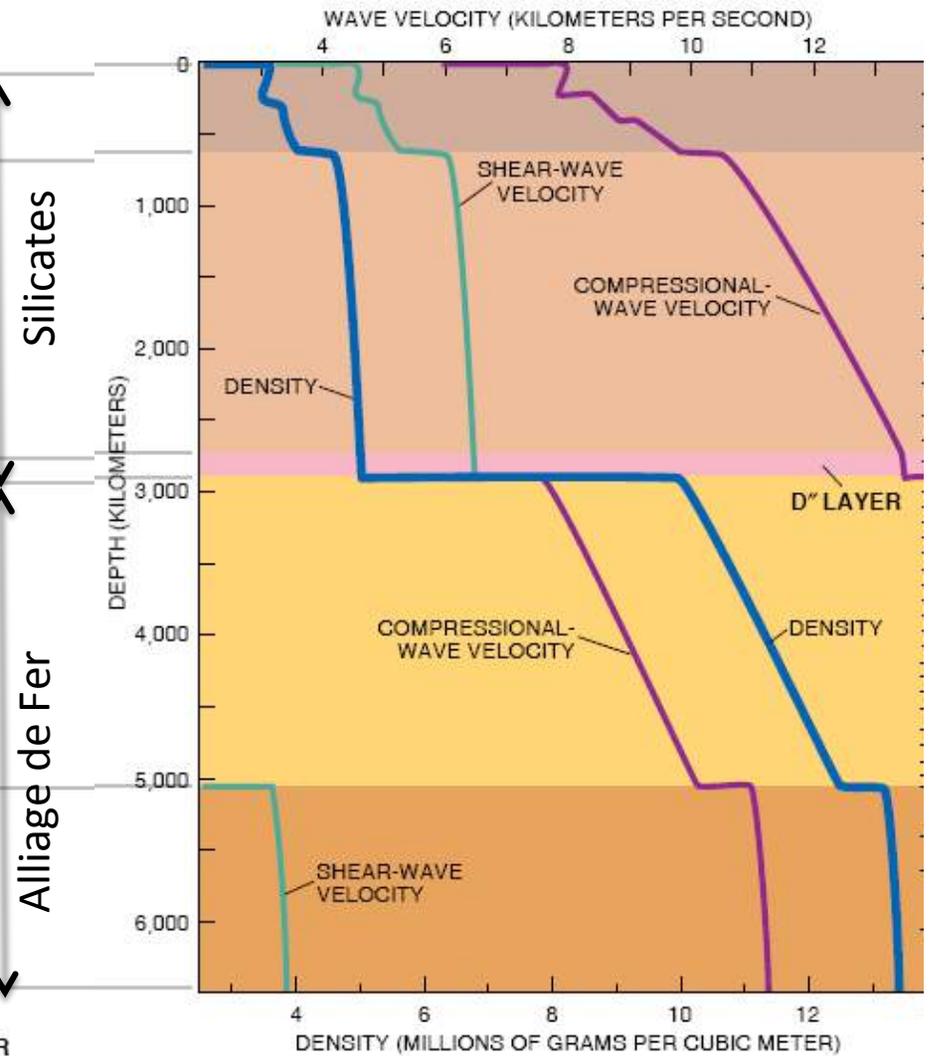
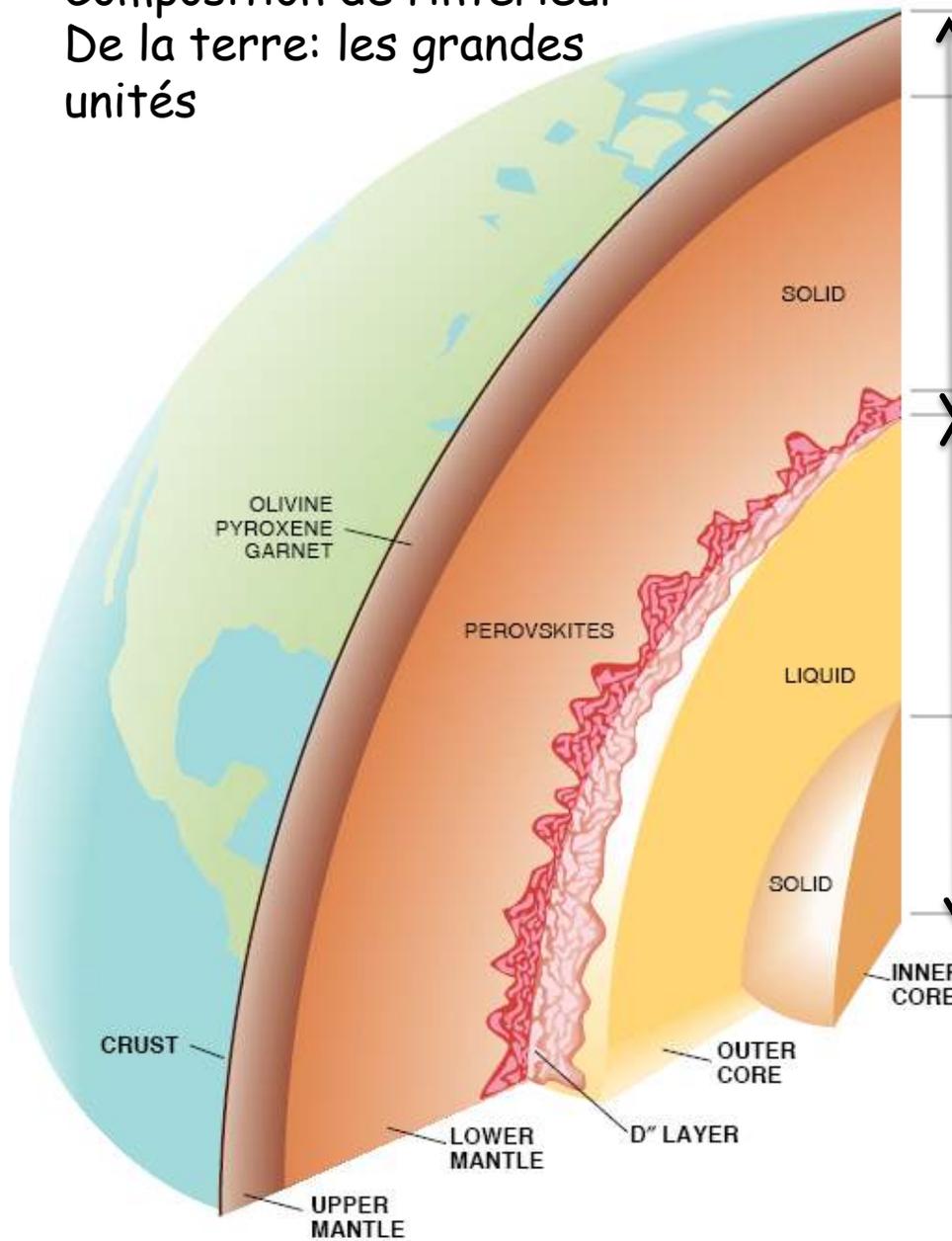
Densité moyenne de la terre:
 $\rho = 5515 \text{ kg/m}^3$
 Densité des roches en surface:
 $\sim 2600 \text{ kg/m}^3$ (granite)

..et en 1970:

High Pressure Instrumentation



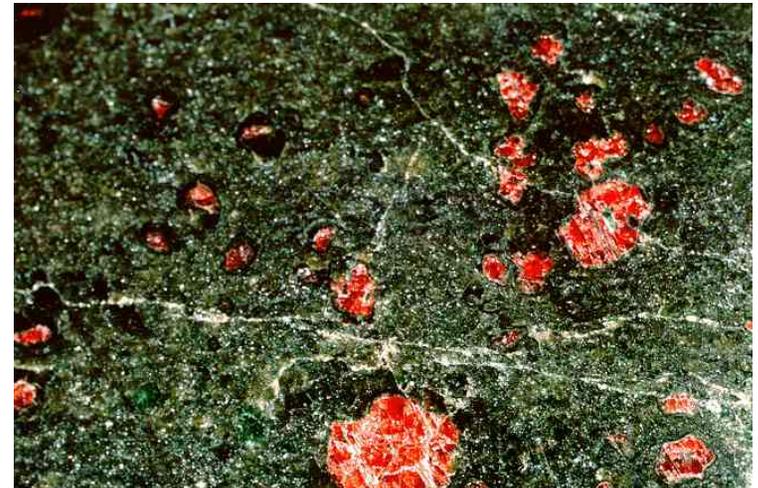
Composition de l'intérieur De la terre: les grandes unités



Modèle sismique PREM-
Dziewonski and Anderson, 1981:
Densité, vitesses de cisaillement
et vitesses de compression

Le manteau de la terre est formé de silicates

- **Constituant principal: olivine**
 - Compositions de l'olivine $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$
 - Forstérite (Fo) Mg_2SiO_4
 - Fayalite (Fa) Fe_2SiO_4
 - "manteau moyen": très forsteritique : $\text{Fo}_{91}\text{-Fo}_{94}$
 - où 91= 91% de Mg dans $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
- **Autres minéraux majeurs:**
 - Orthopyroxène (Opx) $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$
 - Clinopyroxène (Cpx) $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$
 - Grenat (Gt) $(\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$



Modèle de composition du manteau supérieur: "Pyrolite"

Mineral	Composition	wt(%)
Olivine (Fo ₈₉)	(Mg _{0.89} , Fe _{0.11}) ₂ SiO ₄	57
Orthopyroxene	(Mg, Fe)SiO ₃	17
Clinopyroxene	(Ca, Mg, Fe) ₂ Si ₂ O ₆ – NaAlSi ₂ O ₆	12
Pyrope-rich garnet	(Mg, Fe, Ca) ₃ (Al, Cr) ₂ Si ₃ O ₁₂	14

Source: Ringwood (1979).

La pyrolite est une roche synthétique inventée par Ringwood pour servir de modèle de composition du manteau supérieur et inférieur. Cette composition est en général acceptée pour les 200 premiers km du manteau supérieur. A plus grande profondeur, les opinions divergent. En particulier, il n'y a pas de certitude concernant l'uniformité de la composition dans tout le manteau.

L'olivine change de structure cristalline sous l'effet de la pression et de la température:

Trois changements de phase définissant la "zone de transition du manteau":

-à ~400 km de profondeur:

- > Olivine → Wasleyite (Spinel)
- > densité augmente de 4-5%

-à ~520 km de profondeur:

- > Wasleyite → Ringwoodite
- > densité augment de 4-5%

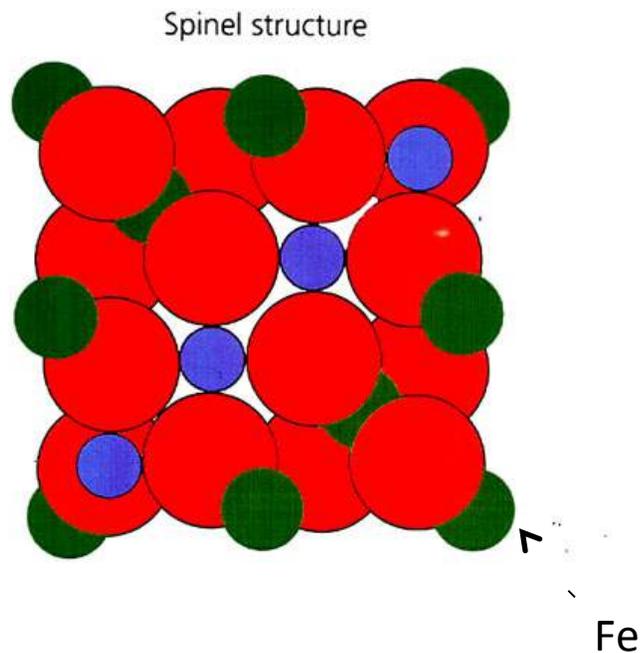
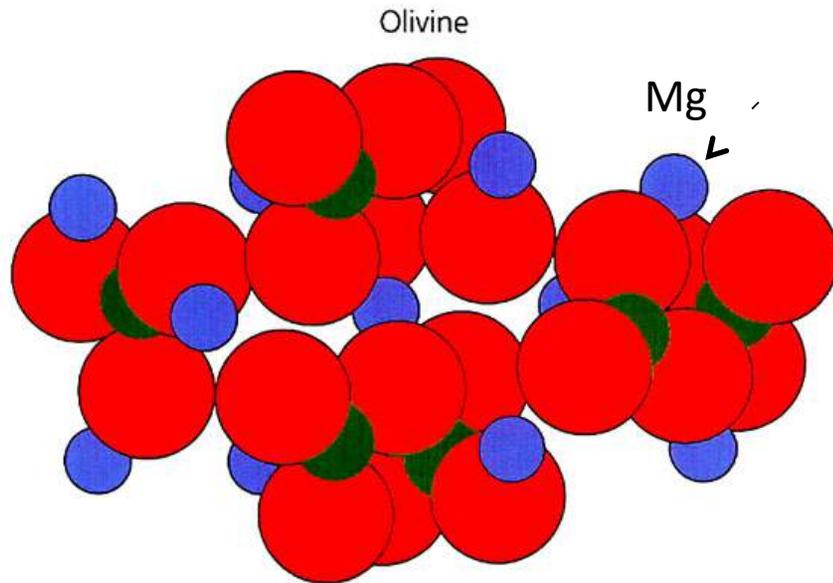
-à ~660 km de profondeur: l'olivine se décompose en pérovskite ($(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$) et oxydes $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ (magnesiowustite)

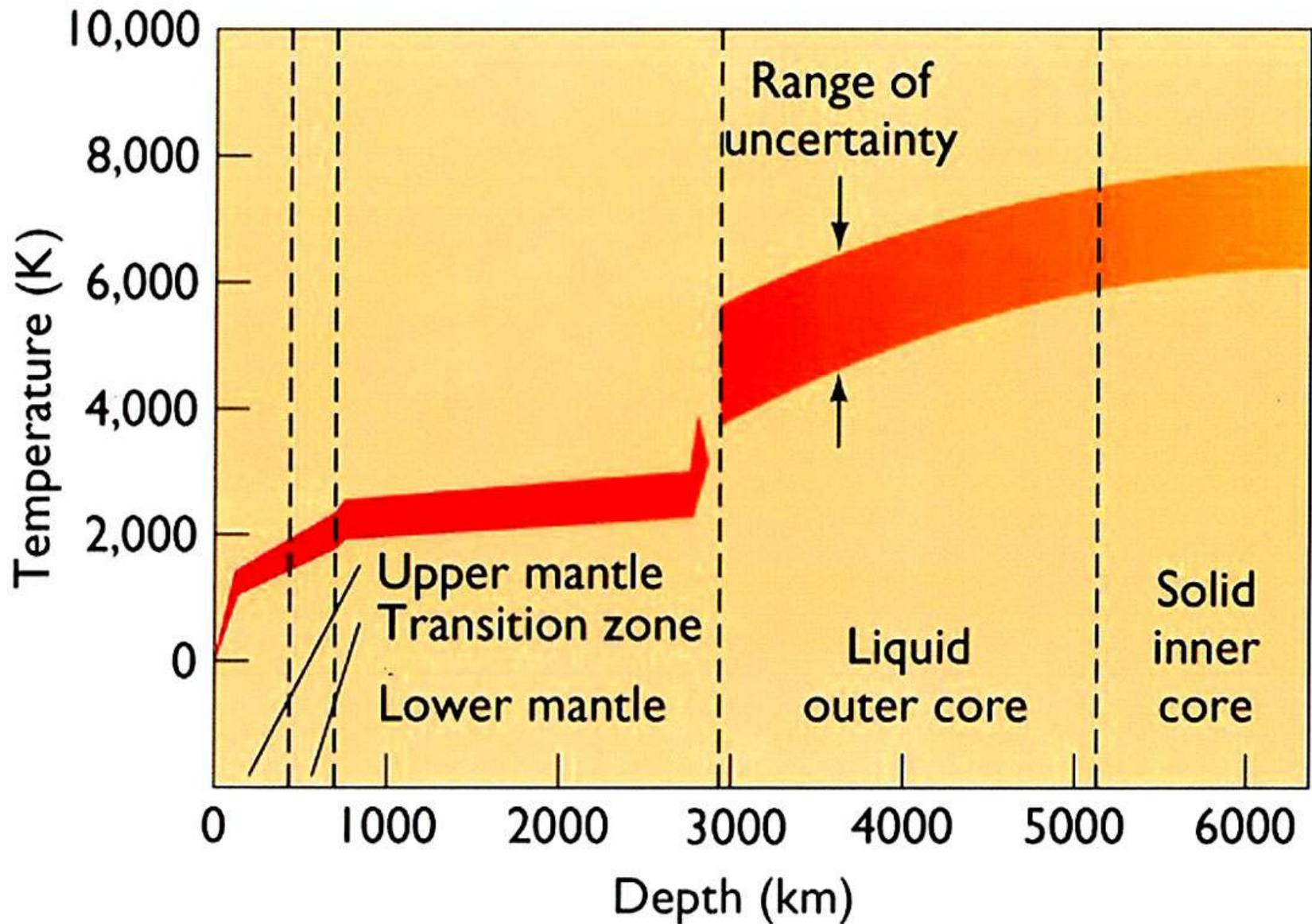
- > densité augmente de ~ 10%
- > ceci marque la limite entre le manteau supérieur et inférieur

▫ Ces transitions de phase se caractérisent par une augmentation "brusque" des vitesses sismiques et de la densité:

=> discontinuités

Les propriétés de déformation des minéraux changent avec la structure cristalline





La température dans le manteau supérieur varie de $\sim 1300^{\circ}\text{C}$ à $\sim 1800^{\circ}\text{C}$

Le profil de température est appelé "géotherme"

Phases du manteau

- Manteau supérieur
 - Olivine, orthopyroxène, clinopyroxène, plagioclase → spinel → grenat
- Zone de Transition
 - Olivine → Wadsleyite → Ringwoodite
 - Pyroxènes se dissolvent dans le grenat
- Manteau inférieur
 - Deux perovskites + oxide
- Quoi d'autre?
 - E.g. Post-perovskite (2004)

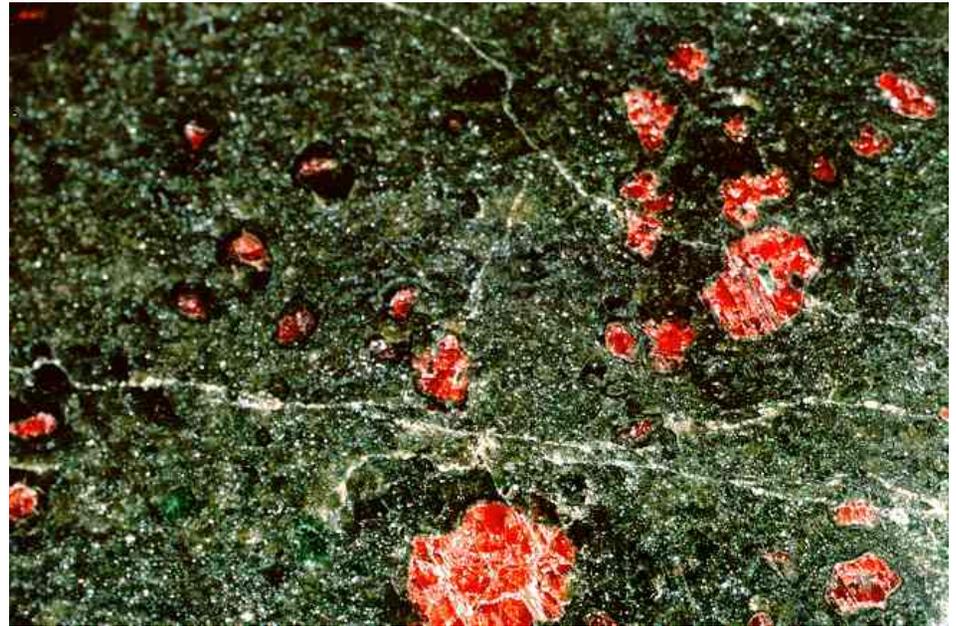
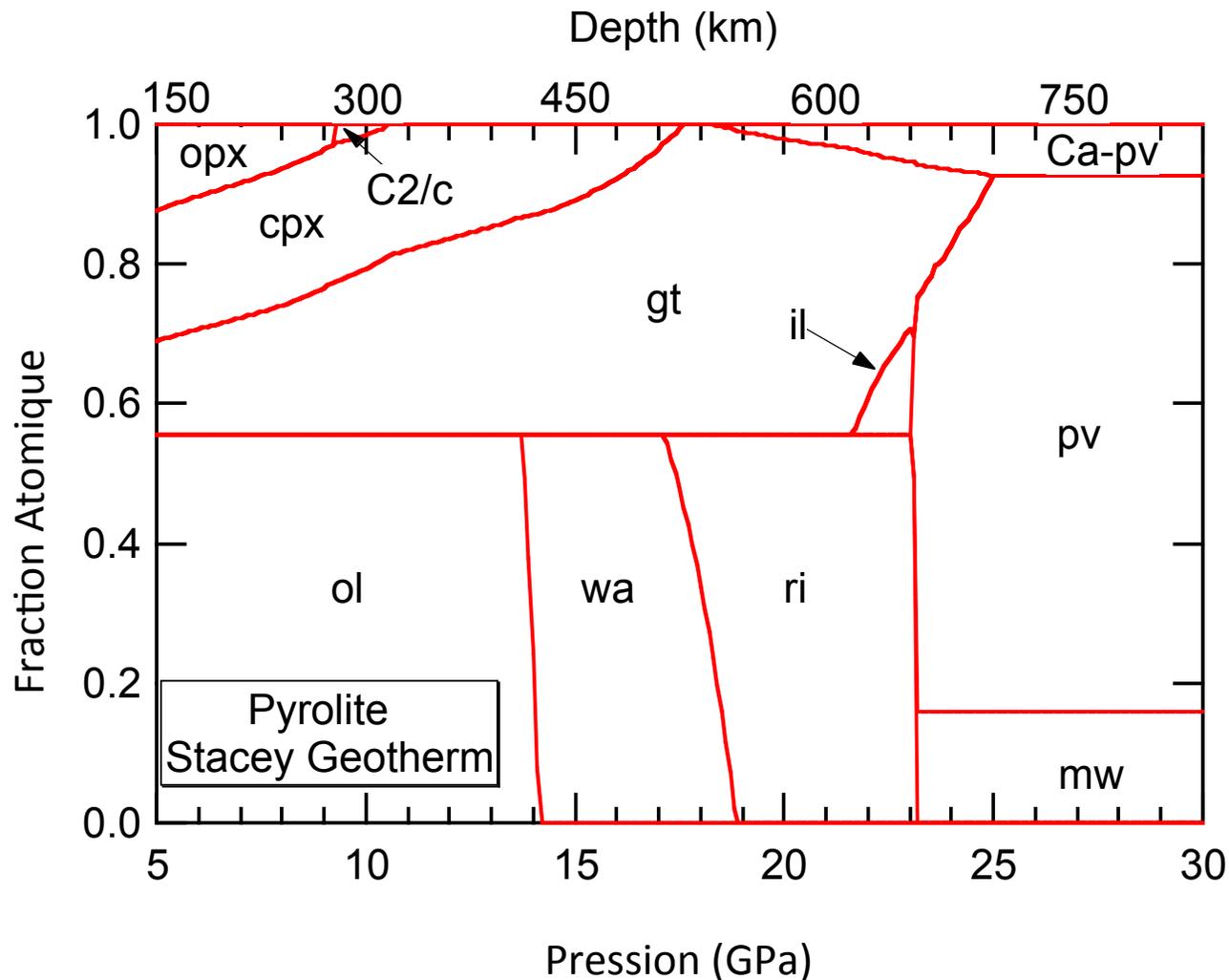
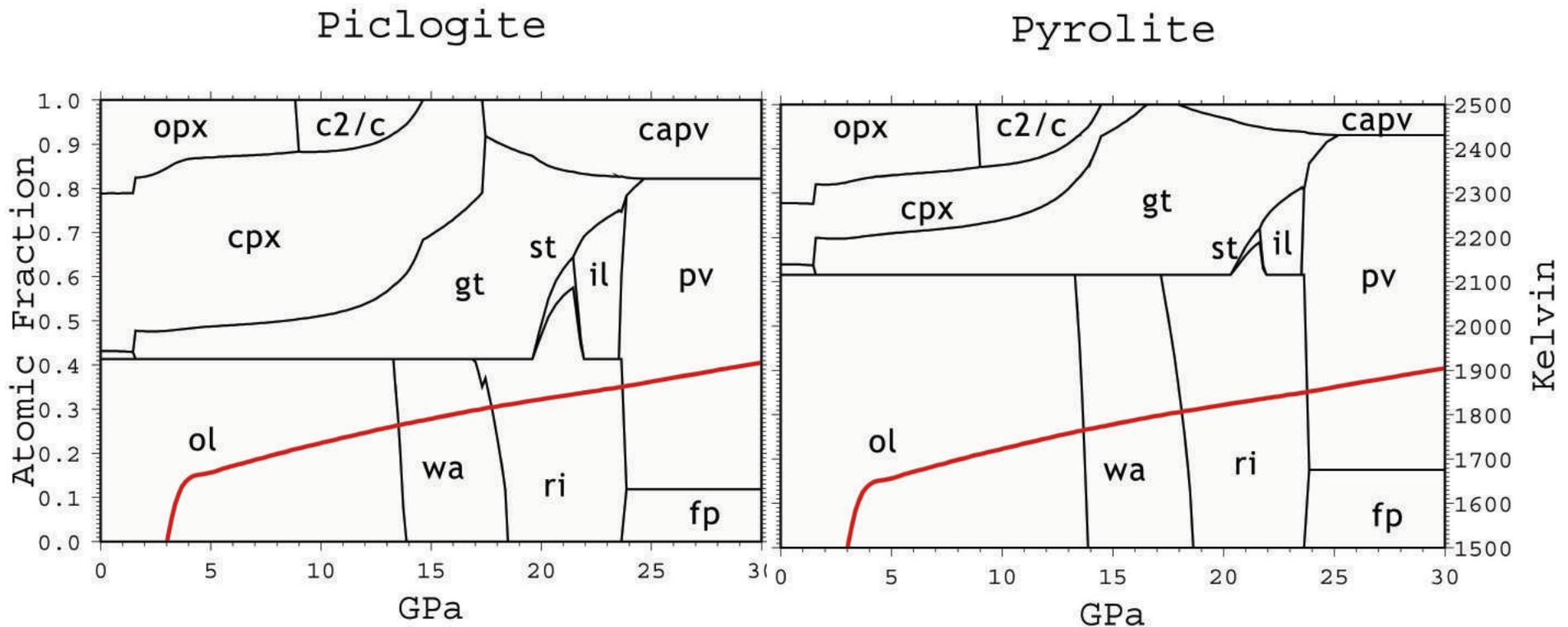


Diagramme de phase pour le manteau supérieur pyrolitique



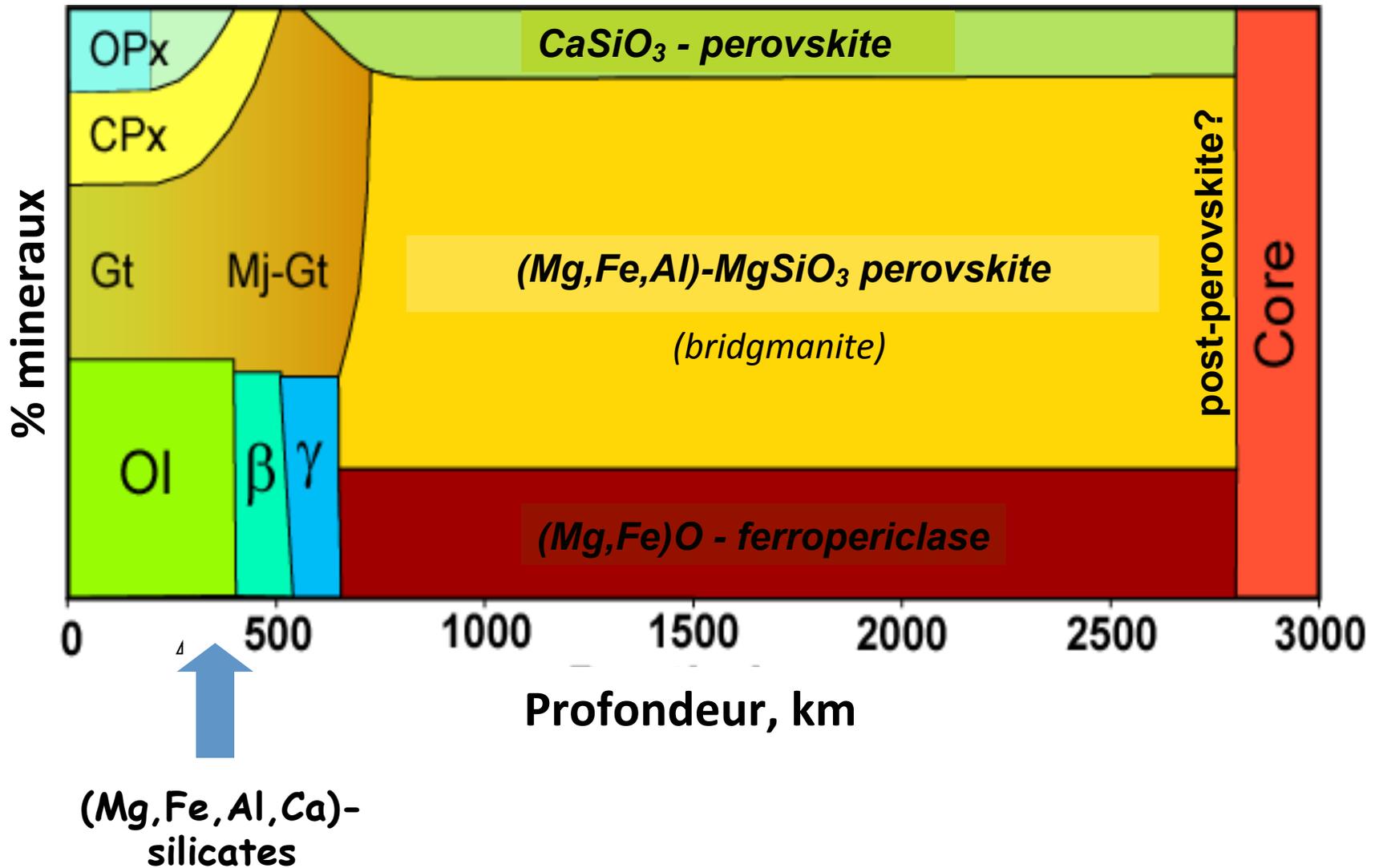
Diagrammes de phase du manteau



Deux modèles différents pour la composition du manteau

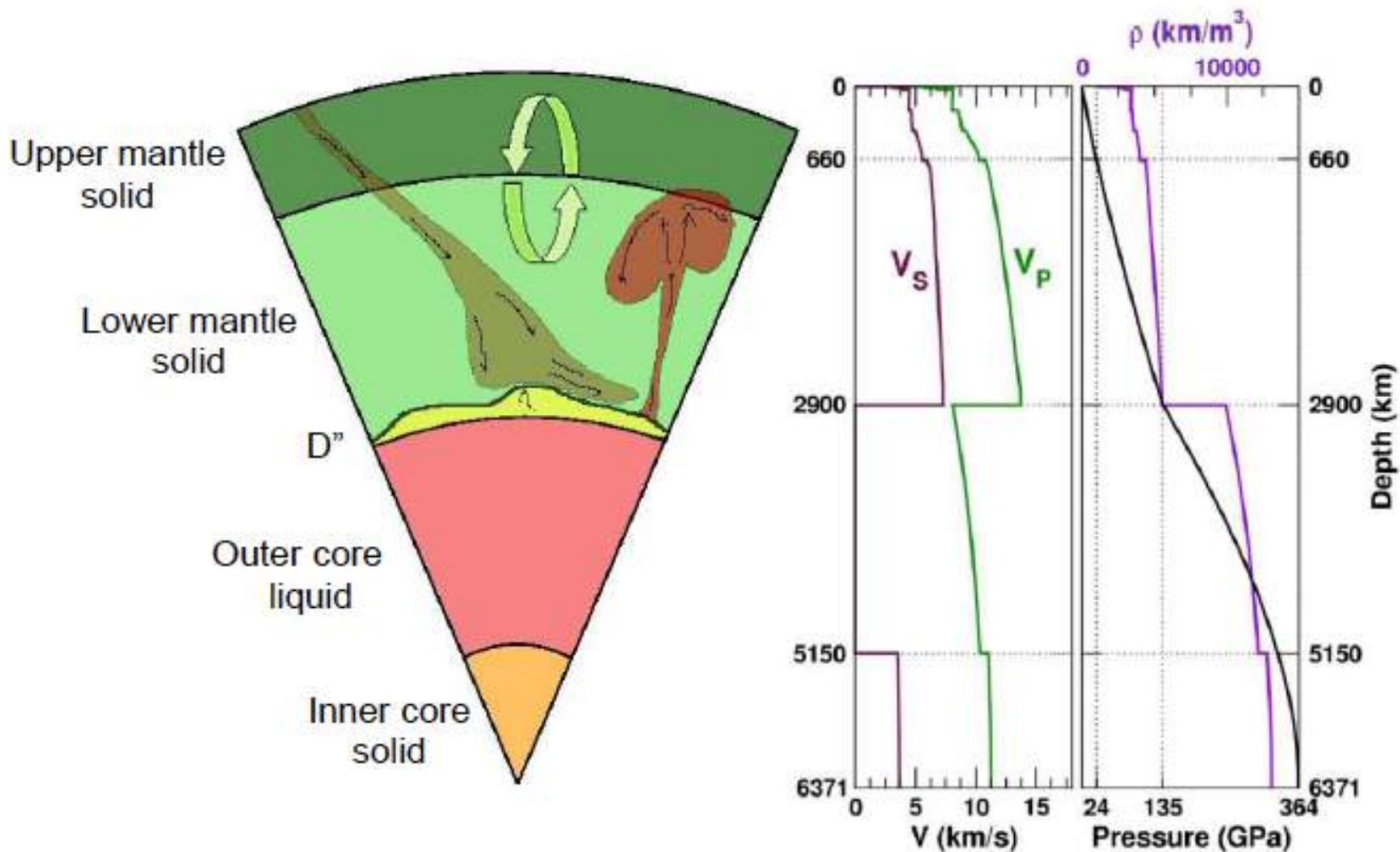
- Temperature = "géotherme"

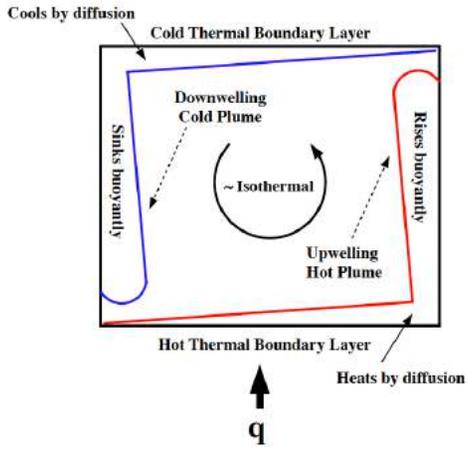
Minéraux du manteau de la Terre



Courtesy of S. Sinogeikin

Une terre dynamique



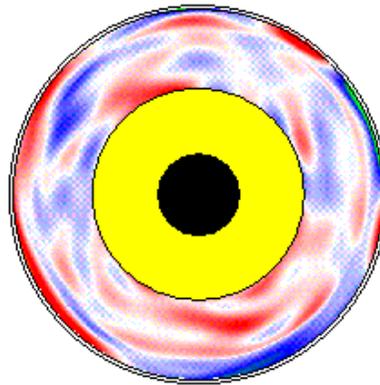


Imagerie Médicale



Slow

(chaud)

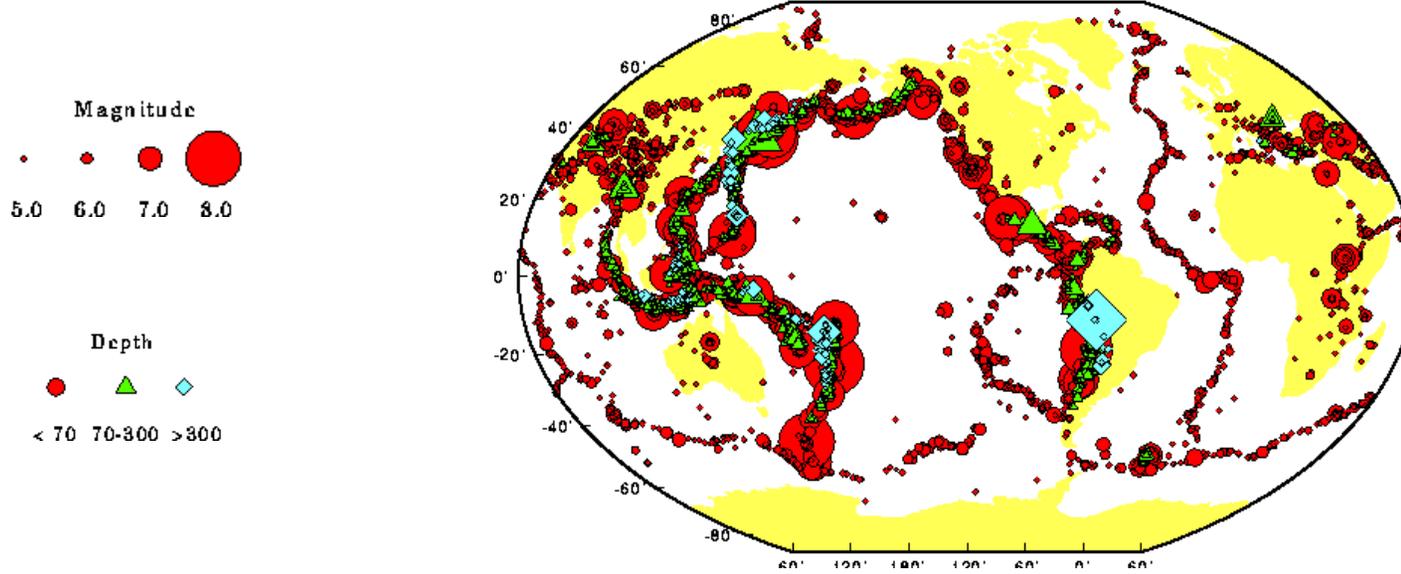


Fast

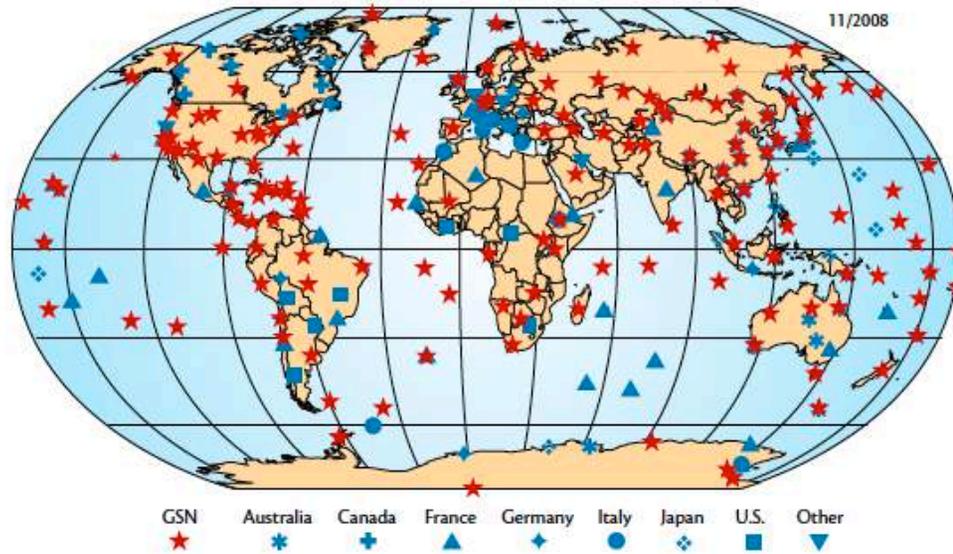
(froid)

Tomographie sismique

Earthquakes >Magnitude 5.0, 1985 - 1996 From NEIC



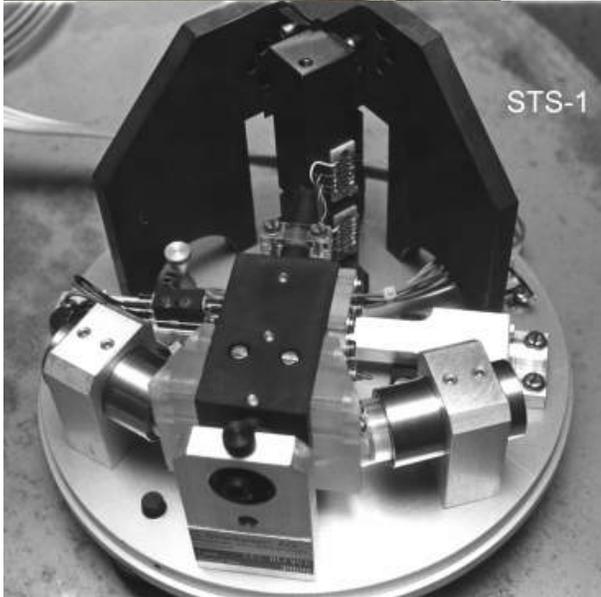
International Federation of Digital Seismograph Networks



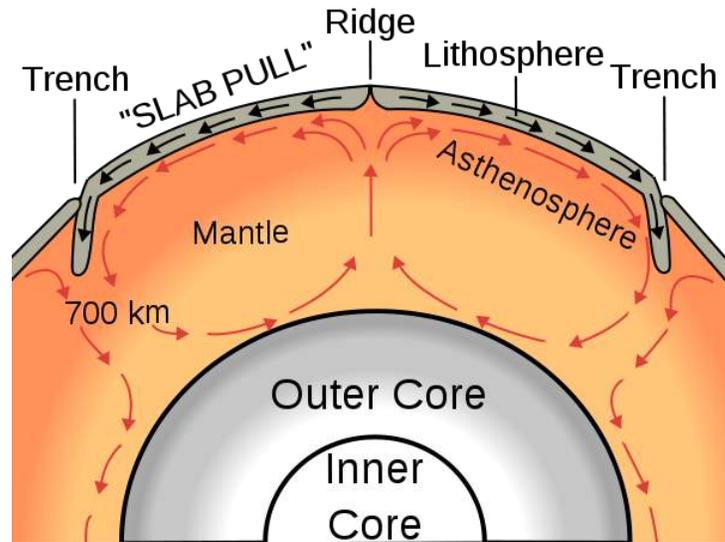
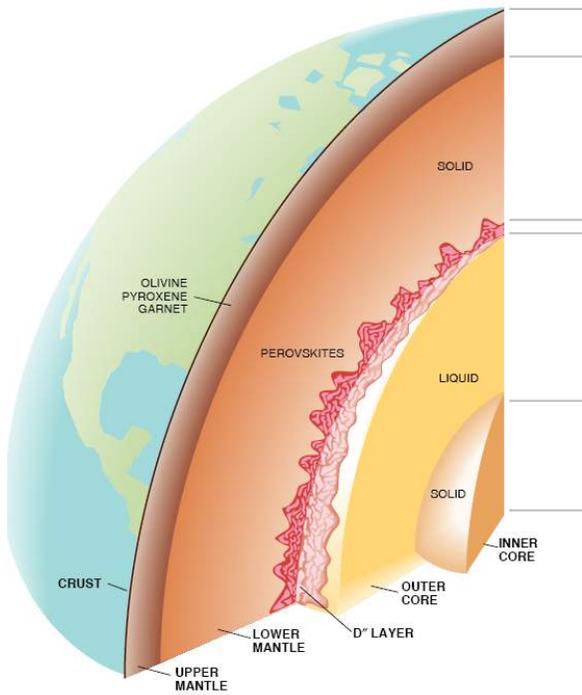
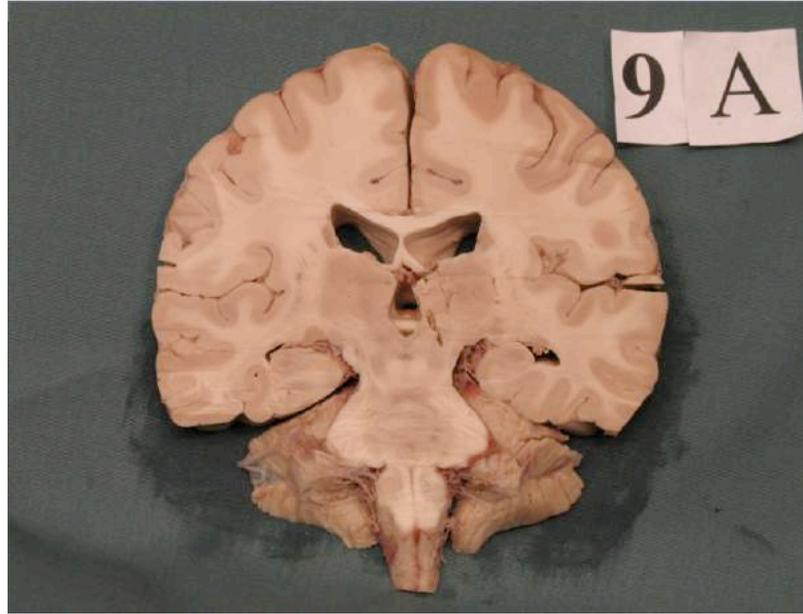
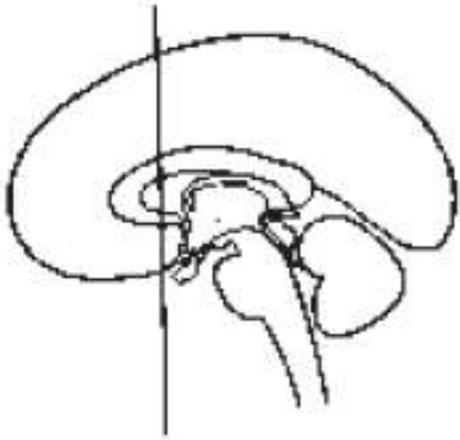
Stations sismiques très large-bande (e.g. réseau GEOSCOPE)

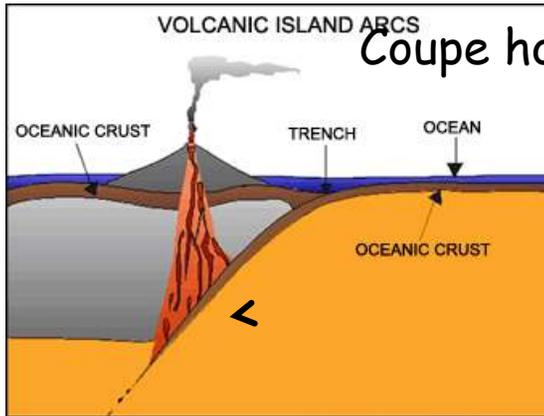


VBB seismometer+
Accelerometer
> >200 dB dynamic
range



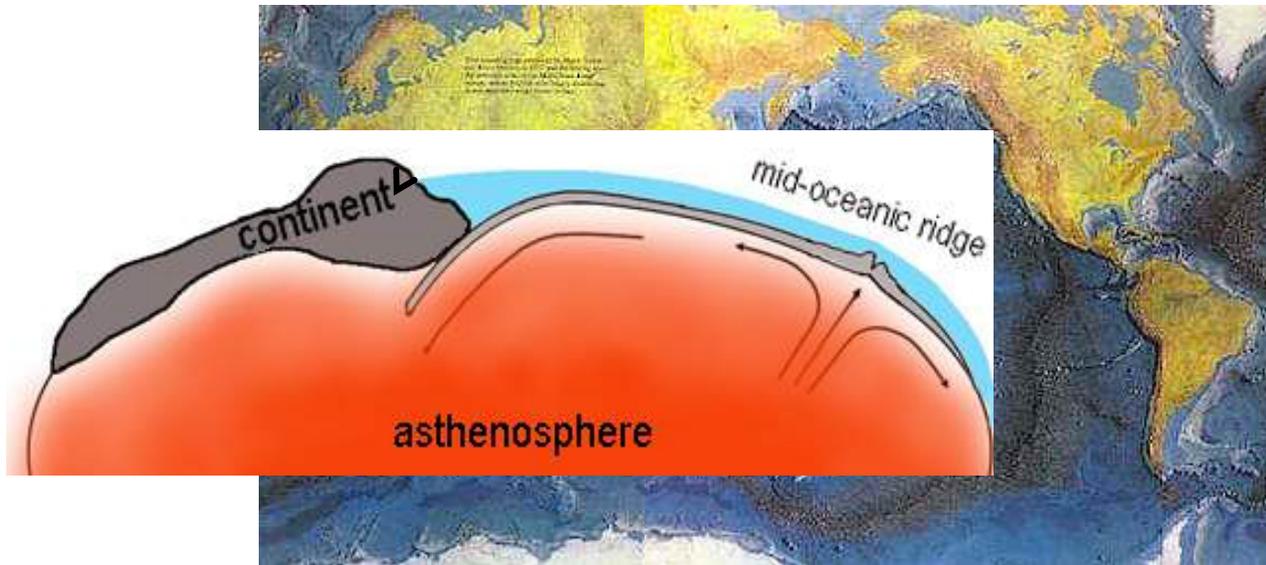
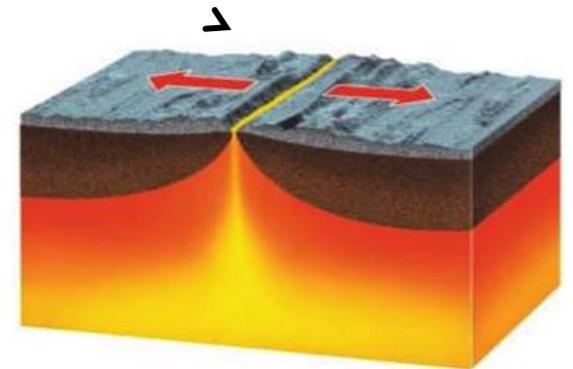
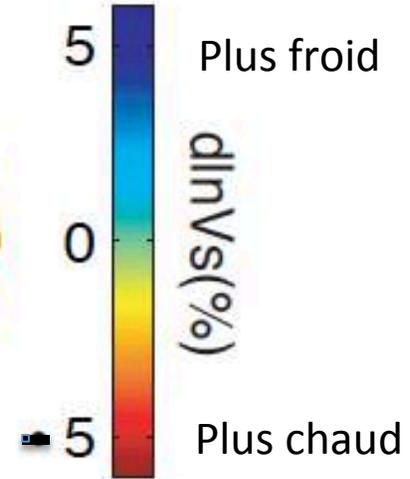
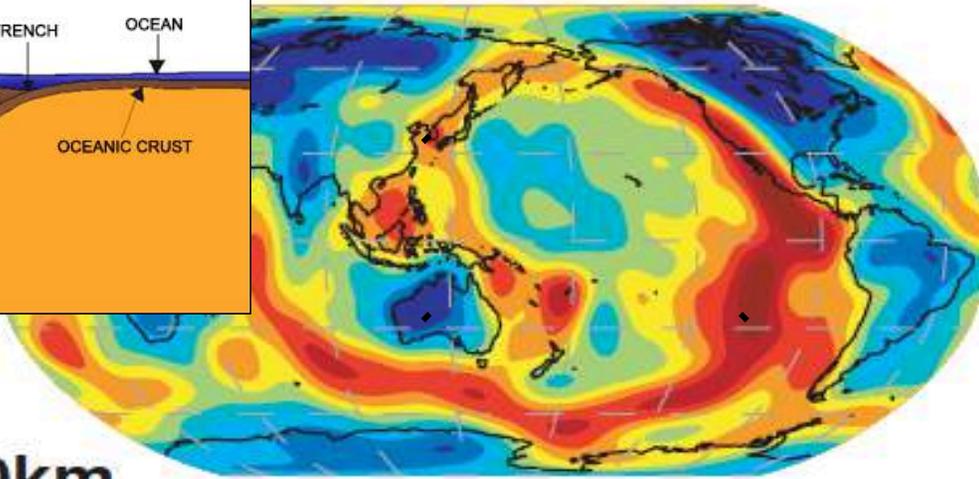
Datalogger + time
Power supply and
conditioning,
Telemetry equipment,
OTHER

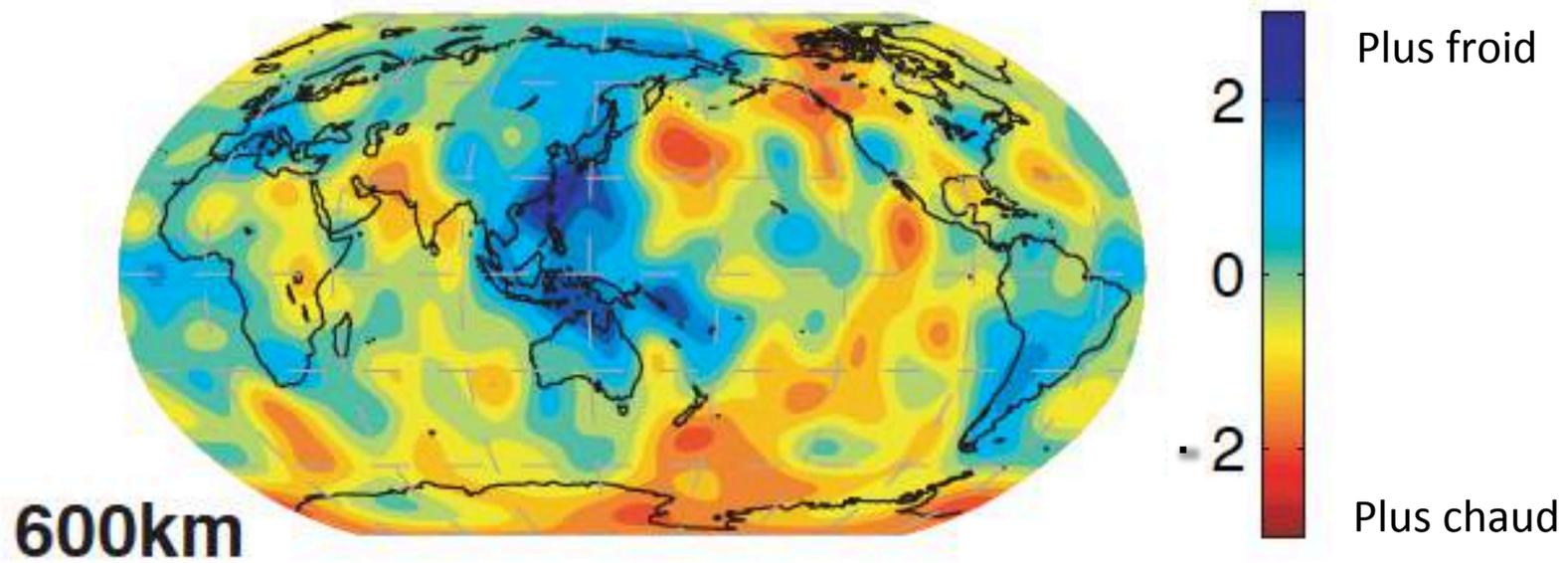
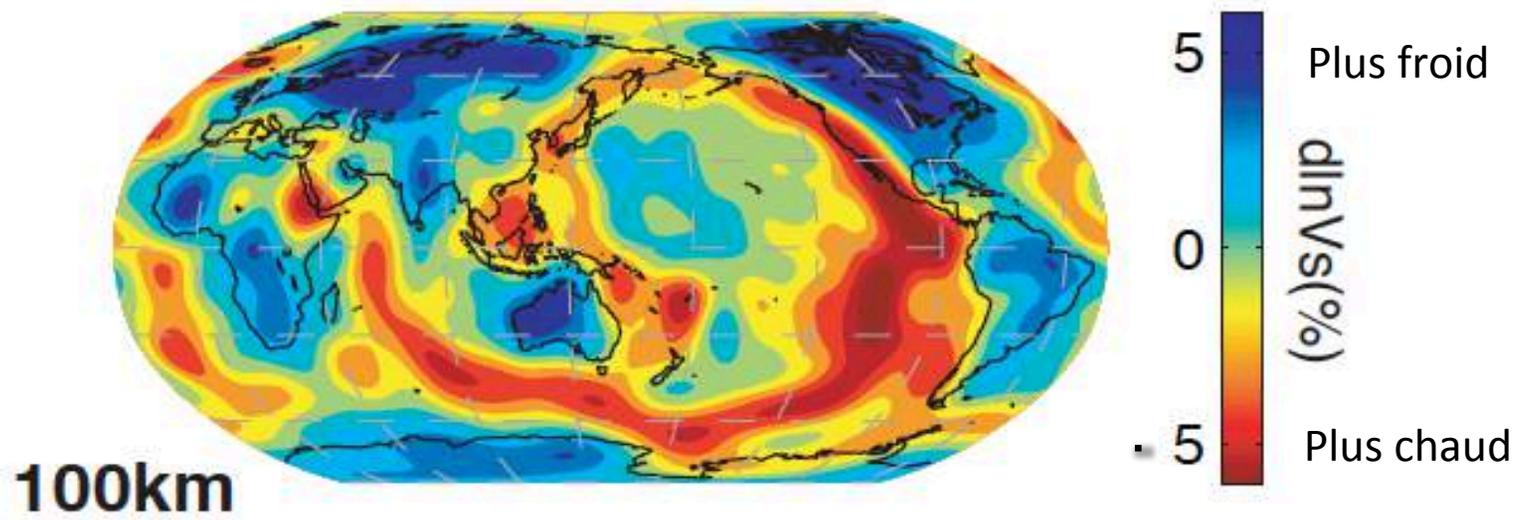




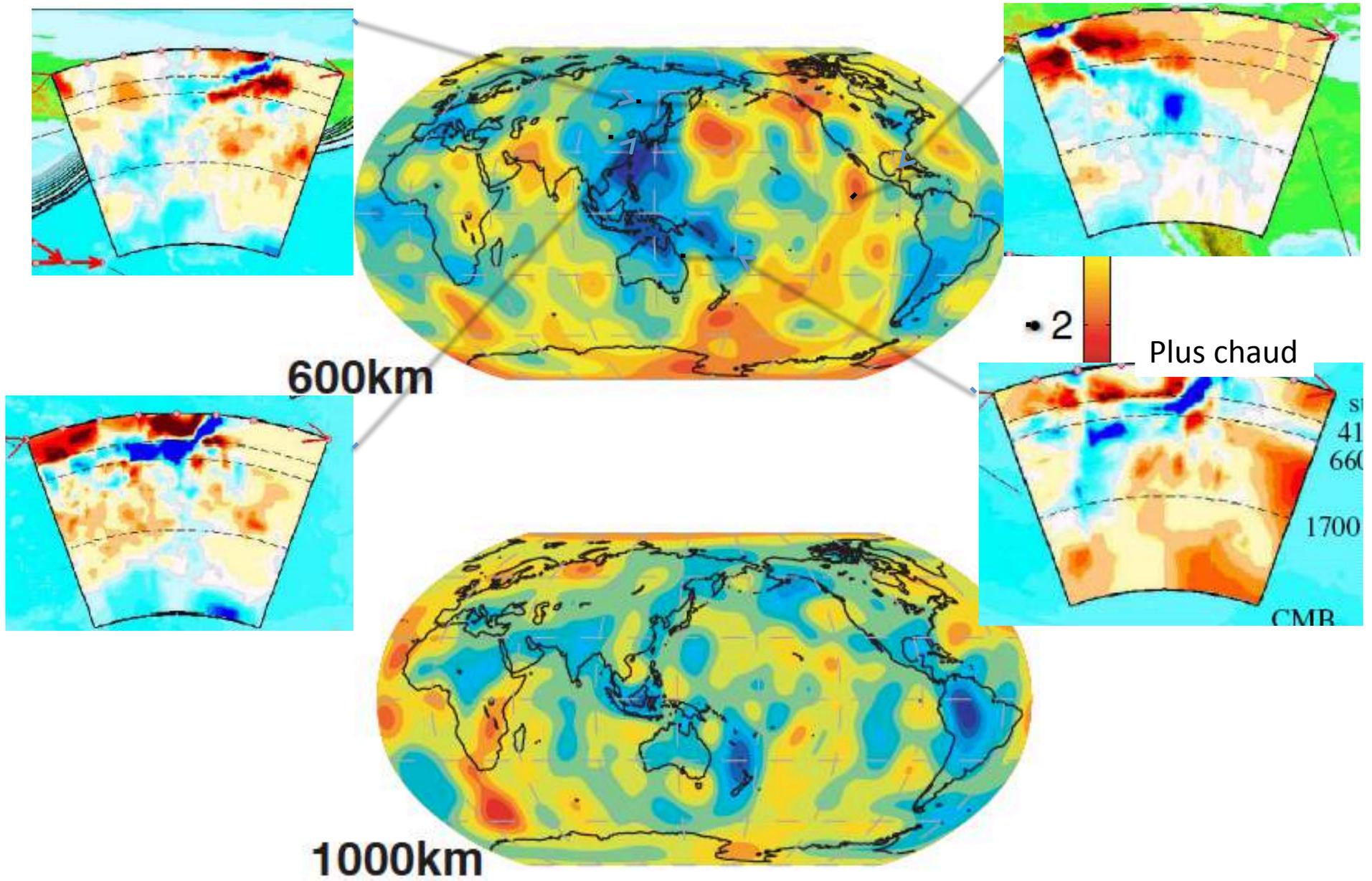
Coupe horizontale à 100 km de profondeur

100km

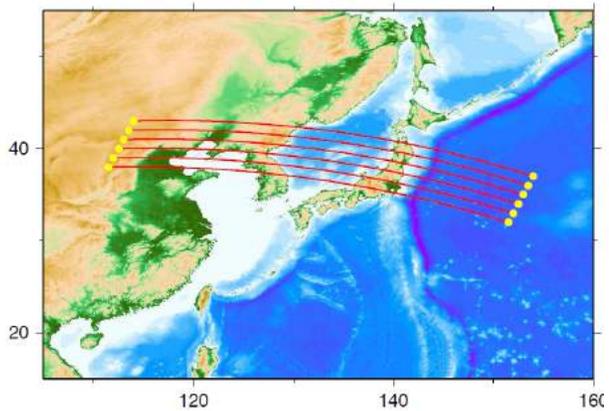




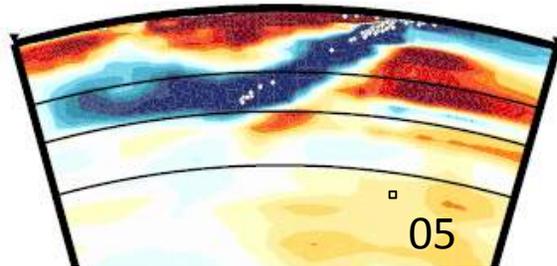
Coupe horizontale à 600 km de profondeur



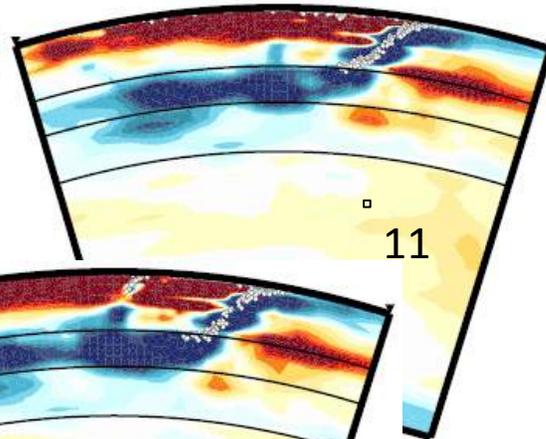
Coupe horizontale à 1000 km de profondeur



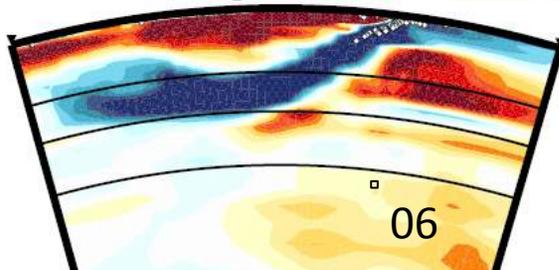
Honshu



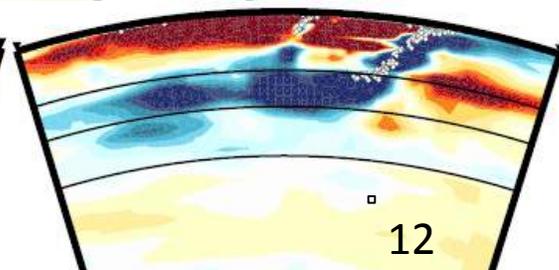
05



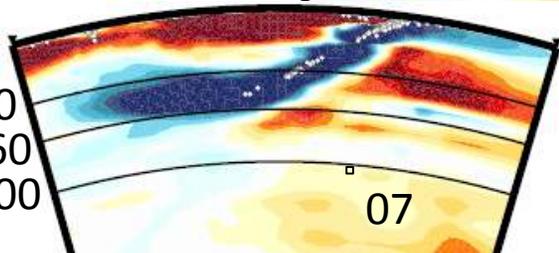
11



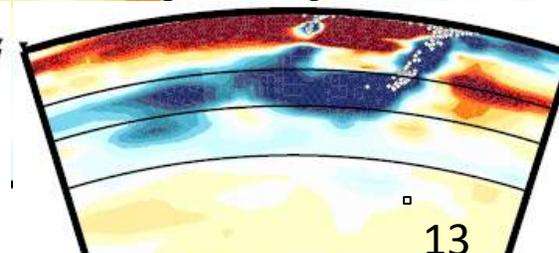
06



12



07

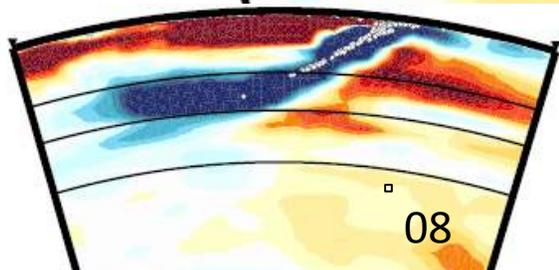


13

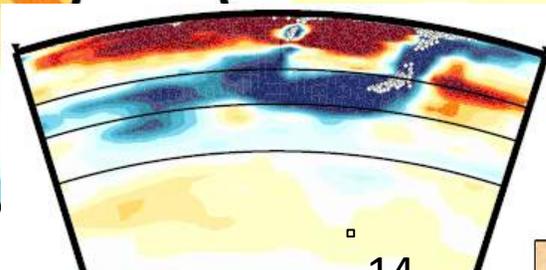
$\pm 1.5\%$

$\pm 1.5\%$

410
660
1000

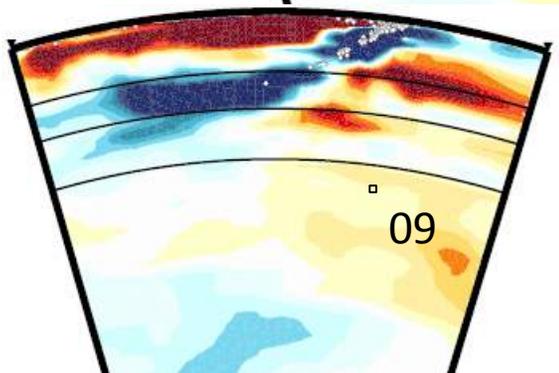


08

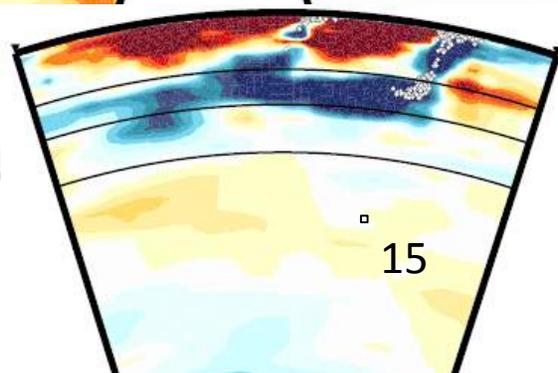


14

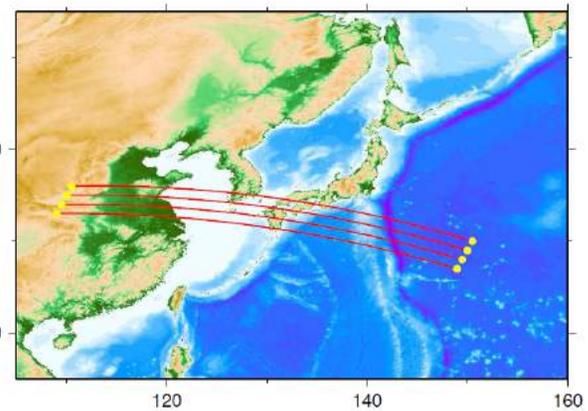
northern Bonin



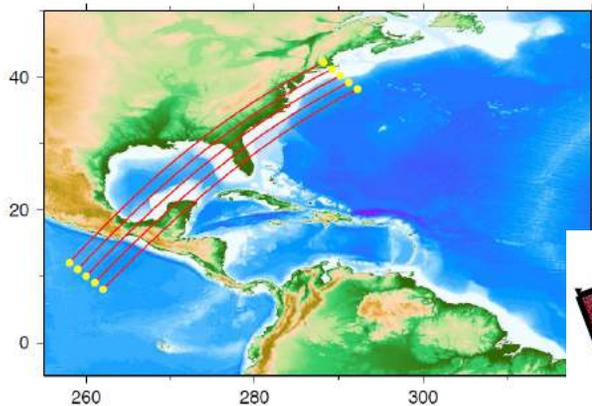
09



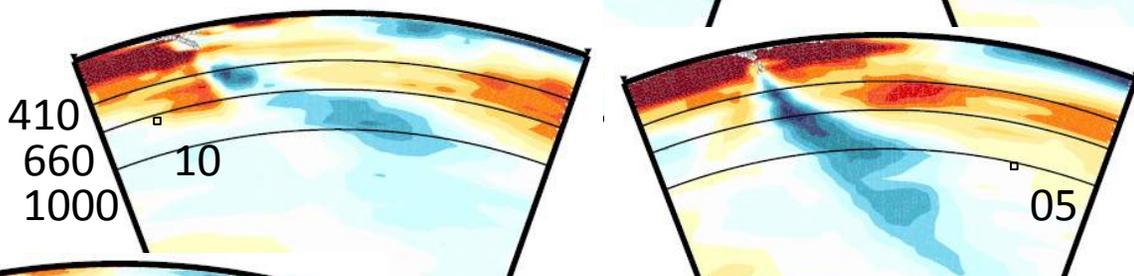
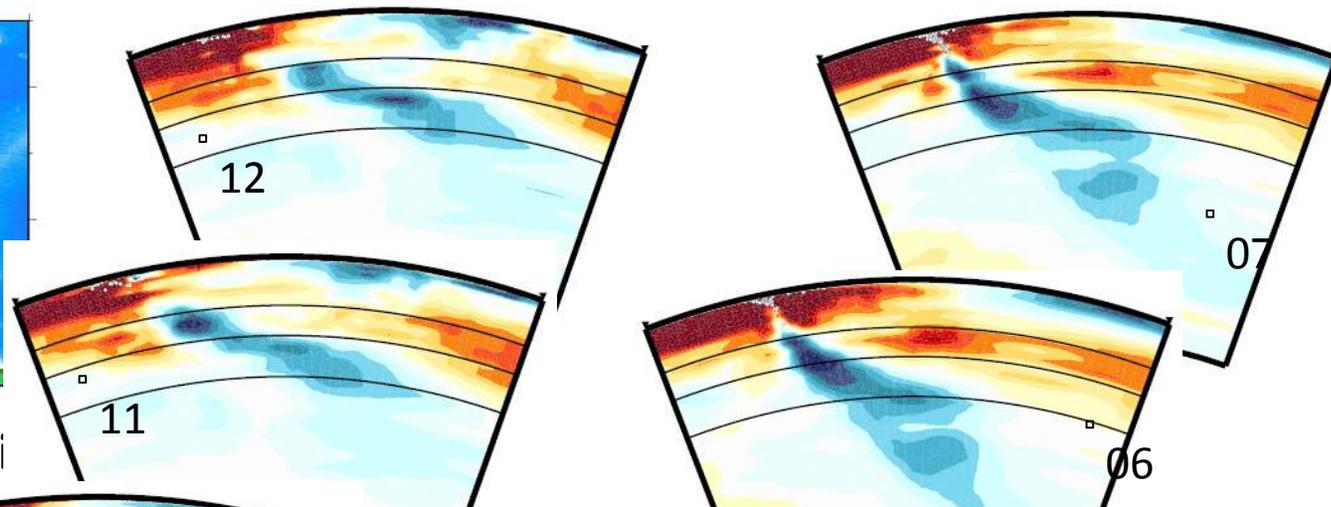
15



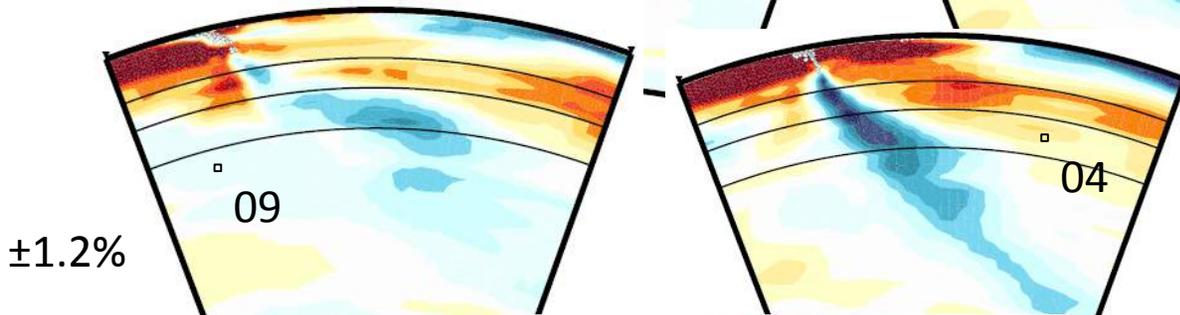
120 140 160



northern Central America



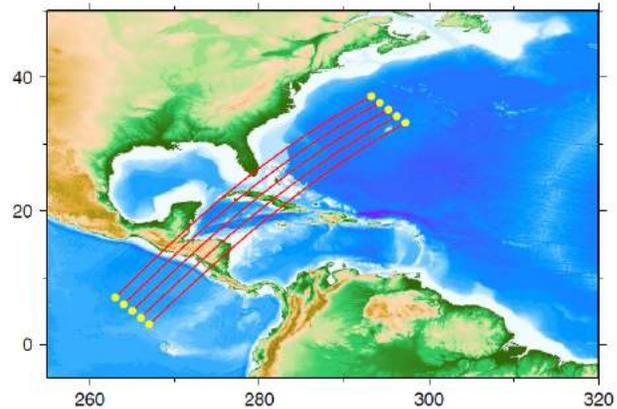
$\pm 1.2\%$

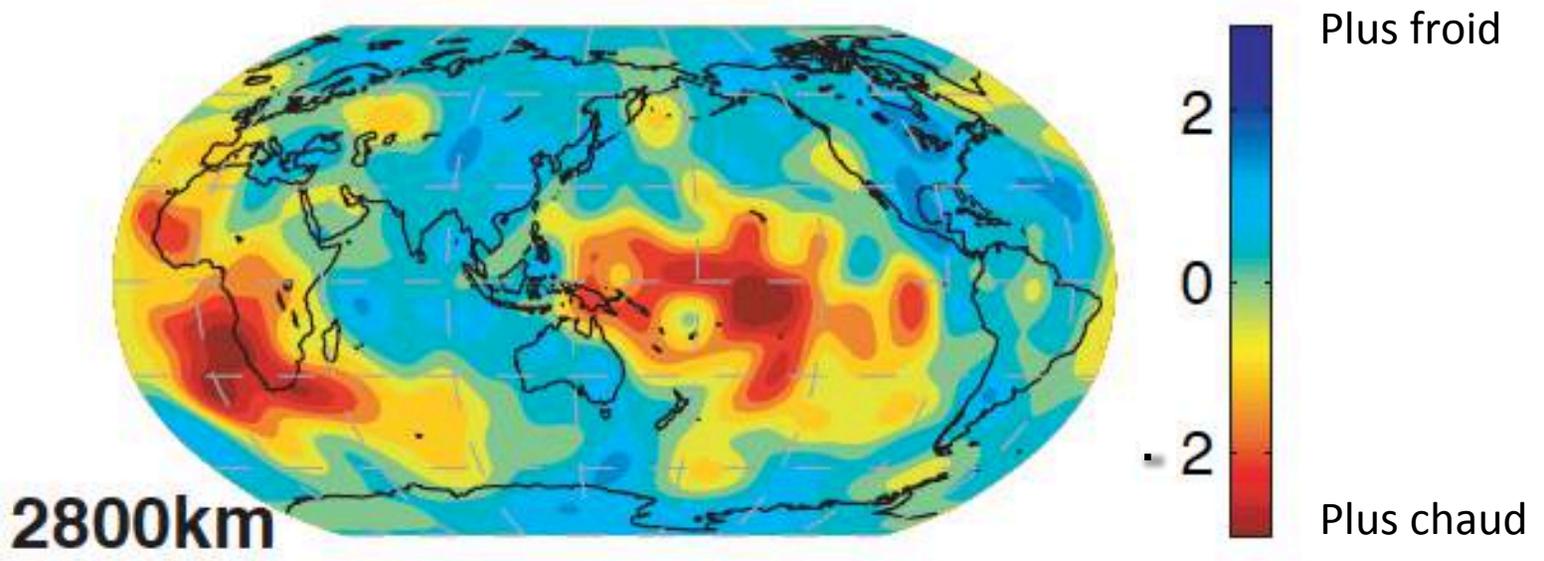
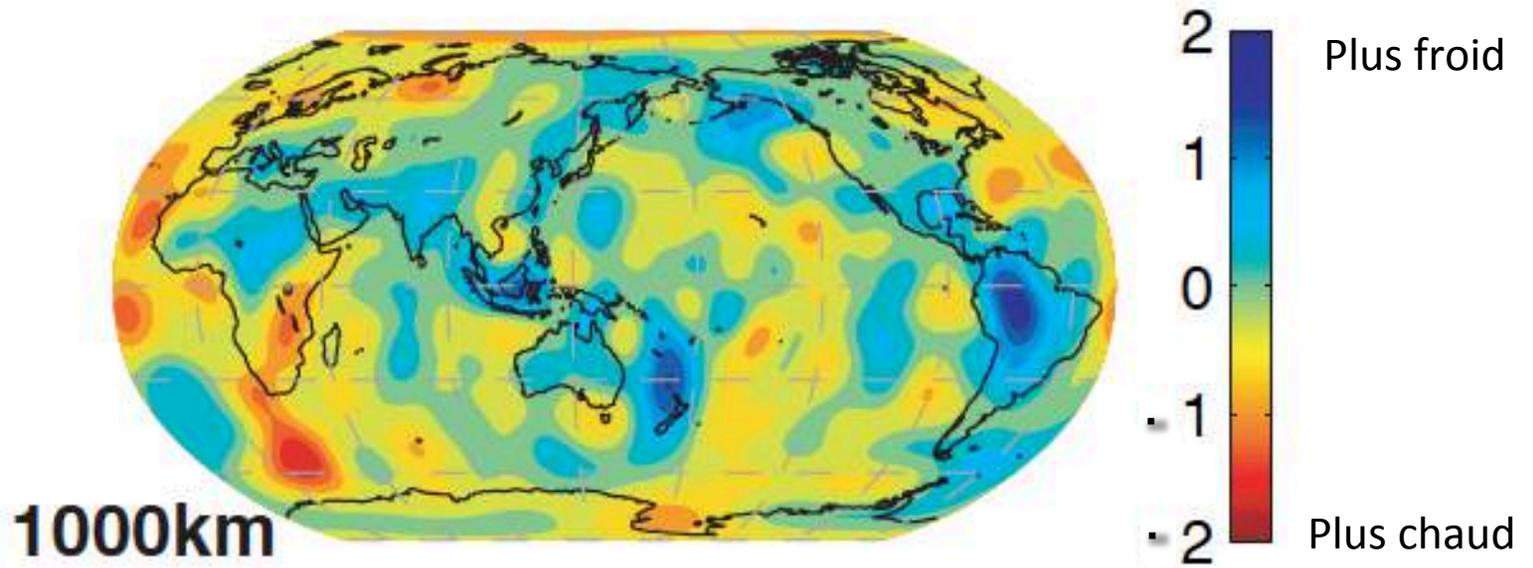


$\pm 1.2\%$



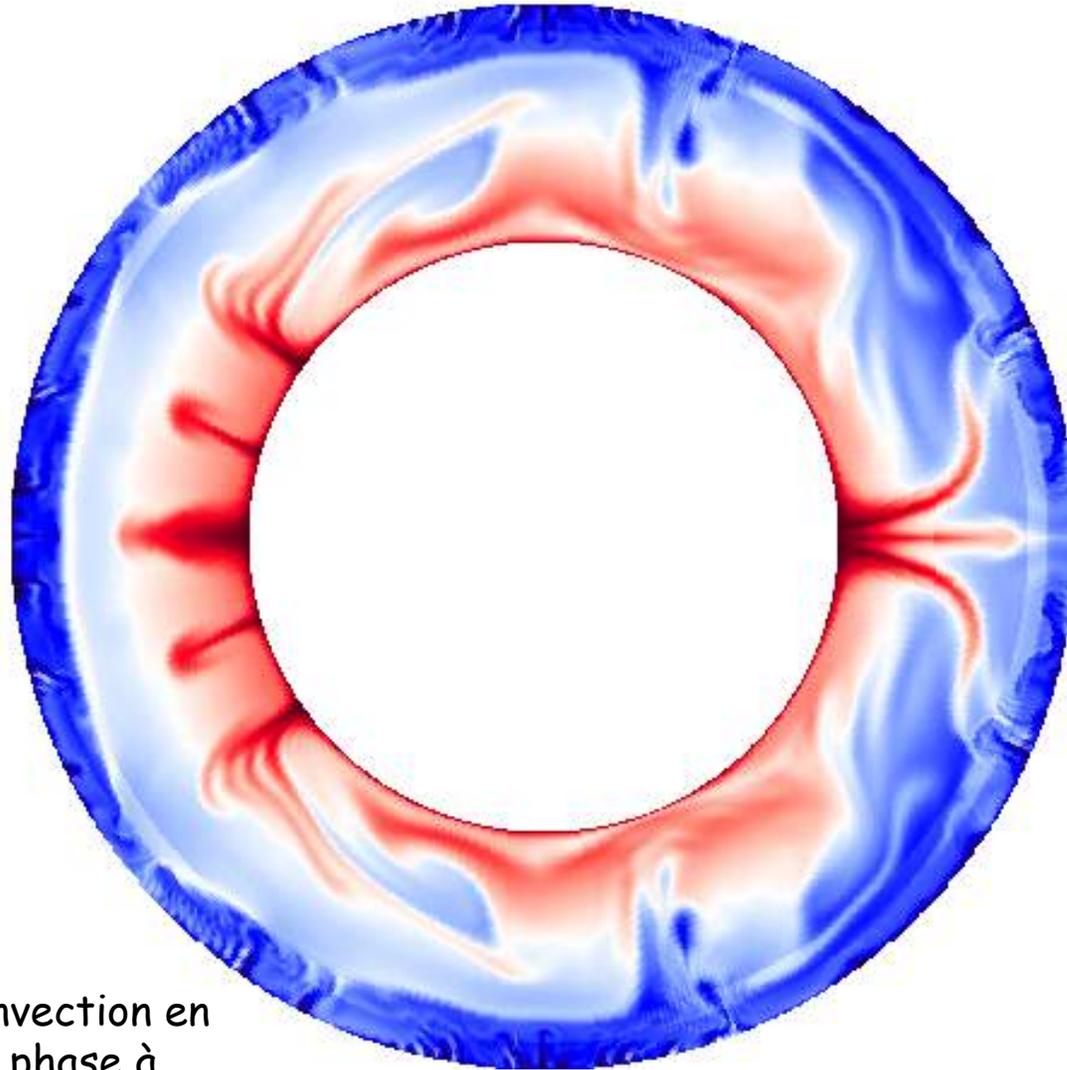
mid Central America





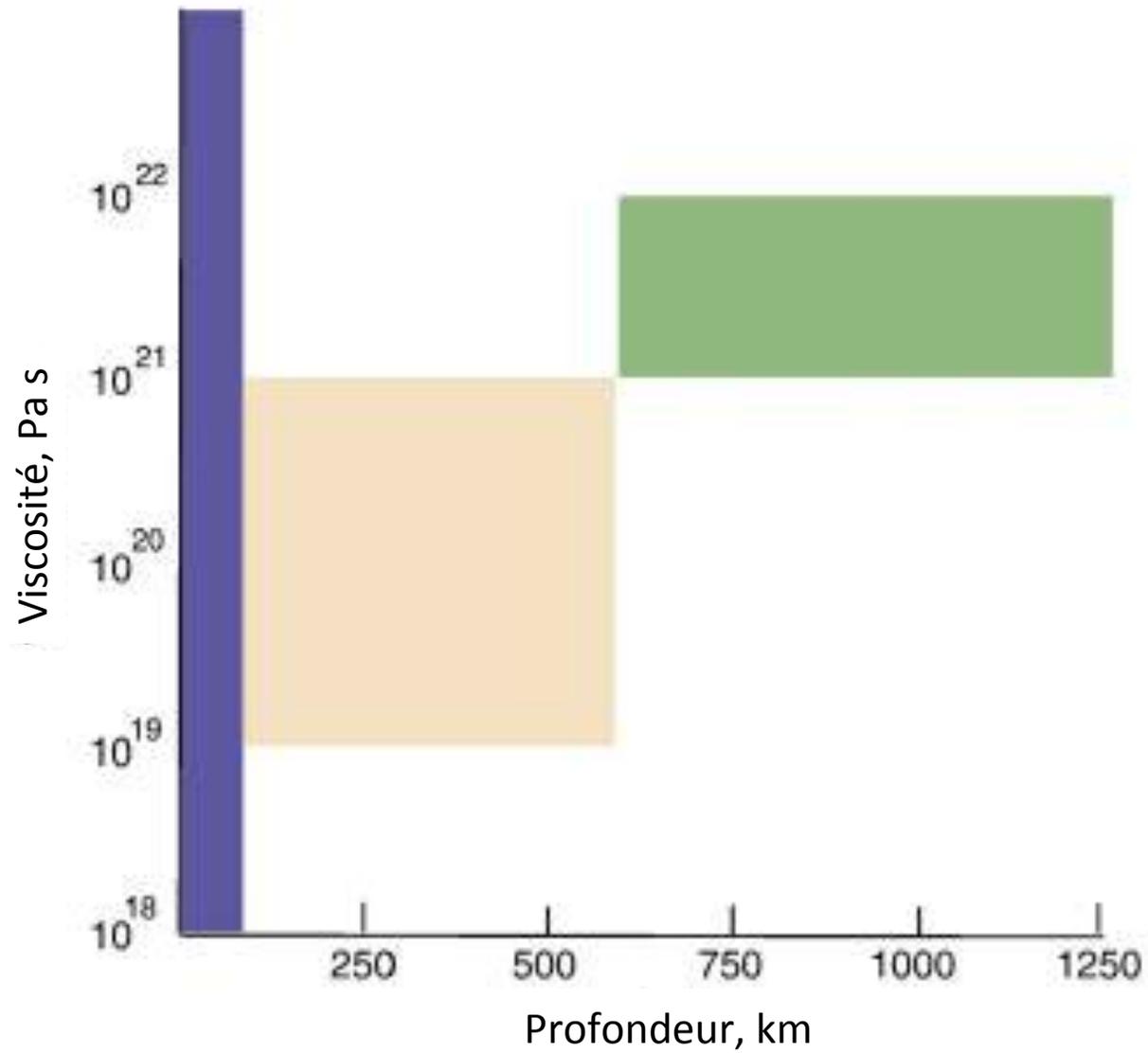
Coupe horizontale à 2800 km de profondeur (base du manteau)

Déformation dans le manteau



Modélisation de la convection en
2D avec transition de phase à
670km © Ph. Machetel

Viscosité/profondeur dans le manteau



Viscosité du manteau: Rebond post-glaciaire

-> La vitesse de déformation quand on enlève la charge dépend de la rigidité flexurale de la lithosphère et de la viscosité du manteau.

-> Pour observer la réponse visqueuse du manteau, la charge doit être ôtée rapidement.

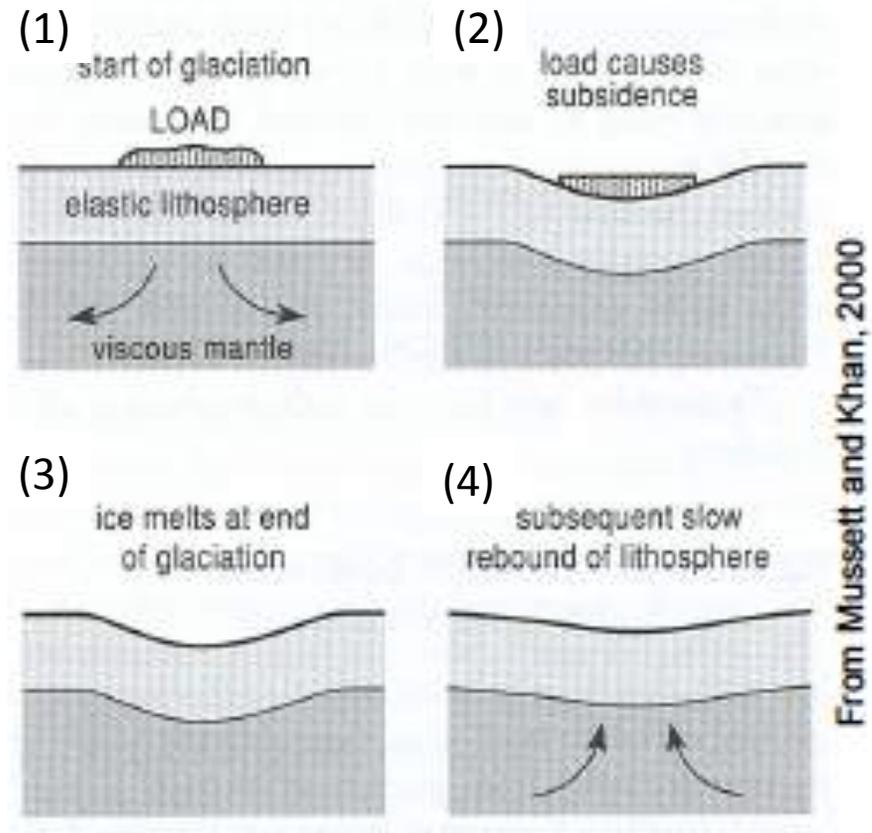
1. Petites charges: ~100 km diamètre
Nous renseignent sur la viscosité du manteau supérieur:

e.g. Lake Bonneville, Utah

- Asséché il y a 10,000 ans: charge ôtée sur 300m d'épaisseur

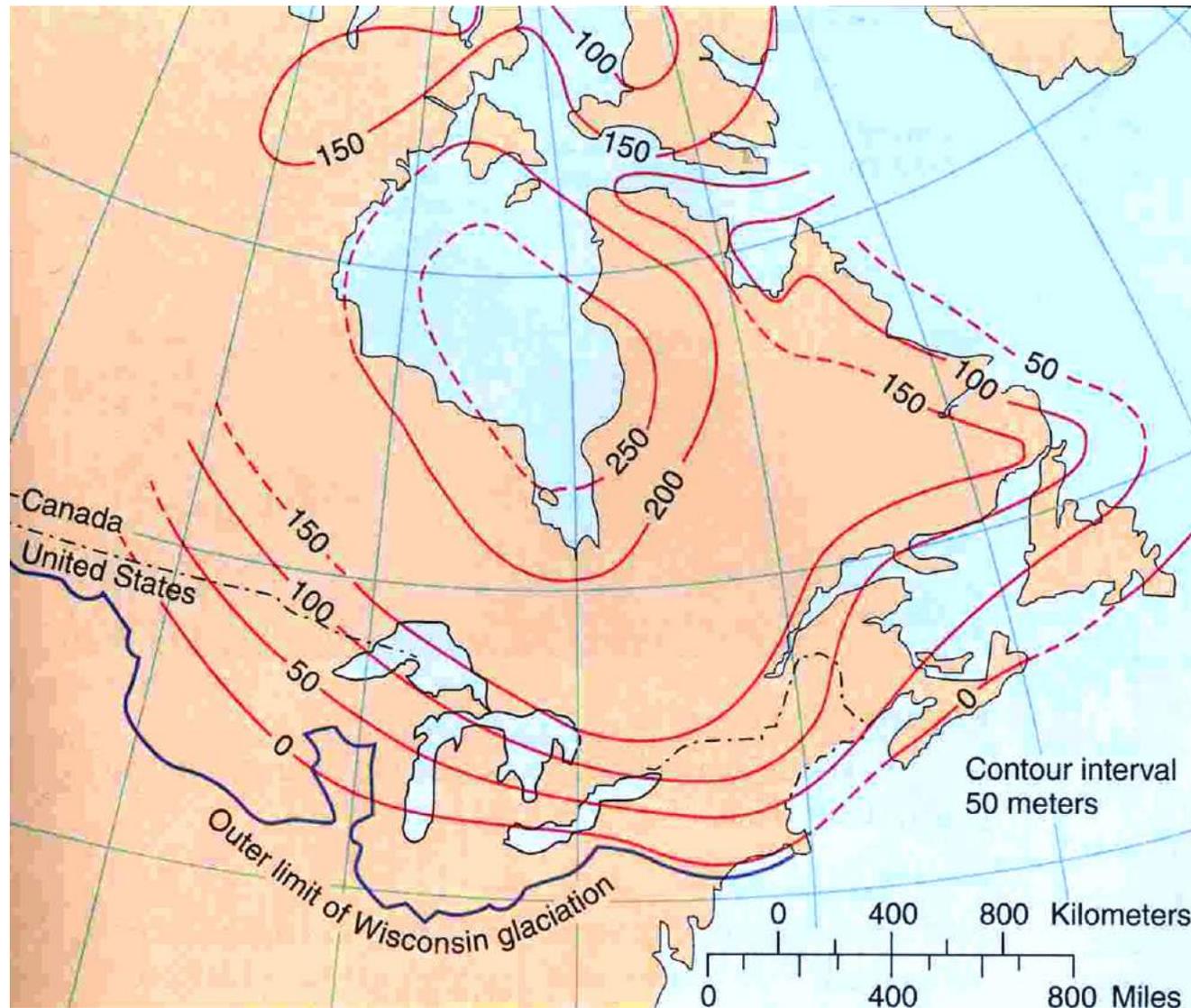
Le centre du lac s'est élevé de 165 m

- viscosité: 4×10^{19} - 10^{20} Pa s pour une épaisseur de lithosphère de 250 km.

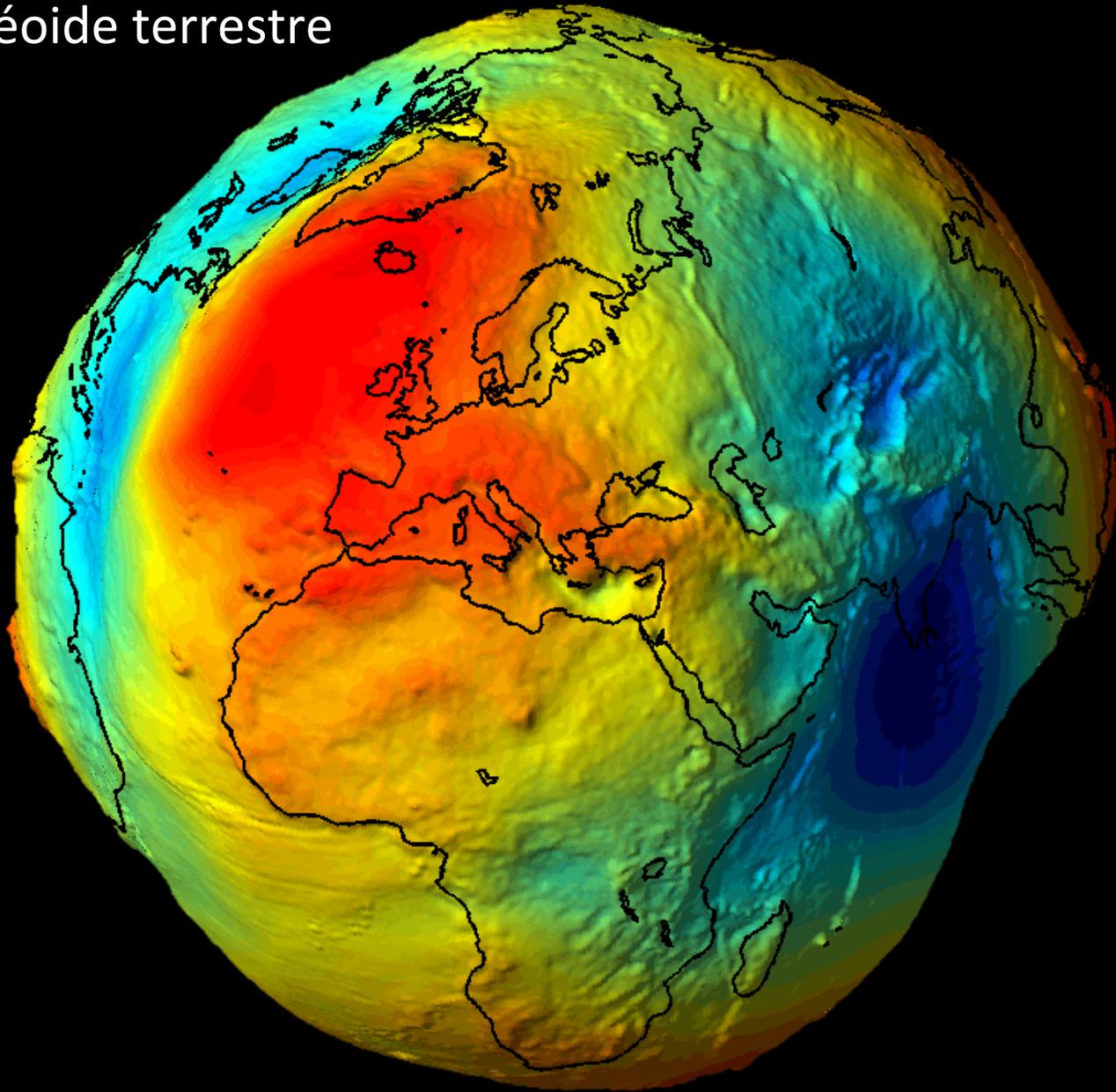


Viscosité: représente la résistance d'un fluide à l'écoulement

Baie d'Hudson (Canada): rebond post-glaciaire



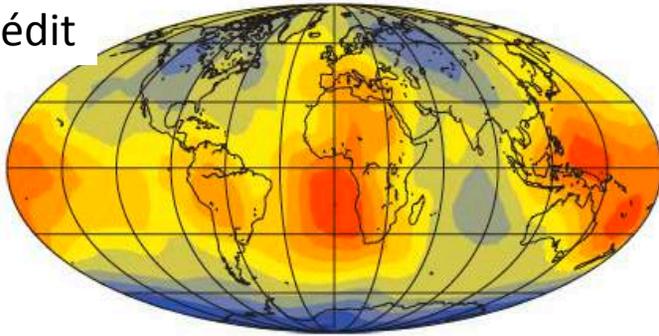
Géοide terrestre



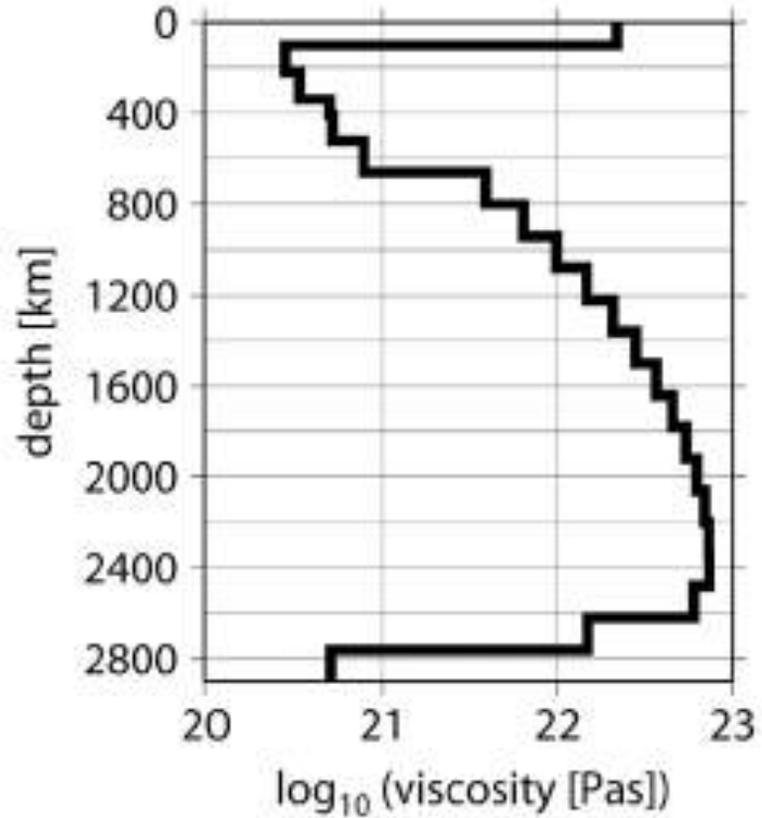
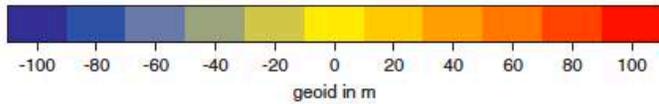
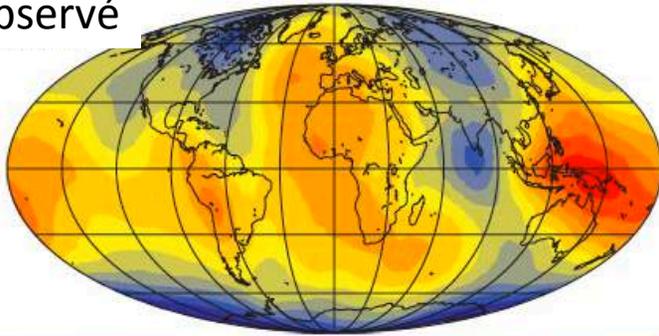
Credits: ESA

géoïde

Prédit



Observé



Steinberger and Calderwood, 2006

ANISOTROPIE

Définition :

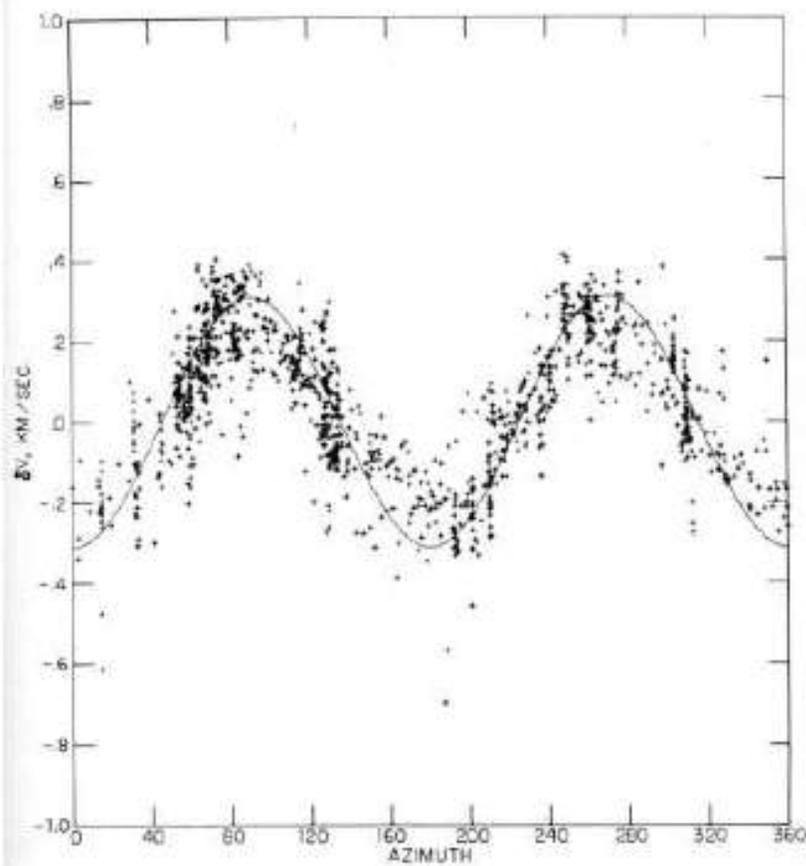
Variation d'une propriété physique en fonction de la direction dans laquelle on la mesure

“Propriétés physiques”

- ◆ Elasticité : propagation des ondes sismiques
- ◆ Propriétés anisotropes des minéraux
- ◆ Conductivité électrique/Magnétique/Thermique
- ◆ Propriétés optiques
- ◆ Viscosité

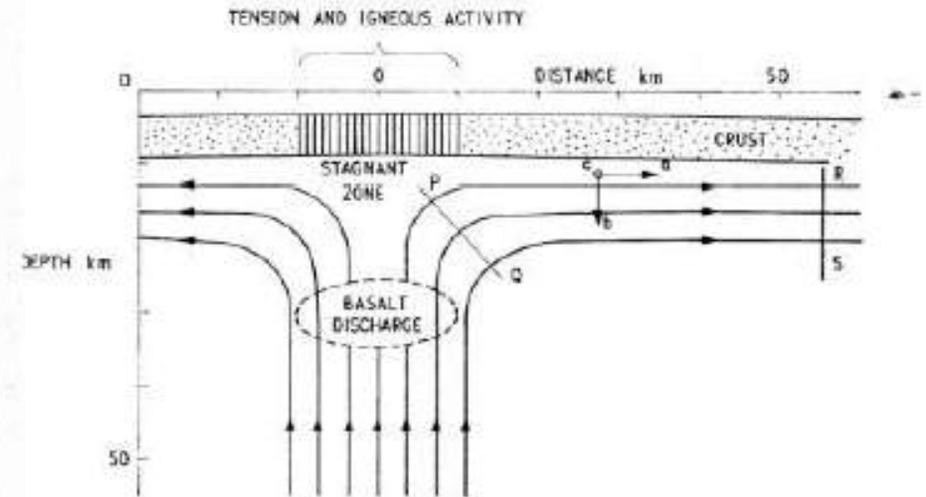
- Anisotropie sismique dans le manteau terrestre
 - Observations
- D'où vient cette anisotropie?
 - Processus à l'échelle microscopique:
 - Structure cristalline, systèmes de glissement, texture
 - Comment les cristaux s'alignent dans un écoulement
 - Quelle forme prend l'anisotropie sismique résultante?
 - Nature et forme de l'écoulement?

Un peu d'histoire.....



Variation azimuthale des ondes P_n près de Hawaii

Shor and Pollard, J. Geophys. Res. 69, 1963
Morris et al., J. Geophys. Res. 74, 1969

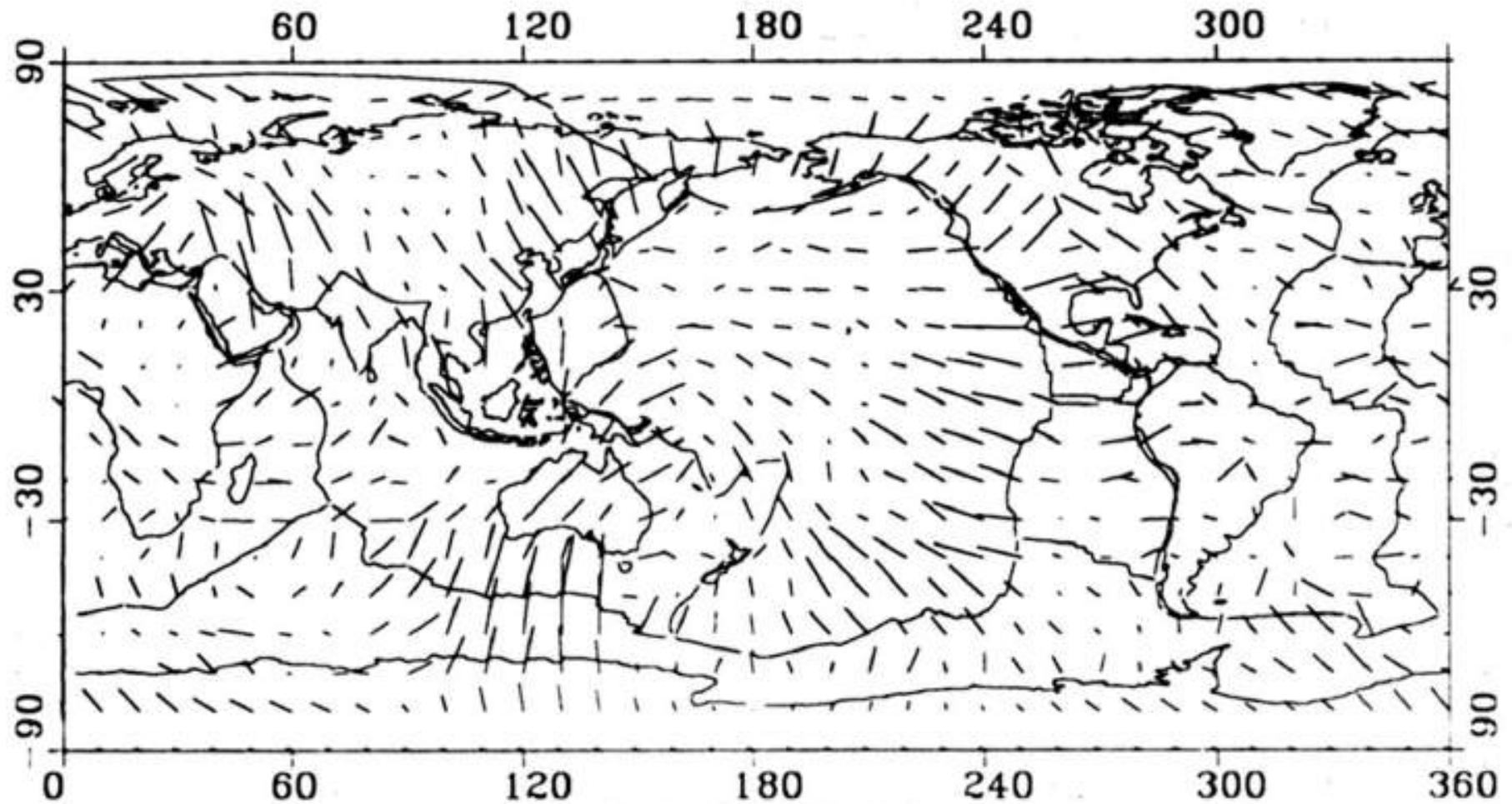


Cann, Geophys. J. R. Astr. Soc 221, 1968

Hess, Nature 203, 1964:
Relation avec la tectonique des plaques



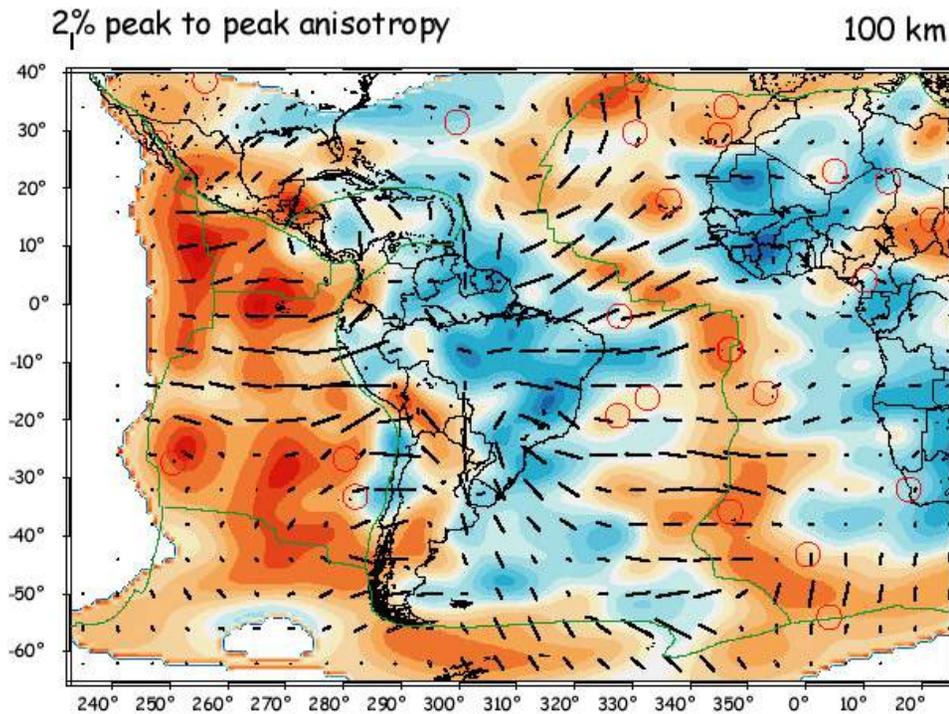
Anisotropie azimuthale des ondes de surfaces
dans le manteau supérieur



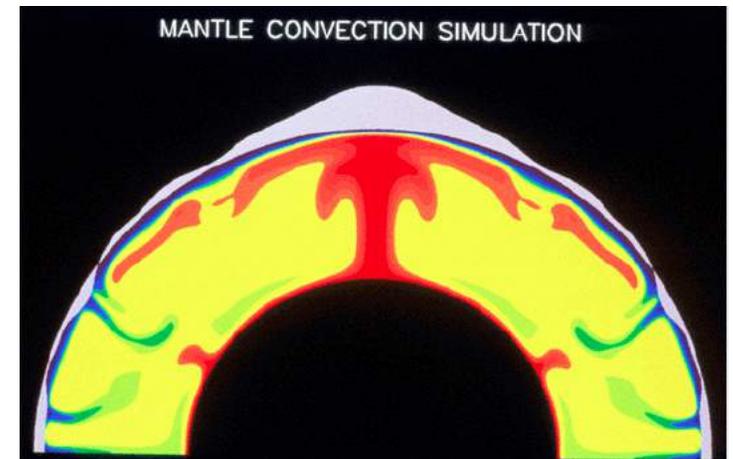
Montagner and Tanimoto, 1990

-> L'étude de l'anisotropie sismique nous permet de visualiser dans l'espace, à grande échelle, la déformation dans le manteau

-> Comment passer de l'anisotropie sismique obtenue par imagerie du manteau aux écoulements de matière?



Heinz et al. 2003

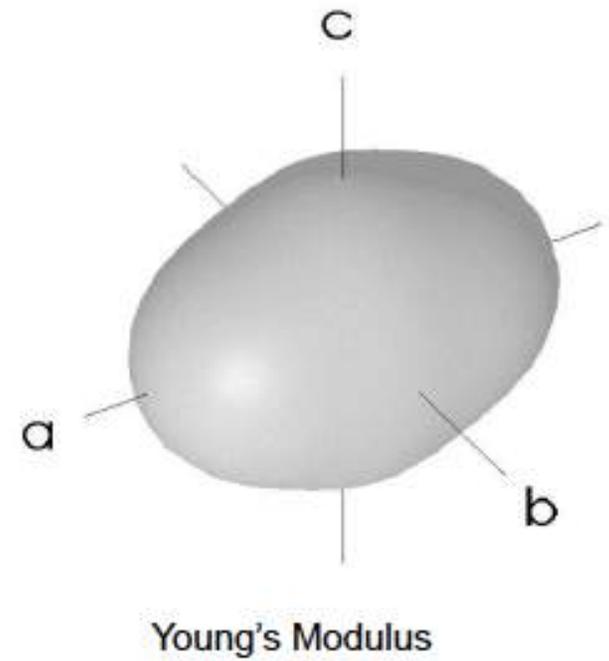


Quelle est la cause de l'anisotropie sismique observée?

1- A l'échelle du cristal

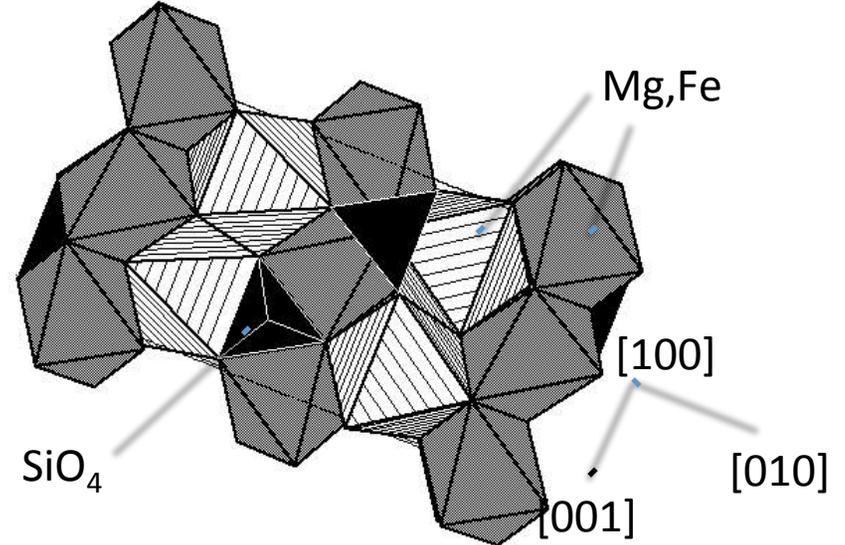
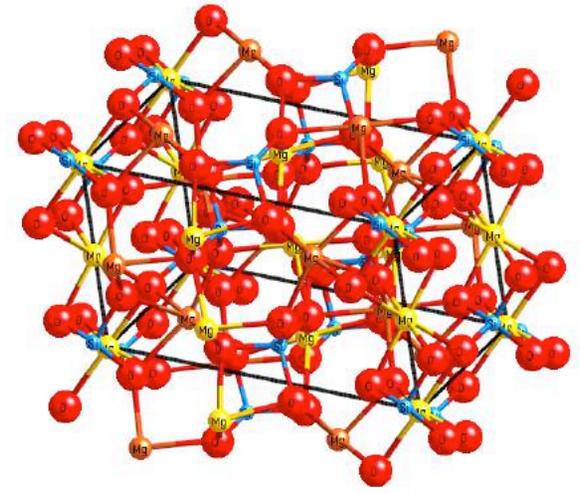
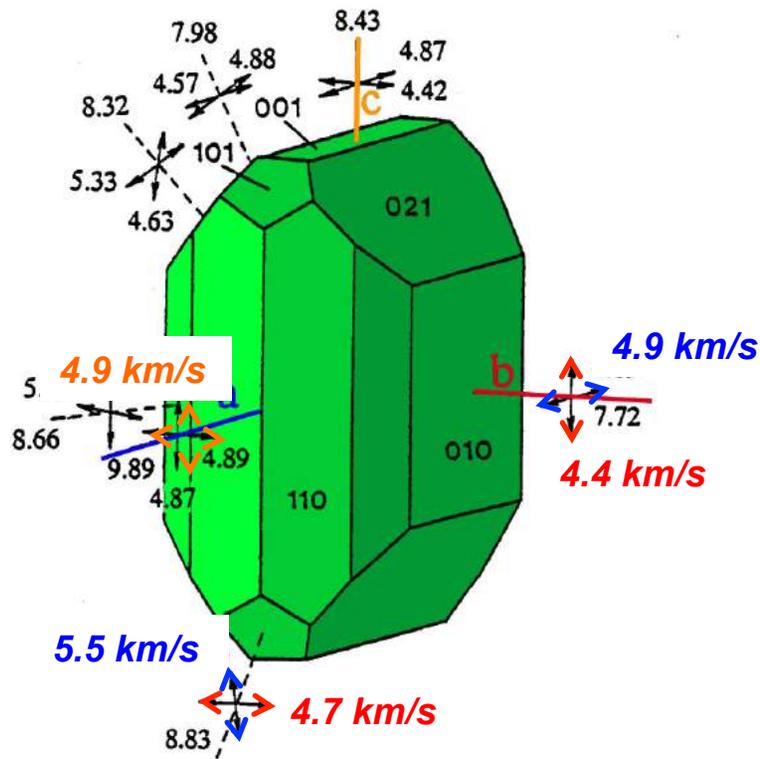
2- A l'échelle de la roche

3- A l'échelle des observations géophysiques (dizaines/centaines de km)



Cristal d'olivine

Olivine = $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$



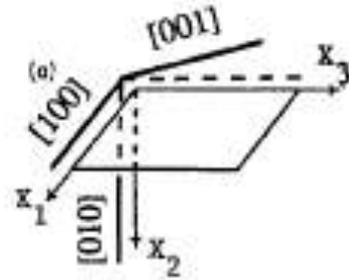
Pourquoi un cristal est-il anisotrope?

-> Organisation périodique des atomes avec \neq liaisons dans des directions \neq

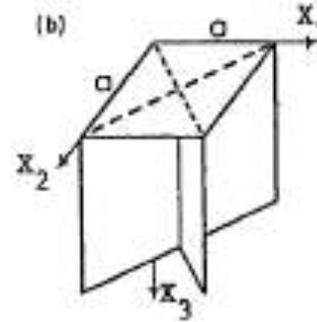
Les symétries de la structure cristalline définissent l'anisotropie

Exemples de symétries cristallines

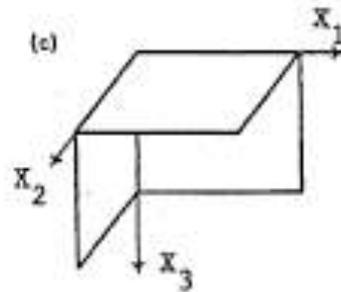
Monoclinique (13)



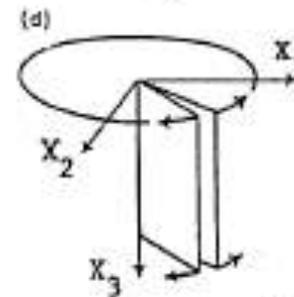
Tetragonale (6)



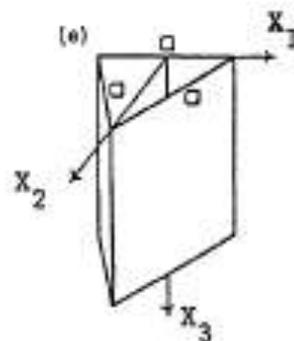
Orthorombique (9)
-> olivine



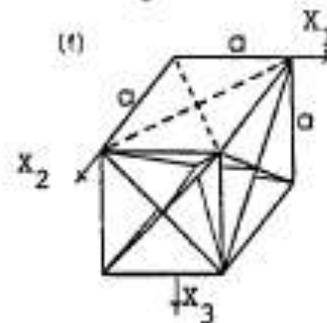
Hexagonale (5)
-> glace



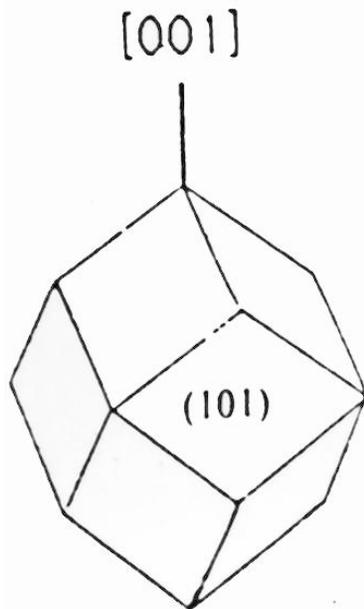
Trigonale (7)



Cubique (3)
-> grenat



Tous les minéraux ne sont pas fortement anisotropes:
-> Les cristaux cubiques comme le grenat ou les spinelles sont presque Isotropes.



GRENAT

Almandin	$V_{\max}=8.9 \text{ km/s}$ $V_{\min}=8.8 \text{ km/s}$
Pyrope	$V=9.1 \text{ km/s}$
Grossulaire	$V_{\max}=9.4 \text{ km/s}$ $V_{\min}=9.2 \text{ km/s}$
Spessartine	$V_{\max}=8.5 \text{ km/s}$ $V_{\min}=8.4 \text{ km/s}$

Comment l'anisotropie est elle transférée de l'échelle du cristal à celle de la roche?