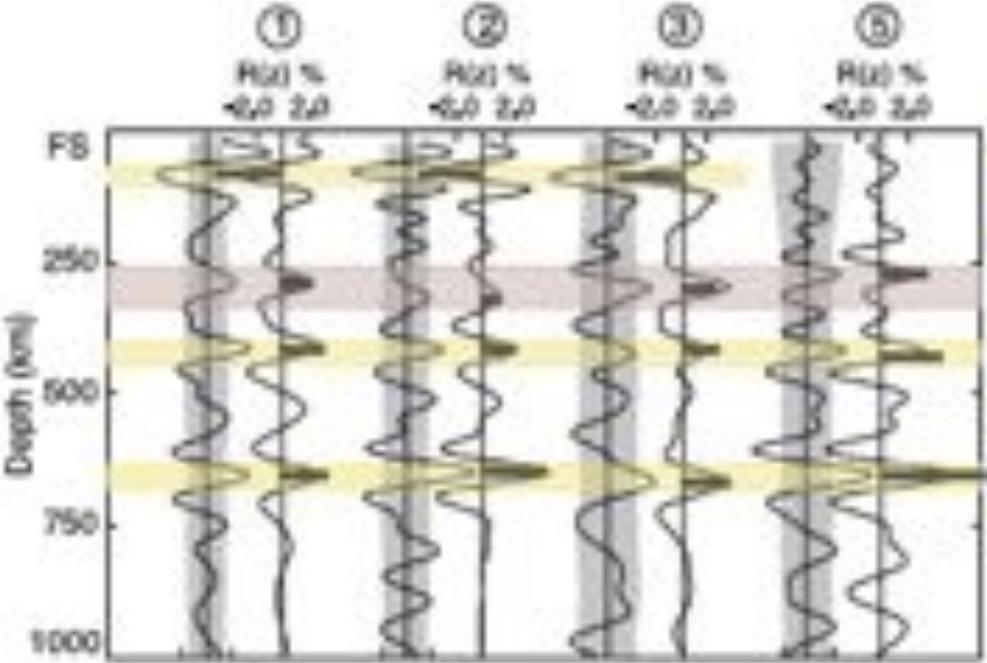
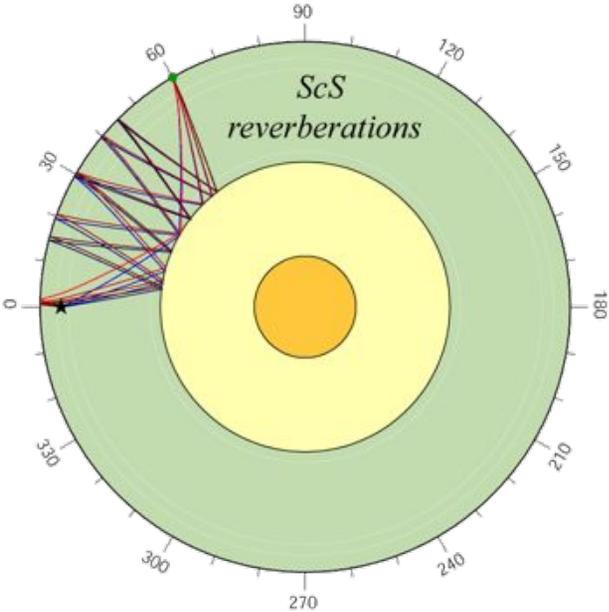


# Structure et dynamique du système Lithosphère/Asthénosphère

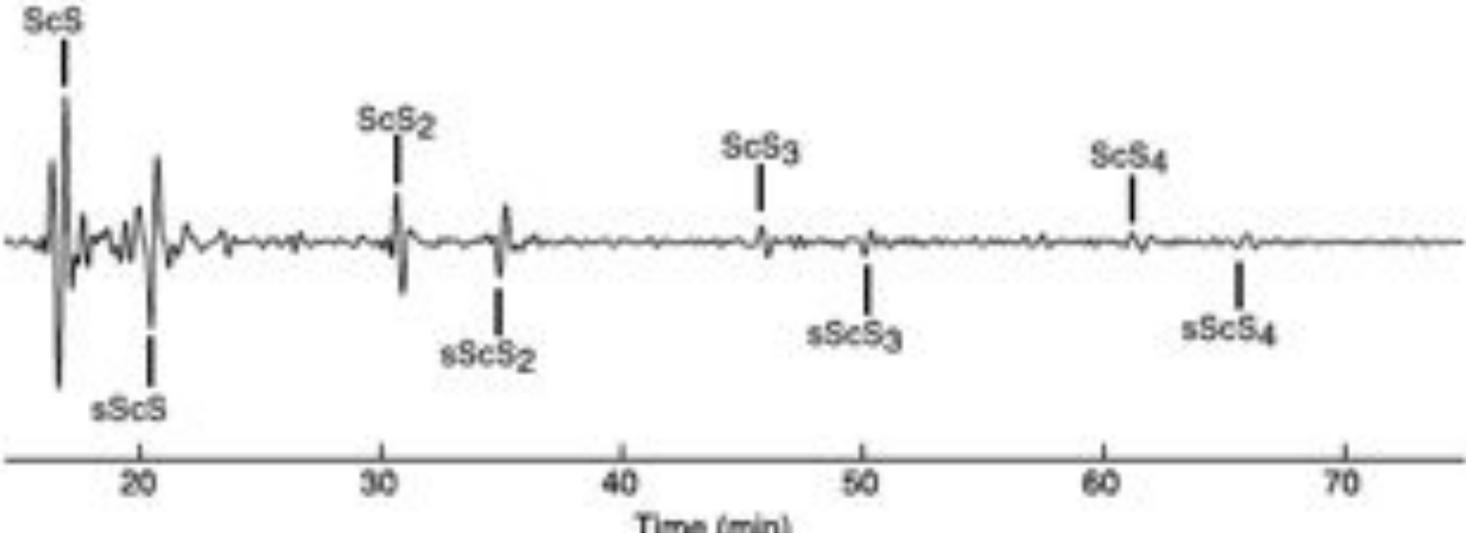
5-Méthodes sismologiques et magnéto-telluriques:  
structure "stratifiée" dans le manteau supérieur  
(Suite)

Barbara Romanowicz - Cours 2013  
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre  
Collège de France  
4 Novembre 2013

# 1 - Ondes ScS multiples

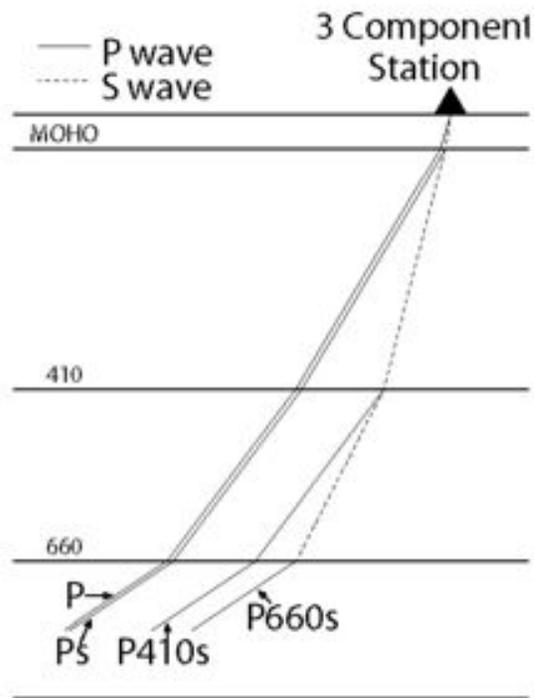


Bagley and Revenaugh, 2008



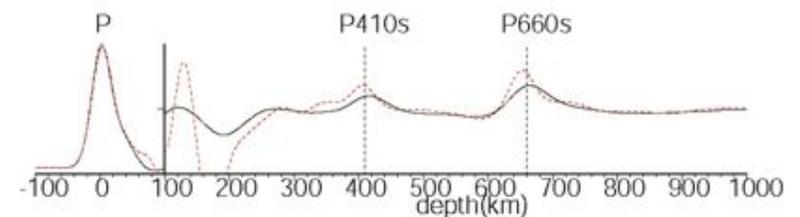
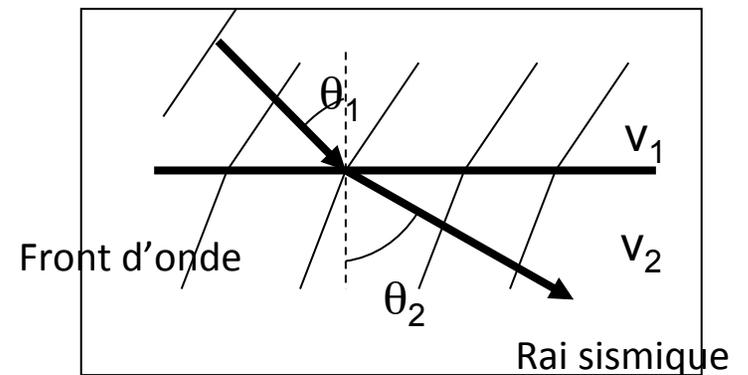
## 2- Ondes converties Ps et Sp

Fonctions "récepteur"



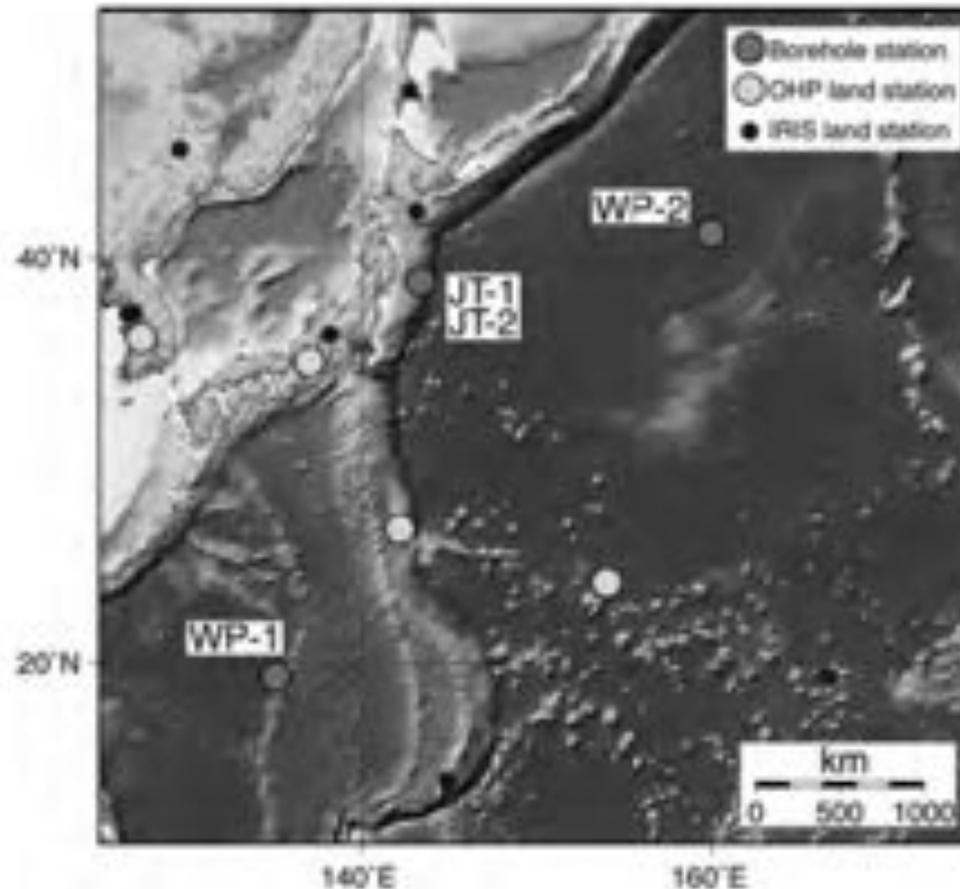
Loi de la réfraction:

$$\frac{r \sin \theta}{v} = p = \text{constante}$$

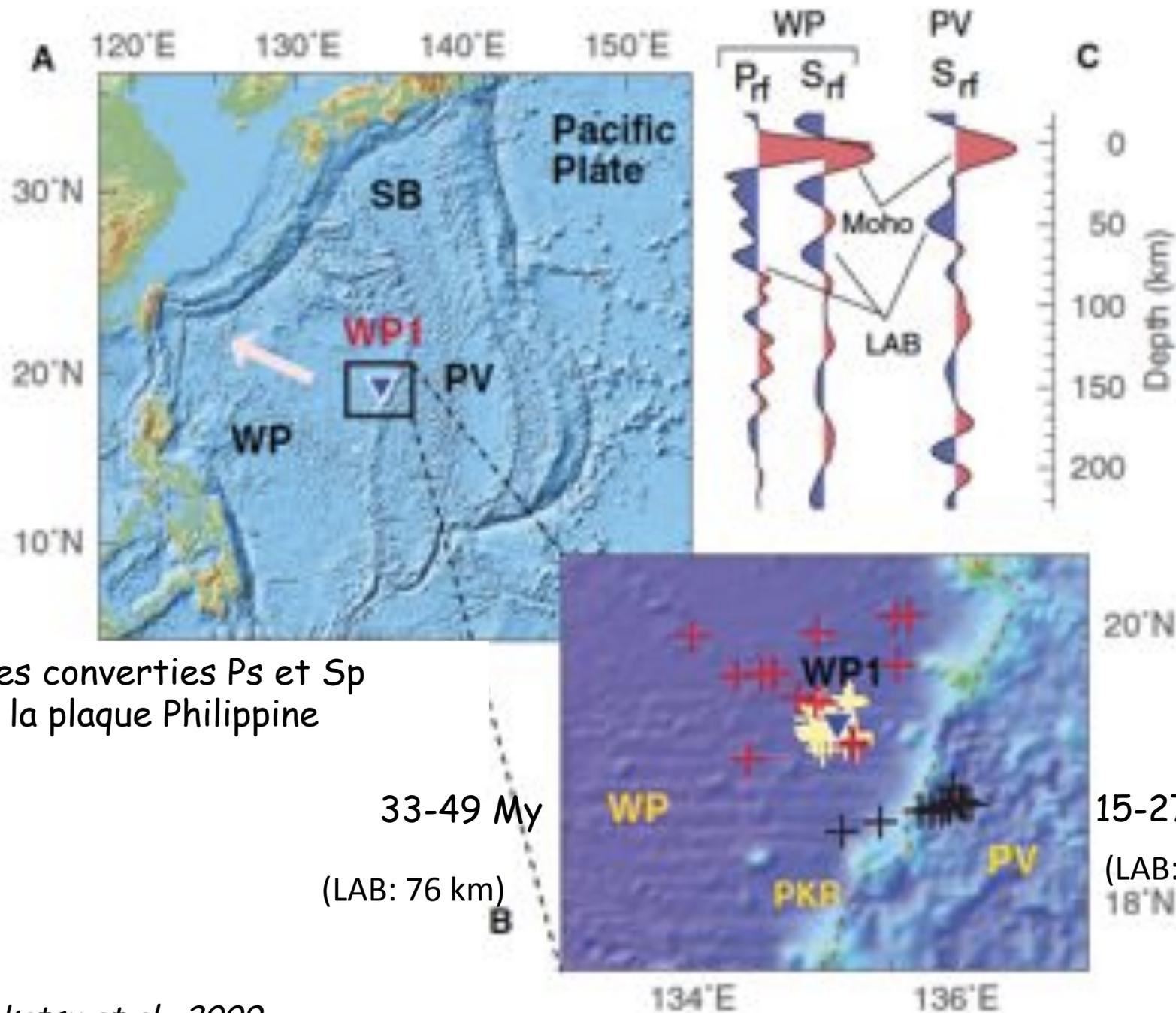


- Ondes converties sous les stations
- Echantillonnent surtout les continents
- Ps mais aussi Sp

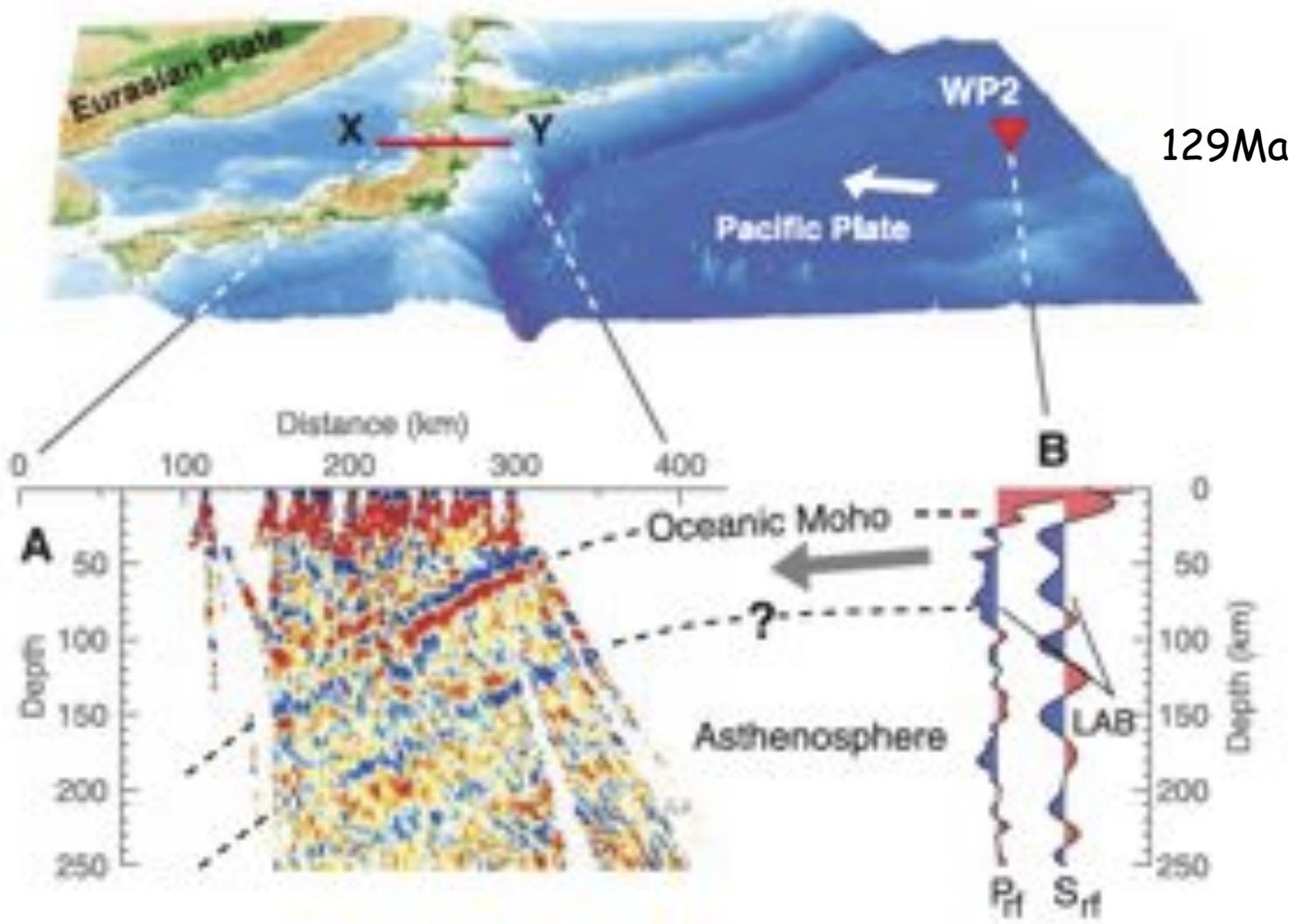
Stations sismologiques large bande fond de mer, installées en  
fond de puits: WP1, WP2:  
Projet japonais: "OHP" (Ocean Hemisphere Project)



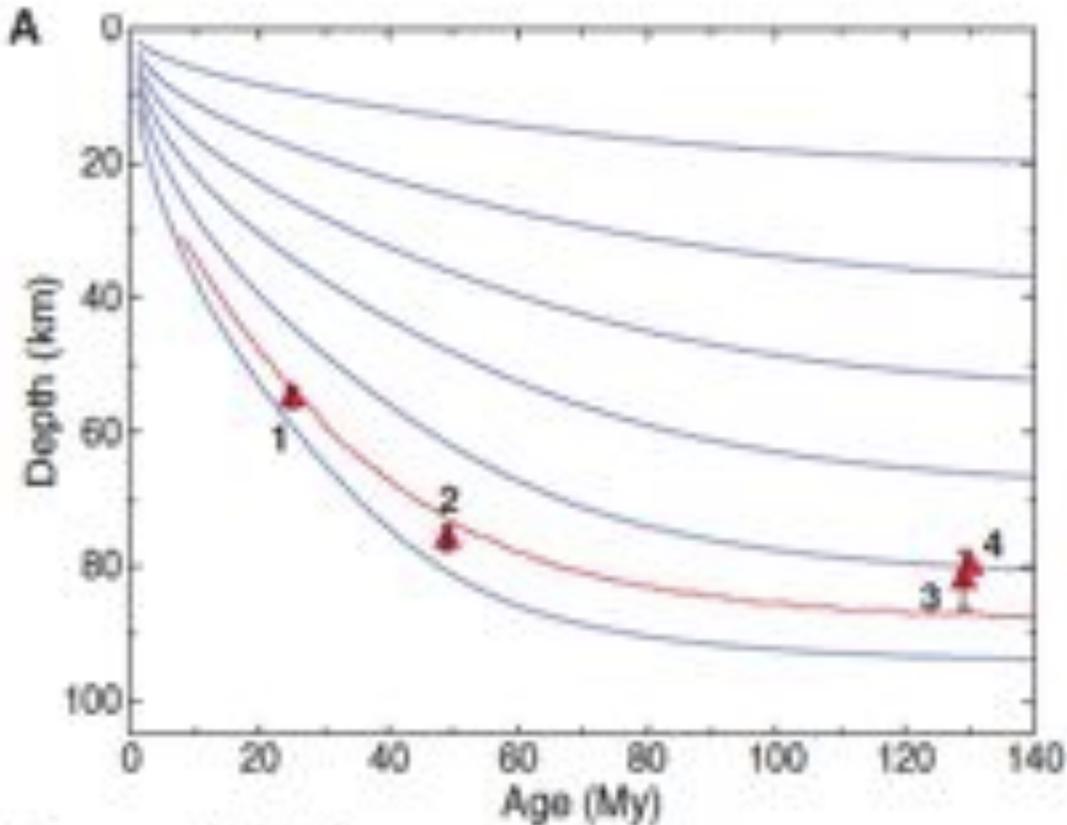
Installées en 2000  
et 2001 (ODP - Ocean Drilling Project)  
Données récupérées par ROV



Ondes converties Ps et Sp  
 sous la plaque Philippine



LAB à 82 +/- 4km



Profondeur de la zone de fusion partielle correspondant à une solubilité d' $H_2O$  de  $10^{-3}$  calculé pour le modèle de Mierdel et al. (2007)

->Dépendance avec l'âge exclut le modèle d'extraction d'eau aux rides

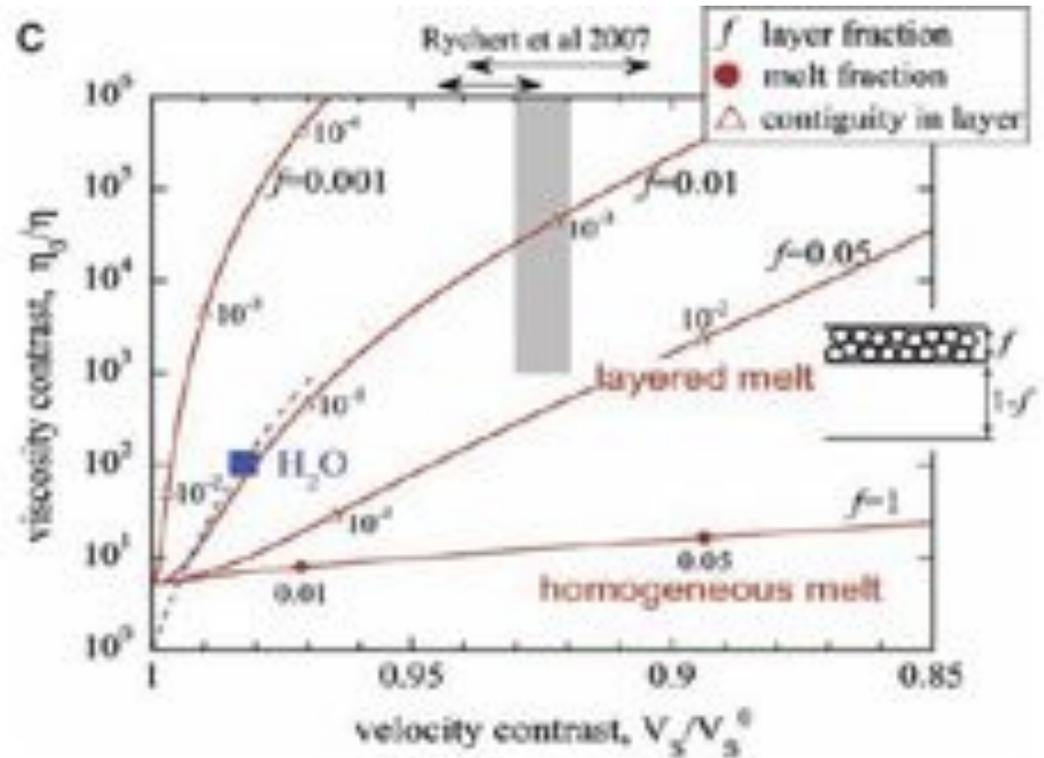
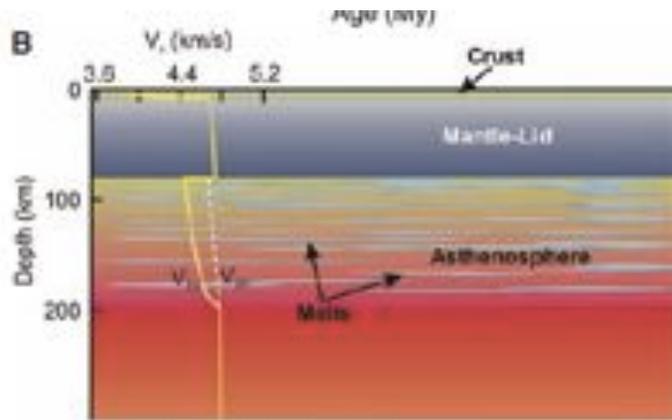
-> Discontinuité d'épaisseur moins de 10-15 km

avec saut de vitesse de 7-8% exclut le modèle purement thermique

-> fusion partielle (?)

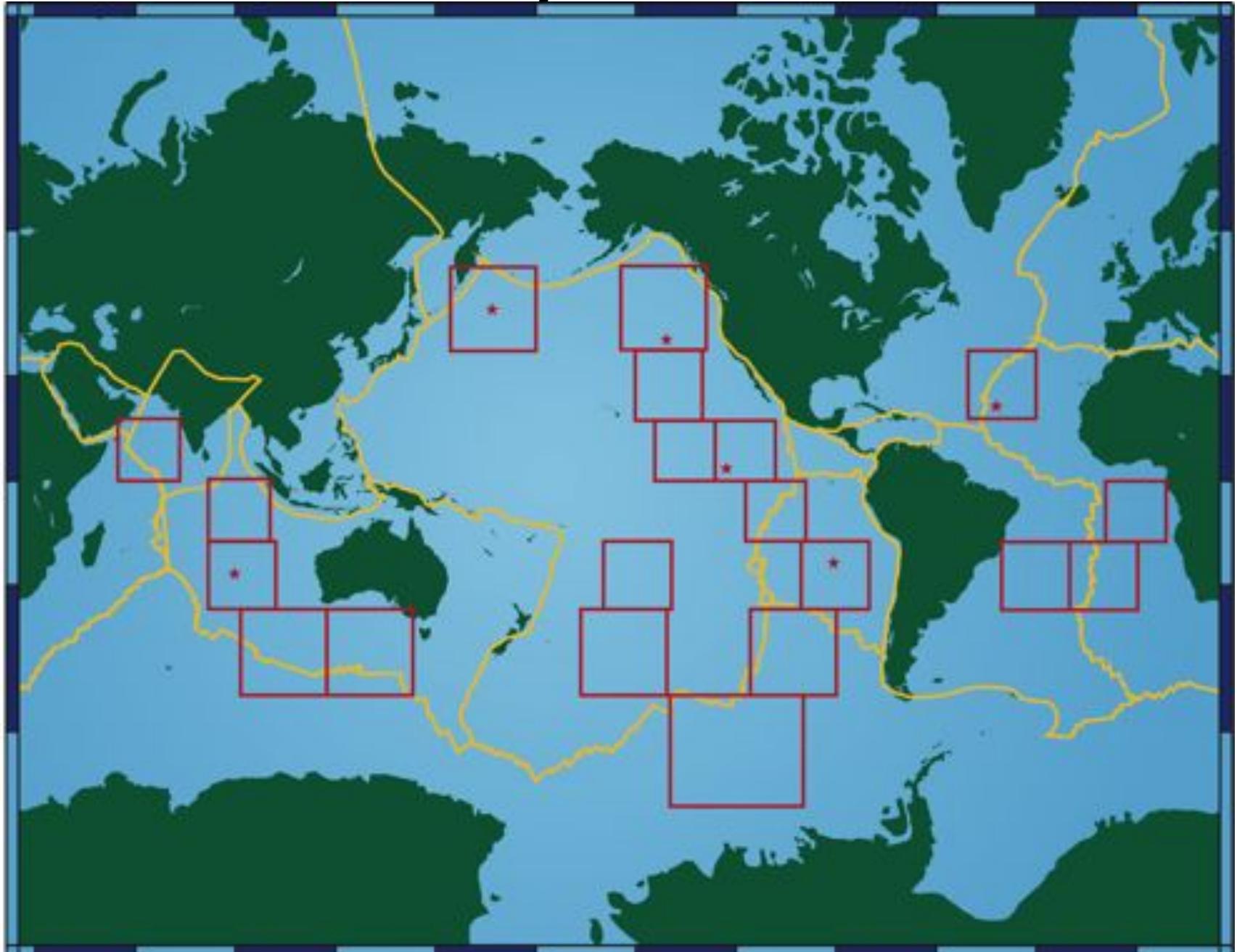
Kawakatsu et al. (2009): contraste de vitesse de 7-8% => proportion de fusion partielle de 3.5 à 4.0%, dix fois trop!

-> proposent une structure en bandes alternées de fusion partielle



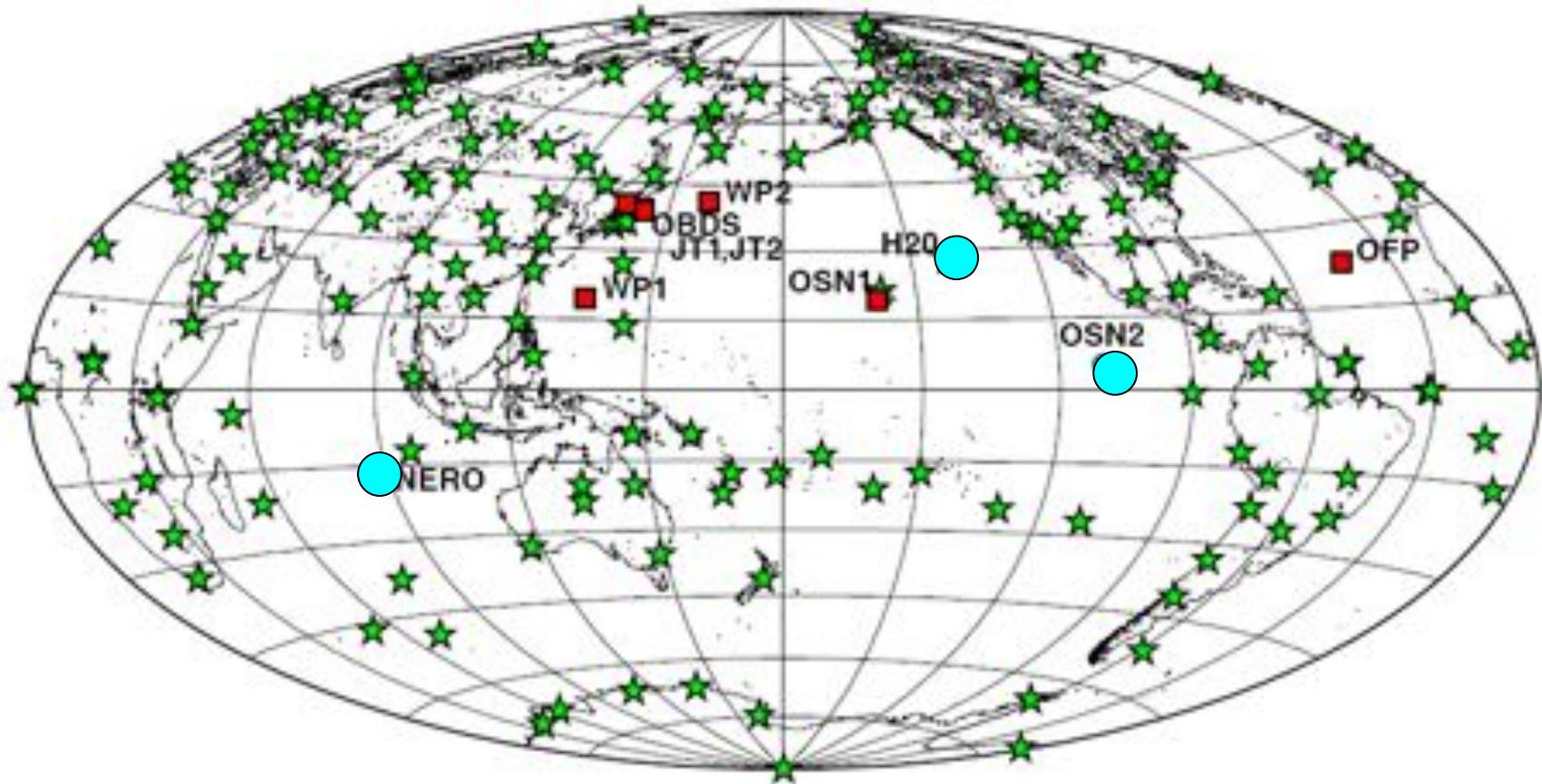
Kawakatsu et al., 2009

# ION Priority Seismic Sites

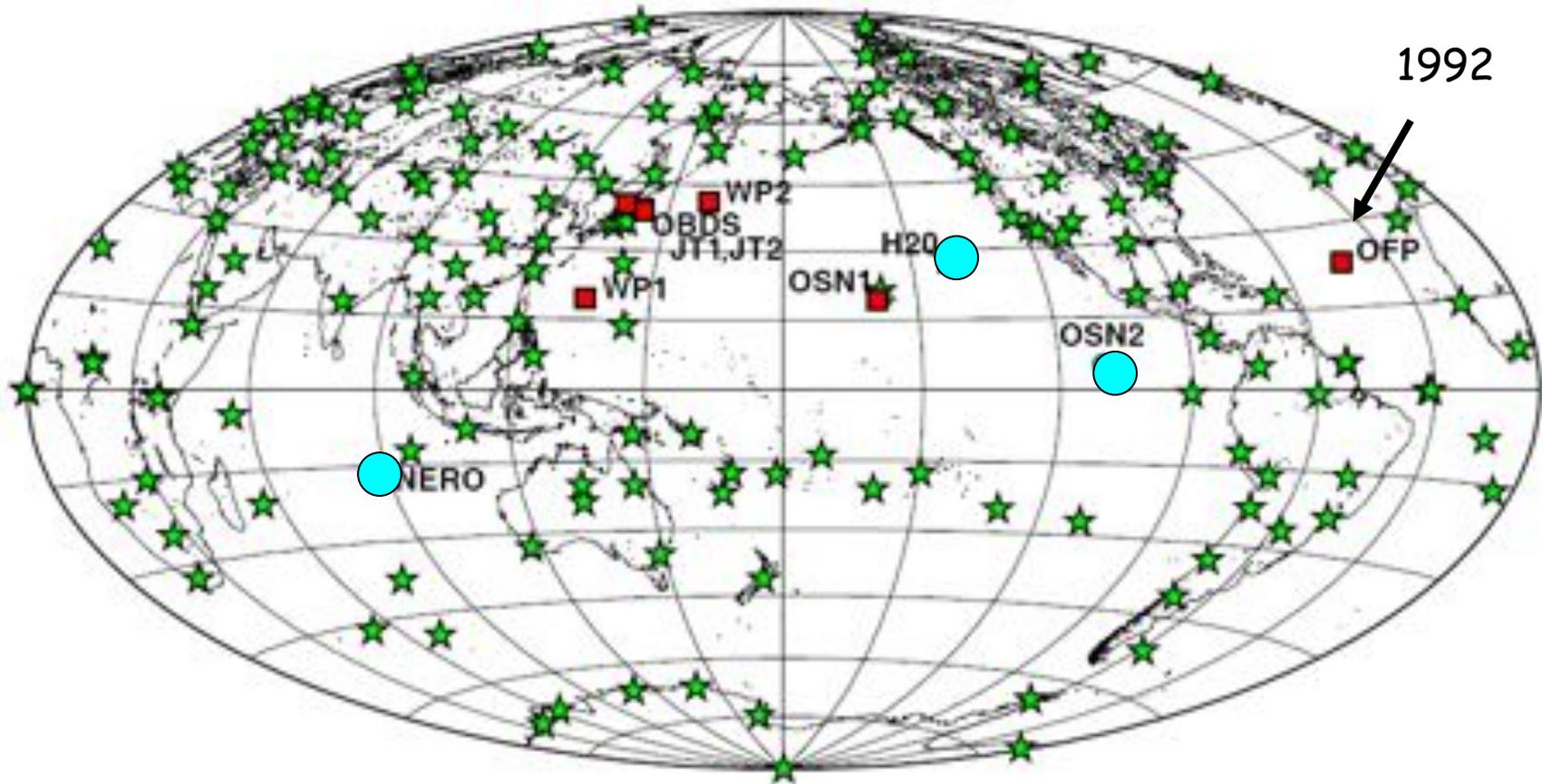


# ION: International Ocean Network

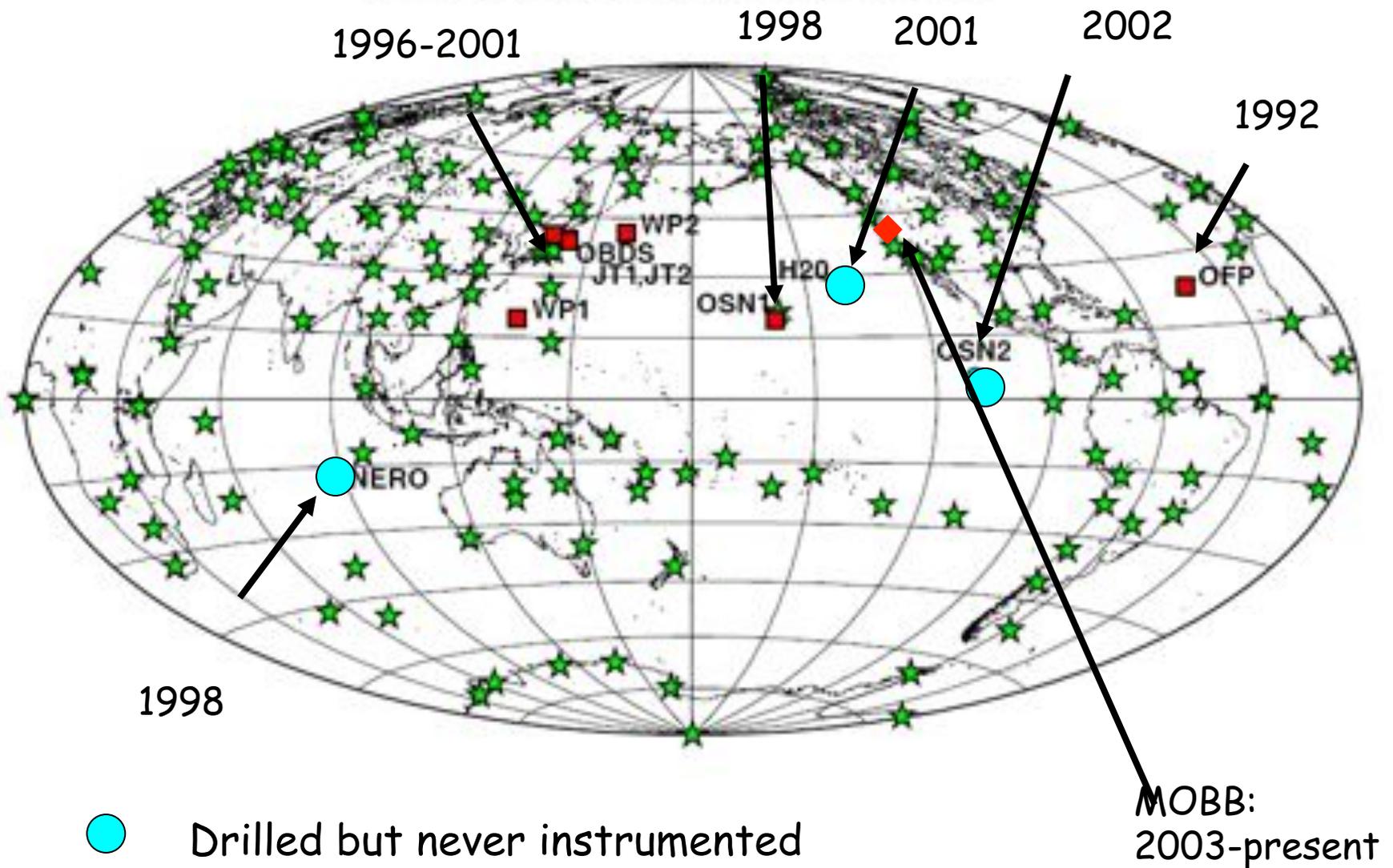
2002

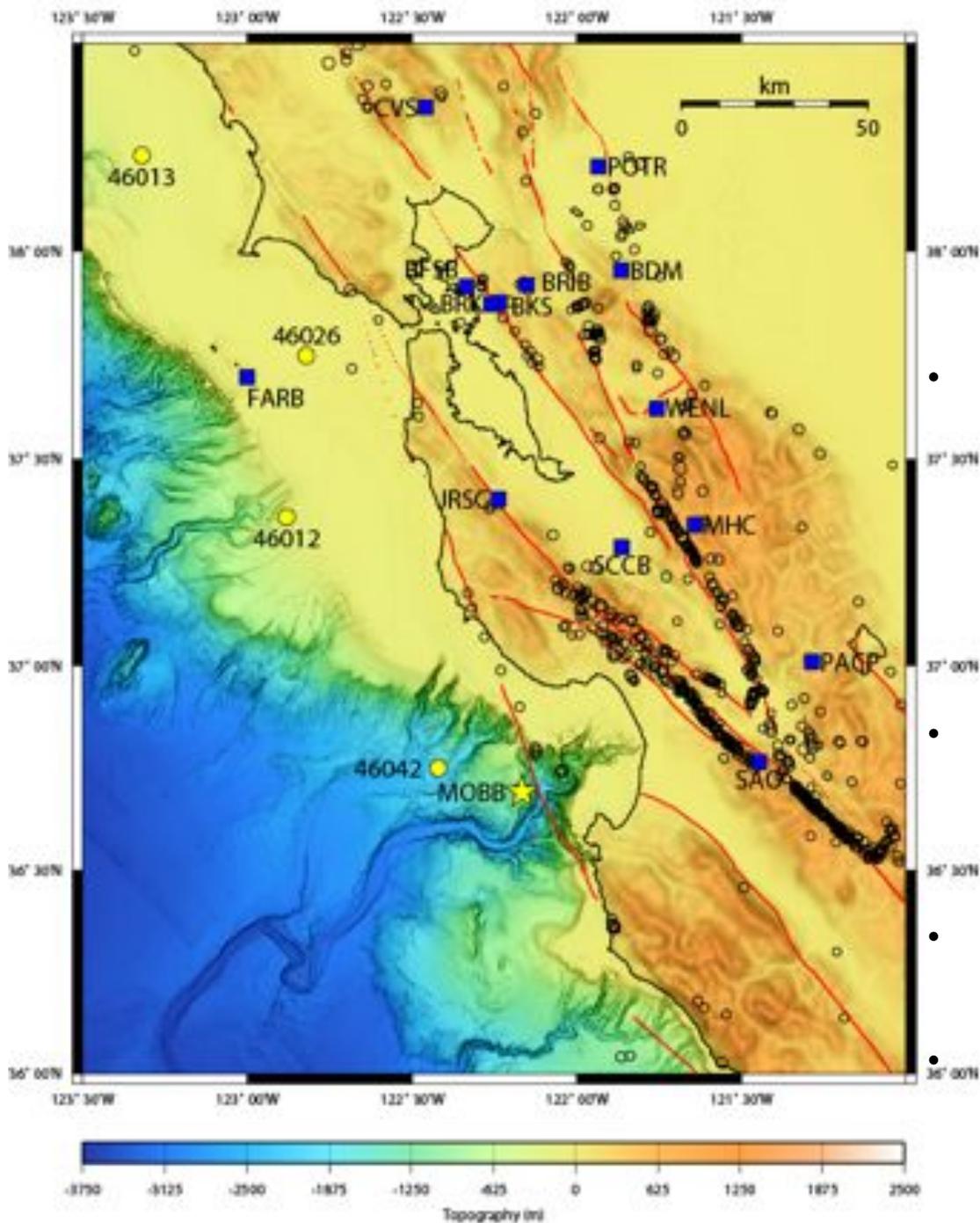


# ION: International Ocean Network



# ION: International Ocean Network





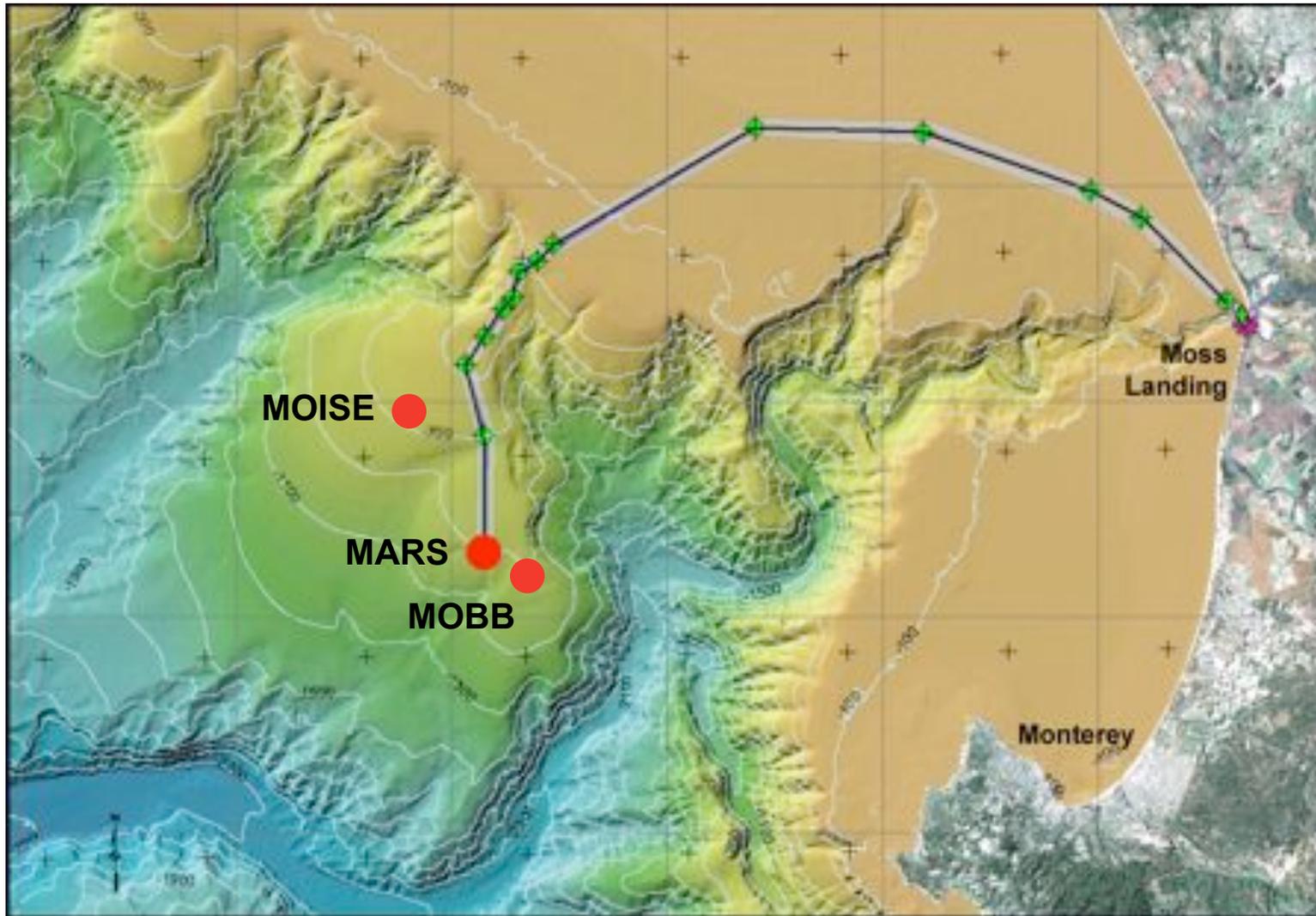
# MOBB

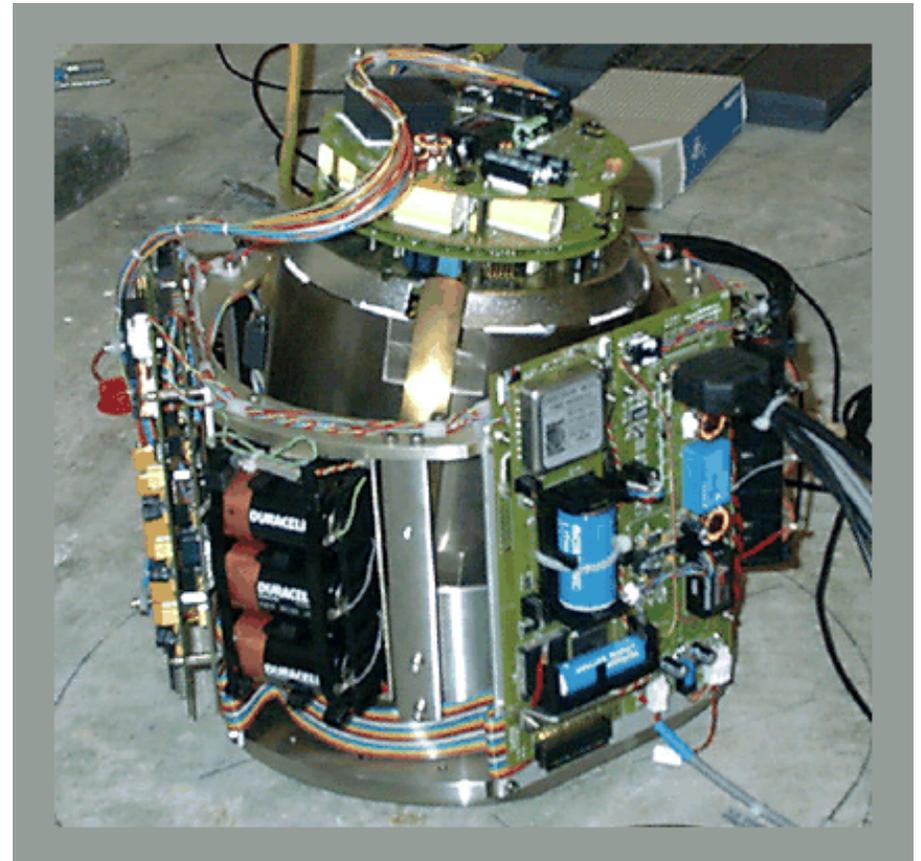
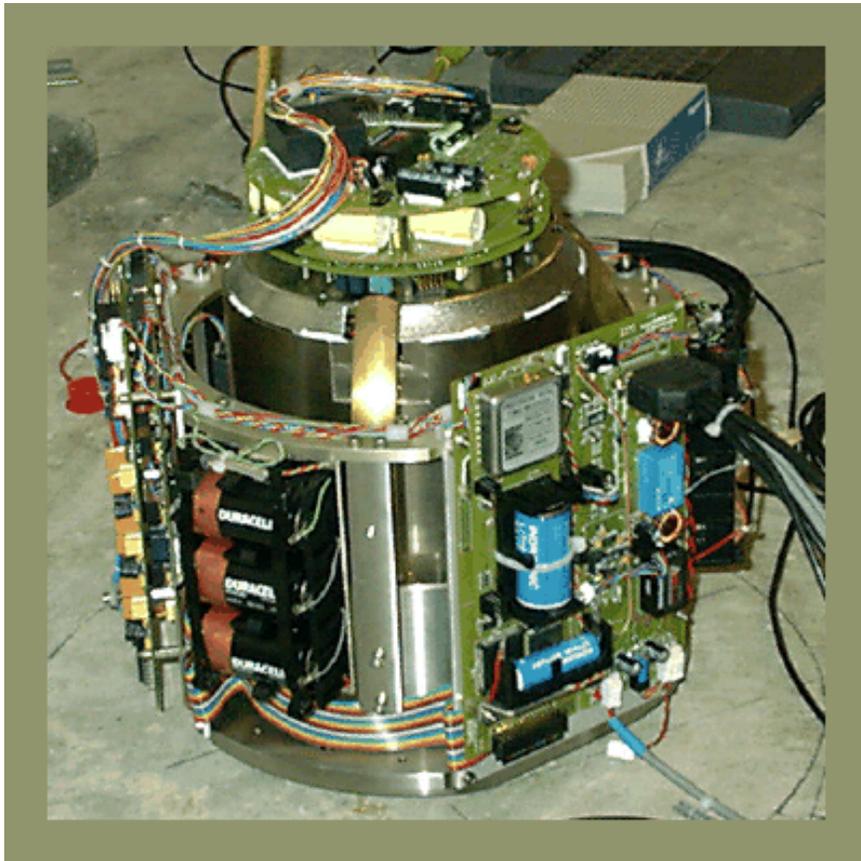
Monterey Ocean Bottom Broadband Observatory

- Projet du laboratoire de sismologie de l'université de Californie à Berkeley, en collaboration avec MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Institute)
- Station sismologique fond de mer large bande installée en Avril 2002
- Plus de 11 ans de données en continu
- *Reliée depuis 2009 par câble sous marin à la côte: données en temps réel*

# "MOBB to MARS"

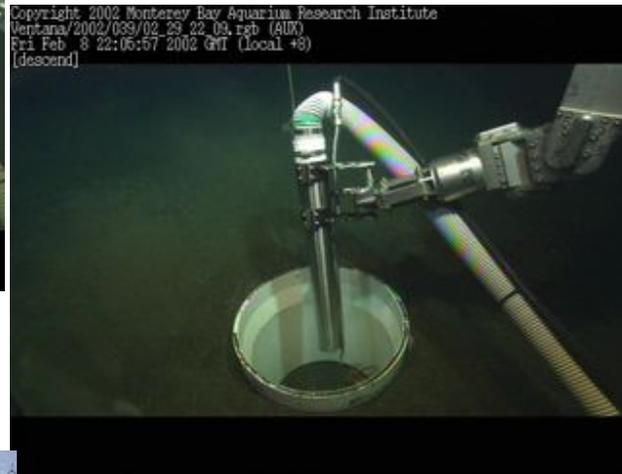
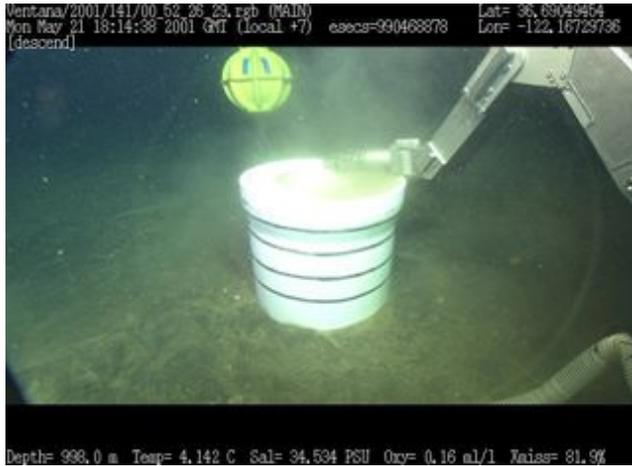
- Required a 3km extension cable from MOBB to MARS science node.





During leveling...

Titanium vessel  
Foam and mylar insulation  
Filled with argon



# Installation MOBB Fév-Avril 2002



Copyright 2002 Monterey Bay Aquarium Research Institute

Ventana/2002/039/01\_49\_13\_12.rgb (AUX)

Fri Feb 8 21:25:20 2002 GMT (local +8)

[descend]



Copyright 2002 Monterey Bay Aquarium Research Institute

Ventana/2002/100/00\_41\_35\_14.rgb (AUX)

Wed Apr 10 17:44:31 2002 GMT (local +7)

[descend]

229

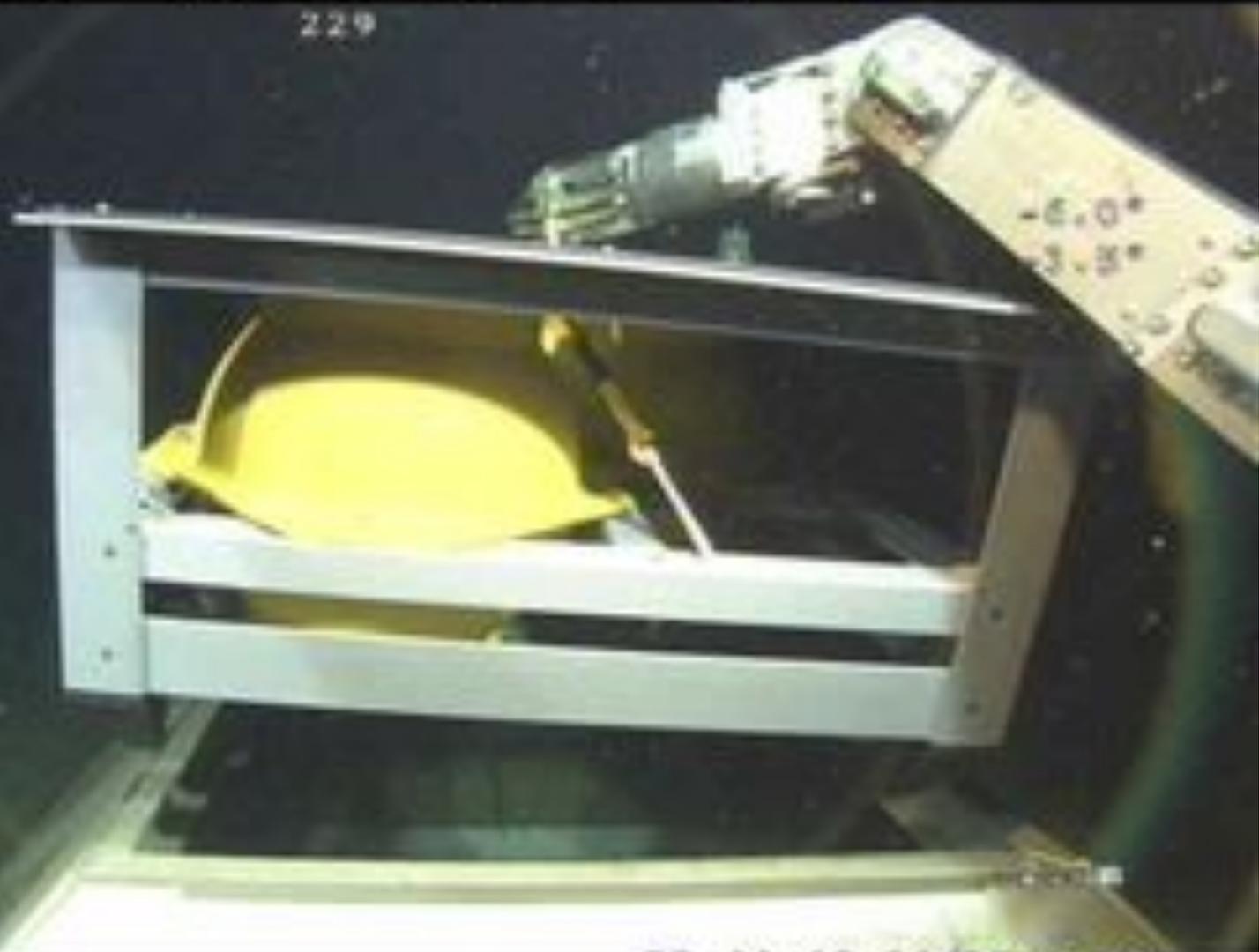
1000.5

1.8m

2913.4

Dive # 2152

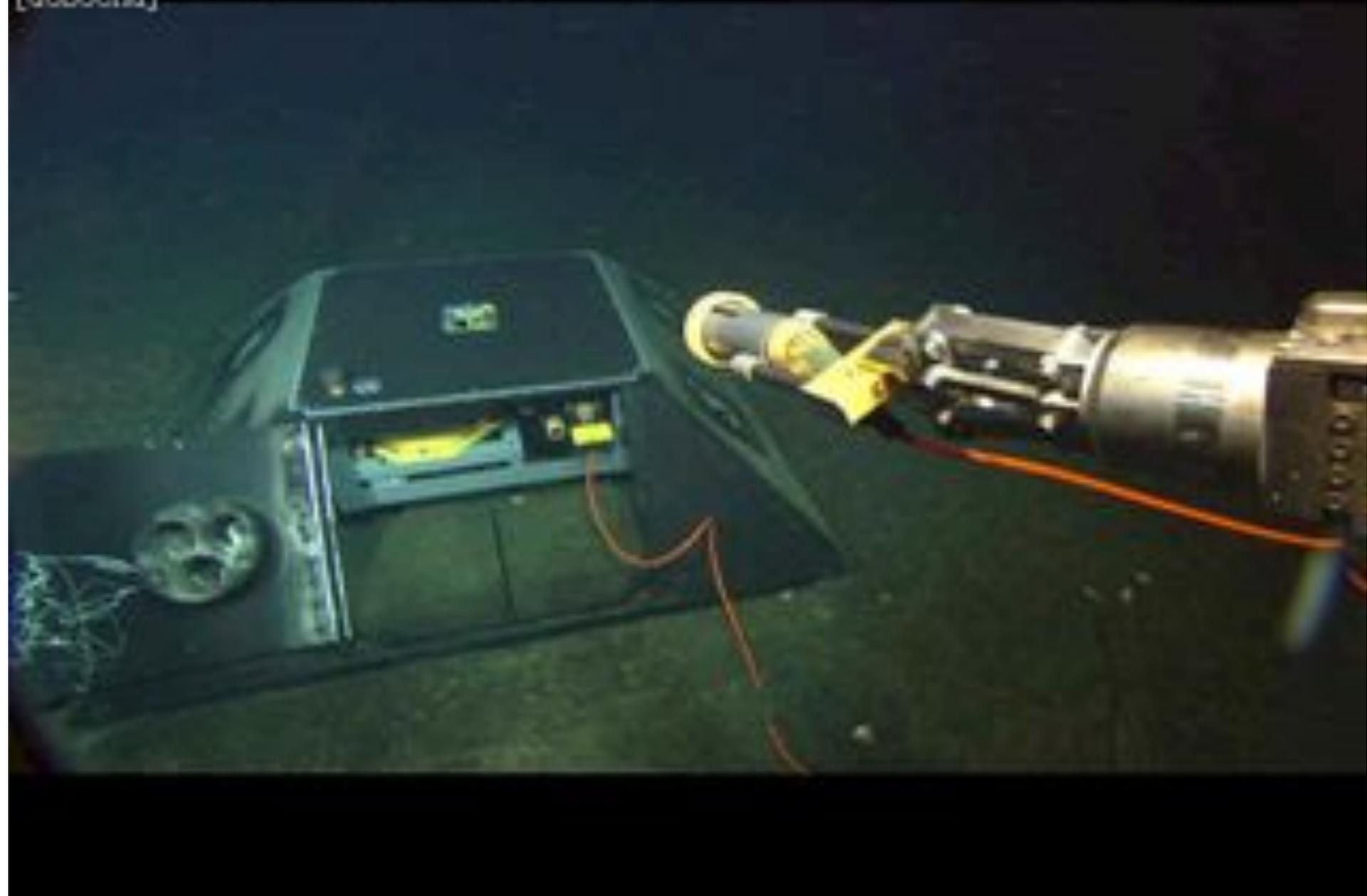
09:44:46 04/10/2002



Copyright 2002 Monterey Bay Aquarium Research Institute  
Ventana/2002/101/01\_00\_53\_24.rgb (MAIN)  
Thu Apr 11 18:07:56 2002 GMT (local +7)  
[descend]



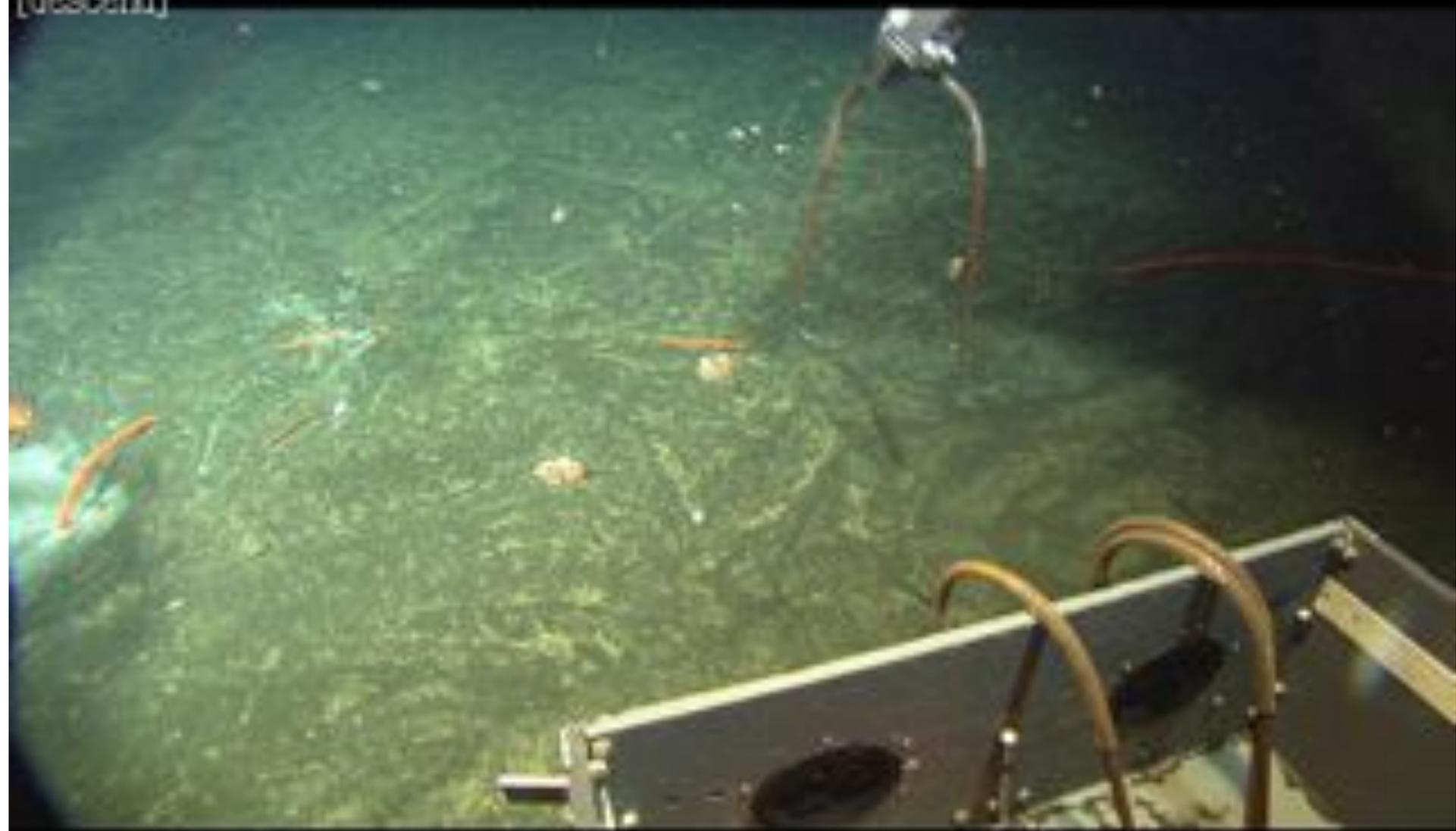
Copyright 2002 Monterey Bay Aquarium Research Institute  
Ventana/2002/101/01\_03 11 20.rgb (MAIN)  
Thu Apr 11 18:10:14 2002 GMT (local +7)  
[descend]

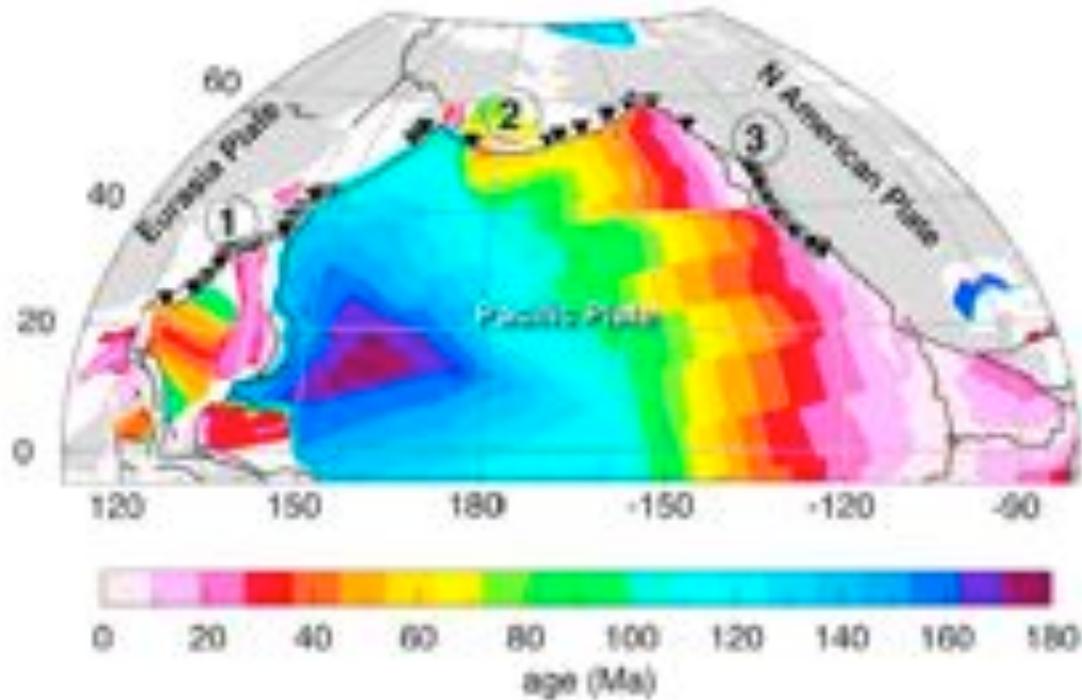


Copyright 2002 Monterey Bay Aquarium Research Institute  
Ventana/2002/101/00\_15 57 03.rgb (MAIN)  
Thu Apr 11 18:13:48 2002 GMT (local +7)  
[descend]

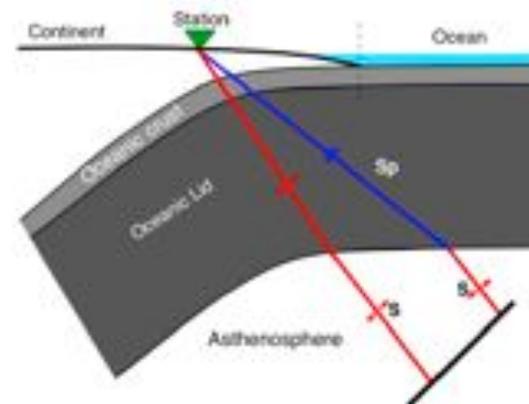


Copyright 2002 Monterey Bay Aquarium Research Institute  
Ventana/2002/101/01\_49\_06\_20.rgb (MAIN)  
Thu Apr 11 19:30:52 2002 GMT (local +7)  
[descend]



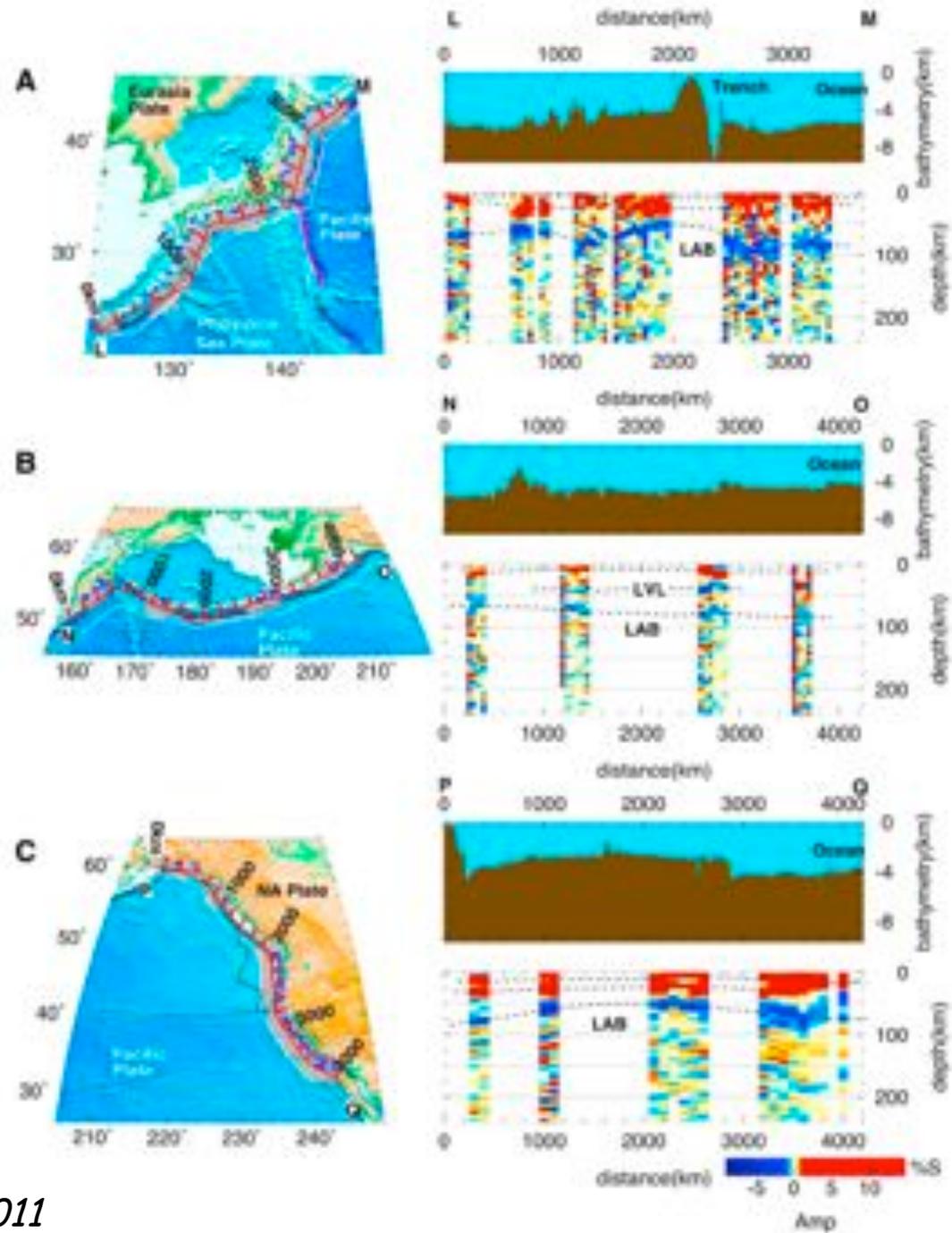


Ages des plaques:  
10-130 Ma

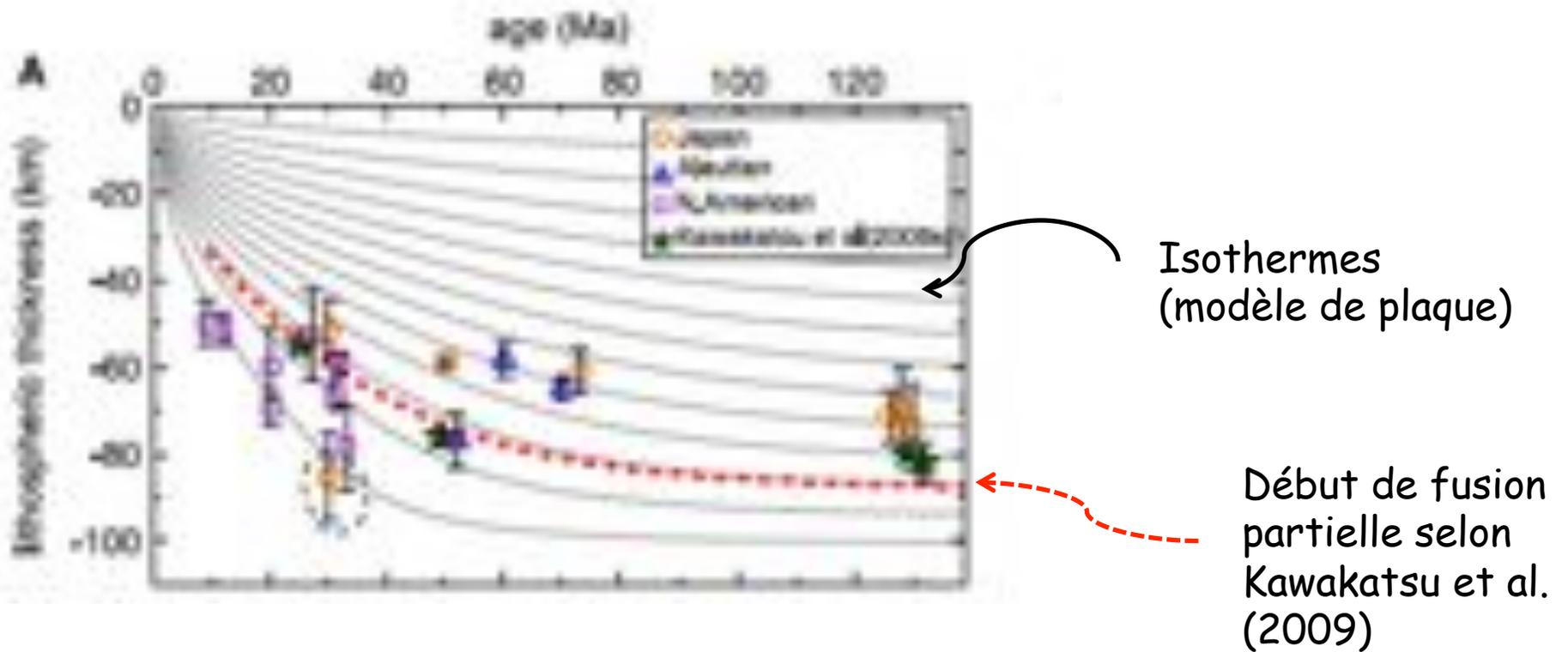


*Kumar and Kawakatsu, 2011*

Ages des plaques:  
10-130 Ma



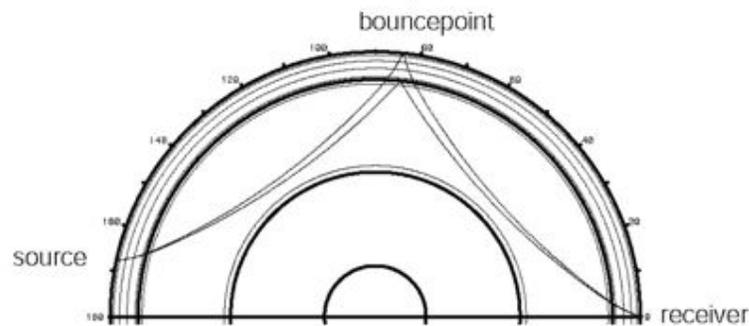
*Kumar and Kawakatsu, 2011*



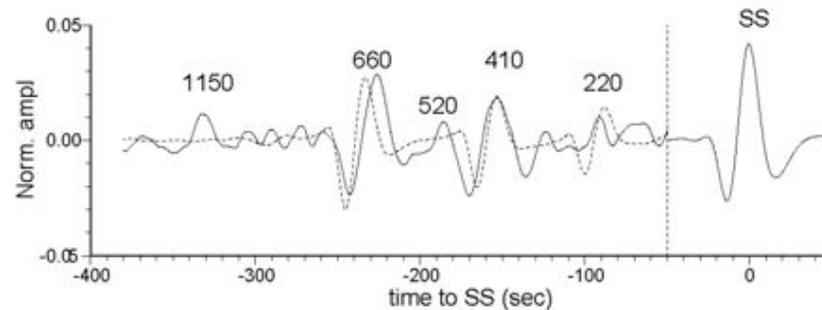
Variation avec l'âge s'atténue à partir de 50 Ma (plus en accord avec le modèle de plaque déshydratée)

# 3- Précurseurs aux ondes SS et PP

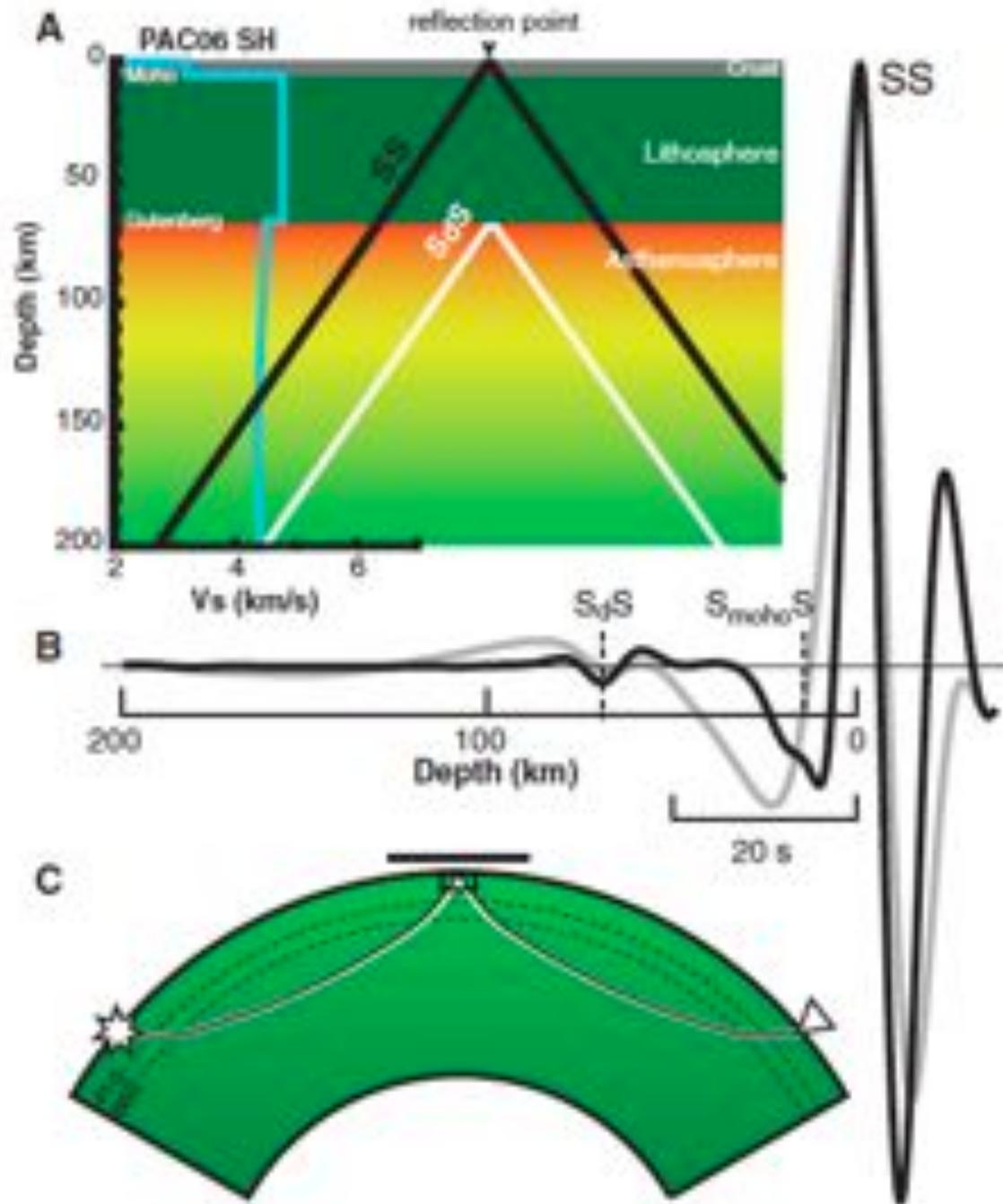
## SS and PP-precursors



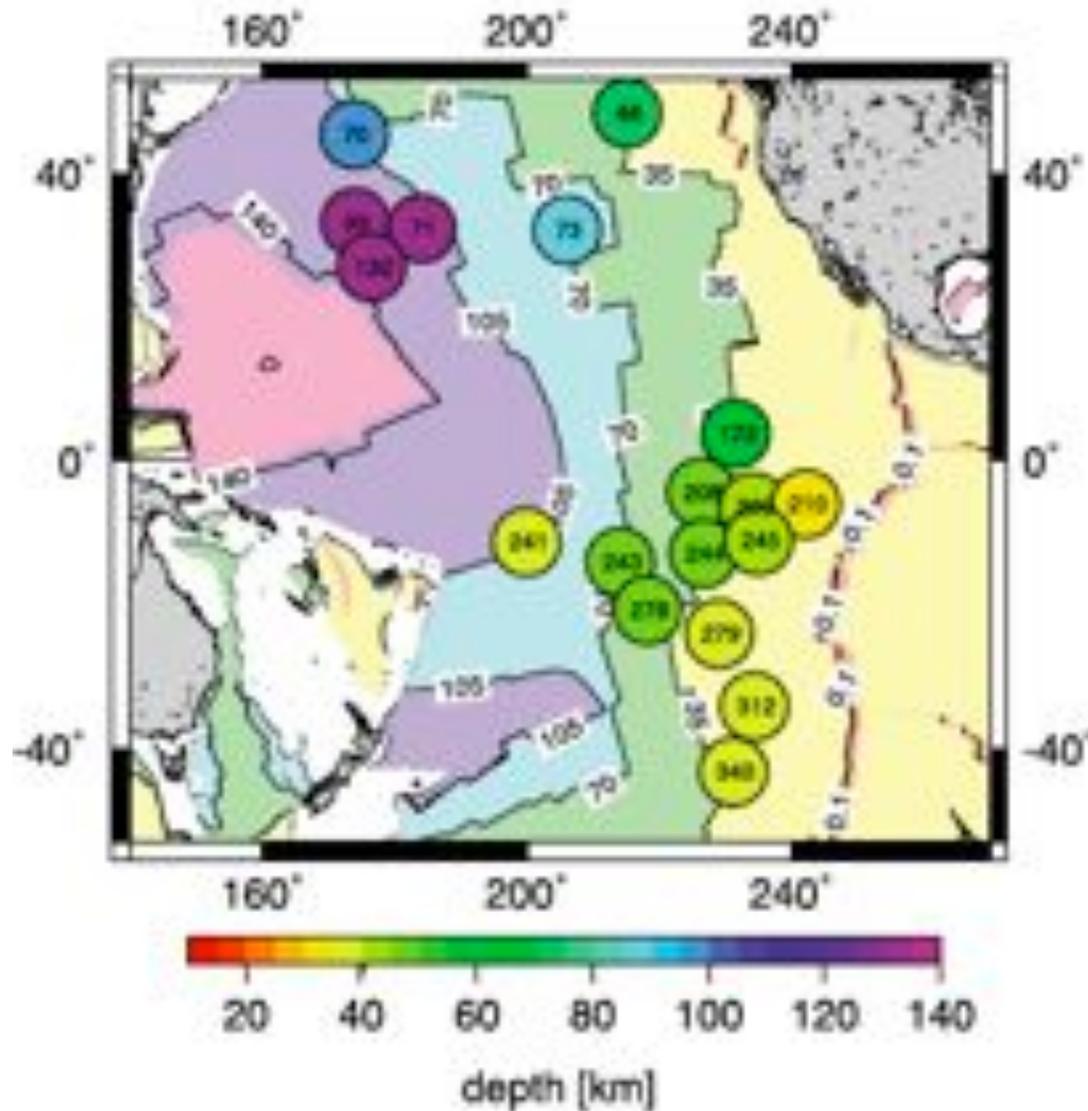
## Detection of mantle discontinuities

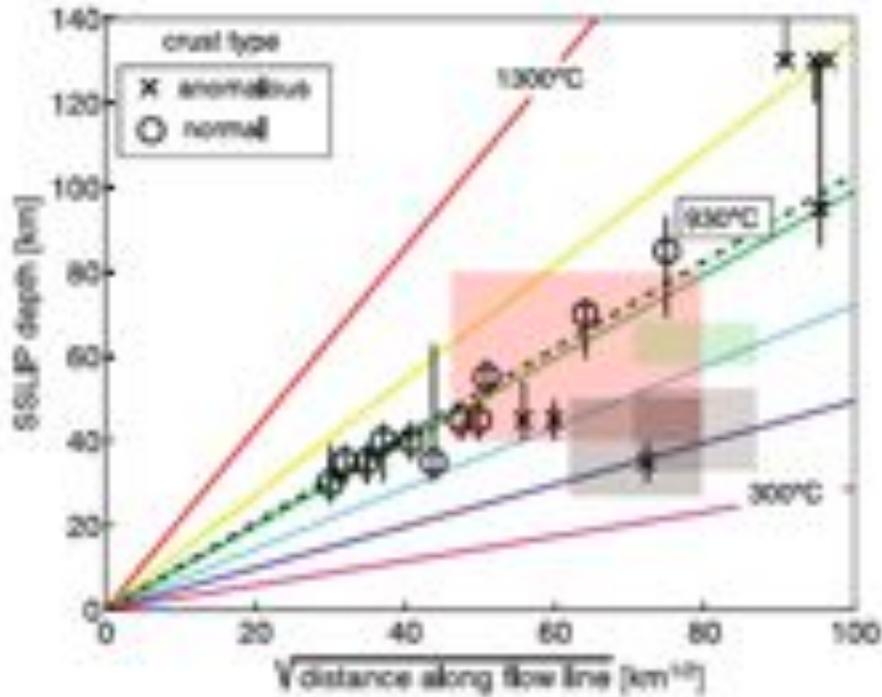


- \* Ondes réfléchies
- \* Échantillonnent les océans et les continents

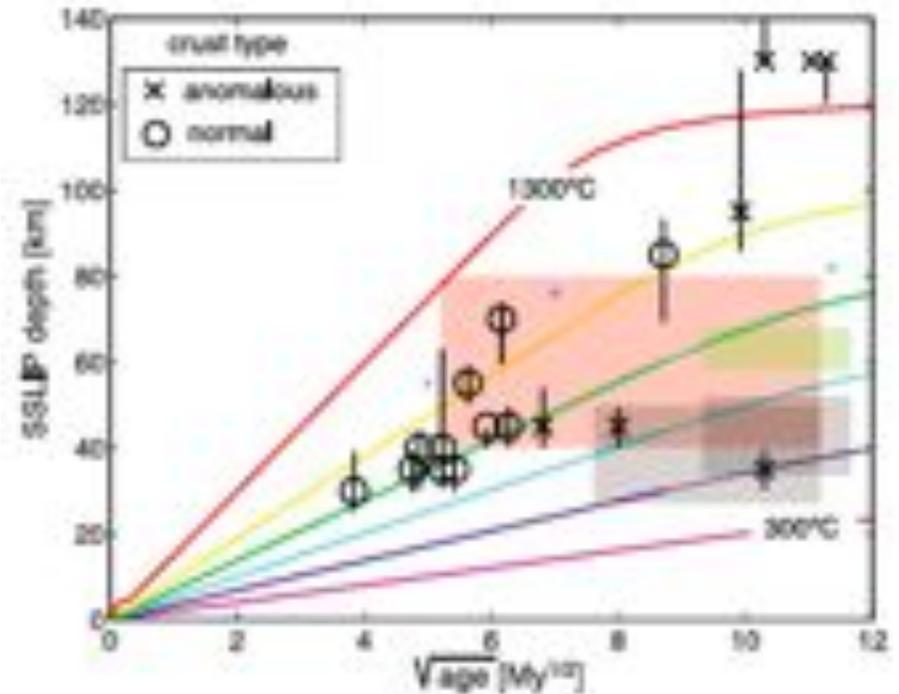


### 3- Modélisation des précurseurs aux ondes SS (longue période)



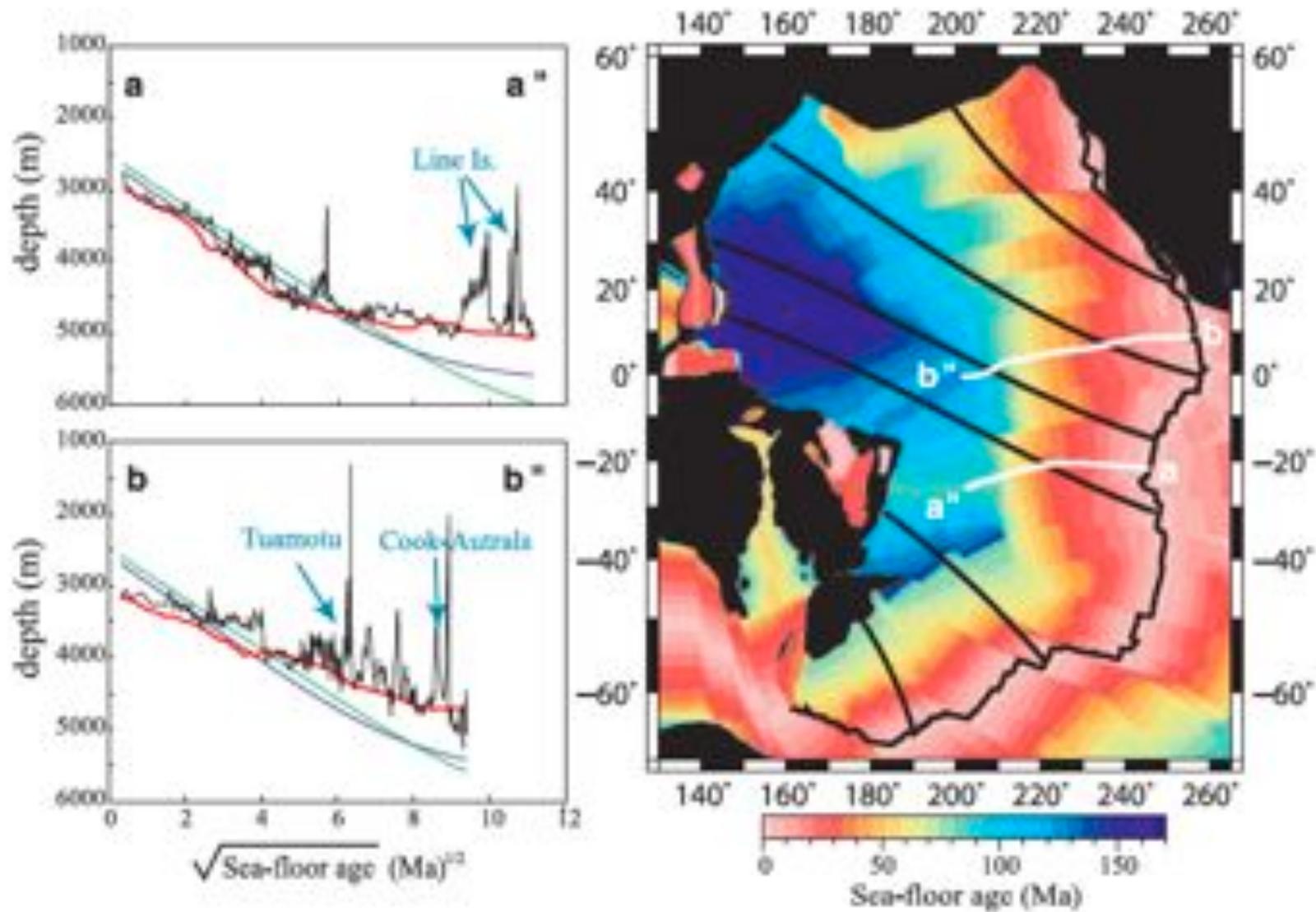


Profondeur en fonction de l'âge de la plaque

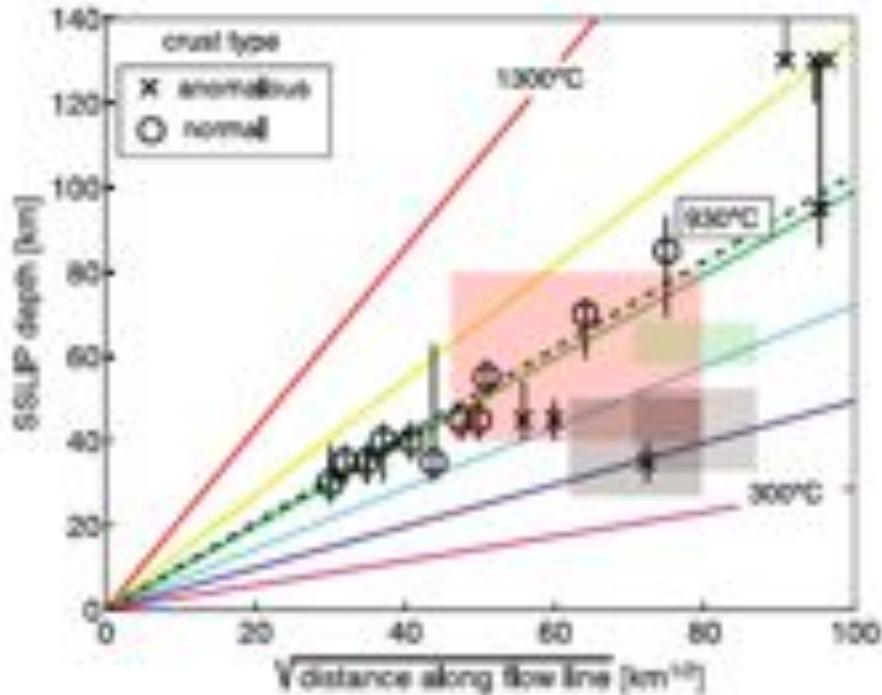


Profondeur en fonction de la distance mesurée le long de la direction de la plaque

Bathymétrie en fonction de l'âge de la plaque ou de la distance le long de la direction de mouvement de la plaque:



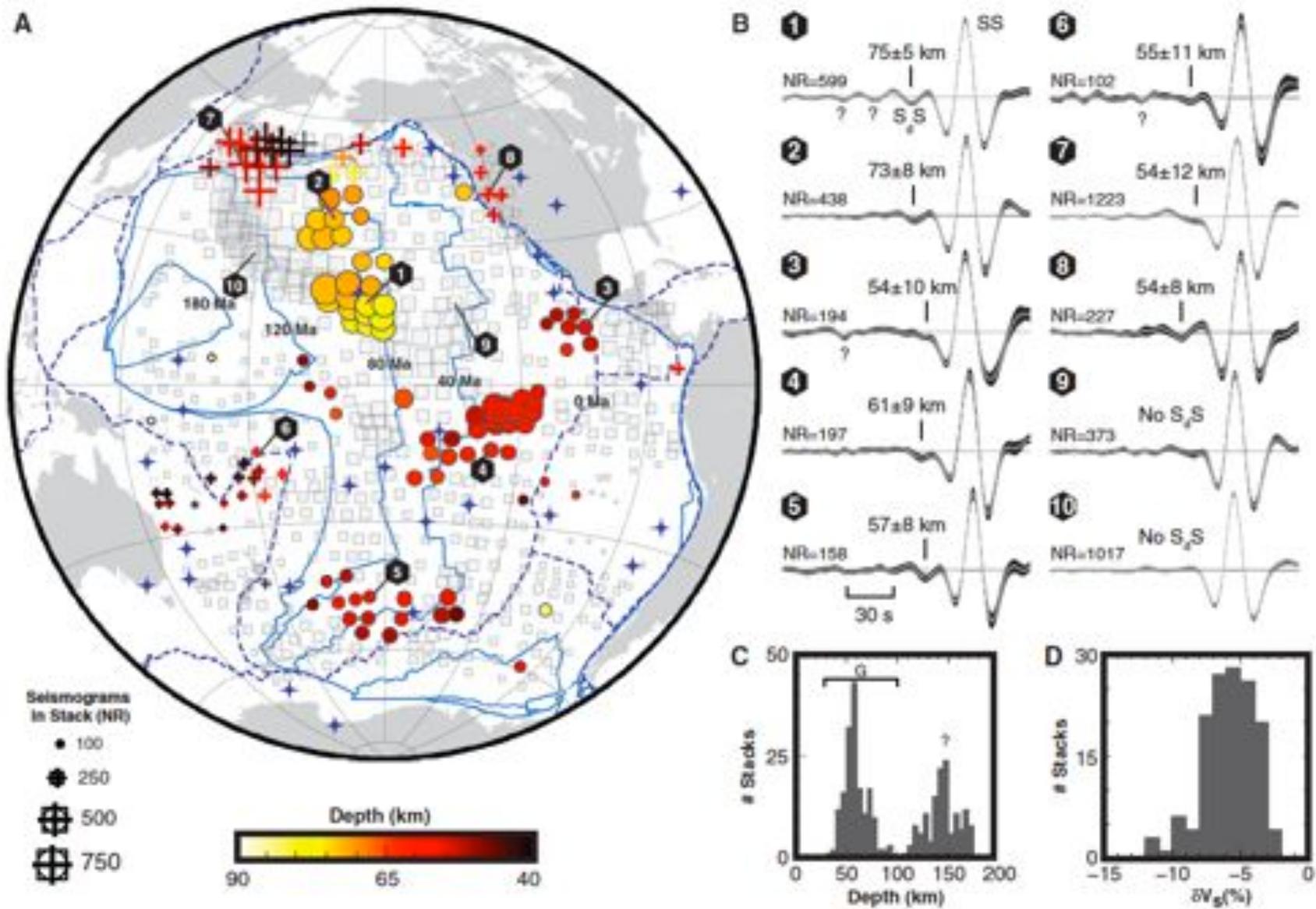
Le refroidissement de la plaque serait contrôlé par le manteau en convection

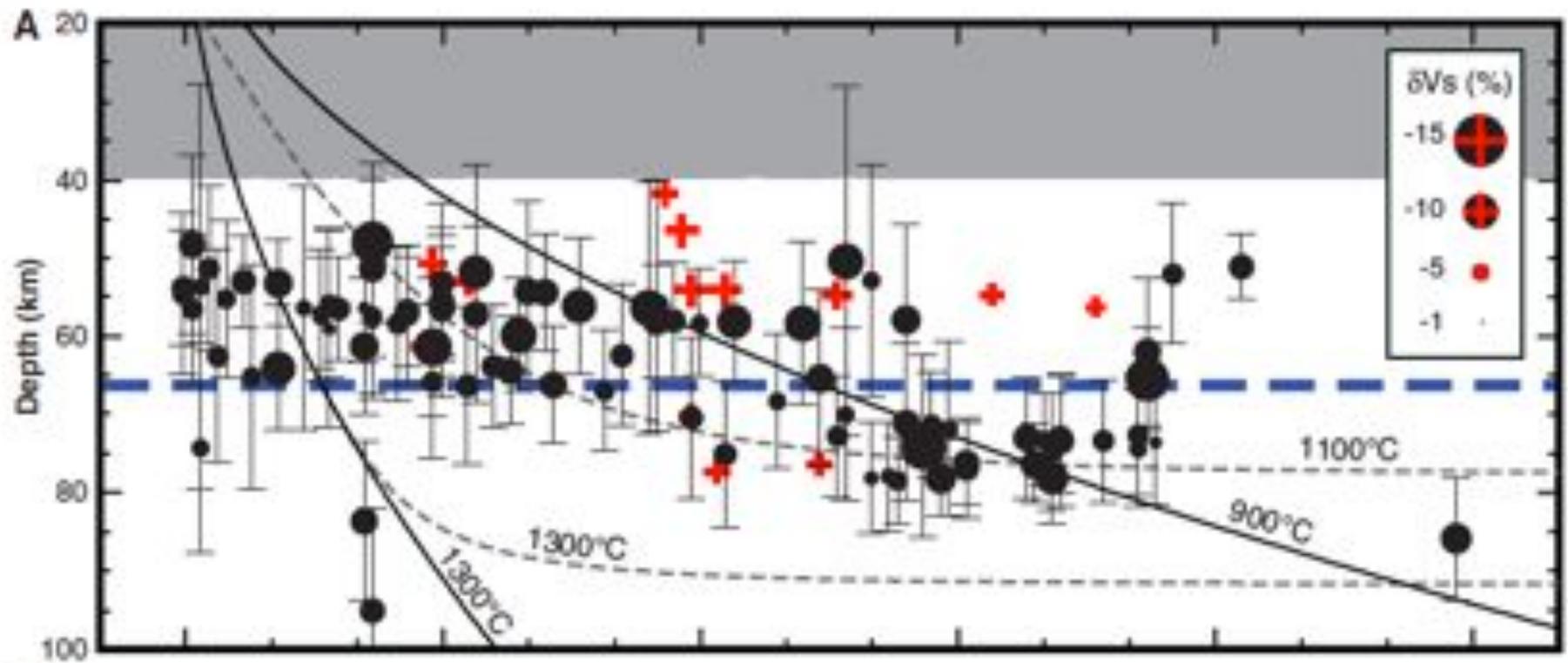


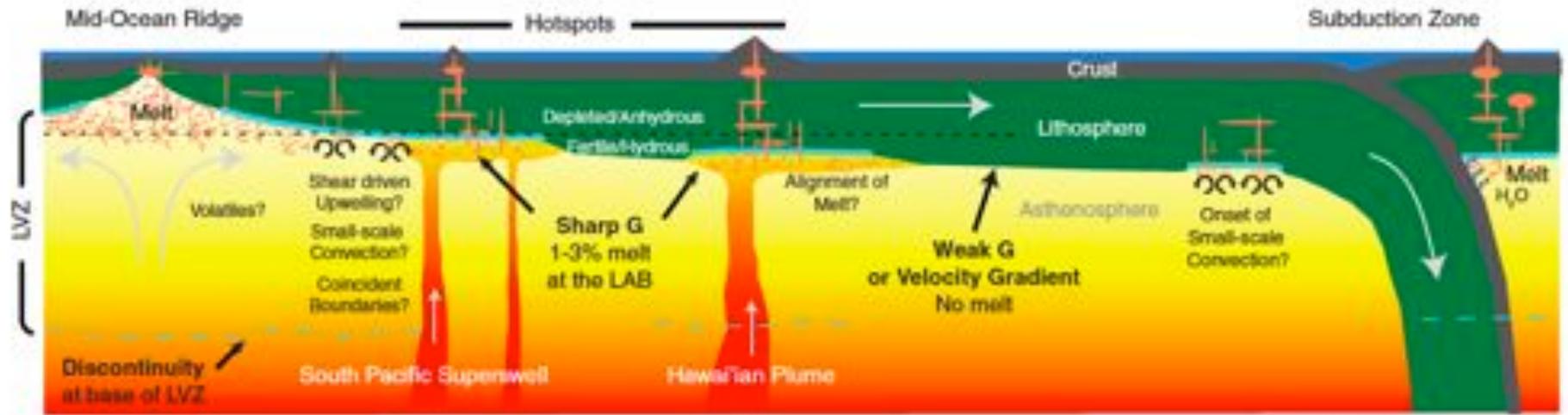
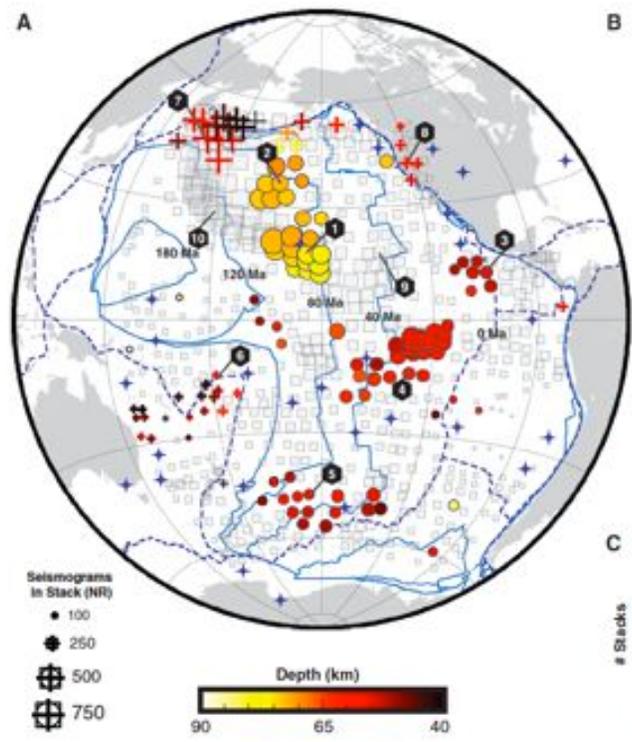
Profondeur en fonction de la distance mesurée le long de la direction de la plaque: meilleure corrélation?

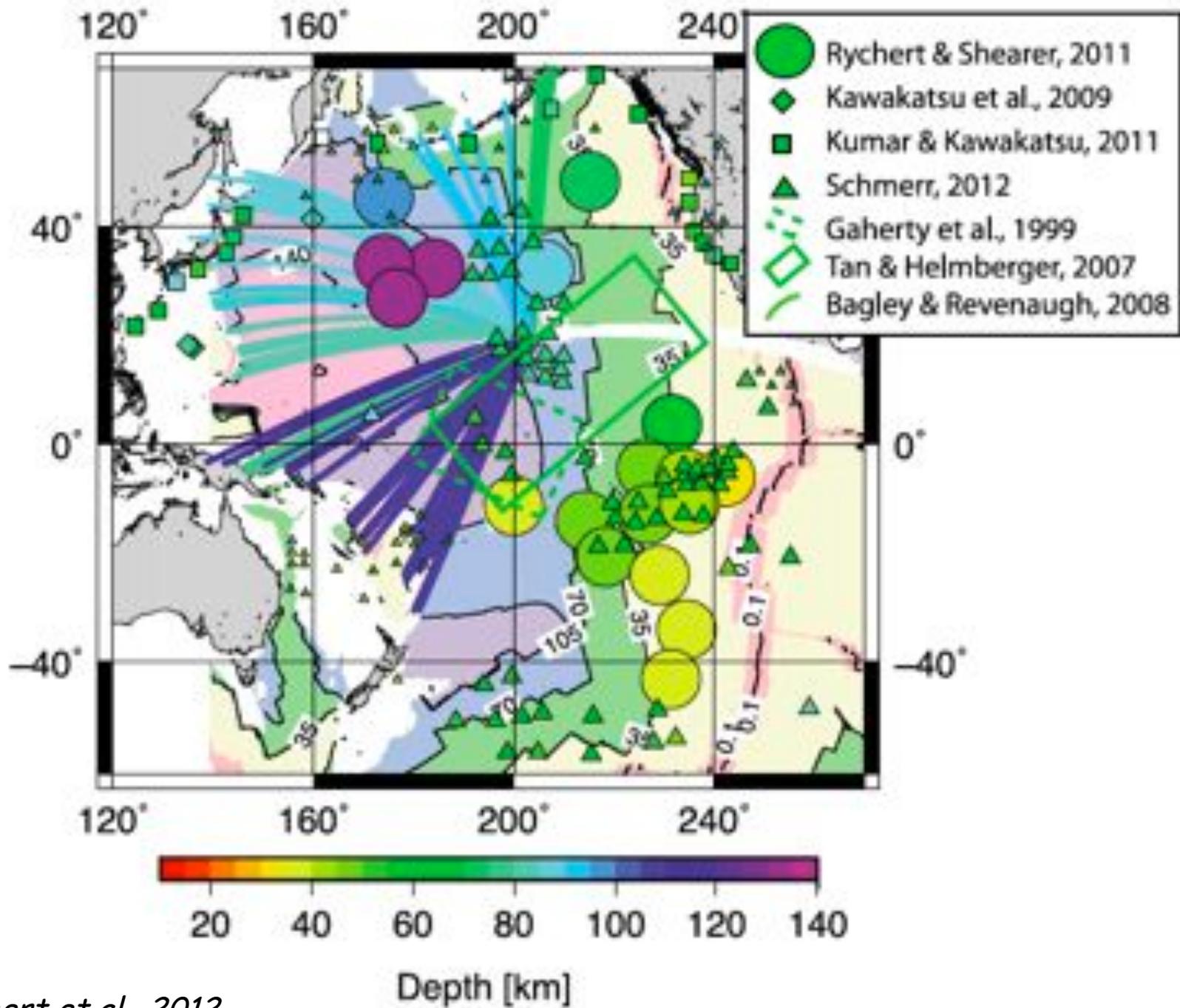
-> Ce résultat suggère que la profondeur de la LAB est contrôlée par refroidissement conductif le long des lignes de mouvement de la plaque

-> Ceci n'explique pas la discontinuité forte observée



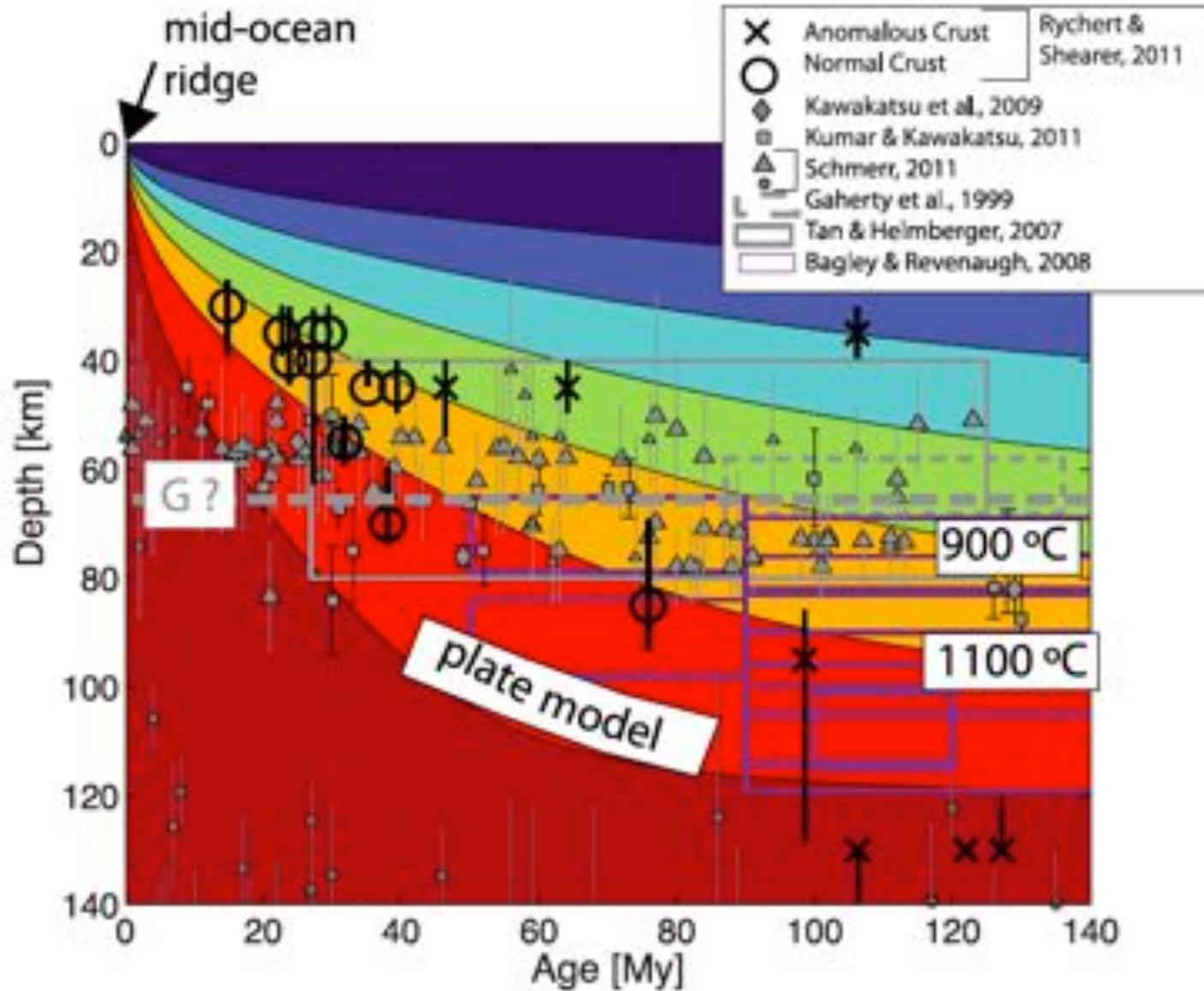






Rychert et al., 2012

Profondeur de la LAB océanique en fonction de l'âge du fond marin, comparée aux isothermes des modèles empiriques de plaque



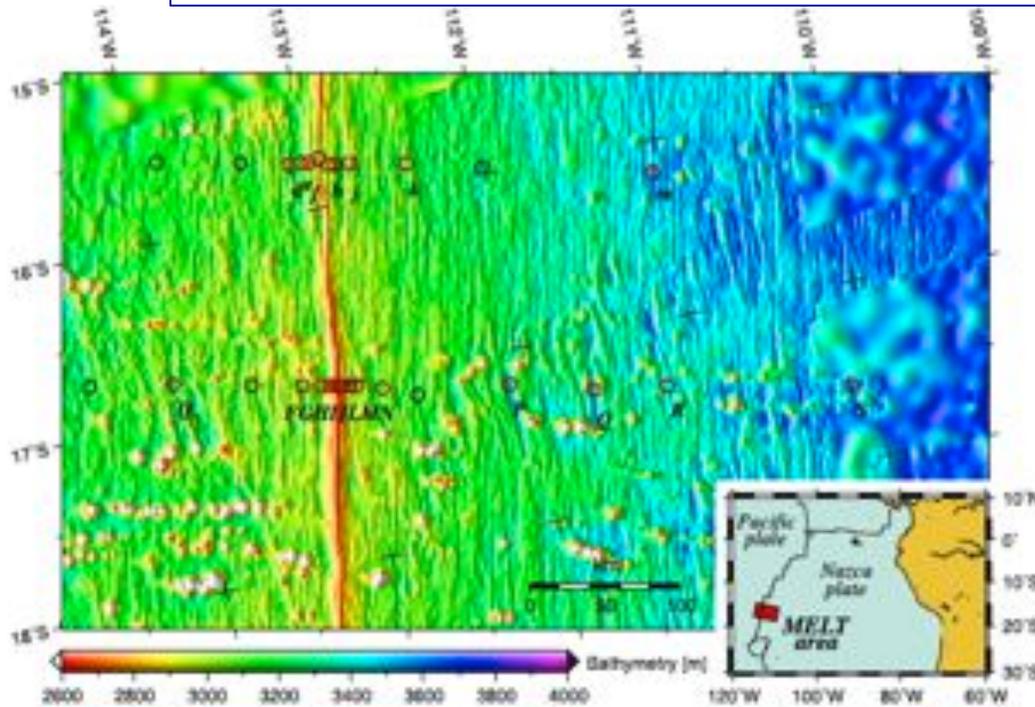
# Conductivité électrique à partir des données magnétotelluriques

- Les variations du champ magnétique terrestre dues aux causes externes (soleil, orages) induisent des courants électriques (telluriques) dans la croûte et le manteau
- On mesure simultanément les composantes orthogonales du champ magnétique et électrique → impédance → Modèle de résistivité électrique
- Fréquences de 10,000 Hz à  $10^{-3}$  Hz
  - Les périodes plus longues permettent l'accès aux plus grandes profondeurs

# Résistivité électrique à partir des données magnétotelluriques

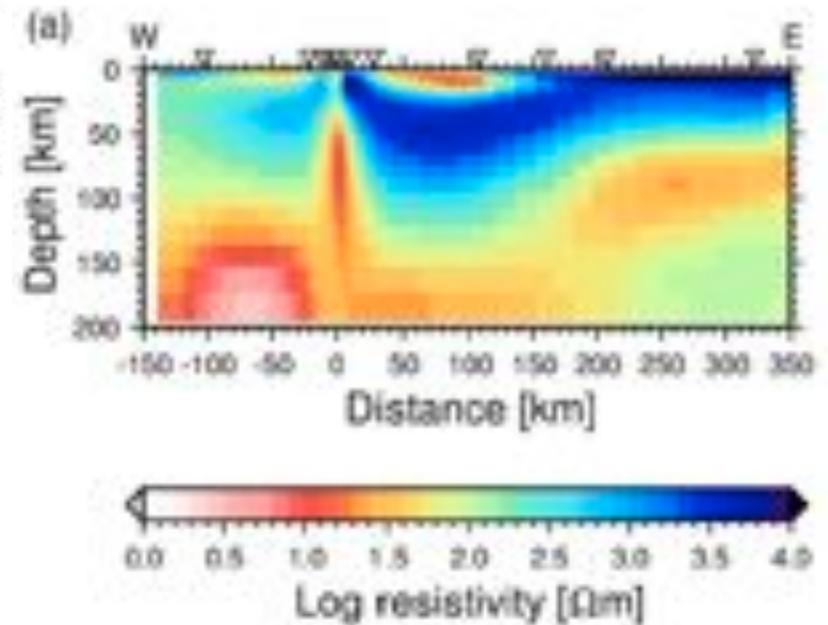
- La résistivité dépend de:
  - Température
  - Composition
  - Présence de fusion partielle
  - Contenu en  $H_2O$
- Comparaison des mesures sur le terrain avec les résultats de laboratoire sur la péridotite sèche

## Mesures de résistivité électrique dans la croûte et le manteau supérieur océanique: expérience MELT



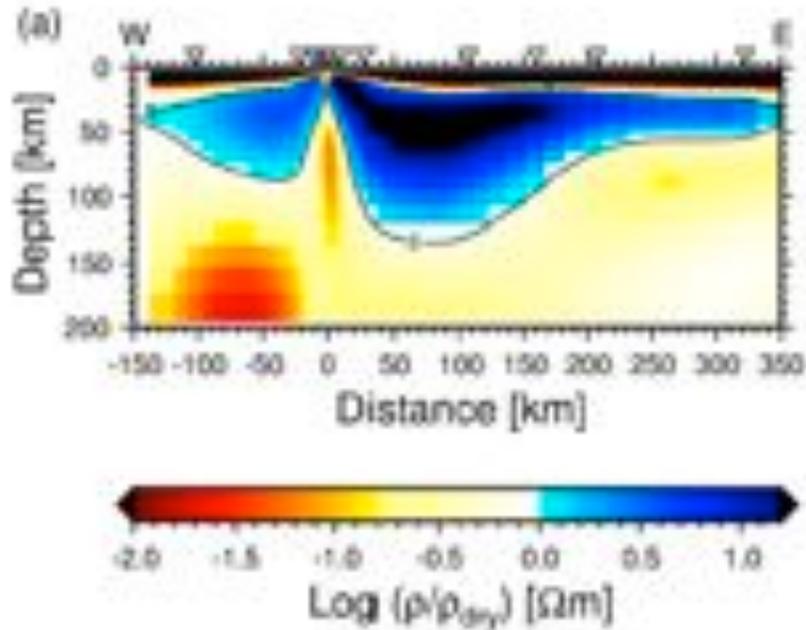
1- Zone axiale de 100 km de large, de forte conductivité

2 - La conductivité augmente significativement vers 60 km de profondeur

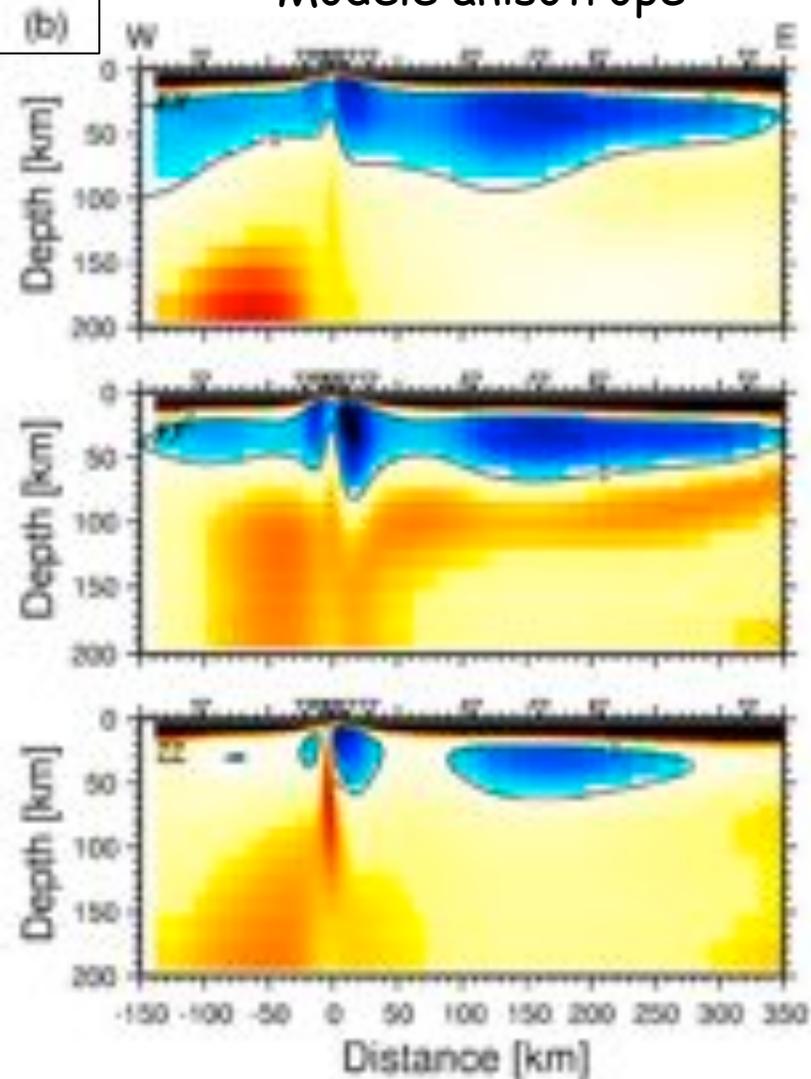


Résistivité normalisée par rapport à un modèle de péridodite sèche,  $T_p = 1350^\circ\text{C}$

Modèle isotrope



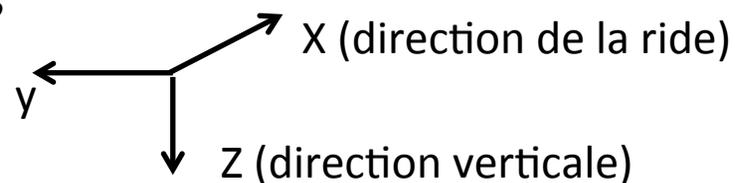
Modèle anisotrope



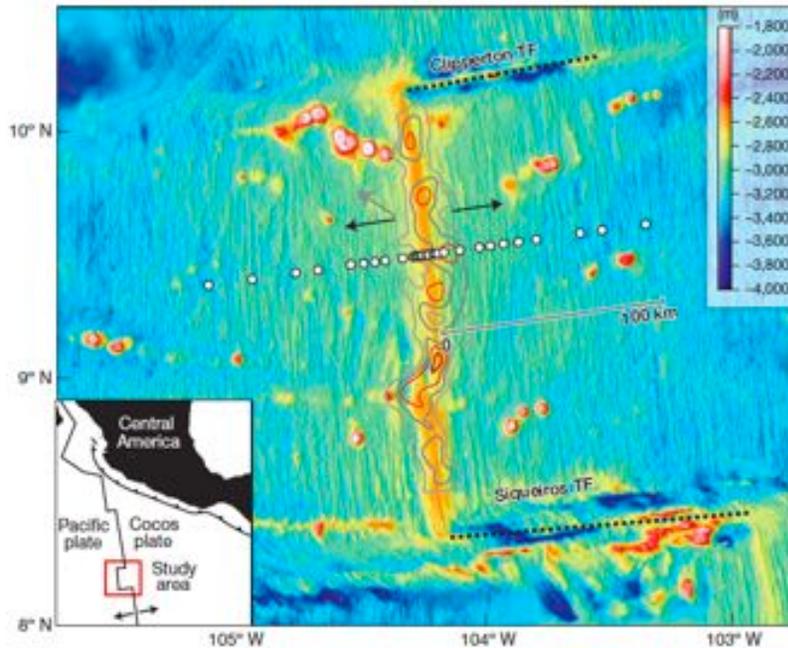
-> Incompatible avec modèle purement thermique

-> fusion partielle à l'aplomb de la ride

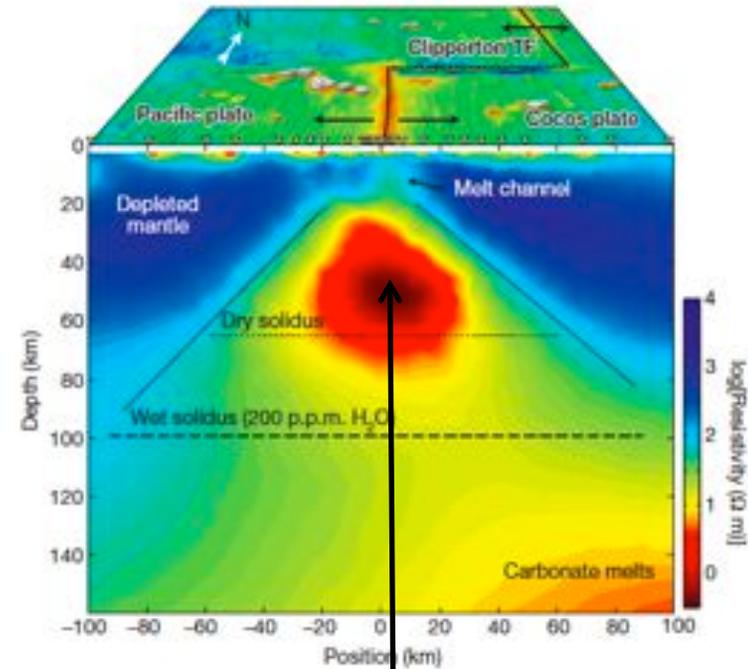
-> déshydratation de la lithosphère plus loin de la ride, avec présence de LPO



# Image plus détaillée de la conductivité sous la ride Est Pacifique (Nord):



Vitesse d'ouverture: 11 cm/an



>10 vol% fusion partielle?

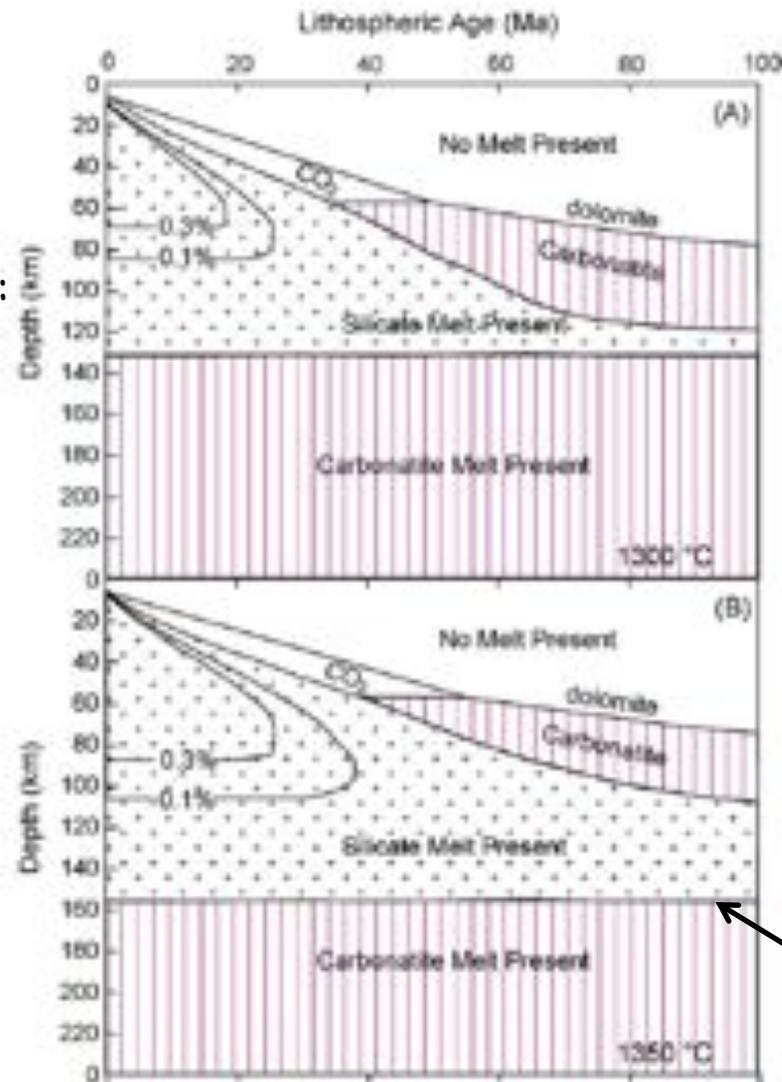
Key et al, 2012

Stabilité de la roche en fusion partielle en fonction de la composition et de la profondeur, en présence de volatiles ( $H_2O$  et  $CO_2$ )

Quantités de volatiles considérées:  
 $100 \cdot 10^{-6} H_2O$ ,  $60 \cdot 10^{-6} CO_2$

->  $CO_2$  très incompatible dans les silicates: dissolution dans le produit de fusion

->  $H_2O$  a plus d'effet sur le Solidus que  $CO_2$



$T_p: 1300^\circ C$

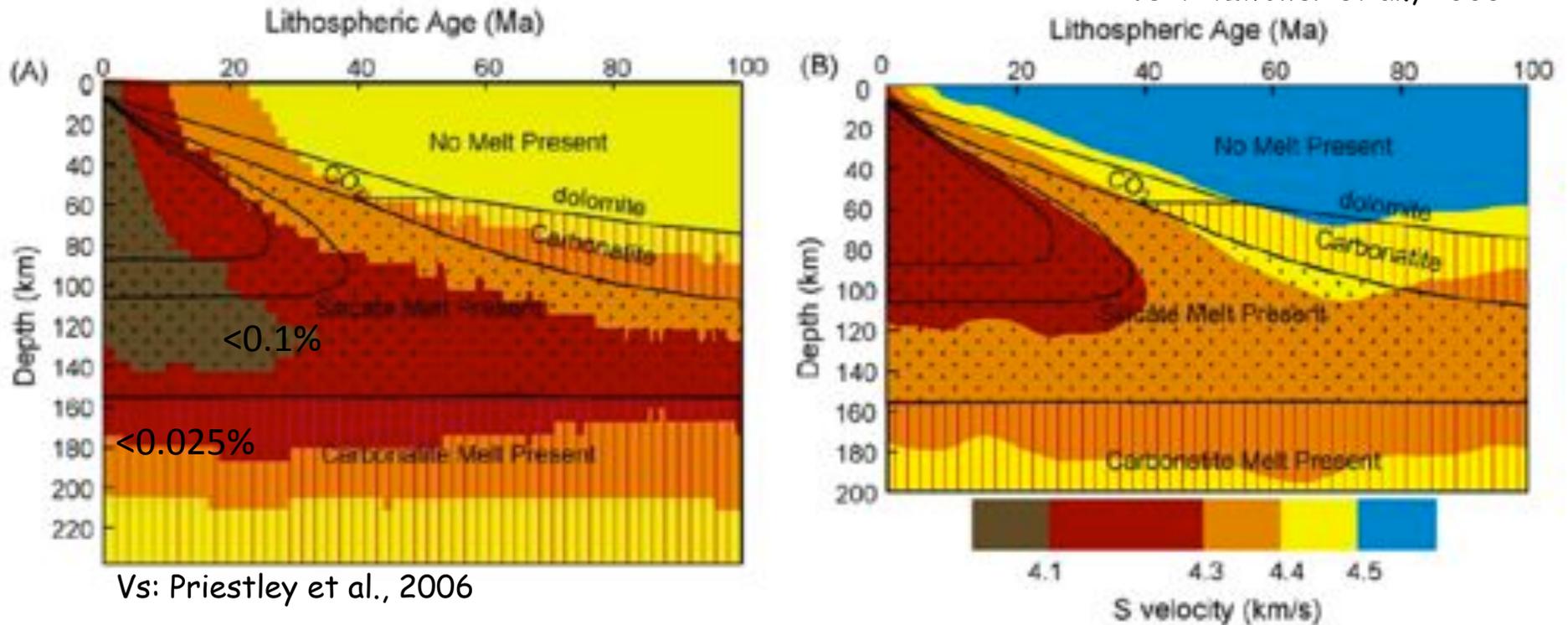
Plaque d'épaisseur  
125 km

$T_p: 1350^\circ C$

0.024%

# Stabilité de la roche en fusion partielle en fonction de la composition et de la profondeur, en présence de volatiles (H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>)

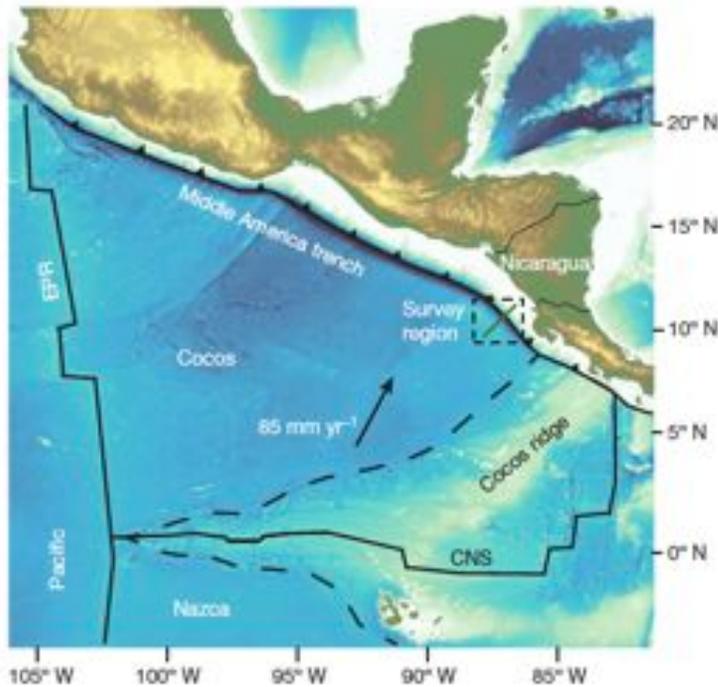
Vs: Ritzwoller et al., 2005



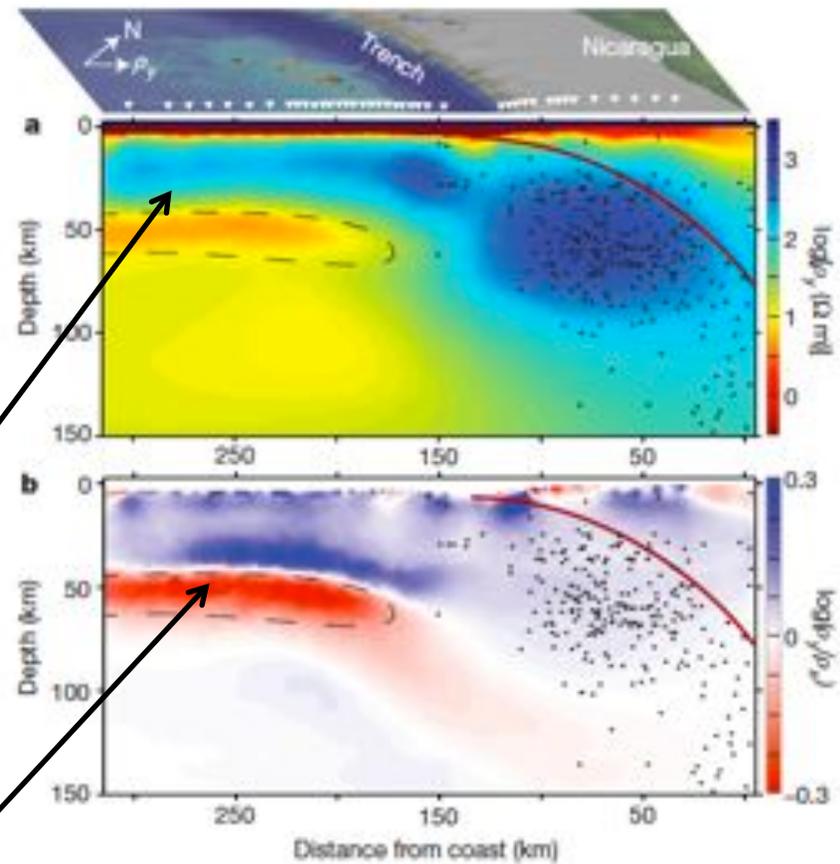
Quantités de volatiles considérées: à partir des mesures dans les échantillons de MORB:  
 100 10<sup>-6</sup> H<sub>2</sub>O, 60 10<sup>-6</sup> CO<sub>2</sub>  
 Température potentielle: 1350°C

Hirschmann, 2010

# Mesures de résistivité électrique loin de la ride



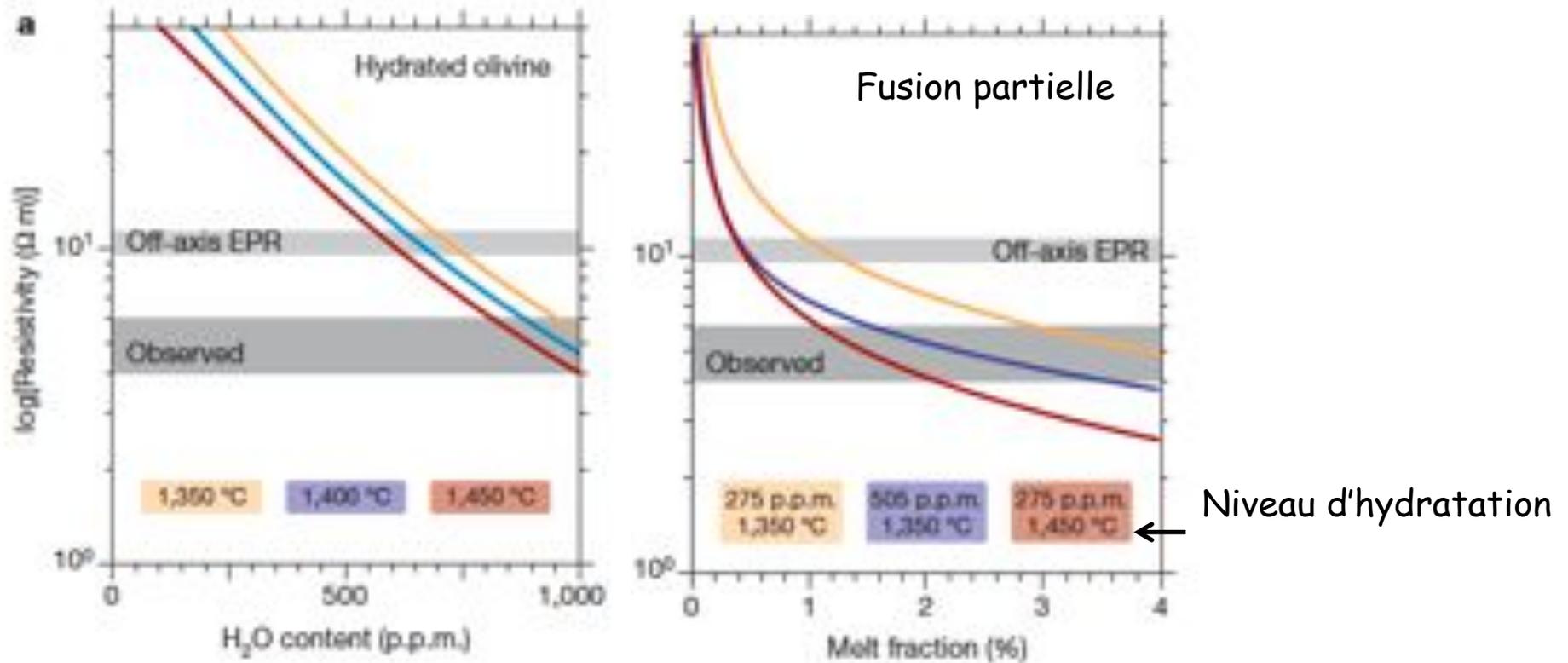
Résistivité dans la direction du mvt de la plaque:



Lithosphère

Couche de forte conductivité: 2 fois plus conductive dans la direction parallèle au mouvt de la plaque que dans la direction perpendiculaire

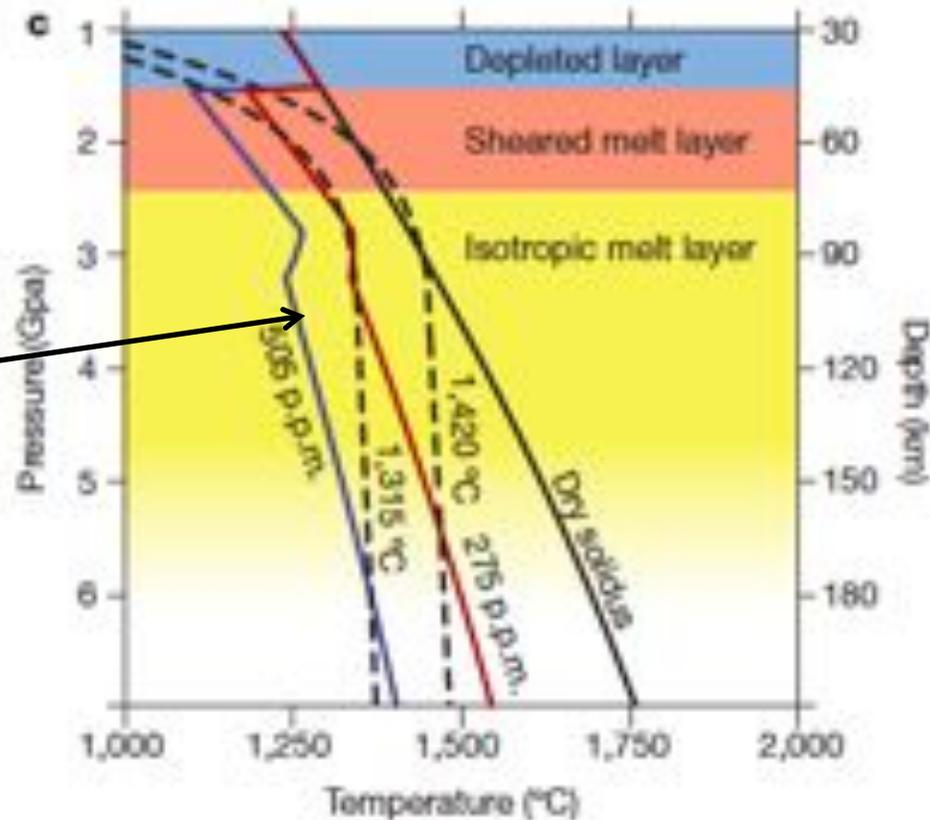
Combien de H<sub>2</sub>O?  
Combien de fusion partielle?



800 ppm de H<sub>2</sub>O nécessaires en l'absence de fusion partielle

----- Géothermes  
pour un modèle  
de plaque à 23 Ma

Solidus  
suivant contenu  
en H<sub>2</sub>O de la roche



-> Anisotropie dans la couche de forte conductivité:  
Réseau d'inclusions fluides de forme allongée dans  
la direction du mouvement de la plaque

-> Ces inclusions pourraient être mises en place à la ride  
au moment de la formation de la lithosphère

-> élongation due au cisaillement associé au mouvement  
de la plaque

# Nature de la LAB sous les océans?

- Le comportement de la plaque océanique ne suit ni les prédictions d'un modèle de demi-espace qui se refroidit au cours du temps, ni celui de la plaque dont la base est un isotherme
- Les résultats récents sont plus favorables au modèle de lithosphère déshydratée au moment de sa formation à la ride
- La présence de fusion partielle (favorisée par la présence d'H), dans une couche fine juste au dessous de la LAB n'est pas exclue.
- Cette couche pourrait être plus ou moins continue, et formée de bandes alternées avec ou sans fusion partielle, avec inclusions fluides alignées horizontalement dans la direction du mouvement de la plaque.

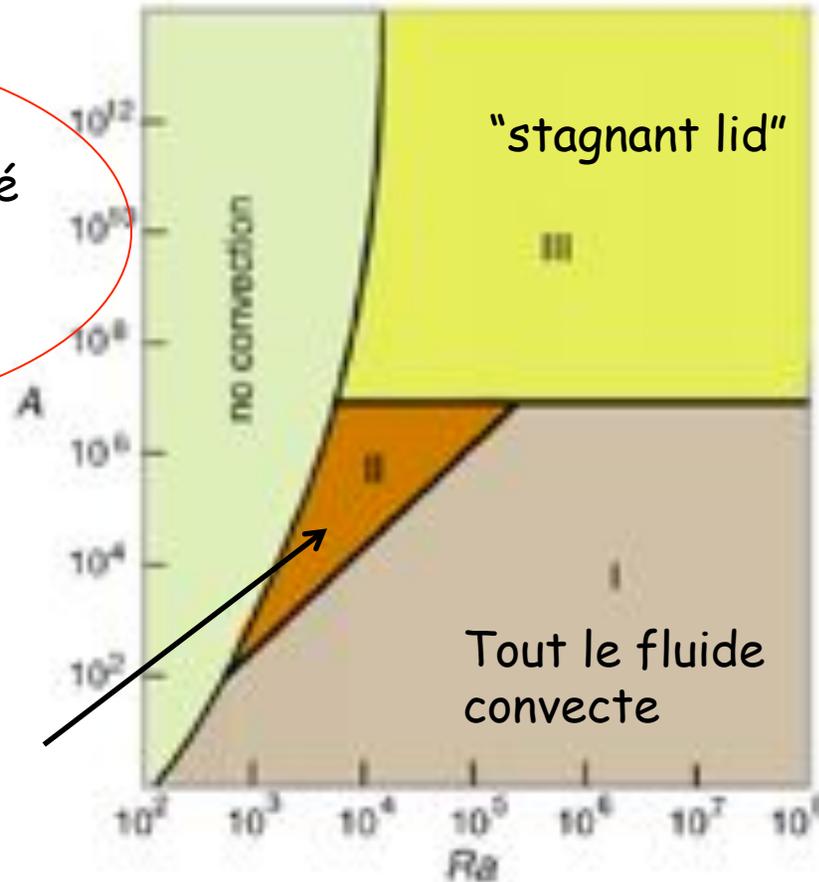
# Rôle de la zone à faible viscosité pour la tectonique des plaques

- On pense depuis les années 1970 que sa présence favorise le régime particulier de tectonique terrestre, avec plaques rigides mobiles de grandes dimensions qui persistent pendant des temps longs (200 Ma)
- Le point de vue classique est que le contraste de viscosité à la base de la plaque "lubrifie" le mouvement des plaques rigides
- Ce n'est que récemment que l'on a pu avoir accès à des calculs numériques suffisamment puissants pour explorer plus à fond l'espace des paramètres dans la modélisation de la convection à l'échelle du manteau terrestre.

## Cas d'une viscosité dépendant fortement de la température

A = contraste de viscosité entre la couche externe et le manteau "chaud"

Régime transitoire "mobile lid" - où la tectonique des plaques est possible à condition de rajouter d'autres facteurs pour diminuer la rigidité de la lithosphère (en particulier la déformation cassante le long de failles)



Cas d'une rhéologie non-Newtonienne ( $n=3$ )

# Rôle de la stratification en viscosité pour la convection mantellique

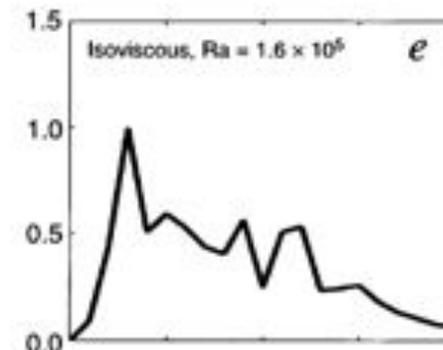
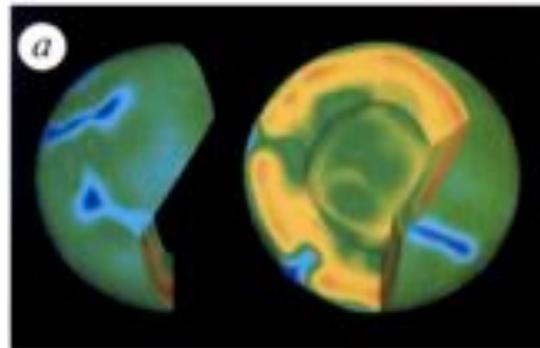
Bleu= froid  
Jaune = chaud

Champ des températures  
aux profondeurs >250 km  
régime stationnaire

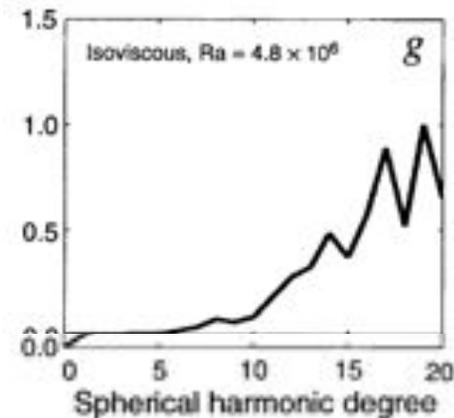
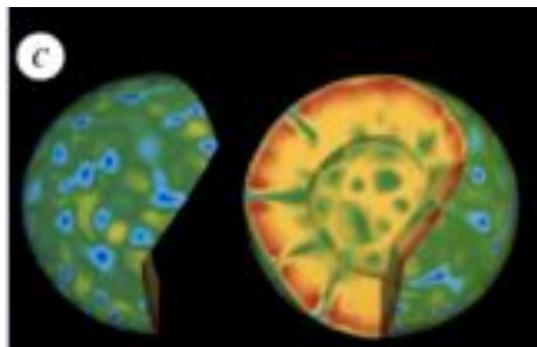
Spectre des hétérogénéités

Modèle  
isovisqueux

$\eta = 1.7 \cdot 10^{24}$  Pa s



Comme en a),  
viscosité 30 fois  
plus faible  
(augmentation du  
Ra)



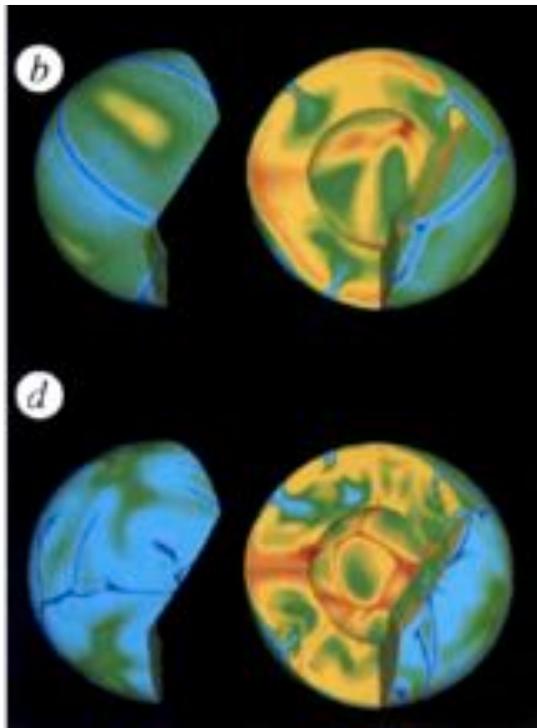
Modèle incompressible  
Chauffage interne uniforme, approx de Boussinesq

*Bunge, Richards, Baumgartner, 1996*

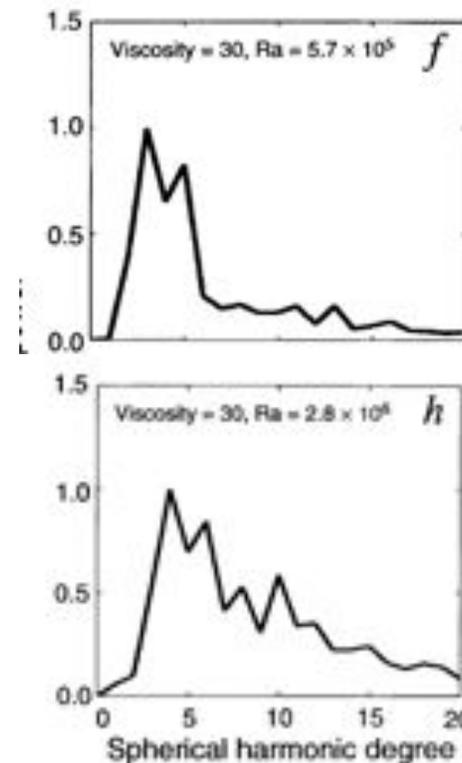
# Rôle de la stratification en viscosité pour la convection mantellique

## Spectre des hétérogénéités

Viscosité dans le manteau supérieur réduite d'un facteur 30

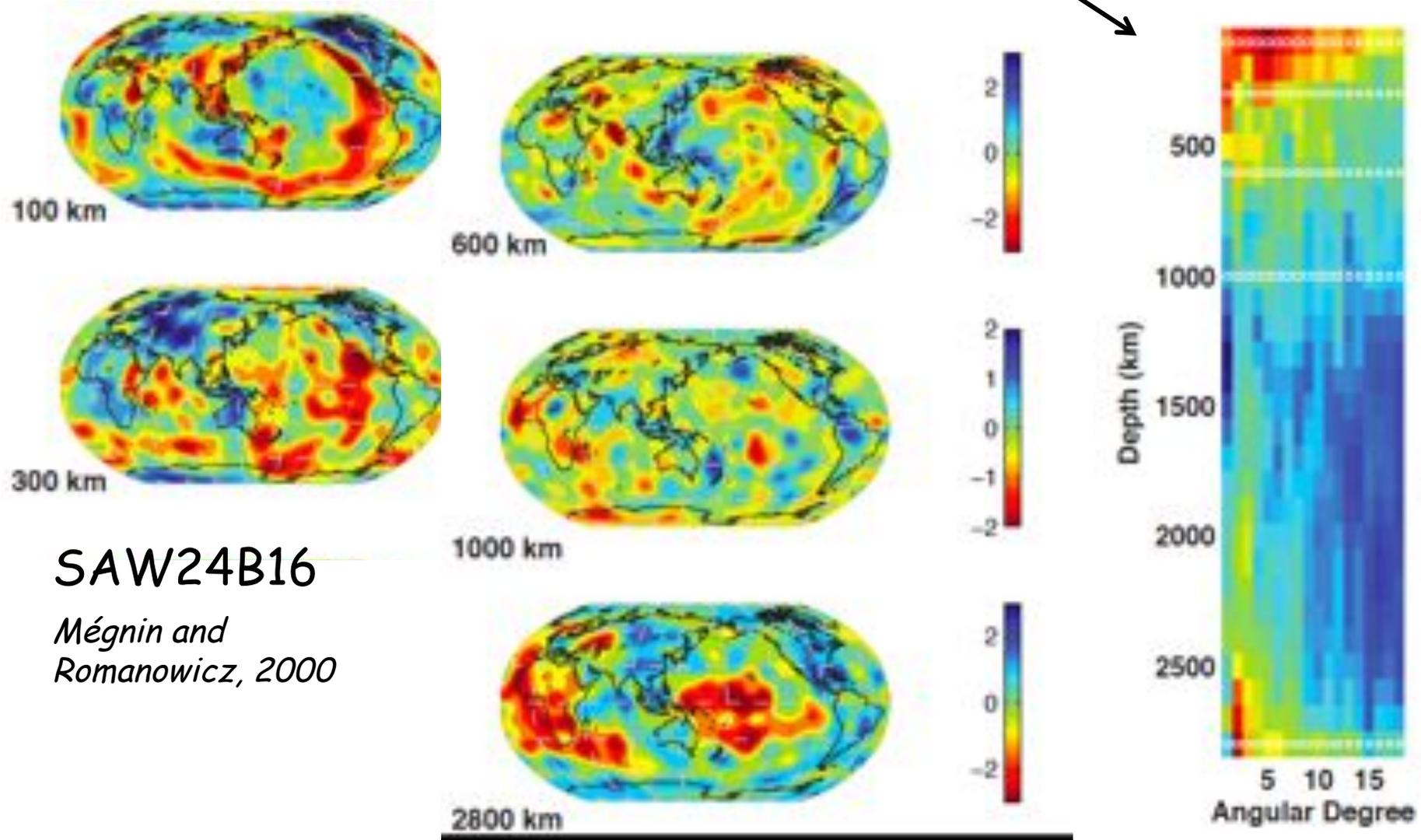


Comme en b), viscosités 10 fois plus faibles



# Tomographie sismique globale en Vs

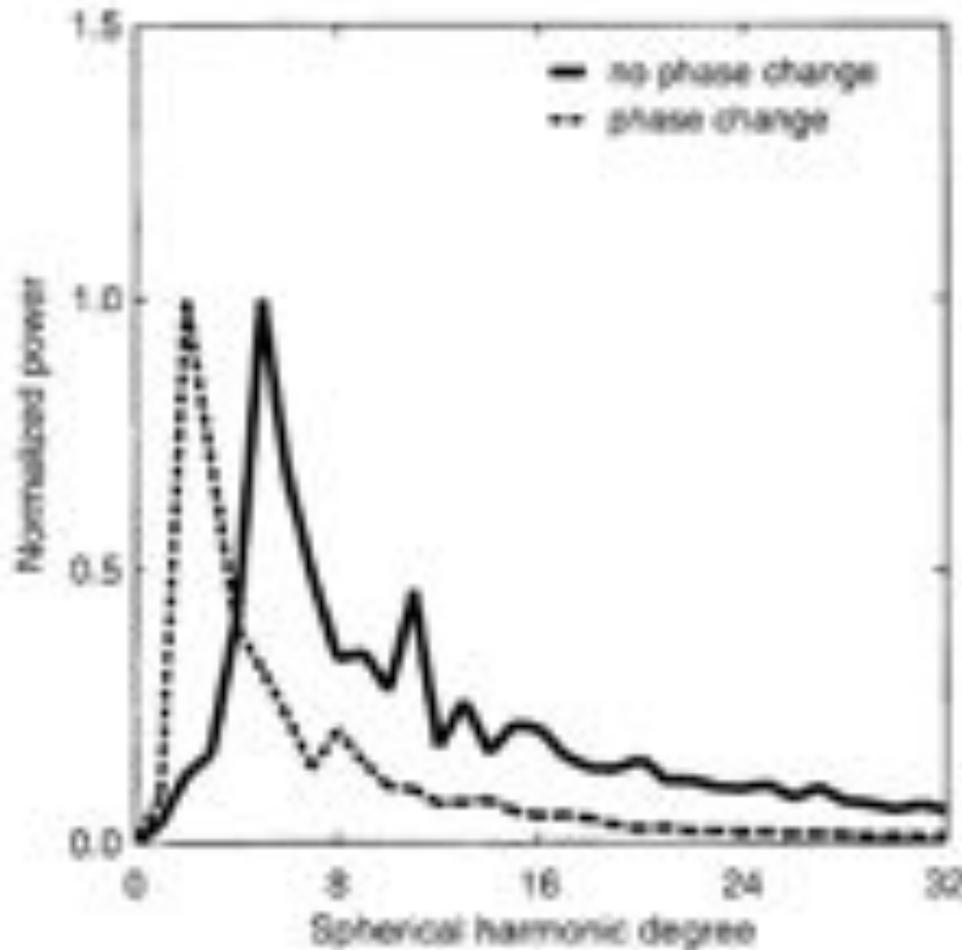
# Spectrum of heterogeneity



SAW24B16

Mégnin and Romanowicz, 2000

# Spectre des hétérogénéités de température



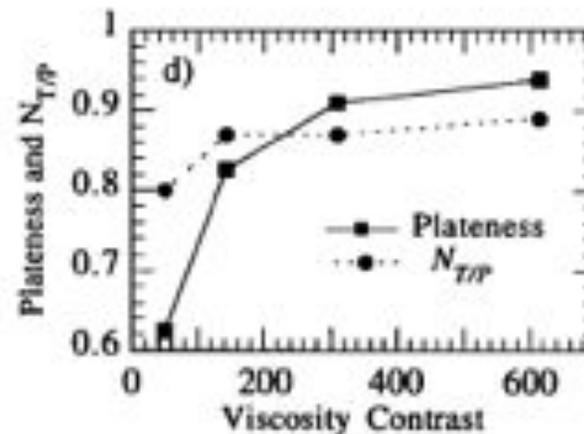
Transition de phase  
endothermique à 670 km  
de profondeur  
et chauffage par le bas (20%)

- Différence de viscosité entre le manteau supérieur et inférieur favorise une morphologie de convection proche de celle observée (e.g. Bunge et al., 1996)
- Modèles mécaniques de plaques montrent qu'une zone à faible viscosité est nécessaire pour que la lithosphère garde sa cohérence près des zones de cassure

$$Plateness = 1 - V_{rms} / V_p$$

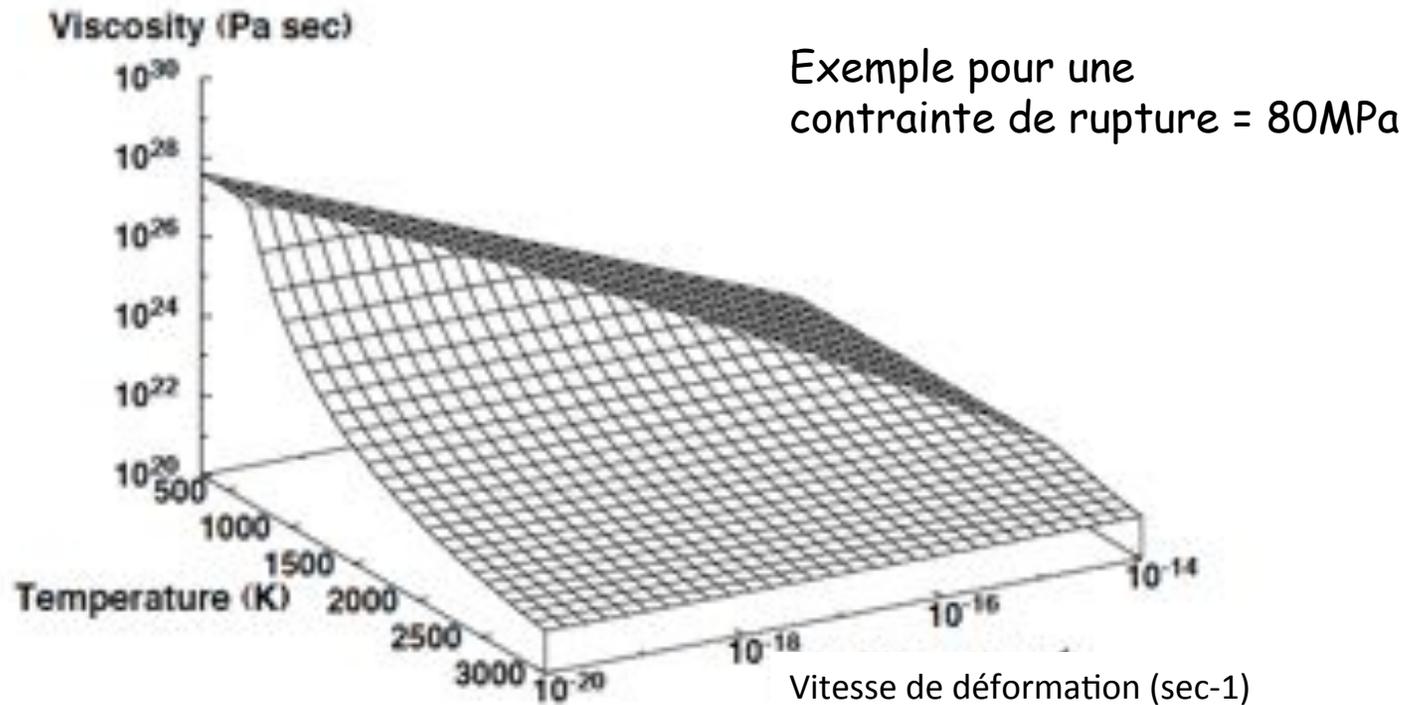
$V_p$  vitesse moyenne dans la plaque

$V_{rms}$  écart-type à la vitesse moyenne



Zhong et al., 1998

## Effet d'une zone à faible viscosité sur l'existence de plaques lithosphériques



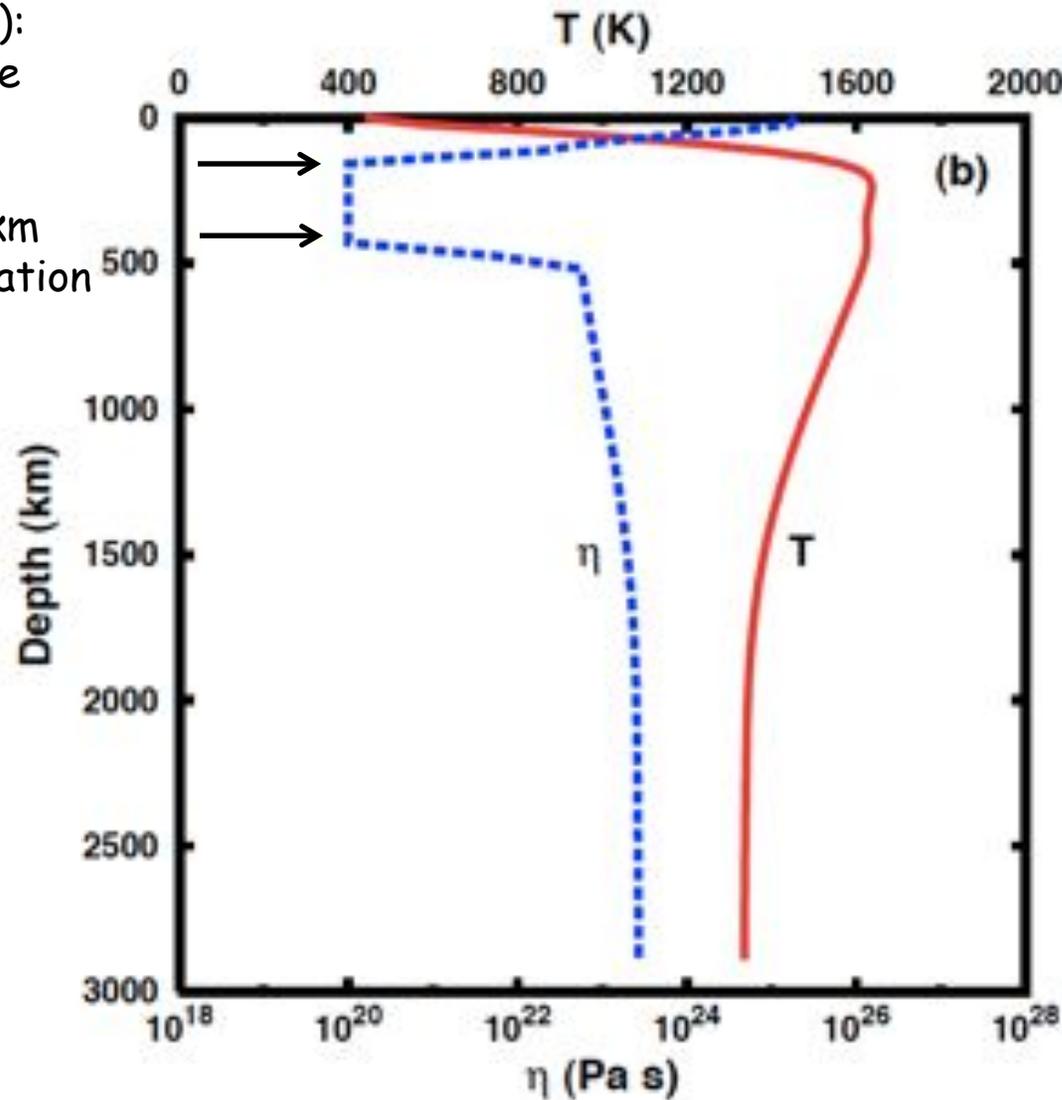
*Richards et al., 2001*

- >Modèle cartésien 2D
- >Rhéologie Newtonnienne dépendant de la température
- >Chauffage interne, refroidit par le haut
- >Contrainte de rupture variable pour la lithosphère

Introduction d'une zone à faible viscosité (/100):  
quand  $T > T_0$  de la base  
de la lithosphère

Base de la LVZ: 500 km  
(arbitraire): augmentation  
d'un facteur  $\eta^*$

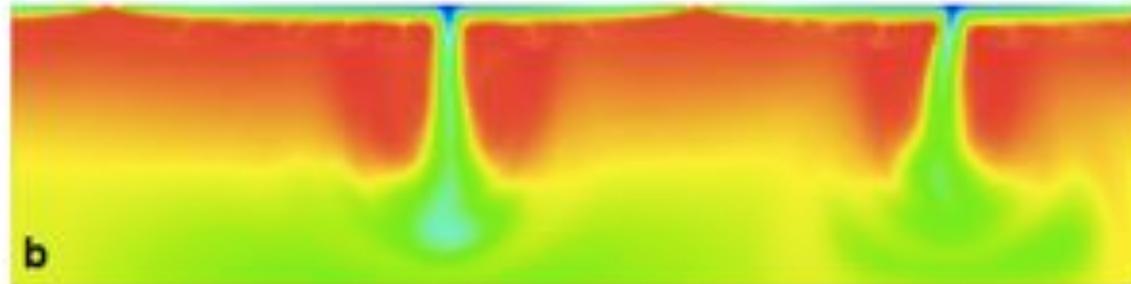
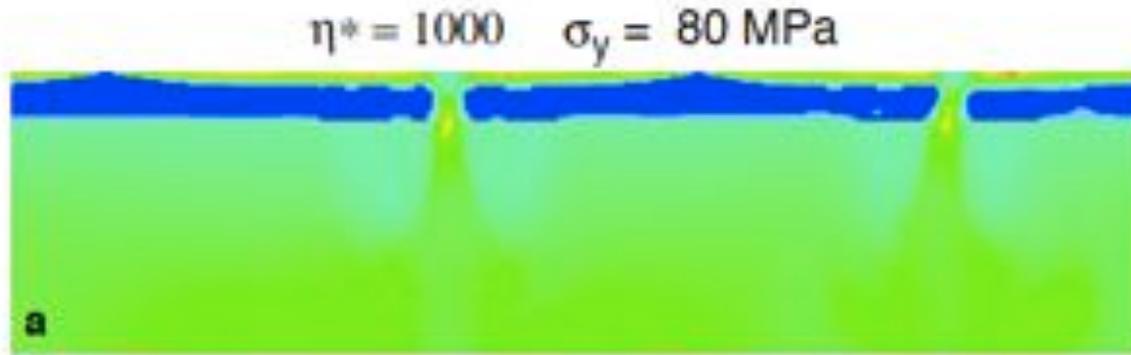
La viscosité  
peut ainsi réduite  
*de manière*  
"naturelle" dans les  
régions de courants  
ascendants (rides)



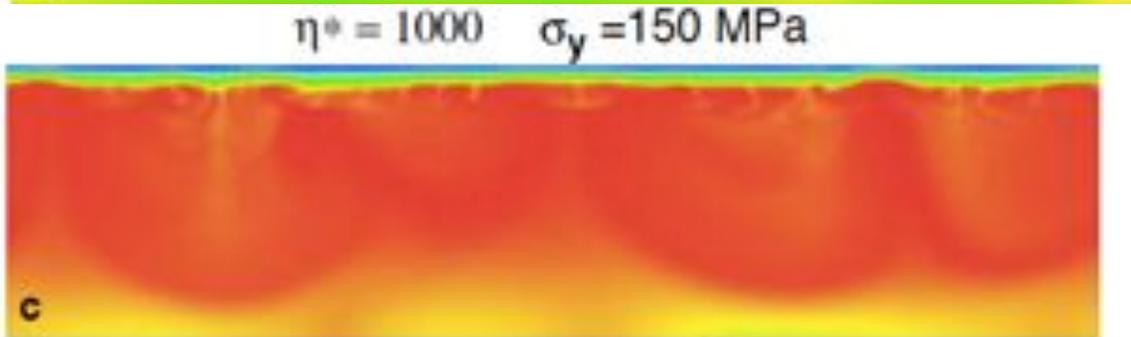
Cas no 1: 2D

Viscosité  
Bleu=faible  
( $10^{20}$ Pa·s)  
Vert= $10^{28}$ Pa·s

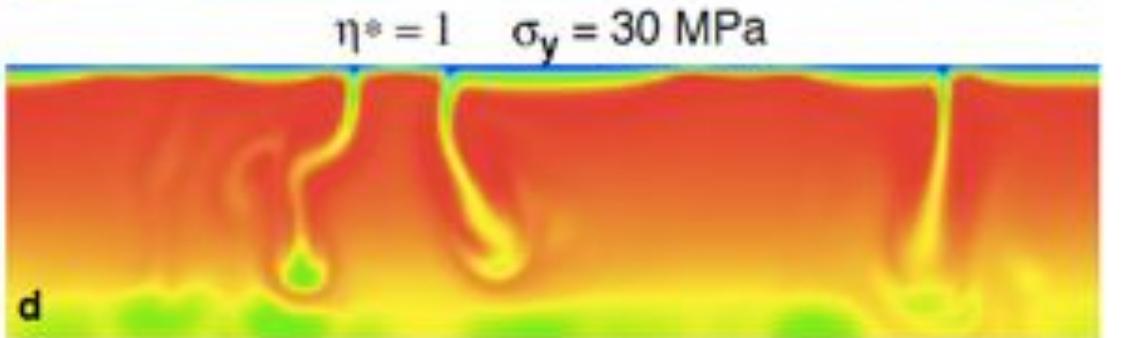
Température  
Bleu (44°C)  
Rouge (1437°C)



Plaques  
froides  
stables



Couche  
externe  
rigide



Couche externe  
mobile

$\eta^* / \sigma_y$ (MPa)	Inf	150	100	Contrainte de rupture (lithosphère)				
1								
100								
300								
500								
1000								
10000								

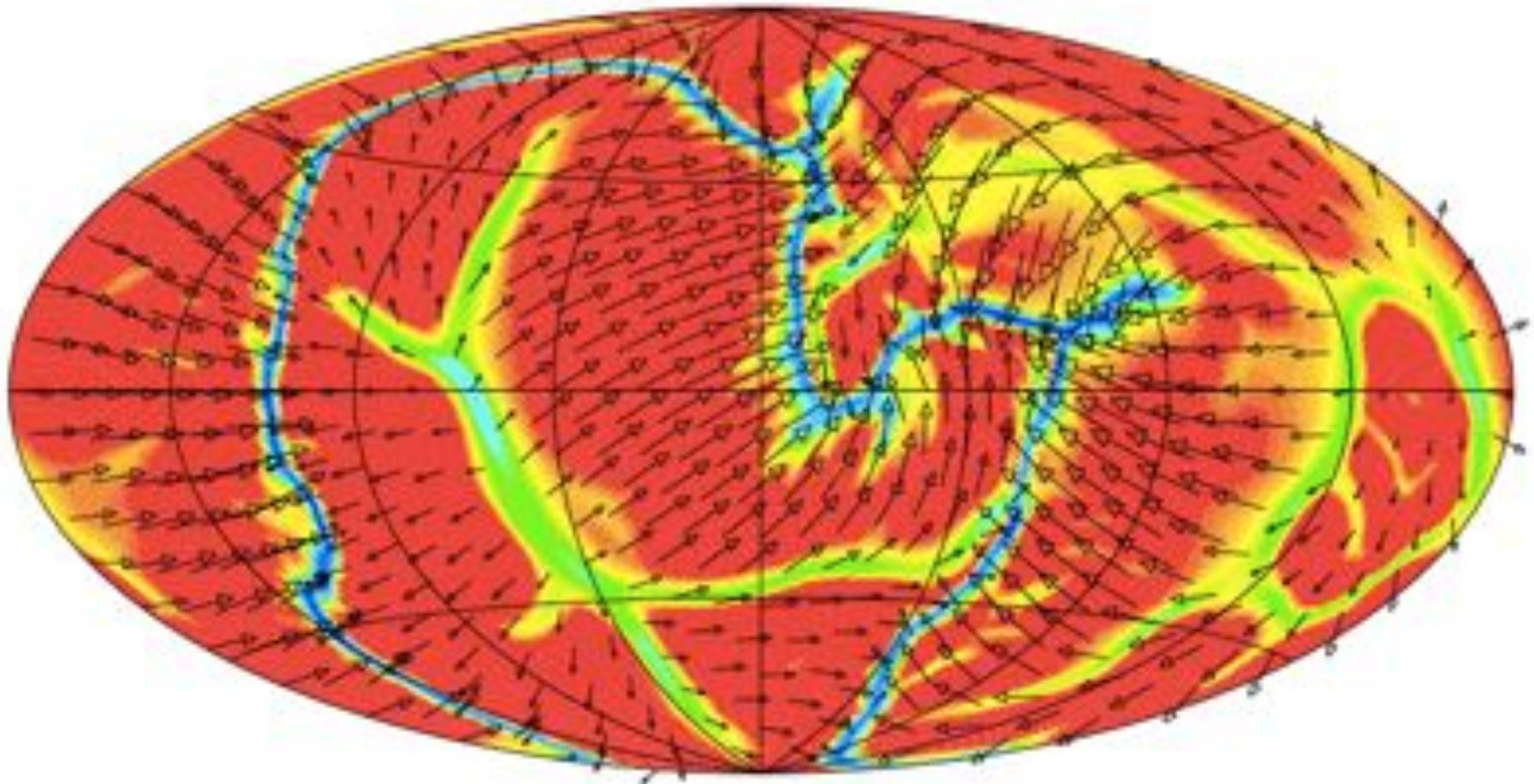
Frozen
 Plates
 Mobile

Contraste de viscosité

Un comportement avec "plaques" est favorisé par la présence d'une zone à faible viscosité sous une lithosphère rigide (cassante)

# Extension au cas 3D

log( viscosité): rouge  $3 \times 10^{23}$  Pas, bleu  $10^{21}$  Pas

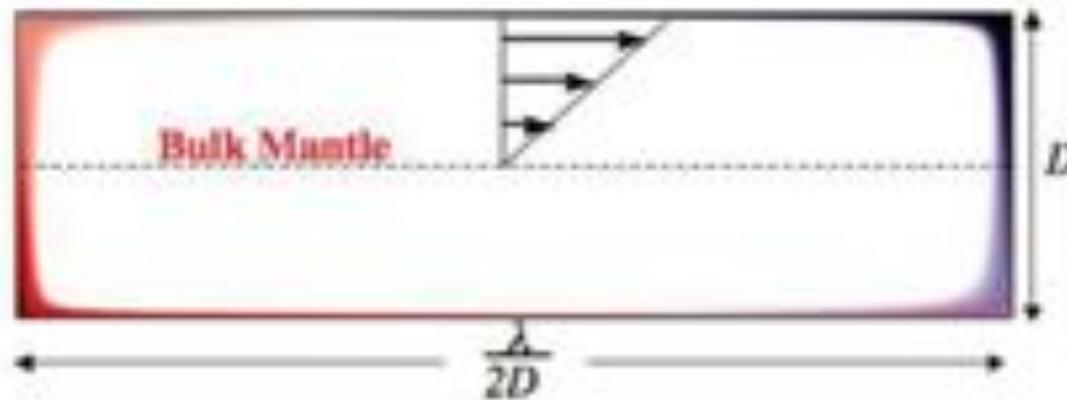


→ Champ de vitesses à la surface

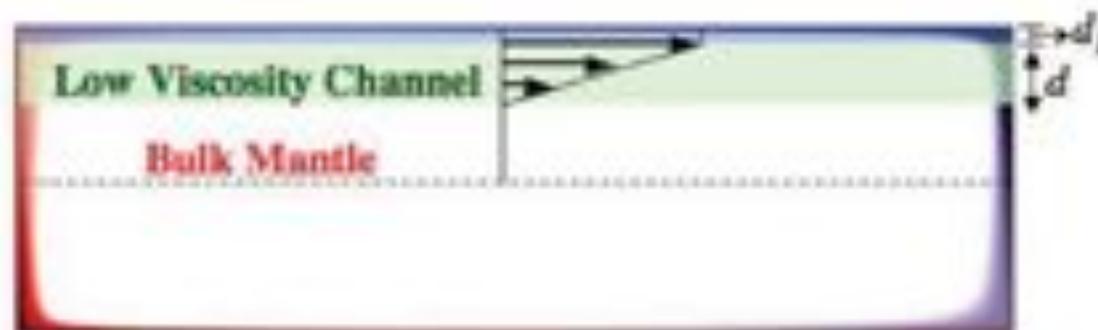
- Pourquoi la présence d'une zone à faible viscosité (LVZ) favorise-t-elle:
- (1) les structures convectives de grande longueur d'onde?
  - Busse et al. (2006); Lenardic et al. (2006) montrent que la LVZ "canalise" le mouvement de matière et diminue la dissipation latérale associée aux cellules de convection de grande échelle
- (2) la présence d'une tectonique des plaques pour une grande plage de valeurs de contraintes de rupture?
  - Amplification des contraintes dû à la restriction du flux de matière dans une zone étroite? (Hoink et al., 2012)

# Développement de lois d'échelles pour l'estimation des contraintes de cisaillement à la base des plaques

Théorie de la "couche limite" classique



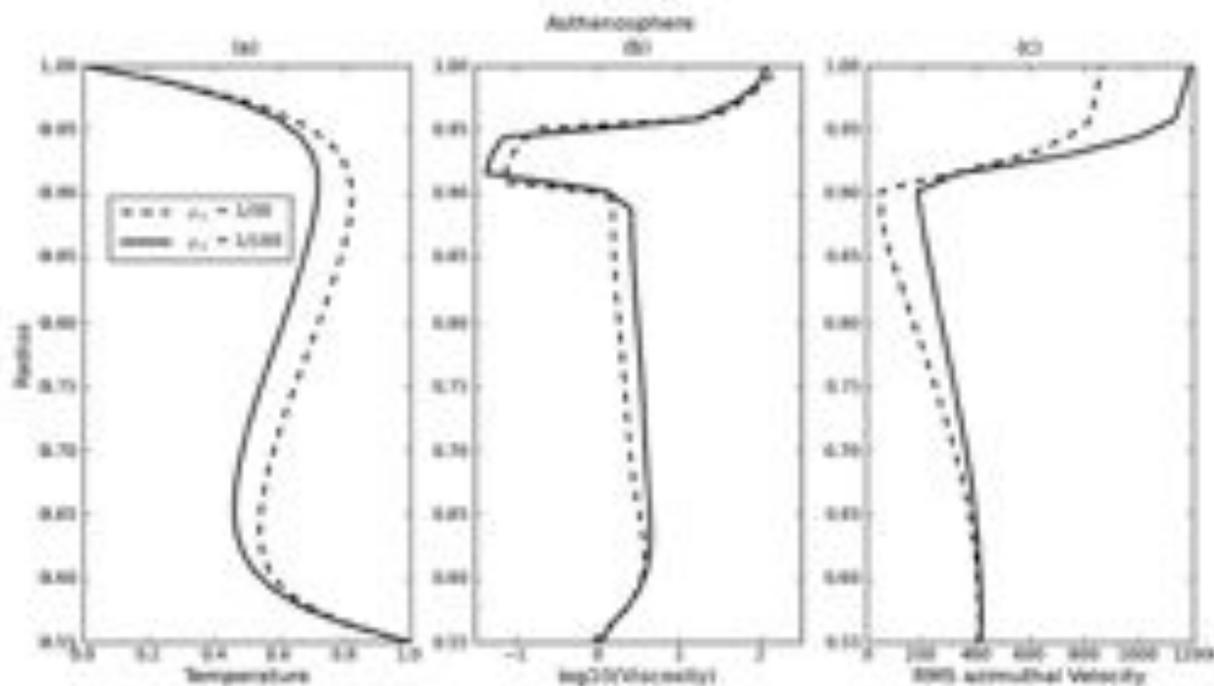
Théorie modifiée (Lenardic et al., 2006)



Cas d'une  
asthénosphère  
étroite

--  $\mu_A=1/30$

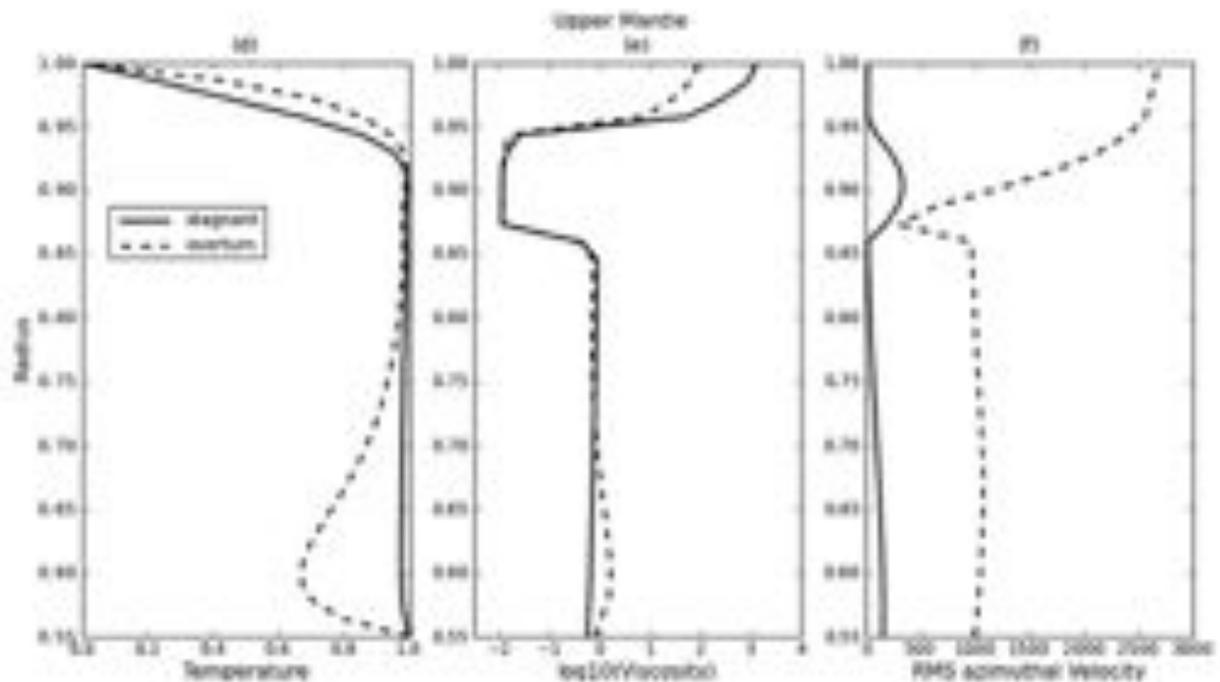
—  $\mu_A=1/100$



Cas d'une  
asthénosphère  
plus épaisse:  
Comportement  
épisodique  
entre deux états:

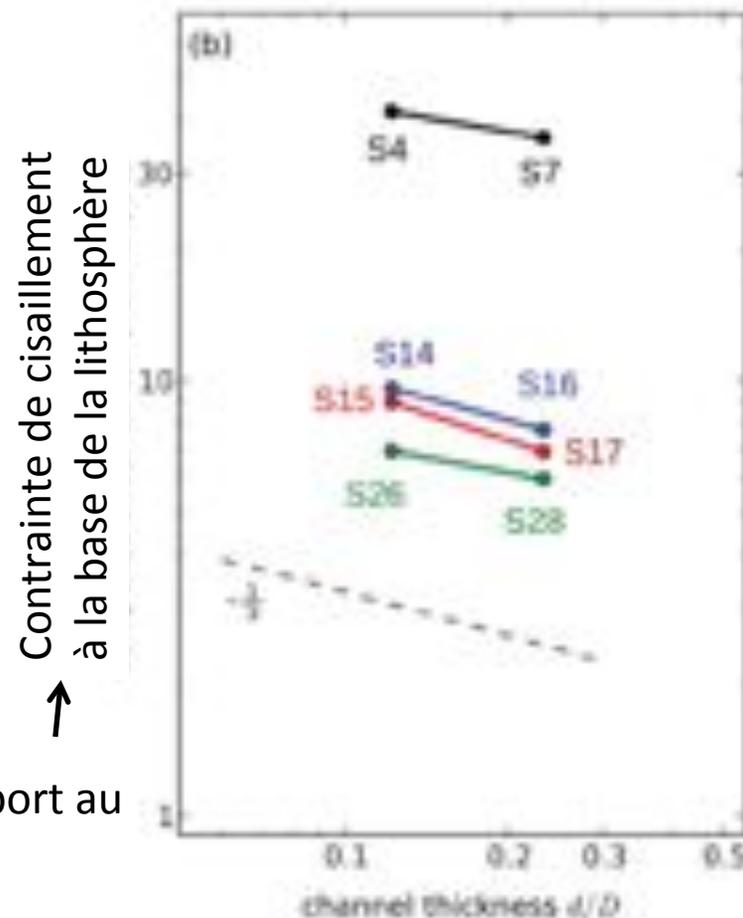
— stagnant lid

-- overturn



Trade-offs entre l'épaisseur de la LVZ, le contraste de viscosité entre la LVZ et le manteau ( $m_A$ ), et le processus qui détermine l'épaisseur des plaques (refroidissement thermique ou lithosphère déshydratée)

→ Les lois d'échelle (et les simulations 3D) prédisent que les niveaux de contrainte augmentent lorsque le flux de matière est canalisé dans une LVZ



La présence d'une asthénosphère favorise la tectonique des plaques en amplifiant les niveaux de contrainte sous les plaques ce qui entretient ou réactive les limites de plaque

Ceci par opposition à un effet "lubrifiant"

Contrainte normalisée par rapport au cas sans LVZ