

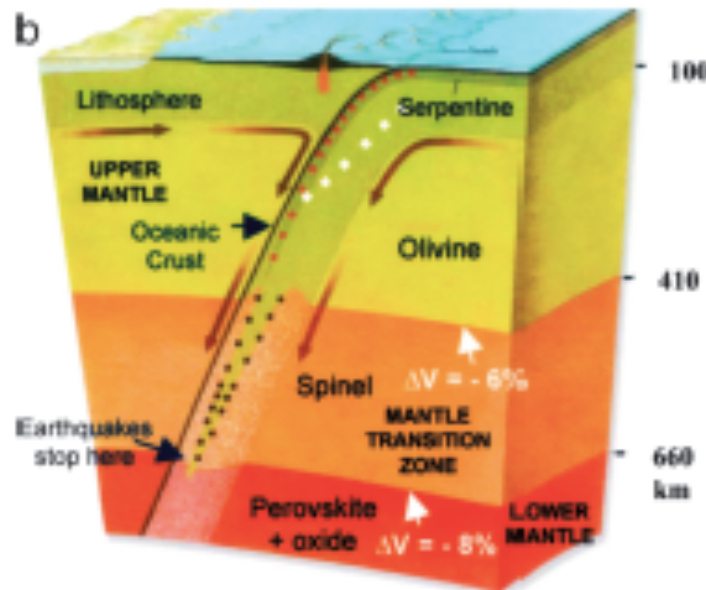
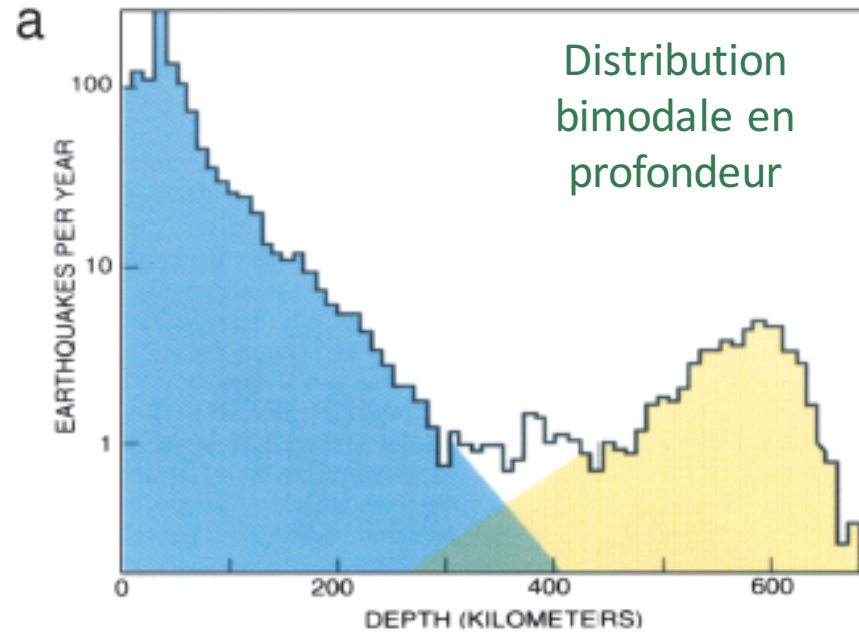
Séismes intermédiaires et profonds

3- Séismes de profondeur intermédiaire et
déshydratation de la croûte et de la lithosphère

Barbara Romanowicz
*Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre
Collège de France, Paris*

5 Novembre 2018

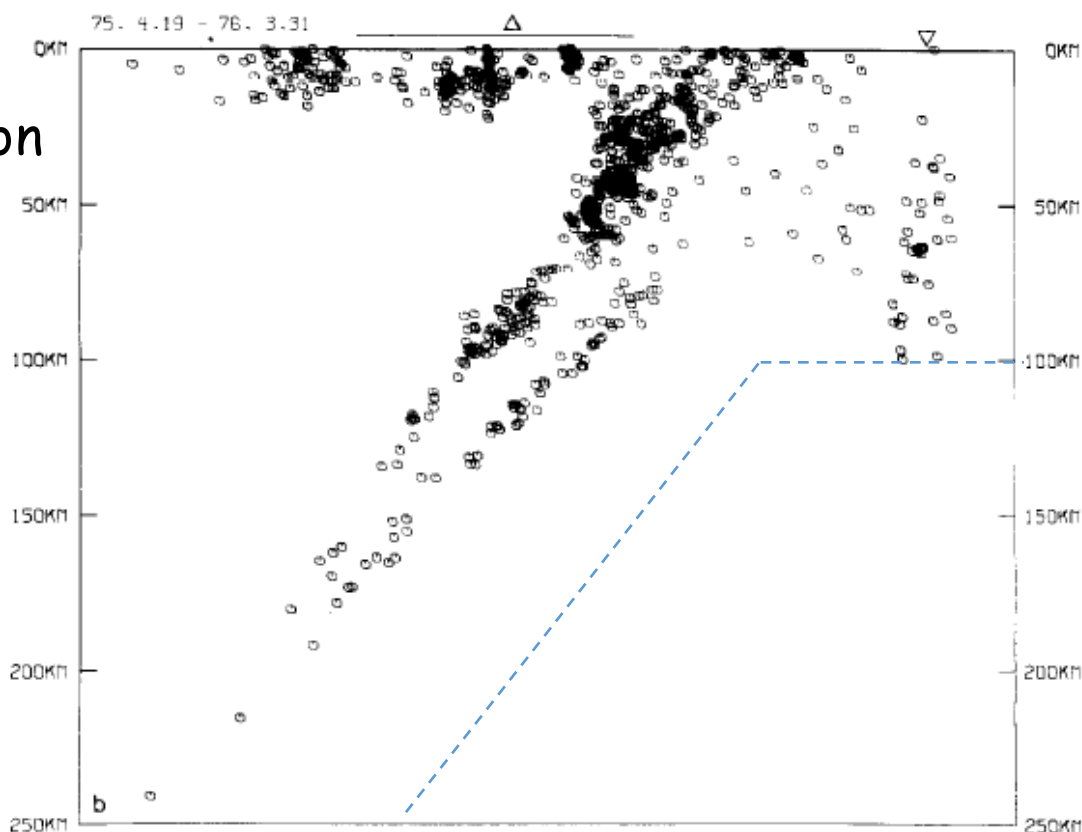
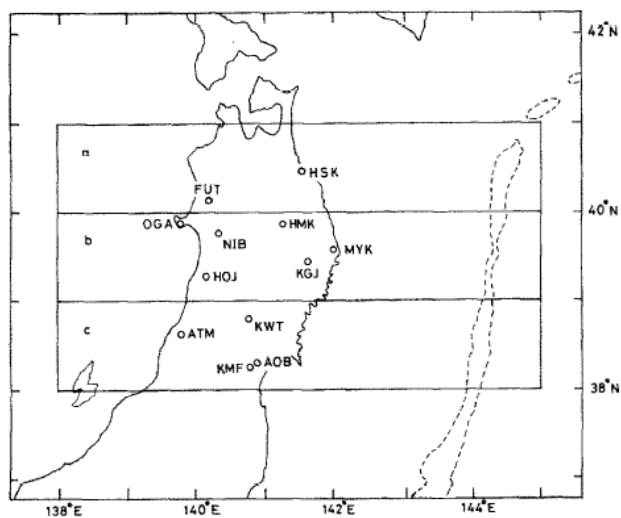
Séismes intermédiaires et profonds



Serpentine:
Groupe de minéraux
hydratés (dont l'antigorite)

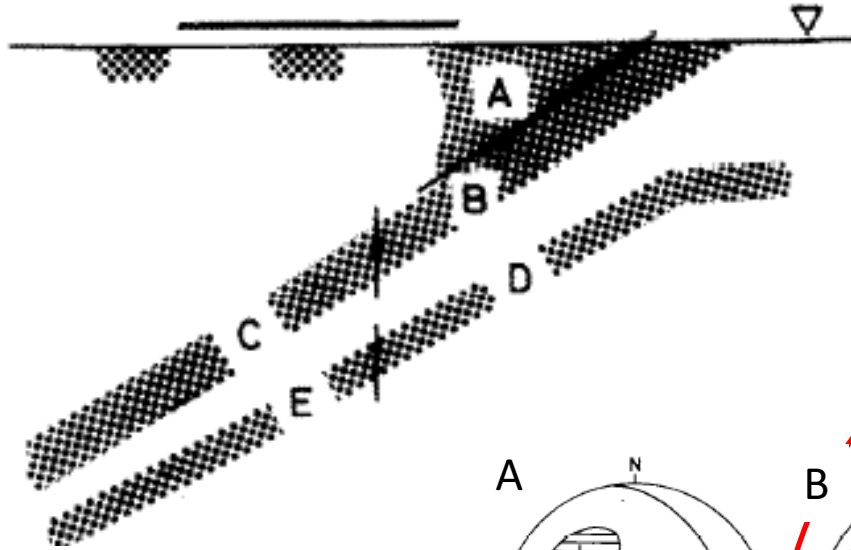
Zones sismiques de Wadati-Benioff "doubles"

Zone de subduction du Japon



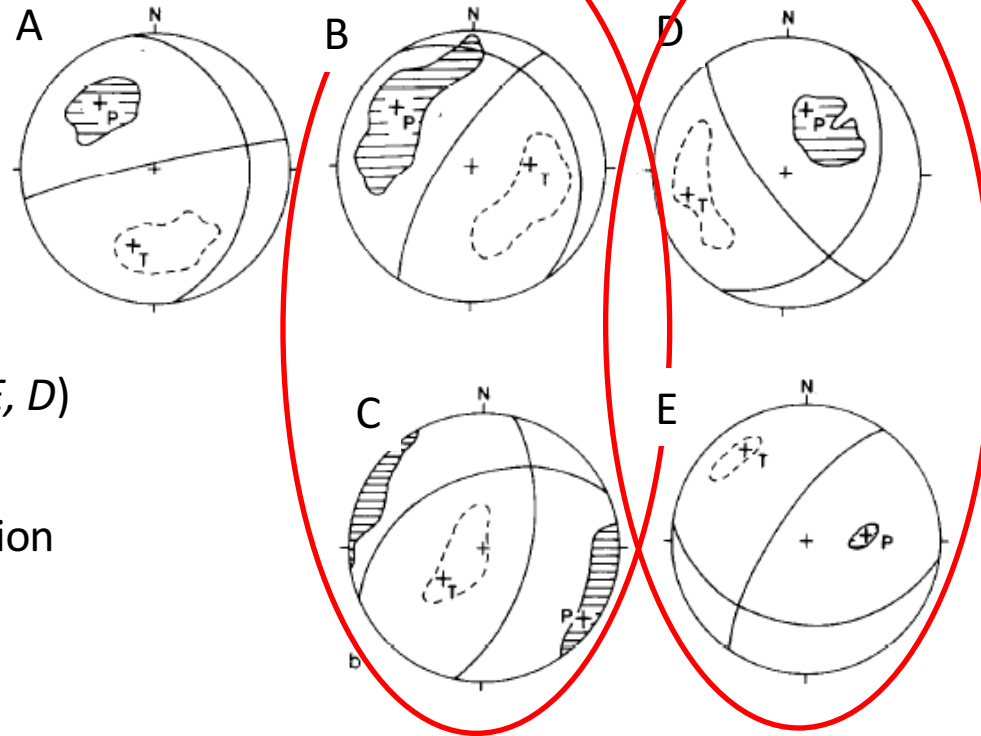
Hasegawa et al., Tectonophys., 1978

Zone de subduction du Japon



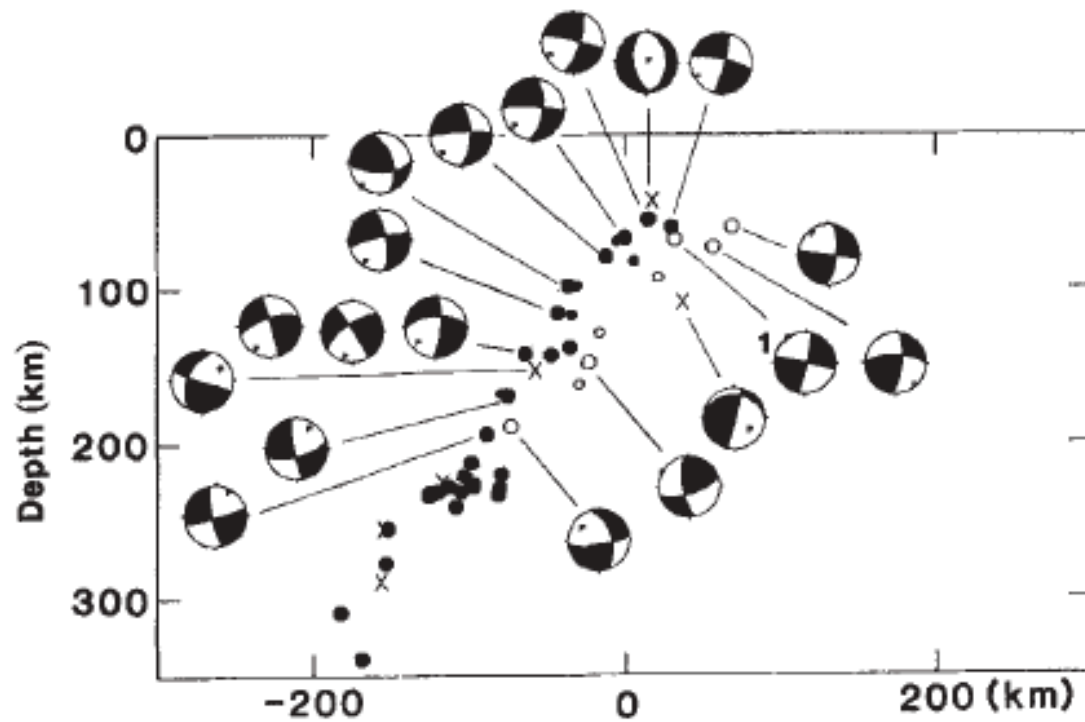
Zone sismique supérieure (B, C):

- Failles inverses
- Compression dans la direction de plongement



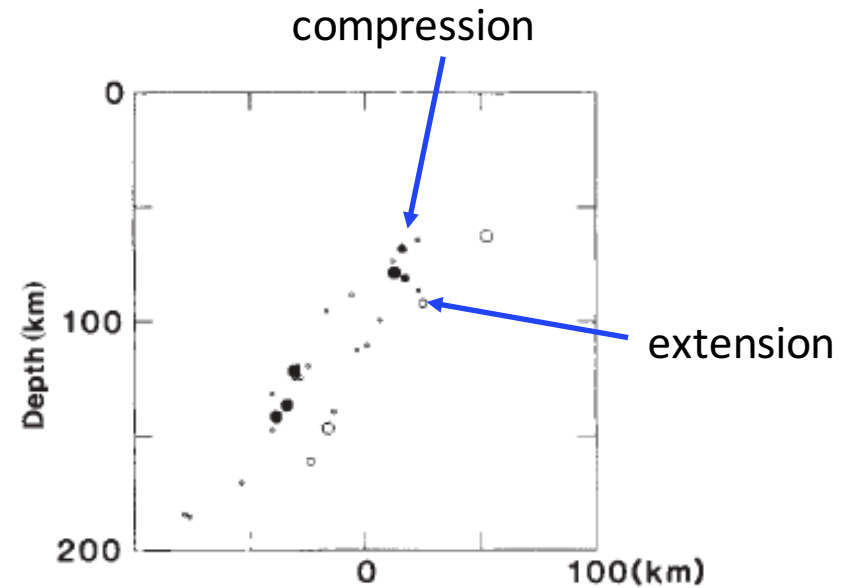
Zone sismique inférieure (E, D)

- Failles normales
- Extension dans la direction de plongement

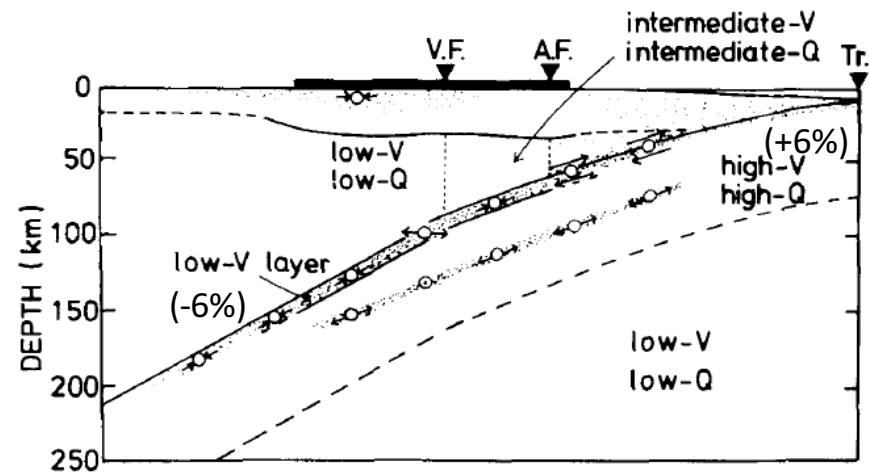
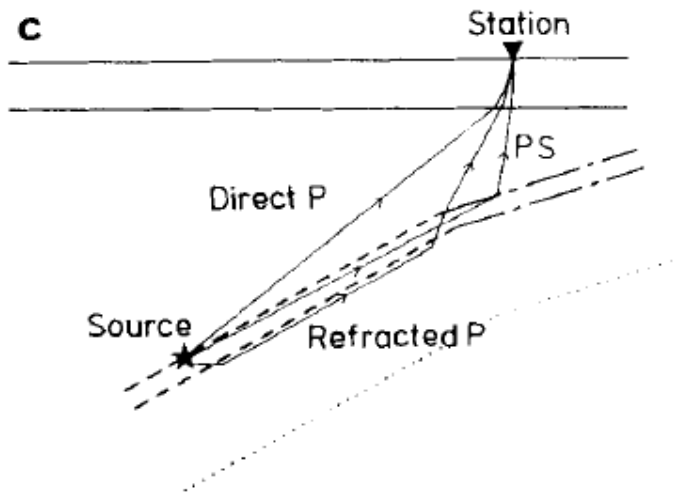
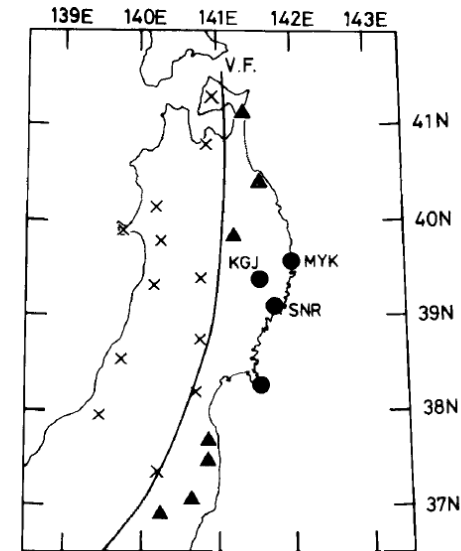
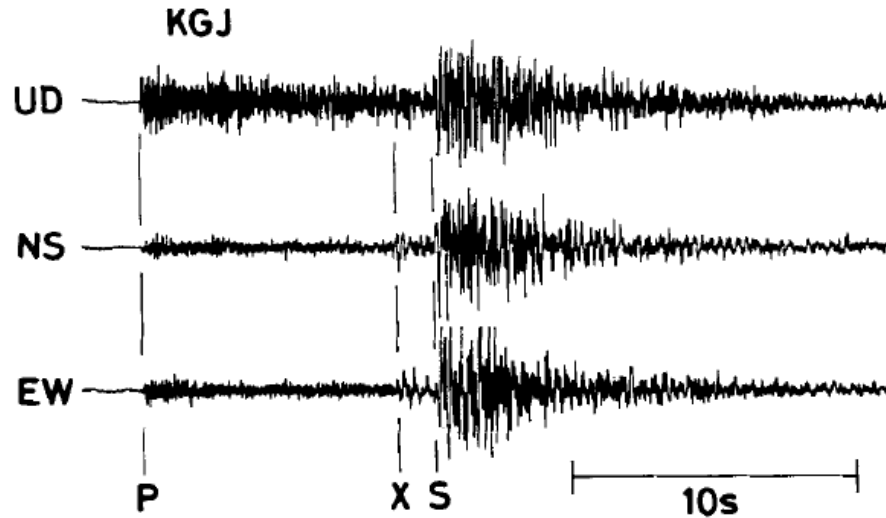


Zone de subduction
de Tonga

- La zone de sismicité double peut être expliquée par le redressement de la plaque:
- Vitesses de déformation $\sim 10^{-16} - 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ pour une plaque de 100 km d'épaisseur

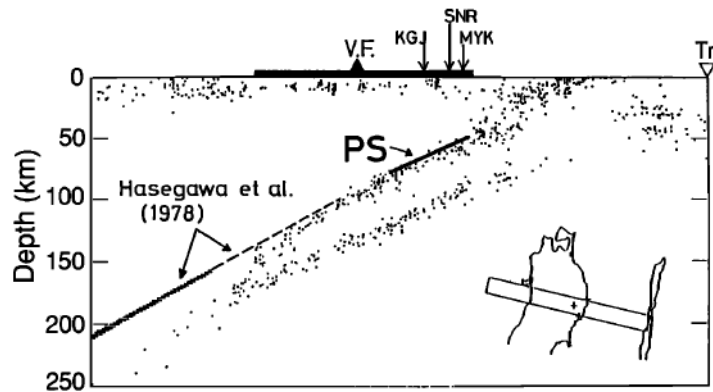
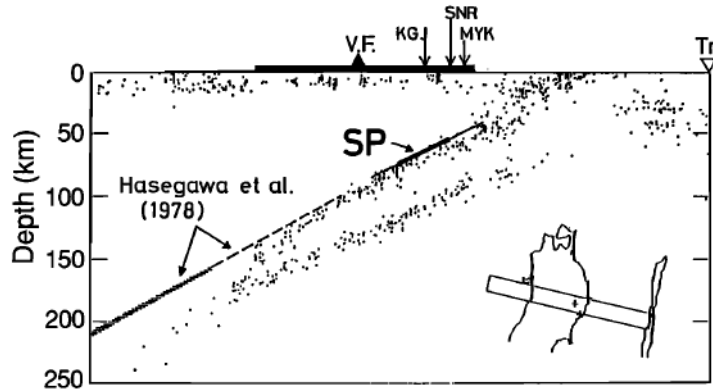


Phases converties à la limite supérieure de la plaque plongeante sous le Japon
 et couche à faible vitesse contenant une des zones de sismicité intermédiaire



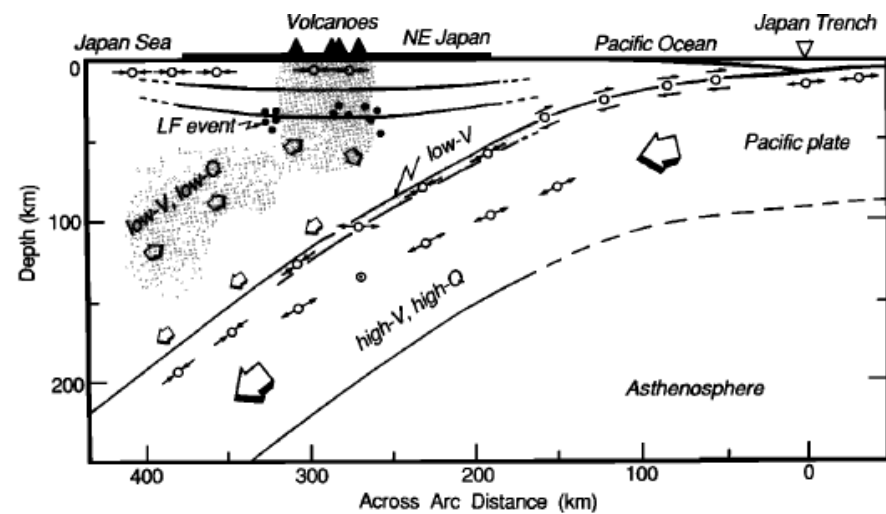
Matuzawa et al., 1986, *Geophys. J.*

Zone de subduction du Japon



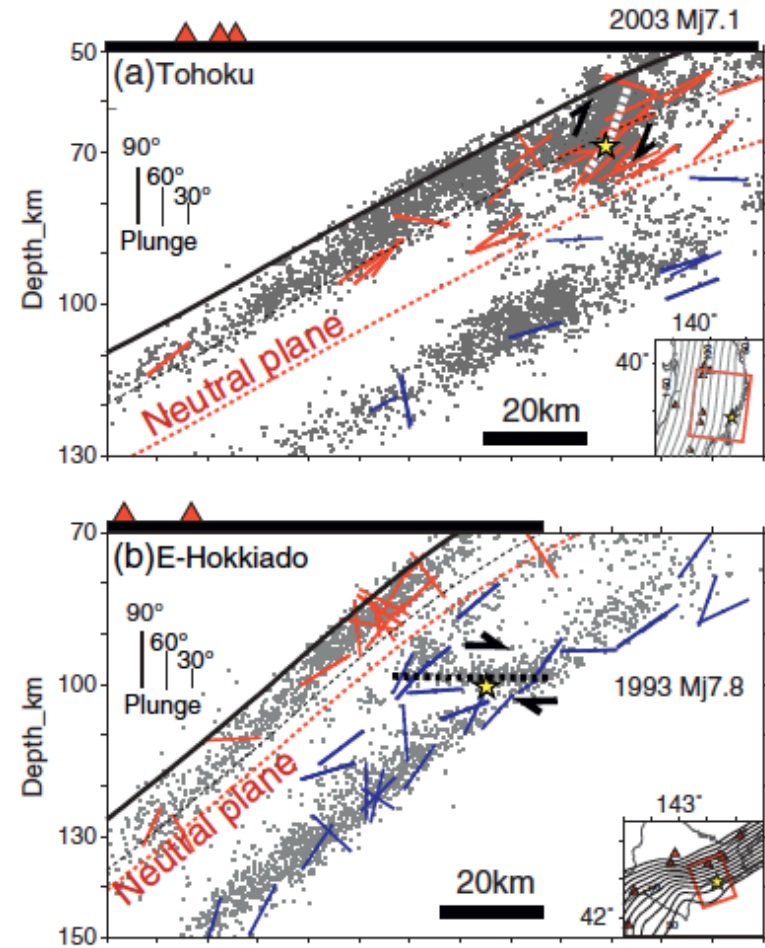
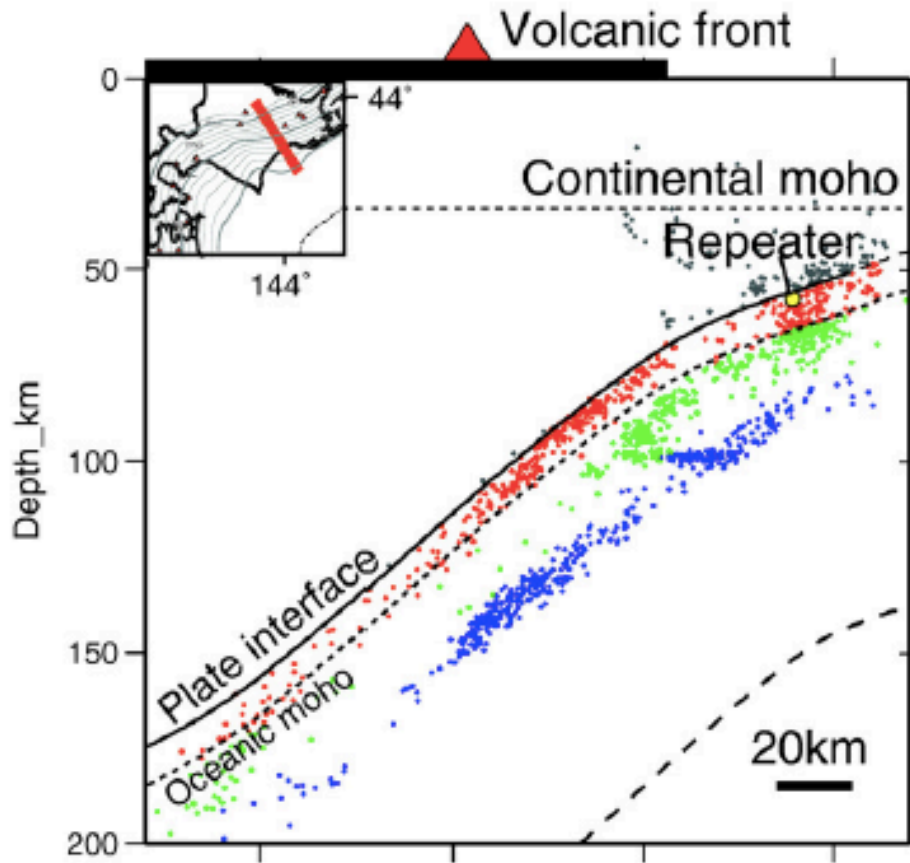
Zone de sismicité supérieure:
- dans la croûte

Zone de sismicité inférieure:
- dans la lithosphère

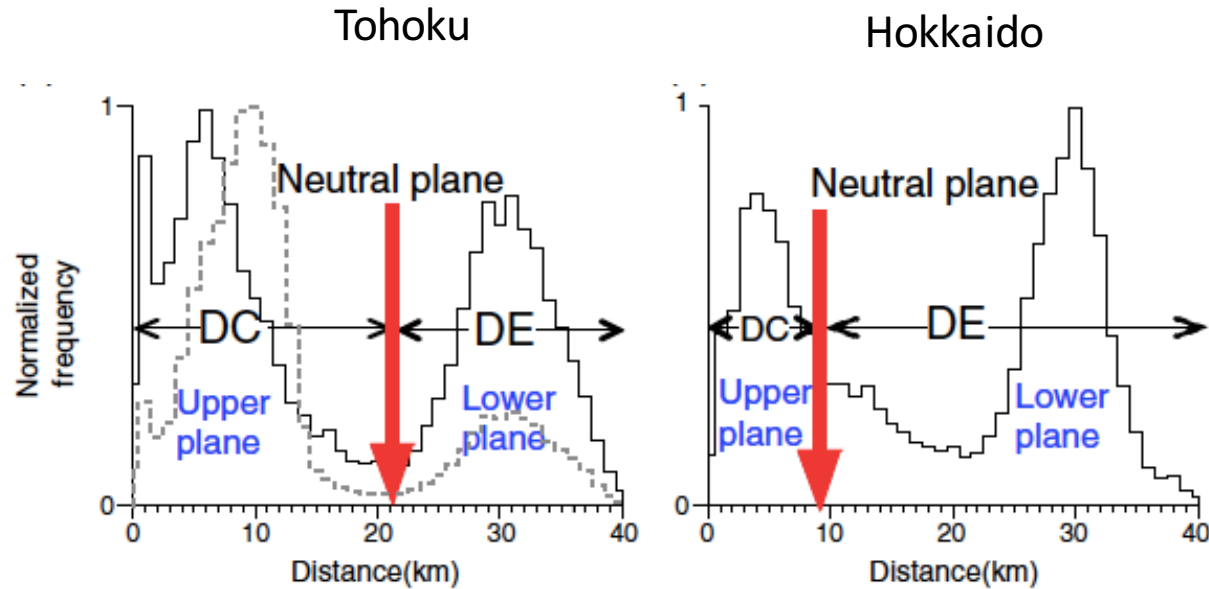


Hasegawa et al., 1994

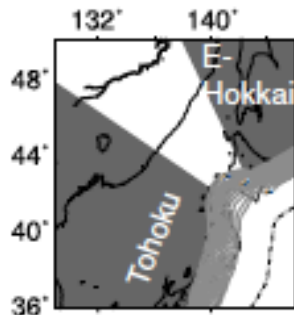
Les zones de répliques des forts séismes ne traversent pas le plan d'inversion des contraintes



Variation régionale de la position dans la plaque du plan neutre:



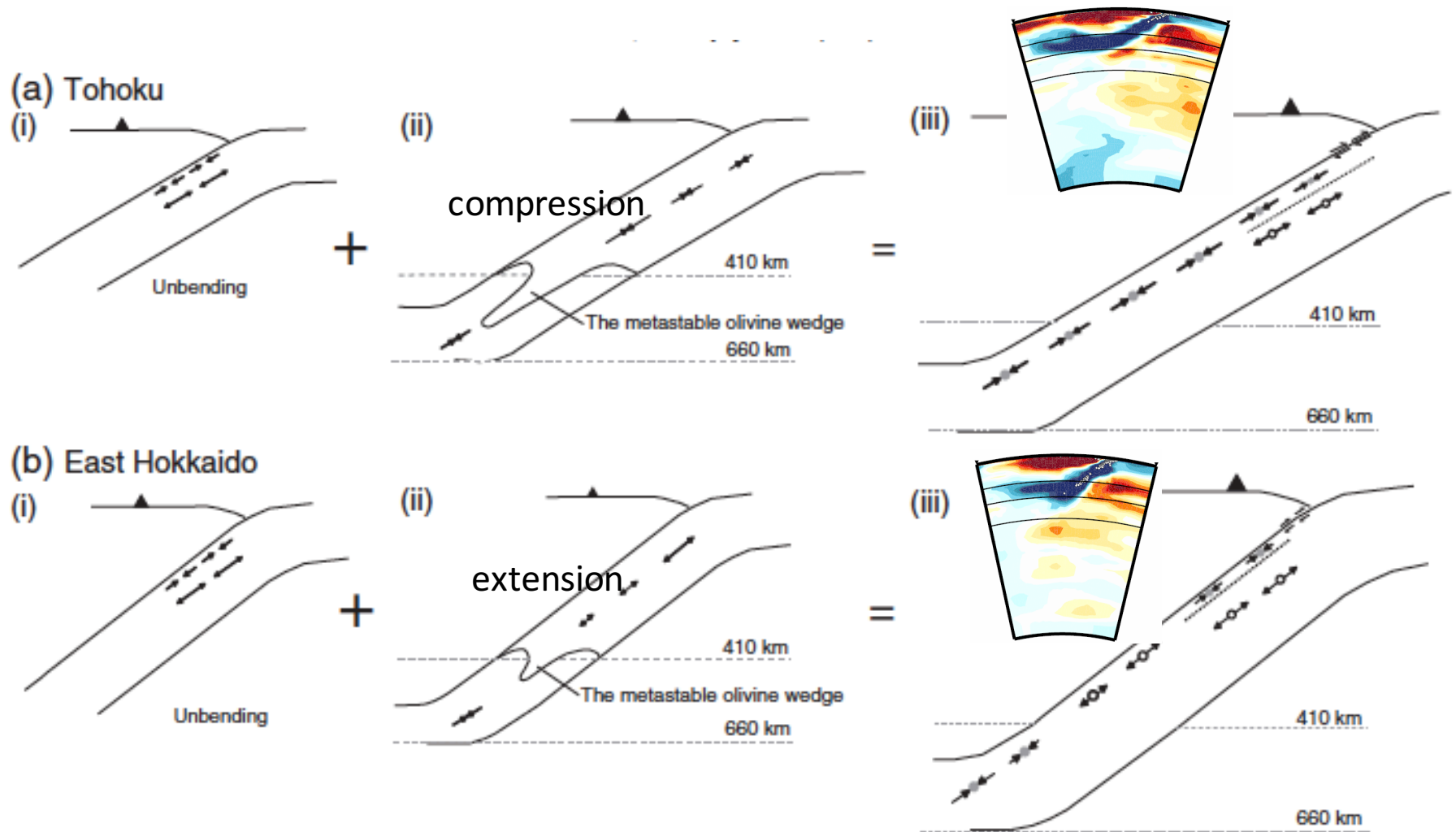
La distance est calculée à partir du bord supérieur de la plaque,
perpendiculairement à celui-ci



Interprétation:

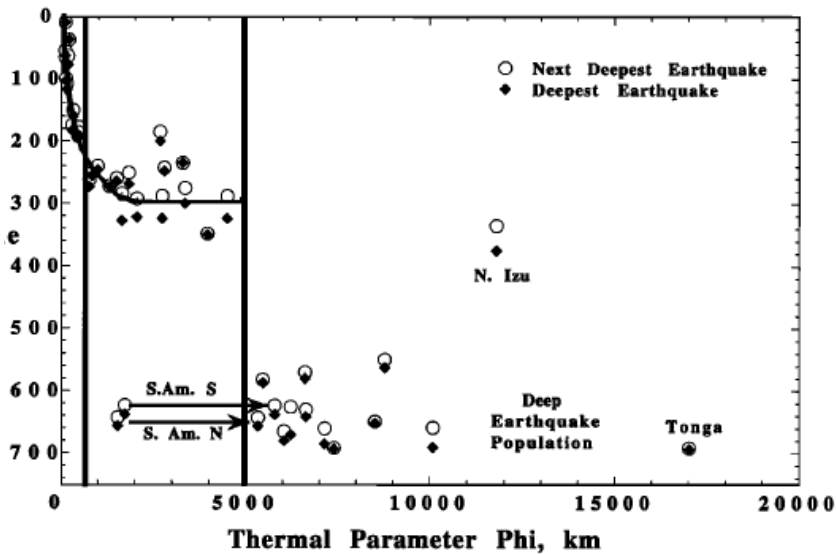
- différence dans la force exercée par la bande d'olivine métastable à plus grande profondeur (i.e. différents paramètres thermiques Φ):
- $\Phi \sim 3800$ Hokkaido (direction oblique de convergence)
- $\Phi \sim 5100$ Tohoku

Les différences régionales reflètent l'interaction entre les contraintes dues au redressement de la plaque et celles dues aux forces de gravité à plus grande profondeur



Déshydratation des plaques et séismes intermédiaires

Profondeur maximale des séismes en fonction du paramètre thermique

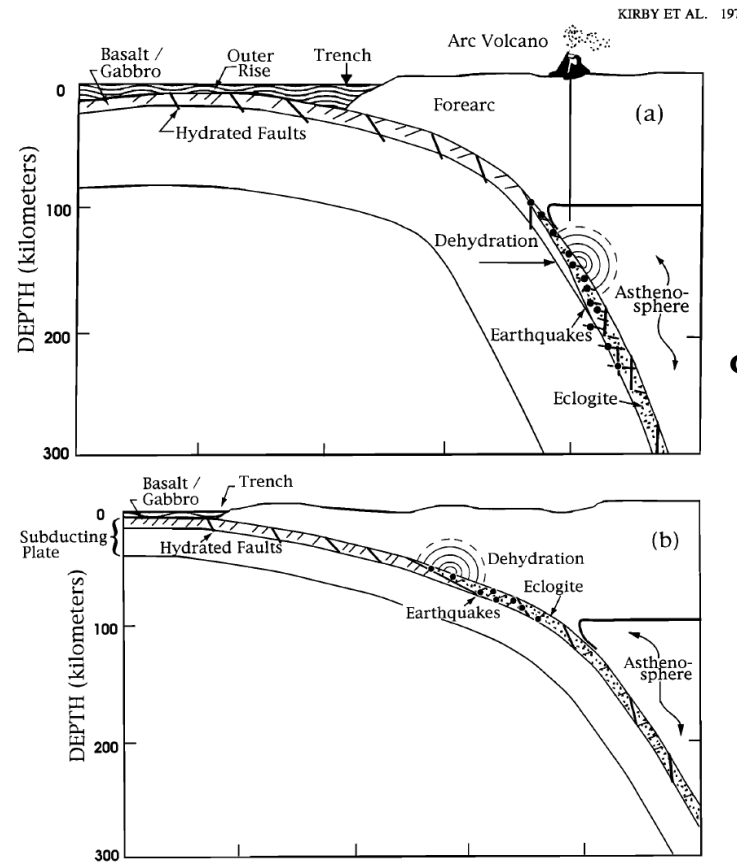


La maturité thermique de la plaque est exprimée par le "paramètre thermique" Φ :

$$\Phi = v * A$$

- Où v : composante verticale de la vitesse de la plaque
- A : âge de la lithosphère près de la fosse.

Croûte océanique fracturée près de la fosse juste avant la subduction



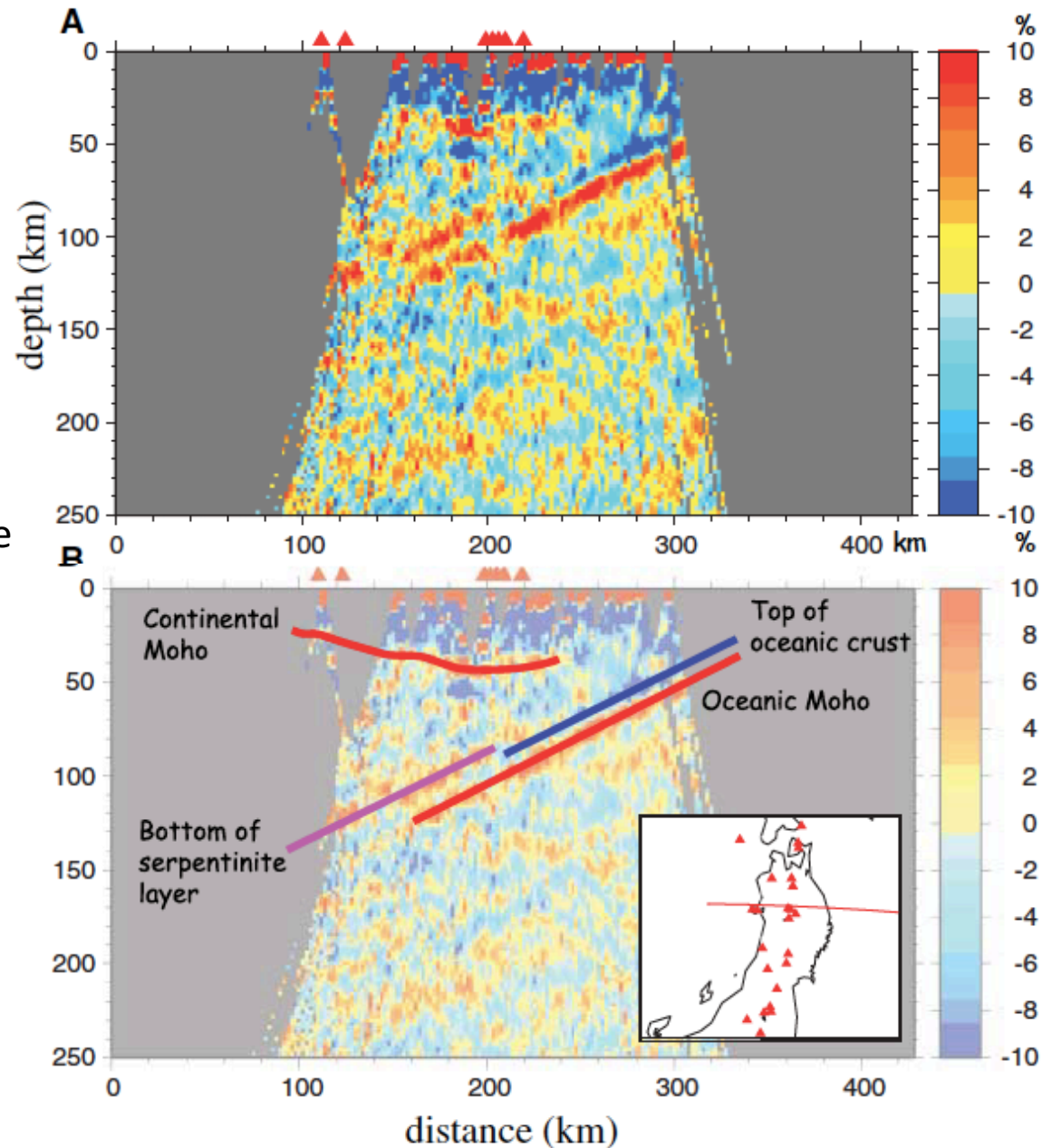
"Vieilles" plaques

$\Phi \sim 1000\text{km}$

Plaques "jeunes"

Coupe de réflectivité sismique sous le Japon du Nord

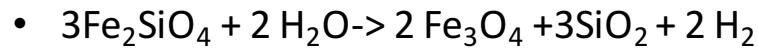
Attention:
la convention de
couleurs est inverse
de celle des études
tomographiques !!



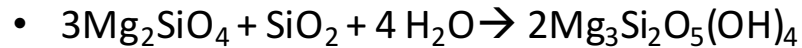
Kwakatsu and Watada, Science, 2007

Déshydratation de la serpentine

- Serpentine: forme hydratée de l'olivine obtenue par processus métamorphique de basse température:



Serpentine



Serpentine Brucite



- Polymorphes de la serpentine:
 - Antigorite (stable à haute température $T > 350^\circ\text{C}$)
 - Lizardite (plus couramment rencontrée)



- Raleigh et Paterson (1965) étudient le comportement mécanique de la serpentinite (roche) dans le contexte de la genèse des massifs montagneux.

Zones sismiques Wadati-Benioff "doubles"

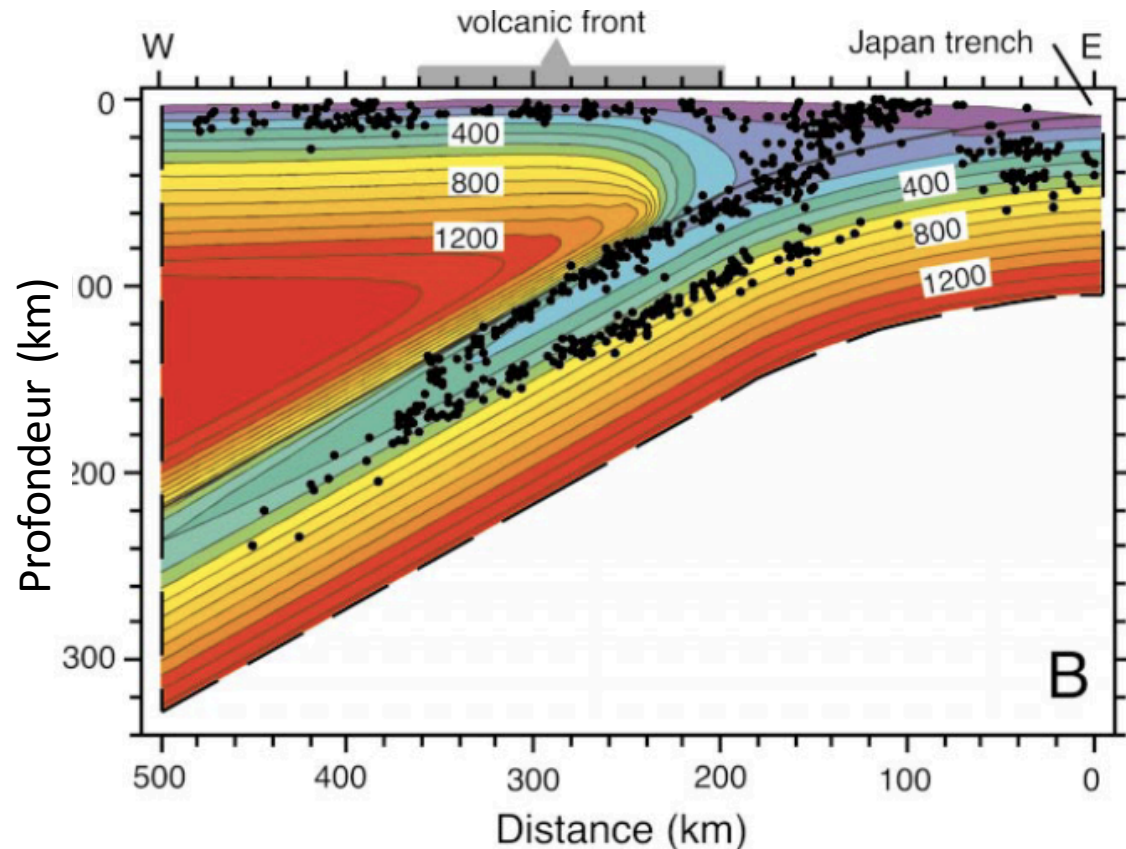
1) Sismicité intermédiaire subsiste à des profondeurs au delà du domaine des contraintes de redressement de la plaque.

2) Plan inférieur de sismicité:

-> à 100 km: 550-800°C

-> à 160 km: 350-600°C

Domaine de déshydratation de l'antigorite ->
Forsterite+enstatite+H₂O

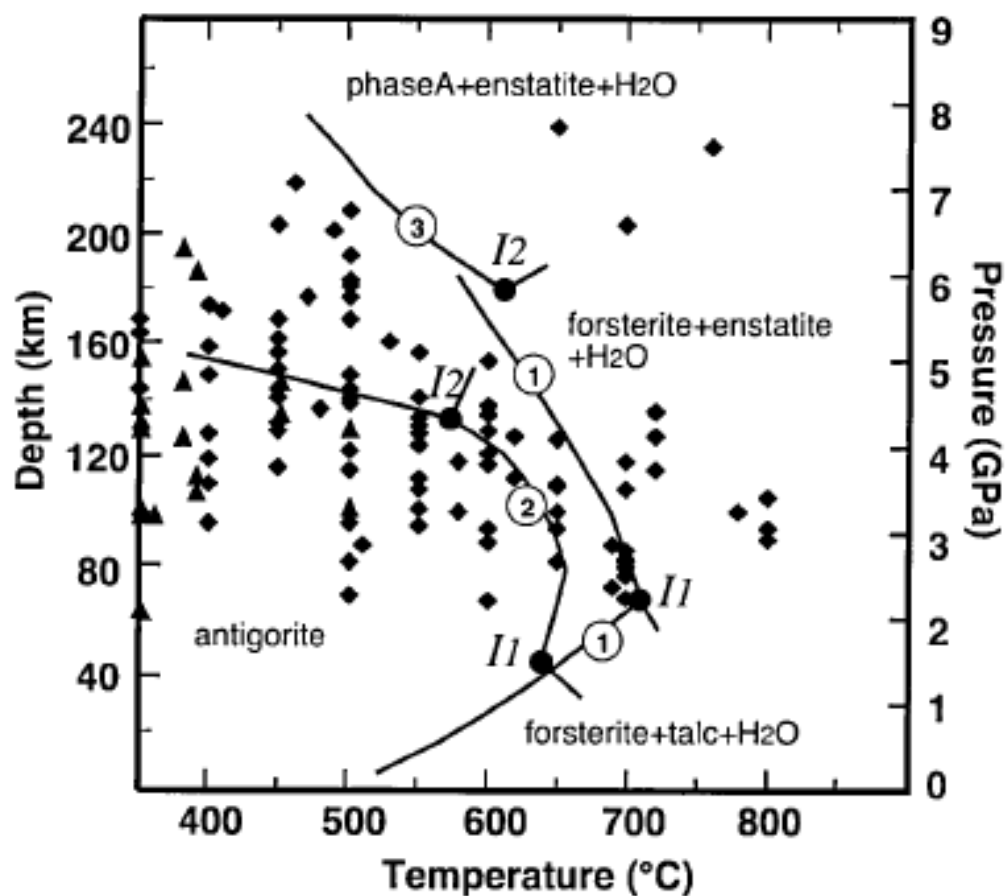


Peacock, 2001,

Sismicité: Hasegawa et al., 1994

-> Hydratation par fracturation de la plaque océanique affecte aussi la partie supérieure du manteau

Diagramme de phase : décomposition de l'antigorite



◆ Séismes intermédiaires

(Calculs sans Fe: manque de données expérimentales)

Antigorite $\text{Mg}_{43}\text{Si}_{34}\text{O}_{85}(\text{OH})_{31}$

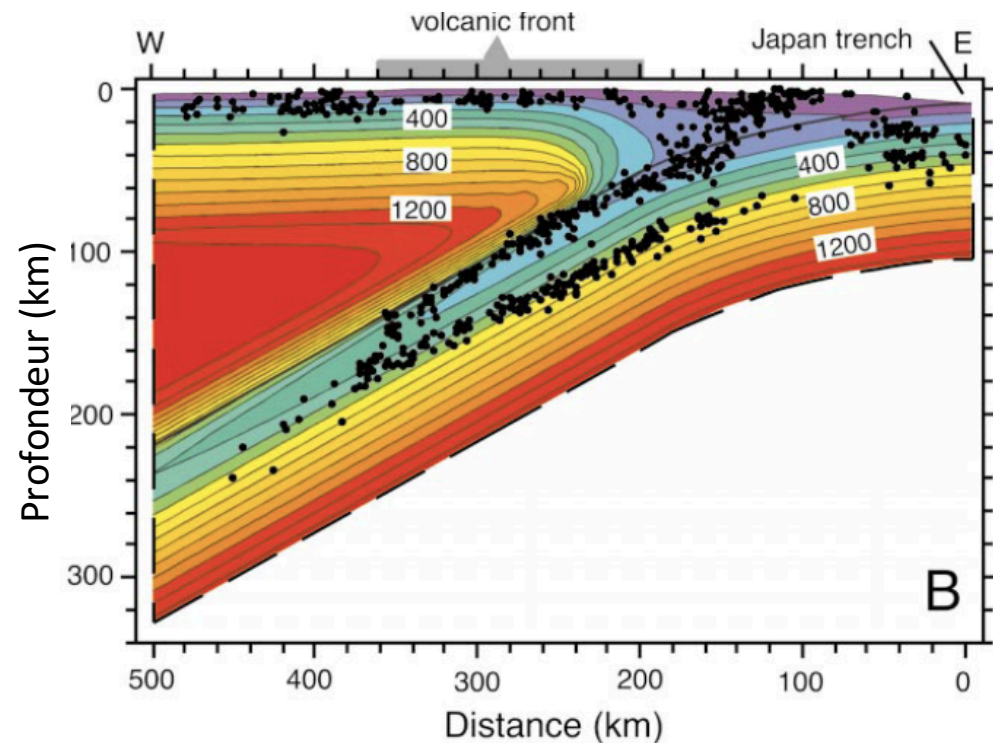
Forsterite Mg_2SiO_4

Enstatite $\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_6$

talc $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Omori et al., 2002 (références à travaux plus anciens: (1) Ulmer and Trommsdorff (1995); (2) Wunder and Schreyer (1997); (3) Bose and Navrotsky (1998))

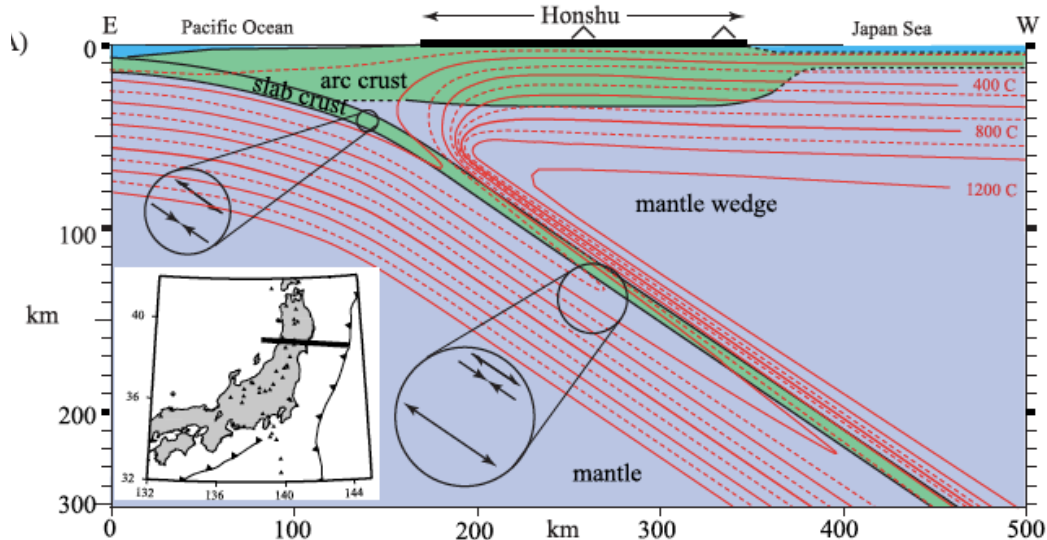
- Serpentine $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ contient 13 wt% H_2O :
 - Minéral le plus important dans les roches ultramafiques
 - Antigorite stable à $T > 300^\circ C$
 - Suggère qu'il peut y avoir un réservoir important d'eau dans les zones de subduction.
- Propose que l'hydratation se produit juste avant la fosse (outer rise)
 - Grandes failles normales peuvent atteindre 25 km de profondeur
 - Séismes de faille inverse encore plus profonds \rightarrow 50 km (e.g. Sumba 1977 Mw 8.3)
 - Suggère même que les séismes plus profonds pourraient être dus à la déshydratation de minéraux hydratés stables à plus haute pression, telle que la phase A.



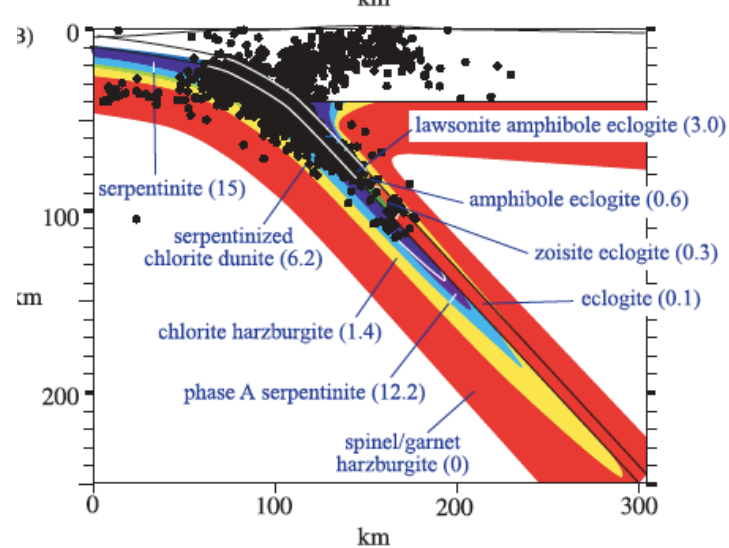
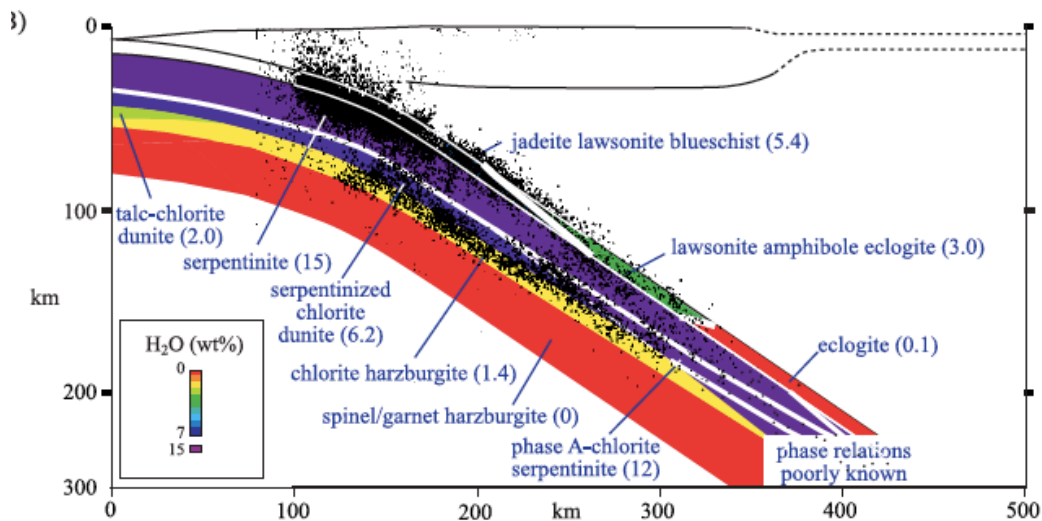
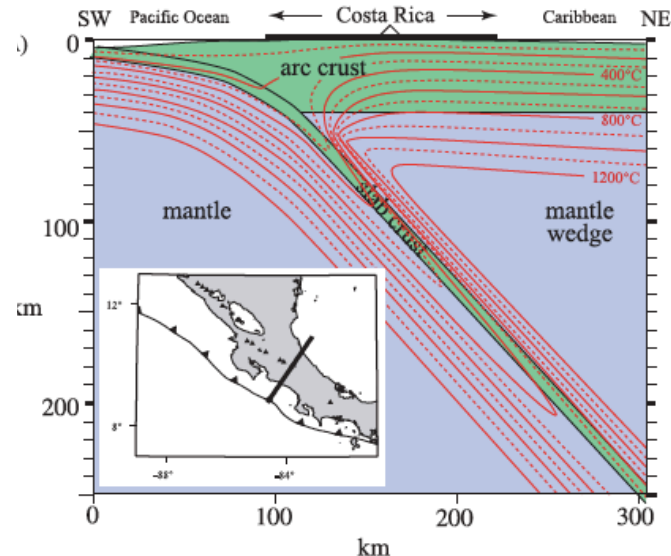
Peacock, 2001,
Sismicité: Hasegawa et al., 1994

Modèles pétrologiques des plaques en subduction

Japon (Honshu)

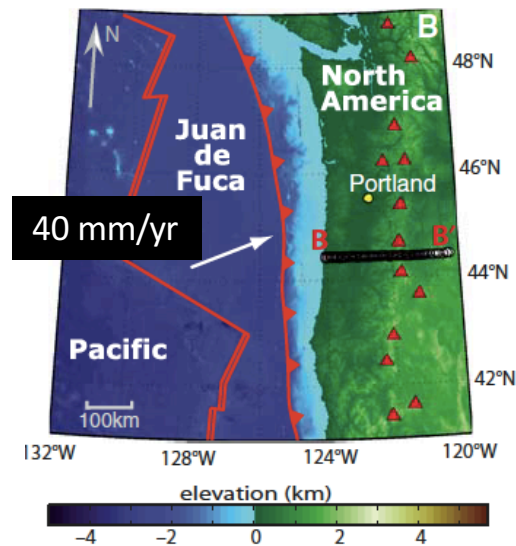
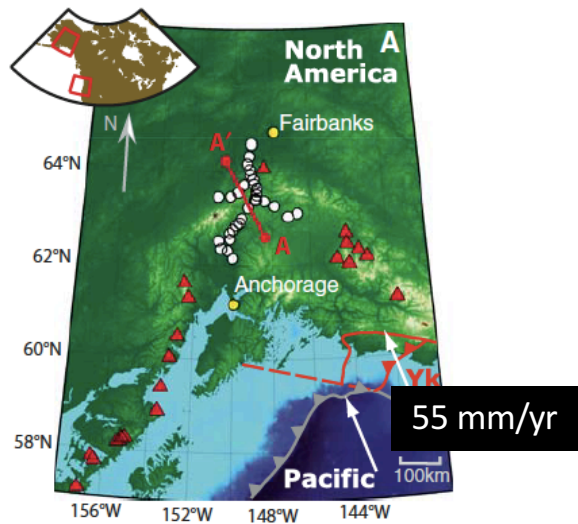


Amérique centrale (Costa Rica)



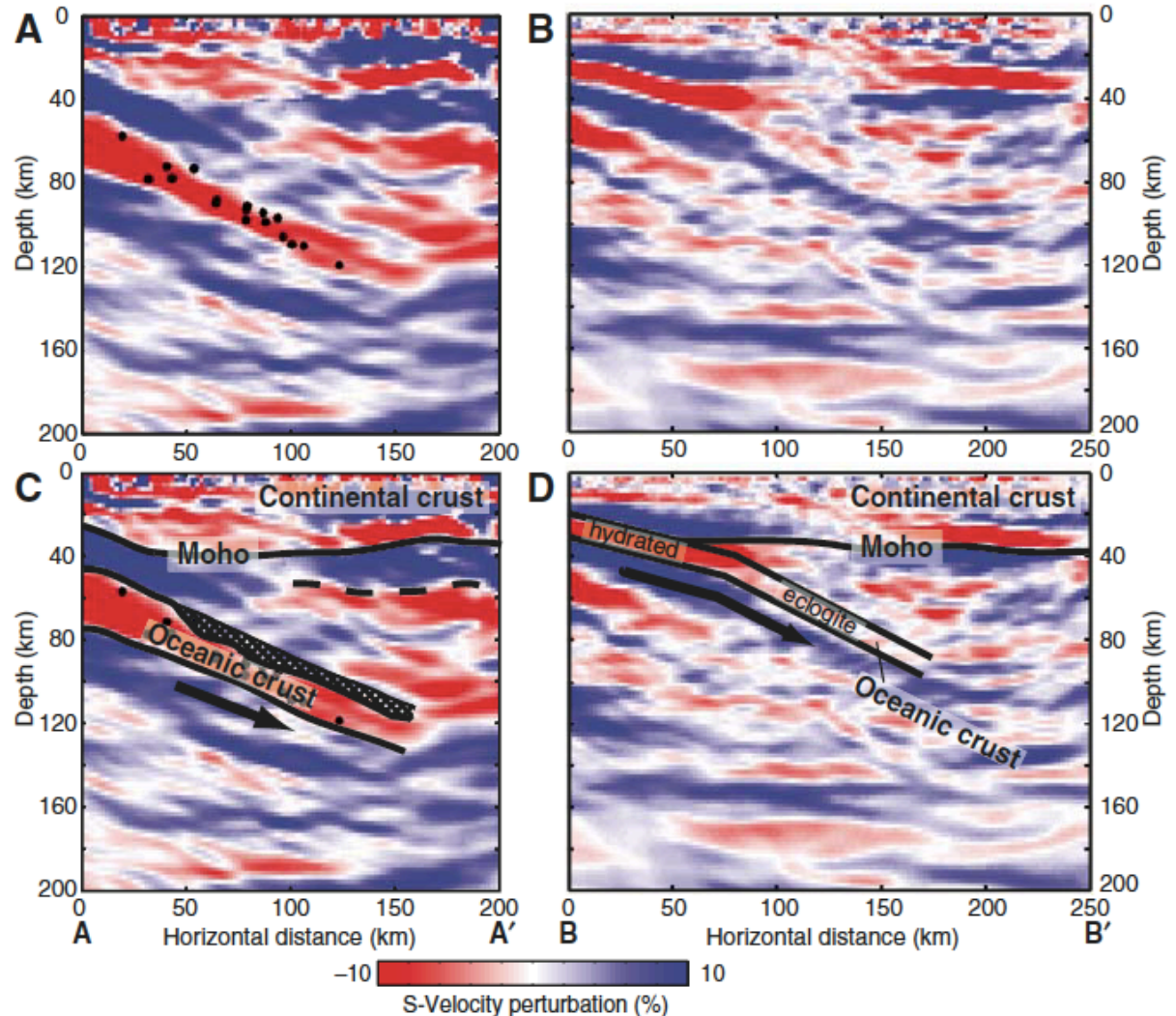
Réflectivité dans les plaques plongeantes sous l'Alaska et l'Ouest des USA (Cascadia)

(Convention de couleur comme en tomographie, inverse de Kawakatsu and Watada)

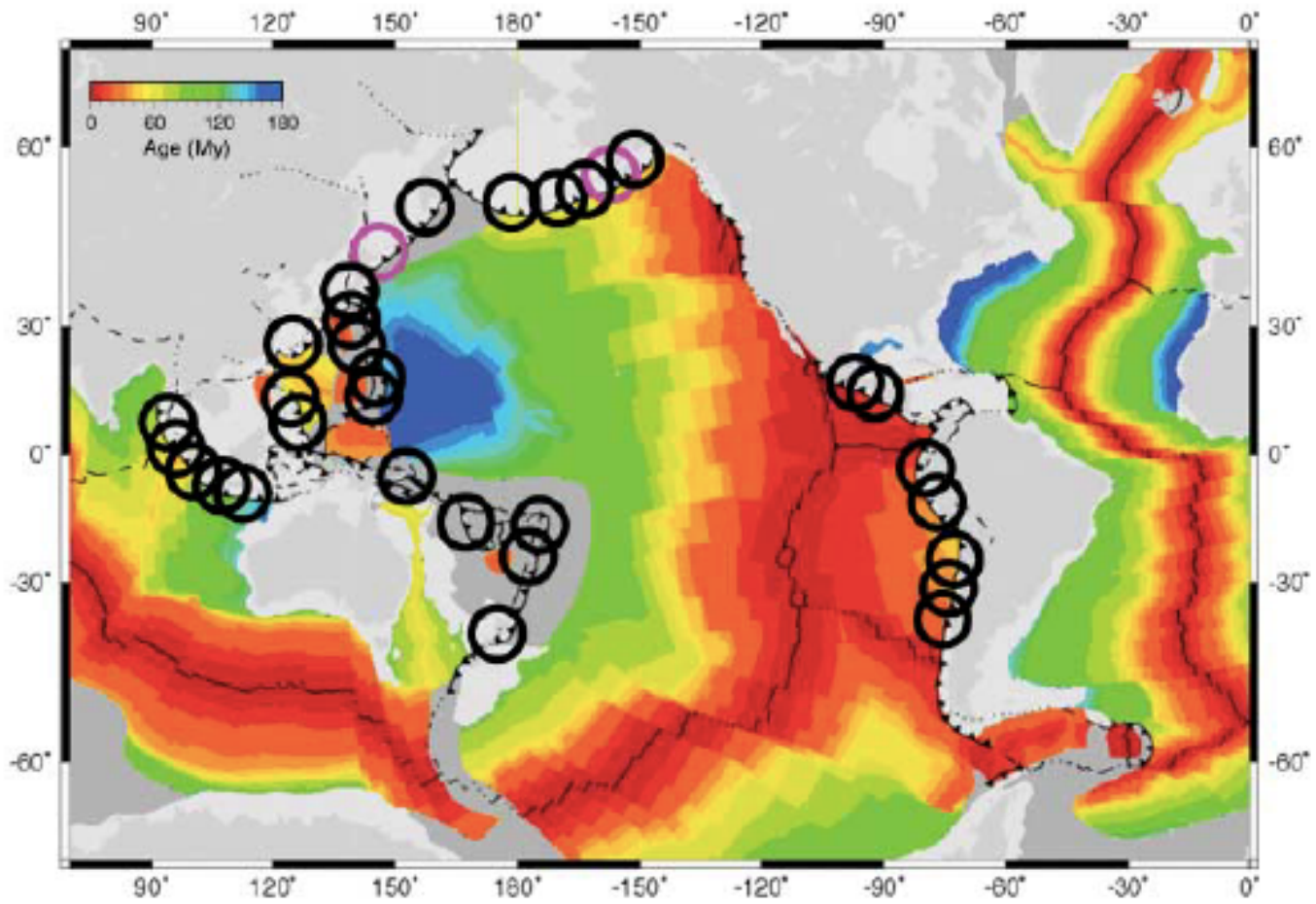


Alaska (35-45 Ma)

Cascadia (6-10 Ma)



=> Eclogitisation de la croûte dépend de la structure thermique de la plaque

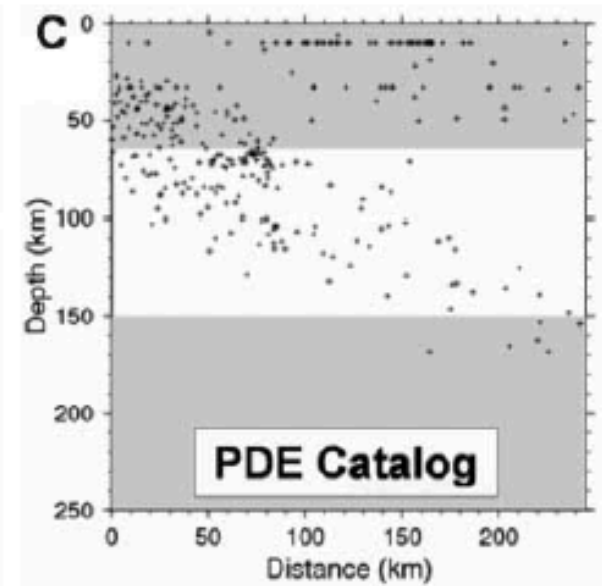
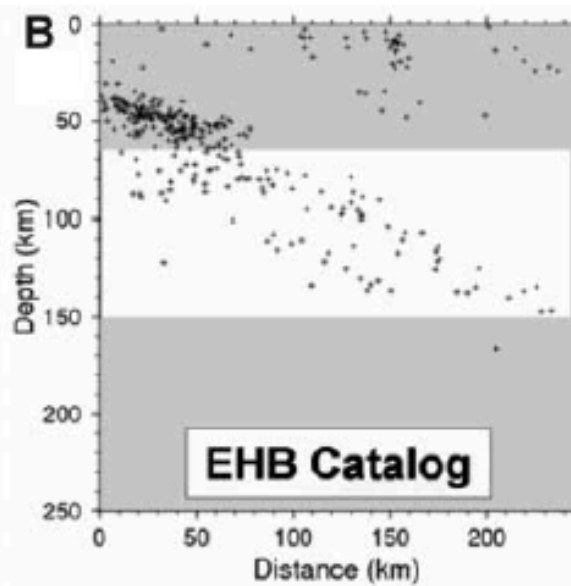
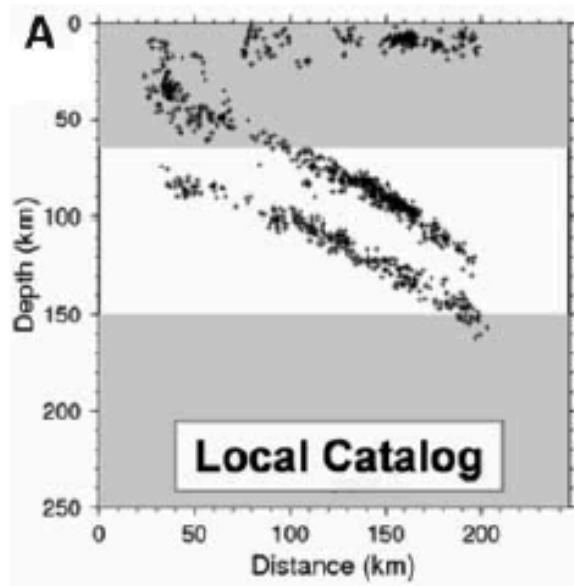


Brudzinski et al., Science, 2007

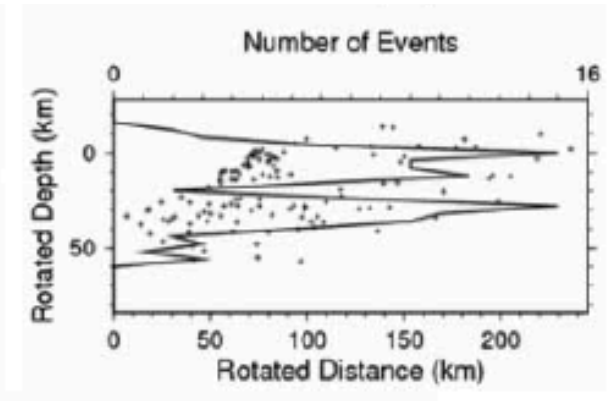
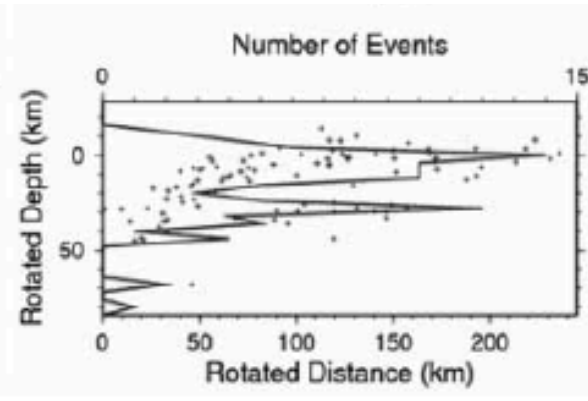
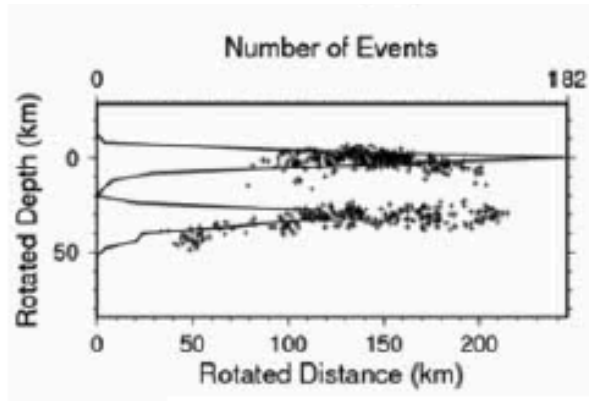
Relocalisation par
"double différences"

Relocalisation globale

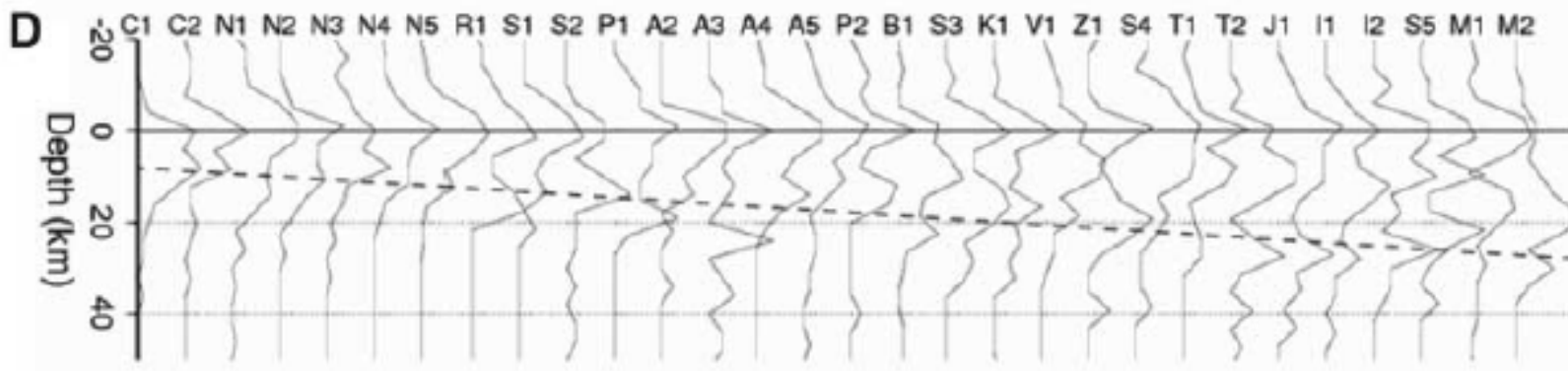
Catalogue global
"ordinaire"



Après rotation dans la direction de plongement:
séparation des 2 plans de sismicité ~ 30 km



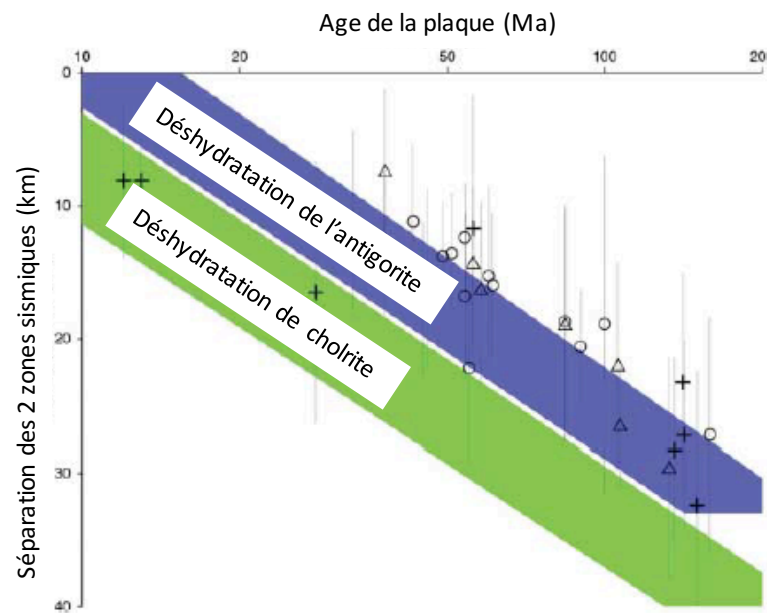
Age de la plaque en subduction



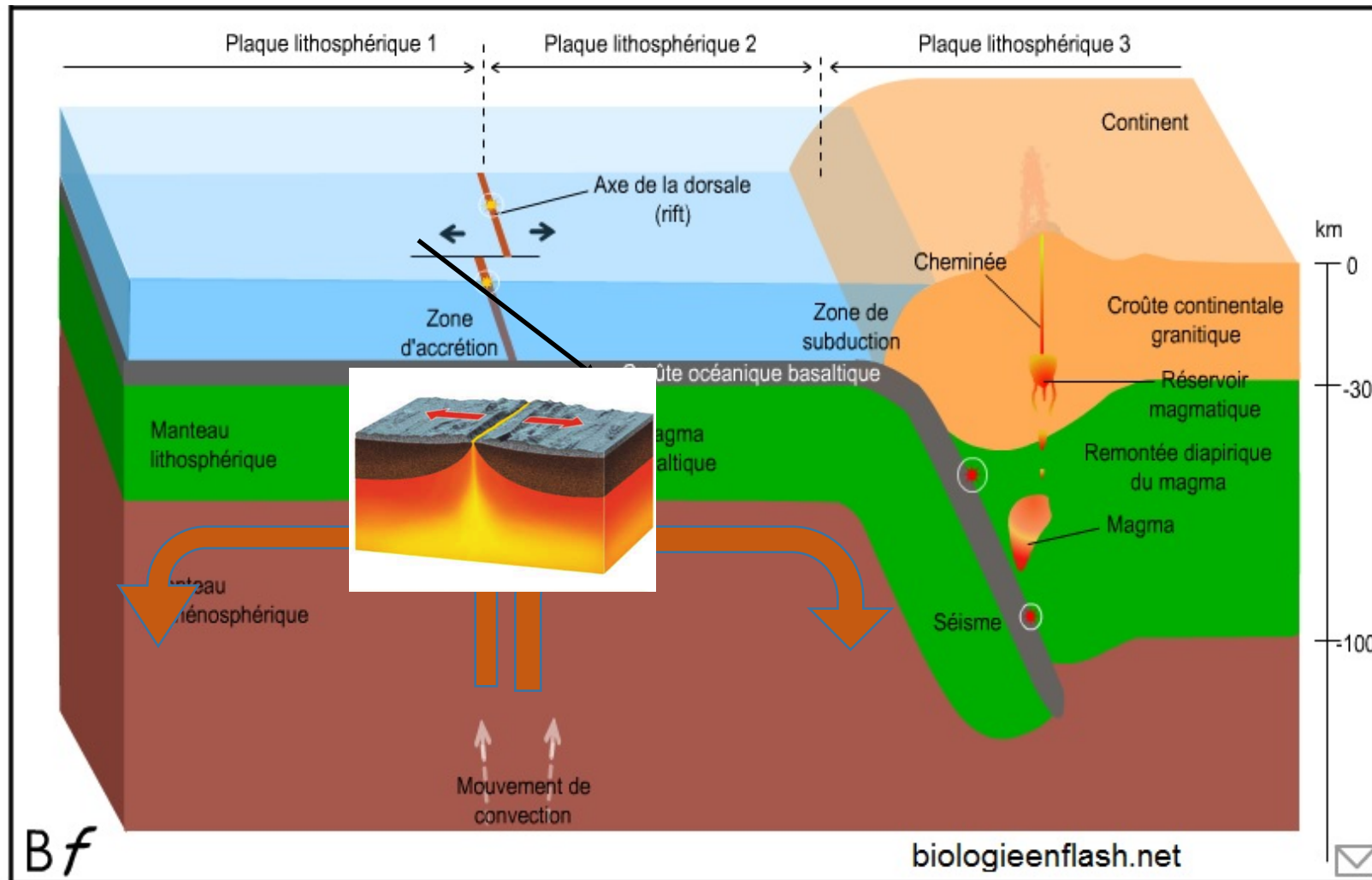
12 Ma

160Ma

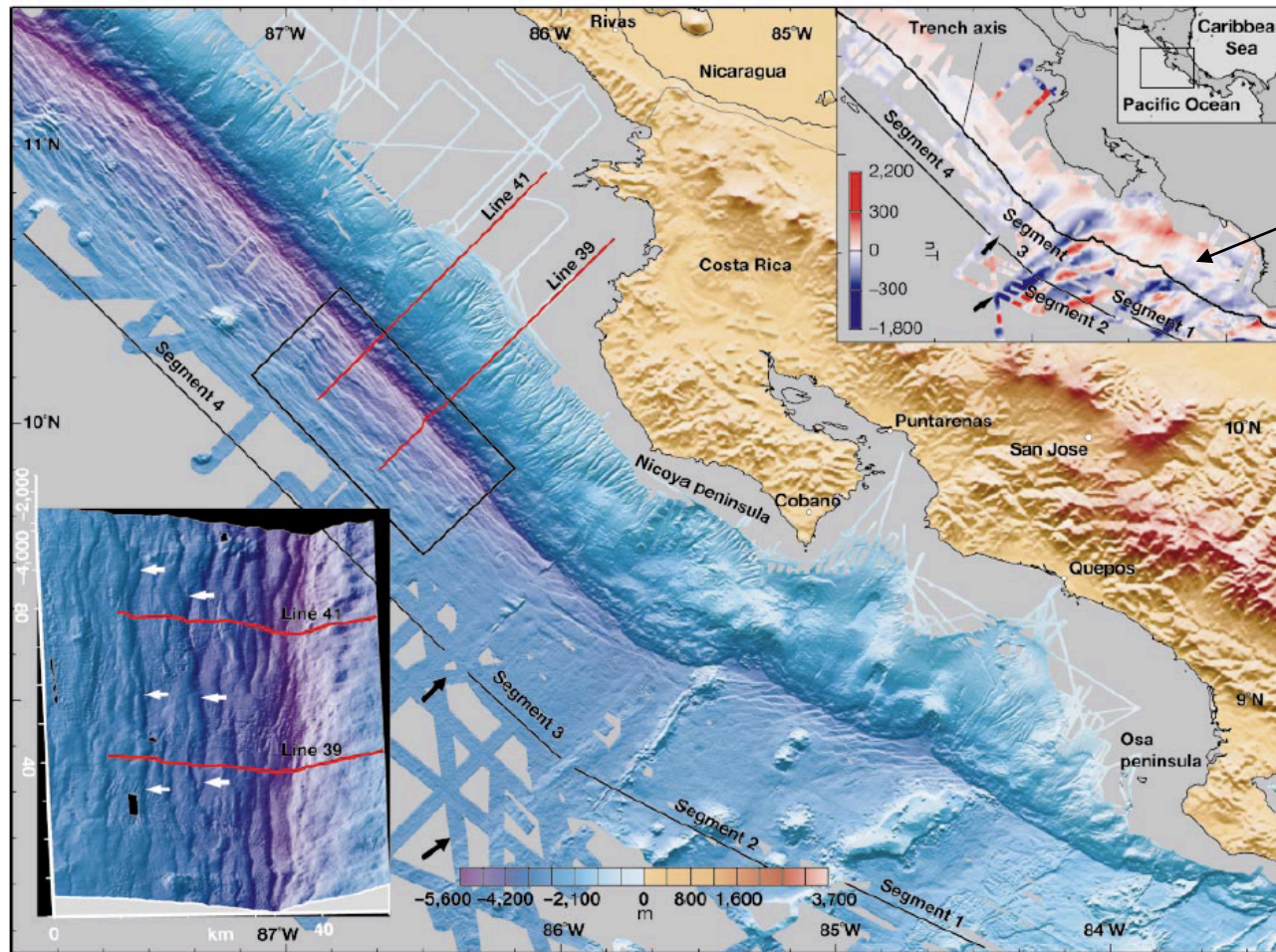
=> Mécanisme générateur des zones doubles de séismes intermédiaires doit être indépendant du régime de contrainte et de la température de la plaque



Comment les plaques peuvent elles s'hydrater avant la subduction?



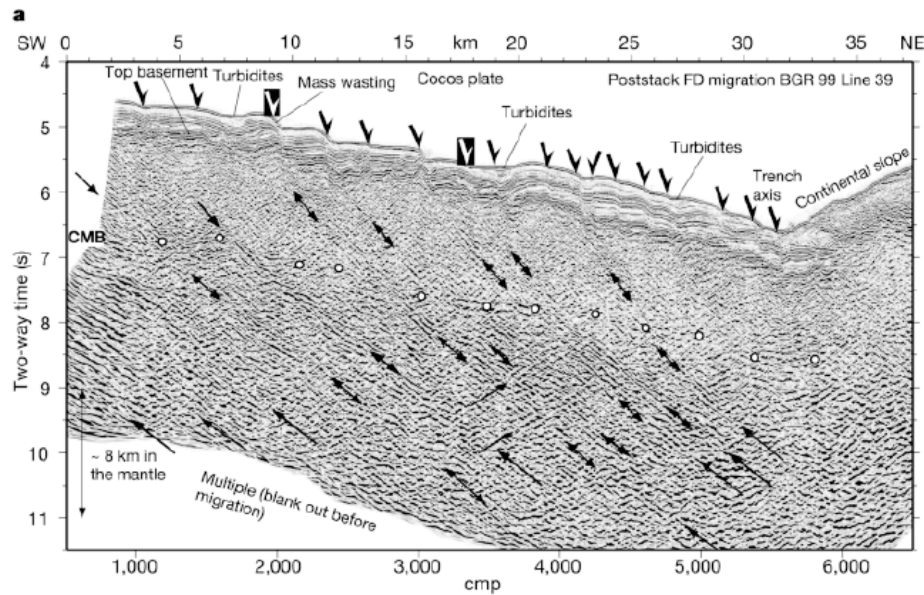
Bathymétrie et topographie le long de la fosse centre-américaine



Anomalies
magnétiques

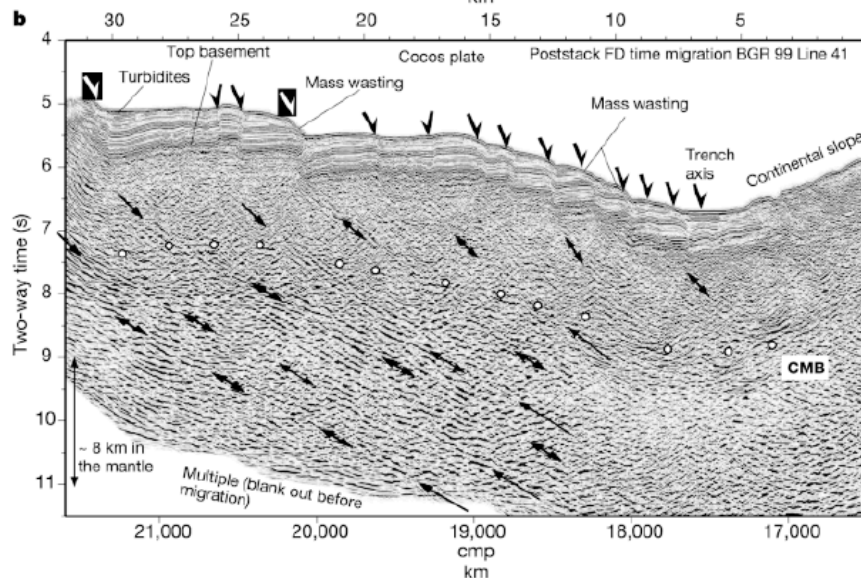
Réactivation de failles quasi parallèles à l'axe de plieure de la plaque

Coupe le long de la ligne 39



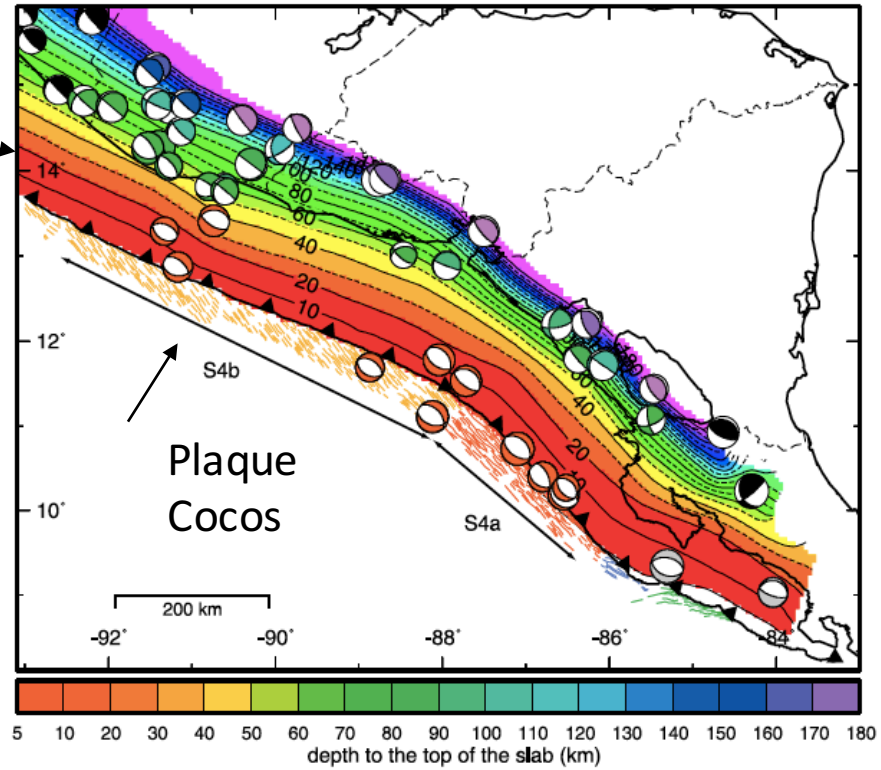
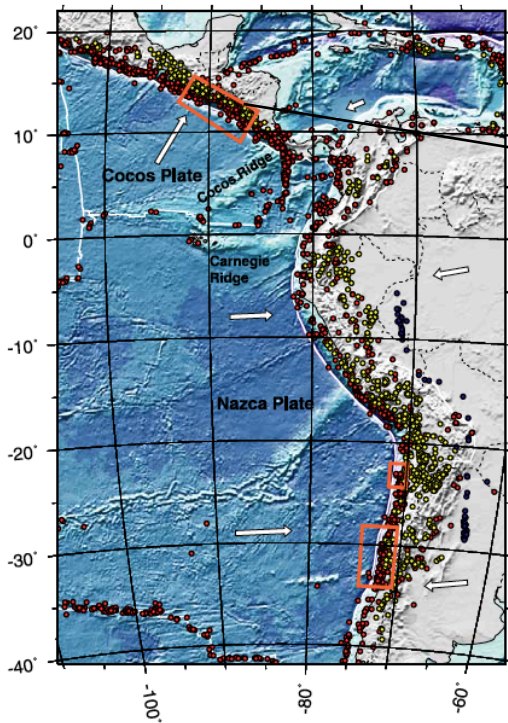
○ Limite croûte manteau

Coupe le long de la ligne 41

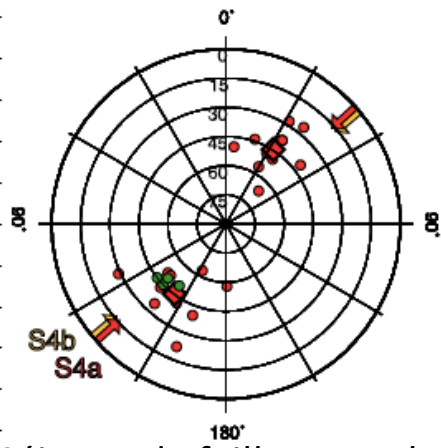


Failles normales actives accommodent la déformation de la plaque?

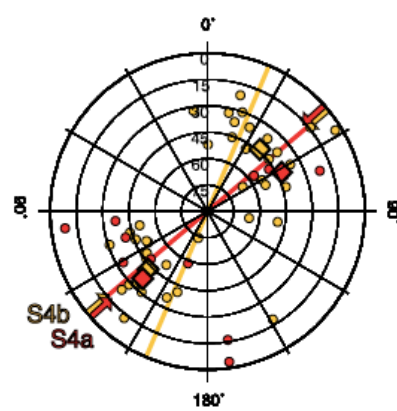
=> Percolation de l'eau dans les failles liées à la pliure de la plaque peut être le mécanisme dominant d'hydratation de celle-ci.



Orientation des plans nodaux:



Séismes de faille normale superficiels



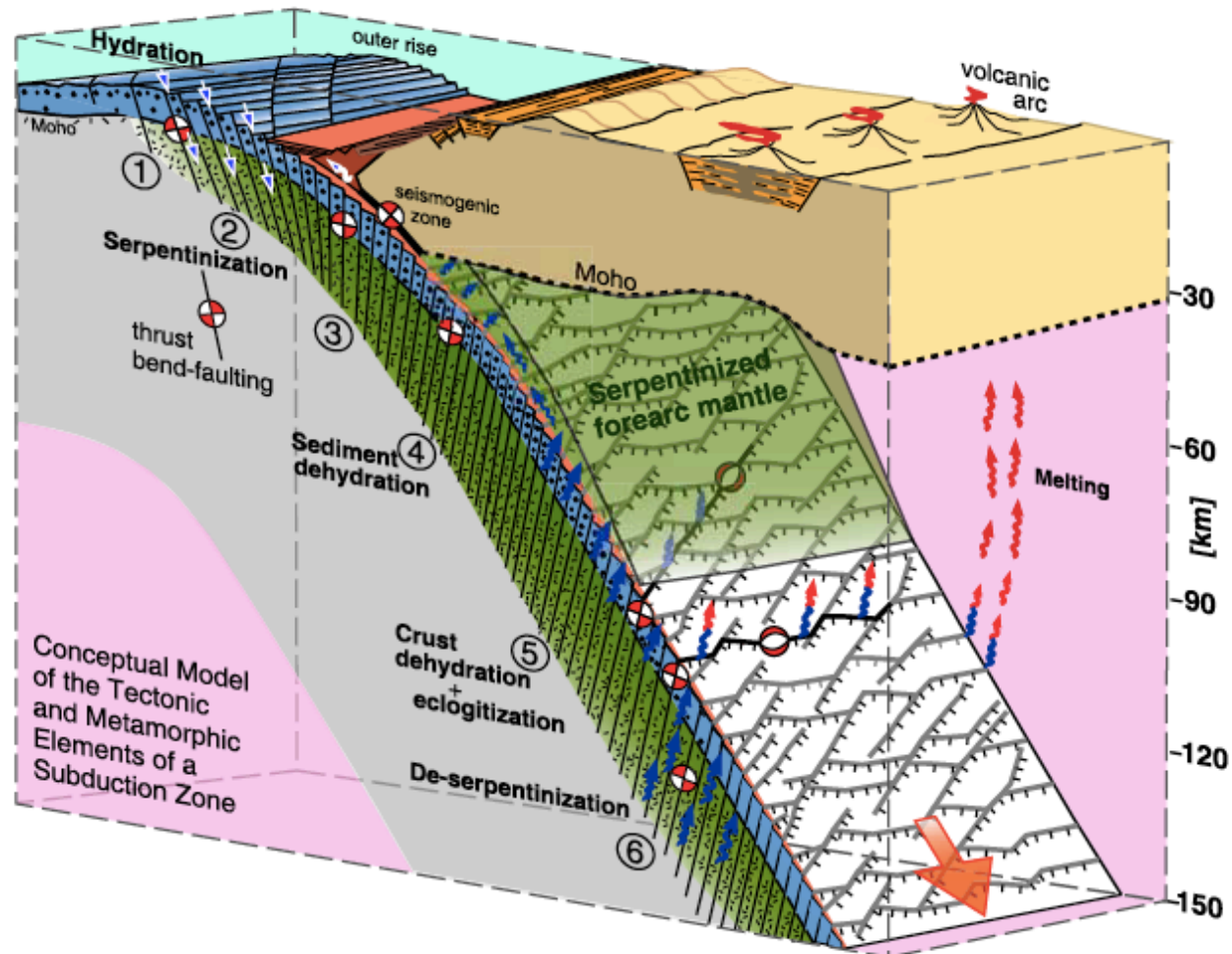
d) rotated poles
Séismes intermédiaires

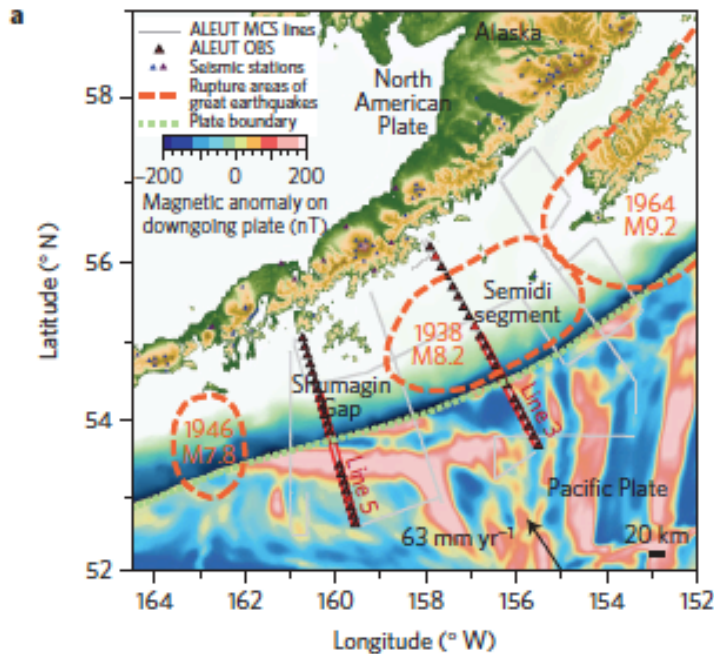
Direction normale à la fosse:

- Segment S4a
- Segment S4b

Ranero et al., 2005, G-Cubed

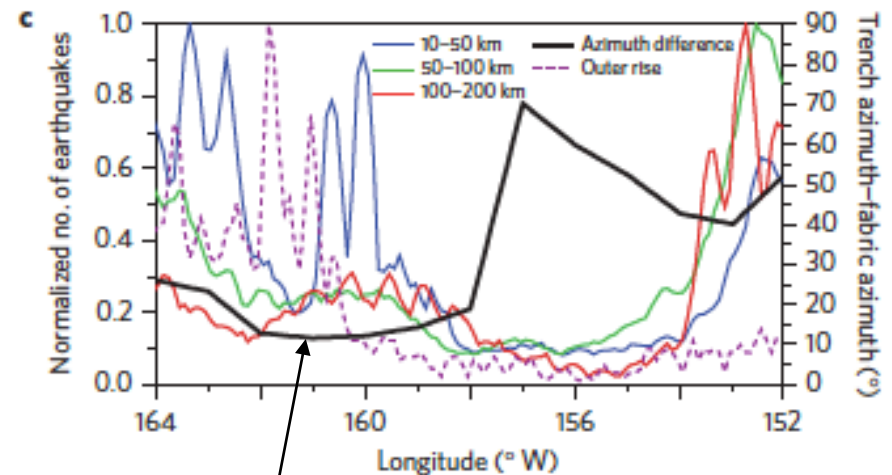
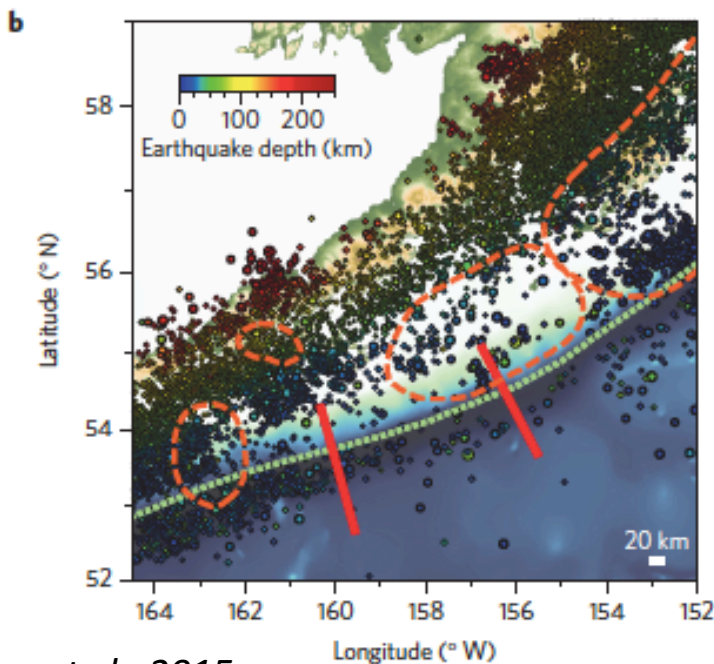
Modèle conceptuel d'une plaque en subduction





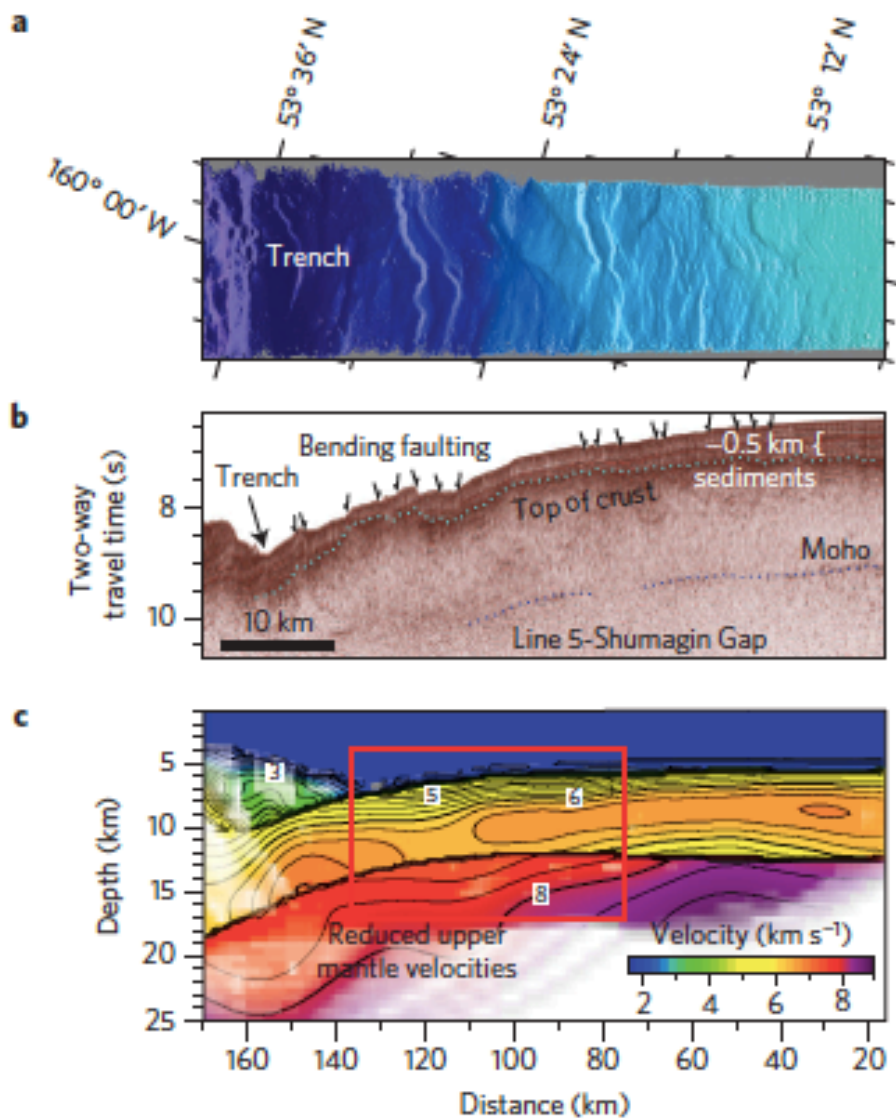
- Séismes intermédiaires plus nombreux là où la texture de la plaque en amont de la fosse est alignée avec la fosse, avec plus de sismicité et d'hydratation de la plaque.

- La fragilisation par déshydratation ne dépend pas seulement de la structure thermique de la plaque mais aussi des hétérogénéités pré-existantes

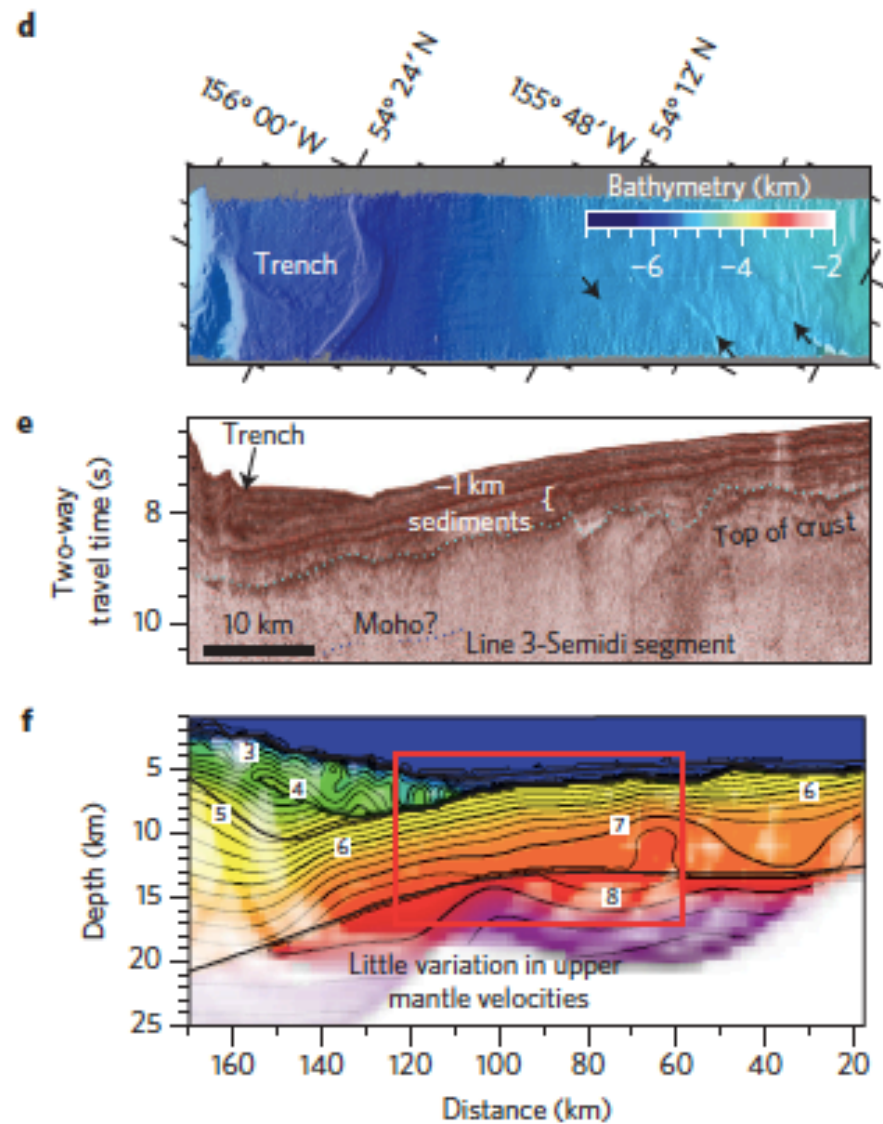


Orientation des structures préexistantes avant la subduction

Shumagin Gap (côté Ouest)



Semidi Segment (côté Est)

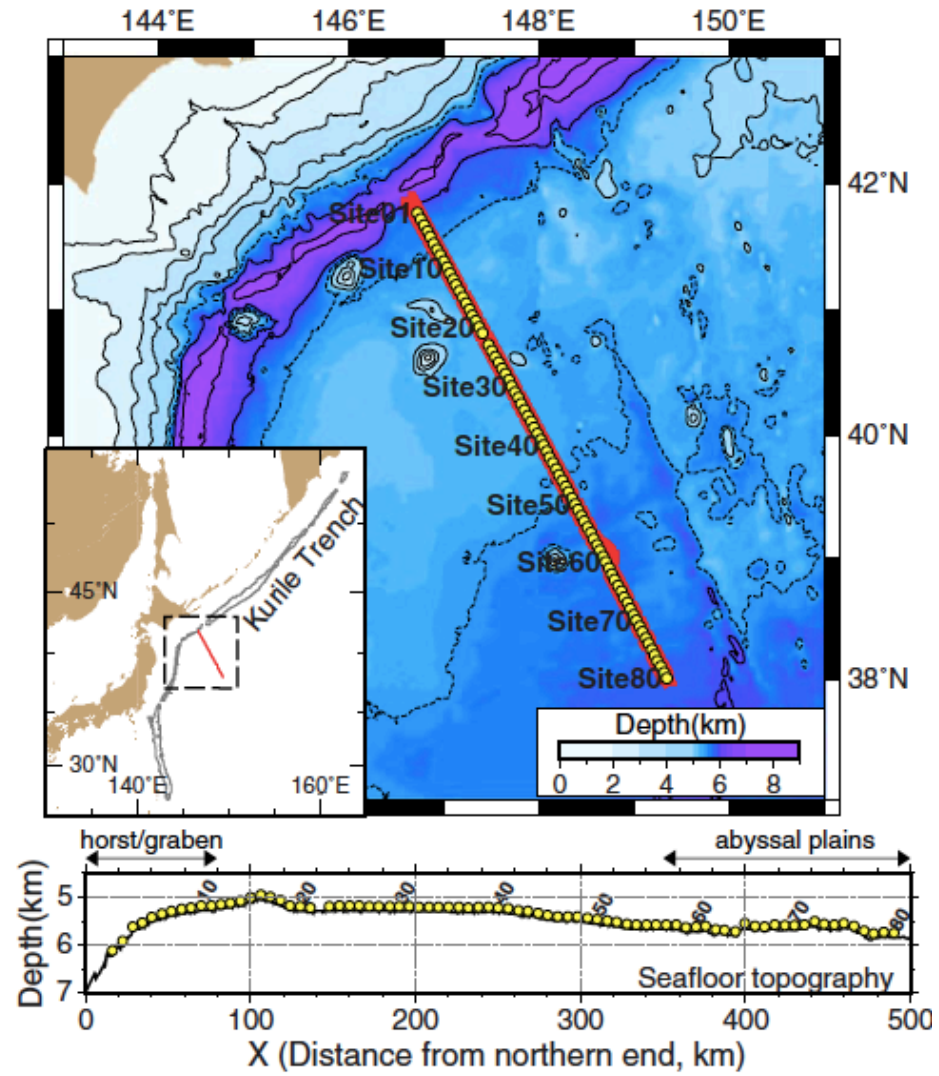


Plus d'hydratation... plus de séismes

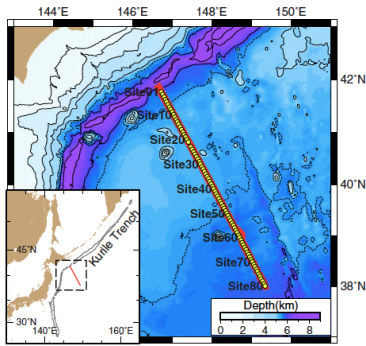
Shillington et al., 2015

Relation entre les vitesses sismiques et le coefficient de Poisson

- Coefficient de Poisson σ :
- $$\sigma = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \right]$$
- $\sigma = 0$ pour $\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{2}$
- Cas des liquides: $V_s = 0 \Rightarrow \sigma = 0.5$
- Cas des roches de la croûte: $\frac{V_p}{V_s} \sim 1.8 \Rightarrow \sigma \sim 0.28$
- Un fort σ peut indiquer une forte porosité (pour fissures aplaties) *et/ou* la présence de fluides



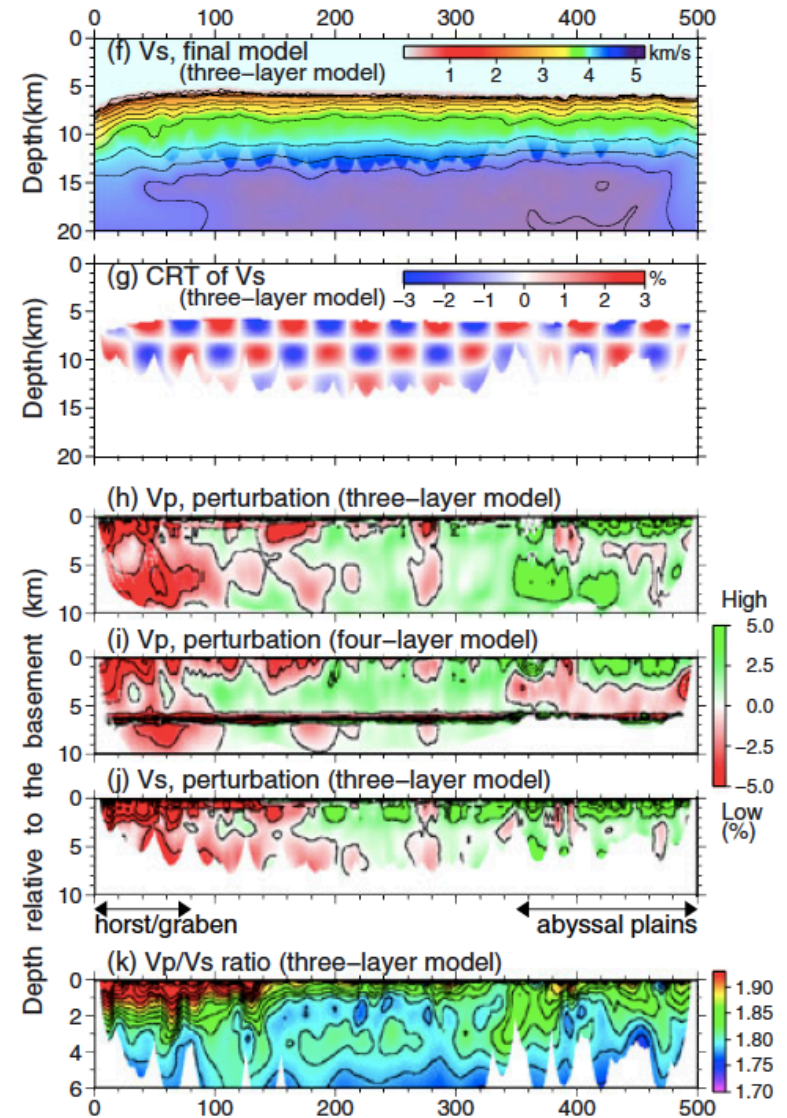
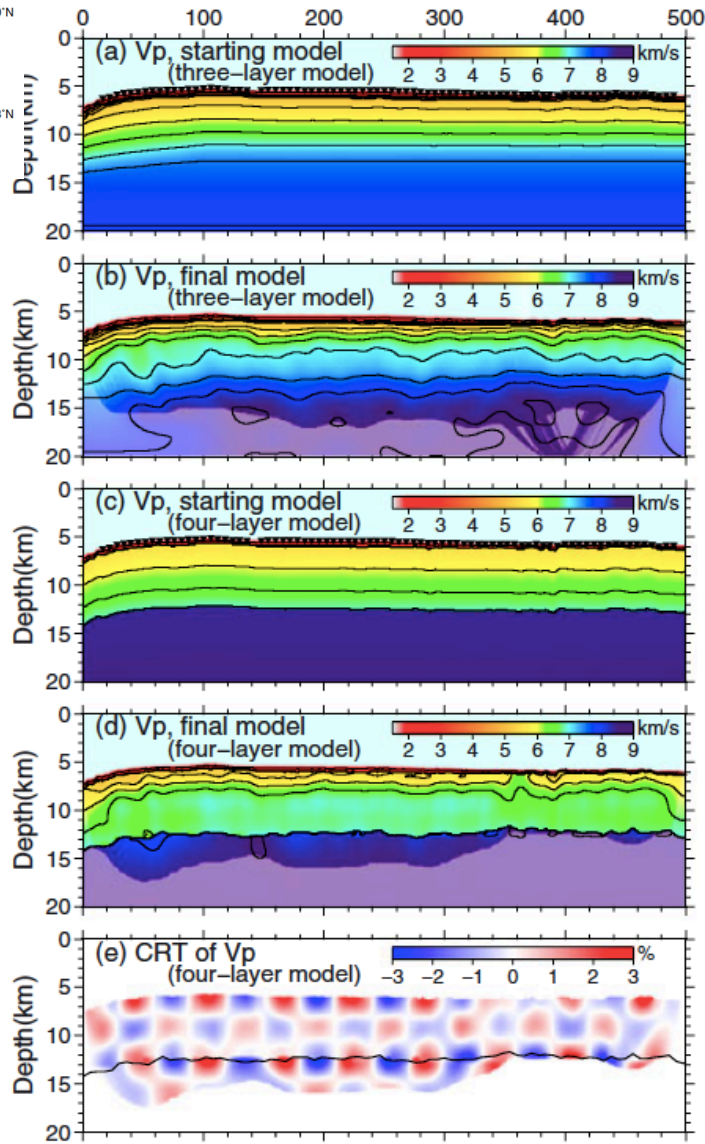
Fujie et al., 2013, GRL



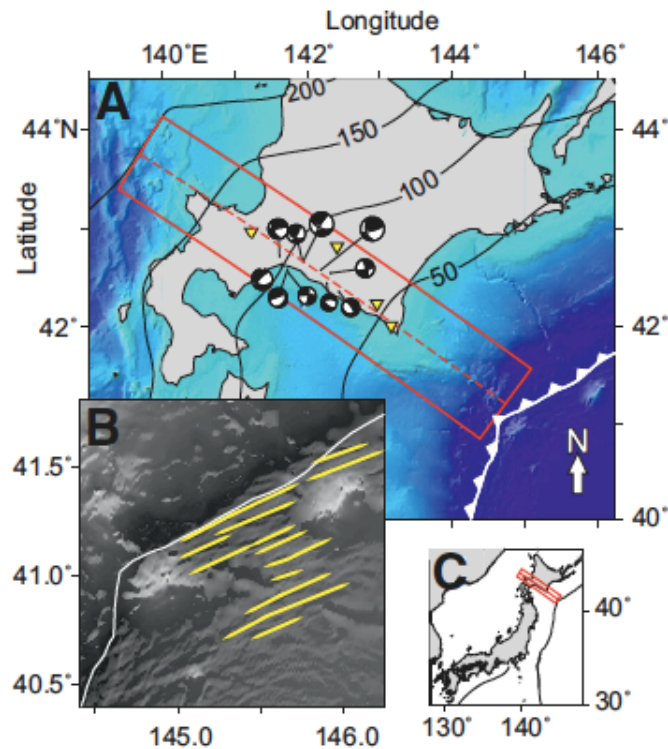
Modèles tomographiques Vp et Vs

Changements systématiques de la structure en Vp et Vs, et Vp/Vs quand on se rapproche de la fosse des Kouriles

=> Croûte et manteau supérieur de plus en plus hydratés



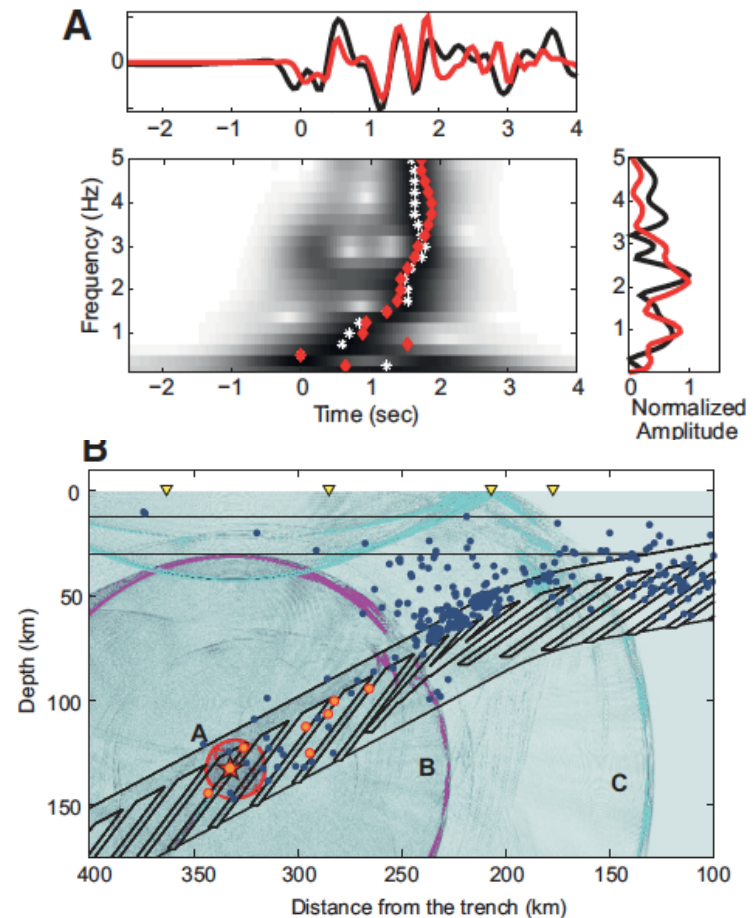
Autres études sismologiques: évidence d'hydratation du manteau de la plaque plongeante

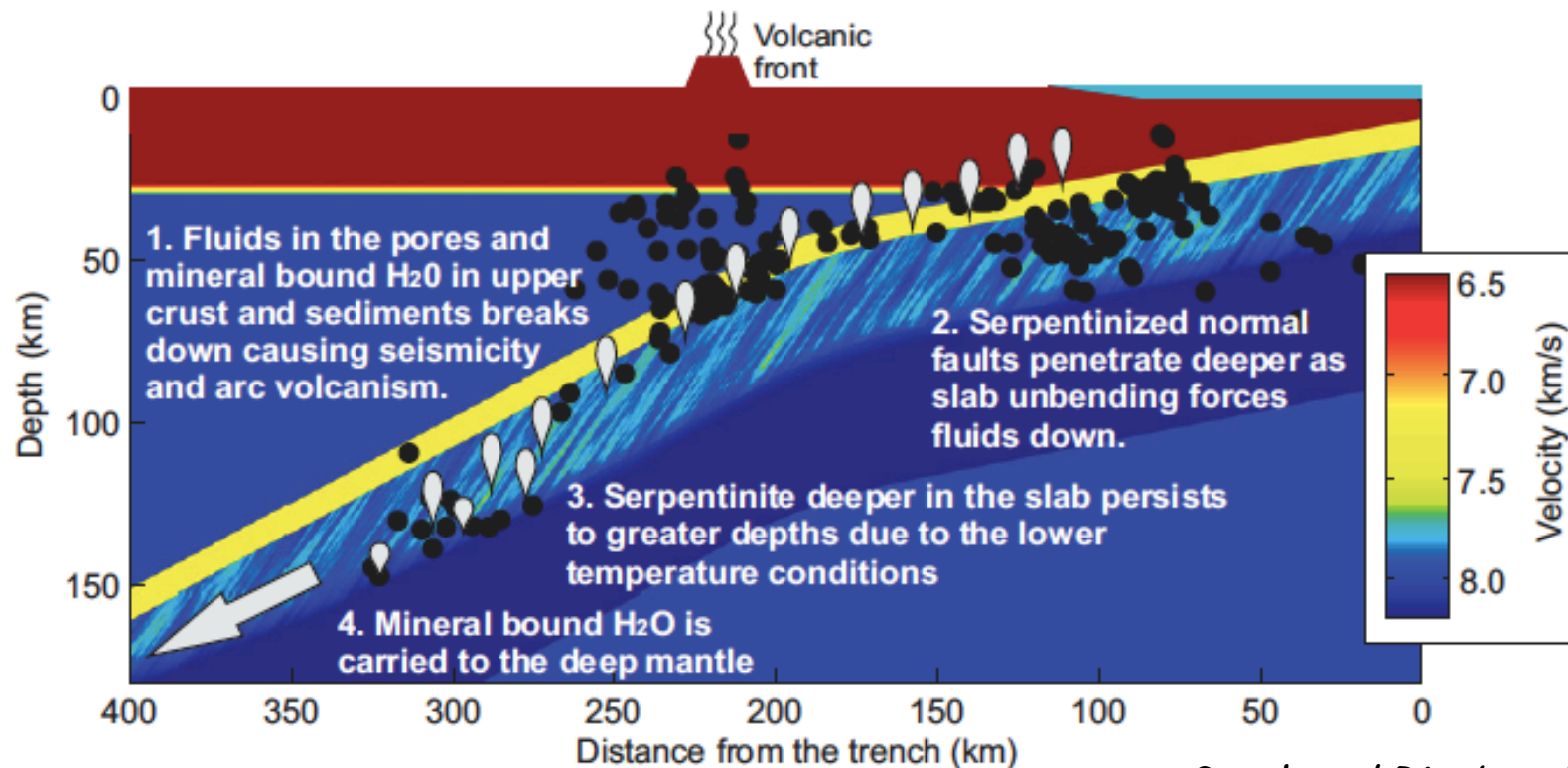


Vitesse moyenne dans la zone perturbée: $V_p \sim 7.8 \pm 0.2$ km/s

Garth and Rietbrock, 2014

Dispersion des ondes P provenant de séismes intermédiaires





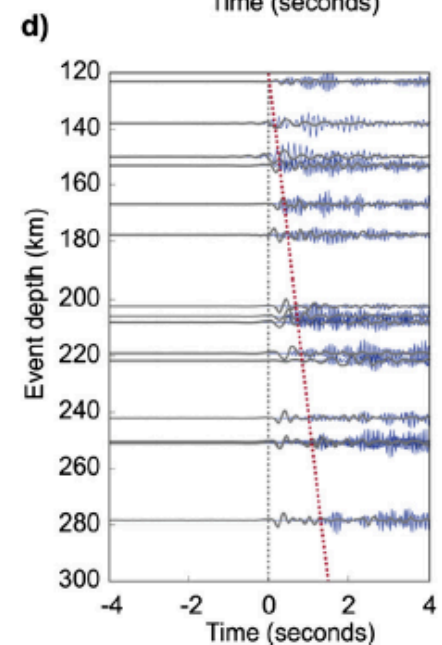
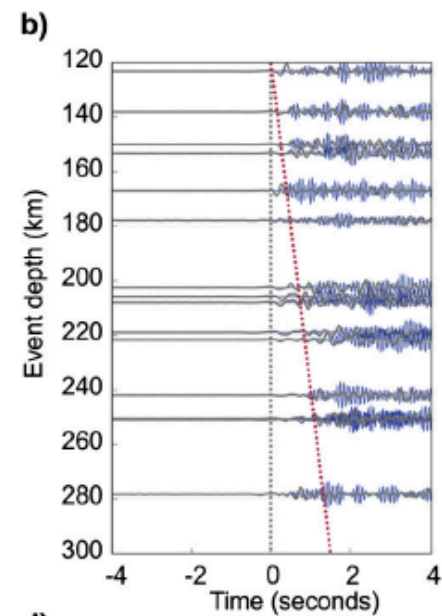
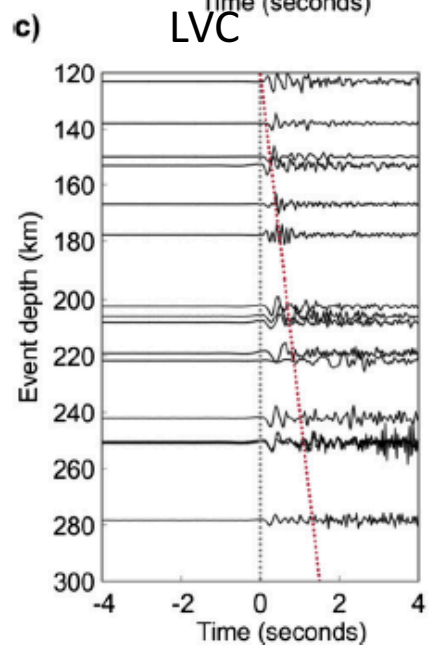
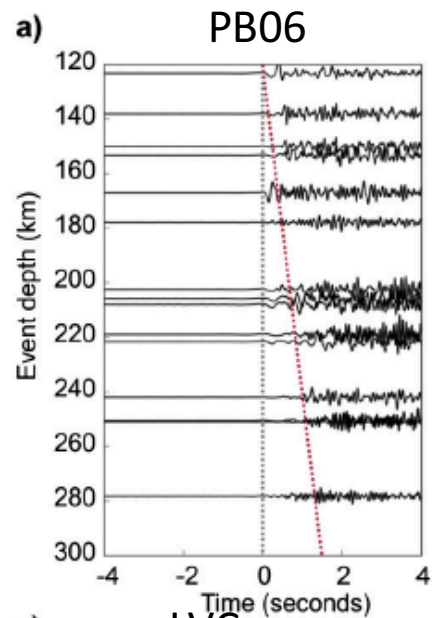
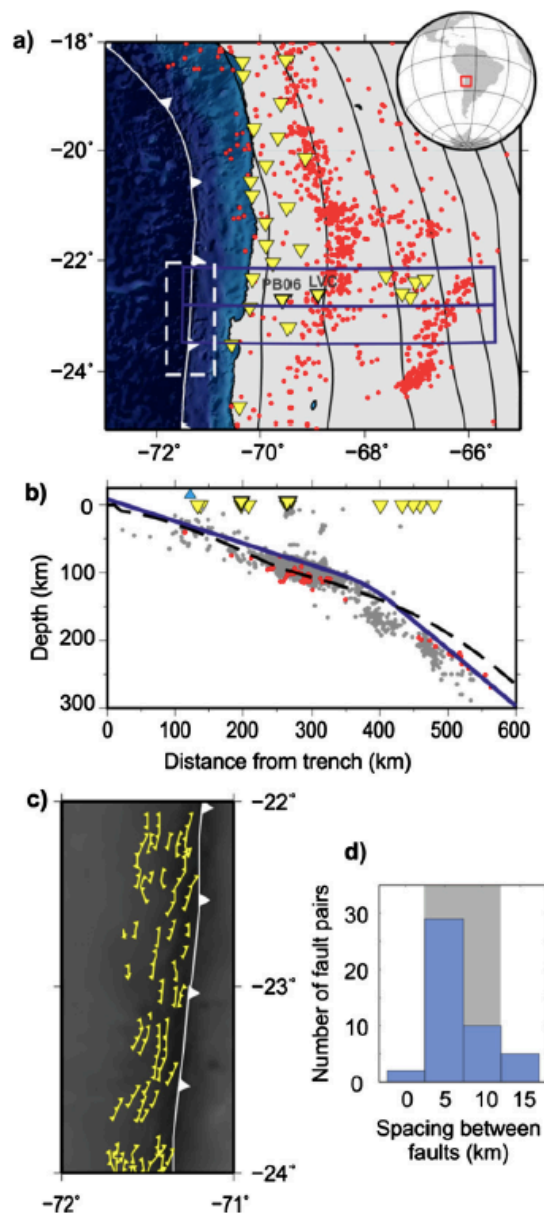
Garth and Rietbrock, 2014

Modèle proposé: présence de zones de failles de 2-3 km de largeur, avec $V_p \sim 7.0-7.2 \text{ km/s}$, soit 12-15% plus lent que le matériau environnant, pendage de 25° par rapport à la surface de la plaque (c.f. failles réactives)
 -> evidence de serpentinisation à 17-31% -> 2.0-3.5 wt% H₂O

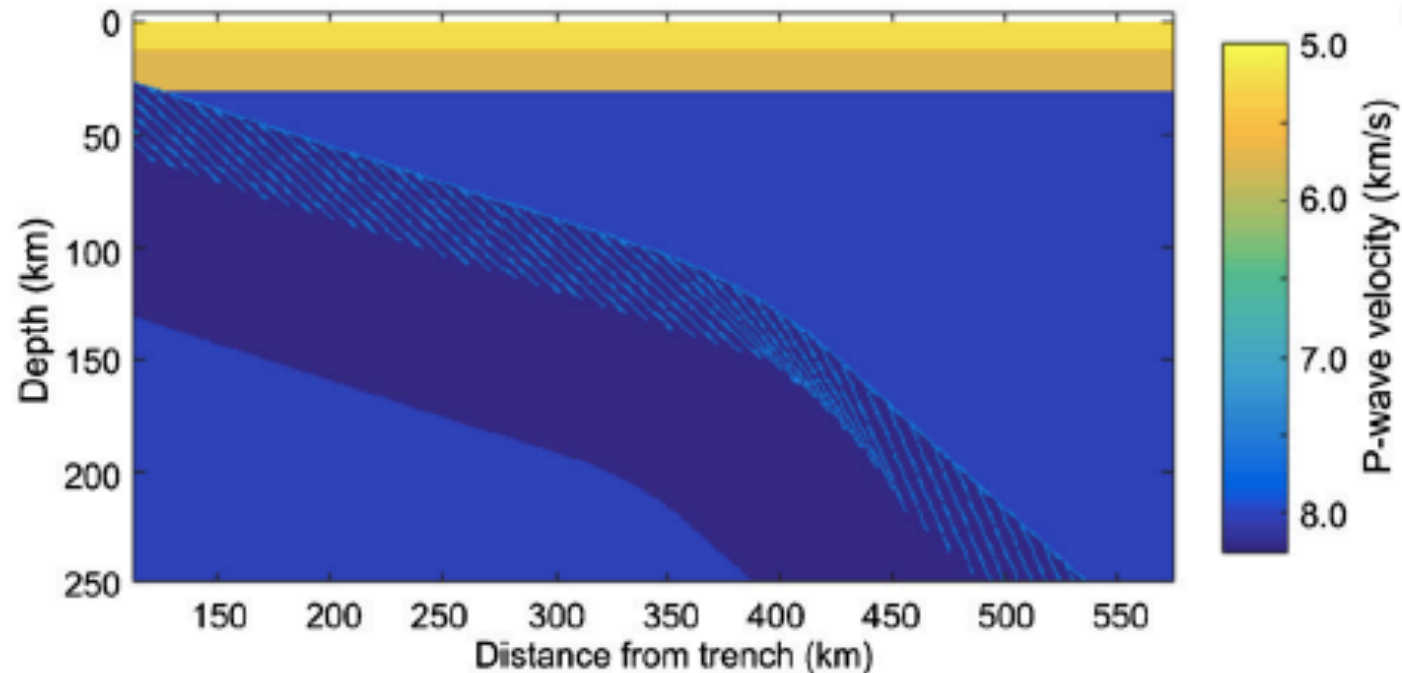
-> 170-320 Tg/Ma d'eau par m d'arc

-> extrapolation globale: 3.5 océans d'eau reincorporés dans le manteau par subduction intégré sur l'âge de la terre

Nord du Chili

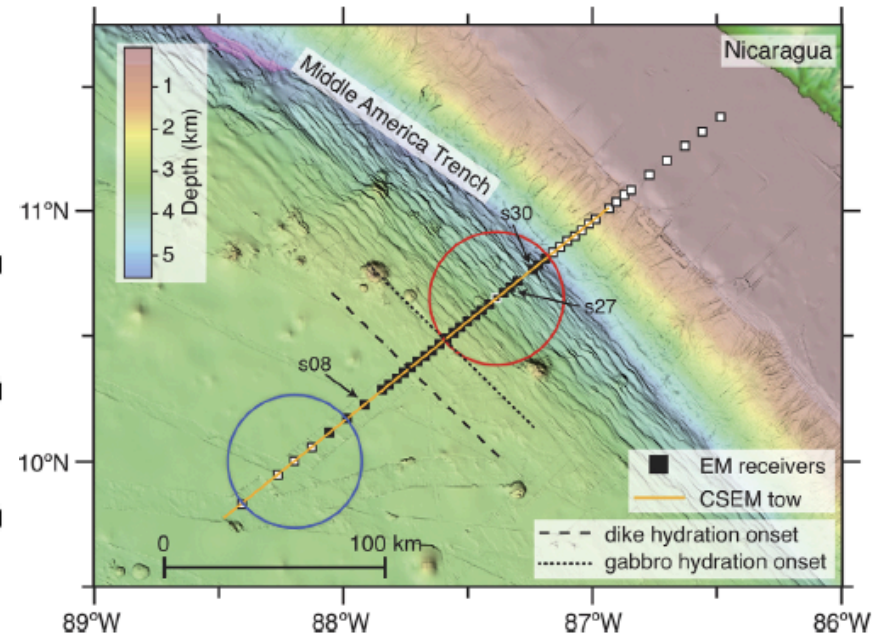
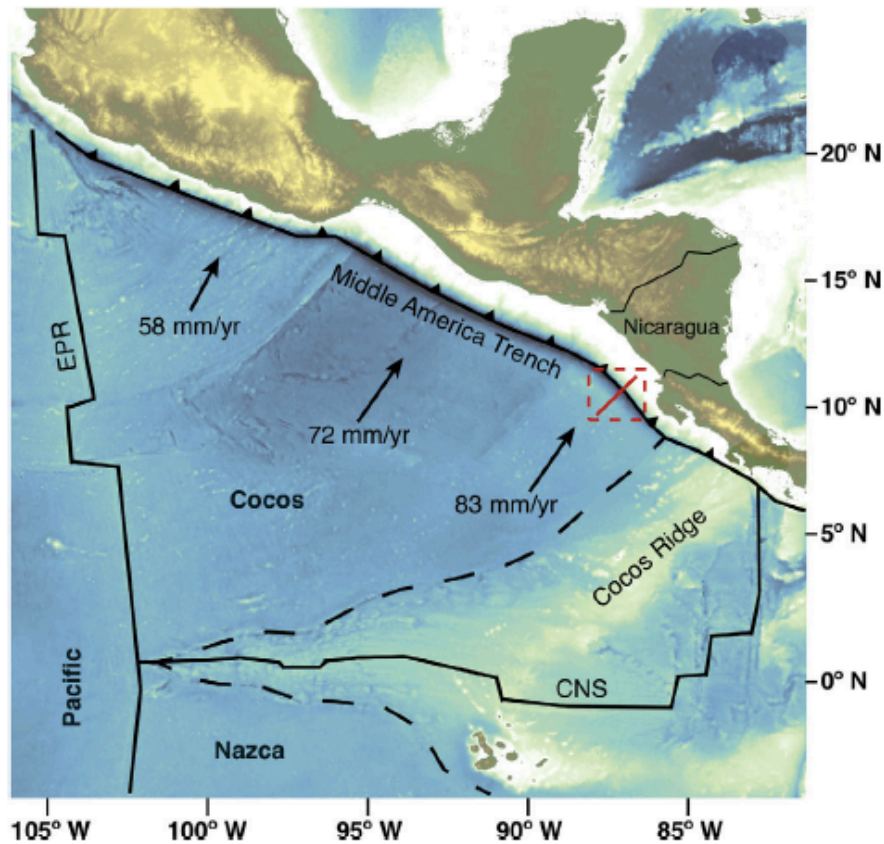


Modèle sismique Vp proposé



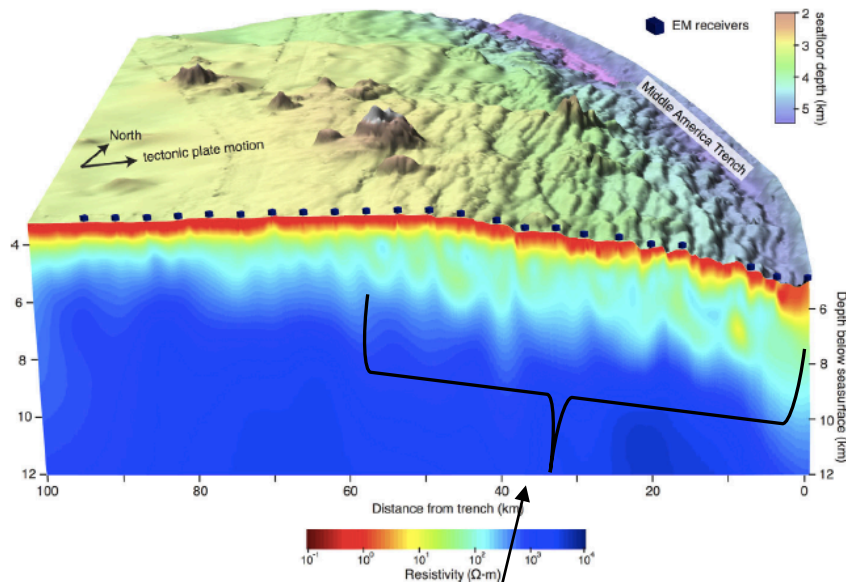
- > Hydratation introduite à la fosse persiste jusqu'à 220 km de profondeur
- > Zone faillée plus étroite qu'au Japon, et serpentinization moins importante (4-15%):
 - > 13-42Tg/Ma/metre d'arc d'eau transportée par la partie mantellique de la plaque
 - > plaques plus jeunes (44Ma) transportent moins d'eau dans le manteau que les vieilles plaques (120Ma)

Campagne de mesures électromagnétiques sur la plaque Cocos (Amérique Centrale)



- Vitesses sismiques dans la croûte: ambiguïté entre les effets de porosité et ceux dûs à la présence de roches hydratées
- Les mesures de résistivité électromagnétique apportent des informations complémentaires
- Mesures de 2 composantes horizontales orthogonales du champ électrique et du champ magnétique

Structure électrique de la plaque Cocos



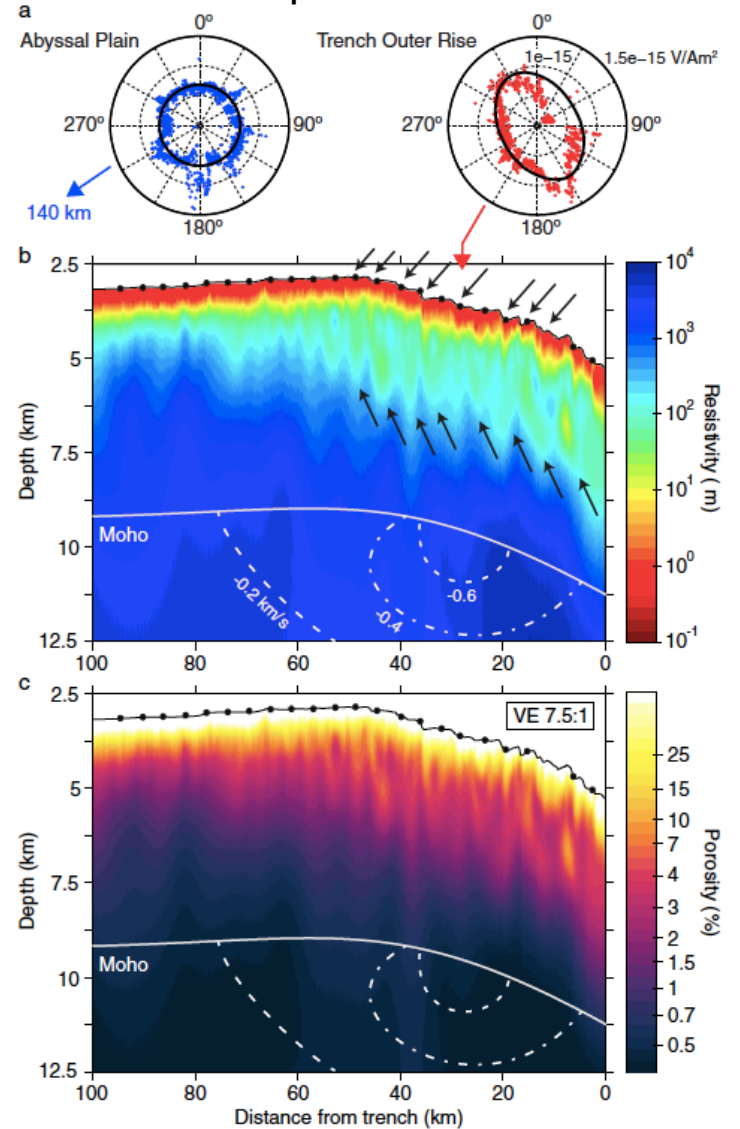
Résistivité électrique

Bandes subverticales de conductivité importante:
 -> migration d'eau de mer le long de failles

-> Augmentation du contenu en eau de 60% dans la croûte dans la région de la fosse
 -> Mais pas d'augmentation de porosité dans le manteau

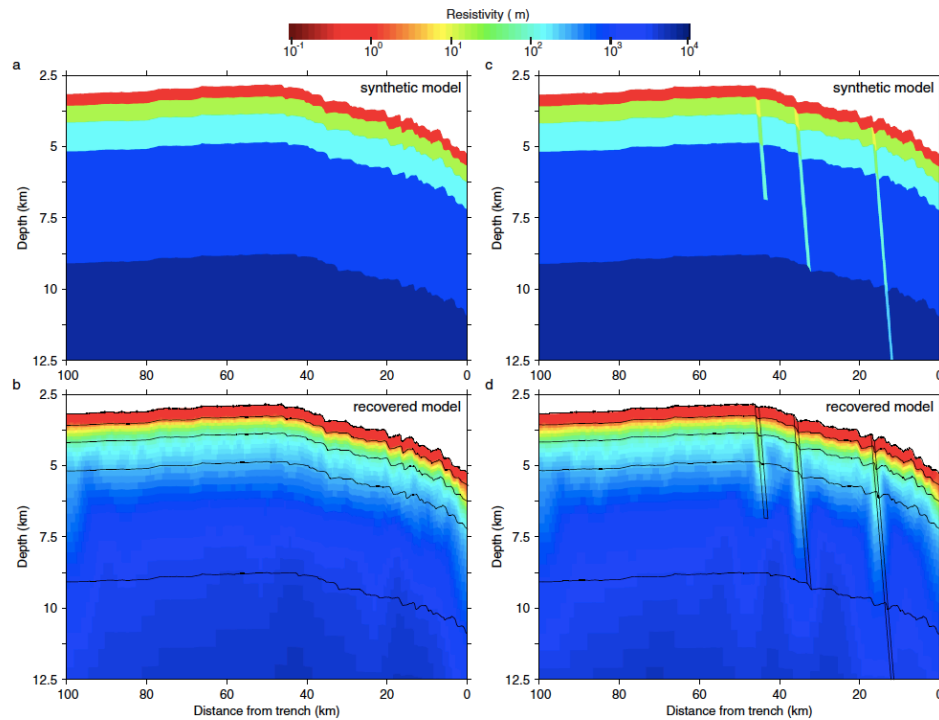
Porosité

Anisotropie de la résistivité

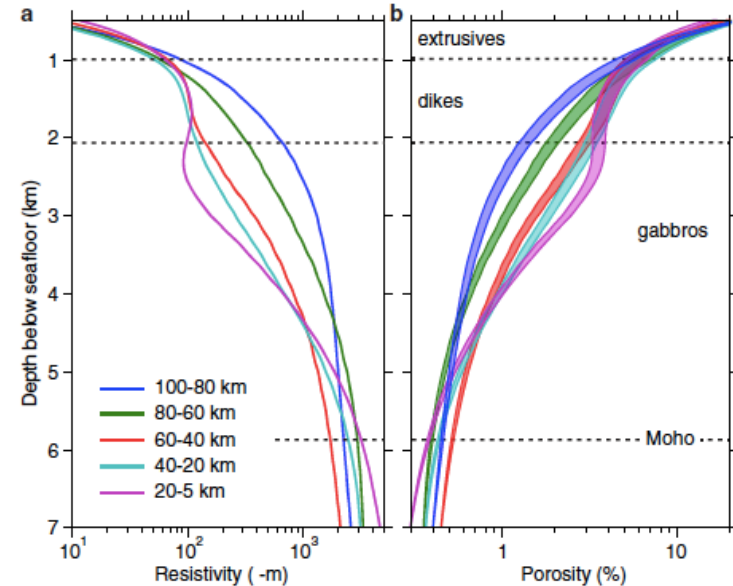


Naif et al., *G-Cubed* (2015)

Tests synthétiques montrant la résolution de la méthode



Resistivité et porosité au voisinage de la fosse



- *Croûte*: Quantité d'eau transportée par la croûte plus importante que les estimations antérieures,
- *Manteau*: Serpentinisation possible, mais alors pas de formation de veines de magnétite, et porosité faible:
 - => Flux de fluides transporté dans le manteau est sans doute faible