

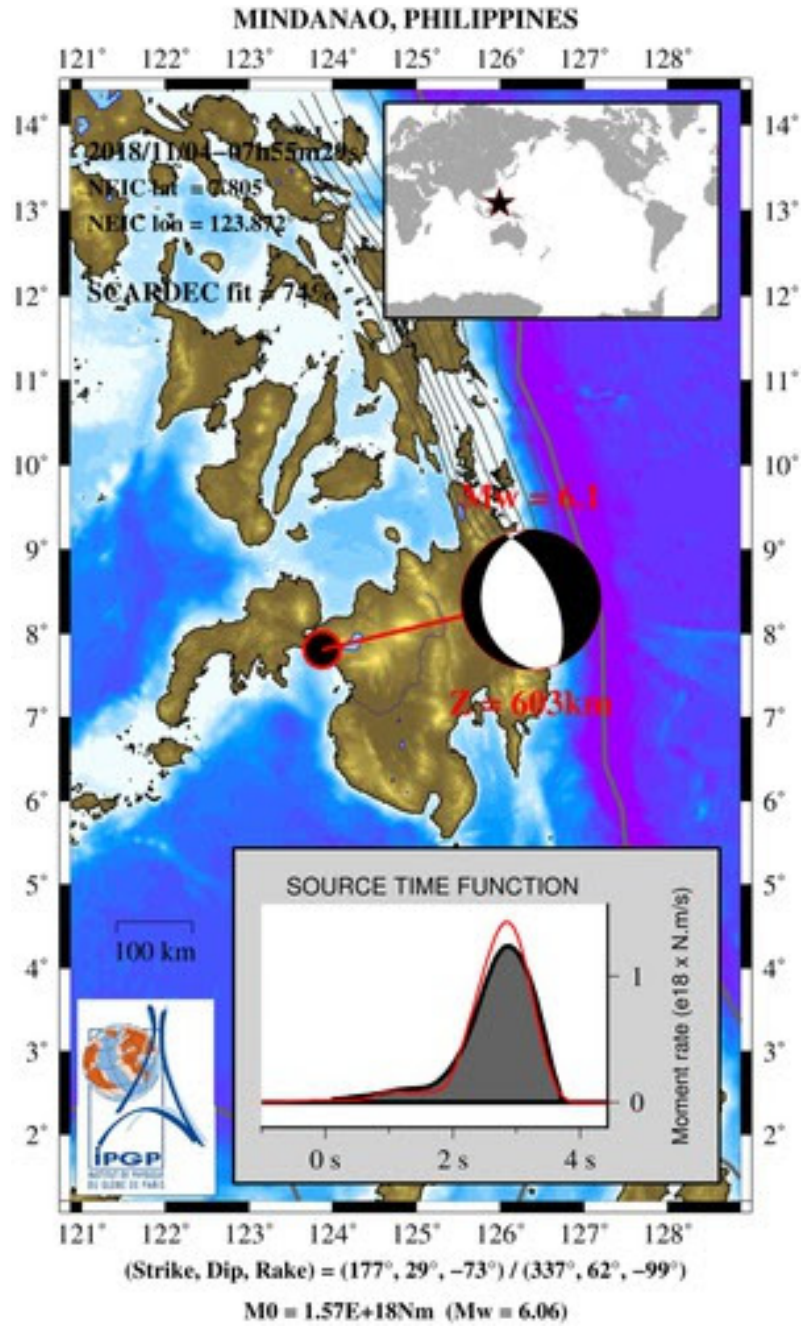
# Séismes intermédiaires et profonds

## 4- Expériences de laboratoire

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

12 Novembre 2018

04 Novembre 2018  
Mw 6.1  
Profondeur 603 km



*Solution Scardec/Geoscope,  
Vallée et al., 2015*

## Fragilisation par déshydratation dans le manteau de la plaque en subduction

- Combien d'eau y a-t-il sous la croûte et comment les roches du manteau ont-elles été hydratées?
- La réduction de vitesse sismique dans les zones où ont lieu les séismes intermédiaires est-elle nécessairement un indice de roches fortement hydratées?
- Quel est le mécanisme précis en jeu dans la fragilisation par déshydratation et combien faut-il d'eau pour la rendre possible?
- La déshydratation des roches mantelliques est-elle nécessaire pour expliquer les séismes intermédiaires (e.g. Kelemen and Hirth, 2007)?
- Qu'en est-il des séismes profonds?

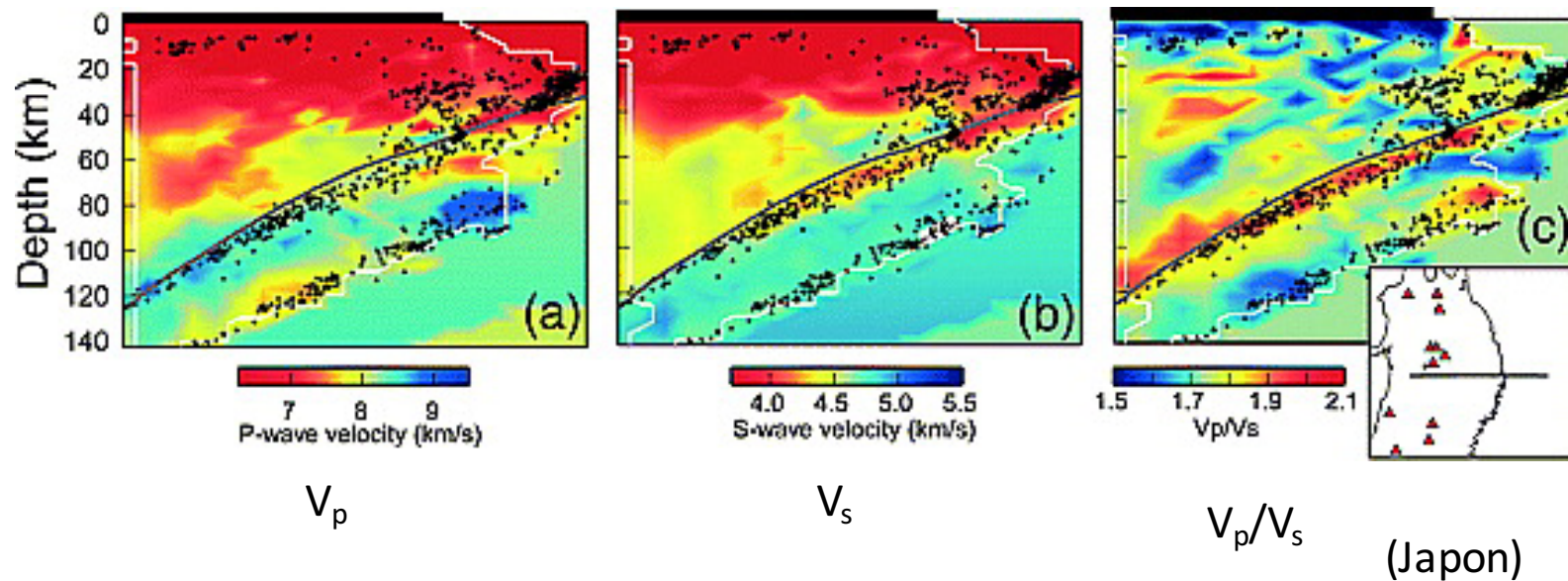
## Fragilisation par déshydratation dans le manteau de la plaque en subduction

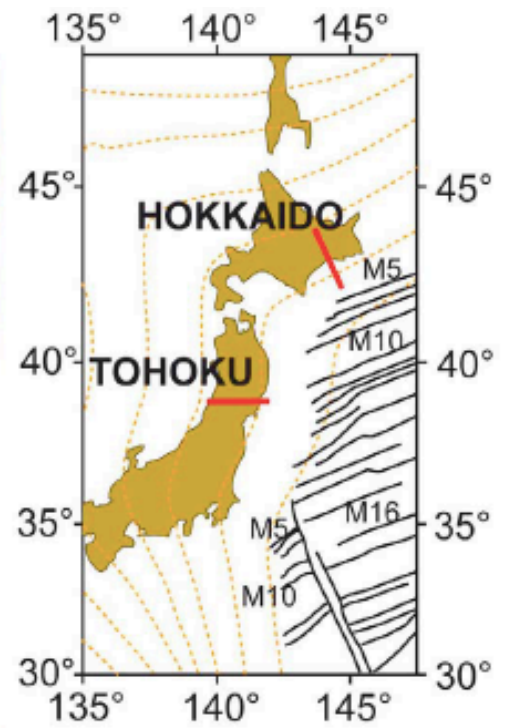
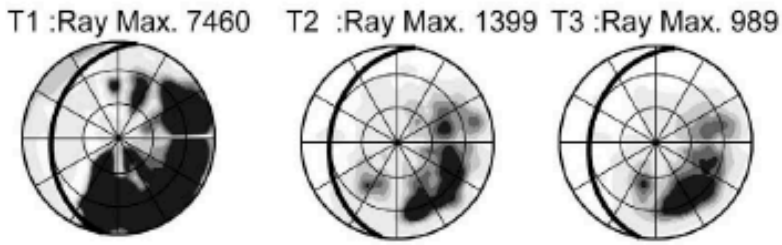
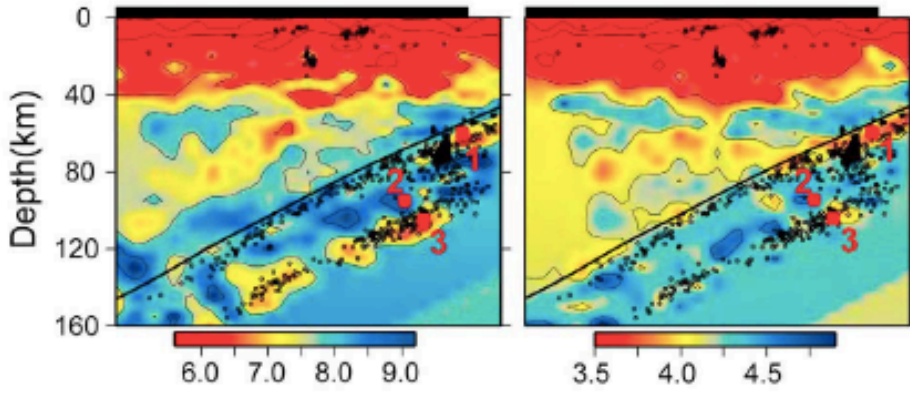
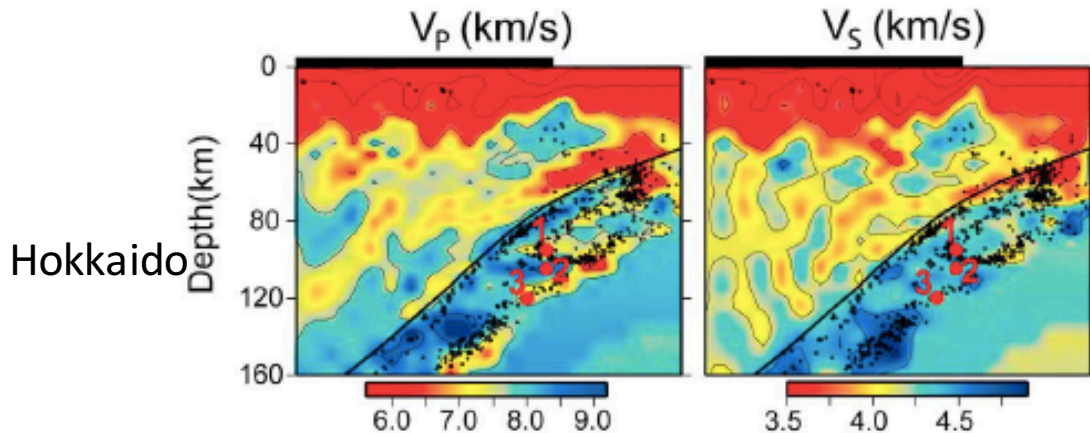
- Combien d'eau y a-t-il sous la croûte et comment les roches du manteau ont-elles été hydratées?
- La réduction de vitesse sismique dans les zones où ont lieu les séismes intermédiaires est-elle nécessairement un indice de roches fortement hydratées?
- Quel est le mécanisme précis en jeu dans la fragilisation par déshydratation et combien faut-il d'eau pour la rendre possible?
- La déshydratation des roches mantelliques est-elle nécessaire pour expliquer les séismes intermédiaires (e.g. Kelemen and Hirth, 2007)?
- Qu'en est-il des séismes profonds?

Tomographie sismique:

Zone à faible vitesse coïncide avec la zone supérieure des zones de sismicité doubles:

Hydratation de la croûte dans la plaque plongeante



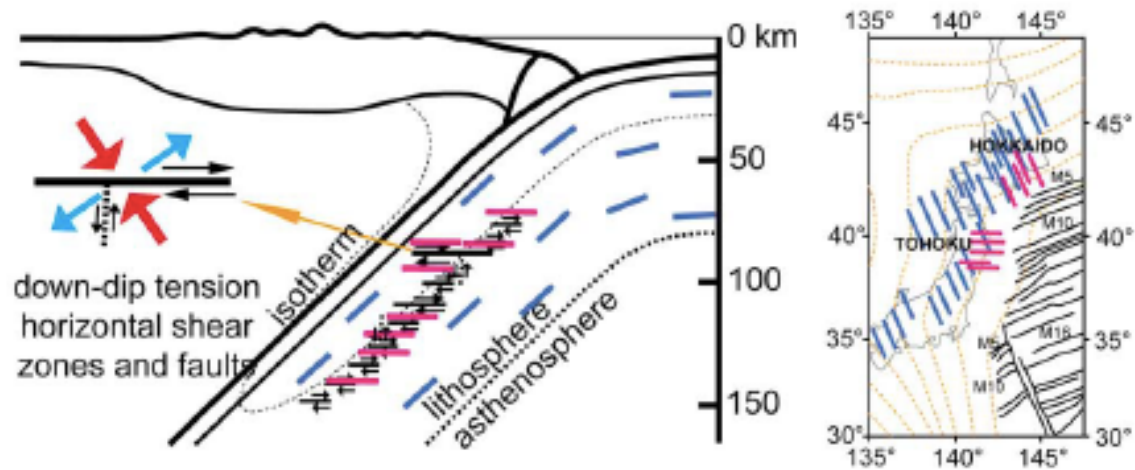


-> Réduction en  $V_p$  plus forte qu'en  $V_s$  dans la zone de sismicité inférieure

-> vitesses rapides entre la croûte et la zone de sismicité inférieure

-> trajets de rais dans une direction particulière

-> peut s'expliquer par l'anisotropie plutôt que la serpentinitisation



- Axe rapide pour les ondes P dans la direction du cisaillement:  
 perpendiculaire à la fosse dans la zone de  
 sismicité intermédiaire inférieure
  
- Anisotropie régionale faible acquise pendant le refroidissement de la plaque depuis  
 sa formation à la dorsale

→ La lithosphère de la plaque ne transporte pas d'eau en quantités importantes

→ Zones de cisaillement favorisent des instabilités sans besoin de présence d'eau dans la partie mantellique de la plaque

-> Une autre source de déformation que la déformation dans la fosse serait nécessaire pour expliquer la présence de l'anisotropie proposée

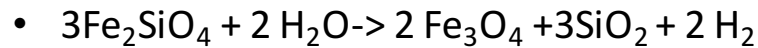
## Fragilisation par déshydratation dans le manteau de la plaque en subduction

- Combien d'eau y a-t-il sous la croûte et comment les roches du manteau ont-elles été hydratées?
- La réduction de vitesse sismique dans les zones où ont lieu les séismes intermédiaires est-elle nécessairement un indice de roches fortement hydratées?
- Quel est le mécanisme précis en jeu dans la fragilisation par déshydratation et combien faut-il d'eau pour la rendre possible?
- La déshydratation des roches mantelliques est-elle nécessaire pour expliquer les séismes intermédiaires (e.g. Kelemen and Hirth, 2007)?
- Qu'en est-il des séismes profonds?

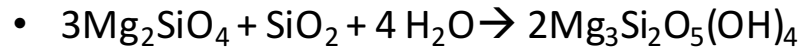


# Déshydratation de la serpentine

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



Serpentine



Serpentine      Brucite

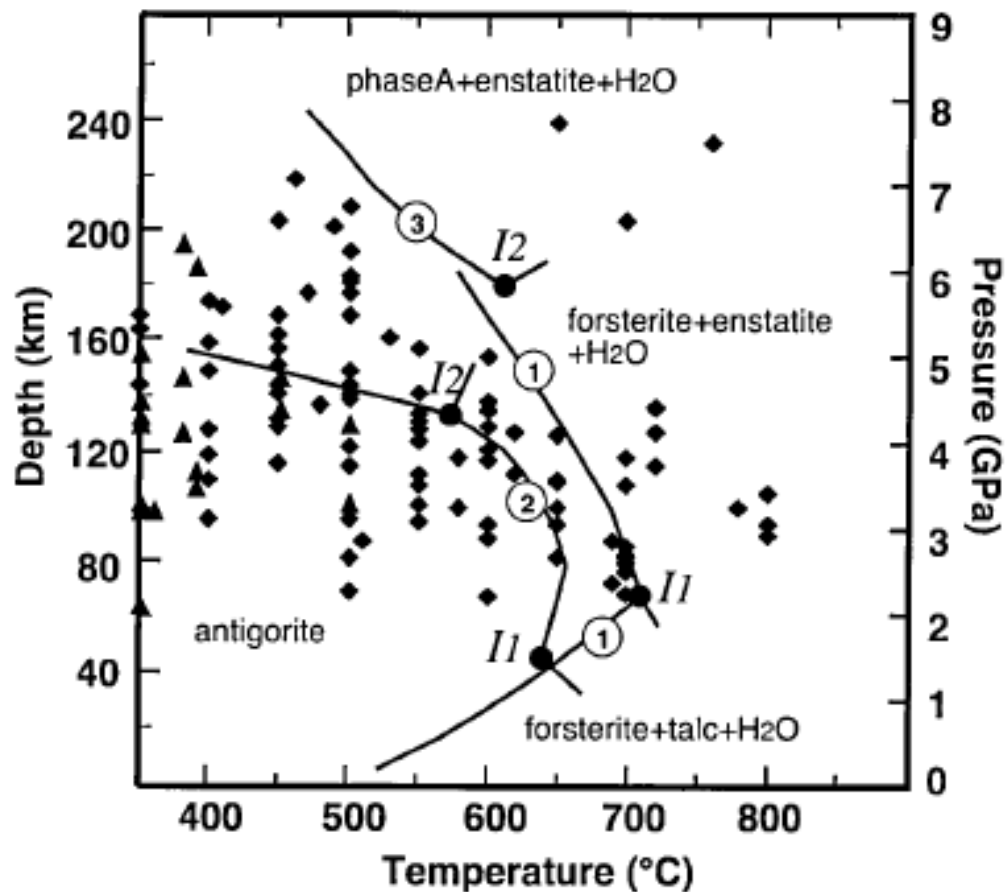


- Polymorphes de la serpentine:
  - Antigorite (stable à haute température  $T > 350^\circ\text{C}$ )
  - Lizardite (plus couramment rencontrée)



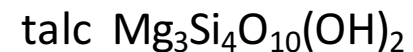
- Raleigh et Paterson (1965) étudient le comportement mécanique de la serpentinite (roche) dans le contexte de la genèse des massifs montagneux.

# Diagramme de phase : décomposition de l'antigorite



◆ Séismes intermédiaires

(Calculs sans Fe: manque de données expérimentales)

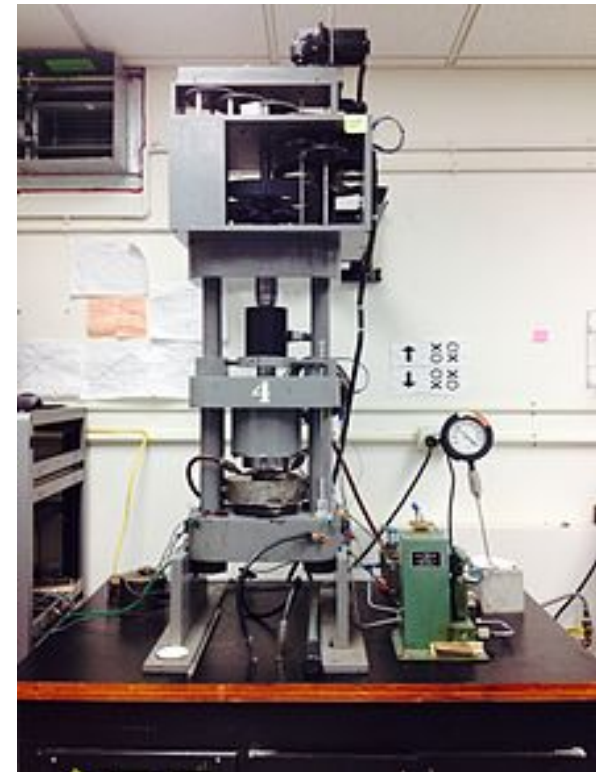


*Omori et al., 2002 (références à travaux plus anciens: (1) Ulmer and Trommsdorff (1995); (2) Wunder and Schreyer (1997); (3) Bose and Navrotsky (1998))*

-appareil de Griggs

Raleigh et M. Paterson (1965) étudient le comportement mécanique de la serpentine aux conditions P et T des zones de subduction (croûte)

- < 700°C
- < 5 kbar (0.5 GPa)
  
- Dans le contexte de la déformation des chaînes de montagne:
- - La serpentinite est elle ductile ou cassante?

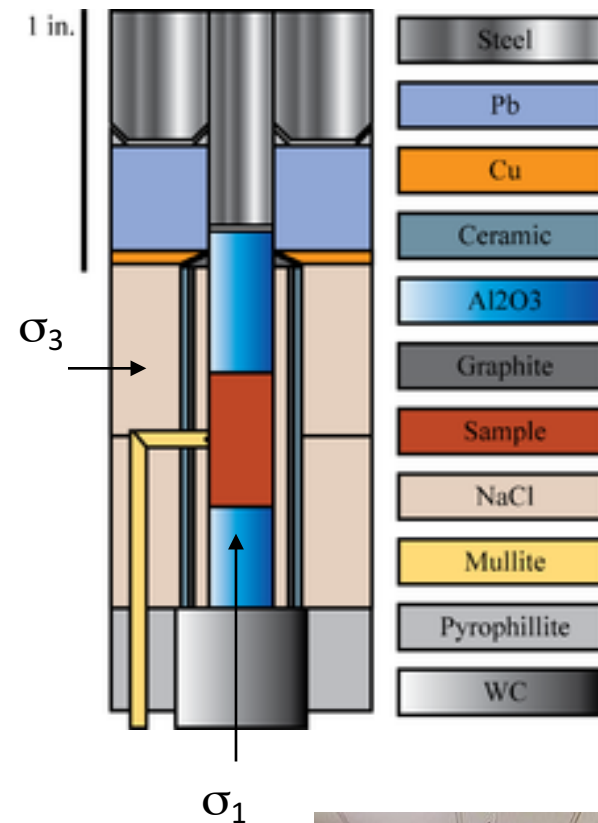


*Univ. of Nevada, Reno*

C. Raleigh et M. Paterson (1965)  
étudient le comportement mécanique  
de la serpentine aux conditions P et T  
des zones de subduction (croûte)

- < 700°C
- < 5 kbar (0.5 GPa)
- Dans le contexte de la déformation  
des chaînes de montagne:
- La serpentinite est elle  
ductile ou cassante?

appareil de Griggs



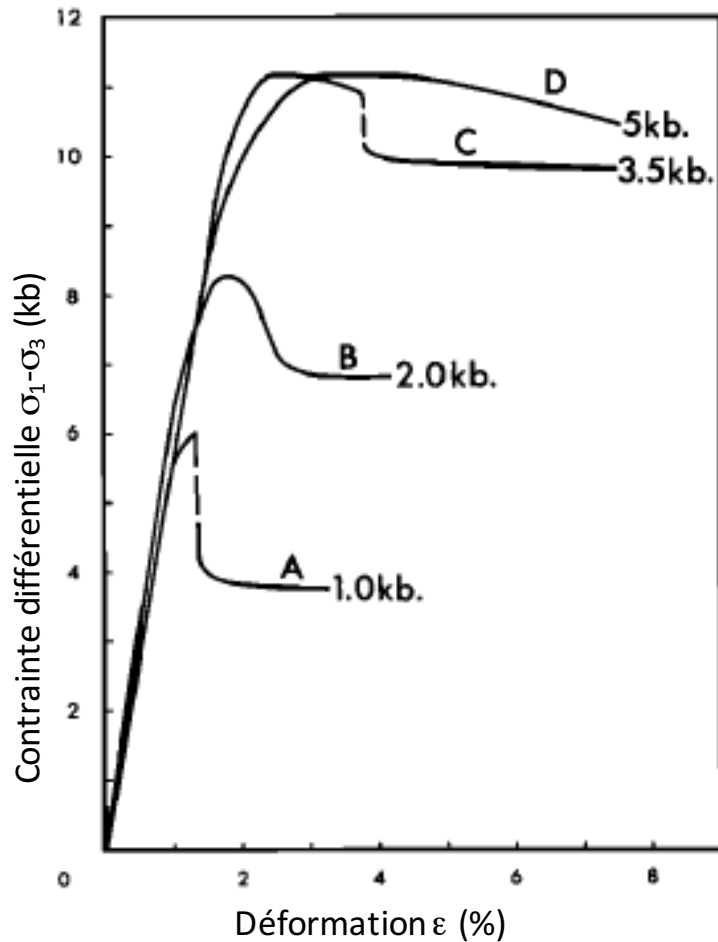
Actuellement:  
< 3GPa, ~1300°C



Univ. of Nevada, Reno

Comportement cassant de la serpentinite à pression et température ambiante

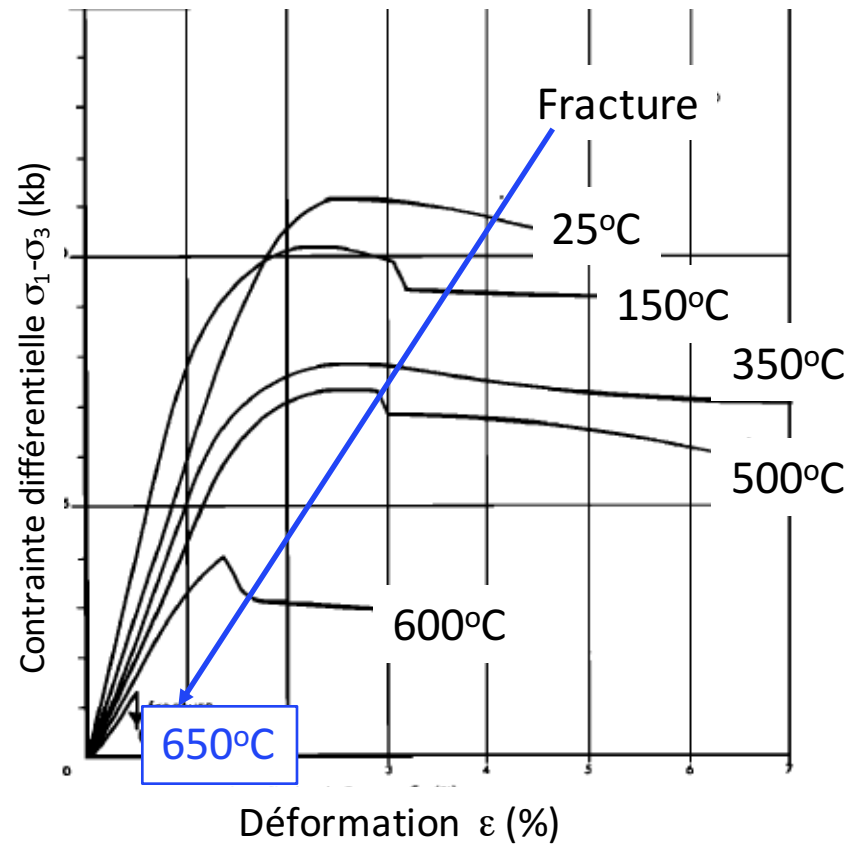
A température T ambiante



Serpentinite de Cabramurra (Australie)

Le comportement change à haute température et haute pression

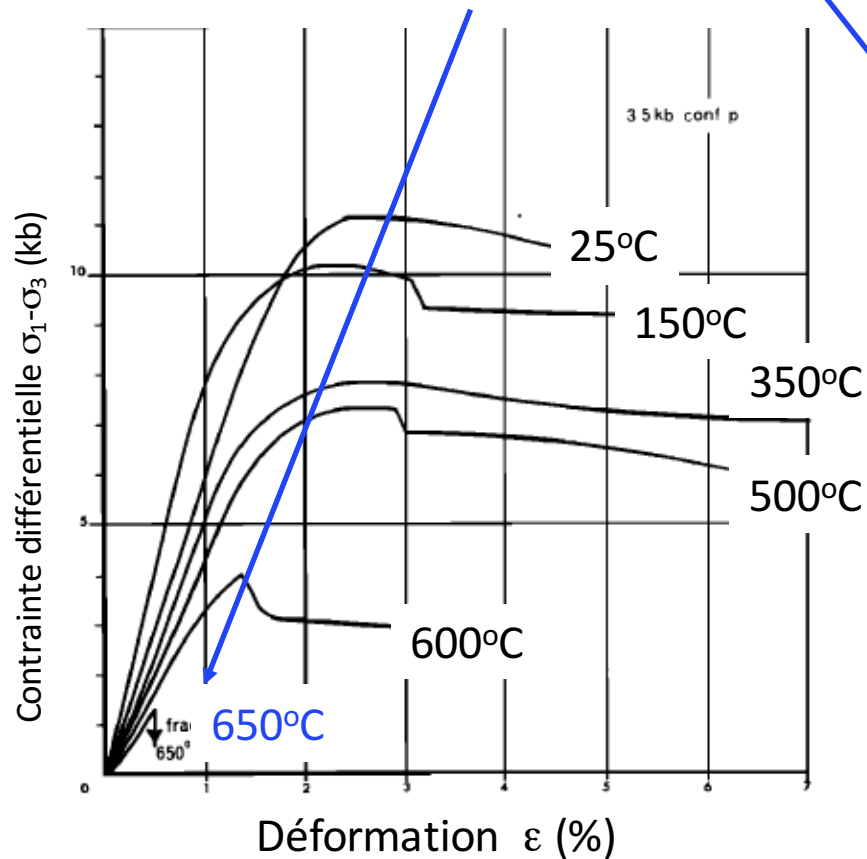
A T  $\rightarrow$  700°C P=3.5 kbar



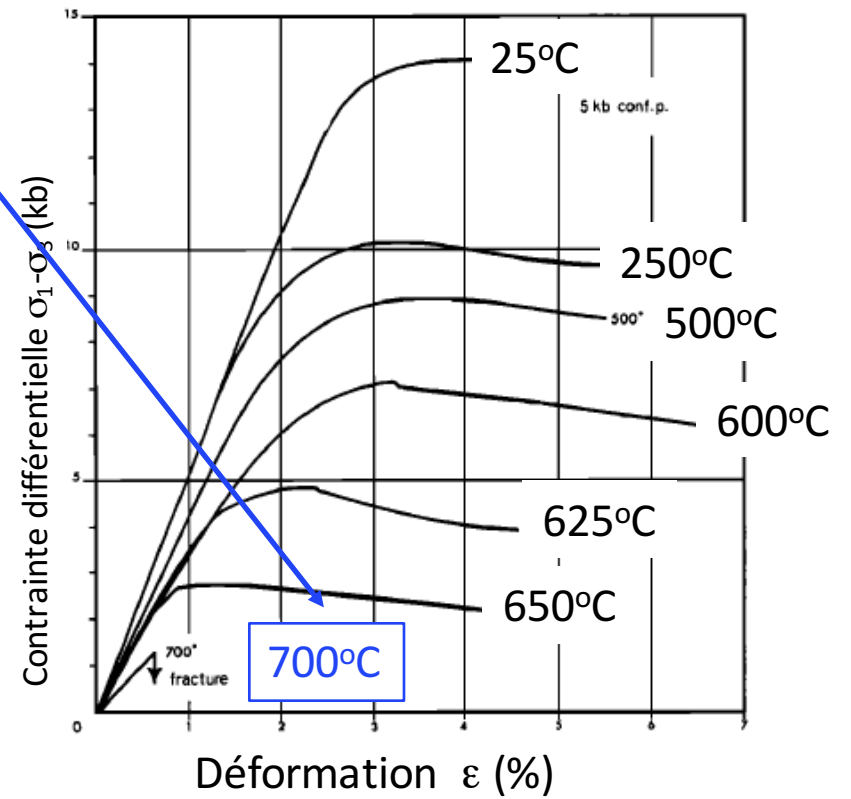
Raleigh and Paterson, JGR, 1965

à T -> 700°C P=3.5 kbar

Comportement cassant



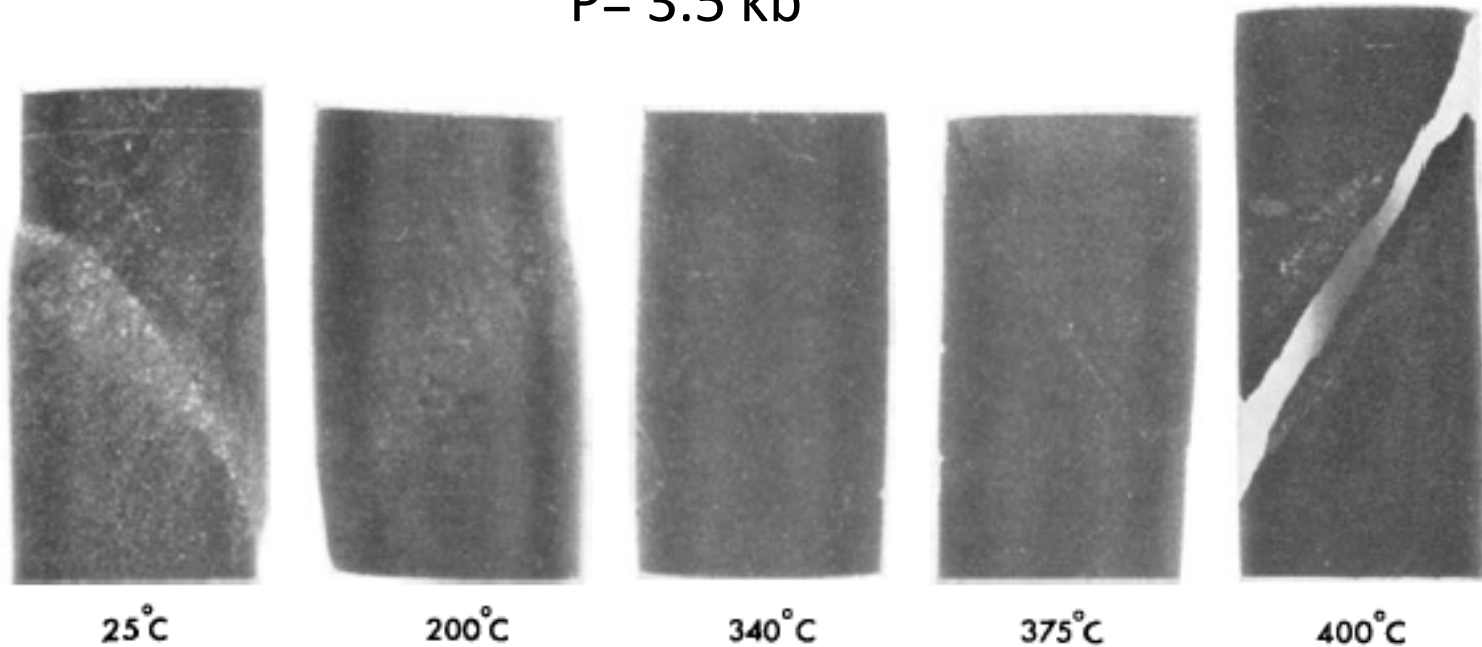
à T -> 700°C P=5.0 kbar



- La contrainte différentielle maximale diminue avec la température

Echantillons de serpentinite Fidalgo de diamètre 1cm

P= 3.5 kb



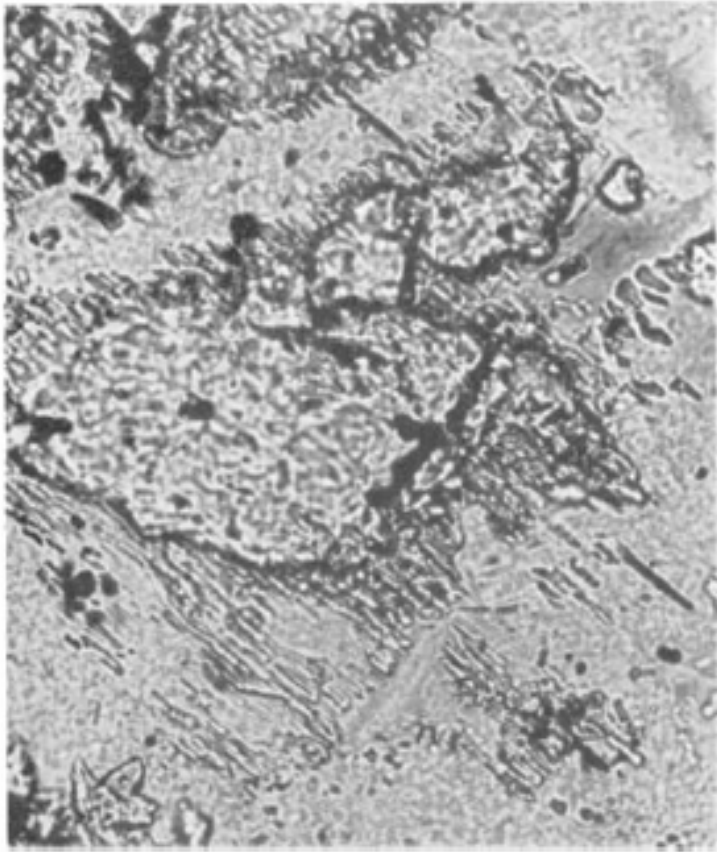
Comportement ductile à 340°C  
Comportement cassant à 375 et 400°C

-> Proposition:

Le comportement cassant est rendu possible par la diminution de la pression de confinement ( $\sigma_n \rightarrow \sigma_n - P$ ) par déshydratation de la serpentinite

*Raleigh and Paterson, JGR, 1965*

## Apparition d'olivine et d'eau (échantillons humides)



0.1 mm

Aiguilles d'olivine (noir) dans une matrice de serpentine

Serpentinite de Cabramurra déformée après chauffage à  $T=550^{\circ}\text{C}$ ,  $P=3.5\text{kb}$

-Perte de cohésion par apparition de nouveaux pores

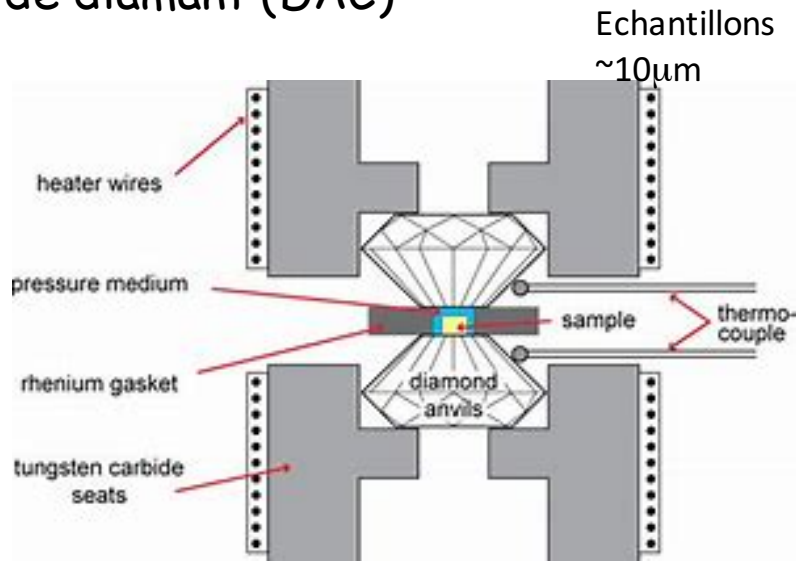
... ou...

- Réduction de pression de confinement par dégagement d'eau dans les pores et les bords de grains

*Raleigh and Paterson, JGR, 1965*

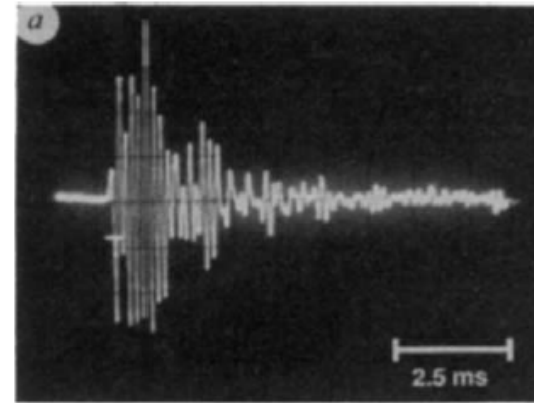


# Echantillons de Si et Ge dans cellule à enclumes de diamant (DAC)

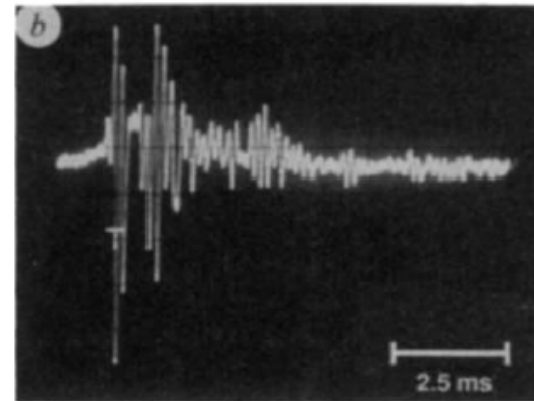


T ambiante  
P > transition cassante ductile ( $\sim 19\text{GPa}$ )

Emissions acoustiques enregistrées 1) sur microphone et 2) sur un capteur piézoélectrique (20MHz) monté sur l'une des enclumes



Si



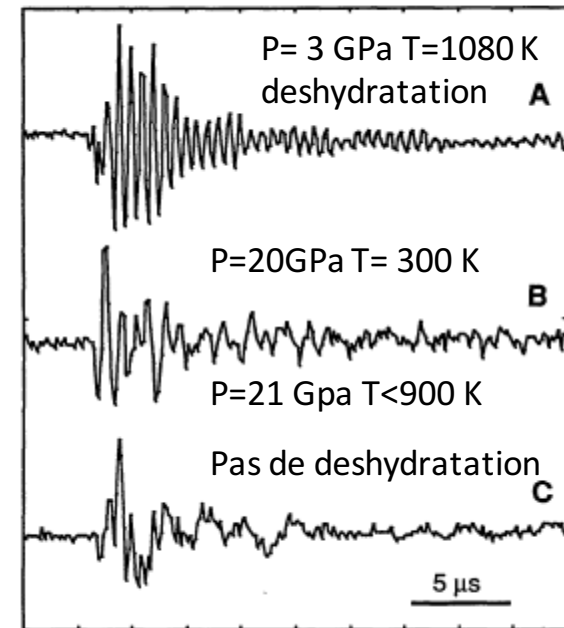
Ge

Transitions de phases dans la structure Cristalline ( $\beta\text{-Sn} \rightarrow$  hexagonale simple) ???

*Meade and Jeanloz, 1989*

# Emissions d'ondes acoustiques pendant les transformations de phase

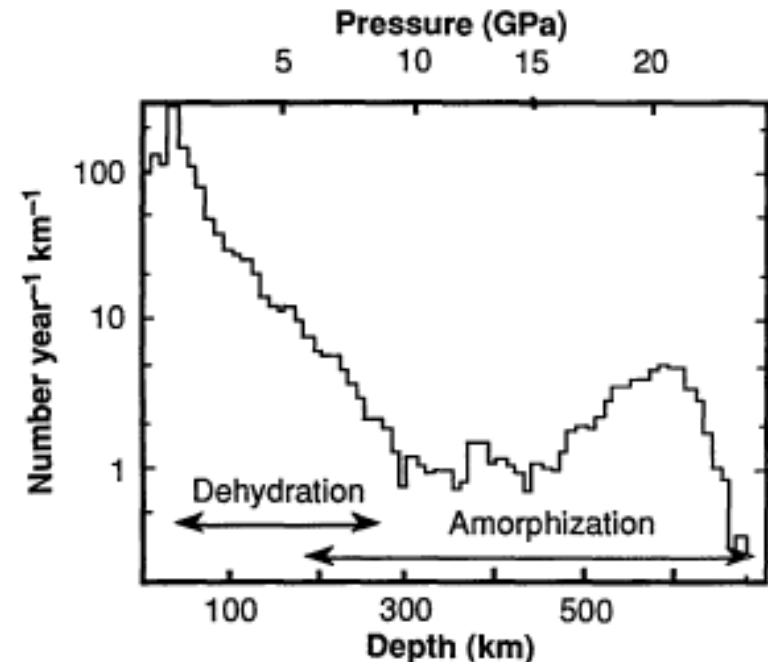
- Meade et Jeanloz (1989, 1991)
  - Etendent le domaine d'expérimentation en P et T, dans la cellule à enclumes de diamant (DIA)
  - Expériences dans l'olivine et le pyroxène: pas d'émissions détectées
  - Serpentine -  $0 < P < 40 \text{ GPa}$ ;  $300 < T < 3000 \text{ K}$ 
    - => Emissions acoustiques (EA) associées à la déshydratation de la serpentine entre 2 et 9 GPa
      - Changement de couleur confirmé visuellement, EA vers  $T \sim 900 \text{ K}$
    - => Pas de déshydratation à plus haute pression, mais perte de la structure de la serpentine -> EA liées à l'amorphisation, mouvements atomiques à l'échelle du cristal 10-10m, instabilités de cisaillement se propagent à grande échelle
    - Serpentine métastable jusqu'à grande profondeur dans les plaques en subduction
    - Estiment la masse d'eau enfouie dans le manteau par les zones de subduction au cours des temps géologiques à  $8 \times 10^{20} \text{ kg}$ , soit 50% du volume total des océans



*Meade and Jeanloz, 1991*

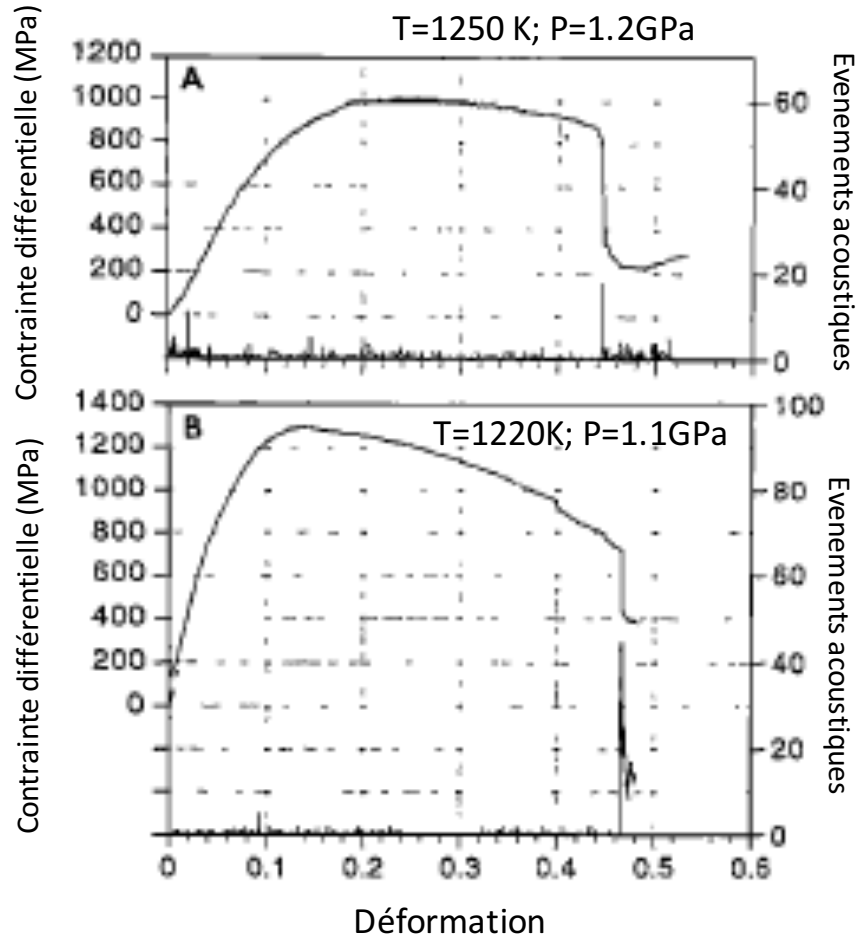
# Emissions d'ondes acoustiques pendant les transformations de phase

- Meade et Jeanloz (1989, 1991)
  - Etendent le domaine d'expérimentation en P et T, dans la cellule à enclumes de diamant (DIA)
  - Expériences dans l'olivine et le pyroxène: pas d'émissions détectées
  - Serpentine -  $0 < P < 40 \text{ GPa}$ ;  $300 < T < 3000 \text{ K}$ 
    - => Emissions acoustiques (EA) associées à la déshydratation de la serpentine entre 2 et 9 GPa
      - Changement de couleur confirmé visuellement, EA vers  $T \sim 900 \text{ K}$
    - => Pas de déshydratation à plus haute pression, mais perte de la structure de la serpentine -> EA liées à l'amorphisation, mouvements atomiques à l'échelle du cristal 10-10m, instabilités de cisaillement se propagent à grande échelle
    - Serpentine métastable jusqu'à grande profondeur dans les plaques en subduction
    - Estiment la masse d'eau enfouie dans le manteau par les zones de subduction au cours des temps géologiques à  $8 \times 10^{20} \text{ kg}$ , soit 50% du volume total des océans



*Meade and Jeanloz, 1991*

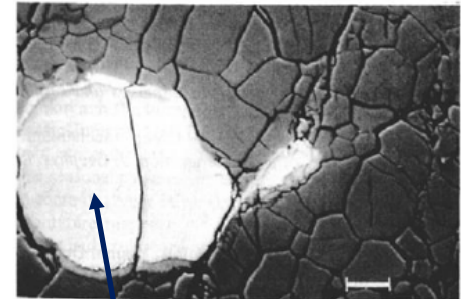
# Emissions acoustiques accompagnant la fracture "anticrack" dans $Mg_2GeO_4$



Dans appareil de Griggs

Pas d'émissions acoustiques détectées avant la fragilisation

Apparition d'une seule grande faille



Grain de chromite

Green et al., GRL, 1992

Harry Green  
(1940-2017)

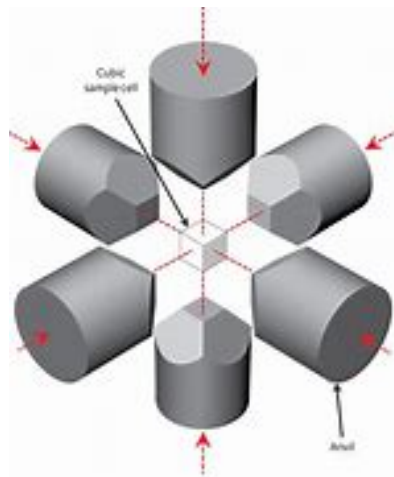
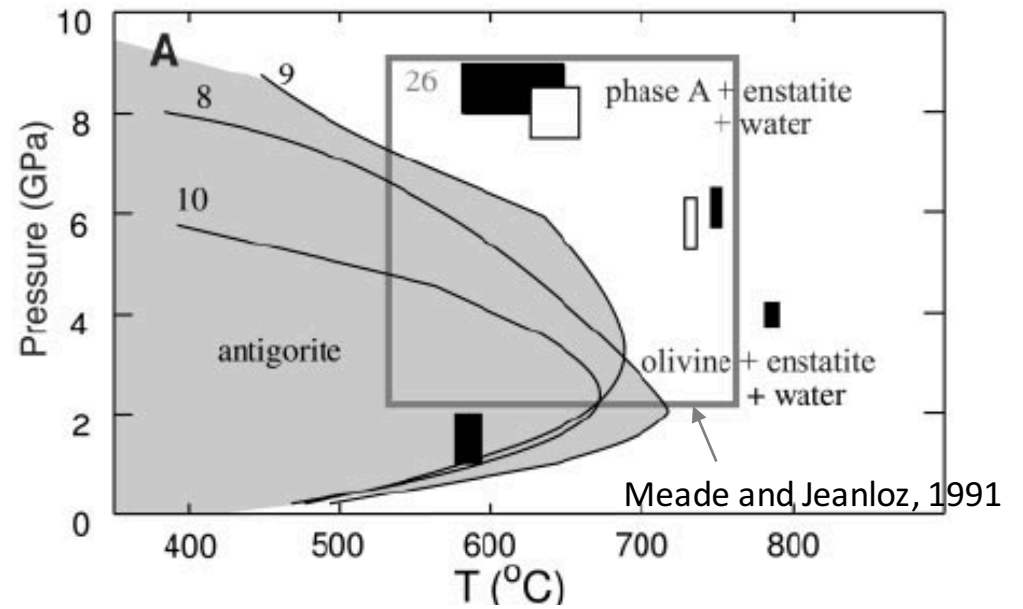


-> Déshydratation de l'antigorite  
(pure à 90-95%)

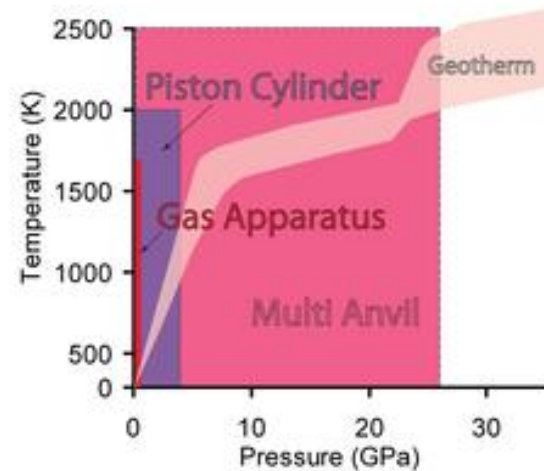
Presse à multi-enclumes  
1.5-8.5 GPa ( $h \sim 250\text{km}$ ), 300-900°C

-> Capteurs d'émissions acoustiques (EA)  
-> EA pendant la déshydratation

-> localisation par mesure de temps  
différentiels entre les arrivées aux  
capteurs situés sur les enclumes



Echantillons ~ mm's

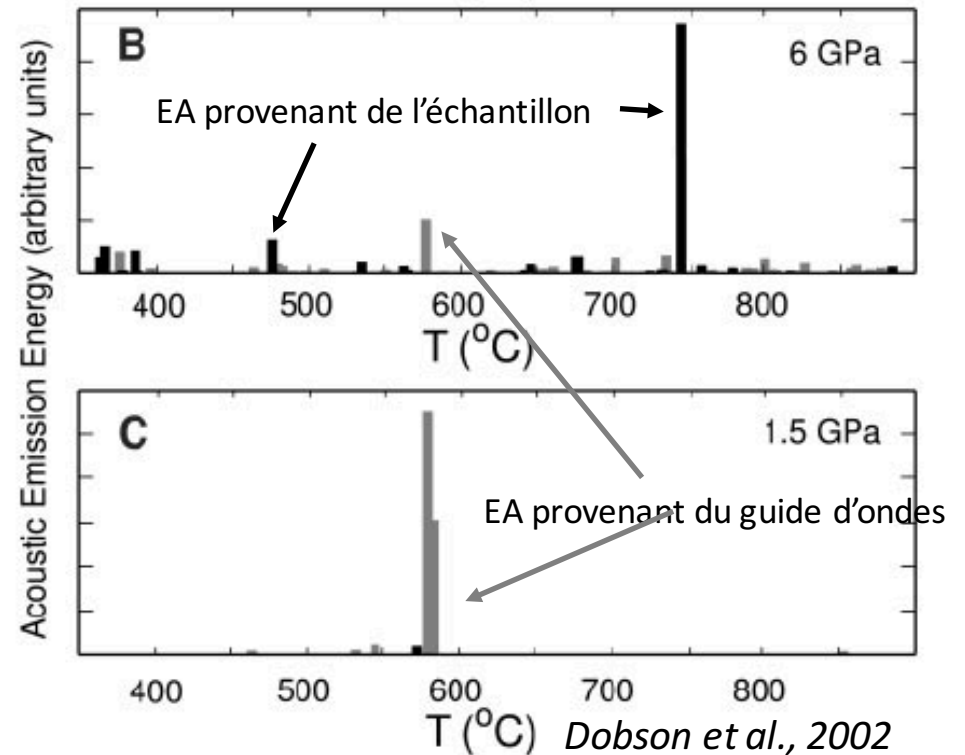
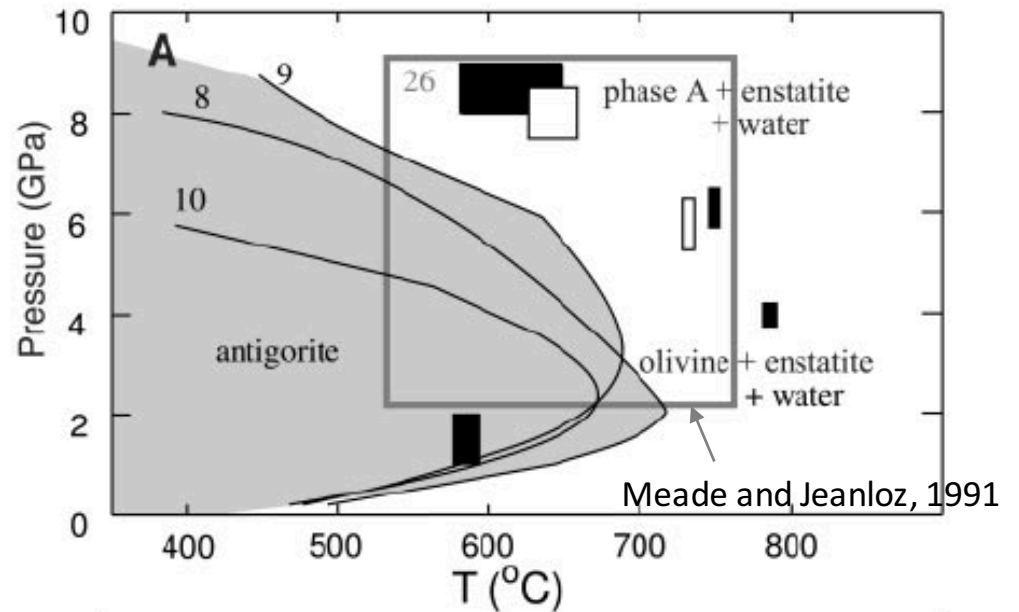


*Dobson et al., 2002*

-> Déshydratation de l'antigorite  
(pure à 90-95%)  
Extraite d'une serpentinite naturelle  
Erzgebirge

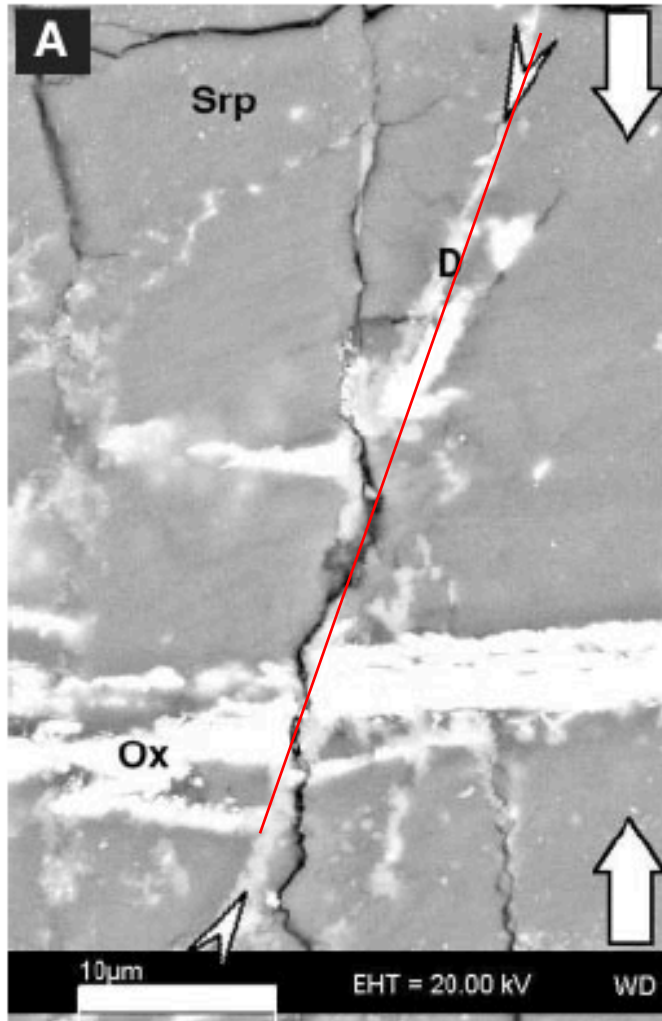
• A  $P < 6.5 \text{ GPa}$  EA associés à la  
deshydratation avec augmentation de la  
pression dans les pores:

- Fragilisation hydraulique,  $\Delta V > 0$
- - En général un seul EA dans  
l'échantillon (hydrofracture s'arrête  
lorsque le fluide peut s'échapper)
- Ou bien un petit EA dans  
l'échantillon suivi d'un plus gros dans  
les guides d'onde
- • A  $P > 6.5 \text{ GPa}$  pente de Clapeyron  
négative et  $\Delta V < 0 \Rightarrow$  pas de  
fracturation hydraulique: EA dus à  
l'affaissement du milieu autour de  
l'échantillon



Echantillon porté à 6GPa, récupéré après observation d'un fort EA

$\sigma_1$



— — déplacement de 3 μm sur la fracture

D : produits de déshydratation

Transposé au cas d'une zone de subduction:

- Le fluide peut-il être évacué par diffusion, écoulement poreux, ou précipitation?
- e.g. perméabilité de la lithosphère: déshydratation d'une couche de 5 à 500 m d'épaisseur de serpentinite sans hydrofracturation implique une perméabilité non réaliste de  $10^{-18}$  à  $10^{-20}$

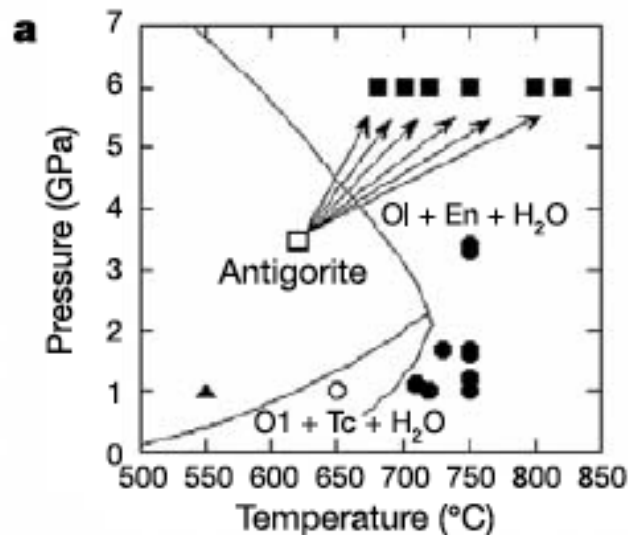
Déshydratation de la serpentinite peut expliquer les séismes intermédiaires jusqu'à <6.5 GPa, soit < 200 km de profondeur

Mécanisme de déclenchement hydraulique dans la zone inférieure des zones de sismicité doubles.

*Dobson et al., 2002*

Conditions nécessaires pour la fragilisation hydraulique telle que proposée par Raleigh et Paterson (1965):

- 1) Dégagement de fluide suffisamment rapide pour que la pression du fluide augmente plus vite que la relaxation par écoulement plastique
- 2) Diffusion hydraulique suffisamment lente pour que le fluide ne se disperse pas

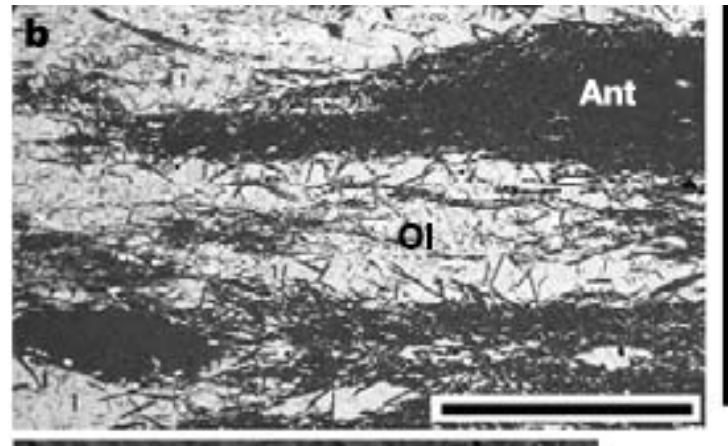
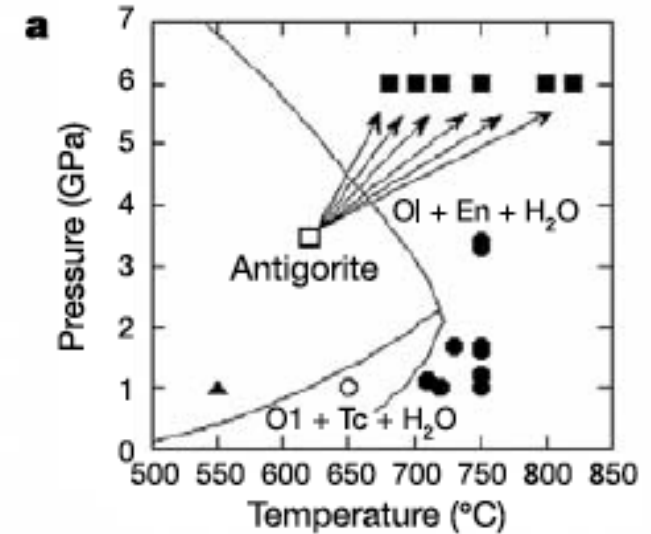


$\Delta V < 0$  à 2 -4 GPa (h= 60-120 km)

Ce mécanisme peut-il fonctionner dans ces conditions?



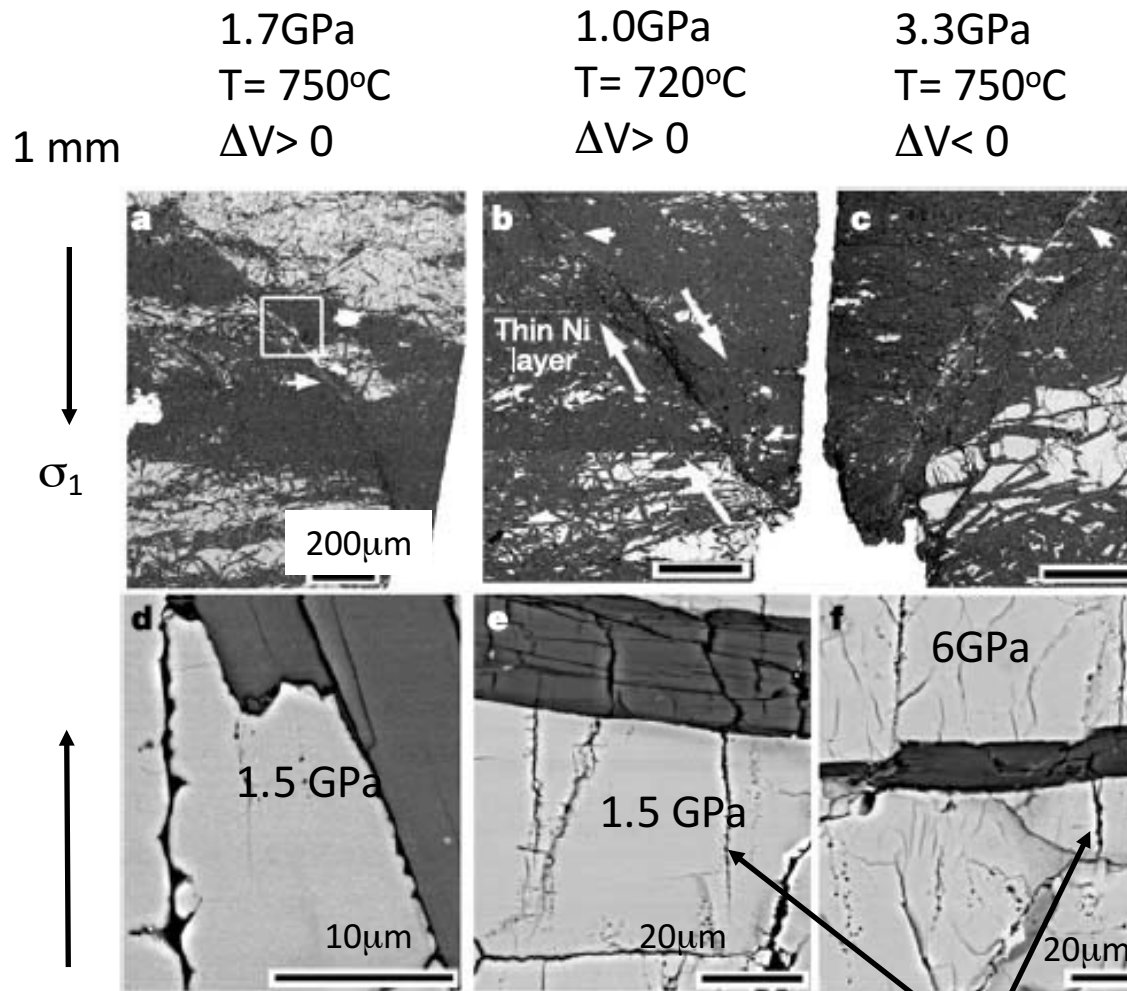
- $P=1-6 \text{ GPa}$ ,  $T=550-820^\circ\text{C}$  antigorite serpentinite du Val Marengo ( Italie)
- Appareil de Griggs modifié
  - échantillons de diamètre 3.1 mm et longueur 8.4 mm dans une capsule de Pt
- Milieu pressurant CsCl (solide très mou pour minimiser la friction dans l'appareil)



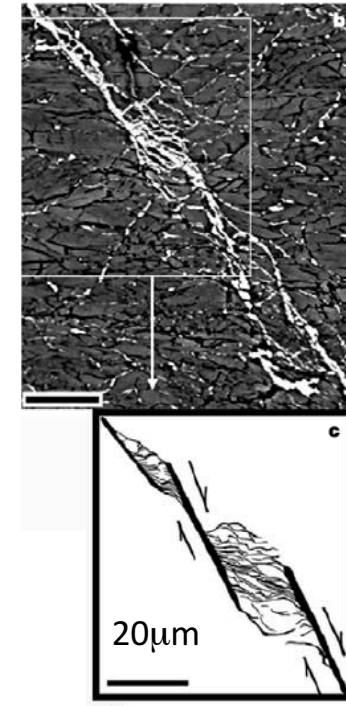
Echantillon initial

*Jung et al., 2004*

Après la déformation– observations de failles orientées à 25-40° par rapport à  $\sigma_1$



6 GPa  
T= 750°C  
 $\Delta V < 0$



Zones de concentration de produits solides (“push together”)

Produits fluides et solides de décomposition de l’antigorite se séparent pendant la cassure:

Le fluide moins dense que l’antigorite permet la formation de fissures en mode 1 -> cassure

*Jung et al., Nature, 2004*

Fissures en mode 1 contiennent les produits de déshydratation fluides (olivine)  $\Delta V > 0$

Presse à multi-enclumes (DIA)+ detection de EA  
(événements acoustiques) sur 4 canaux

- jusqu'à 6 GPa et 690°C

- péridotite très serpentinisée  
- Comparaison avec la harzburgite

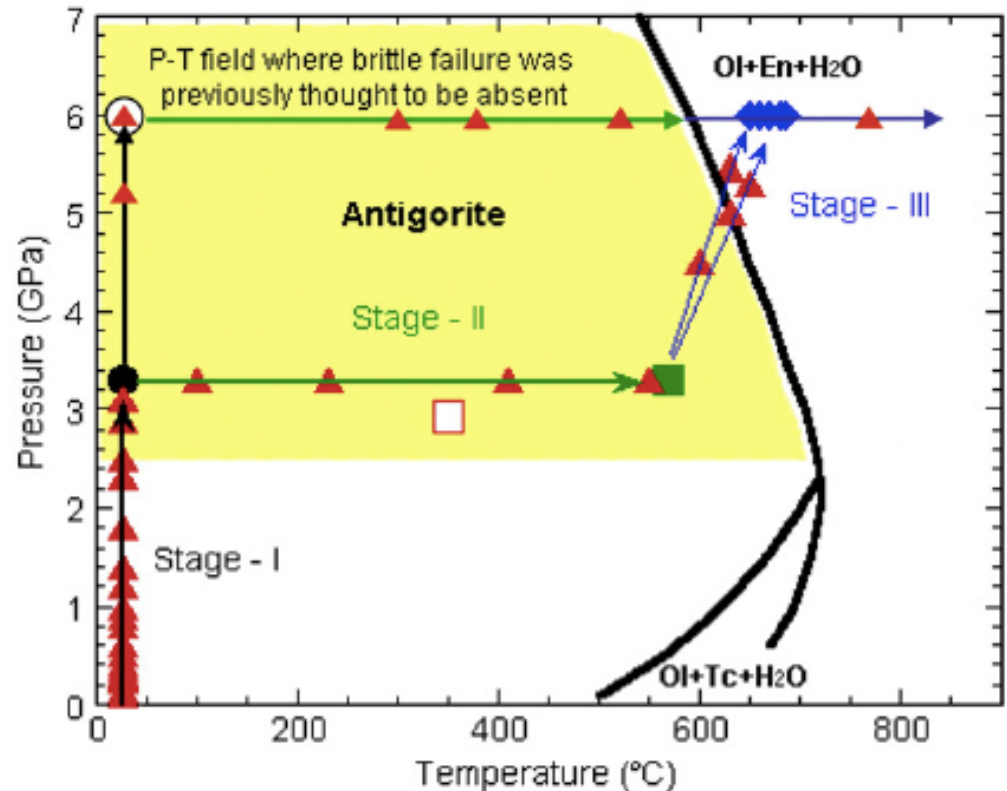
3 étapes:

I - compression isotherme à basse T

II- chauffage isobarique à haute P

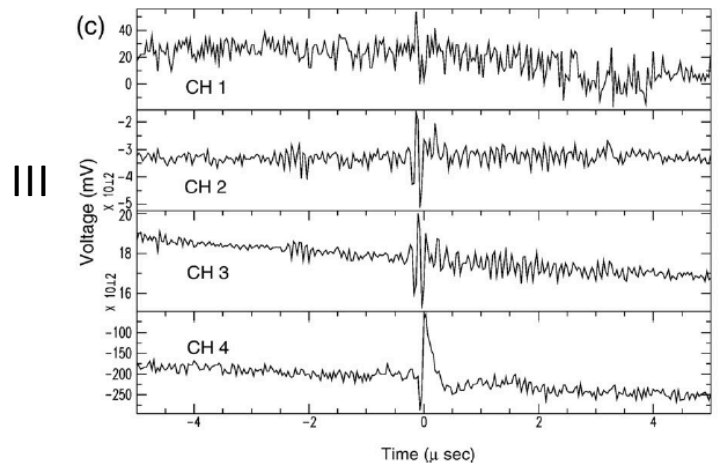
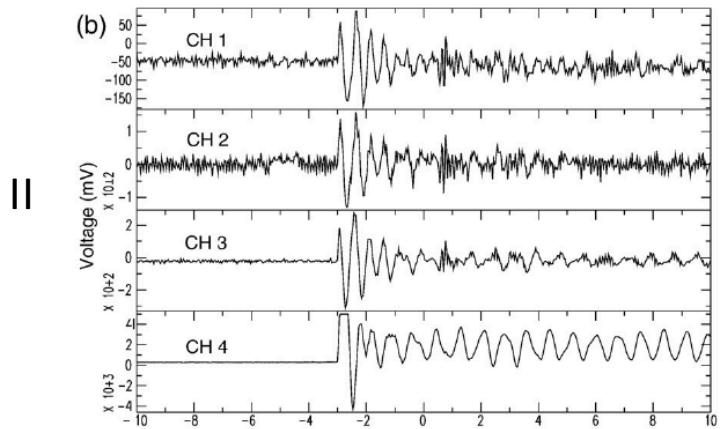
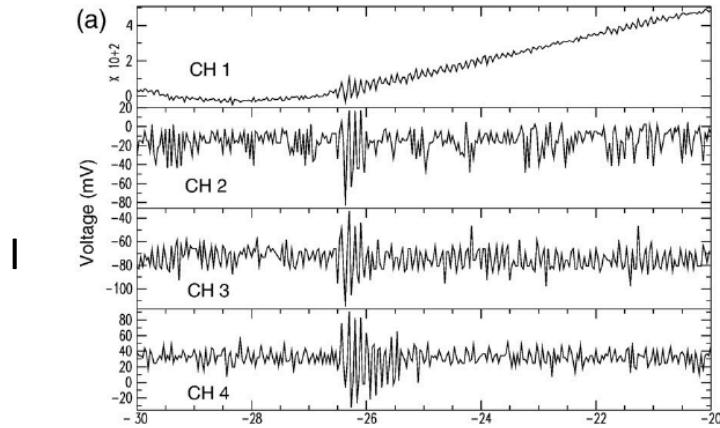
III- augmentation simultanée de P et T

EA observées à toutes les étapes  
I, II et III avant deshydratation



▲ Emissions acoustiques

*Jung et al., 2009*

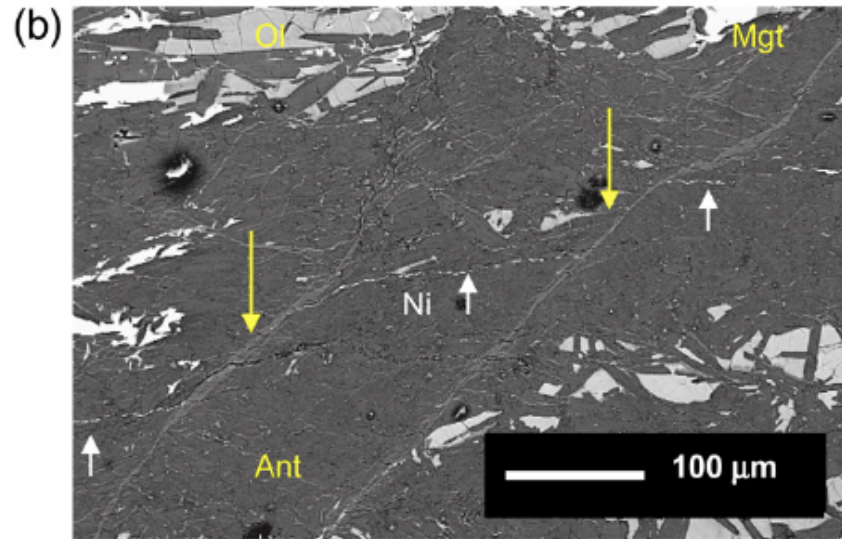


Etape 1: Une seule faille, puis glissement répété sur cette faille pendant l'étape 2

Etape 3: formation de nouvelles failles et Arrêt du glissement sur les anciennes failles:

✂ Fracture due à la deshydratation se produit pour une valeur de la contrainte inférieure à celle nécessaire au glissement par friction

✂ -> augmentation rapide de la pression du fluide dans ces nouvelles fractures par génération de porosité,



Etape 3 P=6GPa T=650-690°C

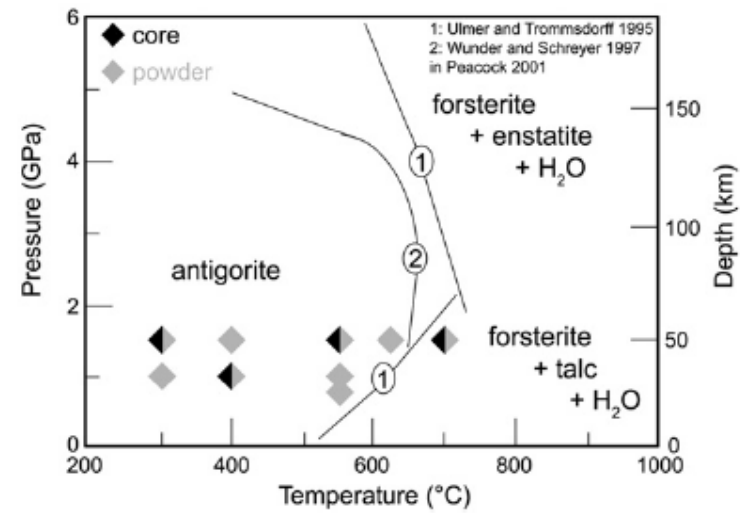
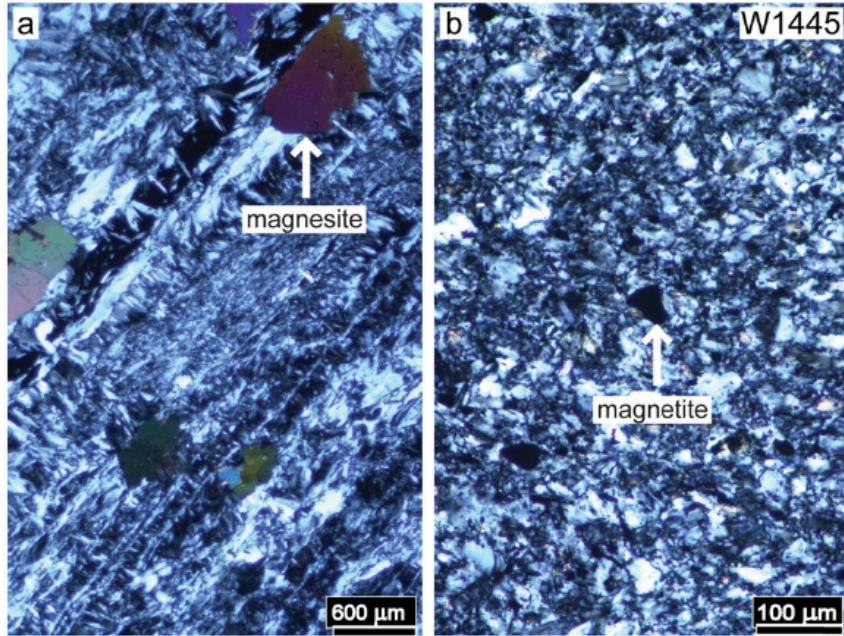
# Appareil de type Griggs

T = 300-700°C P=0.85-1.5 GPa

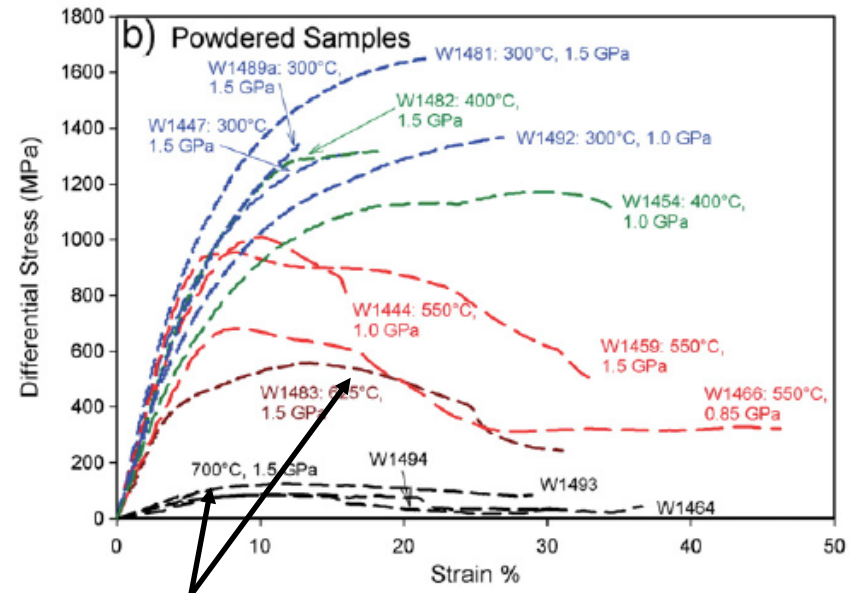
Vitesse de déformation:  $1.5 \cdot 10^{-5}$  to  $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Echantillon naturel

Après pulvérisation et compaction

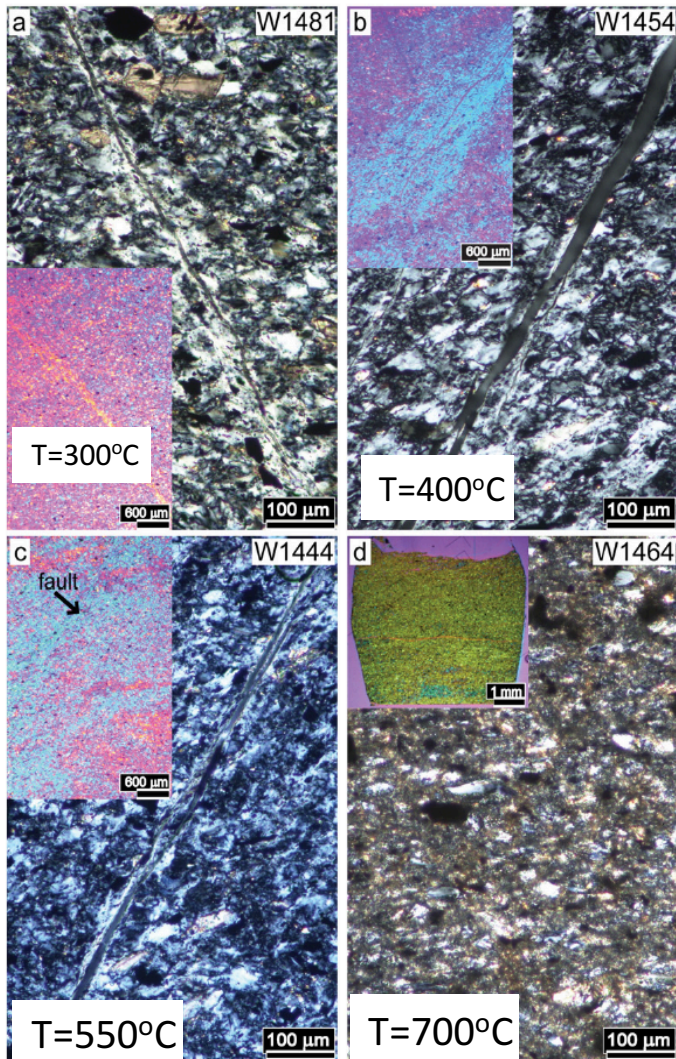


Expériences à haute T montrent une déformation distribuée

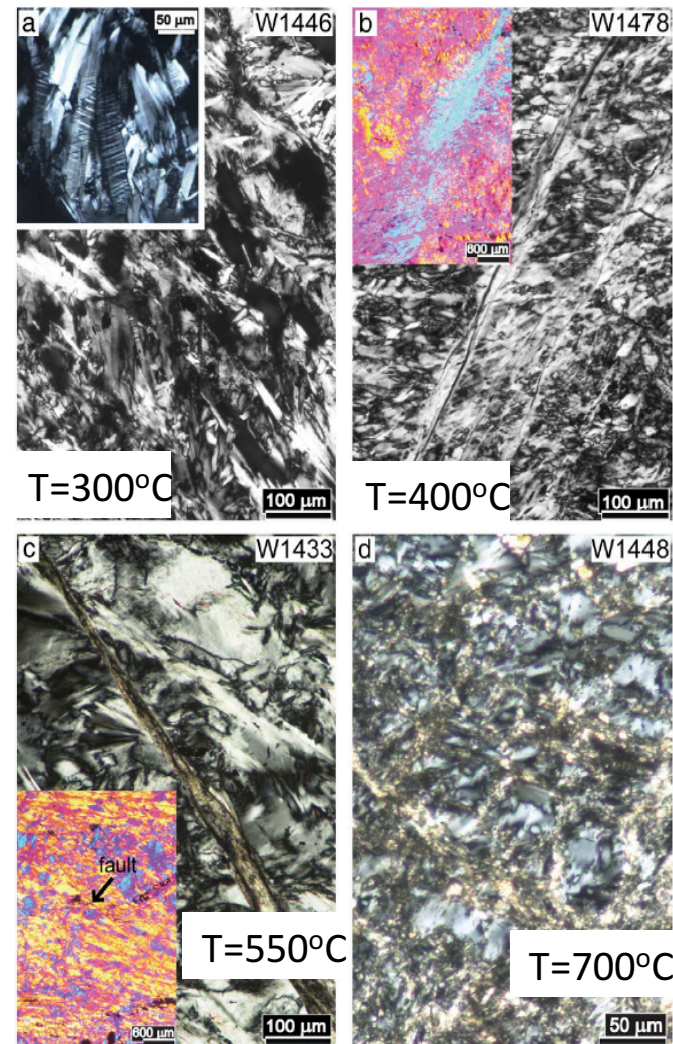


Chernak and Hirth, EPSL 2010

Poudres  $\dot{\epsilon} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  P=1-1.5GPa



Echantillons naturels  $\dot{\epsilon} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  P=1-1.5GPa

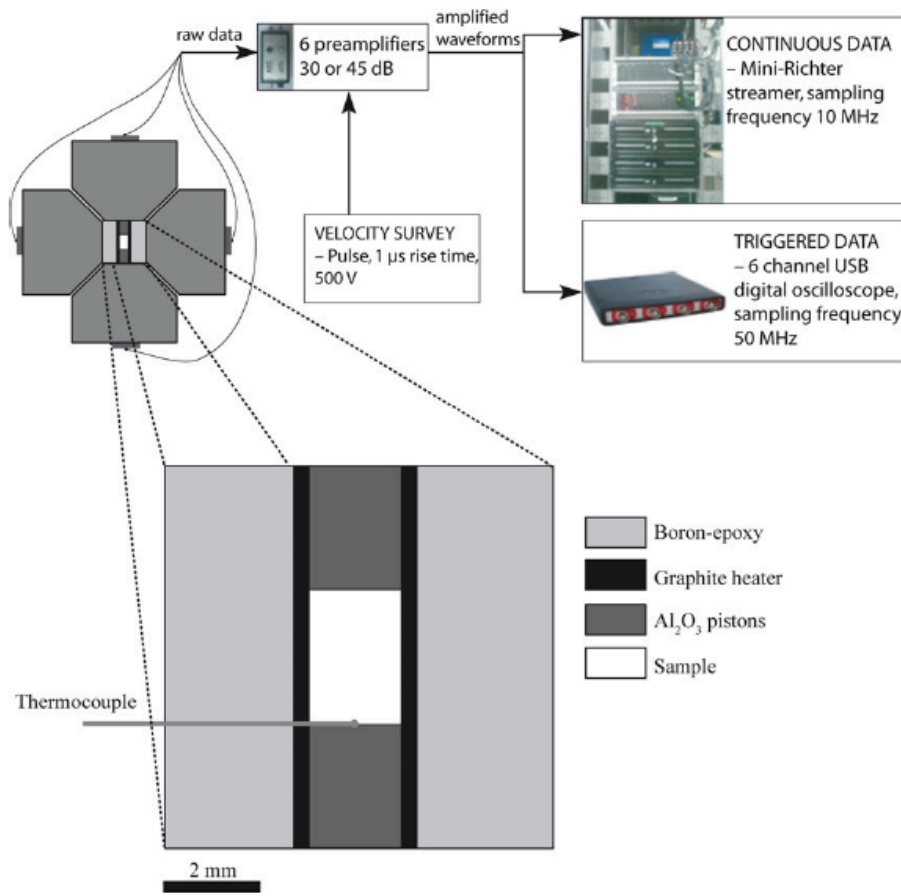


=> Déshydratation empêche la localisation de la déformation

=> Localisation de la déformation plastique par les produits polycristallins de déshydratation (e.g. Kelemen and Hirth, 2007)?

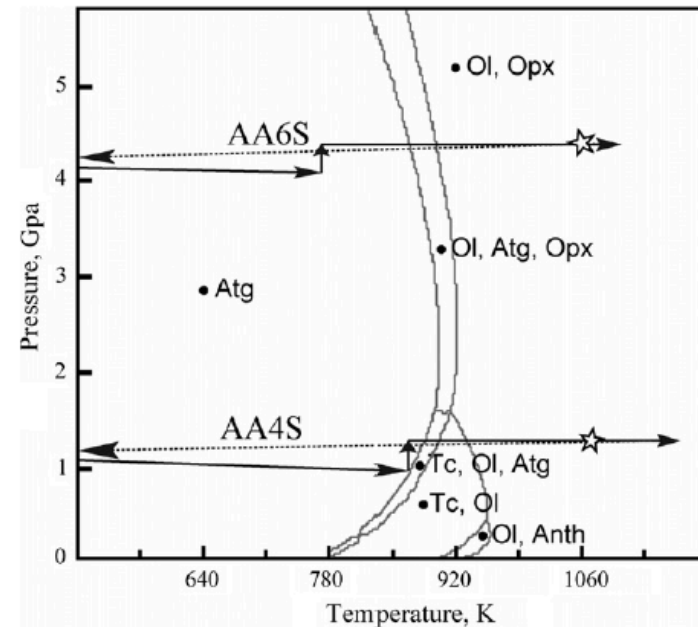
Presse multi-enclume (DIA), avec in-situ  
diffraction par rayons-X

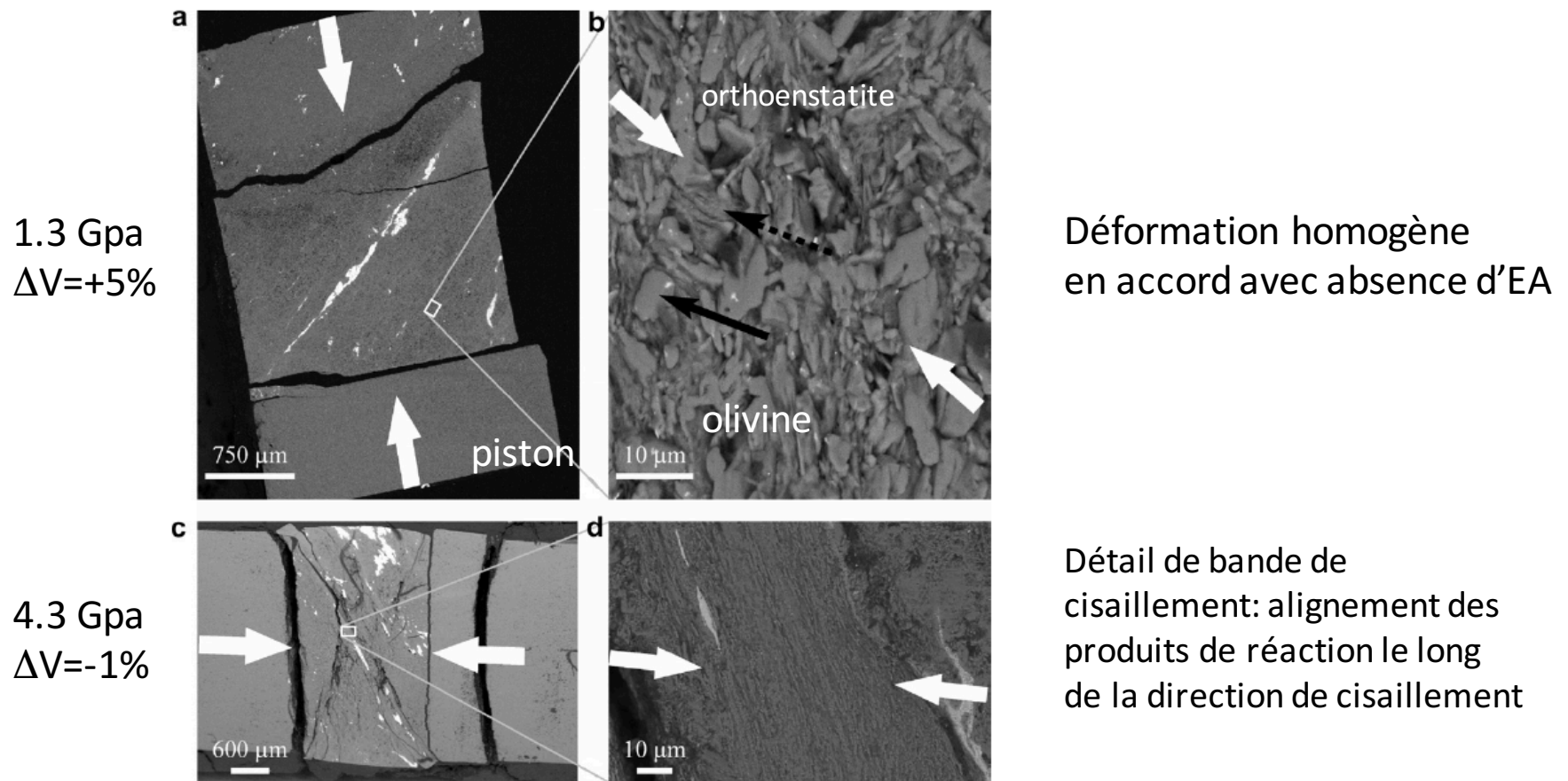
Déshydratation de la serpentine  
suivie in-situ



Pas d'EA pendant la déshydratation  
dans les deux domaines de pression  
considérés ( $\Delta V > 0$  et  $\Delta V < 0$ )

Glissement aismique le long de  
failles produites par compression à  
T ambiante





Glissement le long de failles produites pendant la compression à froid:

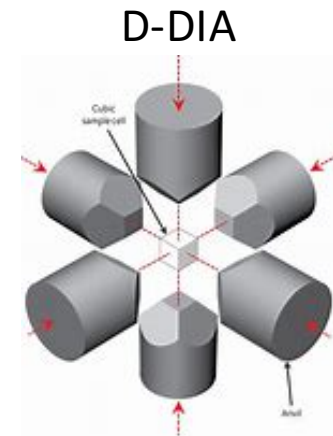
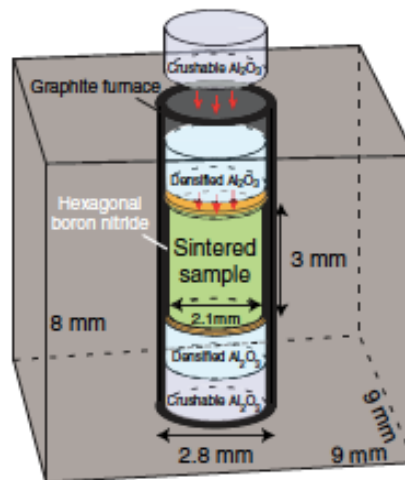
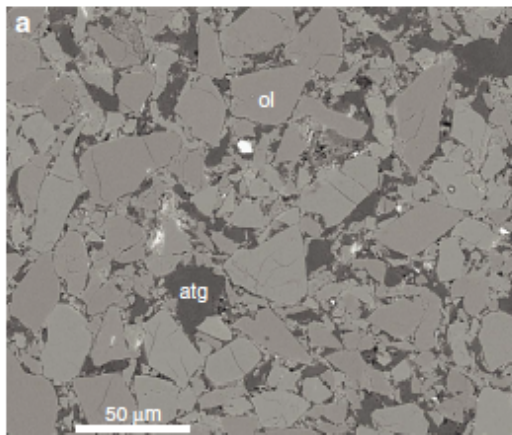
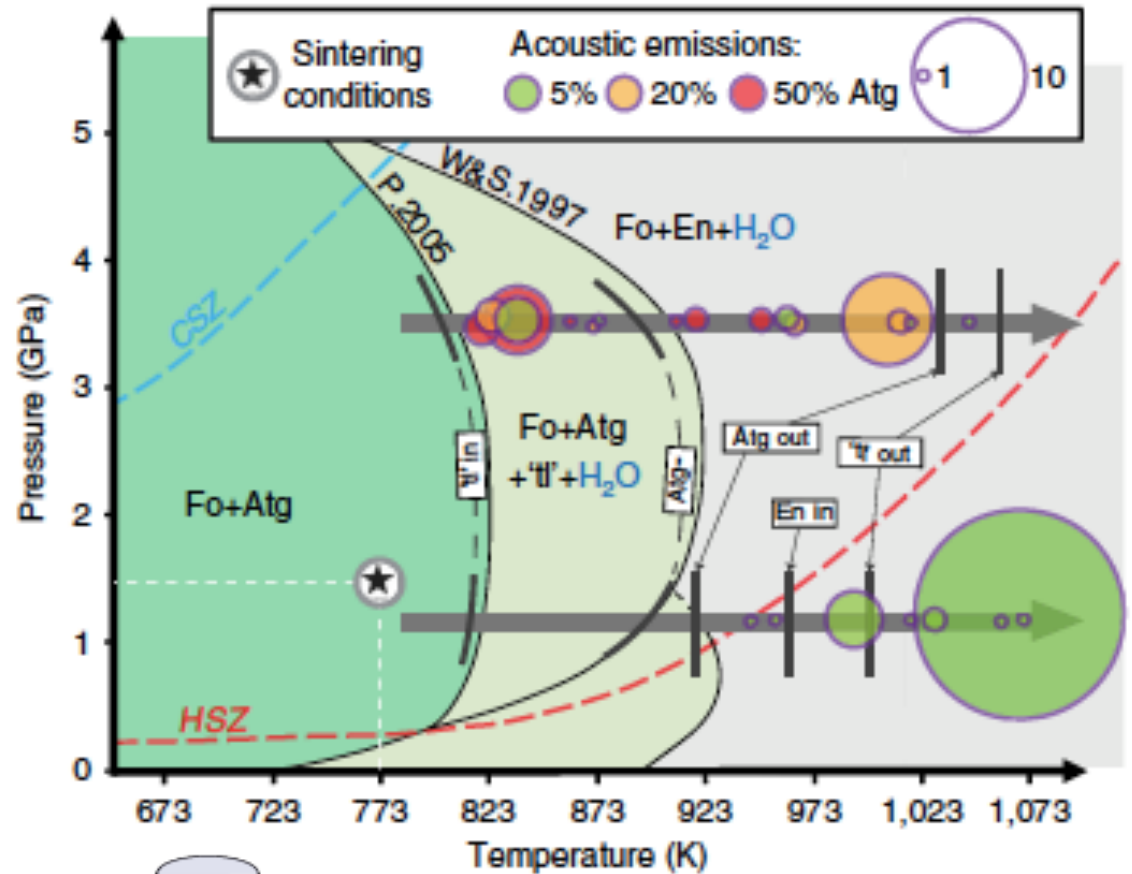
- > Peut être dû à la vitesse rapide de chauffage?
- > EA de période plus longue (séismes lents) non détectés?
- > Composition de la zone de produits de réaction: présence de talc..
- > Drainage des fluides peut varier entre les expériences



Echantillons synthétiques:  
 Mélanges d'olivine et d'antigorite  
 Fabriqués à P=1.5 GPa et T=773 K

Déformés dans un D-DIA  
 Avec 6 capteurs acoustiques  
 $\dot{\epsilon} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$   
 $\dot{T} \sim 4 \text{ K/s}$

$\dot{T} / \dot{\epsilon} \sim 1250 \text{ K}$  comparable aux  
 conditions de subduction

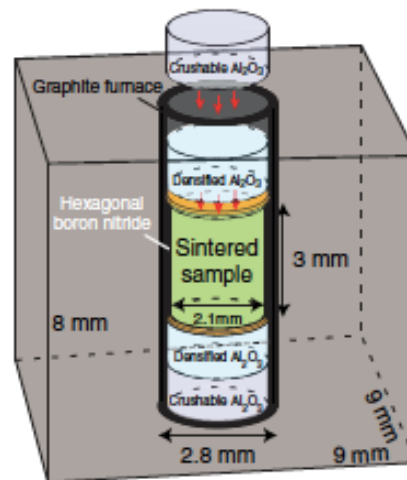
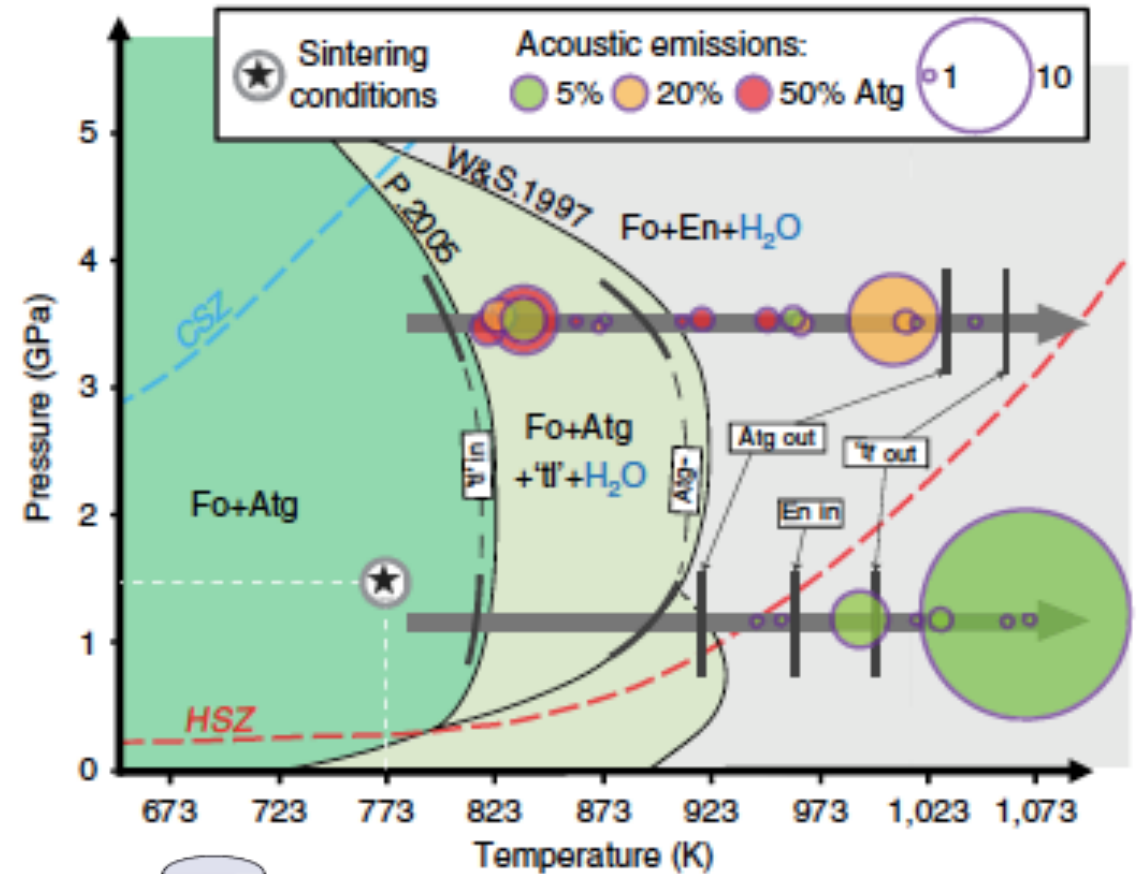
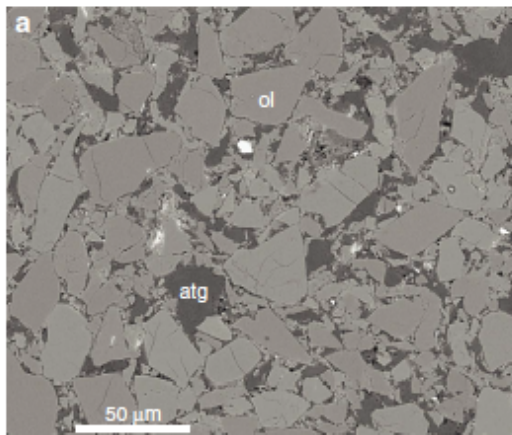


Ferrand et al., 2017

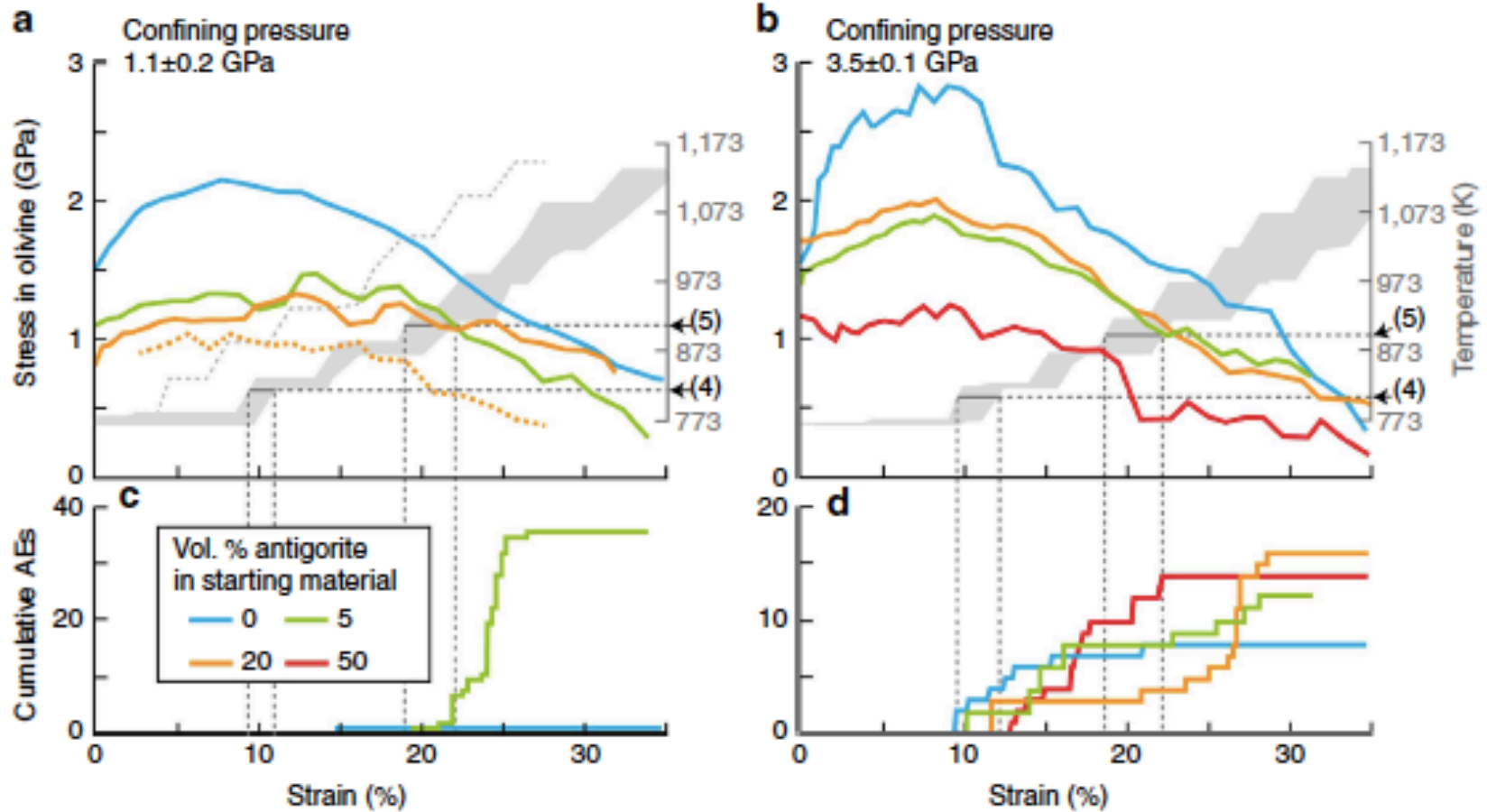
Echantillons synthétiques:  
 Mélanges d'olivine et d'antigorite  
 Fabriqués à P=1.5 GPa et T=773 K

Déformés dans un D-DIA  
 Avec 6 capteurs acoustiques  
 $\dot{\epsilon} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$   
 $\dot{T} \sim 4 \text{ K/s}$

$\dot{T} / \dot{\epsilon} \sim 1250 \text{ K}$  comparable aux  
 conditions de subduction



- Emissions acoustiques:
- Tous les échantillons avec antigorite
  - Olivine pure: seulement à 3.5GPa et à une contrainte max. beaucoup plus élevée



79 EA enregistrés

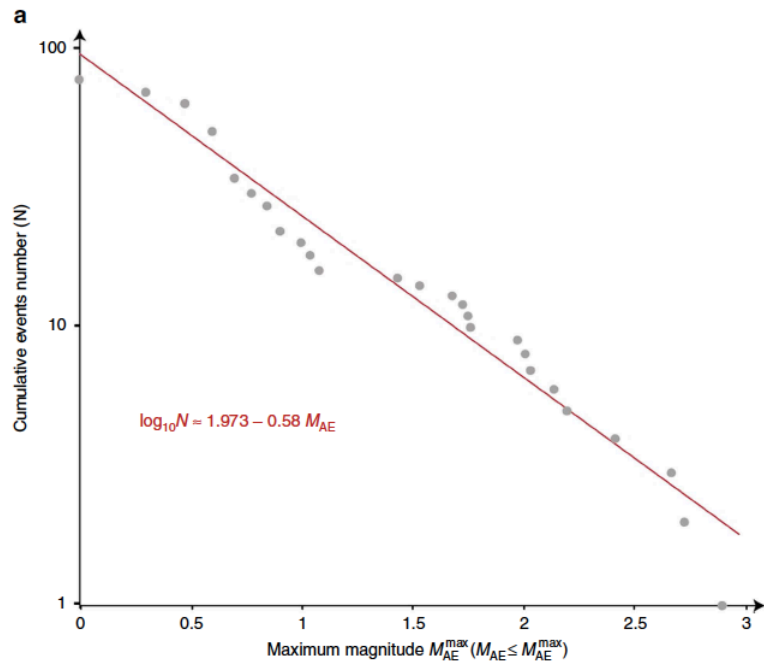
Loi de Gutenberg Richter avec  $b \sim 0.6$ ; fréquence coin de 2MHz

Longueur de faille  $\sim$  longueur de l'échantillon

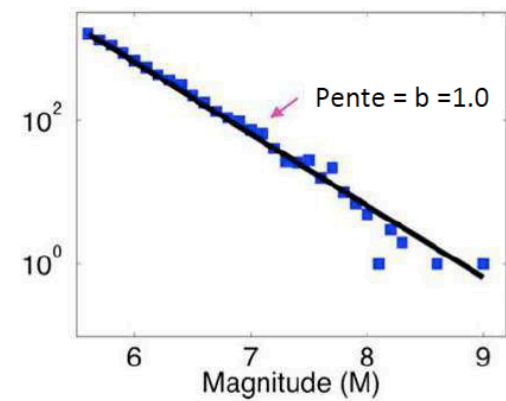
Limite de détection à faible magnitude

*Ferrand et al., 2017*

## Séismes superficiels La Loi de Gutenberg-Richter



30 ans de séismes (global) 1985-2005

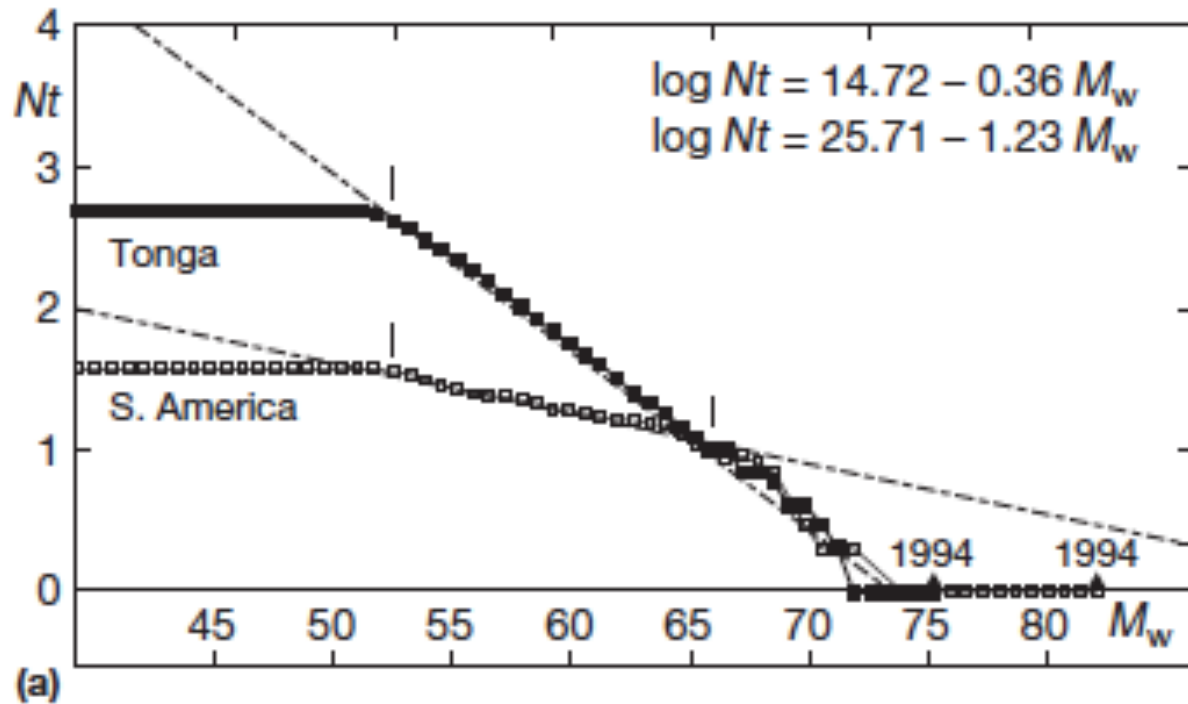


$$\text{Log } N = a - b M$$

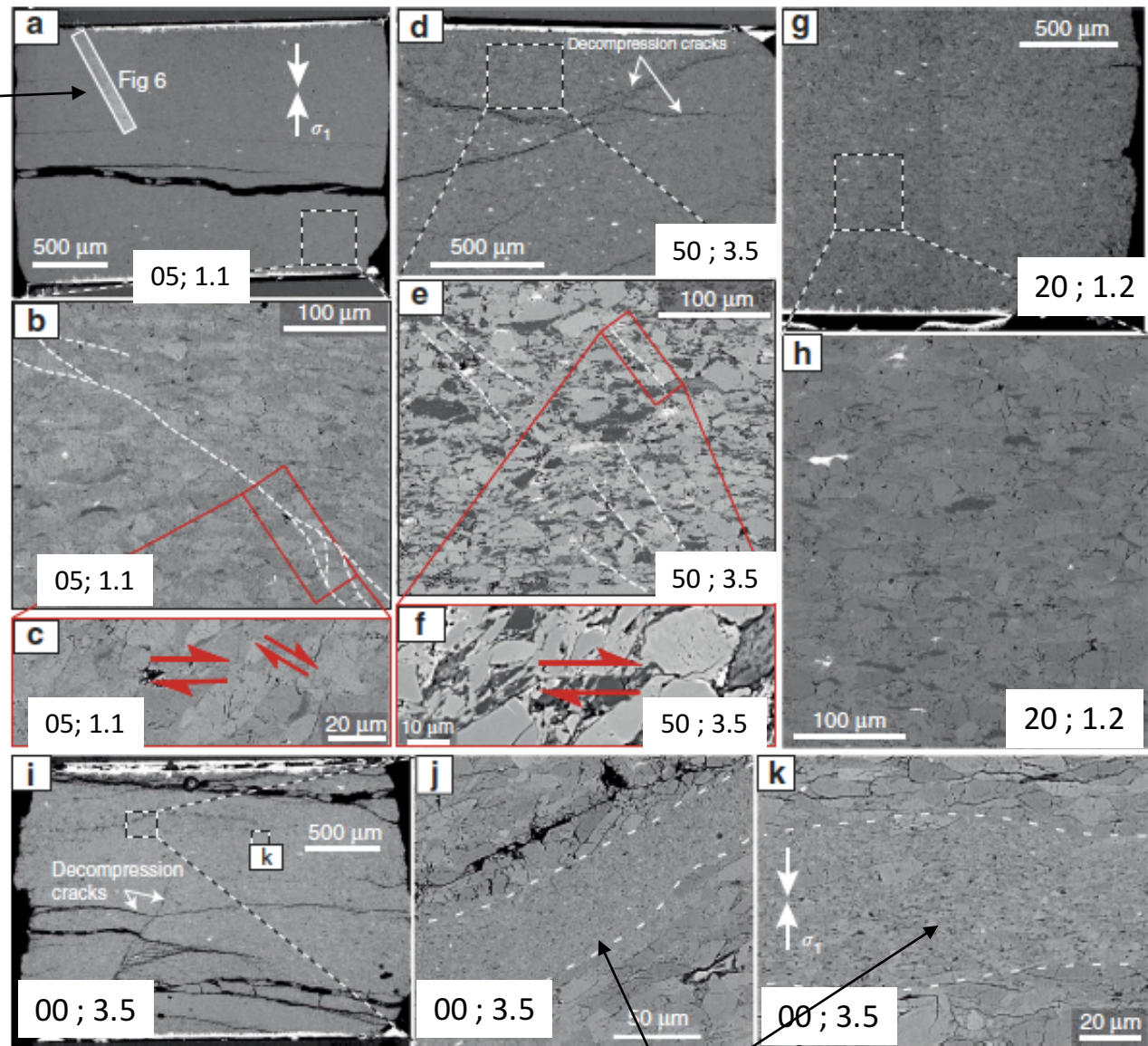
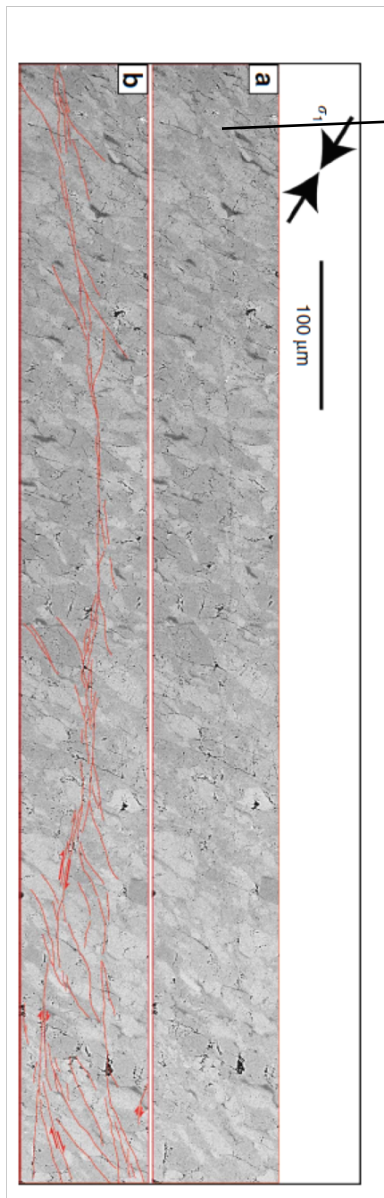
⇒ Il y a 10 fois plus de séismes de M 6 que de M 7

*Ferrand et al., 2017*

## Variations régionales de la "b-value" pour les séismes de profondeur > 400 km



$$\text{Log } N = a - b M$$



Bandes de cisaillement  
remplies de grains d'olivine  
Relaxation thermique sous  
contrainte élevée?

%ag ;  $\sigma_m$

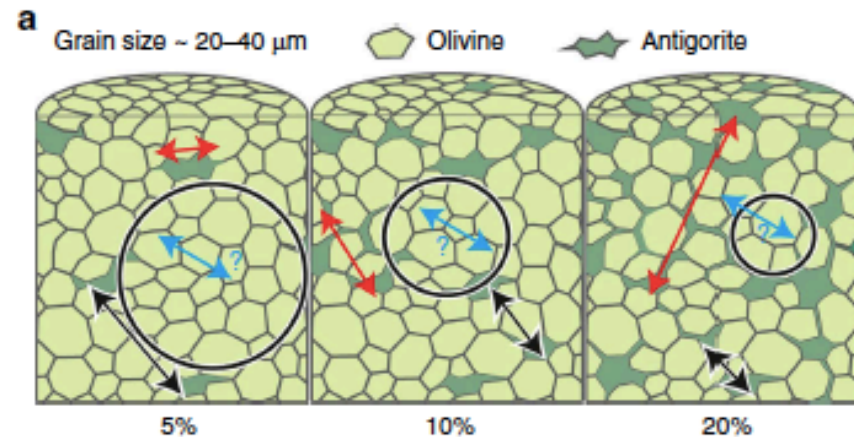
Modèle proposé:

Transfert de contrainte du à la déshydratation provoque la cassure dans la matrice d'olivine

Pendant la déshydratation, la contrainte s'annule dans les cristaux d'antigorite et transfère la contrainte a la matrice d'olivine, provoquant une instabilité mécanique.

La fracture se produit si les volumes d'antigorite sont:

- suffisamment petits pour que ceux d'olivine soient plus grands que la longueur minimale de nucléation de la fracture
- - suffisamment grands pour transférer une charge suffisante a la matrice d'olivine
- Marche aussi bien dans le cas  $\Delta V < 0$



Zones de subduction: les sous-volumes d'olivine pourraient être séparés par des failles préexistantes avec des degrés variables de serpentinisation

# Cas de la transformation olivine-spinelle ( $d > 400$ km)

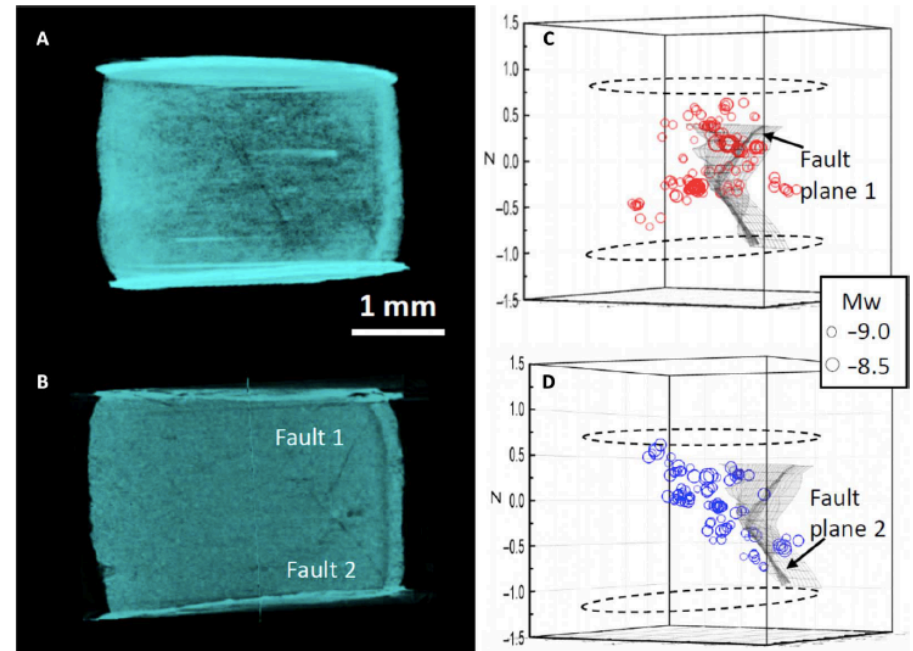
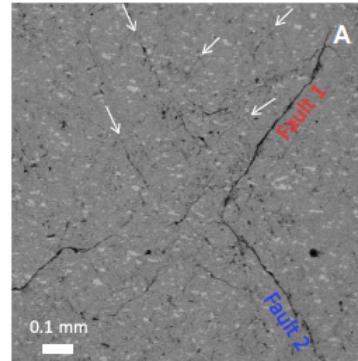
Transformation olivine-spinel dans le  $Mg_2GeO_4$

(D-DIA + synchrotron (rayons X))

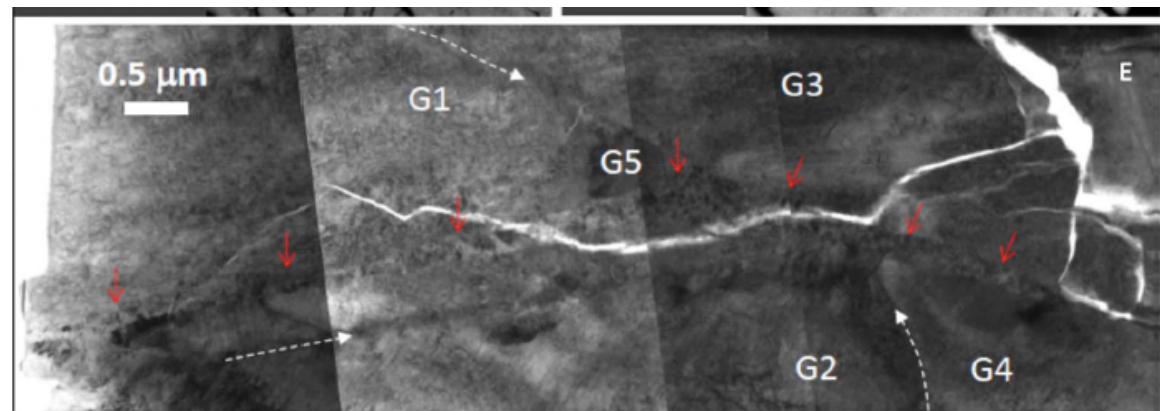
Echantillons de poudre de germanate compactée

$P = 2-5$  Gpa

$T = 973 - 1573$  K

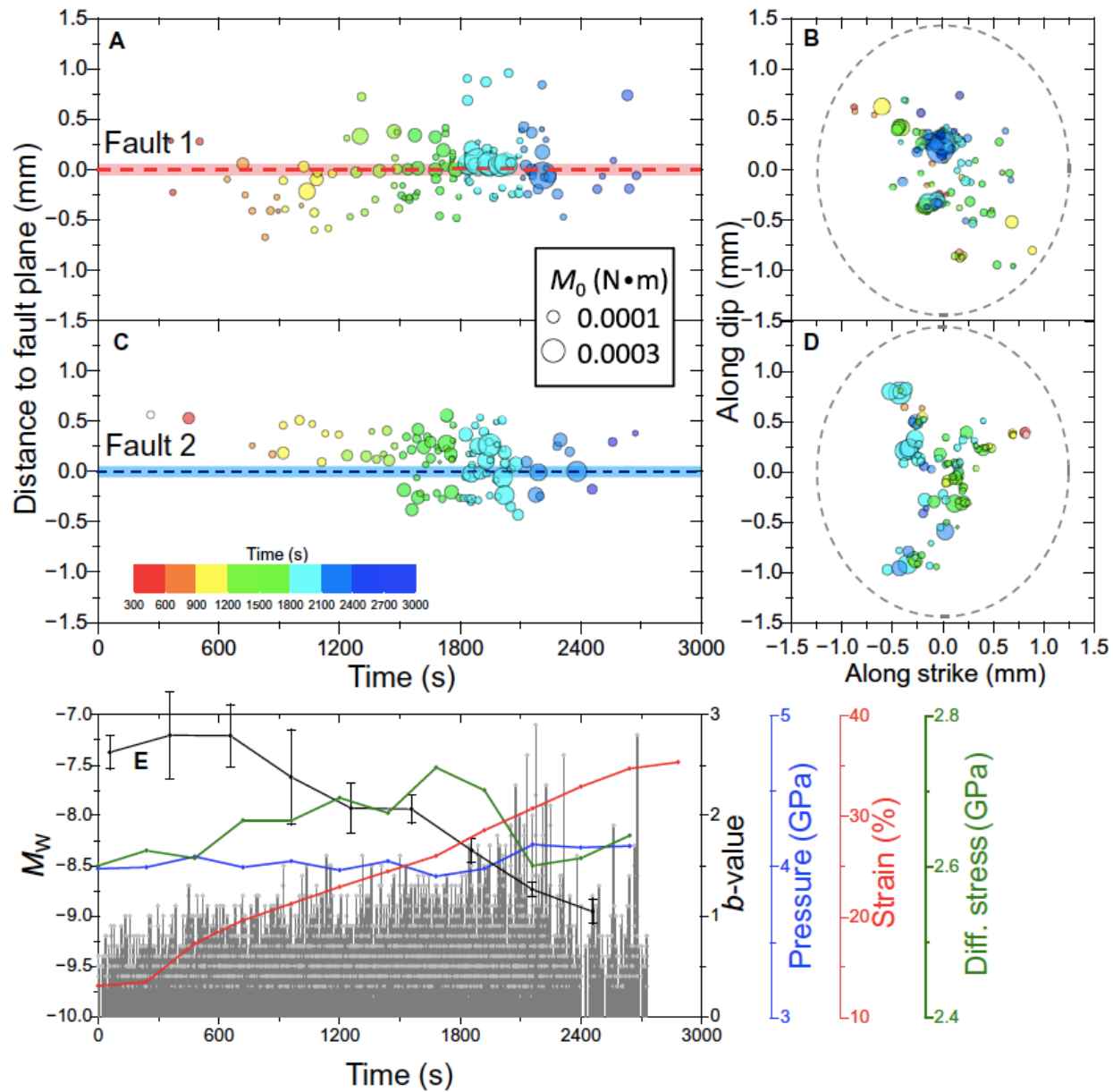


Bande de cisaillement continue traversant plusieurs grains d'olivine d'orientation différente reliant des segments de faille



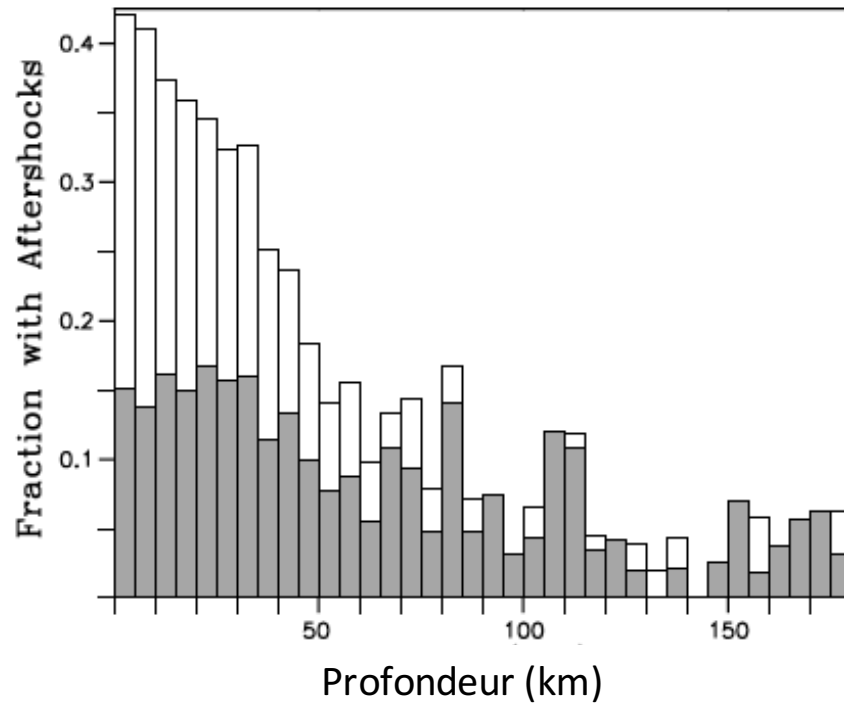
Wang et al., 2017





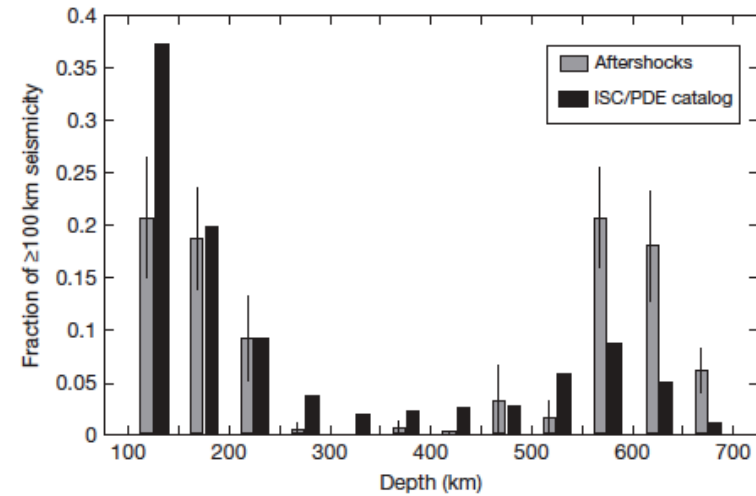
EA precursors manifestent la localisation de la déformation sous l'effet de la contrainte

## Distribution des répliques de séismes intermédiaires et profonds en fonction de la profondeur



*Frohlich, 2004*

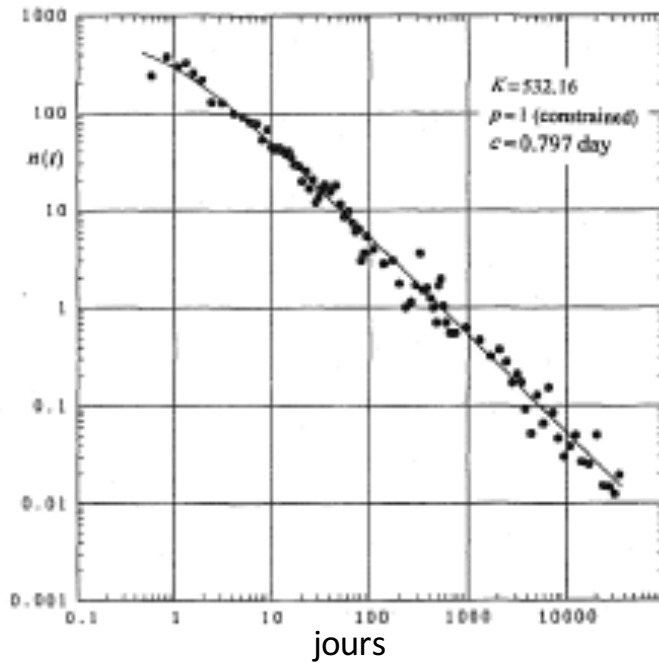
- Une seule réplique
- Plusieurs répliques



*Houston, ToG, 2015*

# Loi d'Omori pour les répliques des séismes superficiels

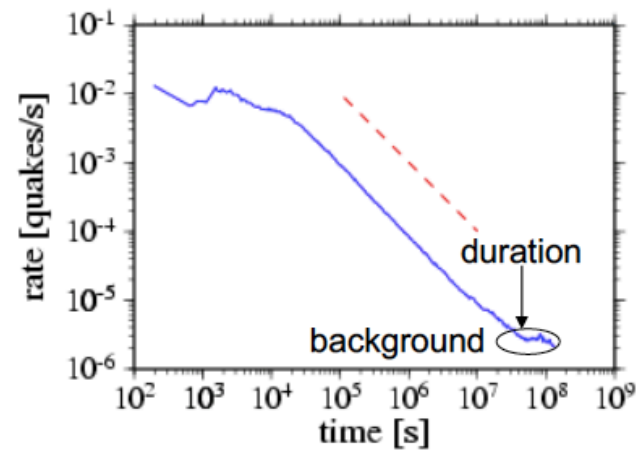
Séisme de Nobi (Japon), 1891  
Répliques ressenties



*Utsu et al., 1995*

$$\frac{dn(t)}{dt} = K/(t + c)^p$$

1995 Mw 6.9 Kobe, Japan



# Mécanismes physiques à l'origine des séismes intermédiaires et profonds

- Séismes intermédiaires:
  - Liés à la déshydratation de la serpentine
    - Plan supérieur probable
    - Plan inférieur - controversé
  - Déshydratation sert sans doute à la nucléation
    - Localisation de la déformation:
      - Rupture sur failles préexistantes?
    - Thermal run-away? (peu de répliques)
- Séismes profonds:
  - Liés à la transformation de phase olivine-spinelle
    - Localisation de la déformation avec phase de nucléation
    - Thermal run-away? (peu de répliques)
- Expériences de laboratoire:
  - Dans quelles conditions peut on observer des répliques?
- Sismologie:
  - Détection de micro-séismes précurseurs aux séismes intermédiaires et profonds?