

Anisotropie sismique et écoulement dans le manteau terrestre

4- Le manteau supérieur (fin)

Barbara Romanowicz

Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre

Collège de France

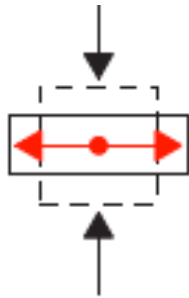
15 Novembre 2016

- Zones de subduction: observations et interprétations
- Différents systèmes de glissement de l'olivine
- Lois de déformations et anisotropie intrinsèque (CPO):
 - régimes de dislocation et diffusion
 - Migration de limites de grains, recristallisation
- Simulations numériques du développement de l'anisotropie intrinsèque dans le manteau supérieur

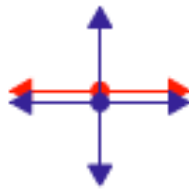
Déformation de l'olivine sèche - résultats expérimentaux

En rouge:
grand axe
de l'ellipse de
déformation

Compression uniaxiale

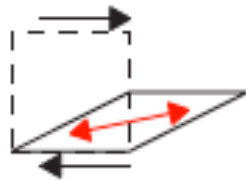


Slow axis
b-axis

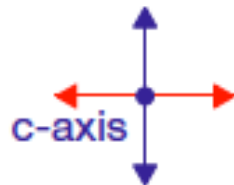


a-axis
c-axis fast plane

Cisaillement simple de
grande ampleur



Slow plane
b-axis



a-axis fast axis

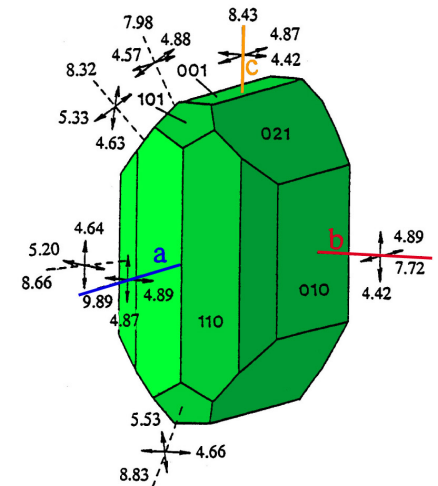
Cisaillement simple de
petite ampleur



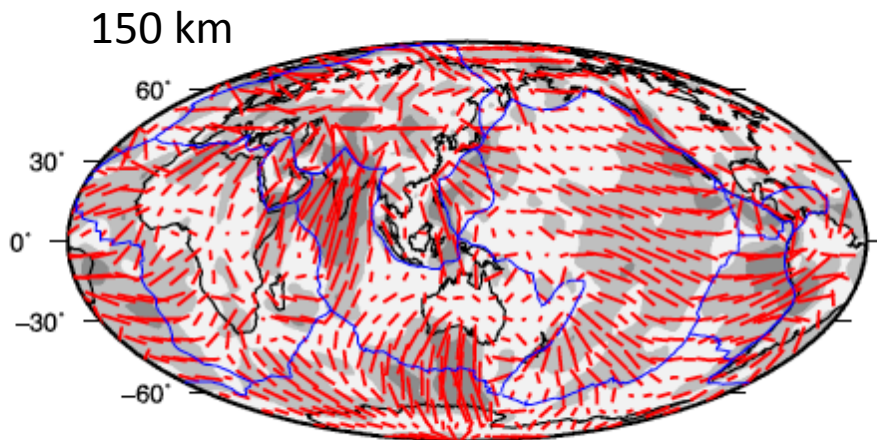
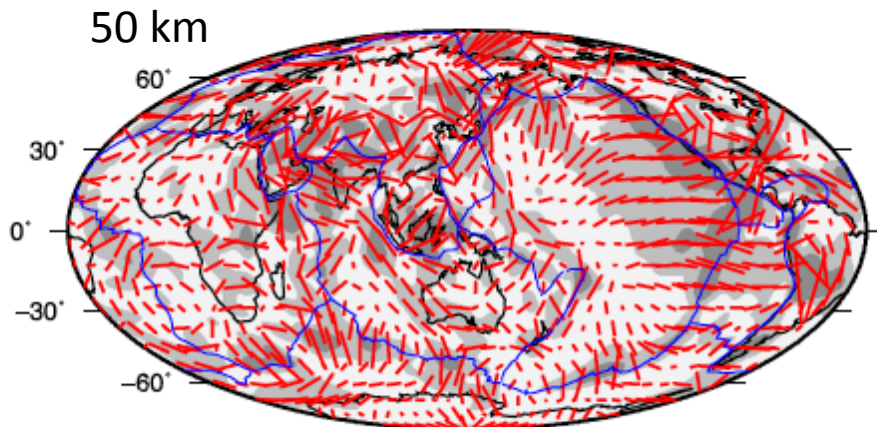
b-axis
Slow plane



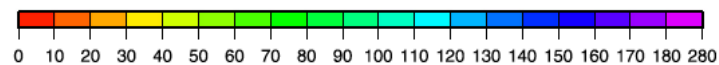
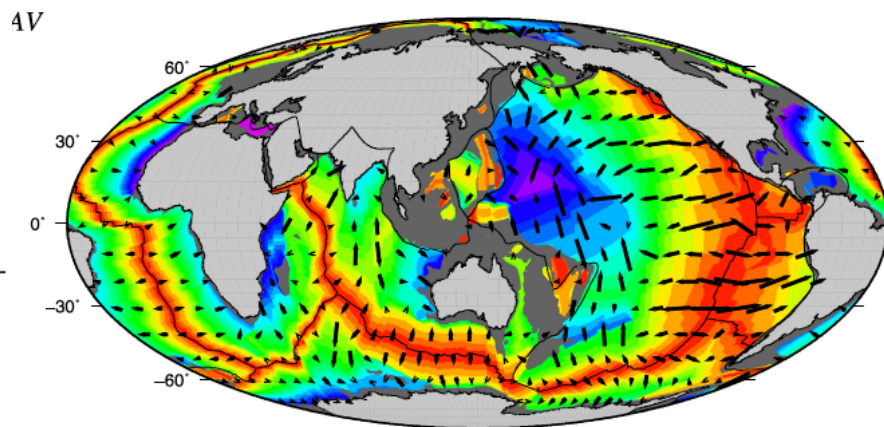
a-axis fast axis



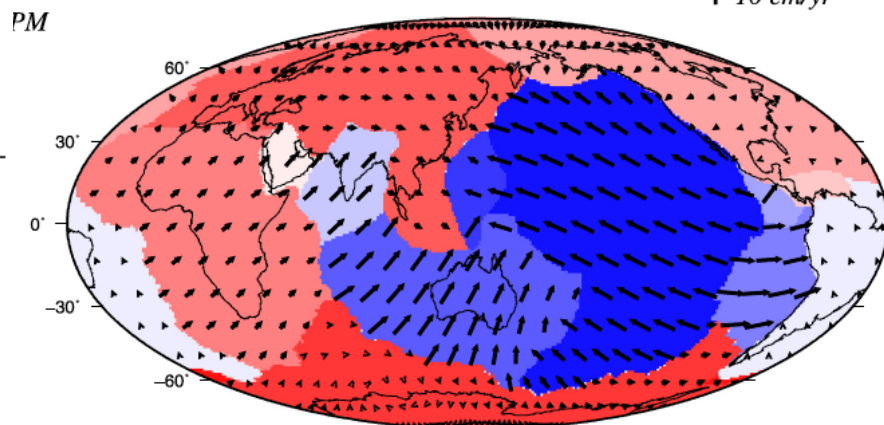
Anisotropie azimuthale | 4% peak



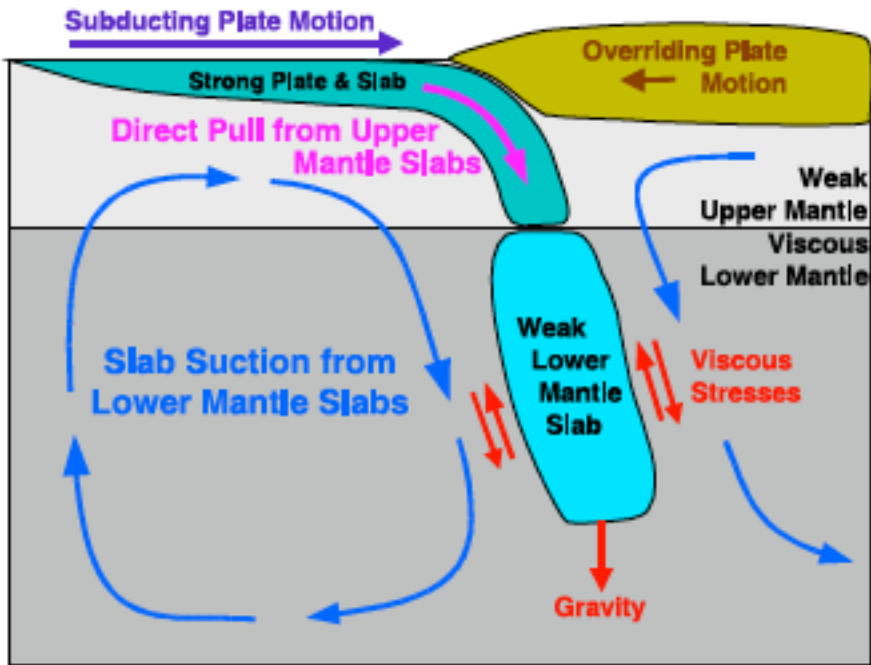
Directions absolues de plaques fossiles



| 10 cm/yr

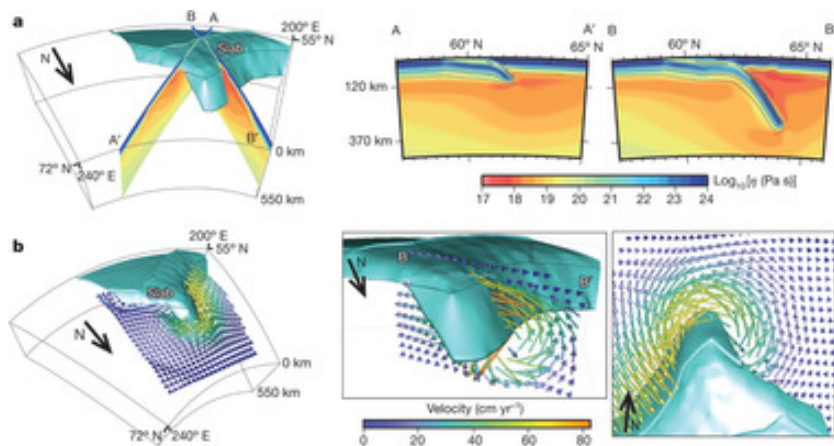


Directions absolues de plaques actuelles

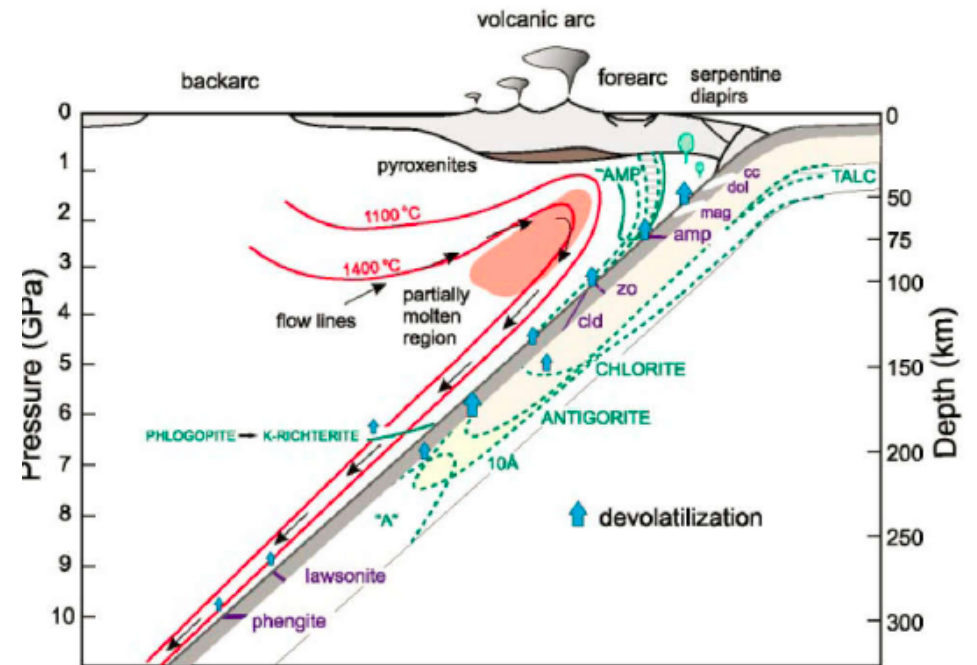


Conrad and Lithgow-Bertelloni, 2004

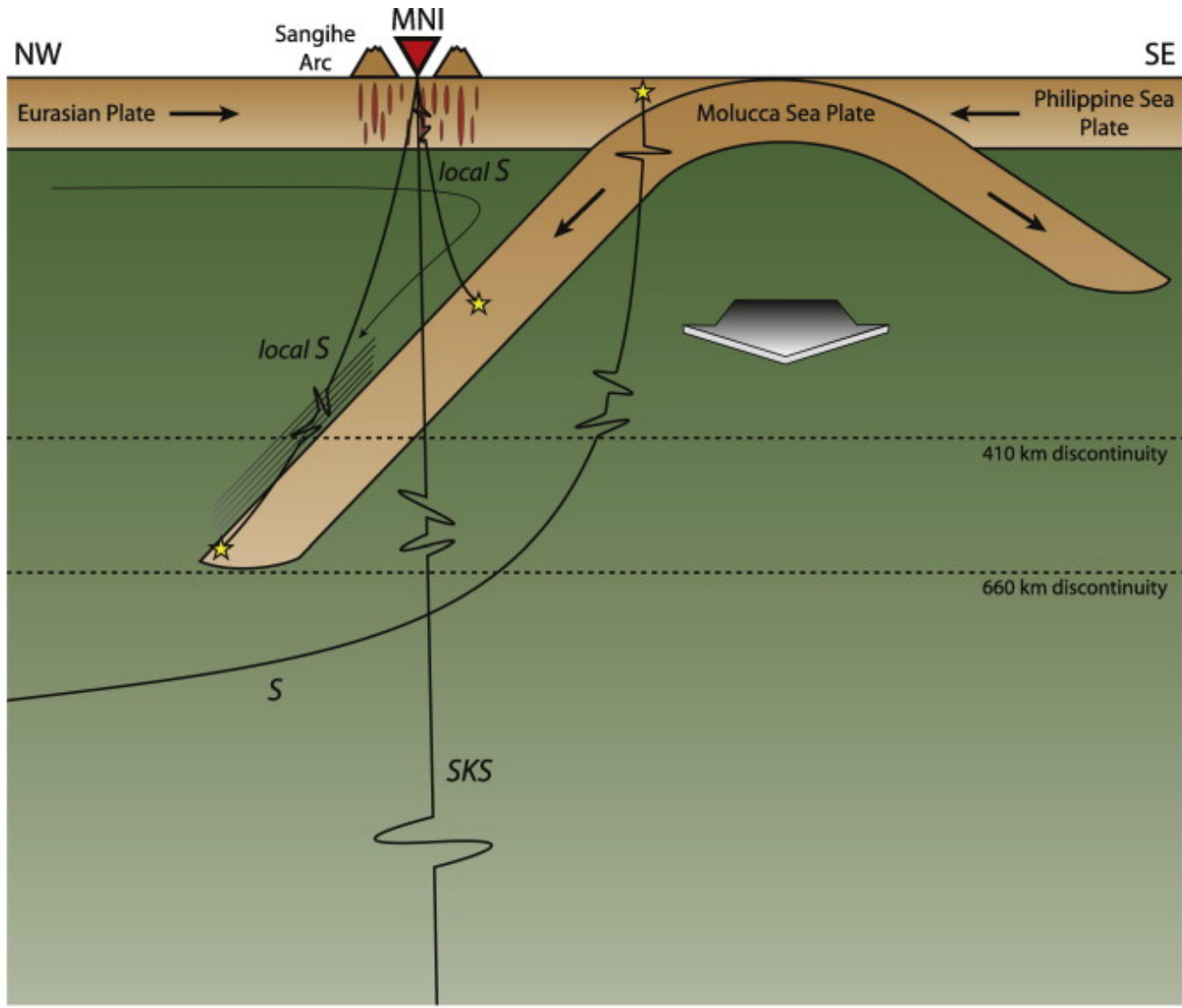
Anisotropie sismique et dynamique des zones de subduction



Jadamek and Billen, 2010



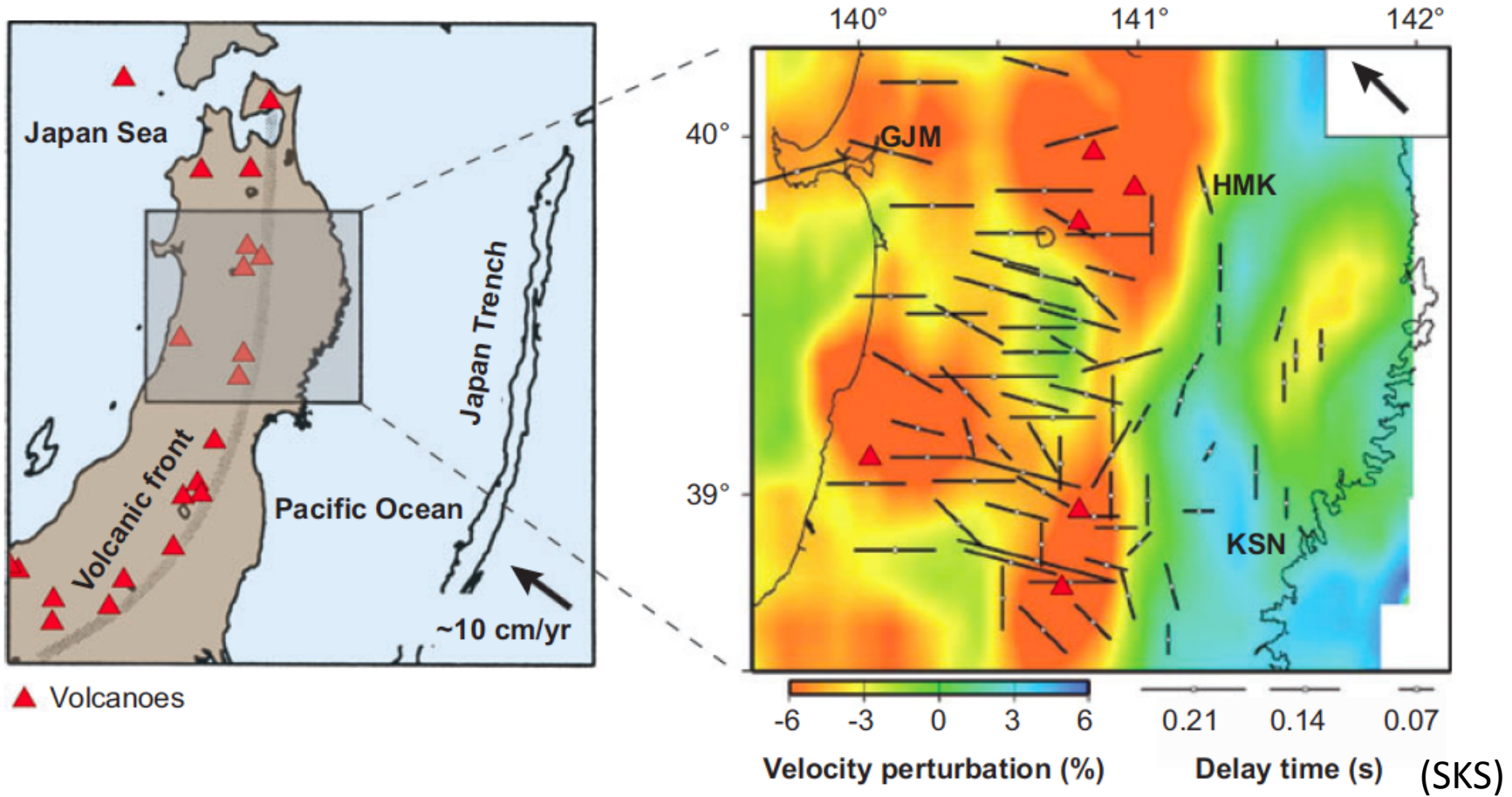
Poli and Schmidt, 2002



Di Leo et al., 2012, PEPI

Observations dans le "coin" mantellique

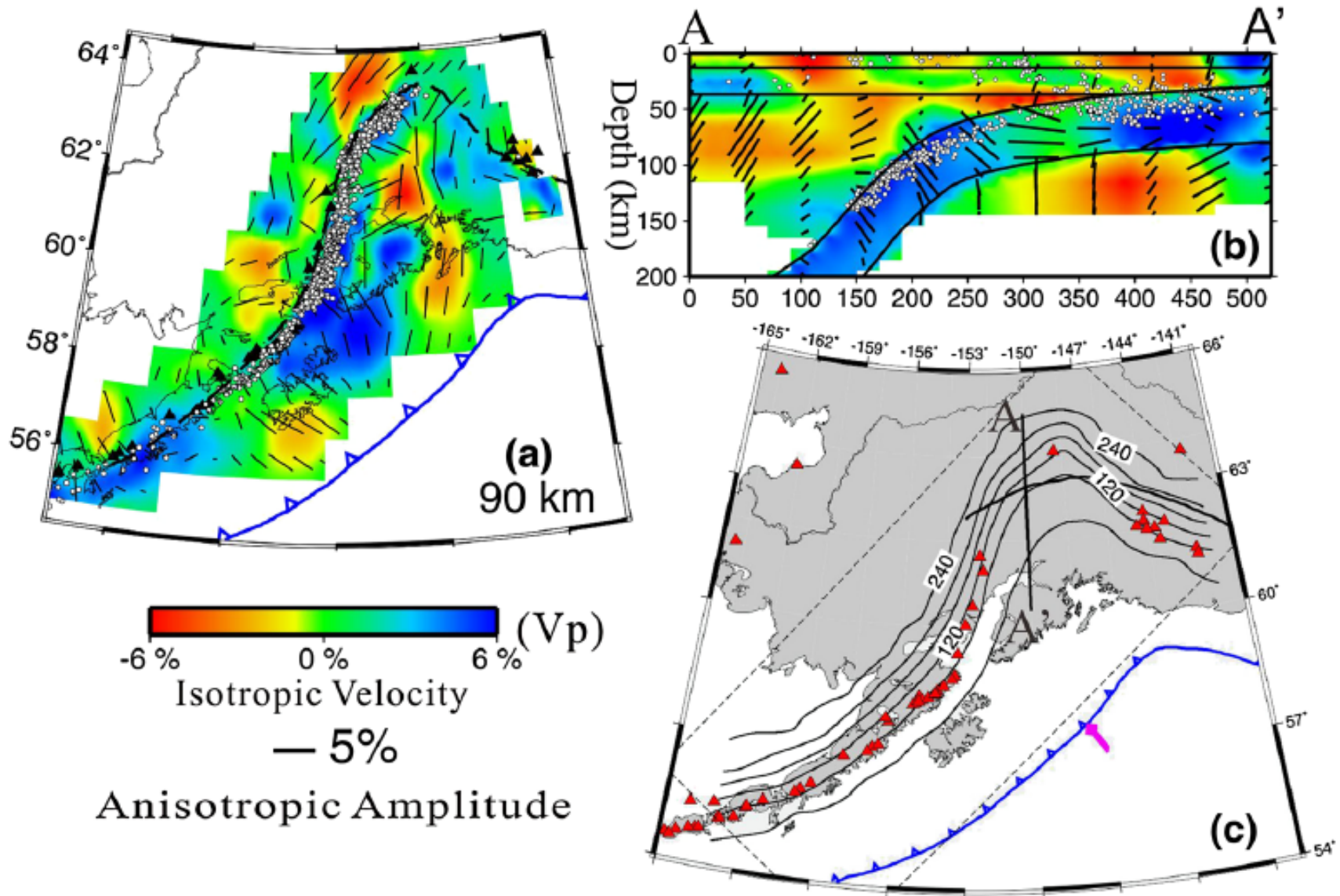
a



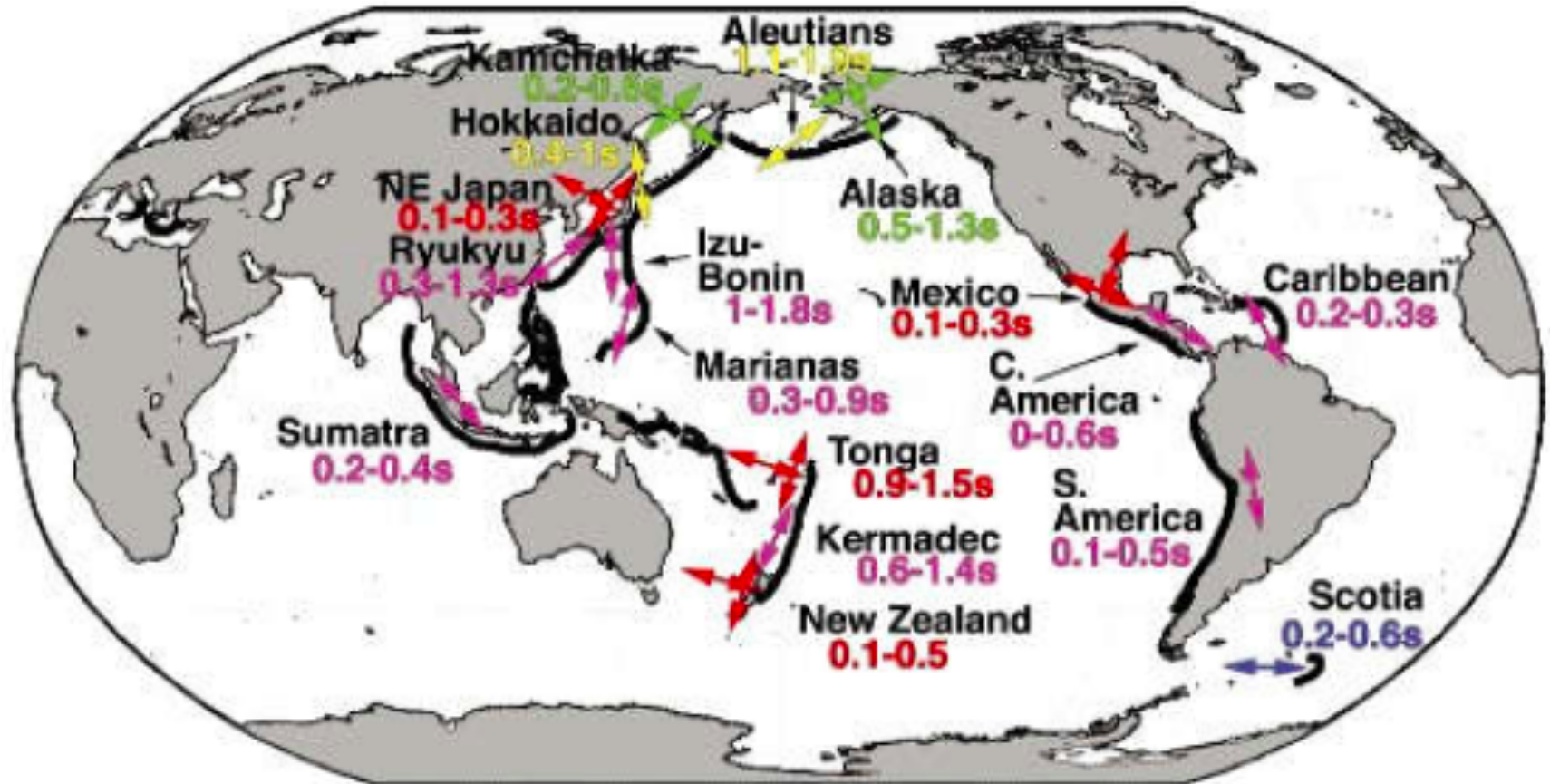
Kneller et al., 2005

Dans certaines zones de subduction, on observe une transition de la direction de l'axe rapide parallèle à la ligne de la fosse au voisinage de la fosse -> axe rapide perpendiculaire à la ligne de la fosse plus loin de celle-ci

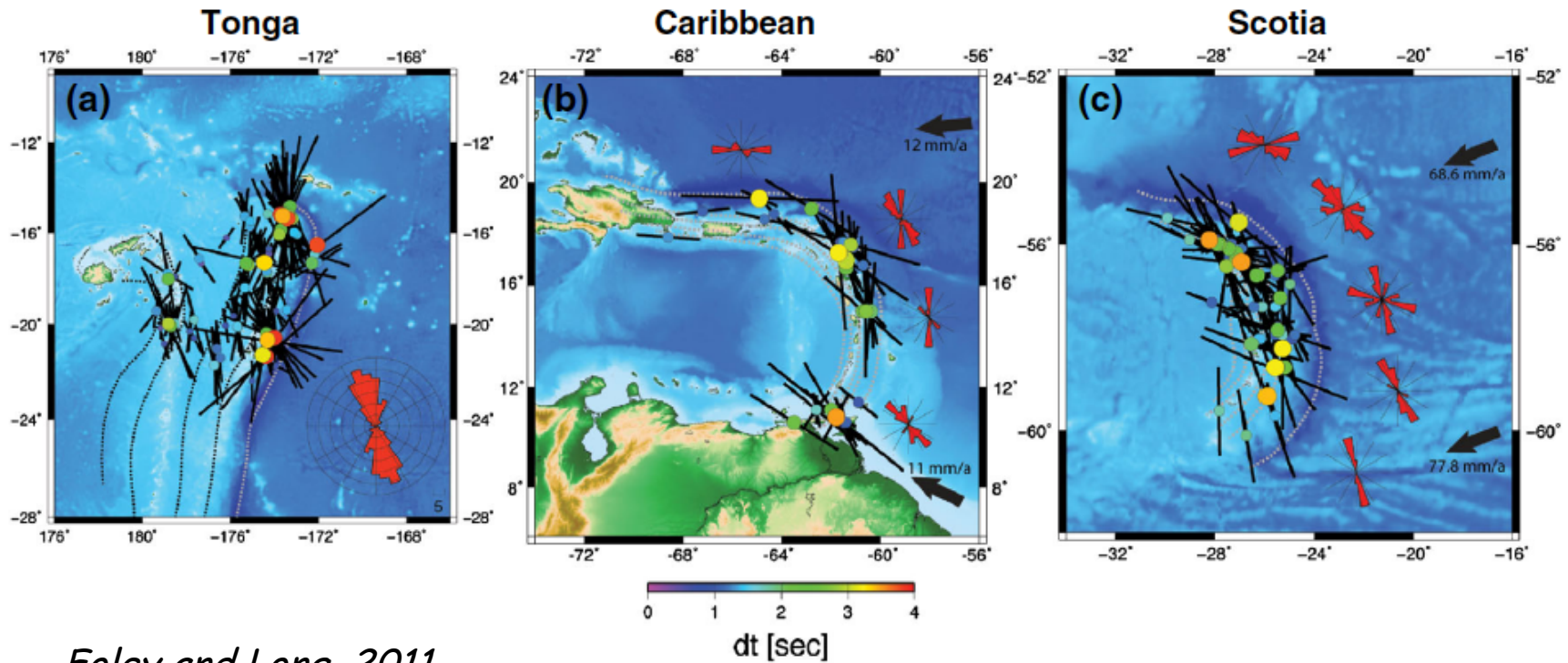
Tomographie anisotrope d'ondes P : Alaska



Observations dans la partie du manteau au dessus de la plaque plongeante - "Mantle wedge"



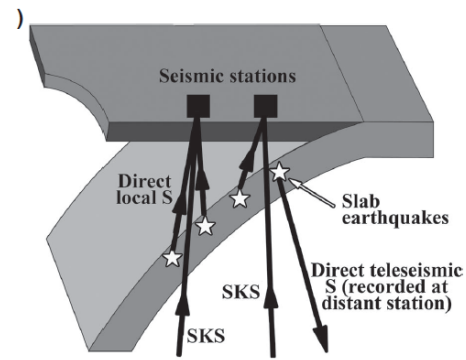
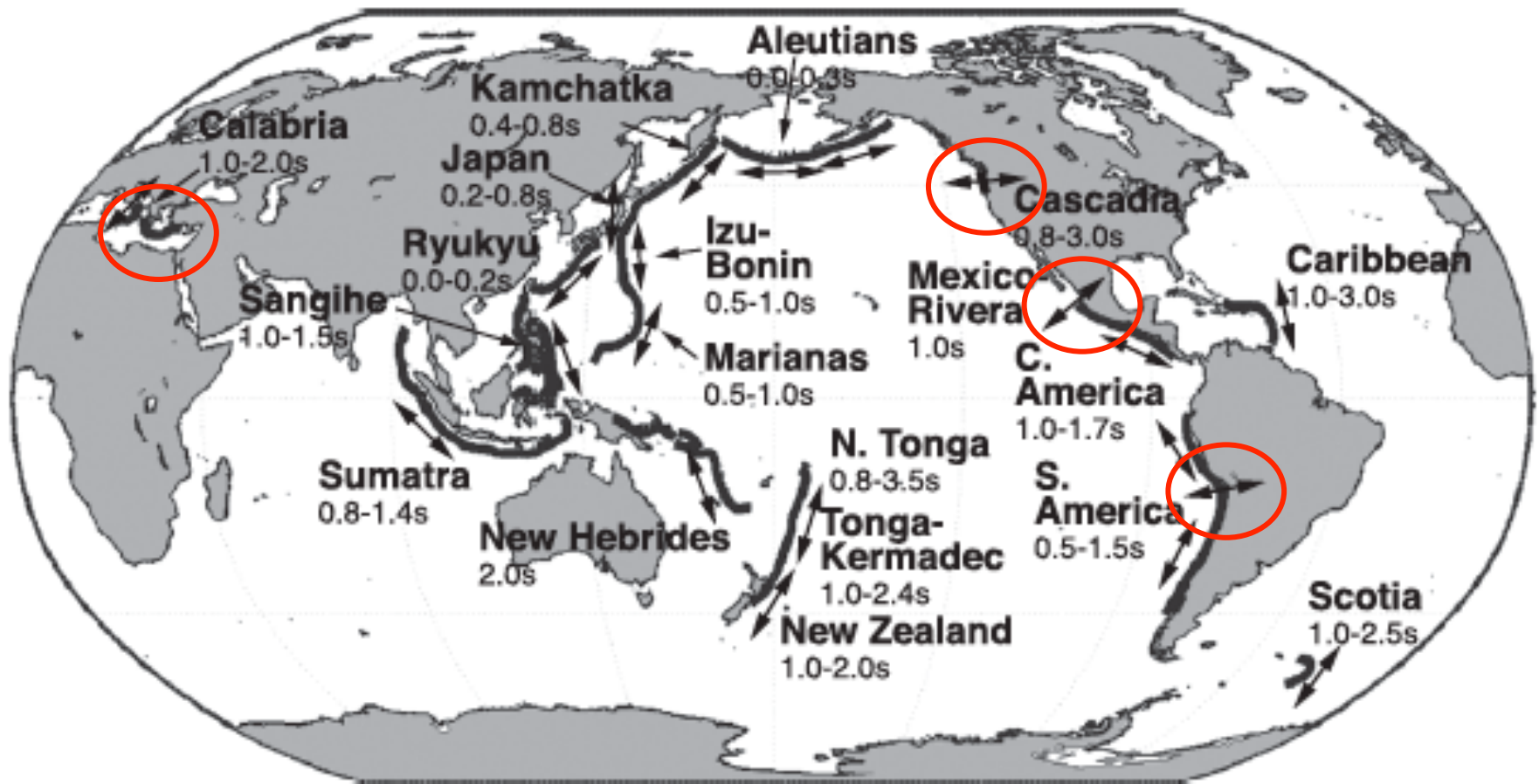
Anisotropie sous la plaque par l'étude des ondes S télésismiques engendrées dans la plaque



Foley and Long, 2011

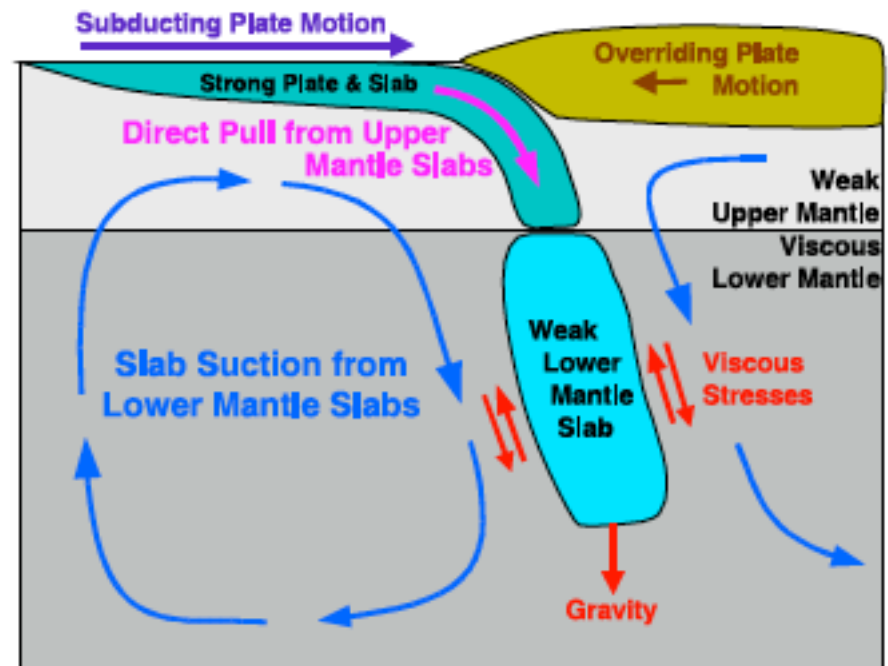
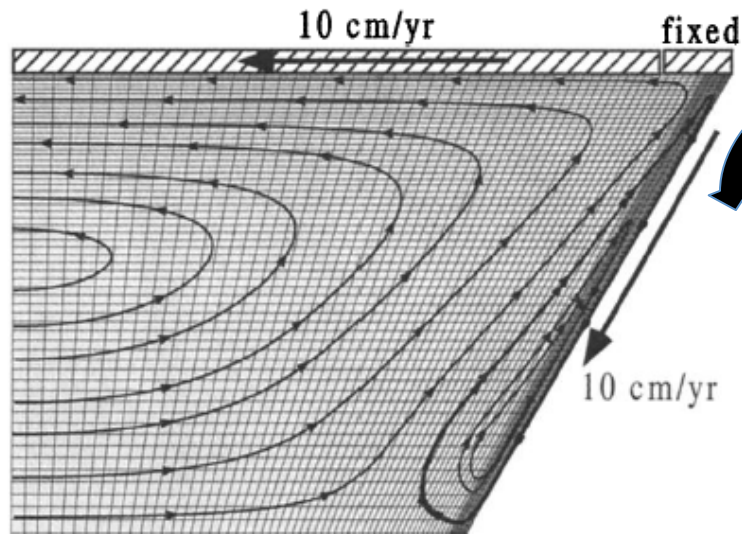
Lynner and Long, 2013

Anisotropie dans le manteau sous la plaque plongeante



- >Ondes S telesismiques
- >Ondes SKS

Écoulement 2D "classique" prédit un axe rapide perpendiculaire à la fosse, aussi bien au dessus et au dessous de la plaque



Fischer et al., 2000, JGR

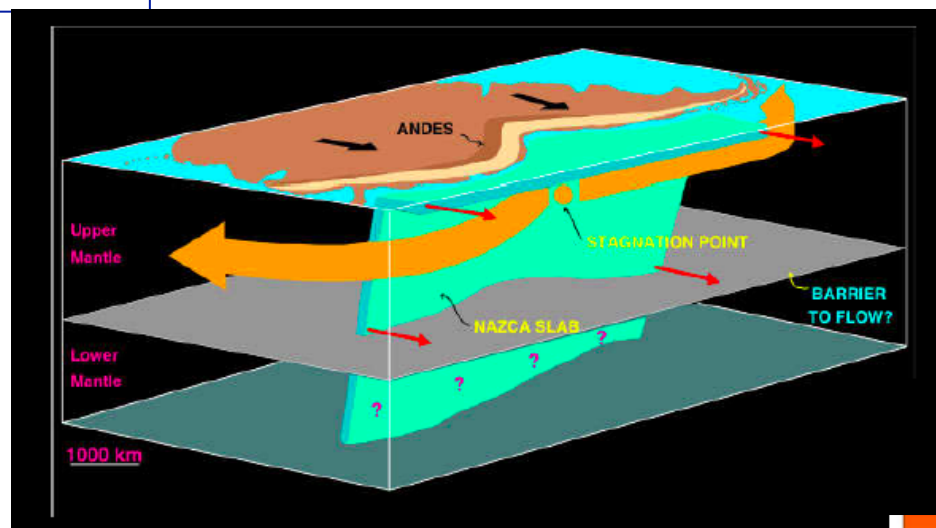
Conrad and Lithgow-Bertelloni, 2005

Anisotropie sous la plaque: modèles proposés

- Pour expliquer l'alignement des axes rapides // à la fosse, différents modèles sont proposés:
 - (I) Écoulement parallèle à la plaque (Russo and Silver, 1994; Long and Silver, 2008)
 - (II) Modèle de déformation de "type B" de l'olivine (Jung et al., 2009)
 - (III) Anisotropie transverse inclinée (entraînement de l'asthénosphère) (Song and Kawakatsu, 2012)

I - Ecoulement sous la plaque Nazca

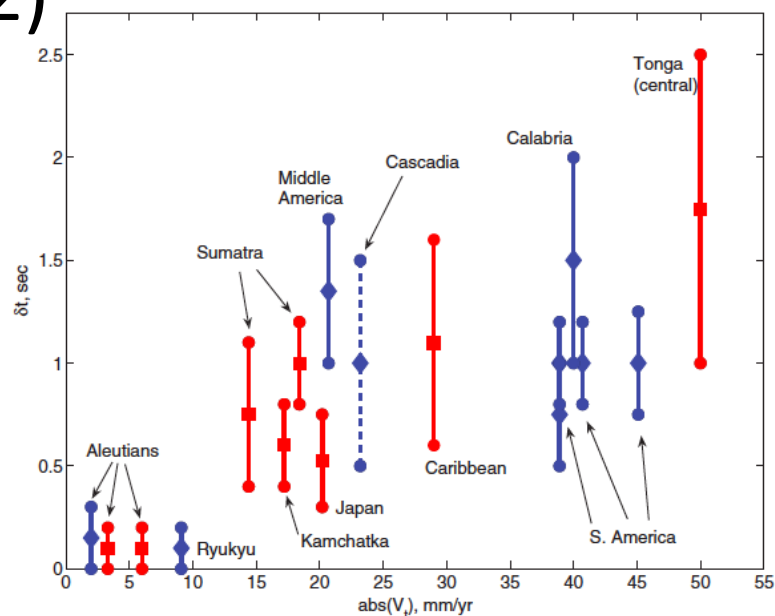
(1)



Russo and Silver, 1994

Relation entre le temps de splitting et la vitesse de recul de la fosse

(2)



Long and Silver, 2008

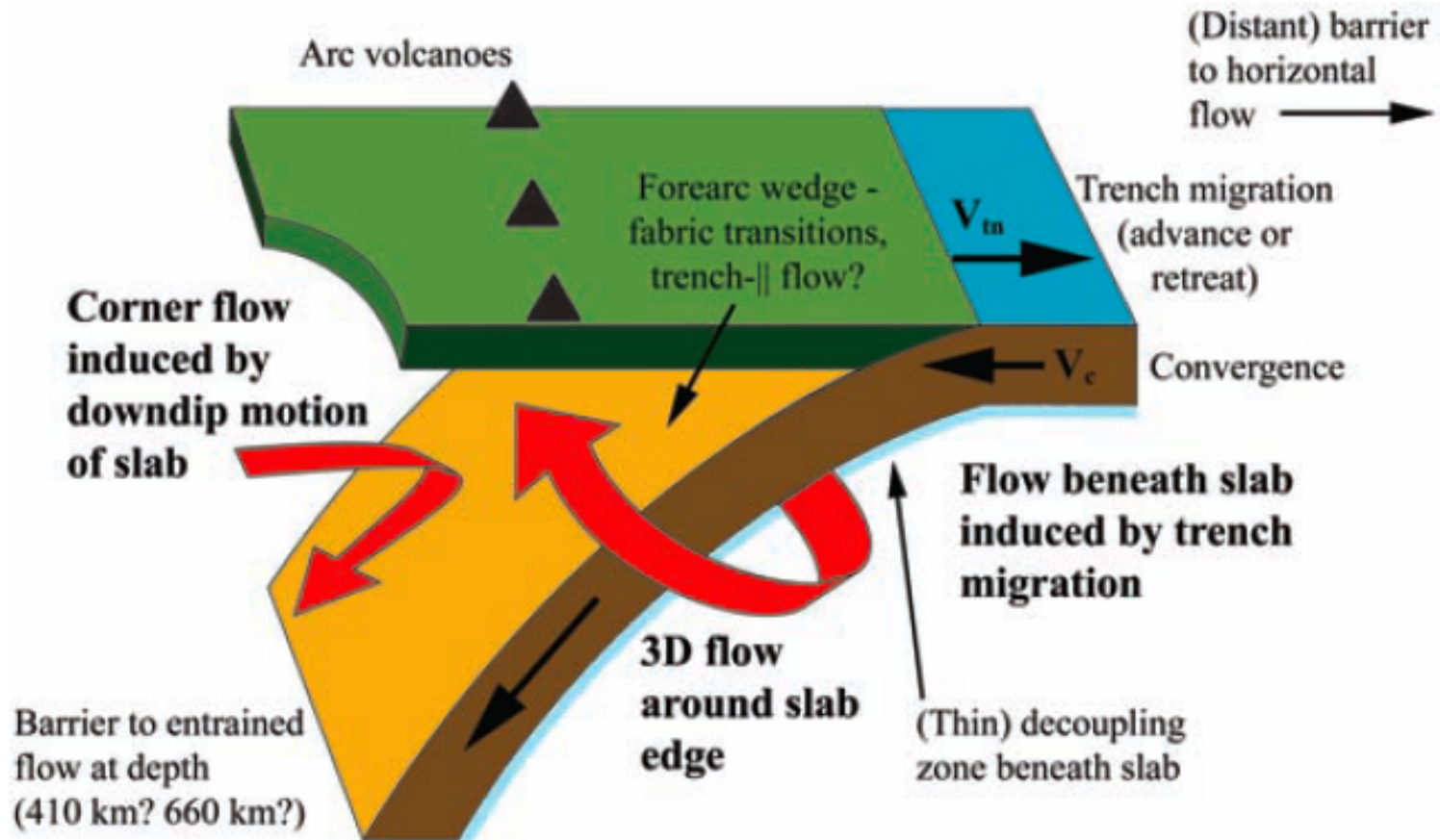
L'écoulement parallèle à la fosse sous la plaque serait dû aux effets de:

- Recul de la fosse +
- Résistance à l'écoulement par le bas (viscosité plus élevée au bas de la zone de transition du manteau)

Ce modèle suppose un gradient vertical dans la vitesse de l'écoulement, pour obtenir une déformation parallèle à la fosse

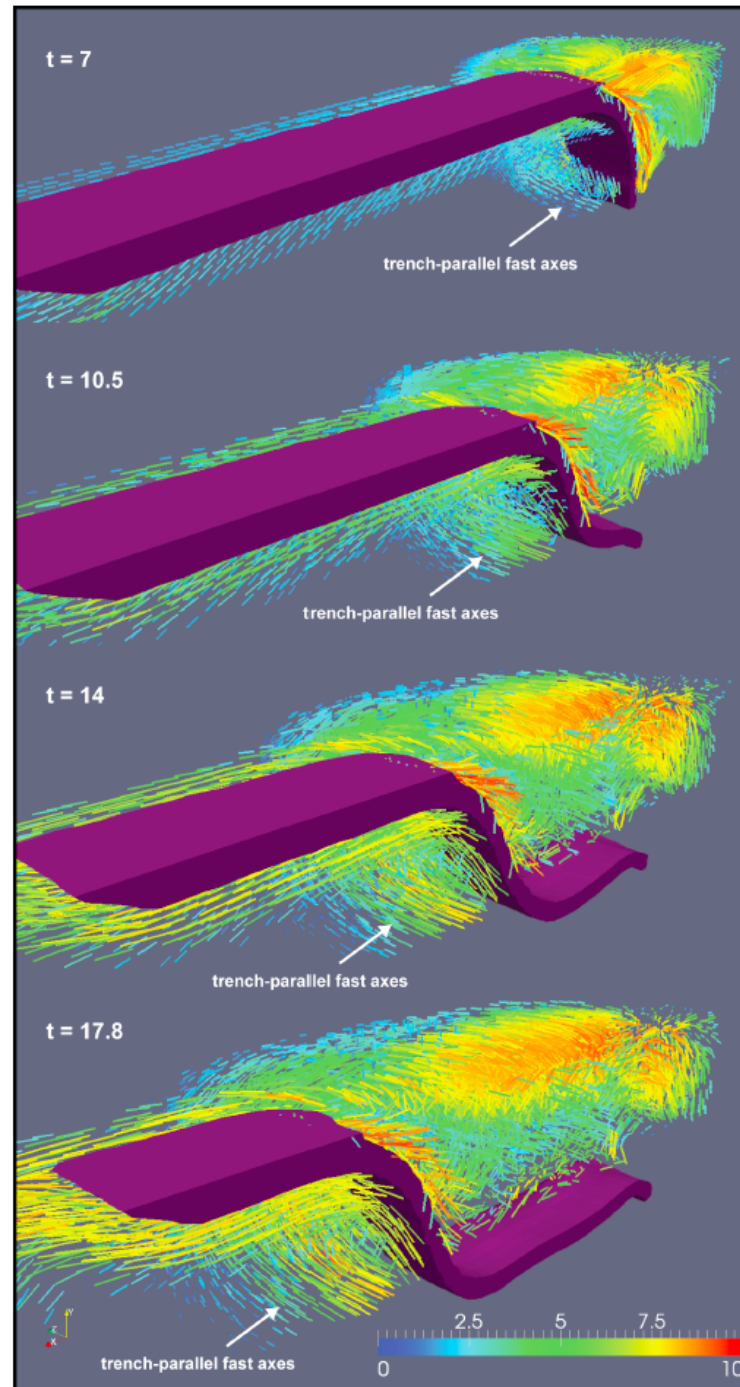
Écoulement parallèle à la plaque: interprétation

(Russo and Silver, 1994; Long and Silver, 2008)



Russo and Silver, 1994
Long and Silver, 2008

Modélisation numérique du développement de CPO due à un modèle 3D de déformation avec rhéologie non-newtonienne

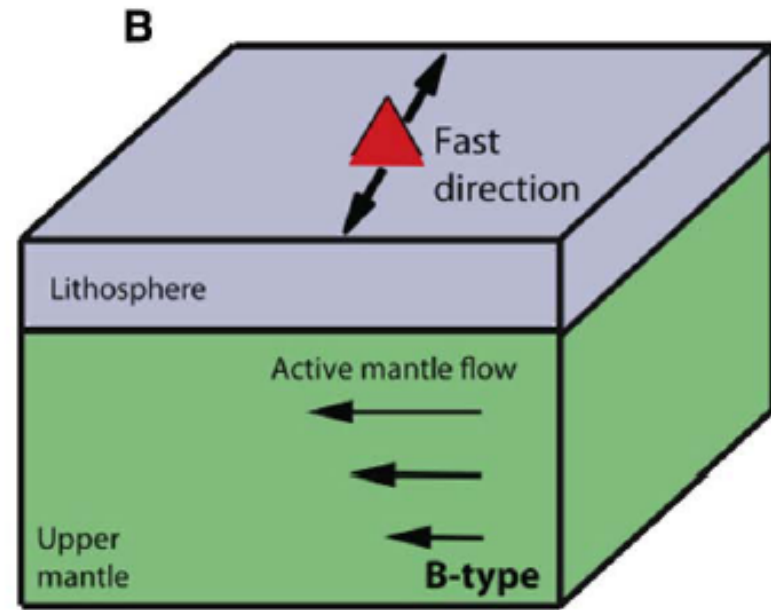
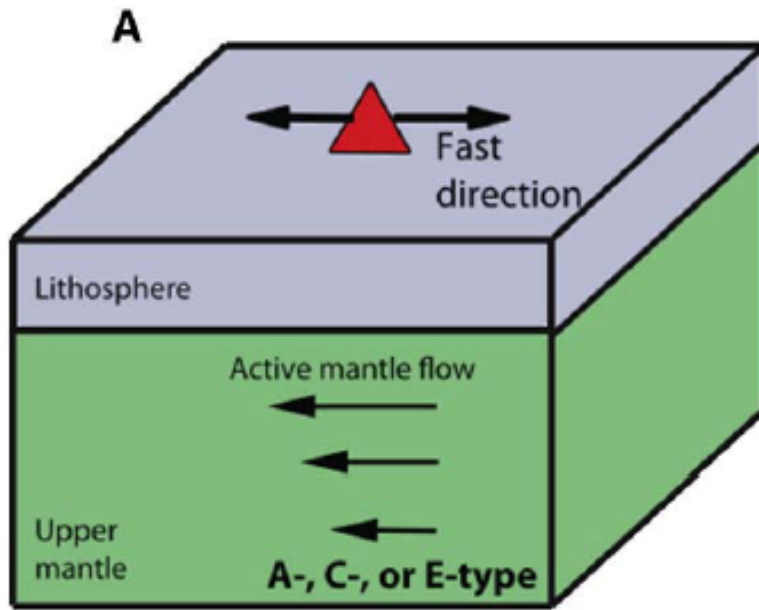


Résultats:

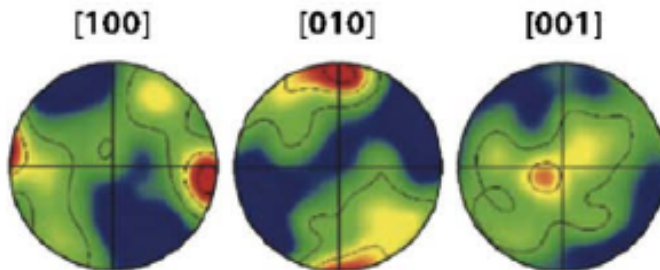
La magnitude du splitting SKS prédit dépend de la distance de migration de la plaque et non de la vitesse de celle-ci

*Faccena and
Capitanio, 2012, GRL*

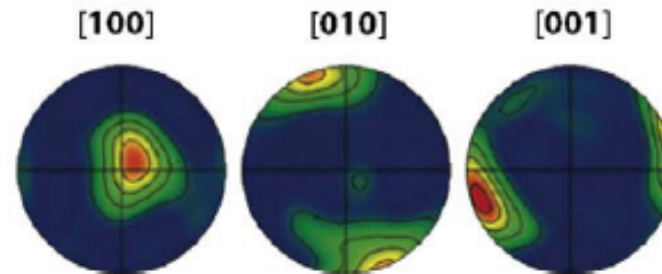
(II) Modèle de déformation de "type B" de l'olivine (Jung et al., 2009, NatGeo)



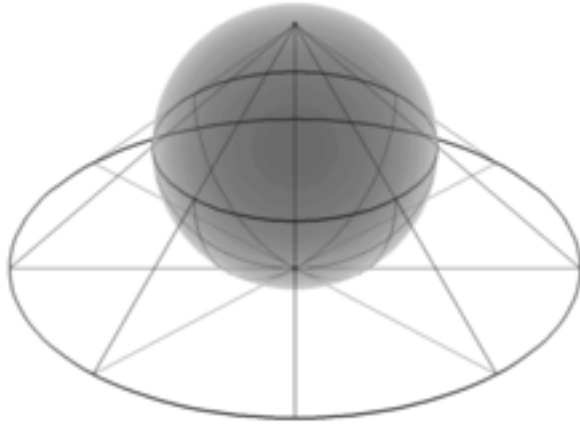
Olivine A-type



Olivine B-type

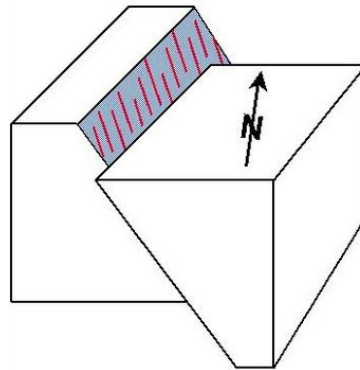


Projection stéréographique



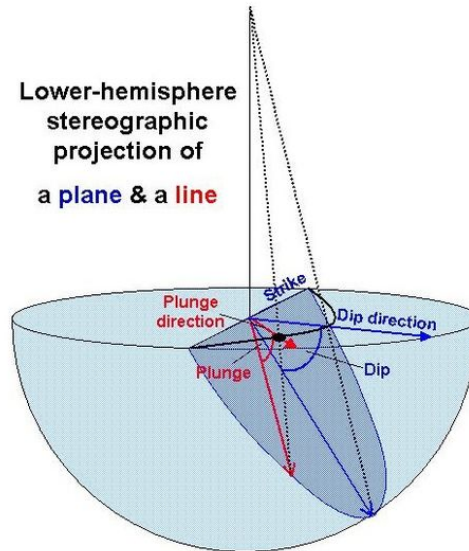
1) Situation à représenter

Oblique normal fault with **slickensides** on the fault plane



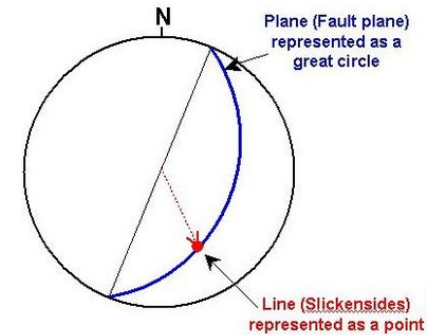
2) Projection d'un plan et d'un vecteur

Lower-hemisphere stereographic projection of a **plane** & a **line**

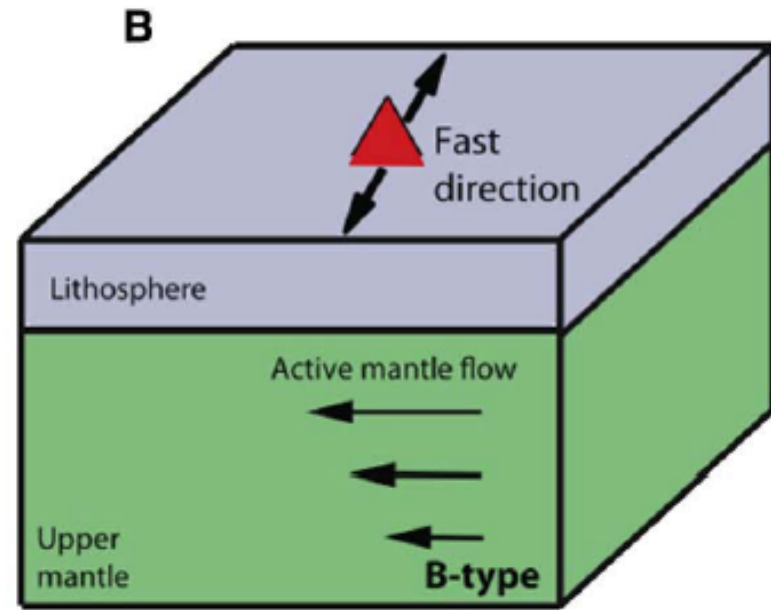
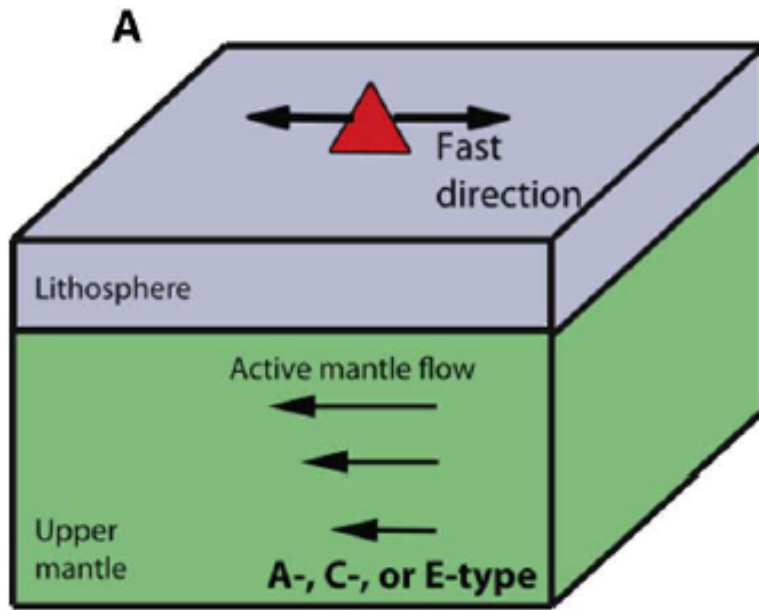


3) Représentation stéréographique

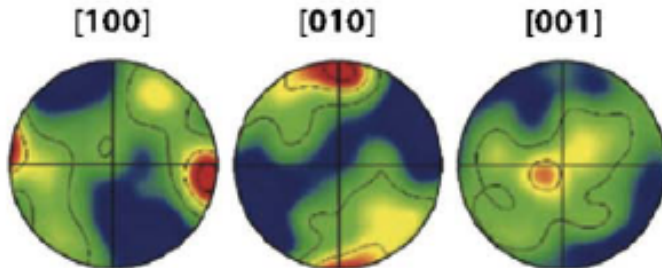
Representation of 3D structures on a plane



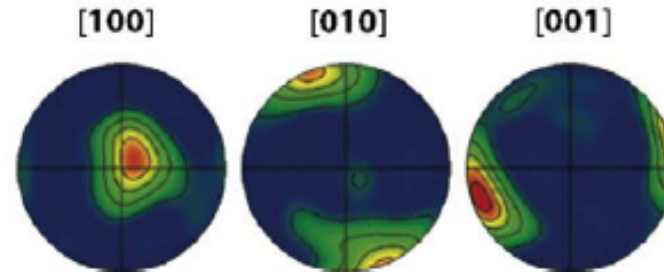
(II) Modèle de déformation de "type B" de l'olivine (Jung et al., 2009, NatGeo)



Olivine A-type

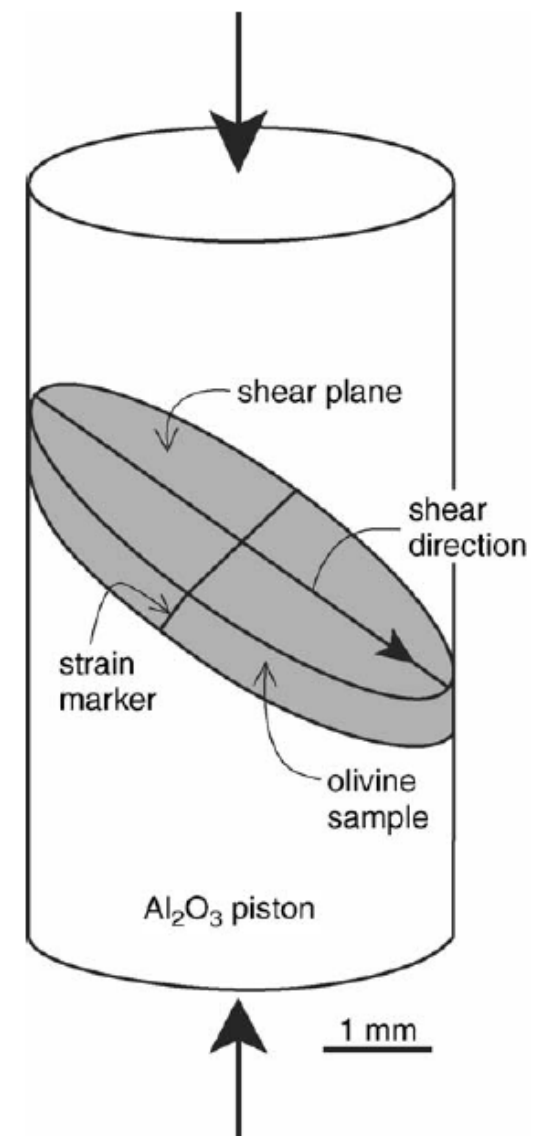
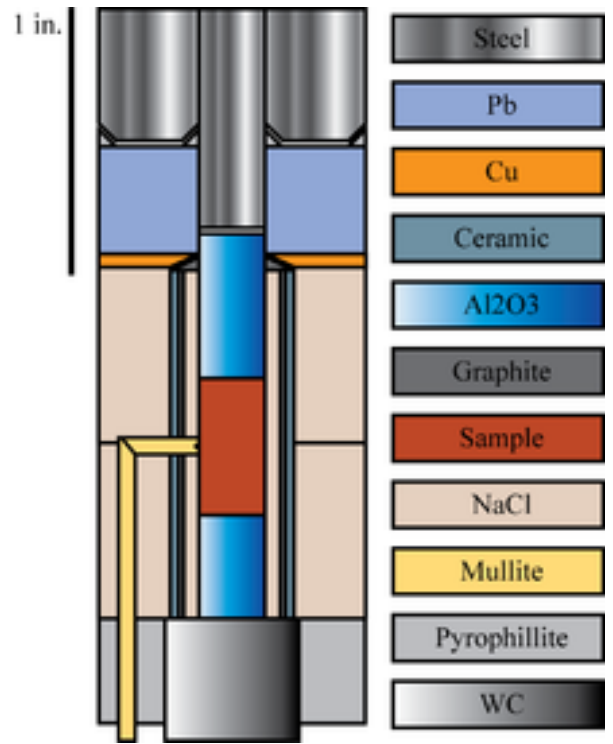


Olivine B-type



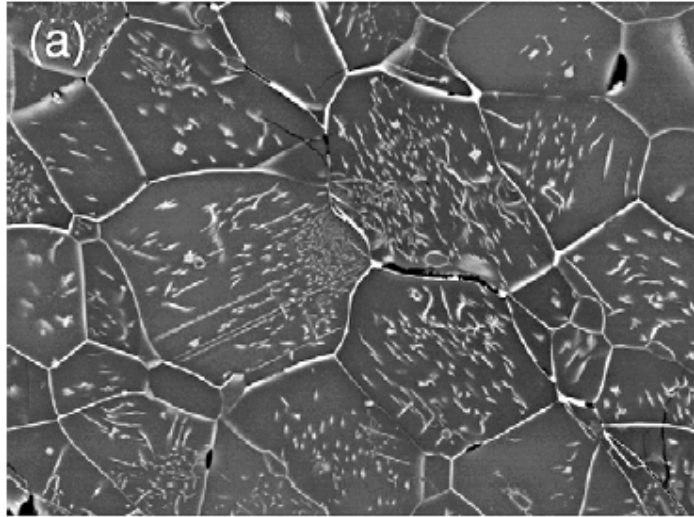
- Expériences de laboratoire sur la déformation de l'olivine:
 - >> expériences en cisaillement simple dans un appareil de Griggs (~1936)
 - >> les plans de glissement principaux changent avec le contenu en eau de l'échantillon
 - > ce mécanisme est plausible dans le manteau: la quantité d'eau enfermée dans la roche est plus grande à plus forte pression (augmentation de 2 ordres de magnitude entre 0,3 GPa et 3 GPa)

Appareil de Griggs



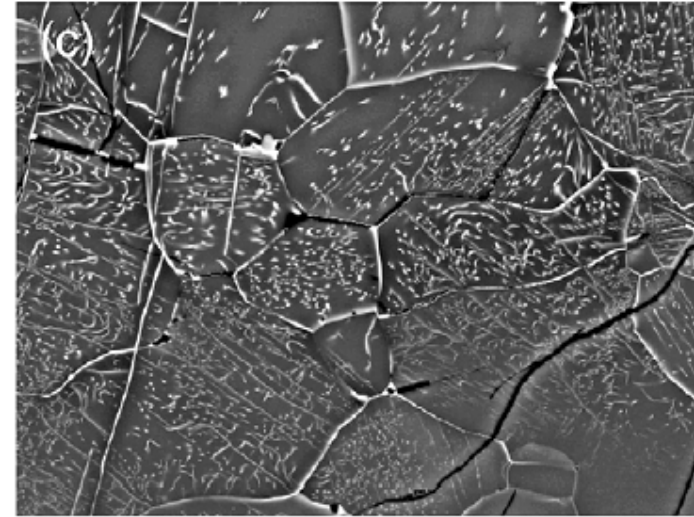
Katayama and Karato, 2006

Type B

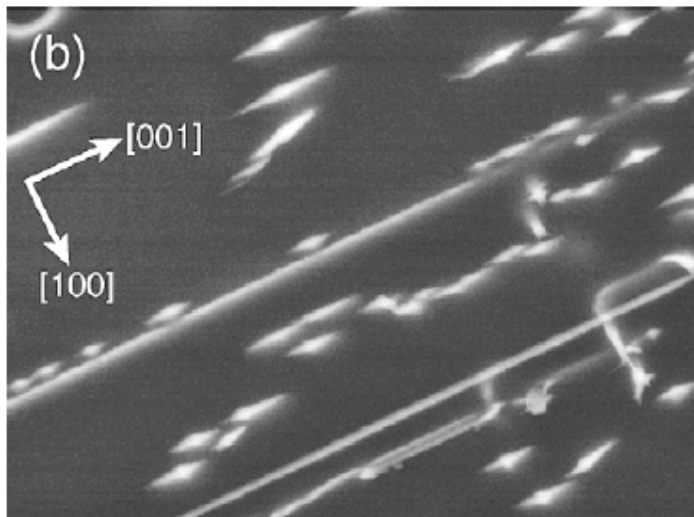


10 μm

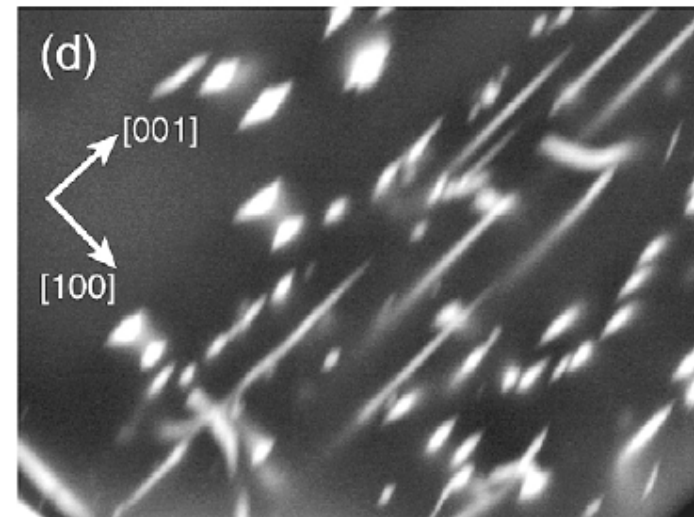
Type C



10 μm



1 μm



1 μm

Microstructures de dislocation dans les échantillons déformés

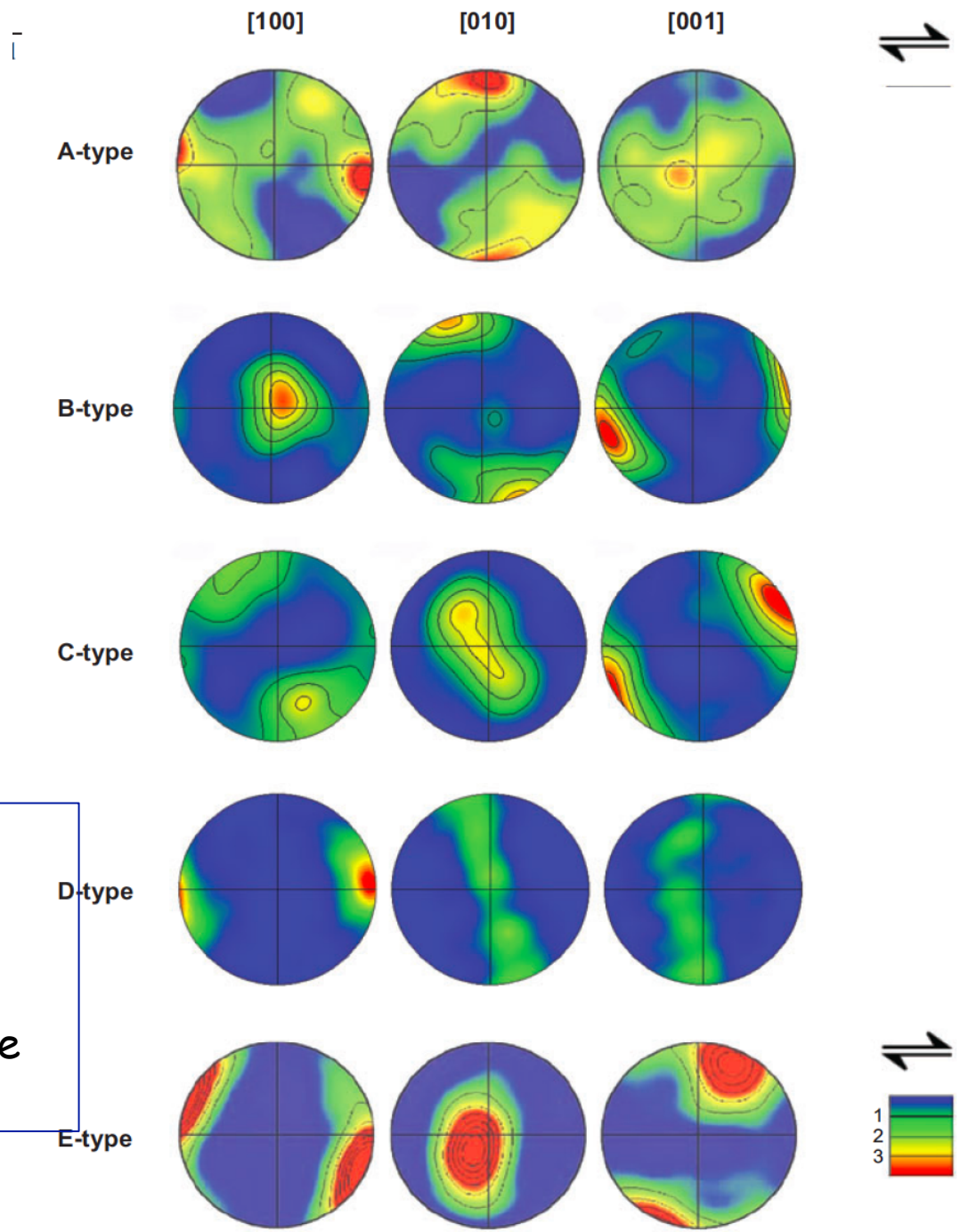
Images SEM

Katayama and Karato, 2006

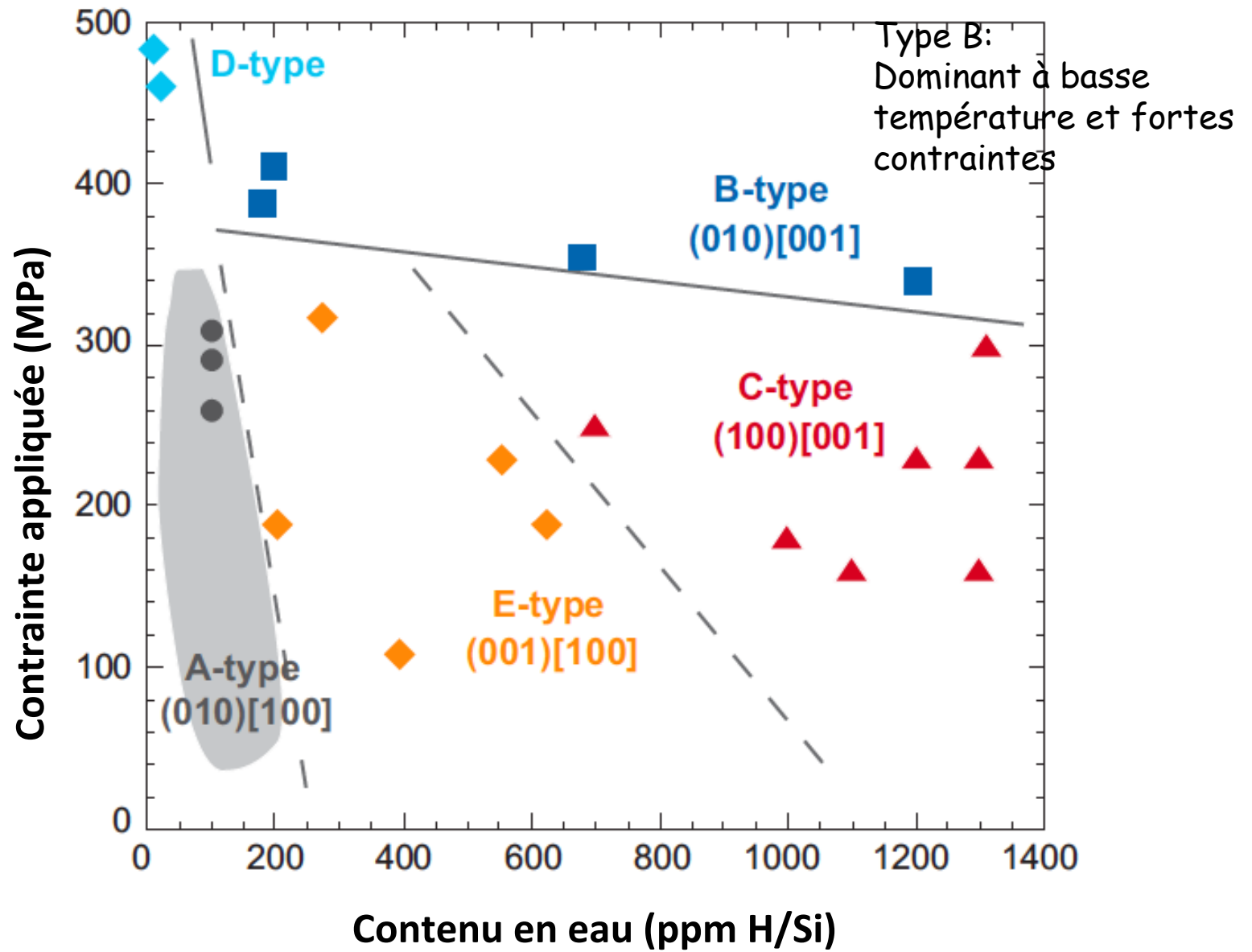
Différents types de déformation de l'olivine suivant les conditions expérimentales (contenu en eau, et contrainte appliquée)

- La pression peut aussi jouer un rôle

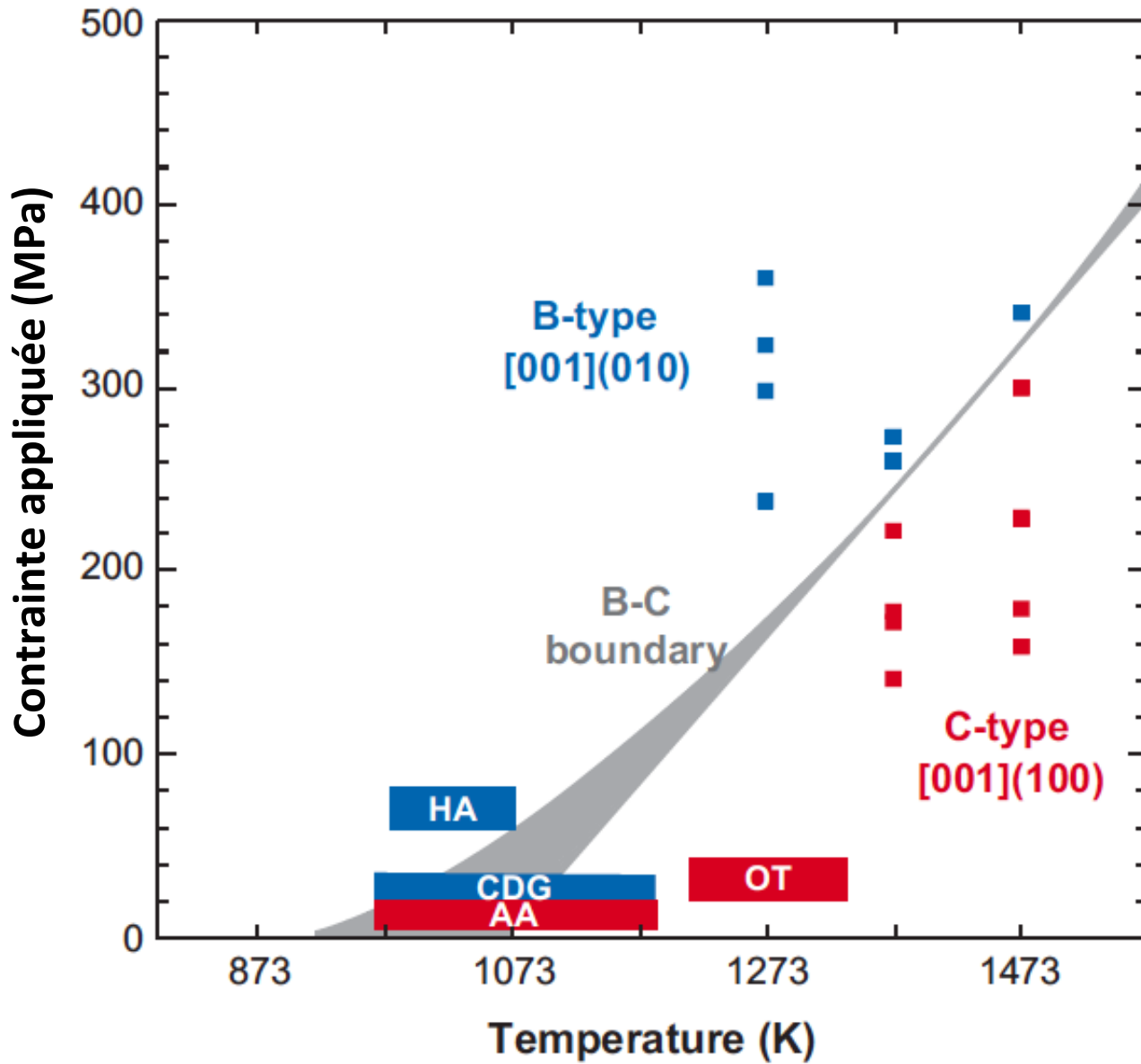
→ Effet sur le splitting:
 - Différence importante entre type A et B
 - Différences plus subtiles entre A,C,D,E



T ~ 1470-1570 K

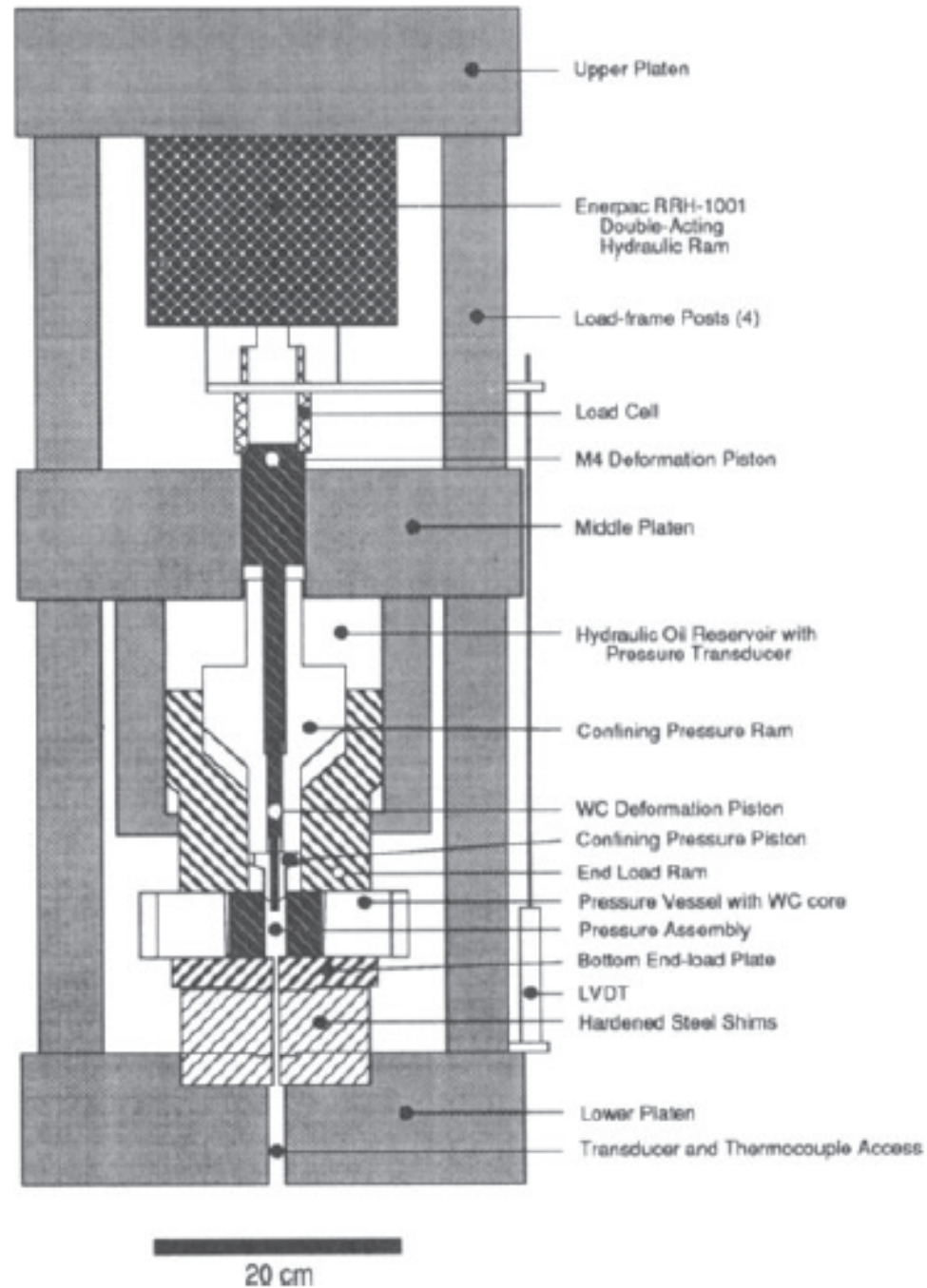


Pour une teneur en eau fixe: $C_w \sim 1500$ ppm H/Si



Appareil de Griggs
 avec
 pistons en alliage
 de tungstene-carbone
 -> pressions >3GPa
 (U. Calif. Riverside):
 Milieu de confinement:
 CsCl

Hautes pressions,
 Faibles contraintes
 Deformations en
 cisaillement importantes



Tingle et al., 1993

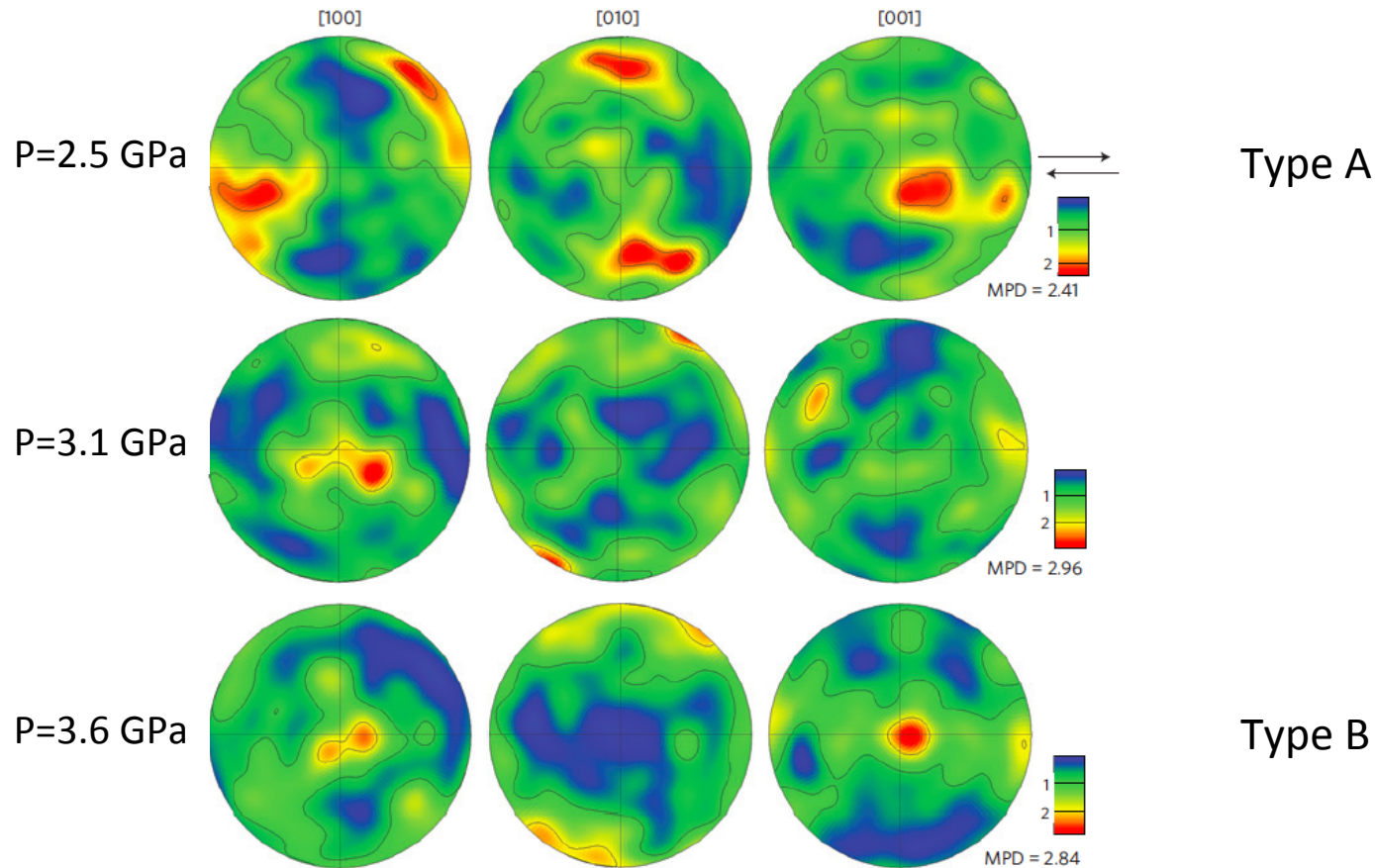
- La transition type A→type B est aussi observée à haute pression (3GPa) sur des échantillons d'olivine sèche (*Jung et al. , 2009*):
- Experiences à $T=1300^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon} \sim 2-6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
 - Déformations en cisaillement atteintes : $\epsilon \sim 3-6$

Table 1 | Experimental conditions and results.

Run No.	P (GPa)	T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	Fabric type	Shear strain (γ)	Differential stress (MPa)	Strain rate (s^{-1})	Water content (p.p.m. H/Si)
GB328	2.5	1,290	1,300	A	3.0 ± 0.3	120	6×10^{-5}	UD
GB323	3.1	1,270	1,300	B	3.0 ± 0.3	150	2×10^{-5}	UD
GB325	3.1	1,270	1,300	B	4.0 ± 0.5	250	6×10^{-5}	90 ± 30
GB335	3.6	1,300	1,290	B	6.0 ± 0.5	390	6×10^{-5}	UD

T_1 and T_2 represent the temperature near the top and bottom of the specimen, respectively. Differential stress was measured with an external load cell. Water content was measured by the Nicolet 6700 FTIR spectrometer with a continuum infrared microscope and was estimated using the Paterson calibration²⁷. UD refers to 'undetectable from the FTIR'. See Fig. 1 for FTIR spectra.

Distribution des axes des cristaux d'olivine dans les échantillons à teneur d'eau infinitésimale



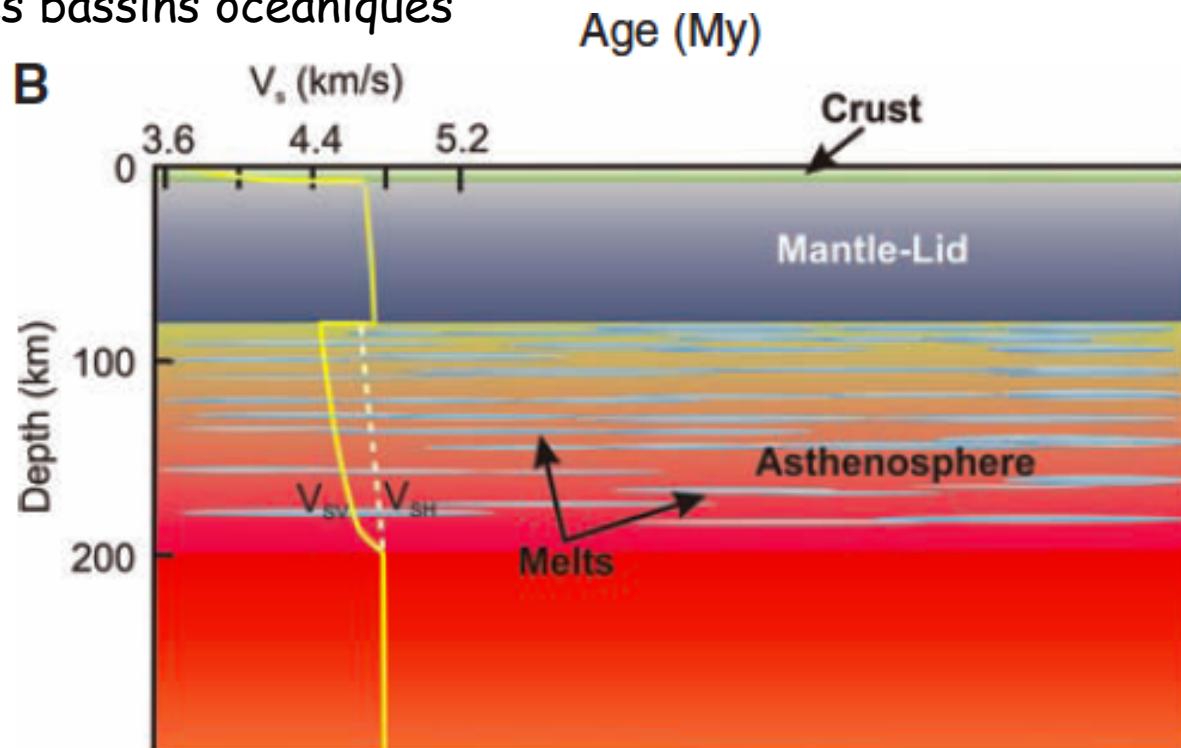
=> Le CPO de type B de l'olivine peut être observé aussi bien sous la plaque (hautes pressions, conditions sèches) que dans le "coin" au dessus de la plaque (conditions humides, basses pressions, $h < 75\text{km}$)
 => Remarque: on trouve du type B dans des peridotites naturelles

Inconvénient de l'interprétation par le mécanisme de déformation de l'olivine de type B:

-> le comportement de type A est en très bon accord avec les observations dans les bassins océaniques

- (III) Anisotropie radiale inclinée (entraînement de l'asthénosphère) (*Song and Kawakatsu, 2012*)

Modèle de "Mille Feuilles" (Kawakatsu et al., 2009) asthénosphère dans les bassins océaniques



Song et Kawakatsu suggèrent que l'asthénosphère est fortement couplée avec la plaque et "plonge" avec celle-ci dans la zone de subduction

Motivation: dans certaines zones de subduction à inclinaison faible (Cascadia, Chili du Sud): axe rapide SKS orienté perpendiculairement à la fosse

Song and Kawakatsu (2012):

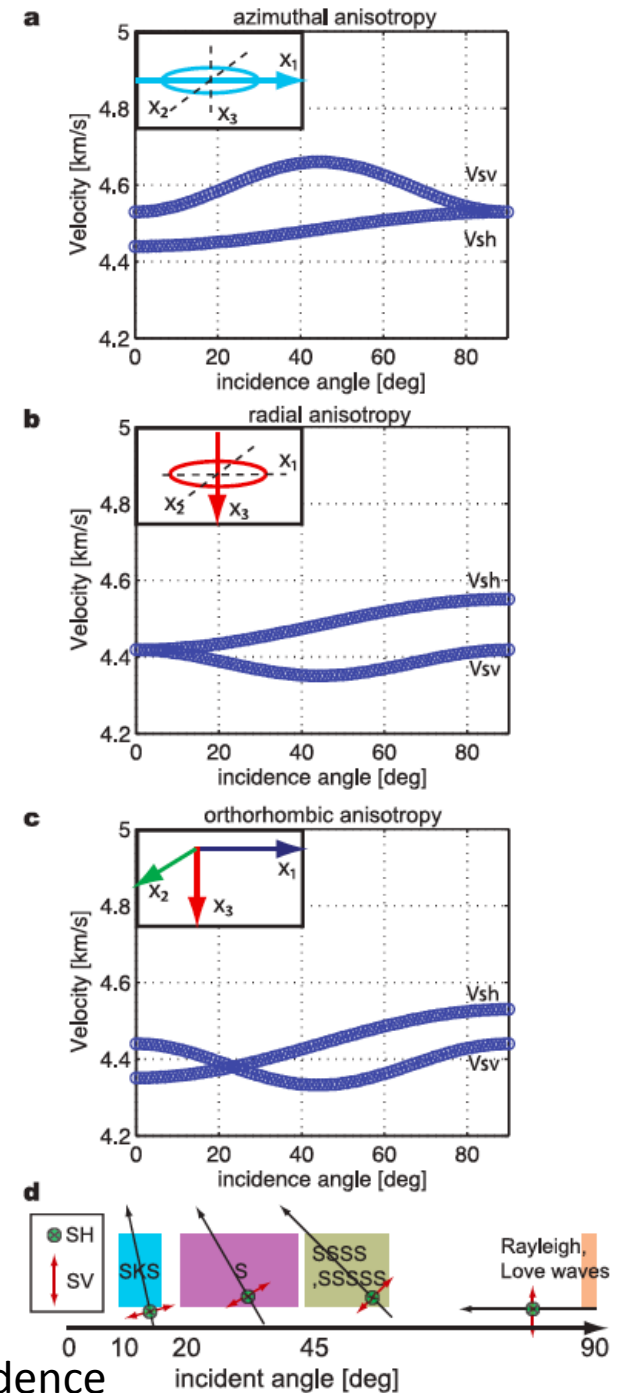
Symétrie hexagonale:

-> Implique: Anisotropie azimuthale forte dans les bassins océaniques, et anisotropie radiale faible

-> Or l'anisotropie radiale (discordance ondes de Love et Rayleigh) observée est forte.

Symétrie orthorhombique:

-> anisotropie azimuthale faible (2%) et anisotropie radiale forte (4%)



Dépendance des vitesses SH et SV en fonction de l'angle d'incidence

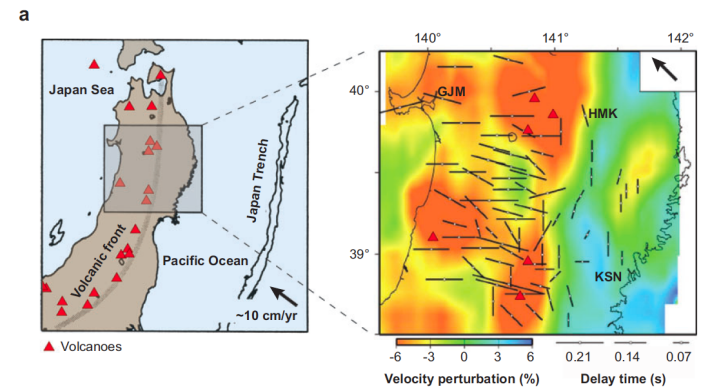
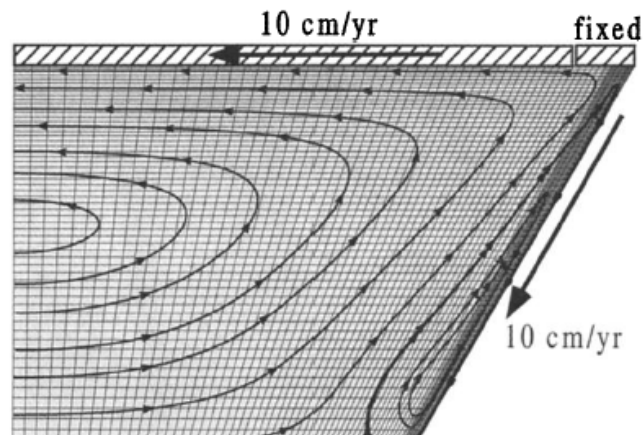
Quel est le modèle le plus réaliste?

- **Modèle d'olivine B:**
 - en désaccord avec les observations dans les bassins océaniques, où l'anisotropie azimuthale est bien expliquée jusqu'à des profondeurs de 200 km par un modèle d'olivine de type A.
 - La plupart des échantillons de roche du manteau montrent une déformation de type A
- **Les deux autres modèles sont difficiles à distinguer:**
 - ⇒ Il faut plus de données d'ondes S, ScS avec des inclinaisons de trajets différentes
 - ⇒ Modélisation 3D de la déformation dans les zones de subduction avec rhéologie réaliste.

Anisotropie dans le "coin" (mantle wedge)

Ecoulement de coin 2D → axe rapide perpendiculaire à la fosse

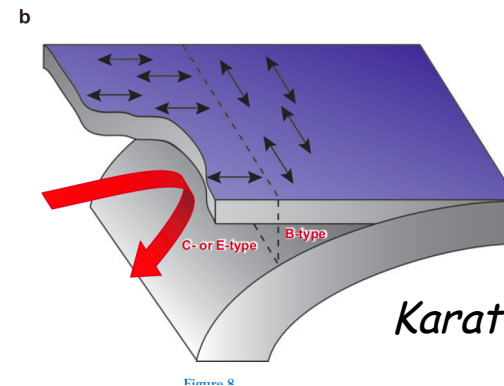
FISCHER ET AL.: BACK ARC MANTLE FLOW AND ANISOTROPY



Observations d'axe rapide parallèle à la fosse → autres explications?

->Modèle d'olivine de type B
ou présence d'antigorite déformée dans
la partie peu profonde du coin

-> Circulation 3D dans le coin, convection à petite échelle



Karato et al., 2008

Dislocations et CPO

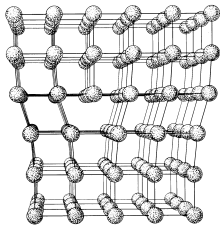
Lois de déformation:

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

Régime des "dislocations": $m=0$

Régime de la diffusion $n=1$, $m = 2$ ou 3

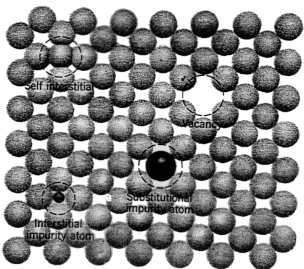
Déformation ductile dans les solides



Défaut linéaire: dislocations

Mouvements de défauts dans la Structure cristalline

Défaut Ponctuel : trous



diffusion

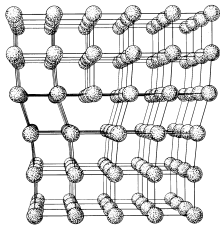
Glissement des dislocations
Fluage par dislocations

- Dépend de :
- structure du minéral
 - T
 - $\sigma, \dot{\epsilon}$
 - $f(H_2O, O_2)...$

twinning

Glissement des limites de grain

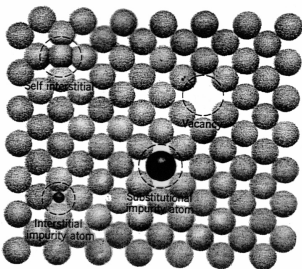
Déformation ductile dans les solides



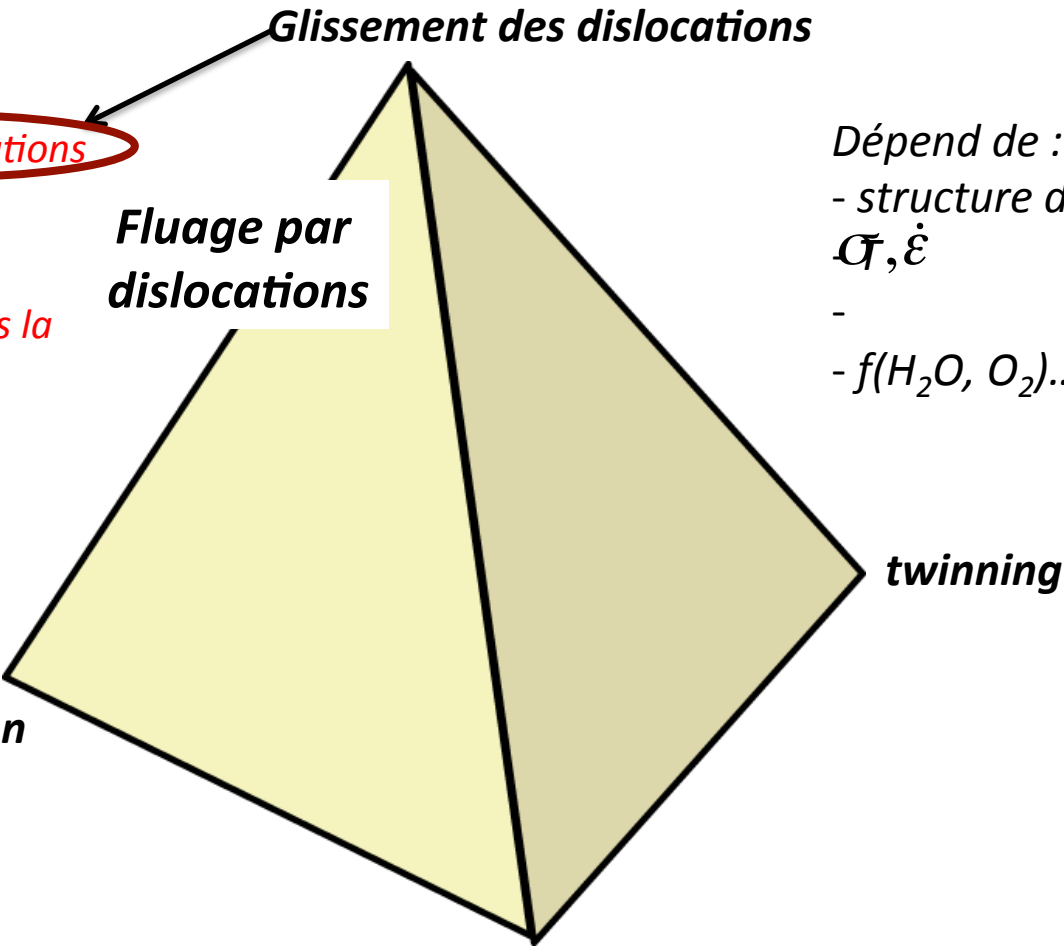
linéaire: dislocations

Mouvements de défauts dans la Structure cristalline

Ponctue:l trous



diffusion



Glissement des dislocations

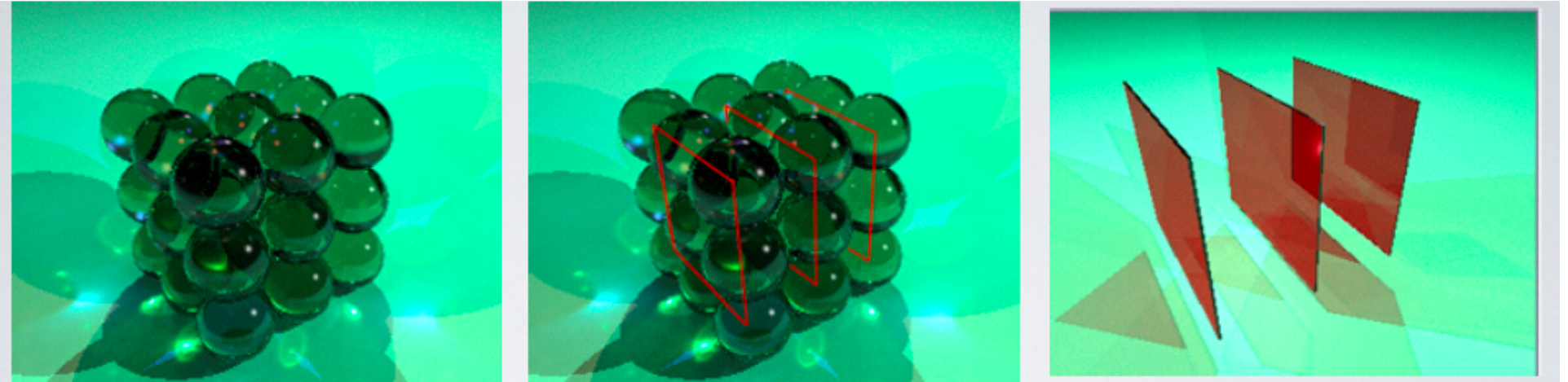
Fluage par dislocations

twinning

Glissement des limites de grain

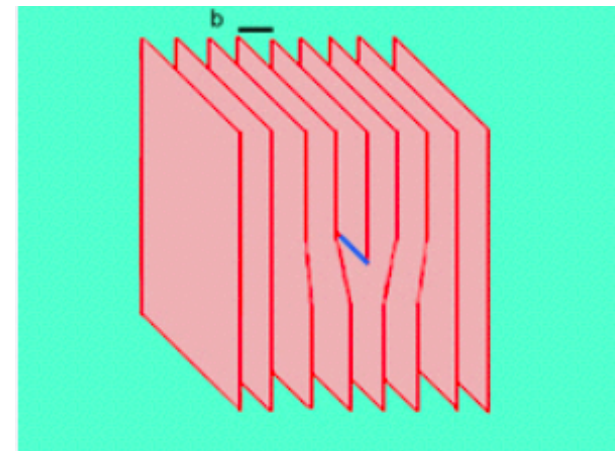
Dépend de :
- structure du minéral
 $\sigma, \dot{\epsilon}$
-
- $f(H_2O, O_2)$...

Qu'est ce qu'une dislocation ?

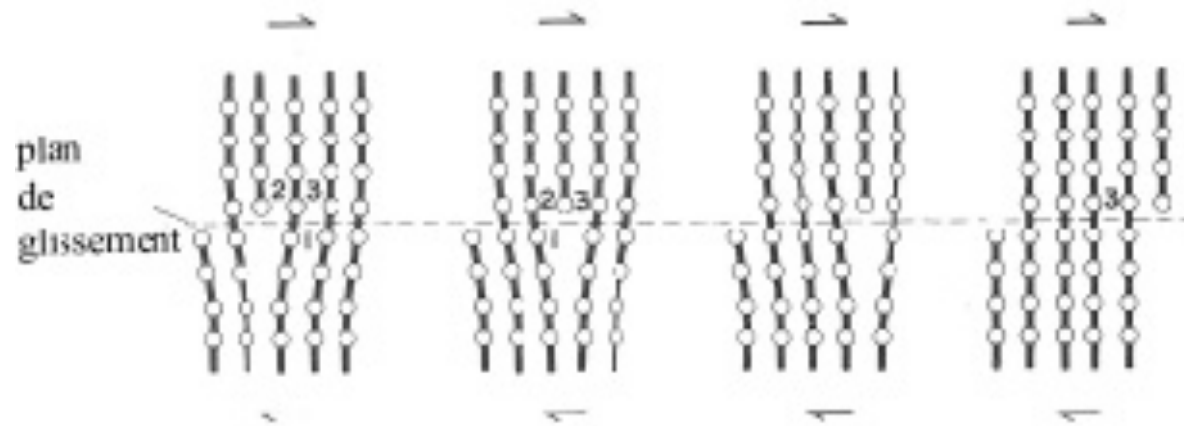


Défaut linéaire dans un cristal

Exemple dans le cas d'un cristal cubique:
Introduction d'un demi-plan supplémentaire



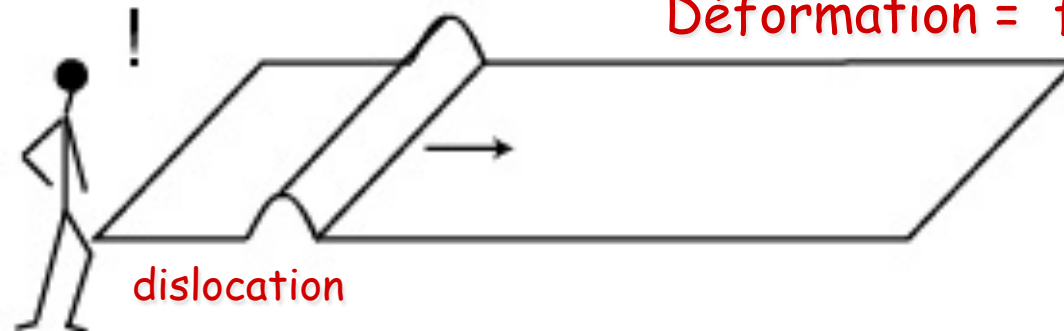
Volterra, 1907 ; Orowan et al, 1930



Déformation instantanée



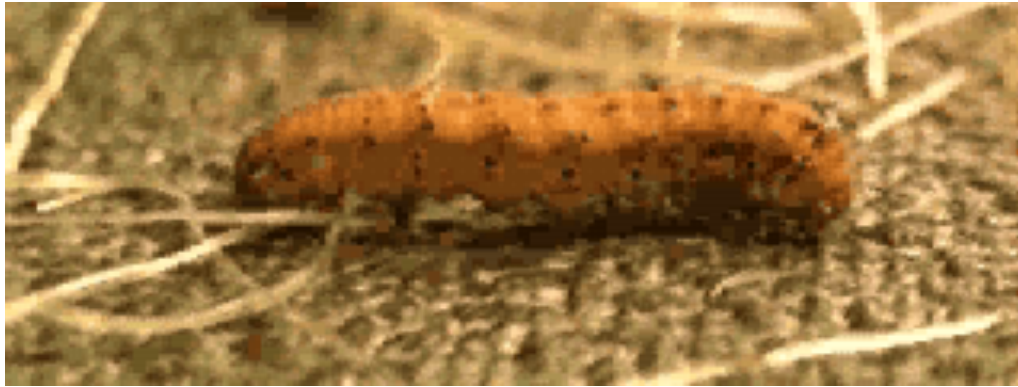
Déformation = $f(\text{temps})$



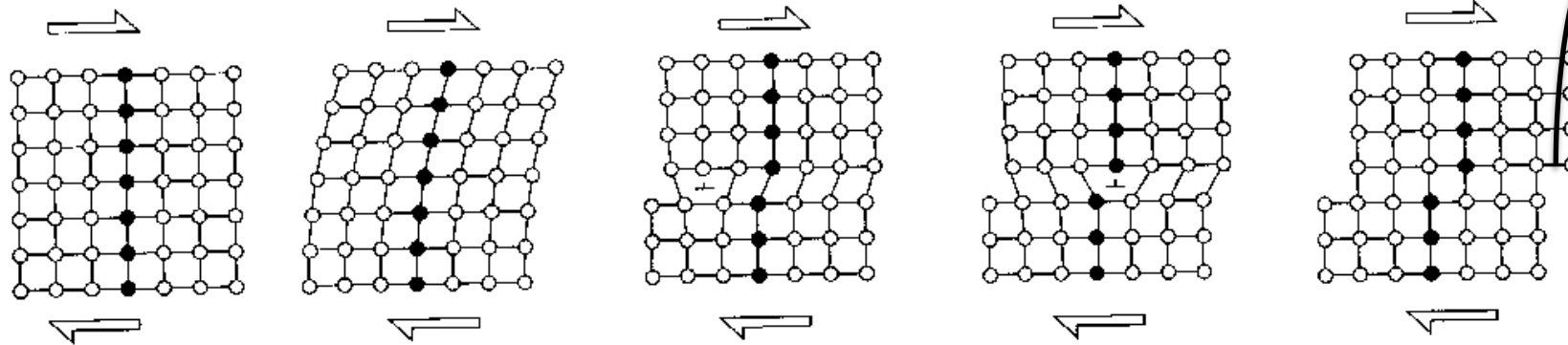
Utilise moins d'énergie!

Image:
A. Tommasi

Le principe



Déplacement infinitesimal =
Vecteur de Burgers \vec{b}



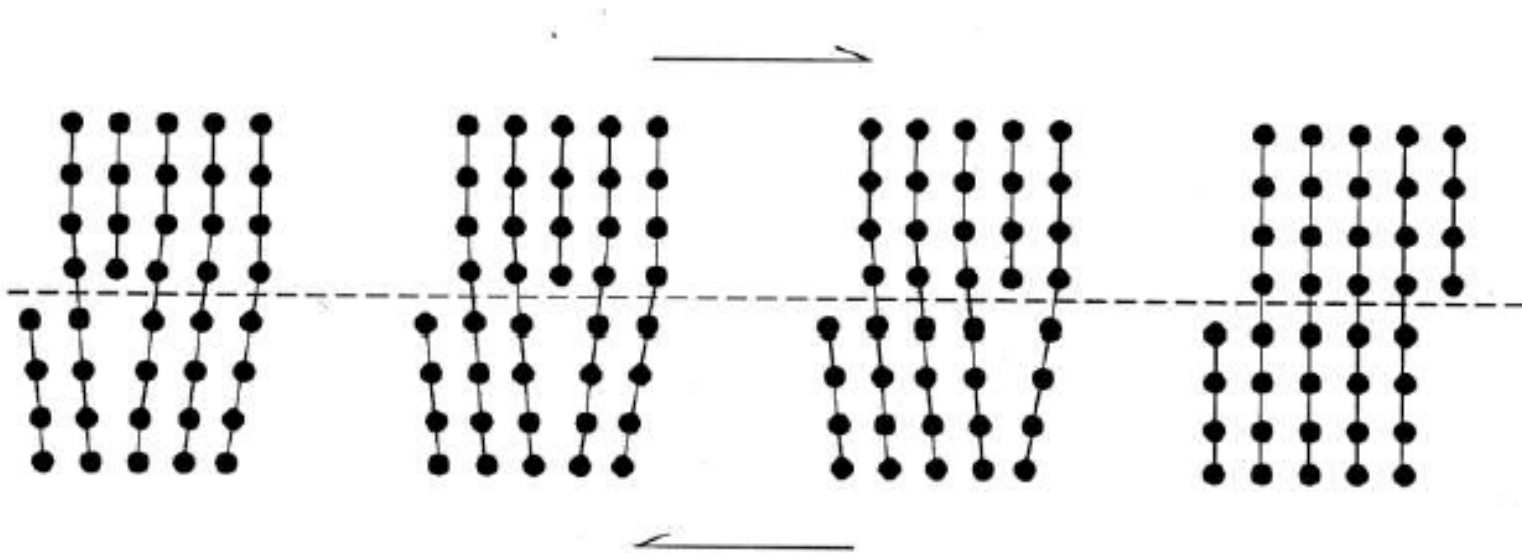
Déformation élastique

Introduction d'une dislocation

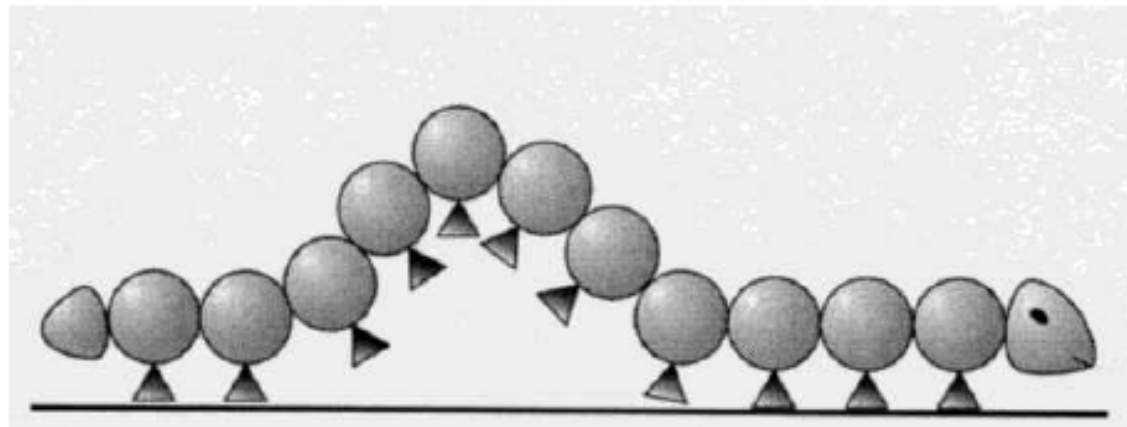
Migration de la dislocation

La forme du cristal a changé sans fracturation mécanique et sans changement de structure

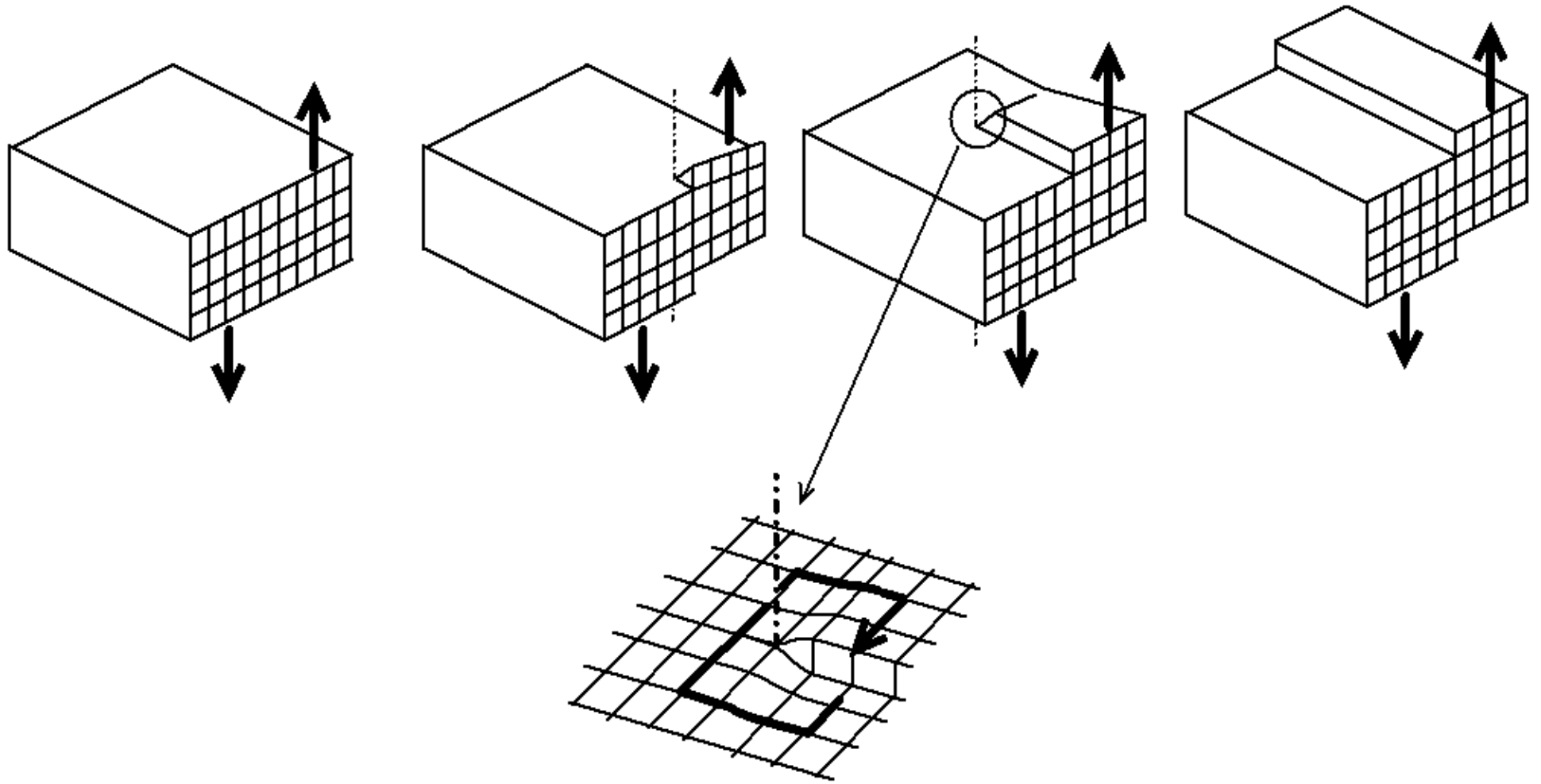
Déformation ductile = mouvement des dislocations



Propagation d'une dislocation de coin (edge dislocation)



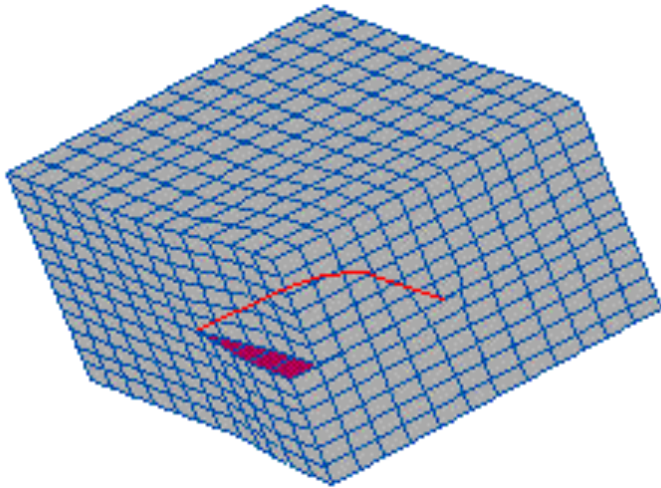
Vecteur de burgers est perpendiculaire à la ligne de dislocation



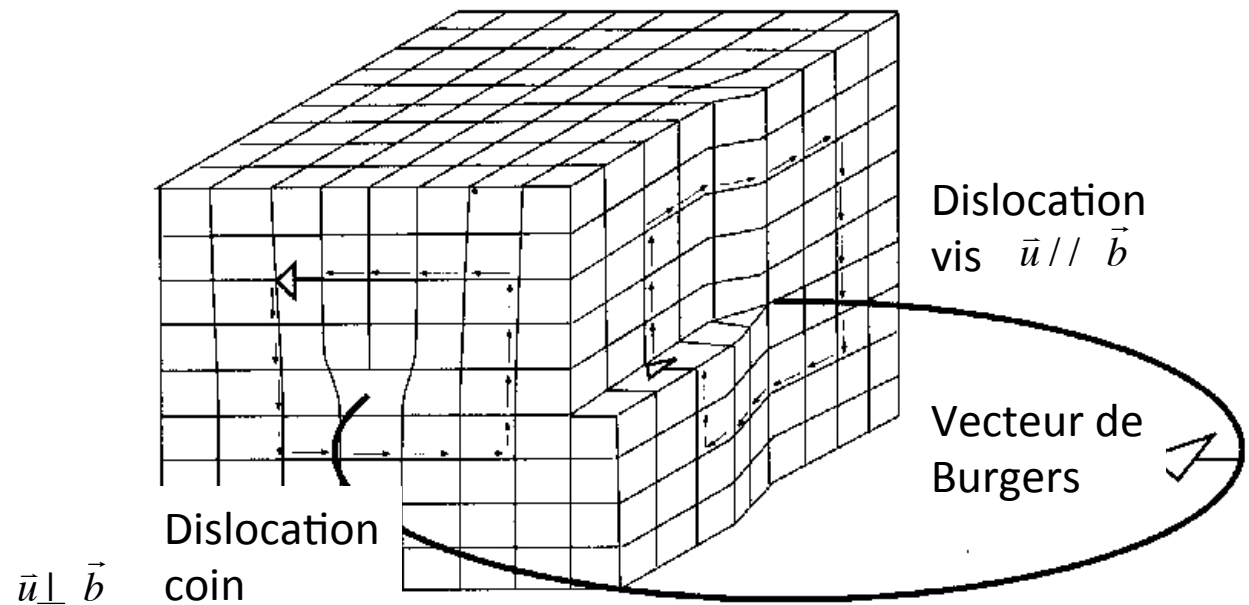
dislocation vis

Vecteur de burgers est parallèle à la ligne de dislocation

Dislocations en 3D = boucles de dislocation

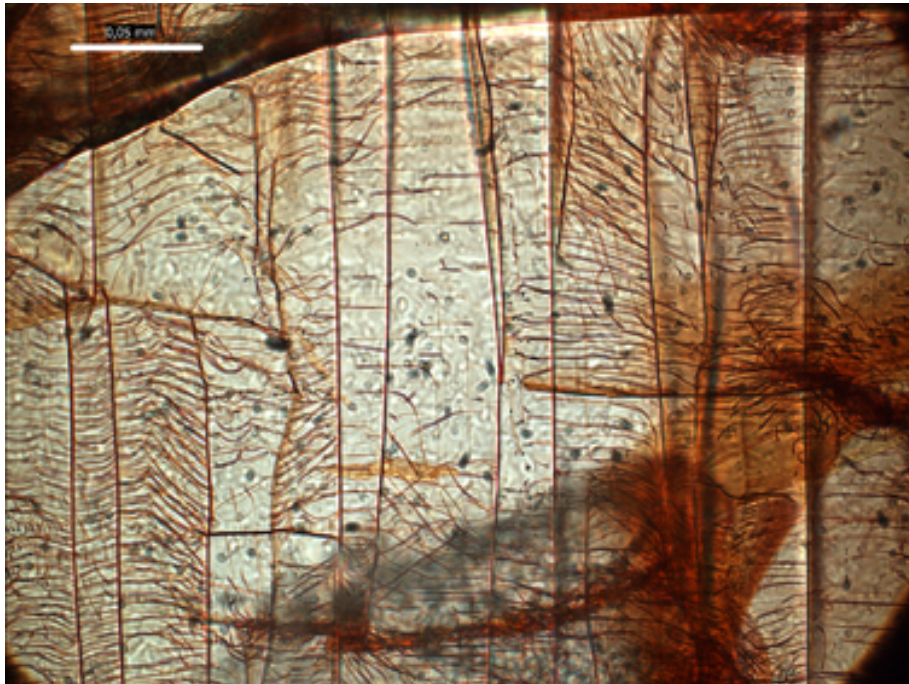


- Une dislocation est caractérisée par:
 - Le vecteur de Burgers \vec{b} représente le cisaillement élémentaire, dans la direction du mouvement des dislocations
 - La direction de la ligne de discontinuité \vec{u}



Comment observe-t-on les dislocations?

- décoration (olivine)

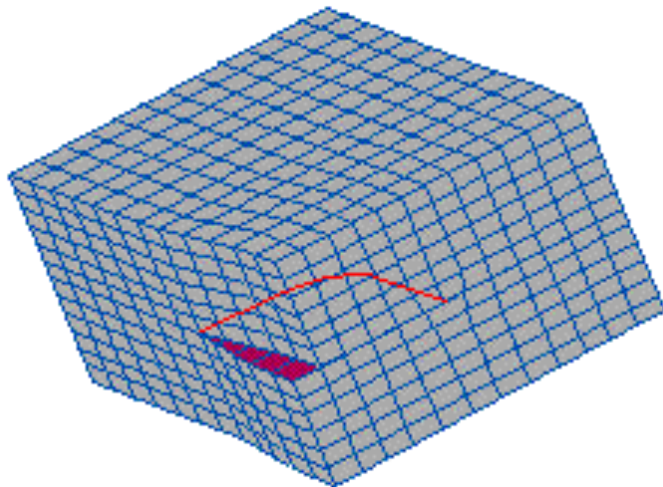
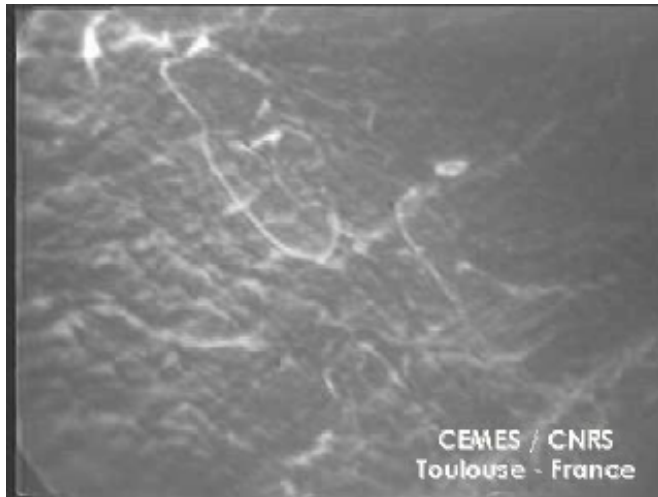


Kamchatka xenolith, Soustelle et al. J. Petrol. 2010

- microscopie électronique de transmission (TEM)



Glissement des Dislocations



Vitesse de déformation $\dot{\epsilon} \propto \rho_m b v$

Vecteur de Burgers

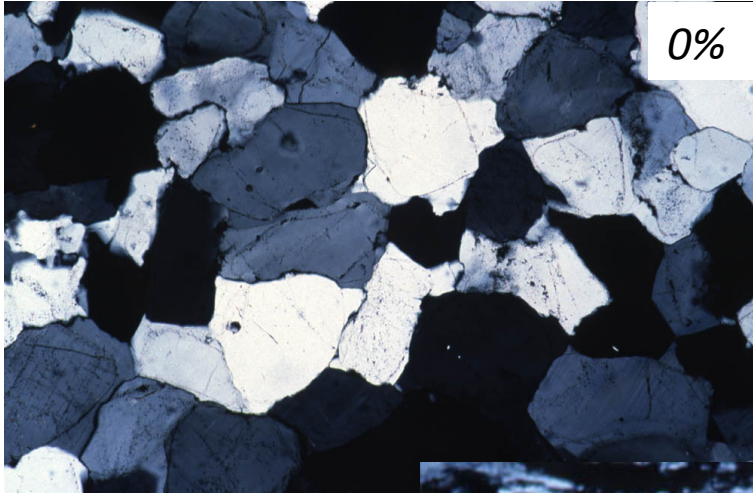
vitesse de glissement (dépend de σ)

Densité des dislocations

$$\rho_m \propto \left(\frac{\sigma}{\mu b} \right)^2$$

Module de cisaillement

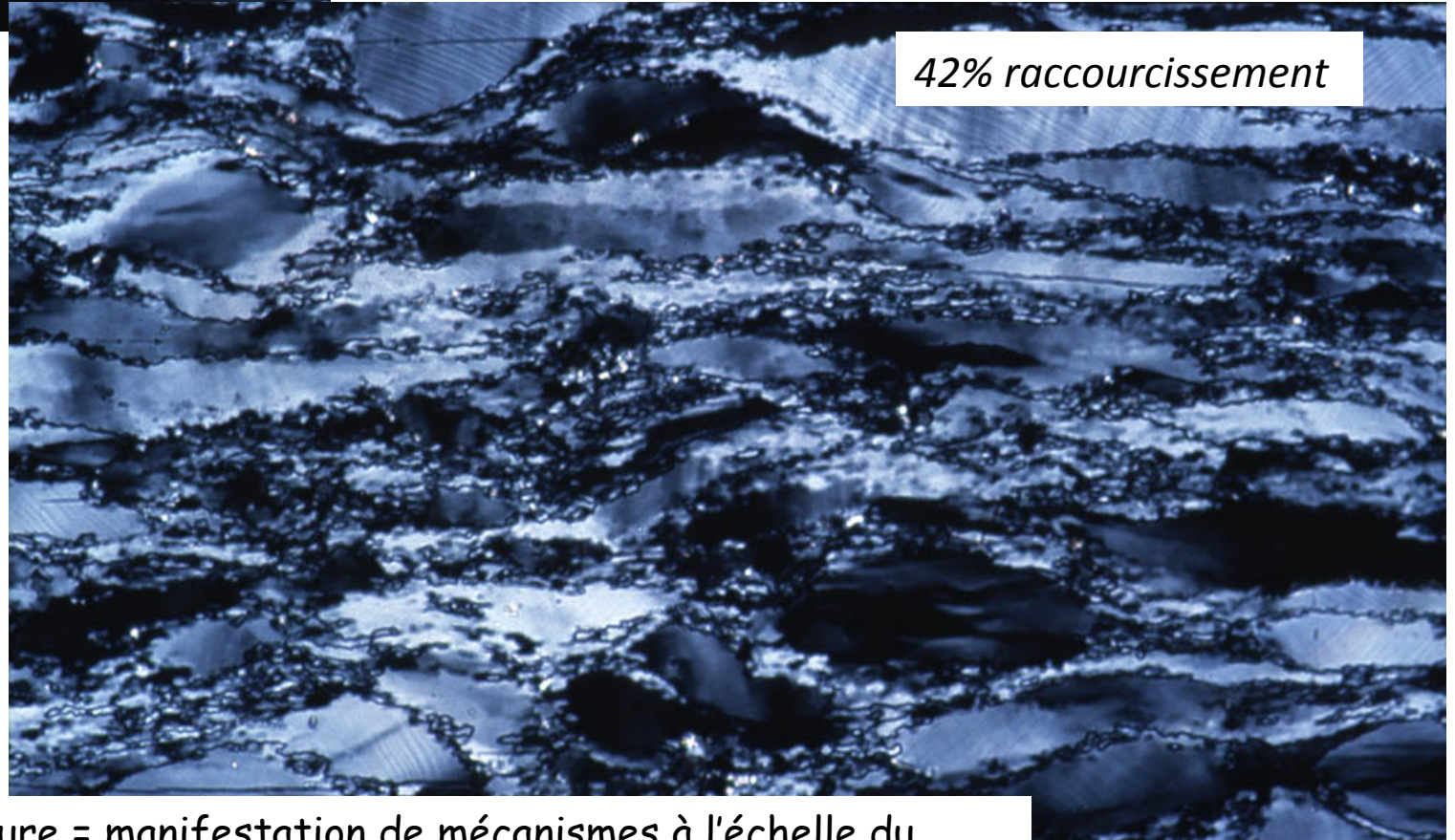
$$\dot{\epsilon} \propto \sigma^3$$



0%

Déformation par dislocations au "labo »
@ 800°C & $10^{-6}s^{-1}$

Heavitree quartzite: »gros grains » 200µm
Matériau initialement non déformé

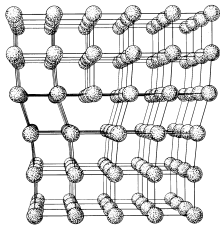


42% raccourcissement

Microstructure = manifestation de mécanismes à l'échelle du cristal, activés en réponse à la déformation macroscopique

Dell'Angelo & Tullis
JStructGeol 1986

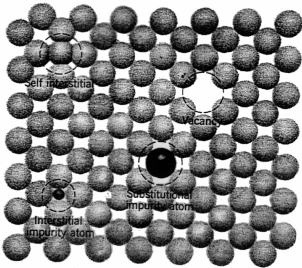
Déformation ductile dans les solides



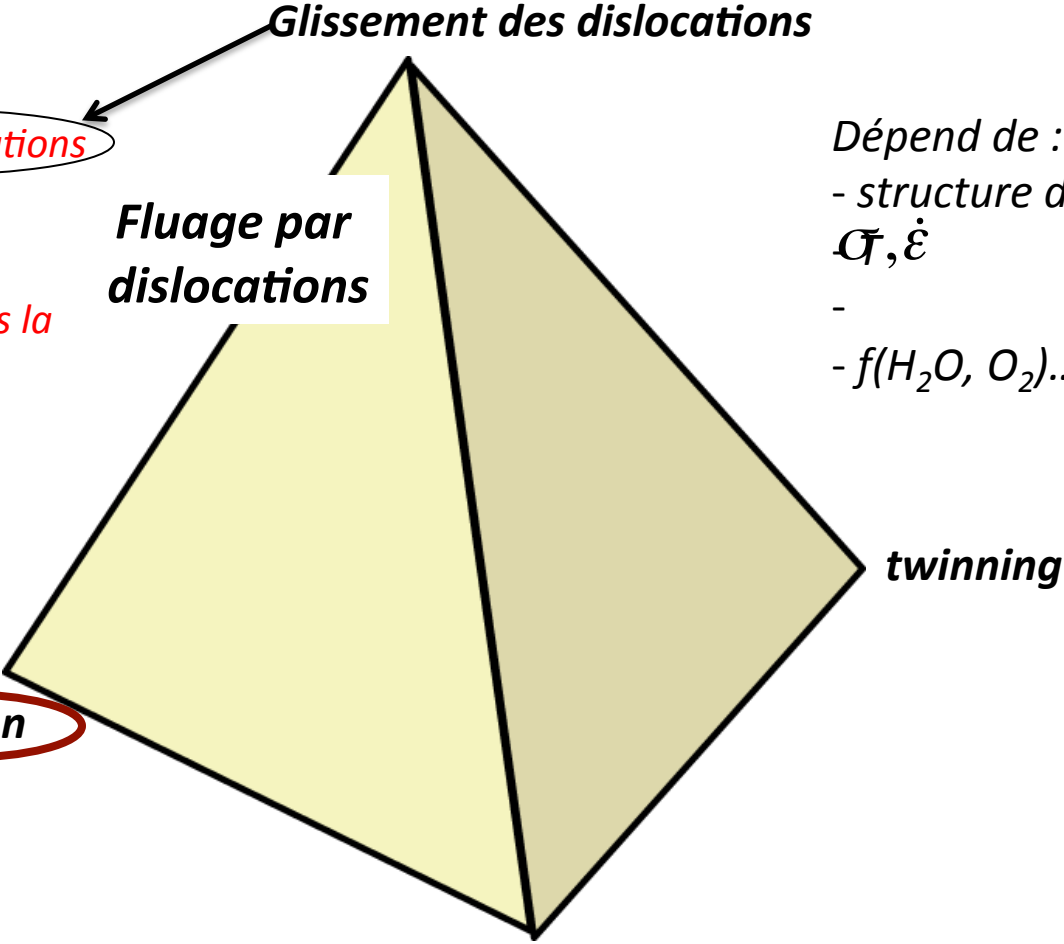
linéaire: dislocations

Mouvements de défauts dans la Structure cristalline

Ponctue:l trous



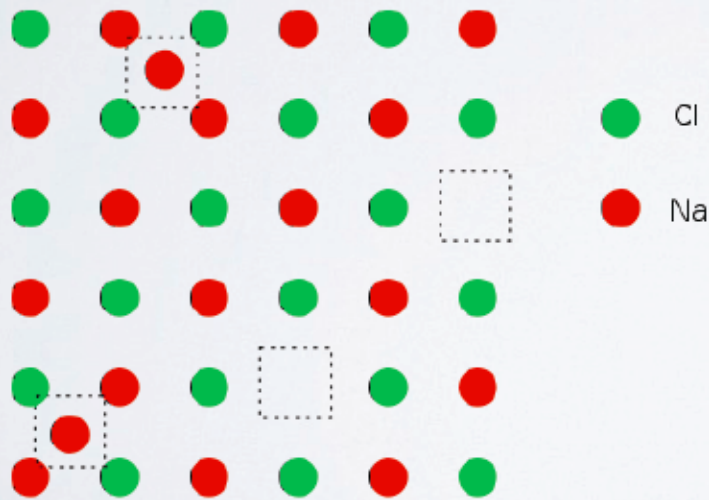
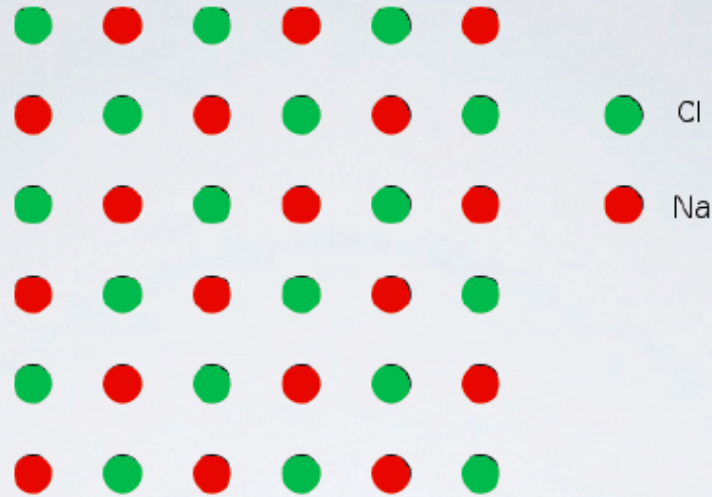
diffusion



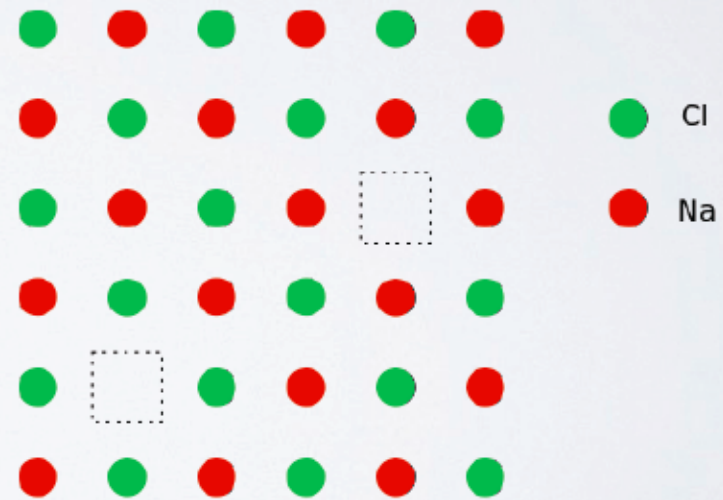
Dépend de :
- structure du minéral
 $\sigma, \dot{\epsilon}$
-
- $f(H_2O, O_2)...$

Glissement des limites de grain

Défauts ponctuels dans les cristaux



Frenkel

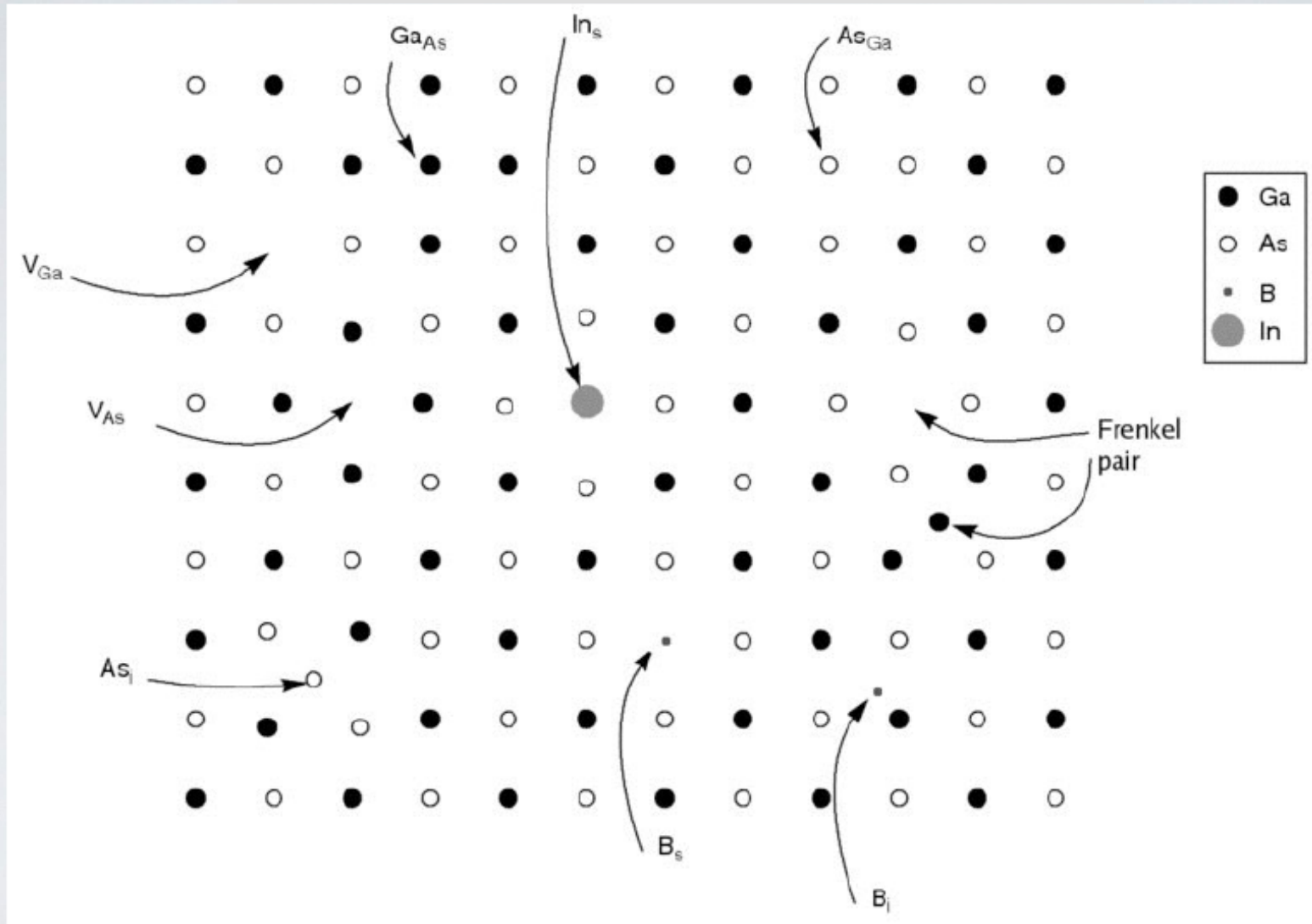


Schottky

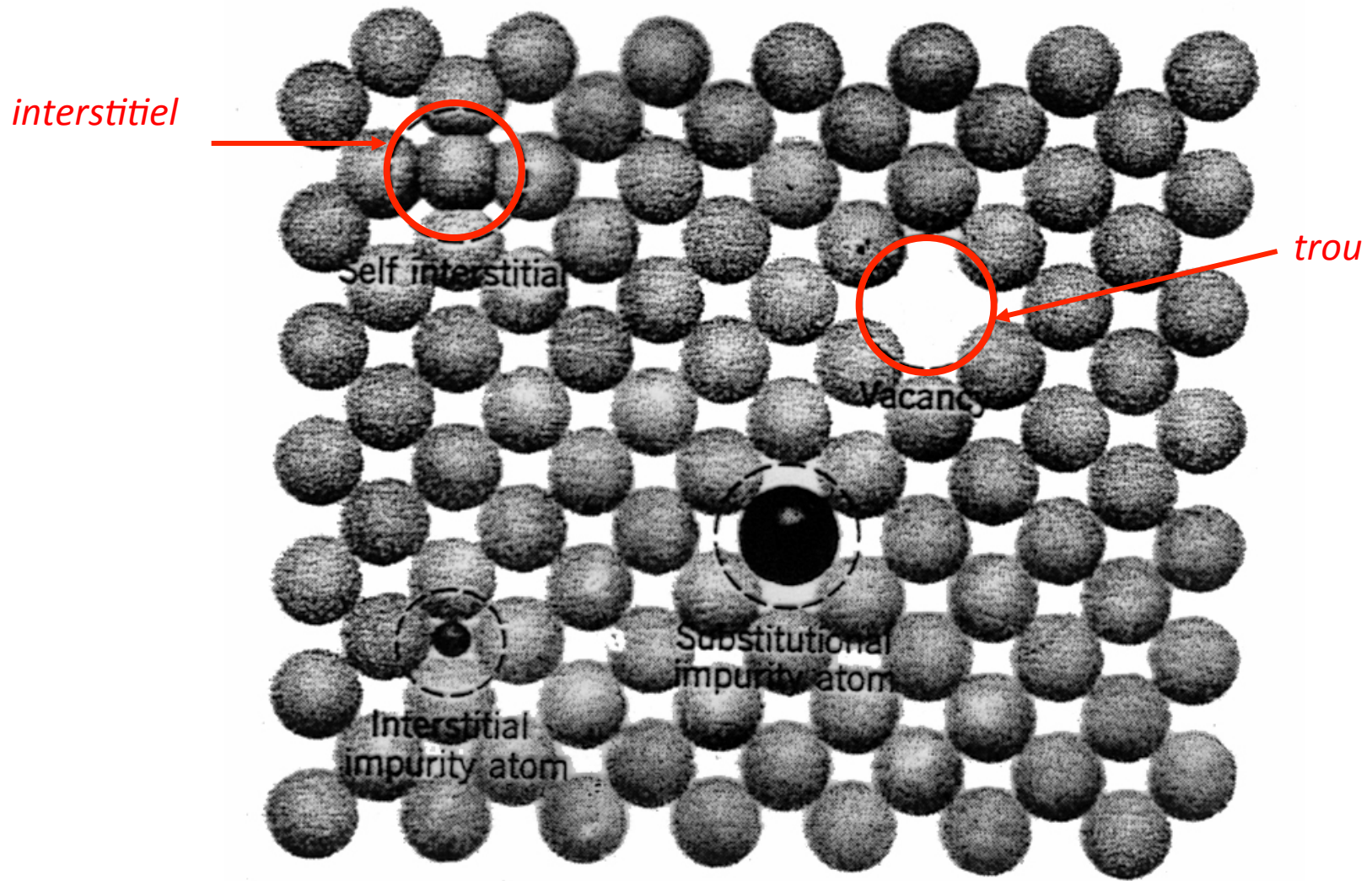
Plutôt dans les cristaux où les ions ont des tailles différentes

Trous laissés par 2 ions de valences opposés

Les défauts peuvent aussi être des impuretés

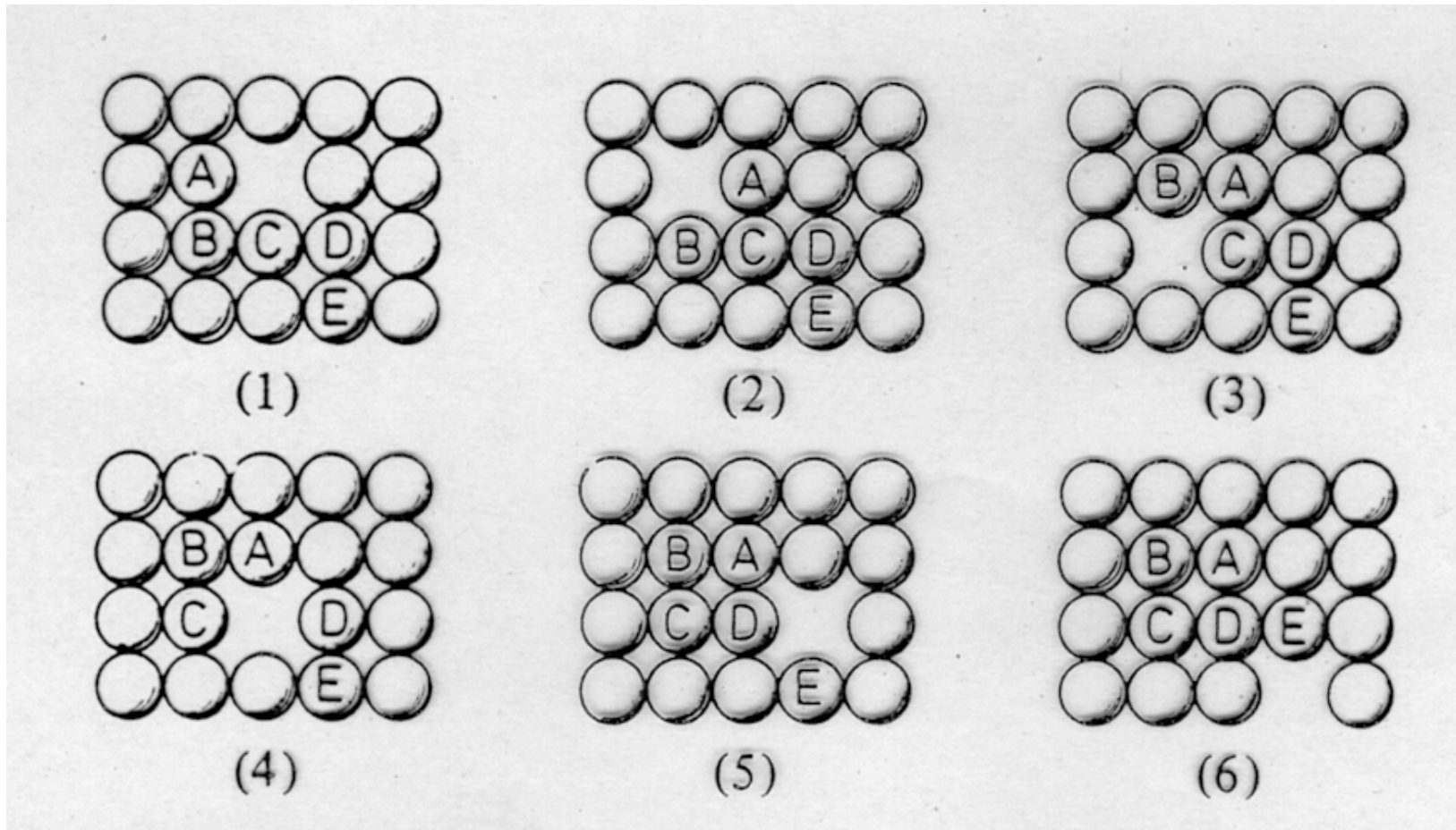


Défauts ponctuels dans un crystal



diffusion = transport de masse

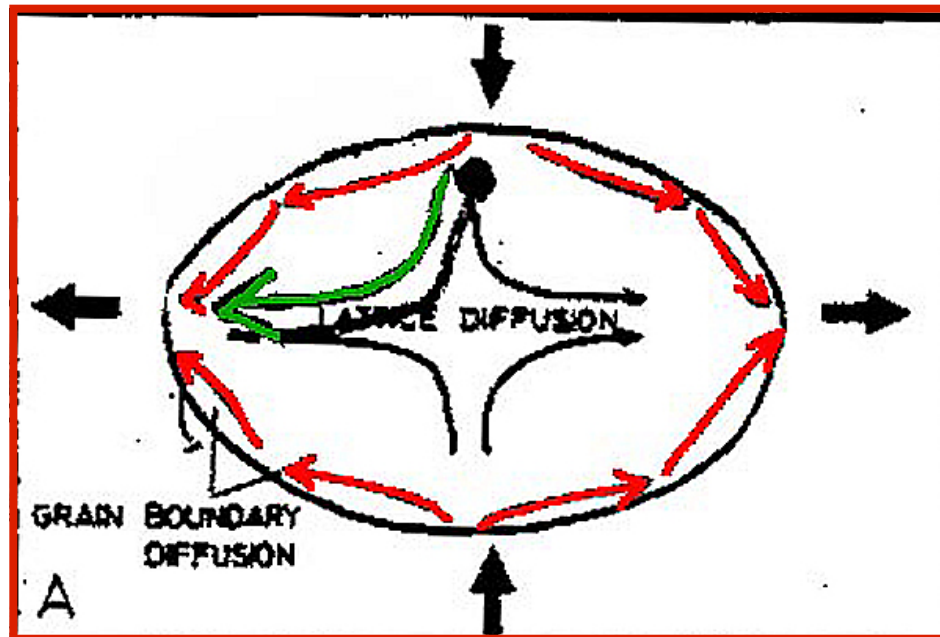
Mouvement des atomes & des trous



Les trous et les atomes se déplacent dans des directions opposées
mais ce sont les trous qui parcourent les longues distances

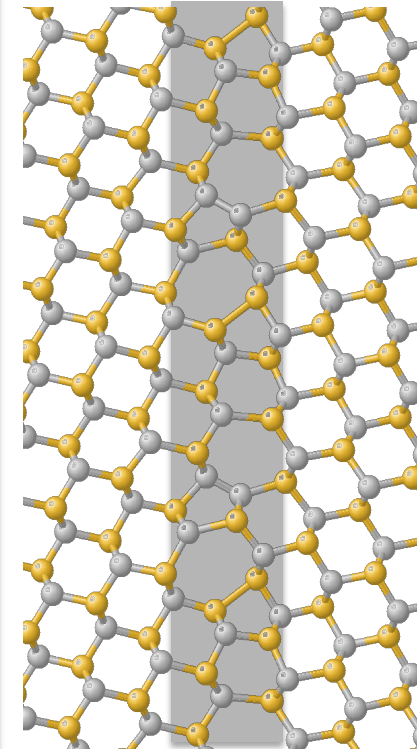
Mécanismes de diffusion

- Fluage de Nabarro-Herring : diffusion intracristalline
- Fluage de Coble : diffusion le long des limites de grains



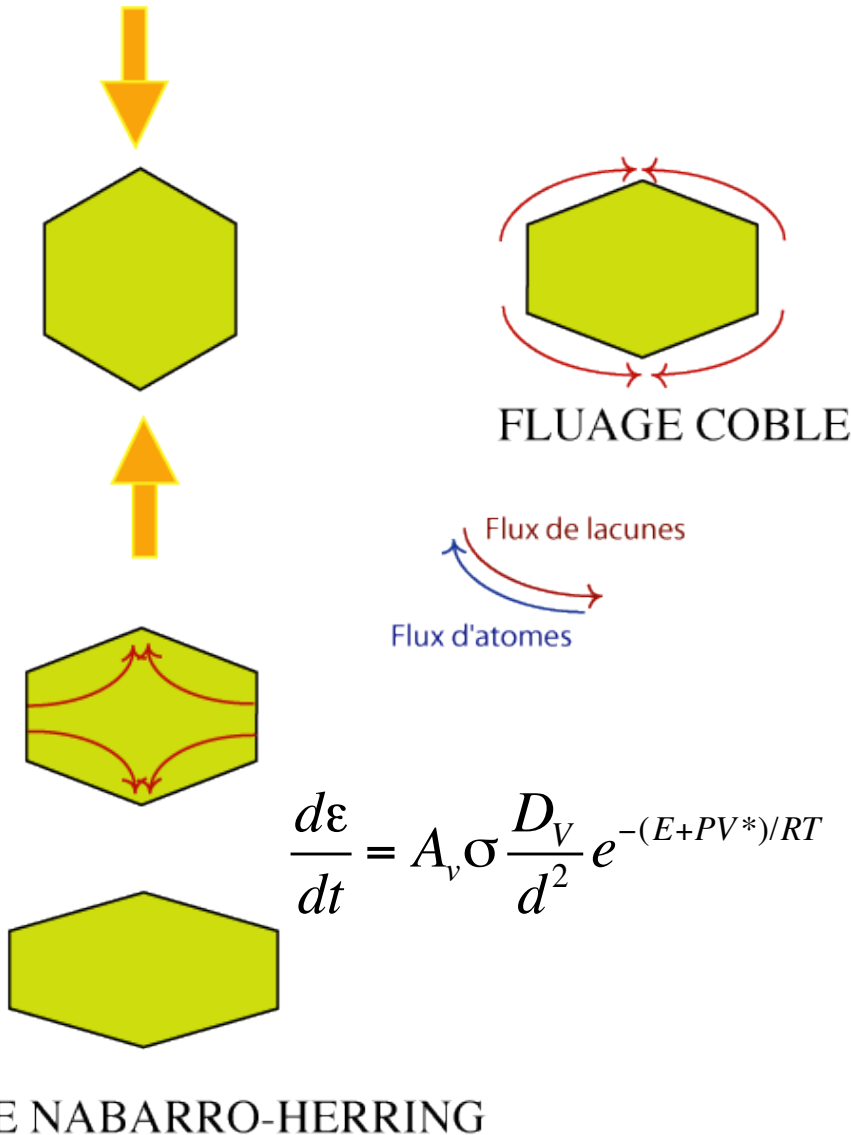
*Les trous et les atomes se déplacent dans des directions opposées
(les flèches indiquent le mouvement des atomes, mais ce sont les trous qui parcourent les longues distances!)*

Limites de grains



- Pas d'espace vide dans les roches!
- - Régions de discontinuité dans l'organisation du cristal -> davantage de défauts .

Fluage Coble et fluage Nabarro-Herring



$$\dot{\epsilon} = v/l \rightarrow l \propto d$$

$$\dot{\epsilon} \propto F \rightarrow F \propto \sigma$$

$$\dot{\epsilon} \propto \exp\left(-\frac{1}{T}\right)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = A_B \sigma \frac{\delta D_B}{d^3} e^{-(E+PV^*)/RT}$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = A_v \sigma \frac{D_v}{d^2} e^{-(E+PV^*)/RT}$$

D_v = coefficient de diffusion intracristalline.

D_b = coefficient de diffusion de la limite de grain

$$D_b \gg D_v$$

A = constante sans dimension

V^* = volume d'activation

E = energie d'activation

R = constante des gaz

d = taille de grain

δ = épaisseur de la limite de grain

En général les deux processus sont associés:
Loi générale de fluage par diffusion

$$\dot{\epsilon} = A \frac{\sigma}{d^2} D_{eff} e^{-(E+PV^*)/RT}$$

$$D_{eff} = D_v \left(1 + \frac{\pi \delta D_b}{d D_v} \right)$$

$$R = k_b N_A$$

D_v = coefficient de diffusion intracristalline.

D_b = coefficient de diffusion de la limite de grain

$$D_b \gg D_v$$

A = constante sans dimension

V^* = volume d'activation

T = température

R = constante des gaz

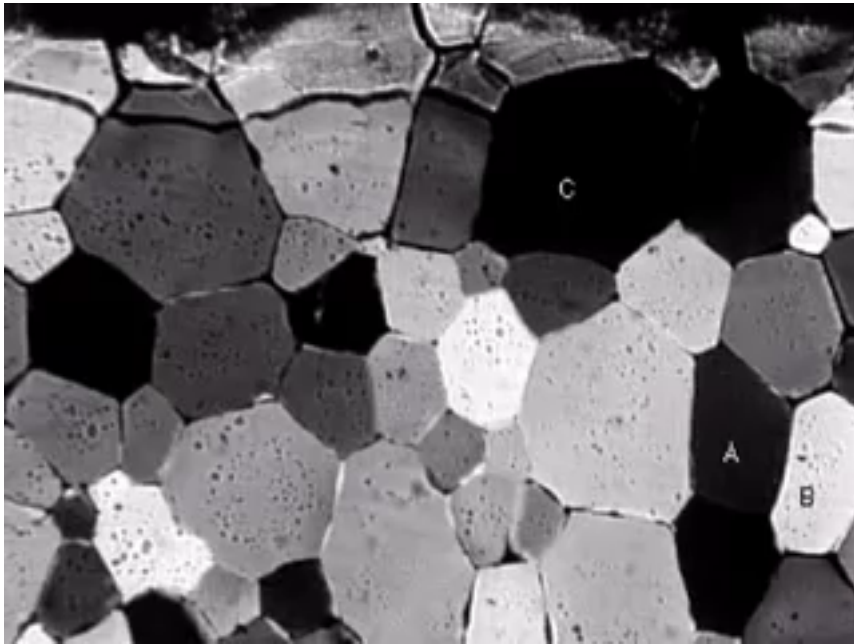
N_A = nombre d'Avogadro

k_b = constante de Boltzmann

d = taille de grain

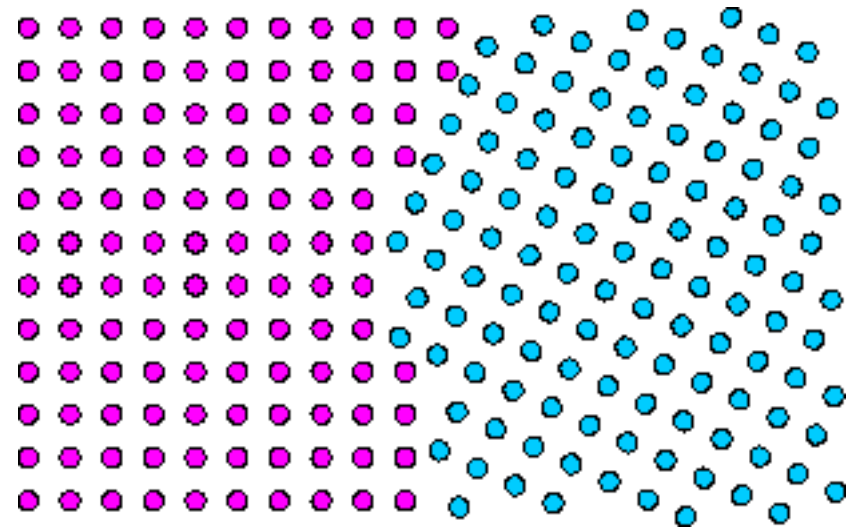
δ = épaisseur de la limite de grain

Pour que le mécanisme de fluage par diffusion soit efficace, il faut des petites tailles de grain et de hautes températures



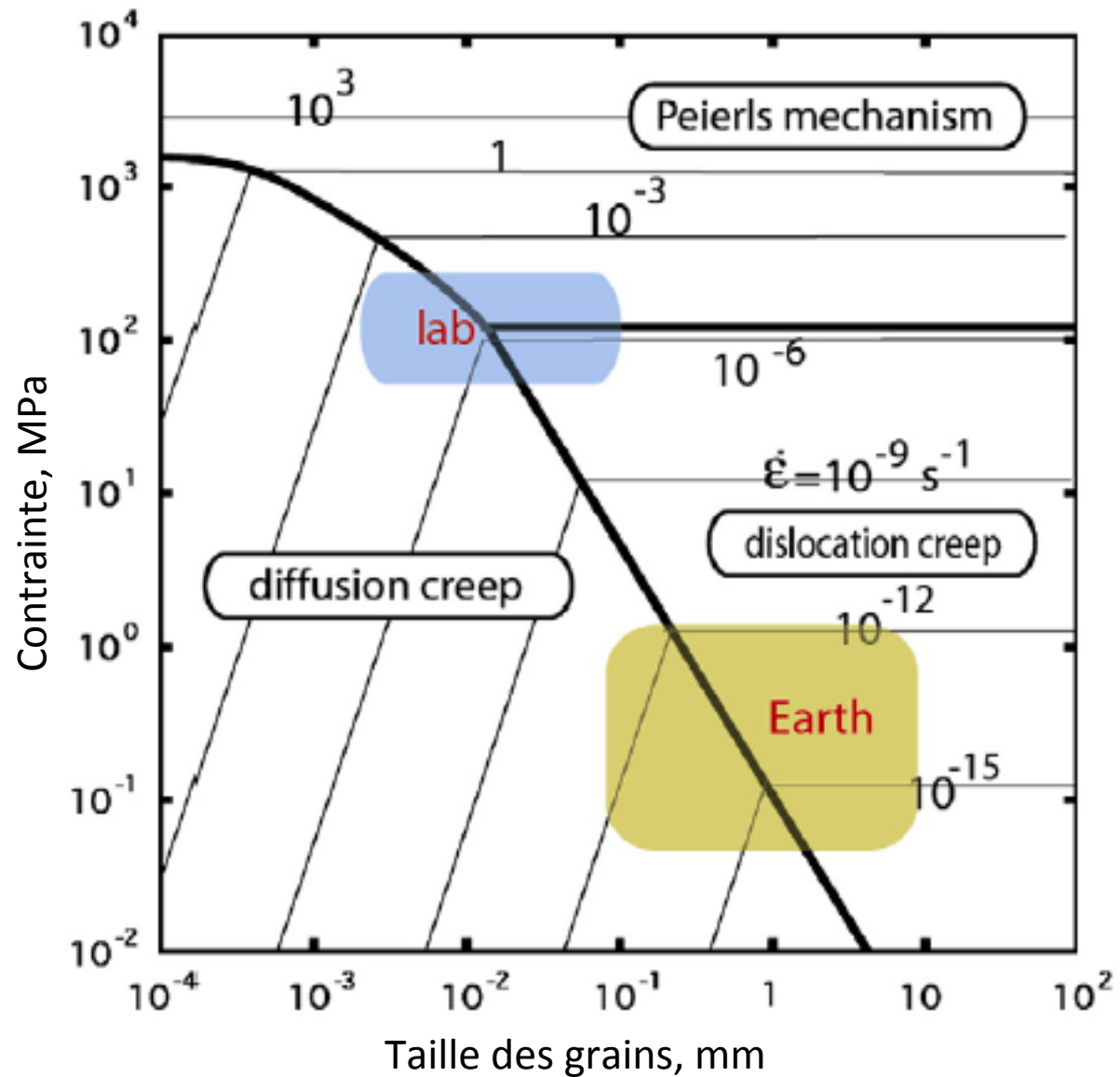
Migration des limites de grains: un processus aidé par la diffusion qui favorise la déformation des cristaux

Croissance de grains statique: octachloropropane
Park, Ree & Means, J. Virtual Explorer 2000



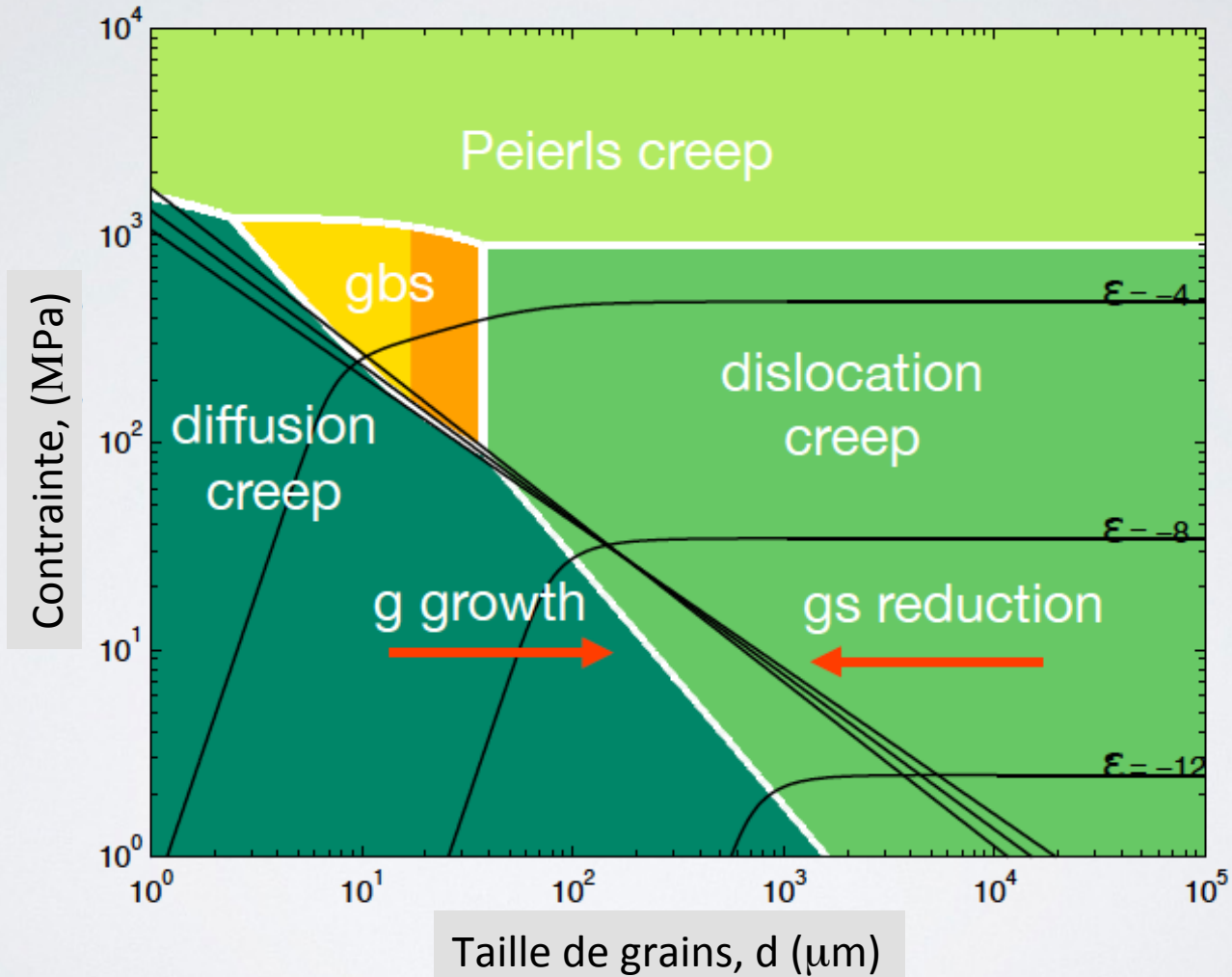
Jessel & Bons – Simulation using ELLE – J. Virtual Explorer 2000
virtualexplorer.com.au/.../lectures/lec2.html

Rhéologie de l'olivine dans le manteau supérieur: $P=7\text{GPa}$, $T=1700\text{K}$



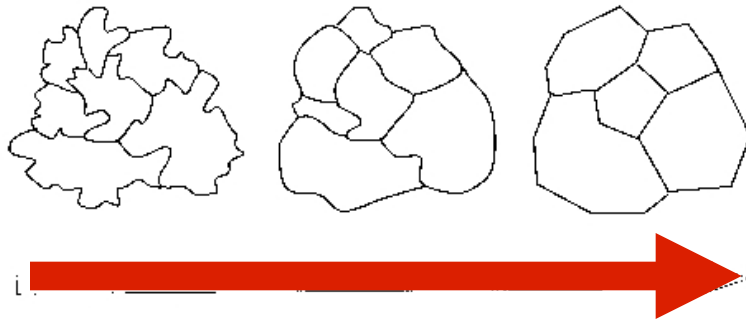
Mécanismes de déformation

Olivine, 1250°C, 0.4 GPa

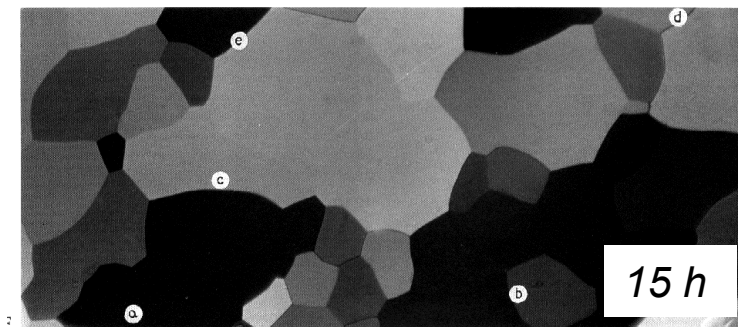
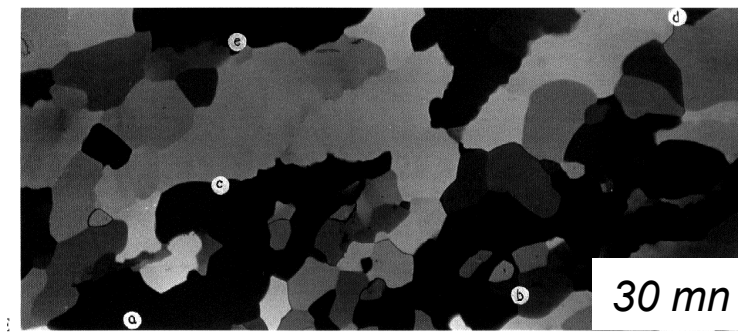
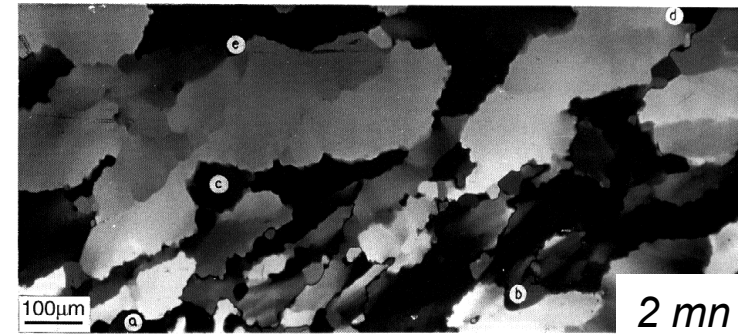
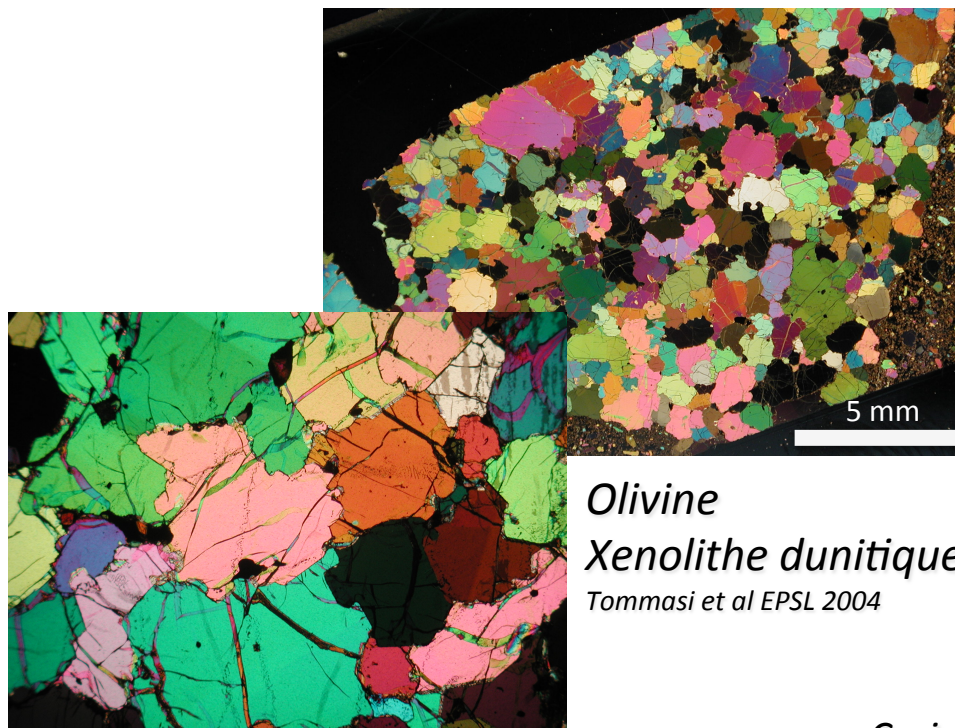


J. Warren

Migration de limites de grains et recristallisation



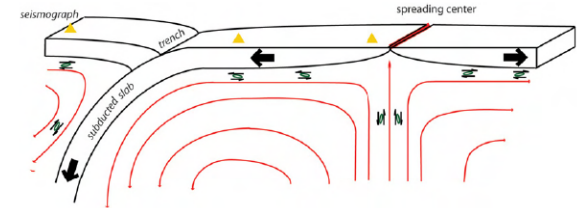
Réduction de la surface de limites de grains



Croissance de grains statique: octachloropropane
Park, Ree & Means, J. Virtual Explorer 2000

Anisotropie intrinsèque et autres minéraux du manteau

Simulations numériques du développement de l'anisotropie par CPO dans le manteau supérieur



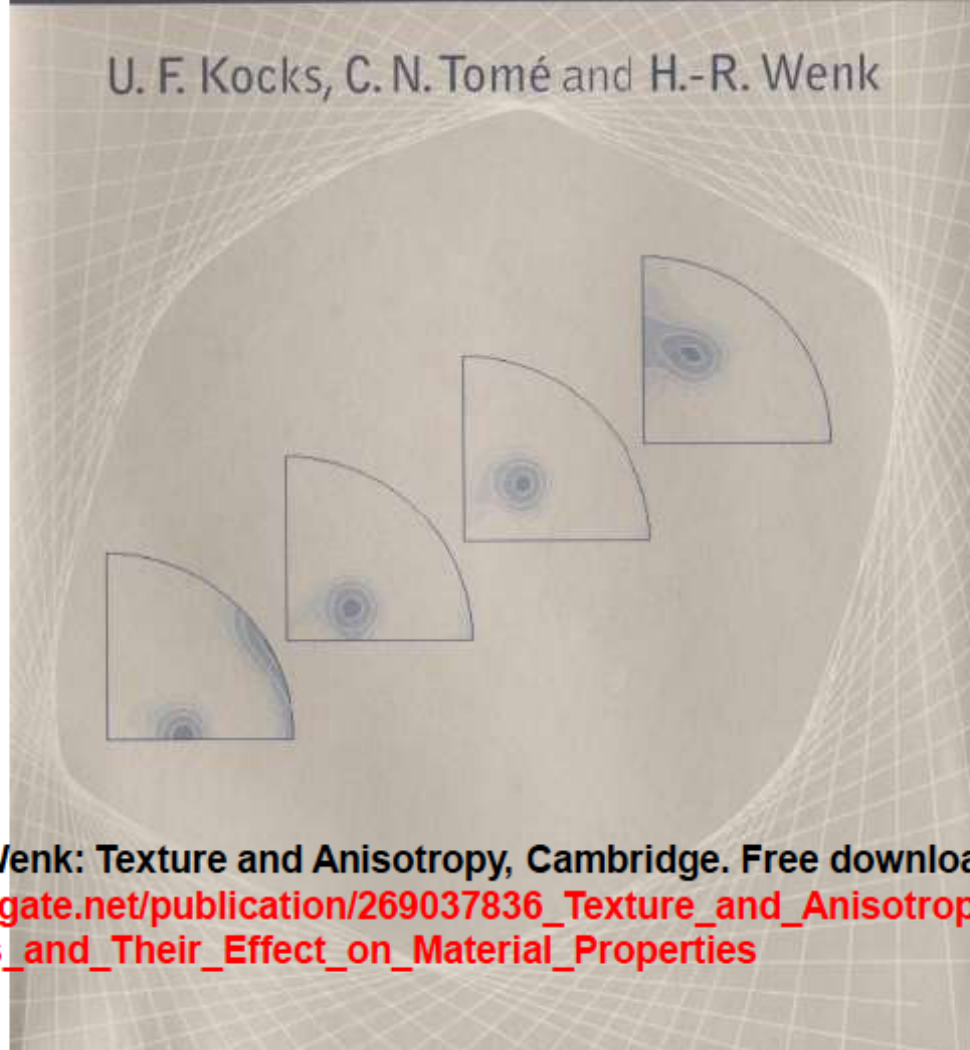
- Influence des différentes hypothèses:

- Symétrie hexagonale des cristaux
- Alignement de l'axe rapide de l'olivine (axe "a") dans la direction de l'écoulement
- Effet des minéraux autres que l'olivine sur la texture des peridotites:
 - Système de glissement dominant de l'olivine $[100](010)$ → axe a s'aligne dans la direction du cisaillement
 - Système de glissement dominant de l'orthopyroxène $[001](100)$ → axe c s'aligne dans la direction du cisaillement
 - → réduction dans l'anisotropie moyenne de la roche.
- Influence de la rhéologie
- Influence de la recristallization (rotation des grains)
 - Observations des échantillons de roche naturels (e.g. A. Nicolas, A. Tommasi, Montpellier)
 - Anisotropie moyenne de 6 ~9% pour les ondes P, 15% pour les ondes S: réduction due à la recristallization et rotation des grains qui réduit la magnitude de l'alignement des cristaux lorsque la déformation dépasse une certaine limite.
- Effet de la pression: changement du système de glissement dominant de l'olivine: $c=[001]$ s'aligne avec l'axe majeur de l'ellipse de déformation → réduction de la magnitude de l'anisotropie.

Texture and Anisotropy

Preferred Orientations in Polycrystals and their Effect on Materials Properties

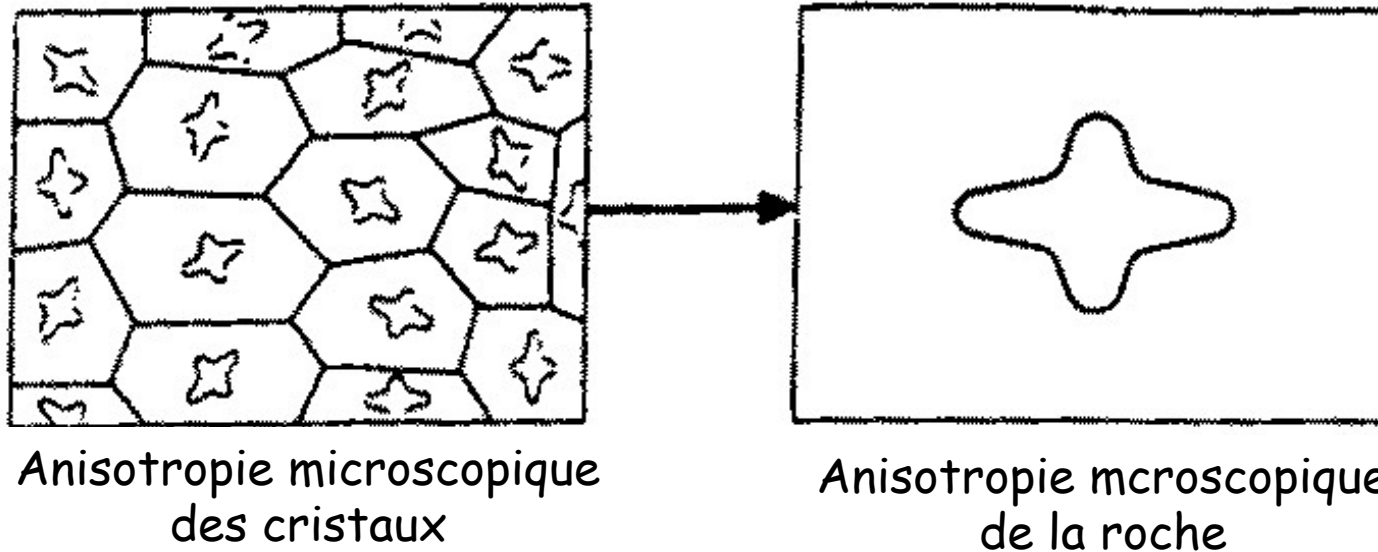
U. F. Kocks, C. N. Tomé and H.-R. Wenk



Book Kocks, Tome, Wenk: Texture and Anisotropy, Cambridge. Free download.

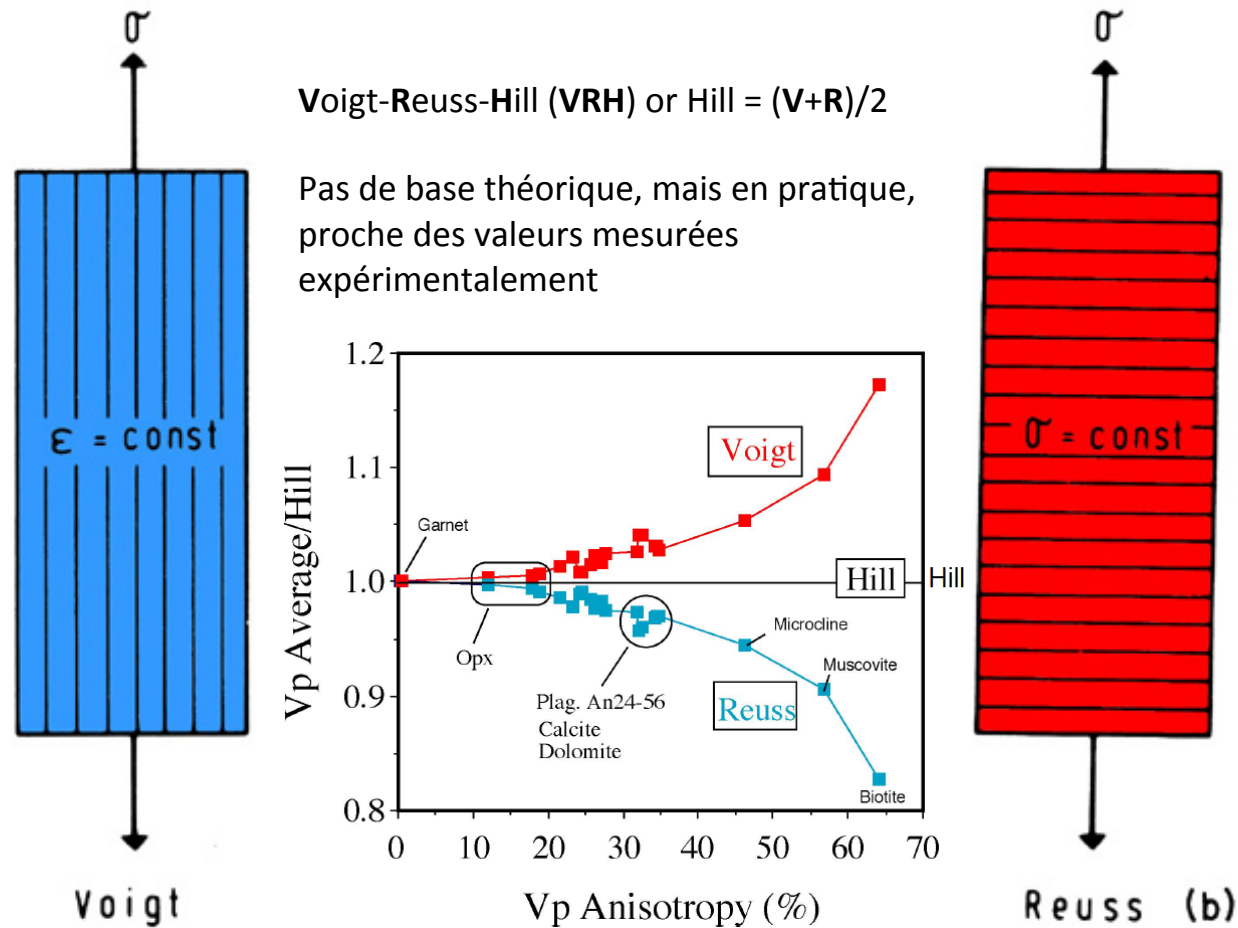
https://www.researchgate.net/publication/269037836_Texture_and_Anisotropy_PREFERRED_Orientations_in_Polycrystals_and_Their_Effect_on_Material_Properties

Comment calculer les propriétés anisotropes à l'échelle de la roche?



- roche = assemblage de cristaux
- Moyenne volumétrique en fonction de:
 - la composition minéralogique
 - l'orientation des cristaux

Milieux « effectifs »: Modèles de microstructure



$$\hat{E} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\epsilon}} = \frac{\sum f_i \sigma_i}{\hat{\epsilon}} = \frac{\sum f_i (\hat{\epsilon} E_i)}{\hat{\epsilon}} \quad \hat{E} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\epsilon}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sum f_i \epsilon_i} = \frac{\hat{\sigma}}{\sum f_i \left(\frac{\hat{\sigma}}{E_i}\right)}$$

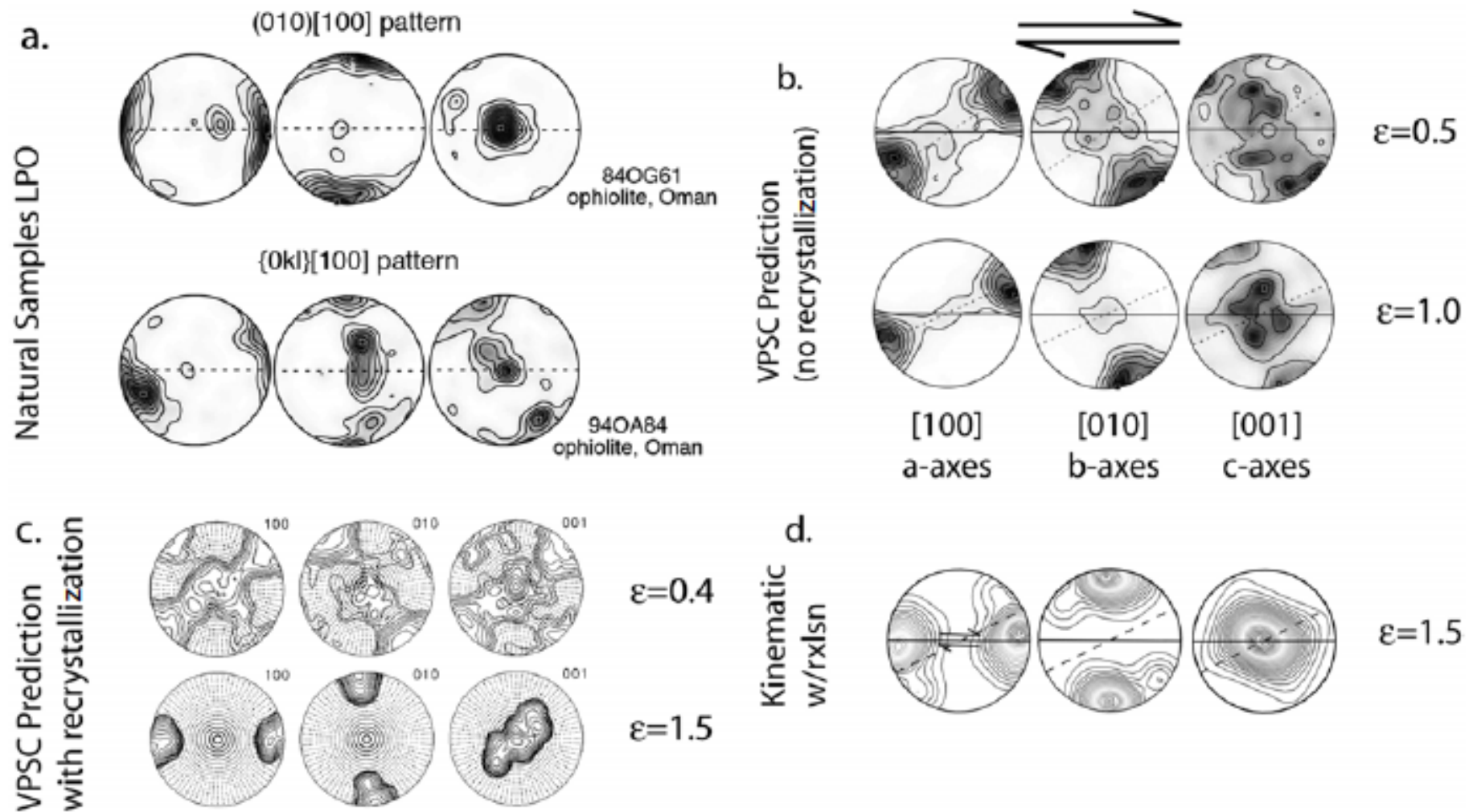
$$\hat{E} = \sum f_i E_i \quad \frac{1}{\hat{E}} = \sum \frac{f_i}{E_i}$$

Simulation de déformation

- Formalisme VPSC - Visco Plastic Self-Consistent (Molinari et al, 1987; Wenk et al., 1991; Lebensohn and Tomé, 1993;):
 - Chaque grain d'un ensemble polycristallin est traité comme une inclusion ellipsoïdale à l'intérieur d'une matrice
 - Calcul de la déformation plastique (rotation et fluage par dislocation):
 - On détermine la contrainte de cisaillement critique (CRSS = critical resolved shear stress) pour chaque système de glissement du grain, suivant son orientation et la force appliquée.
 - Glissement autorisé pour les systèmes de glissement pour lesquels $\sigma_{crit.} >$ seuil d'activité, à une vitesse proportionnelle à la contrainte déviatorique locale.
 - Calcul en fonction du temps
- Recristallization traitée approximativement: nucléation de nouveaux grains non déformés lorsque l'énergie de déformation dépasse un certain seuil.

- -> En entrée: nombre de grains, propriétés des cristaux, texture
- -> Calcul des propriétés sismiques:
 - Tenseur élastique effectif par sommation sur les grains (moyenne de Voigt).
 - On peut aussi sommer sur le tenseur des $1/\sigma$ (compliance tensor (moyenne de Reuss)).
 - La moyenne des deux: Hill
 - Voigt et Hill donnent des propriétés sismiques du matériau polycristallin à 5-10% près des mesures dans les échantillons naturels avec distribution des orientations de grains similaires.

Comparaison des prédictions de 2 différentes méthodes aux observations dans des ophiolites

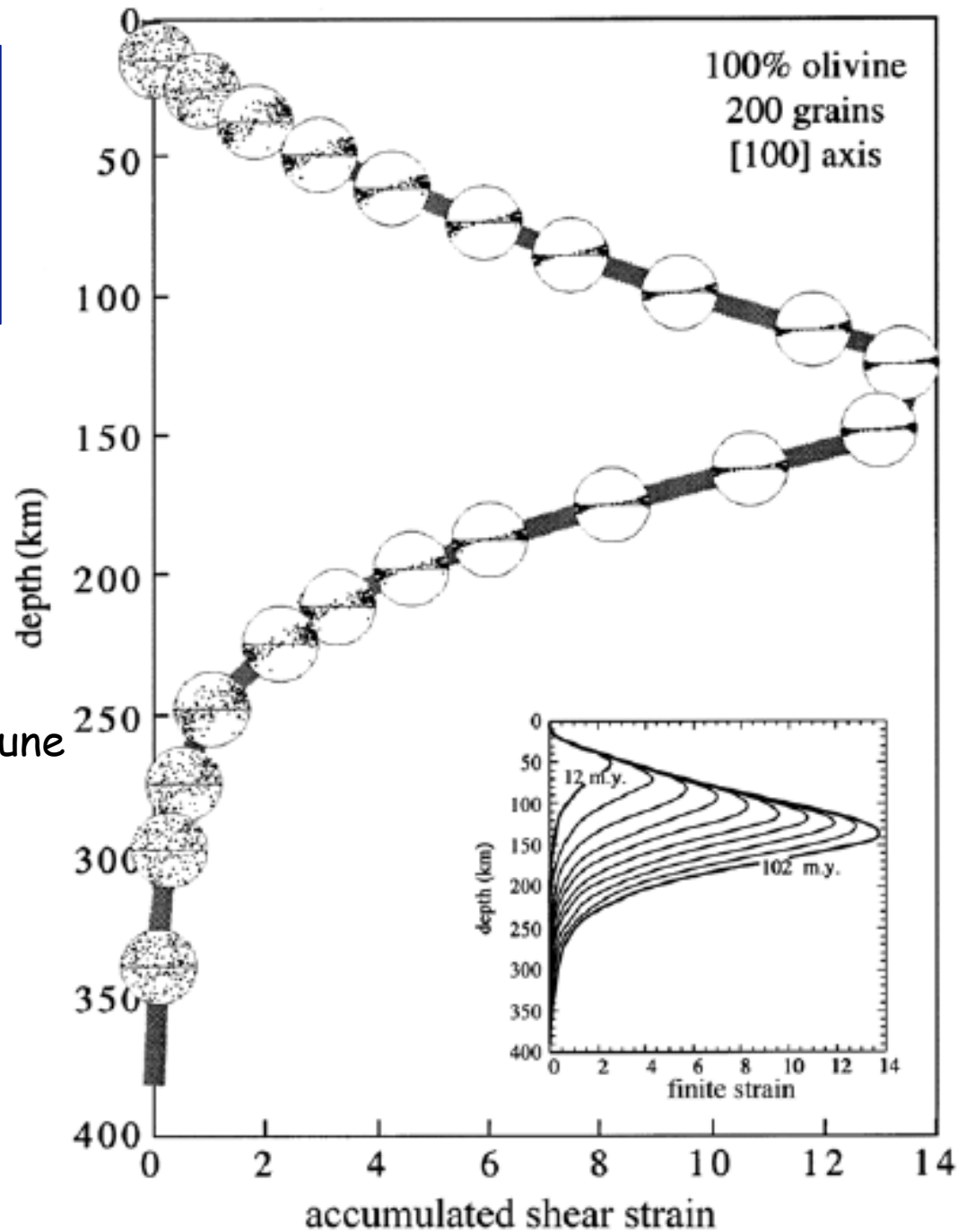


Exemples d'applications

- Régions proches des limites de plaque:
 - -> gradients de déformation intense
 - -> favorables au développement d'anisotropie
 - -> modélisation de plasticité polycristalline en 2D et 3D dans:
 - 1) limite litho/asthénosphère dans les bassins océaniques
 - 2) les régions de dorsale

Déformation en cisaillement entre une plaque lithosphérique et l'asthénosphère:

=> Développement d'une couche de ~250 km d'épaisseur de CPO

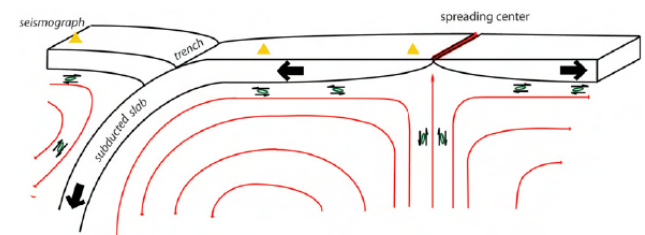


Age de la lithosphère: 100 Ma

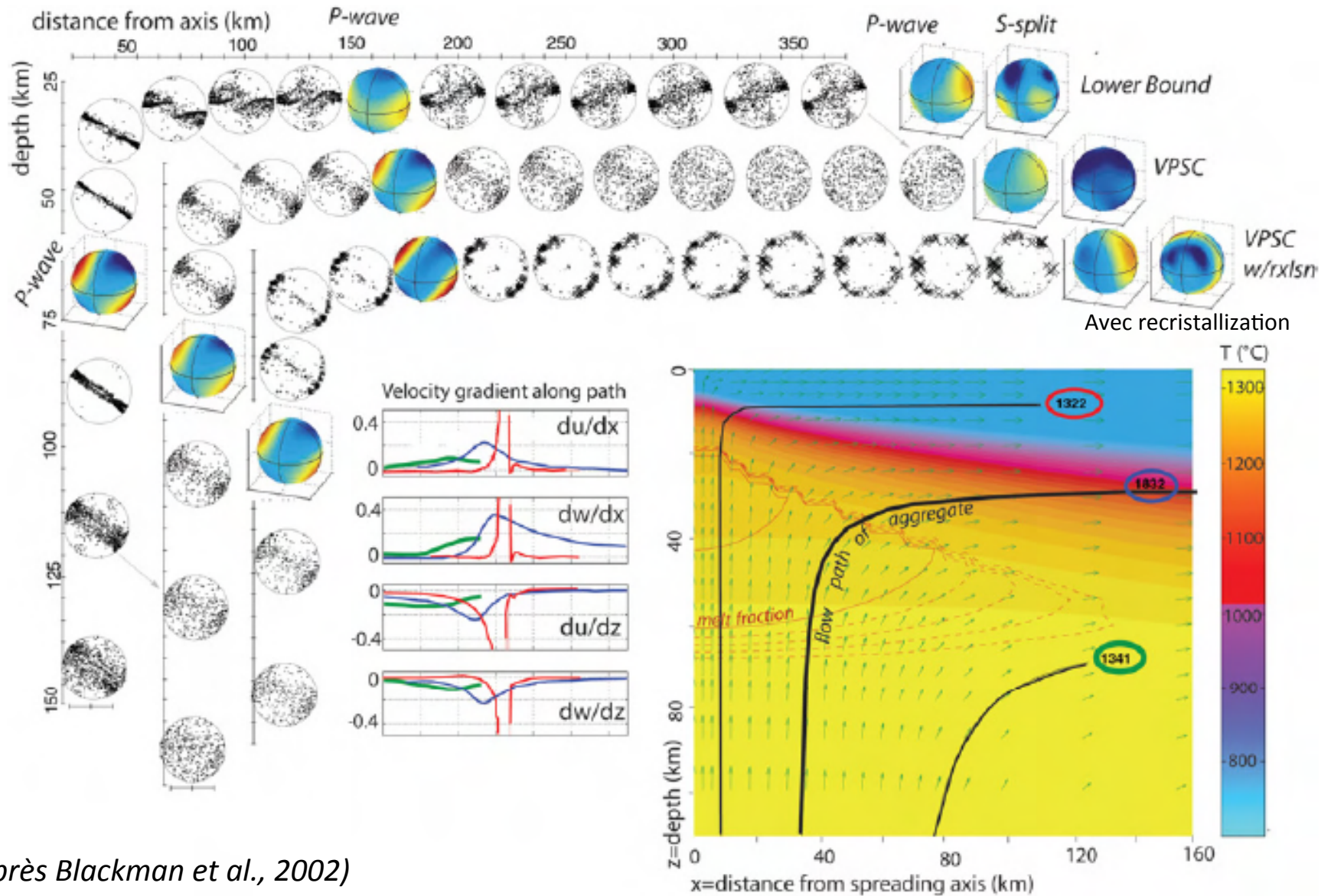
Blackman (2007);
Modified from
Tommasi (1998)

Déformation près d'une dorsale océanique

- 1) modèle géodynamique régional (éléments finis ou différences finies)
 - rhéologie dépend de la température
 - Conditions aux bords (mvt de la plaque..)
 - Produit: gradients de vitesse d'écoulement le long d'une série de lignes d'écoulement
- 2) On considère un agrégat de 70% olivine, 30% enstatite suivi le long de chaque ligne d'écoulement, en commençant par une orientation aléatoire des cristaux à la base du modèle -> évolue en fonction de la déformation rencontrée le long du trajet
- 3) on calcule le type et l'orientation de 1000 grains dans chaque "agrégat" et on en déduit les constantes élastiques effectives -> vitesses et anisotropie sismique



Écoulement près d'une dorsale:
 Comparaison de différentes méthodes de prédiction de la texture (trajet 1832) -
 Fusion partielle incluse



(D'après Blackman et al., 2002)

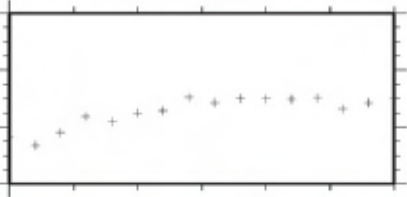
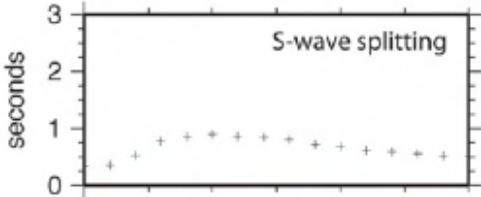
Anisotropie près de la dorsale

Viscosité de l'asthénosphère:

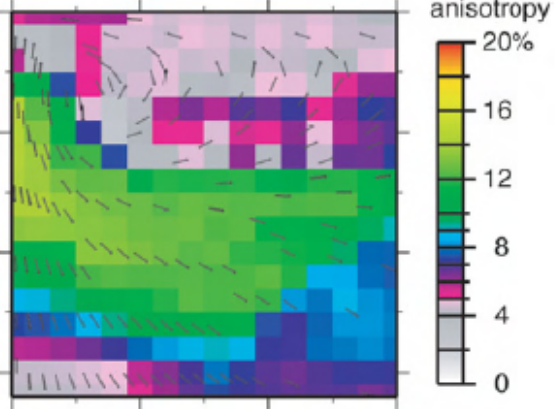
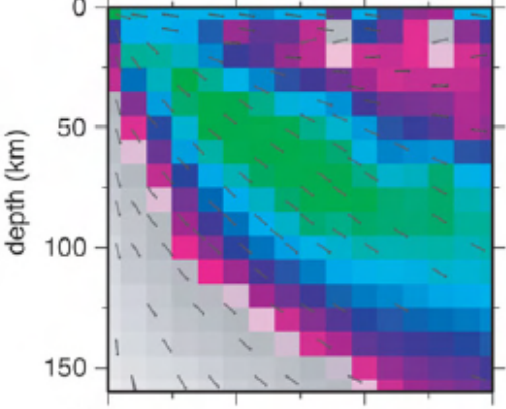
10^{20} Pas

5×10^{18} Pas

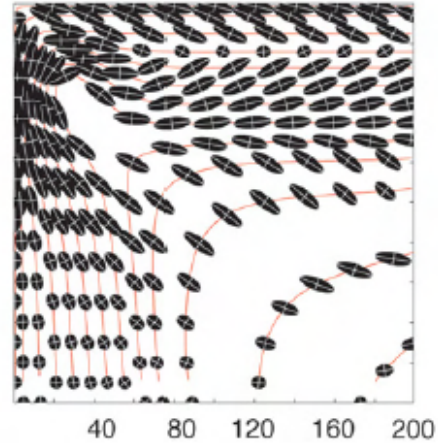
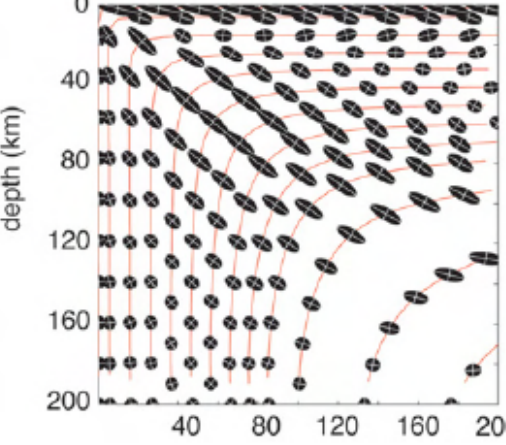
Splitting des ondes S pour une propagation verticale



Anisotropie en vitesse P et direction de l'axe rapide



Ellipses de déformation



D'après Blackman et Kendall, 2002