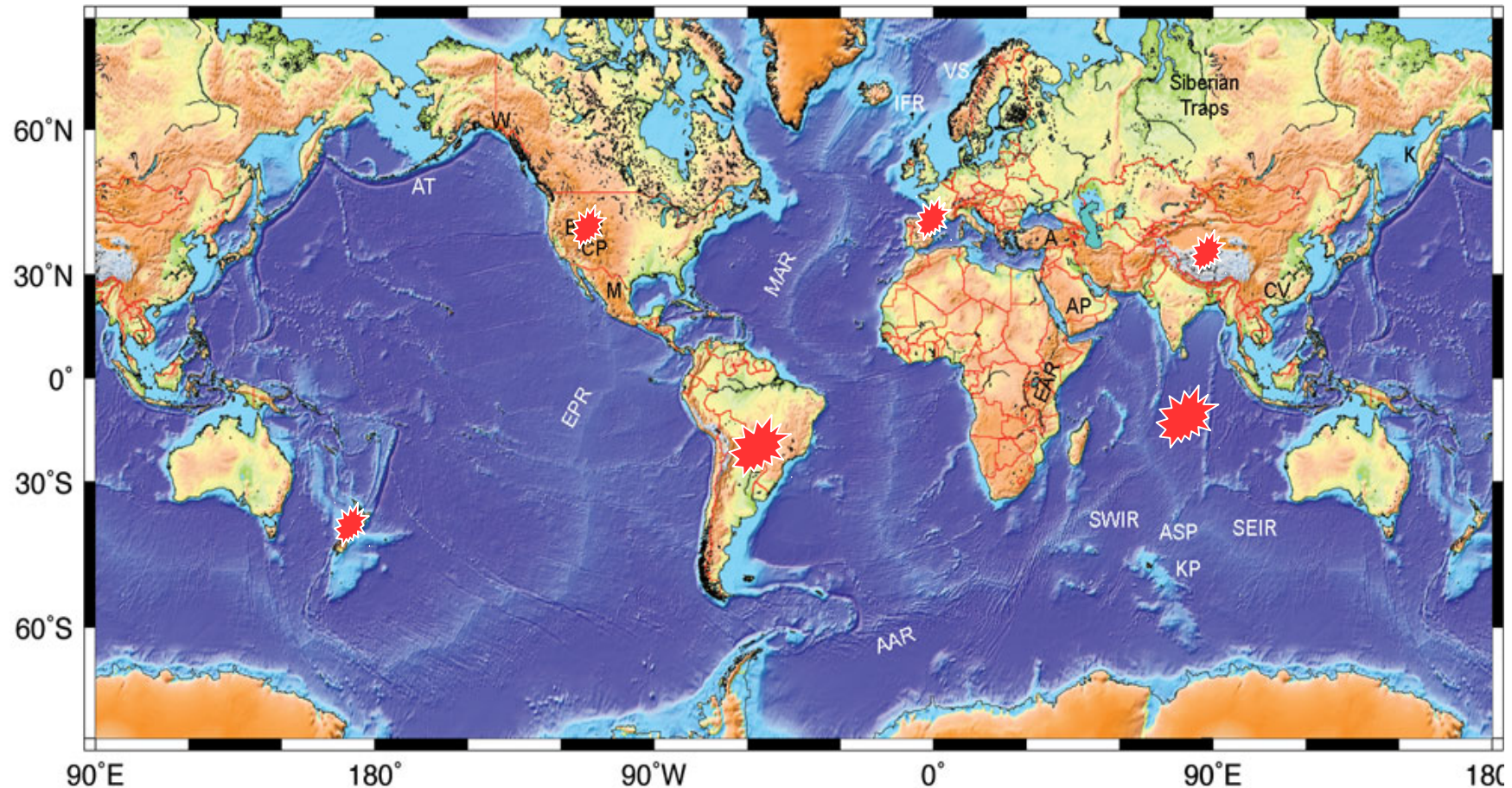
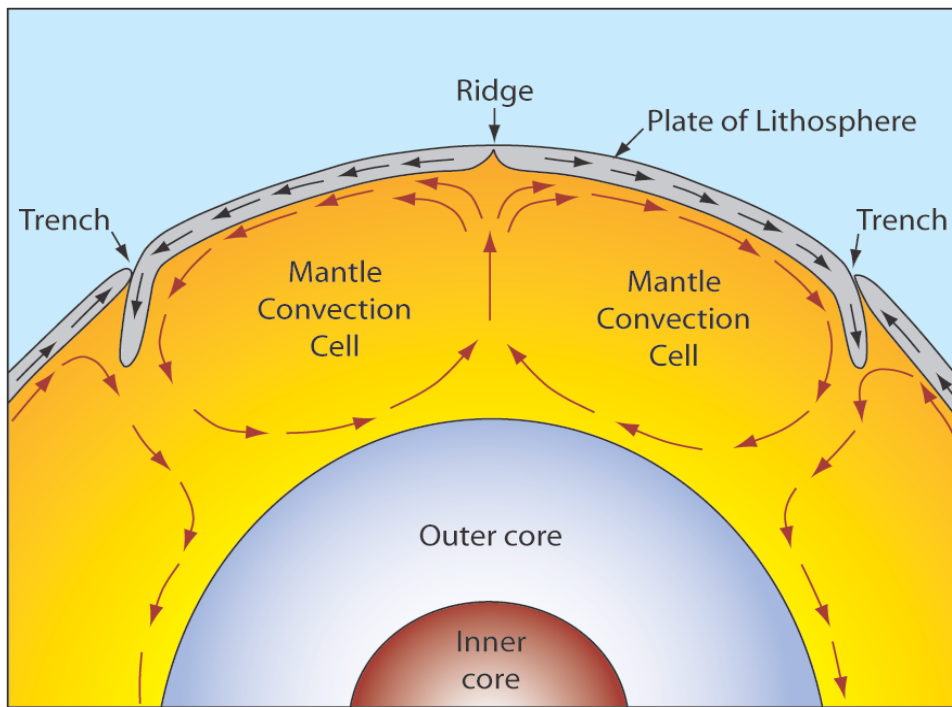


Modélisations de la Convergence de plaques tectoniques - M. Gerbault



- 1) Propriétés thermo-mécaniques des Plaques
- 2) Déformation Diffuse vs. Localisée (flambage et failles)
- 3) La subduction « Andine »
- 4) Interaction d'une plaque en subduction avec la discontinuité à 660 km.

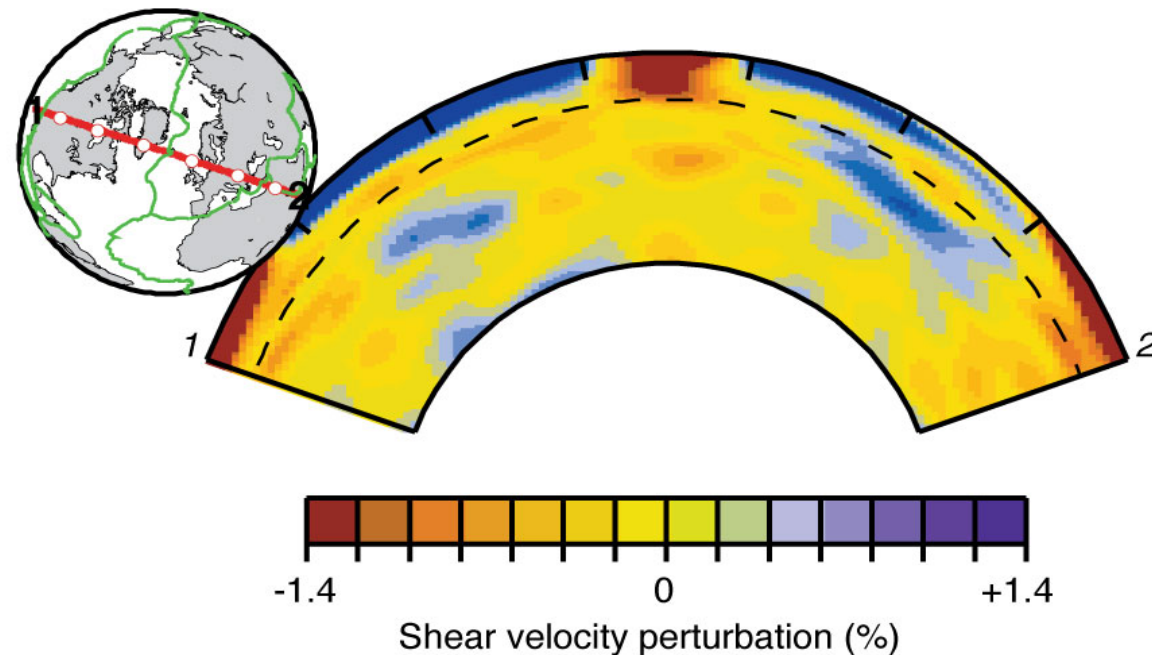


CONCEPT : Théorie de la tectonique des plaques. Wegener (1920), Holmes (1930), Le Pichon (1968),...«Les plaques rigides dérivent portées par les cellules convectives du manteau »

En évolution...

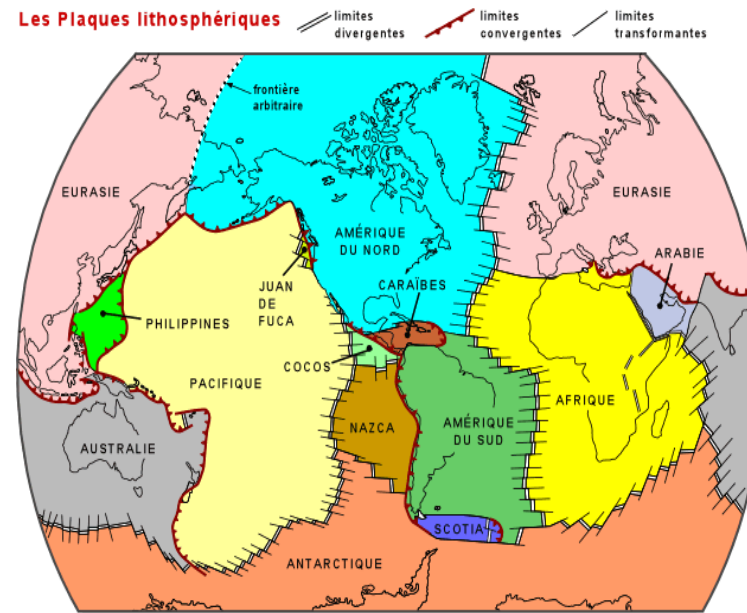
DONNEES :
Géologiques, géophysiques...

Tomographie du manteau : les couleurs représentent les différences de vitesses des ondes sismiques, généralement attribuées à des contrastes de température . Ainsi les domaines bleus, plus rapides, sont assimilés à des plaques subductées.



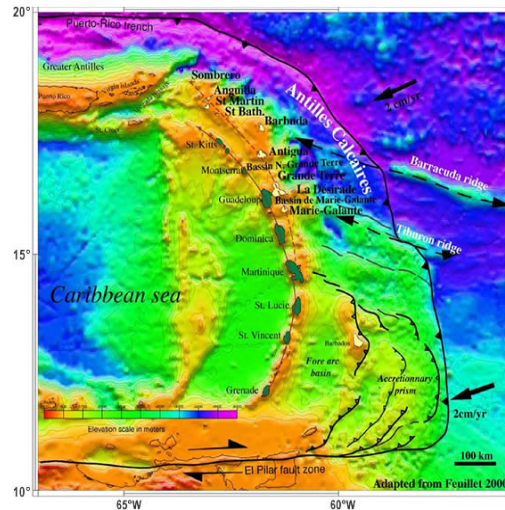
Vocabulaire: lithosphère -asthénosphère, slab, discontinuité à 660 km ...

De la cinématique des plaques: concept initial de plaques rigides avec des vitesses à leurs bords (le long de failles),

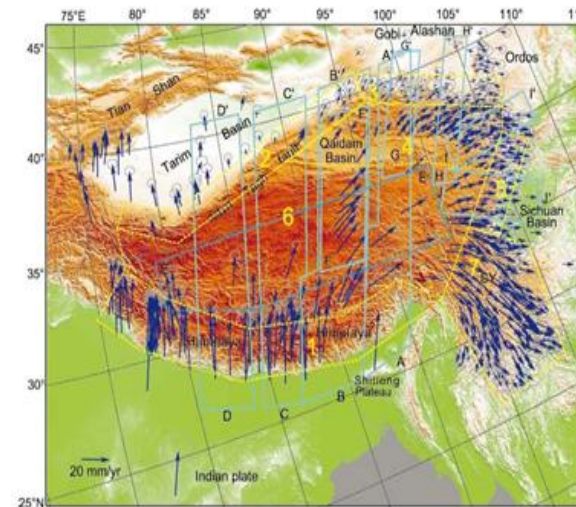


à la mesure de déformations à l'intérieur des plaques (déformations géodésiques et géologiques) => comportement d'un solide déformable

Antilles



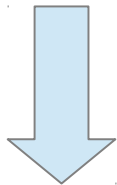
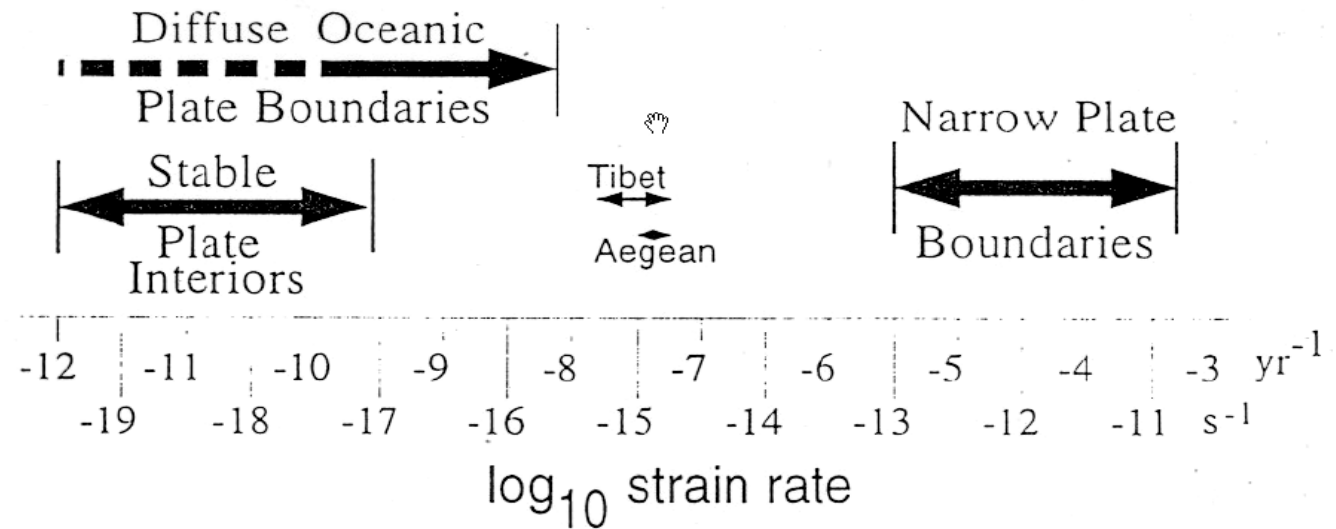
Tibet



1) Propriétés mécaniques de la lithosphère

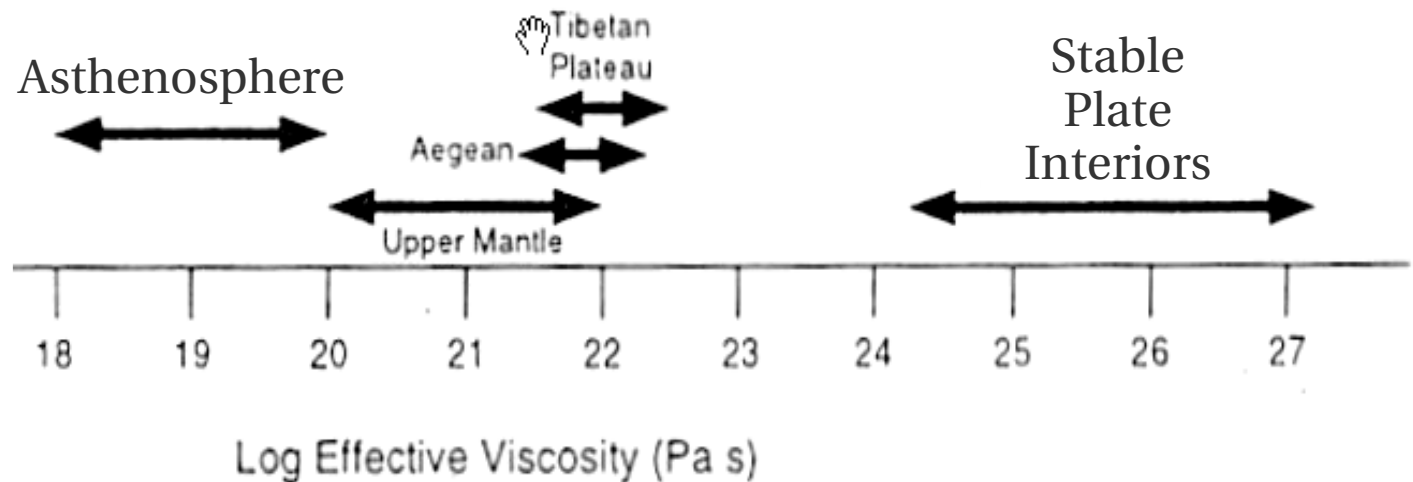
Ordres de grandeur des déformations : différentes échelles

$\dot{\epsilon}$



$\sigma = \mu \cdot \dot{\epsilon}$

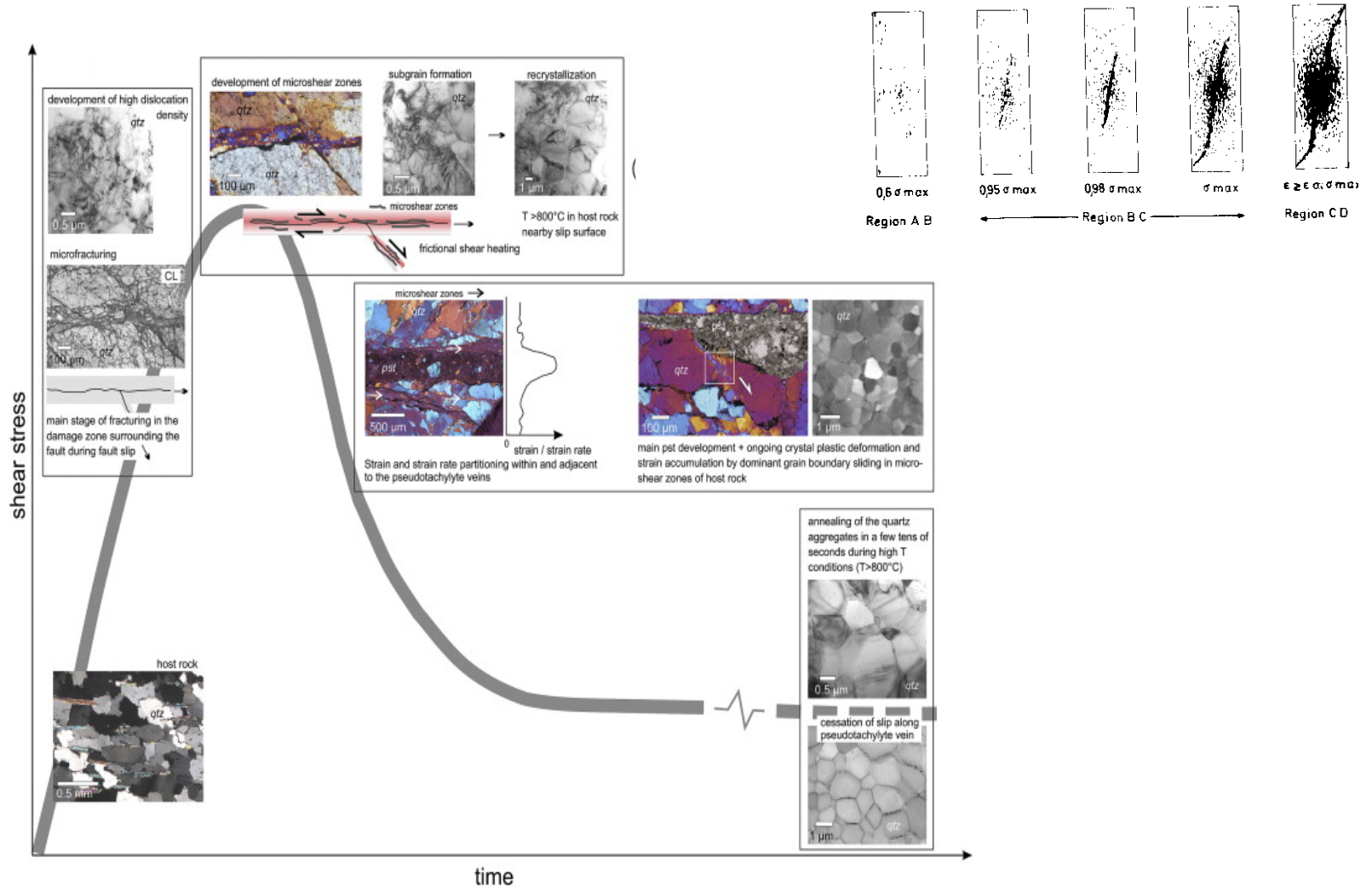
μ_{eff}



Expérimentations sur roches

Mécanismes de déformation, fonction de P, T, composition, chargement ...

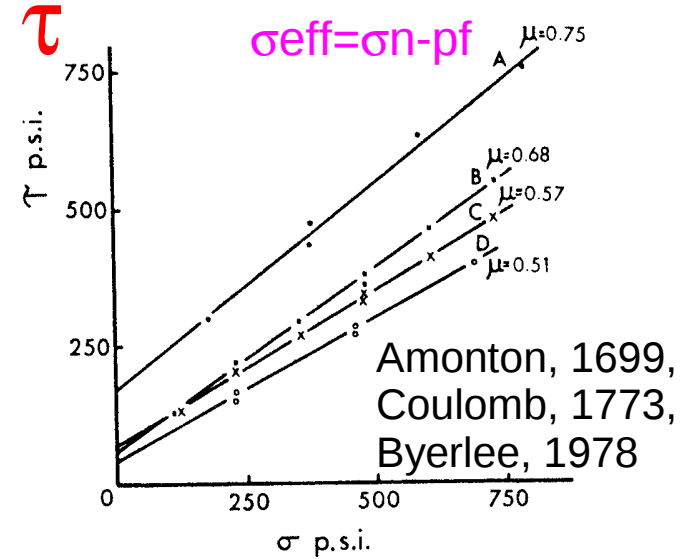
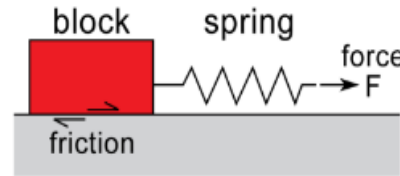
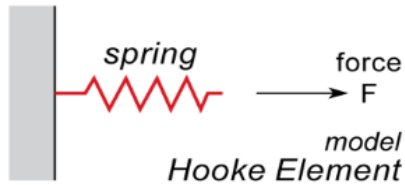
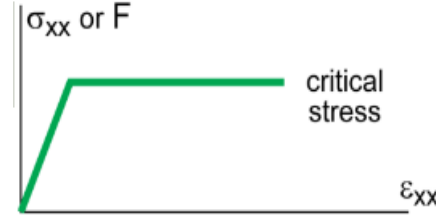
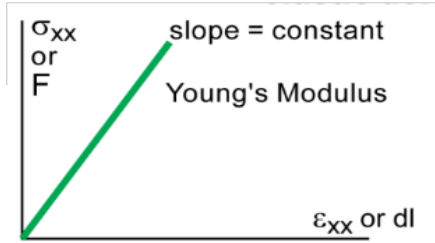
➡ Quel comportement (lois constitutives)?



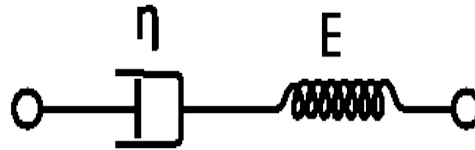
Lois de comportement

Elasticité, $\sigma = D \cdot \epsilon$

Rupture, type Coulomb : $\tau_s = S_o - \mu \cdot \sigma_n$

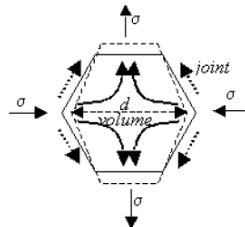


Fluage ductile : f(T)



Diffusion Creep

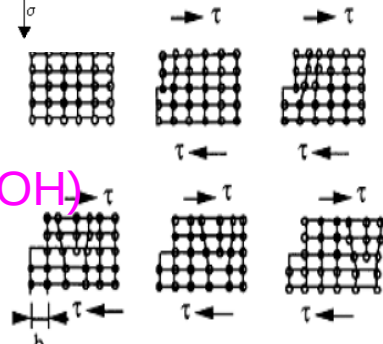
$$\dot{\epsilon}_{dif} = A d^{-p} \cdot \tau \cdot \exp\left(\frac{-Q_d}{RT}\right) \epsilon$$



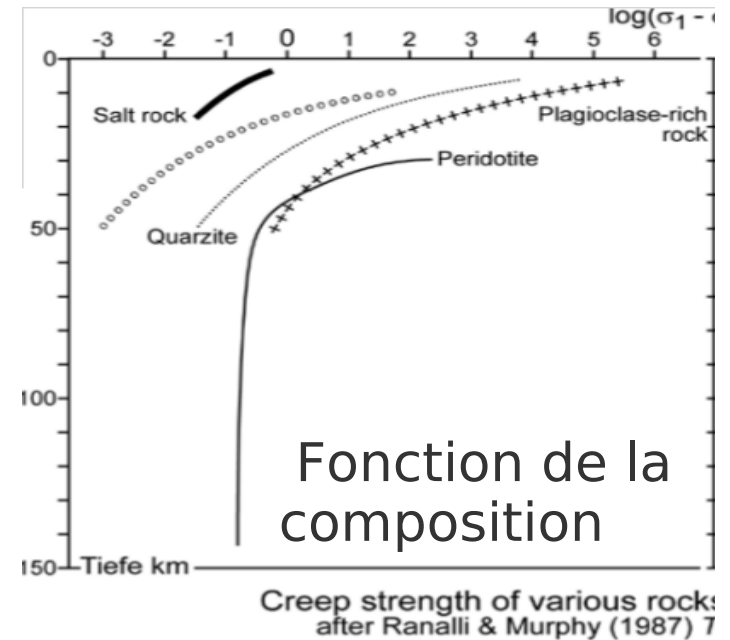
Dislocation Creep

$$\dot{\epsilon}_{dis} = A \cdot \tau^n \cdot \exp\left(\frac{-Q_p + PV}{RT}\right) \epsilon$$

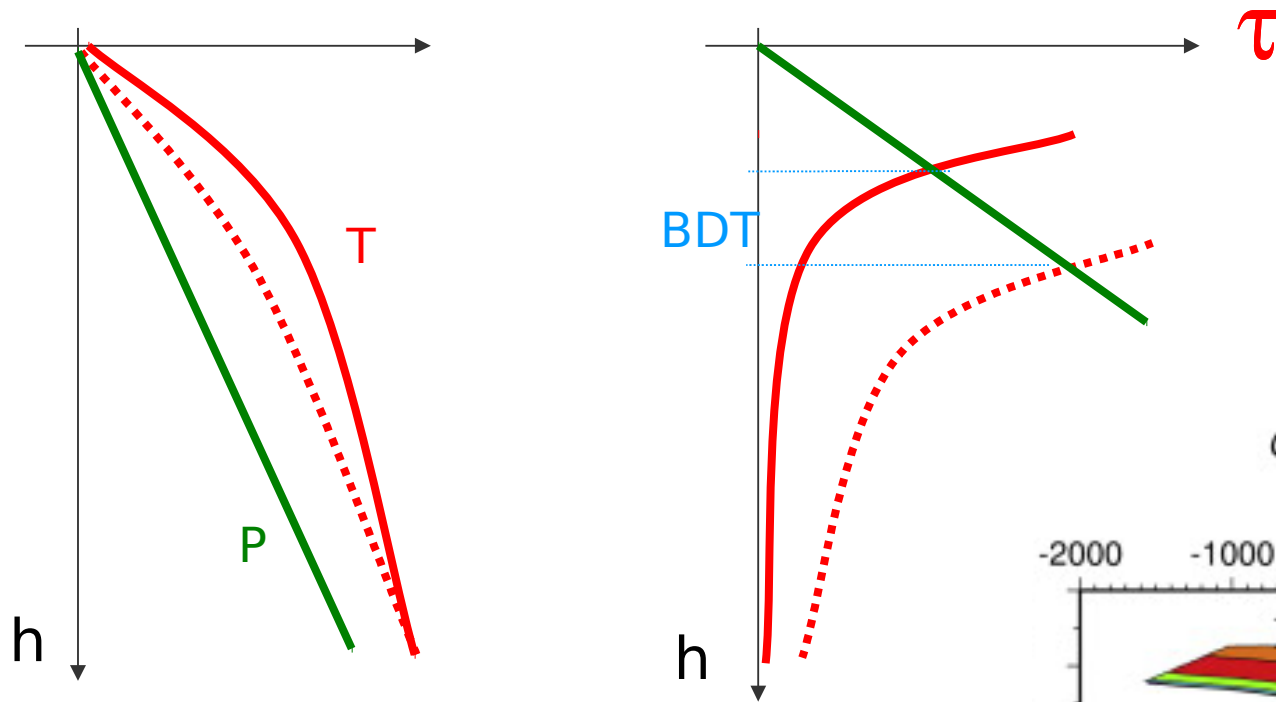
x f(OH)



Effet de l'eau...



Extrapolation des lois de comportement à l'échelle de la lithosphère

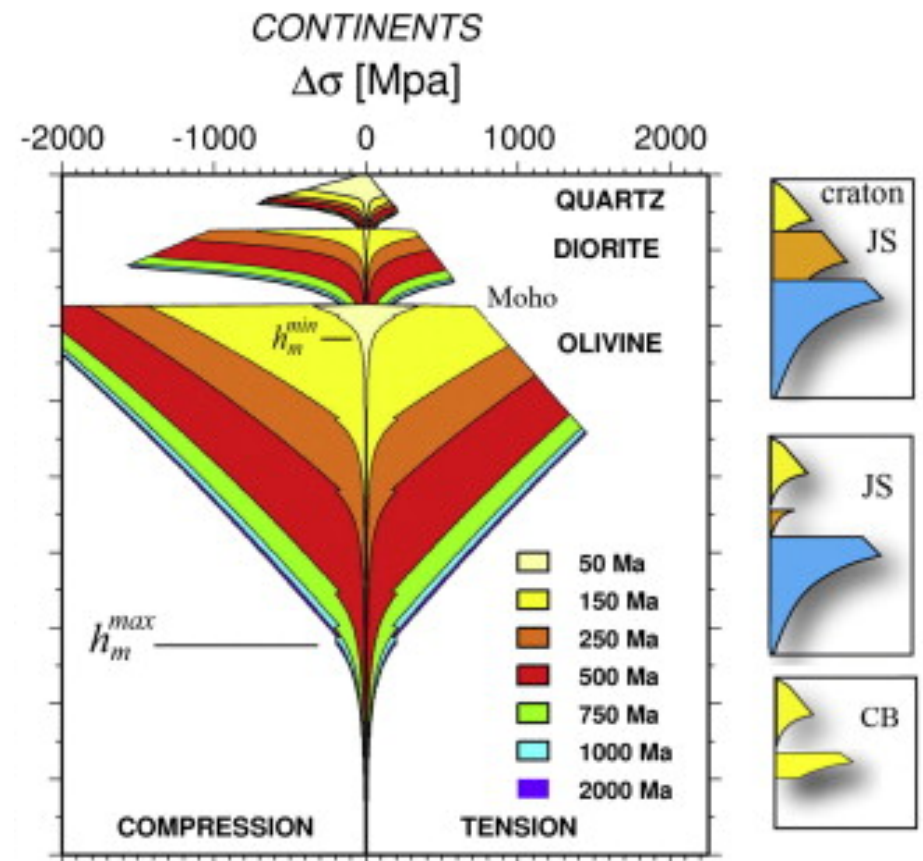


Comportement fragile de type Byerlee

$$\tau = f(P)$$

Comportement ductile non-Newtonien

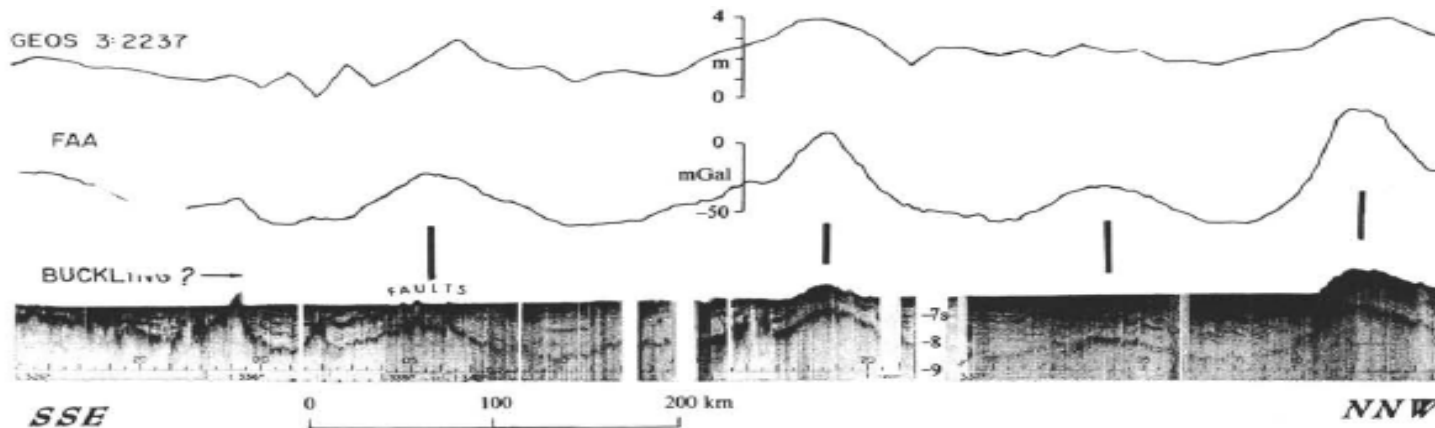
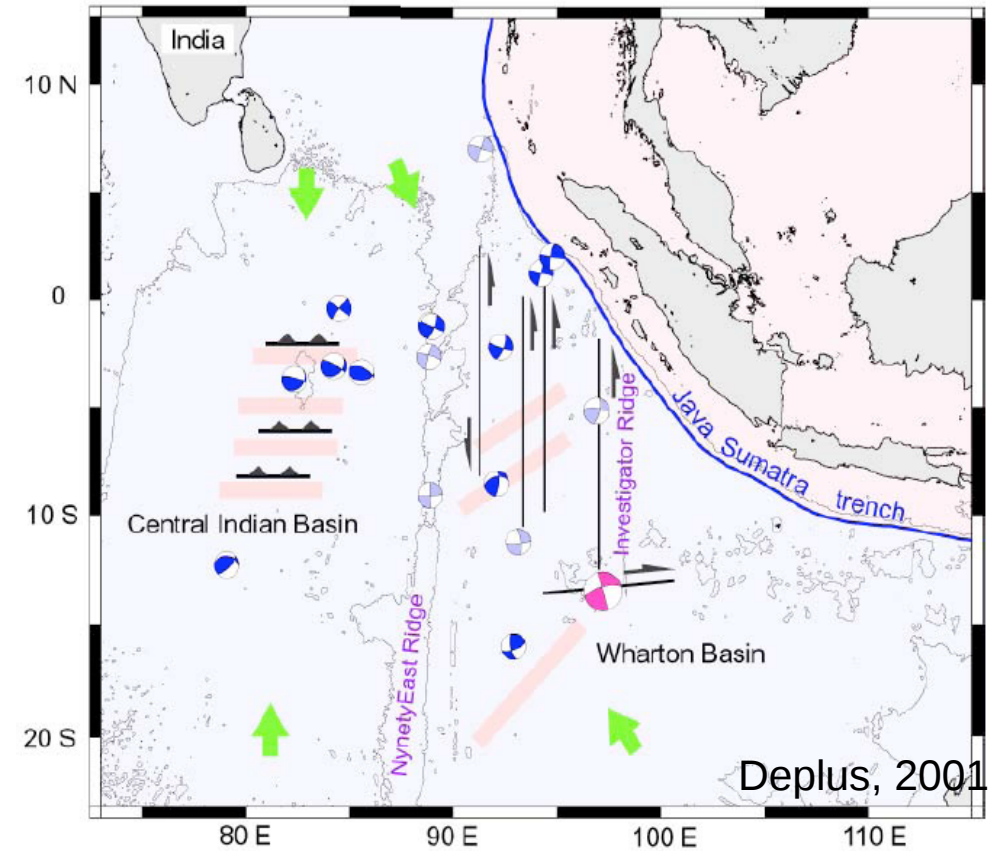
$$\tau = f(T)$$



2) Déformation diffuse vs. localisée - l'Océan Indien Central

1970-80: Sykes, et Weissel et al.
Relient l'activité sismique au centre de la plaque (magnitude 6 à 42 km de profondeur) à une déformation tectonique distribuée.

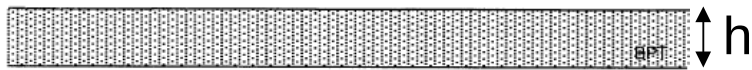
Les campagnes géophysiques montrent des Failles en surface et des oscillations périodiques de l'anomalie gravitaire en phase avec la bathymétrie, $\lambda \sim 200$ km.



Weissel et al., 1980

Principe du Flambage Lithosphérique

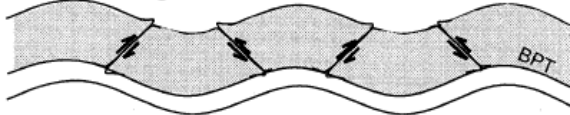
Homogeneous thickening and Diffuse faulting



Buckling



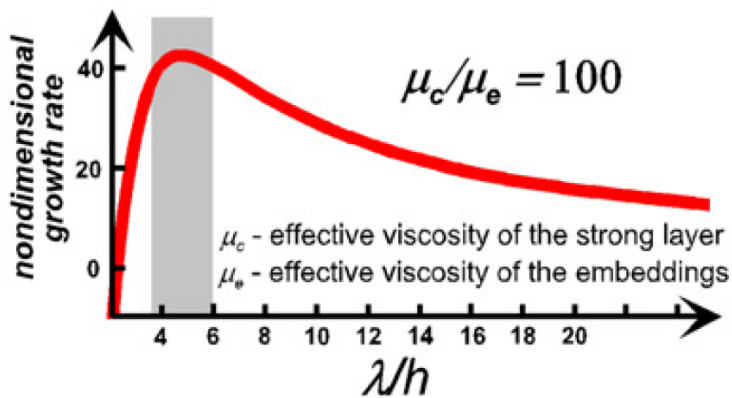
Localised faulting



Lithospheric failure



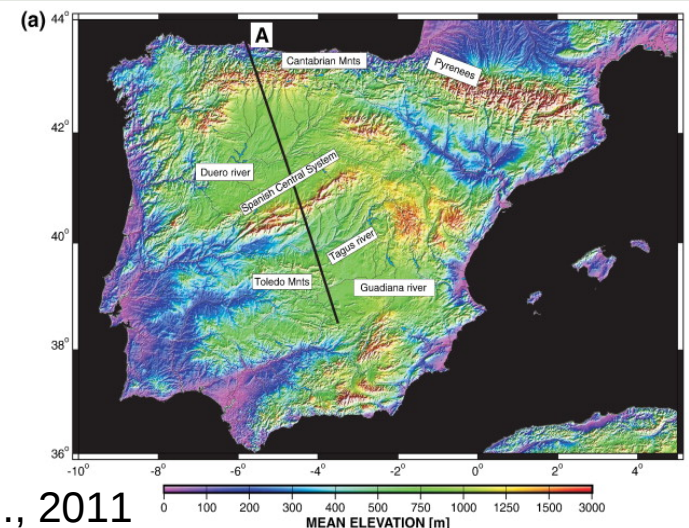
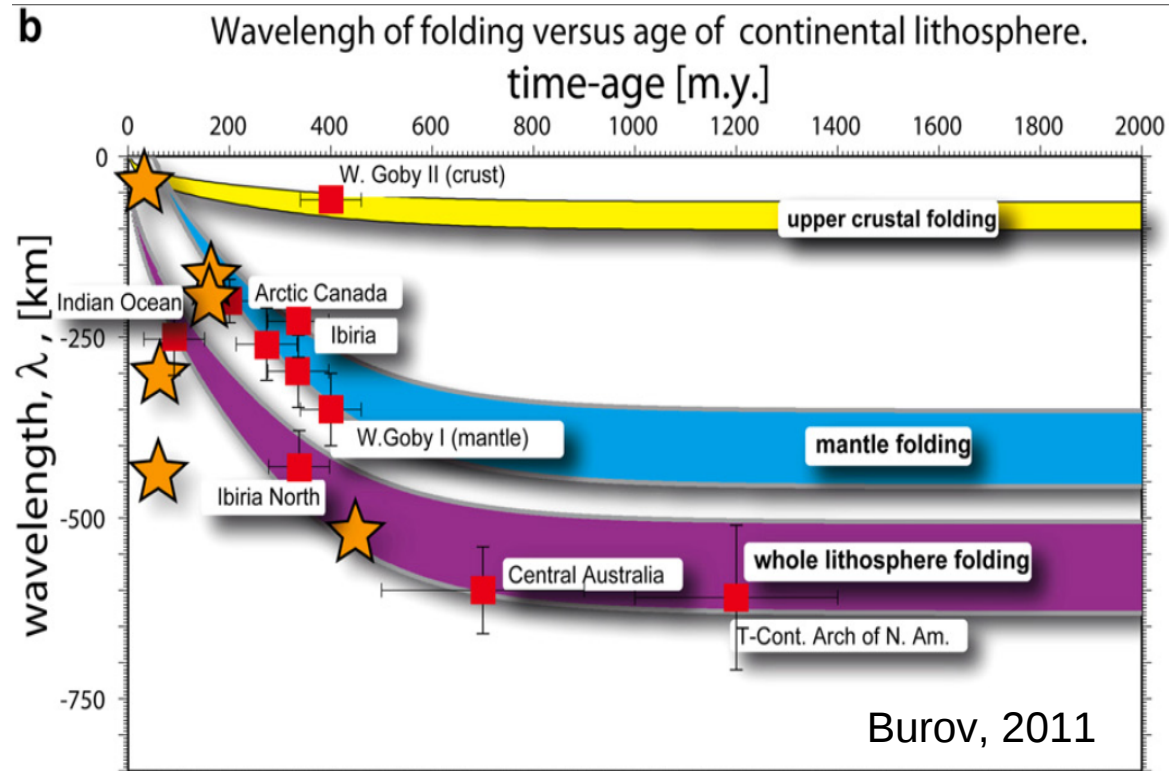
Gerbault, 2000, parmi d'autres



On calcule par une méthode de perturbation la longueur d'onde dominante d'une instabilité de flambage pour une couche d'épaisseur h :

$\lambda \approx 4-6 h$

Les couches résistantes de la lithosphère flambent selon l'épaisseur de ses couches compétentes, fonction de la température:

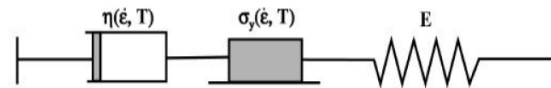


Méthode numérique en différences finies

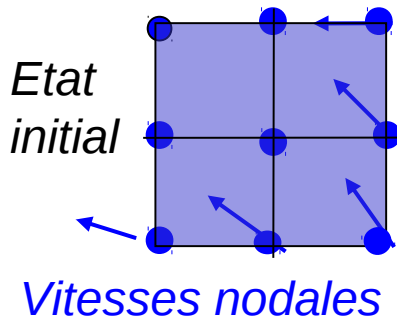
Parovoz (Poliakov & Podladchikov, 1993, **FLAC**, Cundall & Board, 1988)

• Equations de continuité et du mouvement: $\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$ et $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho \frac{dv_i}{dt}$

• Equations Constitutives: $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{el} + \dot{\epsilon}_{ij}^{vis} + \dot{\epsilon}_{ij}^{pl} = \frac{1}{2G} \frac{d\tau_{ij}}{dt} + \frac{1}{2\mu_{vis}} \tau_{ij} + \dot{\lambda} \tau_{ij}$

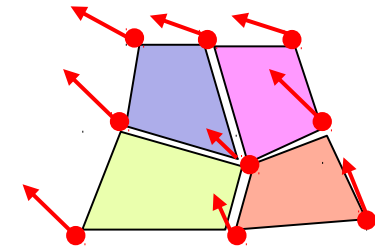


t1

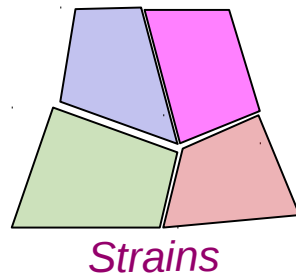


new
velocities and
displacements

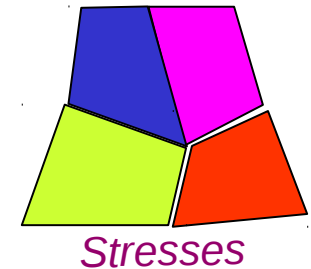
Equilibrium Equation
(Equation of Motion)



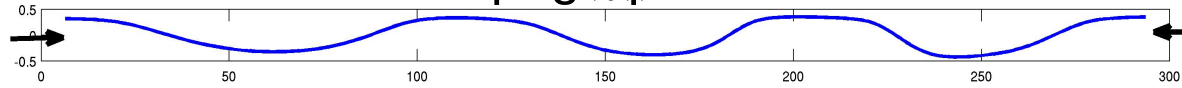
new
stresses
or forces



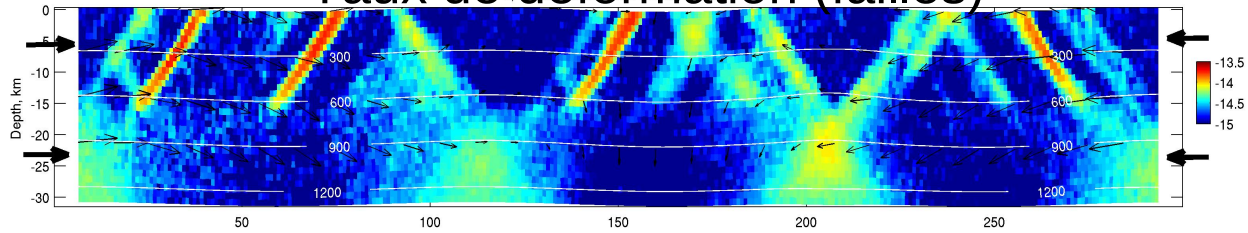
Stress / Strain Relation
(Constitutive Equation)



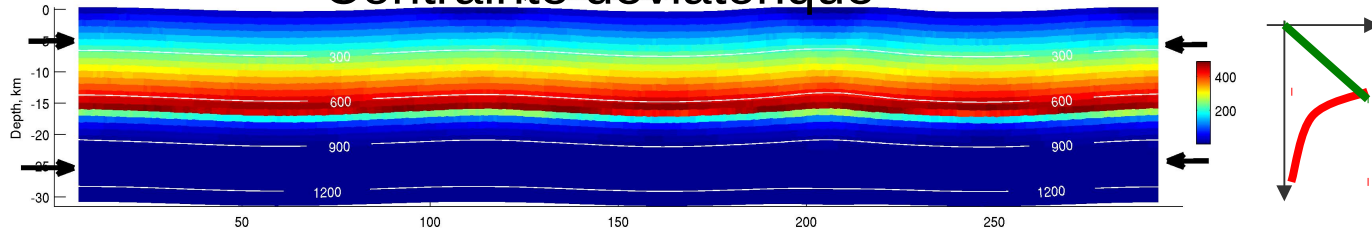
Topographie



Taux de déformation (failles)



Contrainte déviatorique

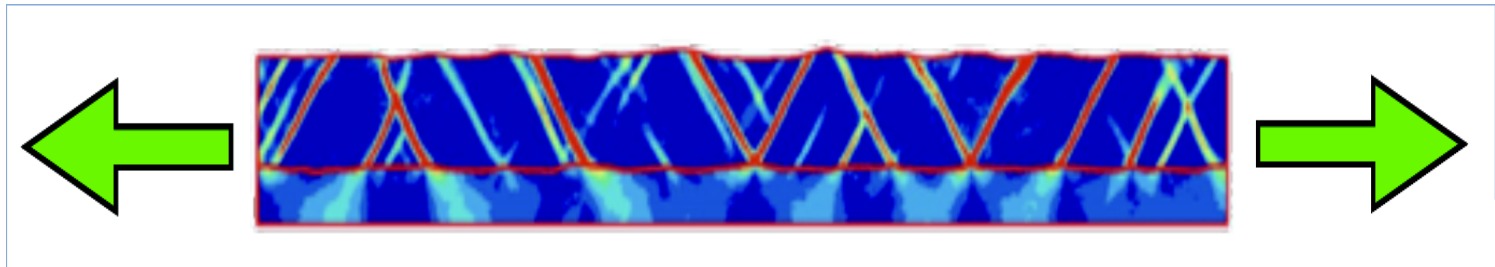


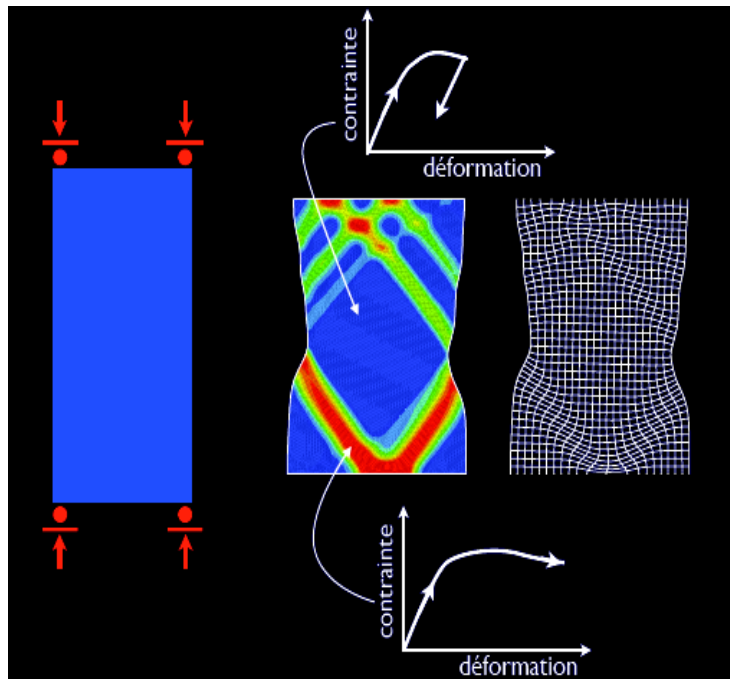
Compression
(code Parovoz)

Comparaison avec les
données aident à
contraindre τ réel
(Gerbault, 1999, 2000)



Extension
(code Adeli,
Hassani)





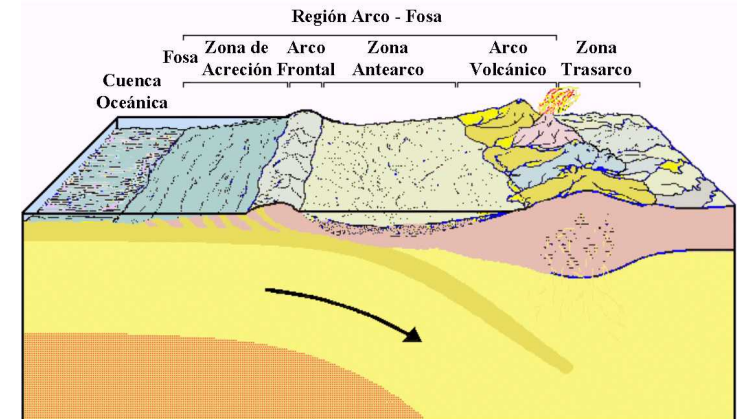
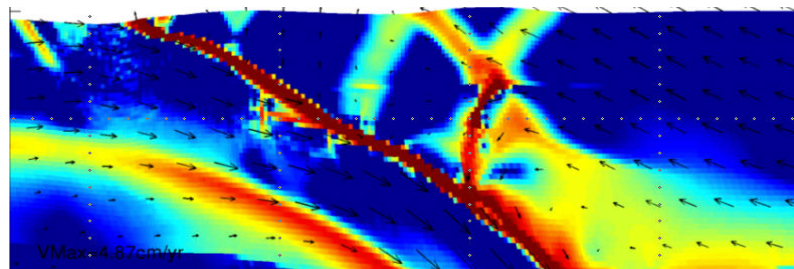
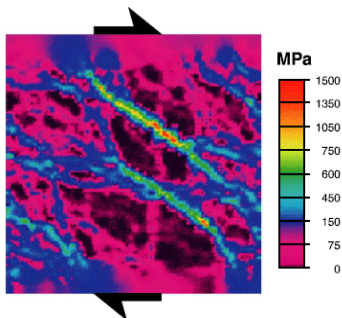
Etudes de localisation de la déformation à Géoazur:

Initiation de zones de cisaillement par méthodes numériques –
ADELI (R.Hassani), FLAC (A. Chemenda)

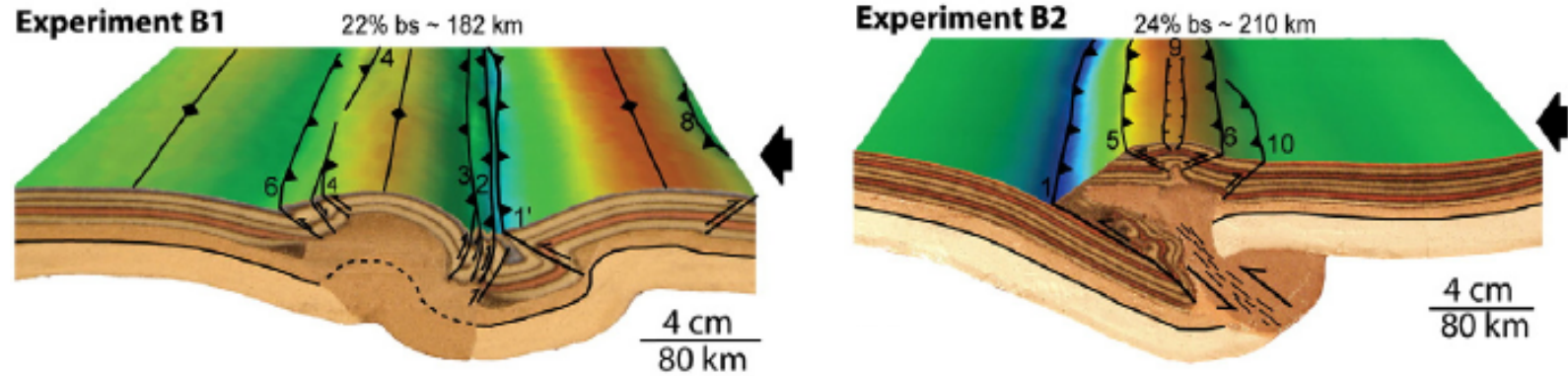
Interaction fluides/faille: glissement selon les propriétés hydromécaniques –
FLAC+TOUGH (F. Cappa)

Instabilités de pente (la Clapière),
Compaction de géomatériaux –
FLAC+LMGC (Bouissou, Chemenda)

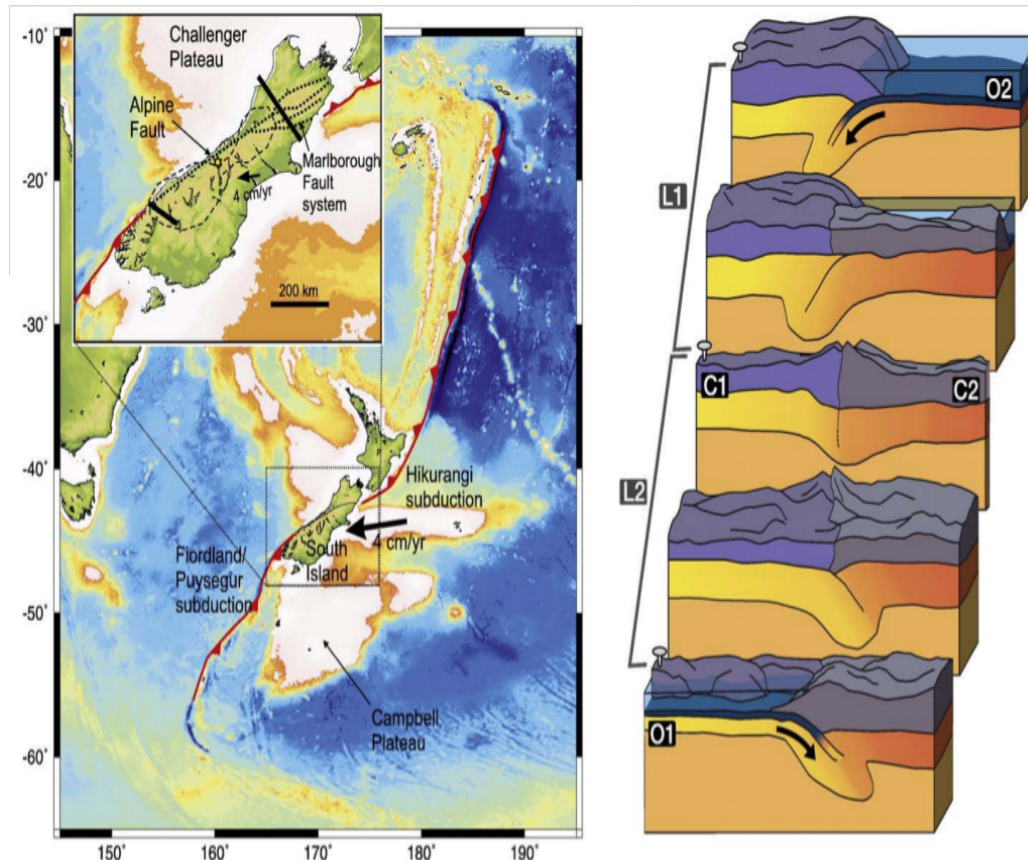
La localisation de la déformation est une bifurcation élasto-plastique qui se produit aussi à l'échelle lithosphérique à long terme



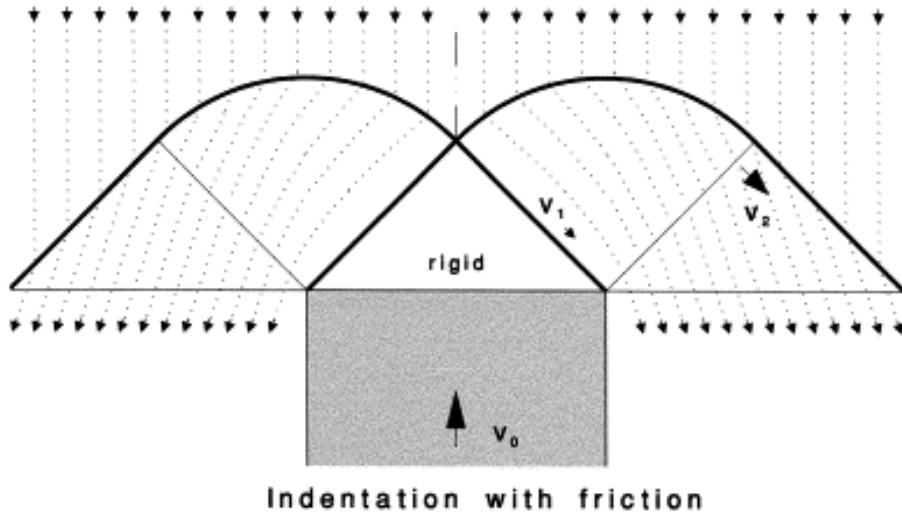
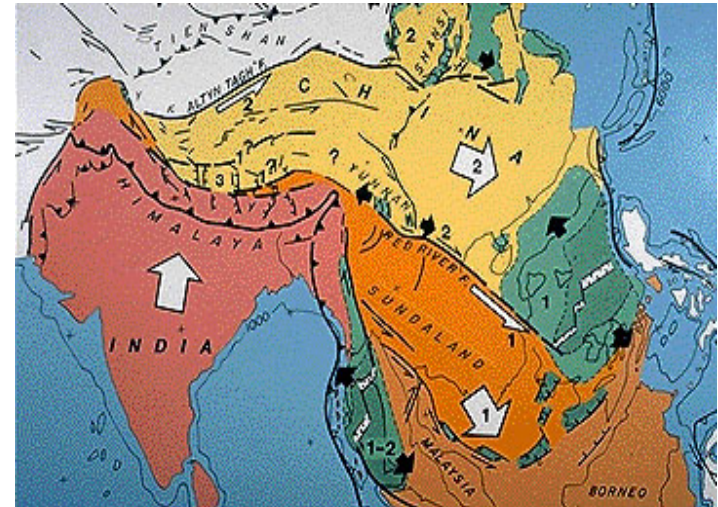
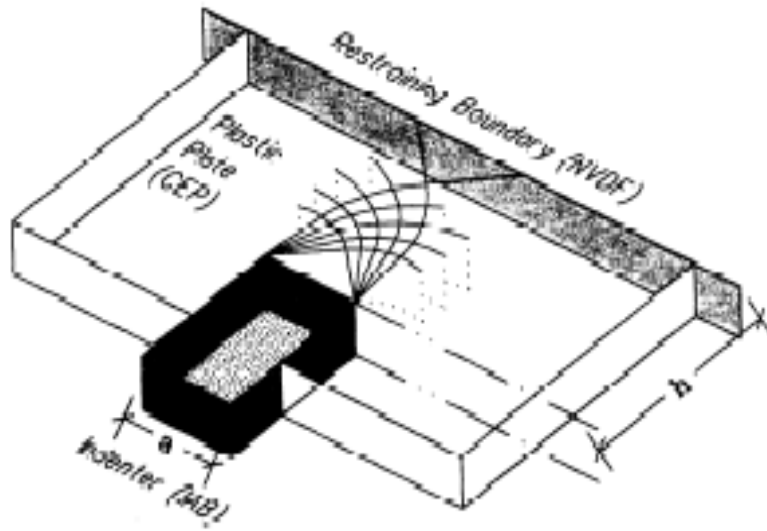
La Collision continentale : *indentation* et imbrication de couches



Nouvelle-Zélande

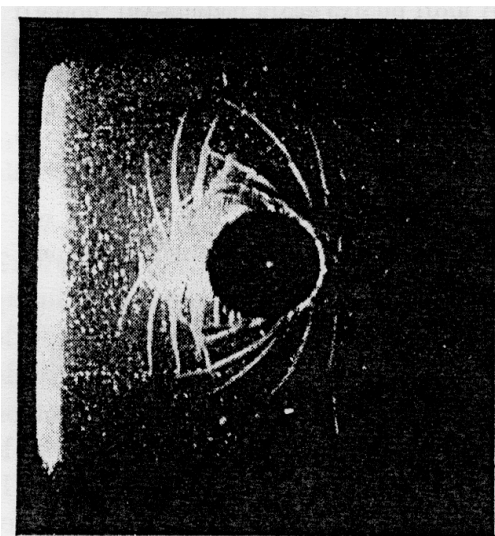


Multiple examples of indentation with the most prominent: the Himalayas



Indentation asymetrique
Tapponier et al. (1975)

Solutions mécaniques (théorie de la plasticité), applicables à divers contextes : flexure de plaque, réservoirs magmatiques



tends to cause, at least in the surface layer, a plastic flow of symmetry having the radii as circles as the directions of principal stress.¹ These slip lines have envelope.

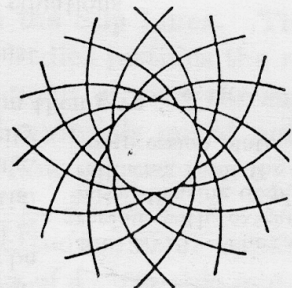
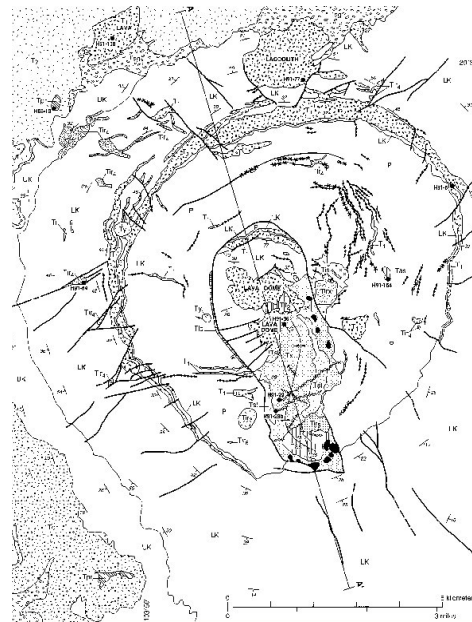


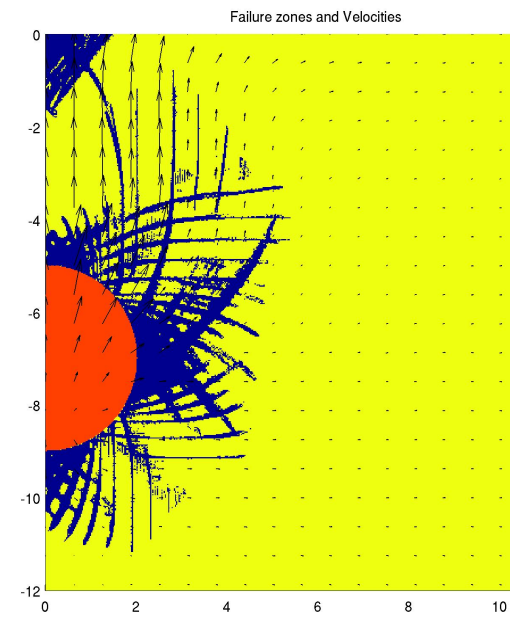
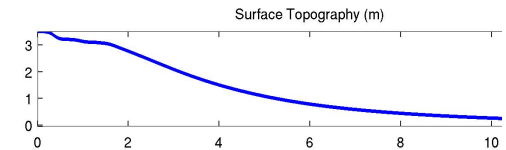
FIG. 37-12. Slip lines on surface of a steel block produced by forcing a cylindrical punch into it.

FIG. 37-13. Slip lines consist of system of orthogonal logarithmic spirals.

Nadai, 1960



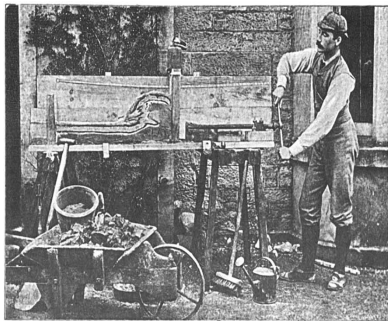
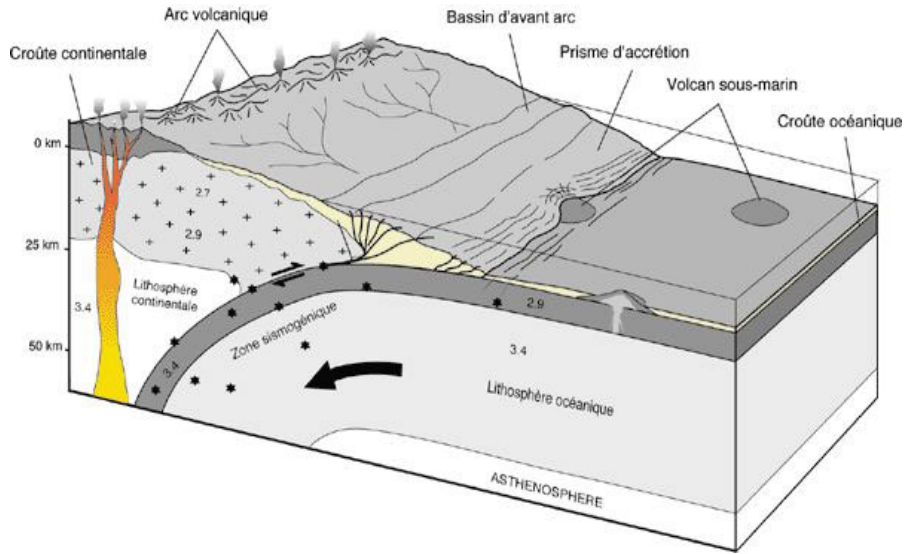
Solitario Laccolith, Texas (Henry et al., 1997)



Mohr-Coulomb shear-type failure (blue zones) around a pressurized
Gerbault et al., 2012

Comparaison de la géométrie des structures
+ Surpression interne nécessaire pour la rupture

L'interface d'une subduction



Experiments in Mountain Building

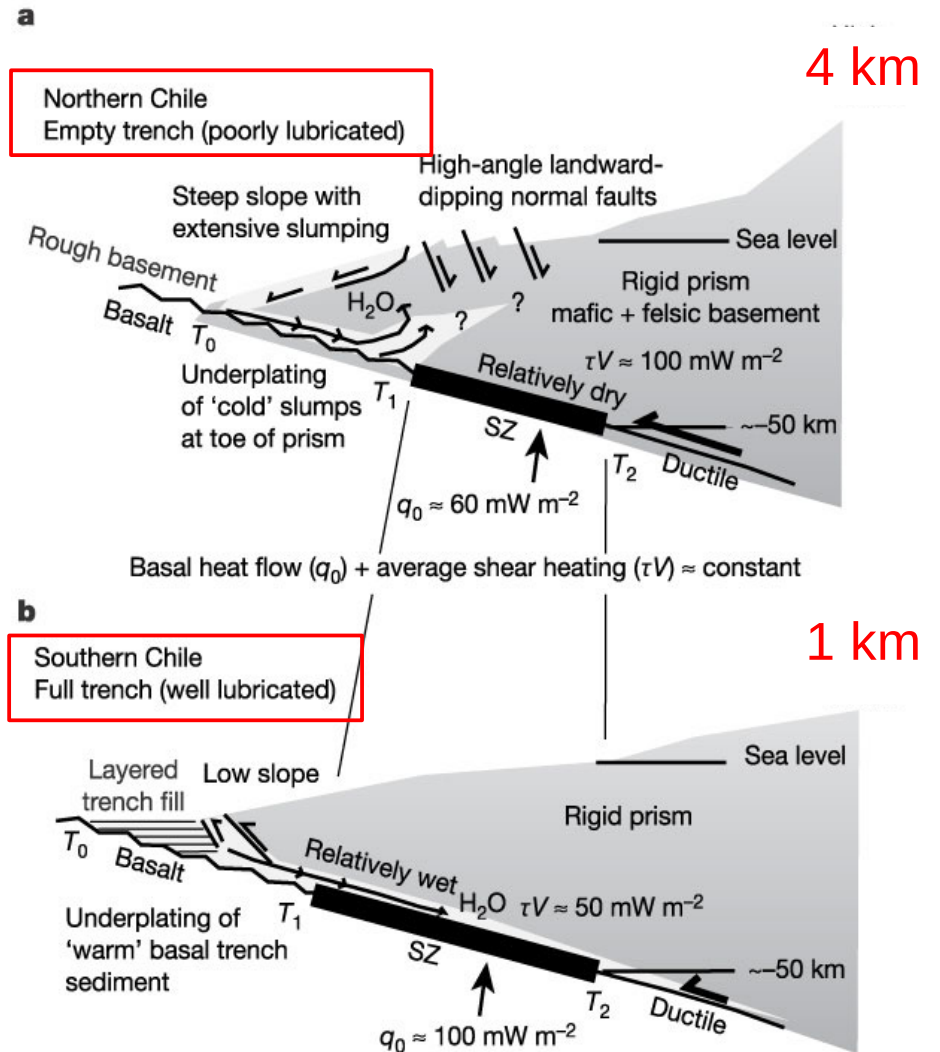


La mesure des pentes α et β
 + bilan des forces
 Fournit la friction ($\mu = \tan \phi$)

$$\alpha = \beta \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} - 1 \right) + \mu_b \cdot \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

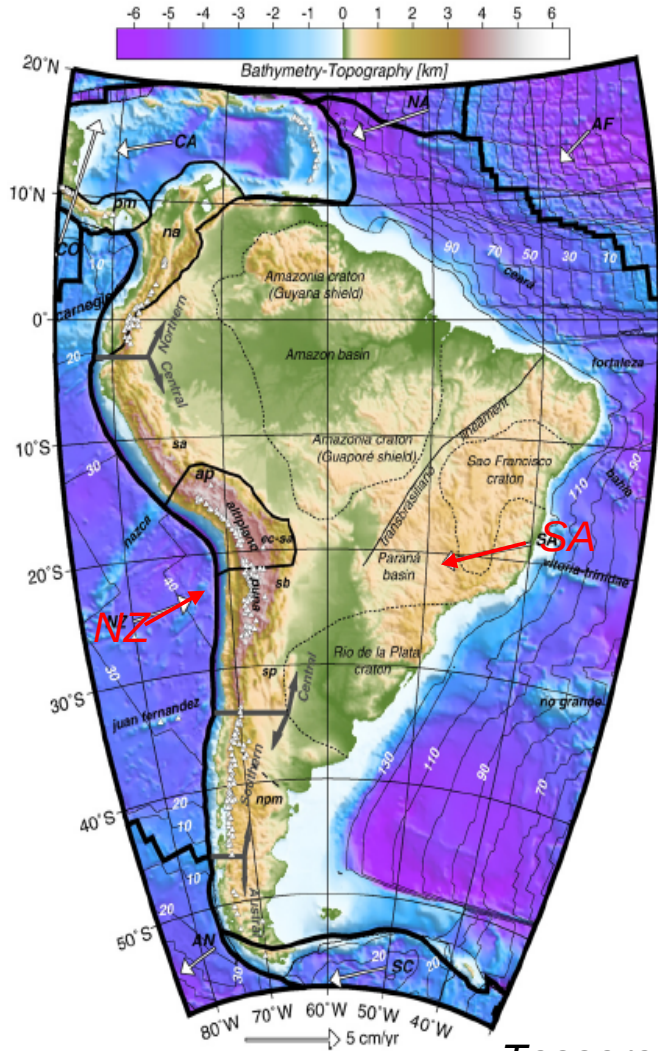
$$\mu \rightarrow \tau$$

Le relief résulte de l'interaction climat/tectonique, qui conditionne la lubrification du plan de subduction

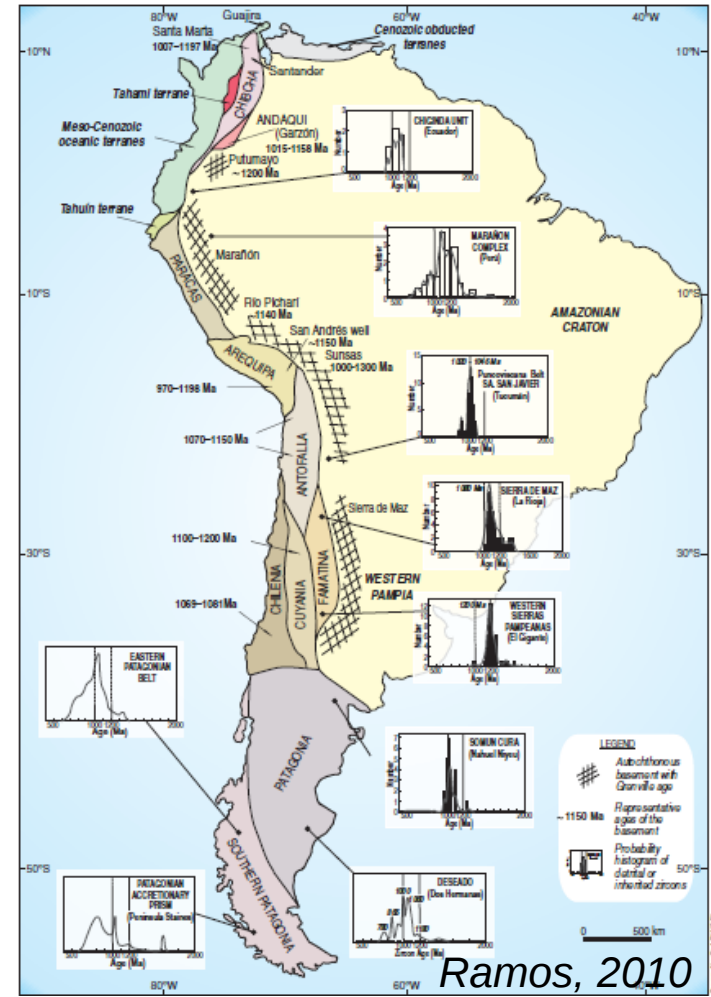
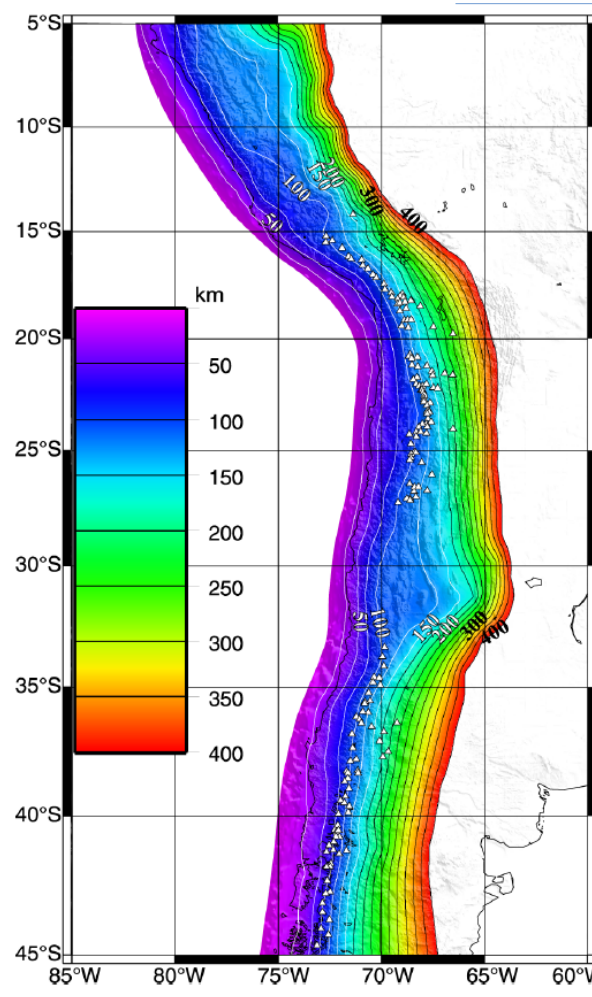


3) La Subduction Andine

Nazca passe sous l'Amérique du Sud à la vitesse uniforme de 7 cm/an (vitesse de croissance des ongles)

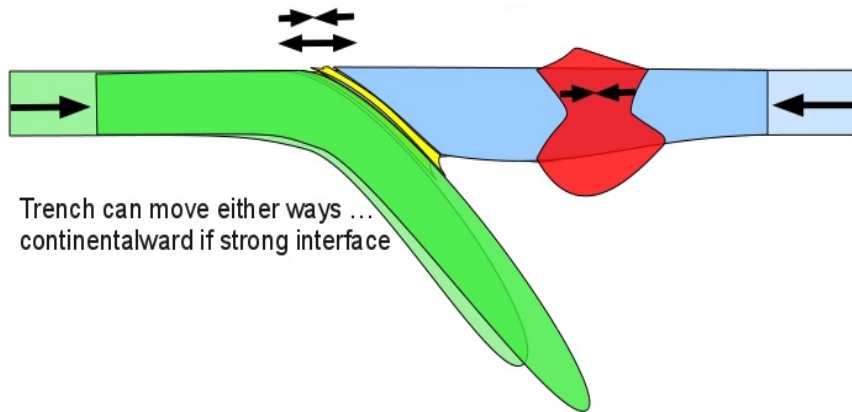


Tassara, 2012

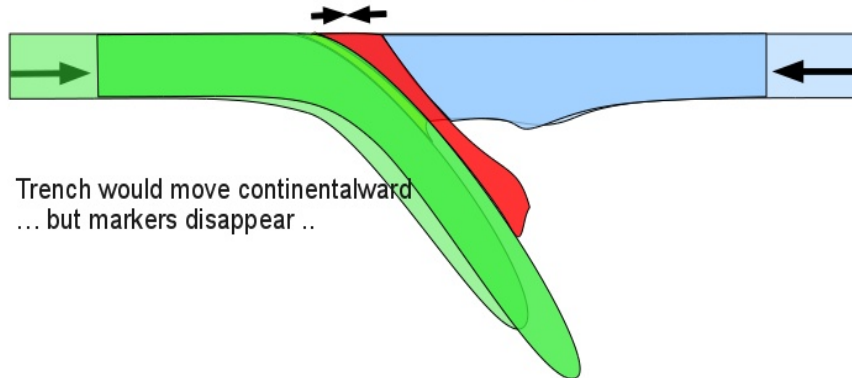


Relief variable, slab de pente variable, terrains variables

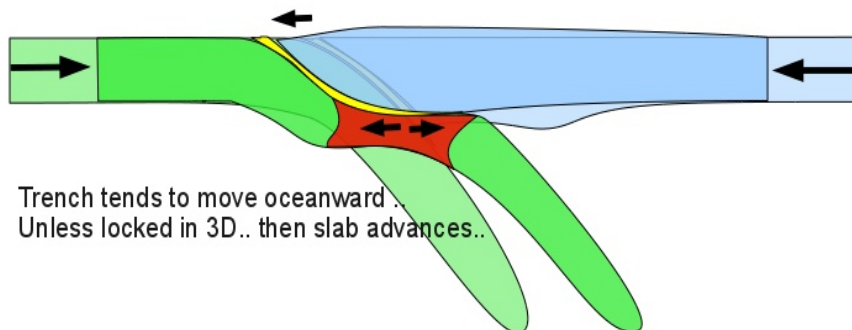
La convergence entre plaques s'accomode là où elles sont le plus faible mécaniquement



a) un arrière arc faible
> déformation intraplaque
(plus distribué).



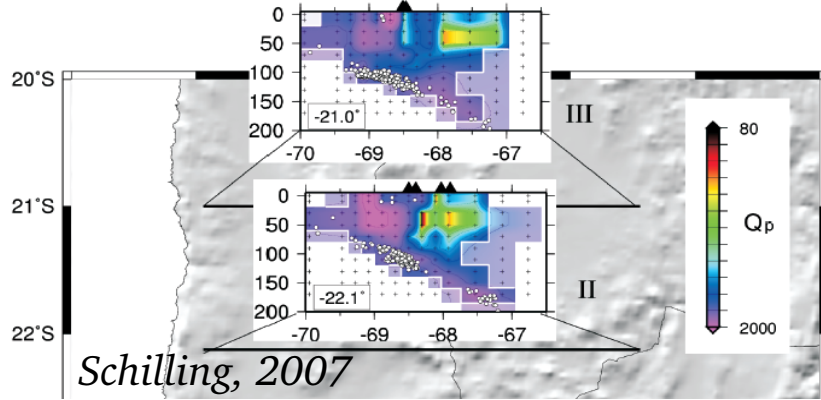
b) une faible friction d'interface
> glissement relatif au contact
(plus localisé).



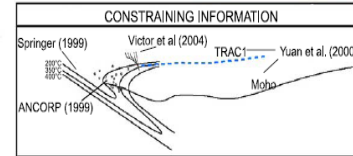
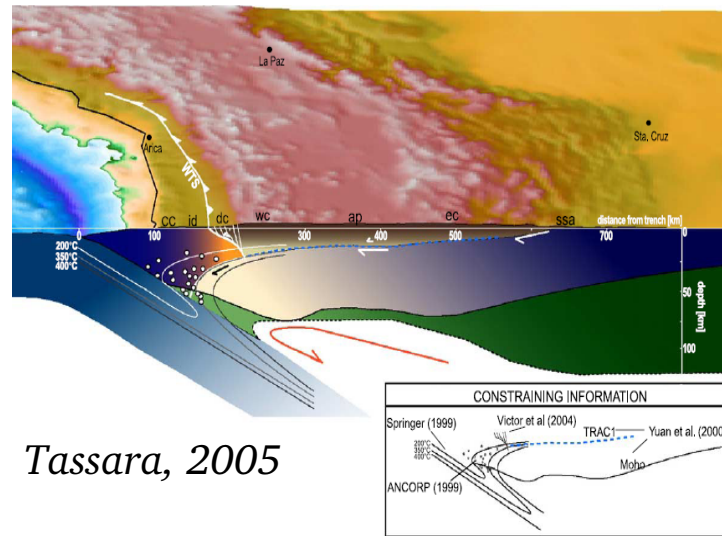
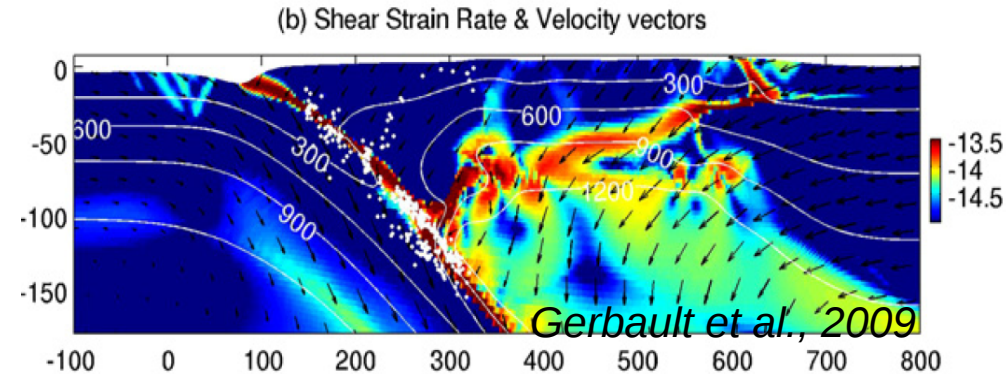
c) un slab faible
> se déforme/ se rompt

Cas a) des Andes Centrales – données et modèles

Données géologiques et géophysiques
(sismiques, magnétotellurique)

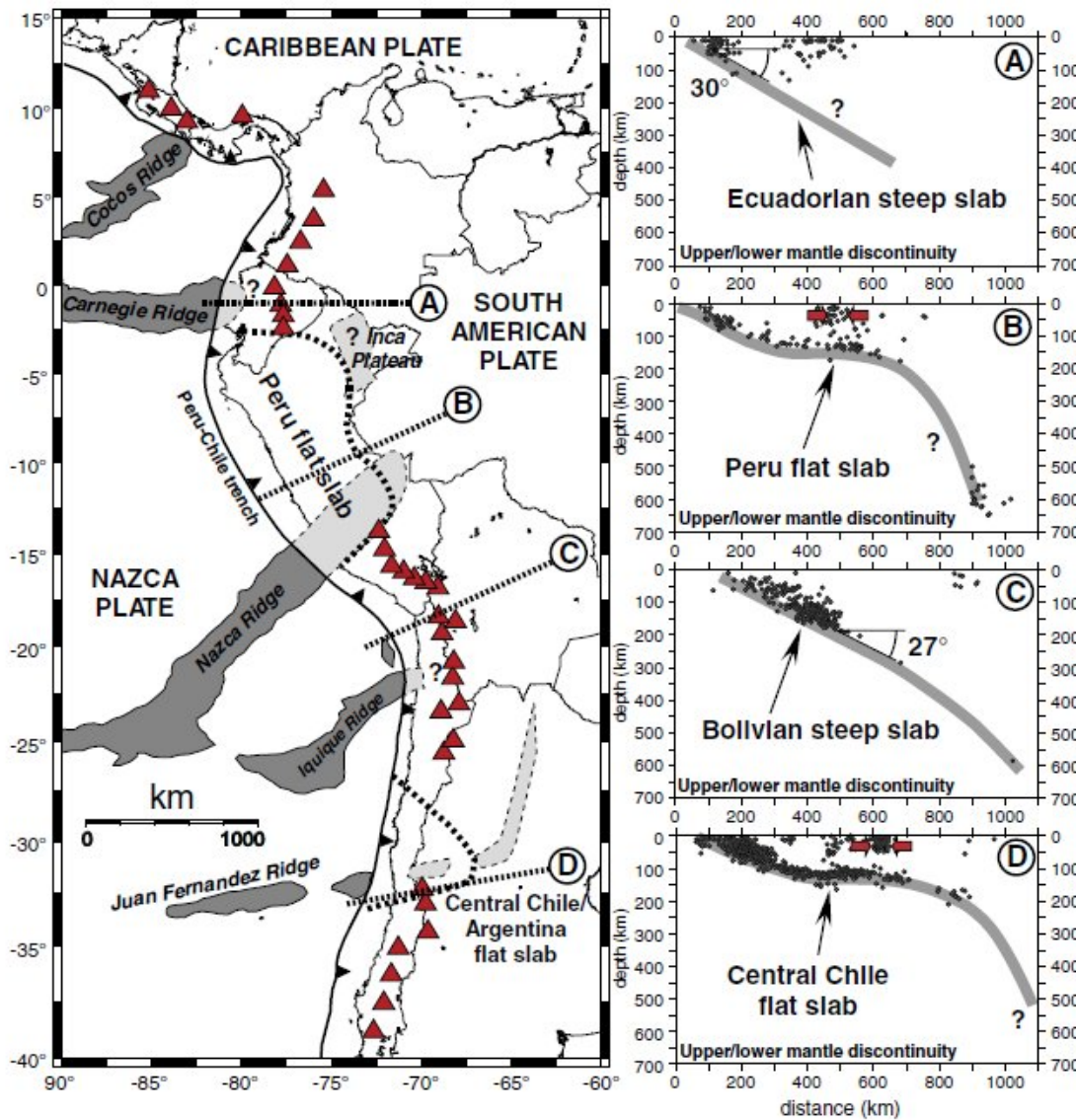


Modèles numériques



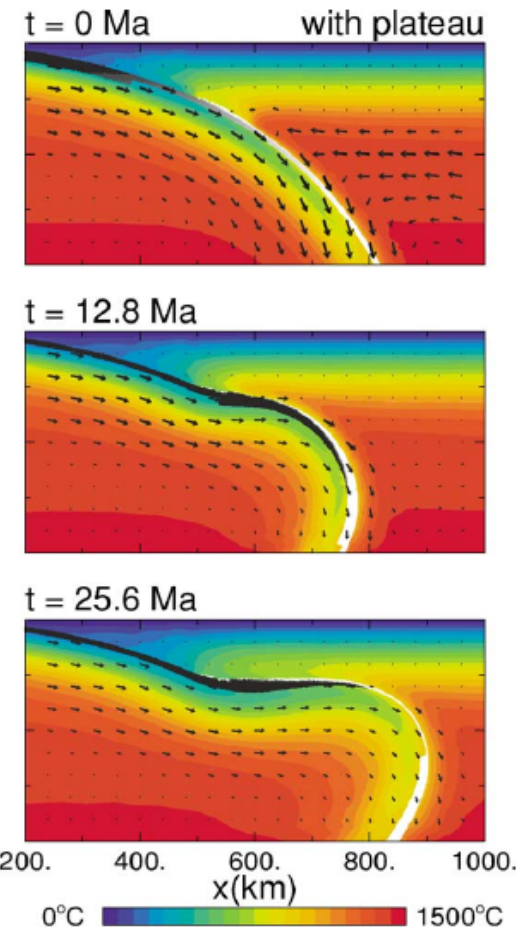
Données et modèles concordent sur l'existence d'un méga-cisaillement qui propage la déformation vers la zone subandine (700 km de la fosse).

4) Cas de la Subduction Plane - problème



Esput et al., 2008

Explication courante :
Un plateau océanique léger +
vitesse de la plaque supérieure



Van Hunen, 2002, 2004

Le long du Chili (>3000 km N-S), ni la vitesses des plaques (constante) ni la flottabilité des rides n'expliquent les variations de géométrie du slab.

Variations temporelles du volcanisme d'arc, du pendage du slab, de la convergence...

Simultanéité de périodes de construction du relief et d'activité magmatique sur ~40 Ma.

Liées à une variation de pendage du slab (De Celles, 2009, Haschke, 2007; Ramos, 2010).

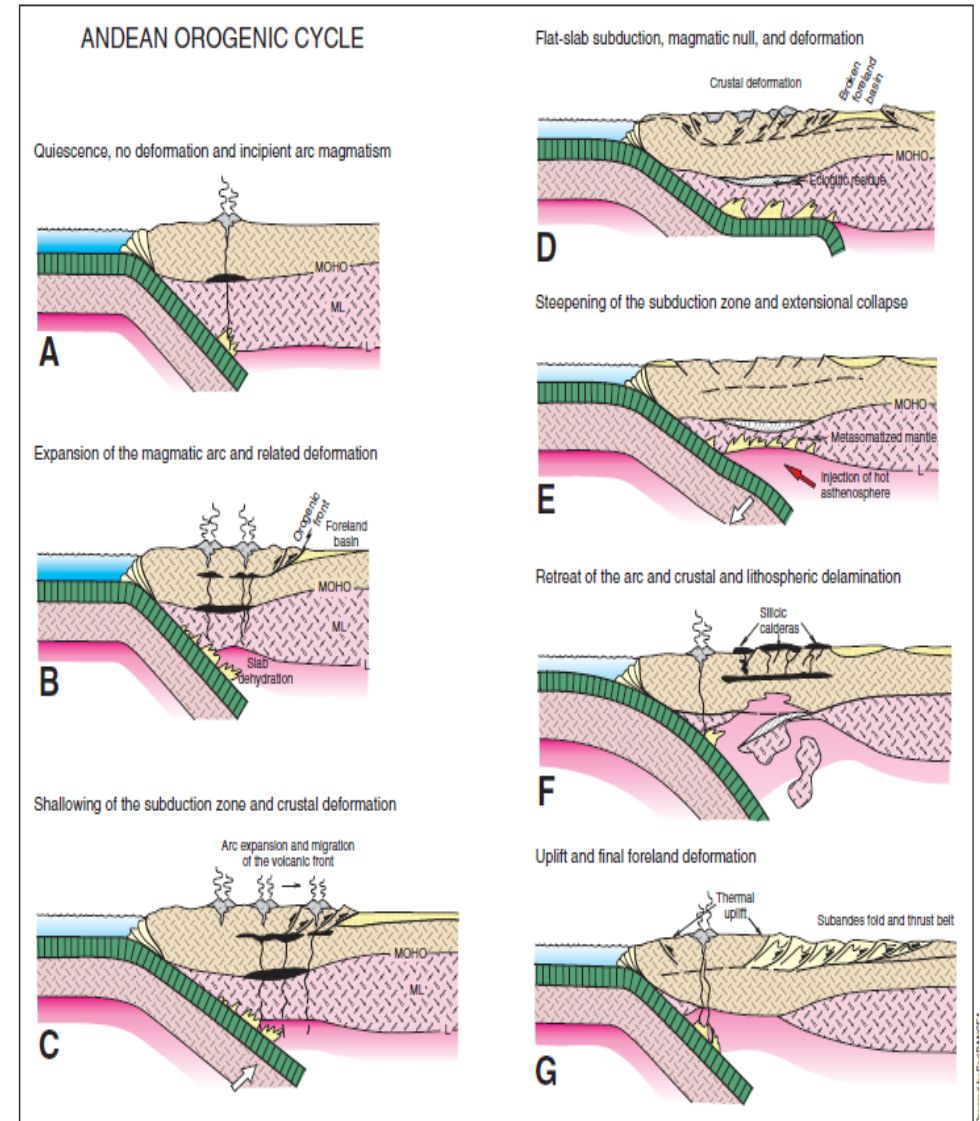
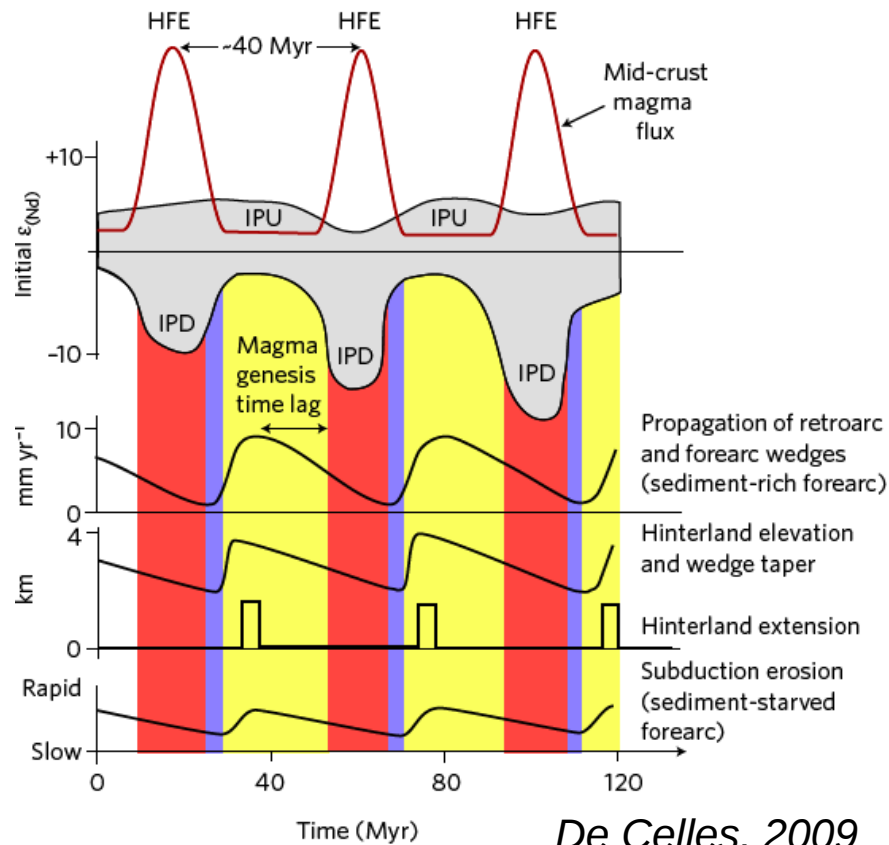
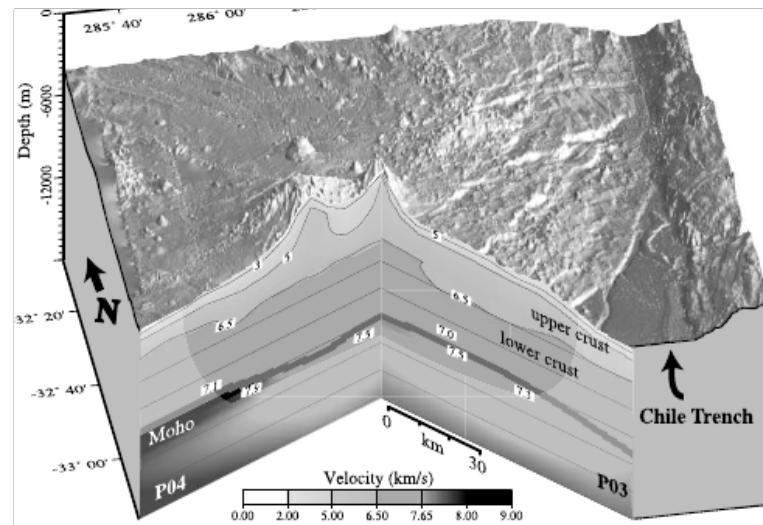
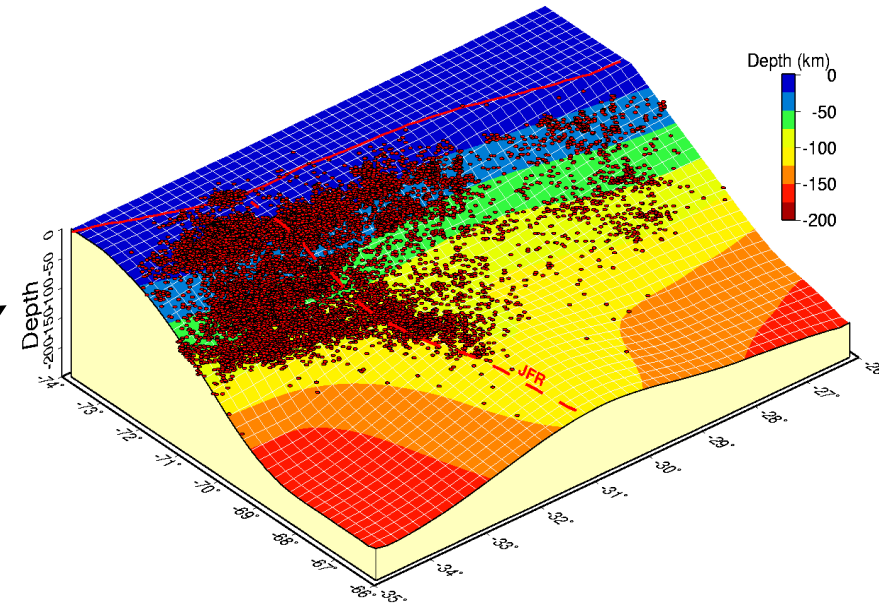
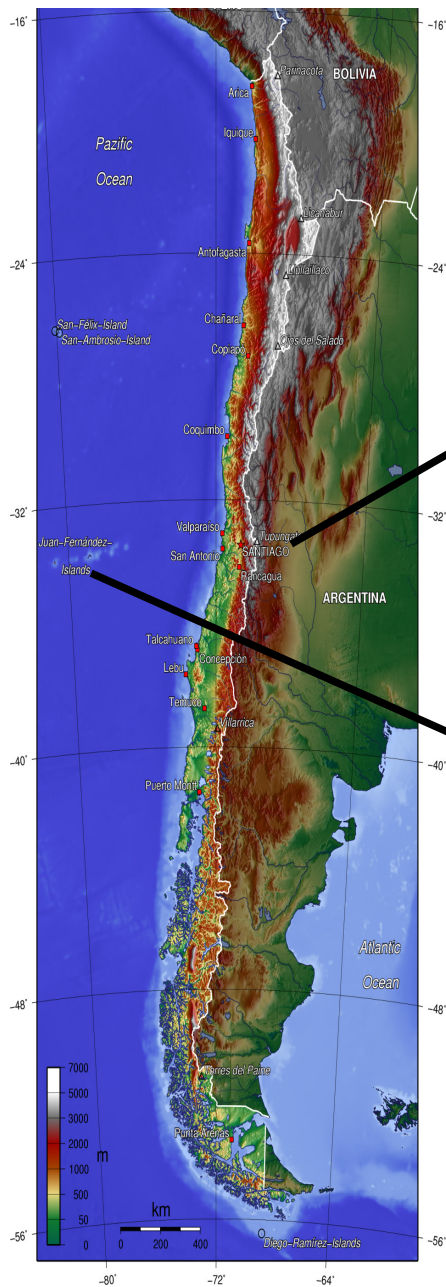


Figure 17. Idealized tectonic evolution of an Andean orogenic cycle (based on many authors; see discussion in the text). ML—lithospheric mantle

Ramos, 2010

Propriétés sismiques du slab plat chilien (T. Monfret , thèse M. Marot en cours, Geoazur)



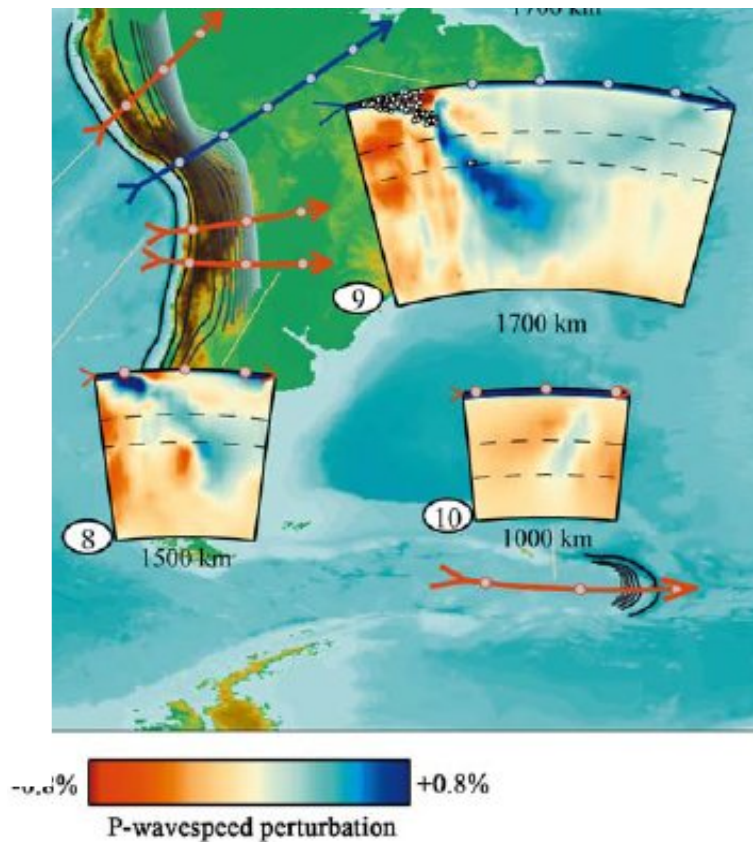
Ride peu épaisse,
mais manteau hydraté
(Kopp et al., 2005)

La cause pourrait être liée à un comportement
particulier du slab dans le manteau ?

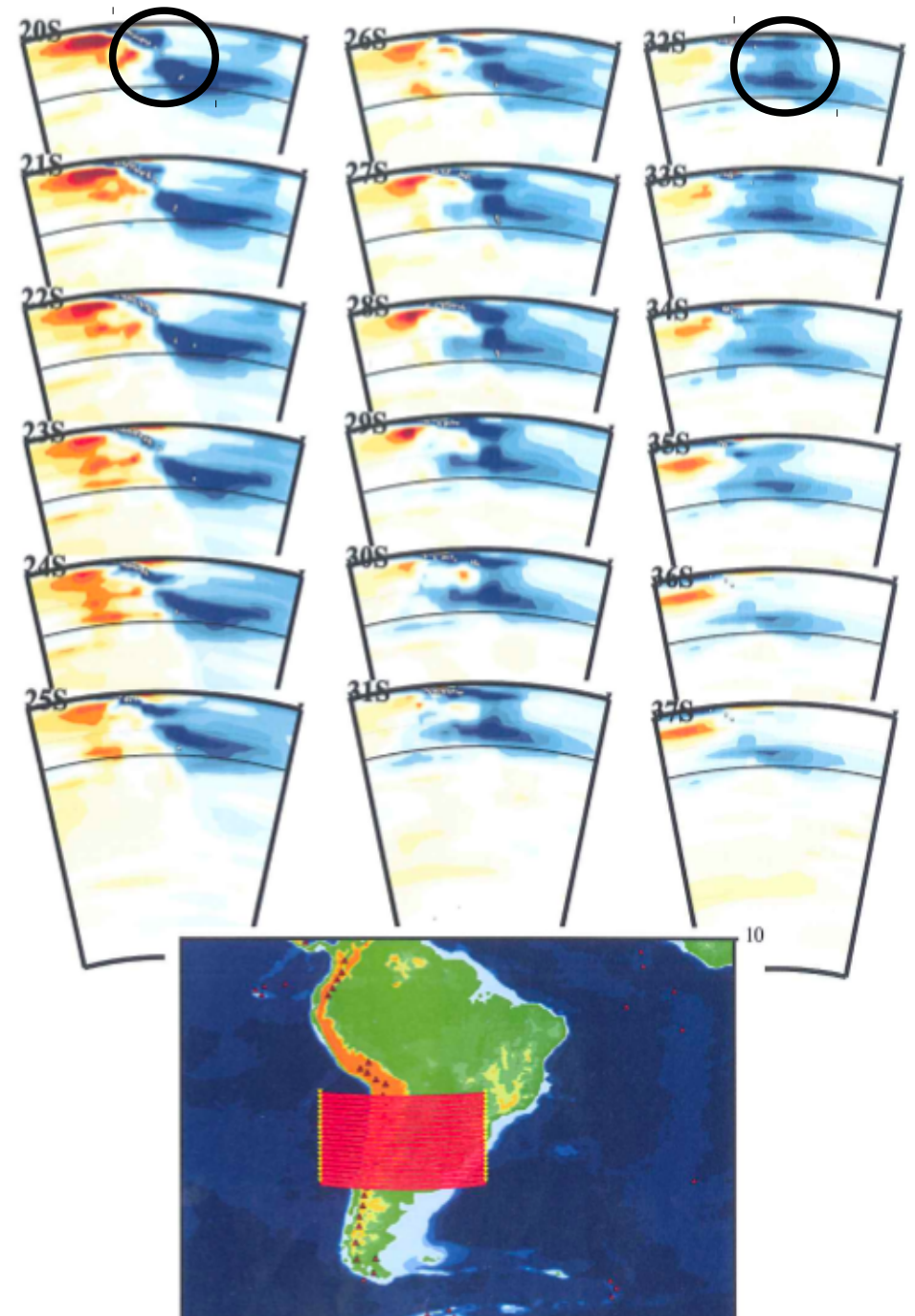
Les tomographies sismiques

sont « floues » : que fait le slab ?

- au delà de 600 km (Li et al., 2008)
- ou non (Fukao et al., 2009) ?

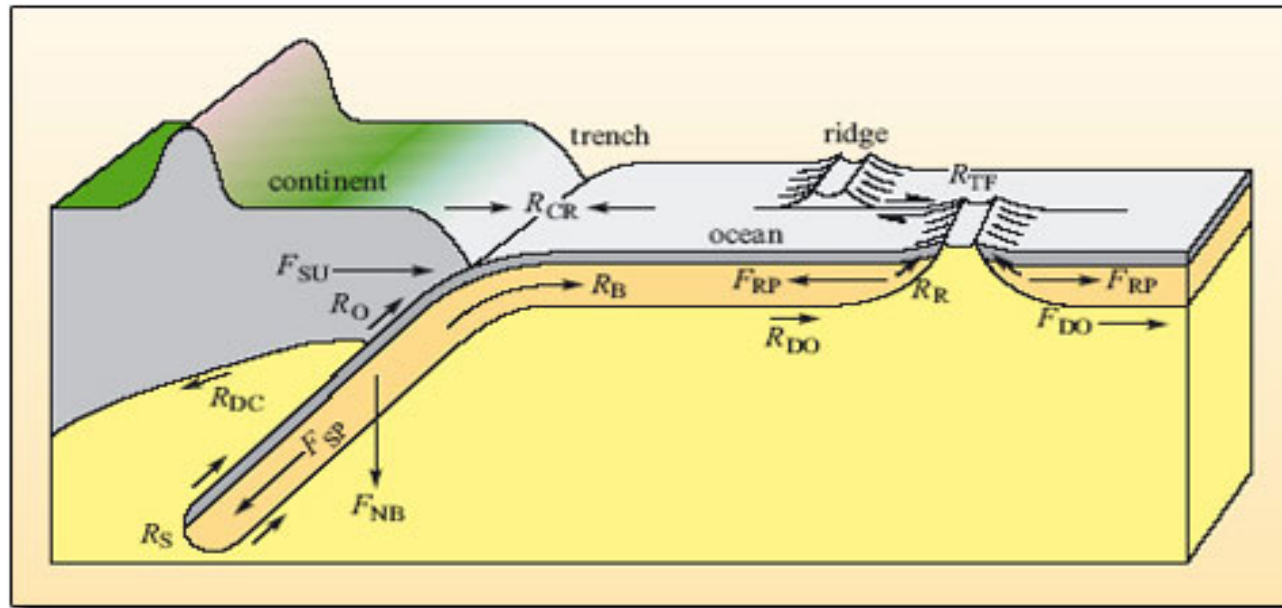


Li et al., 2008



Pers.comm. M. Obayashi (from Fukao et al., 2009)

Notre approche (Gibert et al., 2012)

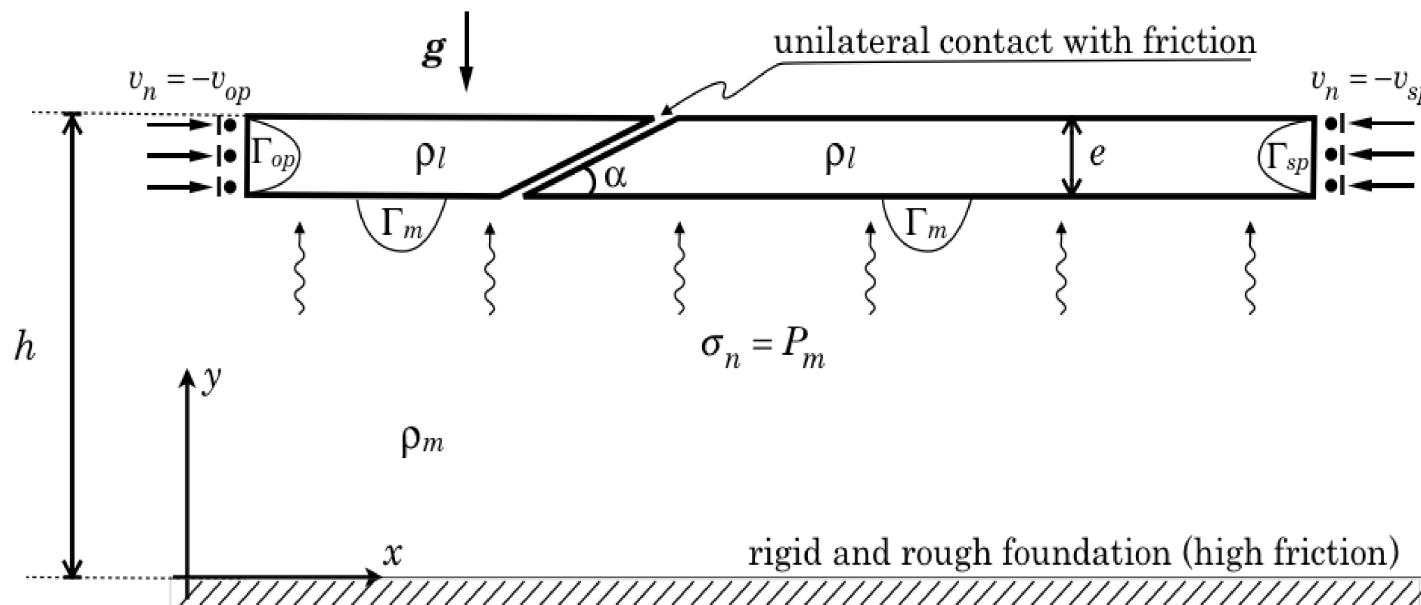


Forces impliquées dans le phénomène subduction:

- Forces motrices F_i
- Forces résistantes R_i .

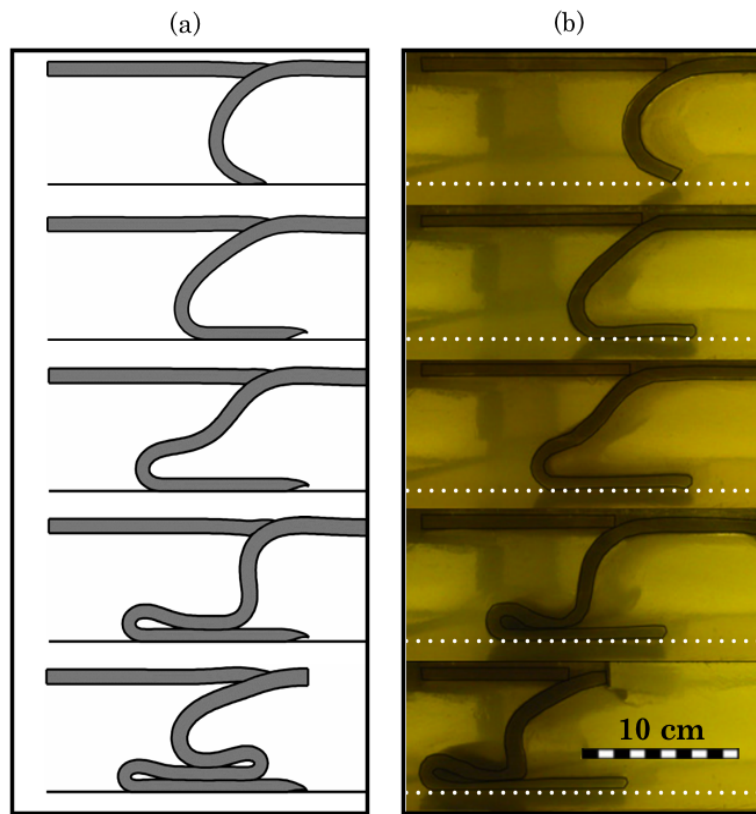
Hypothèses du modèle:

- vitesse imposée des plaques F_{op} , F_{sp}
- manteau inviscide $Rd=0$
- discontinuité 660km impénétrable.



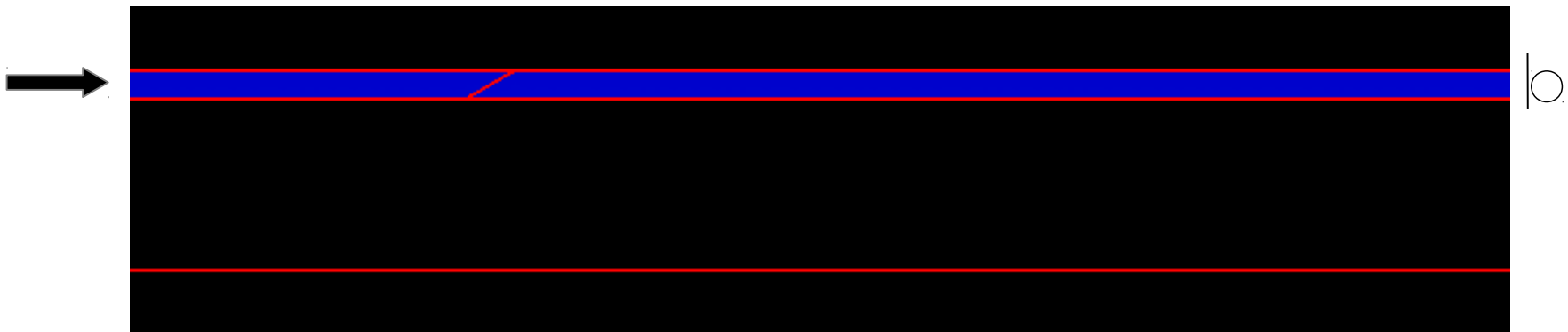
Méthode Numérique :

ADELI (Hassani et Chery, 1998) Relaxation dynamique par FEM.



Comparaison du modèle numérique avec un modèle analogique (Guillaume et al., 2009):

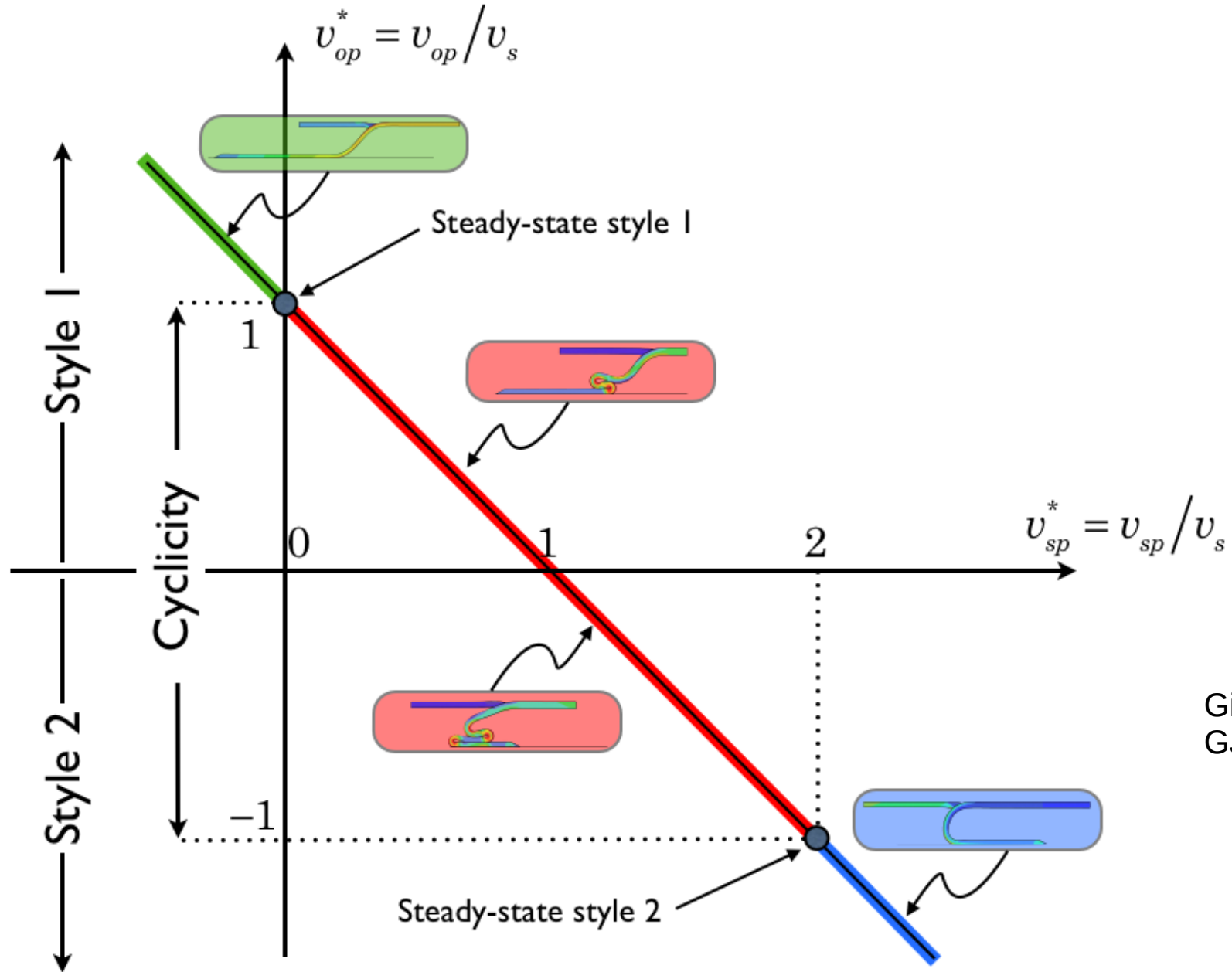
Evolution très similaire, sauf
- la fosse est fixe en a),
- la friction basale est fixe en a).



4 modes de subduction existent selon les vitesses imposées aux plaques.

* Style 2 : $v_{op} < 0$ ➔ le slab se dépose vers l'arriere

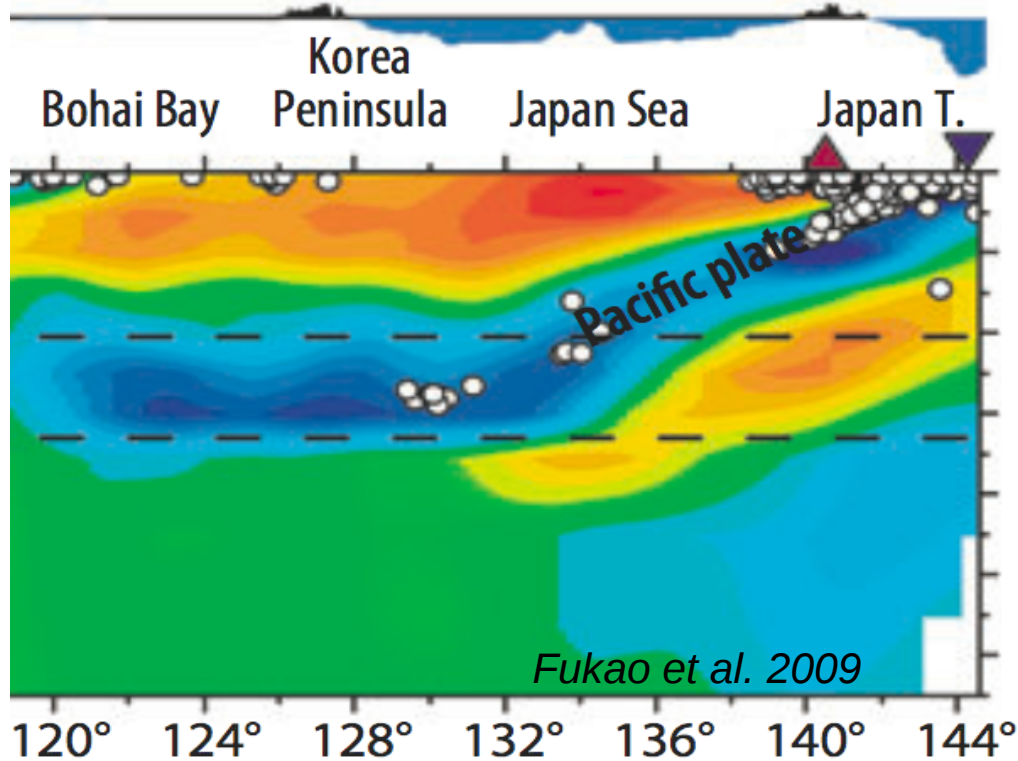
* Cyclicité: $v_s = v_{sp} + v_{op} > |v_{op}|$ ➔ le slab se plisse en se déposant



Gibert et al.,
GJI.2012

Application à des cas réels – a) Pacifique/Eurasie

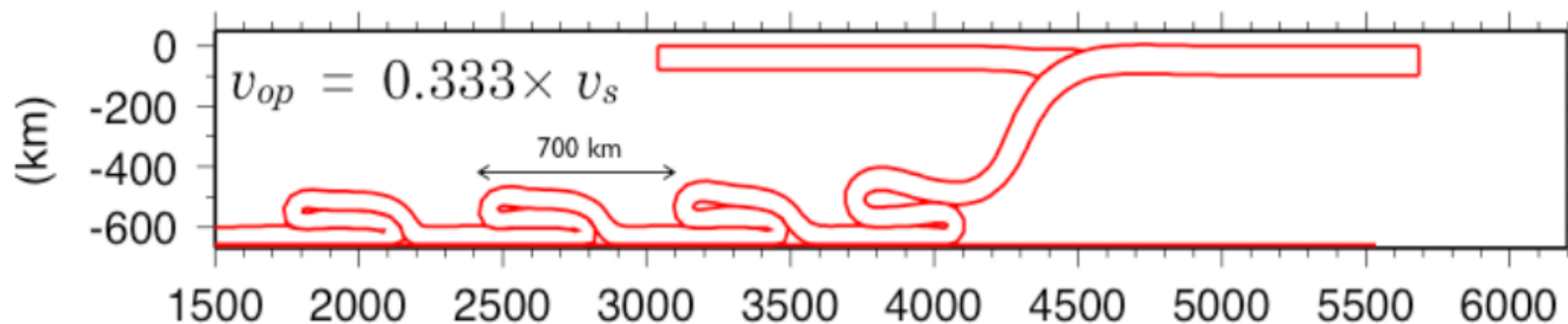
Vitesses actuelles (Nuvel-1A) : $v_{op}=2.2\text{cm/yr}$ (Eurasie) $v_{sp}=6.5\text{ cm/yr}$ (Pacifique)



Correspond au domaine de cycles **1a**.

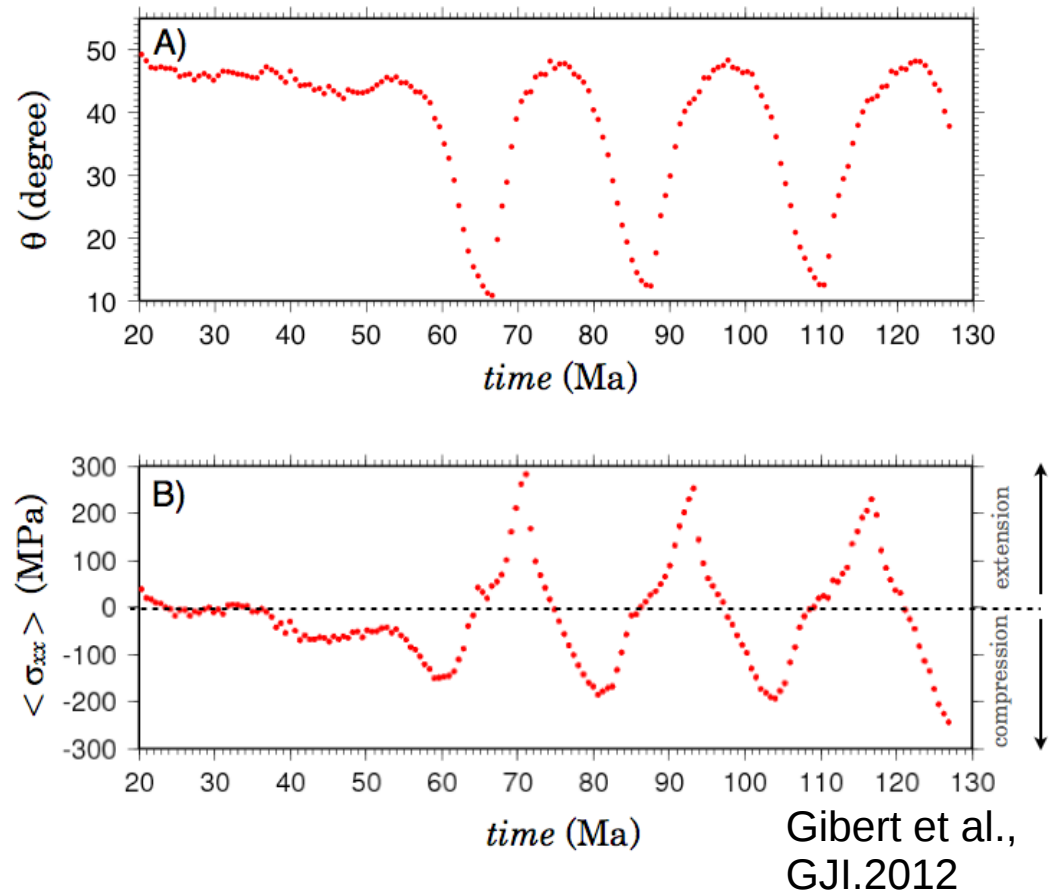
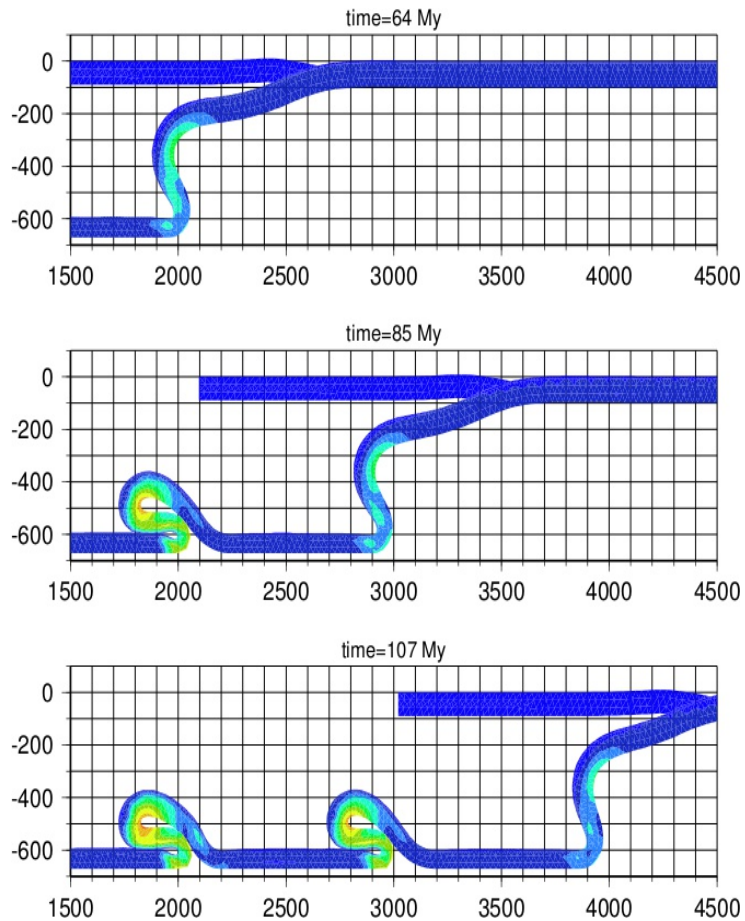
Le slab Pacifique sous la Chine semble avoir une double épaisseur sur la discontinuité à 660 km: plissements ou bien diffusion du signal tomographique ?

Reste à trouver les indices de régimes périodiques de compression dans la plaque Eurasie.



Application à des cas réels – b) Les Andes

Vitesses actuelles (Nuvel-1A) : $v_{op}=4.3$ cm/yr (Sud Amerique) $v_{sp}=2.9$ cm/yr (Nazca)



* Les cycles sont de ~ 22 Ma et la pente « plane » dure ~ 4.3 Ma (à relier avec les périodes de quiescence volcanique).

* Les différences entre modèle et observations (pendage, timing) pourraient s'expliquer par a) la viscosité du slab et b) l'absence de couplage avec le manteau asthénosphérique.

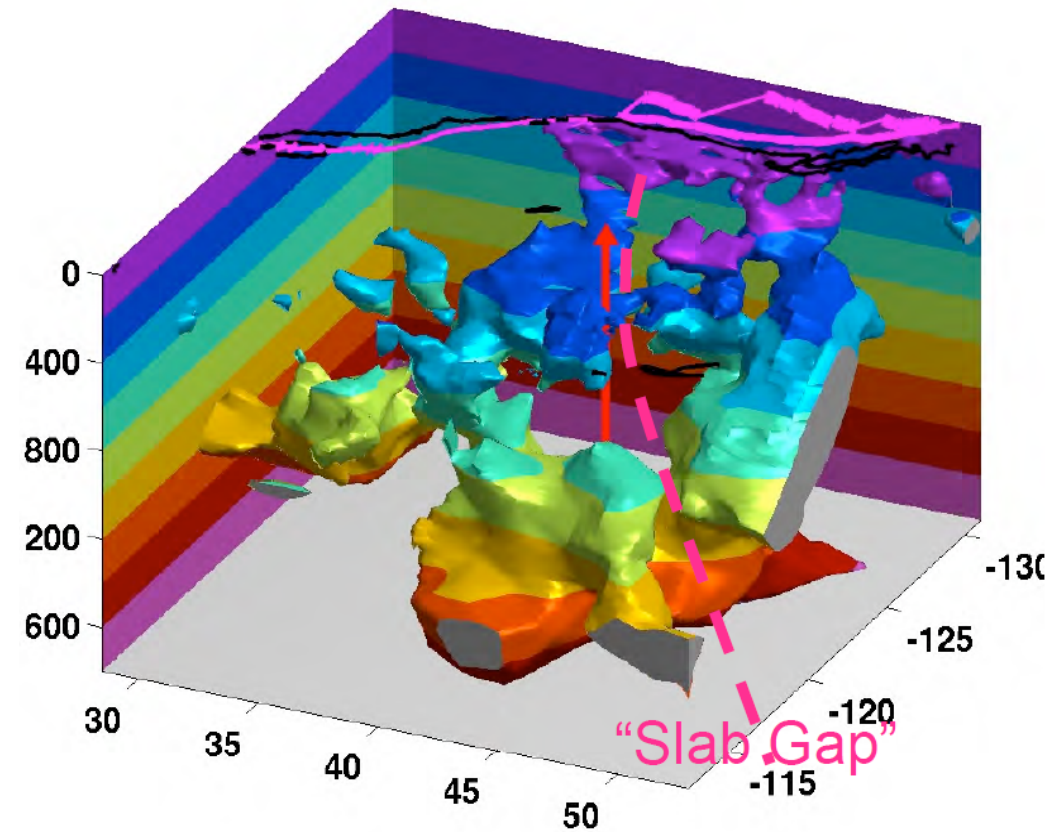
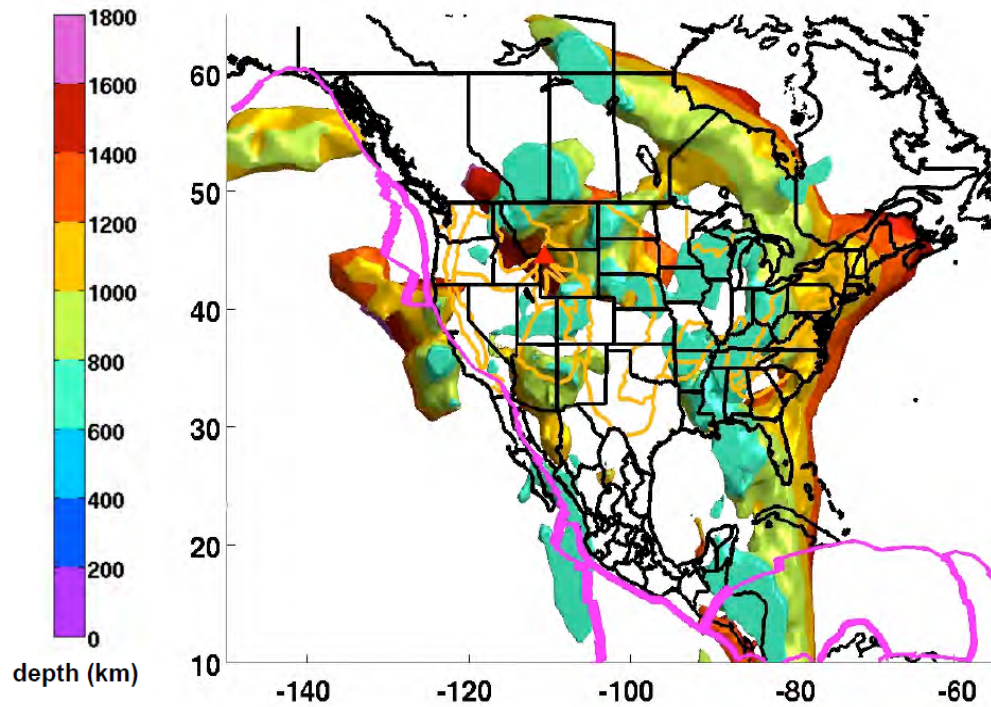
Des slabs mous existent ...

Exemple: tomographie du slab Farallon sous les US

Karin Sigloch, München
and Guust Nolet, Geoazur

Yellowstone a deep plume ?
The "Slab gap", a major tear in
the plate

Fast material below 700 km depth

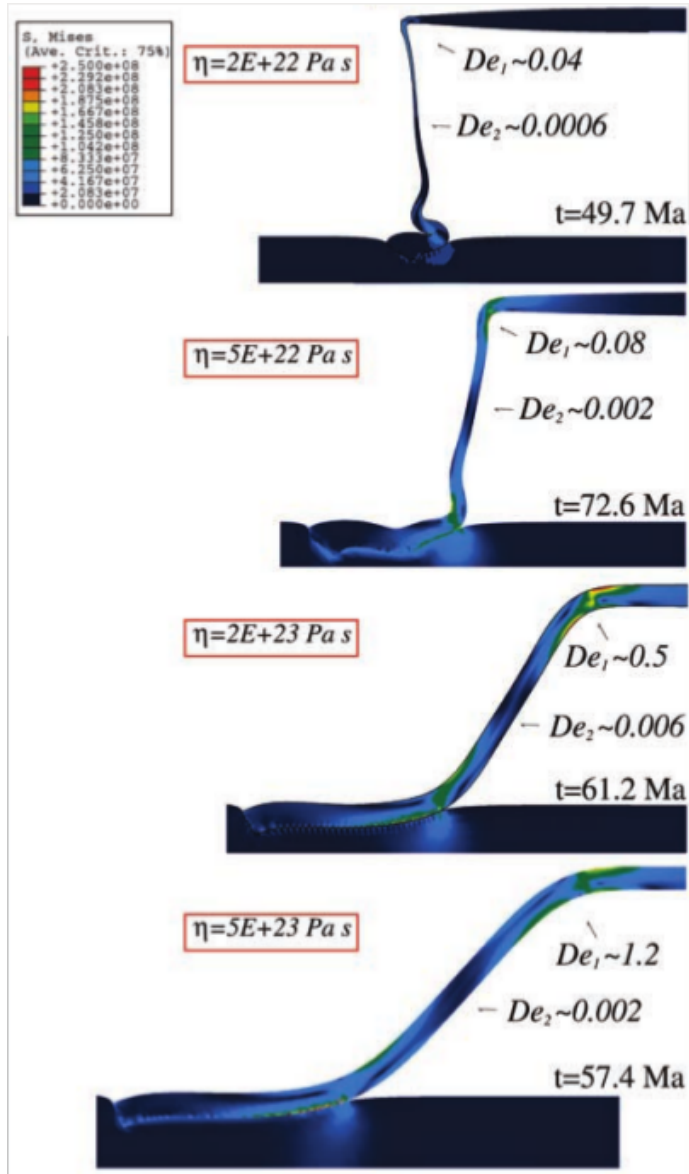
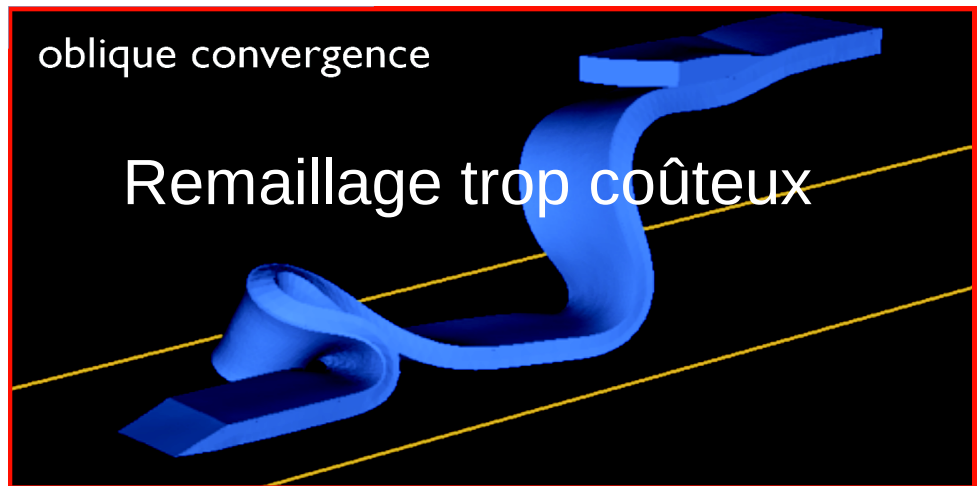
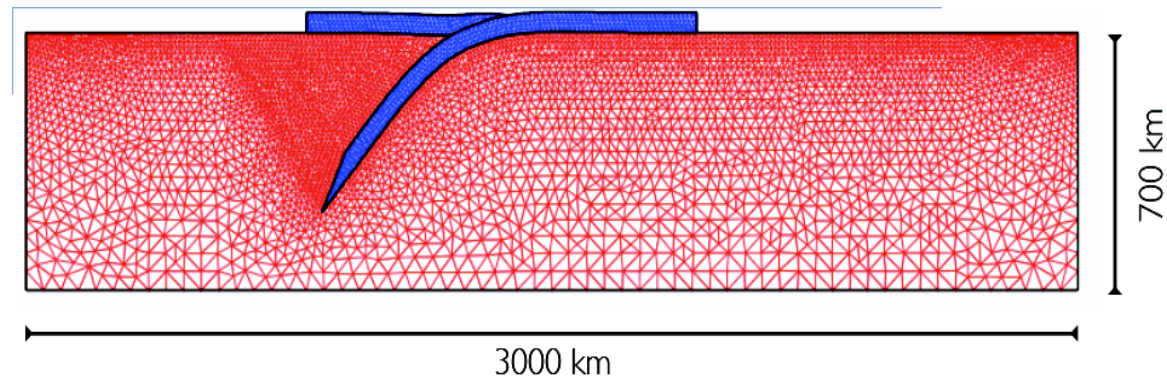


Sigloch et al., Nature 2008

Modèles d'évolution d'un slab dans le manteau : Problème d'interaction d'un solide déformable dans un fluide visqueux

Modèles actuels partiellement satisfaisants

Couplage fluide-solide ADELI (Hassani & Chery, 1998) avec remaillage du fluide (Bonnardot et al., 2008)



Chute gravitationnelle d'un slab visqueux
(Funciello, 2002; Morra et al., 2003)

Développement en cours : interaction lithosphère/asthénosphère par une Méthode de domaines fictifs

Thèse N. Cerpa
en cours
(direction R.Hassani)

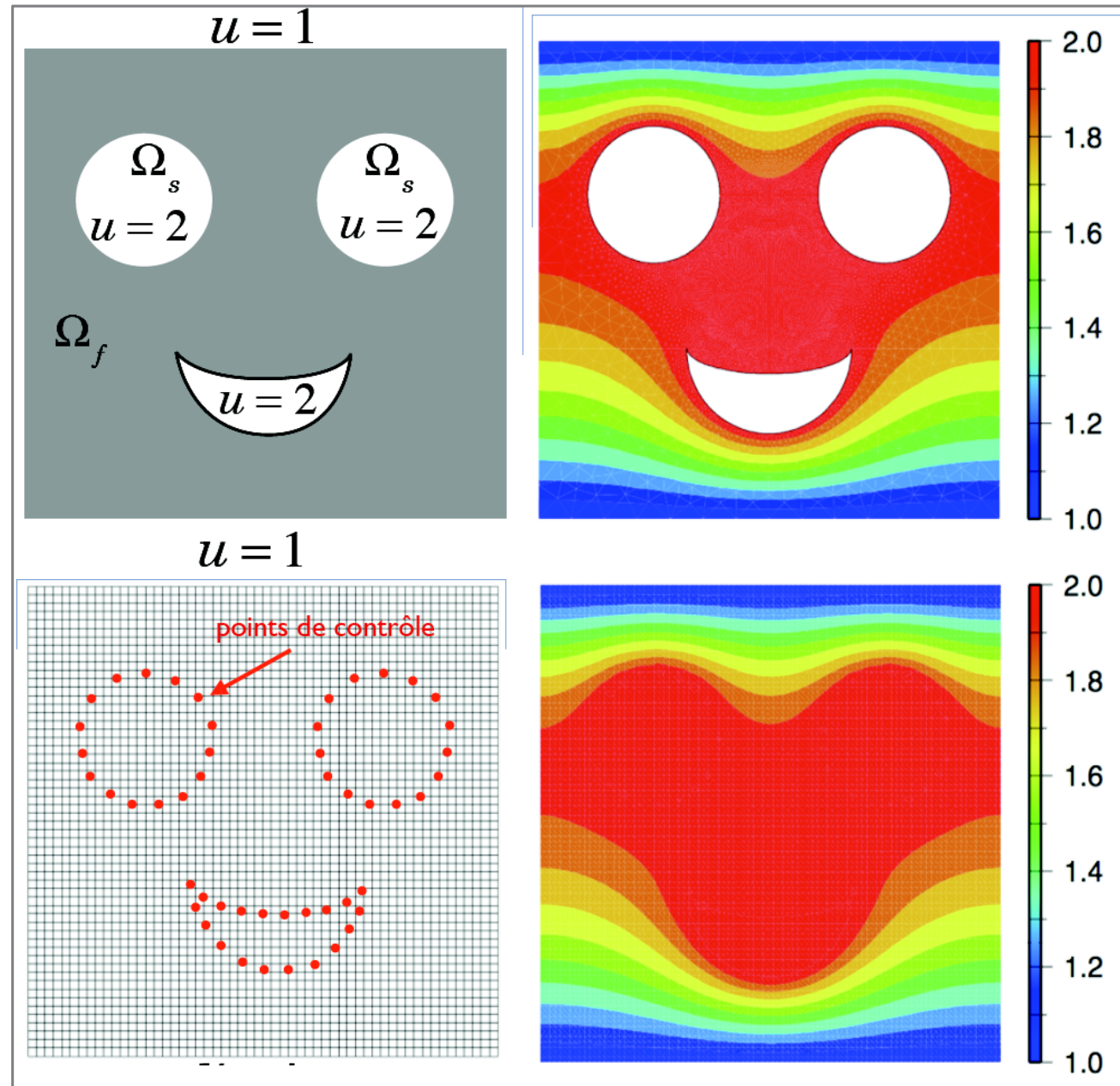
- Soit on résout le problème de Stokes avec un maillage à géométrie complexe.

$$K \cdot U = F_o$$

- Soit on résout le problème de Stokes dans un maillage simple, et on définit des points de contrôles sources Q qui minimisent la différence des vitesses U du fluide et du solide sur leur interface commune:

$$J(Q) = 1/2 \left((\varphi \cdot U(Q) - U_s) \right)^2$$

sous la contrainte $K \cdot U = F_o + F(Q)$



MERCI !