

# Comité Français de Mécanique des Roches

Séance Technique 'Applications de la mécanique des roches à la géophysique'

7 Février 2013, CNAM

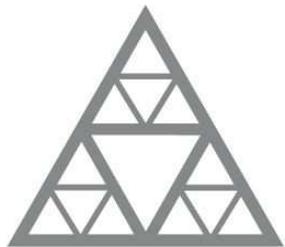
## Couplages Thermo-Chemo-Hydro-Mécaniques et glissements sismiques

**Jean Sulem**

Laboratoire Navier - CERMES

Ecole des Ponts ParisTech, Univ. Paris-Est

Jean.Sulem@enpc.fr

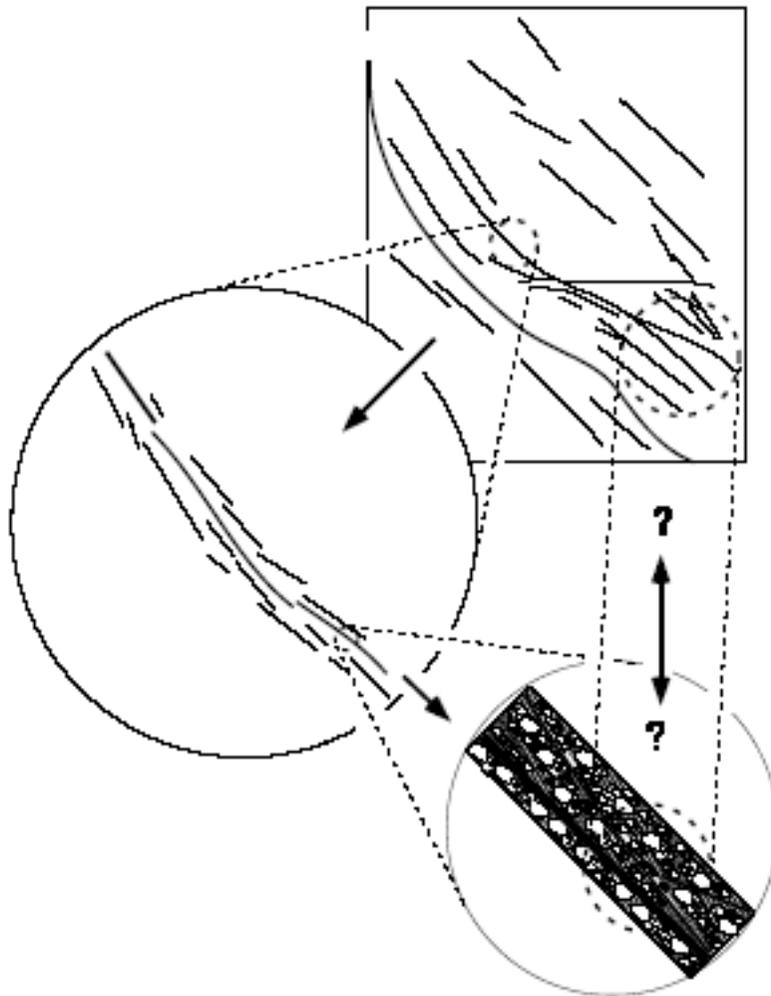


École des Ponts  
ParisTech



UNIVERSITÉ — 4 —  
— PARIS-EST

# Différentes échelles de structuration de failles



- **Echelle régionale** (1 à 100 km)

Ensemble de fractures orientées de la croûte terrestre

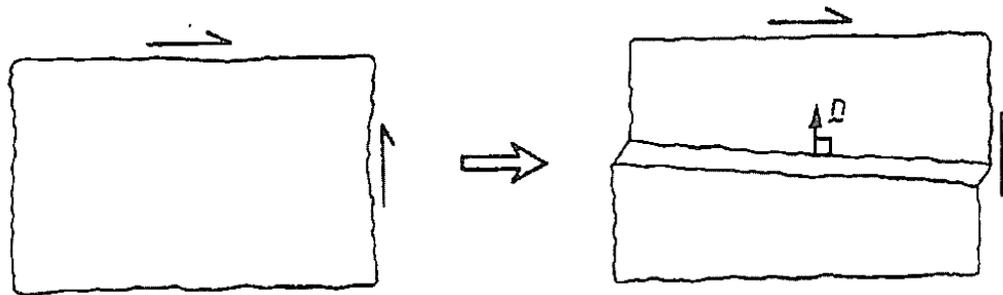
- **Echelle locale** (1 à 100m)

Plusieurs bandes de déformation parallèles entourées de zones d'endommagement

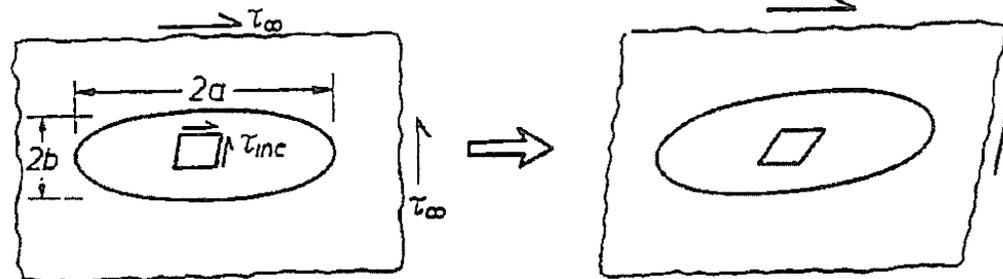
- **Echelle fine** (0.1 à 10 cm)

Bande de cisaillement caractérisée par une fracturation intense de la roche avec une ou plusieurs zones de glissement (<1mm)

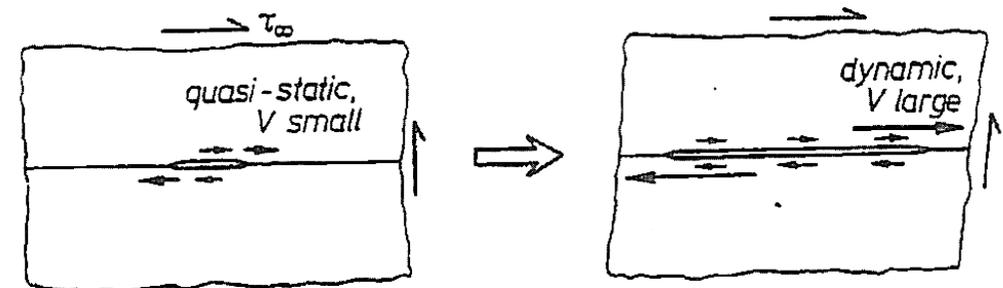
# Mécanismes de rupture à l'origine des séismes



Localisation des déformations  
(instabilité plastique)



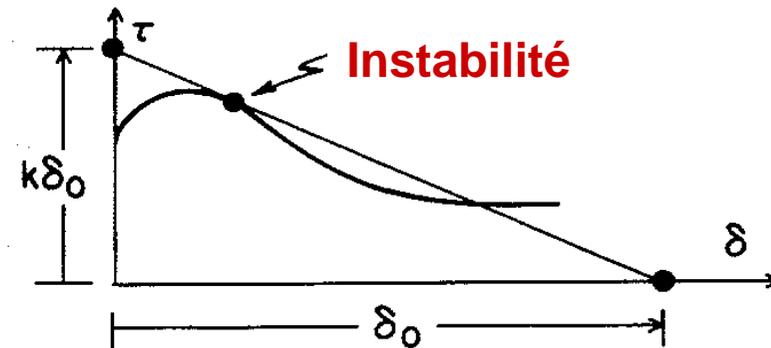
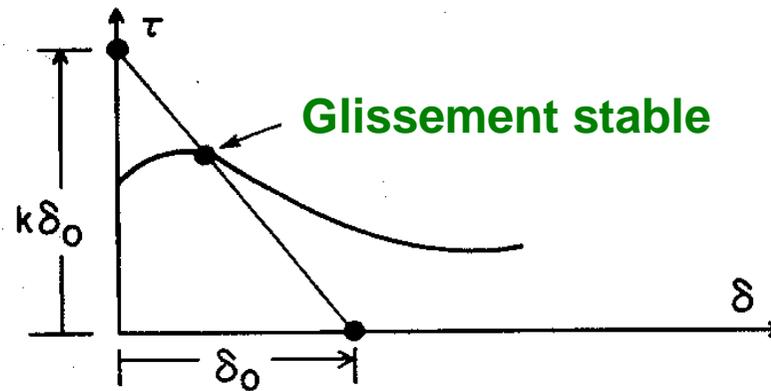
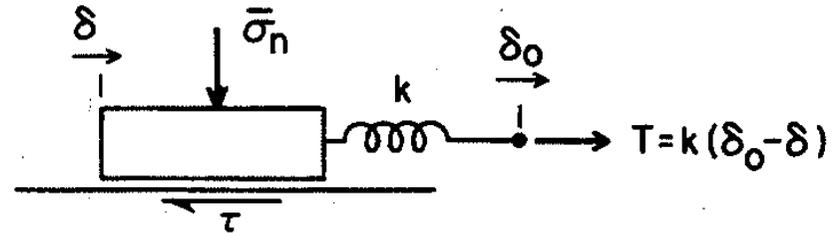
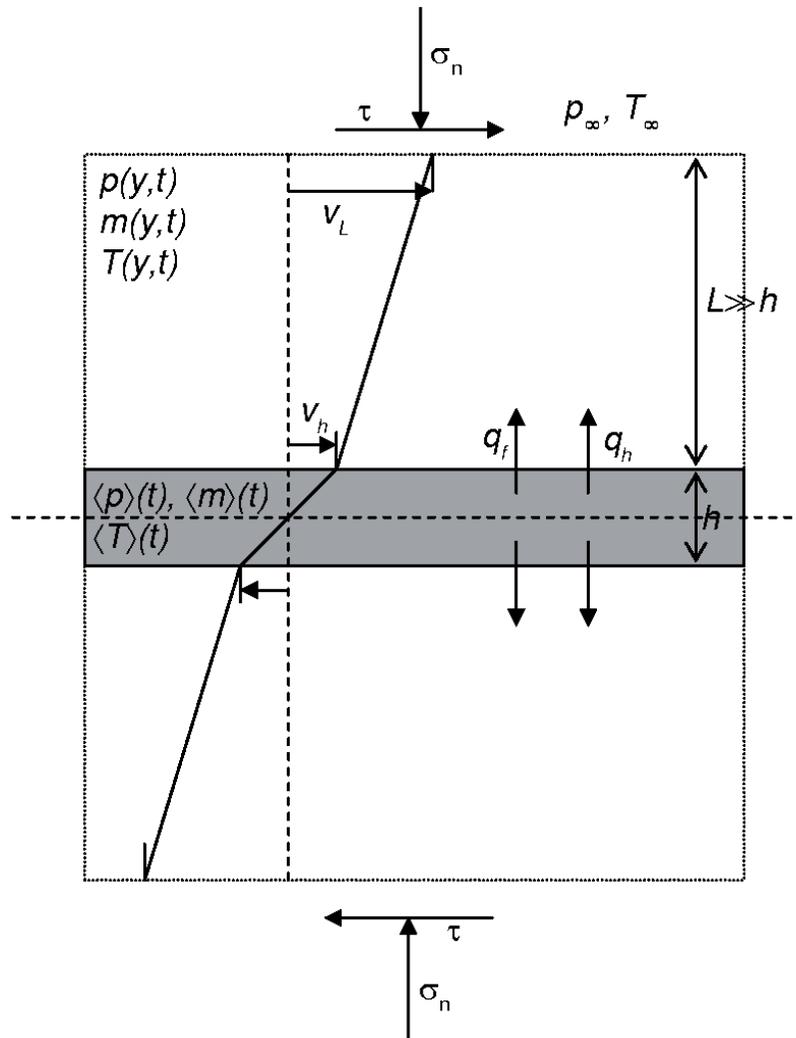
Déformation d'une inclusion  
au comportement  
radoussissant dans un milieu  
élastique  
(‘runaway’ instability)



Glissement le long d'une  
fissure pré-existante (faille)  
(glissement dynamique et  
propagation instable de la  
fracture)

# Glissement instable le long d'une faille (stick-slip instability)

Modèle conceptuel bloc-ressort



# Observations

- Les séismes sont le résultat d'une **perte de résistance** au glissement.
- Un séisme se produit lorsque **la résistance au frottement** sur faille **décroît** avec le glissement accumulé et/ou la vitesse de glissement.
- Les vitesses de glissement sismiques sont de l'ordre de **1m/s**.
- Le glissement lors d'un évènement sismique est **localisé** dans une zone de glissement très fine de l'ordre de **quelques mm d'épaisseur**, d'où l'importance majeure des **phénomènes thermiques**.
- Les zones de failles montrent souvent la **présence de fluides** en interaction avec la roche.

# Principaux phénomènes physiques mis en jeu lors d'un glissement sismique

- Développement et propagation de la **fracturation**
- Fracturation des grains de la gouge et production de particules fines (**lubrification** de la zone de glissement)
- Production de **chaleur** par frottement
- Augmentation de la **température** et de la **pression de pore**
- Transition de phases (**vaporisation** des fluides, **fusion** des roches)
- Développement de **réactions chimiques** activées par l'augmentation de température (déshydratation des minéraux, décomposition thermique des carbonates...)

# Effets thermiques durant le glissement sismique

## Echauffement frictionnel

$$\tau = f (\sigma_n - P_f)$$

$$\dot{\gamma} = V / h$$

$$f \approx 0.6 - 0.8$$

$$h = 5 \text{ to } 10\text{mm}; V = 1\text{m/s}$$

Exemple: à 7km profondeur

$$\sigma_n = 180\text{MPa}; P_f = 70\text{MPa}$$

$$\tau \approx 66 - 88\text{MPa}$$

$$\dot{\gamma} = V / h = 100 - 200\text{s}^{-1}$$

Chaleur spécifique  $\rho C = 2.7\text{MPa}/^\circ\text{C}$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\tau \dot{\gamma}}{\rho C} \approx 3000 - 6000^\circ / \text{s}$$

# Paradoxe thermique (1/2)

Absence de flux thermique important au voisinage des grandes failles (exemple faille de San Andreas, Californie)

*Lachenbruch & Sass, JGR, 1980*

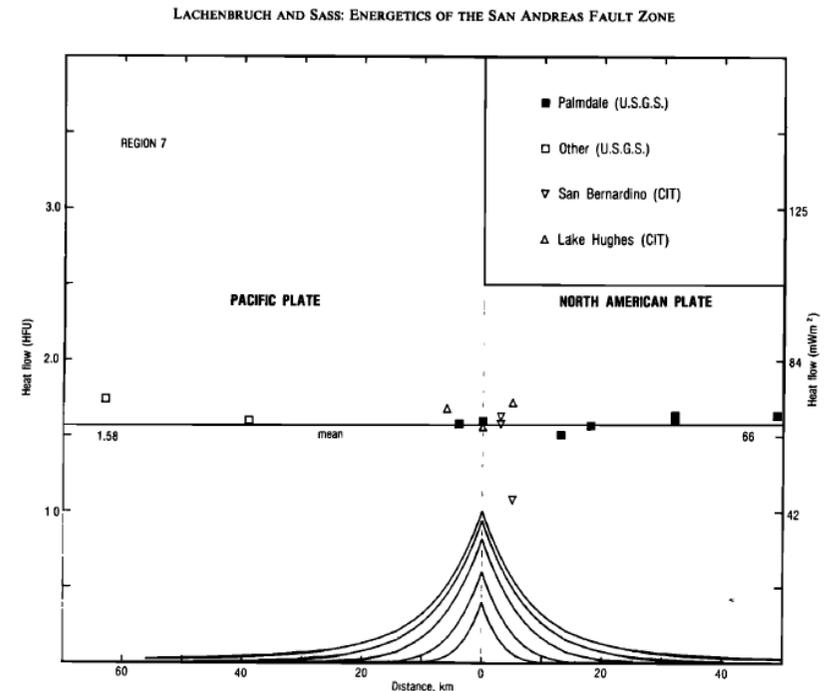


Fig. 19. Heat flow versus distance from the main trace of the San Andreas fault, region 7 (Figure 8), shown with reference anomaly.

Pas de zones importantes de fusion le long des failles exhumées

# Paradoxe thermique (2/2)

## Causes possibles

- Faiblesse du cisaillement agissant sur les failles majeures: Faiblesse du coefficient de frottement du noyau de la gouge de faille (gouge argileuse), forte pression de pore...

OU

- La résistance au cisaillement est forte en condition statique mais chute de façon importante en conditions de glissement dynamique.

**IMPORTANCE DES MECANISMES DE RADOUCCISSEMENT  
D'ORIGINE THERMIQUE DANS UNE ZONE DE GLISSEMENT  
TRES LOCALISEE**

# Mécanismes de radoucissement (1/3)

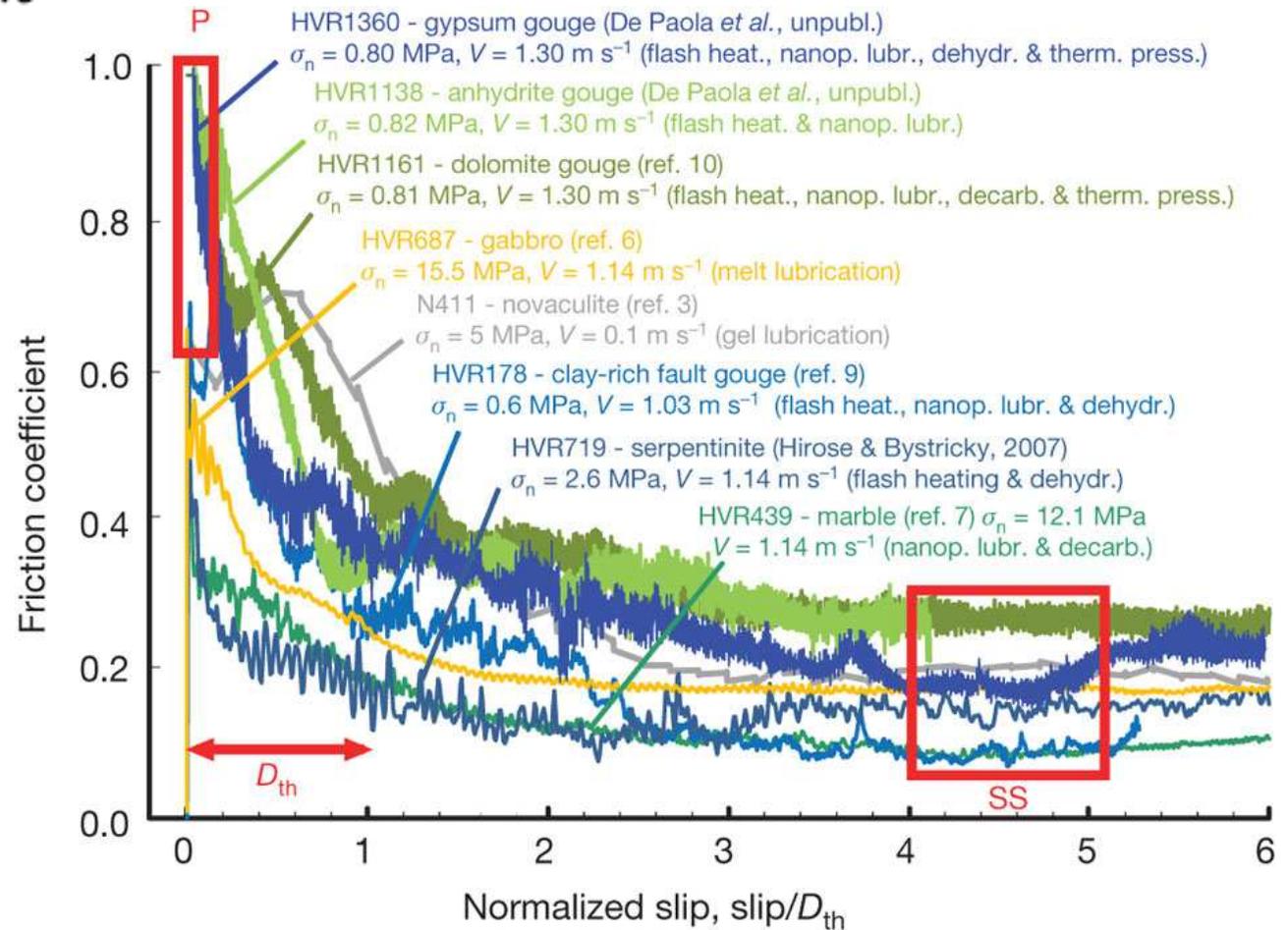
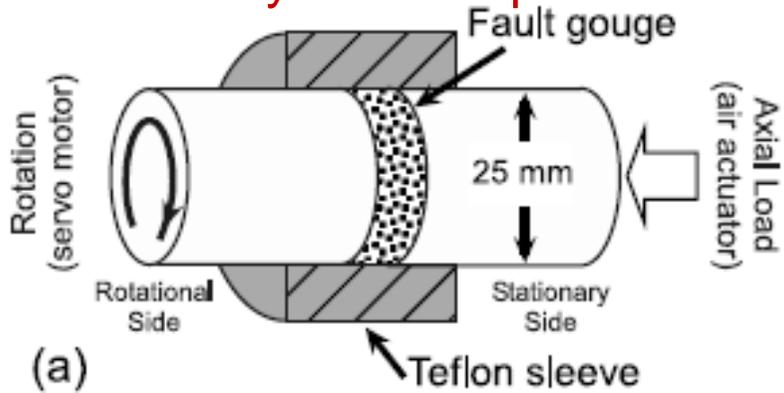
Radoucissement du coefficient de frottement (avec la température, le glissement et/ou la vitesse de glissement)

- **Flash heating** aux contacts des aspérités entre deux surfaces (*Rice, 1999, 2006, 2009*): concentration de contraintes, production localisée et importante de chaleur

- **Lubrication** du plan de faille

Processus physico-chimiques: production de particules nanométriques par broyage des grains, gélification, réactions de décarbonatation et déshydratation, fusion partielle (*Di Toro et al., Nature, 2004, 2011*))

## Rotary shear experiment - Friction coefficient versus normalized slip.



*Di Toro et al, Nature, 2011*

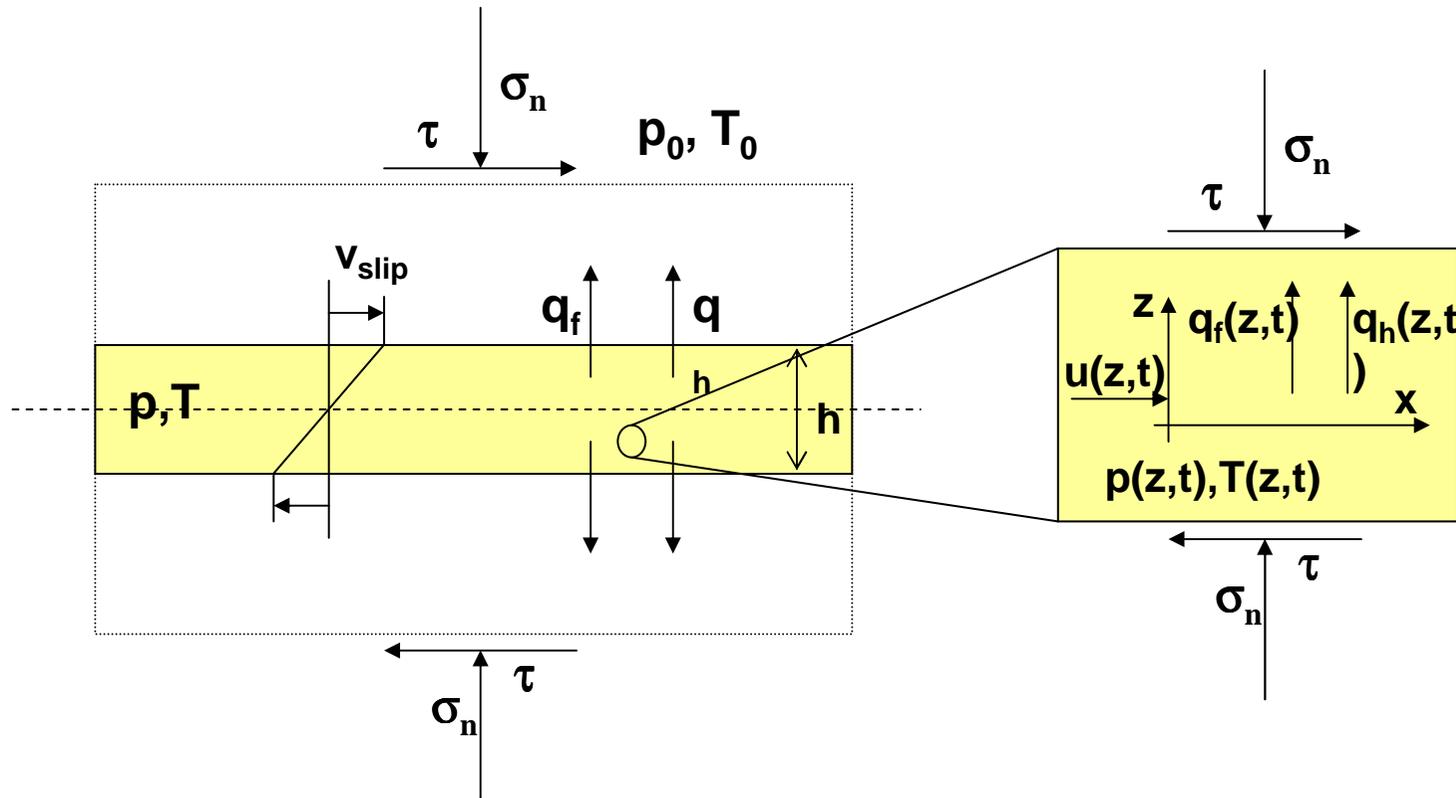
# Mécanismes de radoucissement (2/3)

## Pressurisation thermique des fluides

- Faible perméabilité des zones de glissement
- Evolution quasi adiabatique et non drainée
- Augmentation de la pression de pore (le coefficient d'expansion thermique de l'eau est largement plus grand que celui de la roche)
- Réduction de la contrainte effective et de la résistance au cisaillement

*(Lachenbruch, 1980, Vardoulakis, 2002, Sulem et al. 2005, Rice 2006, Ghabezloo & Sulem, 2009).*

# Modèle 1D de zone de cisaillement



$$p = p_0 + (\sigma_n - p_0) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Lambda f}{\rho C} \frac{u}{h/2}\right) \right)$$

$$T = T_0 + \frac{(\sigma_n - p_0)}{\Lambda} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Lambda f}{\rho C} \frac{u}{h/2}\right) \right)$$

$$u = \int V dt$$

$$p_{\max} = \sigma_n \text{ (liquéfaction)}$$

# Example: Fault zone at 7 km depth

Sulem et al, 2005, *Int. J. Num, An. Meth., Geom*

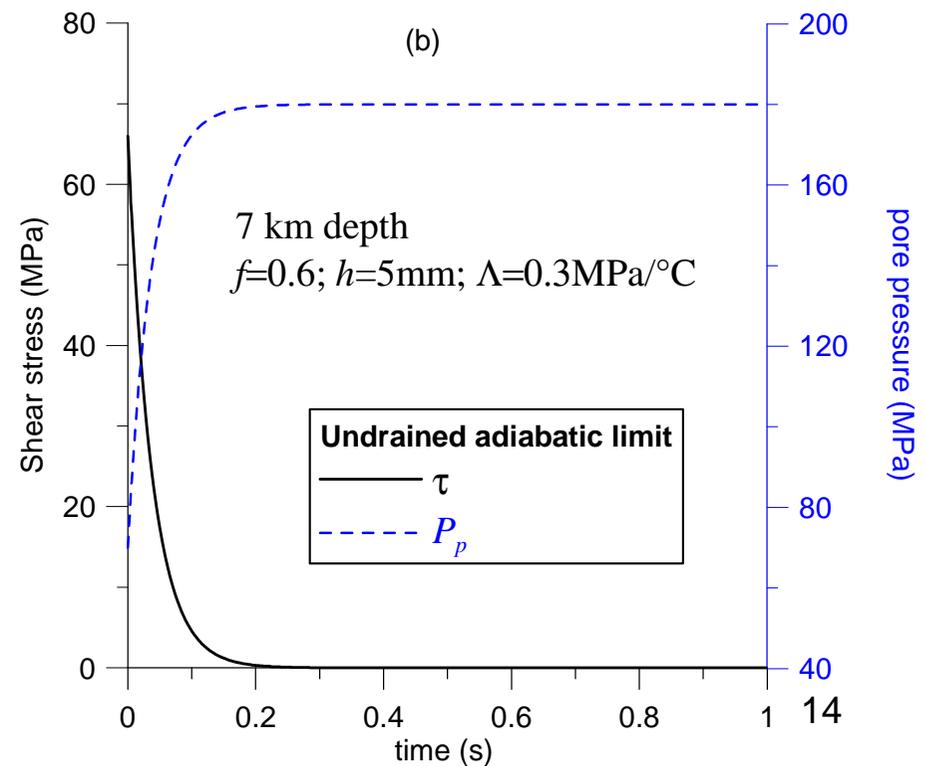
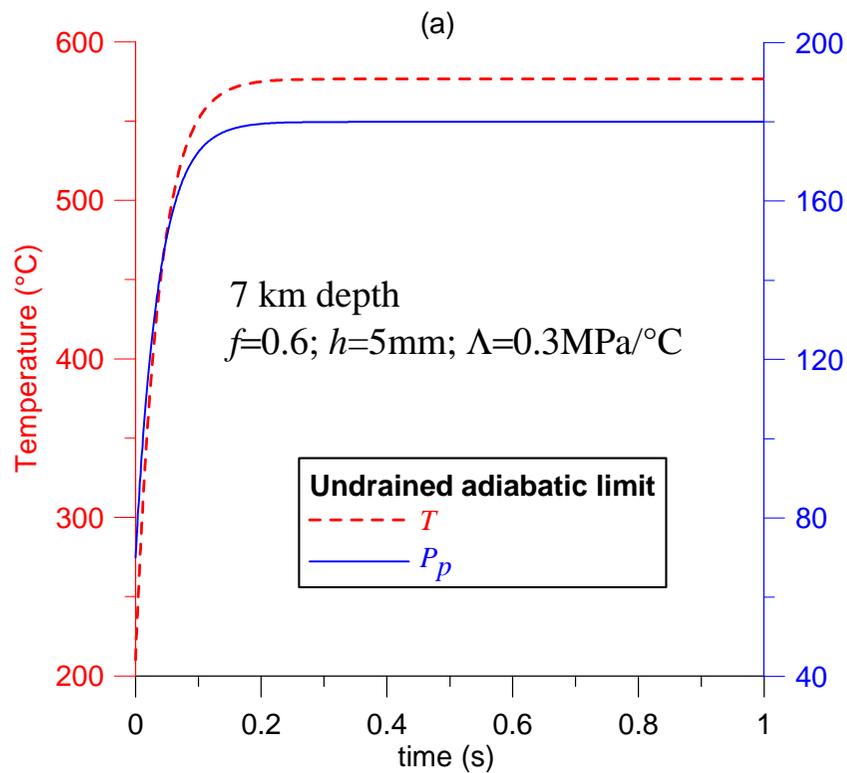
Initial conditions:  $T_0 = 210^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 70\text{MPa}$ ,  $\sigma_n = 180\text{MPa}$

Slip velocity: 1m/s; Shear band thickness:  $h=5\text{mm}$

## Solution adiabatique et non drainée

$$T_{\max} = T_0 + \frac{\sigma_n - p_0}{\Lambda} = 577^\circ\text{C}$$

$$p_{\max} = \sigma_n \text{ (liquéfaction)}$$

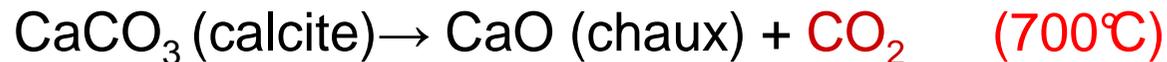


# Mécanismes de radoucissement (3/3)

## Décomposition thermique des minéraux

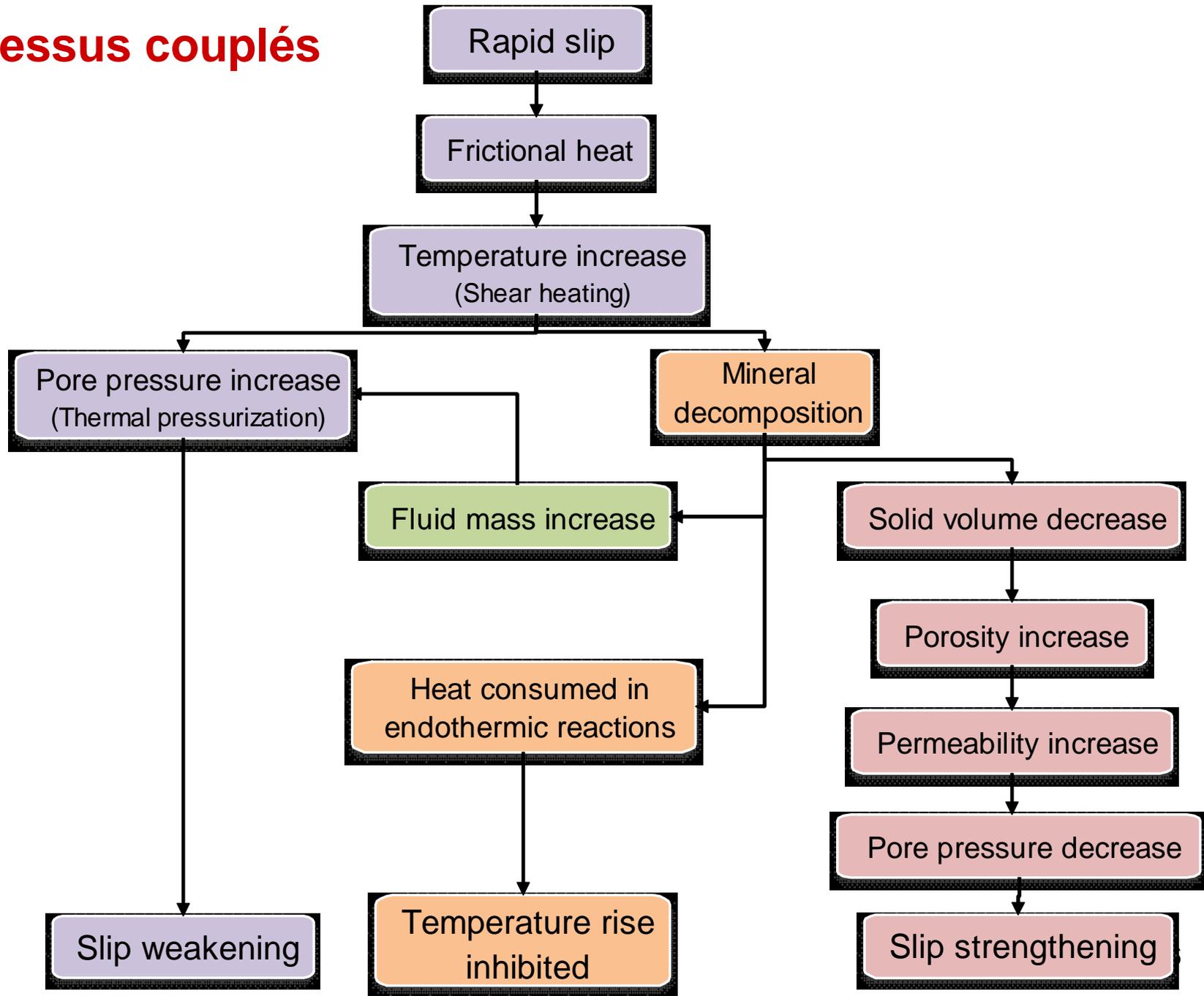
Déshydratation des minéraux argileux et libération d'eau (*Brantut et al., JGR, 2008, 2011*)

- Décomposition des carbonates et production de CO<sub>2</sub> (*Sulem & Famin, JGR, 2009*)



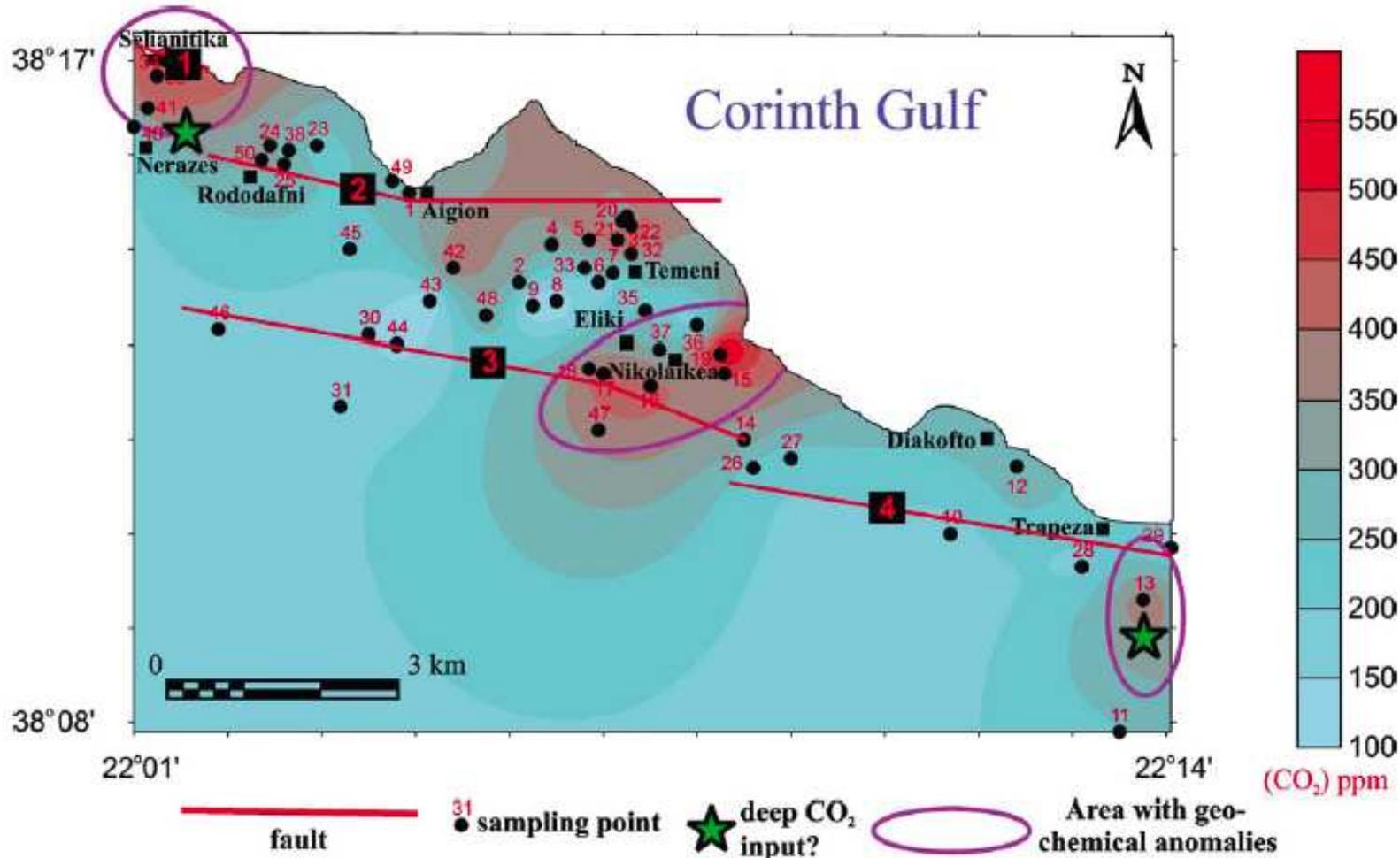
- Production d'une phase fluide (eau, CO<sub>2</sub>) et **augmentation de la pression de pore**
- Diminution de la phase solide, augmentation de la porosité et de la perméabilité
- Réactions endothermiques: une partie de la chaleur dégagée par frottement est consommée par la réaction
- **Limitation de l'accroissement co-sismique de température**

# Processus couplés



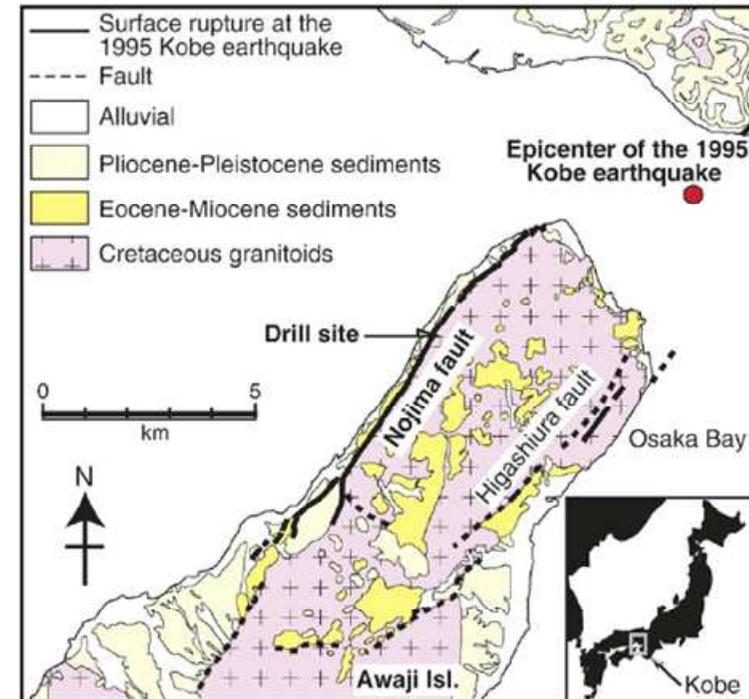
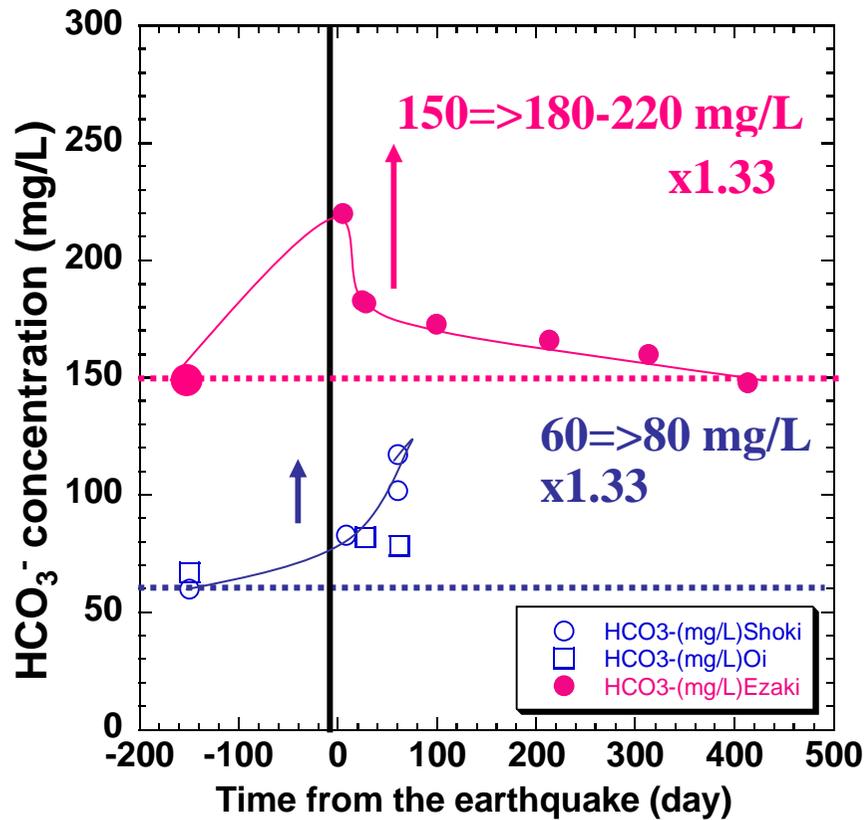
# Dégagement de CO<sub>2</sub> au voisinage des failles actives

Exemple : Forte teneur en CO<sub>2</sub> dissout dans les sources voisines des failles actives du Golfe de Corinthe



# Augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> dans les sources après un séisme

Exemple : Faille de Nojima (Japon)



Augmentation de 30% de la concentration en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> après le séisme de Kobe (1995)

Sato & Takahashi, Chishitsu News (1996)

## Fluid mass balance : Pore pressure diffusion and generation

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \Lambda \frac{\partial T}{\partial t} + \alpha_{hy} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho_f \beta^*} \frac{\partial m_d}{\partial t} - \frac{1}{\beta^*} \frac{\partial n_d}{\partial t}$$

Thermal  
pressurization

Fluid  
diffusion

Fluid  
production

Porosity increase  
(solid decomposition)

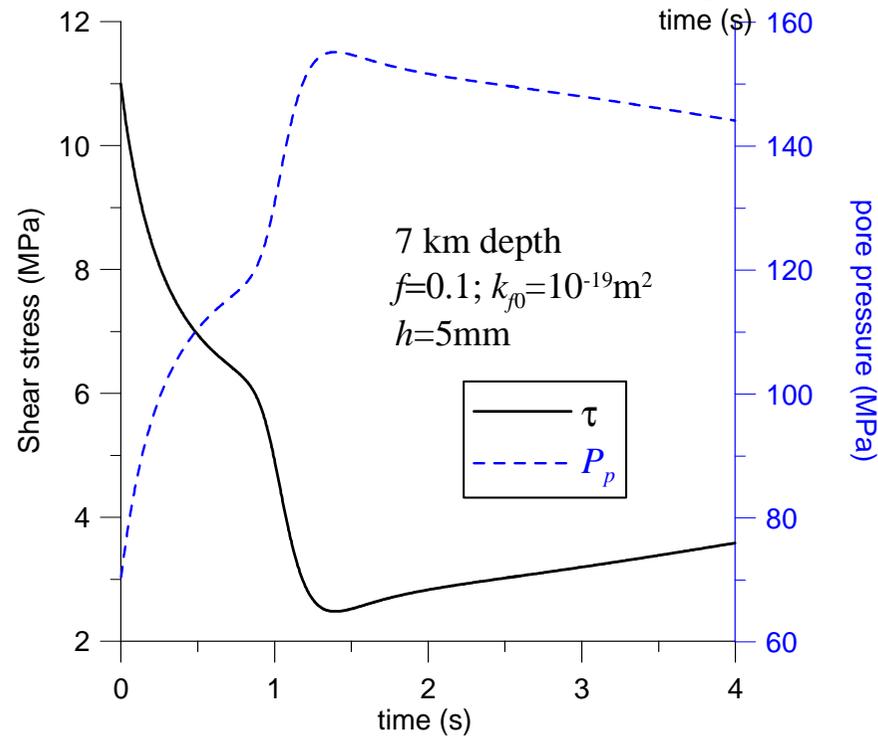
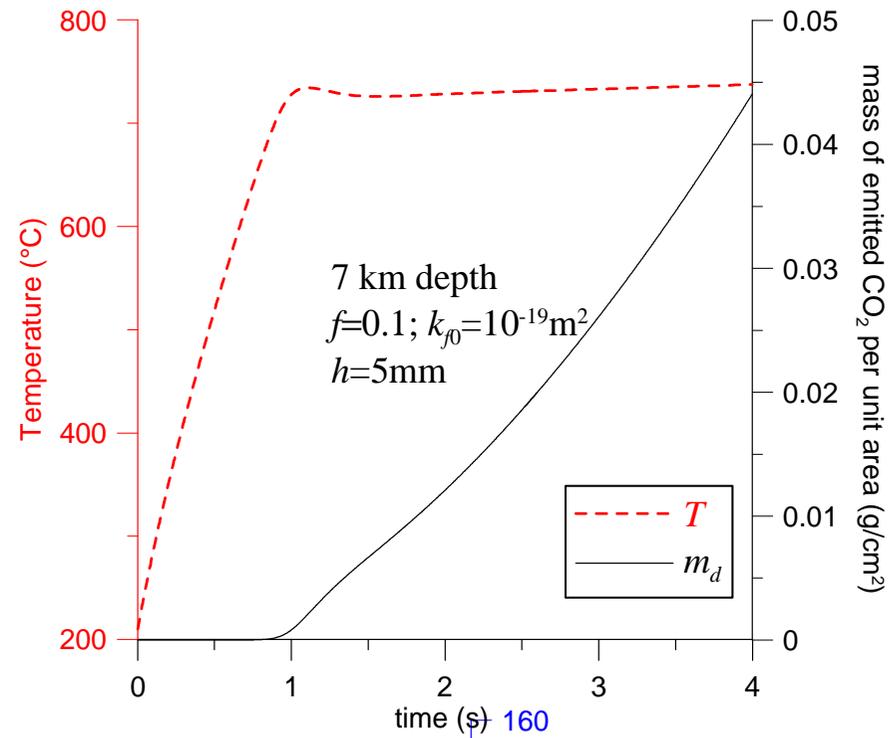
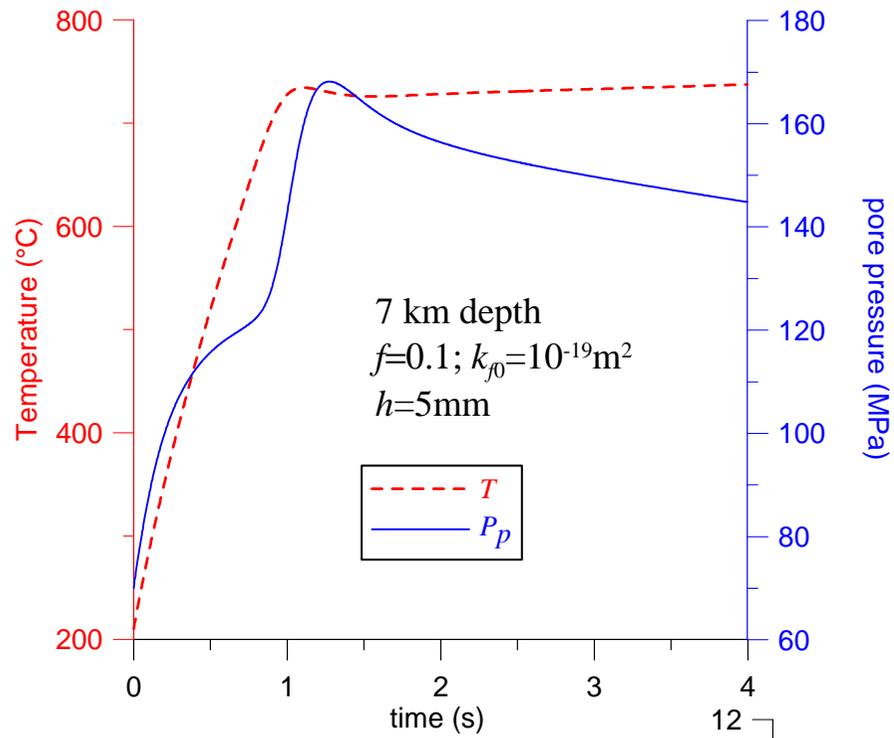
## Energy balance : The plastic work is converted into heat

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{th} \frac{\partial T^2}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho C} \tau \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{\rho C} \Delta H^0 \frac{\partial m_d}{\partial t}$$

Heat  
diffusion

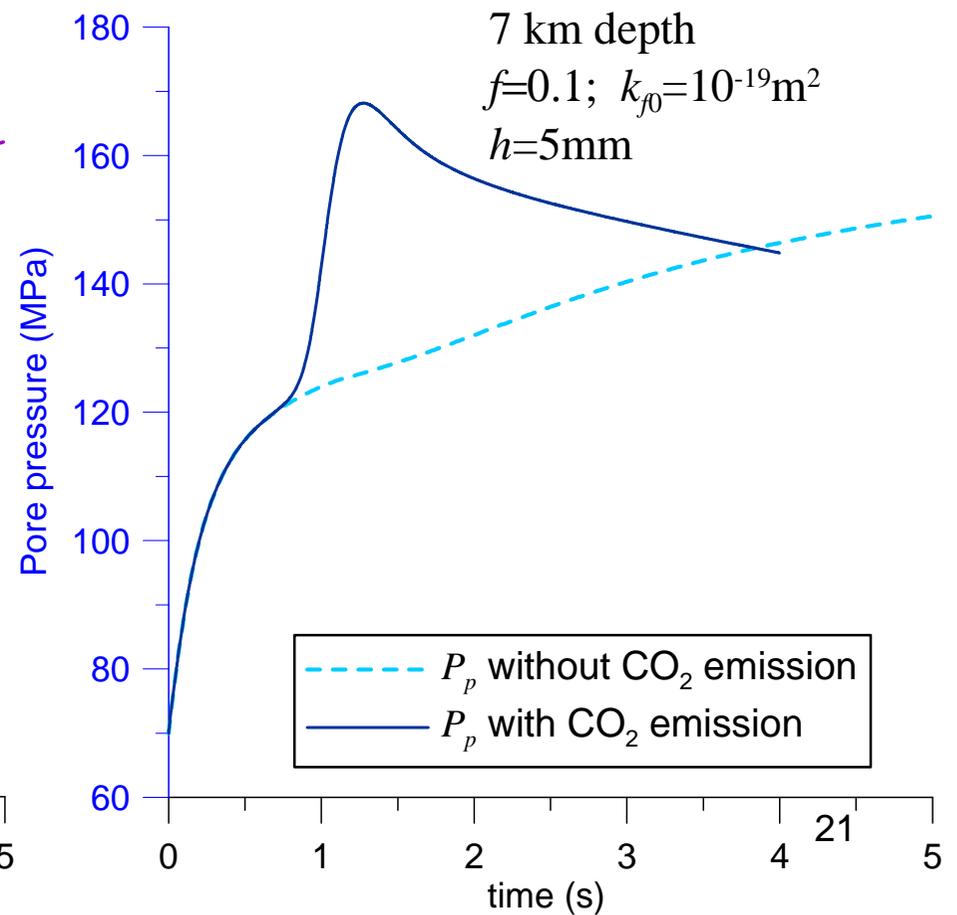
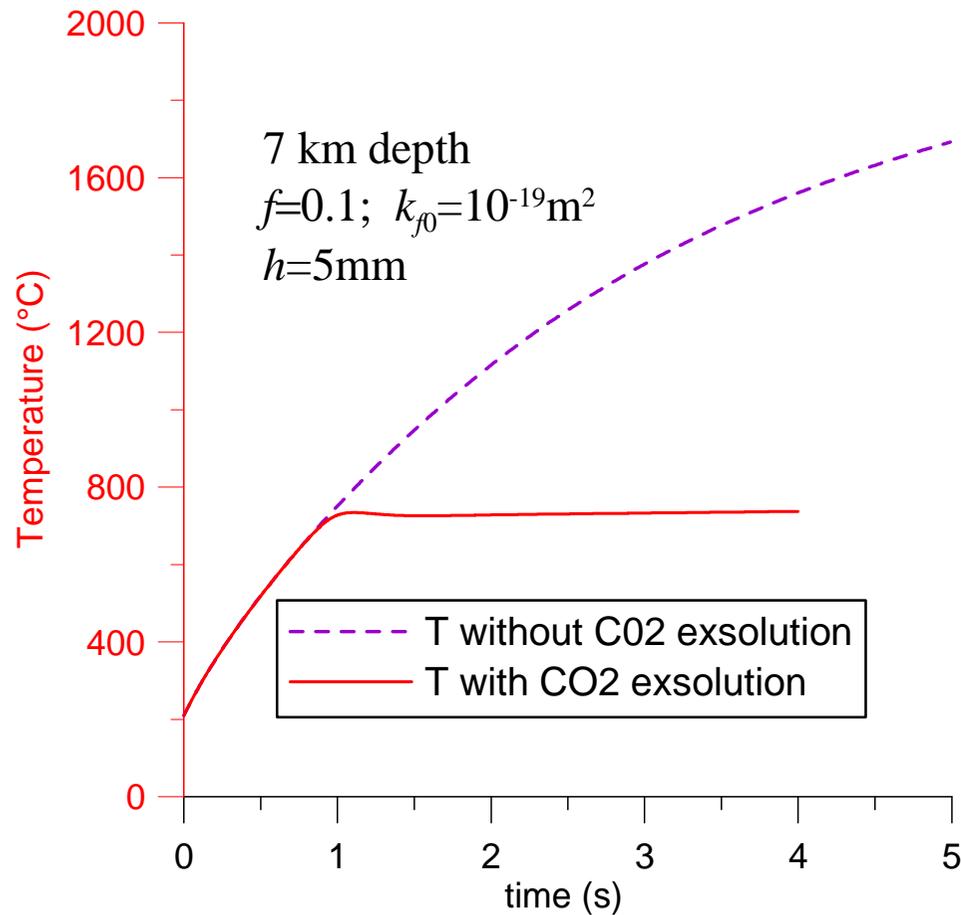
Frictional  
heat

Heat consumed in the  
chemical reaction

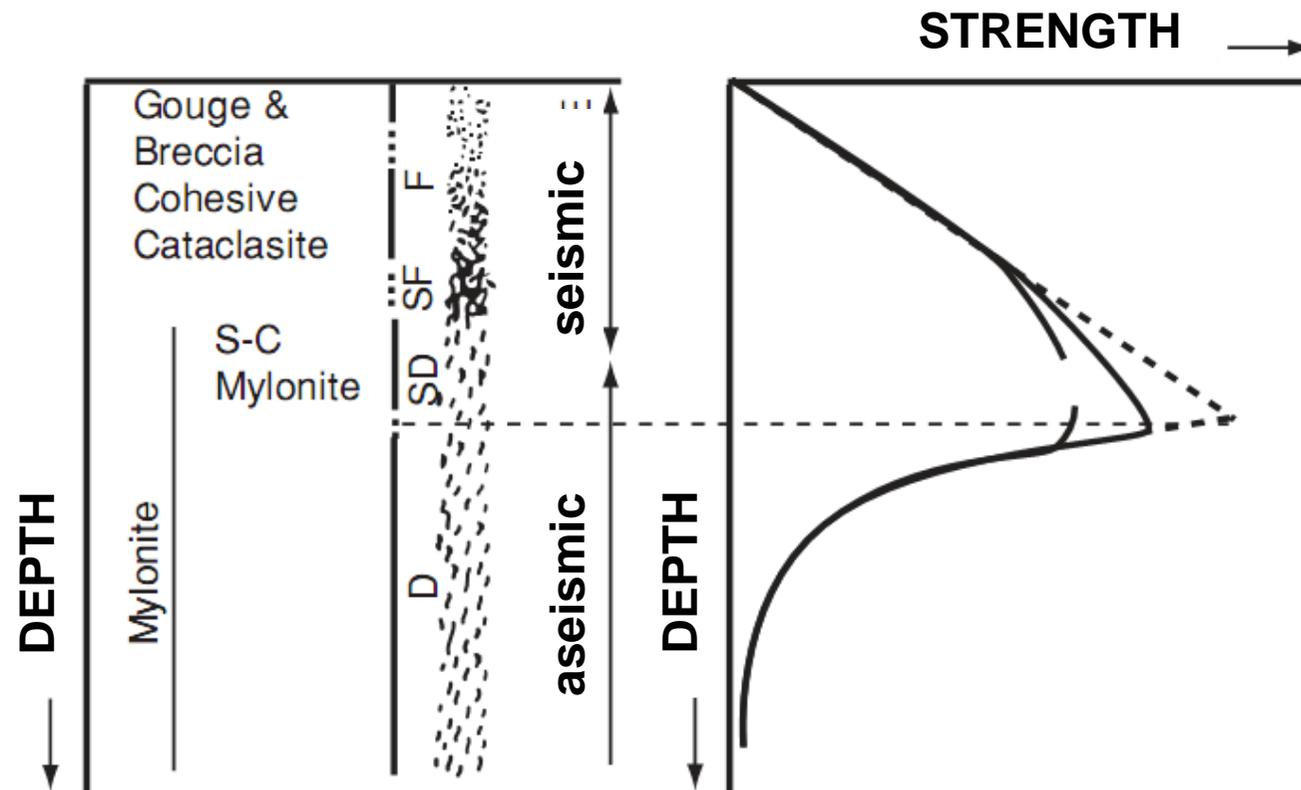


Sulem & Famin, JGR,  
 2009

# Effet de la décarbonatation sur la pressurisation thermique

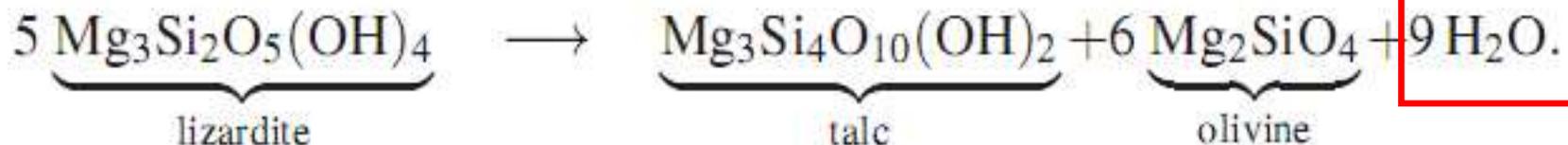


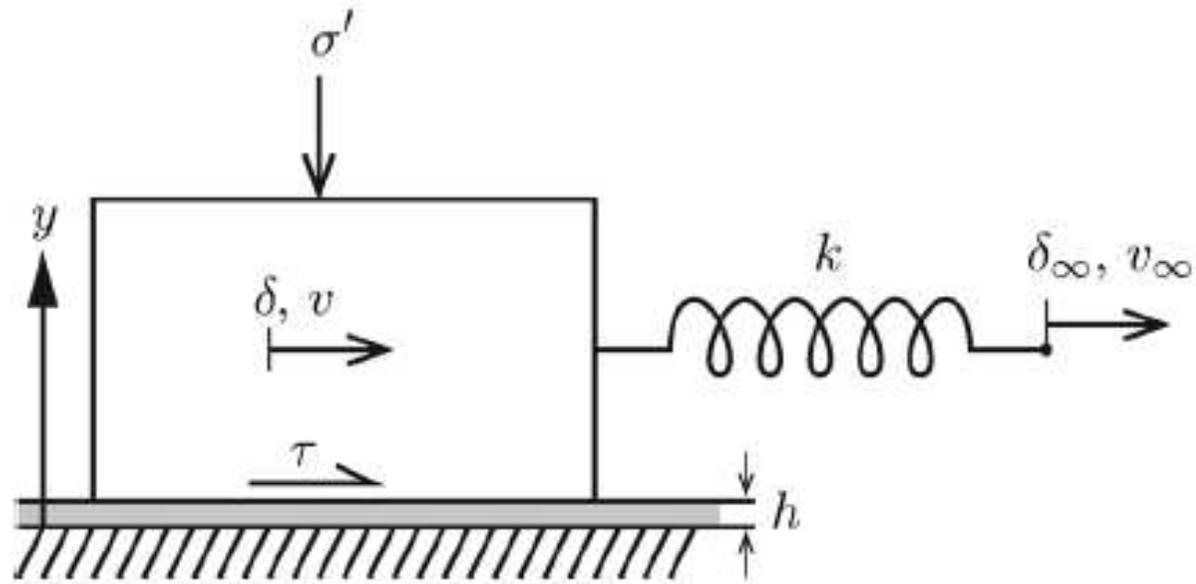
# Couplages TCHM et nucléation des séismes



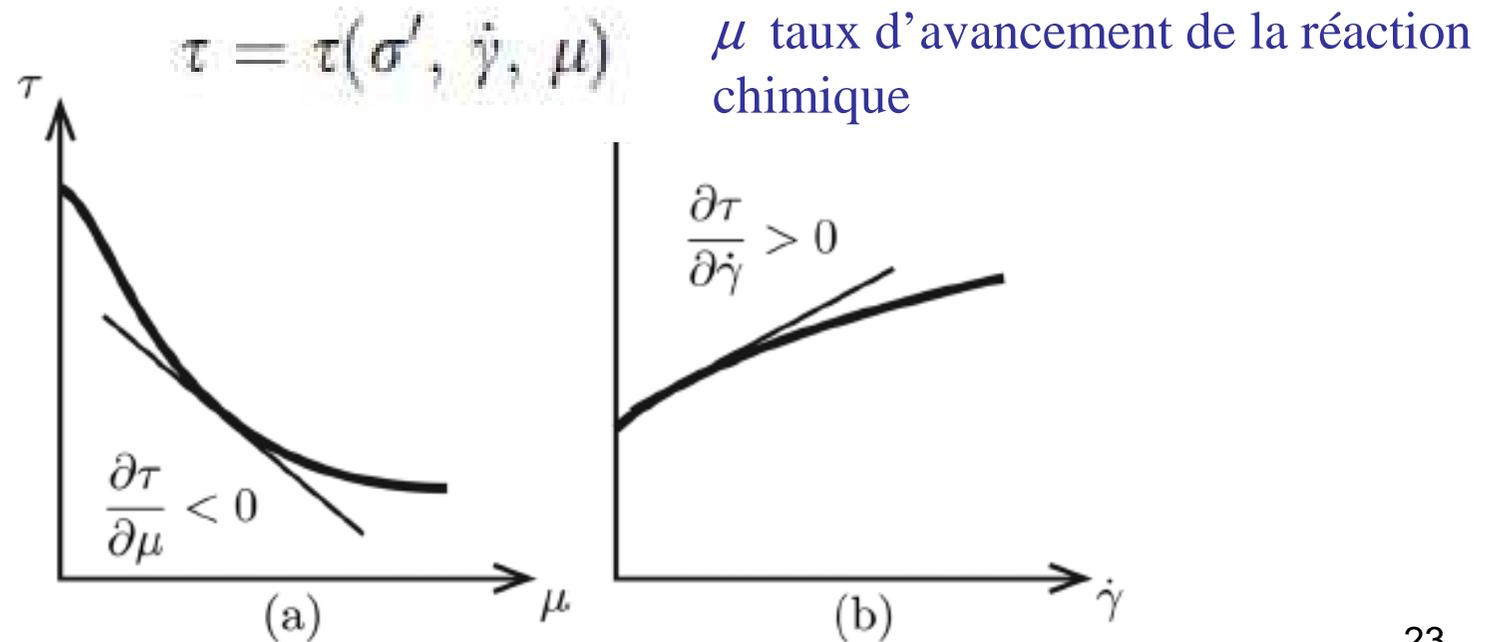
Correspondance entre la transition asismique-sismique et la transition fragile-ductile dans la croûte terrestre.

Pour cette profondeur, les conditions en pression et température peuvent être favorables pour le déclenchement de réactions métamorphiques





Modèle de comportement



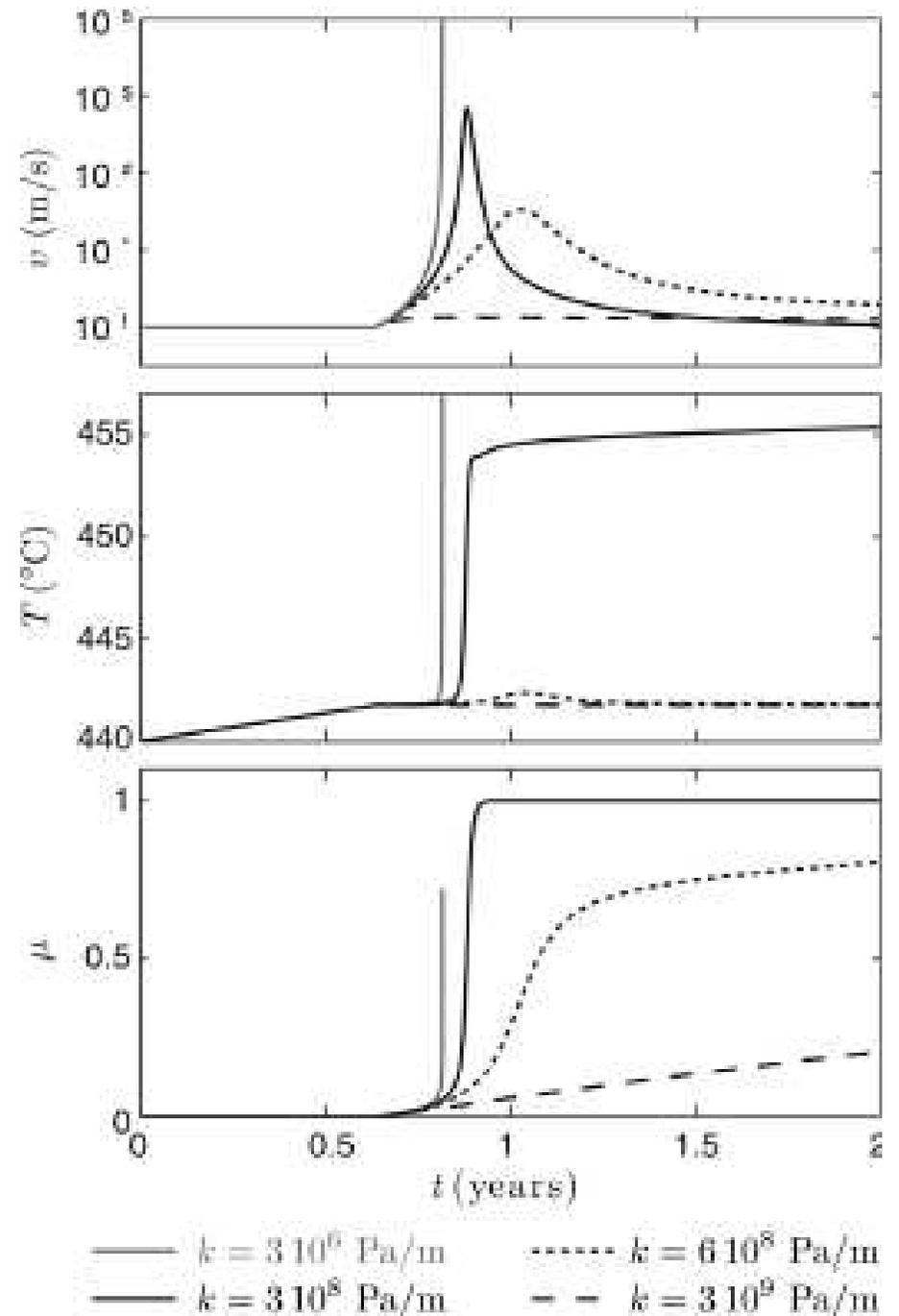
## Exemple: Déshydratation de la lizardite

Accélération du glissement liée au déclenchement de la réaction

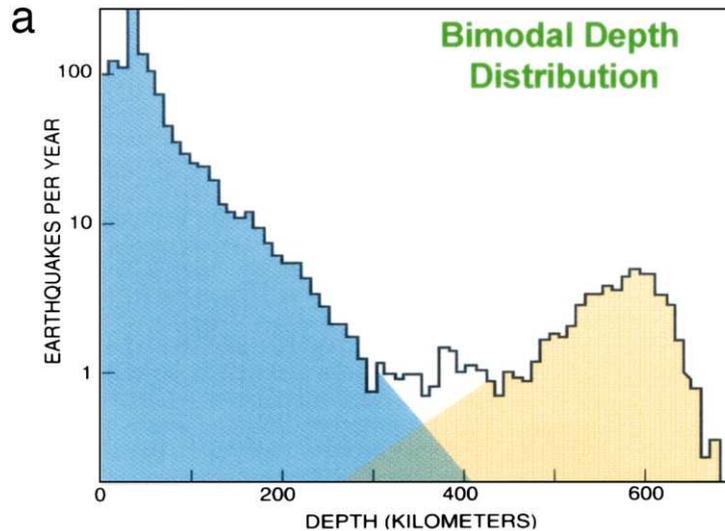
Suivant les valeurs des taux d'écroûissage en vitesse et de radoucissement chimique, et suivant la quantité de réactant pouvant se décomposer, le glissement peut devenir **dynamique (runaway instability)** ou se ralentir ('transient seismic events, 'slow events').

Brantut N, Sulem J., Schubnel A.

*JGR*, 2011, *JAM*, 2012

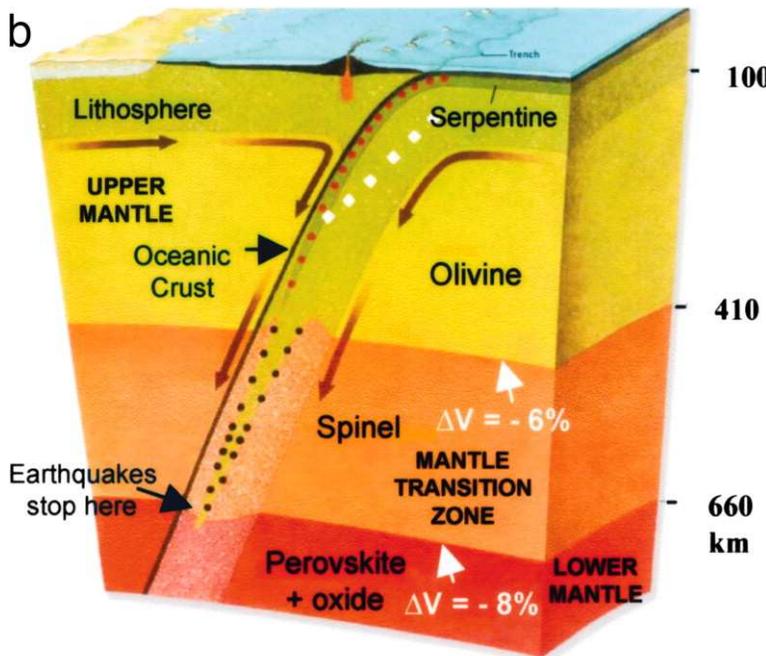


# Application aux séismes très profonds



Question: Comment un tremblement de terre peut être généré dans la zone ductile?

Rôle des **transitions de phases solide-solide** (exemple Olivine – Spinel) dans le déclenchement des séismes très profonds



Réaction exothermique

Réduction de volume solide

Green, H., *PNAS*, 2007

# Conclusions

- Rôle majeur des phénomènes de **radoucissement en frottement** dans l'accélération du glissement le long d'une faille et le **déclenchement des séismes**.
- Importance des **couplages TCHM** dans ces phénomènes de radoucissement (endommagement mécanique, pressurisation thermique, décomposition minérale)
- Rôle des **réactions chimiques** mises en jeu dans le bilan énergétique du système
- Besoin d'études expérimentales sur les **cinétiques de réaction** en conditions de pression/température appropriées et sur le comportement des roches à **très hautes températures et fortes pressions** (e.g. ANR, DELF) pour contraindre les modèles.