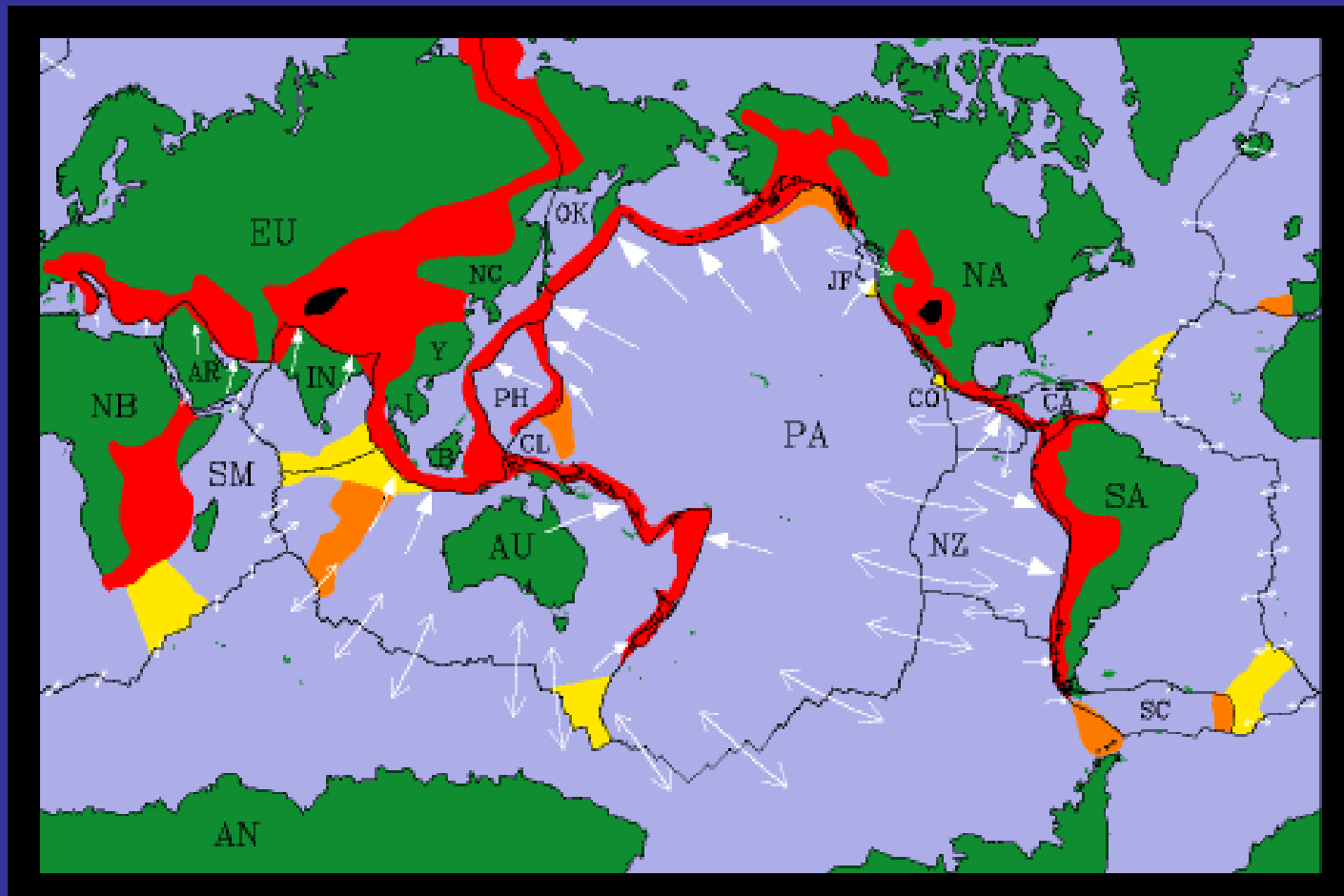


LA MACHINE TERRESTRE

4

Jean-Paul Montagner, Elise Delavaud,
Université Paris VII-Denis Diderot, Institut de Physique du Globe



Plan

I- Une brève Histoire de la Terre

- observations de surface: calculs à la surface de la terre

Calcul de la masse des planètes

- l'aventure Wegenerienne

II- Le champ magnétique terrestre

- Définition

- Modèle de champ dipolaire

- Les inversions

- Aimantation des roches, PGM

III- Tectonique des plaques

- Expansion des fonds océaniques

- Théorème d'Euler

- Modèle cinématique- cinématique sur la sphère

- Différents types de frontière- Différents types de données

IV- Déformations, contraintes, rhéologie (très sommaire)

V- Sismologie

- sismomètres

- séismes, localisation, ondes P, ondes S

- structure radiale de la terre (1D)

- Notions de tomographie sismique

VI- Imagerie des objets géologiques

- Modèles globaux 3D

- Concept de lithosphère

- Slabs

- Hotspots- panaches

VII-Développements actuels

Déformations élastiques et plastiques

NOTION DE CONTRAINTES

NOTION DE DÉFORMATION

Exemple du barreau élastique

- Longueur l
- Section a (diamètre d)
- Force appliquée F

$$\sigma = F/a$$

Déformation

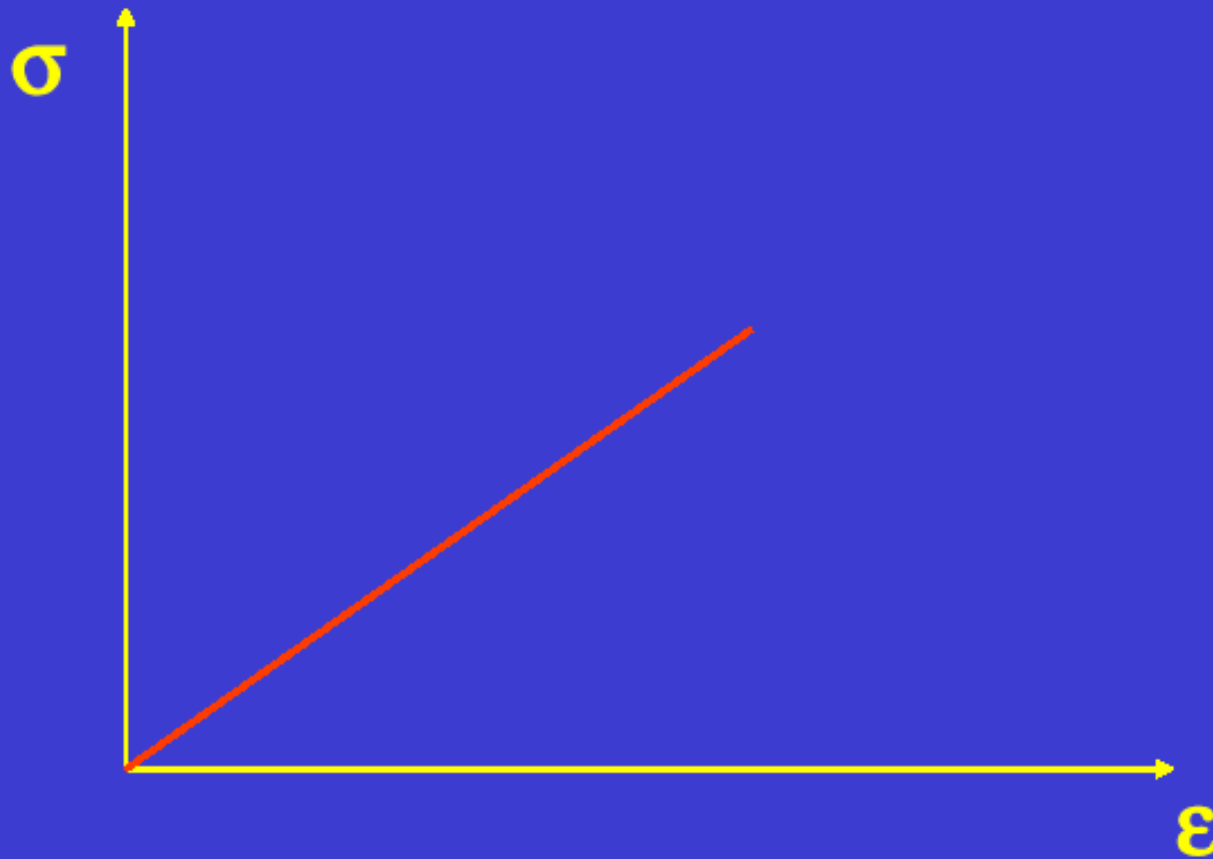


$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Relation
entre σ et ε

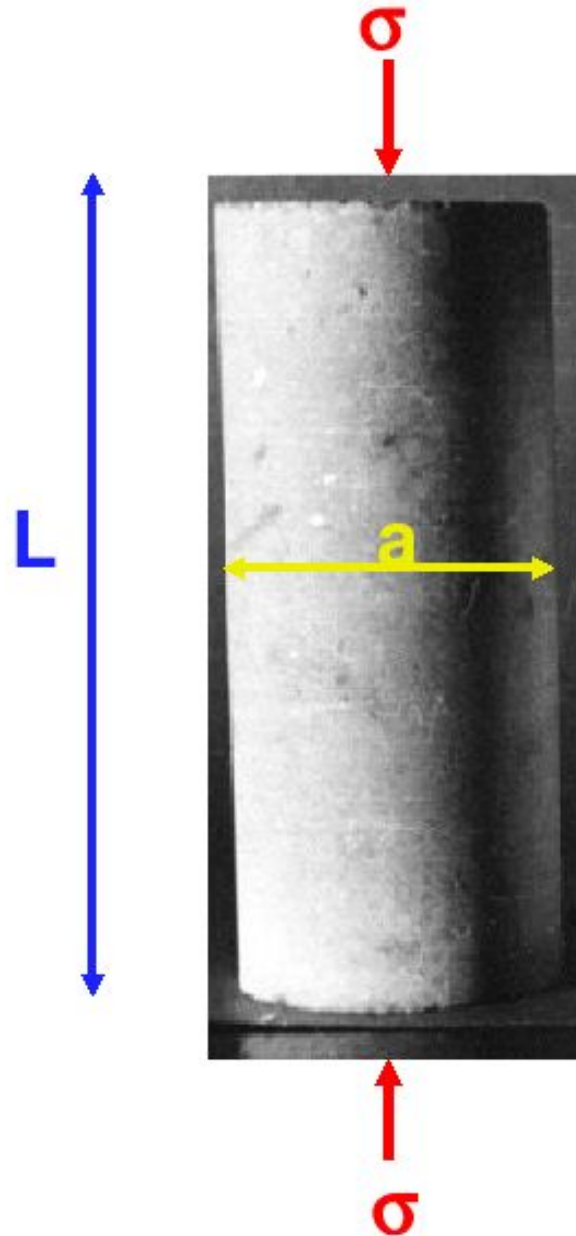
Régime élastique

(comme un ressort)



ϵ proportionnelle à σ :
 $\sigma = \lambda \epsilon$, λ module "élastique"

Plusieurs déformations



$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta a}{a}$$

Exemple du barreau élastique

- Longueur l
- Section a (diamètre d); volume $V=a.l$
- Force appliquée F

$$\sigma = F/a$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \sigma$$

1ere Loi de Hooke
E module d'Young

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \sigma$$

Unités: Pascal 1N/m^2

$$E$$

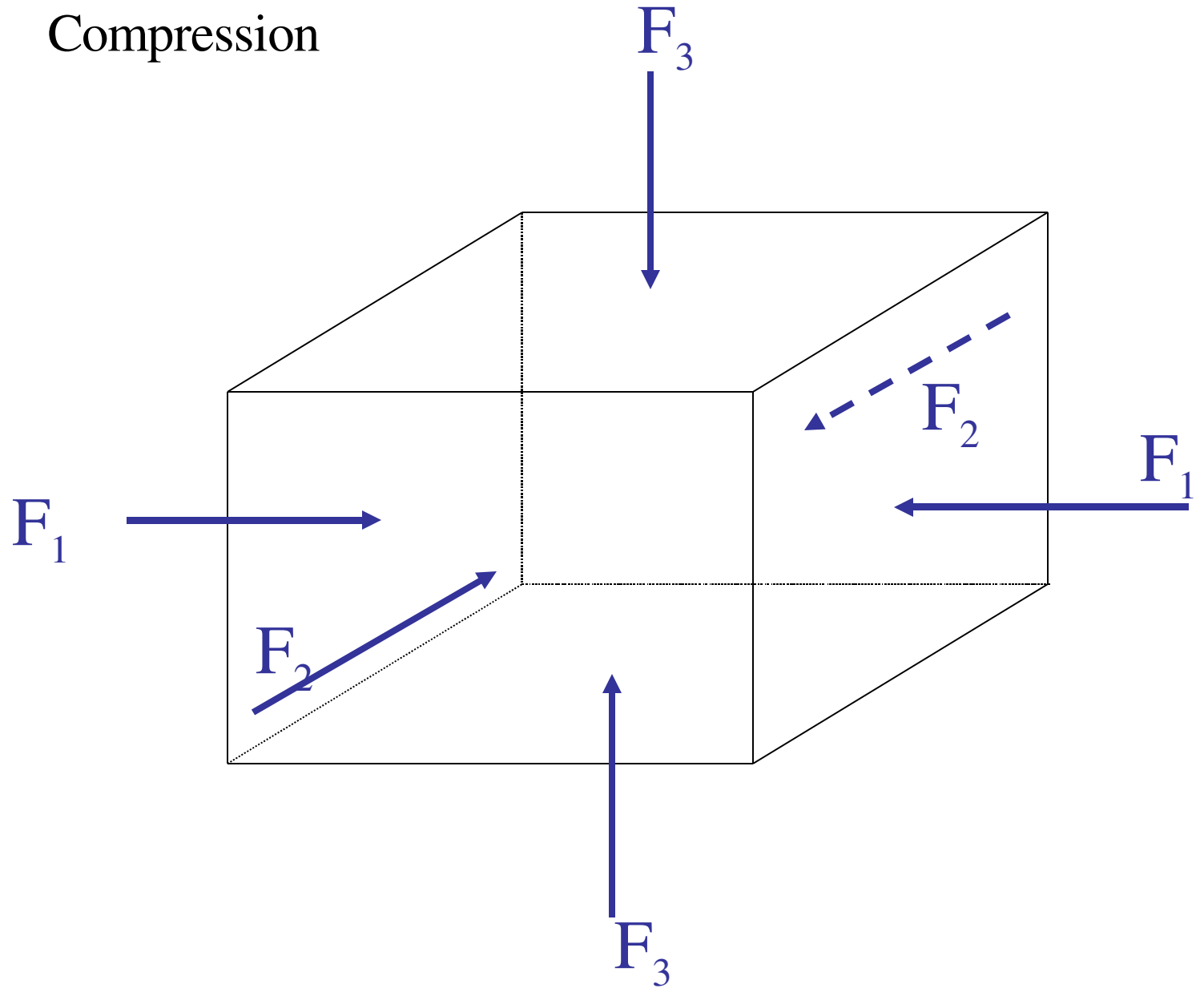
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

2e Loi de Hooke

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta l}{l} \sigma = -\frac{\nu}{E} \sigma$$

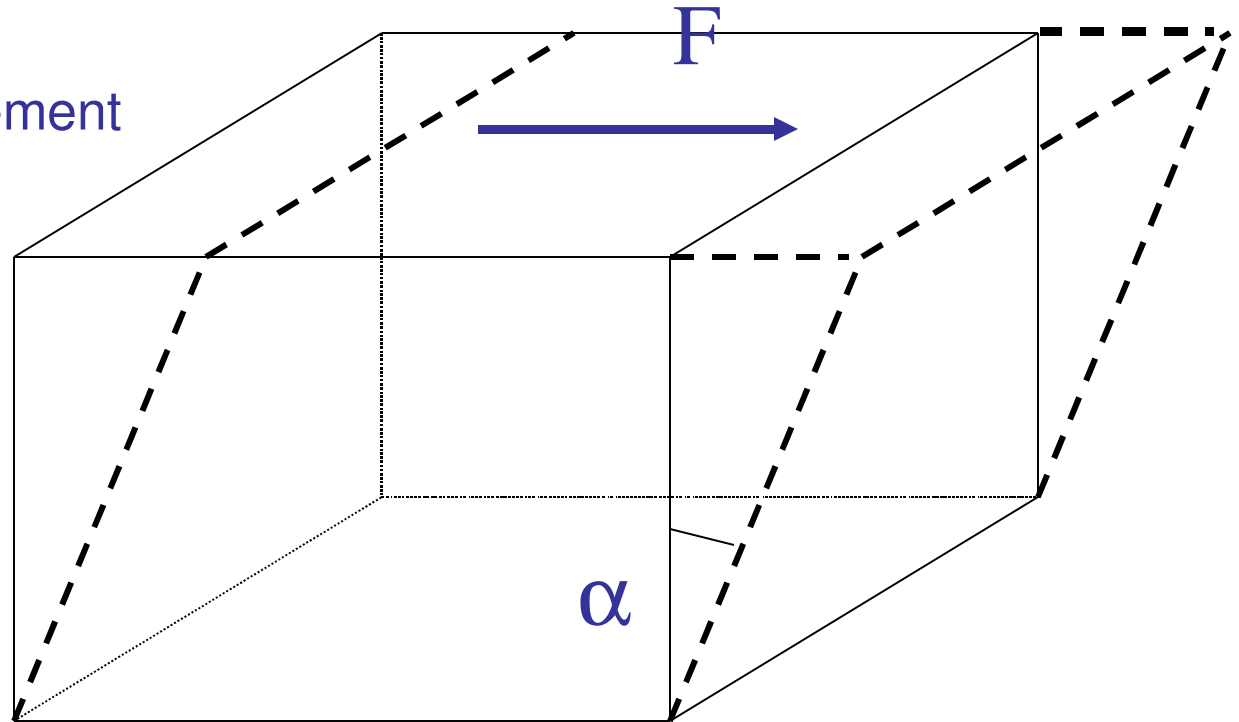
Compression



Forces Tangentielles: 3e loi de Hooke

$$\alpha = \mu^{-1} \sigma$$

μ module de cisaillement



Généralisation: tenseur des contraintes σ_{ij}

Les contraintes

La contrainte est une force divisée par une surface (comme la pression)

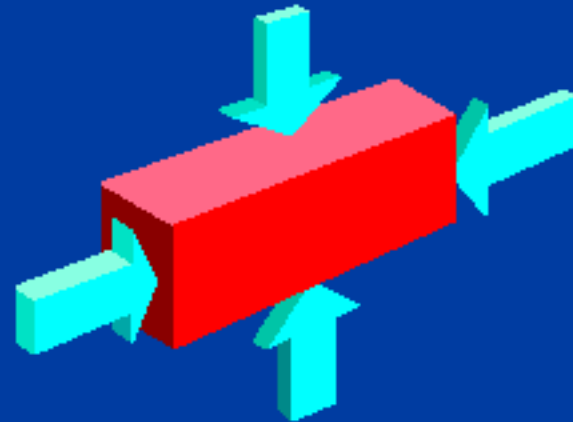
$$\sigma = F / S \text{ (en N/m}^2 = \text{Pa, ou en bar)}$$

La contrainte s'exerce dans une direction (contrairement à la pression).

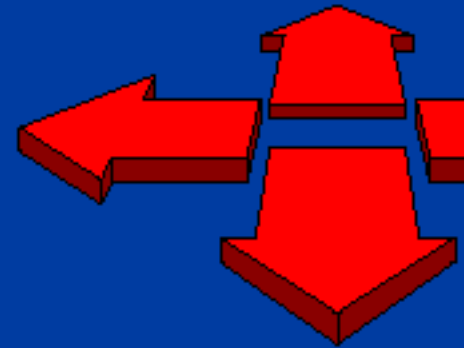
Les contraintes

On distingue trois grands types de contraintes:

- Compression



- Extension

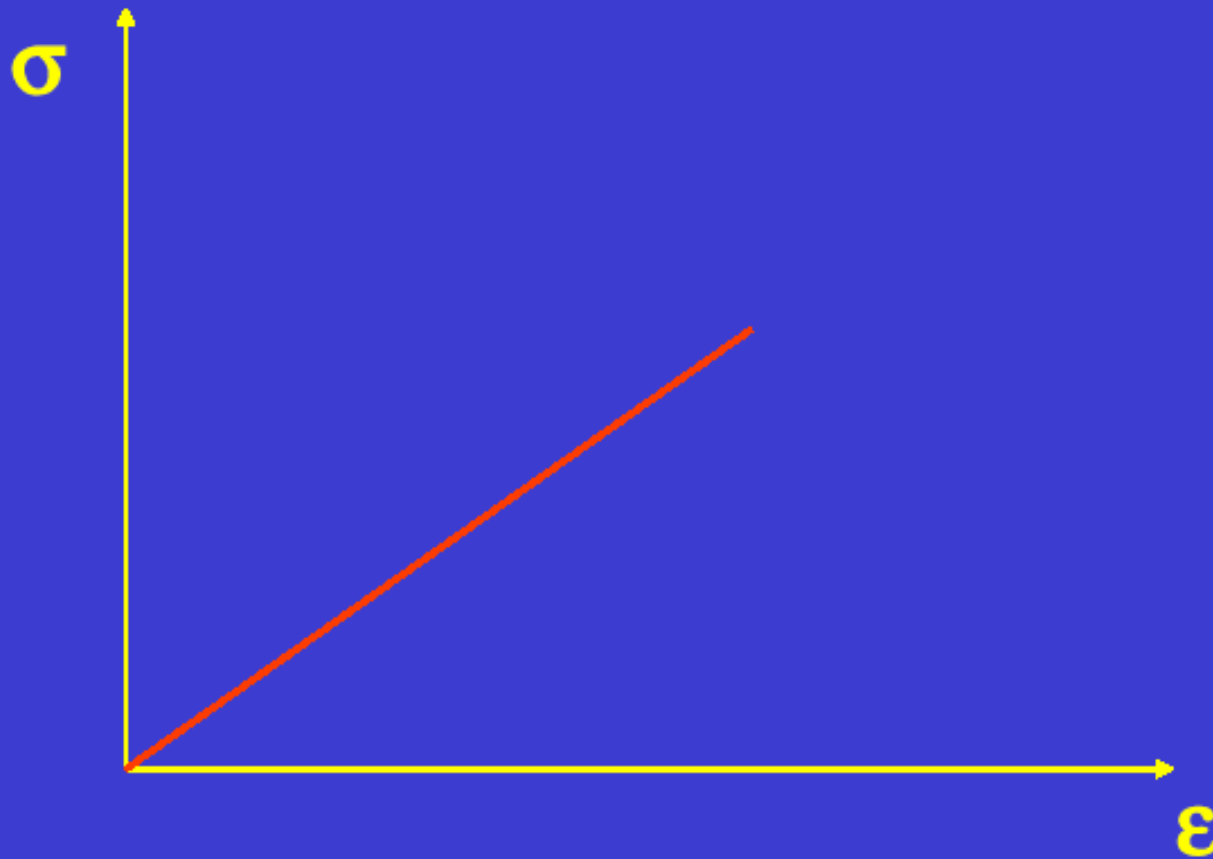


- Cisaillement



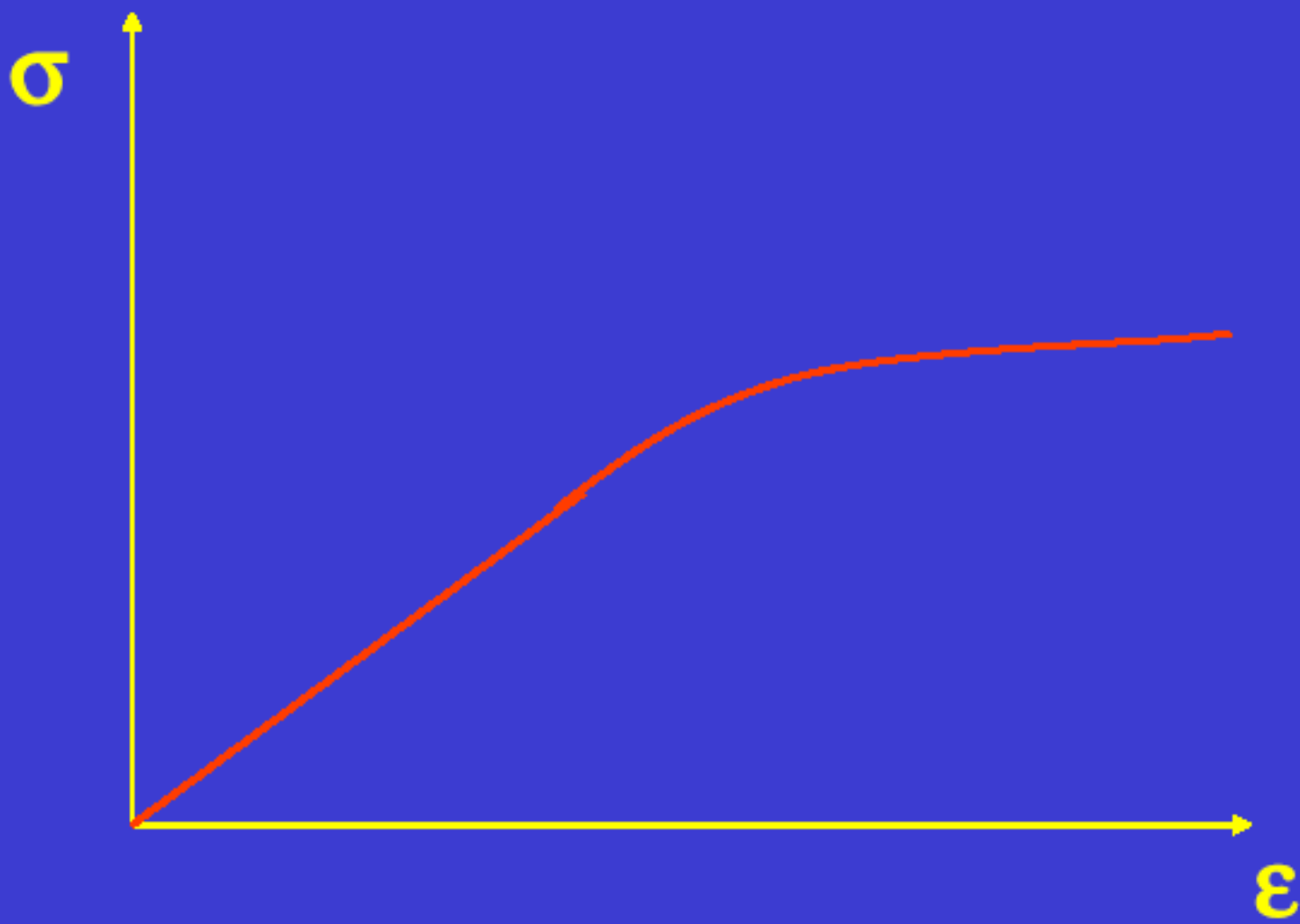
Régime élastique

(comme un ressort)



ϵ proportionnelle à σ :
 $\sigma = \lambda \epsilon$, λ module "élastique"

Régime plastique



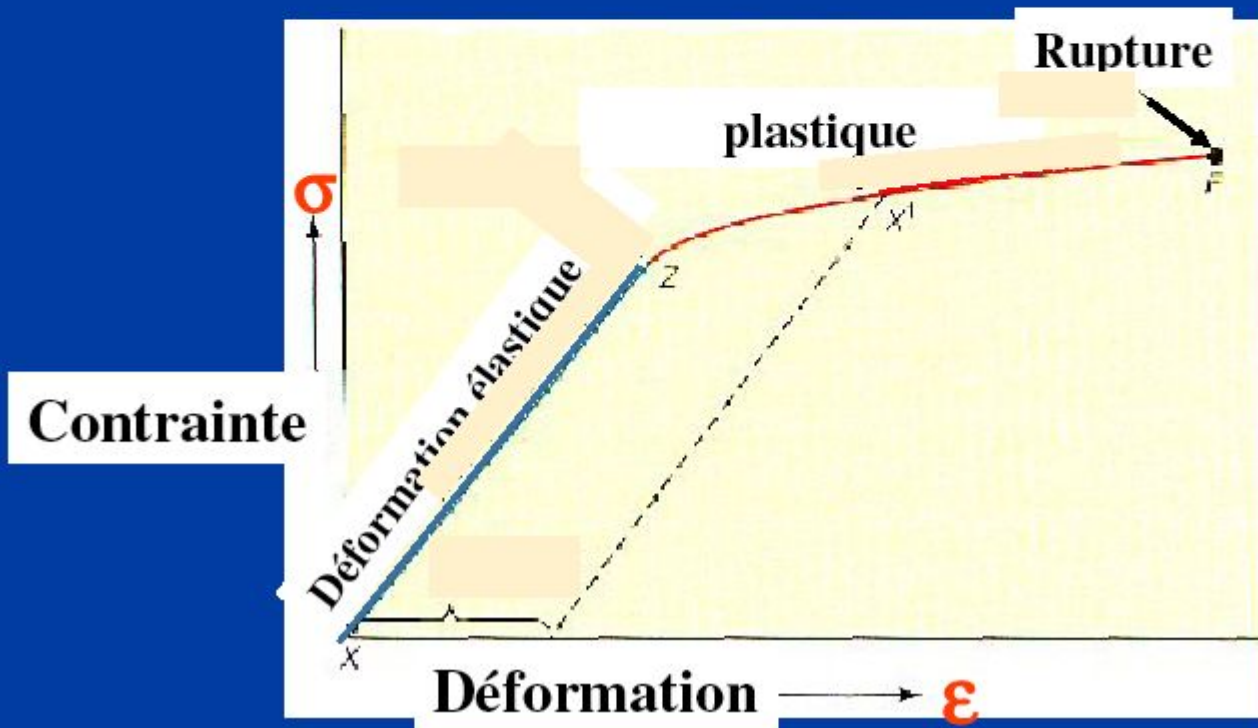
ε n'est pas proportionnelle à σ .

Déformations et contraintes.

Contraintes faibles : régime élastique

Contraintes intermédiaire : régime « plastique »

Contraintes fortes : rupture



MESURES DES CONTRAINTES

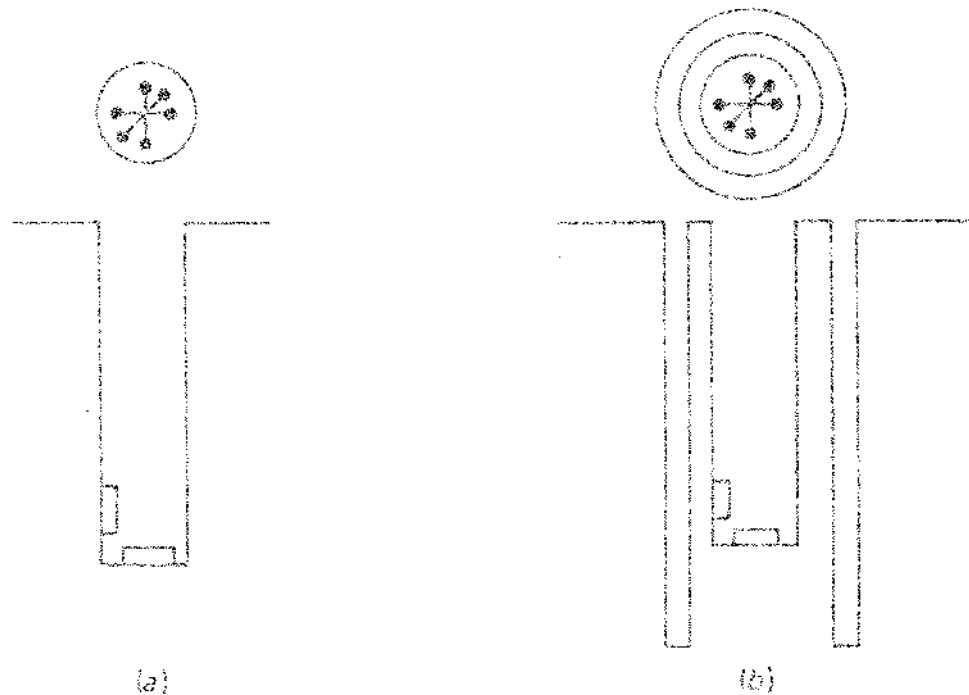
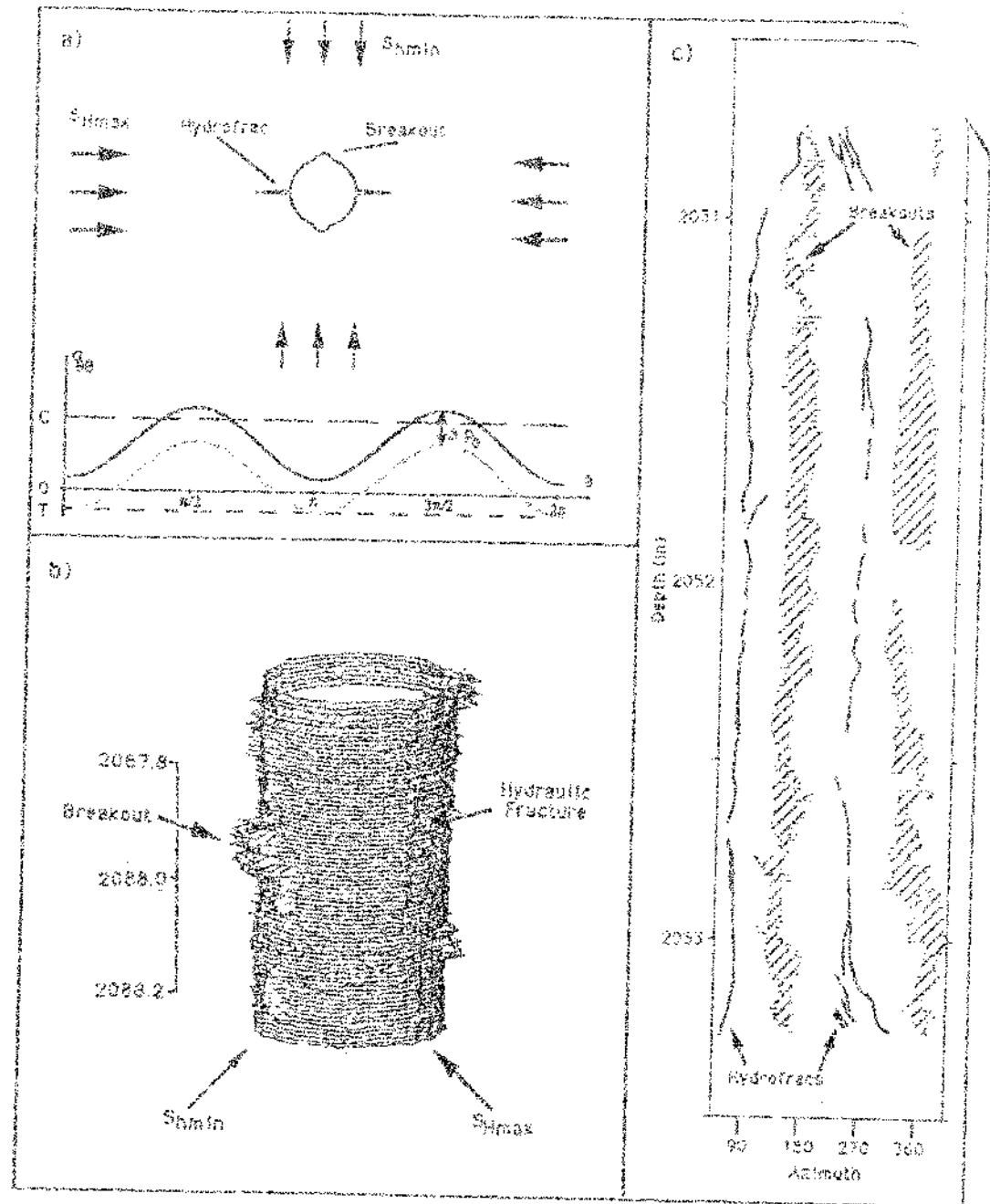


Figure 1-3 Schematic of overcoring technique for stress measurements. (a) A hole is drilled, and four strain gauges are installed: one on the side wall to measure σ_{yy} and three on the base to measure σ_{xx} , σ_{xy} , and σ_{xz} . It is assumed that the drilling of the hole has not affected the ambient state of stress. (b) The second annular hole is drilled. It is assumed that this annular hole completely relieves the initial stresses.

Hydrofracturation



La déformation

La déformation exprime le changement de dimension d'un objet sous l'action d'une force.

Elle se mesure sous forme d'un accroissement de dimension rapporté à la dimension d'origine (donc sans dimension)

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (\text{par exemple en \%})$$

Mesures des déformations

STRESS AND STRAIN IN SOLIDS

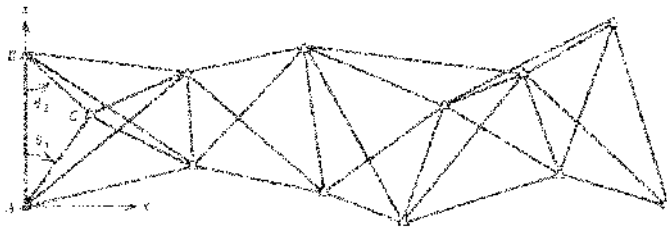


Figure 1.5a. Illustration of triangulation. The x , z position of monument C can be determined from the line length AB and the angles θ_1 and θ_2 . The positions of the other monuments can be similarly determined.

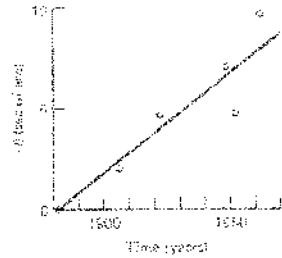
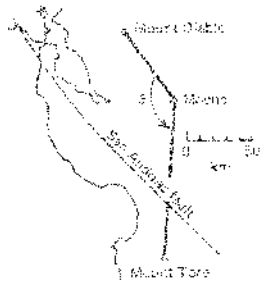
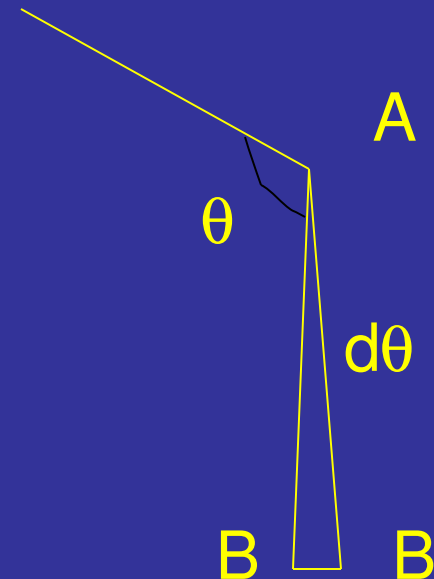


Figure 1.5b. (a) The three monuments at Mount Diablo, Modoc, and Mount Toro are part of a primary triangulation network that spans the San Andreas fault south of San Francisco. (b) Observed changes in the angle θ between the monuments since 1882. Data from J. C. Savage and F. O. Burford, Geodetic determination of relative plate motion in central California. *J. Geophys. Res.* 78, 932-945 (1973).

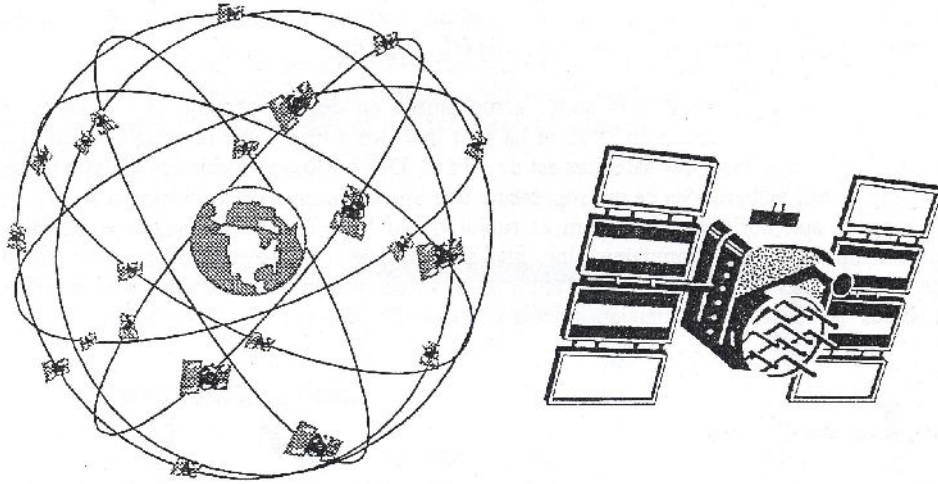


line terrestre

Mesures par satellite

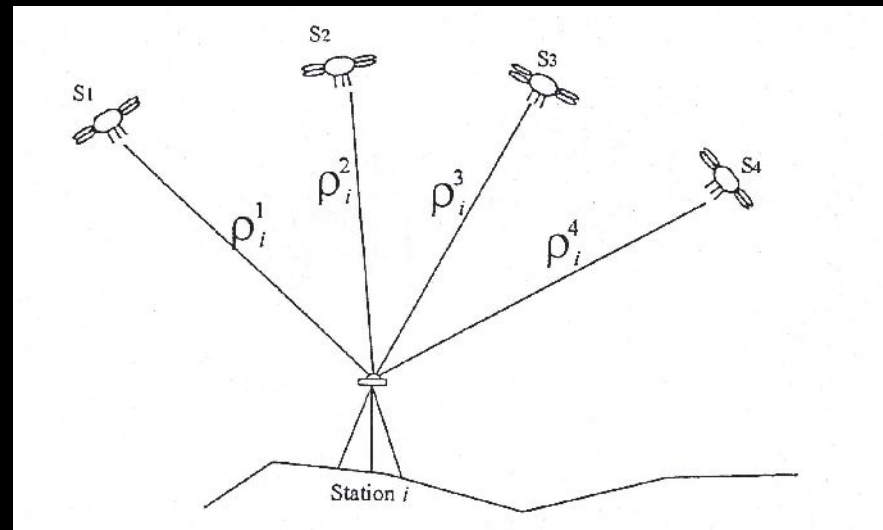


GPS -> Galileo



- Le système de positionnement global (GPS) est composé par 24 satellites répartis sur des orbites conçues pour assurer en tout lieu une visibilité simultanée de 4 à 8 satellites

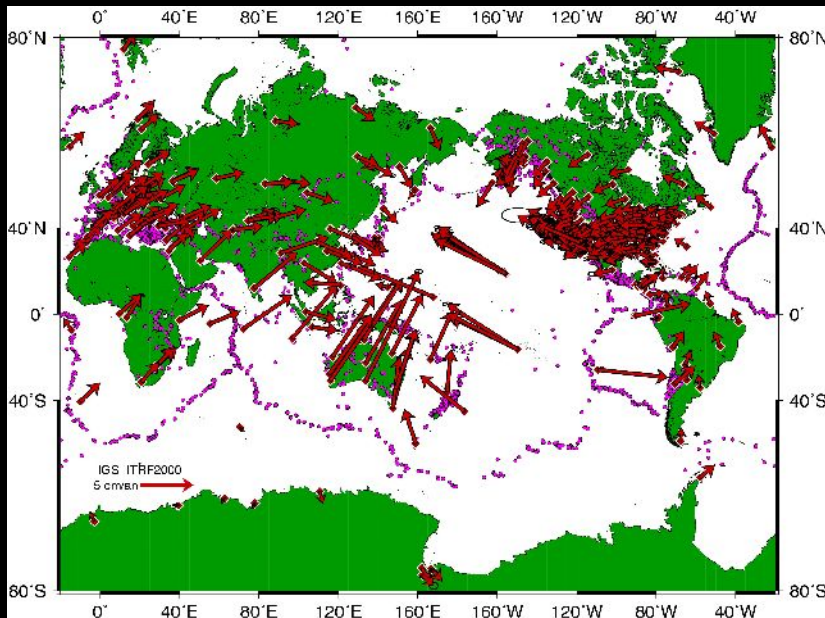
- Un point au sol a besoin de recevoir les données par au moins quatre satellites: trois pour connaître sa position absolue et un pour connaître le temps.



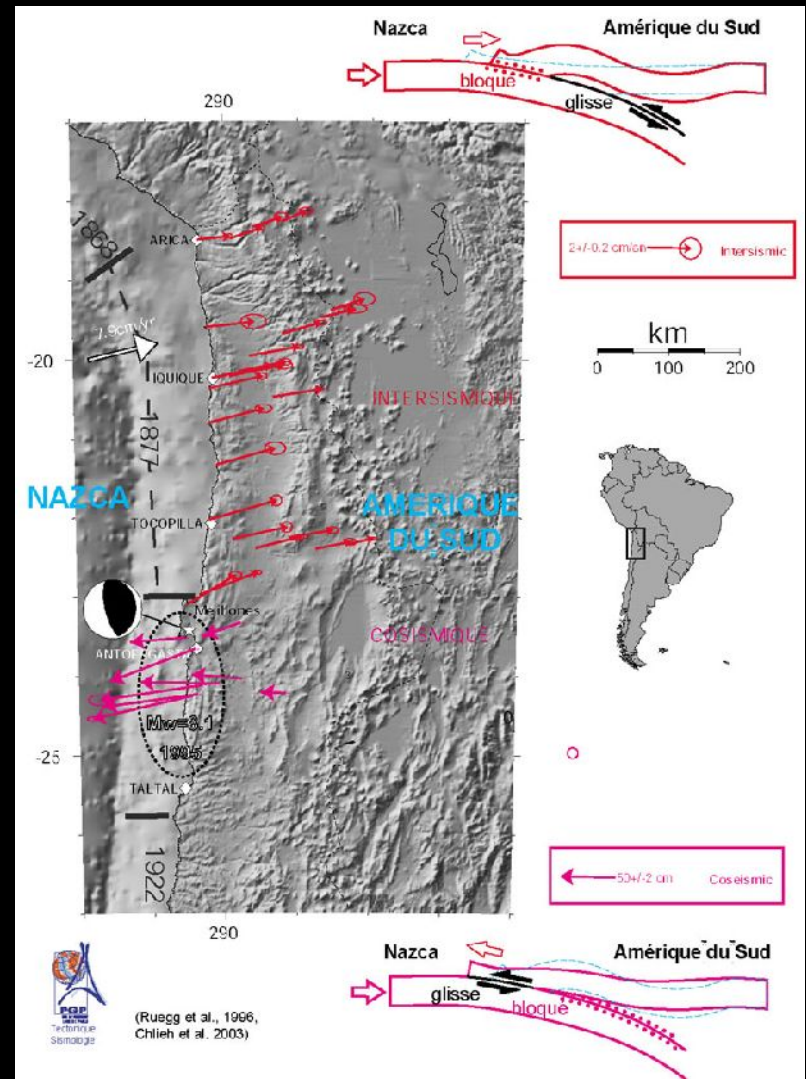
GPS - résultats

- La connaissance précise de la position d'un certain nombre de points ("réseau") permet de détecter les mouvements relatifs du à la tectonique à différentes échelles

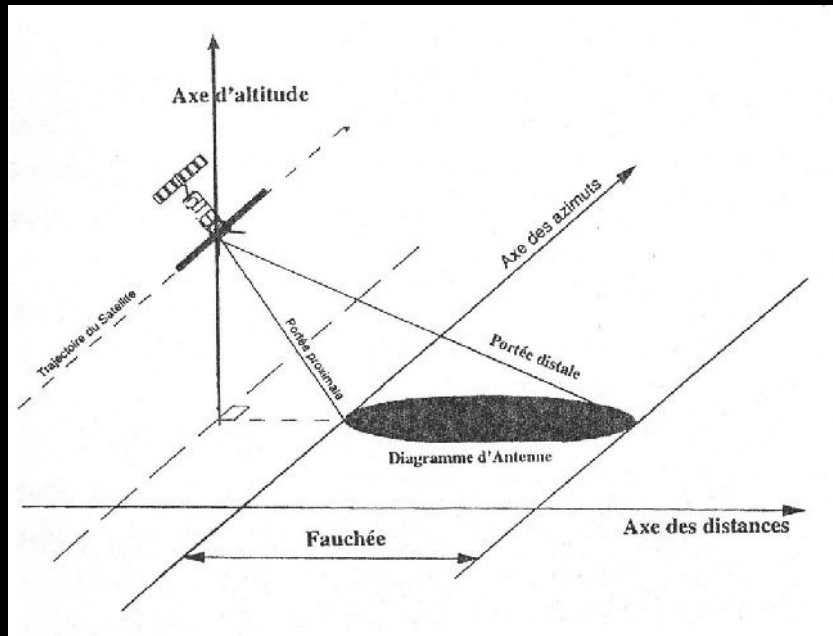
– Échelle Globale



– Échelle locale: Chili



Interférométrie Radar (SAR)

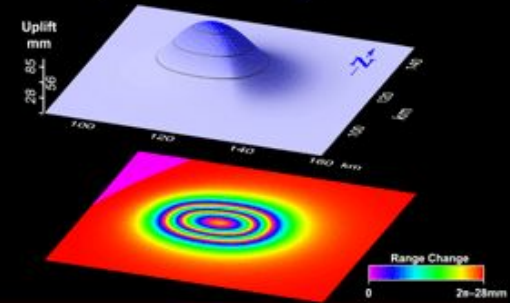


- Le satellite radar envoie vers la surface terrestre un faisceau d'ondes radar de longueur d'onde $\sim 3-6$ cm. Pendant l'acquisition d'une image, le satellite balaie une région de 100×100 km.

- Si, entre deux passages, la forme de la terre a changé, la phase des ondes enregistrée dans l' nouvelle image changera aussi. En soustrayant cette image de l' originale, on voit de très petits changements.

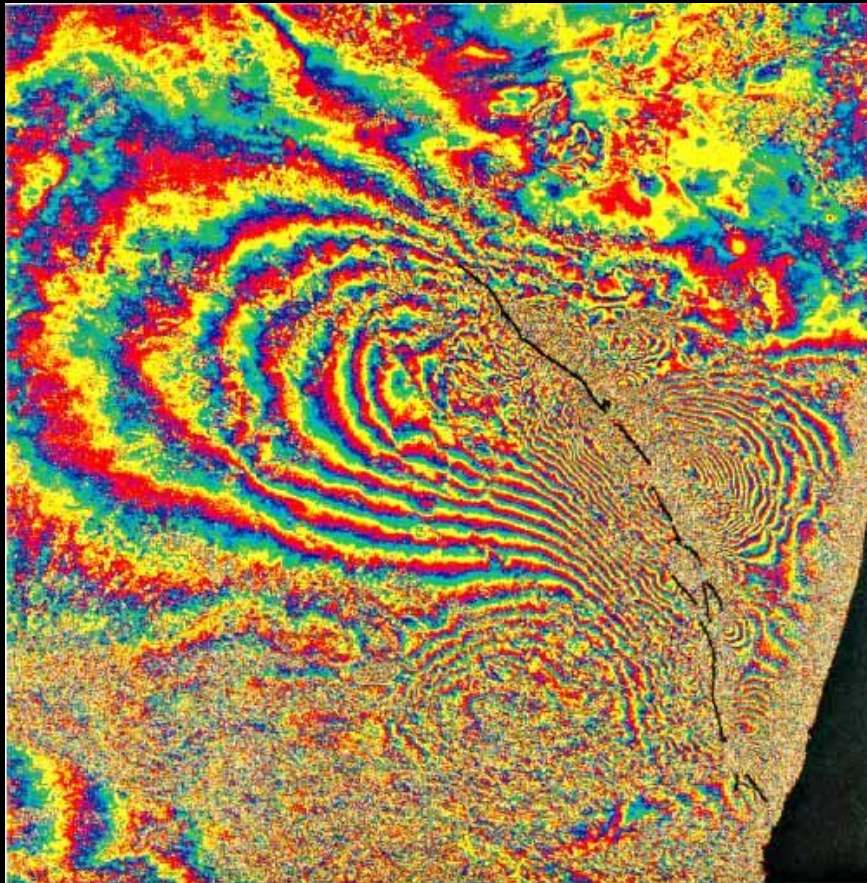


~ 10 cm of uplift produces ~ 3 fringes of deformation

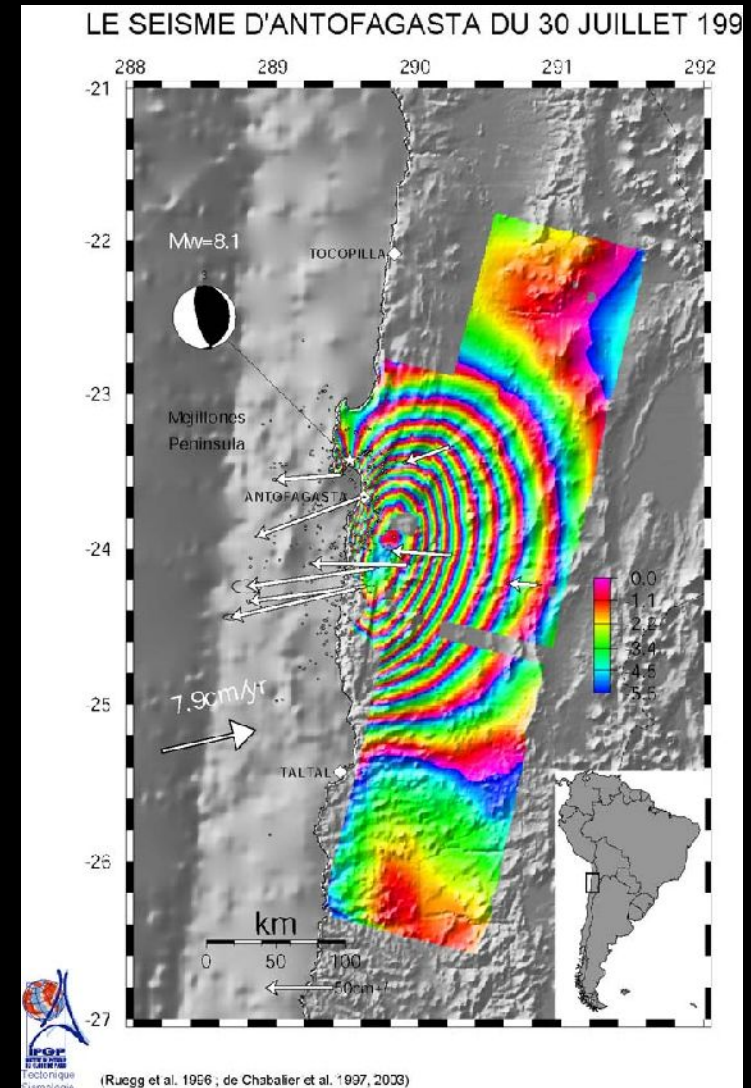


Interférométrie Radar - résultats

- Landers, Californie, USA (Massonnet et al., 1994)



- CHILI: Invisible en surface!



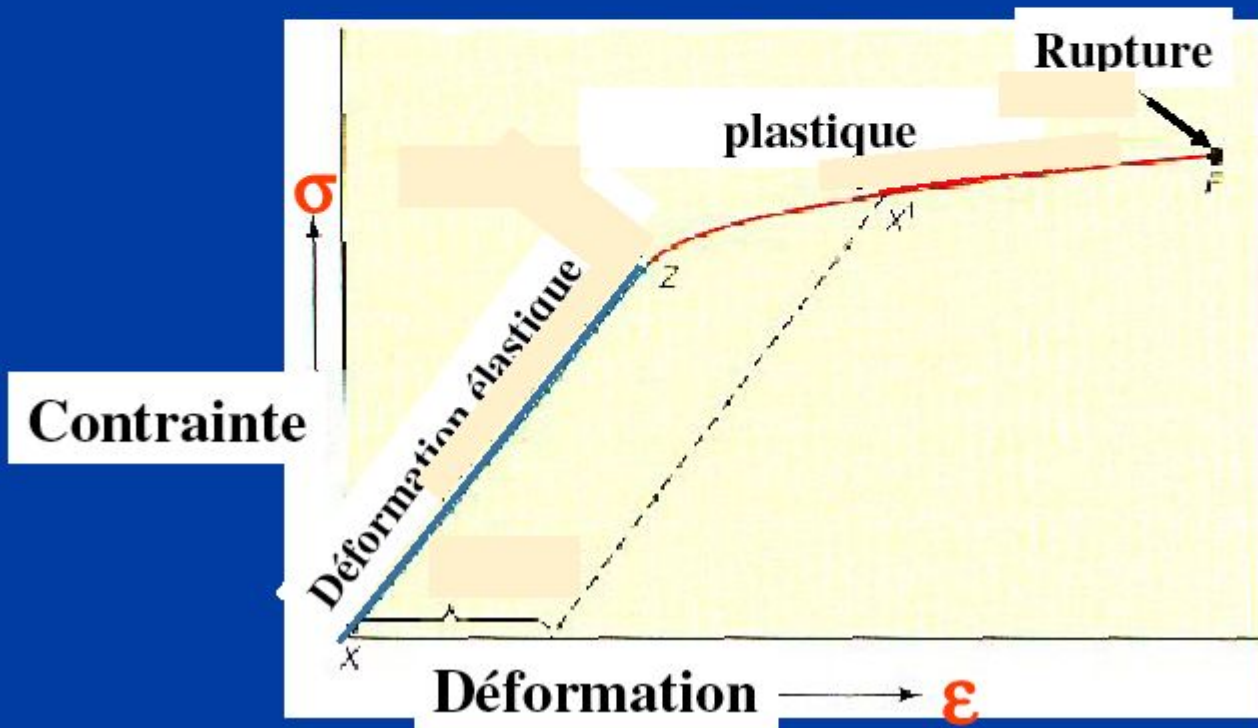
MODÈLES RHÉOLOGIQUES

Déformations et contraintes.

Contraintes faibles : régime élastique

Contraintes intermédiaire : régime « plastique »

Contraintes fortes : rupture



Les modes de déformation

On distingue trois grands modes de déformation:

- **Elastique** : réversible, déformation du réseau
- **Ductile (plastique)** : permanente, glissements l'atomes sans perte de cohésion
- **Fragile (rupture)** : perte de cohésion



$$\sigma = \lambda \varepsilon, \quad \lambda \text{ module "élastique"}$$

Unités :

$$\sigma = \text{contrainte} = \text{Pa (N/m}^2\text{)}$$

$$\varepsilon = \text{déformation} = \text{sans dimension}$$

$$\lambda = \text{module} = \text{Pa (N/m}^2\text{)}$$

Pour les roches

$$\lambda \approx 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\text{Contraintes} \approx 10^7 - 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{donc } \varepsilon \approx 10^{-2} - 10^{-3} : \text{ TRES FAIBLE}$$

Fluage visqueux

$$\sigma = \mu \, d\varepsilon/dt .$$

Unités:

σ : Pa

$d\varepsilon/dt$: s⁻¹

donc μ : Pa s.

Pour le manteau terrestre:

$\mu \approx 10^{21}$ Pa s

(huile de cuisine $\approx 10^{-1}$ Pa s)

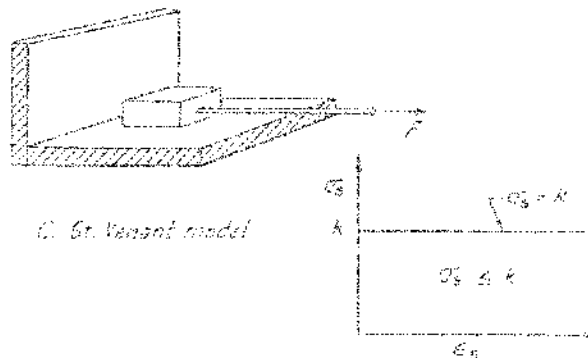
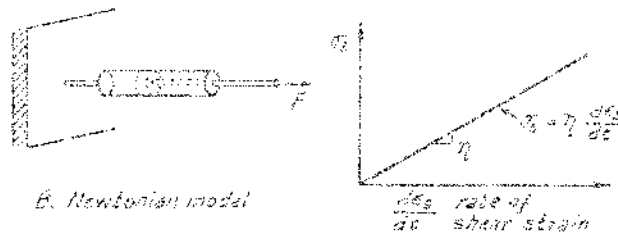
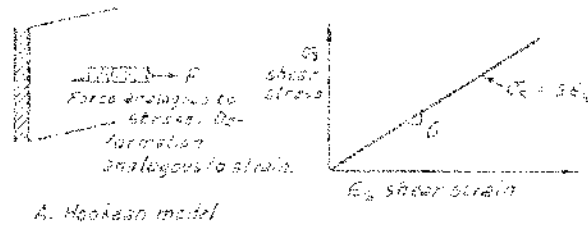


Fig. 11.1 Mechanical analogs of fundamental rheological equations.

- A. Hookean model, a helical spring rigidly supported at one end.
- B. Newtonian model, a tube filled with oil in which a loosely fitting piston can be pushed back and forth.
- C. Saint Venant model, a weight on a flat, rough surface.

Modèle Hookéen
(élastique)

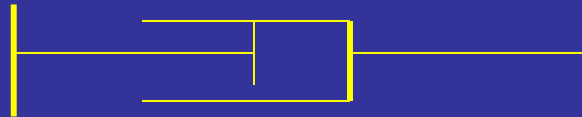
Modèle Newtonien
(visqueux)

Modèle de St-Venant
(cassant)

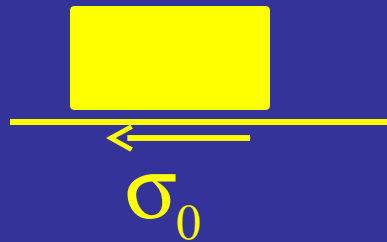
Combinaison de modèles rhéologiques linéaires



Hooke



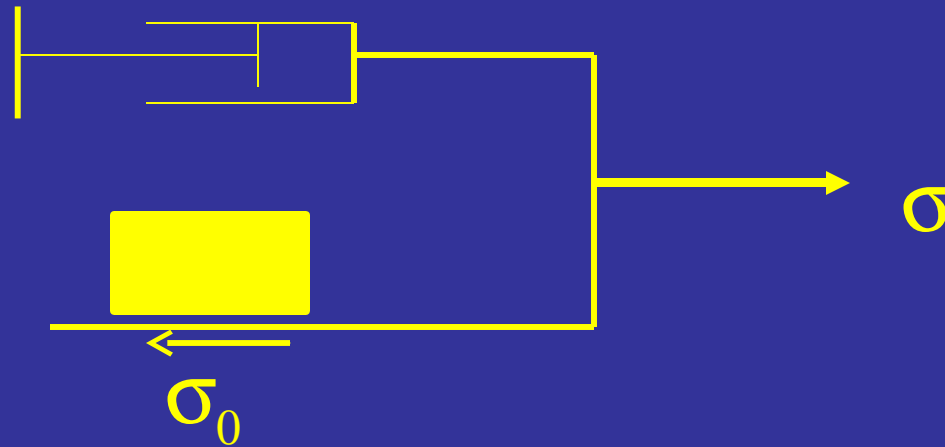
Newton



St-Venant

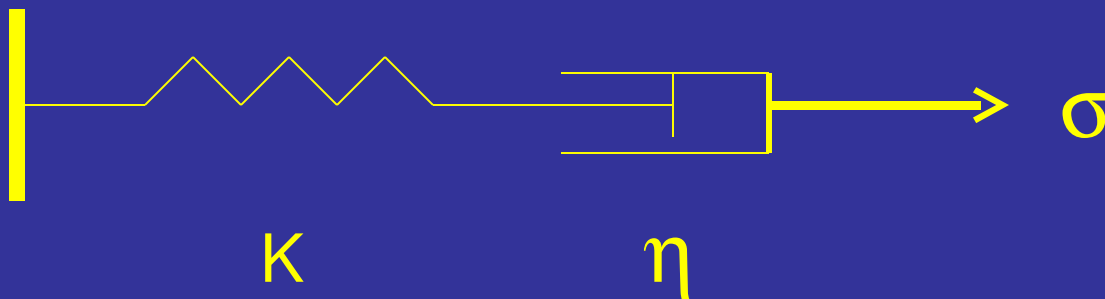
Combinaison de modèles rhéologiques linéaires

Peinture



Combinaison de modèles rhéologiques linéaires

Substance de Maxwell

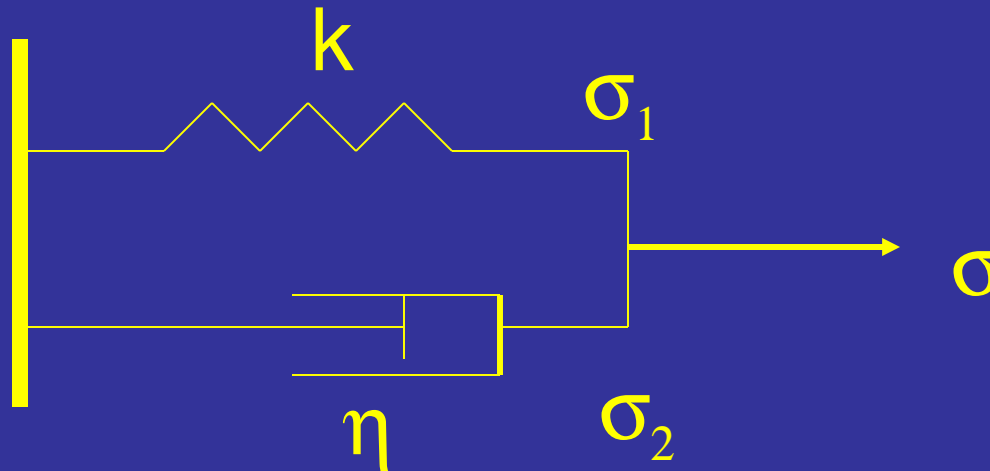


$$\varepsilon_1 = \sigma/k \quad d\varepsilon_2/dt = \sigma/\eta$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \Rightarrow d\varepsilon/dt = 1/k d\sigma/dt + \sigma/\eta$$

Combinaison de modèles rhéologiques linéaires

Modèle de Kelvin - Voigt



$$\sigma_1 = k\varepsilon \quad \sigma_2 = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \Rightarrow k\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \sigma$$

Structure Élastique de la Terre (Sismologie)

**Propriétés Mécaniques des plaques
Concept de lithosphère**

