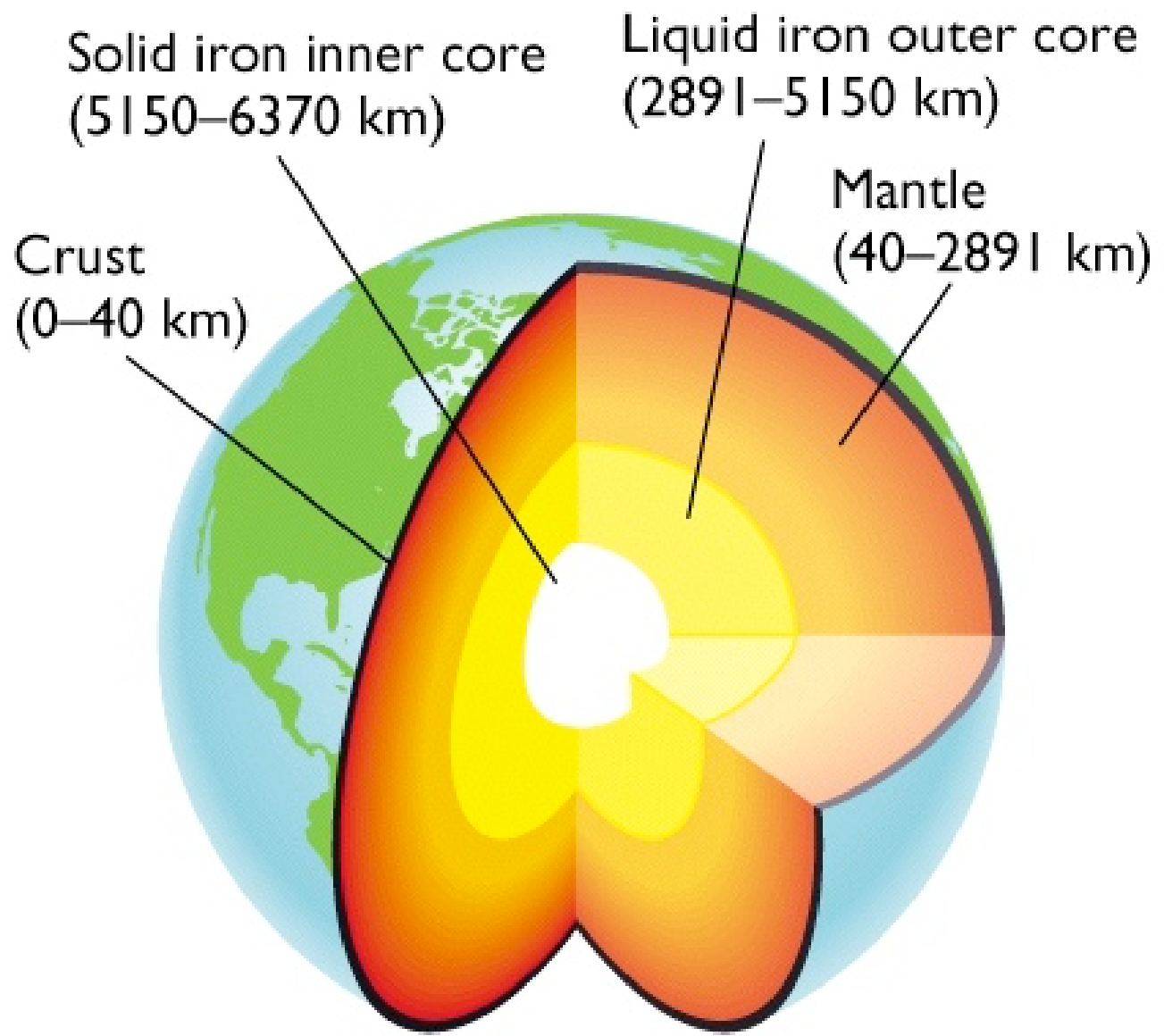


Explorer la structure différenciée de la Terre

Matériel originel profondément fractionné:

- ségrégation du fer et du nickel dans le noyau
- altération, sédimentation, métamorphisme
- tectonique des plaques

Existence de réservoirs inaccessibles
(manteau inférieur, noyau)



(c)

Réponse : la sismologie; Vocabulaire

- *séisme*: mouvement relatif brusque de masses de roches

- *faille*: lieu où se produit le mouvement

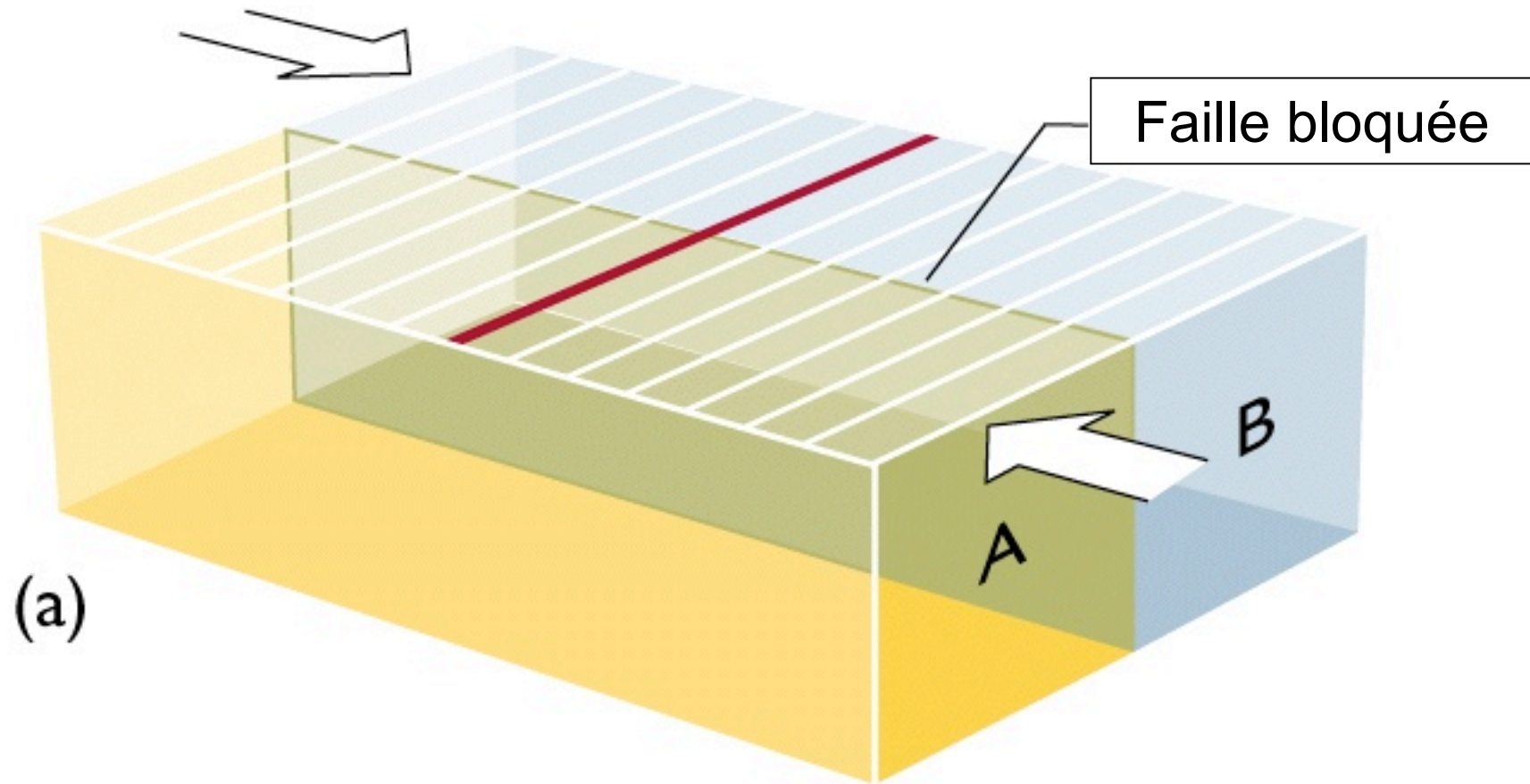
Il existe des failles à **toutes** les échelles

(de 10^{-3} à 10^6 m)

- *foyer*: site de la rupture initiale

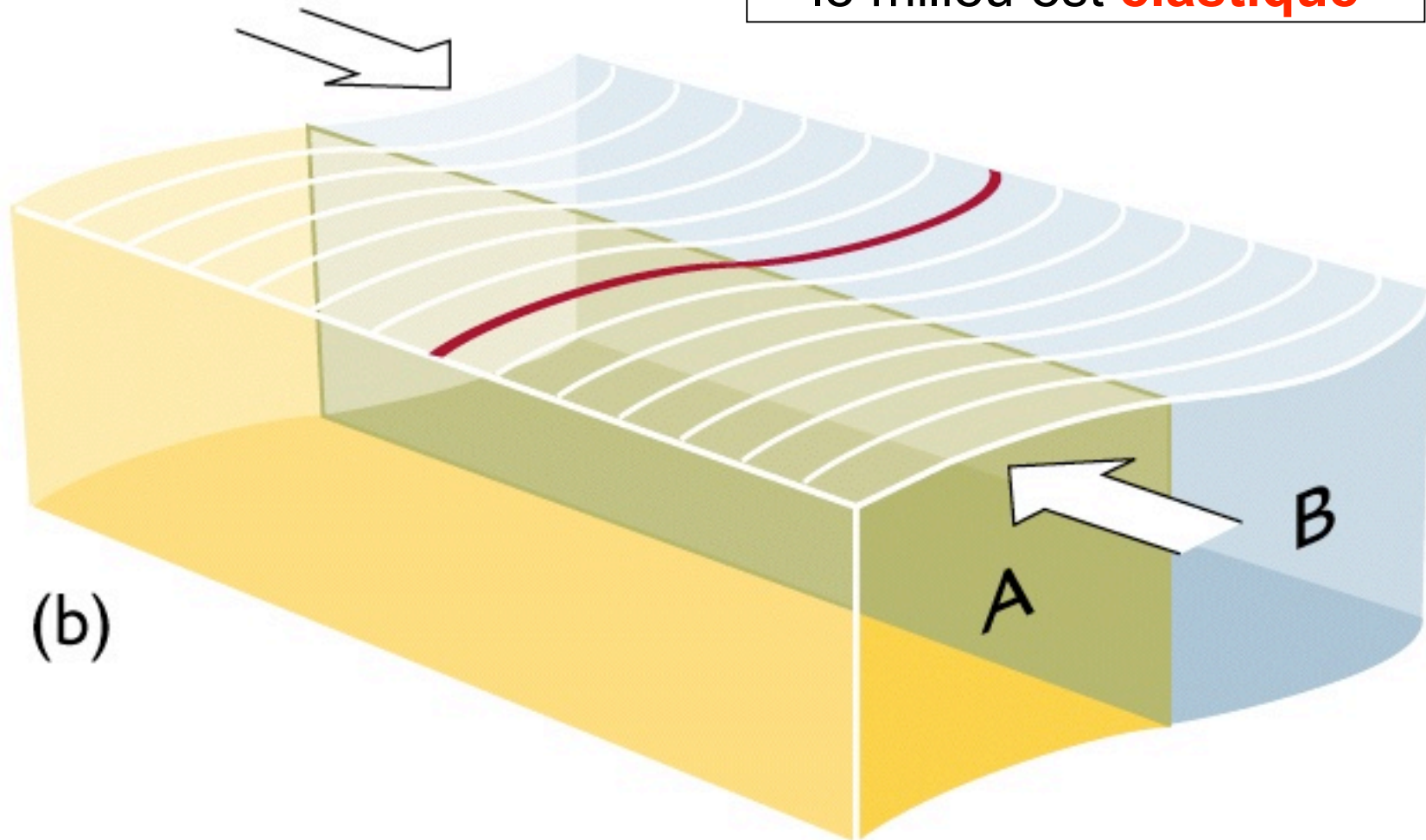
- *épicentre*: point de la surface au dessus du foyer

Théorie du rebond élastique



Théorie du rebond élastique

Déformation graduelle...:
le milieu est **élastique**



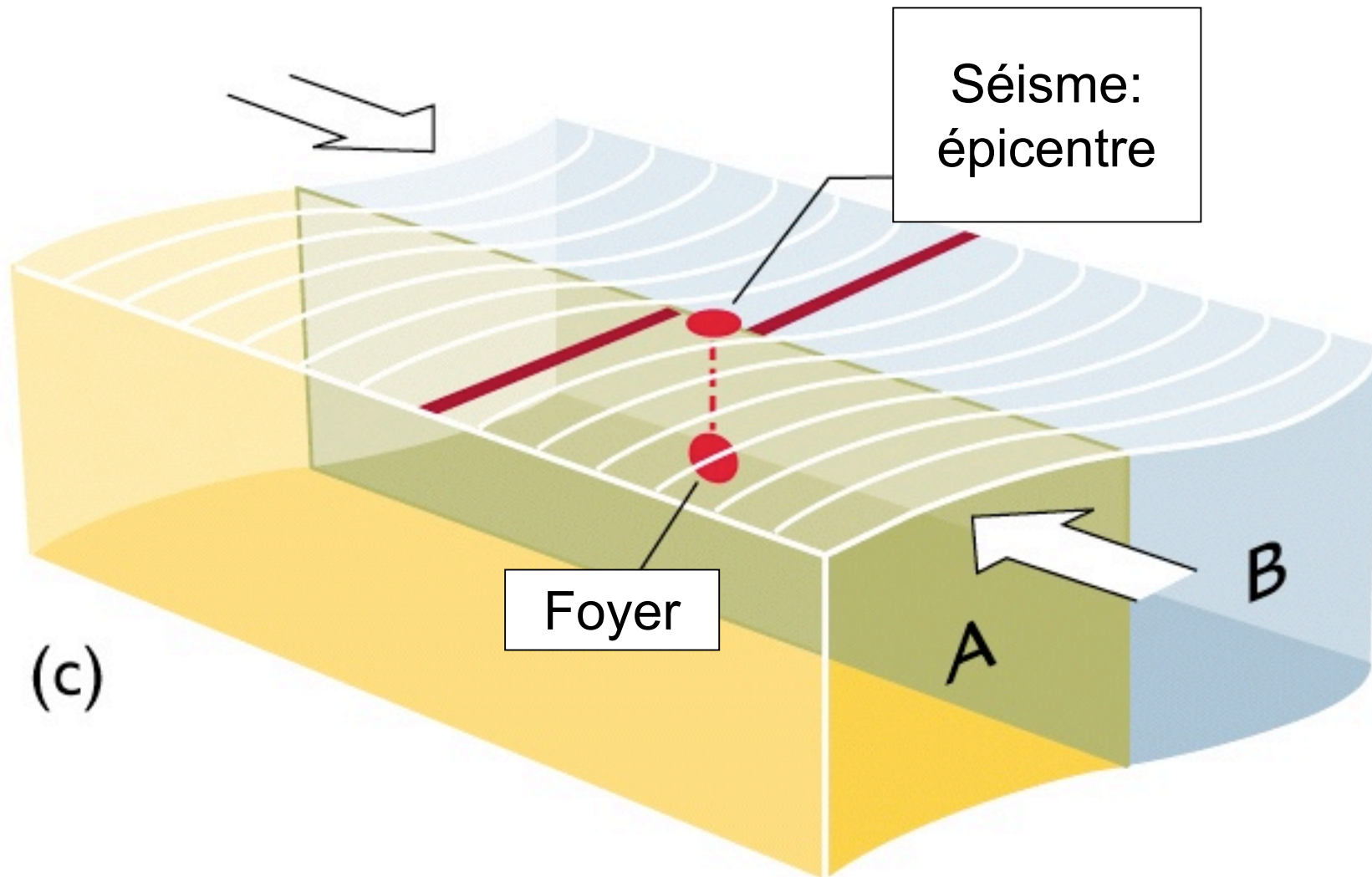
Théorie du rebond élastique

... et il est **fragile**

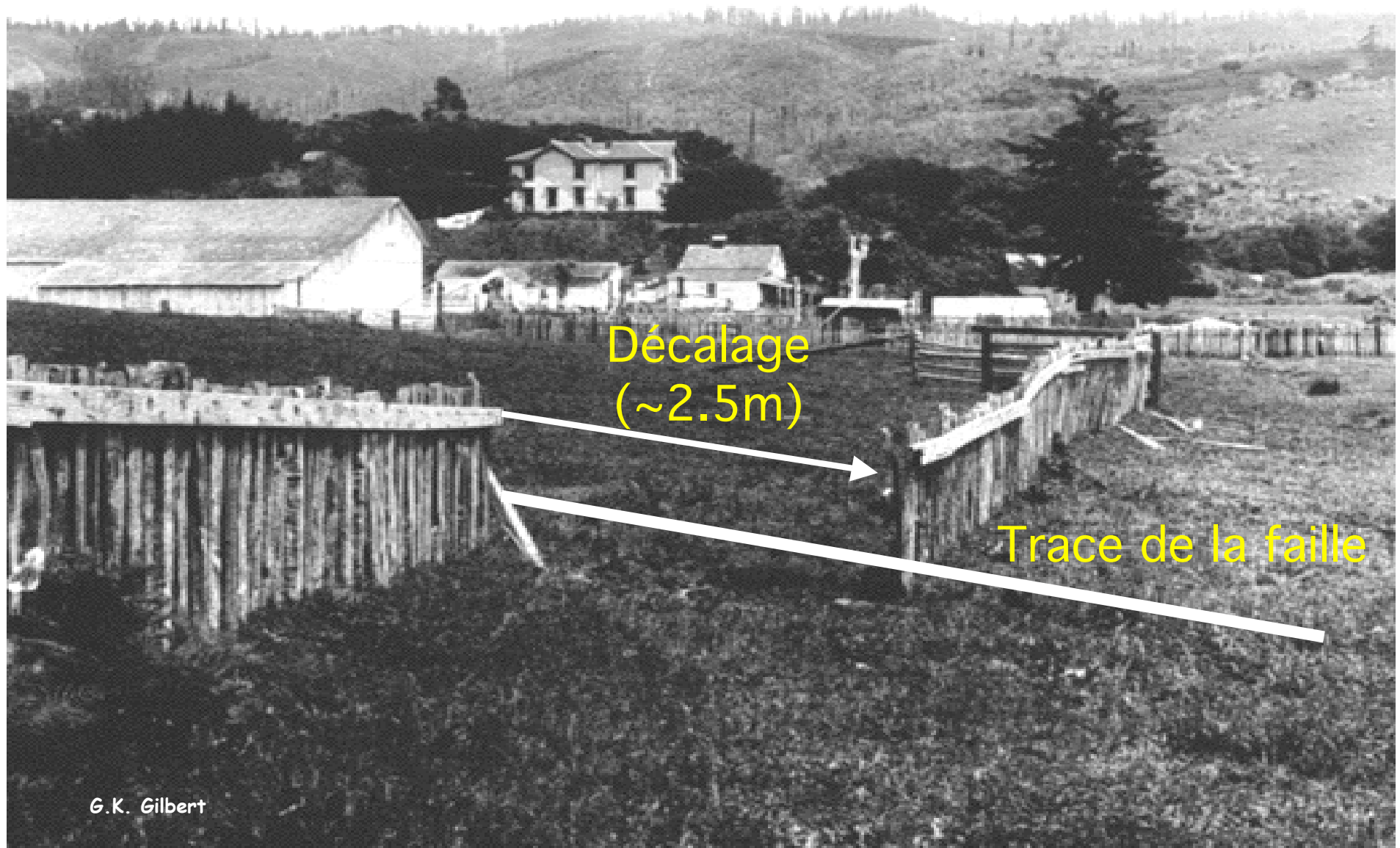
Séisme:
épïcéntré

Foyer

(c)

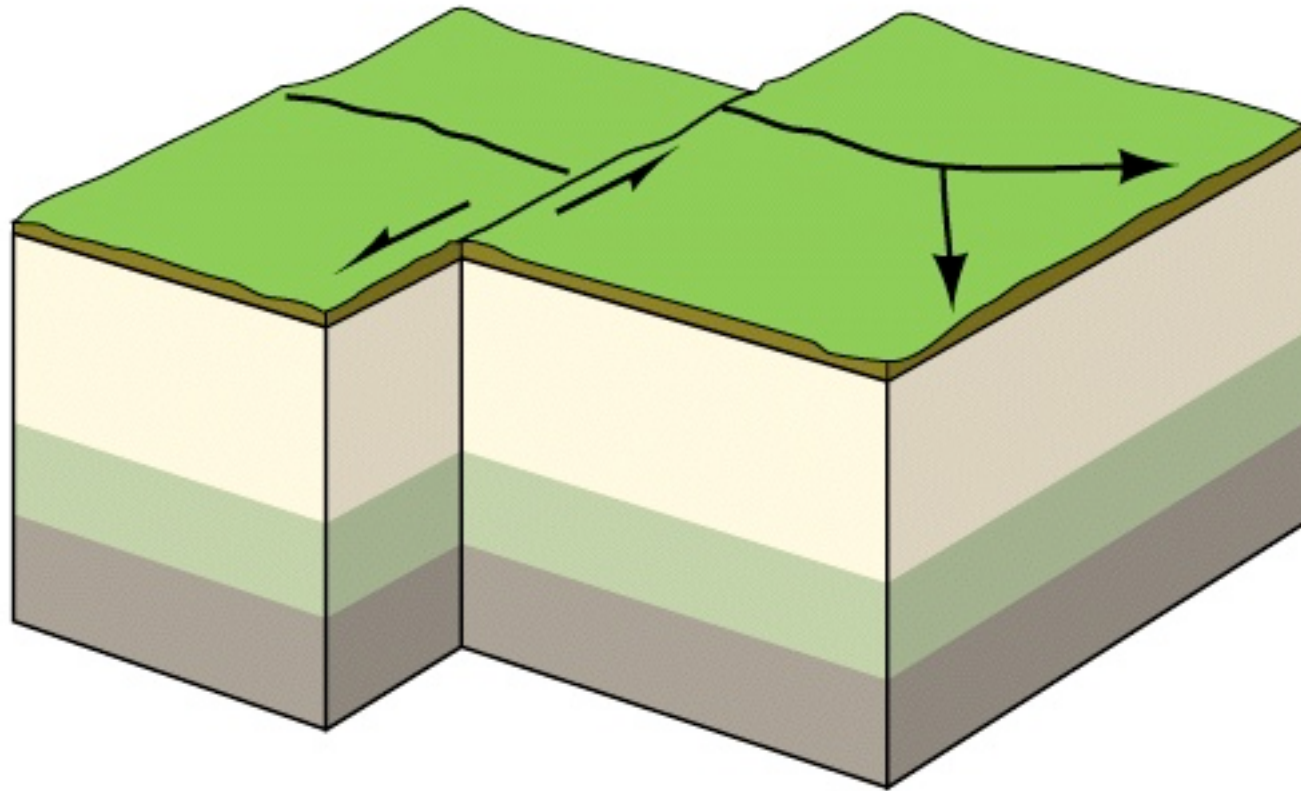


Le séisme de San Francisco (1906)

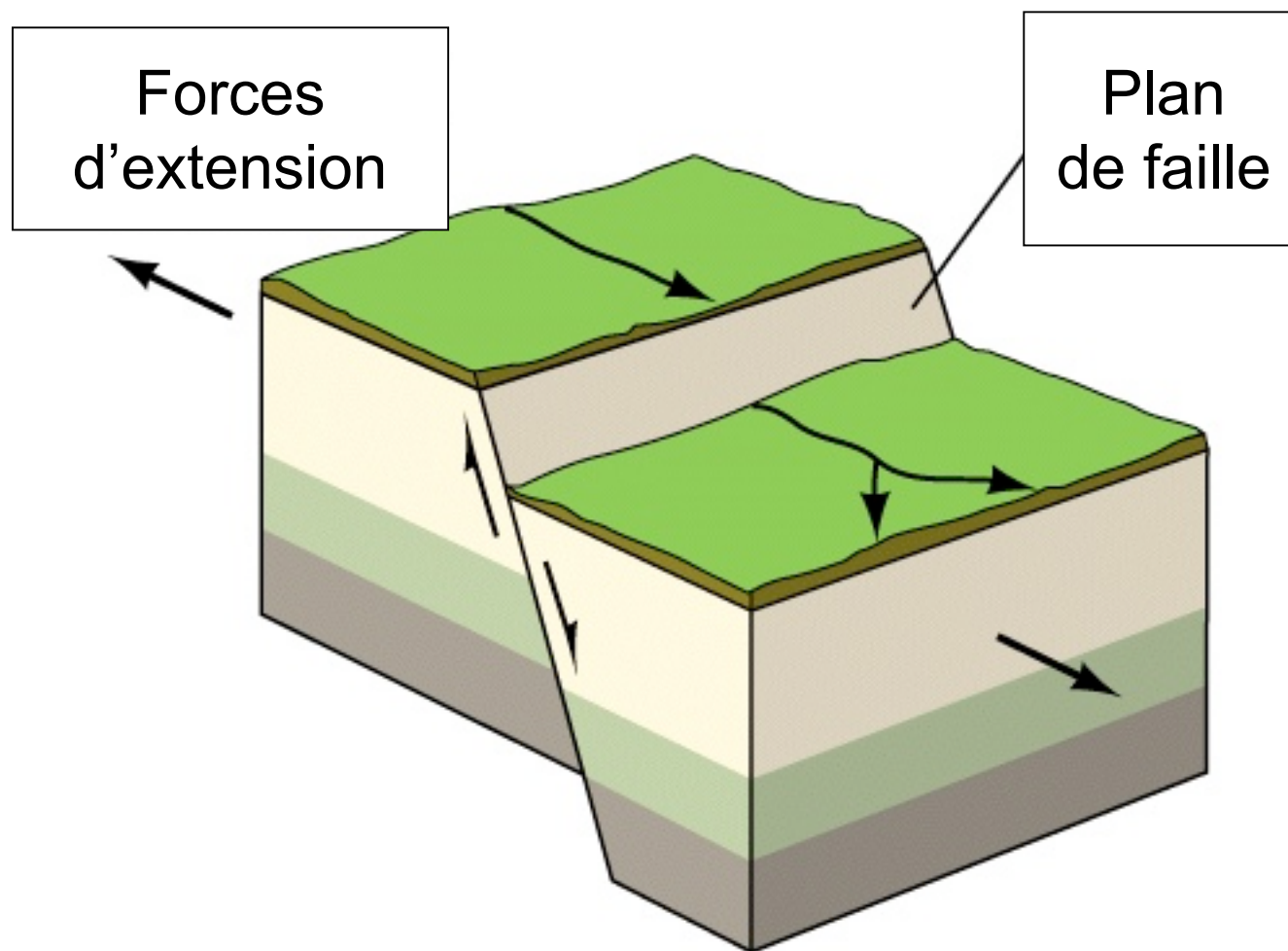


Faïlle de cisaillement

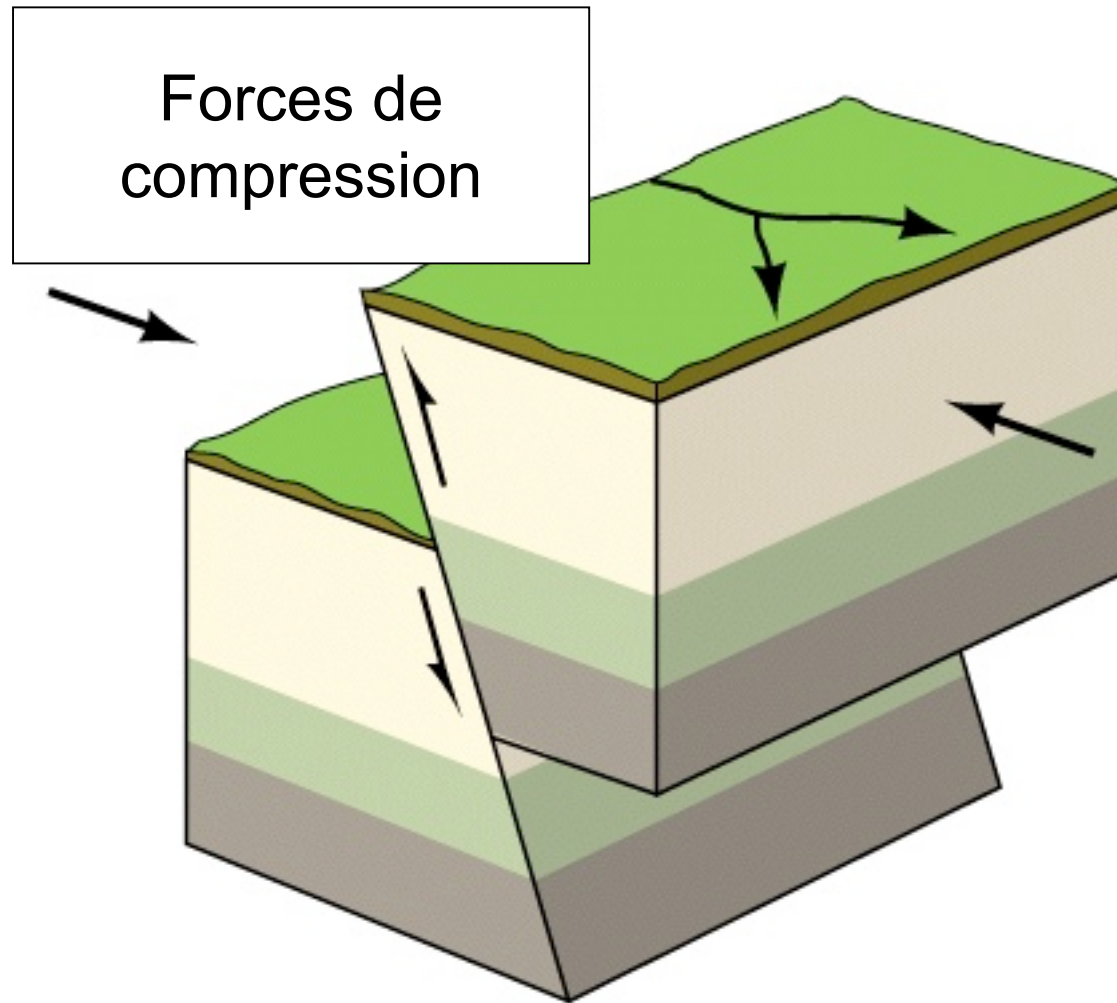
Forces de cisaillement



Faïlle normale



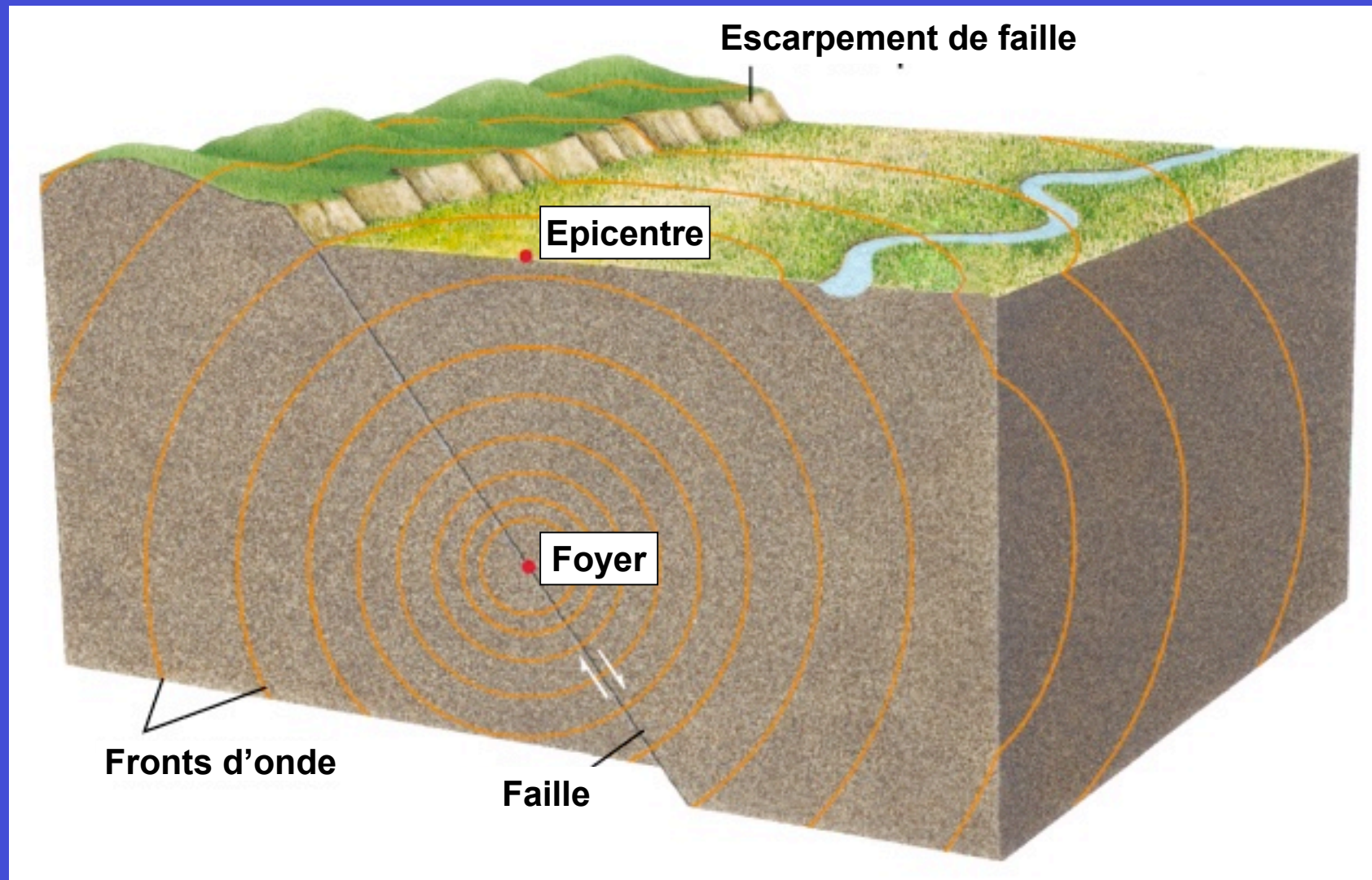
Faille inverse (de chevauchement)



La sismologie

- C'est l'étude de la propagation de l'énergie mécanique relâchée par les séismes (ou les explosions) à travers la Terre.
- Ce relâchement d'énergie déclenche des ondes (comme un caillou lancé dans une mare) dans les roches qui avoisinent le foyer.

Les ondes sismiques irradient à partir du foyer

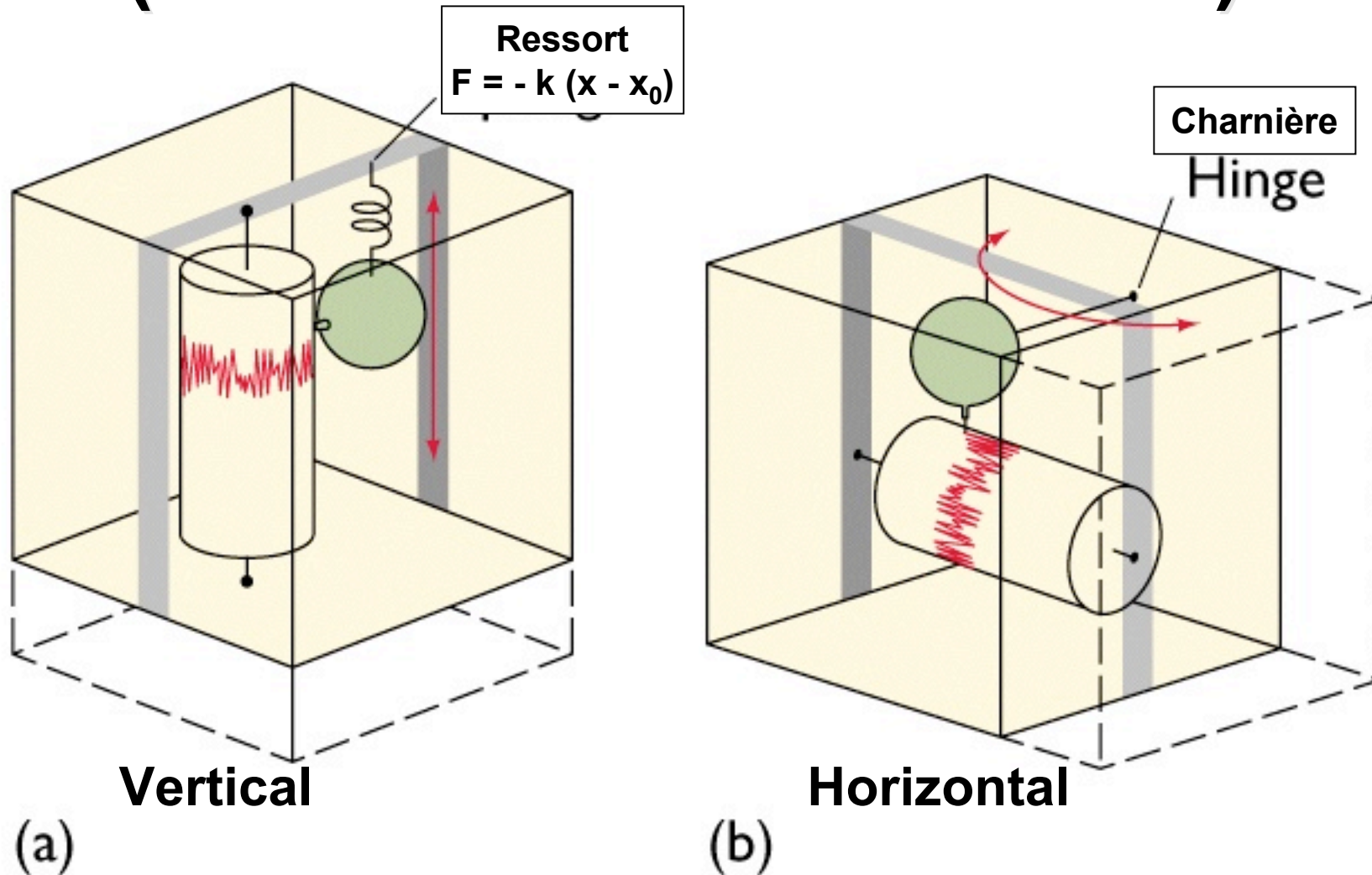


Les ondes sismiques

- Les ondes sont déclenchées par l'état de contraintes (extension ou compression) de la roche.
- Les instruments utilisés pour mesurer ces ondes se nomment des sismographes.

Ils reposent sur le **principe d'inertie**

Les “sismos” enregistrent les mouvements du sol (verticaux ou horizontaux)

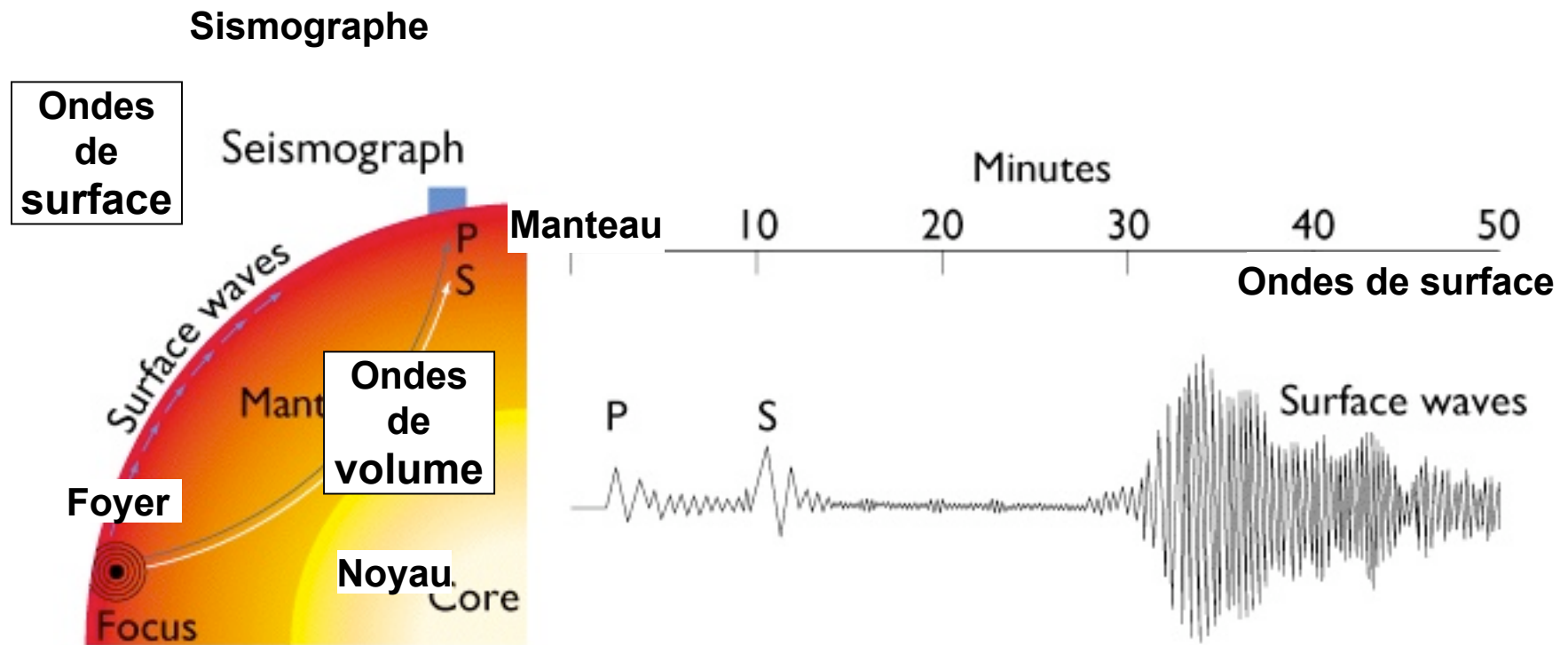


Un sismographe moderne



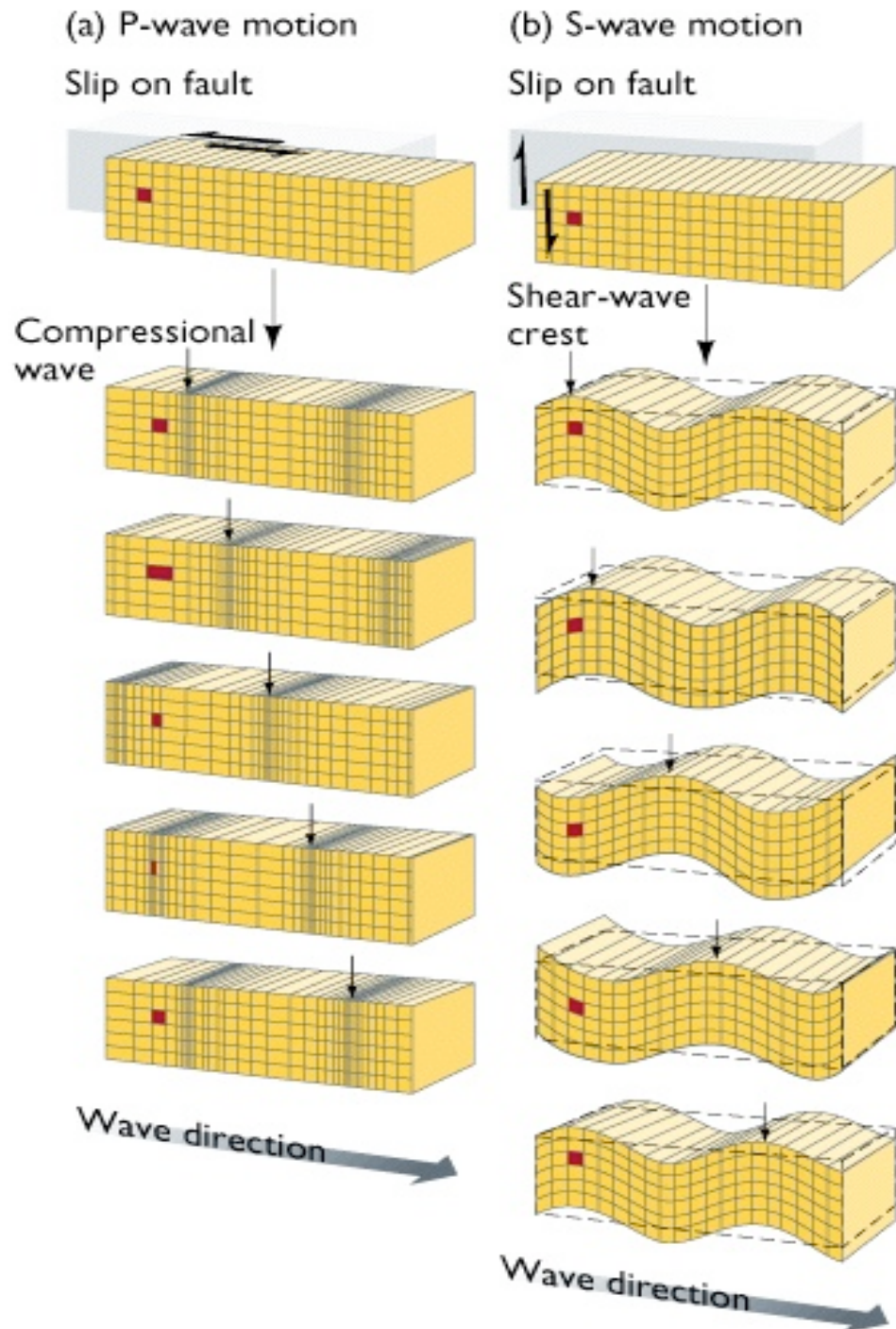
Kinematics

Enregistrement et parcours de trois types d'ondes sismiques



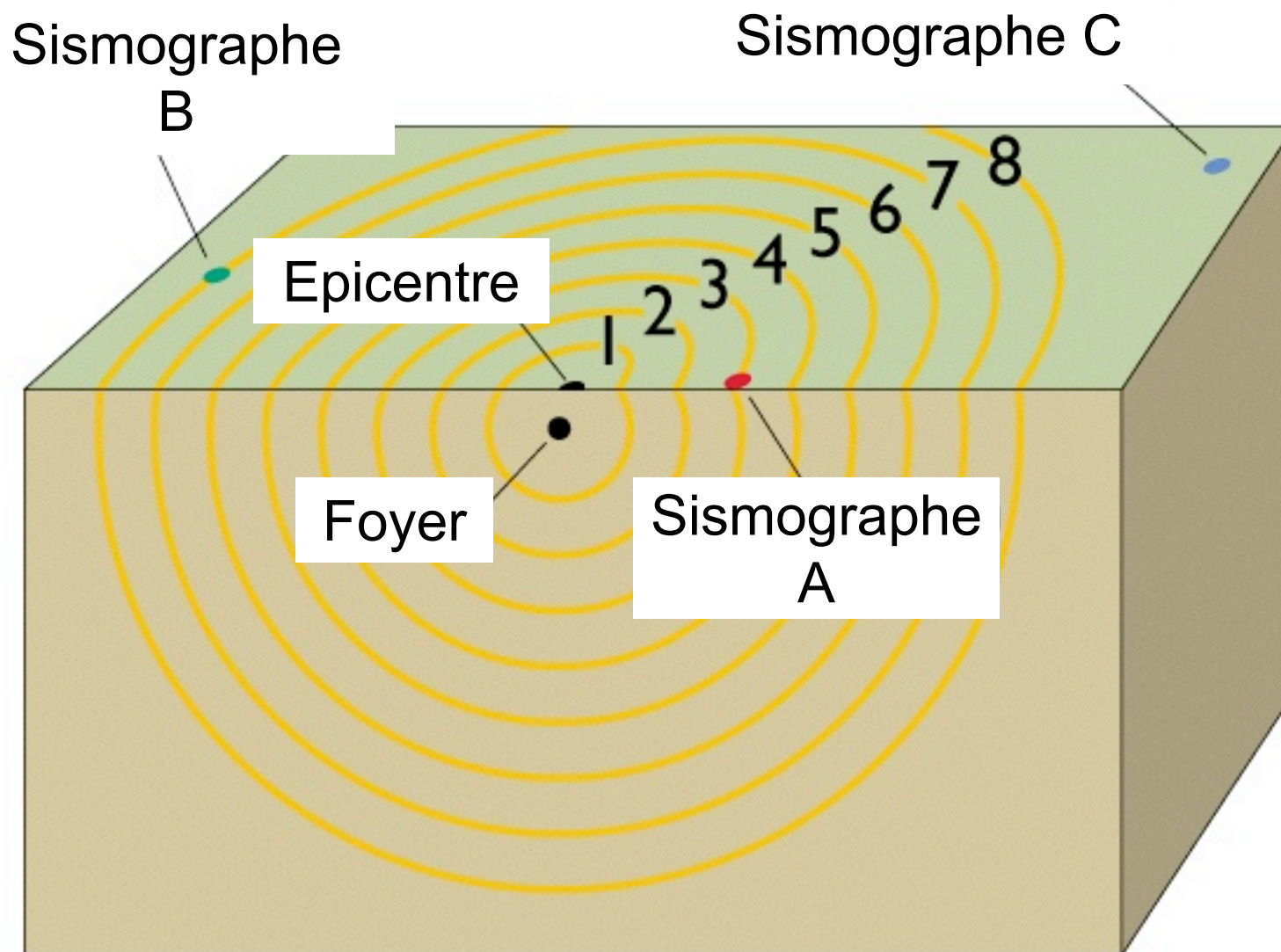
Les deux types d'ondes de volume

- **Ondes P** (de compression) 6–8 km/s.
Parallèles à la direction du mouvement, aussi appelées ondes premières (cf. ressort).
Semblables aux ondes acoustiques.
- **Ondes S** (cisaillement) 4–5 km/s.
Perpendiculaires à la direction du mouvement, aussi appelées ondes secondes (cf. corde).
Dues à la résistance au cisaillement des matériaux.
Ne se propagent pas dans les liquides.



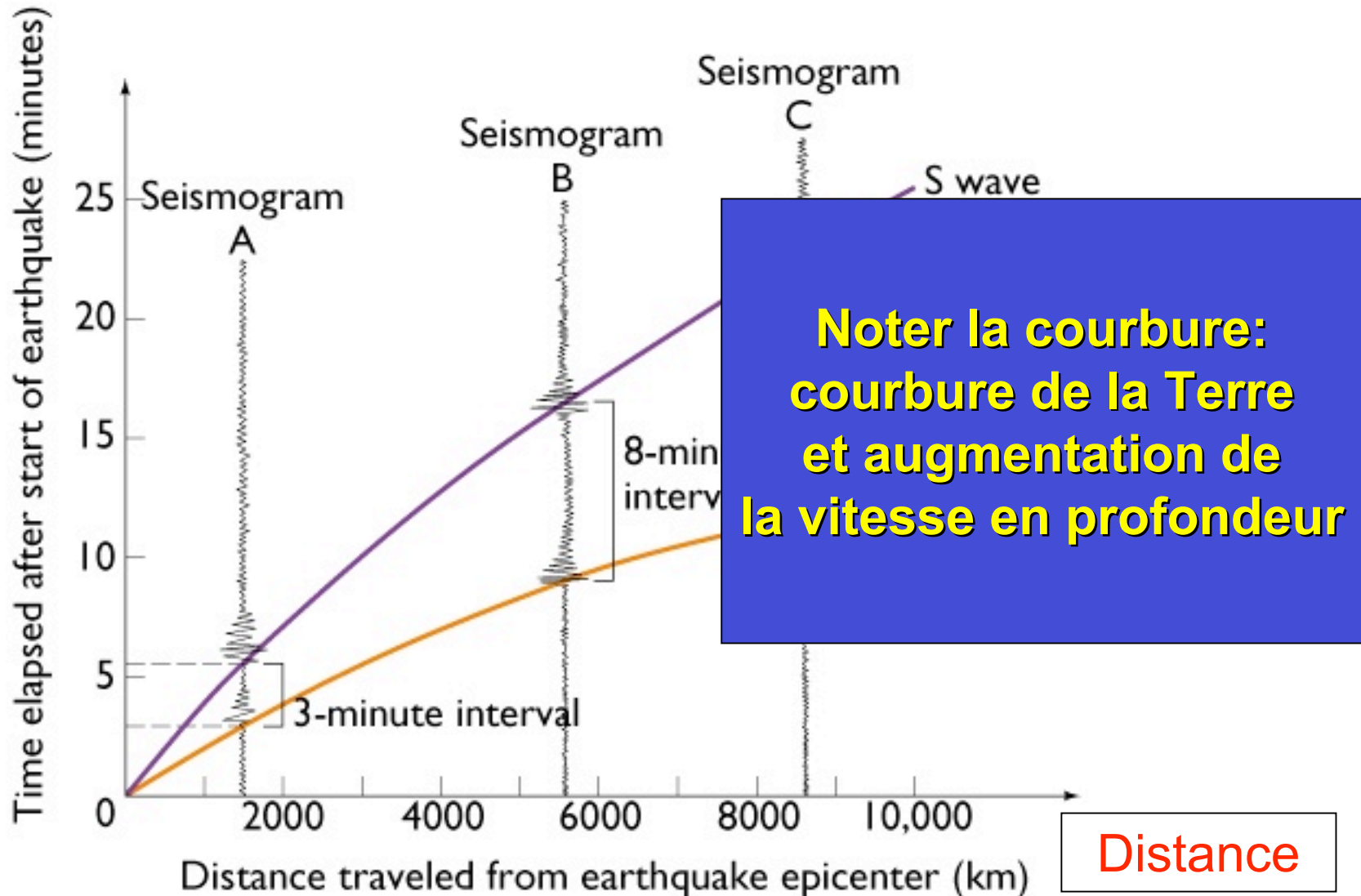
**Comparaison
du mouvement
des particules
du sous-sol
lors du
passage des
ondes
P et S**

Délai entre ondes P et S en fonction de la distance à l'épicentre

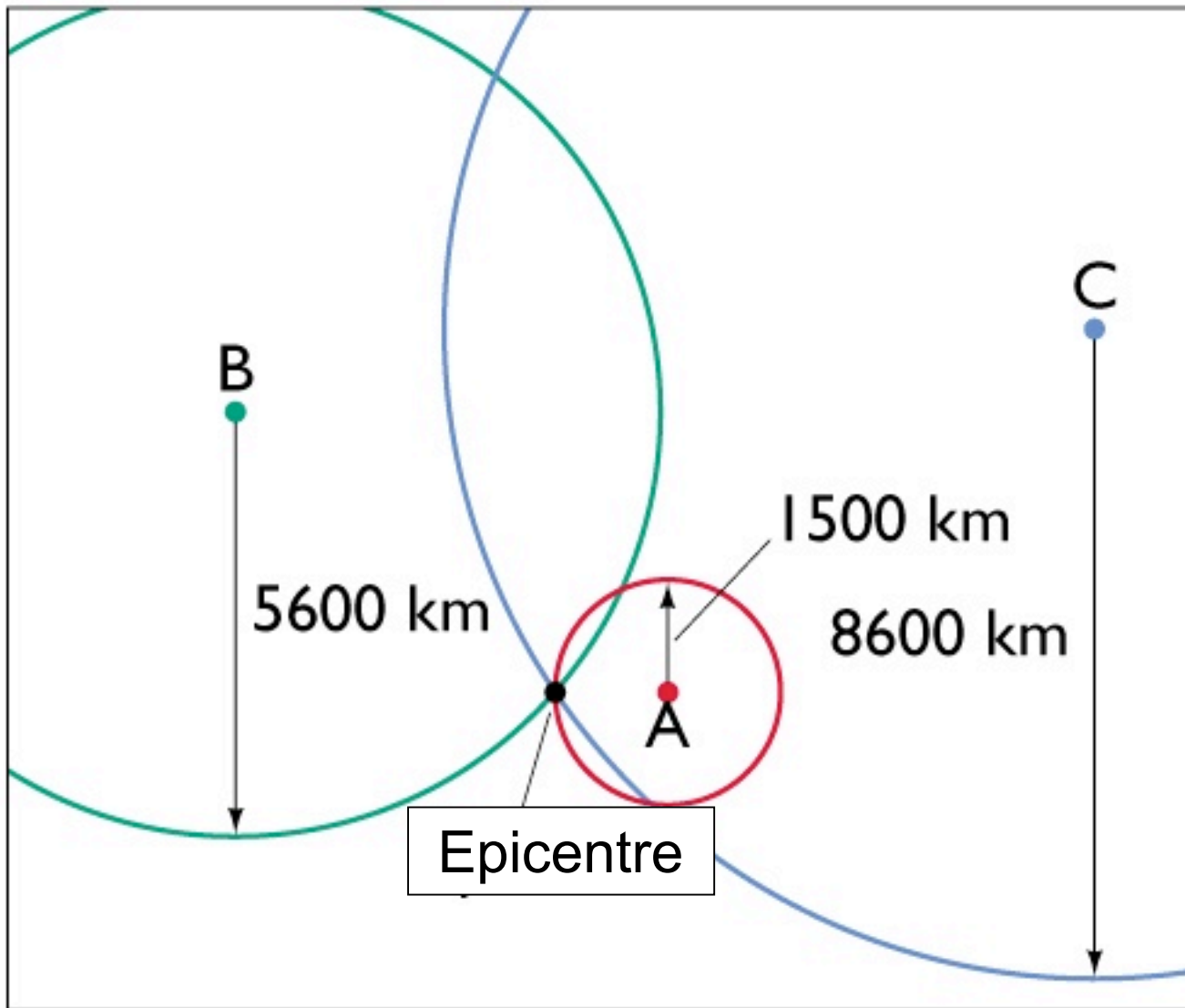


Courbes de temps de parcours des ondes P et S

Temps



Comment localiser l'épicentre?



On utilise
la **différence**
des temps
d'arrivée
des ondes
P et S
 $(V_P - V_S)$

Il faut
trois
stations
d'enregistrement

Les échelles de *magnitude*
sont basées sur l'énergie relâchée

Echelle de Richter :

quantité d'énergie reçue à **100 km** de l'épicentre

Le plus grand séisme enregistré (Chili, 1960): $M \sim 10$
(les roches ne peuvent résister au dessus).

Les séismes de $M=2$ ne sont pas ressentis

L'échelle de Richter est *logarithmique*:

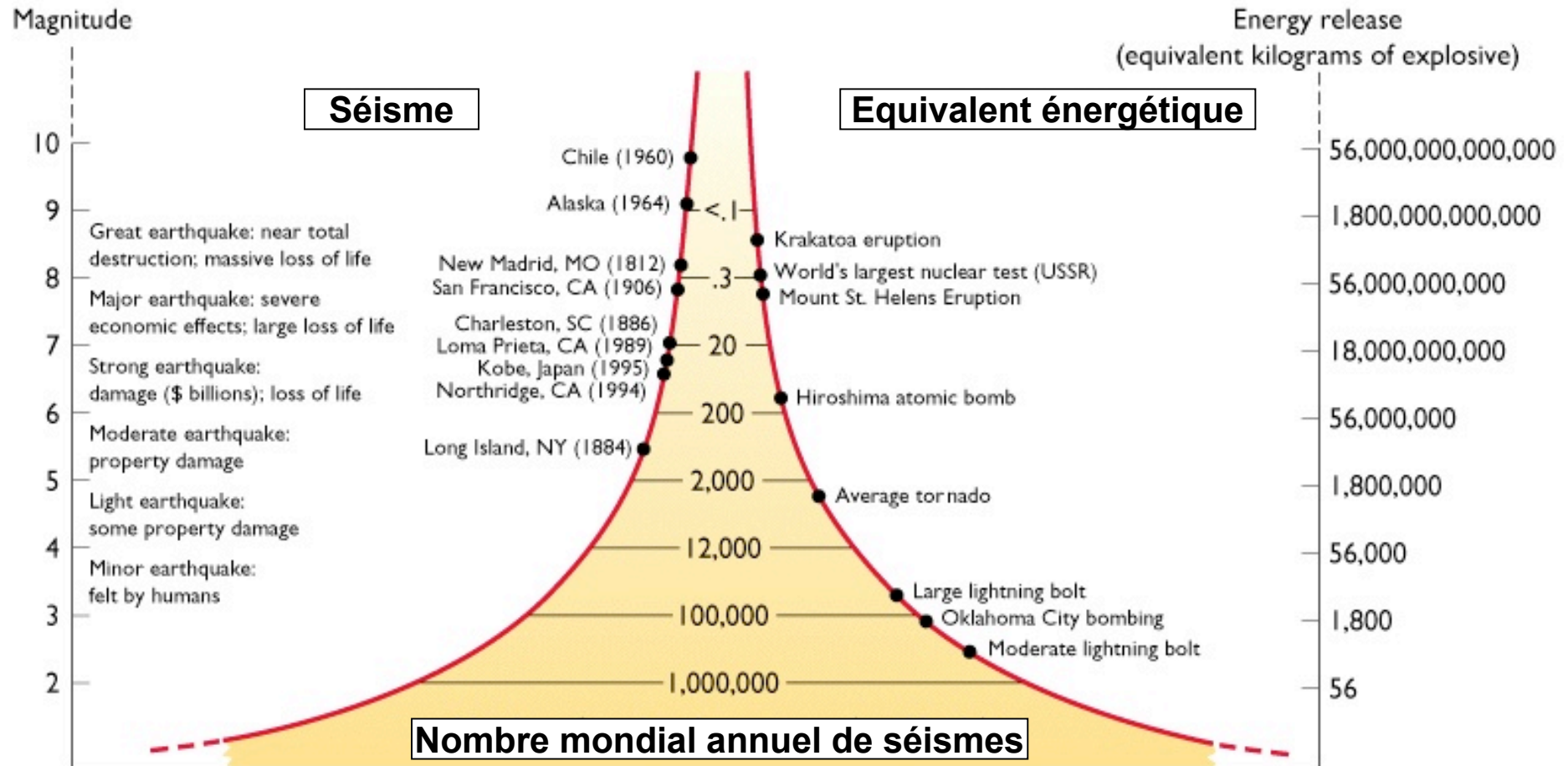
Augmentation d' 1 unité de M =

= ébranlement du sol 10 fois plus fort

= énergie relâchée 30 fois plus forte

Magnitude de Richter et énergie

Nombre annuel de séismes et énergie

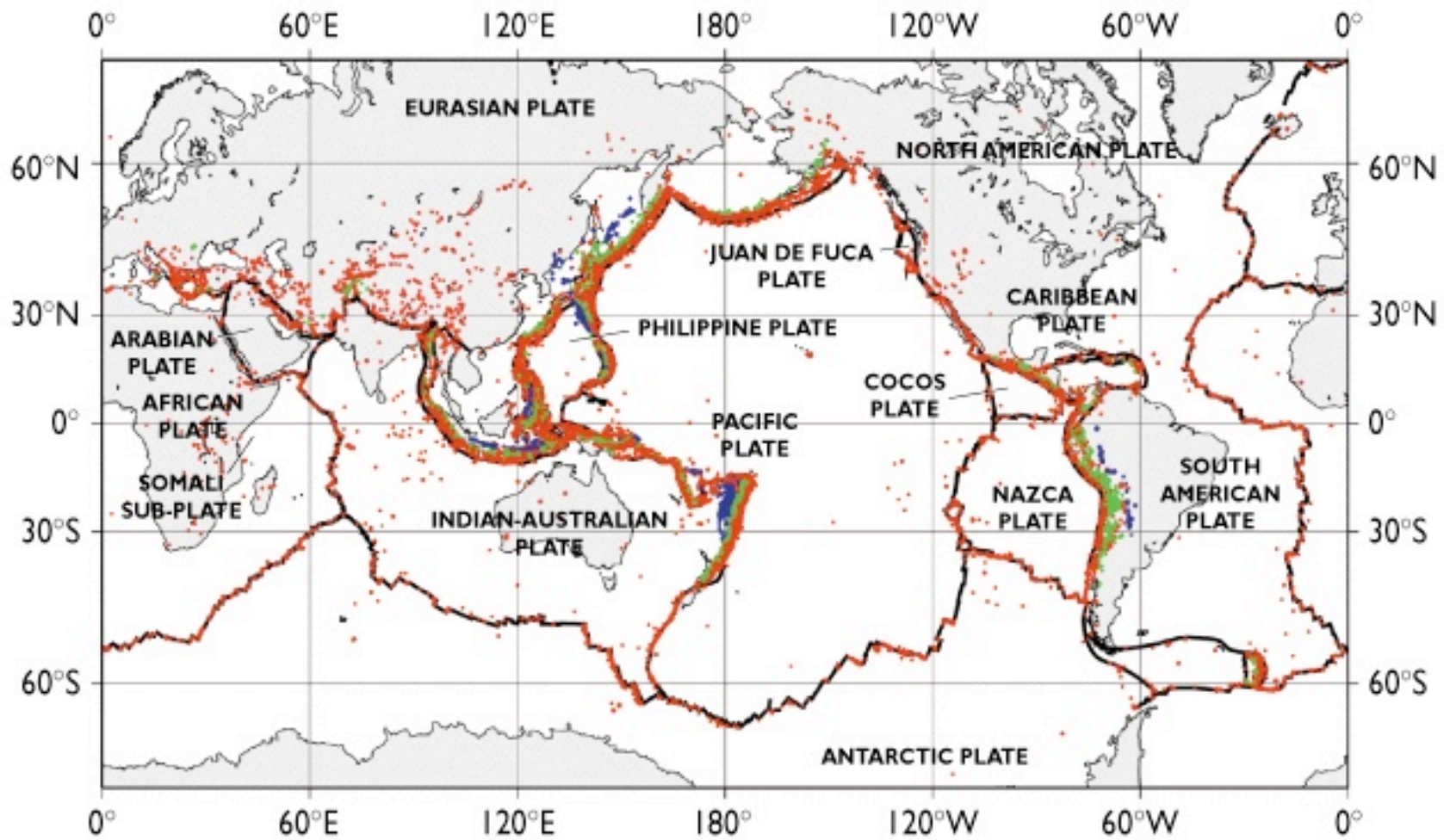


(1 mégatonne (Mt) = 10^9 kg)

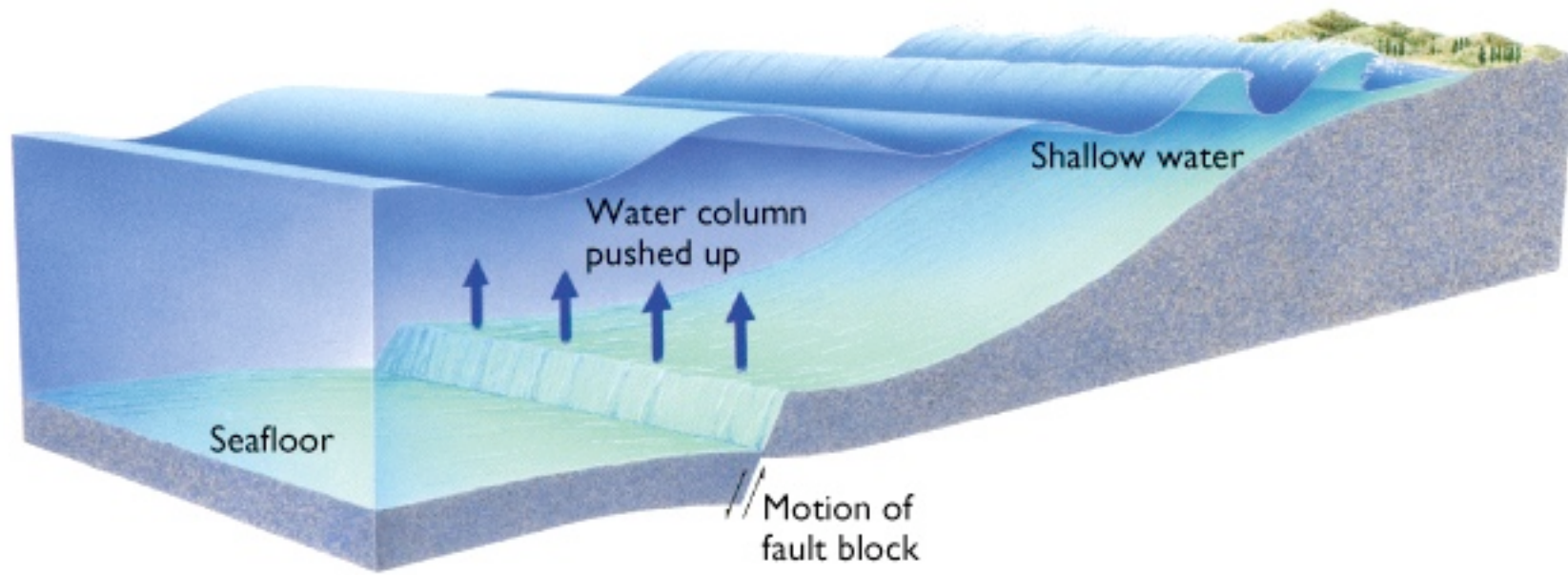
Distribution des séismes

- *Non aléatoire*
- Concentrée aux frontières des plaques (mais présents aussi à l'intérieur)

Sismicité globale, 1963–2000



Déclenchement d'un Tsunami



Structure de la Terre

- La vitesse sismique dépend de la **composition** du matériau et de la **pression**.
- On peut utiliser les propriétés des ondes sismiques pour connaître les **propriétés de l'intérieur** de la Terre.
- Quand les ondes passent d'un matériau à l'autre, elles peuvent **changer de vitesse et de direction**.

Réfraction et réflexion d'un pinceau de lumière

(interface air/eau)

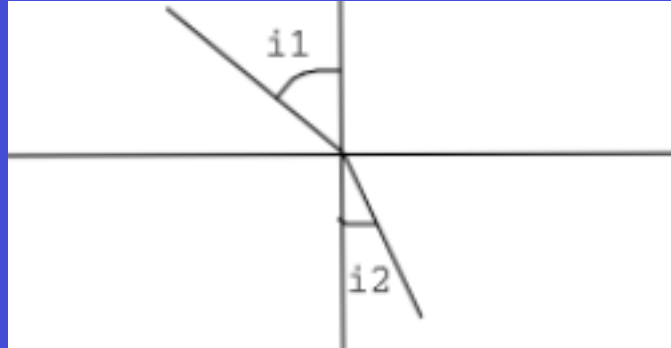


The diagram shows a glass of water with a red laser beam entering from the left. The beam is split into two paths at the water surface. One path is labeled 'Réfraction' and shows the beam bending towards the normal. The other path is labeled 'Réflexion' and shows the beam reflecting away from the surface. The background is black, and the glass and water are illuminated from the left.

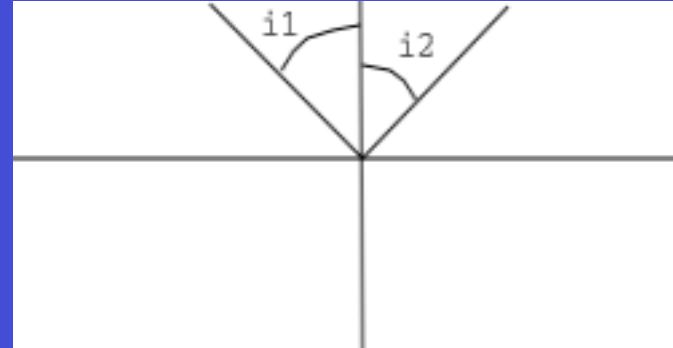
Réfraction

Réflexion

Réfraction et réflexion



$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$



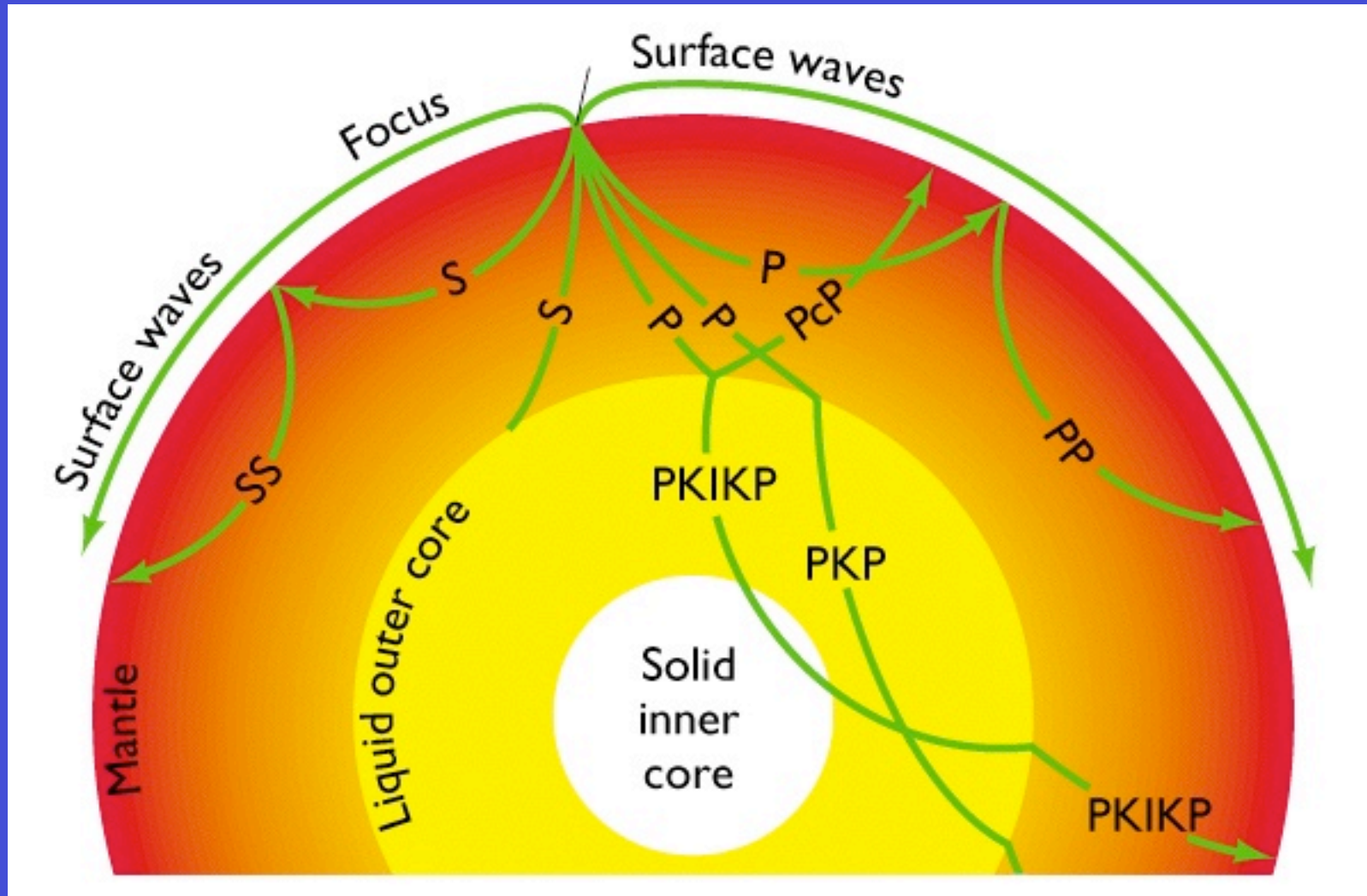
$$i_1 = i_2$$

L'indice de réfraction n est ici $1/V$ avec:

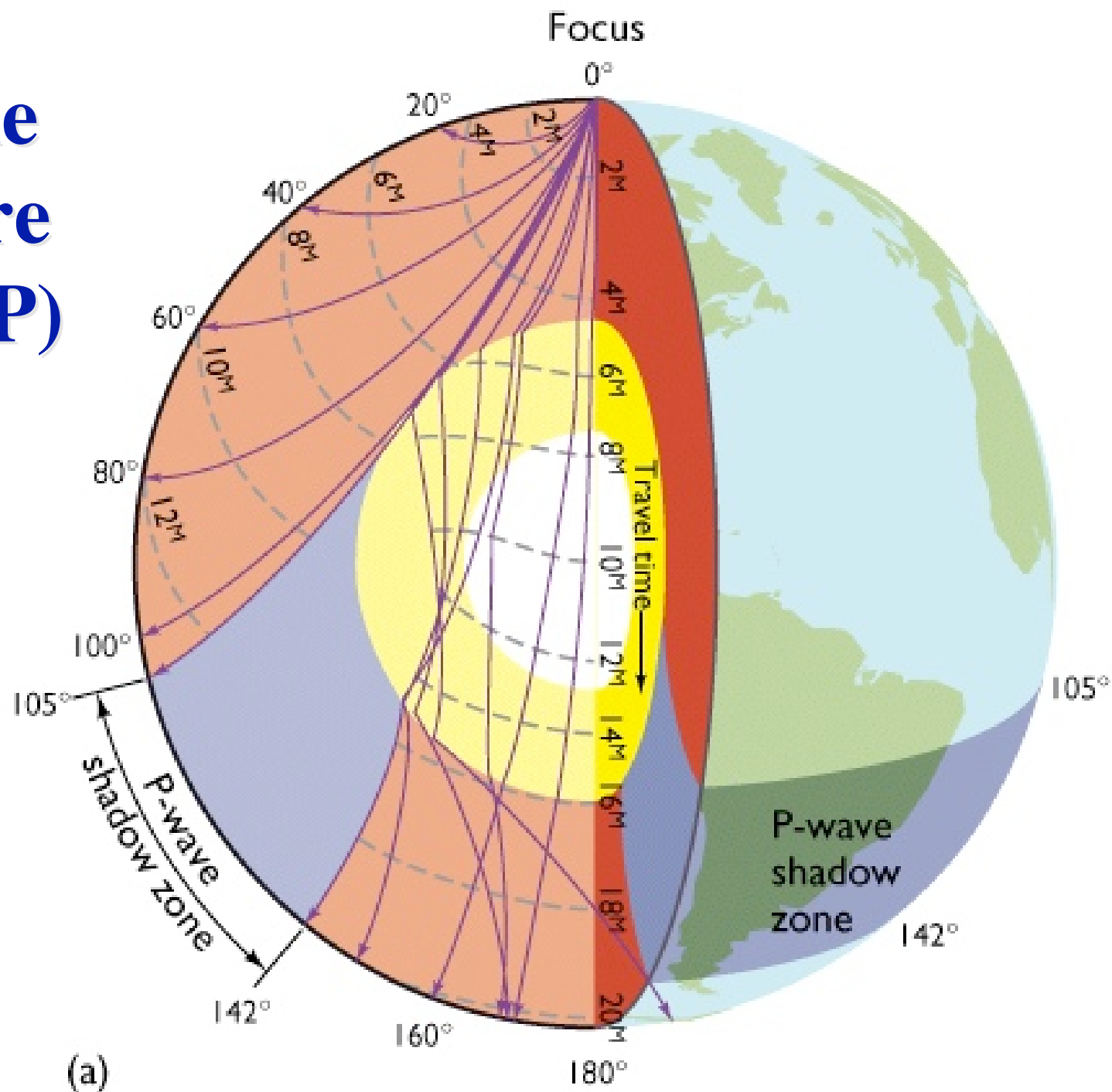
$V = V_P$ ou V_S , vitesse de propagation des ondes sismiques

Si la vitesse de propagation des ondes augmente avec la profondeur, le rai sismique se courbe et se redresse

Trajets sismiques des ondes P et S dans la Terre



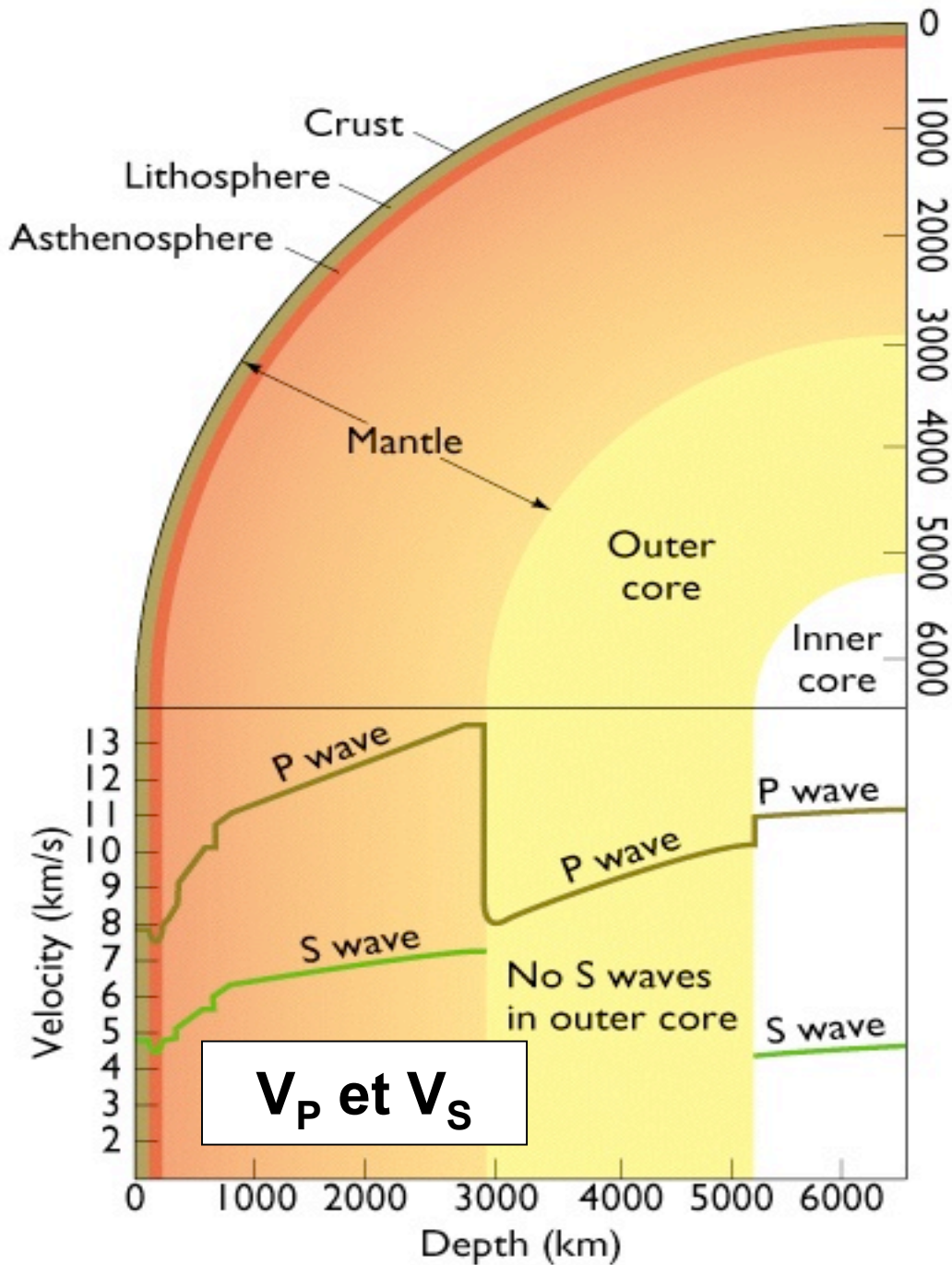
La zone d'ombre (ondes P)



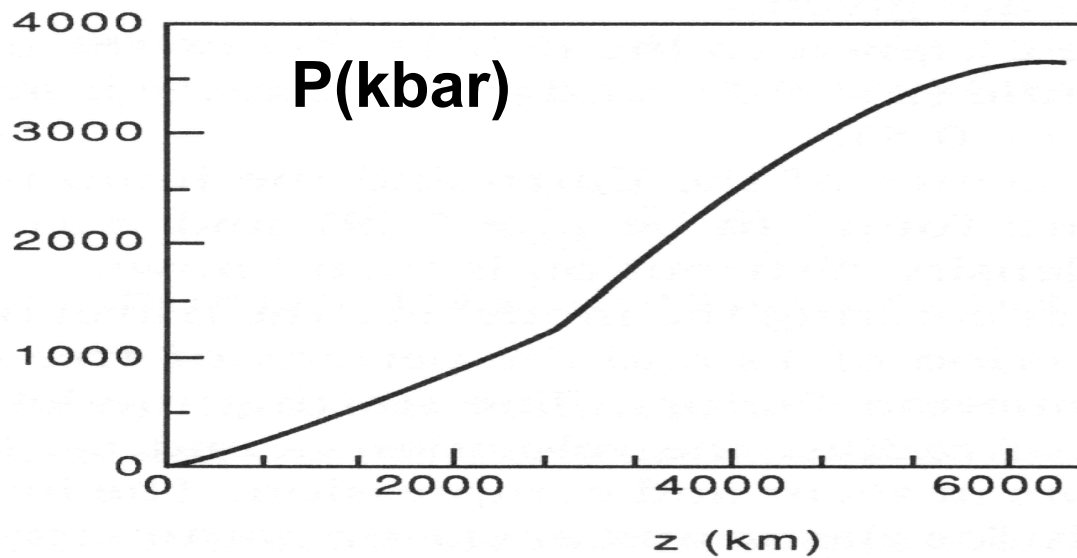
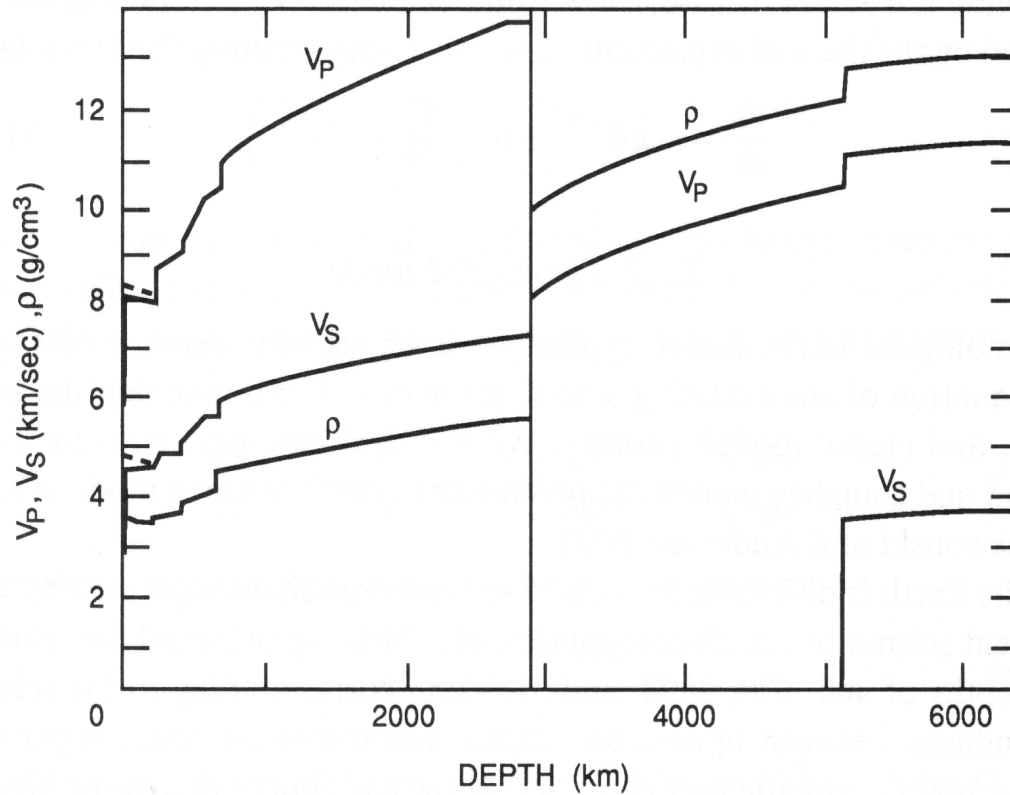
Structure de la Terre

L'étude du comportement des ondes sismiques nous informe sur la composition et la forme des **limites** entre couches internes:

- *Croûte*: ~10 à 70 km, composition intermédiaire (granitique ou basaltique)
- *Manteau*: ~2800 km, composition "mafique" (basique)
- *Noyau externe*: ~2100 km, fer liquide
- *Graine*: ~1400 km, fer solide



**Comment
fait-on pour
déterminer la
densité en
profondeur à
partir des
vitesses des ondes
P et S ?**



Distributions
de

V_P , V_S , ρ

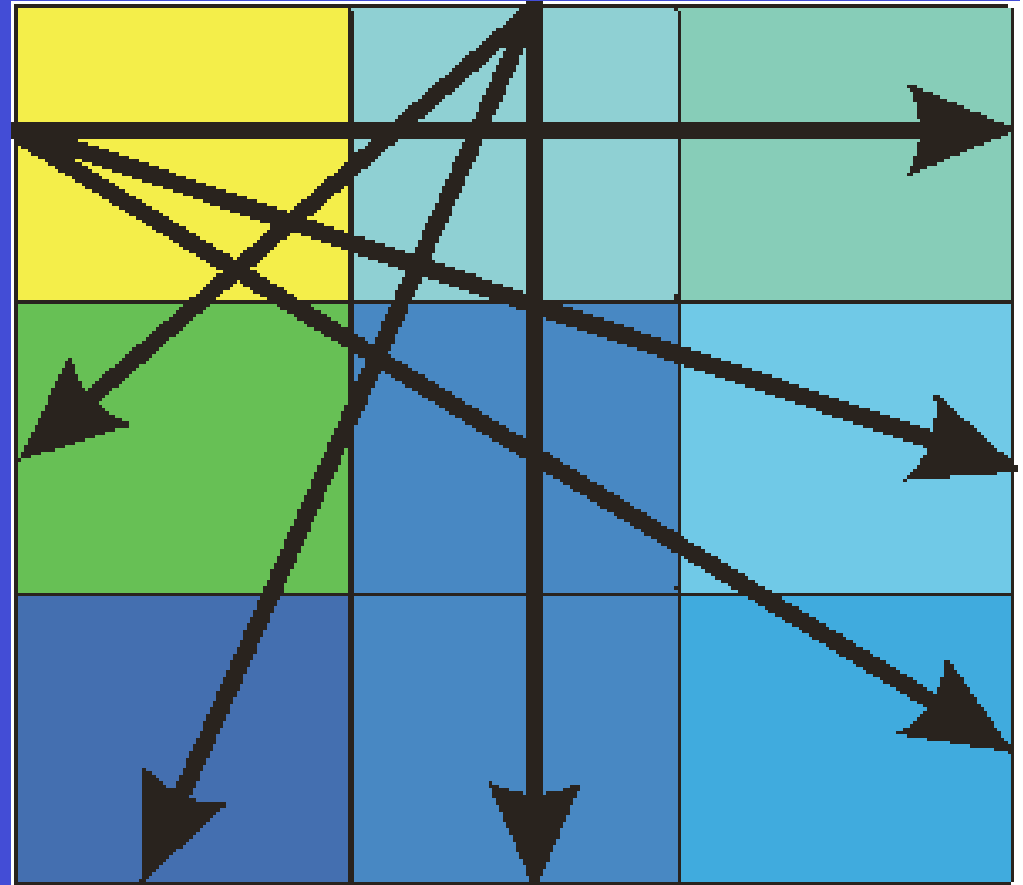
et

P

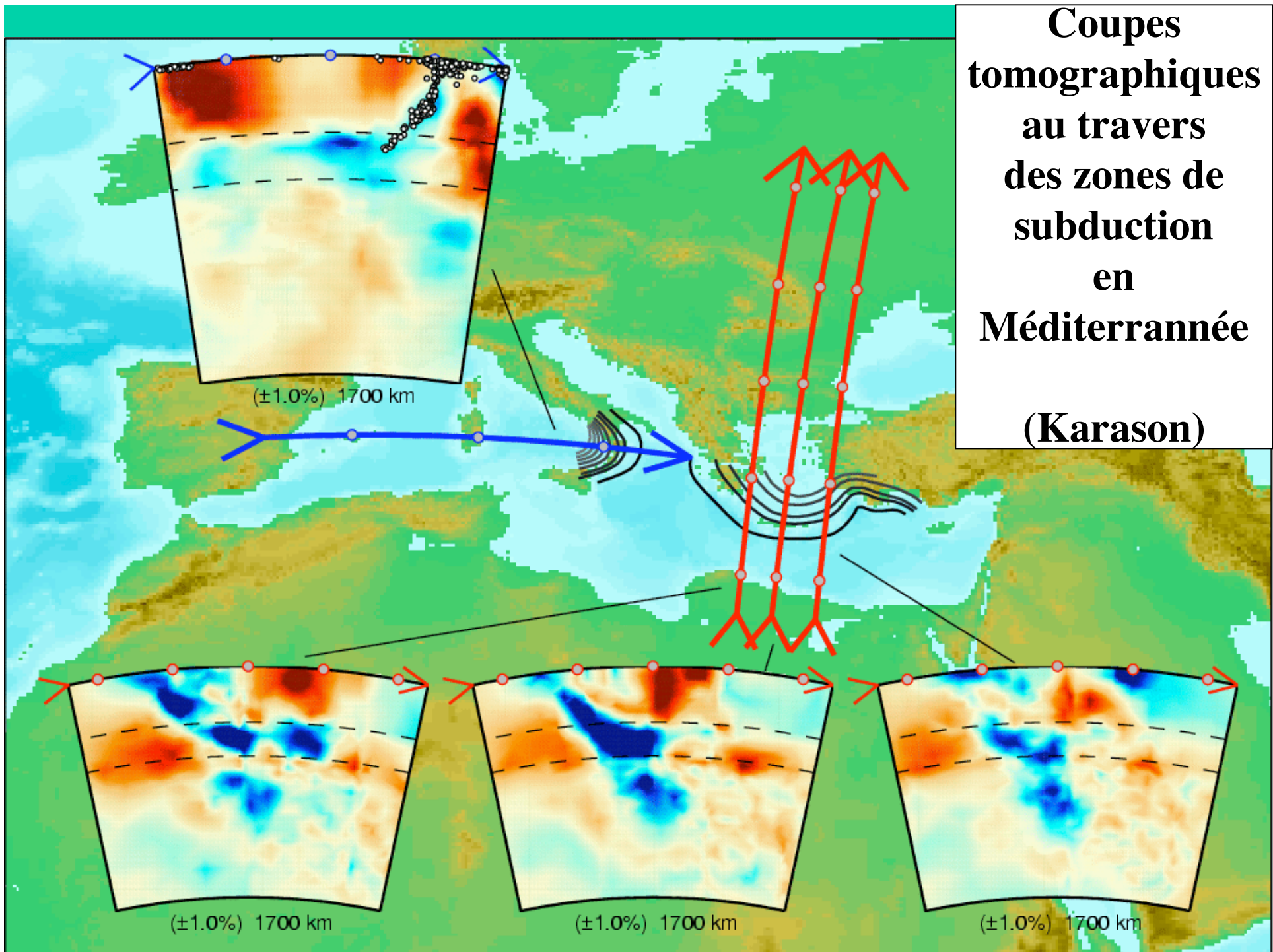
en fonction
de la
profondeur

**Etude des
hétérogénéités
latérales:**

**le principe de la
tomographie
sismique:
un “scanner” pour
voir des coupes du
manteau**



**Coupes
tomographiques
au travers
des zones de
subduction
en
Méditerranée
(Karason)**



QUELQUES ÉLÉMENTS DE GÉODÉSIE- GRAVIMÉTRIE

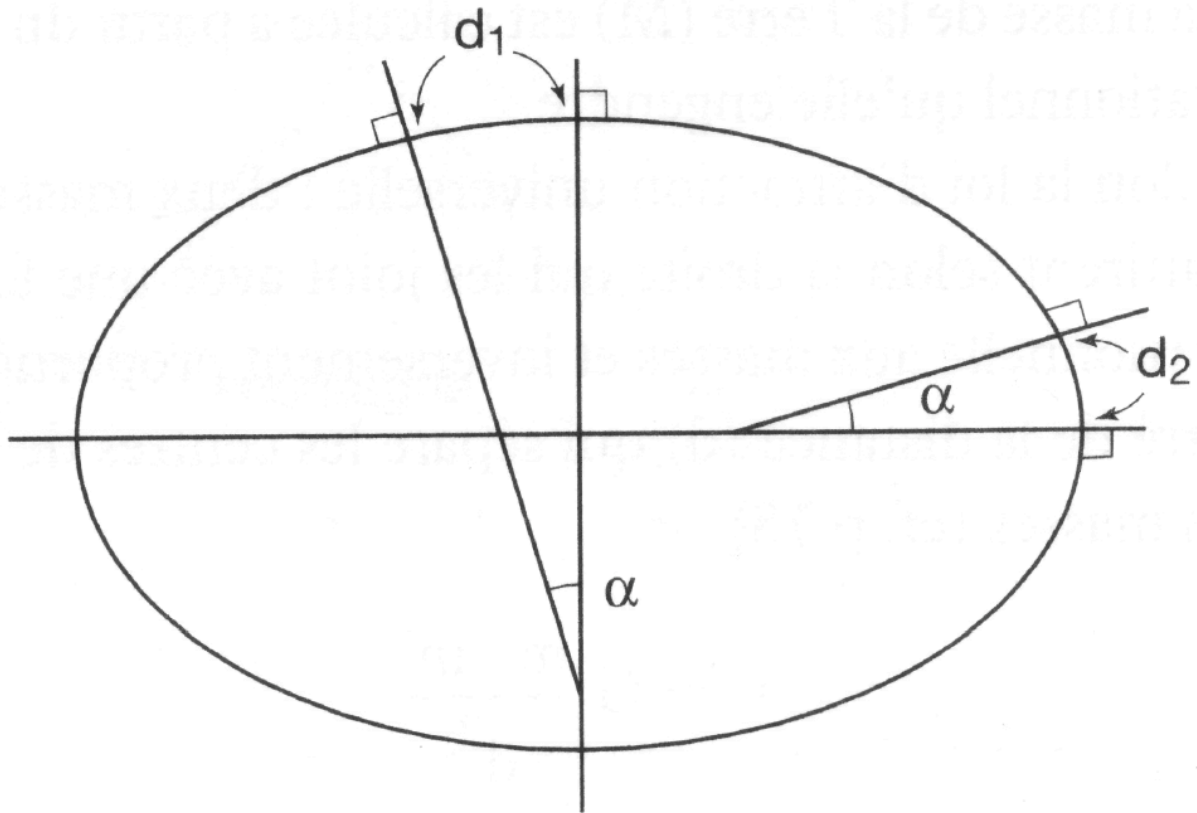
La Terre est sphérique
en première approximation
(Erathosthène, Magellan, satellites)

Au XVIIIème siècle:
Newton => ellipsoïde aplati (hydrostatique)
Cassini => ellipsoïde oblong

Première expédition scientifique Mesure du degré de méridien

**Clairaut-
Maupertuis:
 d_1 en Laponie**

**Bouguer-
La Condamine:
 d_2 au Pérou**



Newton a raison !

**Aujourd'hui
mesures par géodésie spatiale:
poursuite de satellites
ou
altimétrie satellitaire**

**Mais pour avoir accès à la « forme »
de la Terre on passe par la mesure de son
champ de pesanteur
(gravimétrie)**

Le géoïde

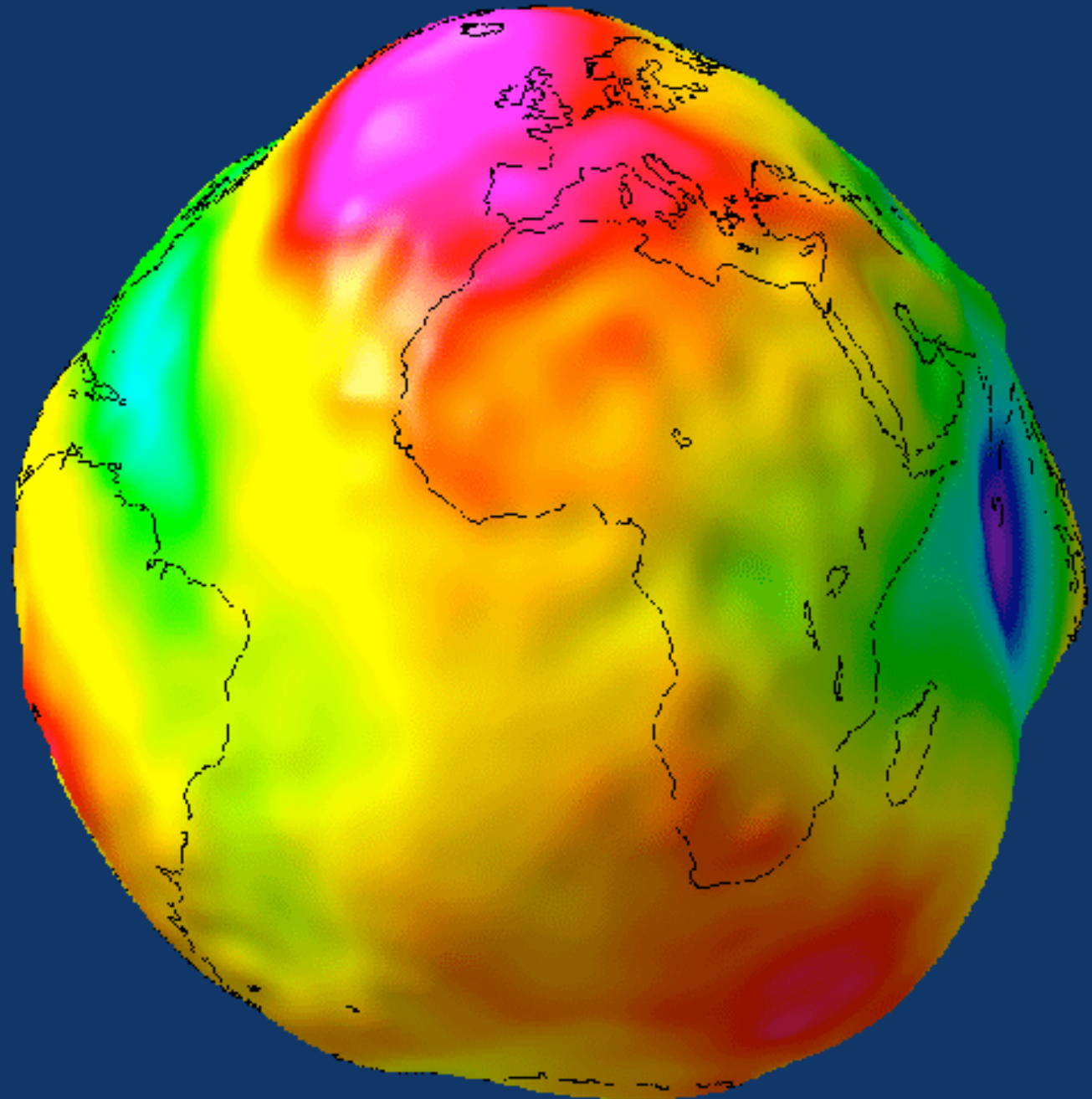
**est la surface équipotentielle
qui coïncide avec la surface d'équilibre des mers
prolongée sous les continents**

**Au premier ordre c'est une sphère
($R = 6371 \text{ km}$)**

**Au second ordre un ellipsoïde aplati
($f=1/298,25$; $R_{\text{équateur}} - R_{\text{pôle}} = 21 \text{ km}$)**

**Au troisième ordre une surface bosselée
(amplitude de quelques 10^2 m)**

Le géoïde



**Ces bosses traduisent
des anomalies de densité
(composition chimique, température)
dans le manteau
et
la dynamique de la convection profonde**