

# COURS DISPONIBLE SUR INTERNET

Serveur [step.ipgp.jussieu.fr](http://step.ipgp.jussieu.fr)

→ TICE

→ Serveur de Cours

# PLAN

1°) Energie et températures dans la Terre

2°) Eléments de dynamique

3°) Champ de pesanteur

4°) **Mesure de la déformation**

5°) **Sismologie et tremblements de terre**

6°) Chimie des roches

# Chapitre 5

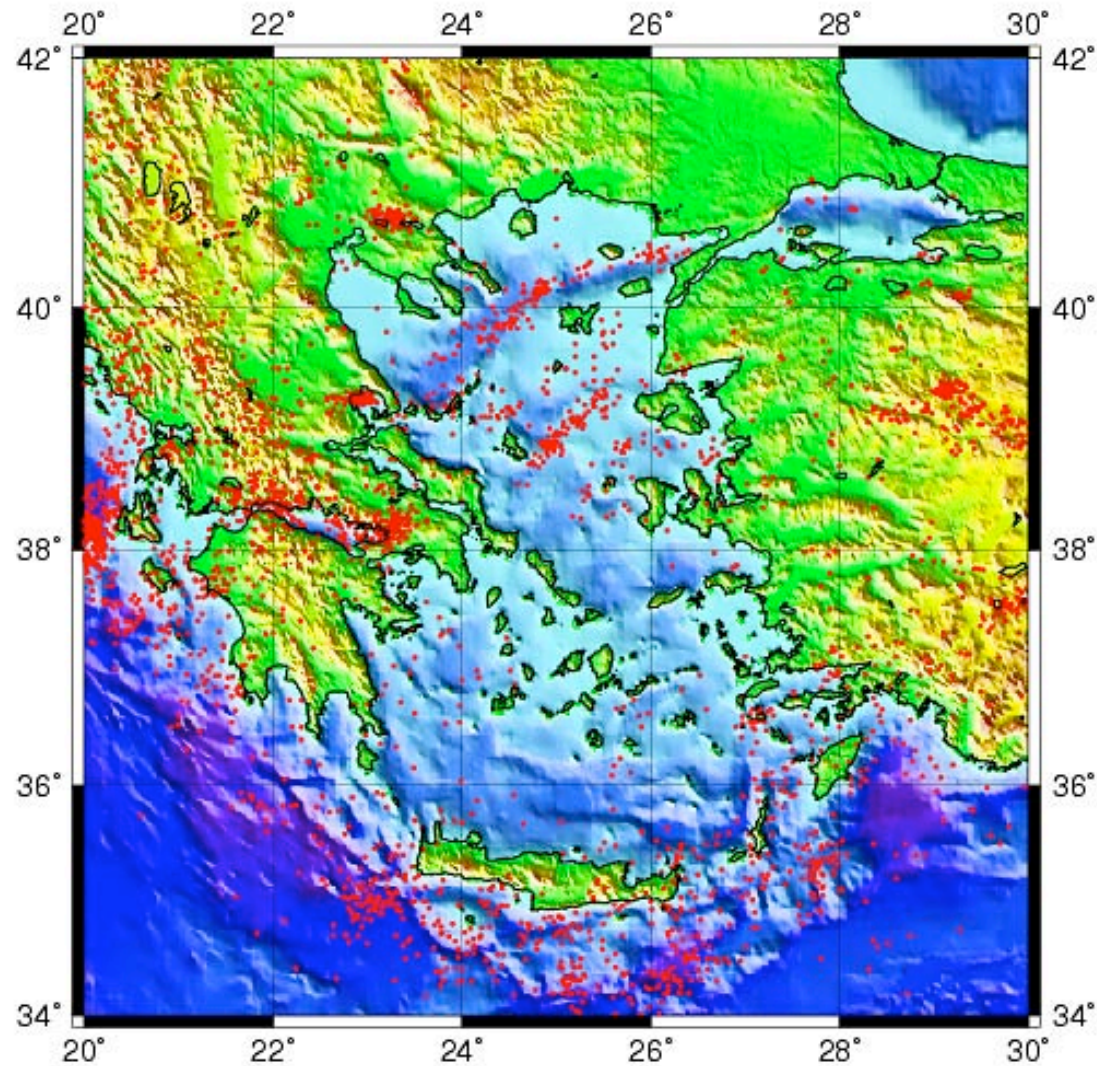
## Sismologie et tremblements de terre

**5.1. Les ondes sismiques**

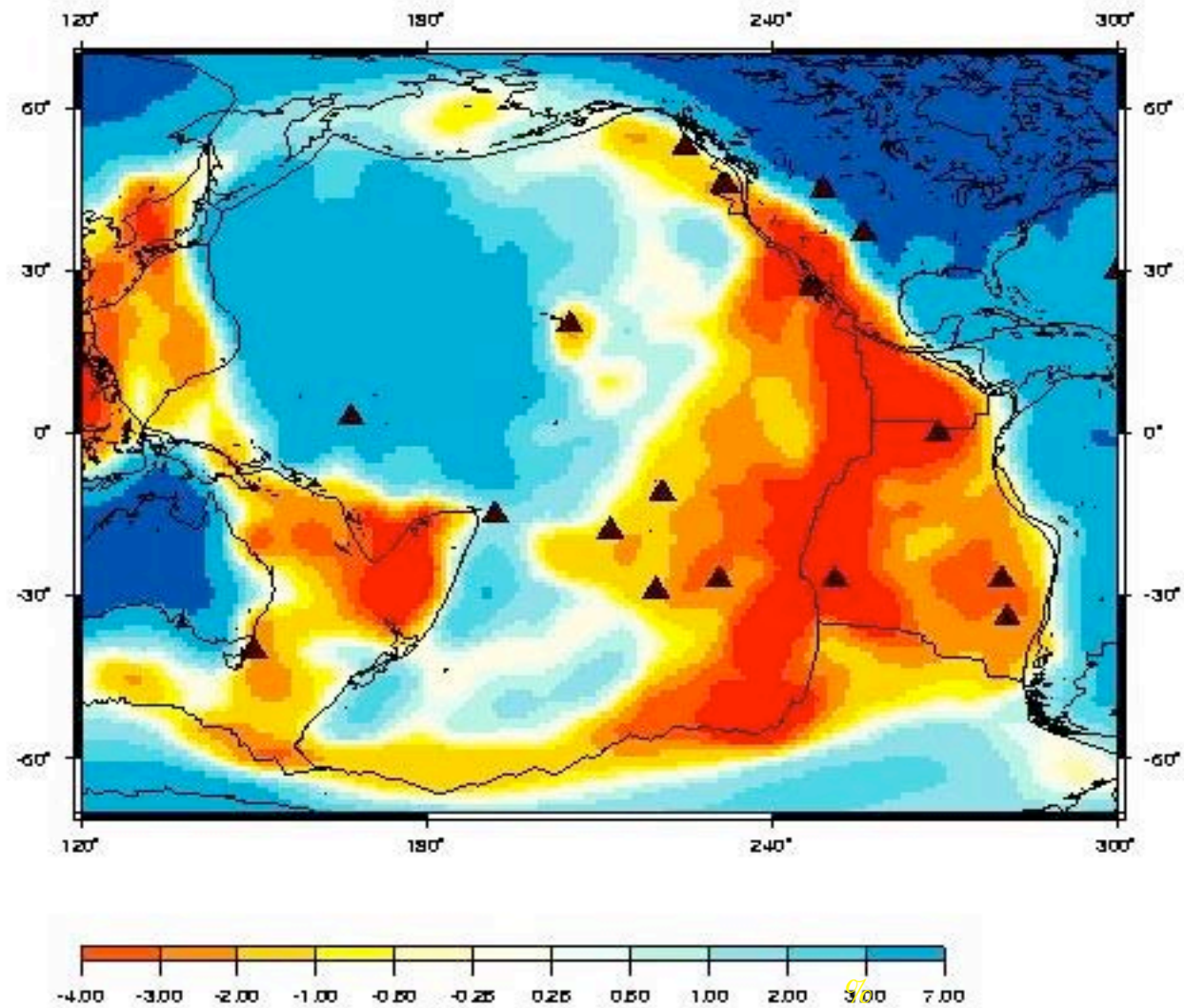
**5.2. Principes d'imagerie du sous-sol**

**5.3. Tremblements de terre et failles actives**

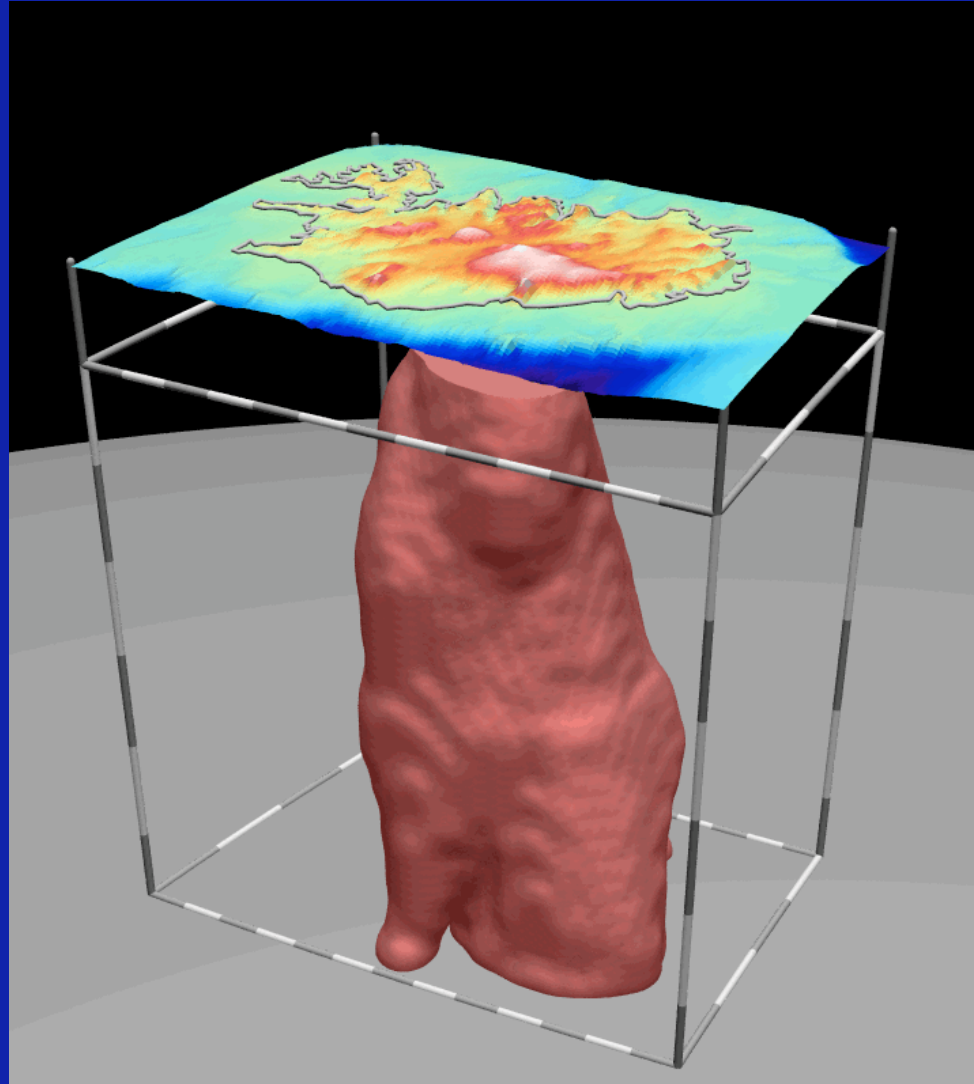
## L'activité géologique : marquée par les tremblements de terre



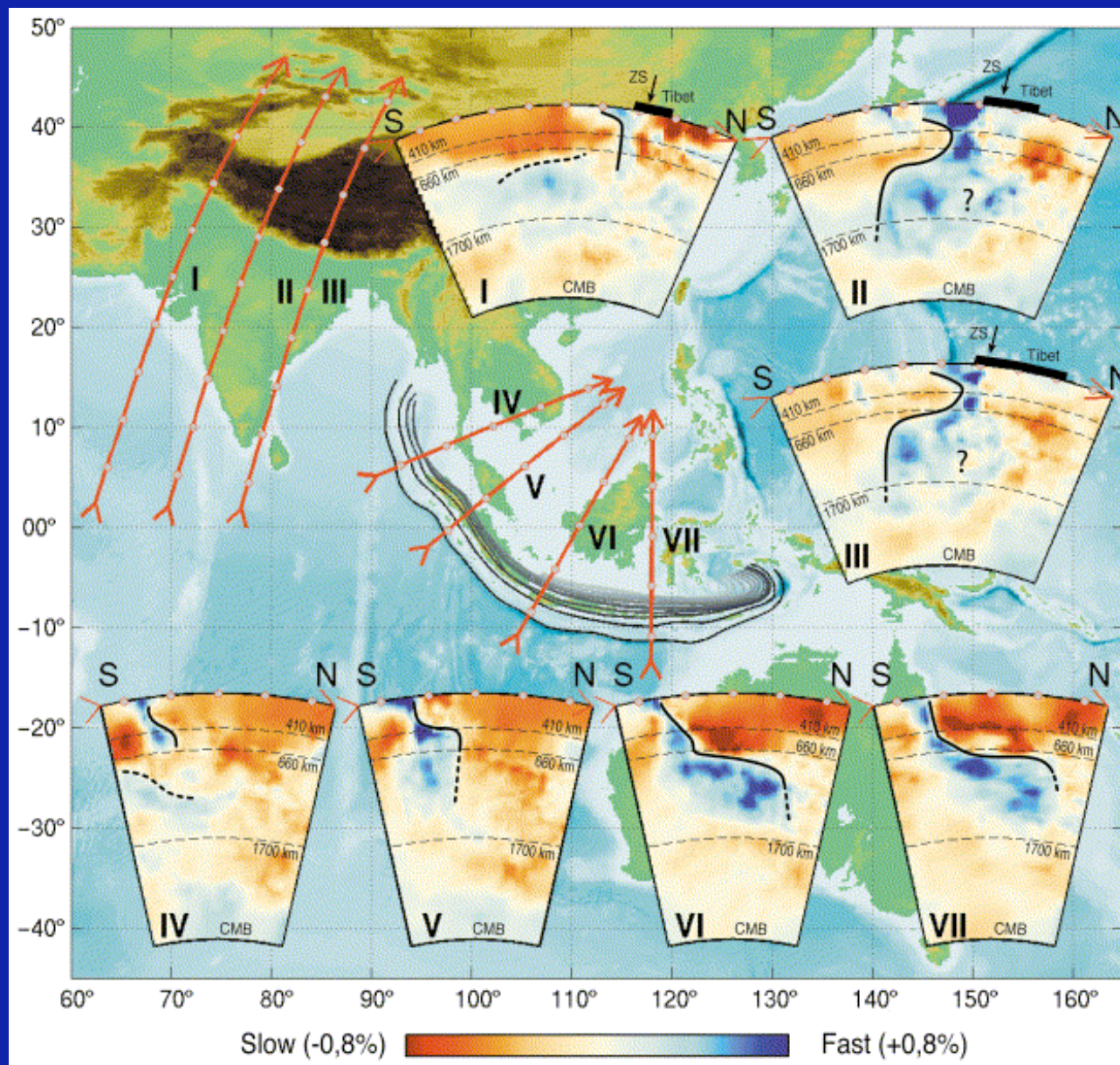
## Anomalies de vitesse $V_S$ à 100 km de profondeur



# Structure profonde de l'Islande

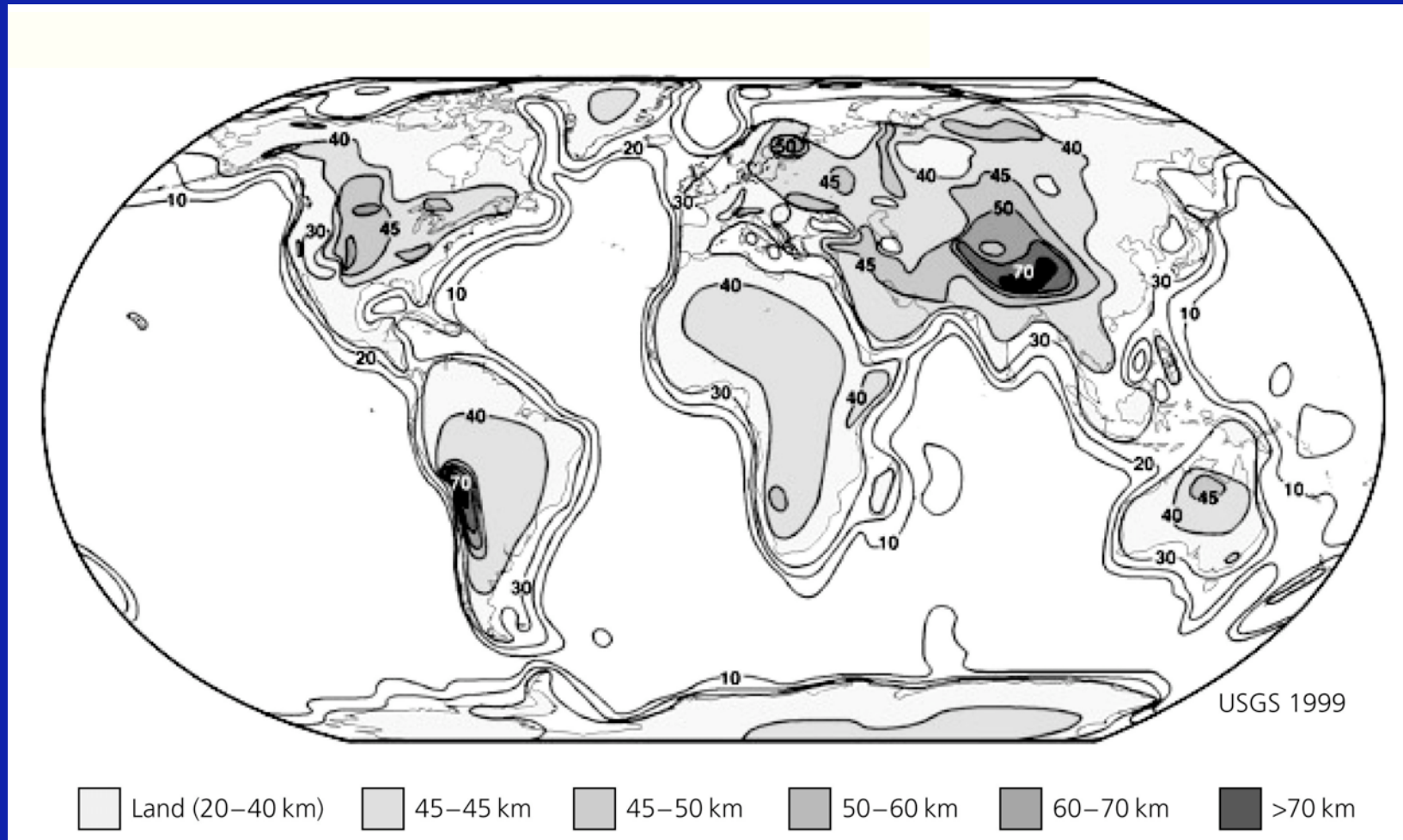


# Les zones de subduction





# L'épaisseur de l'écorce continentale



# Deux types d'ondes sismiques

## Ondes de volume

(P et S)

Se propagent à l'intérieur d'un milieu.

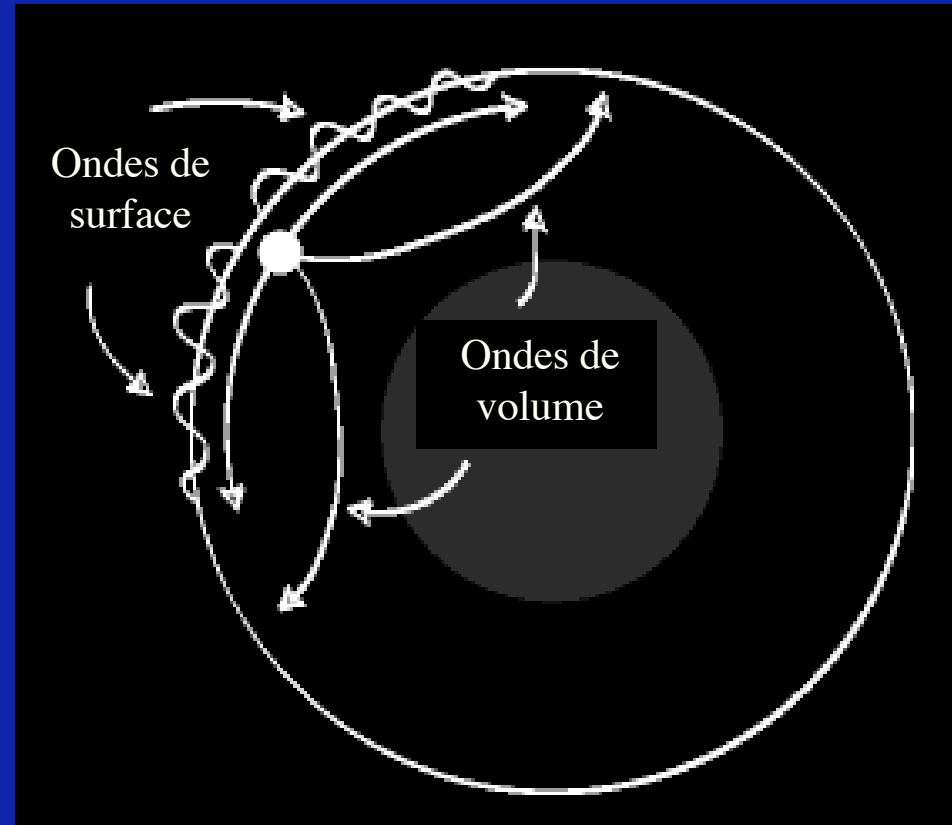
## Ondes de Surface

(Love et Rayleigh)

Se propagent à la surface.

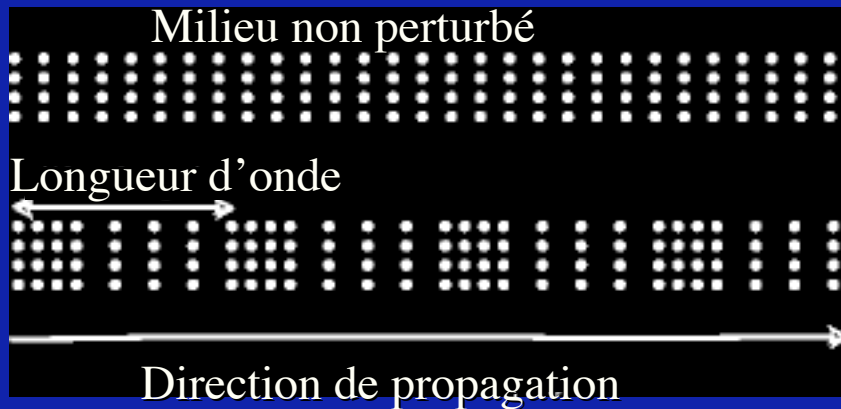
Vitesses plus faibles.

S'atténuent moins.



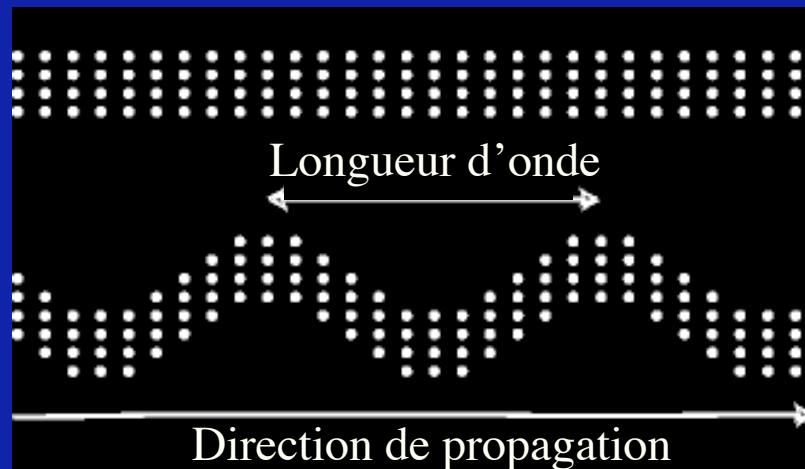
# Les ondes sismiques (élastiques):

## 1. Ondes de volume



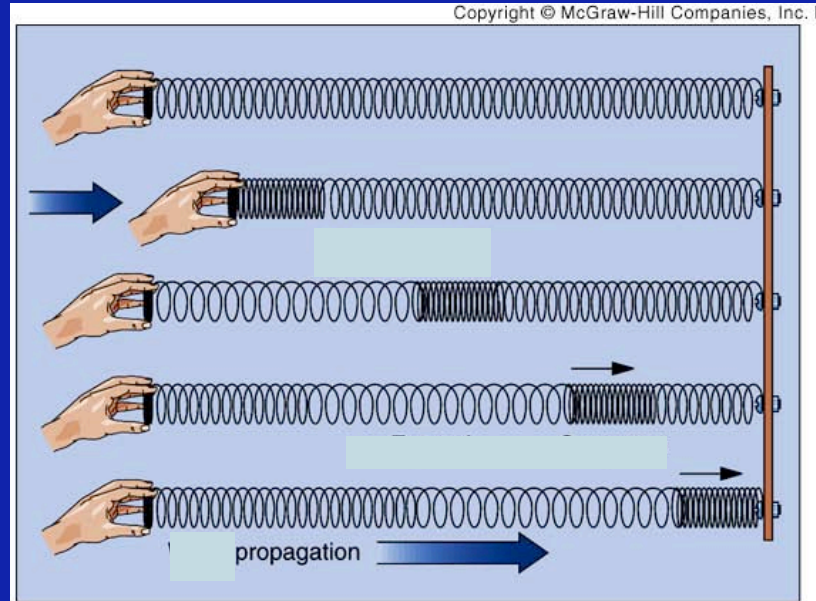
**Onde P** : *changement de volume (dilatation/compression).*

Plus rapide que l'onde S.

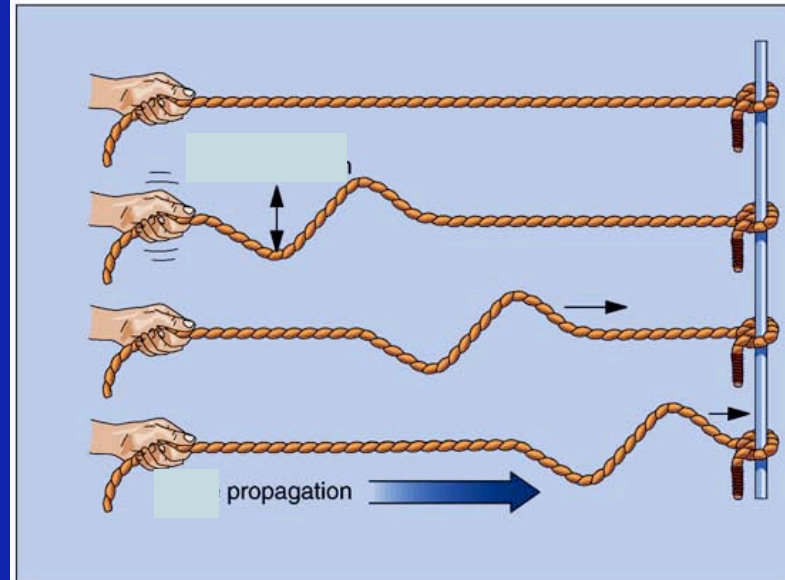


**Onde S** : *cisaillement, pas de variation de volume. Ne peut se propager dans un liquide (IMPORTANT).*

# Onde P



# Onde S



# Vitesse des ondes élastiques

$$v \sim \left( \frac{\lambda}{\rho} \right)^{1/2} \quad (\text{formule exacte plus compliquée})$$

Dimensions :

$$[\lambda] = \text{Pa} = \text{M} \gamma / \text{S} = \text{M L T}^{-2} \text{L}^{-2} = \text{M L}^{-1} \text{T}^{-2}$$

$$[\rho] = \text{M L}^{-3}$$

$$[\lambda / \rho] = \text{L}^2 \text{T}^{-2}$$

# Vitesse des ondes élastiques

$$V \sim \left( \frac{\lambda}{\rho} \right)^{1/2} \quad (\text{formule exacte plus compliquée})$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \text{ module élastique} \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \\ \rho \text{ densité} \approx 3 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3} \end{array} \right\} \begin{array}{l} V \approx 3 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1} \\ 3 \text{ km s}^{-1} \end{array}$$

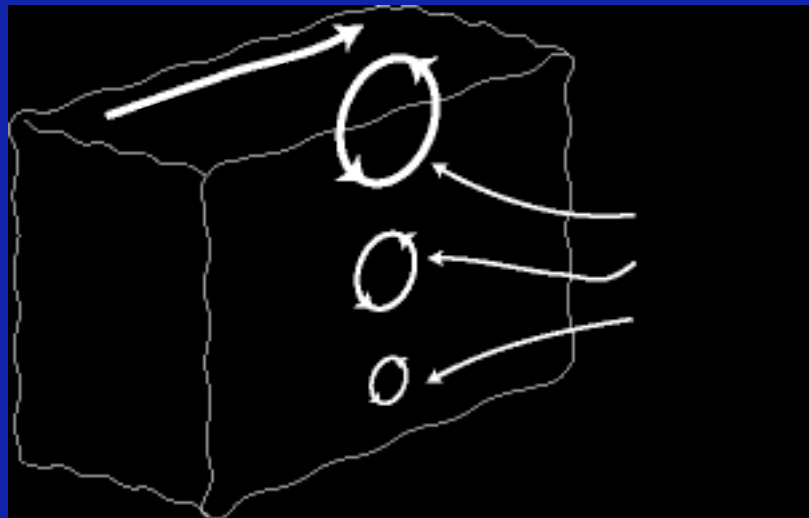
$$V_p \approx 6 - 8 \text{ km s}^{-1}$$

$$V_s \approx 3 - 5 \text{ km s}^{-1}$$

## 2. Ondes de surface



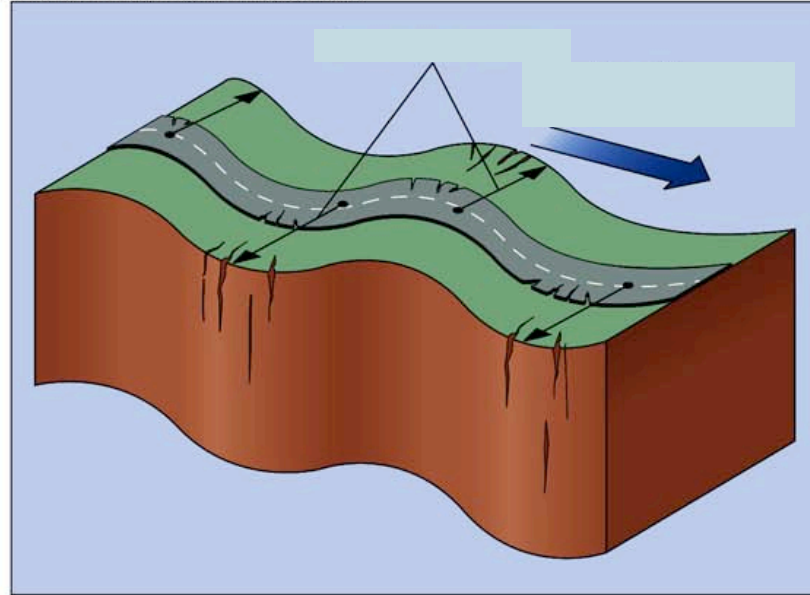
- **Ondes de Love :**  
proches des ondes S  
(mais en surface)  
Pas de mouvement vertical



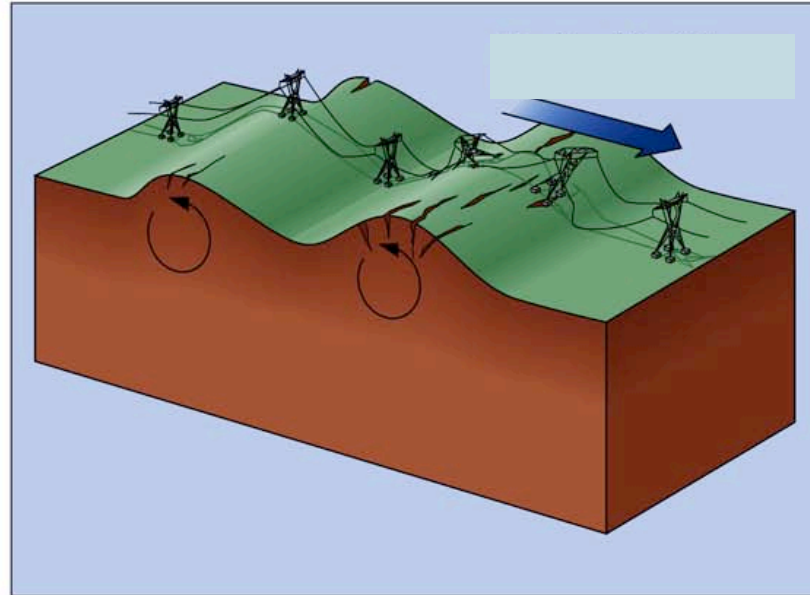
- **Ondes de Rayleigh :**  
analogues aux vagues.  
Les particules  
suivent des trajectoires  
elliptiques.

**Onde de Love**

permission required for reproduction or display.

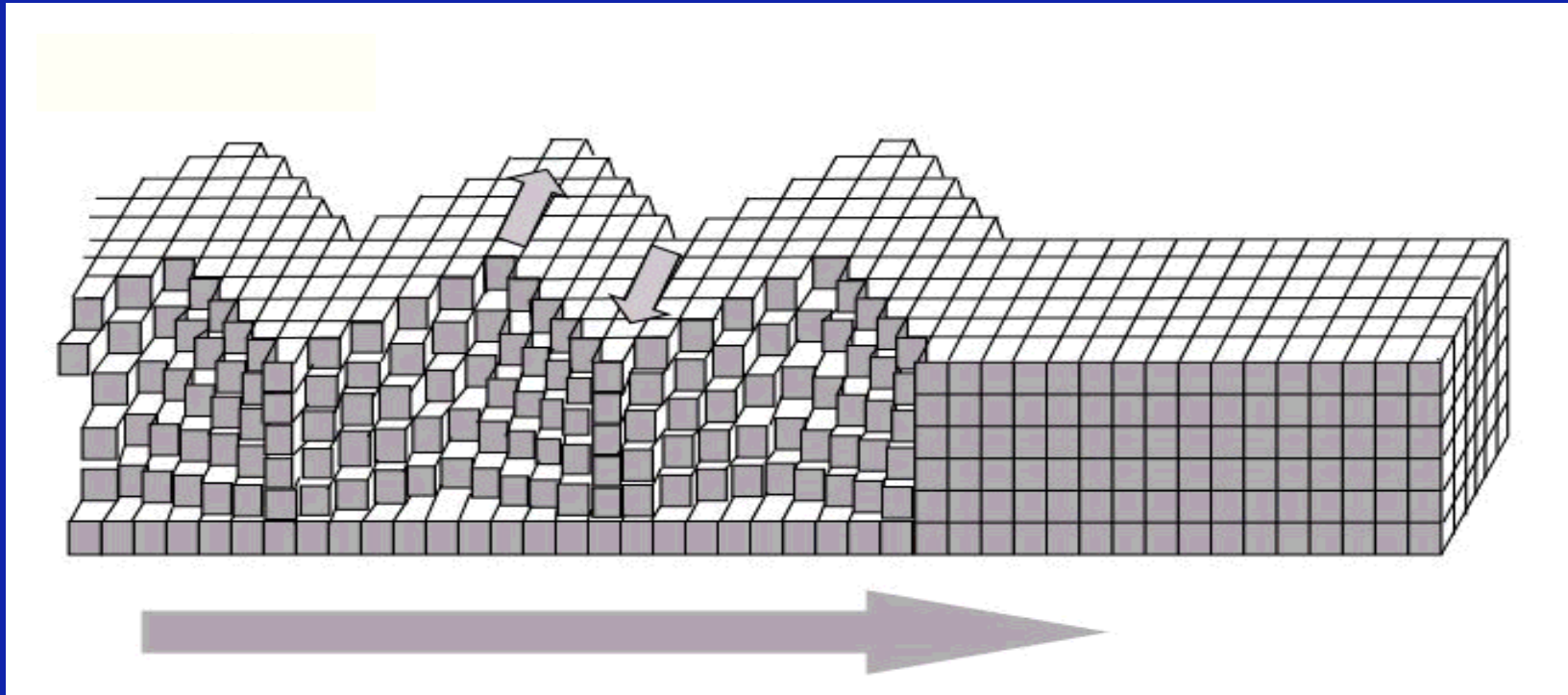


**Onde de Rayleigh**

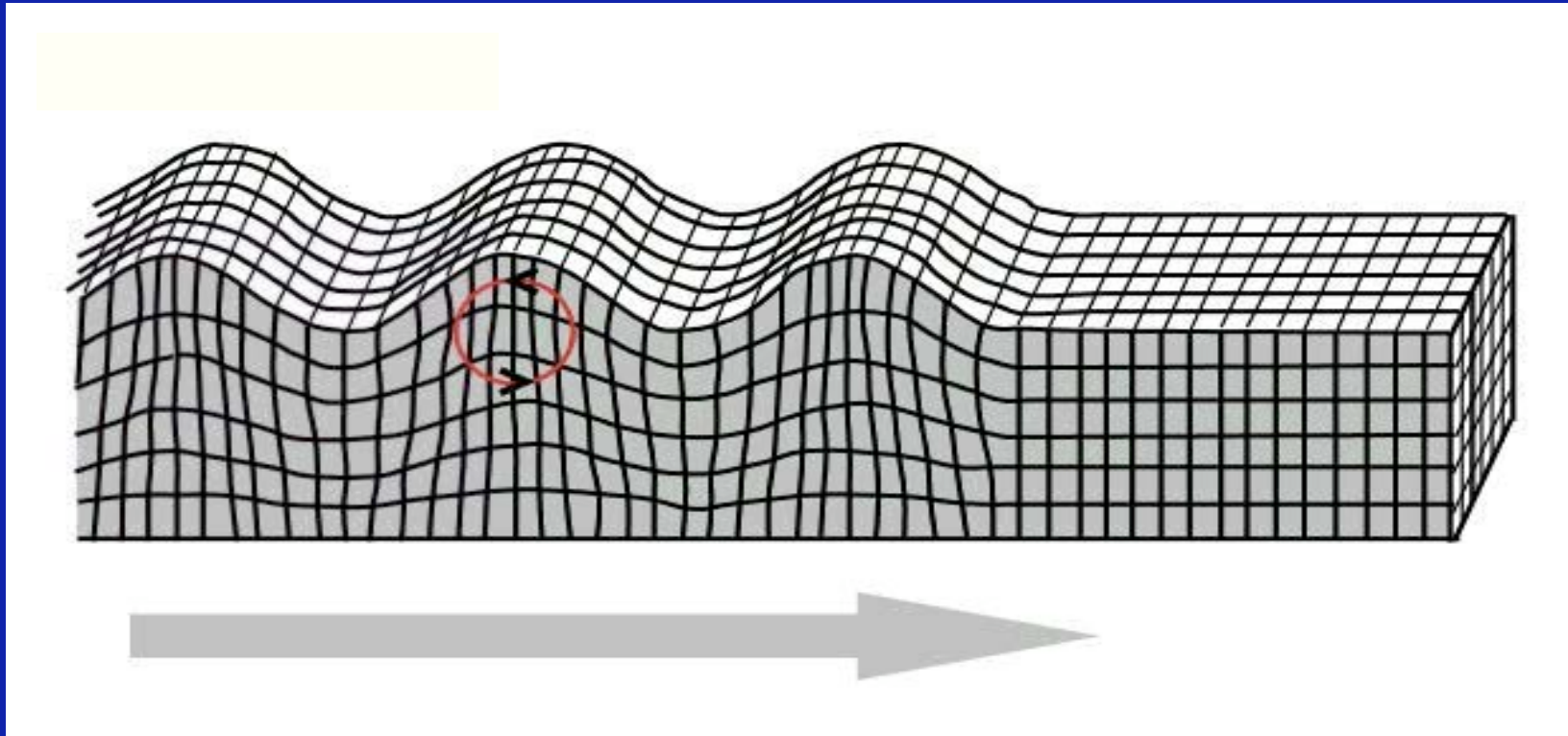




# Ondes de Love

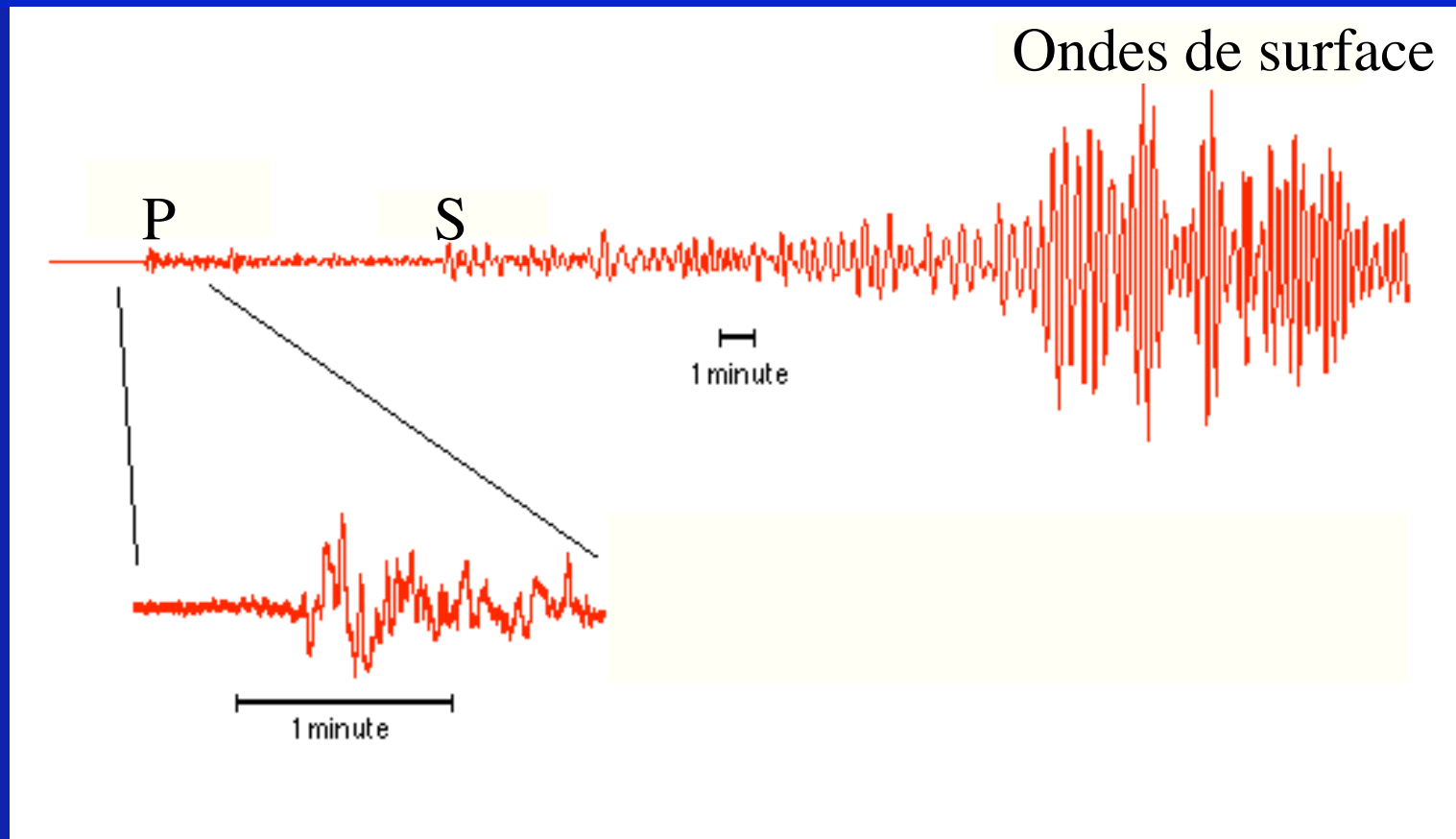


# Ondes de Rayleigh



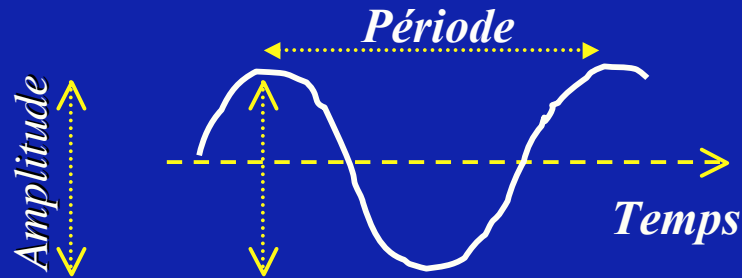
# Séisme de Izmit, Turquie (17 sept. 1999) $M = 7.8$

Enregistrement à Boston, Massachusetts  
(11 minutes après)



# Période, fréquence et longueur d'onde

- *La période,  $T$ , est le temps pour parcourir un cycle.*



- *La fréquence,  $f$ , est égale à  $1/T$ .*  
Unité:  $s^{-1}$  ou Hz.
- *La longueur d'onde,  $\lambda$ , est la distance parcourue en une période.*

$$\lambda = VT = V/f$$

Unité : m.

# Amplitude et Energie

- *L'Amplitude, A, est mesurée de pic à pic.*
- Pour une onde d'amplitude  $A$  et de période  $T$ , l'énergie cinétique est:

$$E = 1/2 m V^{*2}$$

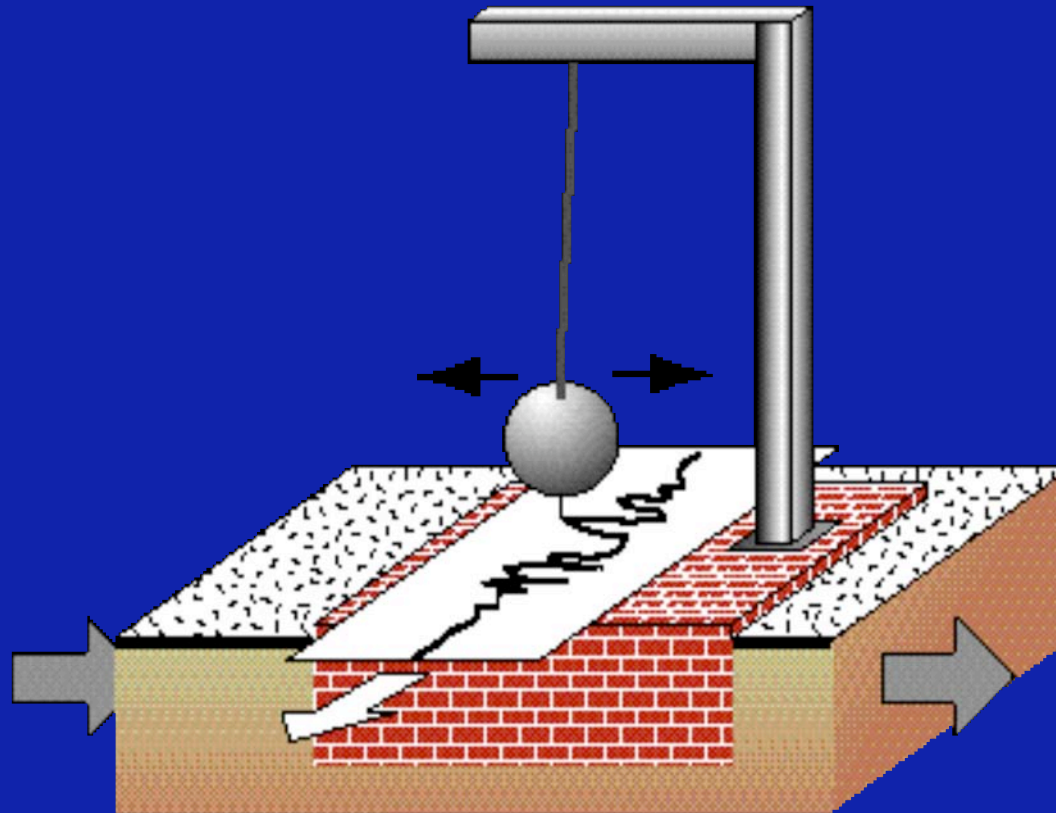
(Attention :  $V^*$  est la vitesse de déplacement d'un point matériel, pas la vitesse de propagation de l'onde).

$$E = 1/2 m V^{*2} = 2 m (A/T)^2 = 2 \rho V_{\text{vol}} (A/T)^2$$

- Par unité de volume:

$$E^* = 2 \rho (A/T)^2$$

# Le sismomètre

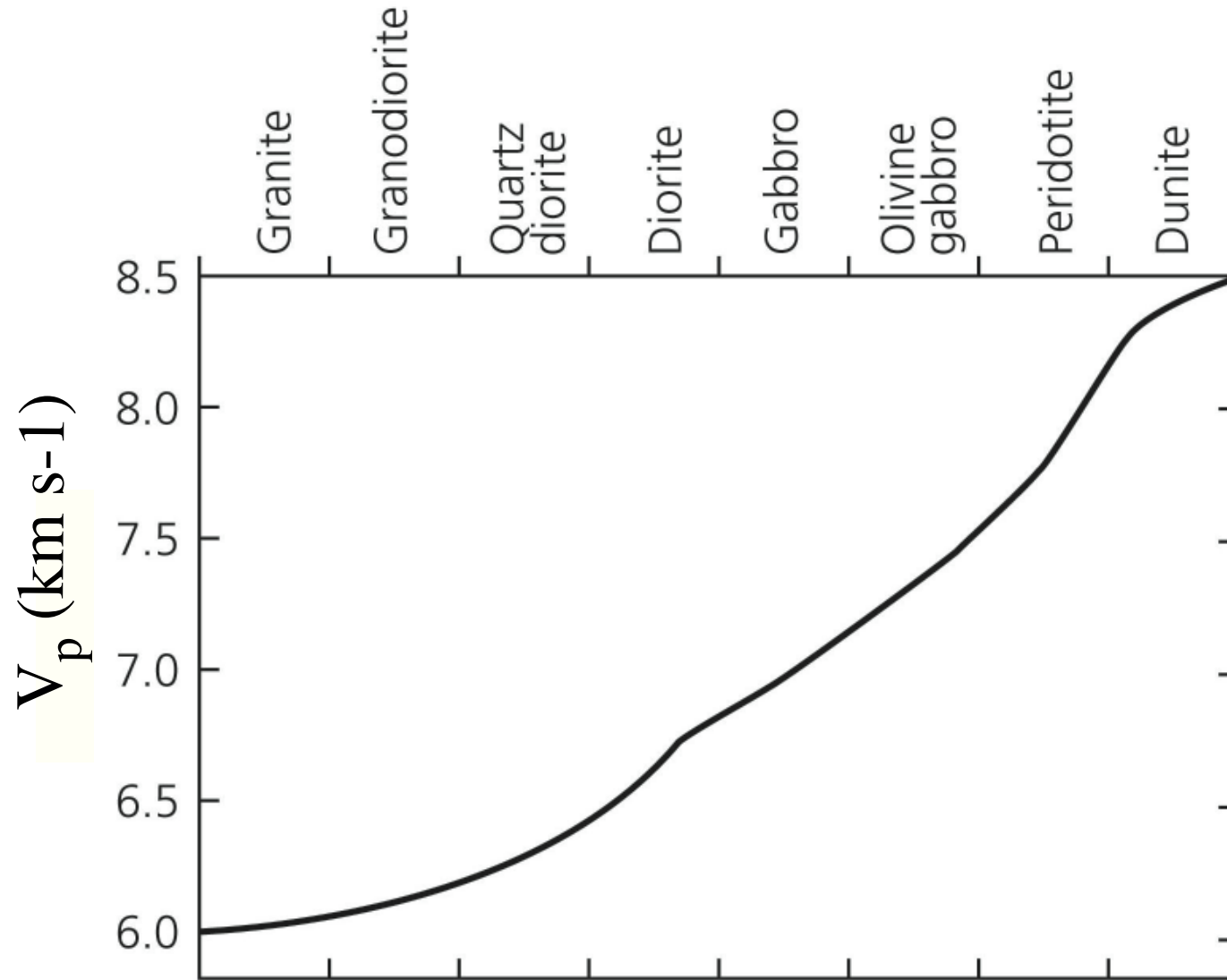


Par inertie, la masse ne se déplace pas  
et enregistre les mouvements.

## Quelques valeurs des vitesses $V_P$ et $V_S$ (en km s-1)

<u>Matériau</u>	$V_P$	$V_S$
Air	0.33	/
Eau	1.4 - 1.5	/
Hydrocarbure	1.3 - 1.4	/
Granite	5.5 - 6.0	2.8 - 3.3
Grès	1.4 - 4.3	0.7 - 2.8
Calcaire	5.9 - 6.1	2.8 - 3.0

## La vitesse des ondes sismiques varie avec la composition





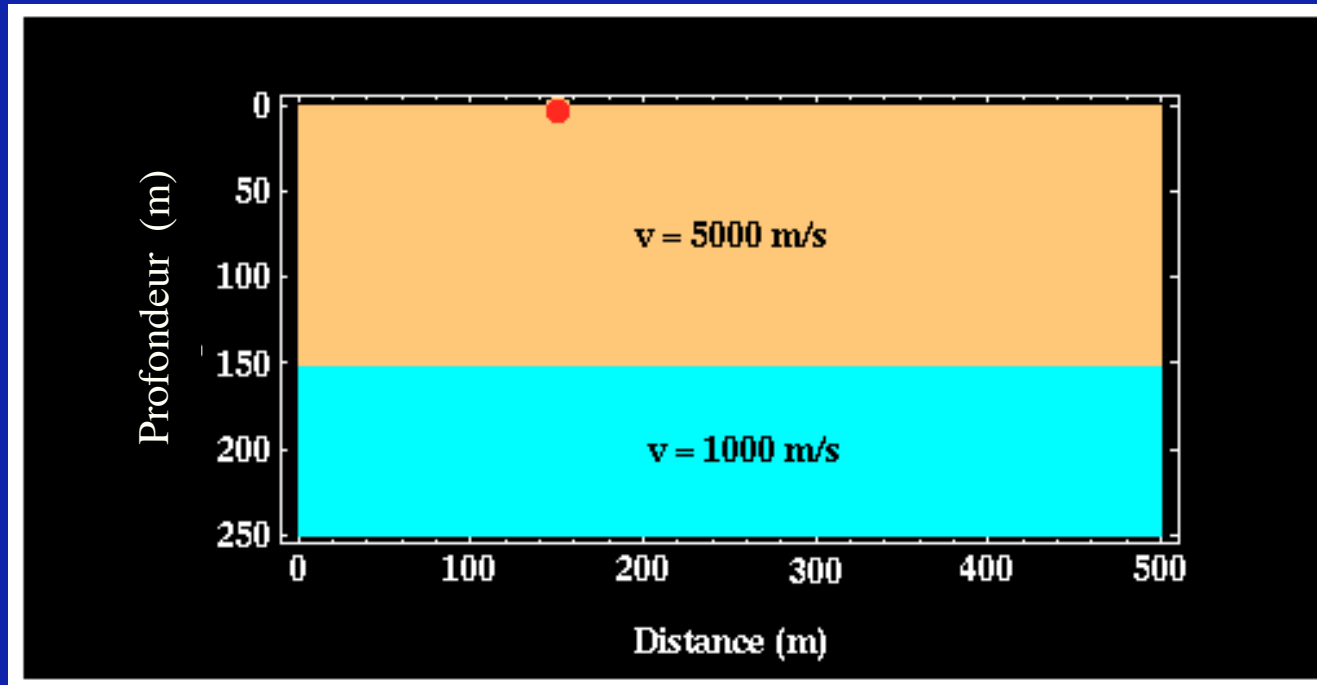
## Autres effets

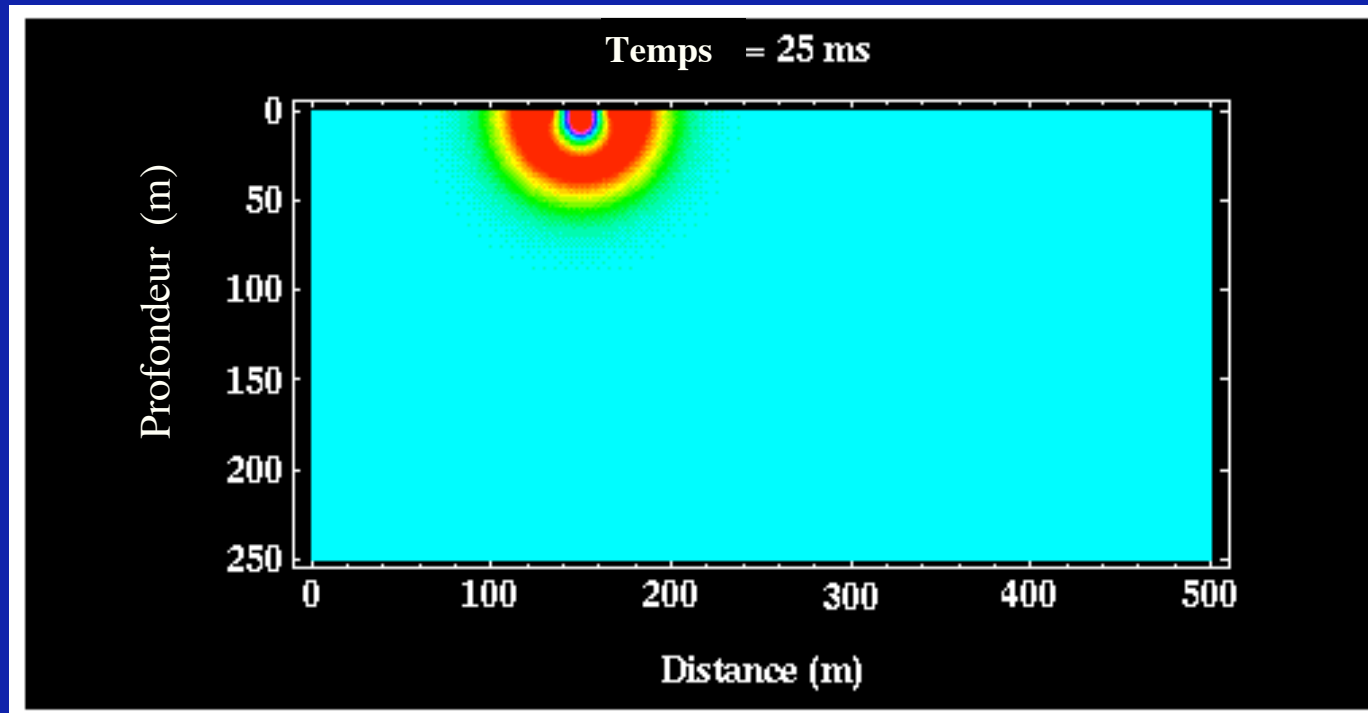
Température : la vitesse décroît quand T croît.

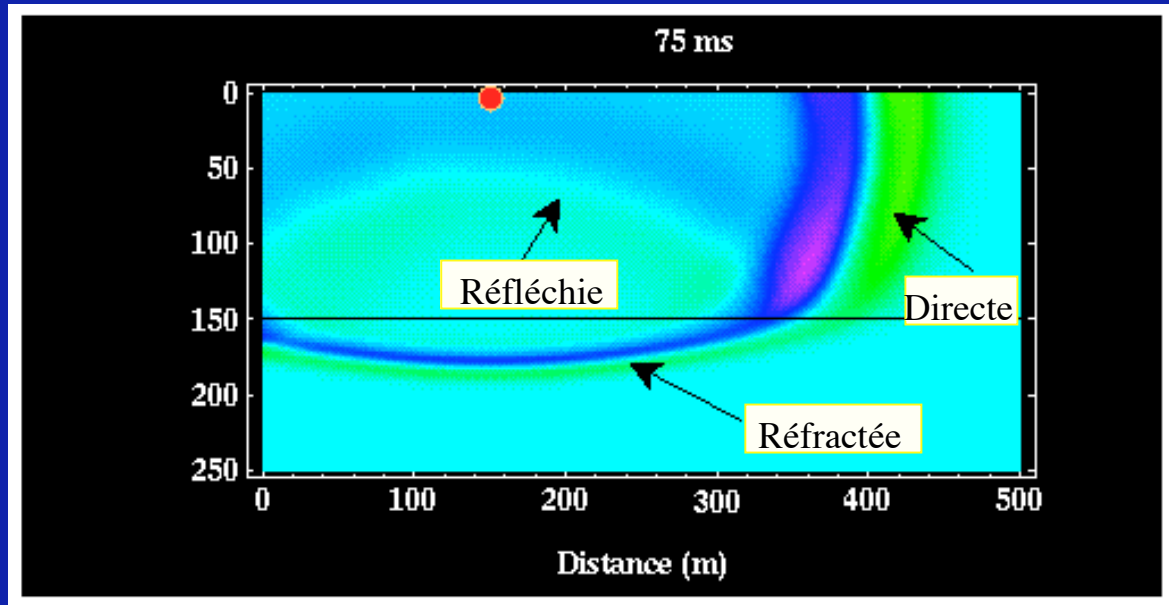
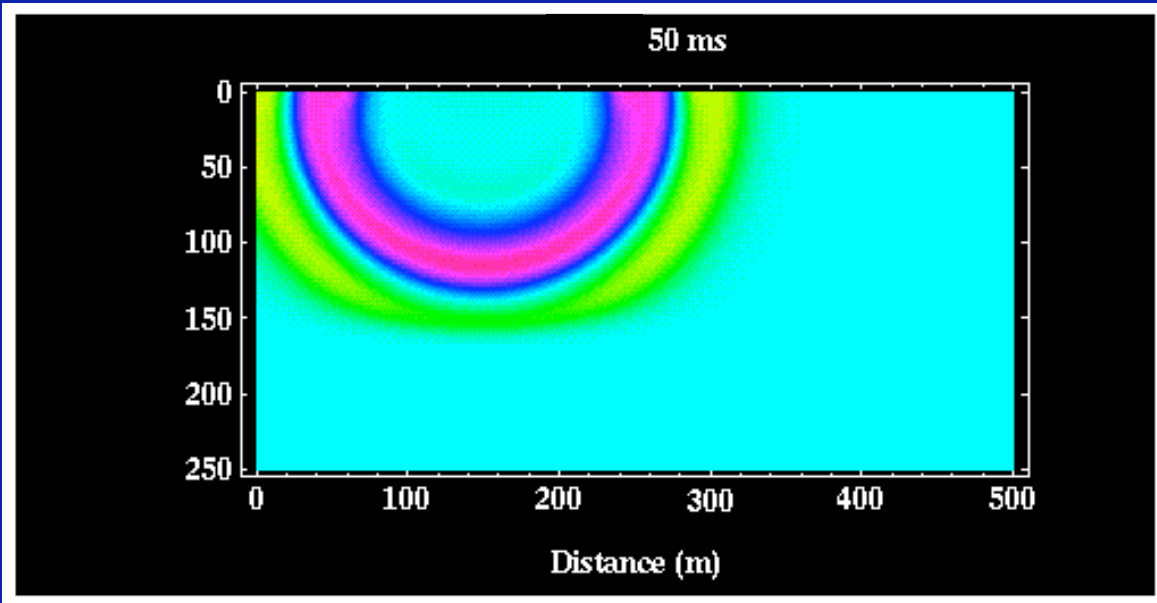
Pression : la vitesse croît quand P croît.

Fusion partielle : la vitesse décroît  
quand les roches sont partiellement fondues.

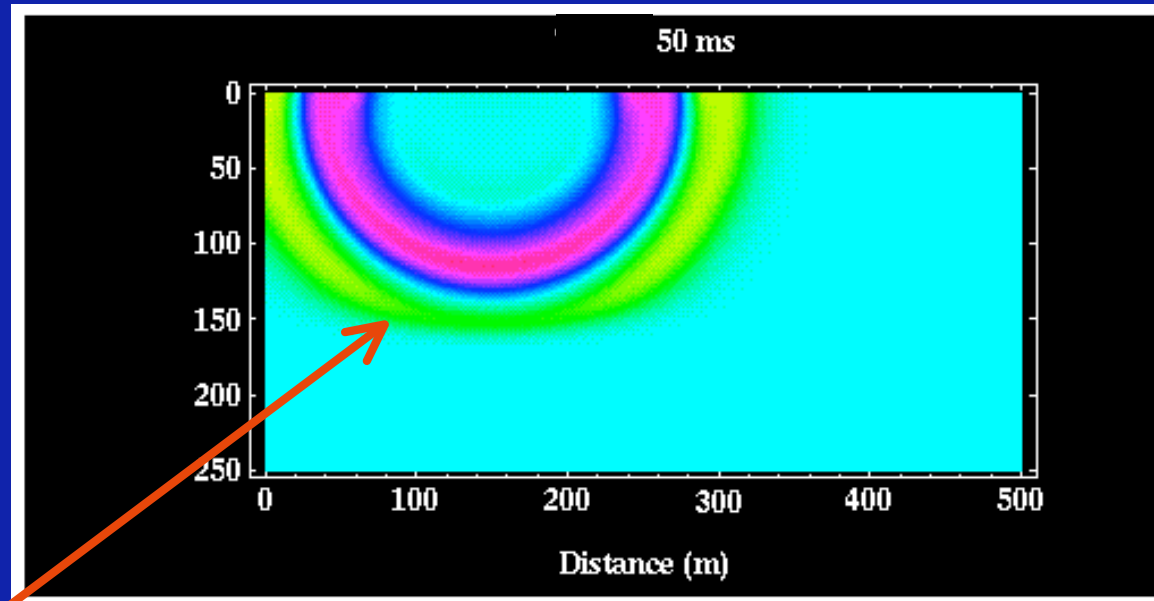
# Ondes dans un milieu stratifié





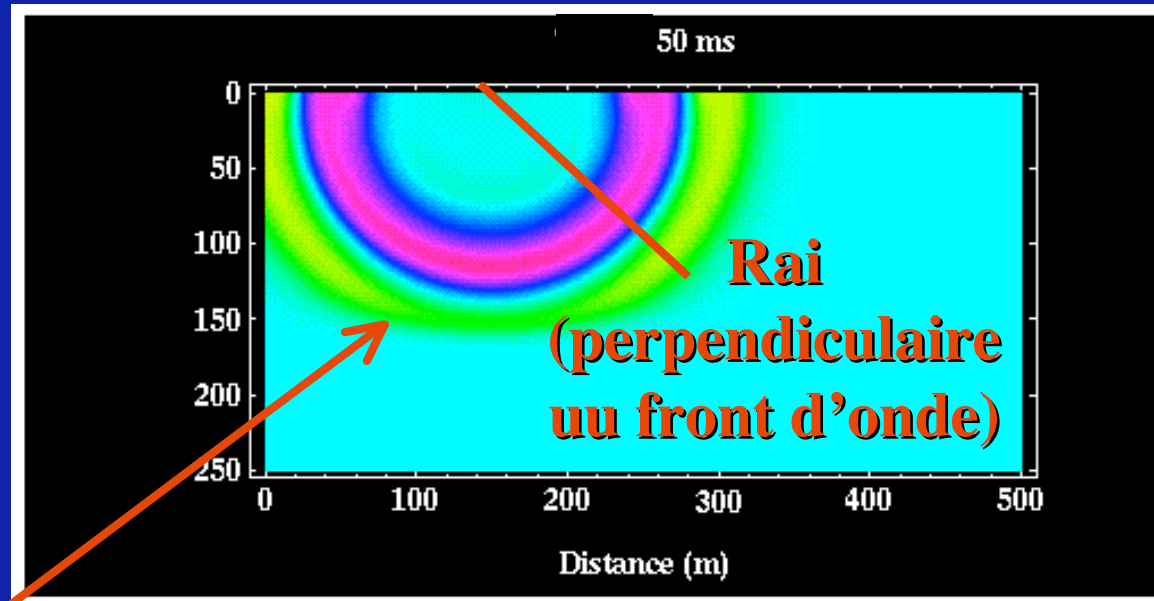


# L'étude des rais sismiques (analogues des rayons lumineux)



**Front d'onde**

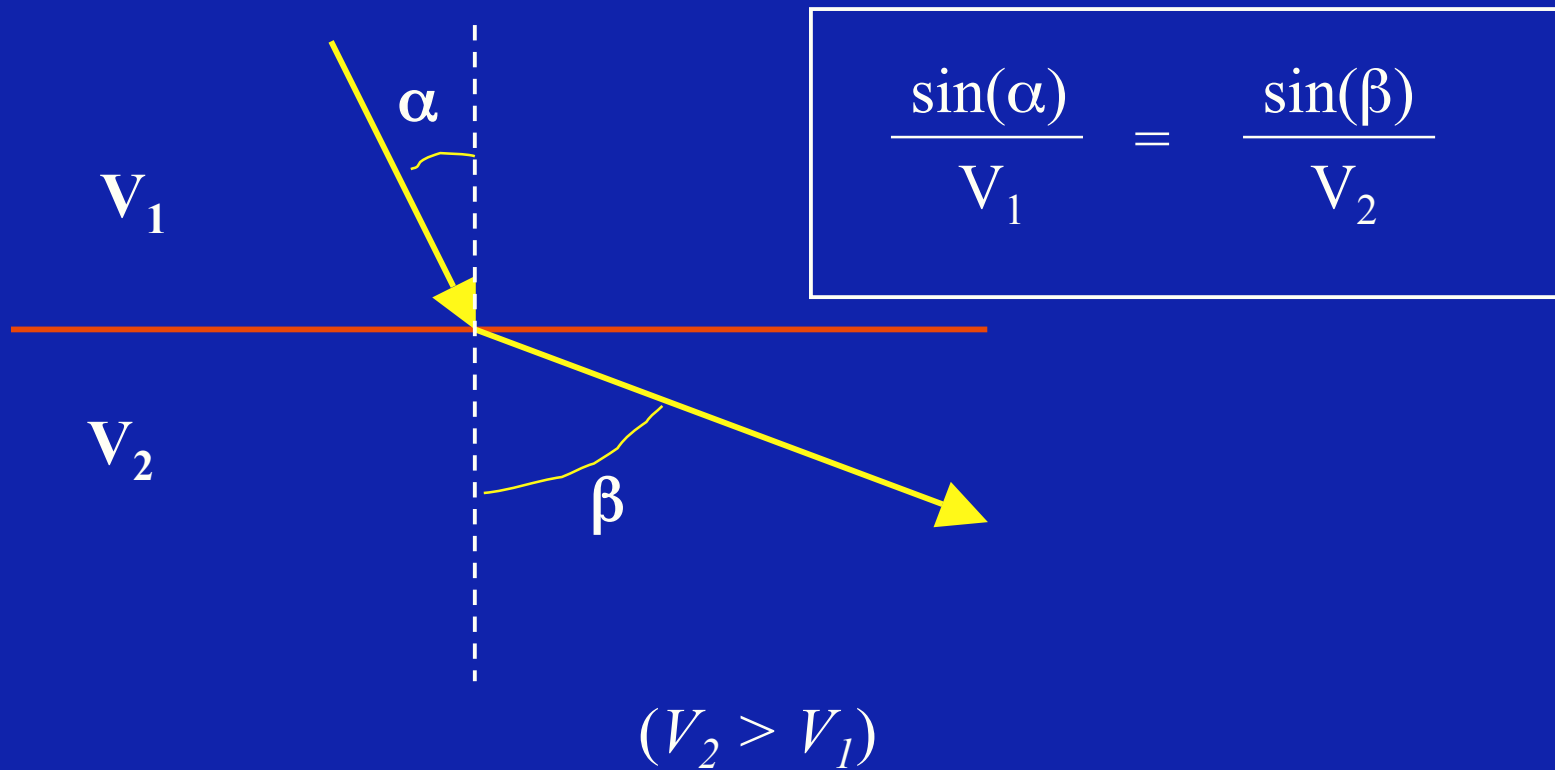
## L'étude des rais sismiques (analogues des rayons lumineux)



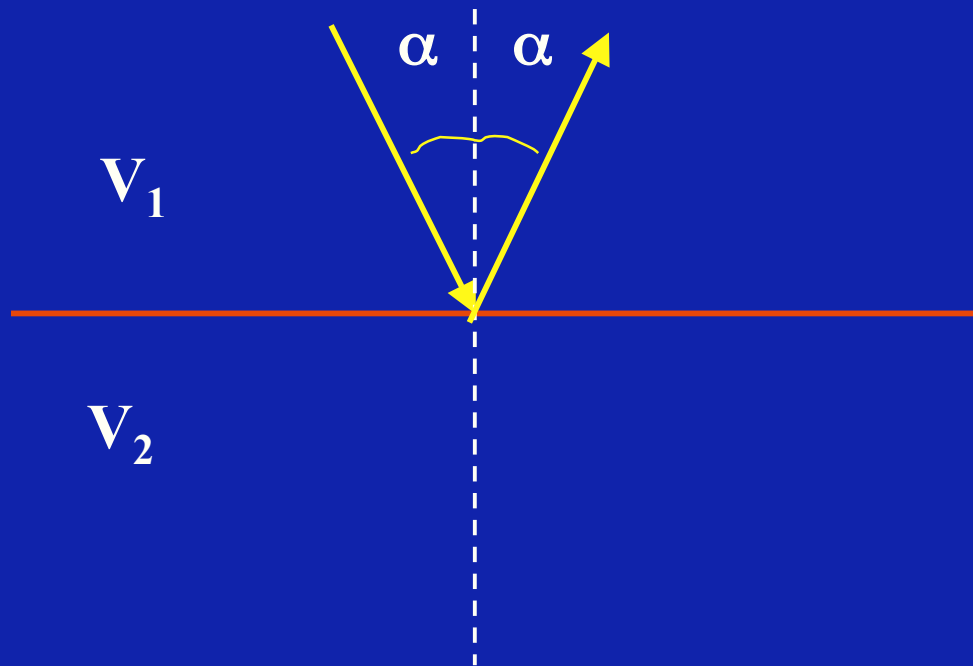
**Front d'onde**

Le rai représente  
la direction de propagation

# Réfraction : loi de Descartes - Snell

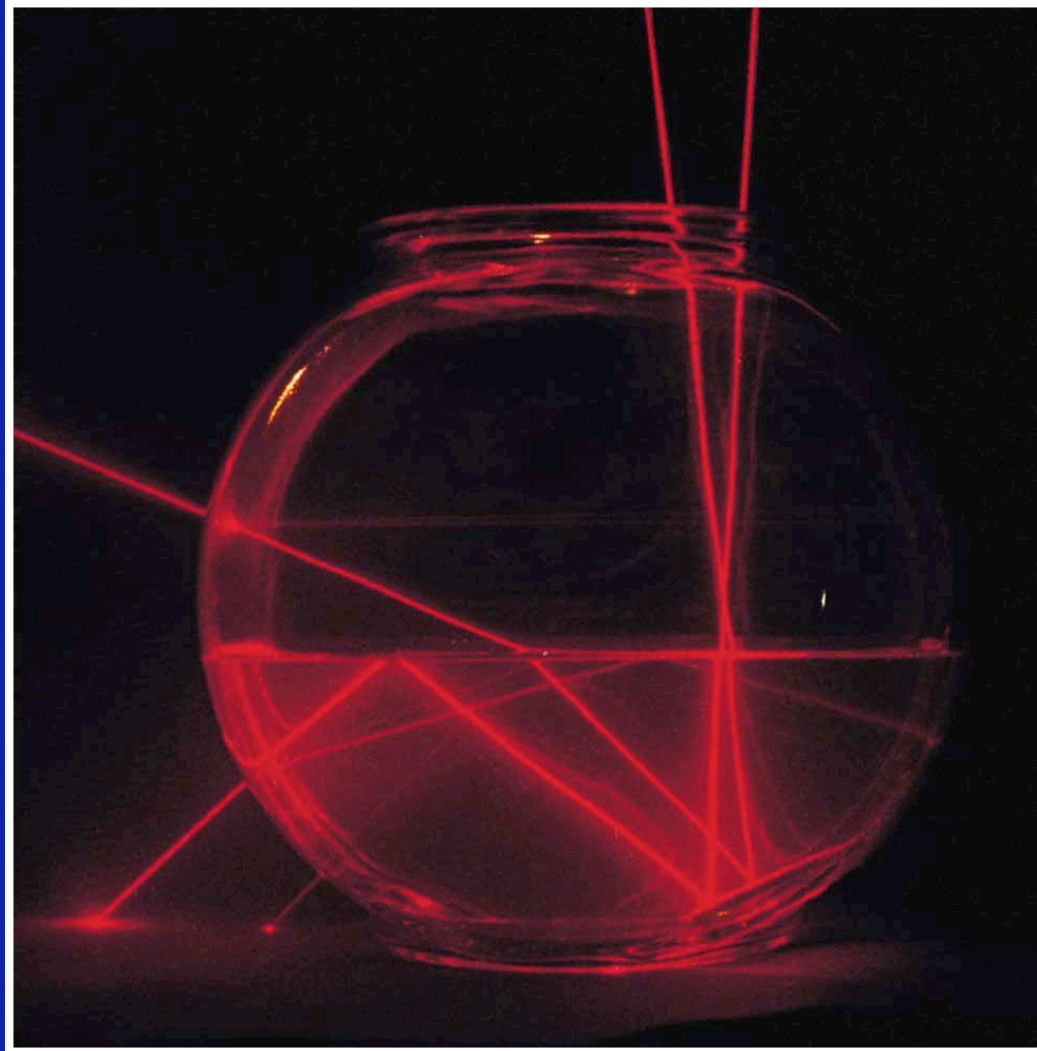


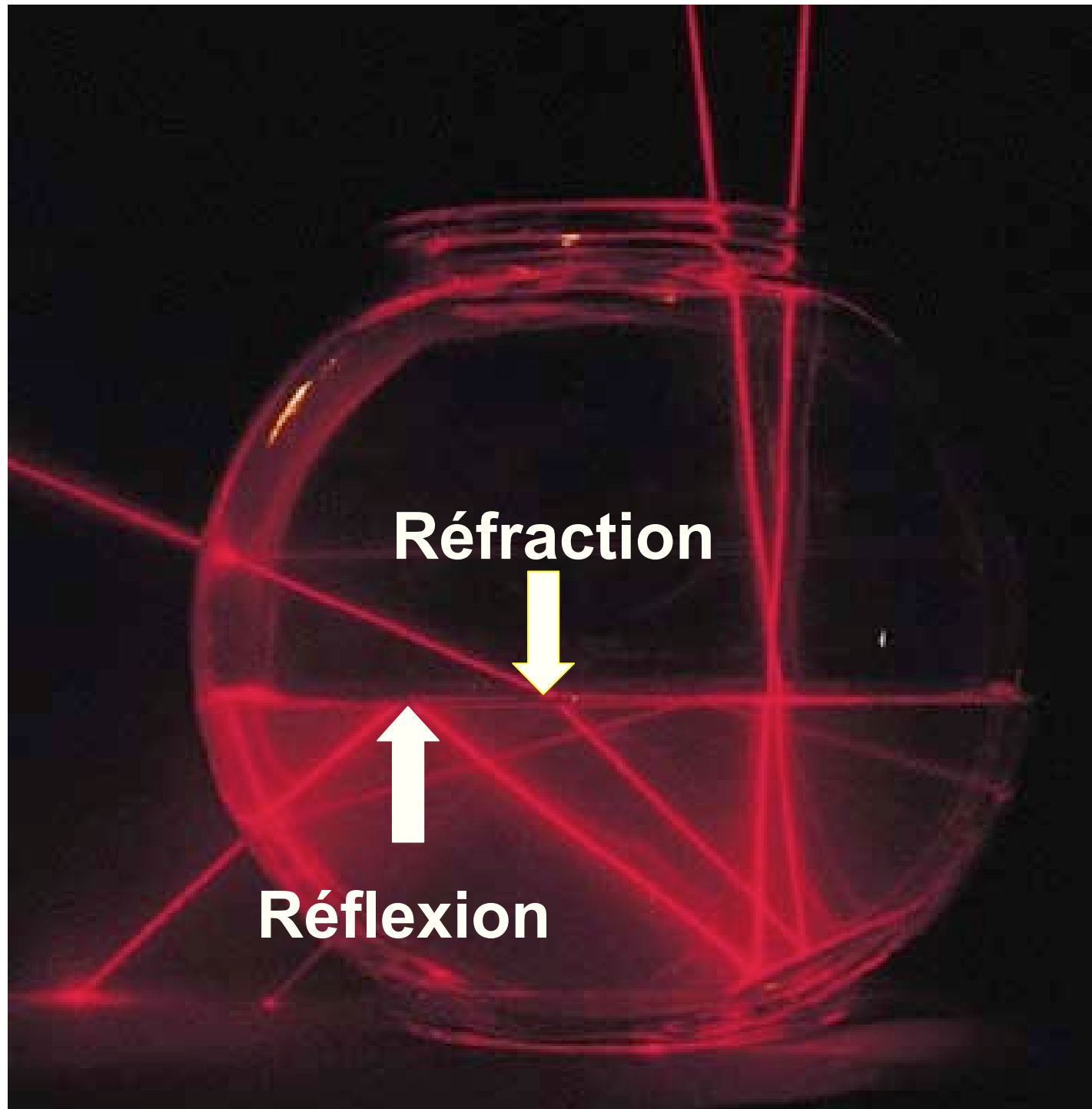
# Réflexion





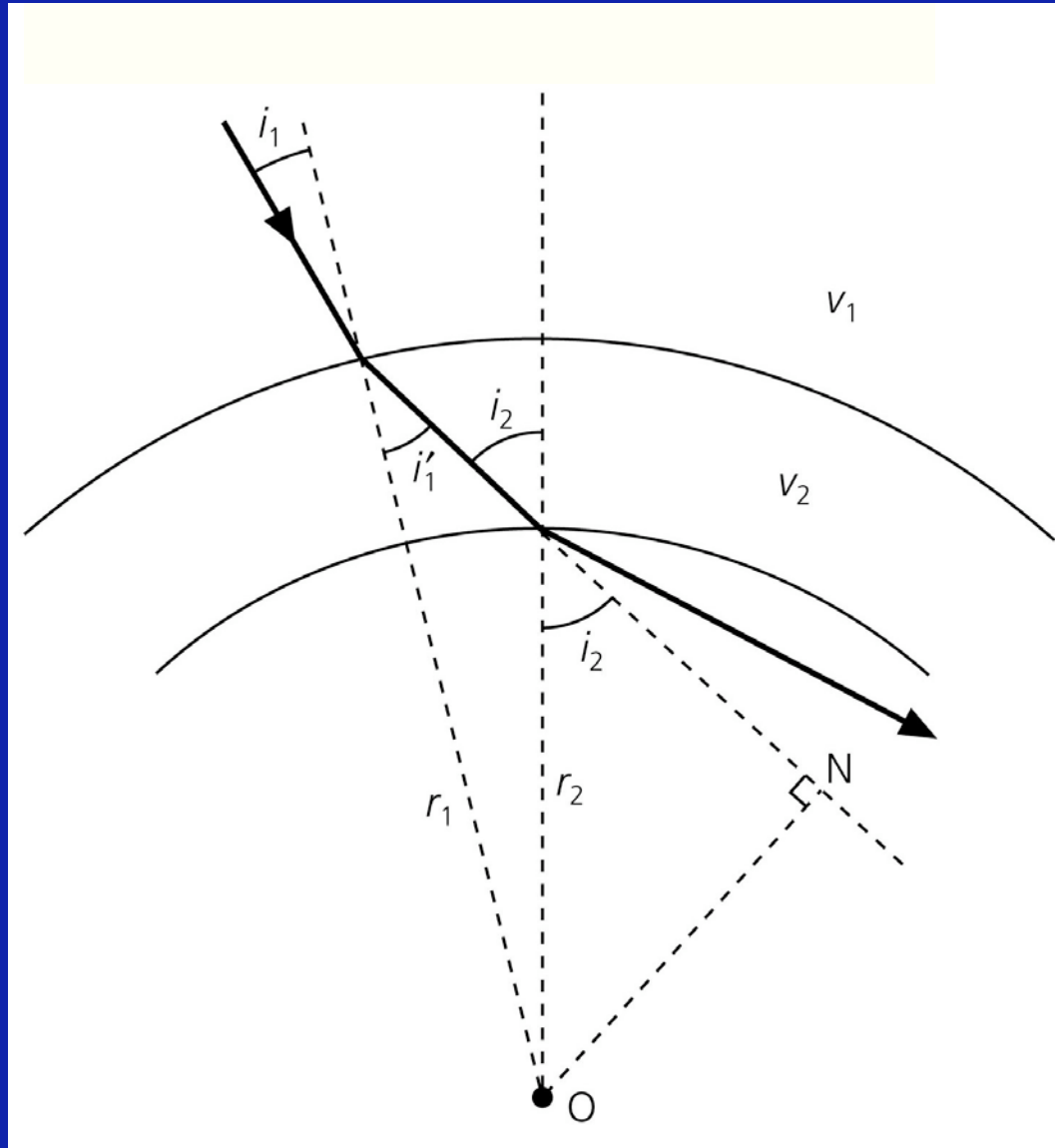
# Trajets des ondes





Réfraction  
et  
réflexion  
d'un  
pinceau  
de lumière

## Réfraction dans la Terre (géométrie sphérique)

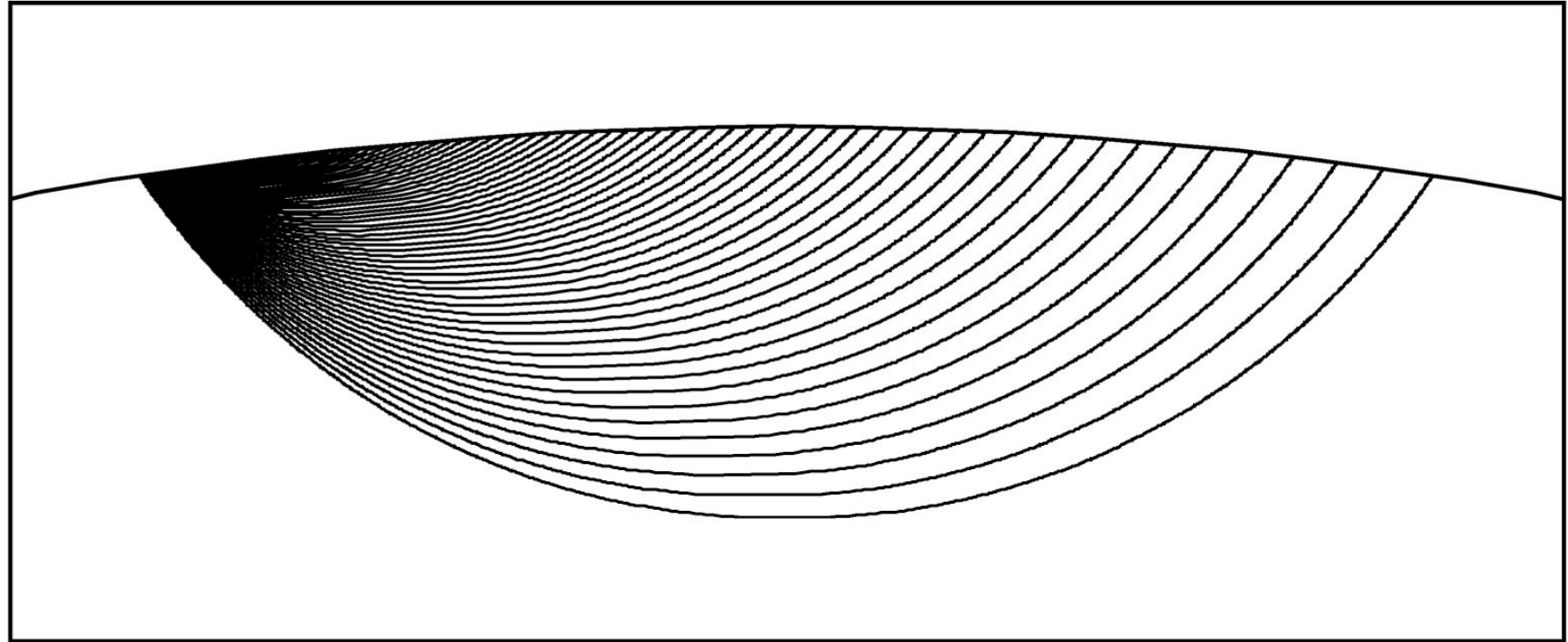


### Principe

Les vitesses augmentent avec la profondeur (effet de la pression)

Les rais ont une courbure positive : ils “remontent”.

# TRAJETS DES RAIS SISMIQUES DANS LA TERRE

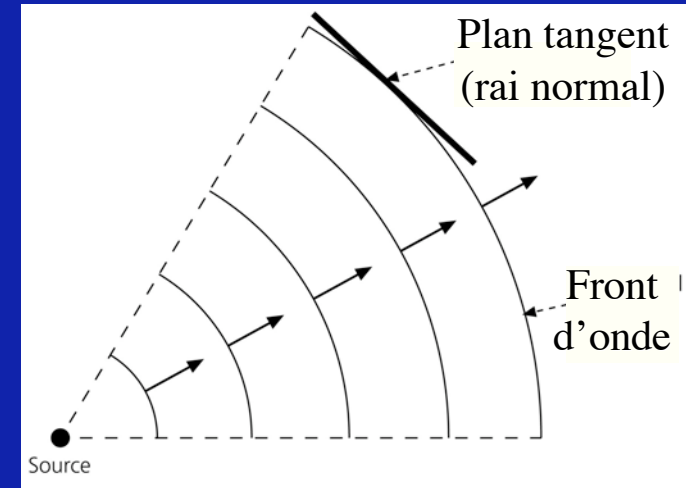


Distance ( $\Delta$ )

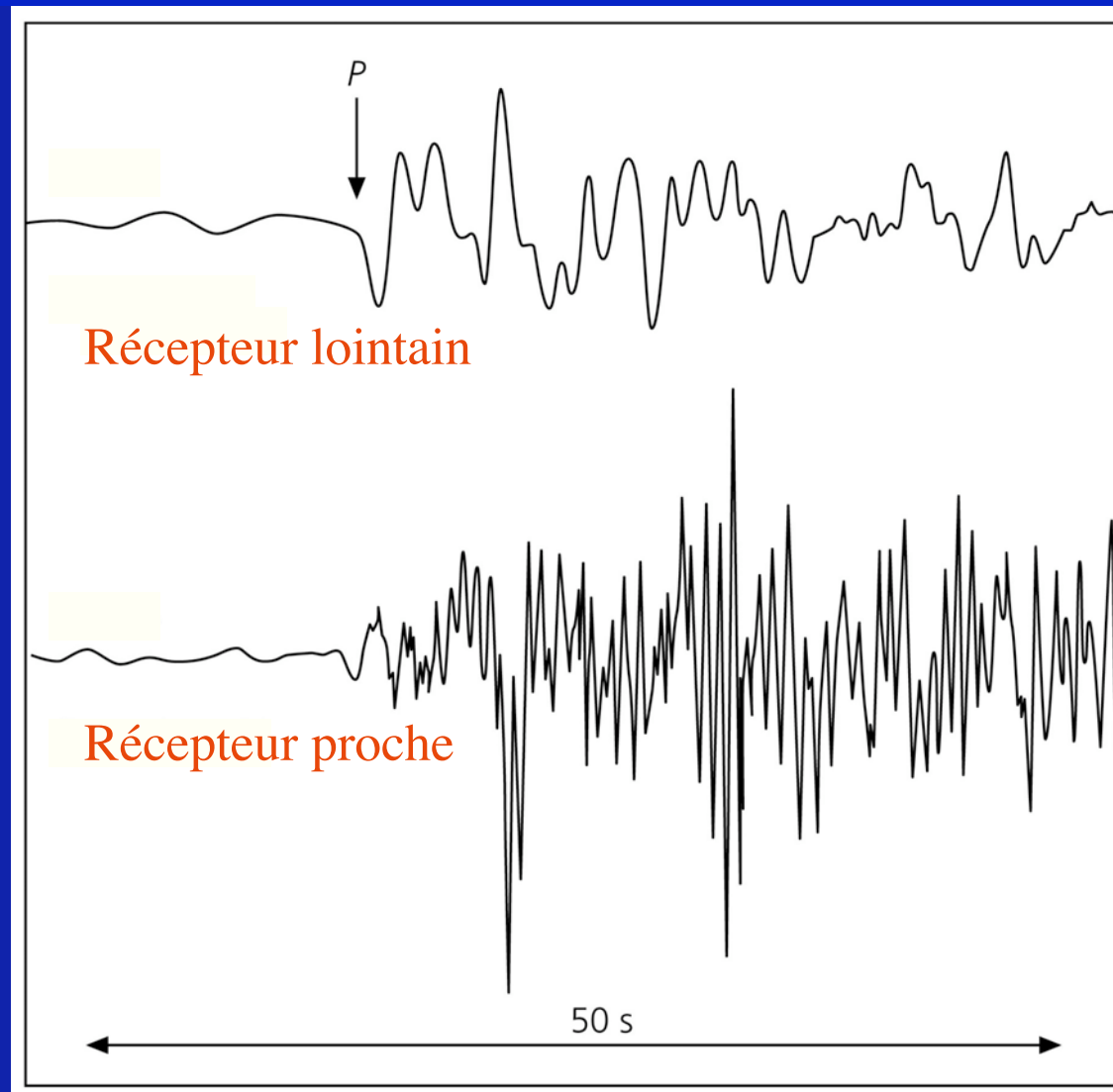
# ATTENUATION DES ONDES

## 1. Ondes de volume

**Géométrie** : l'onde se propage avec un front d'onde sphérique. L'énergie se conserve (à peu près). La surface mise en mouvement au front croît en  $r^2$  ( $r$  = distance de la source). Donc l'énergie de l'onde décroît en  $r^{-2}$ .



# Atténuation : les hautes fréquences sont atténuées plus fortement



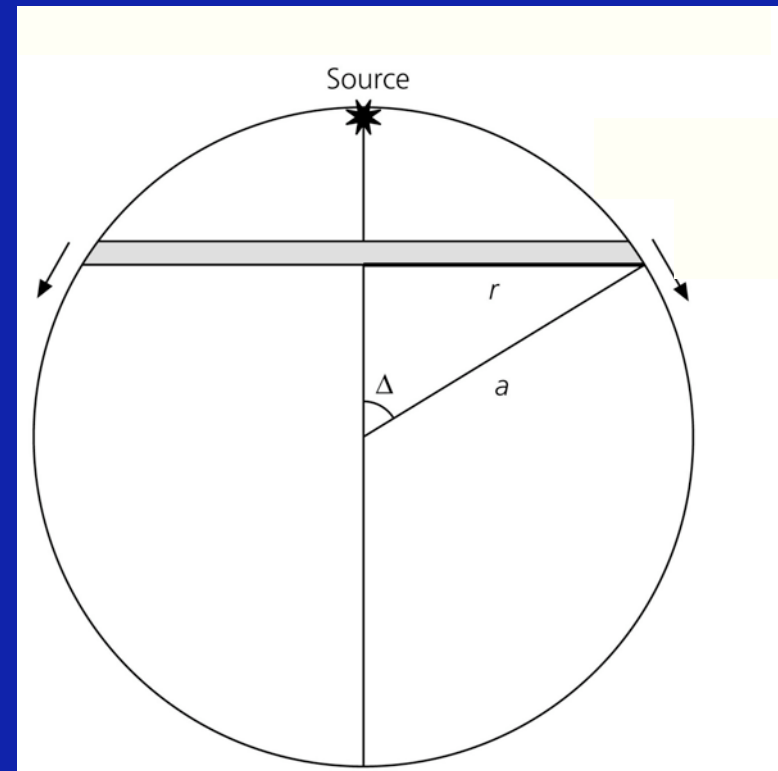
# ATTENUATION DES ONDES DE SURFACE

Le front d'onde est une ligne dont la longueur est proportionnelle à  $r$ .  
L'énergie varie donc en  $1/r$ .

MOINS D'ATTENUATION  
QUE POUR  
LES ONDES DE VOLUME:  
PLUS DANGEREUSES.

$$r = a \sin \Delta$$

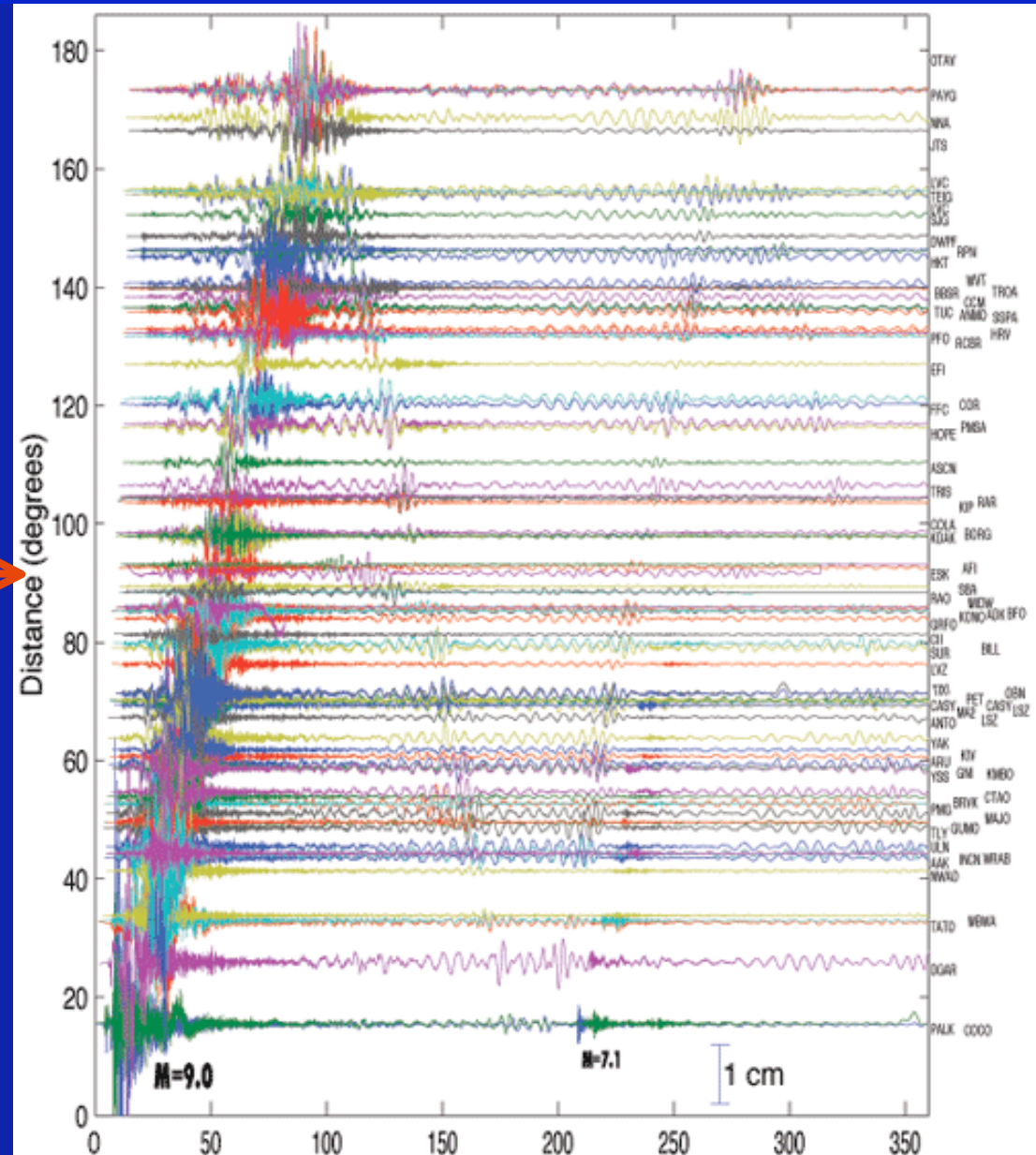
Maximum pour  $\Delta = 90^\circ$   
Minimum pour  $\Delta = 0$  ou  $180^\circ$ .



**Energie minimum pour  $\Delta = 90^\circ$ ,  
Maximum pour  $\Delta = 0^\circ$  et  $180^\circ$**

# Tremblement de terre de Sumatra (décembre 2004)

Atténuation maximum

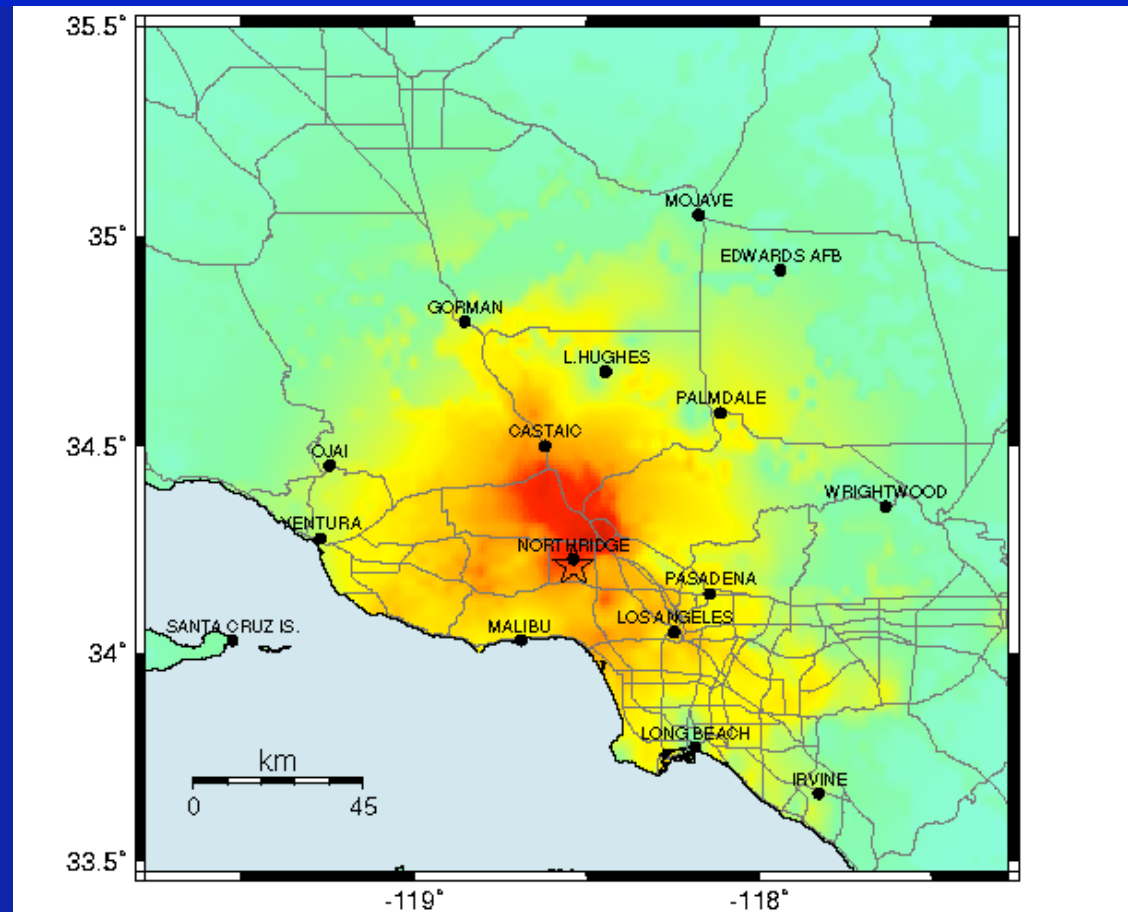


Temps (minutes)



# Attenuation des effets d'un séisme

## Séisme de Northridge (1994)

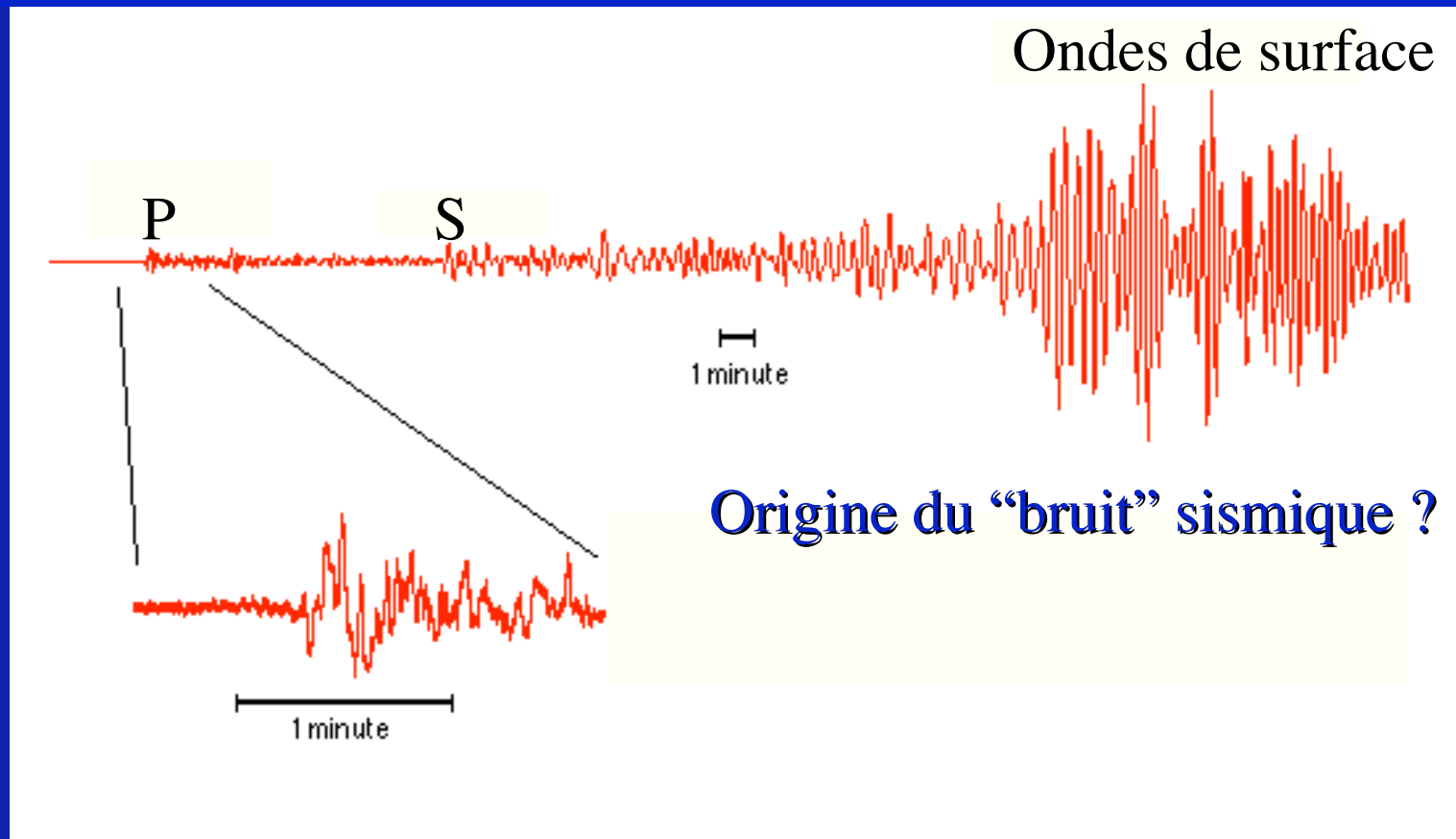


Intensité

I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
---	--------	----	---	----	-----	------	----	----

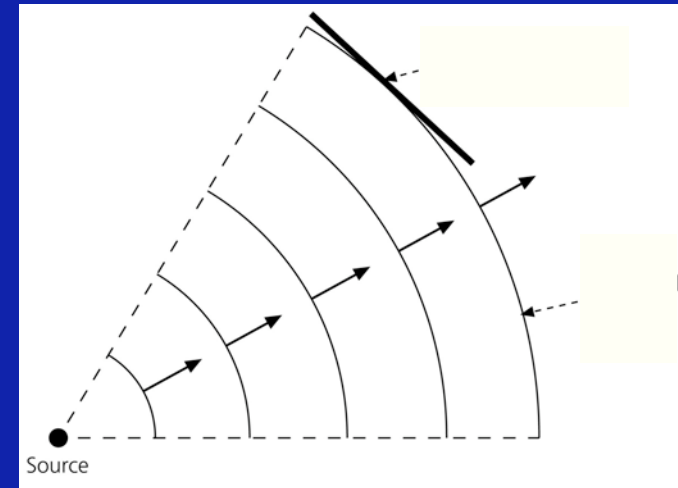
# Séisme de Izmit, Turquie (17 sept. 1999) $M = 7.8$

Enregistrement à Boston, Massachusetts  
(11 minutes après)

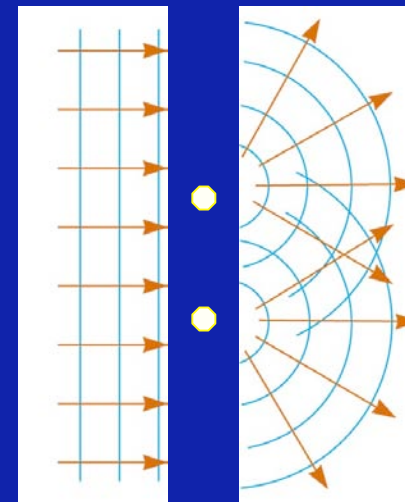


# ATTENUATION DES ONDES

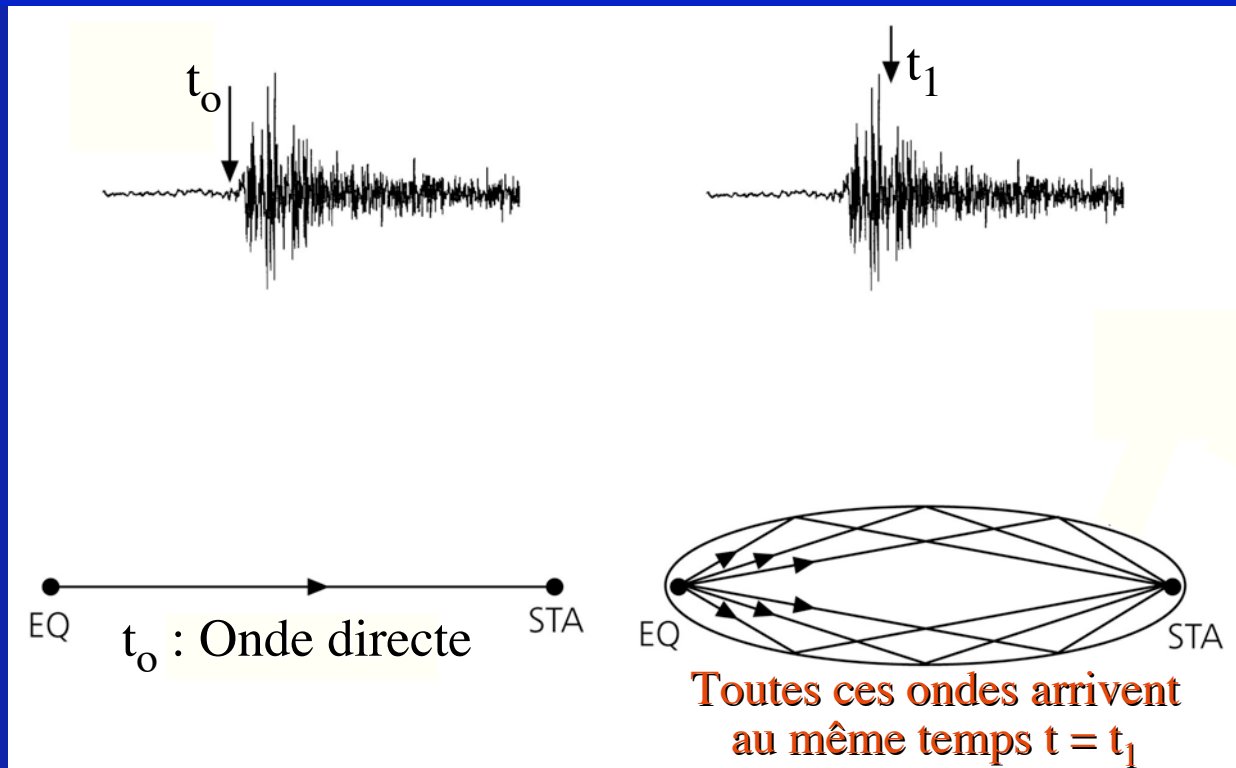
## 1) Géométrie.



2) **Diffusion - dispersion** : l'onde rencontre des hétérogénéités (obstacles). L'énergie est ré-émise dans toutes les directions.



# Les réverbérations sismiques (coda)

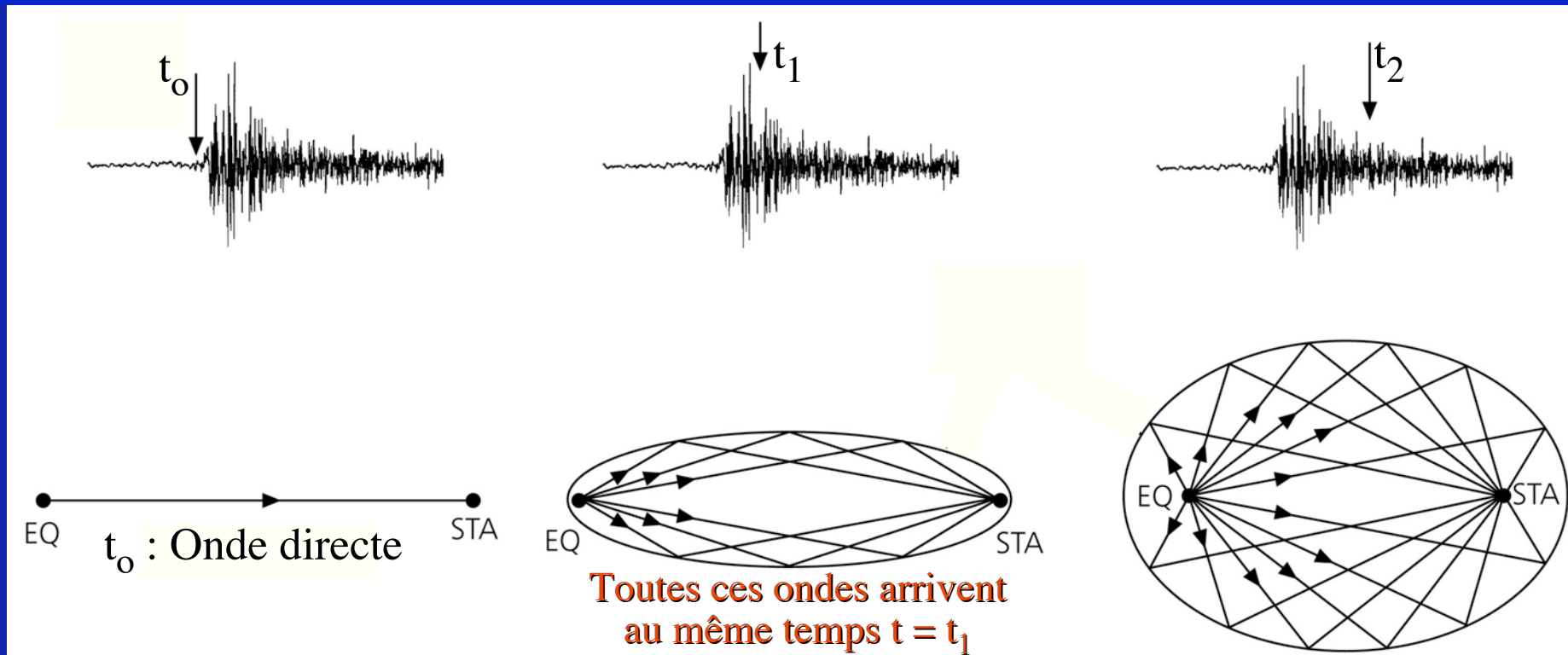


L'onde directe a le trajet le plus court et arrive la première à  $t = t_0$ .

A un temps  $t > t_0$ , des ondes réfléchies par les innombrables hétérogénéités du sous-sol arrivent. On peut dessiner le lieu des points de réflexion pour lesquels les ondes ont le même temps de trajet jusqu'au récepteur.

On peut montrer que ce lieu est une ellipse (dans un milieu à vitesse uniforme).

# Les réverbérations sismiques (coda)

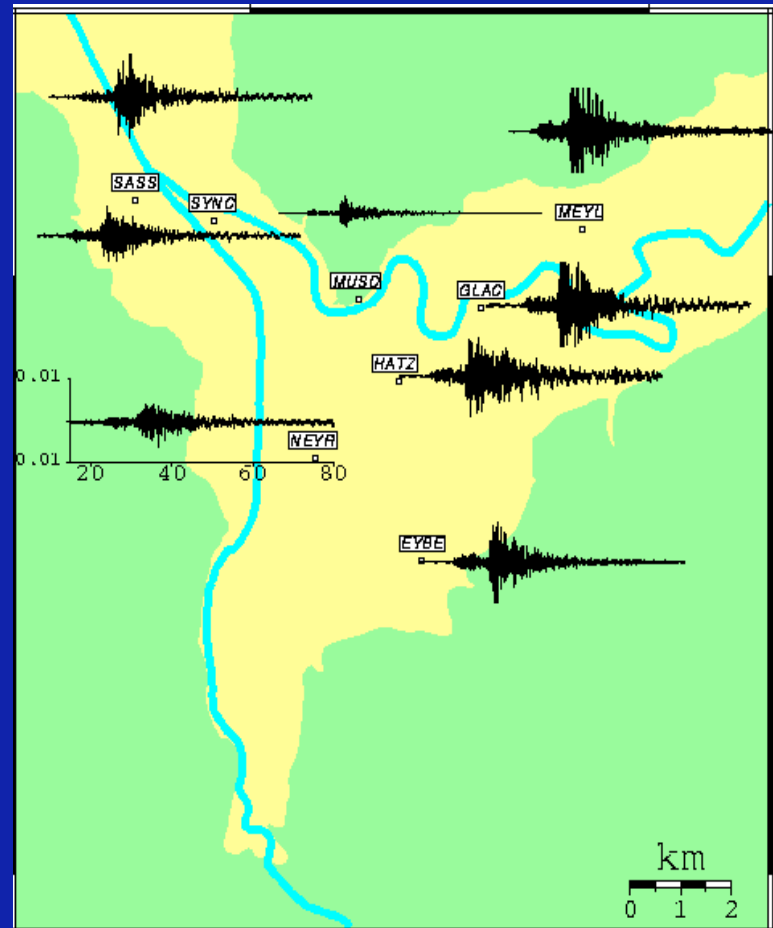


L'onde directe a le trajet le plus court et arrive la première à  $t = t_0$ .

A un temps  $t > t_0$ , des ondes réfléchies par les innombrables hétérogénéités du sous-sol arrivent. On peut dessiner le lieu des points de réflexion pour lesquels les ondes ont le même temps de trajet jusqu'au récepteur.

On peut montrer que ce lieu est une ellipse (dans un milieu à vitesse uniforme).

## Effets de site : région de Grenoble



Séisme de Nice

# Focalisation - défocalisation des ondes par une interface irrégulière

