

Sismologie

Introduction

Les séismes: comment sont-ils générés?

Contraintes, déformation, élasticité et rupture

Les séismes: comment les étudier?

Les ondes sismiques

Mesures d'un séisme et analyse d'un sismogramme

Localisation, magnitude, intensité,...

Imagerie de la Terre

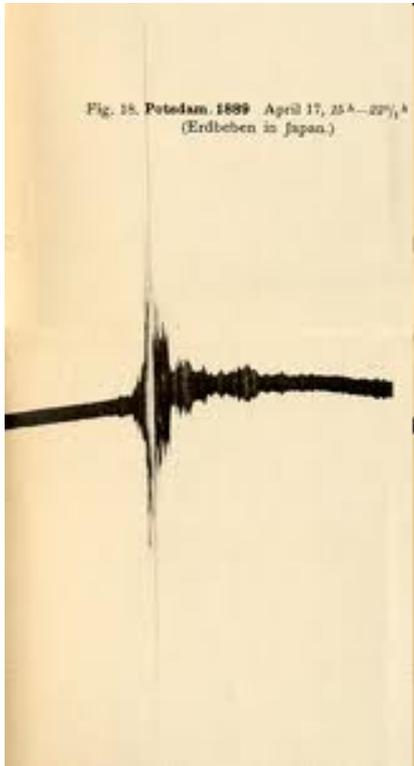
Structure interne et tomographie sismologique

Sismique réflexion et sismique réfraction

Risque sismique et prévention

Tsunami et trémors volcaniques

Les séismes:
comment les étudier?



Paschwitz 1889: enregistre le premier sismogramme à Potsdam le 18 Avril 1889, du séisme de Tokyo du 18 avril 1889!

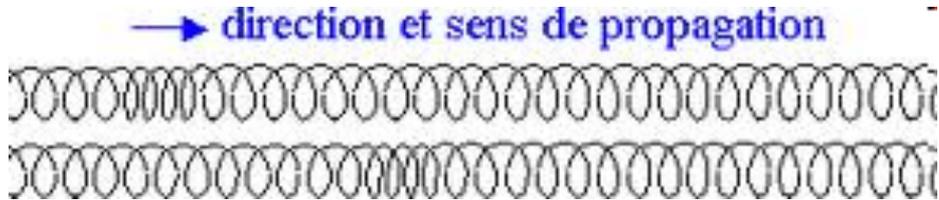
Mise en évidence de la propagation à travers le globe des ondes élastiques émis par un séisme!

Identification des petites ondes (onde de volume) et grandes ondes (onde de surface)

Les séismes:
comment les étudier?

Propagation des ondes

Propagation d'ondes



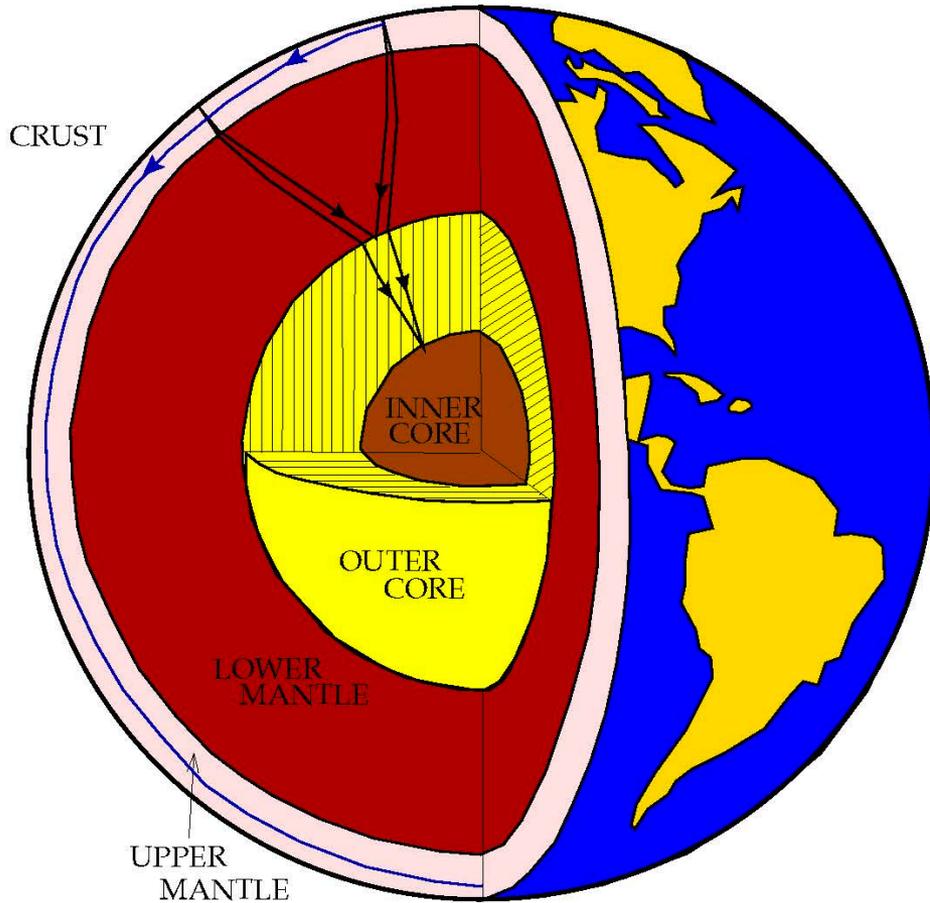
Une onde est le phénomène de **propagation d'une perturbation**.

Onde élastique: le milieu reprend sa position initiale après le passage de la perturbation.

PAS DE TRANSPORT DE MATIERE

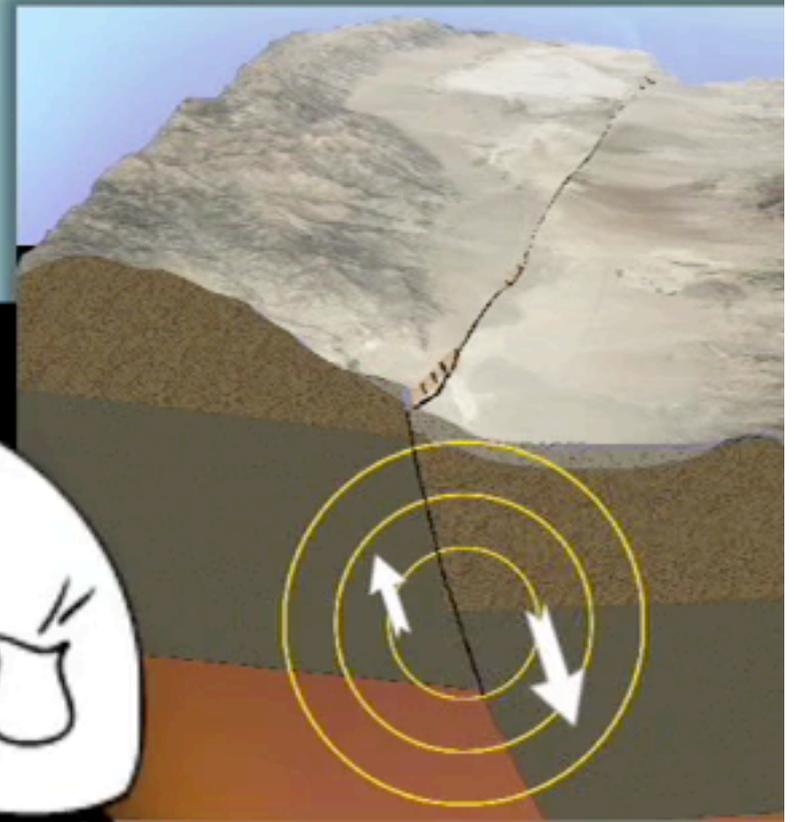
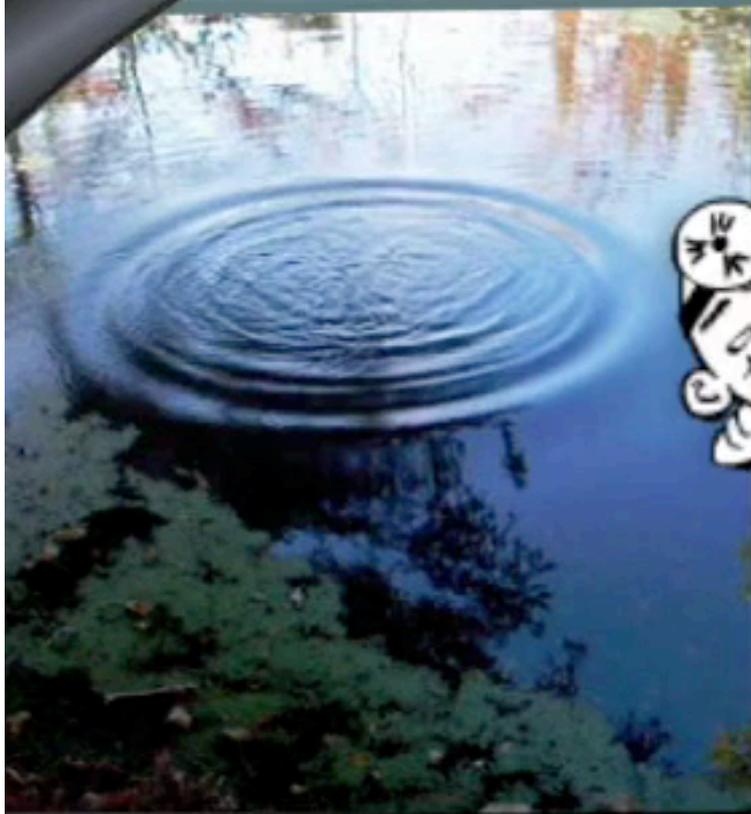
TRANSPORT ENERGIE

Les ondes dans la Terre



- les ondes de Volume: onde P et S
 - investigation des profondeurs de la Terre
- les ondes de surface: onde de Love et de Rayleigh
 - exploration du manteau supérieur

Can an earthquake be compared to a drop of water?



Equation d'ondes

$$\nabla^2 u = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 u = \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

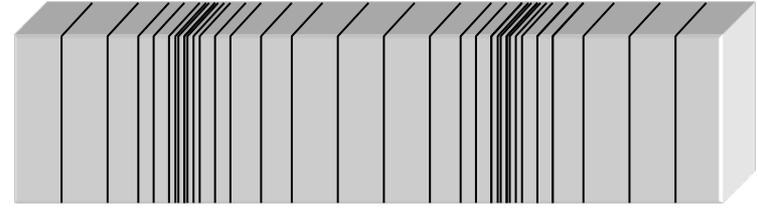
$$\nabla^2 u = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Les ondes de volume

Les ondes P (ou Ondes primaires) :

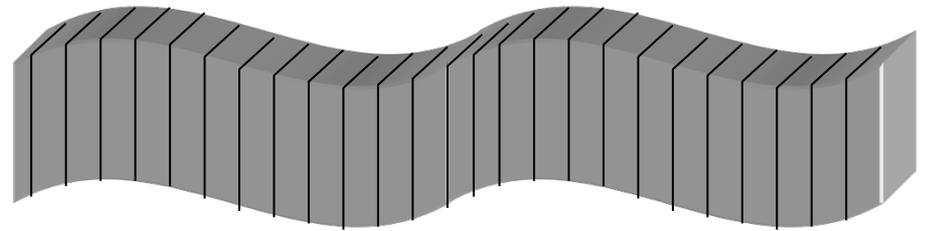
Ce sont des ondes de compression (ou ondes longitudinales). Ce sont les plus rapides (≈ 6 km/s près de la surface).



Onde P \longrightarrow

Les ondes S (ou Ondes secondaires) :

Ce sont des ondes de cisaillement (ou ondes transversales). Elles ne se propagent pas dans les fluides. Elles sont plus lentes que les ondes P (en surface de l'ordre de 4 km/s).

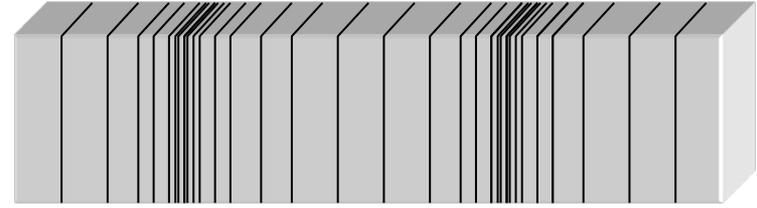


Onde S \longrightarrow

Les ondes de volume

Les ondes P (ou Ondes primaires) :

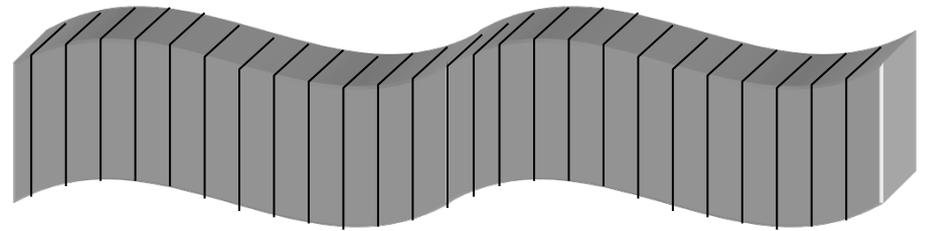
Ce sont des ondes de compression (ou ondes longitudinales). Ce sont les plus rapides (≈ 6 km/s près de la surface).



Onde P \longrightarrow

Les ondes S (ou Ondes secondaires) :

Ce sont des ondes de cisaillement (ou ondes transversales). Elles ne se propagent pas dans les fluides. Elles sont plus lentes que les ondes P (en surface de l'ordre de 4 km/s).



Onde S \longrightarrow

Les ondes P et S ne déforment pas les roches de la même façon!

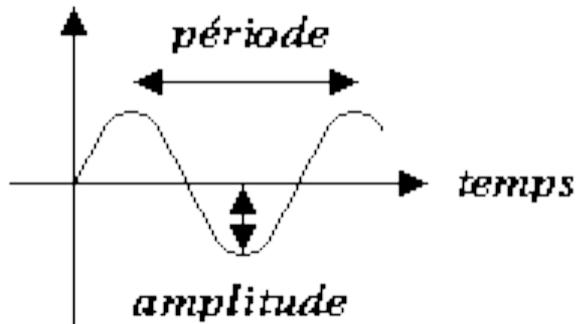
Equation d'ondes

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \qquad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

- $V_p > V_s$
- $V_s = 0\% \text{ à } 70\% V_p$

Fréquence et longueur d'onde

déplacement



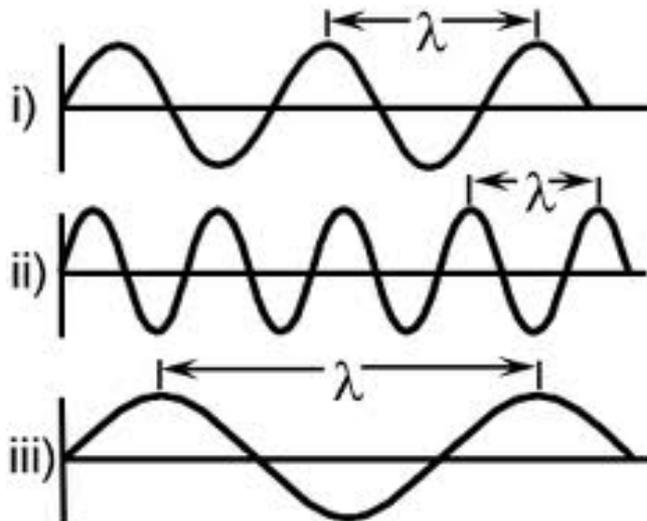
$$T = 1/F$$

$$\lambda = v/F = v \cdot T$$

T: période (s)

F: fréquence (Hz)

λ : longueur d'onde (m)



Résolution?

Les ondes de volume

Matériau	Vp (km/s)	Vs (km/s)
Air	0.33	-
Eau	1.4-1.5	-
Hydrocarbure	1.3-1.4	-
Granite	5.5-6	2.8-3.3
Grès	1.4-4.3	0.7-2.8
Calcaire	5.9-6.1	2.8-3.0

- Température : la vitesse décroît quand T augmente.
- Pression : la vitesse croît quand P augmente.
- Fusion partielle : la vitesse décroît quand les roches sont partiellement fondues.

Les ondes de surface

Les ondes de Love.

Elles résultent de l'interférence entre des ondes S.

Mouvement dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation.

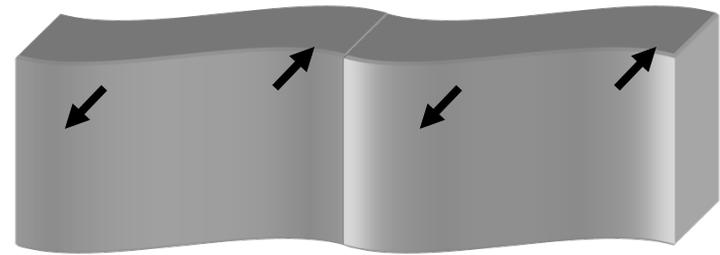
$$V_L = 0.96V_S$$

Les ondes de Rayleigh.

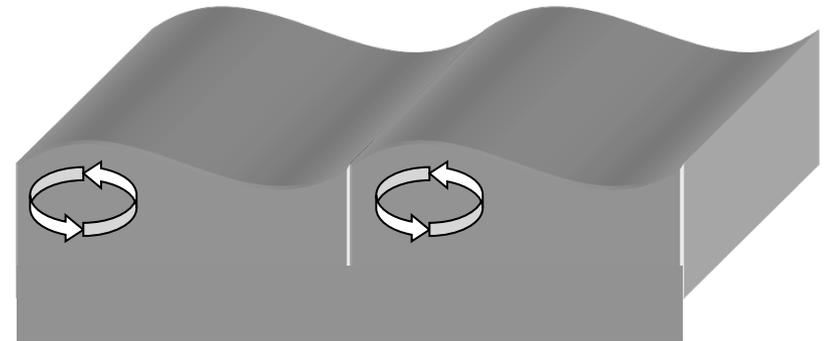
Elles résultent de l'interférence entre des ondes P et S.

Mouvement dans le plan vertical contenant la direction de propagation.

$$V_R = 0.92V_S$$



Onde de Love →



Onde de Rayleigh →

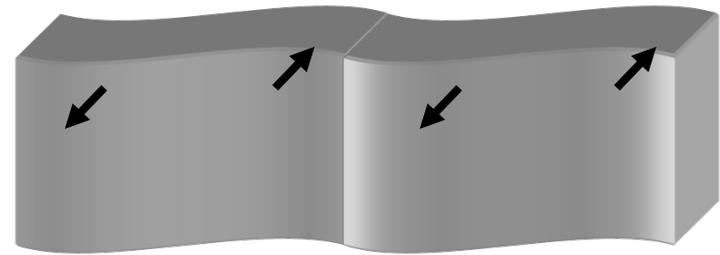
Les ondes de surface

Générées par **l'interférence des ondes de volumes** et guidées le long de la surface de la Terre.

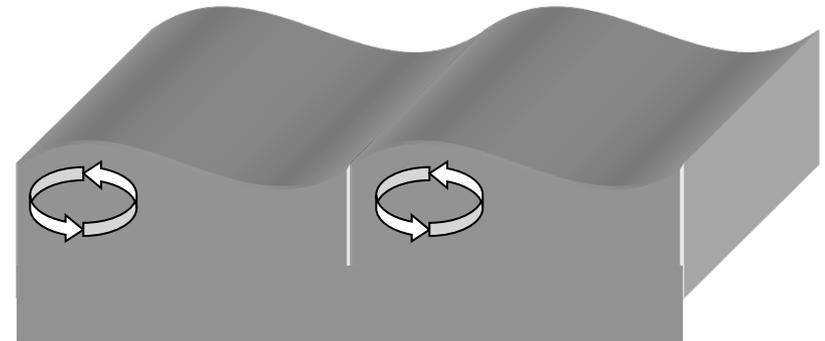
Amplitude: **décroît exponentiellement** avec la profondeur sous la surface.

Dispersive: la vitesse dépend de leur fréquence.

$$V_L > V_R$$



Onde de Love

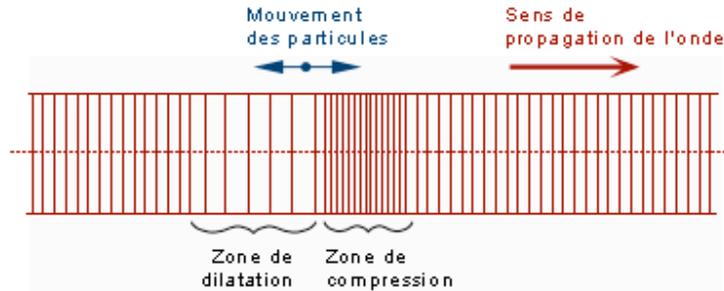


Onde de Rayleigh

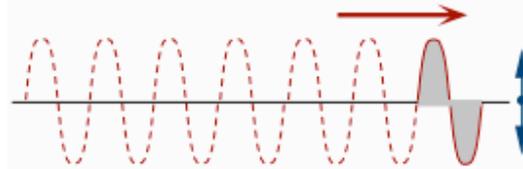


Ondes de volume et surface.

Onde P (compression)



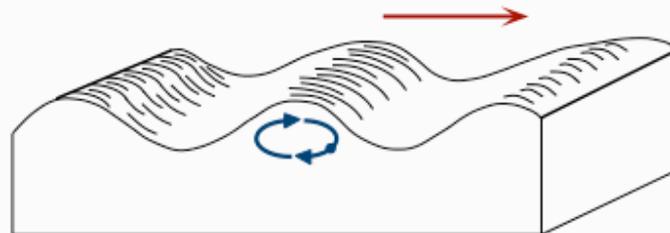
Onde S (cisaillement)



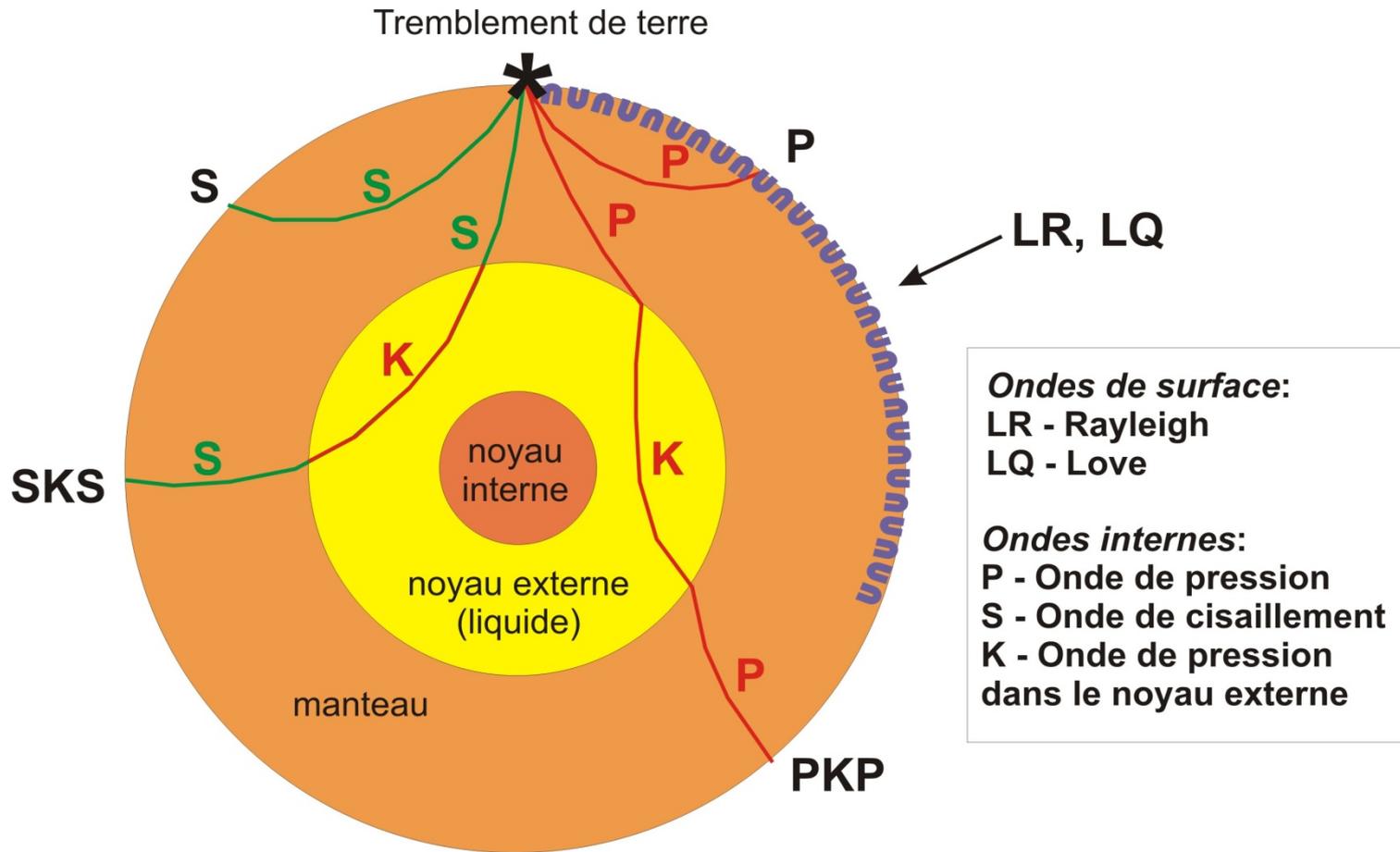
Onde L (de Love) (cisaillement)



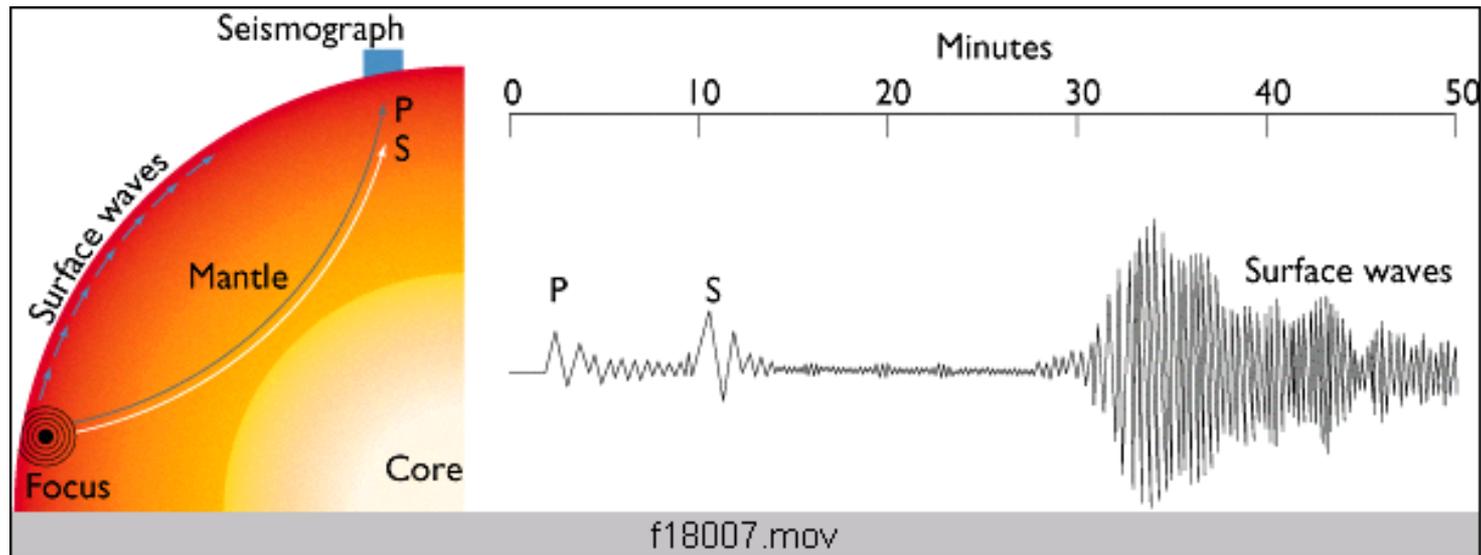
Onde de Rayleigh



Ondes de volume et surface.



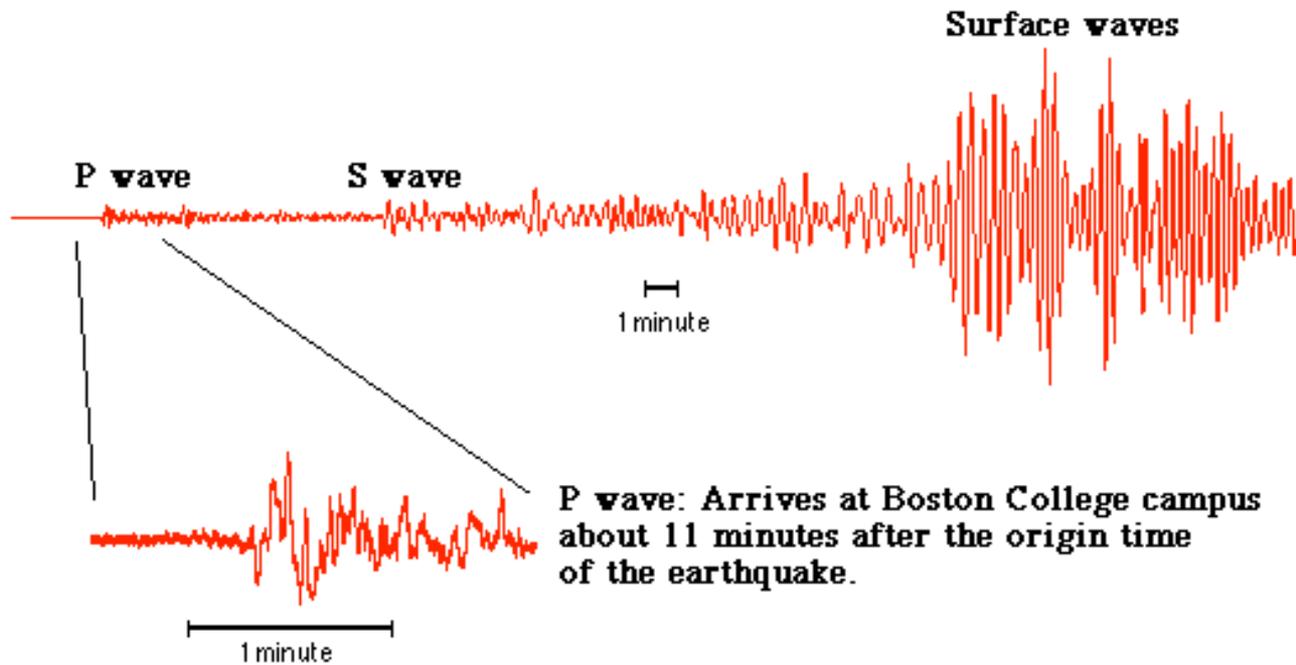
Ondes de volume et surface.



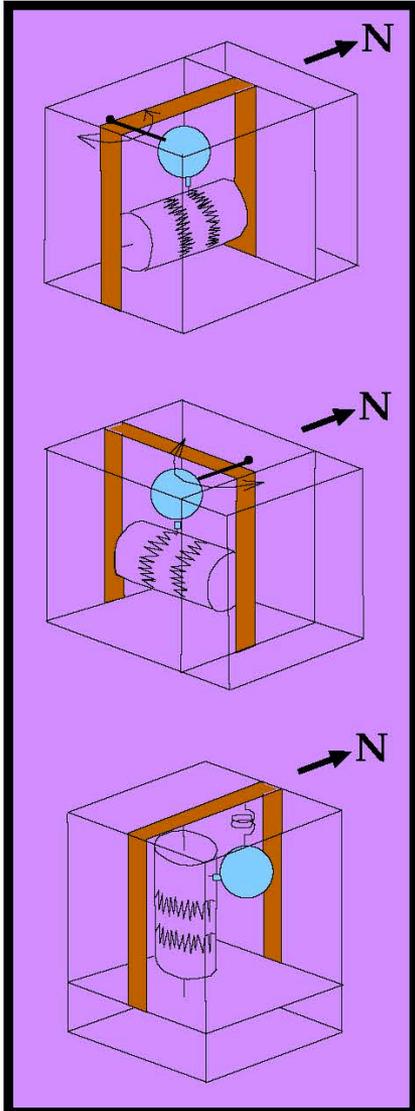
Ondes de volume et surface.

Seismogram of the Izmit, Turkey Earthquake (08/17/99, Ms 7.8)

Recorded by Weston Observatory Seismic Station in Devlin Hall
Department of Geology and Geophysics
Boston College

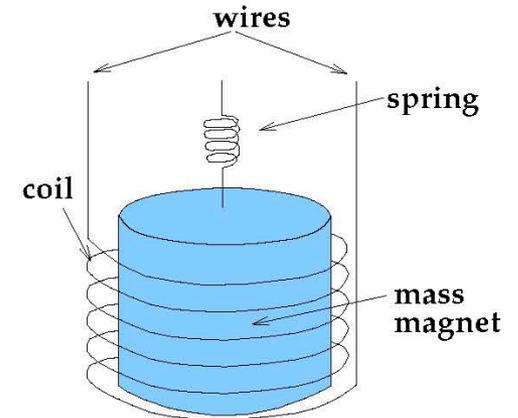


Seismomètre



- Détection du mouvement du sol dans les 3 dimensions de l'espace
 - Verticale: **Z** or **V**
 - Horizontale Nord-Sud : **NS**
 - Horizontale Est-Ouest : **EO**

- Aimant suspendu dans une bobine par un ressort
- Mouvement relatif de l'aimant par rapport à la bobine génère un petit courant électrique
- Convertit en enregistrement numérique



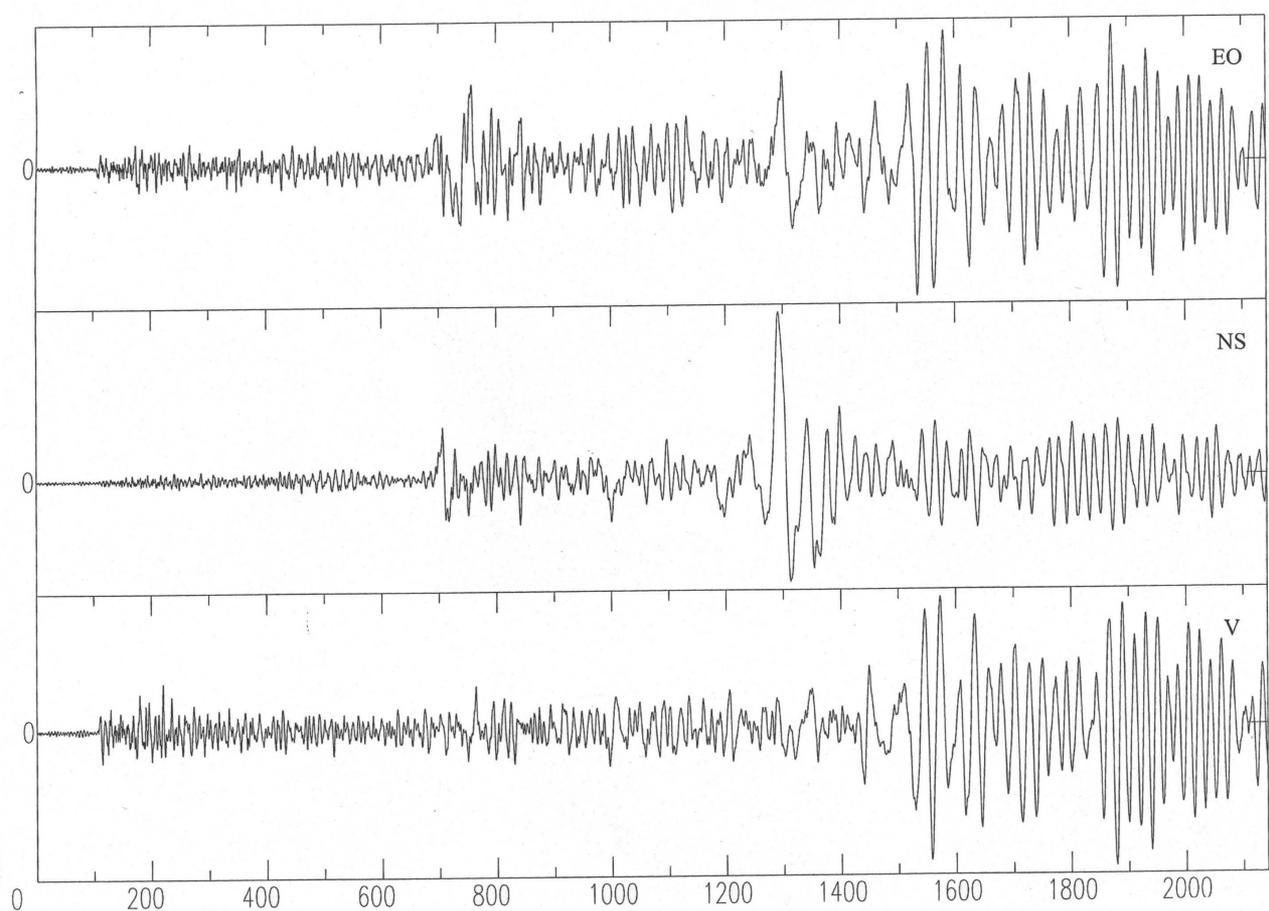


Building response to simplified seismic wave behavior as reflected in a **3-component seismogram**



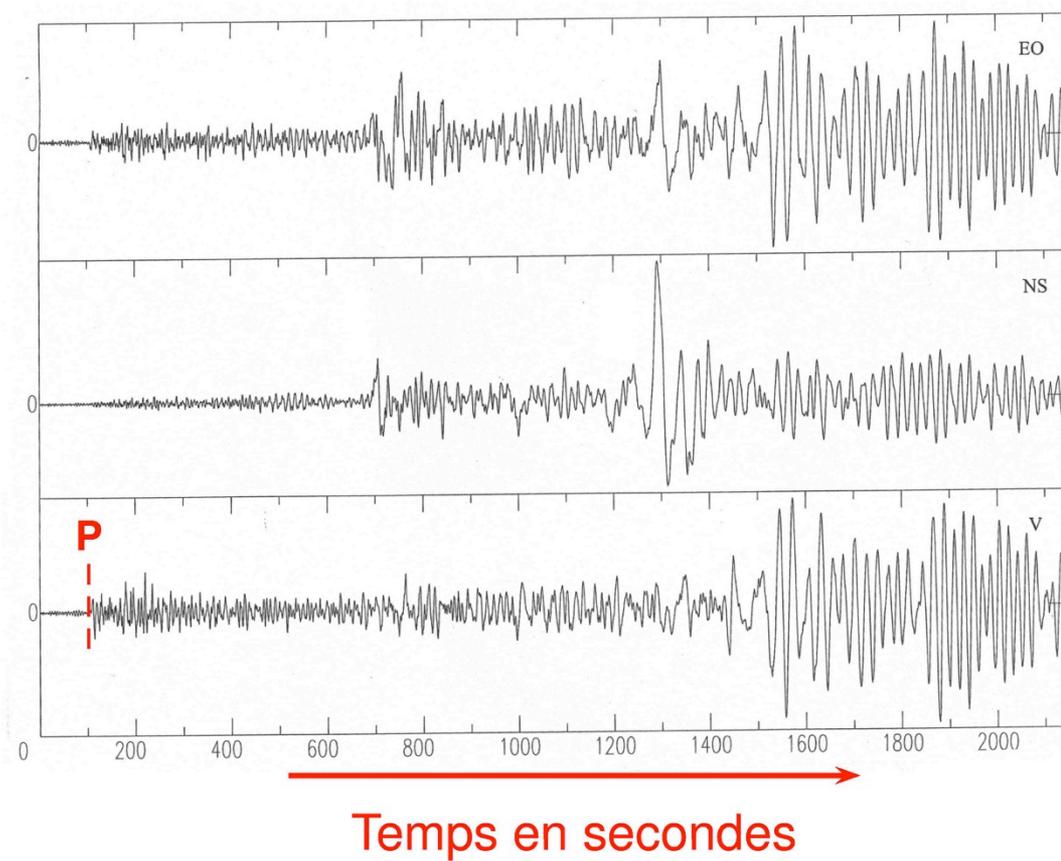
*All scales
are greatly
exaggerated*

Simogrammes: 3 composantes



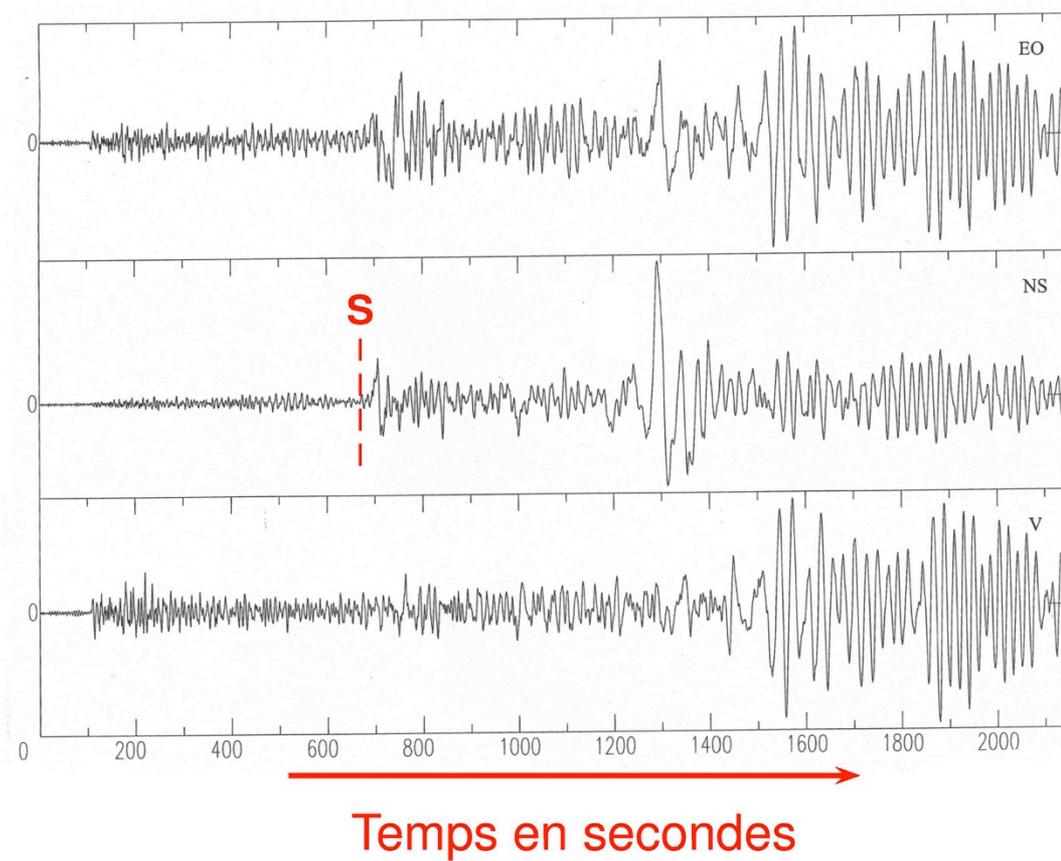
Enregistrement d'un évènement télésismique (distance entre le séisme et la station supérieur à 10° soit 1000km)

Identification de l'onde P



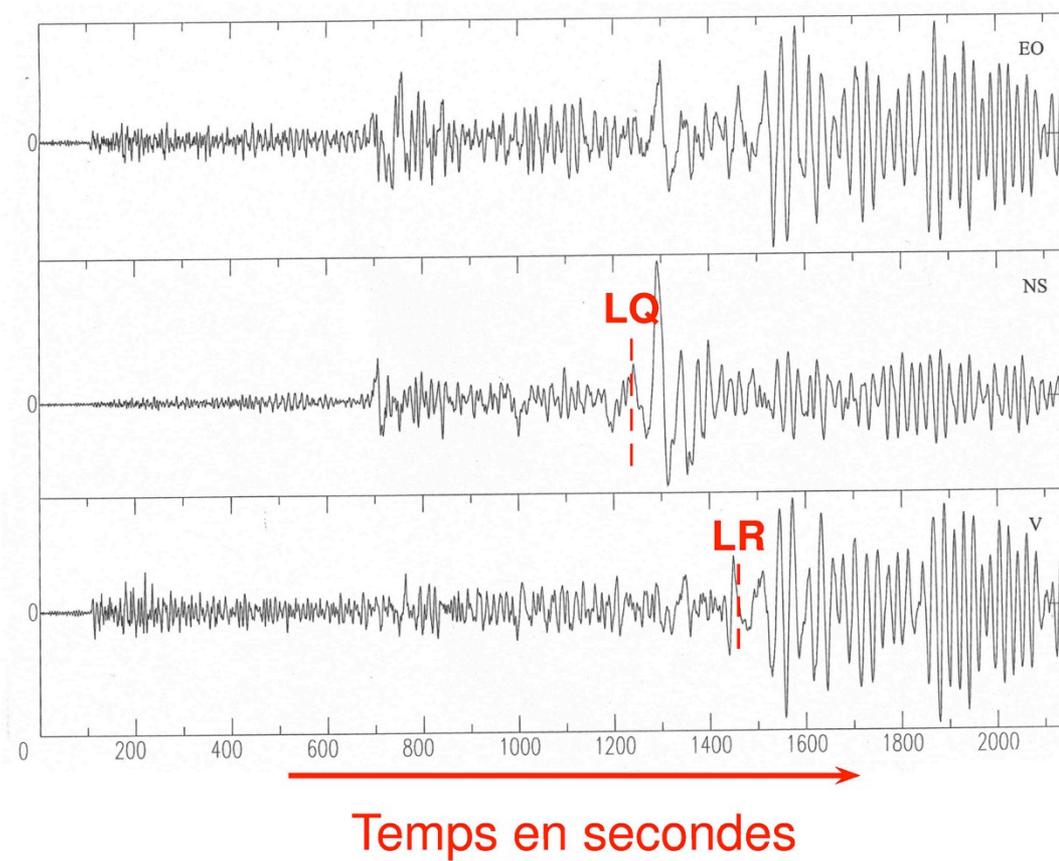
- Meilleure lecture sur la composante verticale
- Première arrivée en temps
- Contenu haute fréquence de l'onde aux alentours de 1 Hz (1 s)

Identification de l'onde S



- Lecture de l'onde S sur les composantes horizontales
- Arrive après l'onde P
- Contenu haute fréquence de l'onde S légèrement plus basse que l'onde P environ 0.25 Hz (4 s)

Identification des ondes de surface



- Lecture sur la composante verticale pour les ondes de Rayleigh (LR) item Lecture sur les composantes horizontales pour les ondes de Love (LQ)
- Les ondes de Love arrivent avant les ondes de Rayleigh
- Contenu basse fréquence des ondes de surfaces aux alentours de 0.1Hz (10s)

Fréquence et longueur d'onde

Le domaine fréquentiel des ondes enregistrées à la surface de la Terre est très large.

$F = 100 \text{ Hz}$ ($T = 0,01 \text{ s}$) : vibrations industrielles.

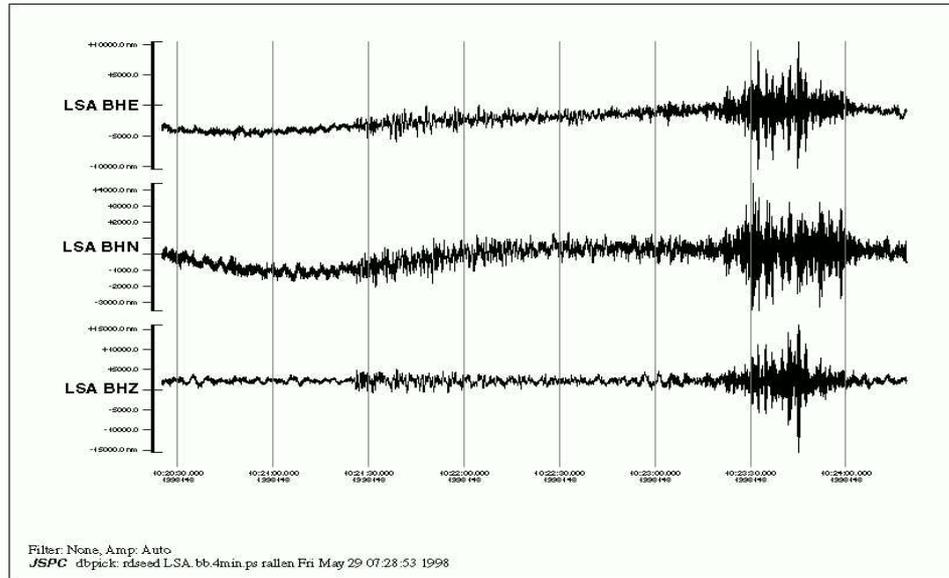
$F = 10 \text{ Hz}$: Agitations industrielles, explosions proches.

$F = 1 \text{ Hz}$: Explosions lointaines, séismes proches.

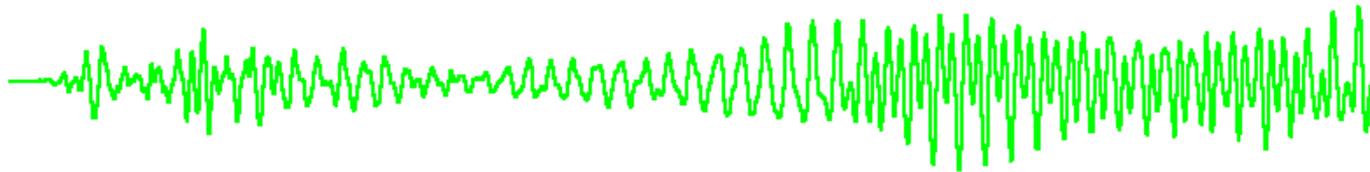
$F = 0,1 \text{ Hz}$: Ondes de volumes des séismes. Agitations naturelles.

$F < 0,001 \text{ Hz}$: Vibrations propres de la Terre. Marées terrestres.

Fréquence et origines des séismes

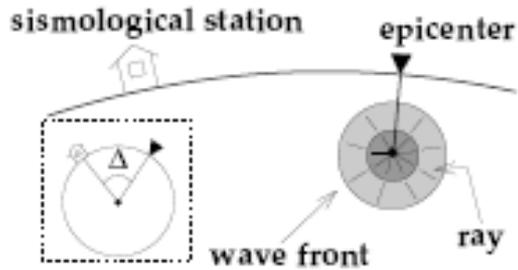


origine nucléaire (Pakistan)

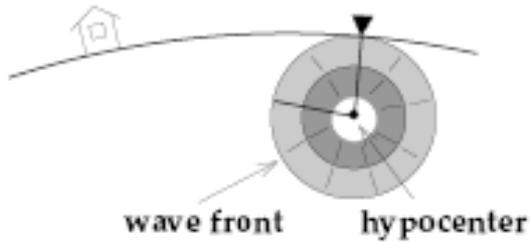


Origine volcanique.

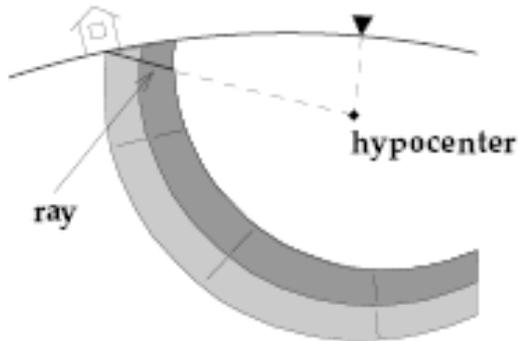
Front d'onde / rayon



Les ondes partent de la source dans toutes les directions formant une surface sphérique, le **FRONT D'ONDE**, s'agrandissant en s'éloignant de la source.

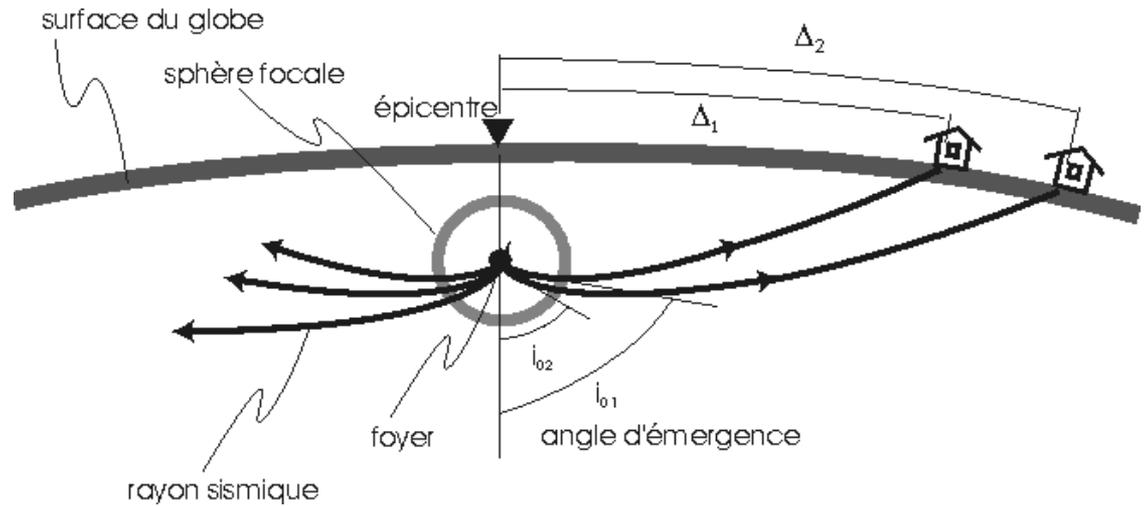
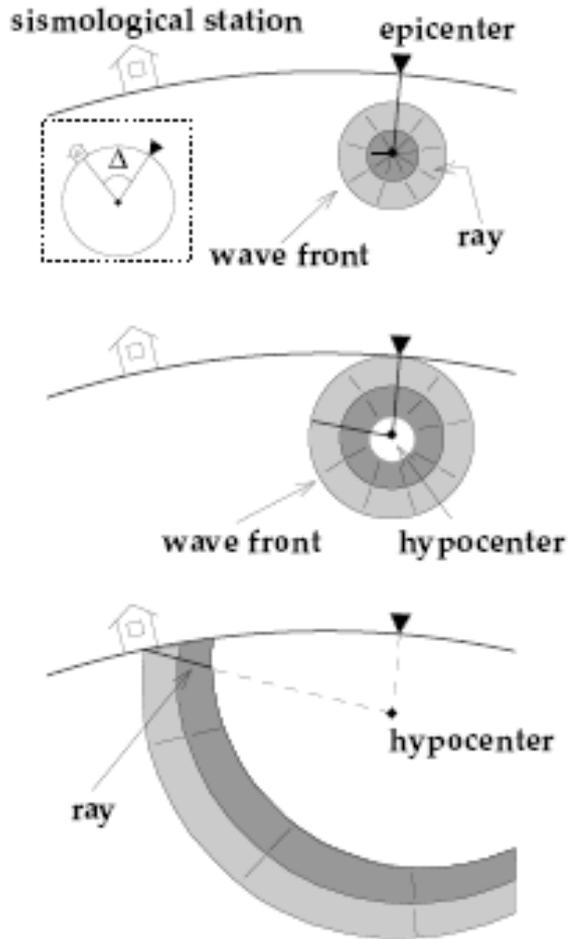


Les **RAIS** sont perpendiculaires au front d'onde, et inversement.



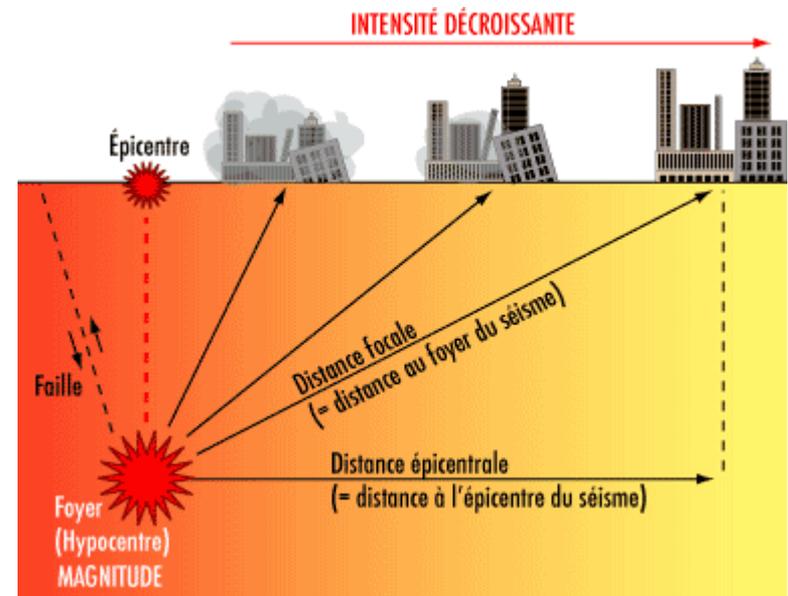
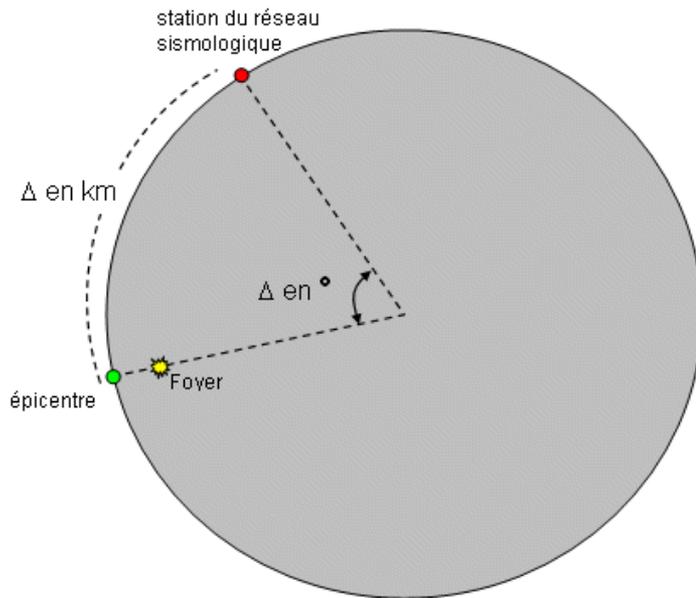
La **DISTANCE ÉPICENTRALE**, est l'angle depuis le centre de la Terre entre l'hypocentre et la station sismologique

Front d'onde / rayon / distance épacentrale



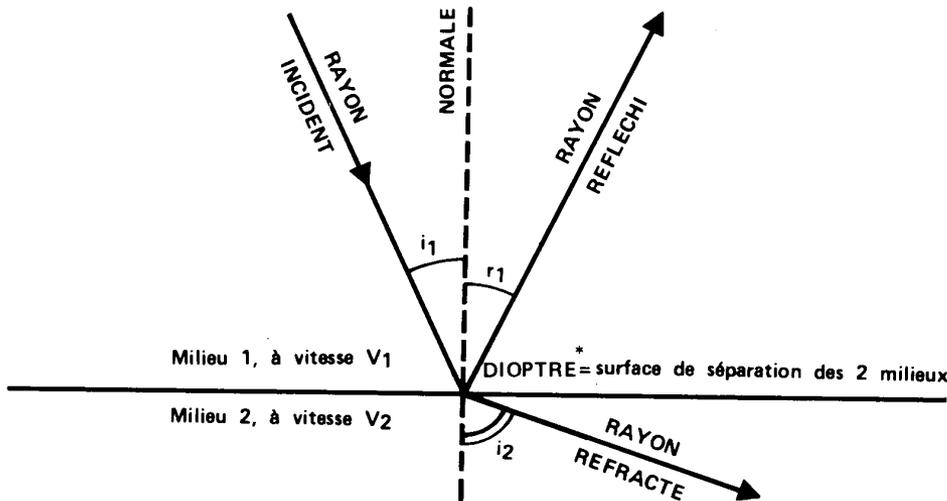
Distance épacentrale

distance épacentrale- foyer, épacentre, réseau sismologique
exprimée en Km ou en ° (en surface 1°= 111,105 km)



$$\Delta(km) = \Delta(^{\circ}) \times R \times 2\pi/360 \text{ avec } R=6371 \text{ km}$$

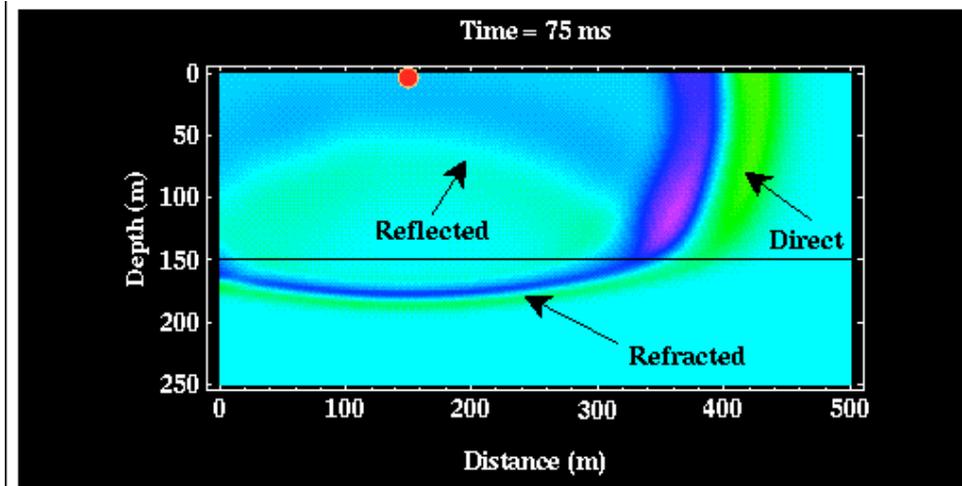
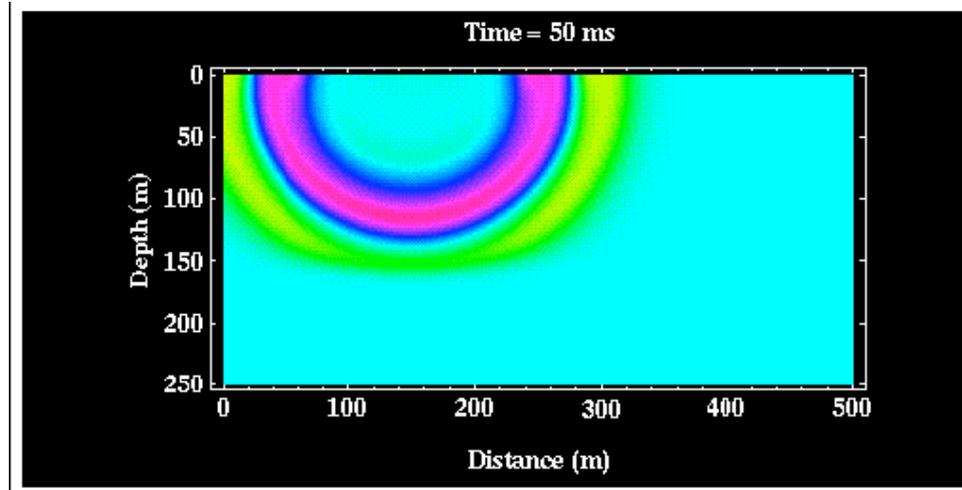
Loi de Snell-Descarte



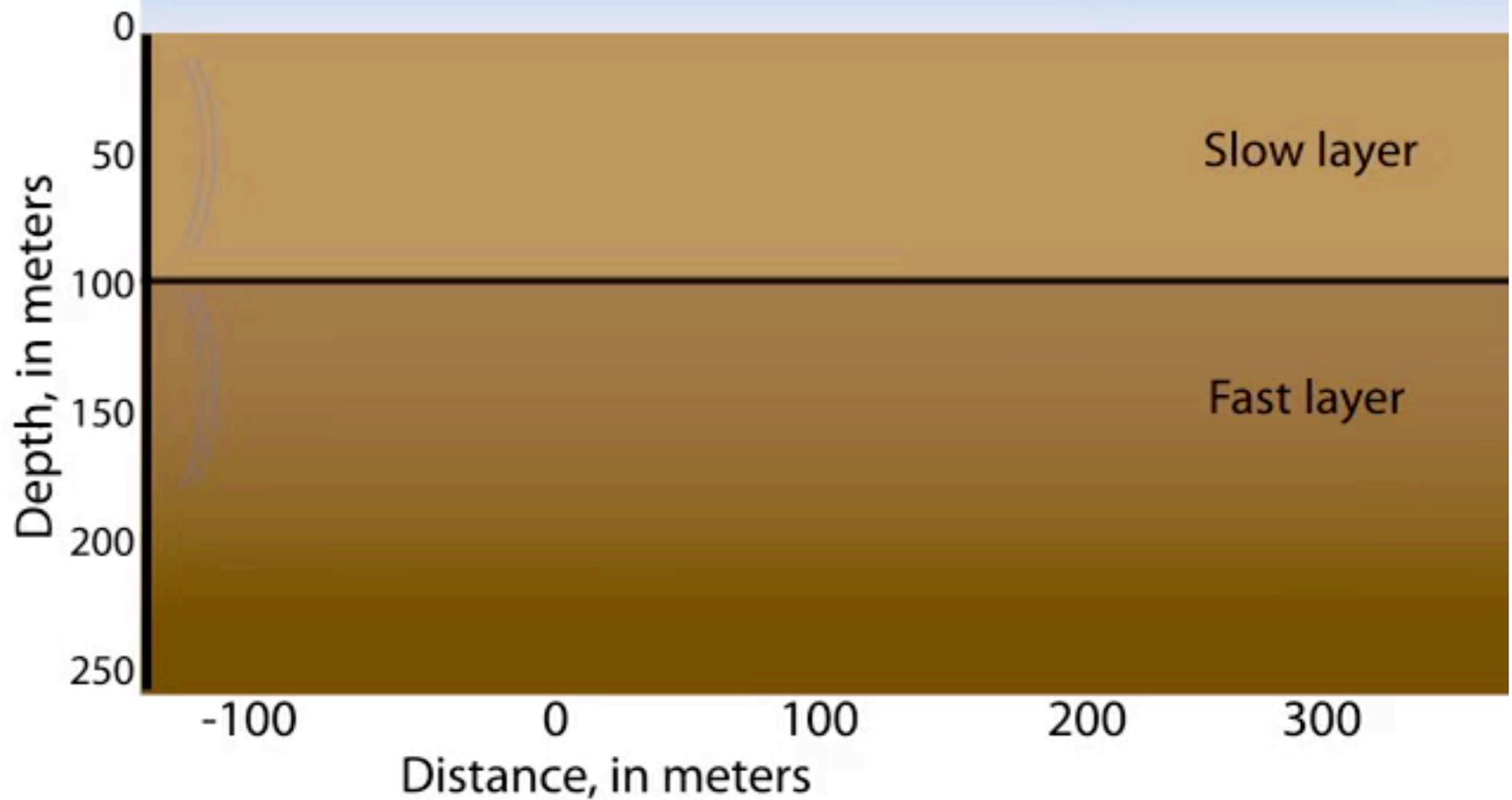
La Terre est à symétrie sphérique avec des couches concentriques 2 couches avec des vitesses différentes sont séparées par une discontinuité ou une interface.

La loi Snell-Descartes donne la relation entre les angles des rais à l'interface.

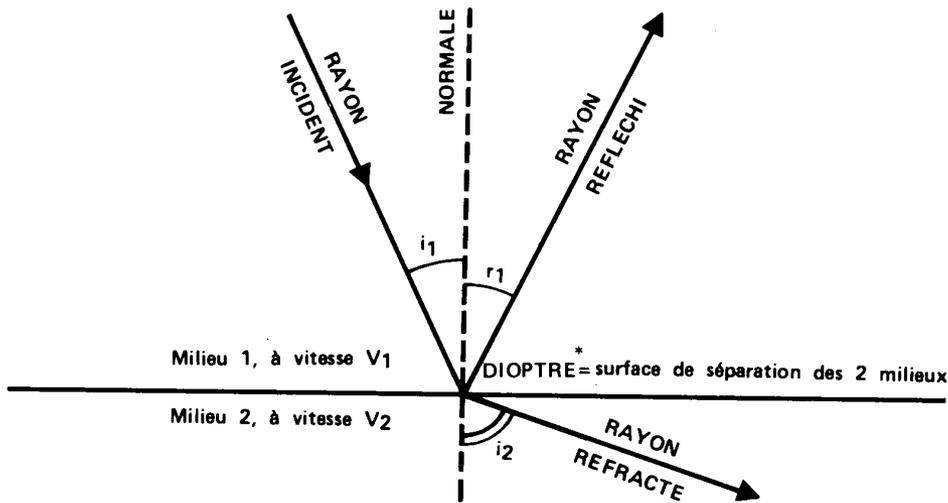
Réflexion - Réfraction



Seismic wave behavior across a single boundary



Loi de Snell-Descarte



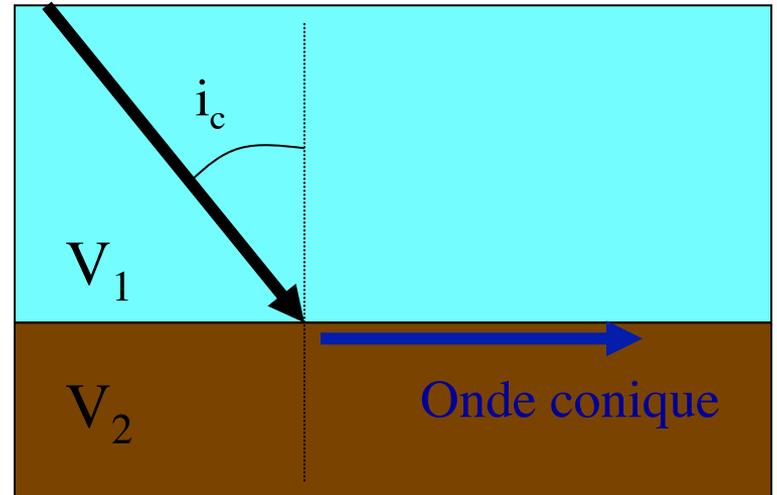
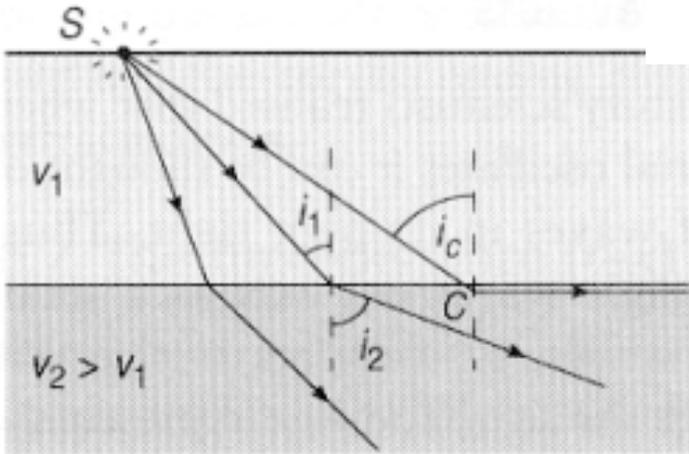
Changement propriétés
physiques

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2}$$

La loi nous donne les relations angulaires entre les rais incidents, réfléchies et réfractées.

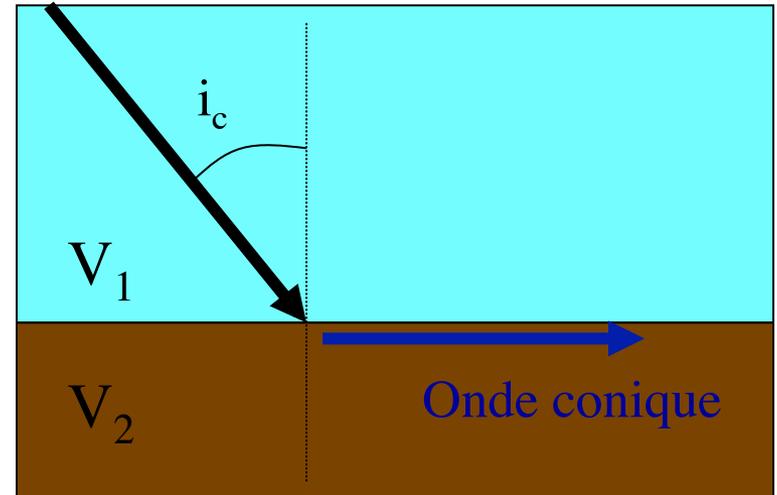
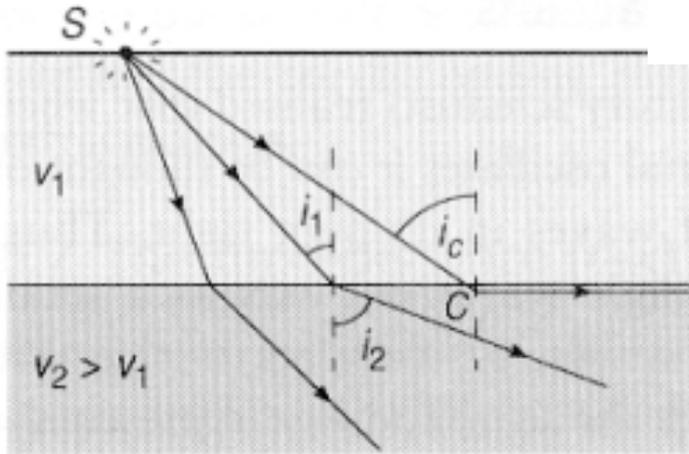
Onde conique

Si $V_2 > V_1$, il existe un angle critique:



Onde conique

Si $V_2 > V_1$, il existe un angle critique:

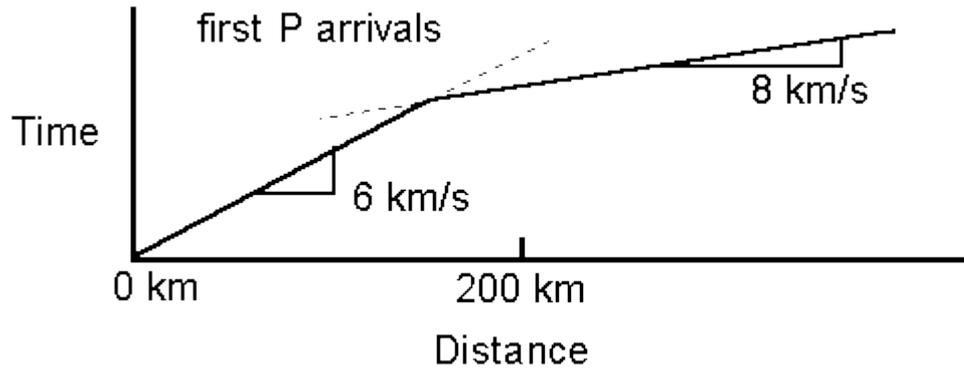


$$\frac{\sin i_c}{V_1} = \frac{\sin 90^\circ}{V_2}$$

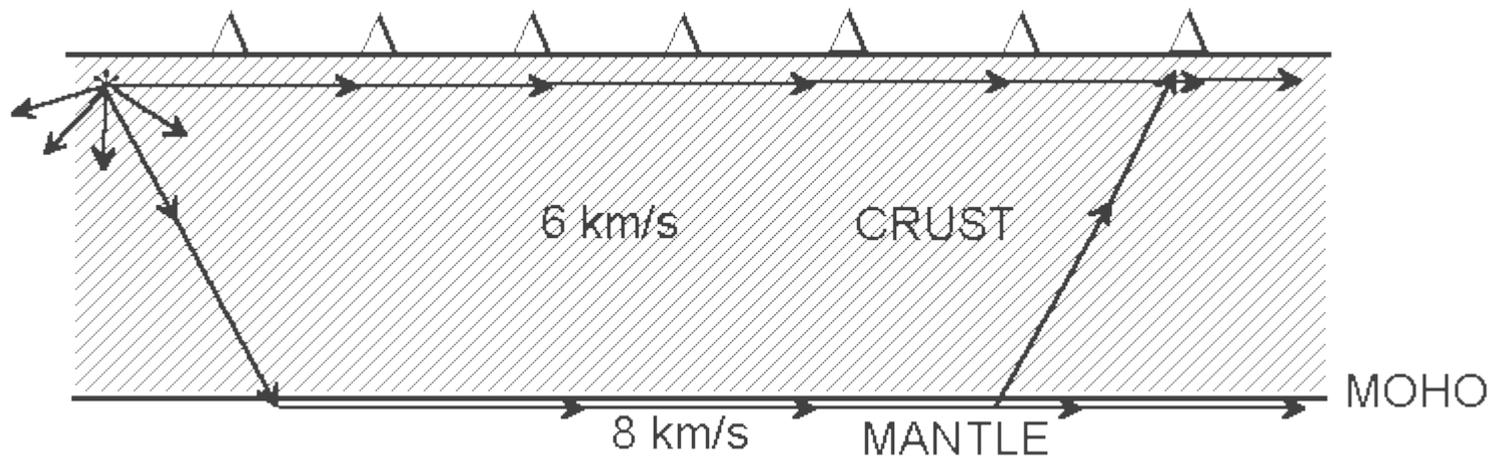
$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2}$$

Il existe donc un angle $i_1 = i_c$ au-delà duquel il n'y a plus d'onde transmise. Pour $i_1 = i_c$, $i_2 = 90^\circ$, l'onde est une **onde réfractée** appelée **onde conique**.

Onde conique



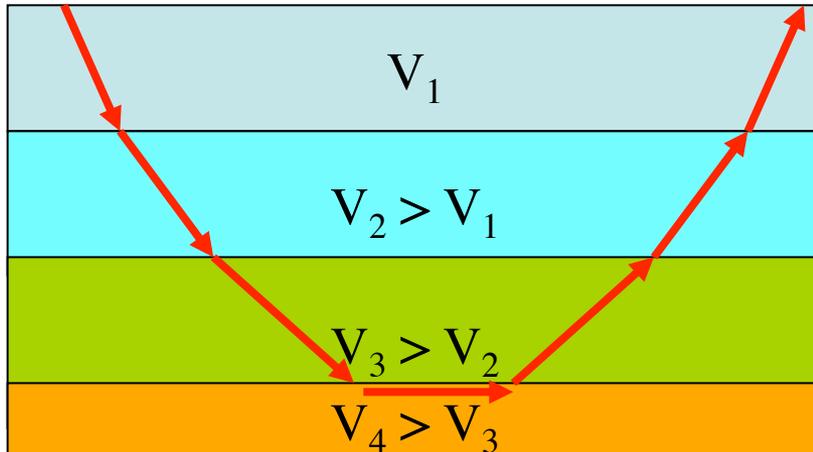
Imagerie du Moho (1909)



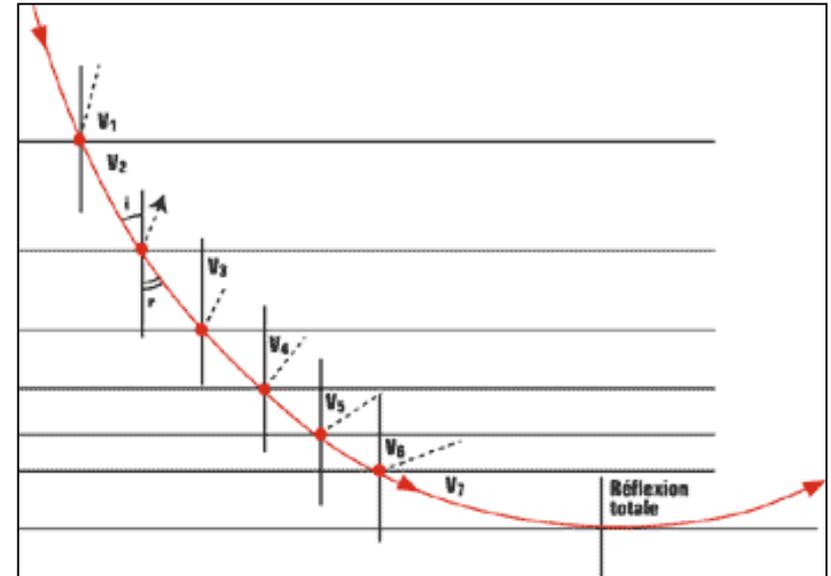
Épaisseur moyenne 35 km avec de larges variations.

Trajectoire courbes des rayons

La trajectoire courbe des rayons sismiques s'explique par l'augmentation de la vitesse des ondes avec la profondeur.



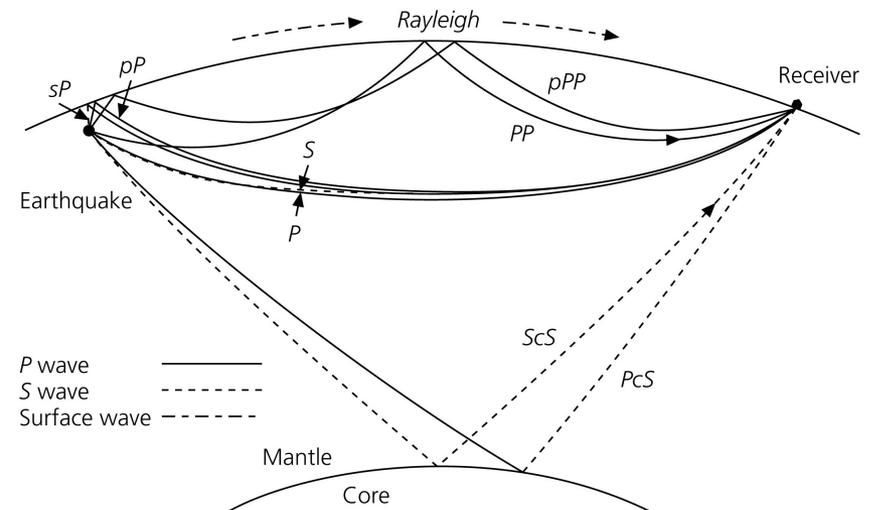
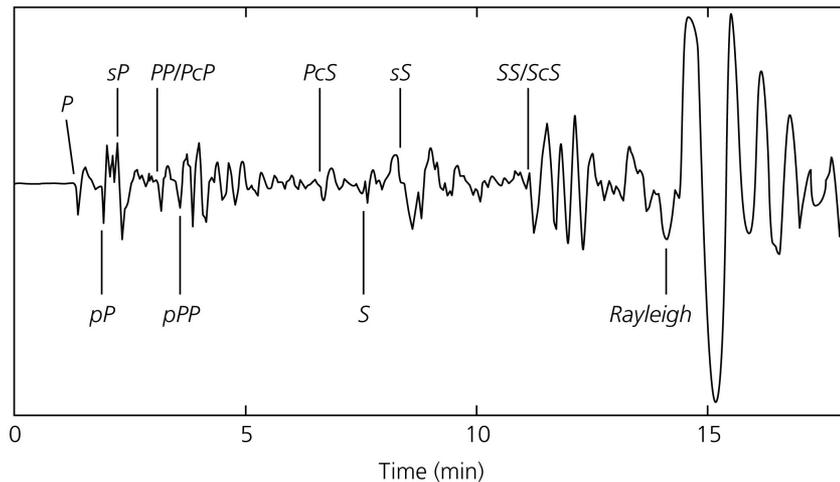
$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} = p$$



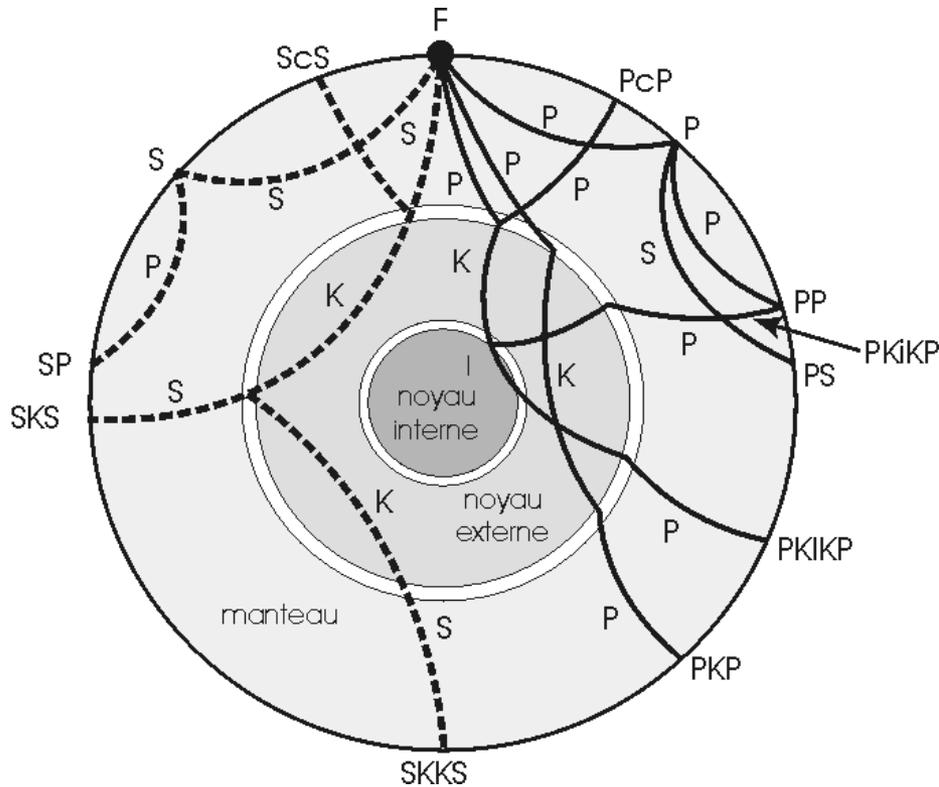
Conversion des ondes aux interfaces.

Lorsqu'une onde P (ou S) se réfléchit ou se transmet sur une surface de discontinuité, elle peut se convertir en S (ou P).

On dénombre ainsi différents types d'ondes qui traversent le globe (P, PP, PS,...).



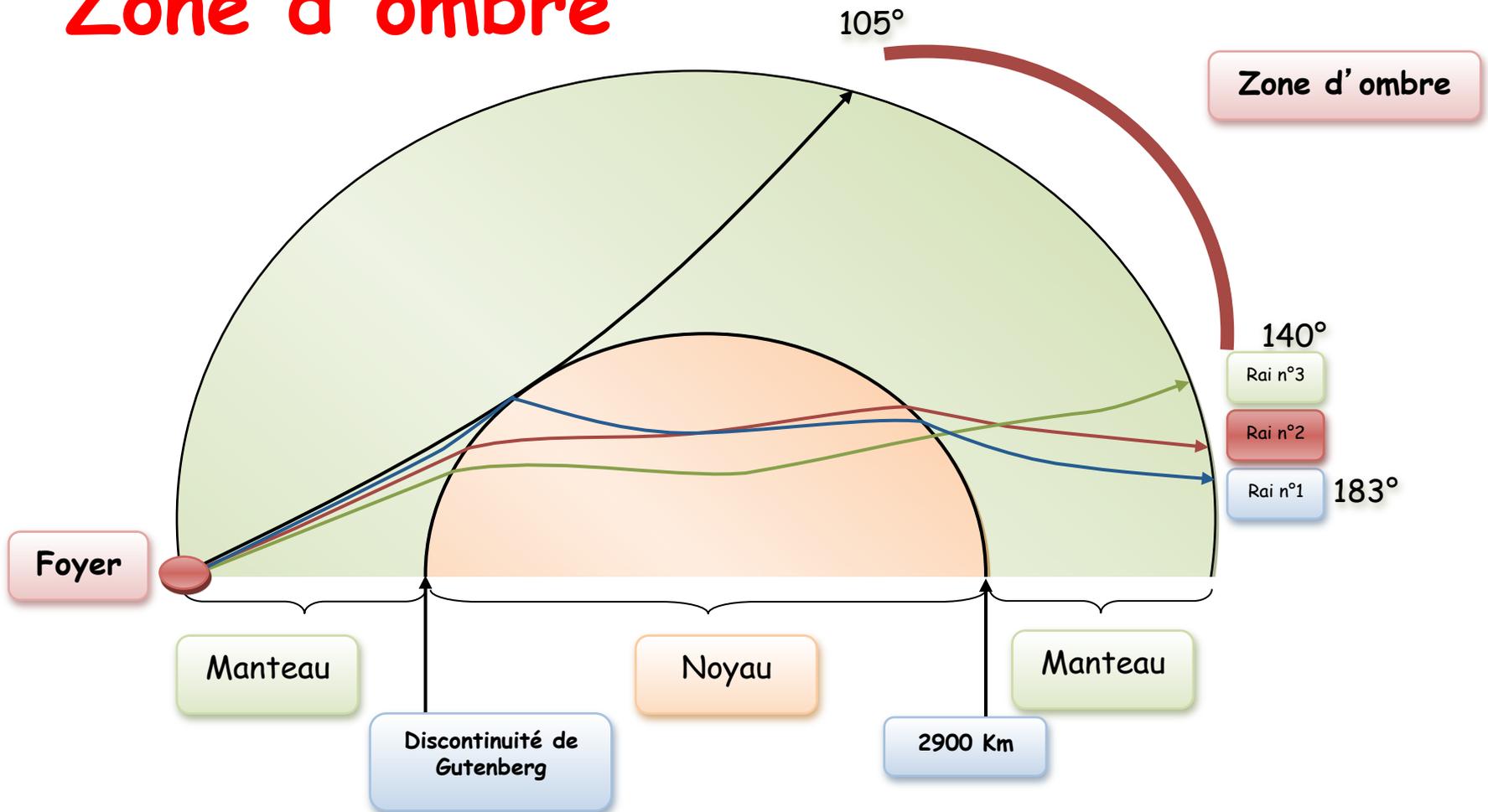
Réflexion - Réfraction



On désigne par :

- "c" une réflexion sur le noyau.
- "i" une réflexion sur la graine.
- "K" un trajet dans le noyau externe.
- "I" un trajet dans la graine (onde P).
- "J" un trajet dans la graine (Onde S)

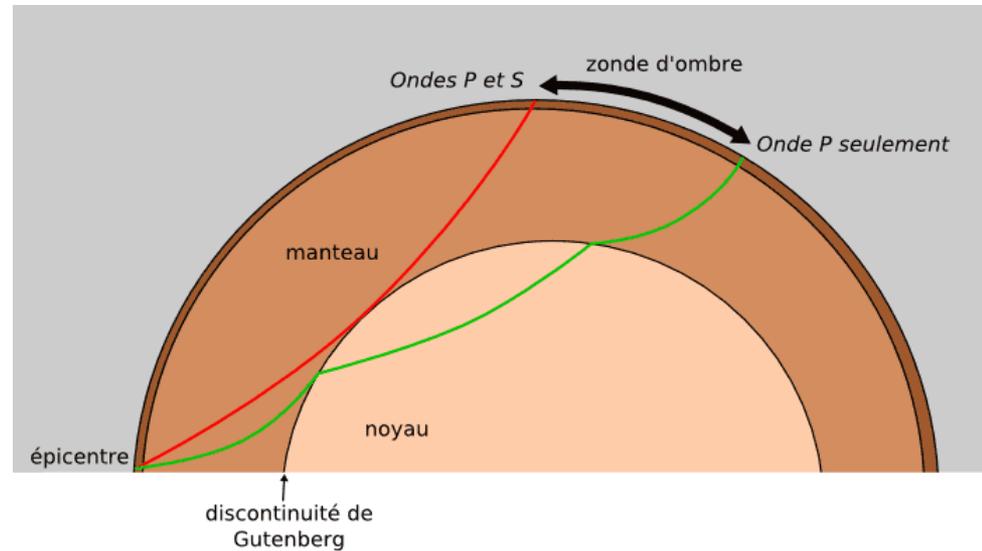
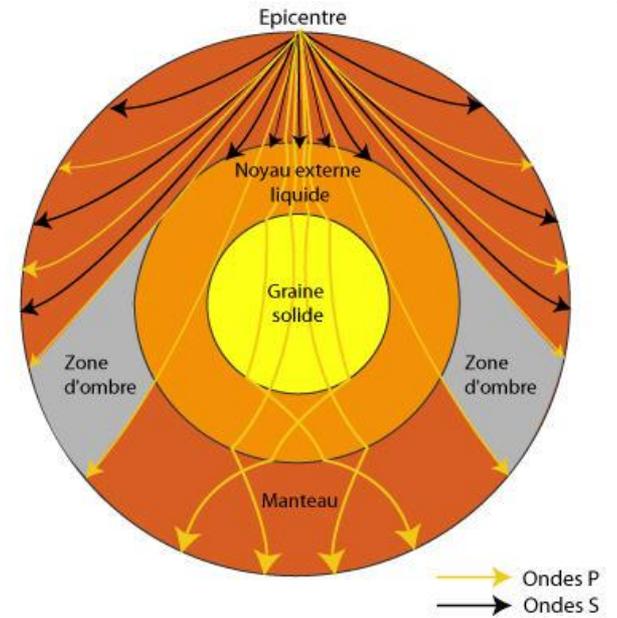
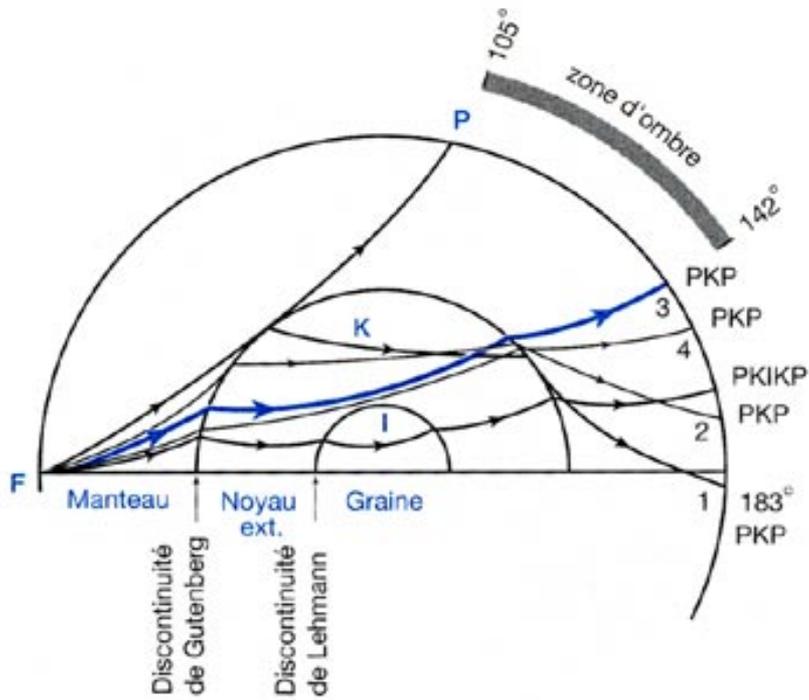
Zone d'ombre



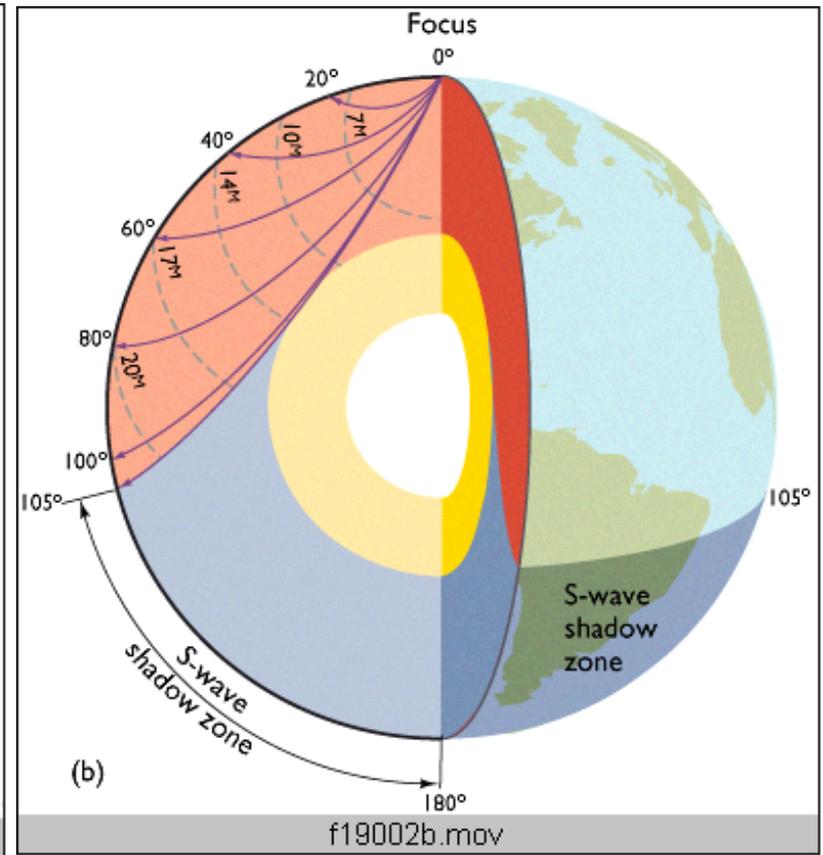
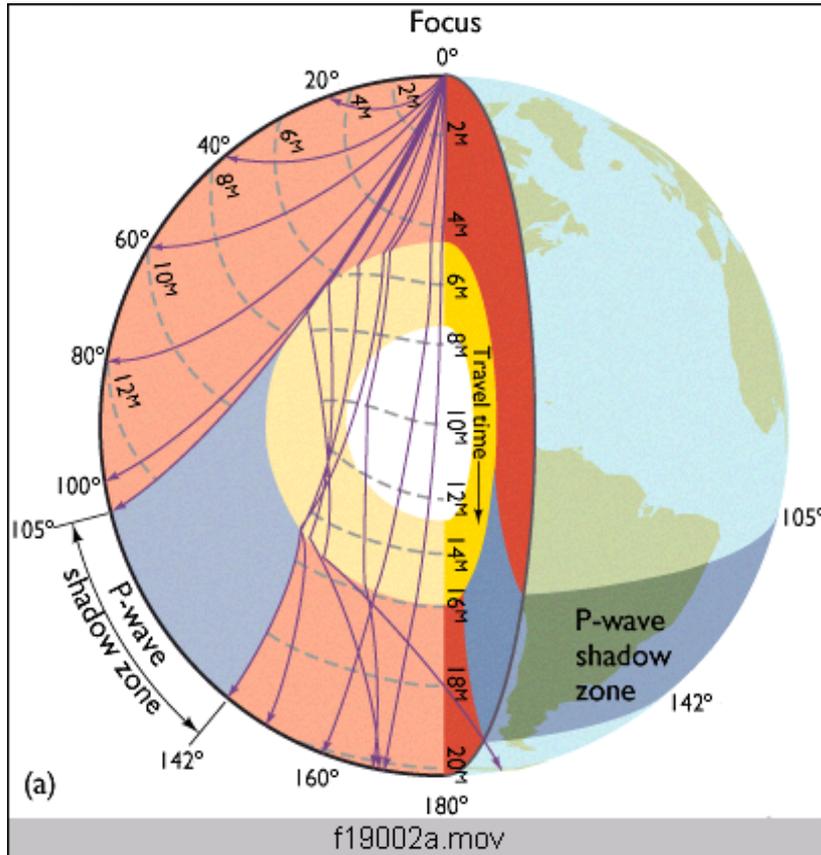
Le rai sismique émergeant à 105° est tangent au noyau externe.

- Le rai d'incidence juste supérieure à 105° pénètre dans le noyau où il est réfracté et en ressort à la distance de 183° , **rai n°1**.
- Les rais issus d'incidence supérieure ressortent jusqu'à 142° , **rai n°2** et **rai n°3**.

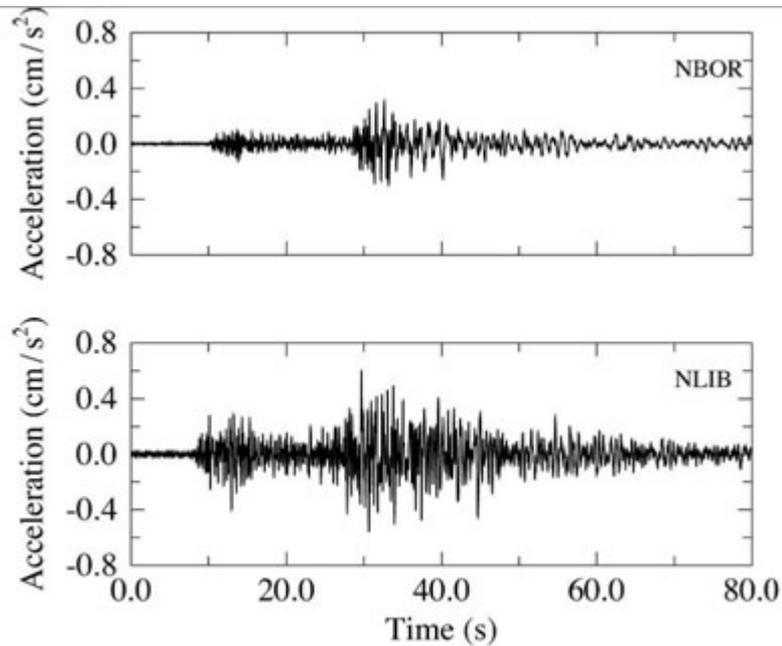
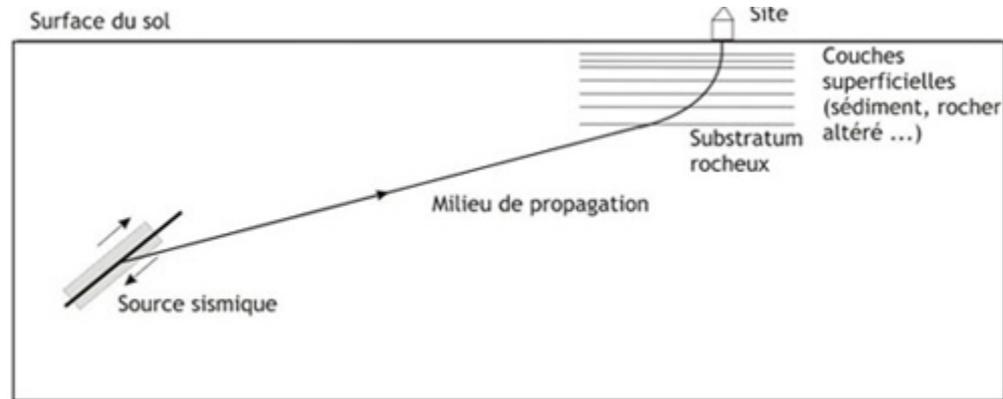
Zone d'ombre



Zone d'ombre



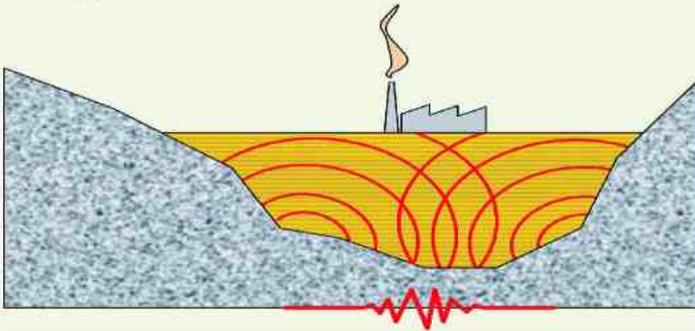
Effets de site



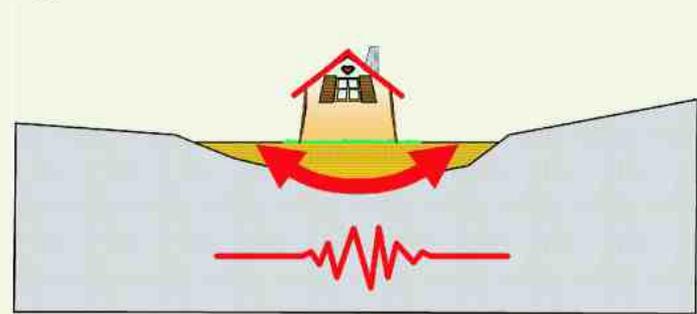
Les effets de site se traduisent fréquemment par une augmentation de l'amplitude des enregistrements de la secousse sismique et de sa durée.

Effets de site

1



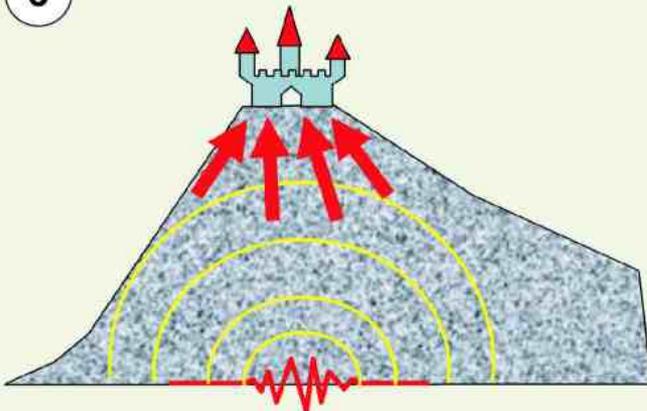
2



Accentuation de l'oscillation dans des sols "élastiques" tels

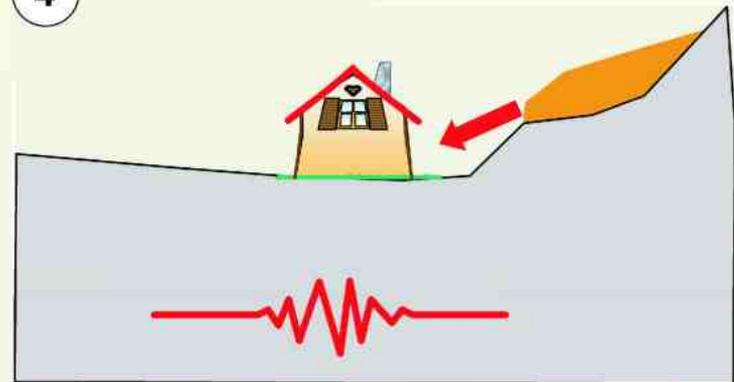
Nature du sous-sol (roche/sédiment) et contenu en eau, compaction, ...

3



TOPOGRAPHIE

4



EFFETS INDUITS