

Sismologie et Traitement du signal

- 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,...

- Méga séismes, et étude de la source sismique

- Imagerie de la Terre

- Structure interne et tomographie sismologique

- Sismique réflexion et sismique réfraction

- Aléa sismique et prévention

- Phénomènes induits (Tsunami...)

Les séismes: comment les étudier?

Propagation des ondes

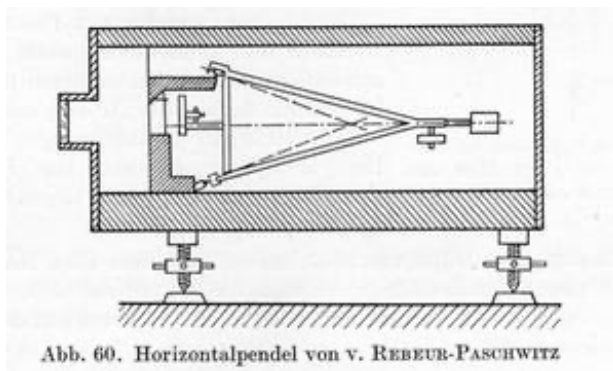


Paschwitz 1889: enregistre le premier sismogramme à Postdam le 18 Avril 1889, du séisme de Tokyo du 18 avril 1889!

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

Identification des différentes ondes

Première estimation de la vitesse de ondes P (7km/s)



Propagation d'ondes

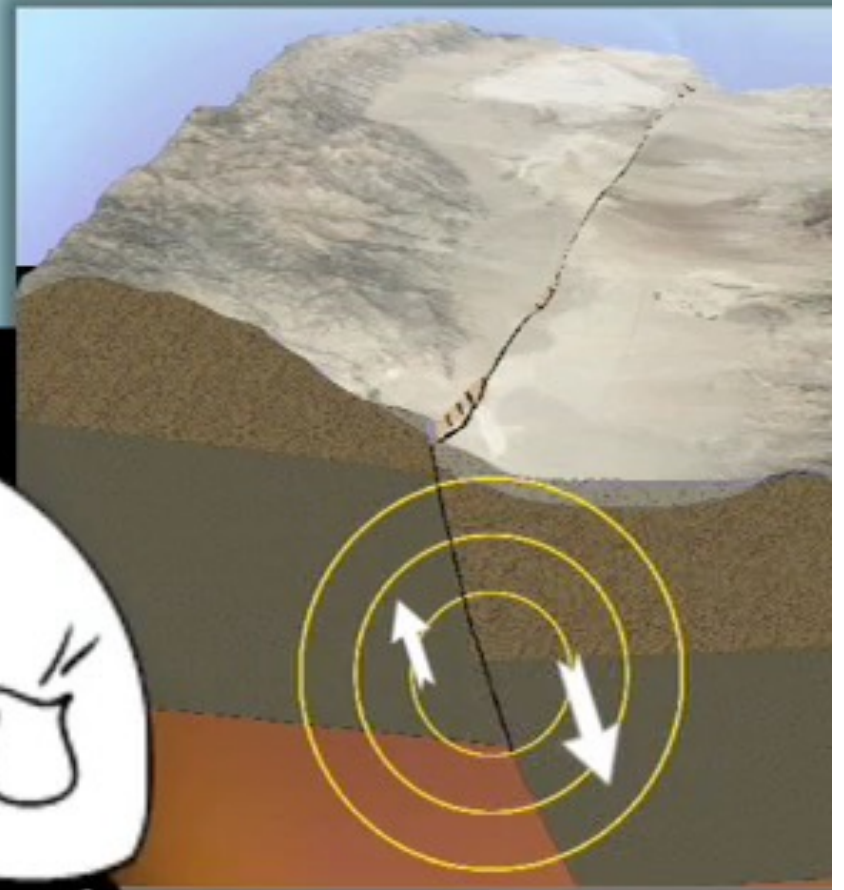
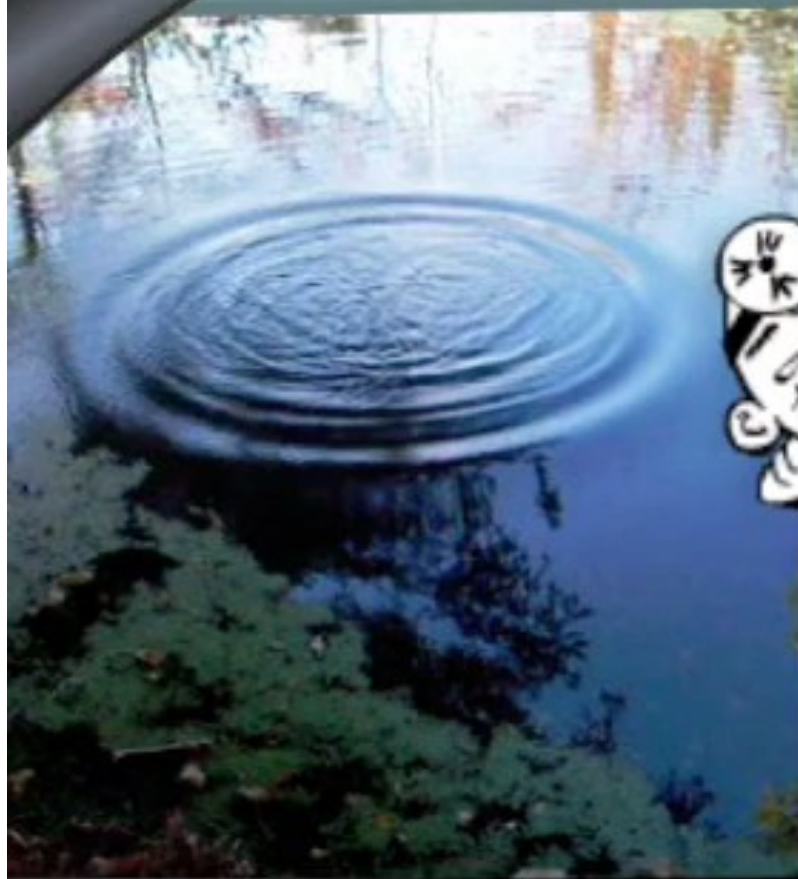


Une onde est le phénomène de **propagation d'une perturbation**.

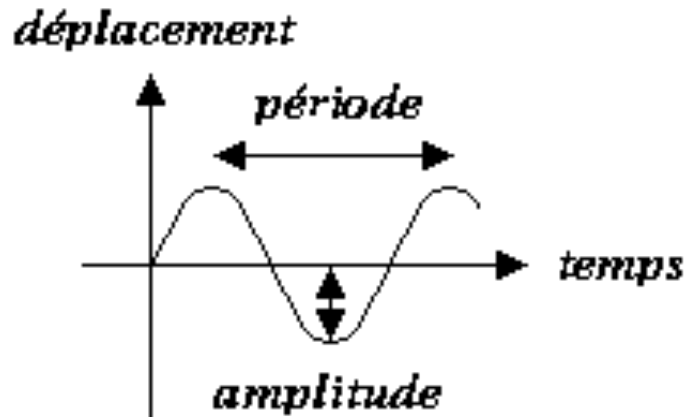
Onde élastique: le milieu reprend sa position initiale après le passage de la perturbation.

- PAS DE TRANSPORT DE MATIERE
 - TRANSPORT ENERGIE

**Can an earthquake be compared
to a drop of water?**



Fréquence et longueur d'onde



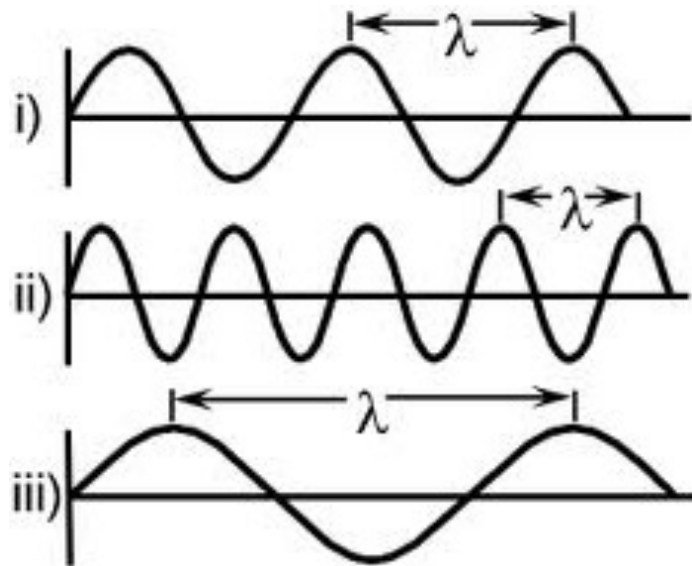
$$T = 1/F$$

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

T: période (s)

F: fréquence (Hz)

λ : longueur d'onde (m)



Résolution?

Fréquence et longueur d'onde

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



HF / petite λ

$F = 100 \text{ Hz}$ ($T = 0,01 \text{ s}$) :	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 longueur d'onde

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

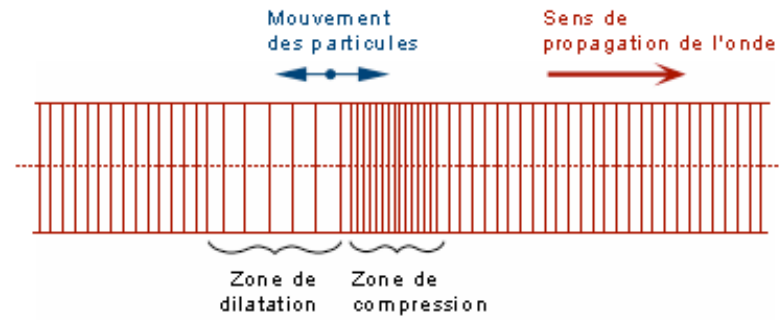


HF / petite λ

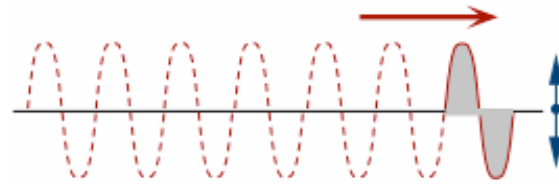
$F = 100 \text{ Hz}$ ($T = 0,01 \text{ s}$) :	vibrations industrielles.
$F = 10 \text{ Hz}$:	Agitations industrielles, explosions proches.
$F = 1 \text{ Hz}$:	Explosions lointaines, séismes proches.
$F = 0,1 \text{ Hz}$:	Ondes de volumes des séismes. Agitations naturelles.
$F < 0,001 \text{ Hz}$:	Vibrations propres de la Terre. Marées terrestres.

Ondes de volume et surface

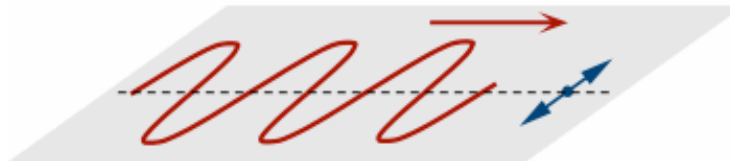
Onde P (compression)



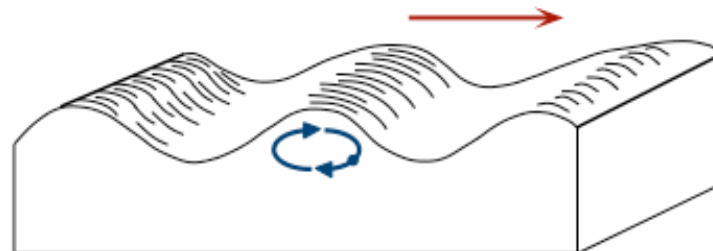
Onde S (cisaillement)



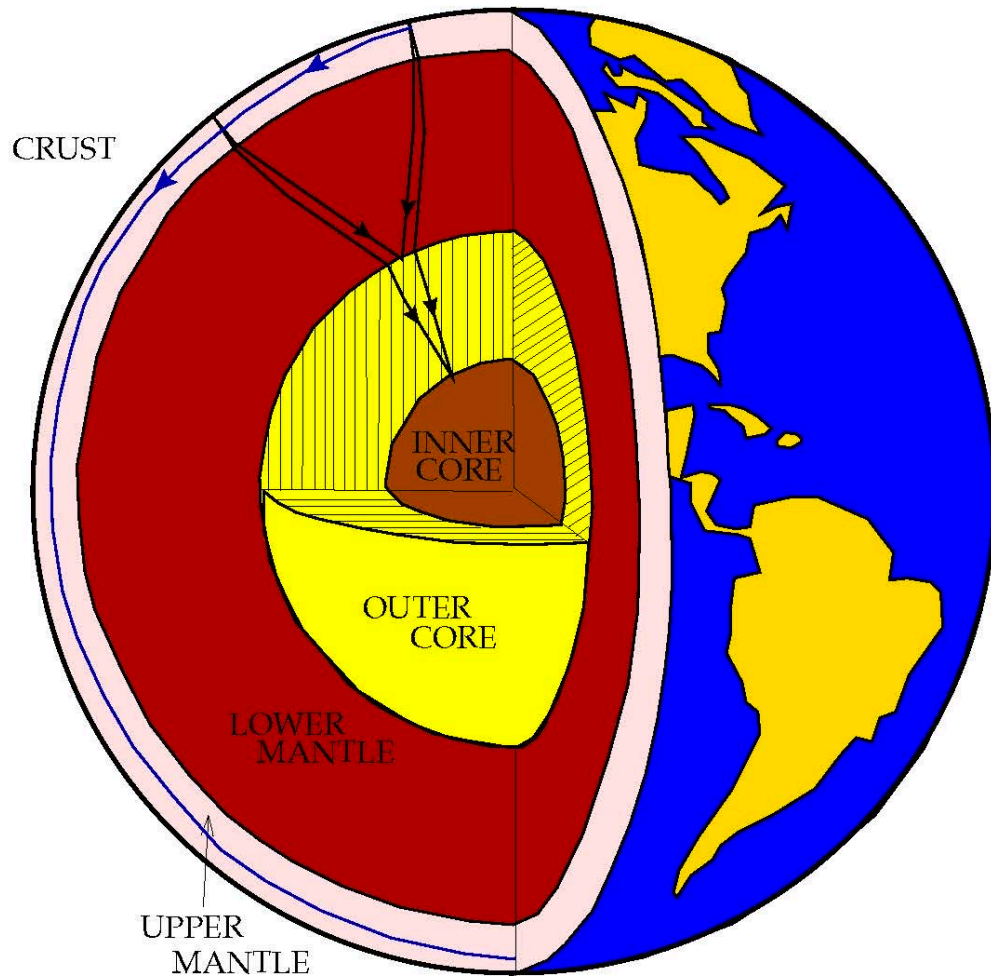
Onde L (de Love) (cisaillement)



Onde de Rayleigh



Les ondes dans la Terre



- les ondes des 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

Julie Perrot (Brest)

Notion de Déformation

Déformation: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ (sans unité)

Loi de Hooke: $\sigma = E\varepsilon$

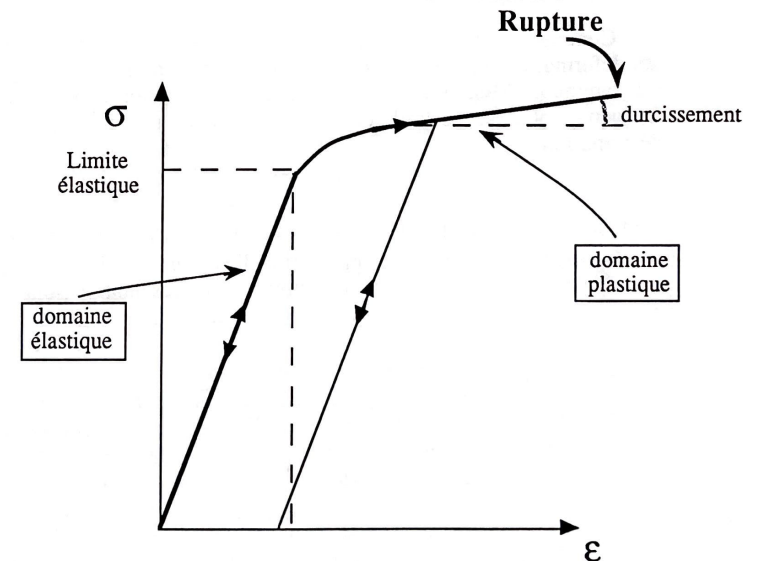
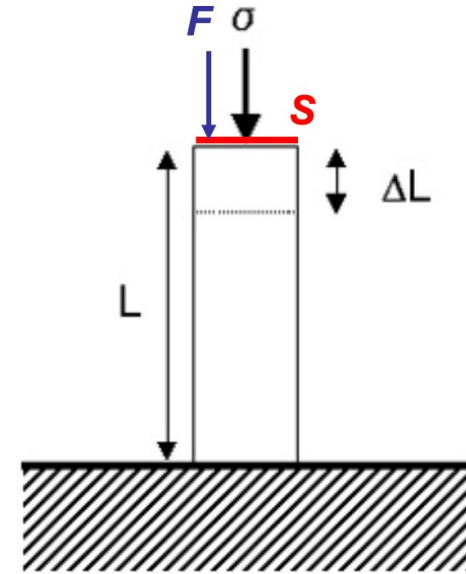
E : module de Young (Pa)

Poisson: $\nu = -\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}}$

Loi de Hooke généralisée: $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$ Milieu isotrope

λ : premier coefficient de Lamé (Pa)

μ : module de cisaillement aussi appelé second coefficient de Lamé (Pa).



Notion de Déformation

De manière générale lorsqu'un volume subi une déformation au niveau macroscopique chaque position $\mathbf{x}$ dans le volume est transformé en une nouvelle position $\mathbf{u}(\mathbf{x})$.

La déformation locale est alors définie par:

$$\varepsilon = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{u}(\mathbf{x}) - \mathbf{x})$$

En considérant le cas des petites déformations ε peut être traité comme un tenseur:

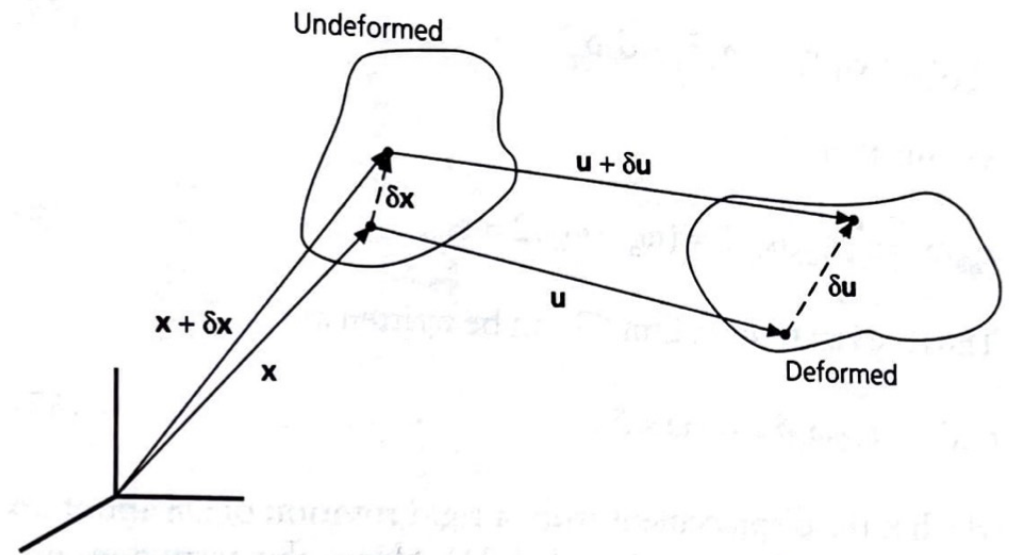


Fig. 2.3-11 Geometry showing how deformation arises from the relative displacement $\delta \mathbf{u}$ between two points originally separated by $\delta \mathbf{x}$.

*TENSEUR DE DÉFORMATION
(SYMÉTRIQUE)
EN FONCTION DES DERIVÉES DES VECTEURS
DÉPLACEMENTS*

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{pmatrix}$$

- Loi de Hooke - relation contrainte et déformation
- Equation de l'élastodynamique donne la relation σ et u



Equation d'ondes

La forme générale de l'équation d'onde est

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


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

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

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

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

Equation d'ondes

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

λ : premier coefficient de Lamé (Pa)

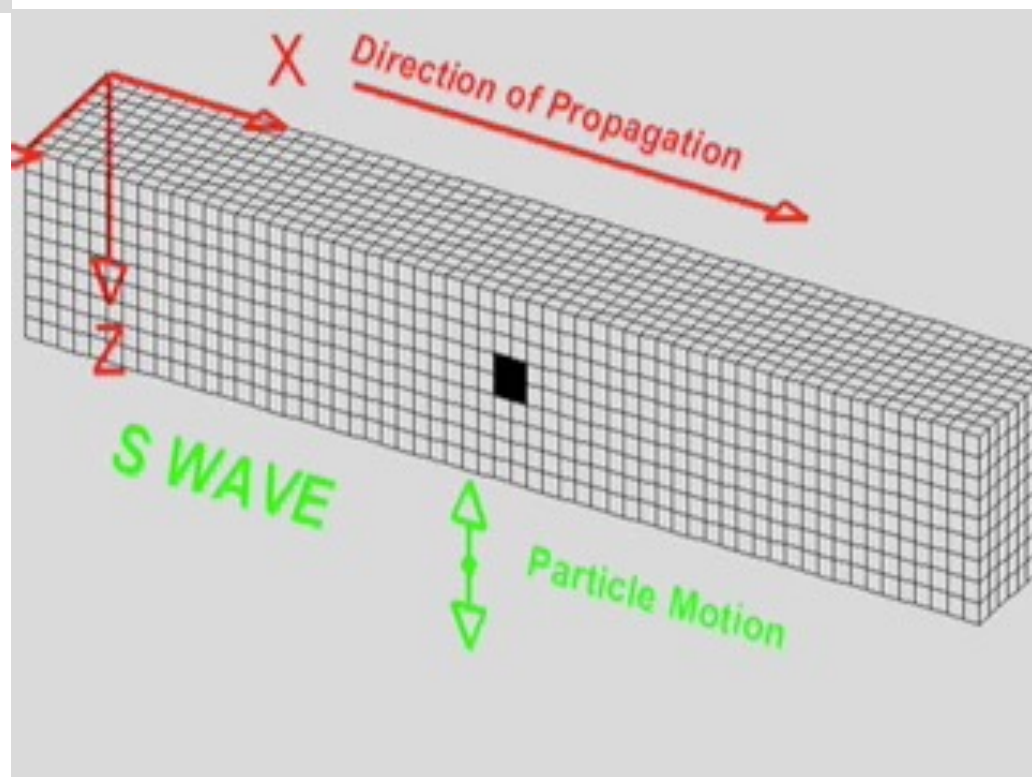
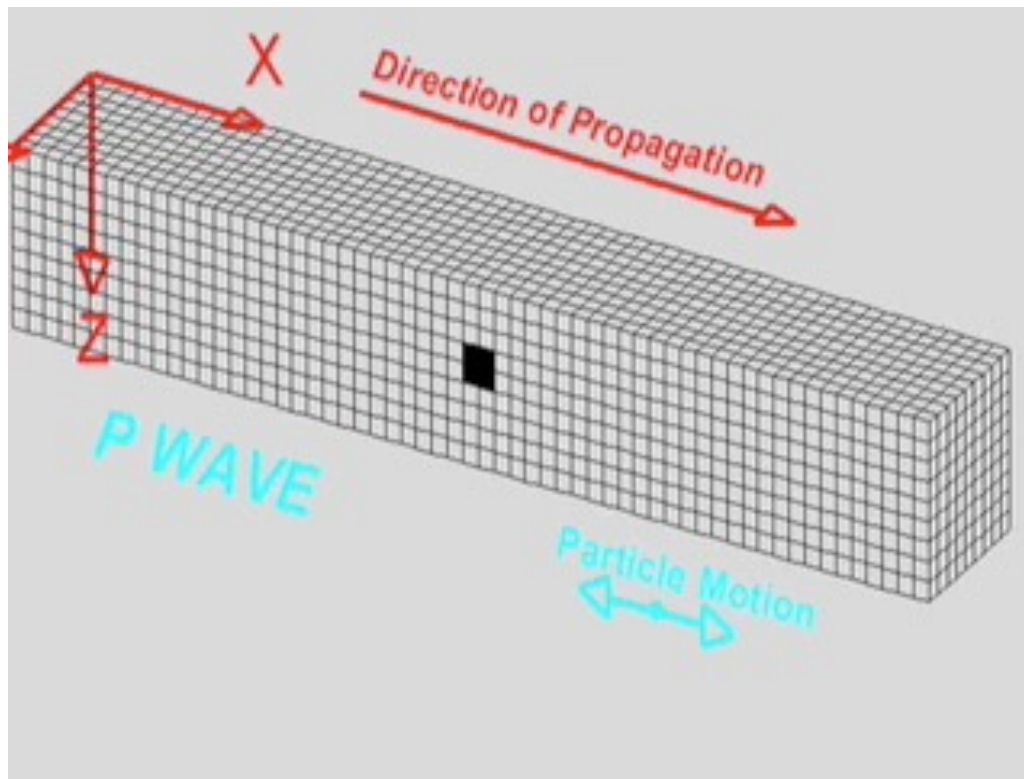
μ : module de cisaillement aussi appelé second coefficient de Lamé (Pa)

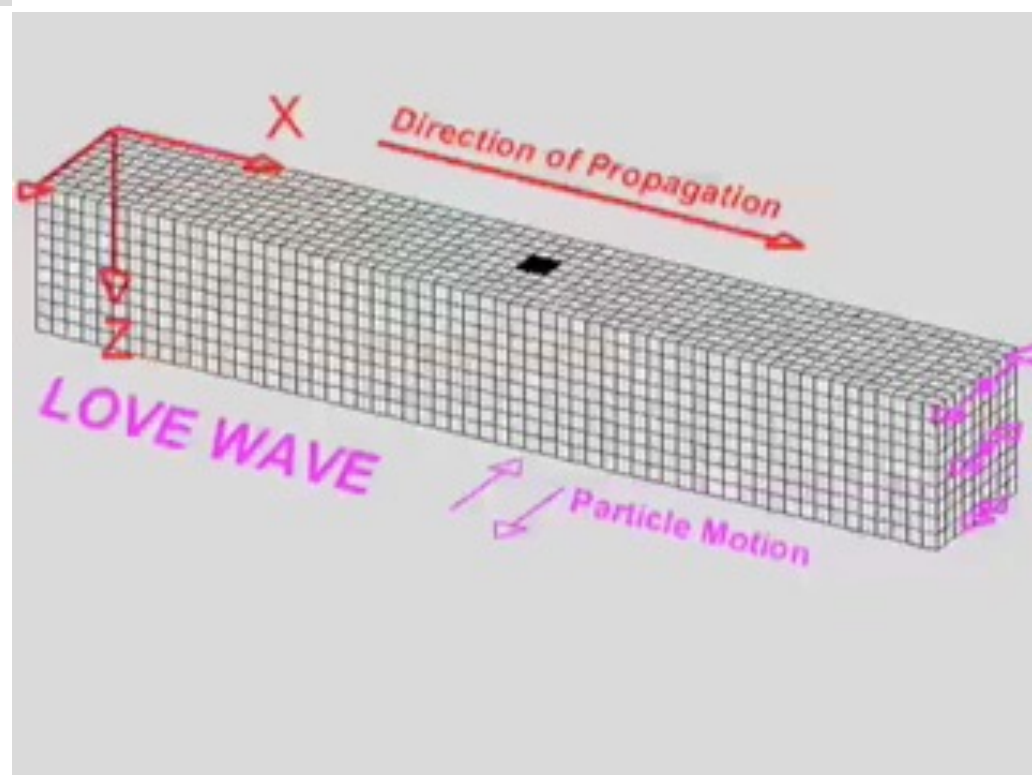
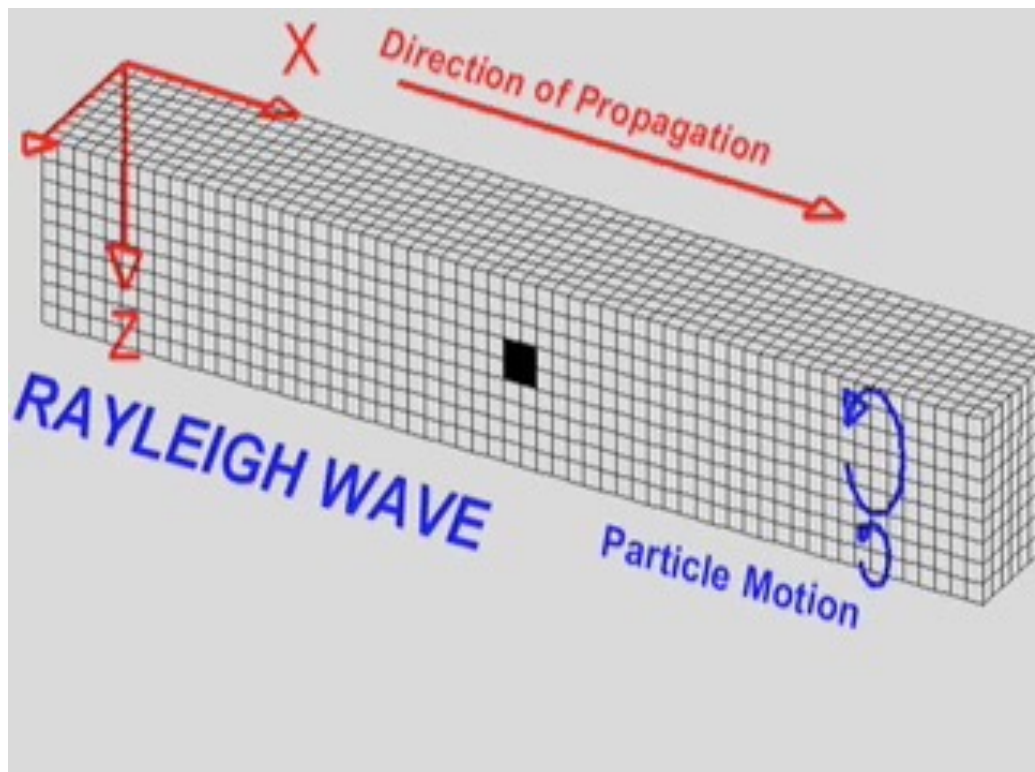
- $V_p > V_s$
- $V_s = 0\% \text{ à } 70\% V_p$

Les ondes de volume

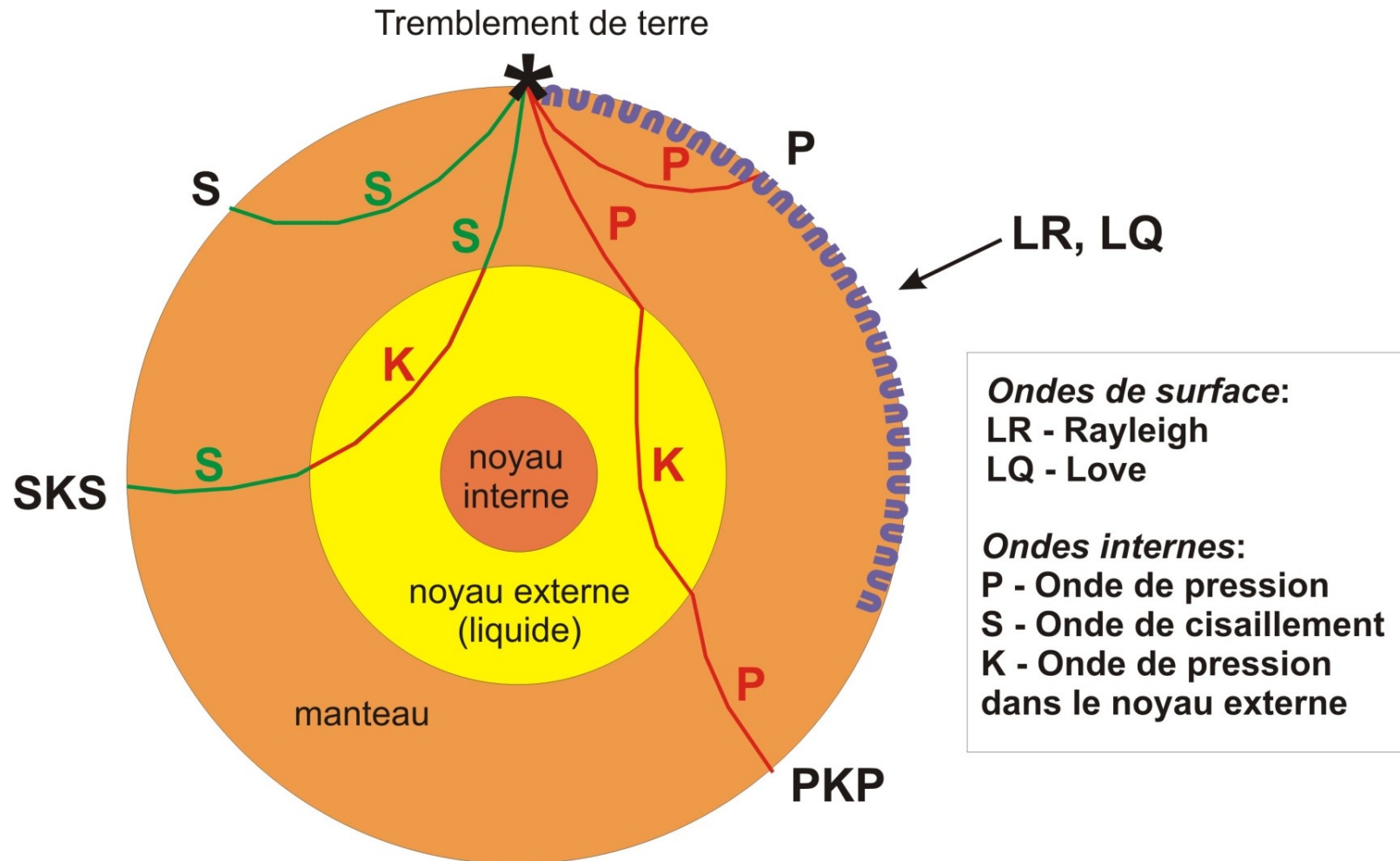
Matériau	Vp (km/s)	Vs (km/s)
Air	0.33	-
Eau	1.4-1.5	-
Hydrocarbure	1.3-1.4	-
Granite	5.5-6	2.8-3.3
Grès	1.4-4.3	0.7-2.8
Calcaire	5.9-6.1	2.8-3.0

- 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.

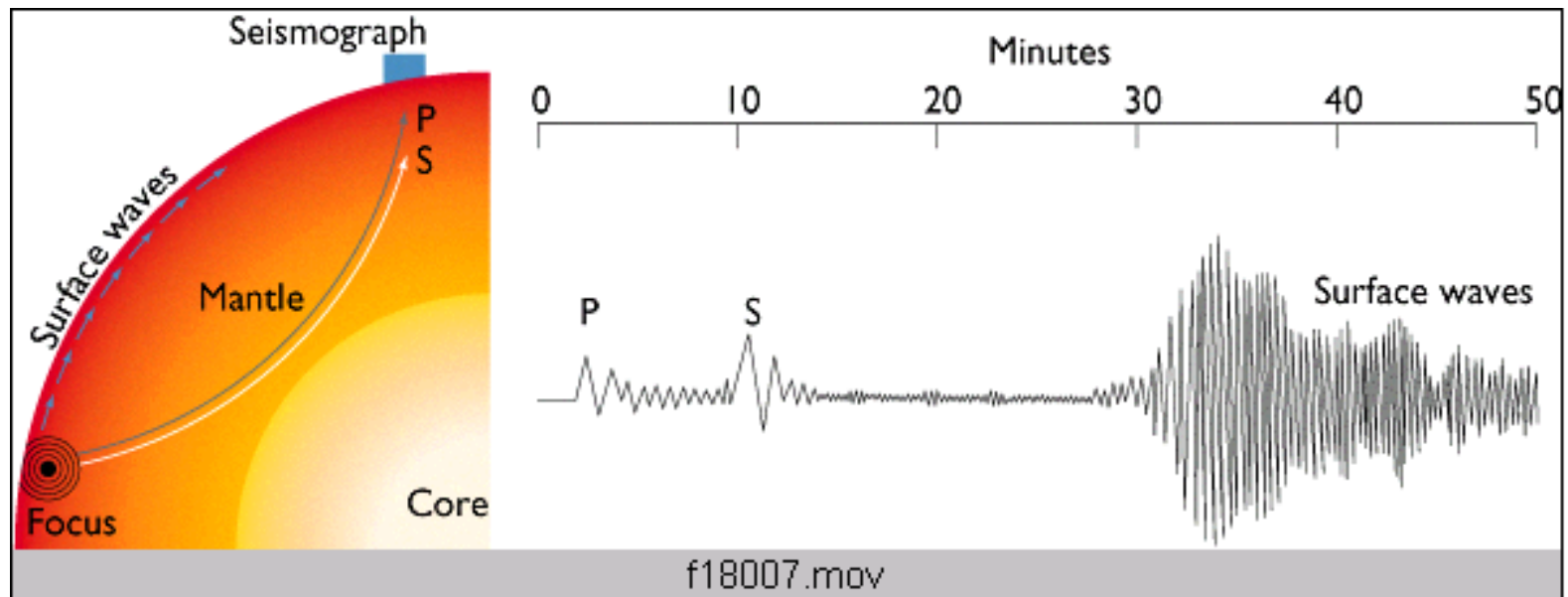




Ondes de volume et surface.



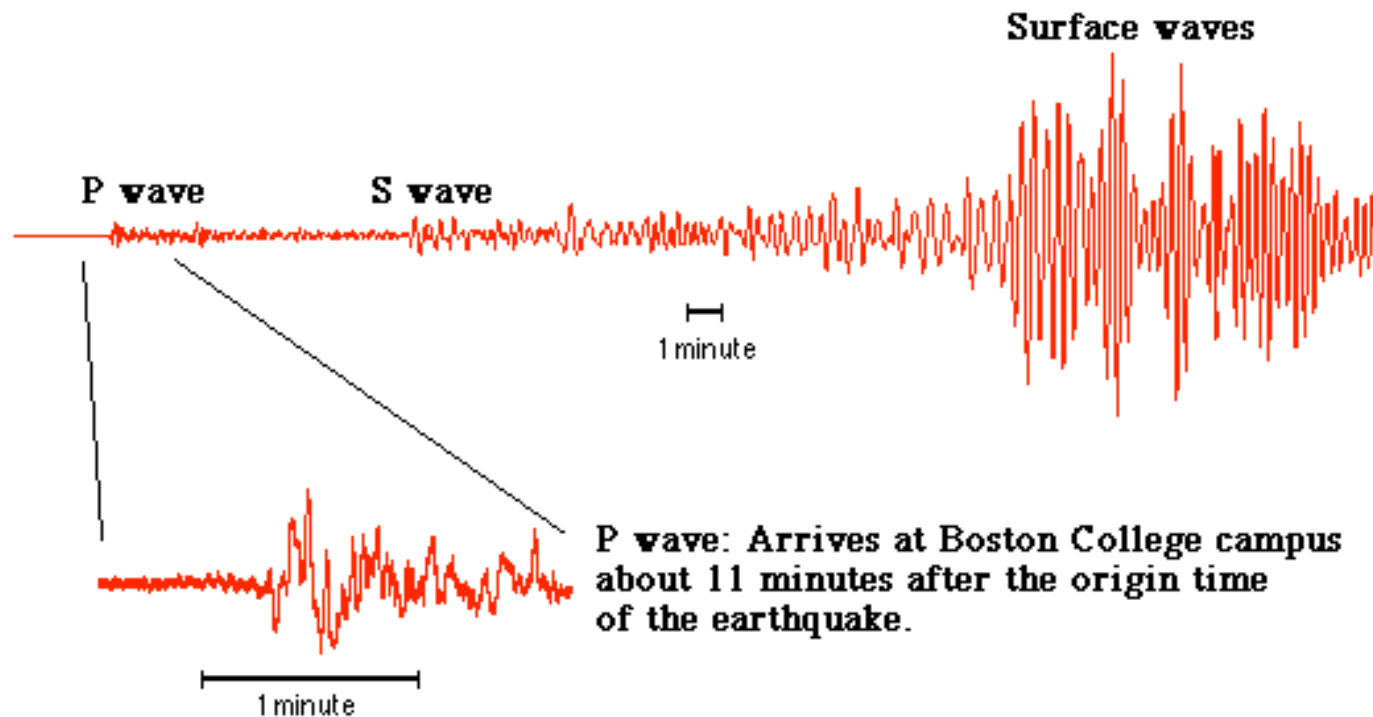
Ondes de volume et surface.



Ondes de volume et surface.

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

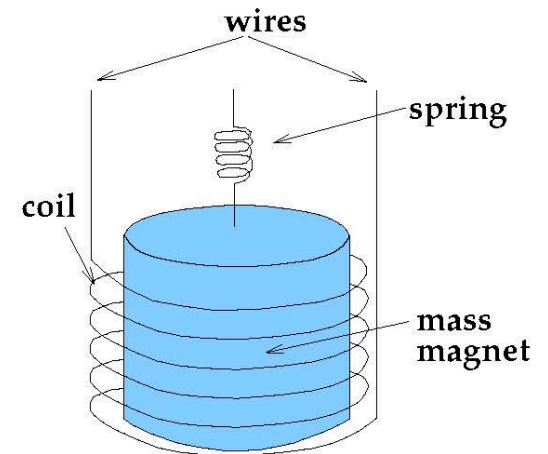
**Recorded by Weston Observatory Seismic Station in Devlin Hall
Department of Geology and Geophysics
Boston College**



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

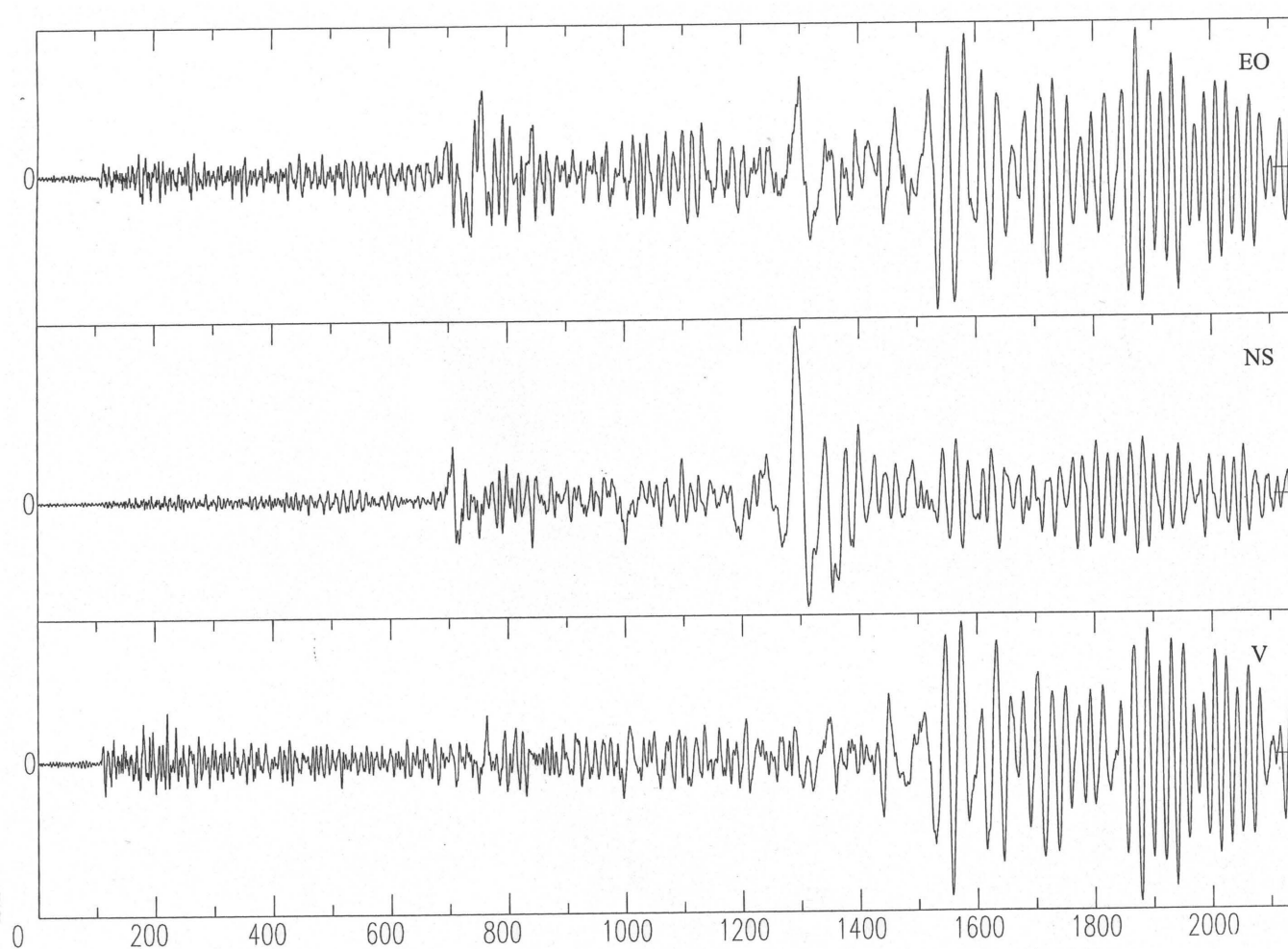


INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY



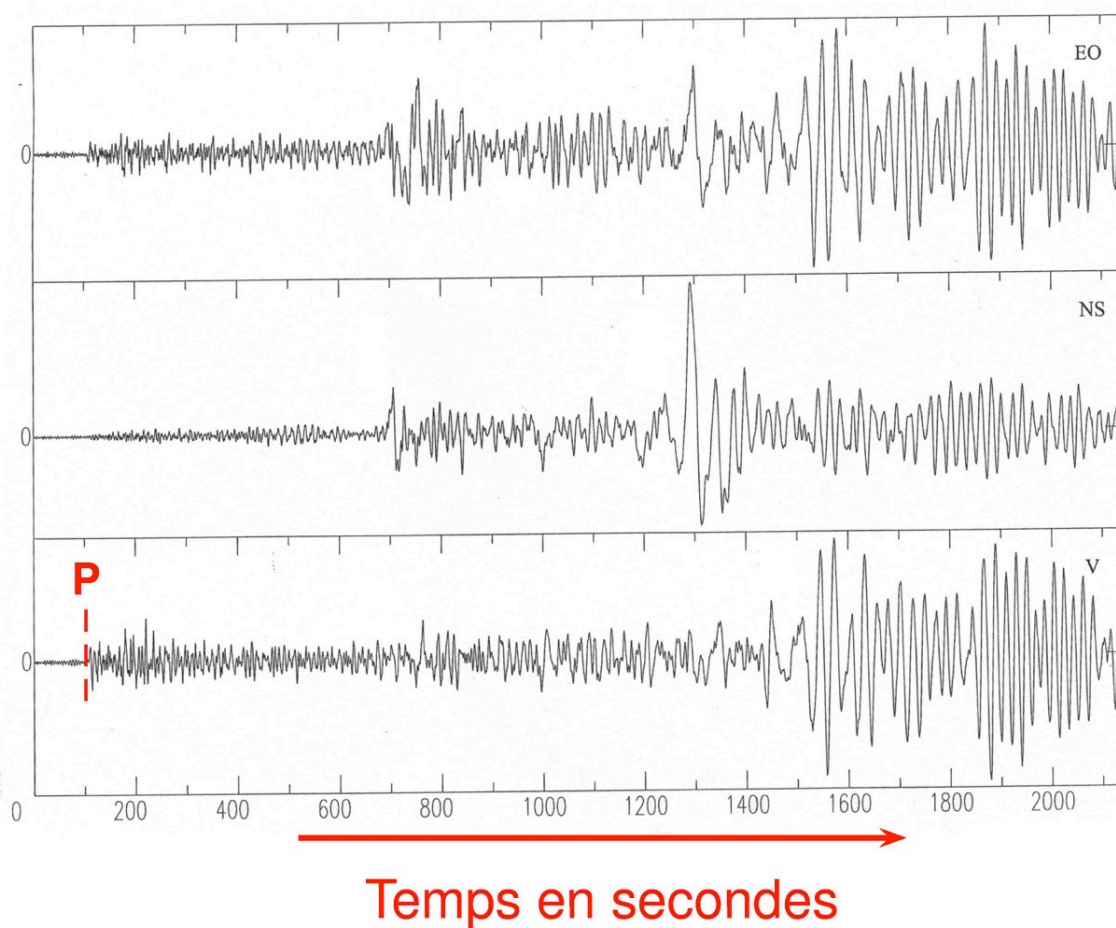
www.iris.edu/earthquake

Simogrammes: 3 composantes



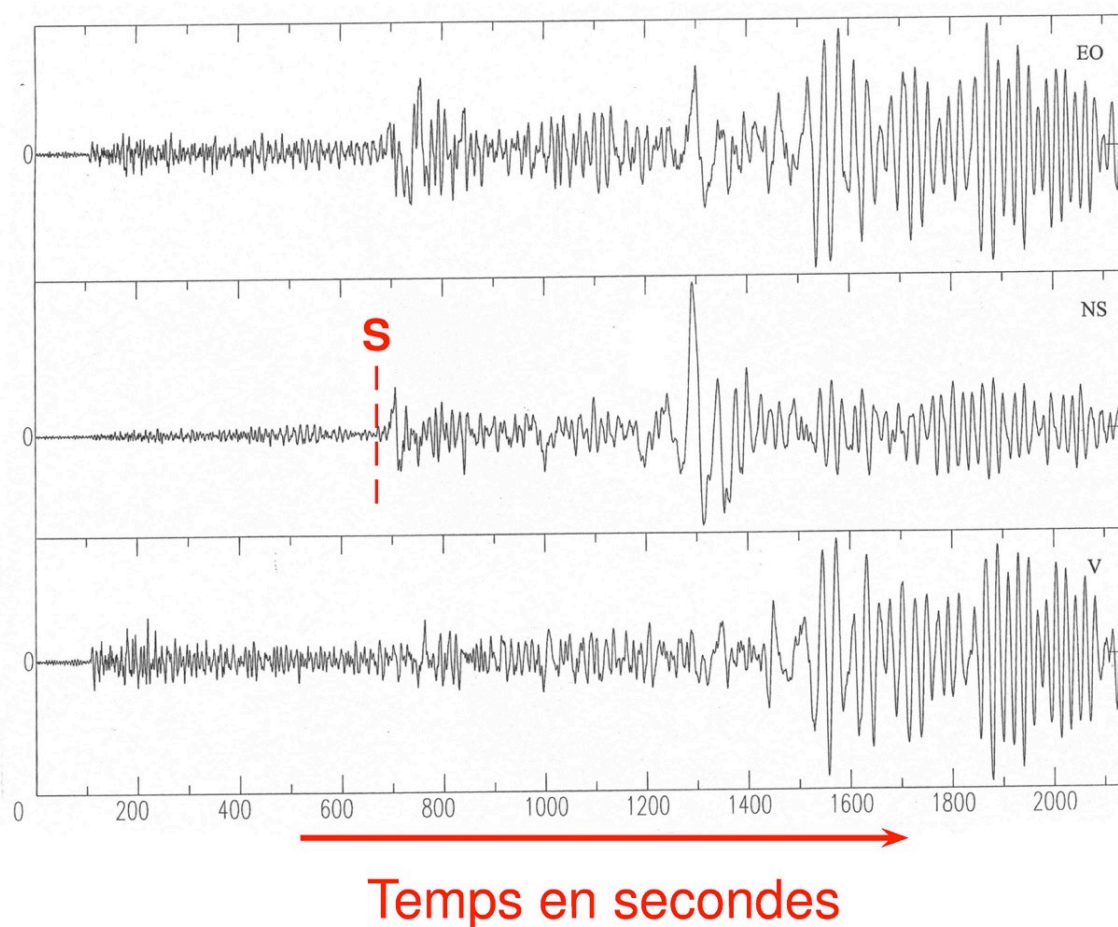
Enregistrement d'un évènement télésismique (distance entre le séisme et la station supérieur à 10° soit 1000km)

Identification de l'onde P



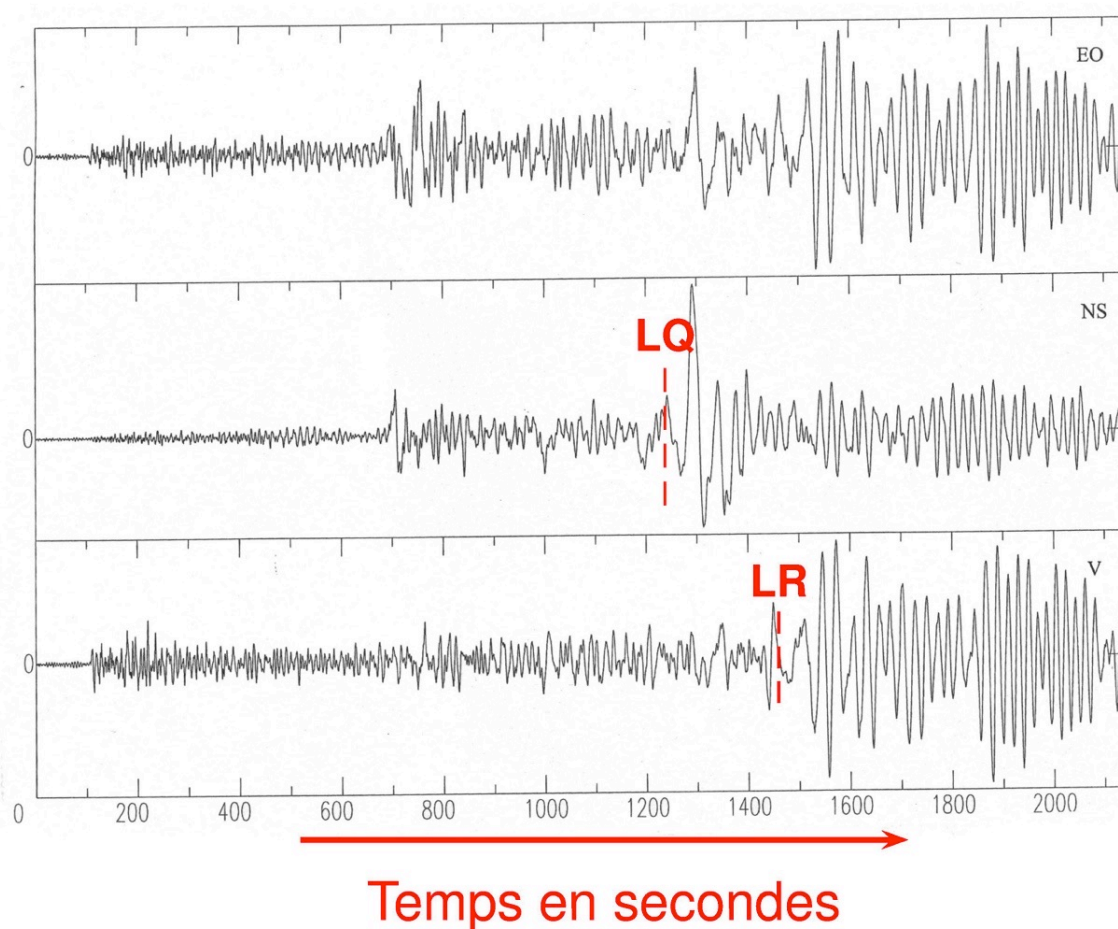
- Meilleure lecture sur la composante verticale
- Première arrivée en temps
- Contenu haute fréquence de l'onde aux alentours de 1 Hz (1 s)

Identification de l'onde S



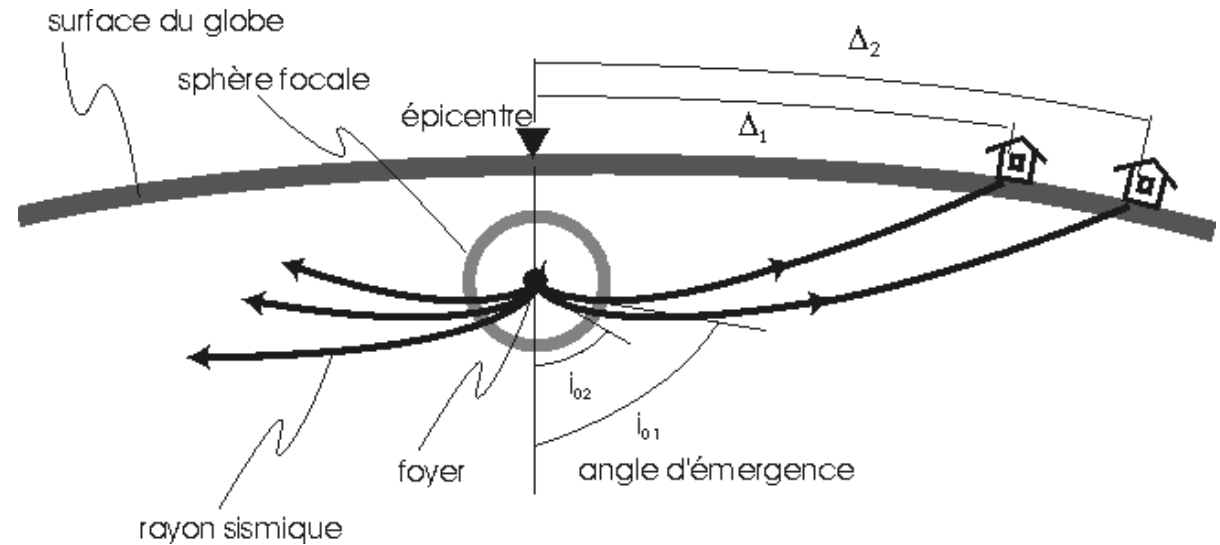
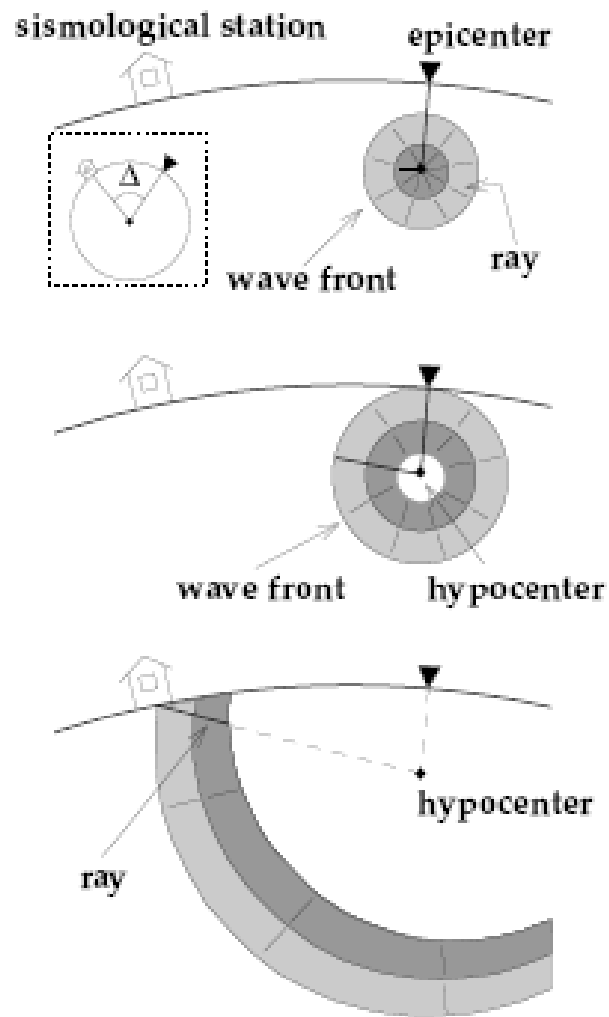
- Lecture de l'onde S sur les composantes horizontales
- Arrive après l'onde P
- Contenu haute fréquence de l'onde S légèrement plus basse que l'onde P environ 0.25 Hz (4 s)

Identification des ondes de surface



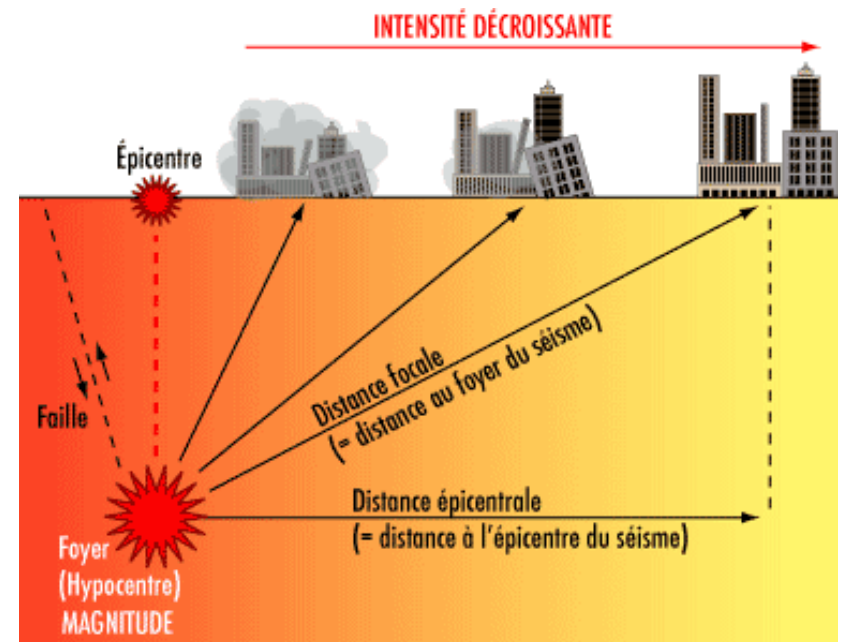
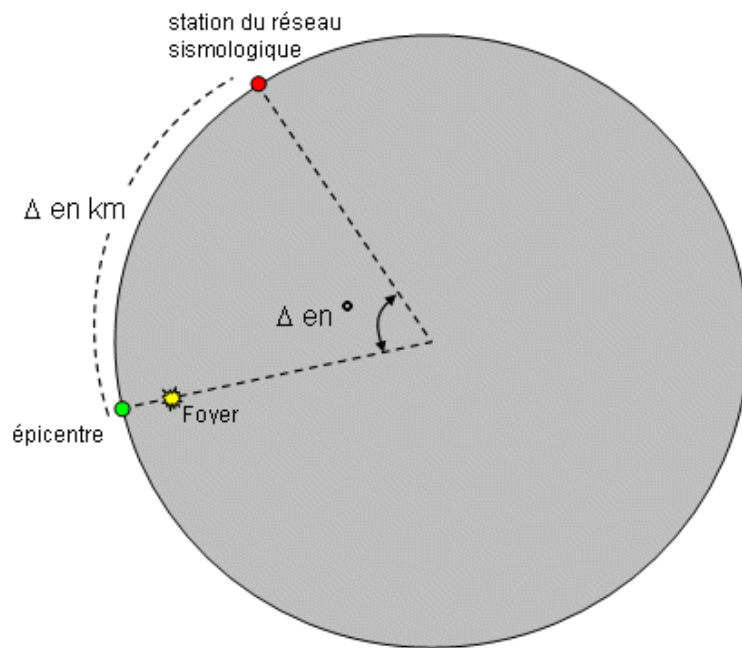
- Lecture sur la composante verticale pour les ondes de Rayleigh (LR) item Lecture sur les composantes horizontales pour les ondes de Love (LQ)
- Les ondes de Love arrivent avant les ondes de Rayleigh
- Contenu basse fréquence des ondes de surfaces aux alentours de 0.1Hz (10s)

Front d'onde / rayon / distance épicentrale



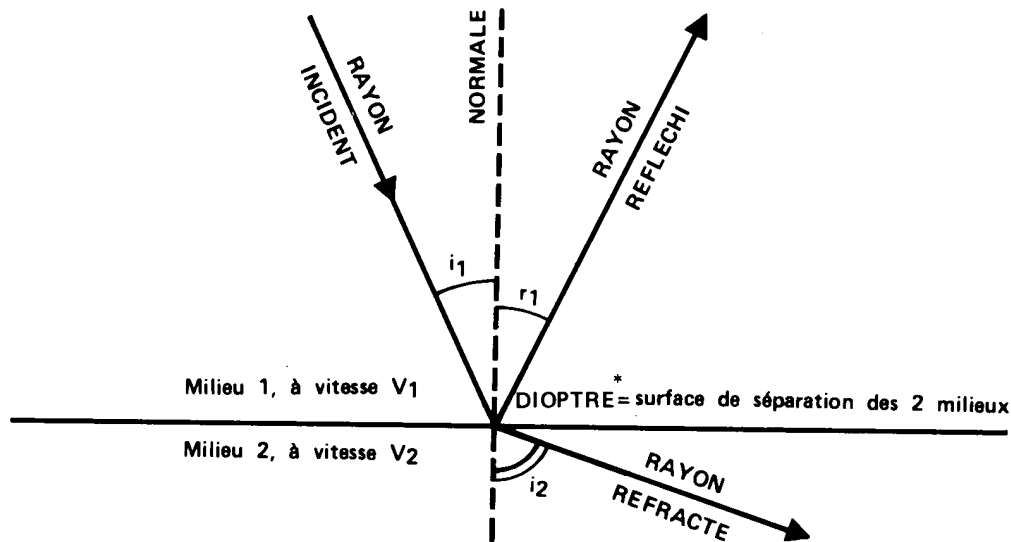
Distance épicentrale

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



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

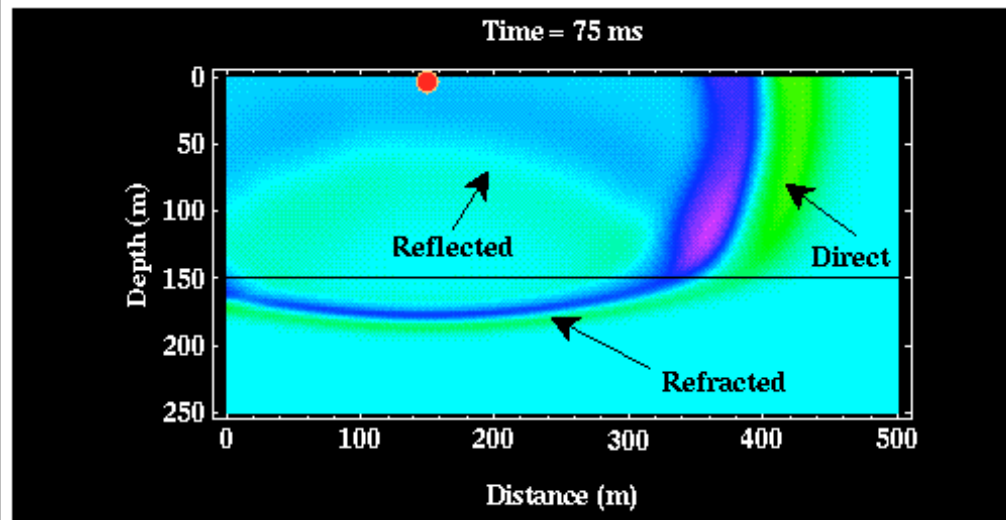
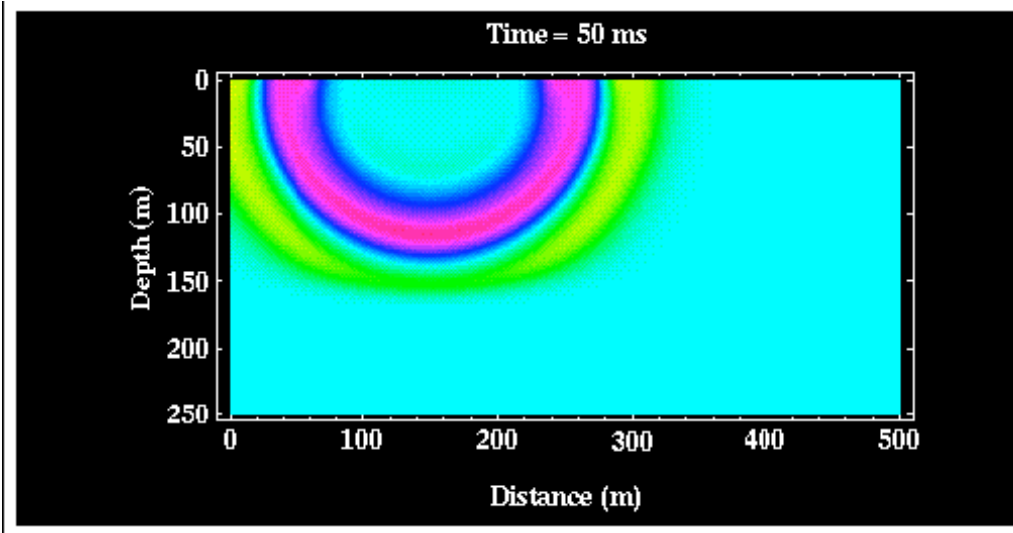
Loi de Snell-Descarte



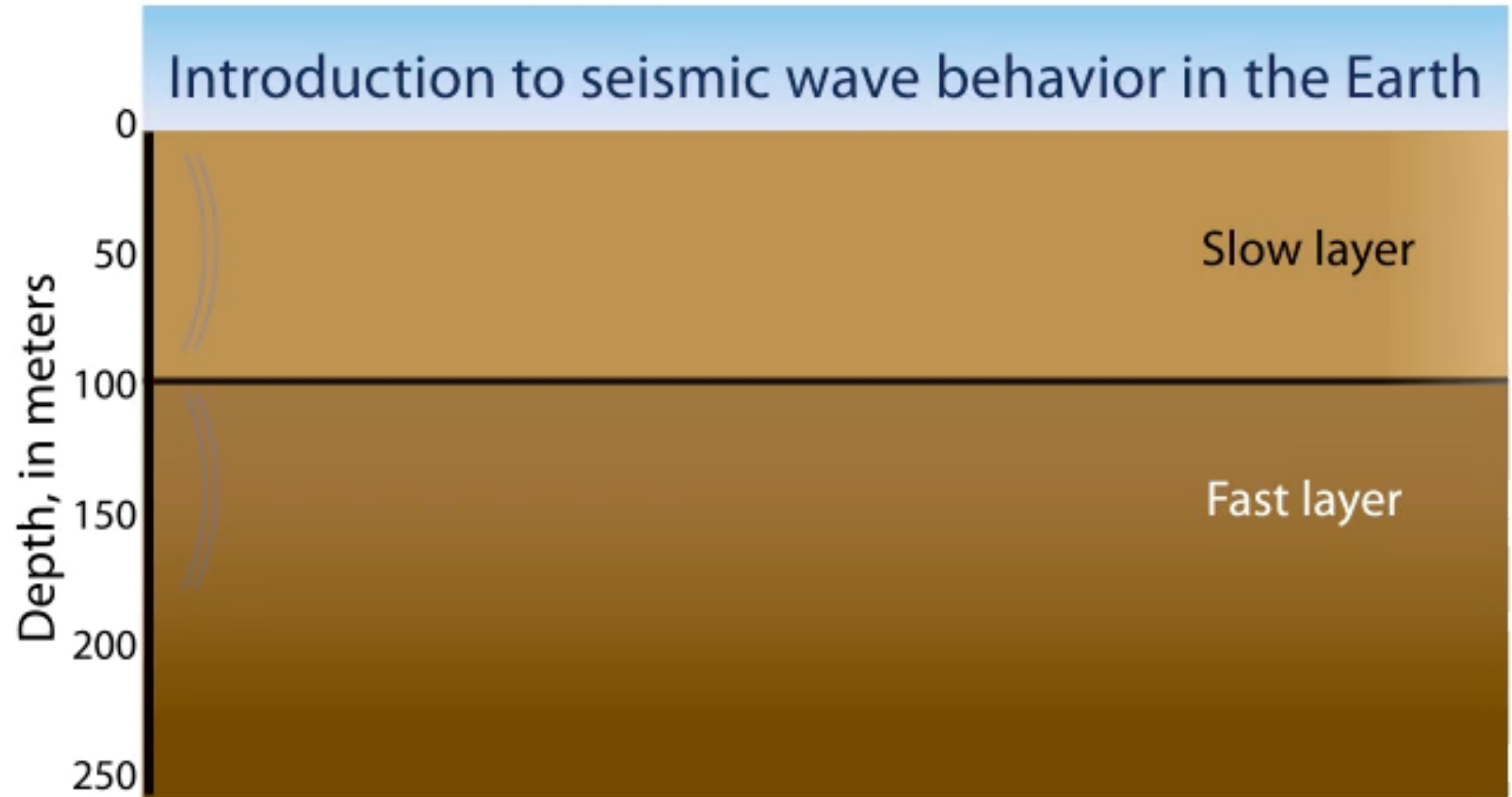
La Terre est à symétrie sphérique avec des couches concentriques 2 couches avec des vitesses différentes sont séparées par une discontinuité ou une interface.

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

Réflexion - Réfraction

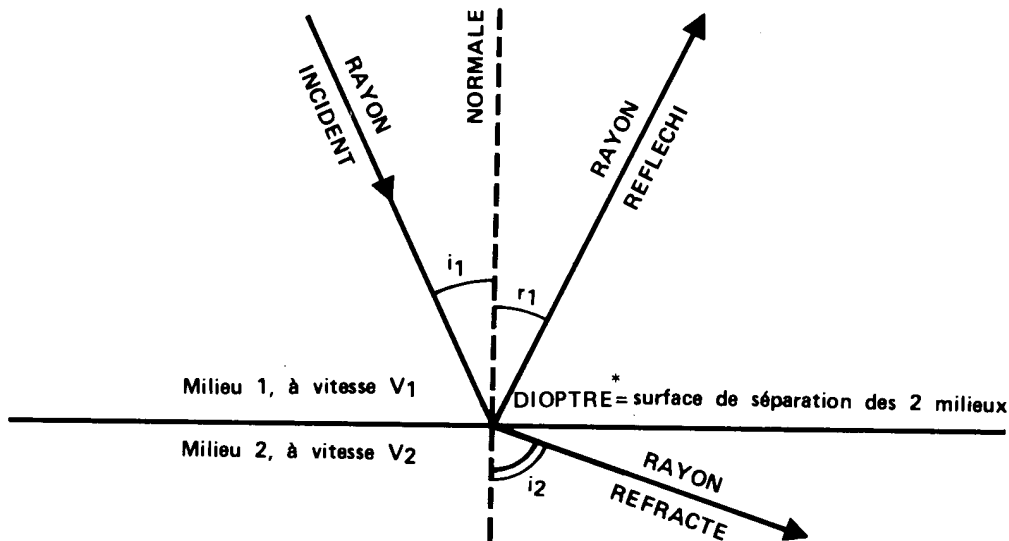


Seismic wave behavior across a single boundary



Incorporated Research Institutions for Seismology

Loi de Snell-Descarte



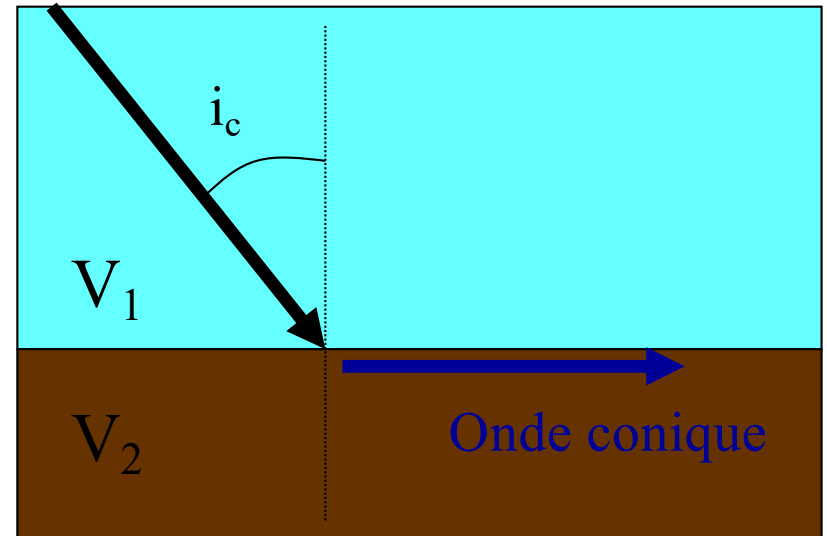
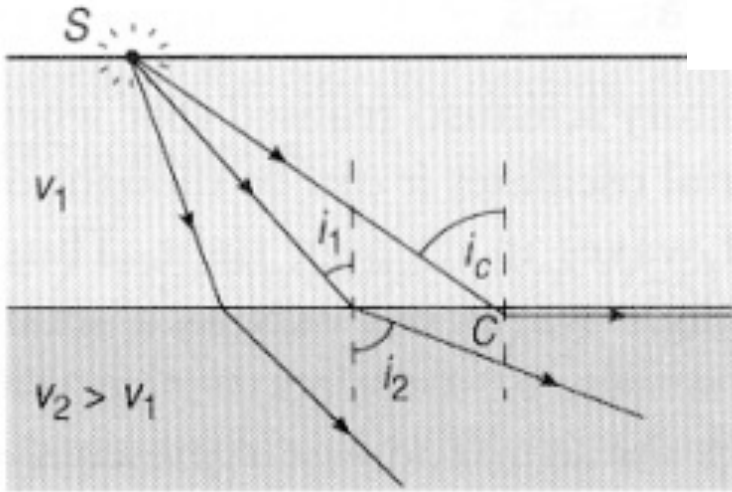
Changement propriétés
physiques

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

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

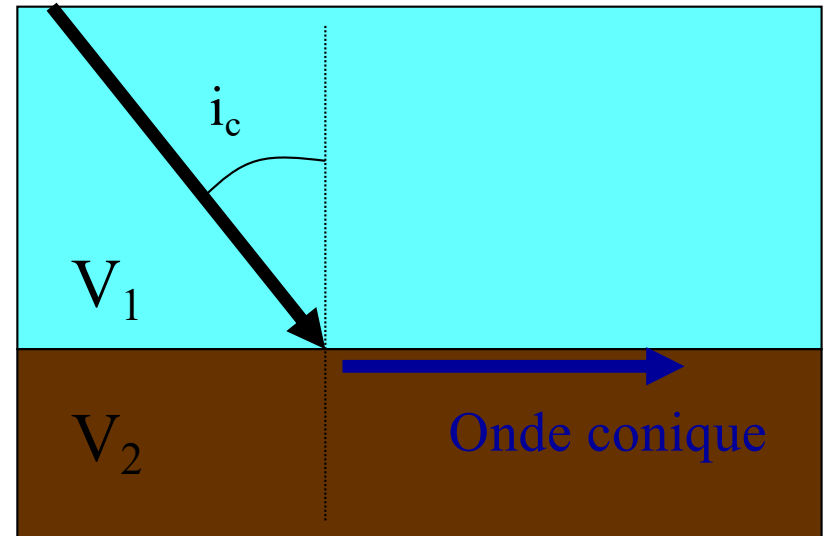
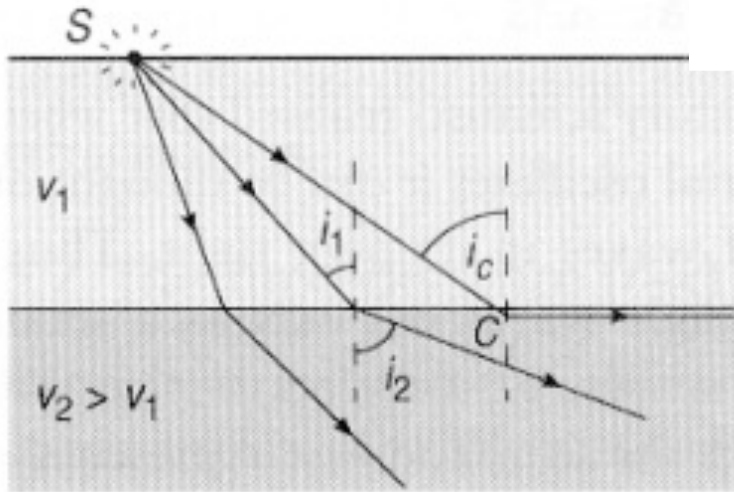
Onde conique

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



Onde conique

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

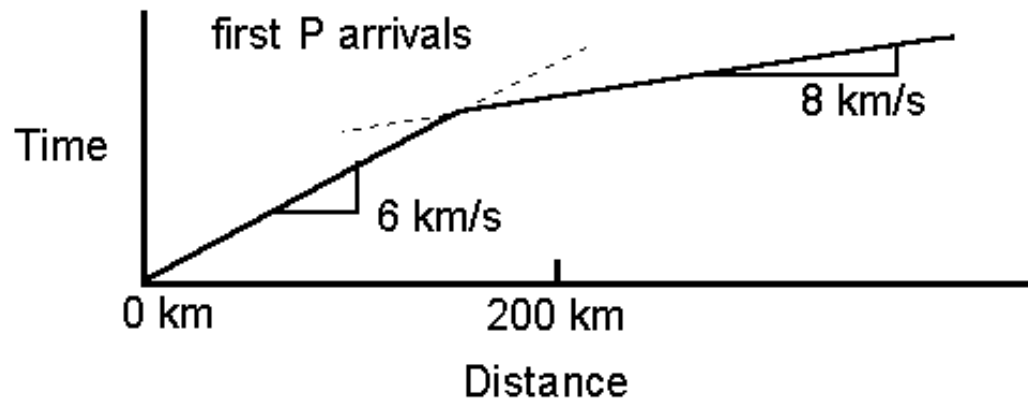


$$\frac{\sin i_c}{v_1} = \frac{\sin 90^\circ}{v_2}$$

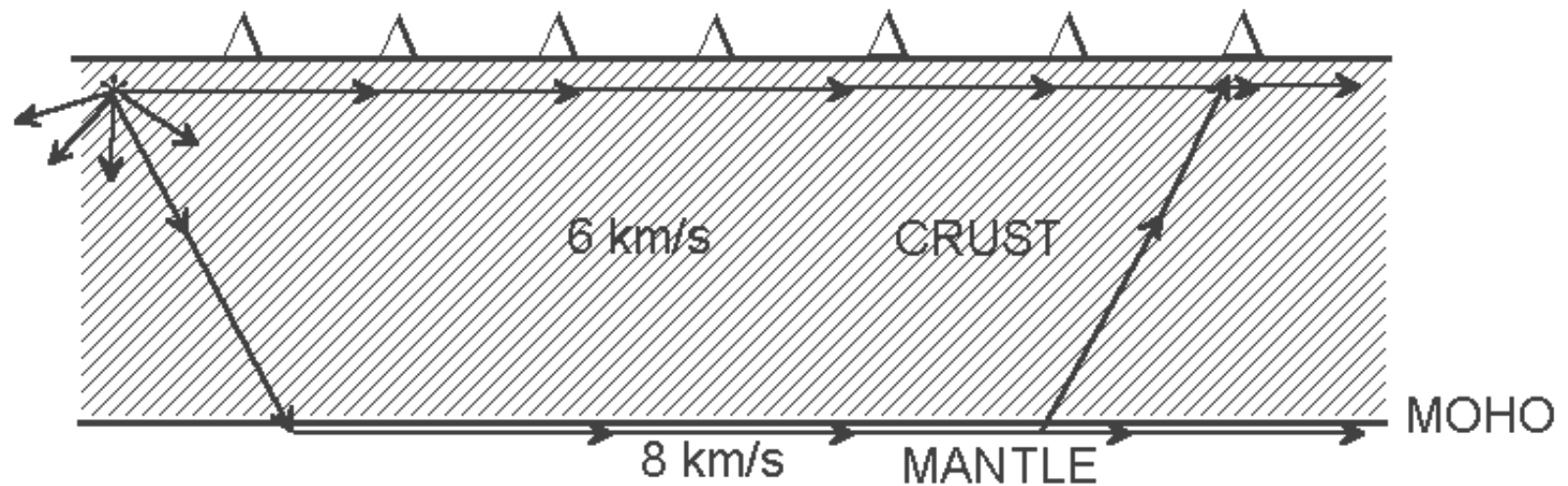
$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2}$$

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)

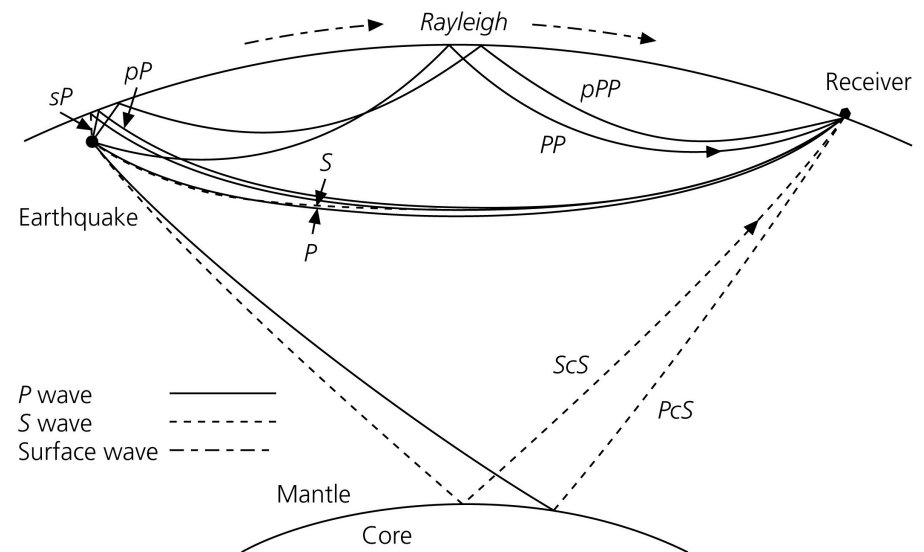
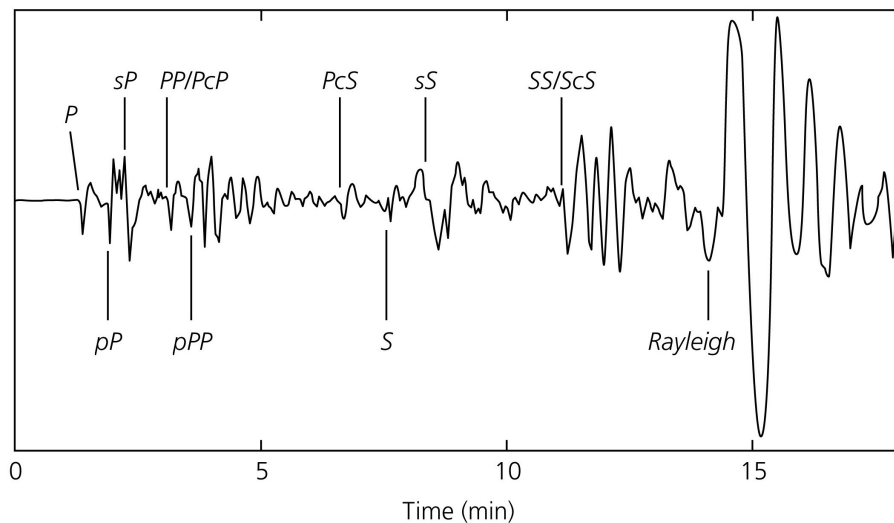


Épaisseur moyenne 35 km avec de larges variations.

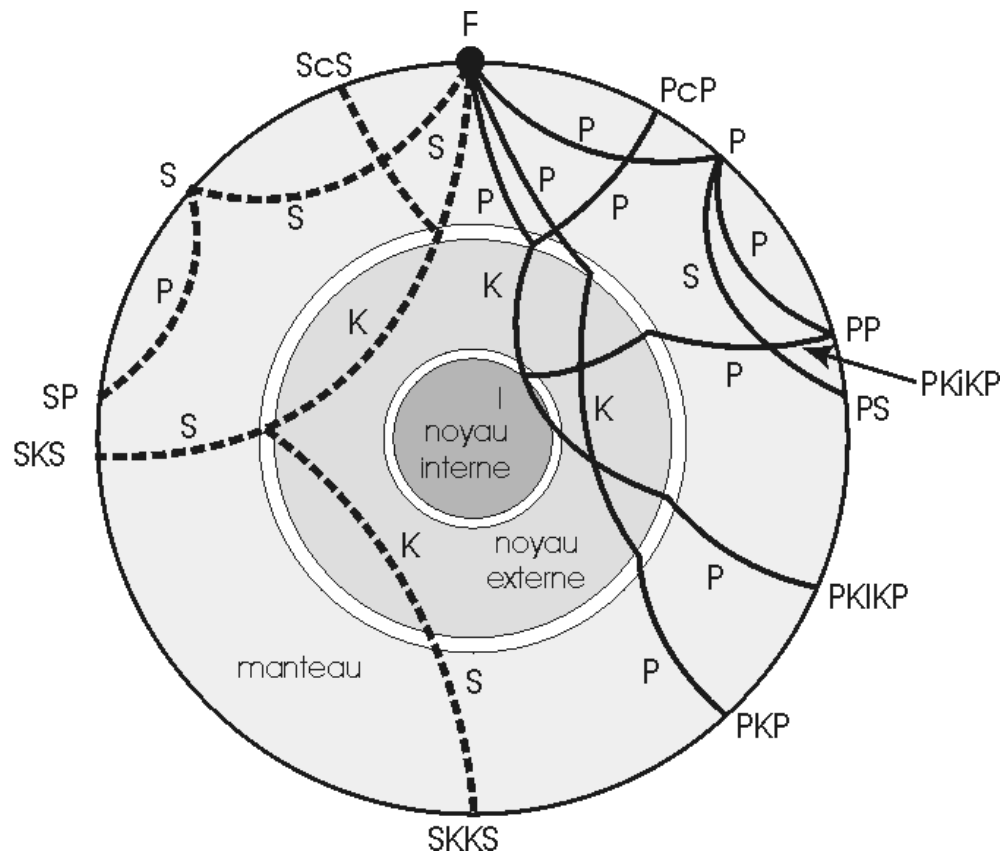
Conversion des ondes aux interfaces.

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.

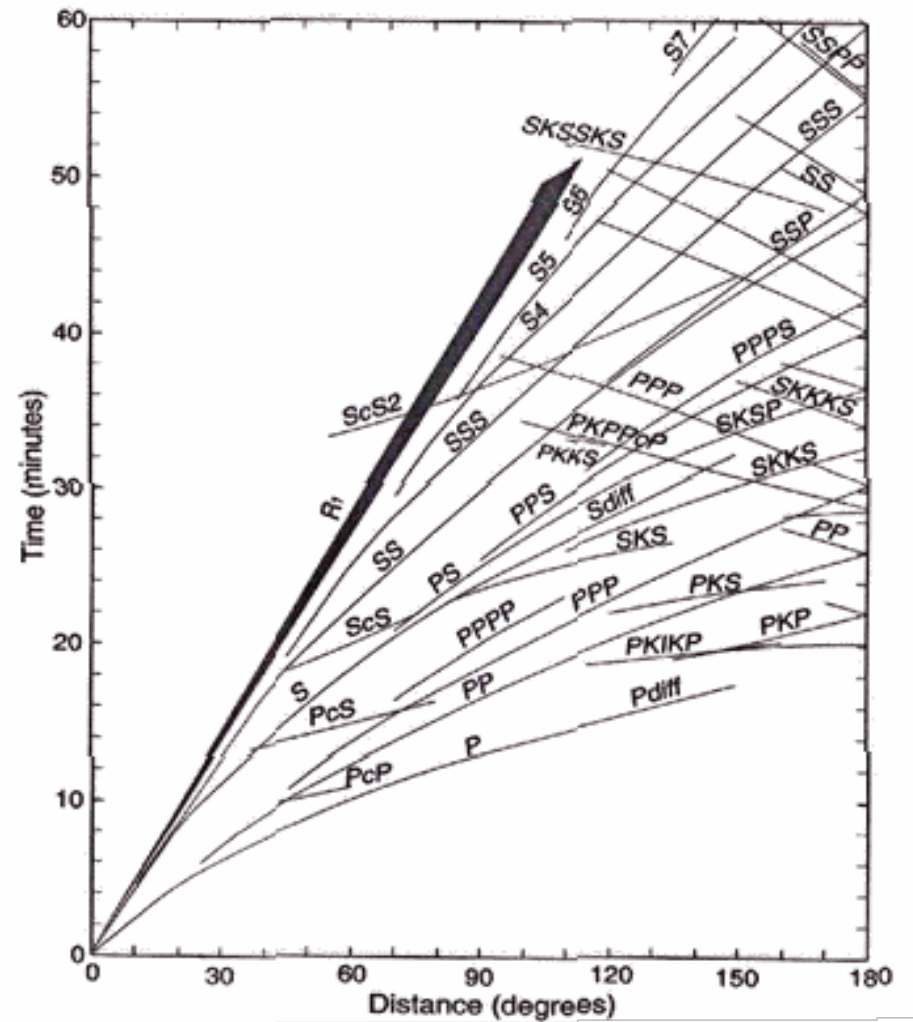
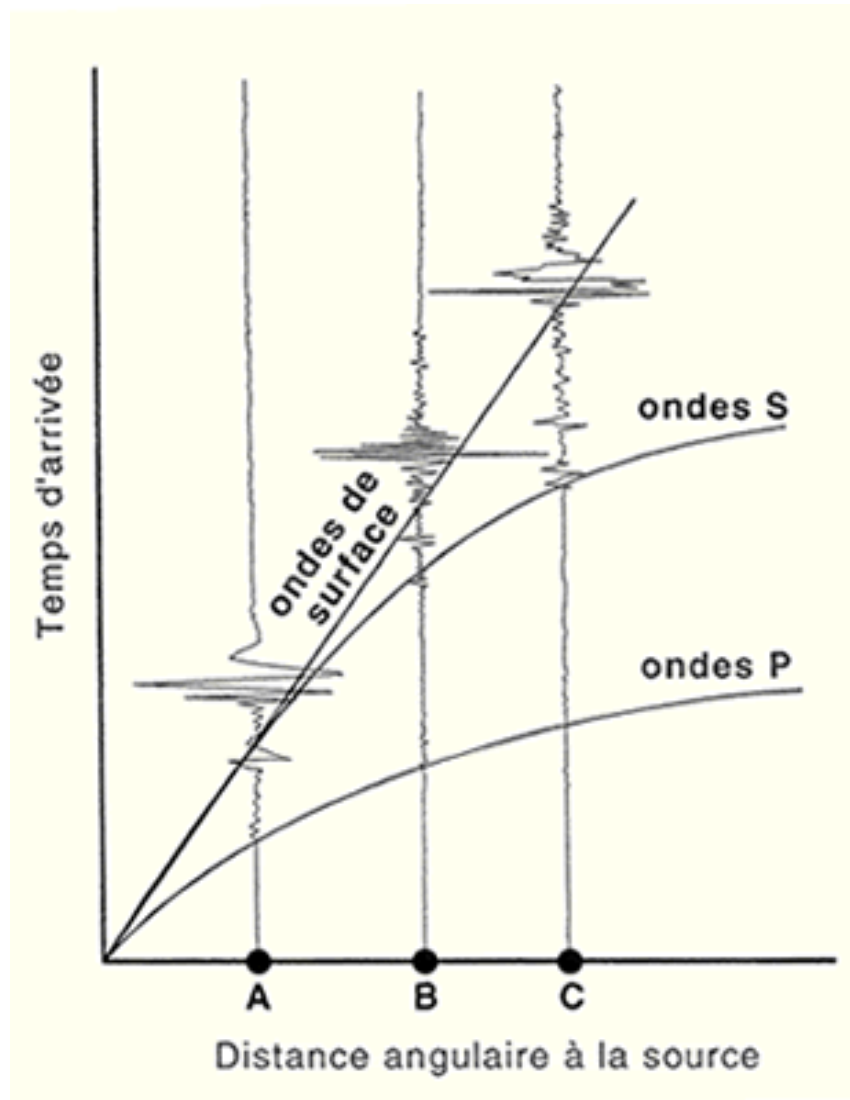
"i" une réflexion sur la graine.

"K" un trajet dans le noyau externe.

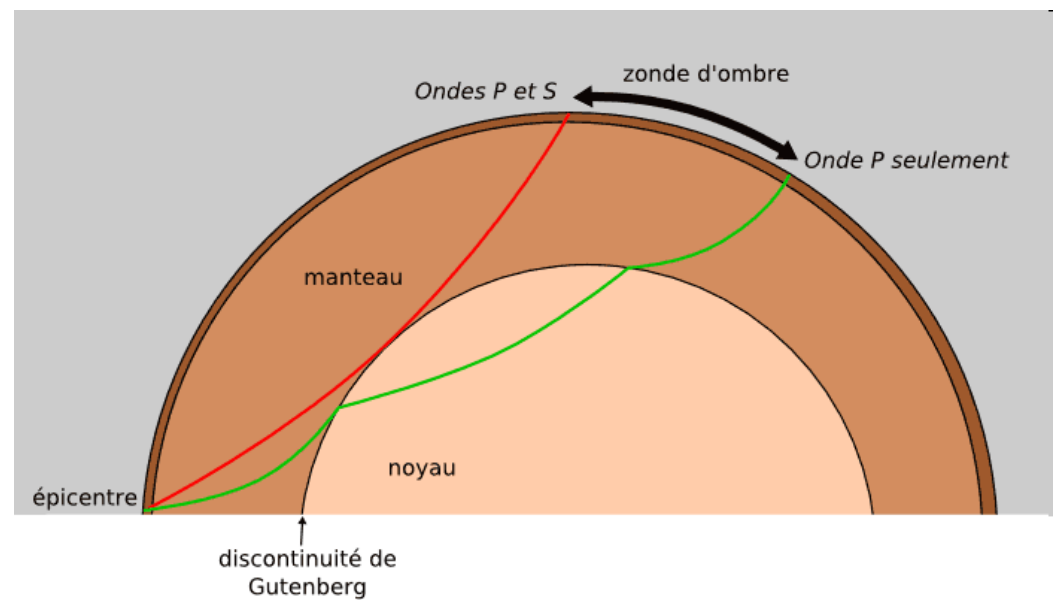
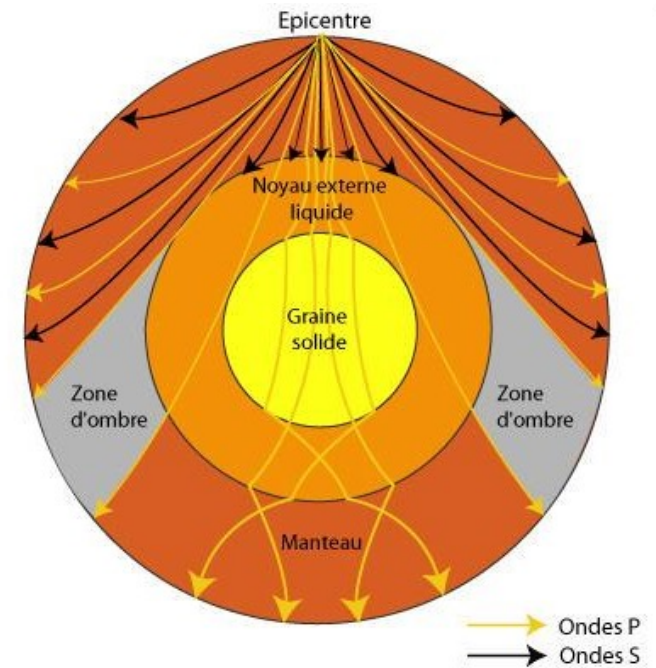
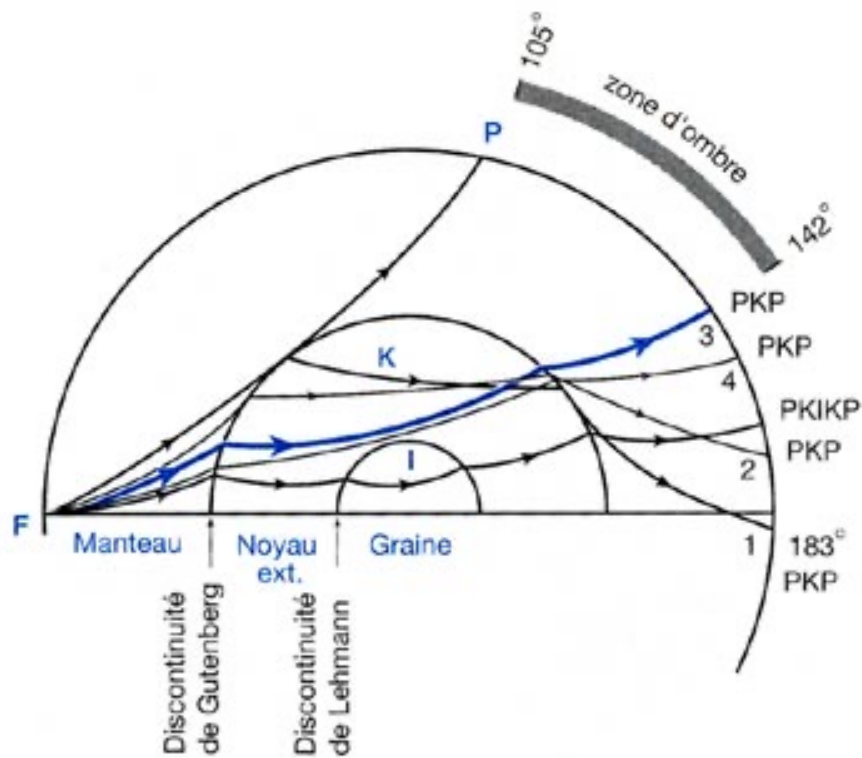
"I" un trajet dans la graine (onde P).

"J" un trajet dans la graine (Onde S)

Hodochrones



Zone d'ombre



Zone d'ombre

