Université de Ferhat Abbas sétif1
Institut d'architectur et des sciences de la terre
Département des scieneces de la terre.

COURS DE PROPERIETES PHYSIQUES DES ROCHES

Présenté par : Dr. HAMLAOUI MAHMOUD

METHODES SISMIQUES

COMPORTEMENT ELASTIQUE DES ROCHES

Introduction

la sismique d'exploration se divise principalement en deux grandes familles - La sismique réflexion - La sismique réfraction, Les deux méthodes se basent sur la propagation des ondes acoustiques (sismiques) dans le sous-sol.

Caractéristiques élastiques des roches

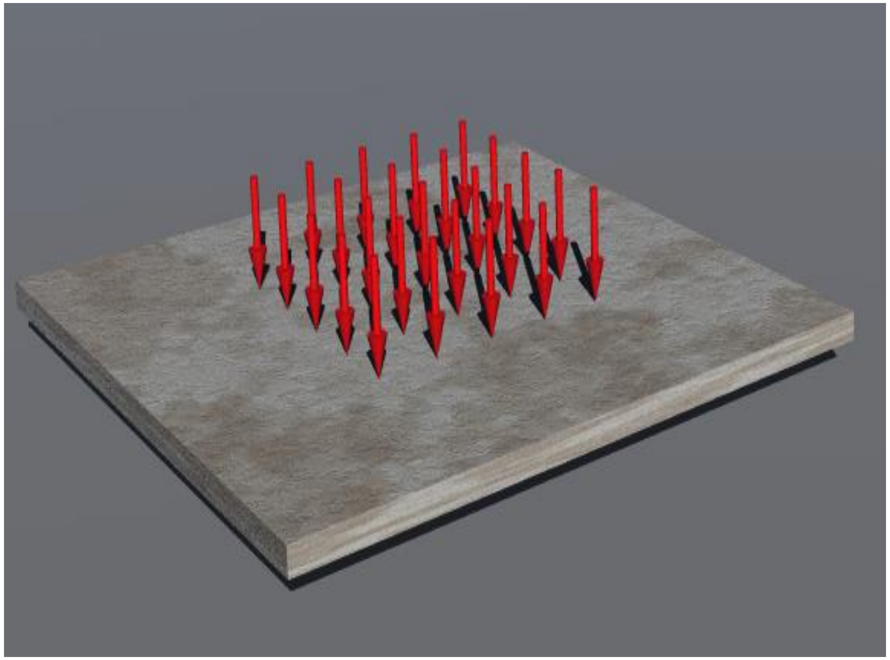
La théorie d'élasticité qui est à la base de la bonne compréhension de la propagation des ondes élastiques (sismiques), en effet, La théorie de l'élasticité des matériaux est à la base de la transmission des ondes acoustiques(sismiques) et donc les méthodes d'exploration sismique et la sismologie tirent profit de cette théorie. Il est donc utile de rappeler que certains paramètres ou modules élastiques pour un corps homogène et isotrope soumis à une contrainte sans subir une déformation permanente.

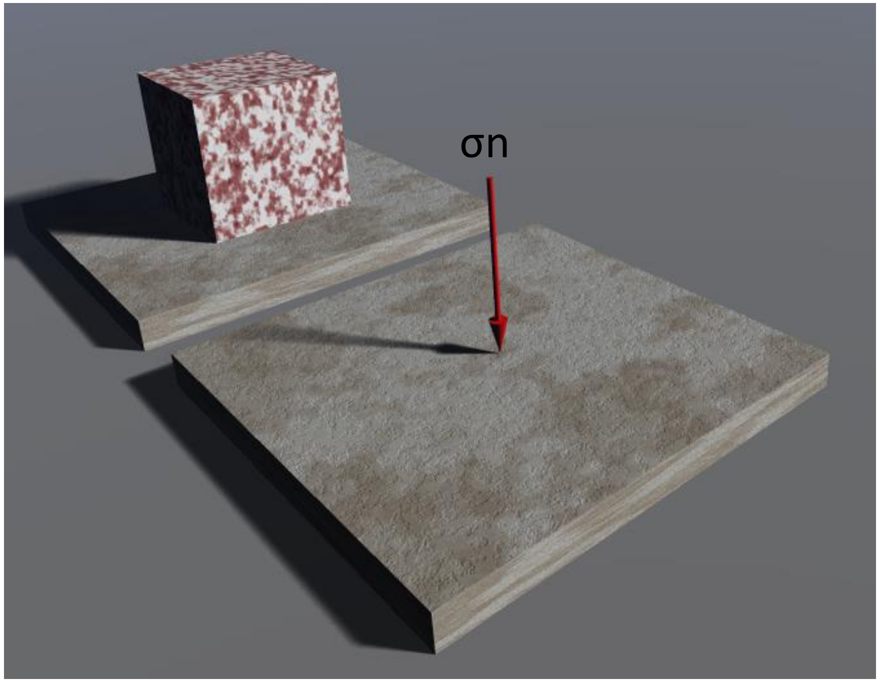
Il n'existe pas de solides qui ne se déforment pas. Tout corps soumis à de très faibles contraintes (forces par unité de surface) se déforme, il subit un comportement élastique appelé domaine d'élasticité. On dit qu'il est élastique au sens général du terme, par la suite on considère que tout matériau homogène et isotrope se trouvant à des températures et des pressions relativement faibles peut être considéré parfaitement élastique, à condition que les déformations dont il était l'objet , soient petites.

Rappel des contraintes et déformation

Contraintes

Lorsqu’une roche (solide) est soumise à des faibles contraintes, elle se déforme et reprend sa forme initiale quand la contrainte cesse .La déformation est réversible, c’est un comportement élastique.
La contrainte se définit comme étant une force appliquée à une certaine unité de surface.
C’est une propriété ponctuelle(un tenseur).
On distingue deux types de contraintes**: - Les contraintes normales, Les contraintes de cisaillement.**

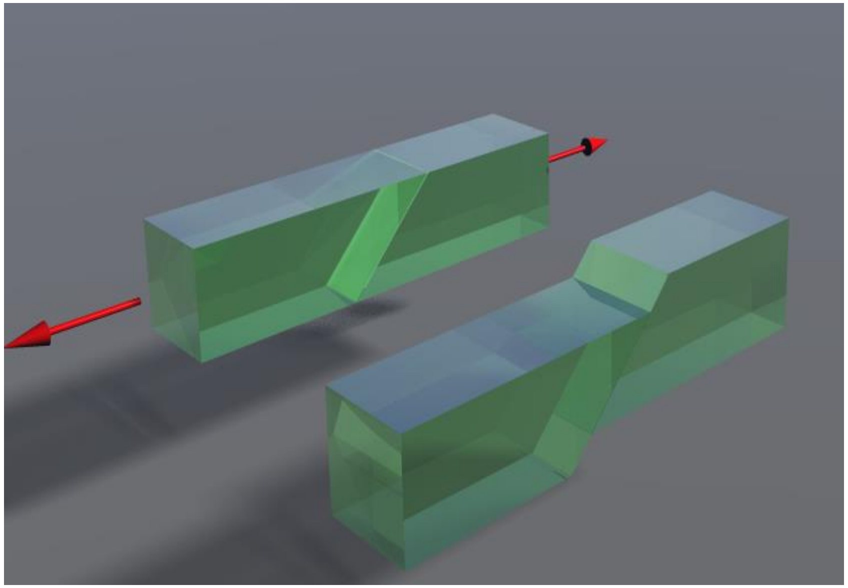


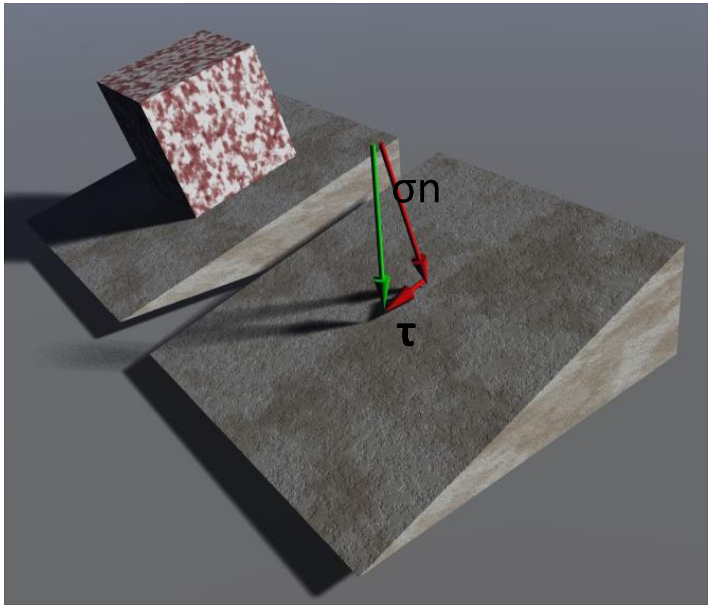


Une contrainte s'exerce toujours sur une surface
1- Elle peut être perpendiculaire à cette surface : La contrainte est alors dite normale, et notée σn
Dans la réalité, la contrainte s'exerce sur toute la surface de contact Par convention :
une compression est positive, une extension est négative

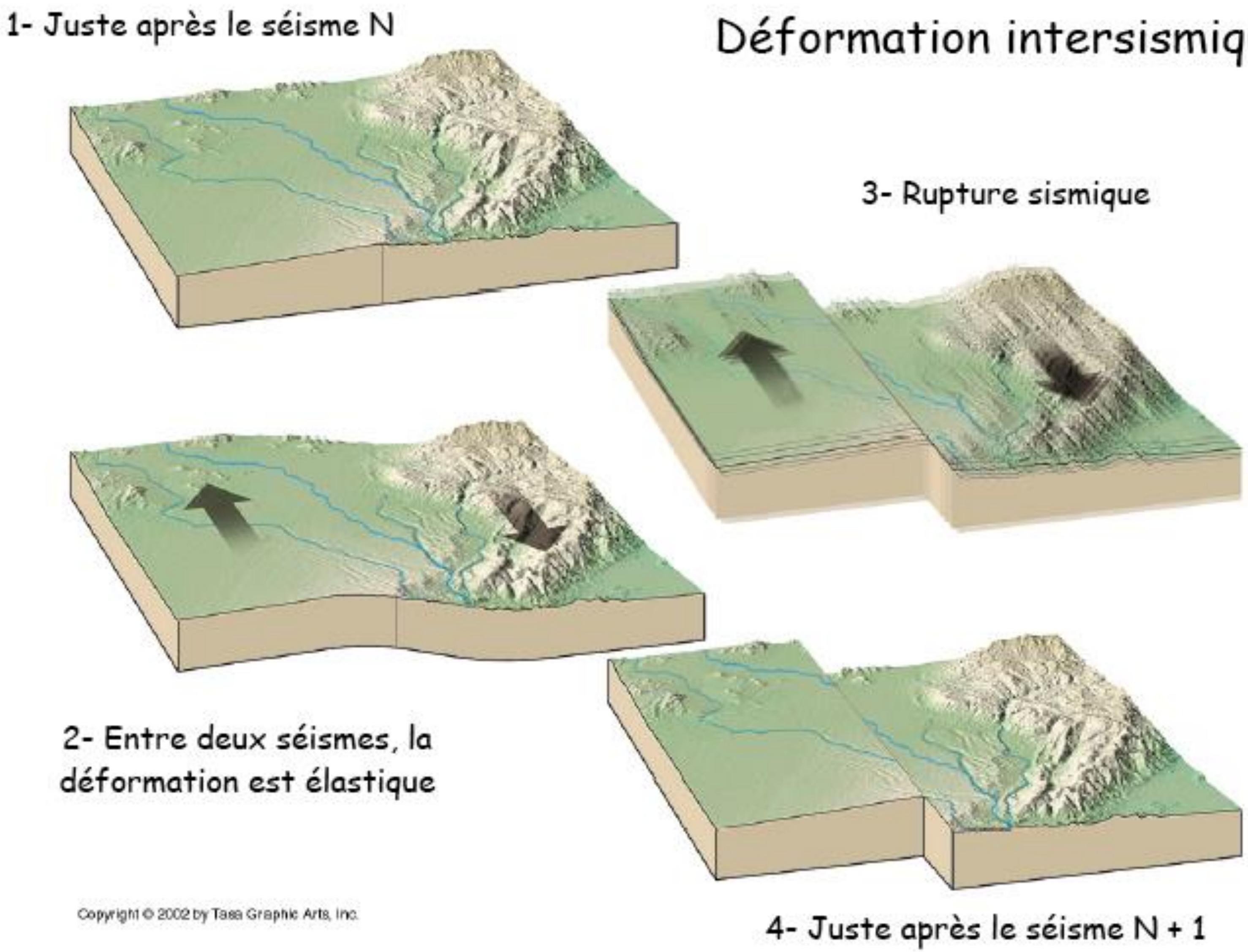
- Les contraintes de cisaillement

2- Elle peut aussi être oblique par rapport à la surface sur laquelle elle s'exerce :
La contrainte se décompose alors en une contrainte normale, notée **σn**, et une composante tangentielle, dite contrainte cisaillante, notée **τ**.



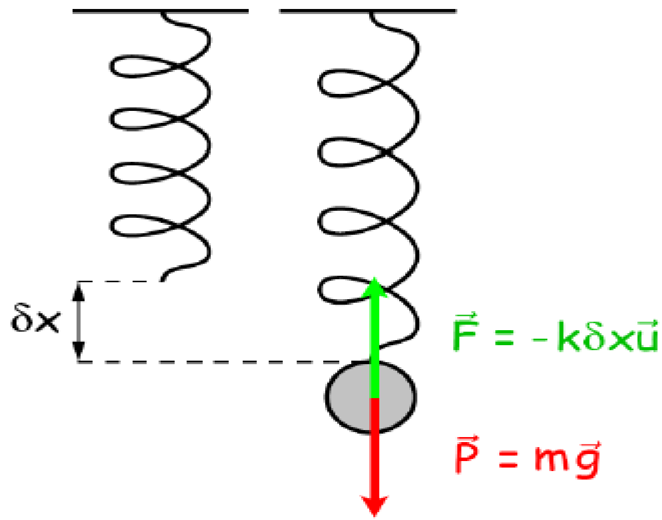


Déformation intersismique



En physique, la **loi de Hooke** modélise le comportement des solides élastiques soumis à des contraintes. Elle stipule que la déformation élastique est une fonction linéaire des contraintes. Sous sa forme la plus simple elle relie l'allongement (d'un ressort, par exemple) à la force appliquée. Cette loi de comportement a été énoncée par le physicien anglais Robert Hooke

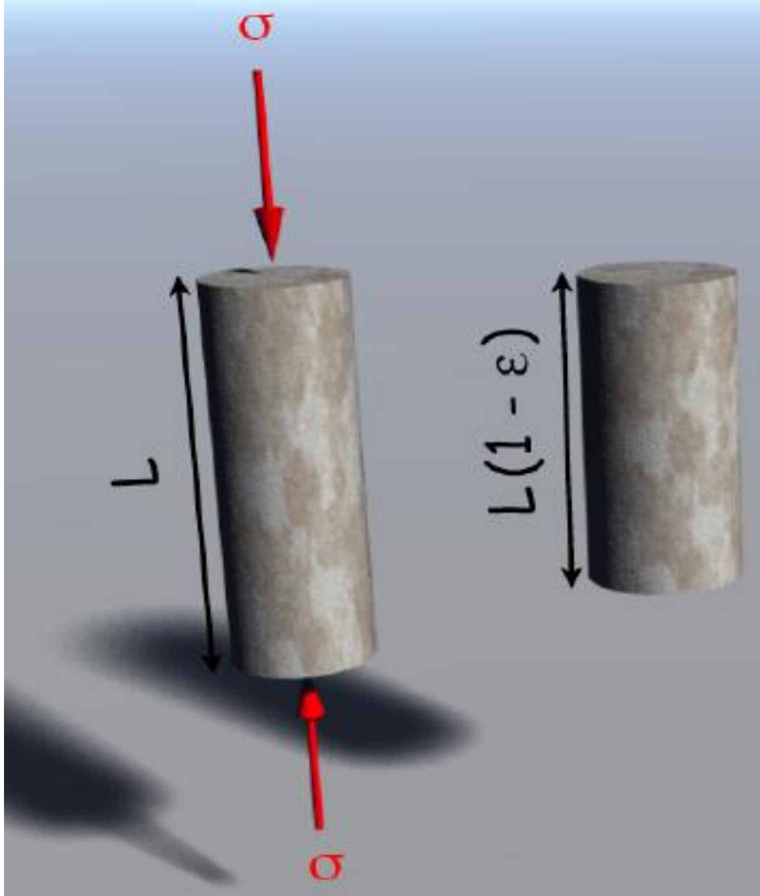
Analogue du point matériel attaché à un ressort



La force et l'allongement sont proportionnels
Quand on enlève la charge, le ressort retourne à sa longueur initiale

MODULE DE YOUNG

La contrainte et la déformation sont proportionnelles :



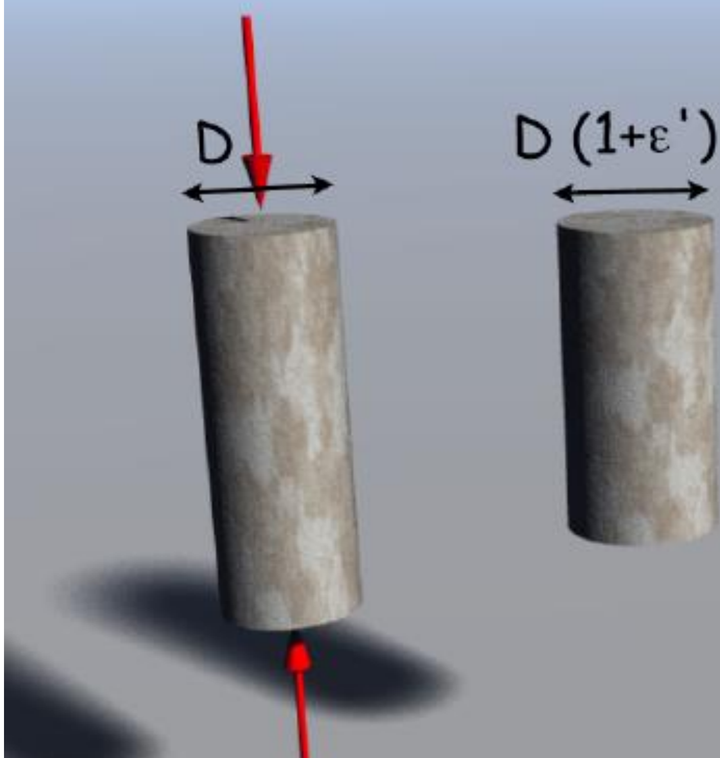
- $\sigma = E\varepsilon$
- Le coefficient E est appelé module d'Young (équivalent de k, la raideur du ressort)
- L'unité de E est la même que celle de σ : Pascal
- E varie entre 0,1 et 1,5 10^{11} Pa

Quand on supprime la contrainte, la déformation s'annule

Avec : $\sigma = \frac{F}{S}$ $\quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$

COEFFICIENT DE POISSON

Mais ce n'est pas tout :



- Le raccourcissement dans la direction longitudinale s'accompagne d'un allongement dans les directions perpendiculaires* :

$$\varepsilon' = \nu\sigma/E = \nu\varepsilon$$

- Le coefficient ν est appelé coefficient de Poisson. Il dépend du matériau. Il n'a pas d'unité.

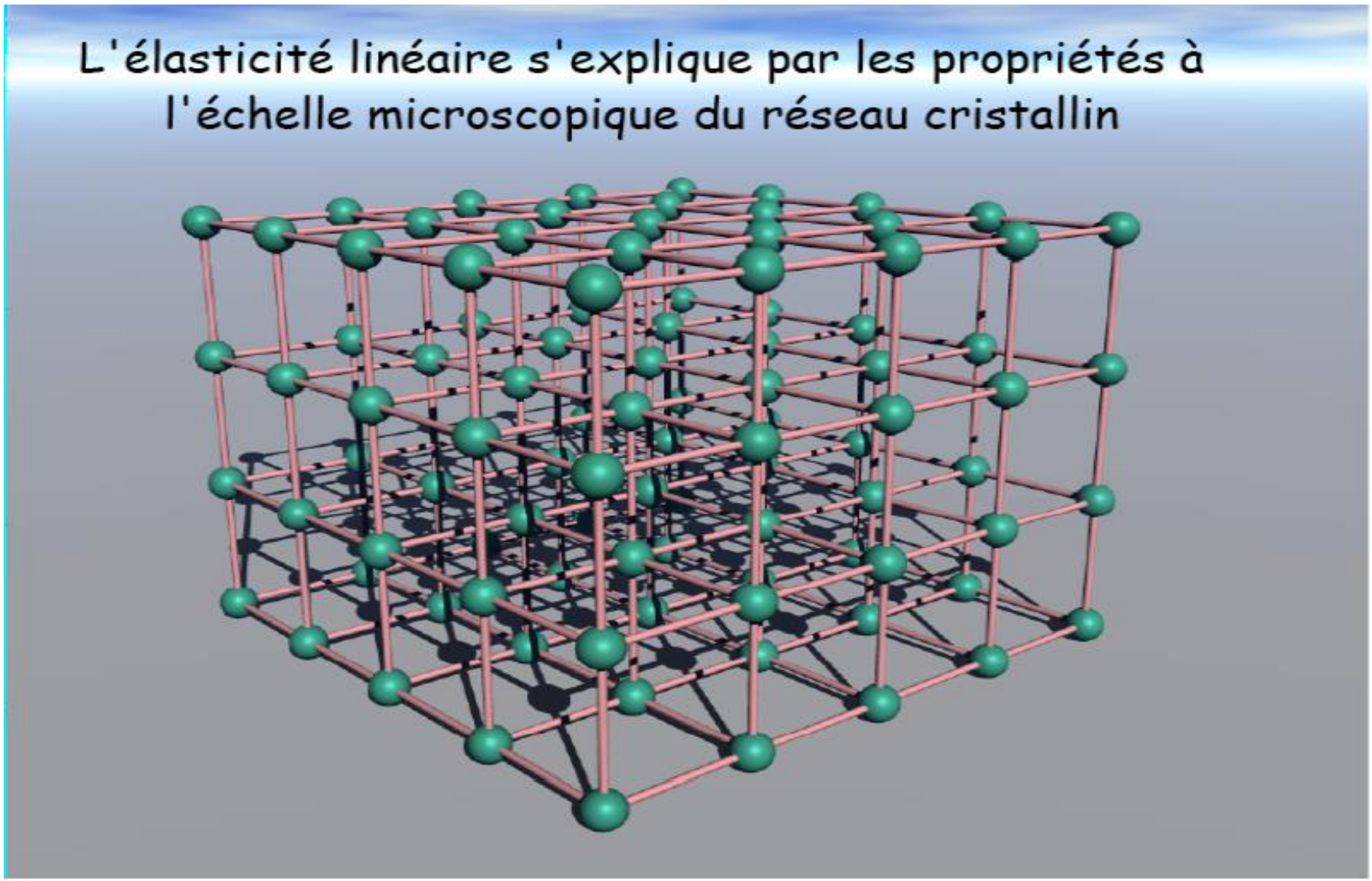
- Si le matériau est incompressible, ν vaut exactement 0,5.

* Si on étire dans la direction longitudinale, il y a un raccourcissement dans les directions perpendiculaires.

Unités utilisées		
Grandeur	Uinté (SI)	Unités conventionnelles
σ	Pa	kPa, MPa, GPa
E	Pa	MPa, GPa
ε	1	%, ‰

$$\nu = \frac{Contraction\ transversale\ unitaire}{allongement\ axial\ unitaire} = \frac{(l_0 - l)/l_0}{(L - L_0)/L_0}$$

Le coefficient de Poisson fait partie des constantes élastique, il est compris entre -1 et 0.5. les valeurs négatives n'ont Étés obtenues qu'expérimentalement pour des matériaux artificiels.



Loi similaire pour le cisaillement

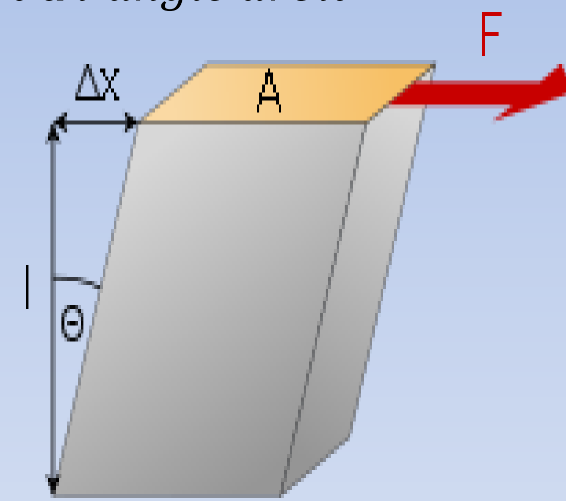
La loi de Hooke est une loi de déformation en traction/compression ; cependant, en cisaillement, on a une loi similaire :

$$\tau = G\ x\ \gamma$$

τ : *est la cission (contrainte de ciasillement)*

G : est le module de cisaillement ou module de Coulomb, également noté μ;

γ : *le déplacement laréral relatif* $= \frac{\Delta x}{l} = \tan\theta, \theta$ *est l'écart à l'angle droit*



$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{Fl}{A\Delta x}$$

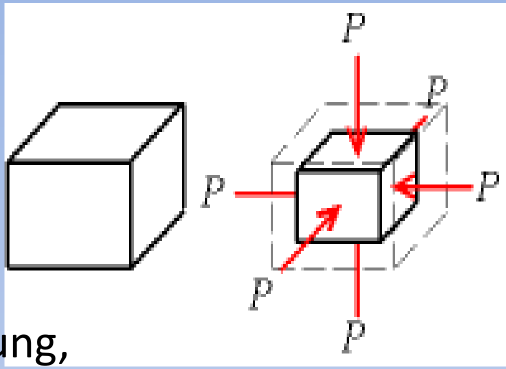
Dans le cas de matériaux isotropes, il est relié au module d'élasticité E et au coefficient de Poisson ν par l'expression

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Unités utilisées		
Grandeur	**Unité (SI)**	**Unités conventionnelles**
τ	Pa	MPa
G	Pa	MPa, GPa
γ	rad	°

Module d'incompressibilité K, ou module d'elasticité:

Il représente la relation de proportionnalité entre la pression et le taux de variation du volume.



$\Delta P = -K \frac{\Delta V}{V_0}$ avec K module d'incompressibilité (Dynes/cm^2)

son inverse $(module\ de\ compressbilité)\ \beta = \frac{1}{K}$

$\frac{1}{\beta} = K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, relation qui exprime la relation entre de module de Young, le coefficient de poisson et module d'incompressibilité.

Relations entre les différents modules élastiques

le module de cisaillement est lié au coefficient de Poisson et au module de Young par la relation suivante :

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

La connaissance du coefficient de Poisson et du module de Young permet de déterminer
Le module d'incompressibilité K ou son inverse β et le coefficient de lamé λ respectivement

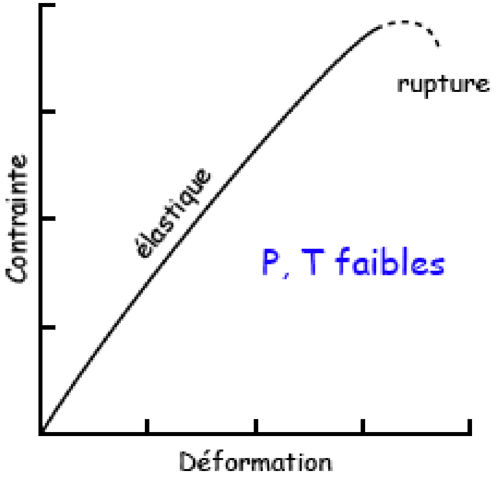
$$\lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)},\ K = \frac{1}{\beta} = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{2}{3}\ \frac{\mu(1+\nu)}{(1-2\nu)}\quad et\quad E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}.$$

Dans la Terre, les déformations élastiques sont faibles

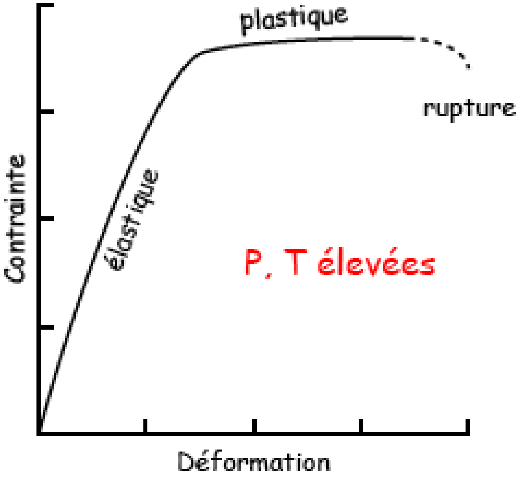
$\varepsilon <$ quelques 10^{-3}

1- Module d'Young élevé

2- Changements de comportement quand σ augmente



Elastique → Fragile
rupture cassante



Elastique → Plastique
déformation ductile

Comment se passent les changements de comportement ?

Elastique $\rightarrow$ Fragile

Elastique $\rightarrow$ Plastique

Critères de rupture, de plasticité…

$$f(\sigma,\tau,\varepsilon\ldots) = 0$$

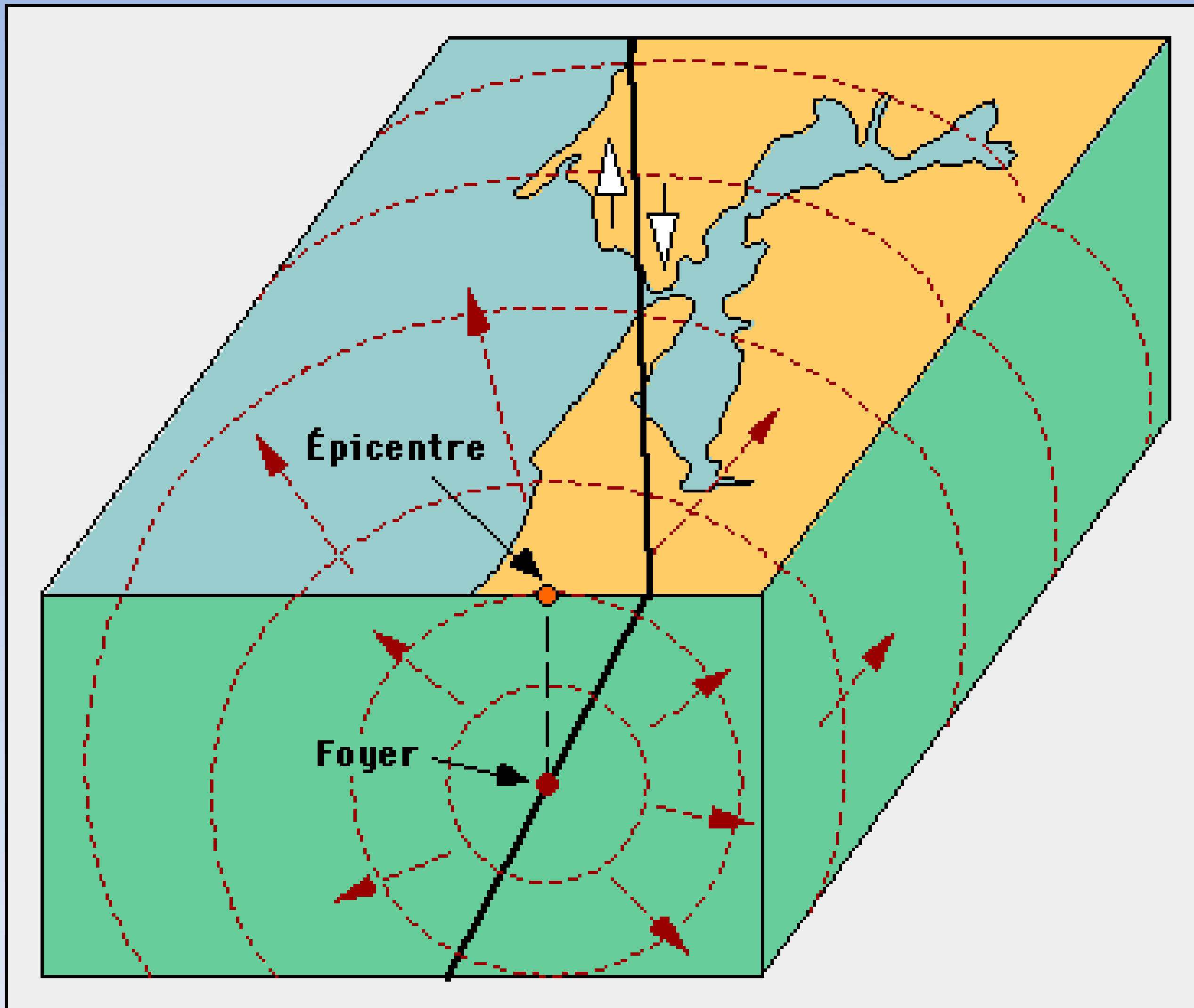
Les Ondes Sismiques

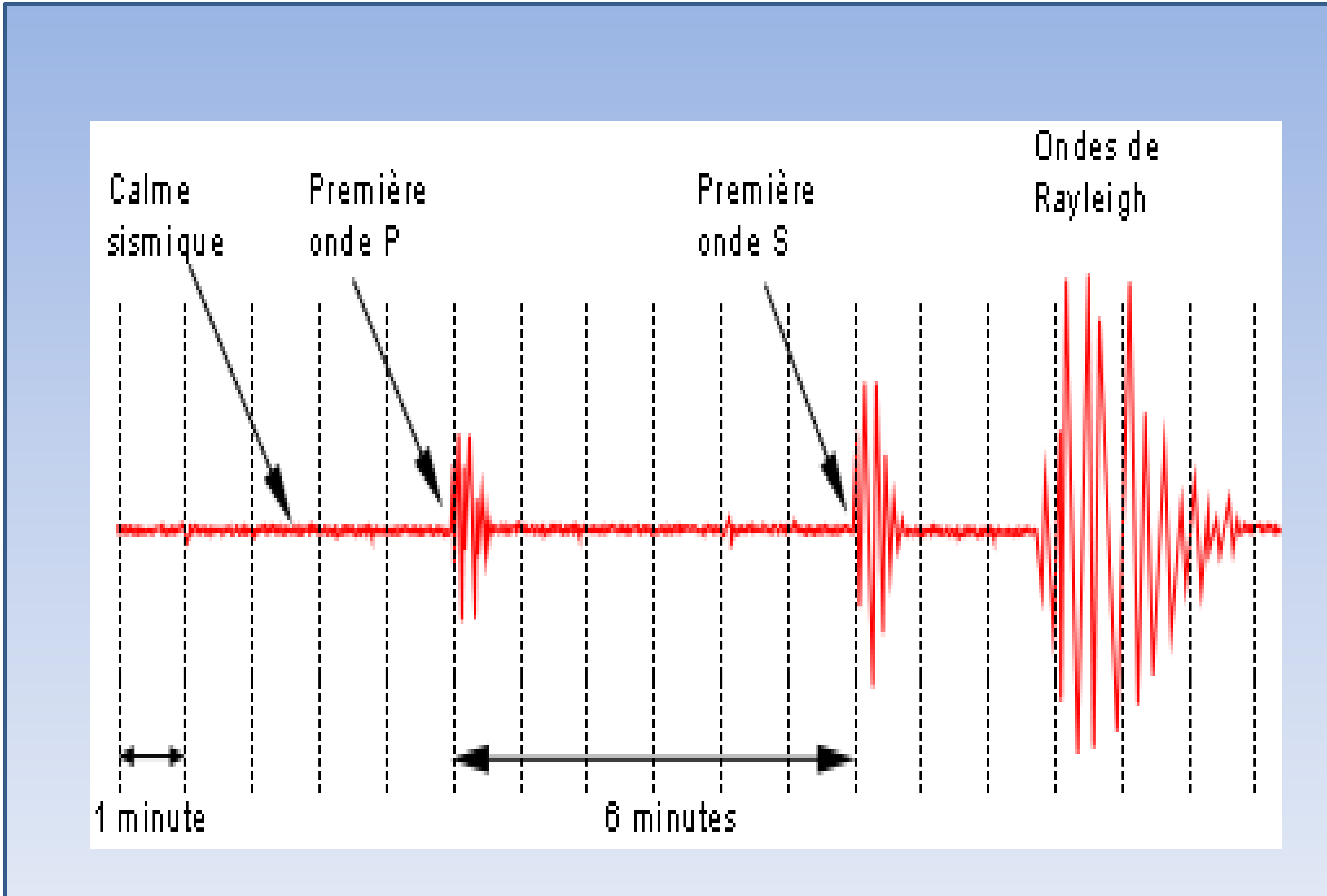
Les ondes sismiques sont des ondes élastiques, l'onde peut traverser un milieu sans modifier durablement ce milieu. L'impulsion de départ va "pousser" des particules élémentaires, qui vont "pousser" d'autres particules et reprendre leur place. Ces nouvelles particules vont "pousser" les particules suivantes et reprendre leur place, etc.

Les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques traversées, c'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure

Ces ébranlements, qui se déplacent sous forme d'ondes, traversent le Globe et donnent des indications irremplaçables sur sa constitution. On distingue :

Propagation des ondes Sismiques a partir du Foyer



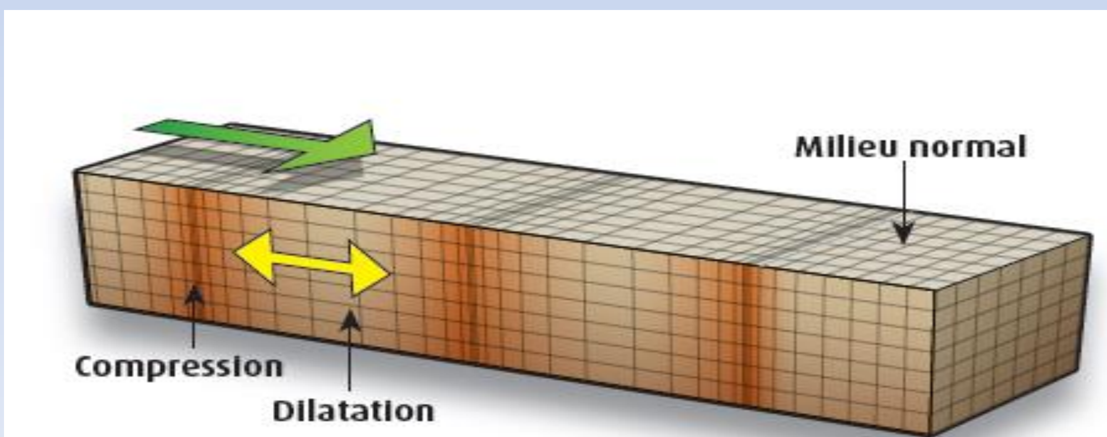


Calme sismique
Première onde P
Première onde S
Ondes de Rayleigh
1 minute
6 minutes

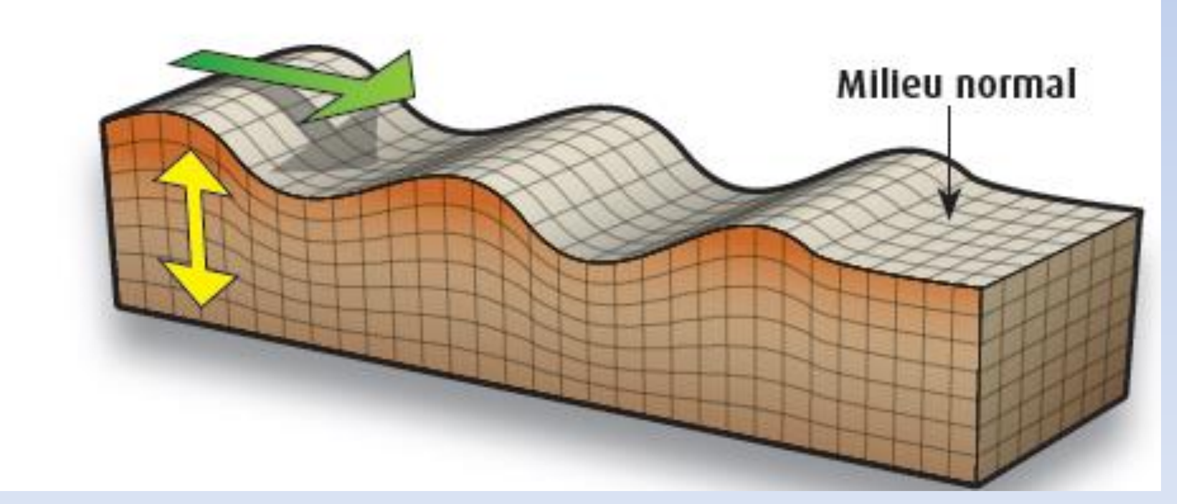
A\ Les ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur. On distingue :

Les ondes P ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les plus rapides (6 km.s-1 près de la surface) et sont enregistrées en premier sur un sismogramme. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

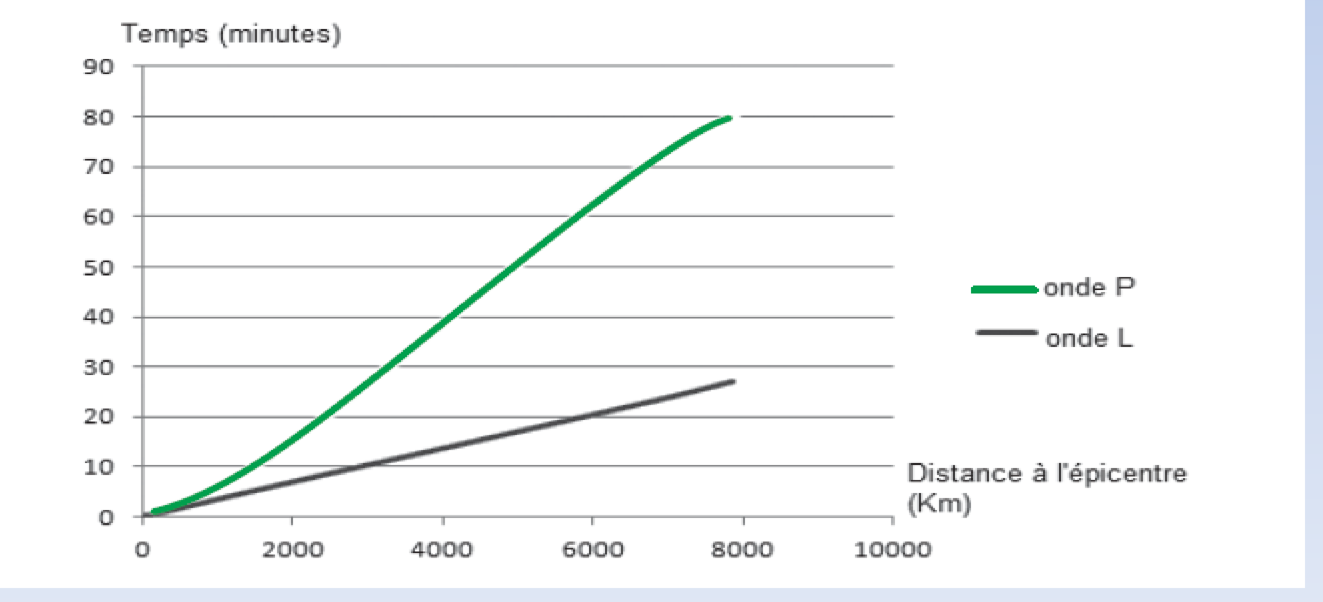


Les ondes S ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. A leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau de la Terre. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P, elles apparaissent en second sur les sismogrammes.



La différence des temps d'arrivée des ondes P et S suffit, connaissant leur vitesse, à donner une indication sur l'éloignement du séisme.

Les ondes de volume se propagent un peu comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, au passage manteau-noyau par exemple. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur de la Terre. Leur temps de parcours dépend de ce trajet, elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

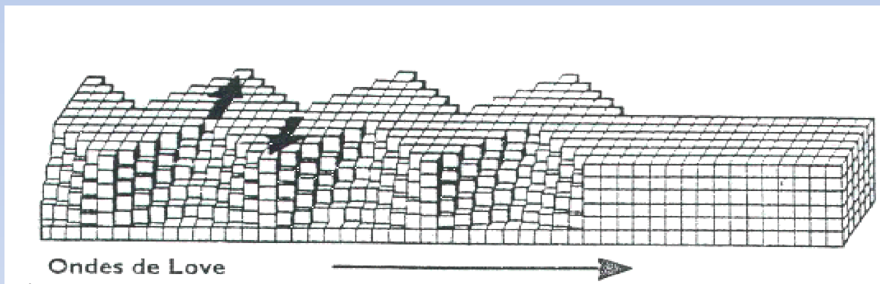


B\ Les ondes de surface

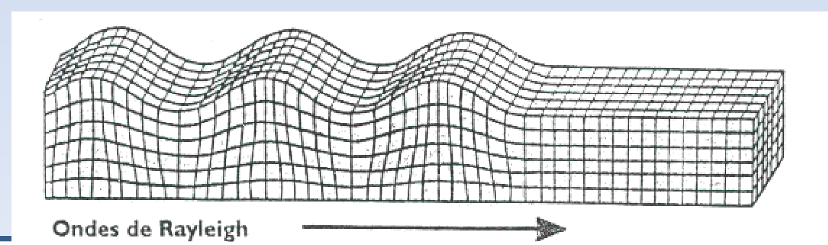
Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte.

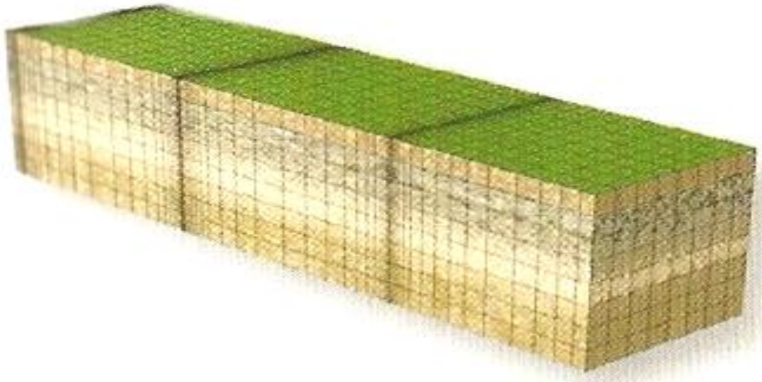
On peut distinguer :

L'onde de Love : le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices.

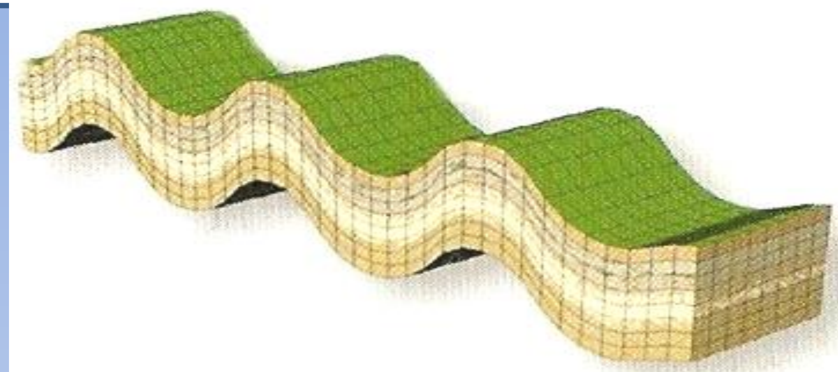


L'onde de Rayleigh : le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement à la fois horizontal et vertical, elliptique, en fait. Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s, elles sont plus rapides que les ondes de Rayleigh

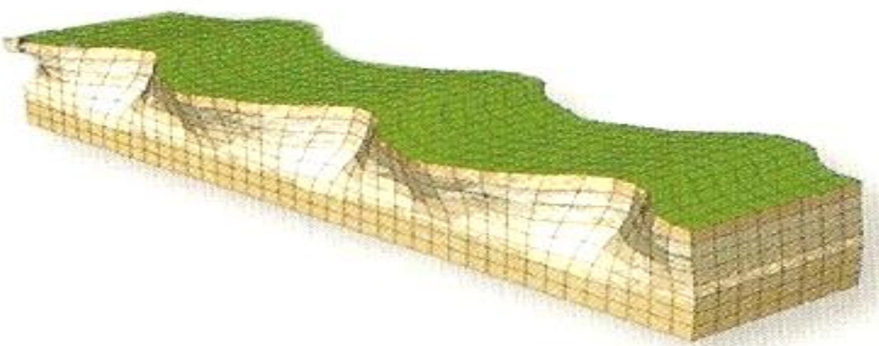




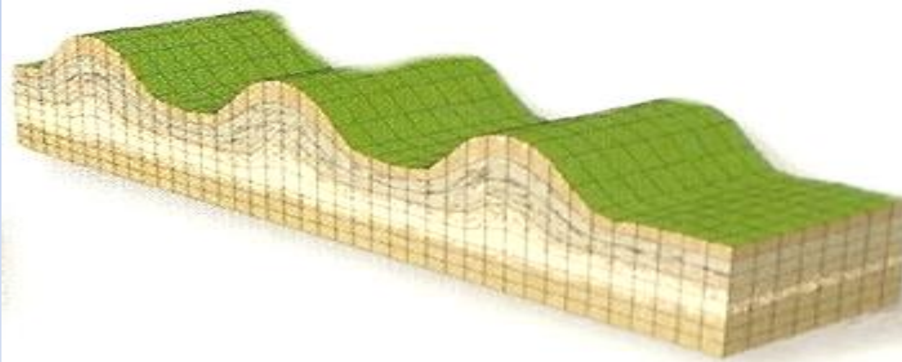
Ondes P Aussi appelées ondes primaires ou de compression, elles se déplacent rapidement de l'intérieur de la Terre vers la surface et sont les premières à être ressenties lors d'un séisme.



Ondes S Appelées ondes secondaires ou de cisaillement, car elles provoquent des mouvements du sol perpendiculaires au sens de leur propagation. Elles voyagent à l'intérieur de la Terre deux fois moins vite que les ondes P.



Ondes de Love Elles provoquent un ébranlement horizontal à la surface de la Terre, qui cause de gros dégâts. Elles sont bien plus lentes que les ondes de volume.



Ondes de Rayleigh Elles provoquent la déformation de la surface du sol comme des vagues sur l'océan. Leur mouvement est à la fois vertical et horizontal et elles sont les plus lentes.

Détermination du module de Young et du coefficient de Poisson

Le module de Young et le coefficient de Poinsson sont les deux seuls paramètres de déformabilité caractérisant les propriétés élastiques des roches qui sont directement accessibles par mesure expérimentale. Ces deux paramètres physiques sont étroitement liés à la nature pétrographique, a la porosité et au degré de saturation des formations géologiques.

Leur détermination s'effectue par la mesure tout d'abord des paramètres acoustiques des formations géologiques telles que:

1- la mesure du temps de transit (ou la lenteur Δt dans la formation géologique) entre deux récepteurs a partir des données diagraphies acoustiques (PSV, cross-hole , down hole… etc.)

2- La déduction des vitesses Vp et Vs.

La vitesse Vp est déduite à l'aide de la relation de Cordier (1983).

$$V_p = \frac{10^6}{\Delta t}$$

V_p en pied/s et Δt en μs /pied (sachant que 1m =3.2809 ft)

Quant à la mesure de la densité (d) des formations, elle est fournie par la log de densité (mesure à l'aide de la sonde gamma-gamma).

Les vitesses des ondes de cisaillement et longitudinales sont liées aux constantes élastiques et à la densité par les relations suivantes:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{d(1-2\sigma)(1+\sigma)}} \quad \text{et } V_s = \sqrt{\frac{E}{2d(1+\sigma)}}$$

La connaissance de celles-ci permet de déduire le module de Young et le coefficient de Poisson par les relations ci-dessous:

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2}-(Vs/Vp)^2}{1-\left(\frac{Vs}{Vp}\right)^2}$$

Le module de cisaillement se détermine à partir de la connaissance des vitesses des ondes sismiques (S)

$$\mu = G = d.Vs^2$$

Généralement la valeur de μ est égale à environ la moitié de celle de E et de $\mu = 0$ pour les liquides qui ne présentent aucune rigidité.

Tableau qui donne les relations entre les différents modules statiques d'élasticité

	E	σ	K	μ	λ
			$\frac{E}{3(1-2\sigma)}$	$\frac{E}{2(1+\sigma)}$	$\frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$
(E, k)		$\frac{3k-E}{6K}$	(E, σ)	$\frac{3kE}{9K-E}$	$3K\left(\frac{3K-E}{9K-E}\right)$
(E, μ)		$\frac{E-2\mu}{2\mu}$	$\frac{\mu E}{3(3\mu-E)}$		$\mu\left(\frac{E-2\mu}{3K-E}\right)$
(σ , k)	$3k(1-2\sigma)$			$\frac{3k}{2}\left(\frac{1-2\sigma}{1+\sigma}\right)$	$3k\left(\frac{\sigma}{1+\sigma}\right)$
(σ, μ)	$2\mu(1+\sigma)$		$\frac{2\mu(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)}$		$\mu\left(\frac{2\sigma}{1-2\sigma}\right)$
(σλ)	$\mu\frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{\sigma}$		$\lambda\left(\frac{1+\sigma}{3\sigma}\right)$	$\lambda\left(\frac{1-2\sigma}{2\sigma}\right)$	
(k, μ)	$\frac{9k\mu}{3k+\mu}$	$\frac{3k-2\mu}{2(3k+\mu)}$			$k-2\frac{\mu}{3}$
(k, λ)	$9k\left(\frac{k-\lambda}{3k-\lambda}\right)$	$\frac{\lambda}{3k-\lambda}$		$\frac{3}{2}(k-\lambda)$	
(μ, λ)	$\mu\left(\frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\right)$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\lambda+\frac{2}{3}\mu$		

Relation entre densité d, Vp et les paramètres élastiques

La relation entre la densité, la vitesse Vp et les paramètres élastiques s'établit comme suit:

$$d.V_p^2 = \lambda + 2\mu = 3K - 2\lambda = K + 4/3\mu = \mu\frac{4(\mu-E)}{(3\mu-E)} = 3K\frac{(3K+E)}{(9K-E)} = \lambda\,\frac{1-\sigma}{\sigma} = \mu\frac{(2-2\sigma)}{(1-2\sigma)} = 3K\frac{(1-\sigma)}{(1+\sigma)}$$

Relation entre d, Vp , Vs et les coefficients géodynamiques d'élasticité.

Module de cisaillement dynamique : $\mu_d = d\,V^2_{s}$.

Paramètre de Lamé: $\lambda_d = d(V^2_p - 2V^2_s)$

Module dynamique de compression : $E_d = d.V_s^2\ \frac{(3Vp^2-4Vs^2}{Vp^2-Vs^2}$

Module dynamique de compressibilité : $K_d = d(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$

Coefficient de Poisson dynamique : $\sigma_d = \frac{(Vp^2-2Vs^2)}{2(Vp^2-Vs^2)}$ et $E_d = 2d\,V_s^2\,(1+\sigma_d)$

-