

# Deuxième partie : La Dynamique interne de la planète

## Chapitre 1 : Les Séismes



Un séisme est un mouvement brusque de la surface terrestre.

Séisme a pour synonyme «**tremblement de terre**».



Responsable : Pr. Mohammed AARAB  
A.U : 2019 / 2020

Les séismes ou tremblements de terre constituent un phénomène géologique qui de tout temps a terrorisé les populations qui vivent dans certaines zones du globe.



L'étude des séismes présente deux aspects :

- d'une part manifestation de l'activité interne du globe,
- d'autre part outil de compréhension de la structure du globe.

## Origine des tremblements de terre

Lorsqu'un matériau rigide est soumis à des contraintes de cisaillement, il va d'abord **se déformer** de **manière élastique**, puis, lorsqu'il aura atteint sa **limite d'élasticité**, la **rupture se produit**, en dégageant de façon instantanée toute l'énergie qu'il a accumulé durant la déformation élastique.

D'une façon plus physique **un séisme est le relâchement brusque d'une contrainte.**

- ☞ C'est ce qui se passe lorsque la **lithosphère** est soumise à des contraintes.
- ☞ Les mouvements de plaques créent des tensions à l'intérieur de la lithosphère (contraintes) qui provoquent des déformations.
- ☞ Les matériaux ont une certaine élasticité. Sous l'effet de la contrainte les roches accumulent de l'énergie durant la déformation élastique.
- ☞ A certains endroits l'élasticité des roches atteint des limites et brutalement se produisent des ruptures sous forme de failles.

**Séismes = ruptures = formation de failles**  
**Faille = plan de faiblesse dans la lithosphère**

# Pourquoi les séismes ?

☛ La Terre, notre planète, est vivante.



☛ Sa chaleur interne, en s'évacuant, induit des mouvements visqueux dans ses profondeurs, en particulier dans ce qui est appelé l'asthénosphère (entre 700 km et 70 à 150 km de profondeur).

Rq : jusqu'au manteau inférieur 2885km

☛ Ceux-ci provoquent à leur tour des mouvements des plaques rigides lithosphériques situées à la surface du globe (entre 70 à 150 km de profondeur et la surface) : c'est ce qui est communément appelé la tectonique des plaques. Ce sont ces mouvements entre plaques lithosphériques qui sont la principale cause des **séismes**.

## Pourquoi les séismes ?

Les mouvements relatifs entre les grandes plaques lithosphériques sont de 3 types principaux :

- ✓ de l'étirement, là où se crée les plaques océaniques au niveau des rifts et des grandes dorsales médio-océaniques ;
- ✓ du raccourcissement, dans les zones de chevauchement de plaques: on parle de subduction lorsqu'une plaque océanique passe sous une autre plaque (par exemple la ceinture du Pacifique au Chili, Alaska, Japon) ou de collision lorsque deux plaques continentales sont impliquées (par exemple les chaînes himalayenne ou alpine) ;
- ✓ du coulissage latéral (ou décrochement), comme au niveau des failles transformantes ou des célèbres failles de San Andreas (Californie, Etats-Unis) ou nord-anatolienne (Turquie).

## Séisme = rupture Accumulation + Relâchement des contraintes

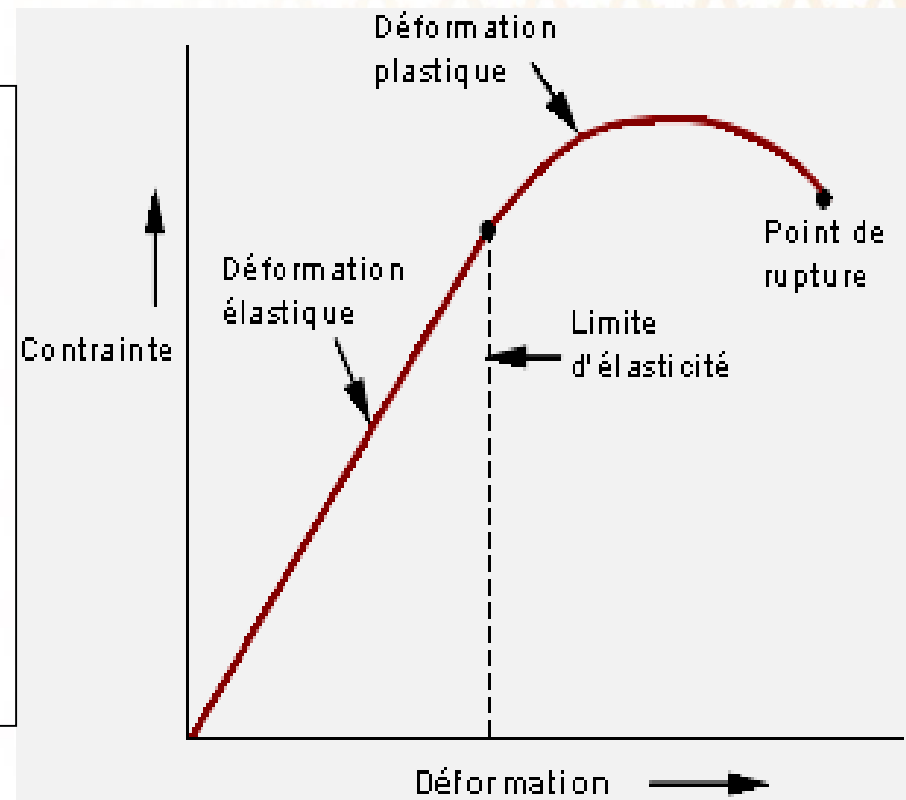
- Un matériau rigide soumis à des contraintes de cisaillement, se déforme de **manière élastique puis de manière plastique**
- **Au point de rupture**, il se rompt

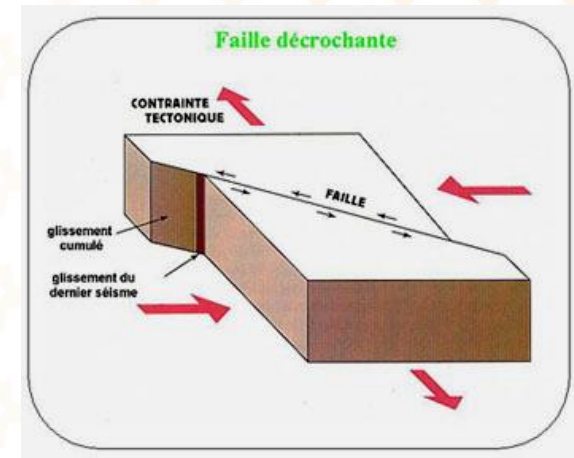
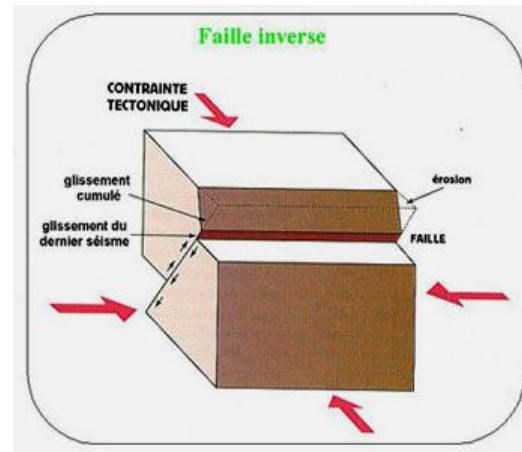
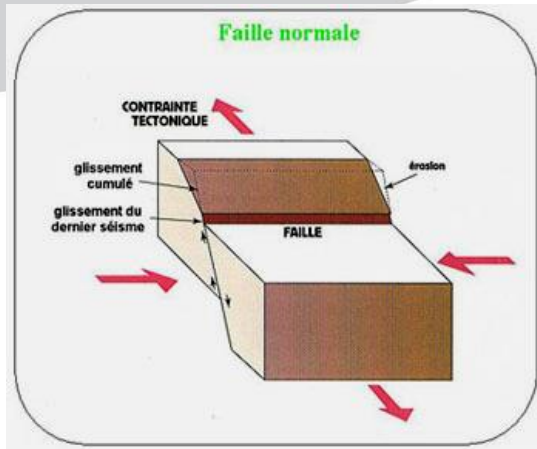
### DEFORMATION

**Élastique** : le matériau reprend sa forme et son volume lorsque la contrainte est relâchée

**Plastique** : le matériau reste déformé lorsque la contrainte est relâchée

**Point de rupture**: libération de l'énergie accumulée lors de la déformation plastique





L'énergie brusquement dégagée le long de ces failles causent des séismes (tremblements de terre).

La propagation à l'intérieur du globe terrestre se fait sous forme d'ondes.



Les blocages le long des miroirs de failles font que les déplacements se font par coups successifs ce qui provoque les répliques enregistrées après le grand séisme.



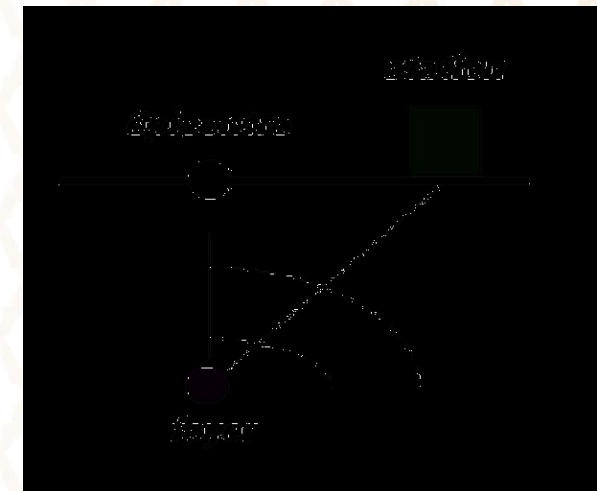
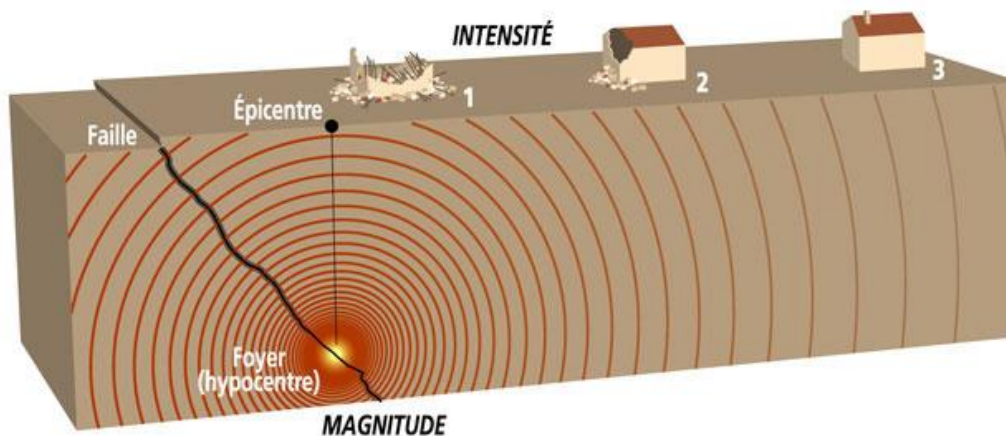
## Foyer ou hypocentre

L'endroit où démarre la rupture est appelé **foyer** du séisme ou **hypocentre**  
(0 à 700 km profondeur)

## Epicentre

**L'épicentre** microsismique est le point de la surface du sol le plus proche du foyer (latitude, longitude)

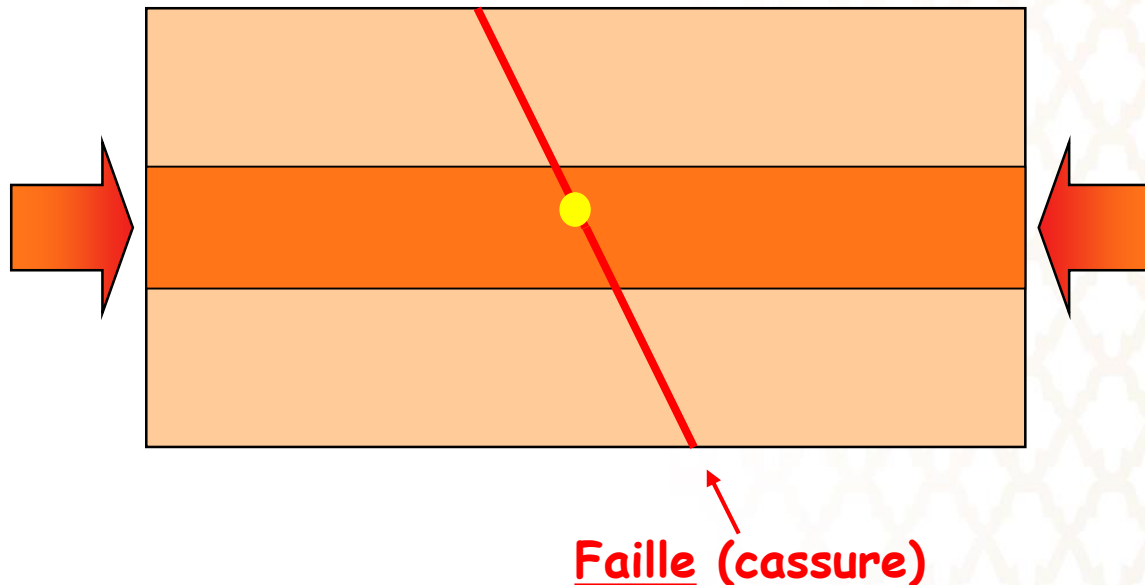
**L'épicentre macrosismique** = lieu de plus forte intensité ressentie -Peut être différent de l'épicentre réel.



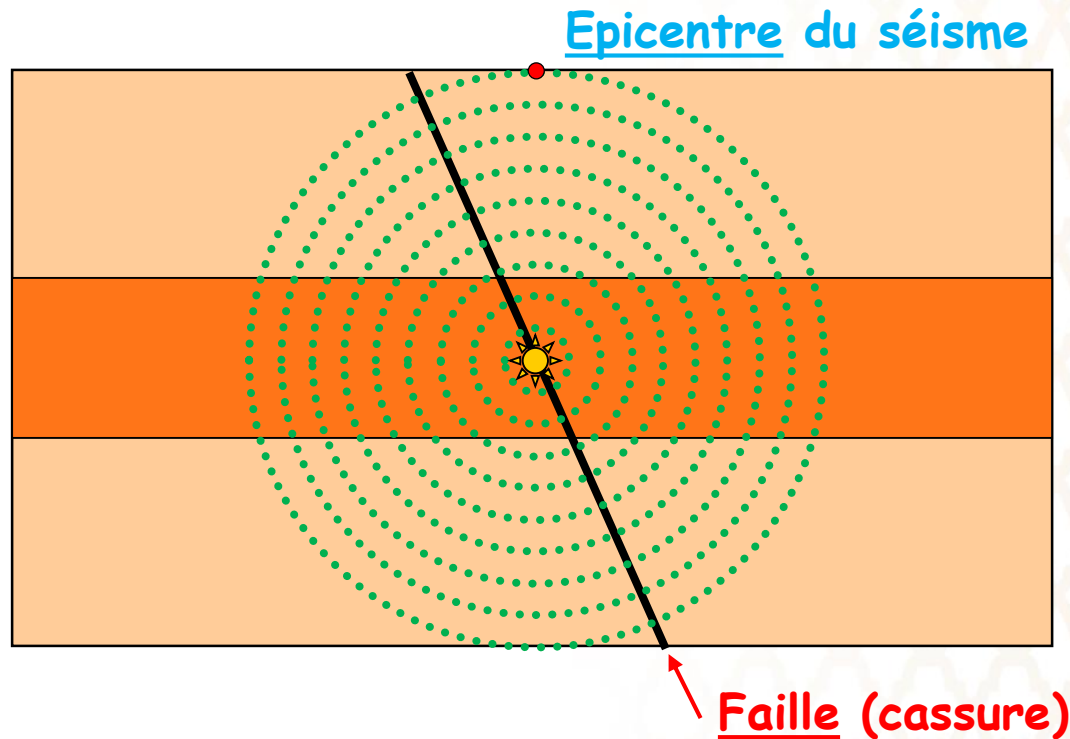
On considère 3 couches de roches superposées :

- Des forces colossales s'exercent sur ces roches du sous-sol, en profondeur... et les **déforment**.
- Lorsque ces forces dépassent la résistance des roches, les roches cassent et une **faille se forme**.

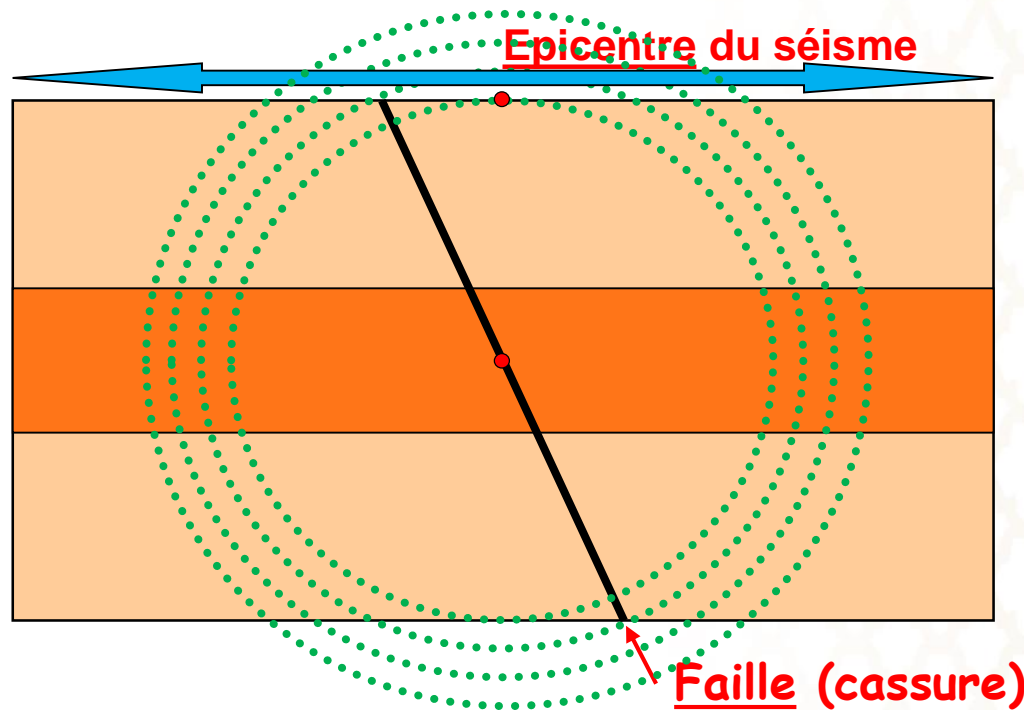
La faille peut se propager jusqu'à la surface.



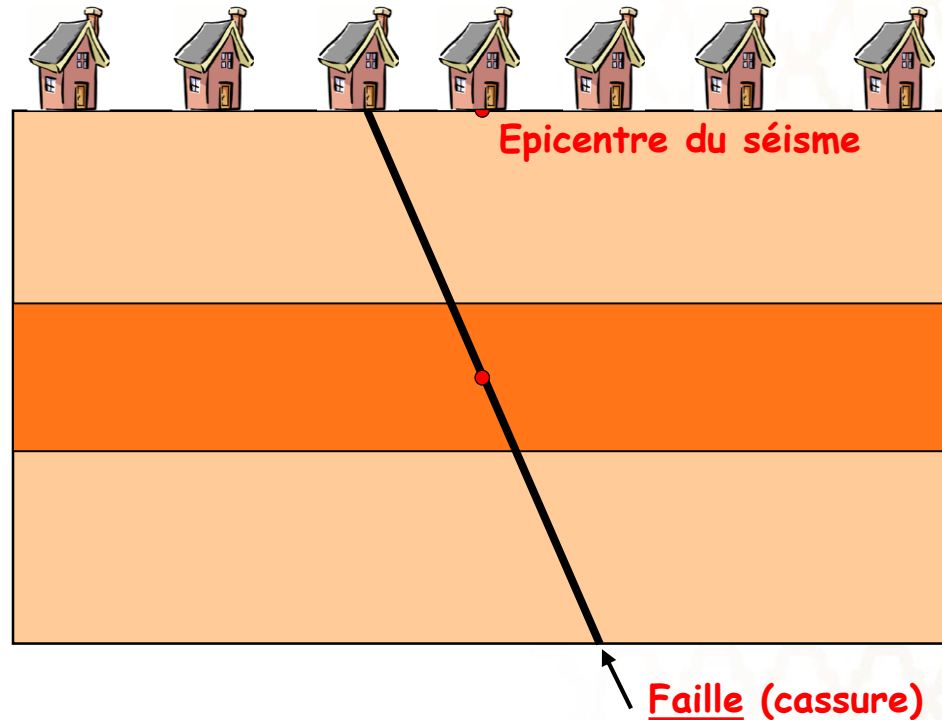
- La formation de la faille donne naissance à des **ondes sismiques** qui se propagent à travers les roches, dans toutes les directions...
- Lorsqu'elles atteignent la surface, elles se manifestent par des **secousses sismiques** au niveau de l'**épicentre**.



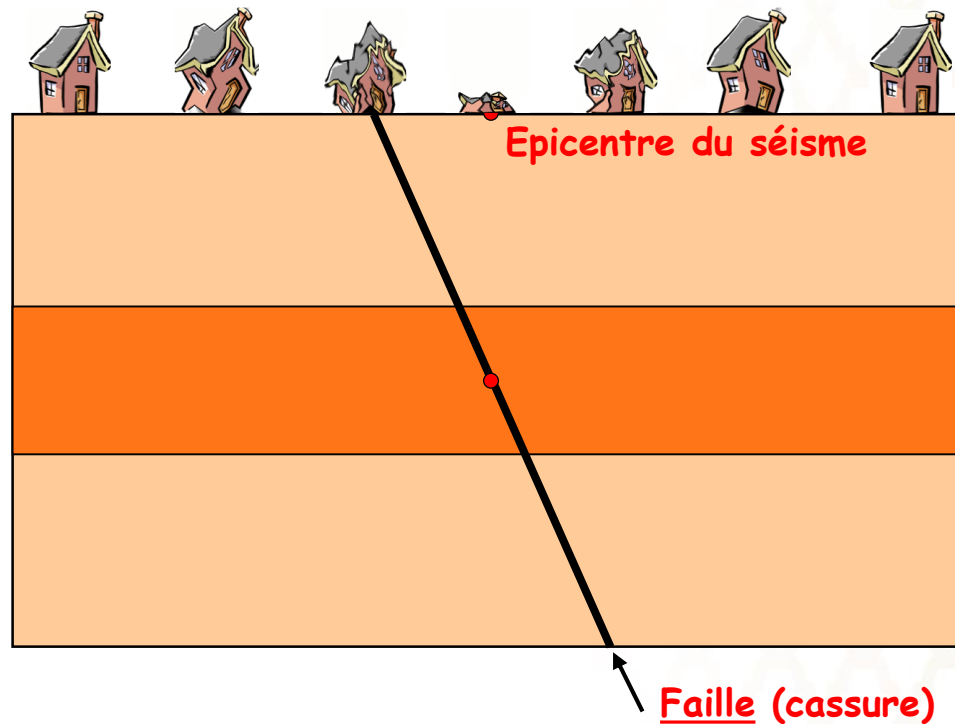
- Les ondes sismiques continuent à se propager à travers les roches du sous-sol.
- Elles se manifestent en surface par des **secousses sismiques** autour de l'**épïcéntré**.



En se propageant dans les roches du sous-sol, **les ondes sismiques s'affaiblissent**... ce qui se traduit en surface par des **secousses de plus en plus faibles** lorsqu'on s'éloigne de l'épicentre.

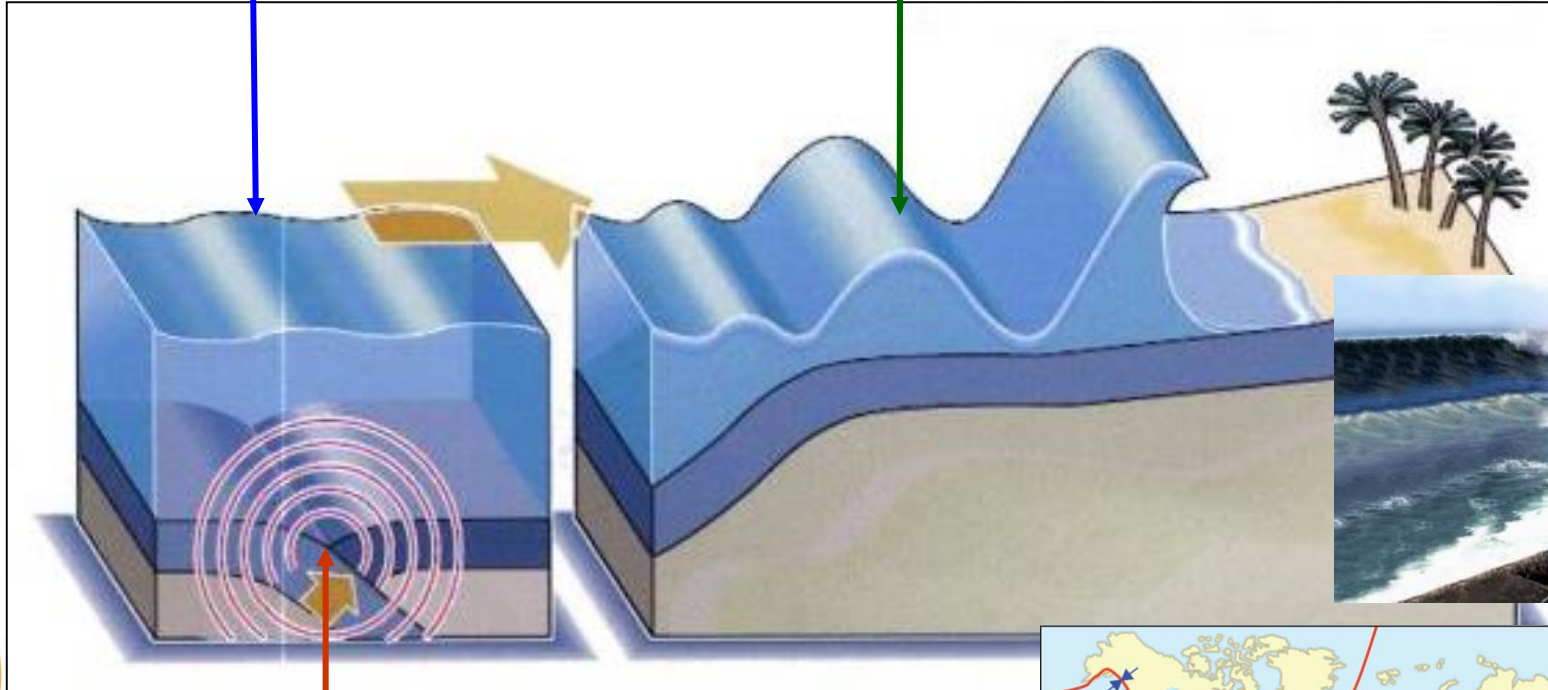


Les secousses étant de plus en plus faibles à partir de l'**épicentre**, les effets du séisme sont de moins en moins dévastateurs au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'épicentre.

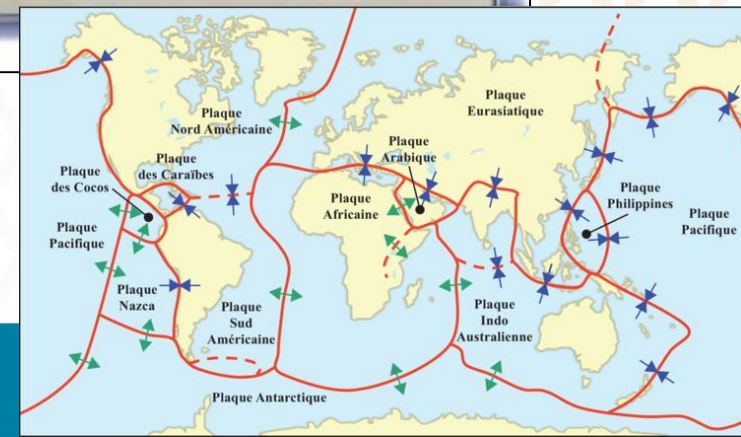


2. Vagues de faible amplitude, de grande longueur d'onde et de vitesse très élevée (jusque 800 Km/h)

3. A l'approche de la côte, les vagues ralentissent et prennent de la hauteur avant de déferler



1. Séisme sous-marin de forte magnitude qui déplace une énorme quantité d'eau



Les séismes se produisent toujours dans des matériaux rigides, ce qui fait qu'ils ont lieu toujours dans la lithosphère mais jamais dans l'asthénosphère qui a un comportement plastique.

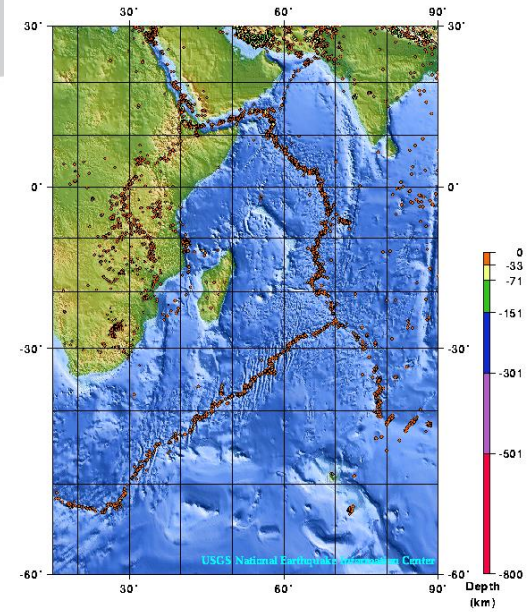
### Trois classes de séismes

en fonction de la profondeur à laquelle ils se produisent :

- les **séismes normaux ou superficiels** (**profondeur < 60 km**) = **frontières de plaques divergentes et frontières de plaque convergentes (fosses océaniques)**
- les **séismes intermédiaires** (**60 < profondeur < 300 km**) = **frontières de plaques convergentes**
- les **séismes profonds** (**jusqu'à 700 km de profondeur**) = **frontières de plaques convergentes**

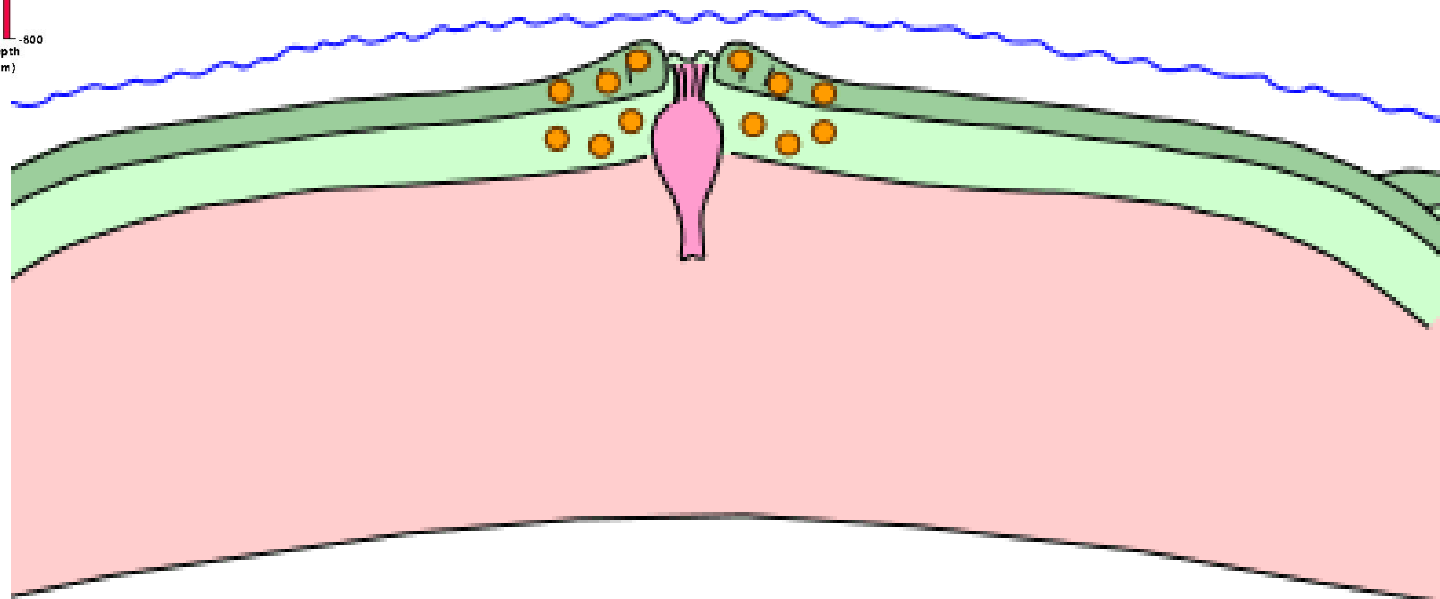


Seismicity of the Indian Ocean: 1975 - 1995



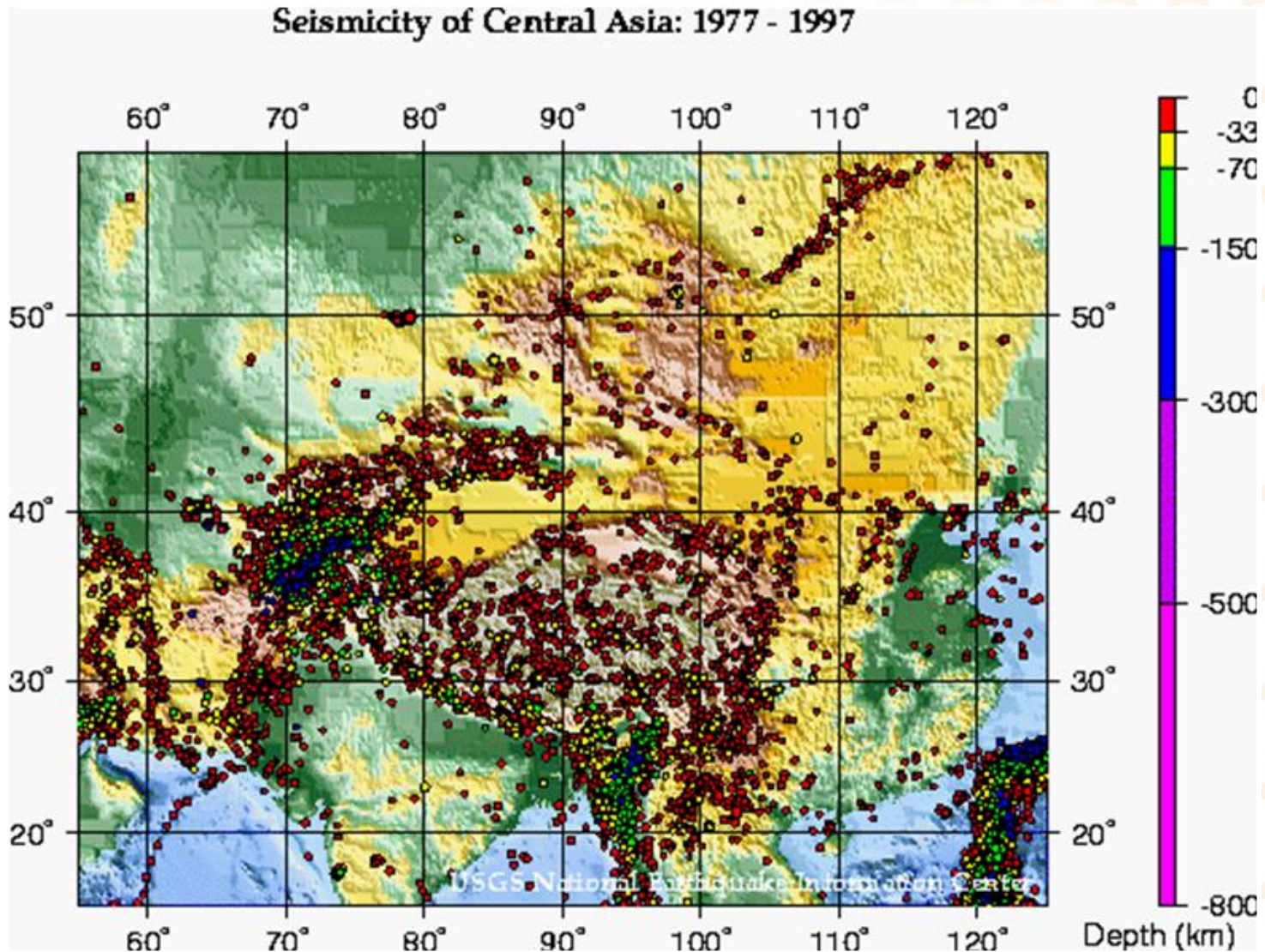
Ride ou rift = zone de divergence  
**SEISMES SUPERFICIELS**

Dorsale  
médo-océanique

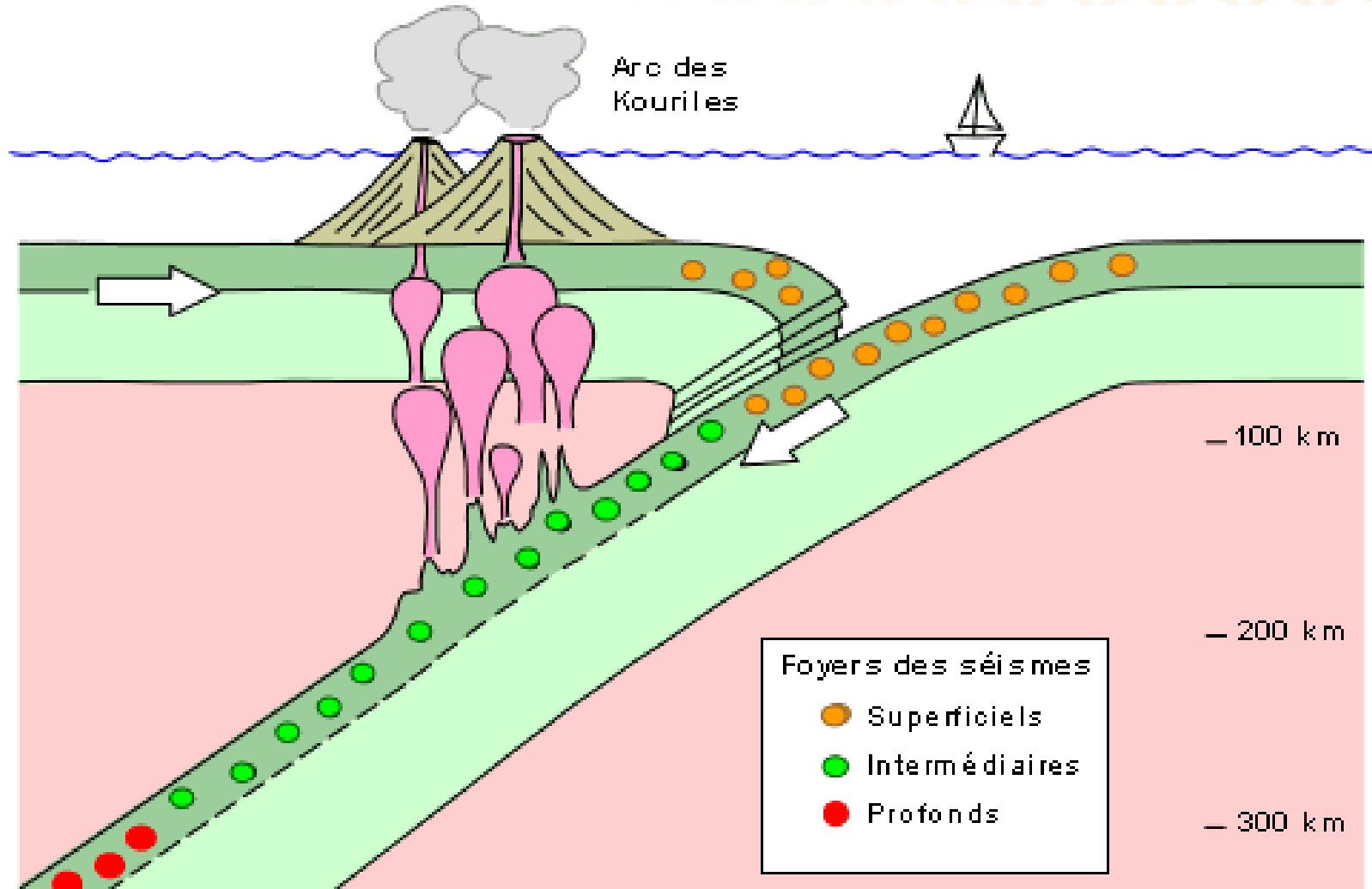


● Foyers sismiques superficiels

Les séismes *intraplaques* sont **superficiels**.



**Les frontières convergentes**  
concentrent les trois catégories de séismes



La plupart des séismes ont lieu dans les zones de contact entre plaques.



## Les différents types d'ondes

Déclenchement d'un séisme = **Propagation d'un front d'ondes**

**sismiques.**

**Deux types d'ondes :**

- *Ondes de fond* qui se propagent à l'intérieur de la terre (**ondes S et ondes P**),
- *Ondes de surface* qui se propagent seulement en surface (**ondes de Love et ondes de Rayleigh**).

## 2<sup>ème</sup> Partie – Les séismes

**Ondes P** = ondes premières/ondes de Compression.

### Dans tous les états de la matière

Les particules se déplacent selon un mouvement avant-arrière dans la direction de la propagation de l'onde

**Ondes S** = ondes de cisaillement **seulement dans les solides.**

Les particules oscillent dans un plan vertical, à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde.

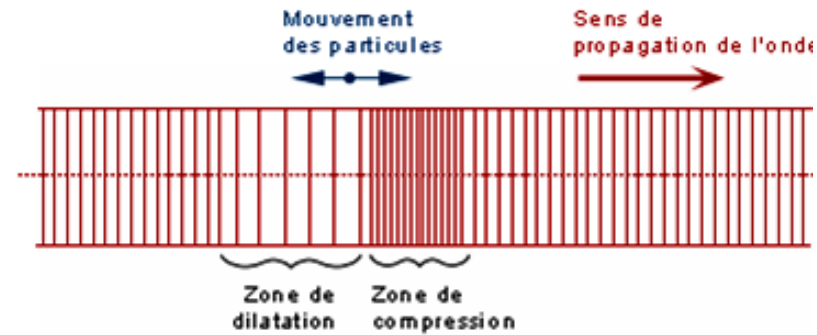
### Ondes L (ondes de love) :

ondes de cisaillement qui oscillent dans un plan horizontal . Imprintent au sol un mouvement de vibration latéral.

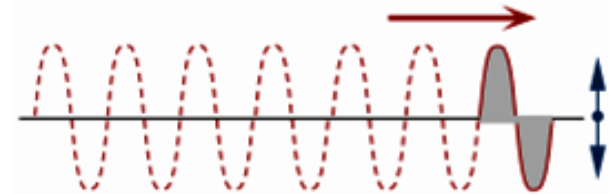
### Ondes de Rayleigh : vague

les particules du sol se déplacent selon une ellipse = vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre.

Onde P (compression)



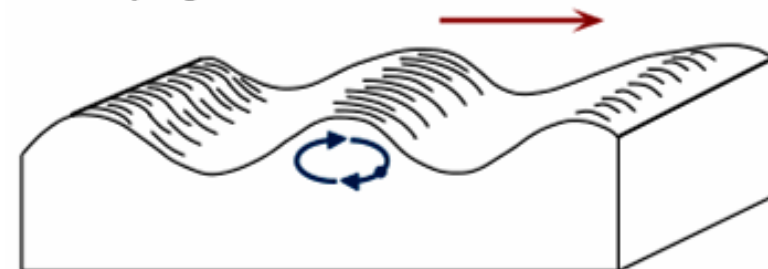
Onde S (cisaillement)



Onde L (de Love) (cisaillement)



Onde de Rayleigh



On distingue ainsi que parmi les ondes émises par un séisme :

Les ondes de fond ou de volume (ondes S et les ondes P) : ondes sonores, elles comprennent :

- **les ondes de compression (dites P)** : font vibrer les roches au cours de leur propagation dans la direction de propagation,
- **les ondes de cisaillement (notées S)** engendrent des mouvements perpendiculaires à cette direction.

Les **ondes P** sont plus rapides que les ondes S et se propagent dans les milieux liquides et solides

Les **ondes S** sont arrêtées par les liquides, mais elles peuvent se transformer en ondes P lorsqu'elles traversent une interface entre deux milieux ; le processus inverse est aussi possible.

- Les ondes de volume ont **des périodes comprises entre 0,1 et 30 secondes**.

- Elles se propagent selon **des raies sismiques comparables aux raies de lumière**, c'est-à-dire que pour aller d'un point à un autre, elles suivent le chemin correspondant au temps de trajet le plus court possible (**principe de Fermat**).

au cours de leurs déplacements, elles perdent de l'énergie, ce qui permet de mesurer les propriétés d'atténuation du milieu.

La **sismologie** révèle ainsi les variations spatiales des **paramètres viscoélastiques des matériaux terrestres** grâce à des méthodes d'imageries de type radiographie (utilisant les ondes transmises à travers le milieu) ou échographie (utilisant des ondes réfléchies).

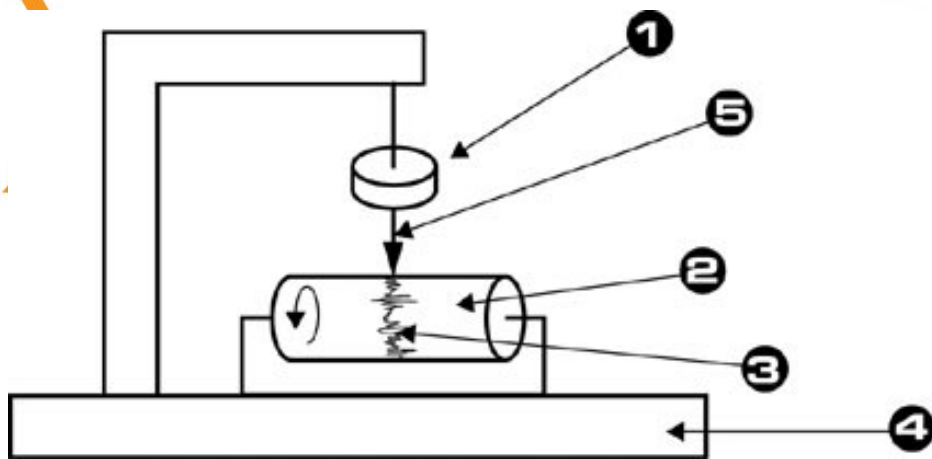
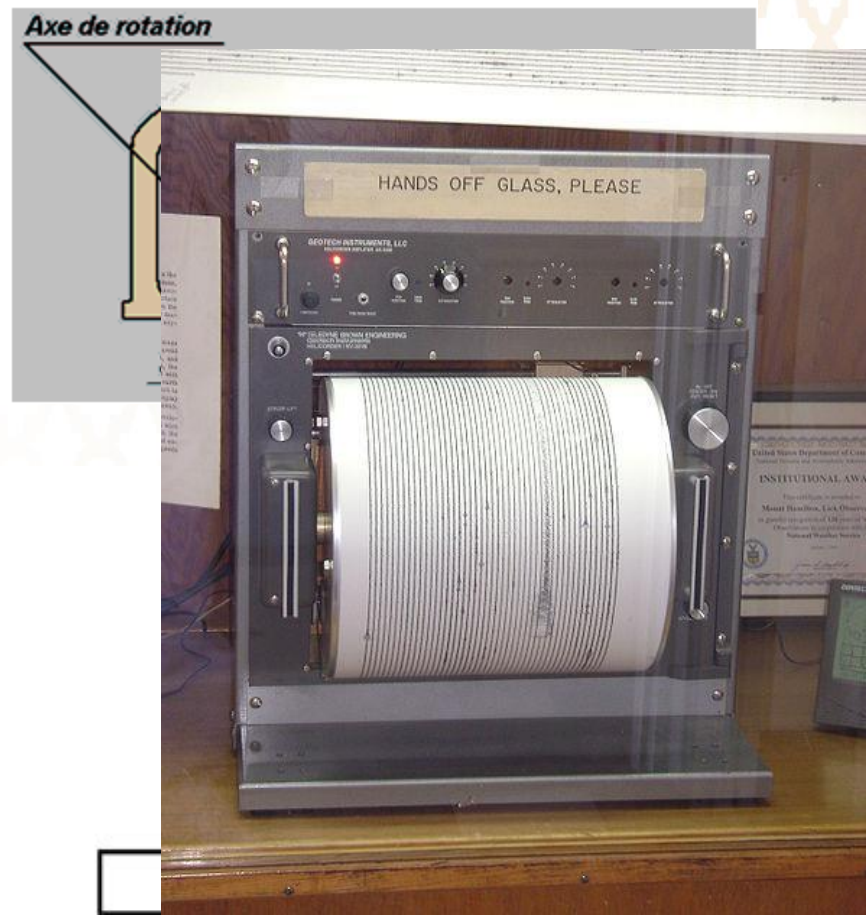
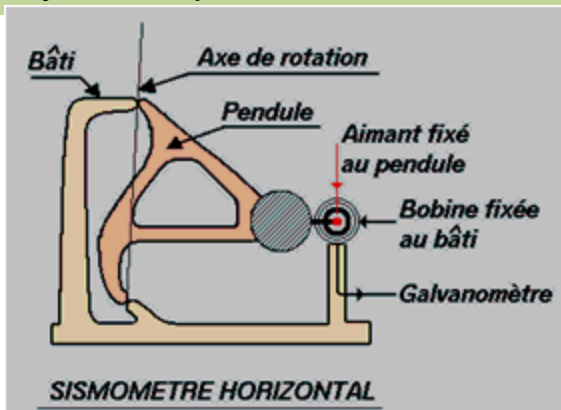


Propriété qui permet de localiser un séisme =  
**Propagation des ondes P plus rapide que celle des ondes S.**

Ondes sismiques enregistrées en plusieurs endroits du globe.

Enregistrement par **sismographes**.

Les vibrations verticales et horizontales du sol sont transmises à une aiguille qui les inscrit sur un cylindre qui tourne à une vitesse constante.

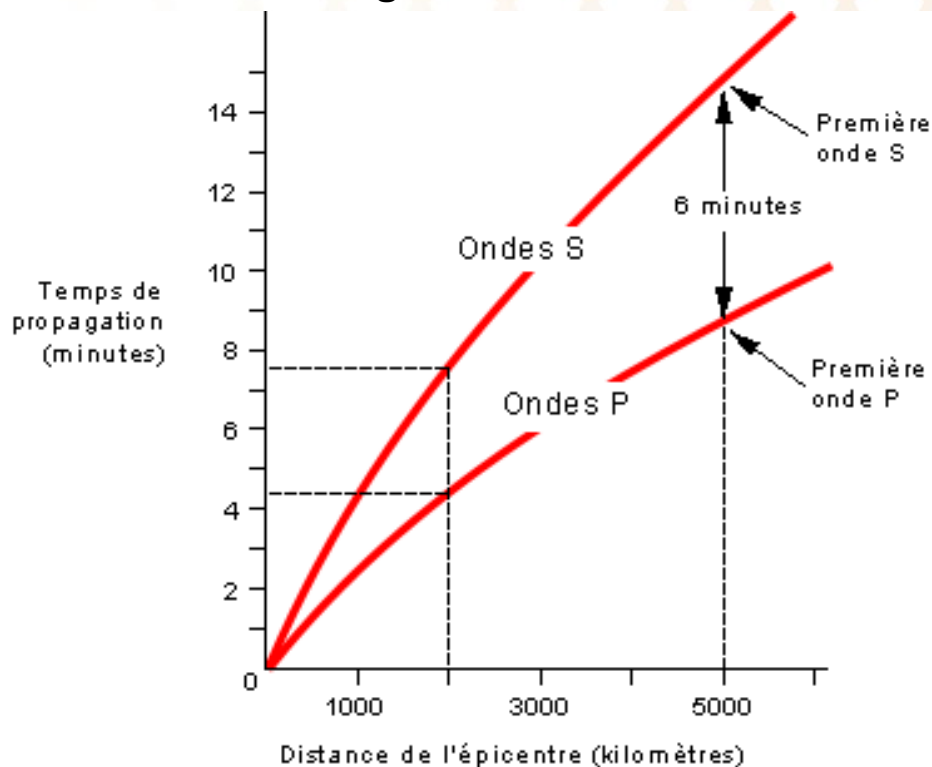
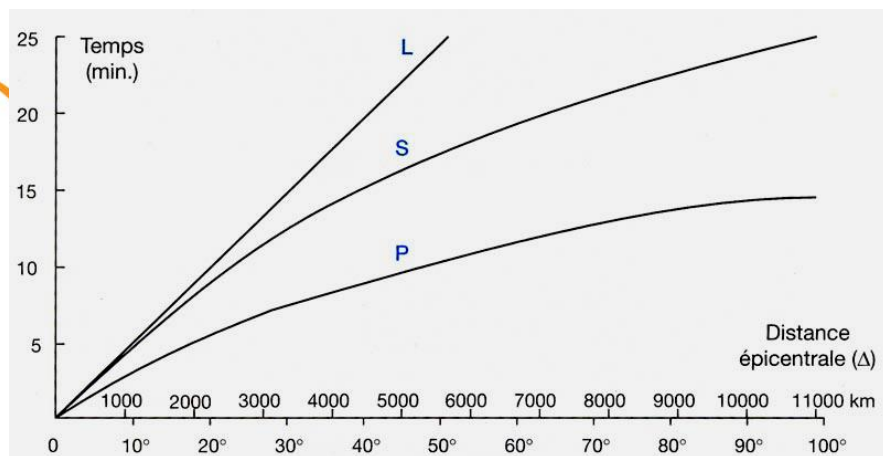


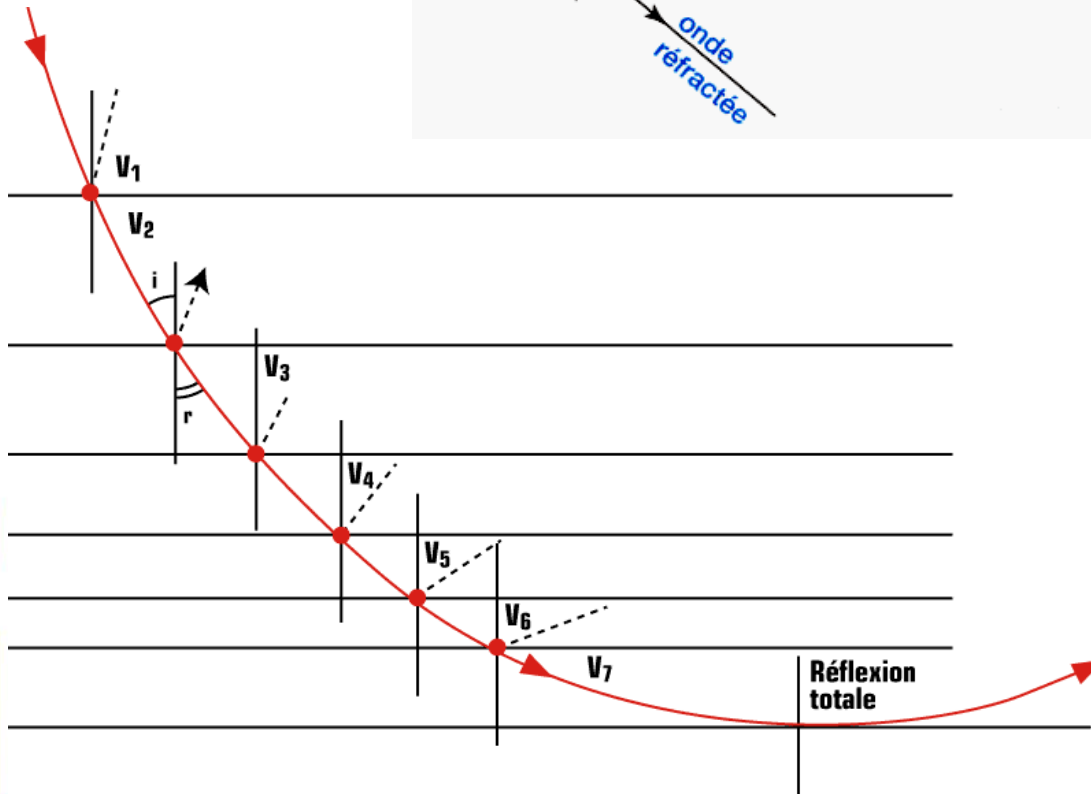
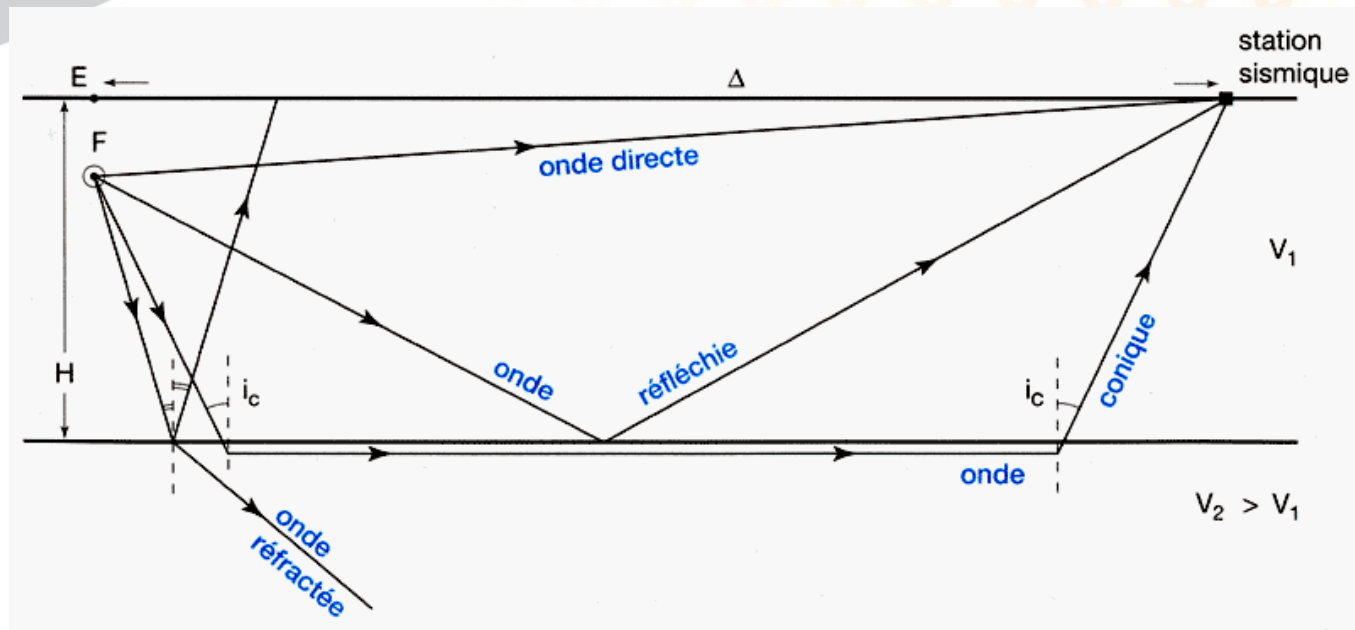
## Les vitesses de propagation des deux types d'ondes (S et P) dans la croûte terrestre établies = courbes étalonnées

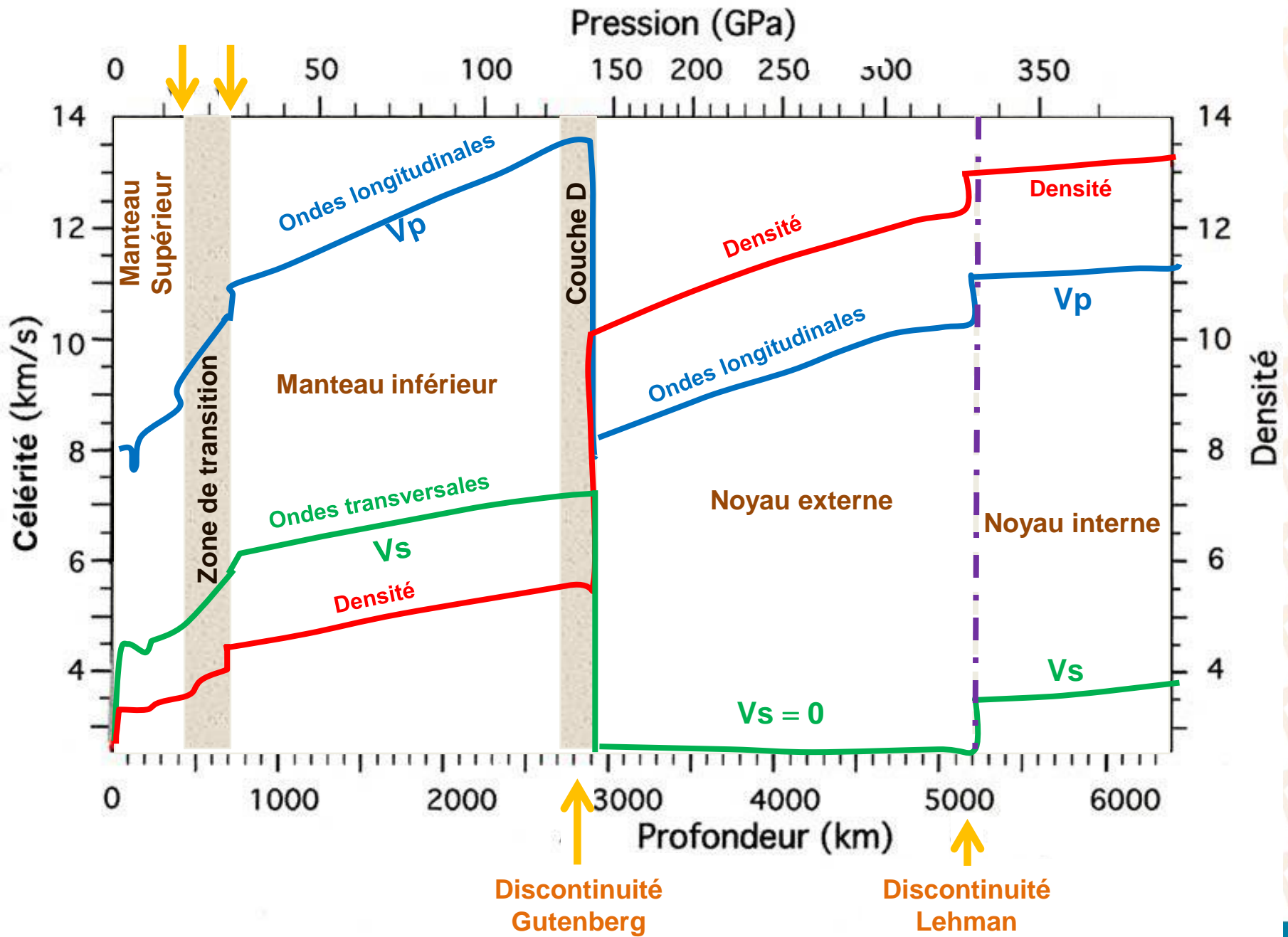
Pour une distance entre séisme et point d'enregistrement de **2000 Km** :

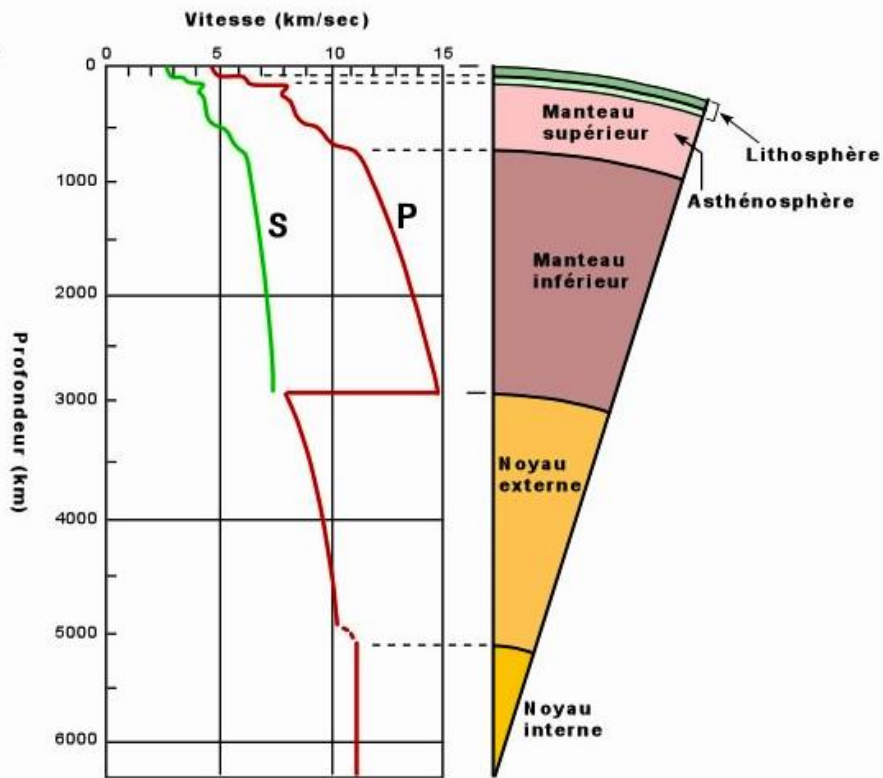
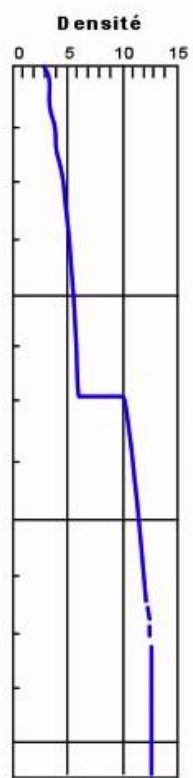
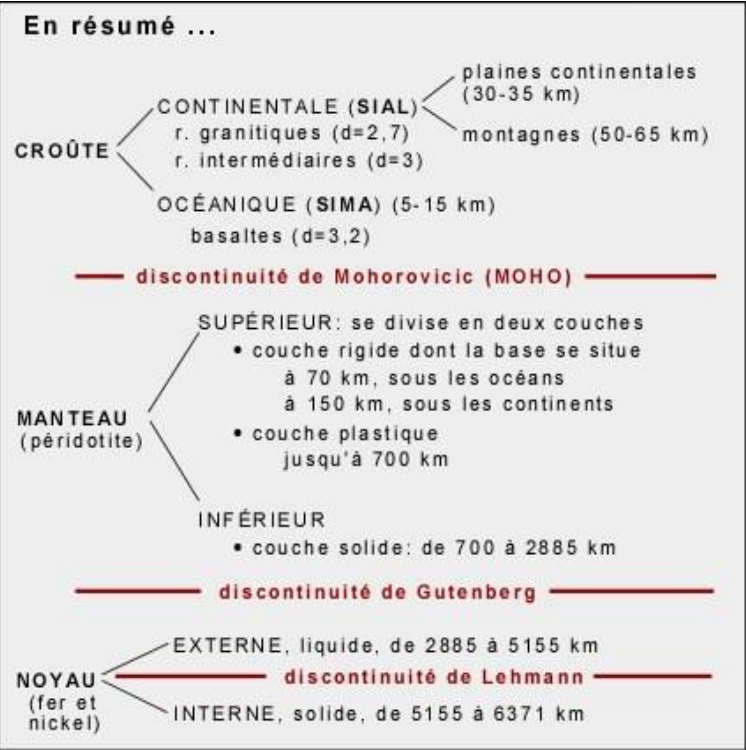
- l'onde P mettra **4,5 min**,
- l'onde S mettra **7,5 min** = décalage de **3 min**.

Dans l'exemple, distance correspondant à un décalage de **6 min** = **5000 Km**





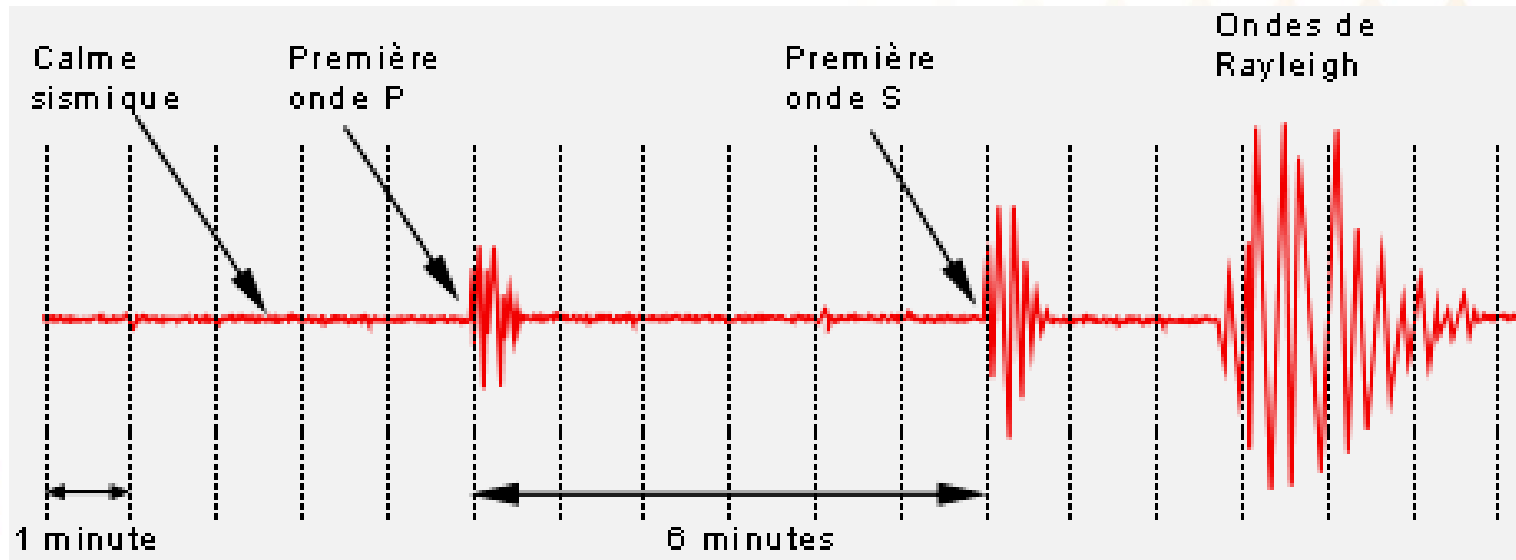




En un lieu donné, enregistrement des **ondes P** puis décalage et enregistrement des **ondes S**.

Exemple :

retard de 6 minutes des **ondes S** par rapport aux **ondes P**.



La **magnitude** d'un séisme (**notée M**) est un chiffre sans dimension, représentant **l'énergie libérée lors de la rupture**. La **magnitude est unique pour un séisme et indépendante du lieu d'observation**.

Estimée par exploitation des sismogrammes, la magnitude est théoriquement illimitée.

Dans la pratique, aucune magnitude mesurée n'a dépassé **8,5** (au Chili, le 22 mai 1960).

# L'intensité

Plusieurs échelles pour évaluer l'intensité des tremblements de terre :

- 1) **Echelle de Mercalli** développée en 1902 et modifiée en 1956,
- 2) **Echelle MSK** (Medvedev, Sponheuer et Karnik, 1964),

Ces deux échelles comportent douze degrés notés généralement en chiffres romains de **I à XII** (1 à 12).

Intensité déterminée par :

- Ampleur des dégâts causés par un séisme,
- perception de la population varient en fonction de la distance à l'épicentre.

**Echelle subjective**

**Echelle variable géographiquement**



- **L'intensité macrosismique**

L'intensité macrosismique est estimée par observation des désordres sur les bâtiments et les infrastructures, ainsi que par la perception du séisme par la population.

Elle comporte **douze niveaux** (de **I à XII**).

Pour un même séisme, l'intensité macrosismique varie dans l'espace en fonction de la distance à l'épicentre et des phénomènes annexes, tels que l'amortissement ou l'amplification des ondes sismiques (effets de site).

- **Relation entre intensité et magnitude**

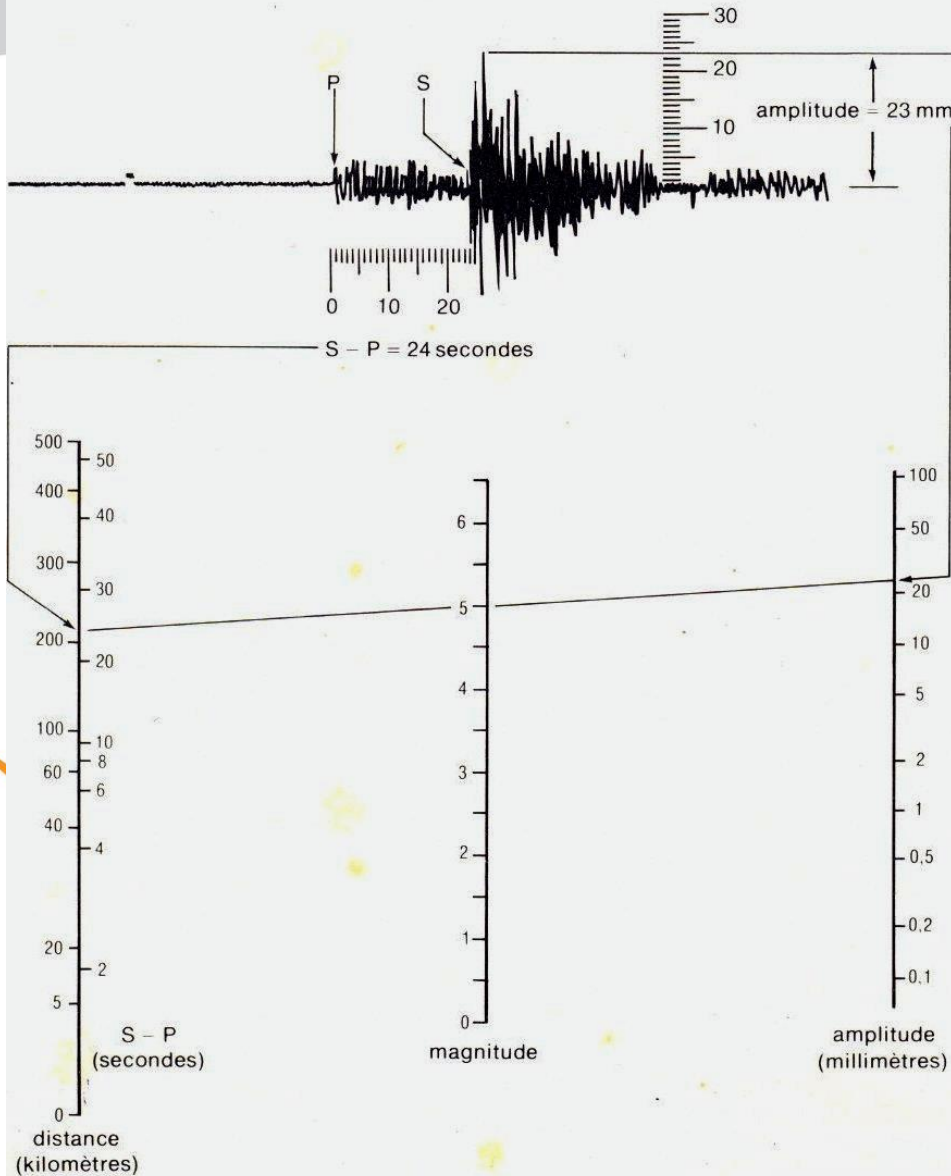
**Il n'y a pas de relation directe entre l'intensité et la magnitude.**

**Les deux grandeurs sont difficilement comparables.**

**un séisme de forte magnitude avec un foyer profond et dans une région peu peuplée sera peu destructeur et donc sera qualifié de faible intensité.**

**Au contraire, un séisme superficiel, même de magnitude moindre pourra être très destructeur et donc caractérisé par une grande intensité.**

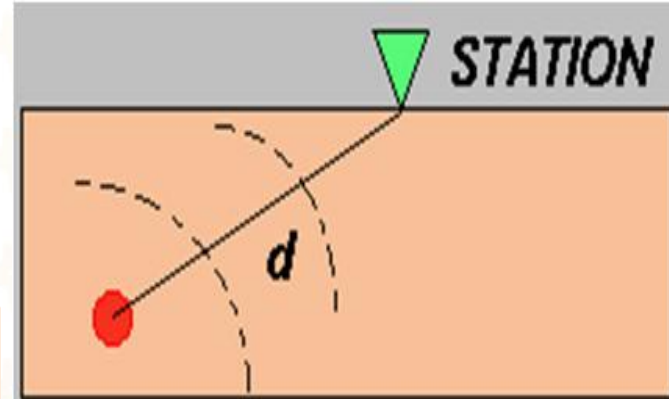
EXEMPLE DE CALCUL  
DE LA MAGNITUDE RICHTER ( $M_L$ )  
D'UN TREMBLEMENT DE TERRE LOCAL



## Méthode de calcul de la magnitude

1. Mesurer la distance au foyer en employant l'intervalle entre les ondes P et S, (S-P) : 24 sec
2. Mesurer la hauteur de l'élongation maximale sur le sismogramme : 23 millimètres
3. Tirer une droite entre les points correspondants sur les échelles de distance (à gauche) et d'amplitude (à droite) pour obtenir la magnitude  $M=5,0$

## La méthode des cercles



basée sur la différence de propagation des ondes P et S

Pour une station :

temps d'arrivée de l'onde P :  $t_p = t_0 + (d / V_p)$

temps d'arrivée de l'onde S :  $t_s = t_0 + (d / V_s)$

Différence entre les deux relations précédentes :

$$t_s - t_p = d \cdot (1 / V_s - 1 / V_p)$$

On connaît les vitesses des ondes P et S dans la croûte et on admet que :

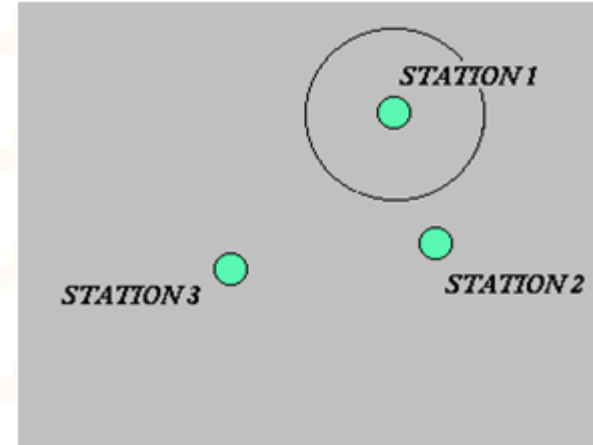
$$(1 / V_s - 1 / V_p) = 1/8$$

$$\text{D'où : } d = 8 * (t_s - t_p)$$

On établit des abaques et on obtient directement d en fonction de  $(t_s - t_p)$

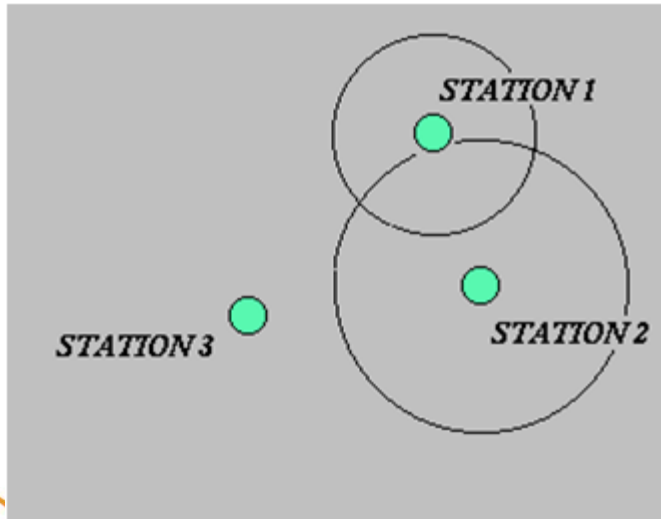
## La triangulation

Le séisme se trouve sur le périmètre d'un cercle de **rayon d1** centré sur une première station d'enregistrement.

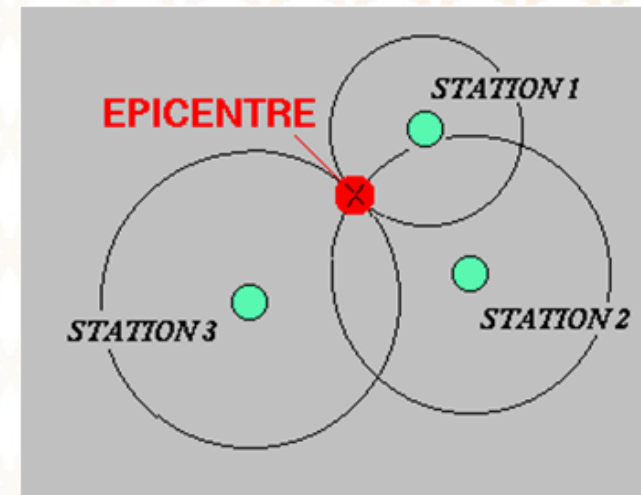


Avec une seconde station, on détermine la distance (**d2**) séparant cette station de l'épicentre du séisme.

Les deux points d'intersection des deux cercles définissent les deux localisations possibles de l'épicentre du séisme enregistré



Avec une troisième station, détermination de la distance (**d3**) séparant cette station de l'épicentre du séisme .  
Un seul point d'intersection possible entre les trois cercles définit la **position précise** de l'épicentre du séisme enregistré



Perception à l'intérieur  
Enregistrement par les sismomètres

Perception à l'extérieur  
Quelques dommages

Dommages légers aux  
« bonnes constructions »  
destruction des « mauvaises »

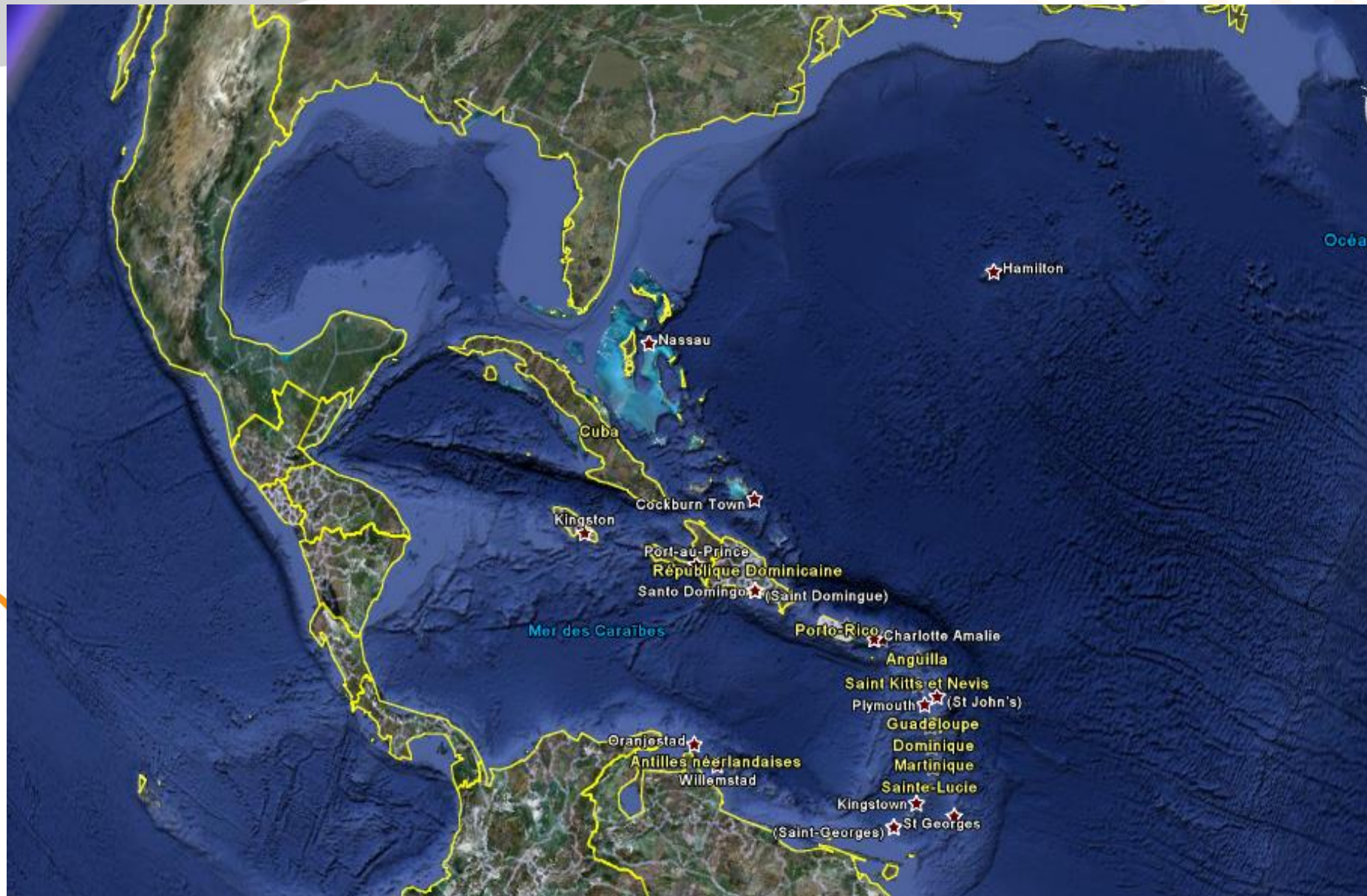
Dommages considérables  
Modification des paysages

ÉCHELLE D'INTENSITÉ DE <b>MERCALLI</b>	MAGNITUDE À L'ÉCHELLE <b>RICHTER</b>
<p><b>I</b> Séisme perçu uniquement par quelques personnes dans des circonstances particulières; détecté seulement par des instruments très sensibles.</p> <p><b>II</b> Perçu par quelques personnes au repos et se trouvant aux étages supérieurs; balancement d'objets suspendus.</p> <p><b>III</b> Perçu principalement par des personnes à l'intérieur des édifices. Les automobiles stationnées peuvent bouger.</p>	<p>2</p> <p>3</p>
<p><b>IV</b> Perçu par la plupart des gens à l'intérieur des édifices et par certains à l'extérieur; suffisant pour réveiller certaines personnes. Bruits de vaisselle, fenêtres et portes.</p> <p><b>V</b> Perçu par presque tout le monde; plusieurs personnes sont réveillées. Bris de vaisselle et de fenêtres; les objets instables sont renversés.</p> <p><b>VI</b> Perçu par tout le monde; plusieurs personnes sont effrayées et courent à l'extérieur; quelques meubles sont déplacés; quelques morceaux de plâtre tombent et quelques dommages aux cheminées. Dommages légers.</p>	<p>4</p> <p>5</p>
<p><b>VII</b> La plupart des gens paniquent et courent à l'extérieur; dommages minimes aux constructions conçues pour les zones sismiques, de minimes à moyens chez les bonnes constructions ordinaires, importants chez les mauvaises constructions. Meubles renversés.</p> <p><b>VIII</b> Dommages légers aux constructions conçues pour les zones sismiques, importants chez les bonnes constructions ordinaires avec des effondrements possibles, catastrophiques chez les mauvaises constructions.</p>	<p>6</p> <p>7</p>
<p><b>IX</b> Dommages considérables aux constructions conçues pour les zones sismiques. Edifices déplacés sur leurs fondations. Fissuration du sol. Bris des canalisations souterraines.</p> <p><b>X</b> Quelques bonnes constructions en bois et la plupart des constructions en maçonnerie sont détruites. Sol fortement fissuré. Plusieurs glissements de terrain se produisent.</p> <p><b>XI</b> Très peu de constructions en maçonnerie restent debout; rails tordus; ponts détruits. Grandes fissures dans le sol.</p> <p><b>XII</b> Destruction quasi totale. Ondulations visibles à la surface du sol. Objets projetés dans les airs.</p>	<p>8</p> <p>9</p>

Aujourd'hui

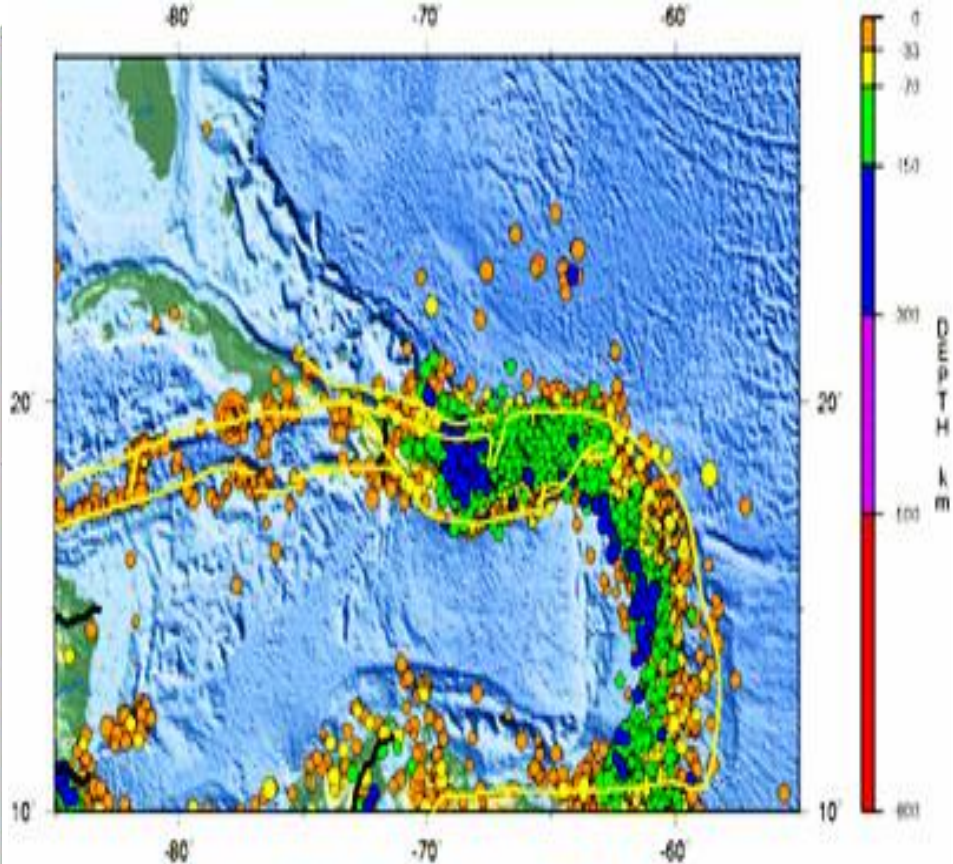
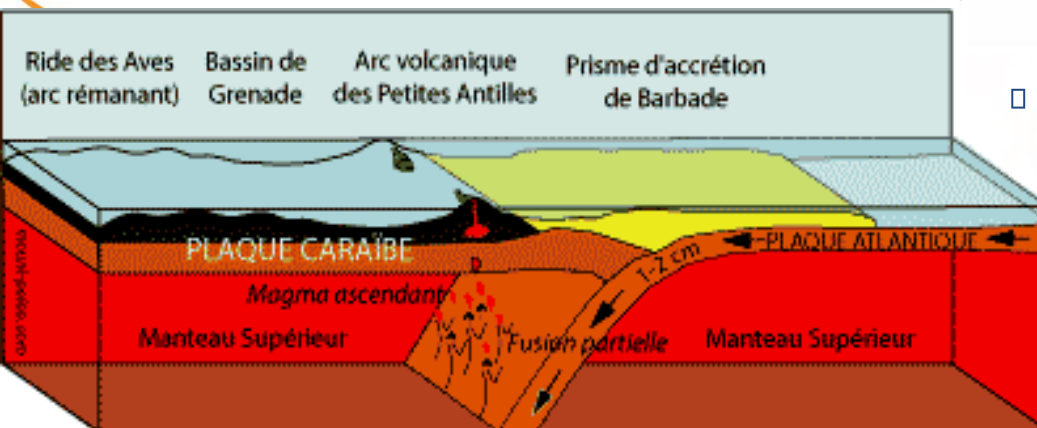
Dans 10 millions d'années







- La montagne Pelée fait partie d'un arc volcanique qui s'étend sur près de 850 km, depuis Puerto-Rico jusqu'au continent Sud-Américain, dans la zone de subduction entre les plaques Caraïbe et Atlantique.
- La plaque Atlantique glisse sous la plaque Caraïbe à un rythme de 1 à 2 cm / an, et plonge dans la manteau supérieur. La fusion partielle de la plaque et des sédiments entraînés, est à l'origine de la formation du magma alimentant les volcans antillais.



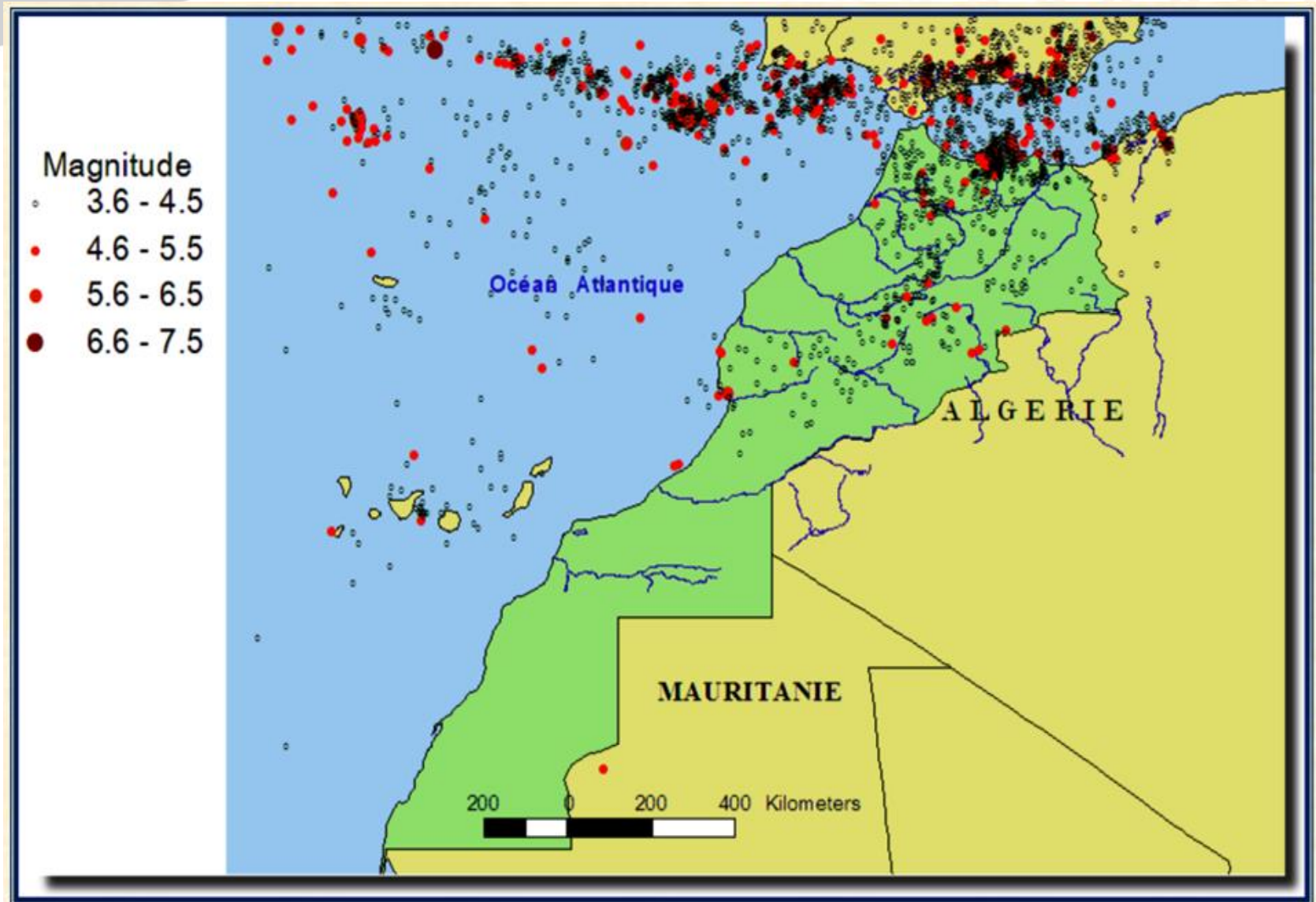
Seismicity of the Caribbean, 1990 - 2006

- Le phénomène de la subduction est à l'origine du volcanisme de l'arc des Petites Antilles, et par le frottement des 2 plaques en mouvements, à l'origine **des séismes tectoniques régionaux.**

- Le séisme de **magnitude 7**, qui a frappé **Haïti**, mardi **12 janvier 2010** à 16 h 53 (heure locale), est intervenu à la frontière entre deux plaques tectoniques. Celle des Caraïbes se déplace de deux centimètres par an par rapport à la plaque nord-américaine, prenant en tenaille l'île d'Hispaniola, sur laquelle se trouve Haïti.
- L'île est parcourue d'Est en Ouest par un système de failles, notamment des failles 'transformantes', situées entre deux plaques coulissant en sens inverse. ampleur.

### Port au prince dévastée par le séisme du 12 janvier 2010





Carte de sismicité du Maroc entre 1901 et 2004 (ne sont représentés que les séismes de magnitude  $\geq 3.6$ ), Cherkaoui et al. 2007

## Tremblement de terre de Lisbonne

**Victimes** entre 50 000 et 100 000 morts.

Le **tremblement de terre de Lisbonne** a eu lieu à Lisbonne (Portugal), le 1<sup>er</sup> novembre 1755 à 9h40 du matin.

Il s'agit d'un des tremblements de terre les plus destructeurs et les plus meurtriers de l'histoire. Selon les sources, on dénombre entre 50 000 et 100 000 victimes. La secousse fut suivie par un tsunami et des incendies, qui détruisirent la ville de Lisbonne dans sa quasi-totalité. Ce séisme, le premier à avoir fait l'objet d'études scientifiques poussées, entraîna la naissance de la sismologie moderne.



Son épïcéntré exact reste discuté, mais se situait probablement dans l'océan Atlantique, à environ 200 km au sud-ouest du cap Saint-Vincent.

Ce séisme n'ayant pas été enregistré grâce à des sismographes, sa magnitudé et son épïcéntré ont été calculés de manière indirecte, en fonction du contexte géologique et de la répartition des destructions. Les sismologues estiment sa magnitude entre 8,5 et 8,7 sur l'échelle de Richter.

- **Aléa** : probabilité du séisme

## Risque

- **Pertes humaines** (morts, blessés...)
- **Impacts environnementaux** (glissement de terrain, pollution...)
- **Destruction des biens** (habitations, infrastructures...)

## Prévision du risque sismique

### La prédiction

= prévoir précisément lieu / date / magnitude du séisme



2 approches:

#### Approche probabiliste :

*identification zones à risque +  
probabilité d'occurrence*

#### Approche déterministe:

*identification de signes précurseurs  
→ interprétation par des processus physiques réalistes  
→ élaboration d'un modèle physique prédictif*

## 3 modes de prévision et de réponse adaptée

**A long terme** : plusieurs dizaines d'années = définition de l'aléa, du mode de construction adapté et renforcement du bâti.

**A moyen terme** : quelques mois, 1 an = surveillance et instrumentation des sites à risque.

**A court terme** : quelques heures à quelques jours = mise en alerte des réseaux d'intervention, préparation des secours et évacuation des bâtiments.

## Beaucoup de difficultés pour la prédiction :

A court et moyen terme

- Méconnaissances des facteurs déclenchant
- Paramètres très nombreux à entrer en jeu
- Paramètres physiques des roches difficiles à mesurer en profondeur

A long terme

+ Evaluation du risque sismique pour une zone donnée = donner la magnitude maximale pouvant être atteinte.

+ un pourcentage de chance pour que cette valeur soit atteinte sur une période de référence.