

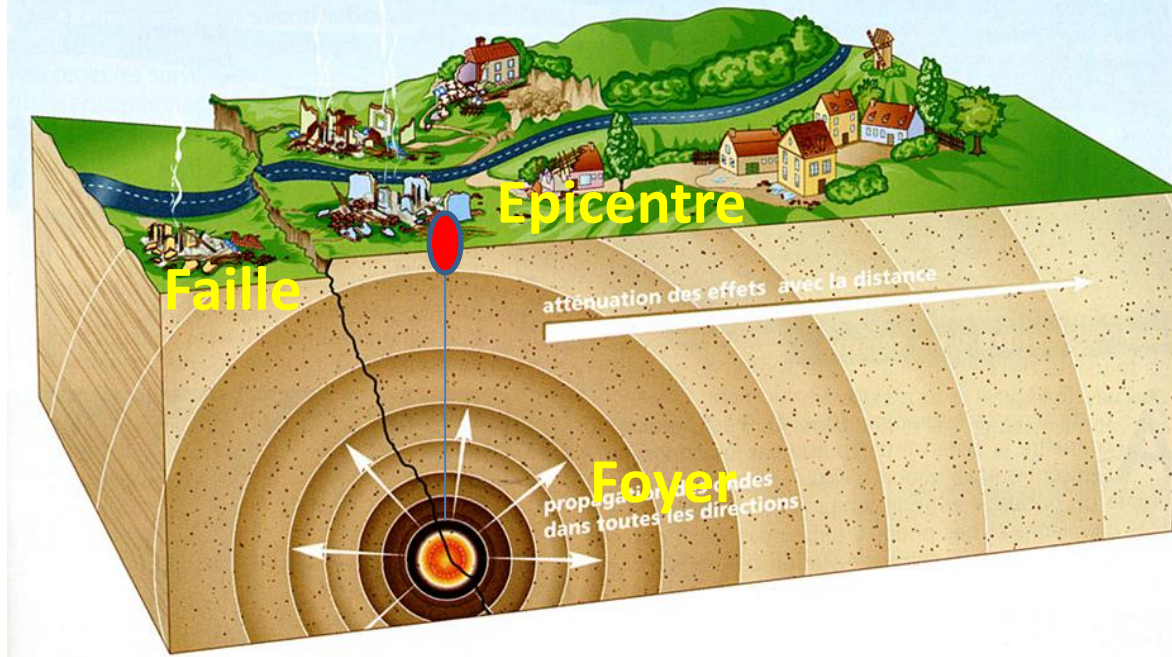
TD1: NOTIONS DE SISMOLOGIE



1- Origine des tremblements de terre = séismes :

Un séisme = mouvement sur une faille à l'intérieur de la lithosphère.

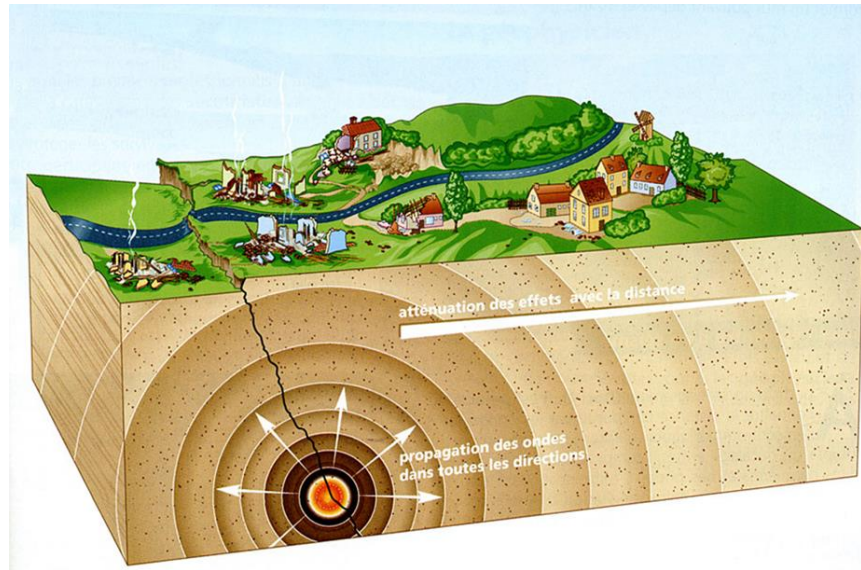
Cette rupture engendre des secousses +/- violentes de courte durée



- **Foyer** = le lieu dans le plan de faille où se produit réellement le séisme
- **Epicentre** = le point de la surface terrestre situé à la verticale du foyer.

1- Origine des tremblements de terre = séismes :

- Lorsqu'un séisme est déclenché, un **front d'ondes** sismiques se propage dans la croûte terrestre.

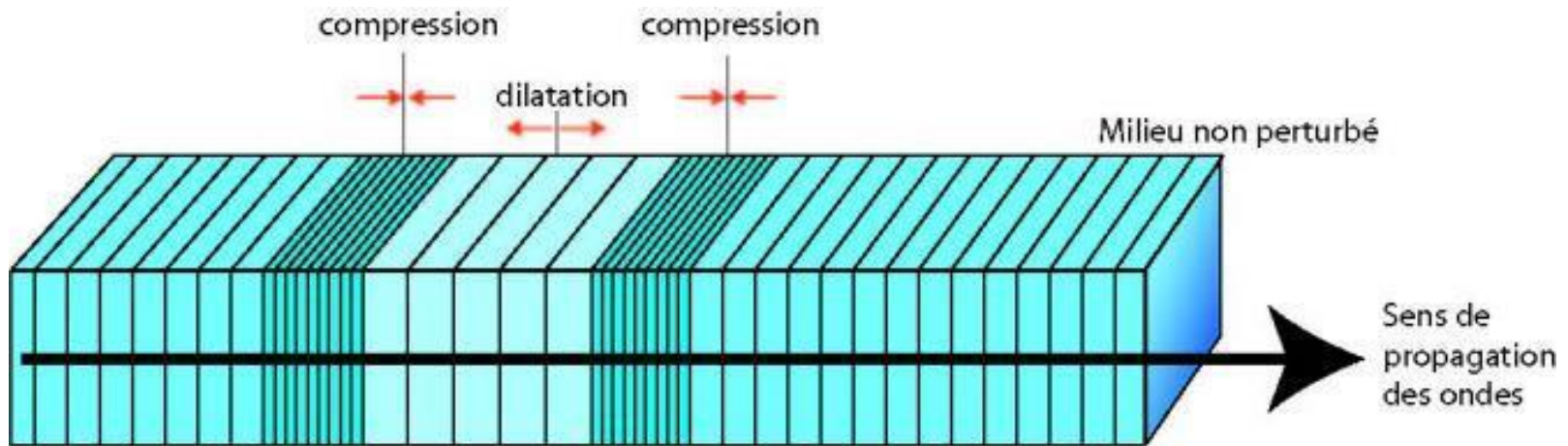


- La **vitesse des ondes** sismiques est **variable** en fonction de leurs propriétés intrinsèques, et celles du milieu où elles se propagent.
- Pour la plupart, leur **vitesse** de déplacement est plus **élevée** lorsque le milieu est **solide**.

2- Types d'ondes sismiques :

A- Ondes de volume : qui traversent la terre

A1- Ondes P ou primaires :

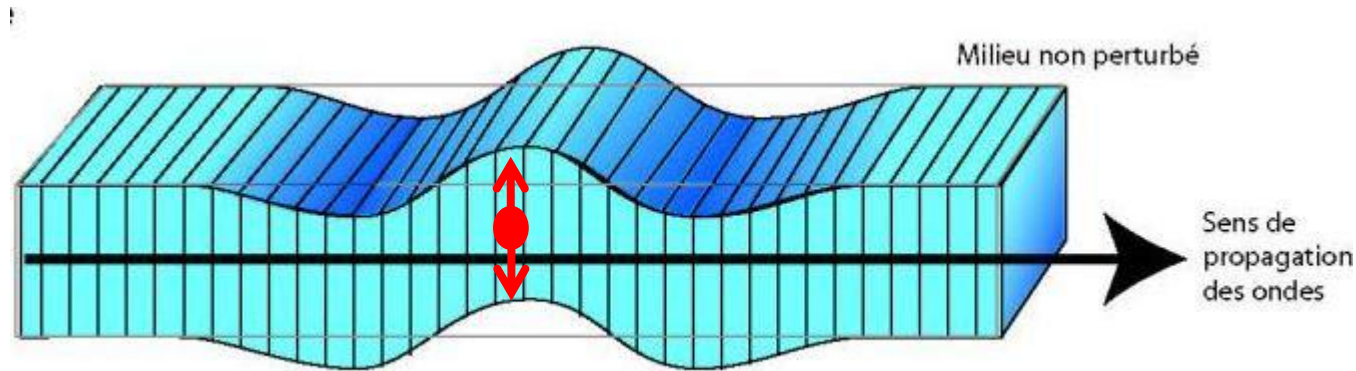


- Dites aussi **ondes de compression** ou **longitudinales**. Elles font vibrer le sol par compressions et dilatations successives dans le sens de leur propagation.
- Elles se propagent aussi bien dans les **solides** que dans les **liquides**.
- Sont les **plus rapides** et donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes. Leur vitesse est fonction croissante de la distance parcourue.

2-Types d'ondes sismiques :

A- Ondes de volume :

A2- Ondes S ou secondaires:

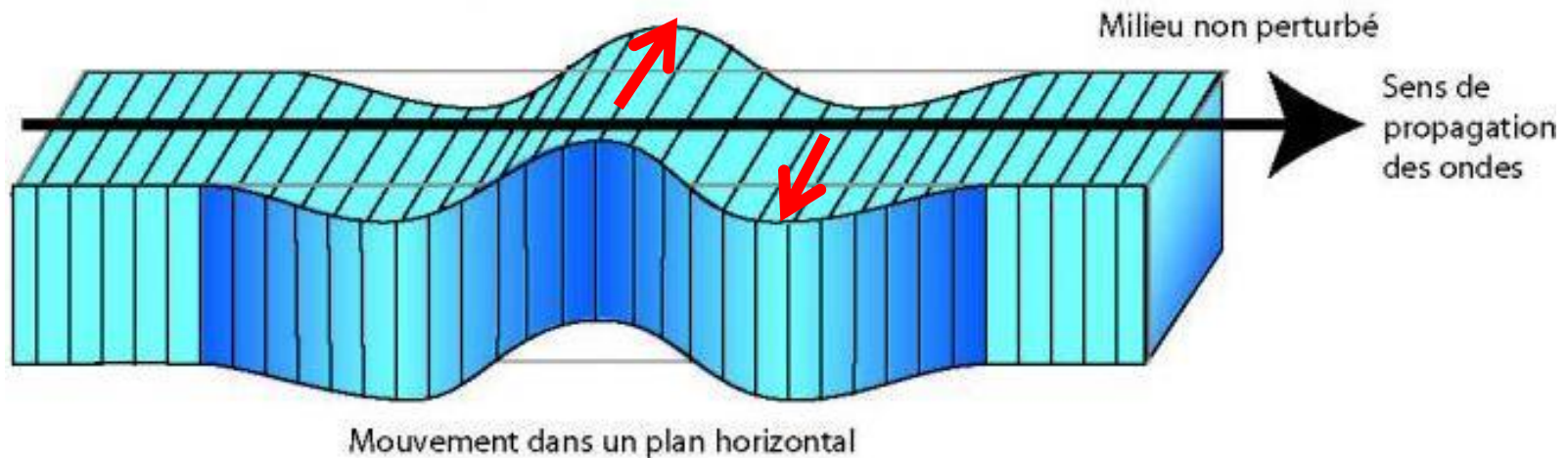


- Dites aussi **ondes de cisaillement** ou **transversales**. Les particules oscillent dans un plan **perpendiculaire** à la direction de propagation de l'onde.
- Elles **ne se propagent pas** dans les milieux **liquides** et sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la Terre. Elles forment des micro vibration à la surface de la Terre, comme lorsqu'on agite une corde.

2-Types d'ondes sismiques :

B- Ondes de surface : se propagent // à la surface

B1- Ondes L (ondes de love):

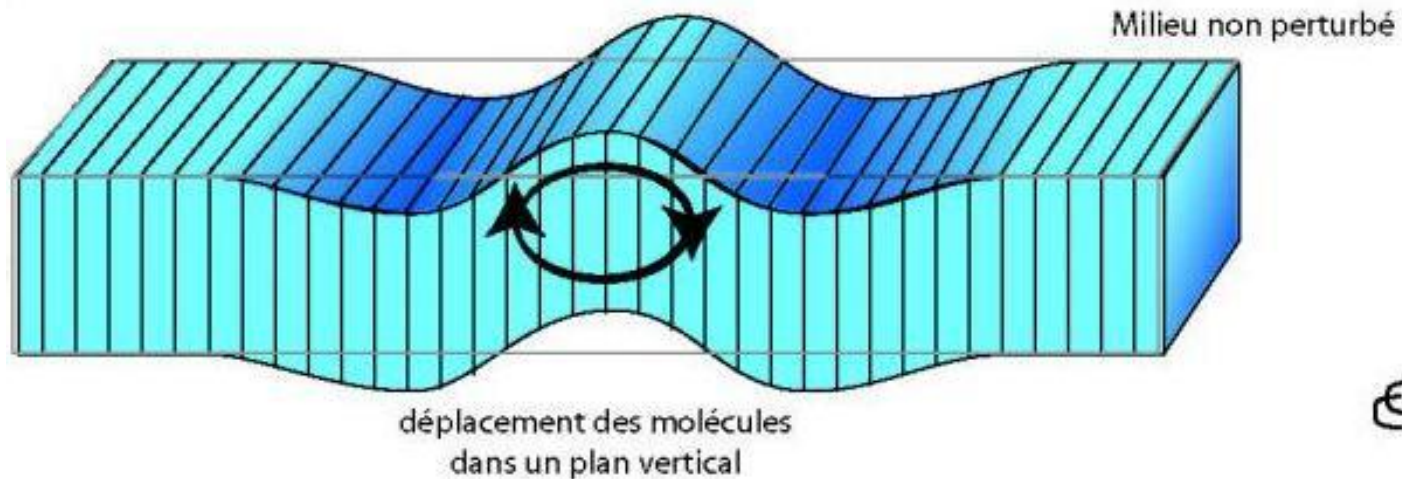


- Sont des ondes de **cisaillement**, comme les ondes **S**, mais qui oscillent dans un **plan horizontal** perpendiculaire à la direction de propagation. Elles sont donc perpendiculaires aux ondes S. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral.

2-Types d'ondes sismiques :

2- Ondes de surface :

B2- Ondes R (Rayleigh):



Elles sont assimilables à une vague ; les particules du sol se déplacent selon une **ellipse**, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre.

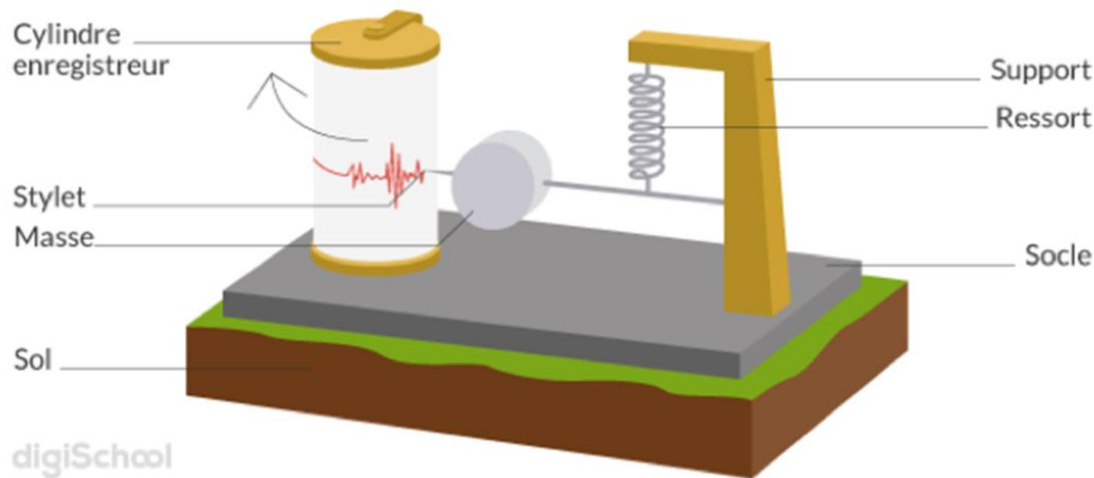
3-Enregistrement des ondes sismiques:

A- Sismographe :

Les **sismographes** sont des appareils très sensibles permettant **d'enregistrer et mesurer les secousses sismiques**. On distingue :

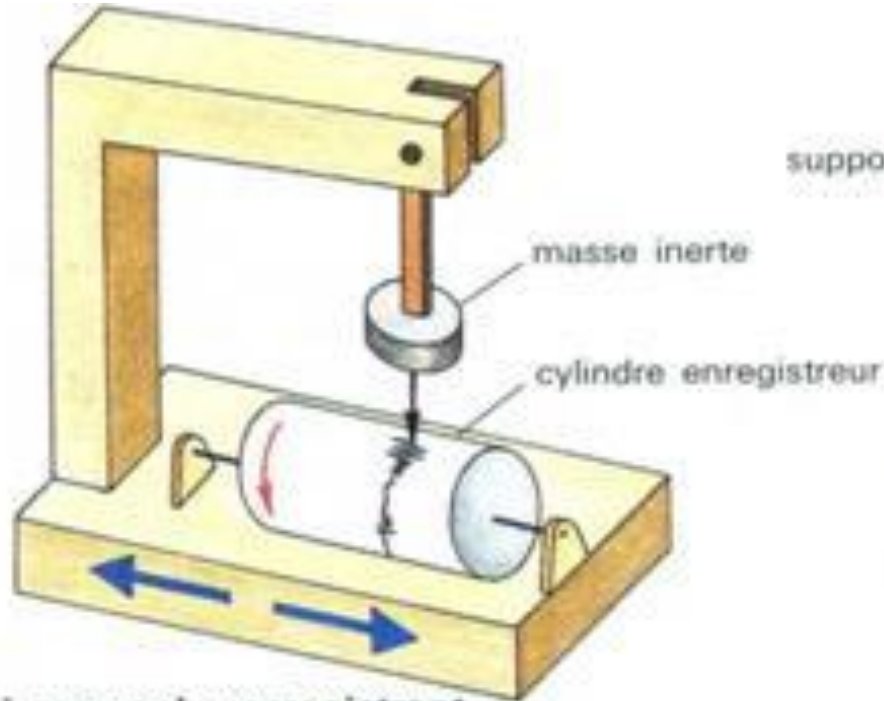
- les **sismographes horizontaux** permettent d'enregistrer le mouvement du sol dans les **directions horizontales N-S** (composante X) et **E-W** (Composantes Y).
- Les **sismographes verticaux** conçus pour enregistrer le mouvement dans la **direction verticale** (la composante Z).

Dans une station d'observation sismographiques il faut, ***au minimum, trois sismographes*** : **2 horizontaux et 1 vertical**.

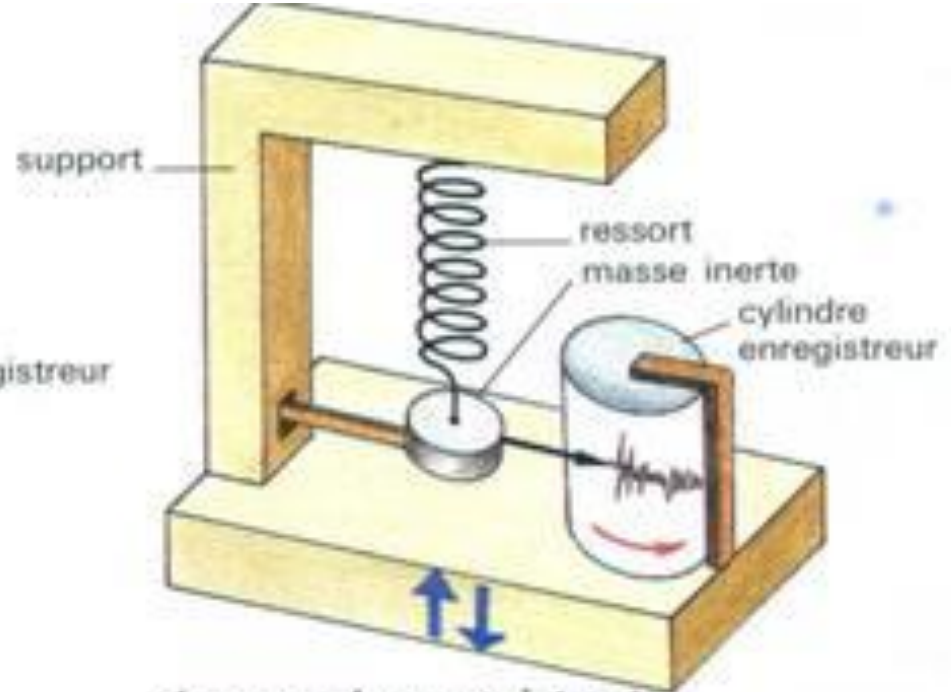


3-Enregistrement des ondes sismiques:

A- Sismographe :



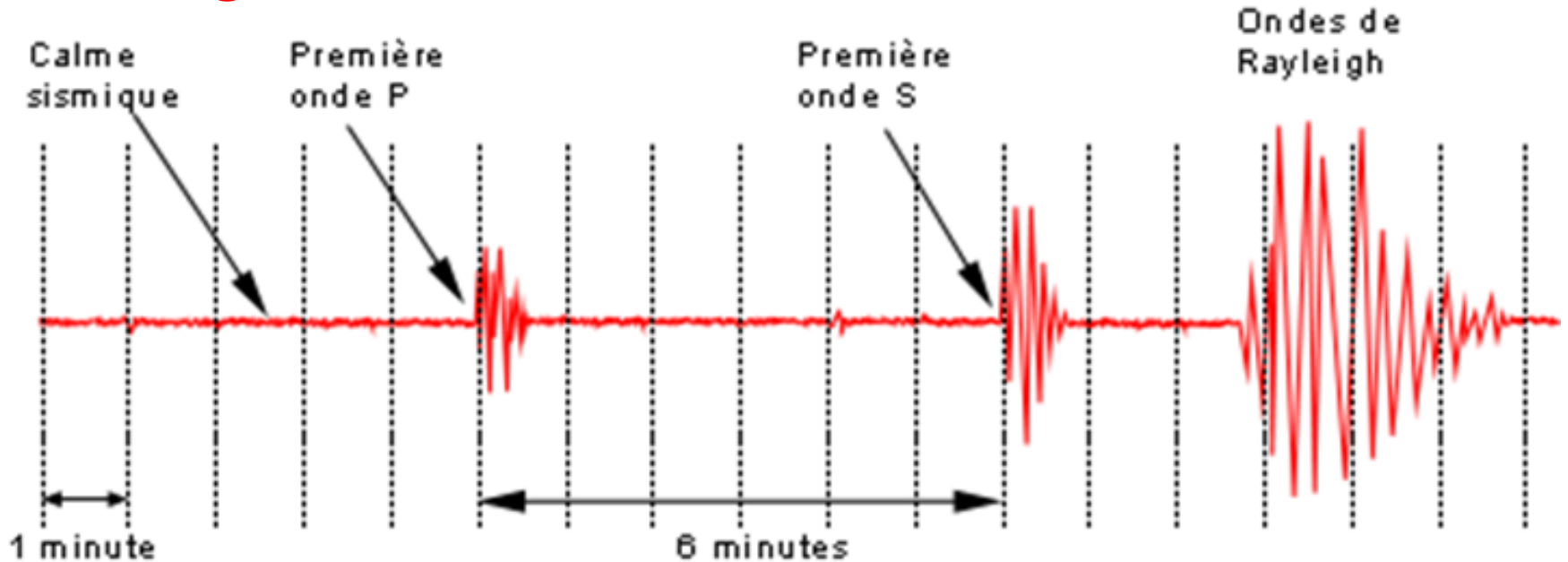
sismographe enregistrant les mouvements horizontaux



sismographe enregistrant les mouvements verticaux

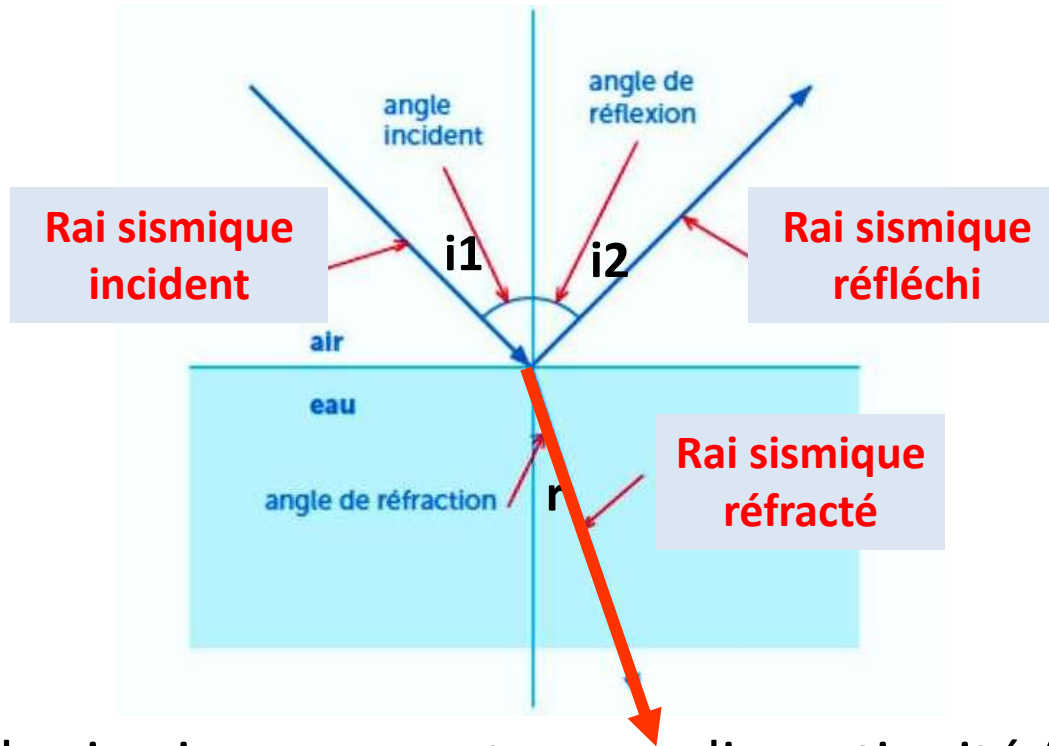
3-Enregistrement des ondes sismiques:

B- Sismogramme:



- Les sismographes permettent d'enregistrer les **temps d'arrivée** des ondes sismiques et permet de **déduire l'épicentre** et la **magnitude du séisme** qui l'a généré.
- La vitesse de propagation et l'amplitude de ces ondes sont modifiées par les structures géologiques traversées.

4-Propagation des ondes sismiques:



Lorsqu'une onde sismique rencontre une discontinuité (changement de milieu) elle donne naissance à 2 ondes: **une réfléchie et une réfractée**.

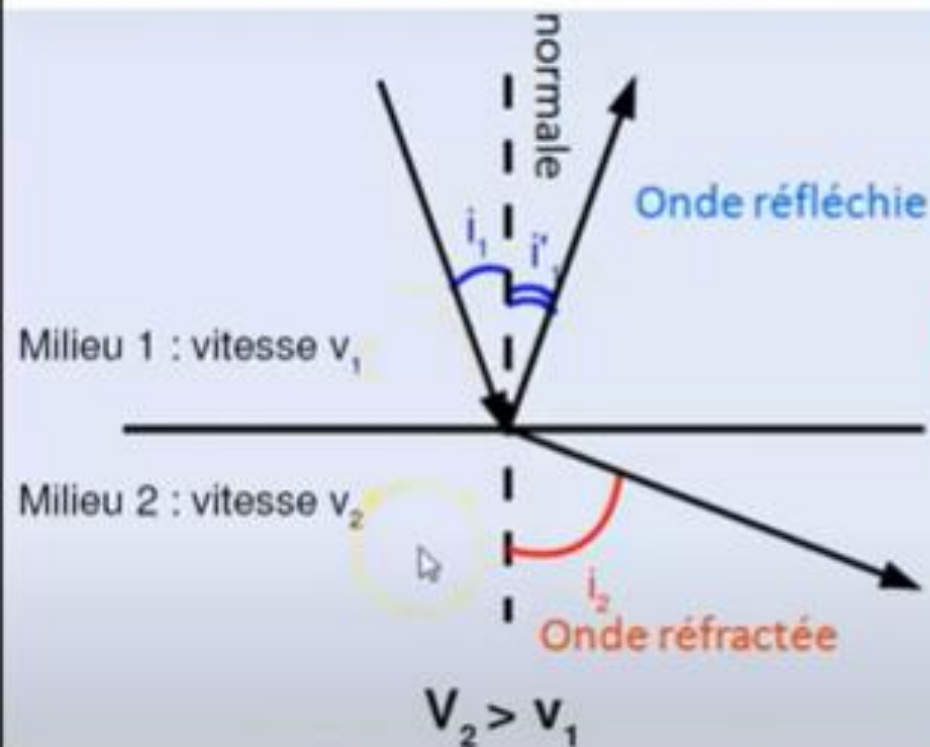
- l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence : **$i_1 = i_2$**
- l'angle de réfraction et d'incidence suivent la loi :

$$n_1 \times \sin(i_1) = n_2 \times \sin(r)$$

où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2 qui sont fortement liés à la densité des milieux.

4-Propagation des ondes sismiques:

Trajectoire des rais sismiques (Loi de Descartes)



Pour les phénomènes réflexion

$$i_1 = i_1'$$

Loi de réfraction

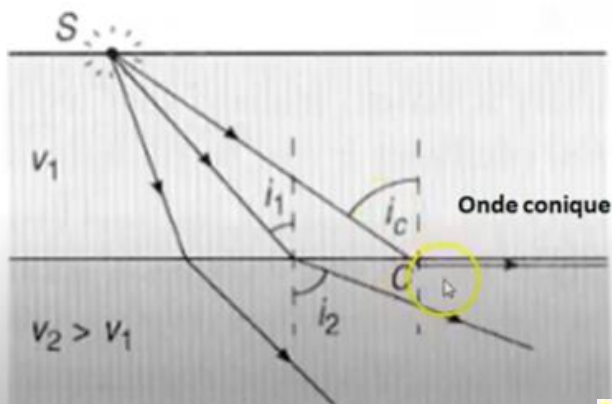
Pour les phénomènes de réfraction :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad \text{Or : } v = 1/n$$

$$\frac{\sin(i_1)}{v_1} = \frac{\sin(i_2)}{v_2}$$

$$i_2 > i_1$$

$$i_2 > i_1$$



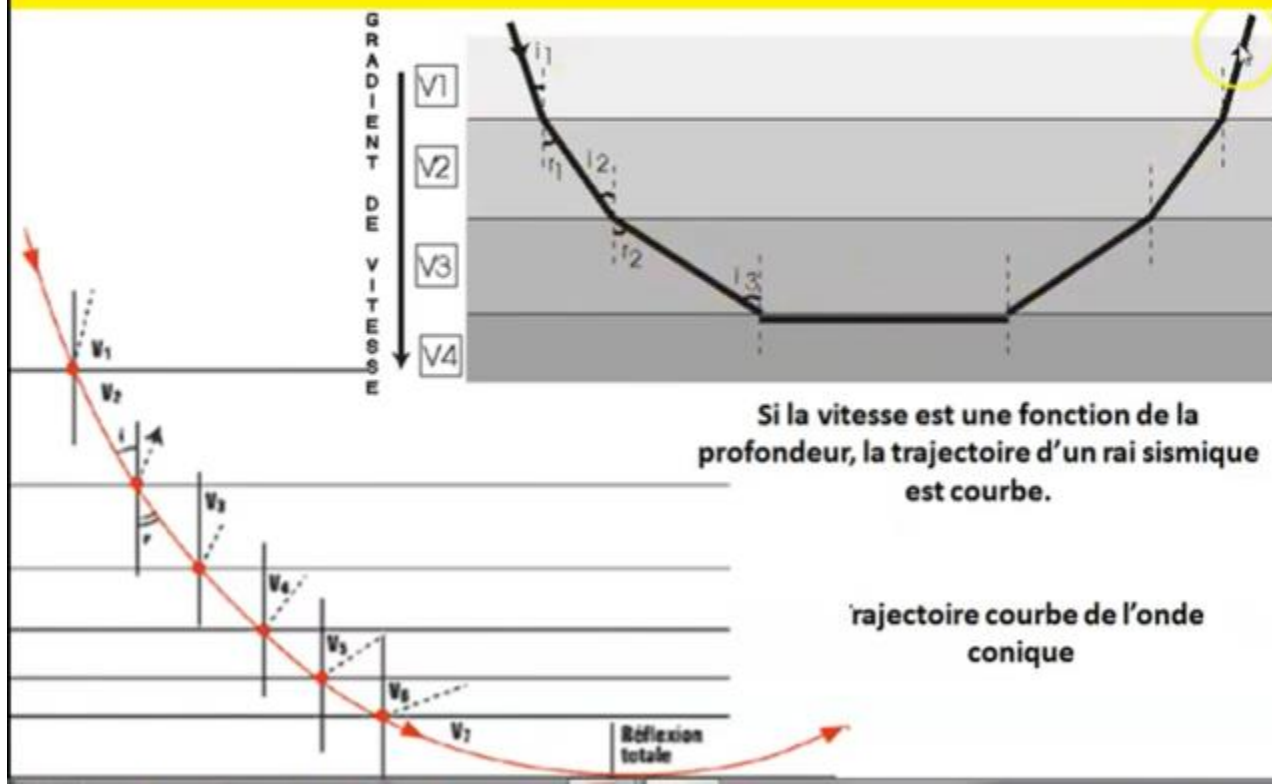
$$\frac{\sin(i_1)}{v_1} = \frac{\sin(i_2)}{v_2}$$

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

$$= 1/v_2 = \text{cste}$$

i_c : angle critique

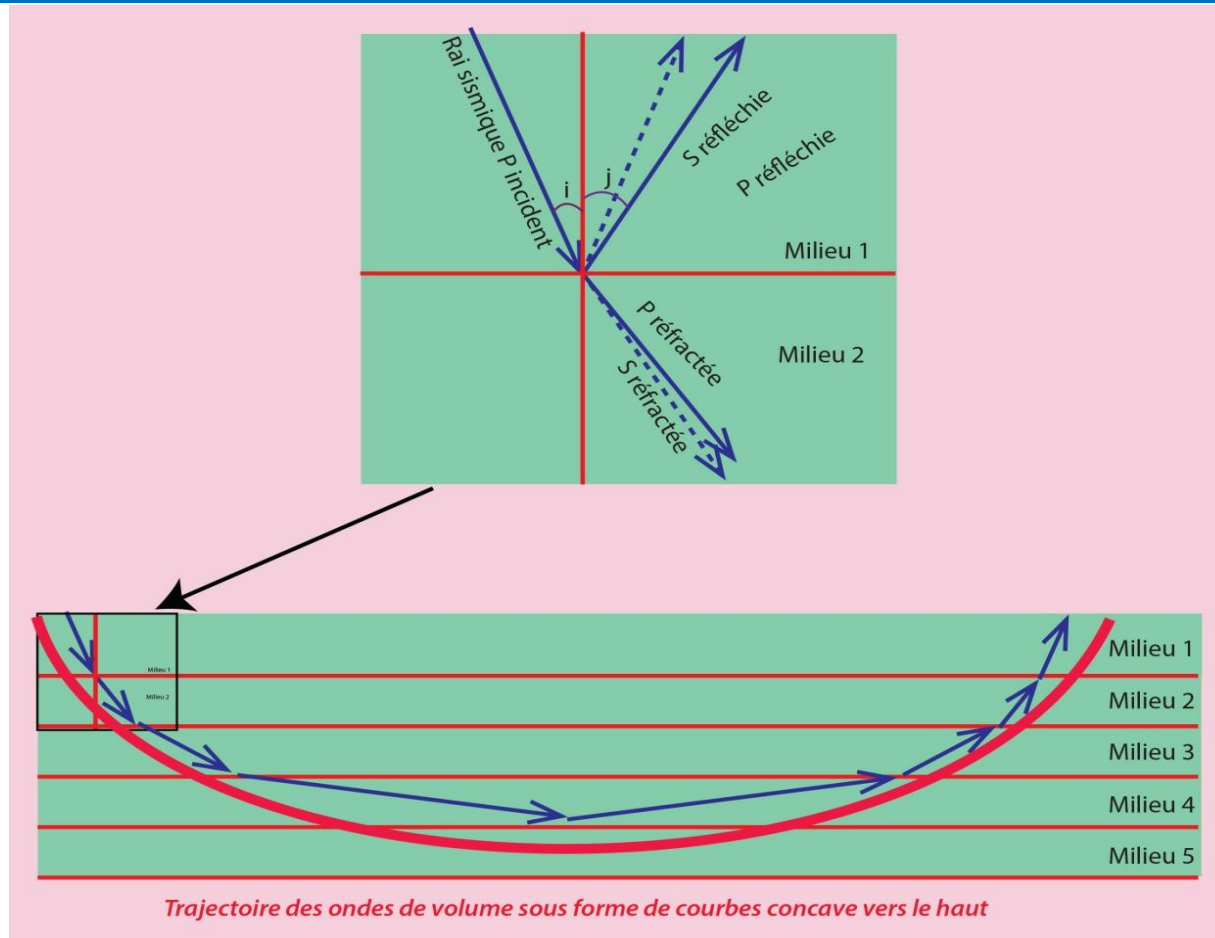
Réflexion totale et trajectoire des rais sismiques



Si la vitesse est une fonction de la profondeur, la trajectoire d'un rai sismique est courbe.

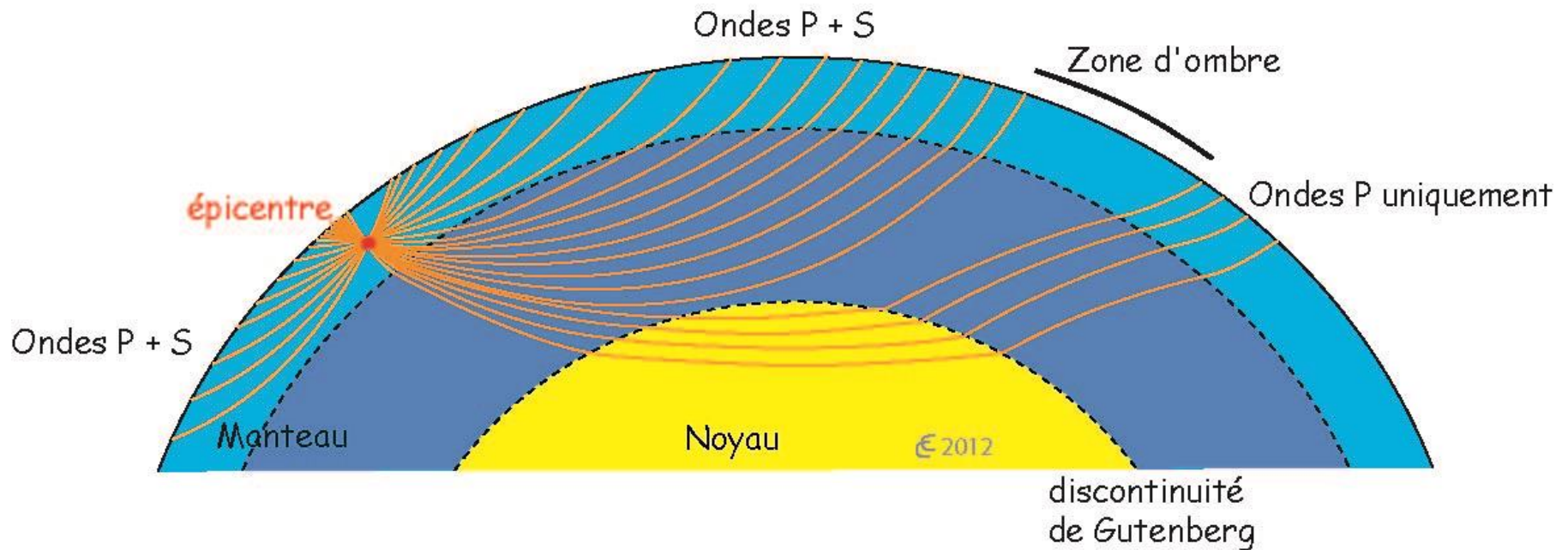
trajectoire courbe de l'onde conique

4-Propagation des ondes sismiques:



Au contact de milieux différents les ondes subissent des réfractions successives jusqu'à ce que l'angle d'incidence ne permette plus de réfractions. A cet instant l'onde P se réfracte en sens inverse (vers la surface de la Terre) ou elle sera enregistrée.

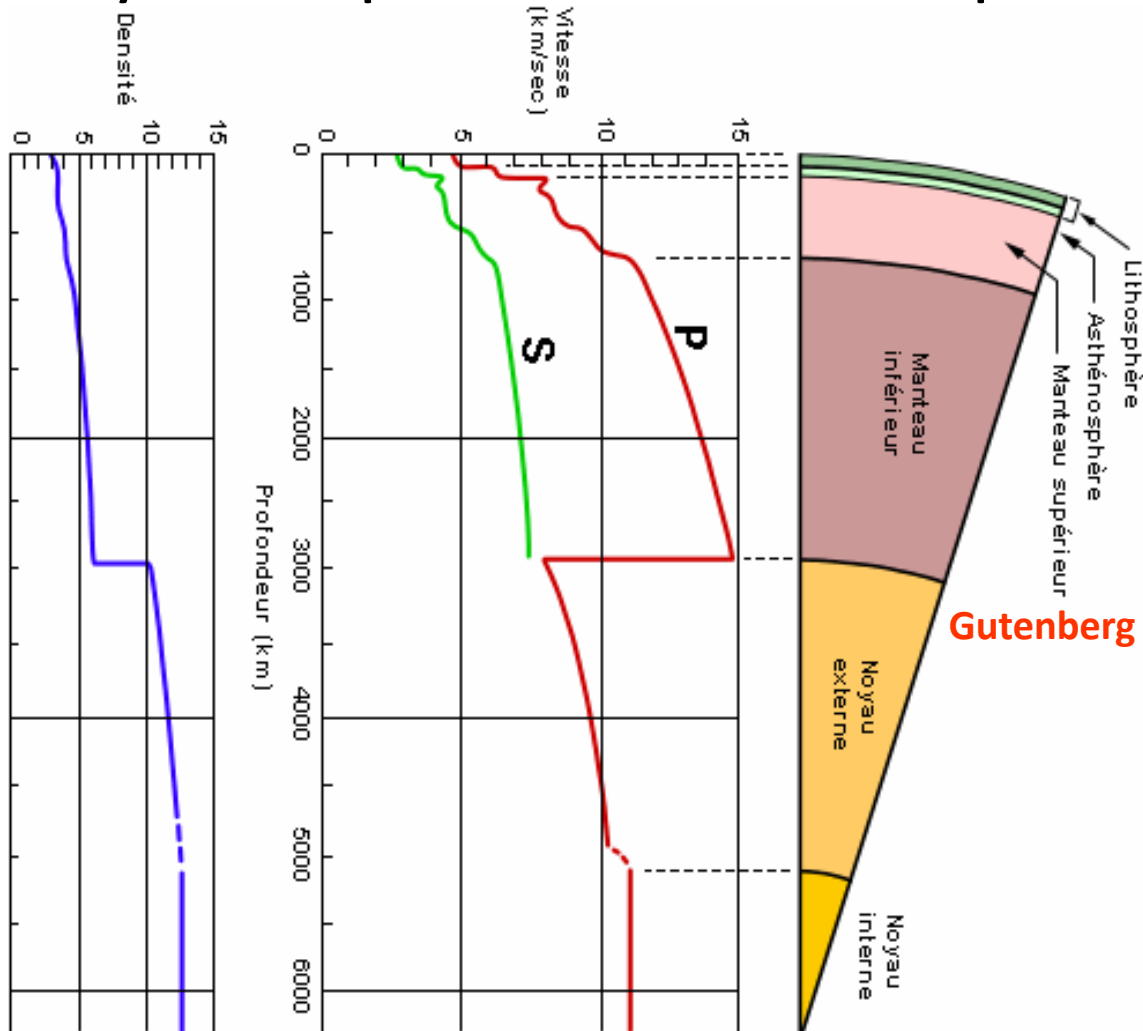
4-Propagation des ondes sismiques:



- Sous la surface de la Terre, le milieu de propagation des ondes n'est pas homogène : **la densité augmente**. Ceci explique le déplacement des ondes car à chaque changement de milieu, il y'a une petite modification de la trajectoire des ondes selon les lois de Descartes.

4-Propagation des ondes sismiques:

La structure interne de la Terre, ainsi que l'état et la densité de la matière, ont été déduits de l'analyse du comportement des ondes sismiques.



moho

Ondes S ne se propagent pas dans les milieux fluides

La vitesse de propagation des ondes sismiques est proportionnelle à la densité du matériel dans lequel elles se propagent.

5-Localisation de l'épicentre

basée sur la différence de propagation des ondes P et S

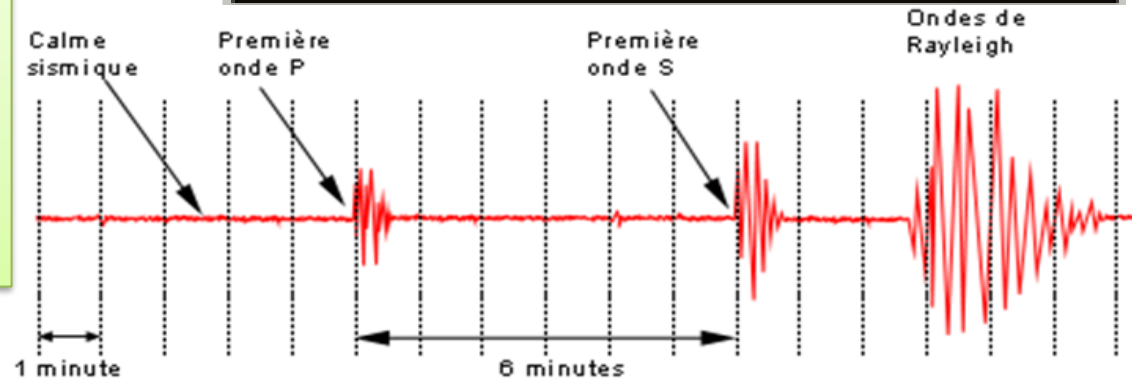
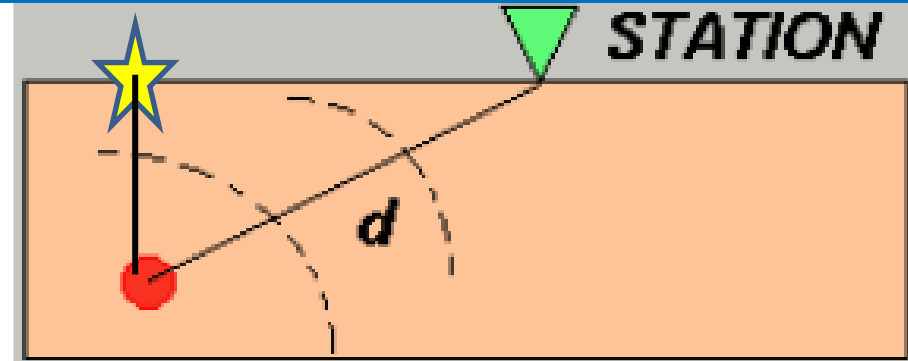
Pour une station:

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

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

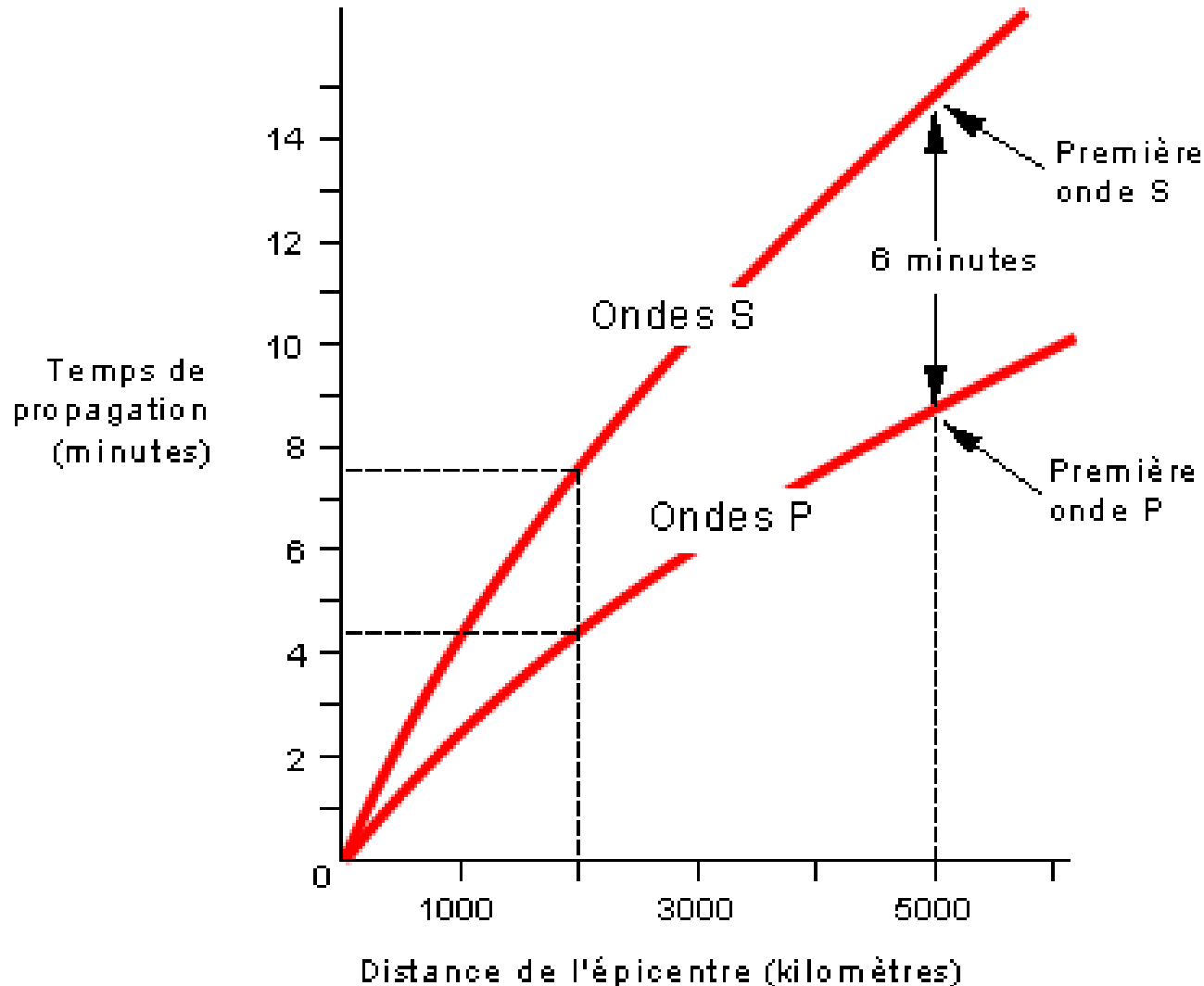
On connaît les vitesses des ondes P et S dans la croûte et on **admet** que

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

D'où : $d = 8 * (t_s - t_p)$

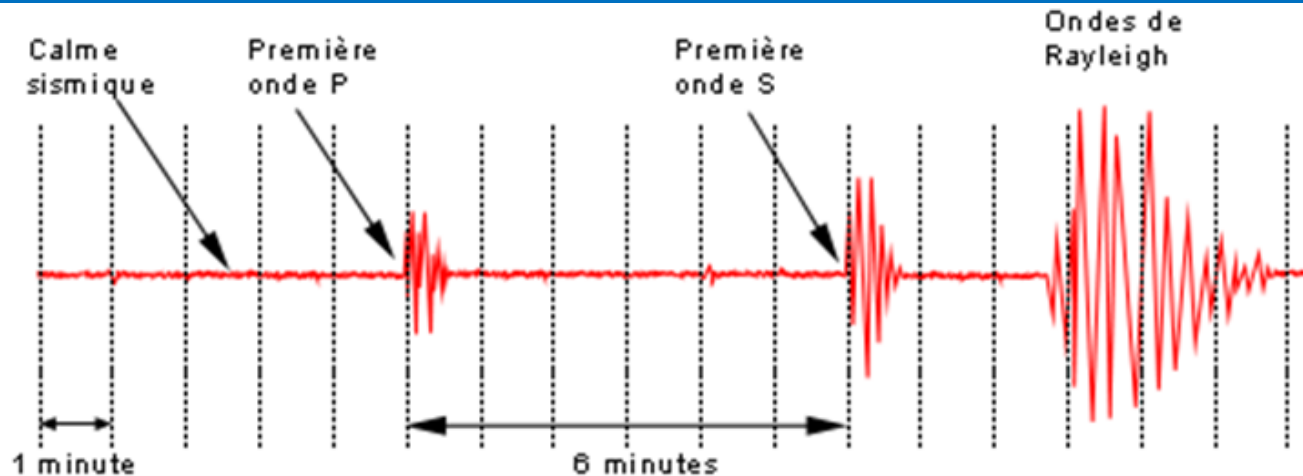
5-Localisation de l'épicentre :

Les vitesses de propagation des deux types d'ondes dans la croûte terrestre ont été établies et on possède des courbes étalonnées, comme celle-ci.



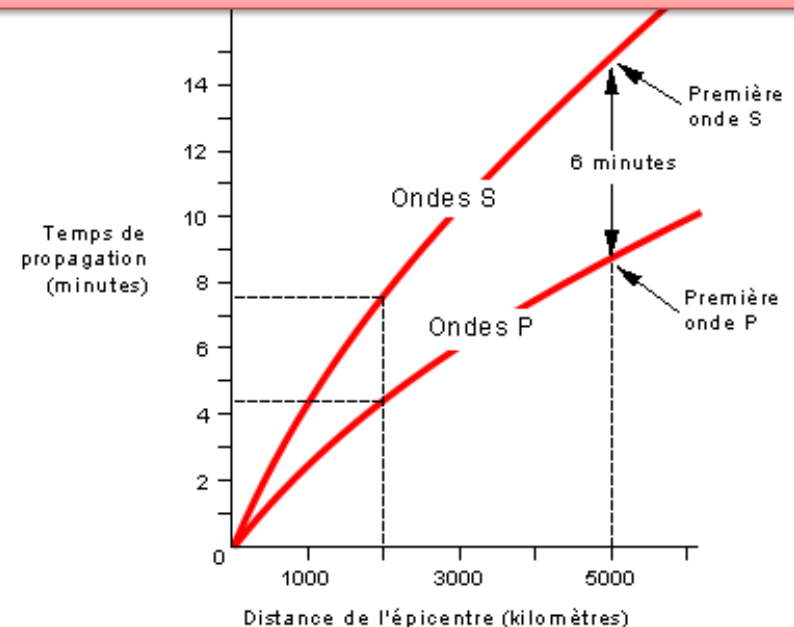
Pour franchir une distance de 2000 kilomètres, l'onde P mettra 4,5 minutes, alors que l'onde S mettra 7,5 minutes soit un décalage de 3 minutes.

5-Localisation de l'épicentre:

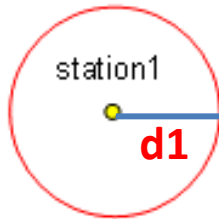


A partir du sismogramme, on obtient le décalage de temps entre les arrivées des ondes P et S (dans cet exemple de 6 mn).

A partir du graphe précédent on déduit la distance entre l'épicentre et la station de mesure (soit 5000 km).



5-Localisation de l'épicentre : méthode des cercles

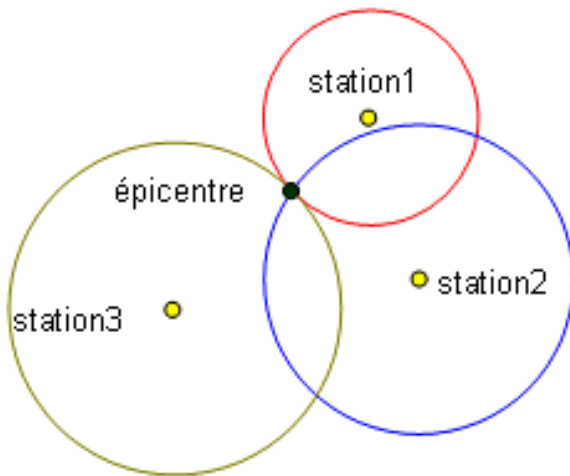
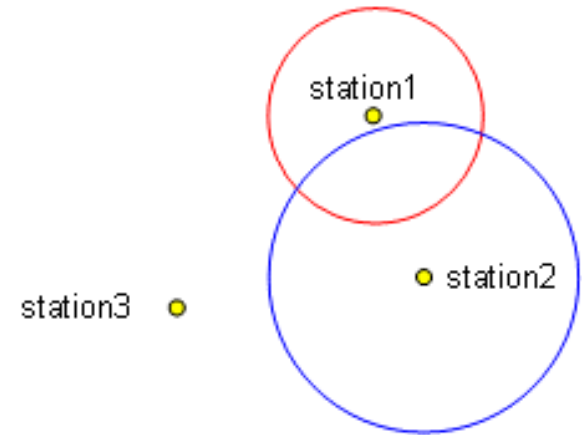


Le séisme se trouve sur le périmètre d'un cercle de rayon **d1** centré sur la station d'enregistrement 1.

station3 ● station2

Avec la station 2, 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

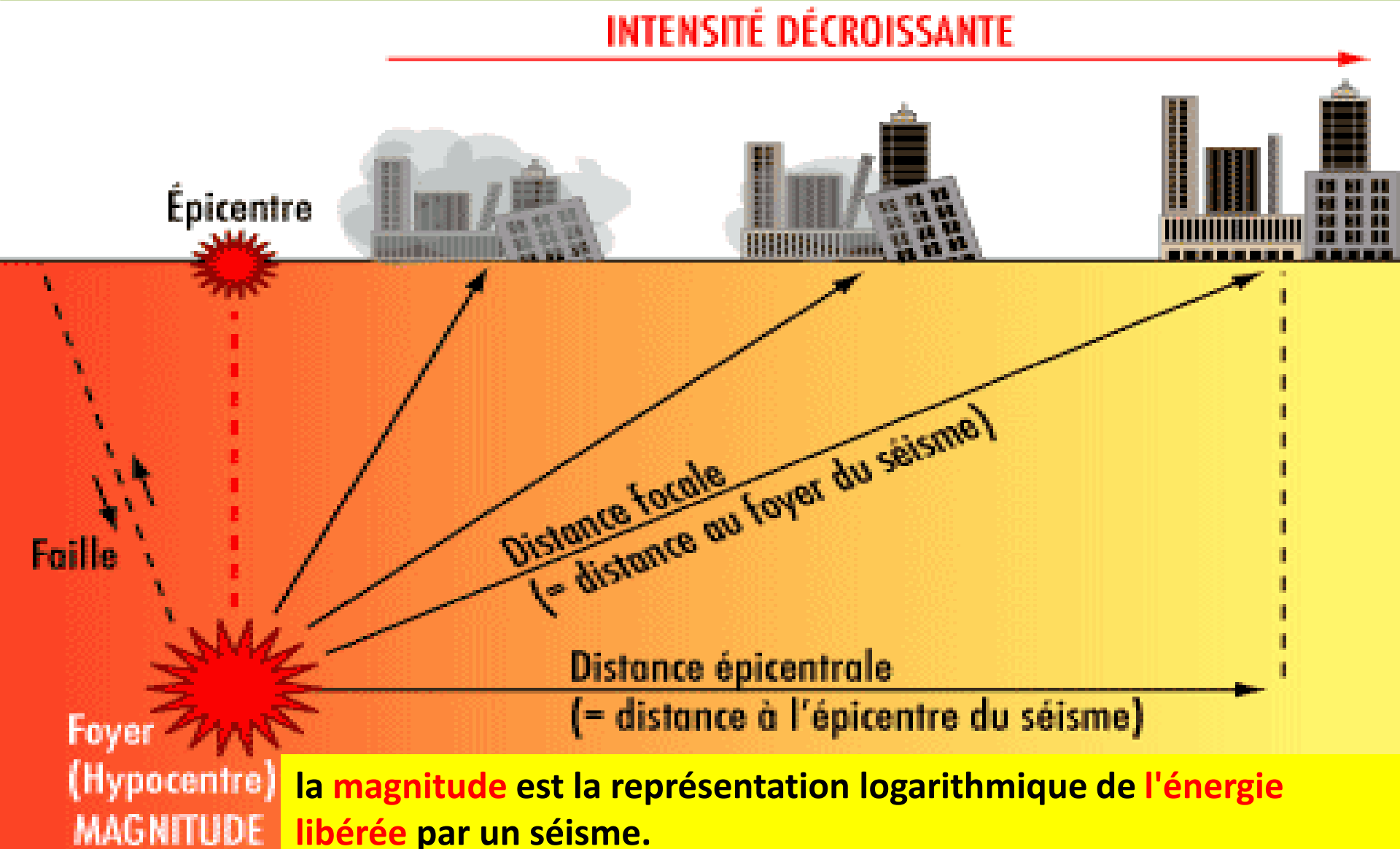


Avec une troisième station, on détermine la distance (**d3**) séparant cette station de l'épicentre du séisme.

Un seul point d'intersection possible entre les trois cercles définit la position précise de l'épicentre du séisme enregistré.

6-L'intensité du séisme

L'**intensité** traduit les effets et **dommages** induits par le **séisme** en un lieu donné.



6-L'intensité du séisme

Enregistrement par les sismomètres
Perception à l'intérieur

Quelques dommages
Perception à l'extérieur

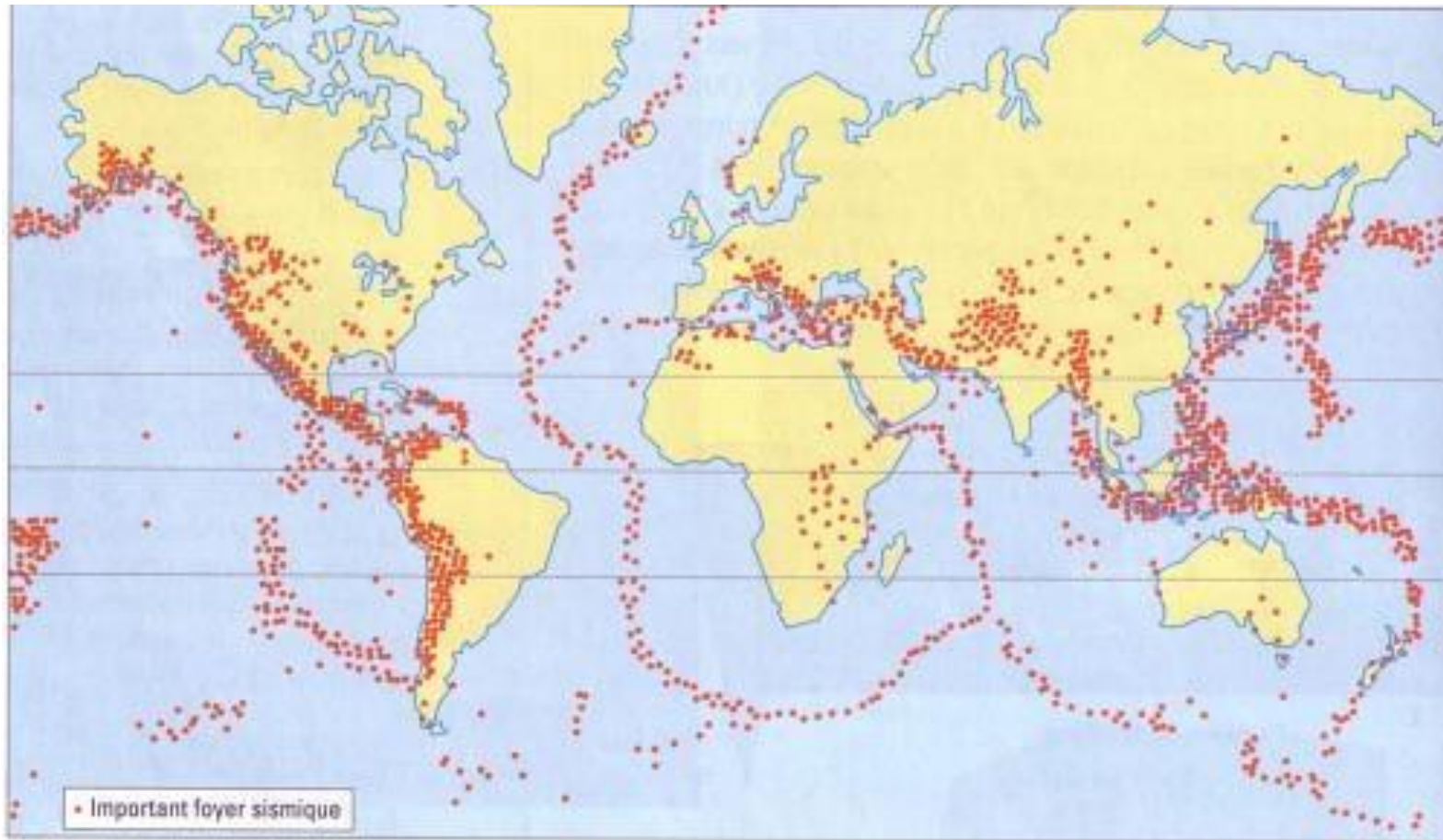
Dommages légers aux « bonnes constructions »
Destruction « des mauvaises »

Dommages considérables
Modification du paysage

Comparaison entre l'intensité et la magnitude ✕		
Échelle d'intensité de Mercalli		Magnitude (Richter)
Intensité	Effets ressentis	
I	Perçu uniquement par quelques personnes dans des circonstances particulières; détecté uniquement par des instruments très sensibles.	2
II	Perçu par quelques personnes au repos ou se trouvant aux étages supérieurs; balancement d'objets suspendus.	3
III	Perçu principalement par des personnes à l'intérieur des édifices. Les automobiles stationnées peuvent bouger.	
IV	Perçu par la plupart des gens à l'intérieur des édifices et par certains à l'extérieur. Suffisant pour réveiller certaines personnes. Bruit de vaisselle, fenêtres et portes.	4
V	Perçu par presque tout le monde, plusieurs personnes sont réveillées. Bris de vaisselle et de fenêtres, les objets instables sont renversés.	5
VI	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.	
VII	La plupart des gens paniques et courent à l'extérieur; dommages minimes aux constructions conçues pour les zones sismiques, minimes à moyens chez les bonnes constructions ordinaires, importants chez les mauvaises constructions. Meubles renversés.	6
VIII	Dommages légers aux constructions conçues pour les zones sismiques, importants chez les bonnes constructions ordinaires avec effondrements possibles, catastrophiques chez les mauvaises constructions.	7
IX	Dommages considérables aux constructions conçues pour les zones sismiques. Édifices déplacés sur leurs fondations.	
X	Fissuration du sol. Bris de canalisations souterraines. Quelques bonnes constructions en bois et la plupart des constructions en maçonnerie sont détruites. Sol fortement fissuré. Plusieurs glissements de terrain se produisent.	8
XI	Très peu de constructions en maçonnerie restent debout; rails tordus; ponts détruits. Grandes fissures dans le sol.	9
XII	Destruction quasi totale. Ondulations visibles à la surface	

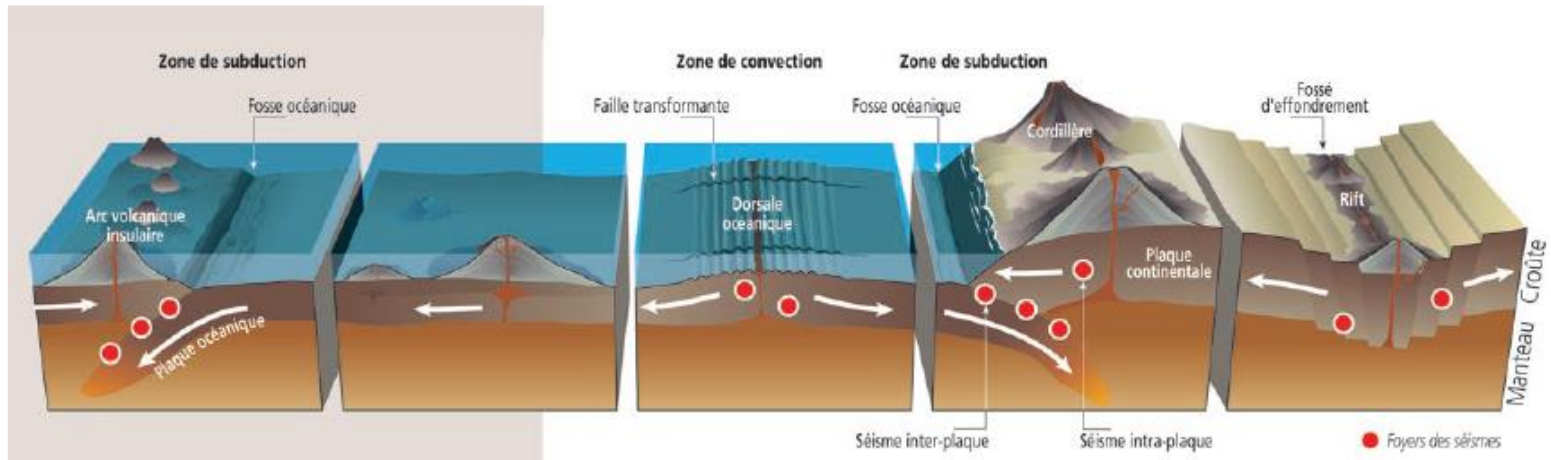
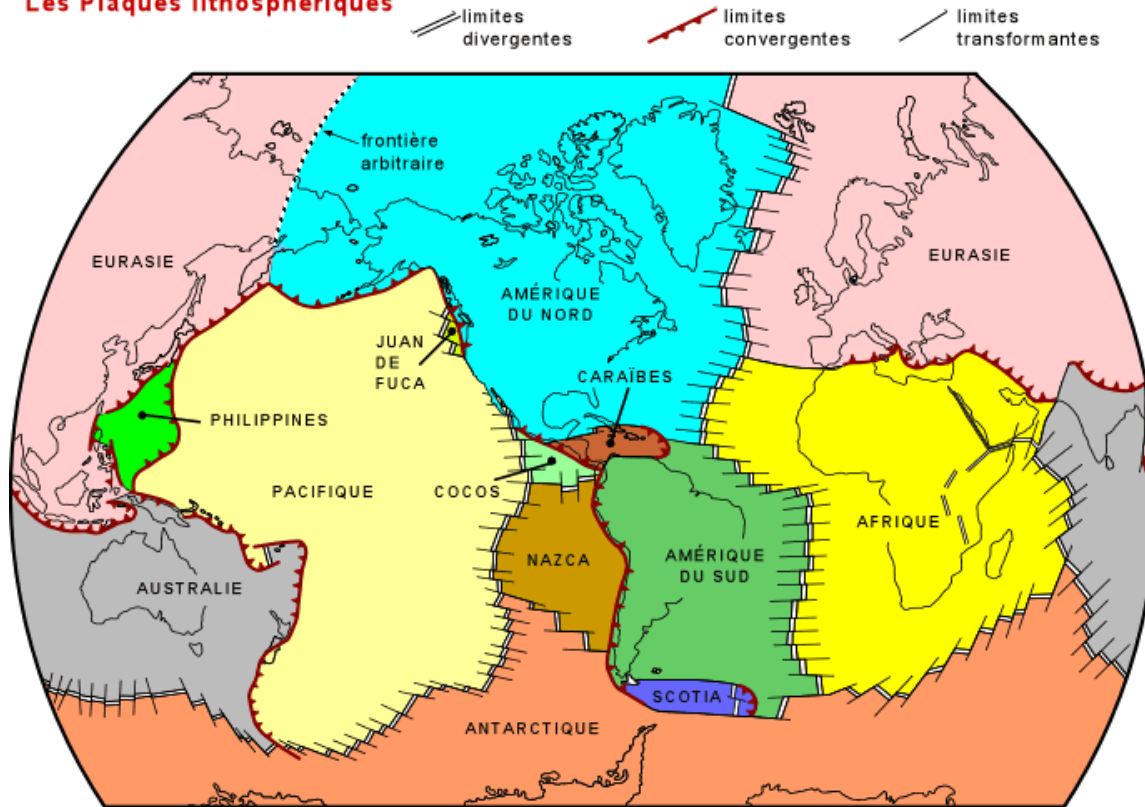
7-Répartition des séismes

La sismicité se concentre pour l'essentiel le long des **frontières des grandes plaques tectoniques**, là où les mouvements relatifs sont les plus importants. C'est notamment le cas tout autour de l'océan Pacifique (grands séismes d'Amérique du Sud, d'Alaska, du Kamchatka ou du Japon) ou à la périphérie de l'océan Indien (grands séismes indonésiens ou himalayens).



7-Répartition des séismes

Les Plaques lithosphériques

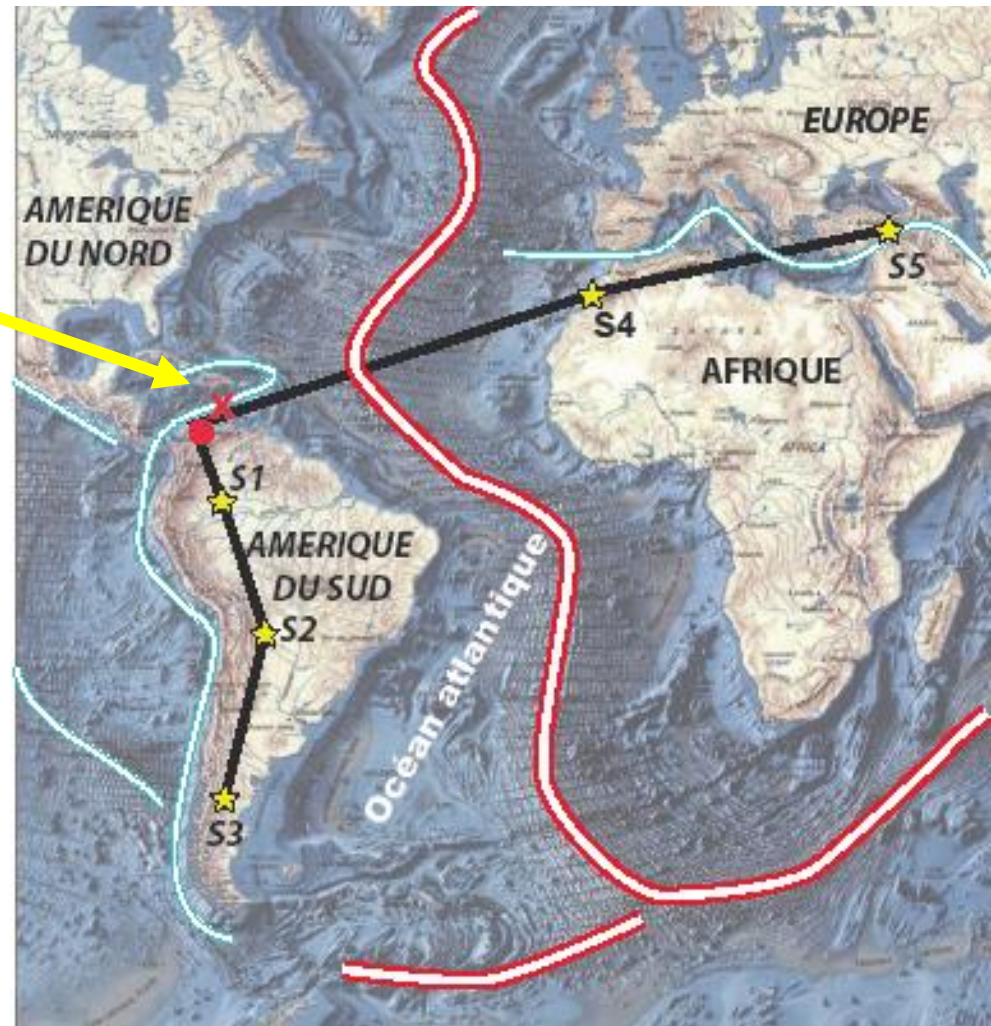


TD1- SISMOLOGIE

Exercice n° 1 :

Sur la carte ci-après, X représente l'épicentre d'un séisme de magnitude=7,5 de Richter.

S1, S2, S3, S4 et S5 représentent des stations d'enregistrement des ondes sismiques du séisme X.



- Epicentre du séisme X
- ★ Stations d'enregistrement des ondes sismiques
- zones de convergence des plaques lithosphériques
- zones de divergence des plaques lithosphériques
- zones sismiques

TD1- SISMOLOGIE

Exercice n° 1 :

- 1) – Combien faut-il de sismographes dans chaque station pour enregistrer les ondes sismiques du séisme X ? Pourquoi ?.
- 2) – Quelles sont les ondes sismiques enregistrées à la station S1 si elle est équipée seulement d'un sismographe « vertical » ?

TD1- SISMOLOGIE

Exercice n° 1 :

1)- Le nombre de sismographes dans chaque station : Il faut au minimum **trois sismographes** dans chaque station :

- Deux sismographes dits : « horizontaux » l'un enregistre la composante horizontale Nord-Sud et l'autre enregistre la composante horizontale Est-Ouest des ondes sismiques.
- un sismographe dit « vertical » pour enregistrer la composante verticale des ondes sismiques.

2)- Les ondes sismiques enregistrées dans la station S1 : les ondes sismiques enregistrées par le sismographe vertical sont les **ondes qui ont une composante verticale** à savoir les **ondes S**, les **ondes P** et les **ondes R** (de Rayleigh). Les ondes de love ou onde L (ou Q) sont des ondes transversales dont le mouvement des particules se fait dans le plan horizontal ; ne seront pas enregistrées par le sismographe vertical.

TD1- SISMOLOGIE

Exercice n° 1 :

3) - Les distances entre l'épicentre X et les stations d'enregistrement S1, S2, S4 et S5 sont respectivement **1222km** ($\Delta = 11^\circ$), **3333km** ($\Delta = 30^\circ$), **5000km** et **12 000km**. Les vitesses des ondes sismiques P calculées au niveau de ces stations sont respectivement V_{p1} , V_{p2} , V_{p4} et V_{p5} .

a) – D'après l'allure générale de la courbe hodochrone de l'onde P (fig.2) **comparer** les vitesses **V_{p1} et V_{p2}** . Comparer également les vitesses **V_{p4} et V_{p5}** .

b) – Quelle **interprétation** peut – on tirer de ces **comparaisons** ?

TD1- SISMOLOGIE

Temps de parcours (mn)

Fig.2 COURBES HODOCHRONES

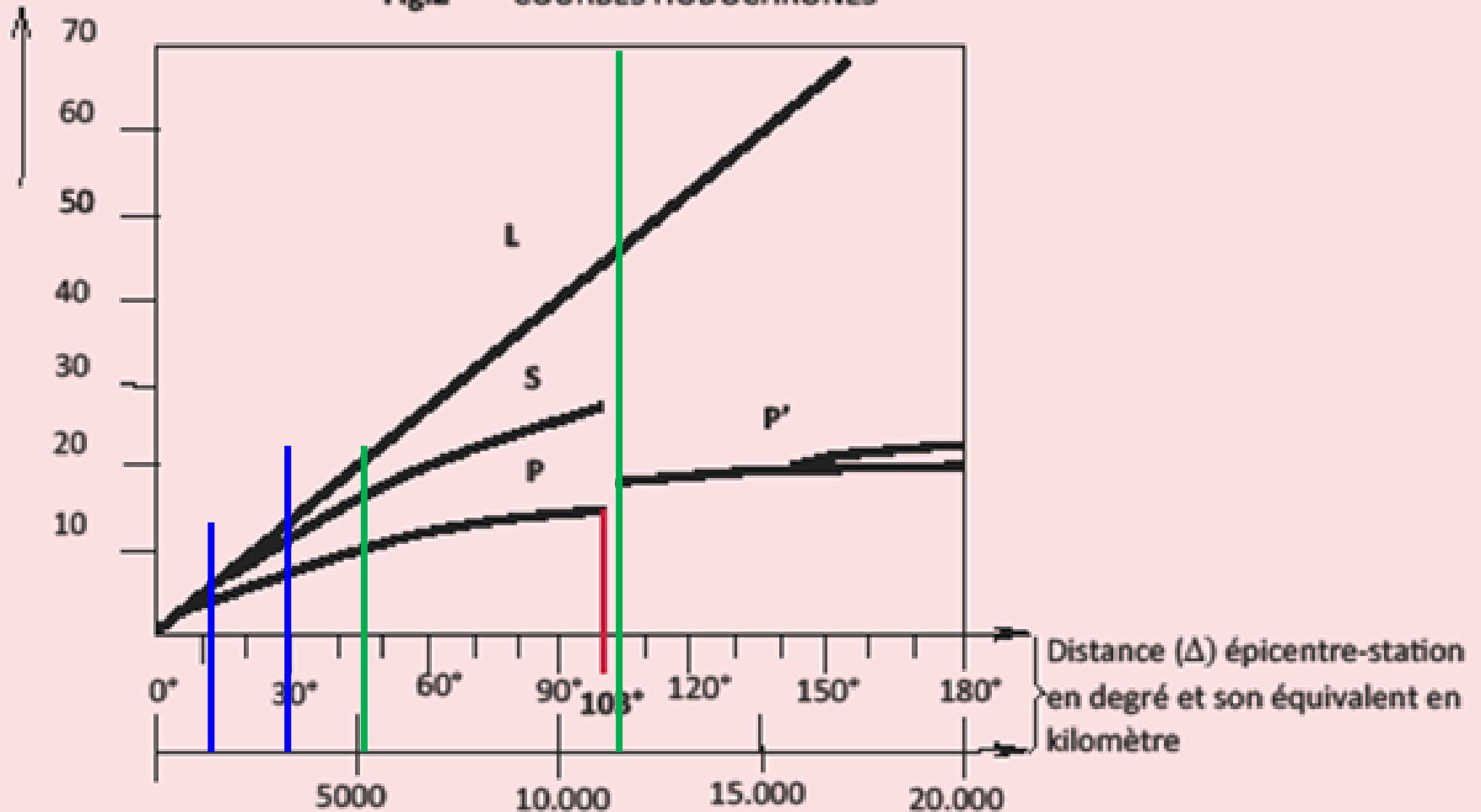


Fig.2

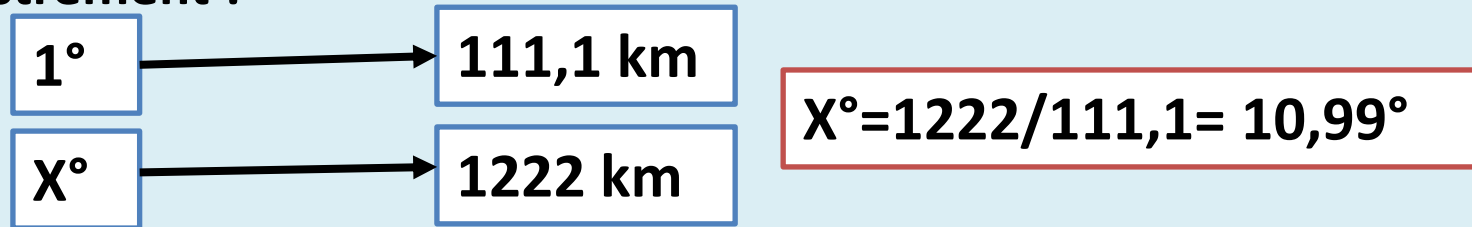
TD1- SISMOLOGIE

3)- a)- Comparaison des vitesses des ondes sismiques d'après l'allure des courbes hodochrones :

On transforme les distances du Km au degré :

$1^\circ = 2\pi R/360$ c'est-à-dire $1^\circ = 111.1$ km sachant que le rayon de la terre $R = 6371$ km.

Donc (par règle de trois) les distances entre l'épicentre X et les stations d'enregistrement :



$\Delta S1$	$\Delta S2$	$\Delta S4$	$\Delta S5$
1222 Km	3333 Km	50000km	12000km
11°	30°	45°	108°

TD1- SISMOLOGIE

3)- a)- Comparaison des vitesses des ondes sismiques d'après l'allure des courbes hodochrones (figure 3) :

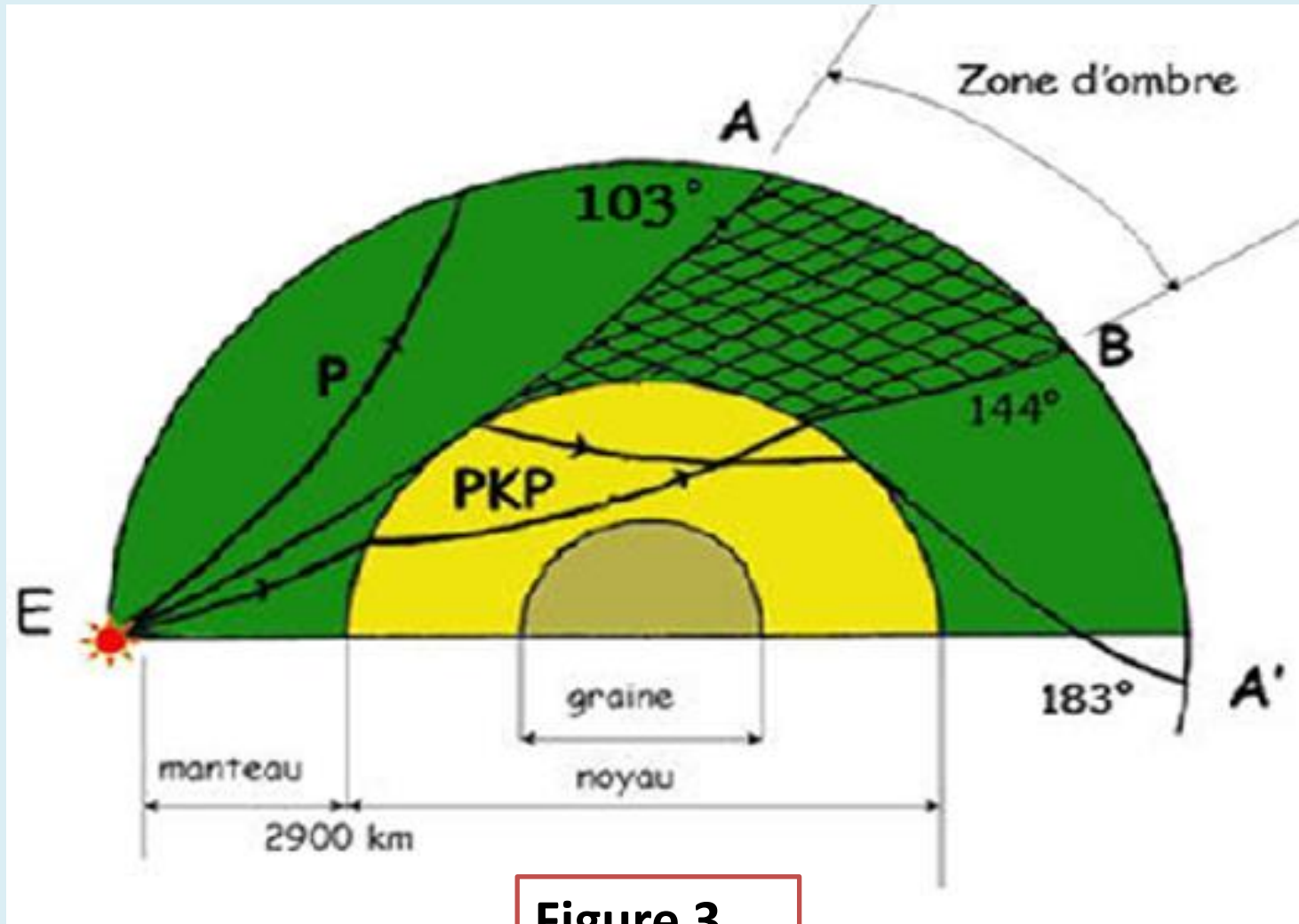


Figure 3

TD1- SISMOLOGIE

3)- a)- Comparaison des vitesses des ondes sismiques d'après l'allure des courbes hodochrones (fig. 2 & 3) :

la zone d'ombre est comprise entre 103° et 144° (Fig.3).

D'après l'allure des courbes hodochrones (Fig. 2), on remarque que les vitesses des ondes sismiques P sont croissantes avec les distances jusqu'à une valeur $\Delta = 103^\circ$ (ou 11443.3 km lorsqu'on fait les conversions) où la vitesse des ondes P est nulle. De ce fait on peut déduire que :

- $V_{p5} = 0$ (car $\Delta = 12000\text{km}$ ou 108° (l'onde passe à l'intérieur de la zone d'ombre).

donc $V_{p1} < V_{p2}$ mais $V_{p5} < V_{p4}$.

TD1- SISMOLOGIE

3)- b) – Quelle interprétation peut – on tirer de ces comparaisons ?

Pour **les ondes P (et S)**, la vitesse donnée par les courbes hodochrones varie avec la distance; elle croît avec cette distance vers $\Delta = 103^\circ$. (Il s'agit de la vitesse apparente étant donné que le trajet réel des P (et S) est interne et que la distance Δ , qui est mesurée à la surface, n'est pas la distance réellement parcourue par les ondes P et S).

On remarque donc que:

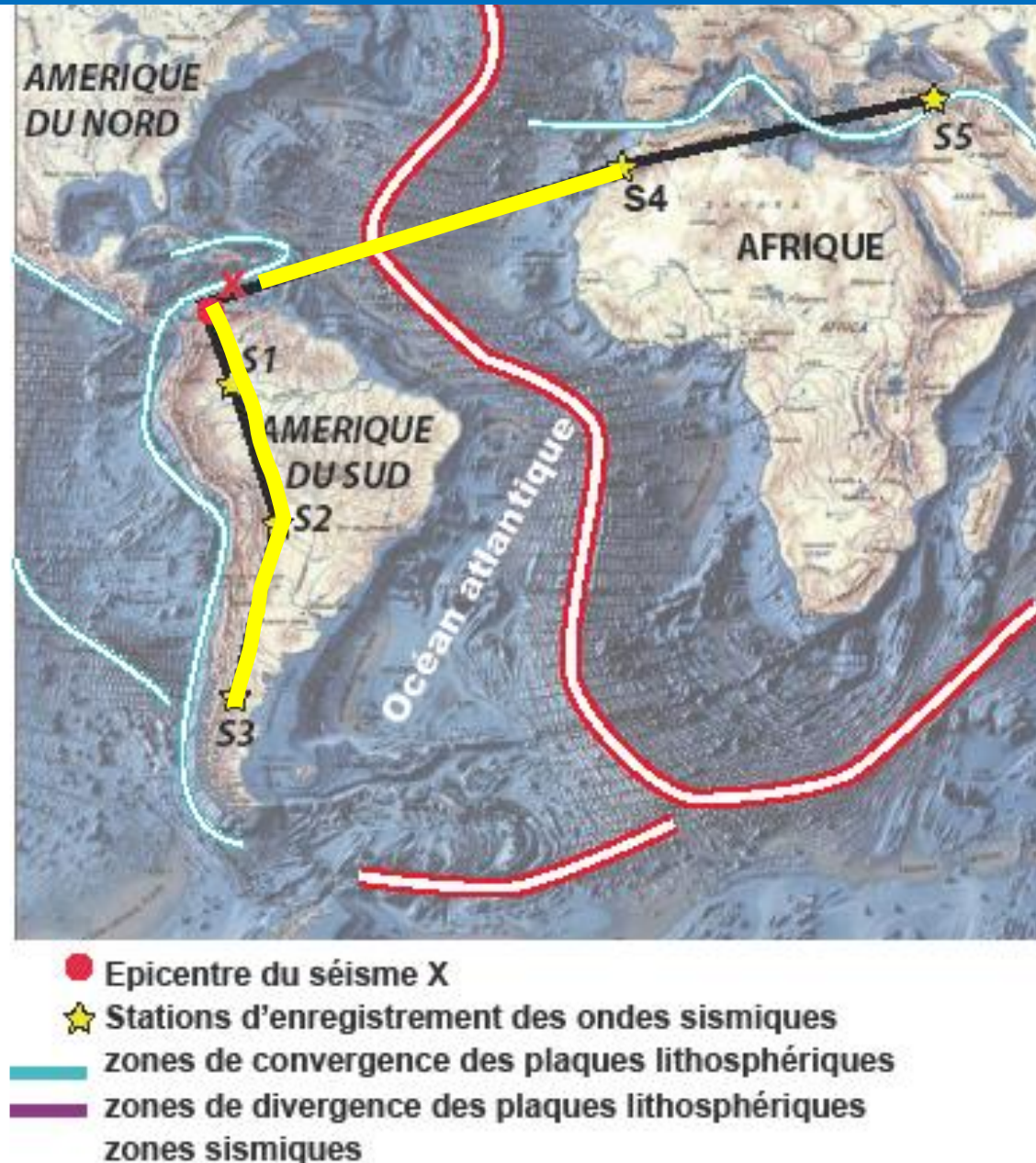
- la vitesse apparente des ondes P et des ondes S et leur vitesse réelle varient dans le même sens,
- la distance Δ et la profondeur maximale atteinte par le rai sismique varient dans le même sens,

On peut tirer de ce qui précède que les vitesses augmentent jusque vers la profondeur de 11443.3km ($\Delta = 103^\circ$). Il s'agit là de la profondeur maximale atteinte par les rais qui ressortent à la distance $\Delta = 103^\circ$.

TD1- SISMOLOGIE

Exercice n° 1 :

4) – En admettant que la distance **X-S3** est égale à la distance **X-S4**, les ondes sismiques superficielles qui résultent du séisme X arrivent-elles au même instant t aux stations S3 et S4 ? Expliquez.



TD1- SISMOLOGIE

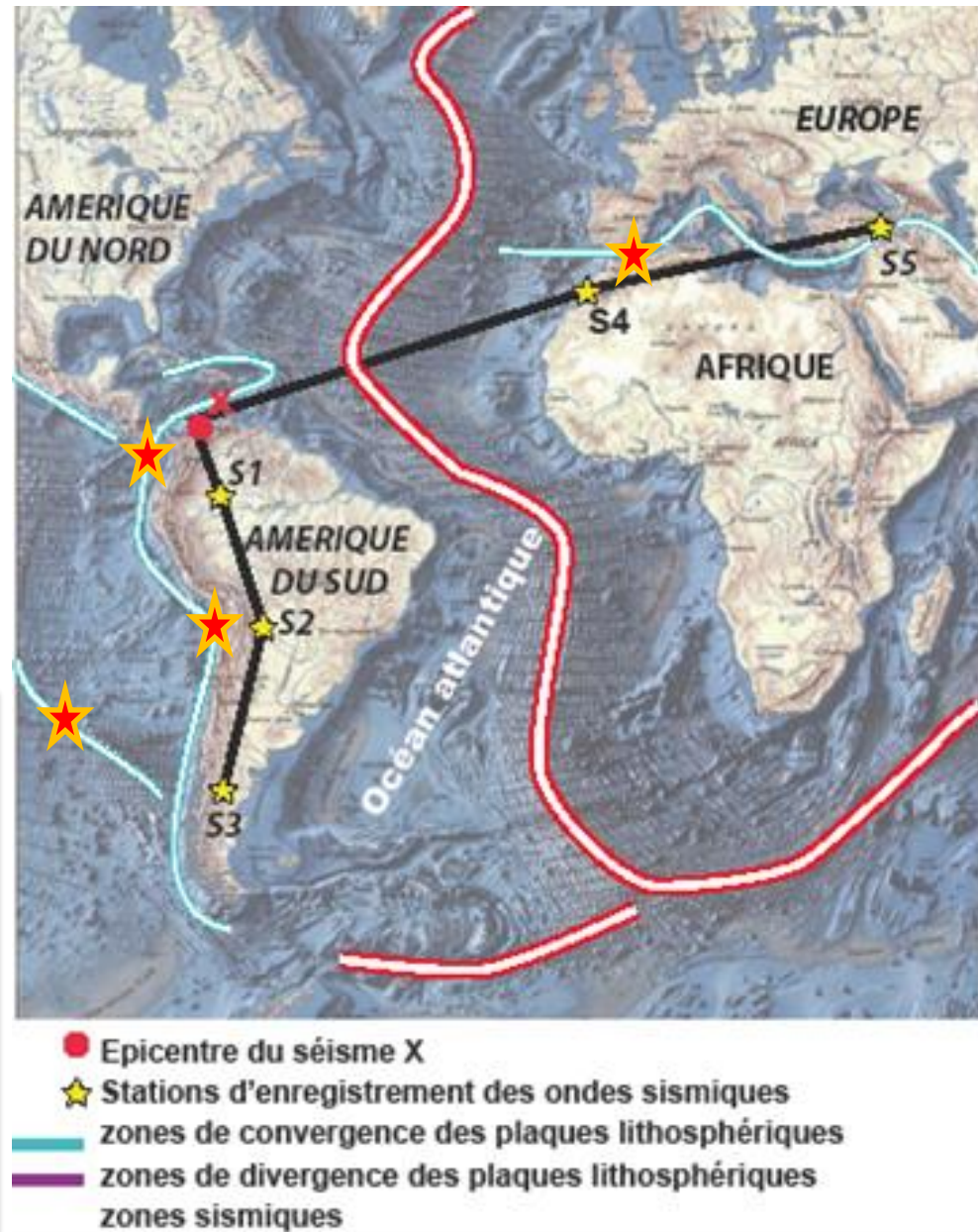
- 4) Même si la distance **X-S3** est égale à la distance **X-S4**, les ondes sismiques superficielles qui résultent du séisme X n'arriveront pas au même instant **t** aux stations S3 et S4 pour les raisons suivantes :
- La vitesse des ondes sismiques dépend de plusieurs facteurs, en particulier la **nature du milieu** traversé par ces ondes.
 - Les ondes sismiques **se propagent d'autant plus vite** qu'elles traversent des **régions rigides, denses, incompressibles et souvent froides** tandis qu'elles ralentissent dans les zones chaudes. De ce fait entre la station S4 et l'épicentre X les ondes sismiques superficielles arrivent en retard car elles ont été ralenties au niveau de la dorsale océanique très chaude (sortie de laves basaltiques).

TD1- SISMOLOGIE

5) - Sur la même carte de la figure n°1, indiquez par un (ou des) figuré (s) de votre choix la position géographique de quelques **épicentres** dans les zones à risque sismique en précisant éventuellement la position du foyer des séismes.

5) - S'inspirer de la carte du monde donnée dans le cours :

- Les **épicentres se localisent préférentiellement au niveau des zones de convergences** (voir légende de la carte).



TD1- SISMOLOGIE

Exercice n° 2

Sur le dessin de la figure 4 ci-après, on représente la trajectoire des ondes sismiques d'un séisme par trois traits 1, 2 et 3 depuis son foyer F qui est superficiel, jusqu'à la station d'enregistrement des ondes sismiques St1 sur une distance $D = 8000$ km.

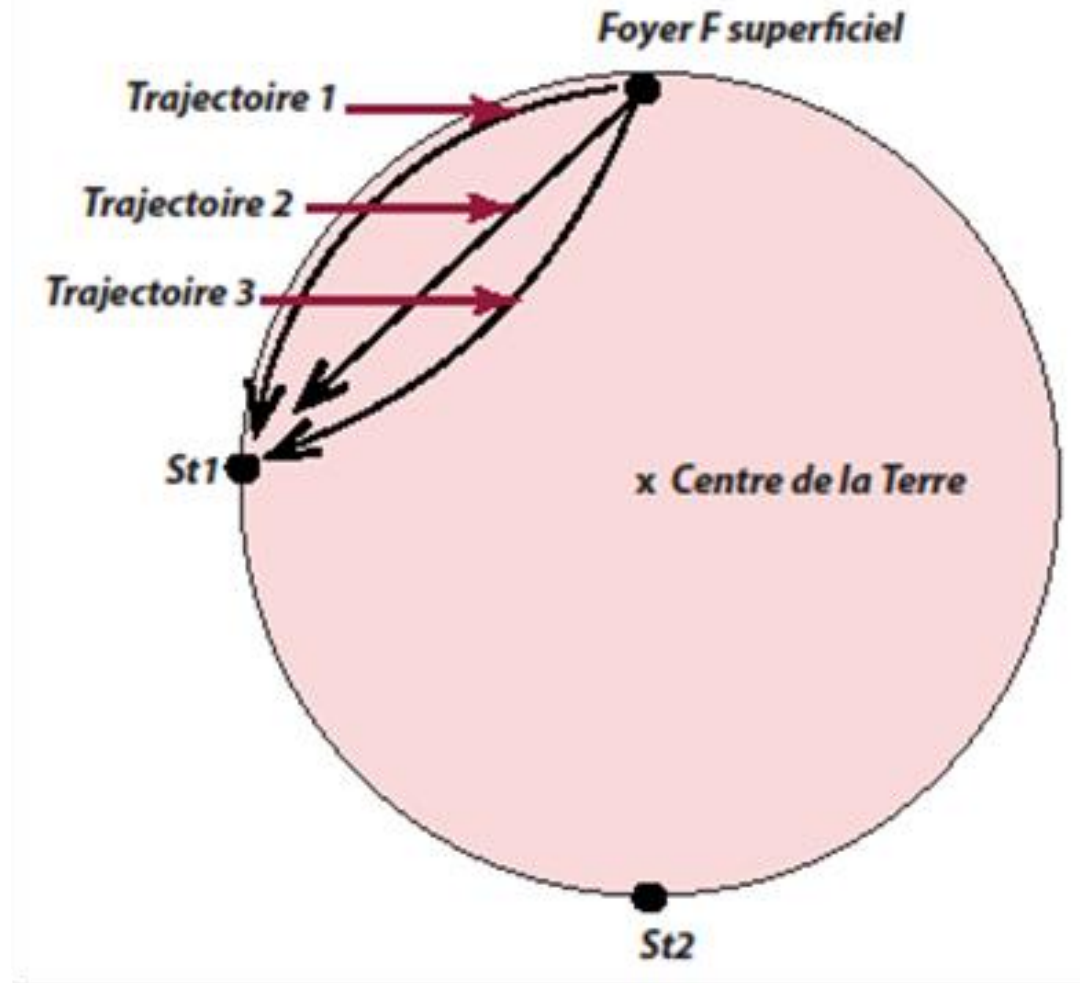


Fig.4

TD1- SISMOLOGIE

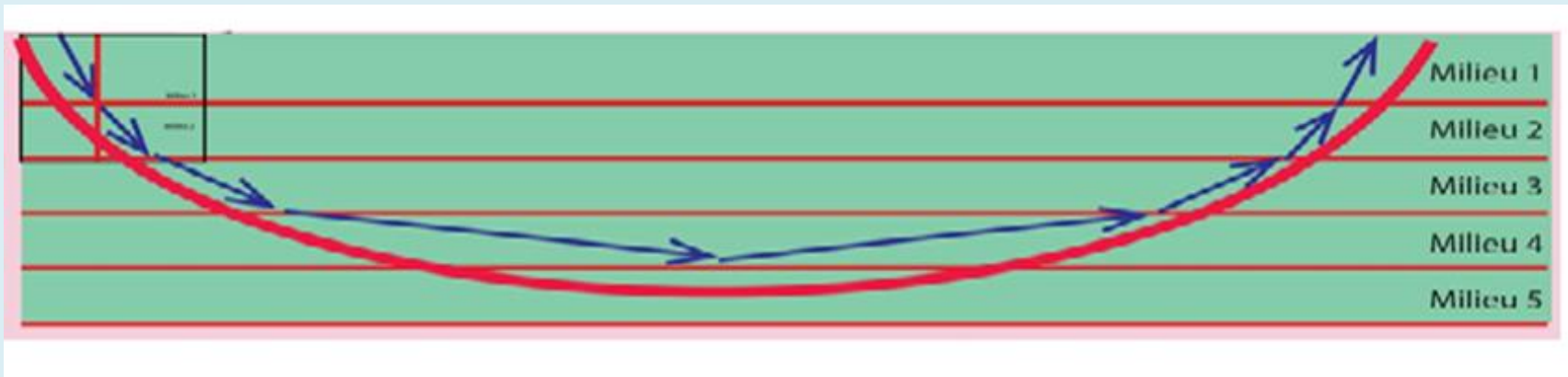
Exercice n° 2

- 1- Lequel des traits représente la trajectoire réelle des ondes P ? Expliquez pourquoi.
- 2- Même question pour les ondes R.
- 3- Les ondes S seront-elles enregistrées dans la station St1 ? Justifiez votre réponse.
- 4- Les ondes S et P directes seront-elles enregistrées dans la station St2 ? Justifiez votre réponse.

TD1- SISMOLOGIE

1°) Le trait qui représente la **trajectoire réelle des ondes P** correspond à la **trajectoire n°3**.

Explication : Les ondes sismiques P sont des ondes de volume, elles voyagent dans les profondeurs hétérogènes de la Terre à la suite d'une série de réfractions successives jusqu'à ce que l'angle d'incidence ne permet plus de réfractions. A cet instant l'onde P se réfracte en sens inverse (vers la surface de la Terre) d'où la forme concave vers le haut de la trajectoire 3 (Figure 3).



Remarque : le trait 2 ne peut pas donc correspondre à la trajectoire réelle de l'onde P car les profondeurs de la Terre sont constituées de matériel hétérogène.

TD1- SISMOLOGIE

2°) Le trait qui représente la trajectoire réelle des ondes R correspond à la trajectoire n°1

Explication : Les ondes sismiques R sont des ondes de surface ; elles se propagent à la (ou près) de la surface du globe terrestre.

3°) Oui, les ondes S seront enregistrées dans la station St1.

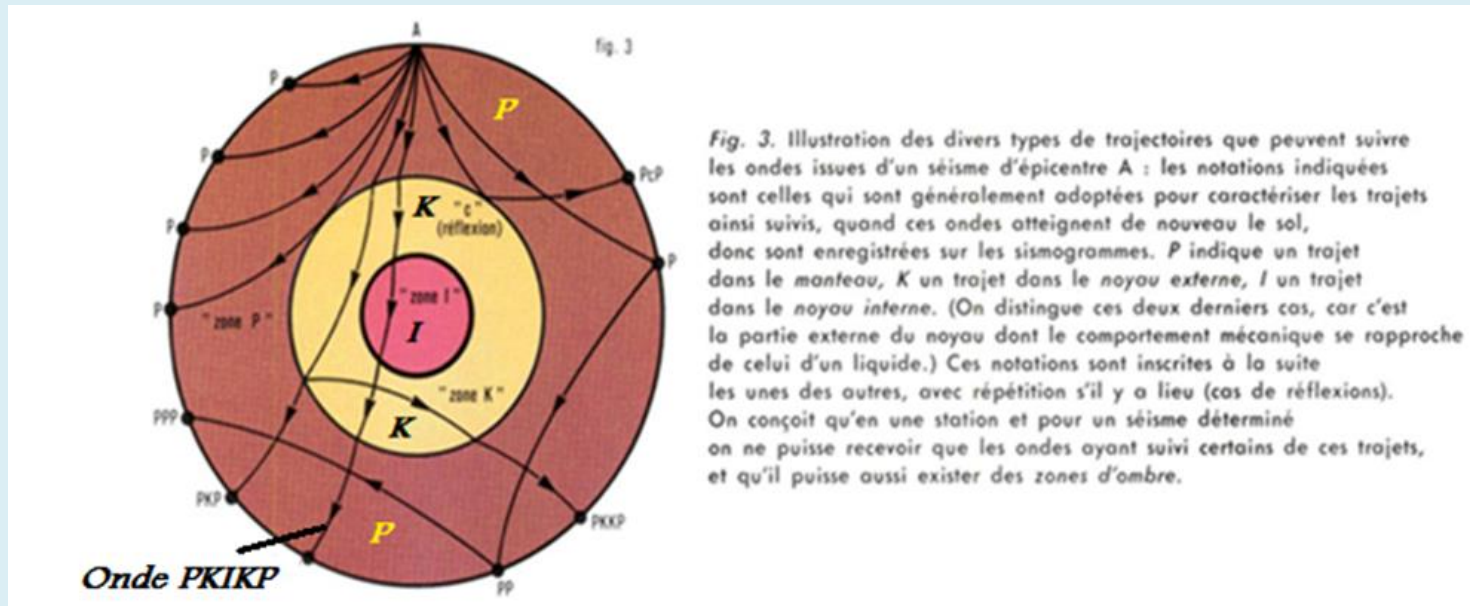
Explication : Les ondes S sont des ondes de cisaillement ; elles sont enregistrées dans toutes les stations comprises entre le Foyer et $D = 103^\circ$ (à peu près 11443.3km).

La distance $D = 8000\text{km}$ correspond à peu près 68.6° (donc inférieur à 103°). De ce fait les ondes seront bien enregistrées à la station St1.

TD1- SISMOLOGIE

4°) La station St2 correspond à l'antipode du foyer. A ce niveau :

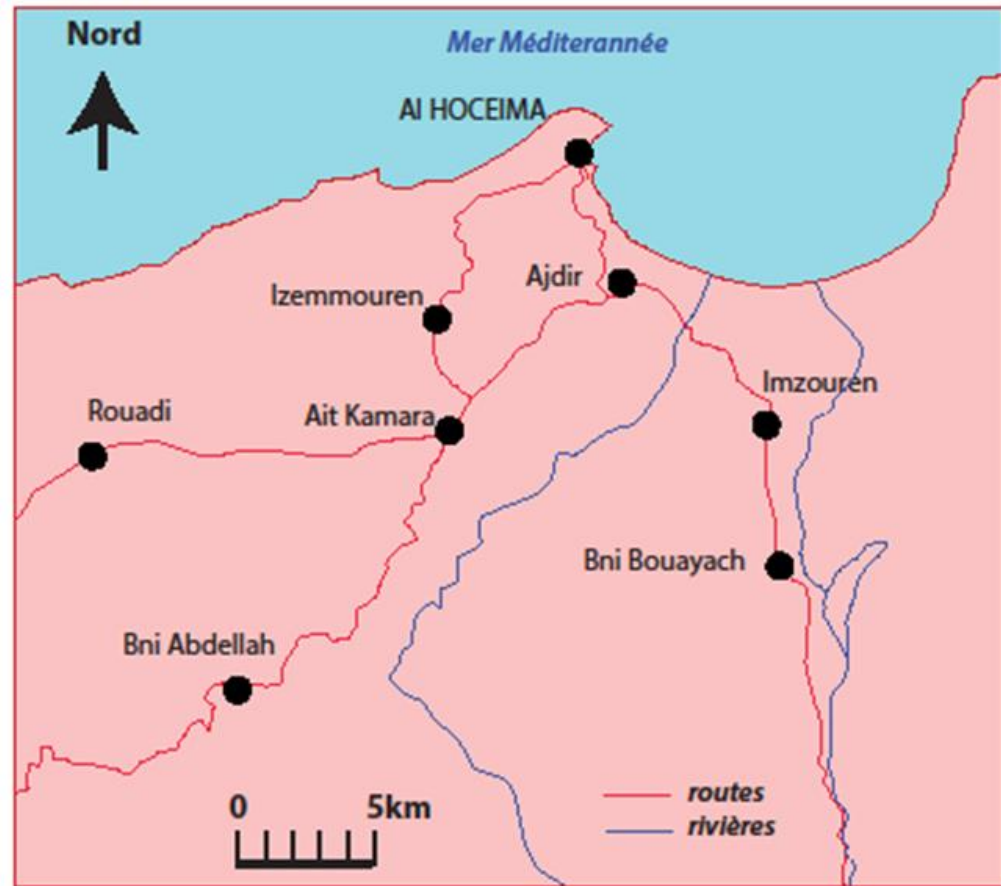
- les **ondes S** ne seront pas enregistrées à cause de l'**obstacle liquide du noyau externe**.
- les **ondes P** directes ne seront pas enregistrées ; elles subissent des **réfractions au niveau du noyau externe et interne** et on aura un nouveau type d'onde appelé PKIKP.



TD1- SISMOLOGIE

Exercice n° 3

Le 24 février 2004 à 2h 27mn, la région d'Al Hoceima a été secouée par un séisme de magnitude $M = 6.1$ sur l'échelle ouverte de Richter. Son intensité est très élevée (destructrice) au voisinage de l'épicentre E. Ce dernier se situe (à vol d'oiseau) à 13km d'Al Hoceima, à 2,6km d'Ait Kamara et à 12km du village d'Imzouren (fig4).

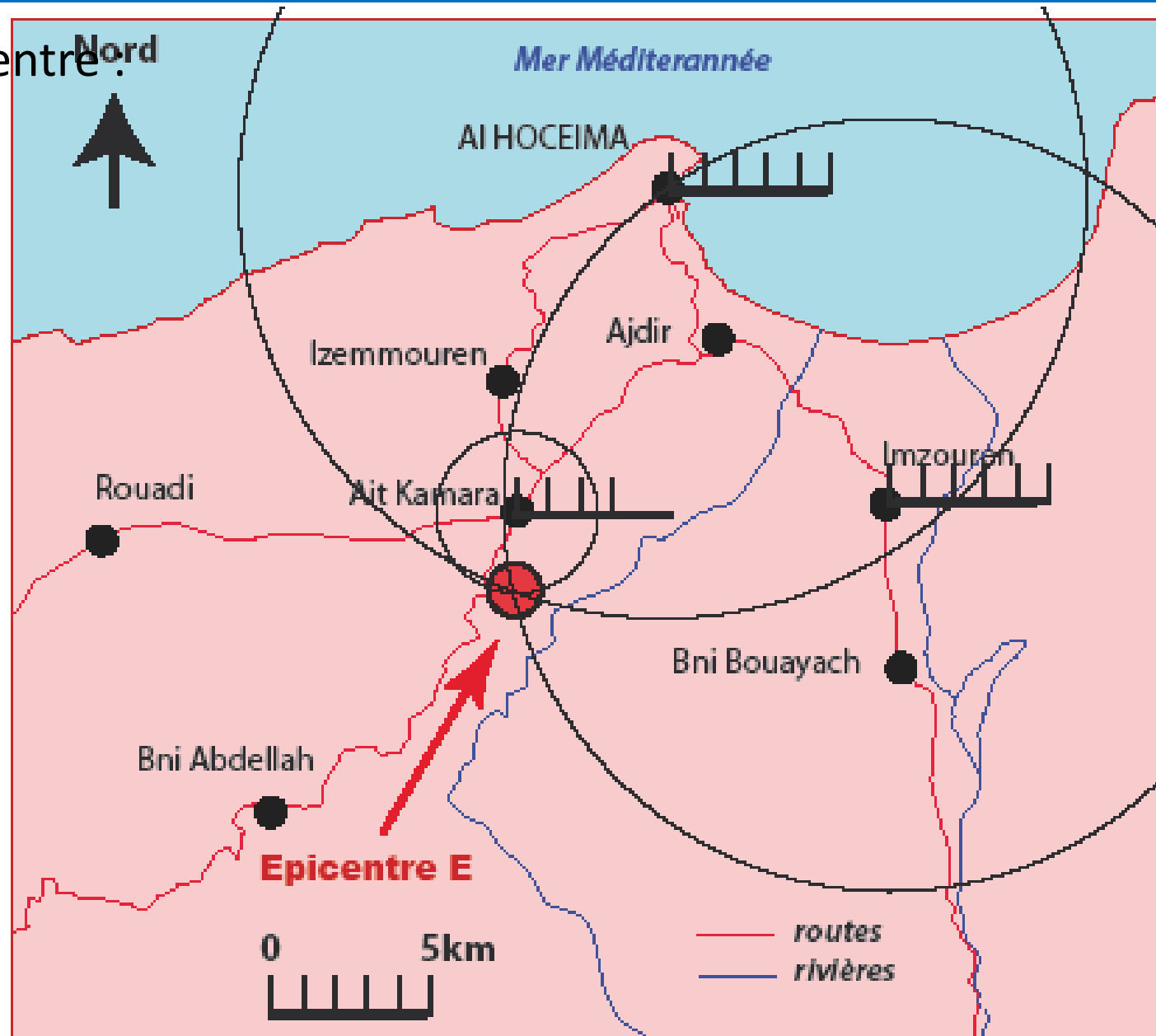


- 1)-Représenter sur la carte ci-après la position exacte de l'épicentre E en utilisant l'échelle graphique.
- 2)-Quelle est la différence entre Magnitude et Intensité d'un séisme ?
- 3)-Les jours qui ont suivi 24/02/2004, les habitants de la région d'Al Hoceima ont ressenti des répliques. Qu'est-ce qu'une réplique sismique ?

TD1- SISMOLOGIE

1) Position de l'épicentre :

Al Hoceima: **13km**
Ait Kamara: **2,6km**
Imzouren: **12km**



TD1- SISMOLOGIE

2) Intensité et magnitude d'un séisme :

L'intensité et la magnitude d'un séisme sont deux notions différentes, bien qu'elles traduisent toutes deux la «force» d'un séisme.

L'intensité est déterminée d'après l'importance des effets ressentis et observés du séisme (dégâts causés). Elle est attribuée par référence à une échelle des intensités.

L'intensité attribuée au séisme est l'intensité la plus grande relevée dans la région (notée I₀) correspondant à l'emplacement de l'épicentre (la zone épicentrale).

Les deux échelles des intensités les plus utilisées actuellement sont :

- l'échelle internationale des intensités «**MSK**» et l'échelle européenne des intensités «**EMS**».

Elles correspondent toutes les deux à l'échelle de Mercalli modifiée.

TD1- SISMOLOGIE

2) Intensité et magnitude d'un séisme :

Chacune des deux échelles est adaptée à un type de construction en Europe (EMS) et aux USA (MSK) ; elles sont établies sur le même principe - ordre d'importance des effets ressentis - comprennent 12 degrés de I à XII par ordre d'intensité croissante, le degré I est attribué aux séismes non ressentis détectés par les sismographes ; le degré XII aux séismes les plus destructeurs.

La magnitude est, selon la définition originelle de Richter, le logarithme décimal de l'amplitude maximale en micromètres du mouvement du sol enregistré à 100km de l'épicentre, sur un sismographe étalon. C'est une mesure indirecte de l'énergie libérée au foyer sous forme d'ondes sismiques.

Les formules de calcul sont en réalité plus compliquées. En effet, différentes corrections y sont introduites pour éliminer l'effet des facteurs (distance épacentrale, profondeur du foyer, nature du sous-sol, type de sismogramme, ...).

L'échelle des magnitudes permet donc, en principe une comparaison de la « force » des séismes de manière plus satisfaisante qu'avec l'échelle des intensités.

TD1- SISMOLOGIE

2) Les répliques d'un séisme :

Une réplique est une secousse sismique qui se manifeste après le séisme principal. Elle peut être dangereuse et elle peut se produire fréquemment plus tard souvent d'une façon répétitive.



Merci de votre attention