

**TP 11a et 11b, deux séances ne seront pas de trop...  
Des transferts d'énergie qui permettent de mieux connaître notre planète.**

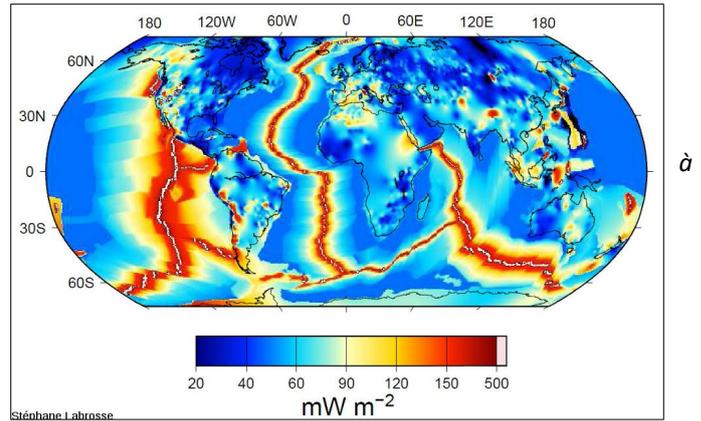
EM : lire les docs de la partie 1.

Notre planète est le théâtre d'importants transferts énergétiques, les uns thermiques et d'autres sismiques.

- La surface de la Terre reçoit 174 000 TW du Soleil. Cela revient une moyenne jour-nuit, été-hiver, pôles-équateur de  $342 \text{ W.m}^{-2}$  ou  $5,5.10^{24} \text{ J}$  par an . **Le flux géothermique dissipé par la Terre est de l'ordre de 46TW.**

La puissance électrique totale produite et consommée par l'humanité en 2010 (combustibles fossiles, nucléaires, énergies renouvelables...) pour tous ses besoins est d'environ 15 TW.

1- Carte de la répartition du flux géothermique moyen. (Rappel :  $1\text{W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$ )



- les **séismes** résultent d'une libération brutale d'énergie lors de rupture de roches soumises à des contraintes. Cette énergie se propage depuis son origine, le **foyer sismique situé sur une faille**, sous forme d'**ondes vibratoires** qui peuvent causer des dégâts aux installations humaines et être enregistrées en surface comme vous l'avez vu au collège.

2- Carte de la sismicité mondiale issue du catalogue v5.0 de l'**ISC-GEM**, pour la période 1904-2014 et pour les séismes de magnitude supérieure à 5,5.

**Partie 1 : Apprendre des variations de vitesses des ondes...(1h20)**

Les informations tirées de l'étude de la vitesse des ondes sismiques permettent de comprendre en partie la structure interne de la Terre : - Le tout permet de dresser un modèle sismique appelé PREM [Preliminary Reference Earth Model] où l'on peut distinguer les différentes couches terrestres : - croûte – manteau – noyau

**On cherche à comprendre comment l'étude de la vitesse de propagation des ondes sismiques permet de mieux connaître la structure du globe.**

**Consigne :**

**Expliquer comment l'étude de la vitesse des ondes peut permettre de décrire une partie de la structure interne de la Terre.**

**Aide à la résolution :**

- ✓ 1- Comprendre la diversité des ondes sismiques
- ✓ 2- Réaliser des manipulations permettant de mettre en évidence les variations de vitesse des ondes selon les caractéristiques du matériaux de propagation.
- ✓ 3- Utiliser les données du modèle PREM(= *Preliminary Reference Earth Model* , doc. 5) pour tenter de décrire les principales couches terrestres.

**Ressources :**

**Doc. 1 : Différentes ondes émises par un foyer sismique.**

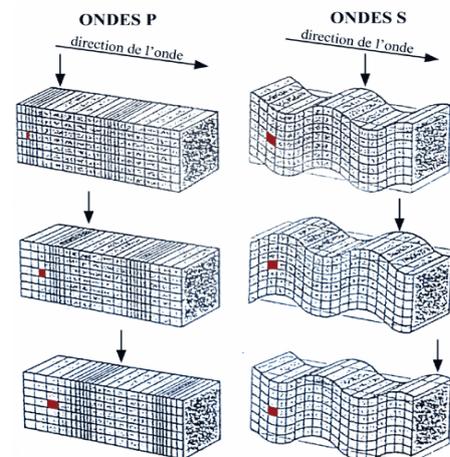
Il existe deux grands type d'ondes se propageant du fait des séismes : les ondes de volume et les ondes de surface.

**Les ondes de volume**

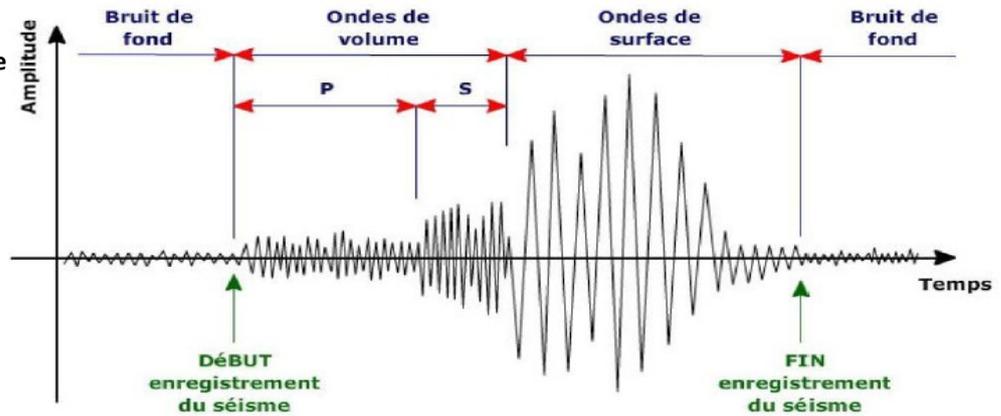
Il existe deux types d'ondes de volume : les ondes P, dites de compression, et les ondes S, dites de cisaillement. Les ondes P sont des ondes de dilatation, pour lesquelles le mouvement des particules a lieu dans la direction de propagation de l'onde. Elles sont analogues à la propagation du son dans l'air. Les ondes S correspondent à un cisaillement et à une rotation des particules lors du passage de l'onde.

**Les ondes de surfaces**

**Les ondes de surfaces sont des ondes sismiques guidées entre la surface et les interfaces peu profondes.** Elles ne pénètrent pas très profondément dans le manteau car elles sont "piégées" dans les couches de surface. Elles sont de forte amplitude et se propagent plus longtemps que les ondes de volume. Il y a deux **types d'ondes de surface, les ondes de Rayleigh et les ondes de Love.** Les ondes de surface sont dites "dispersives", c'est à dire que leur vitesse de propagation dépend de leur fréquence. Les courbes de dispersion que l'on peut obtenir sont utilisées pour étudier la structure fine de la lithosphère. Les ondes de surface sont un outil privilégié en **tomographie sismique.**



Ces ondes peuvent être enregistrées lors de leur passage grâce à un sismomètre, l'enregistrement se nomme un sismogramme :



Les ondes P se propagent plus ou moins rapidement au sein de la matière terrestre.

Le logiciel **Sismo log (+ FT SISMOLOG)** permet de visualiser des enregistrements....

**Doc.2 : Comportement des différentes ondes de volume dans les milieux de propagation**

La vitesse à laquelle voyagent les ondes P ( $V_P$ ) et S ( $V_S$ ), dépend des propriétés physiques du milieu traversé. Elles s'expriment en fonction des modules de cisaillement  $\mu$ , du coefficient de compressibilité K, et de la densité du milieu :

Le coefficient d'incompressibilité est le changement de densité dû à une augmentation de pression. Il correspond à la force par unité de surface qu'il faut exercer pour comprimer le matériel. Le module de cisaillement correspond à la force par unité de surface qu'il faut exercer pour changer la forme du matériel.

**Le module de cisaillement d'un liquide est nul → les liquides ne propagent pas les ondes S.**

$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}}$$

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

**Doc.3 : Vitesse des ondes sismiques en fonction des caractéristiques des matériaux traversés.(à compléter)**

NATURE de la roche traversée	Vitesse des ondes P(en km.s <sup>-1</sup> ) mesure de laboratoire	/	Température du matériaux traversés(en °C)	Vitesse des ondes P(en km.s <sup>-1</sup> ) mesure de laboratoire
Granite		/		
Basalte	6,5 à 7,6	/		
Péridotite	7,9 à 8,4	/		
-----	-----			
-----	-----			

**Matériel fourni :**

- Ordinateur et logiciel AUDACITY(à utiliser en stéréo) - câblage avec 2 micros à relier à l'ordinateur
- un mètre - un marteau - de longues barres de roches(dont une conservée au congélateur)
- de la pâte à modeler, barres de 30 cm à -20°C munies d'un « choqueur » à l'extrémité.(Plus elle se réchaufferont, moins elles seront solide/ alternative : fraîche ou durcit à l'air libre)) - un thermomètre sonde.

Une variation brusque de la vitesse de propagation des ondes indique le passage d'un matériaux à un autre. La variation de vitesse au sein d'un même matériaux(nature chimique constante) indique un changement de nature physique(température, viscosité...).

**Doc 4 : Nature des couches terrestres :**

La lithosphère est une structure mixte :

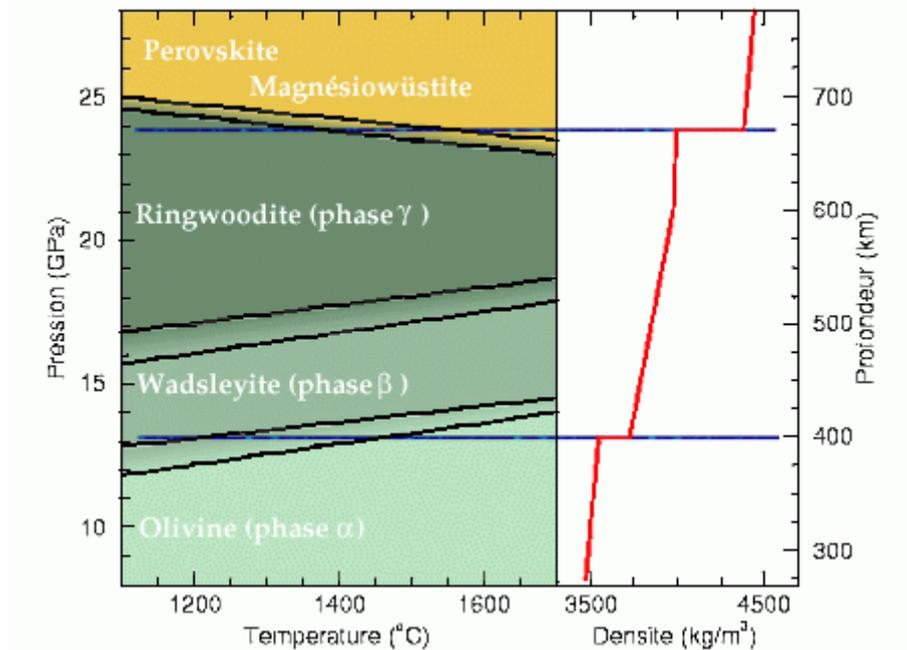
- en surface, la **croûte** constituée de nombreuses roches déjà étudiées et variable en fonction du type de lithosphère étudiée.
- en profondeur constituée de **manteau** composé est essentiellement l'**olivine**.

Constituant du manteau, l'**olivine** change de **structure cristalline** en fonction des conditions de pression et de température : ainsi, elle reste **olivine** jusqu'à environ 12GPa(env. -400km), entre 12GPa et 25GPa(env.670km) elle prend les structures de **Wadsleyite et Ringwoodite** et au-delà, celle de **Pérovskite**. **Les différentes structures cristallines ont bien évidemment des comportements différents vis à vis des ondes...**

**ATTENTION PIÈGE** : tout cela reste de l'olivine mais le type de structure cristallographique change.

**Interview de Pierre Thomas, géologue :** les indices qui permettent de déterminer la composition du noyau terrestre.

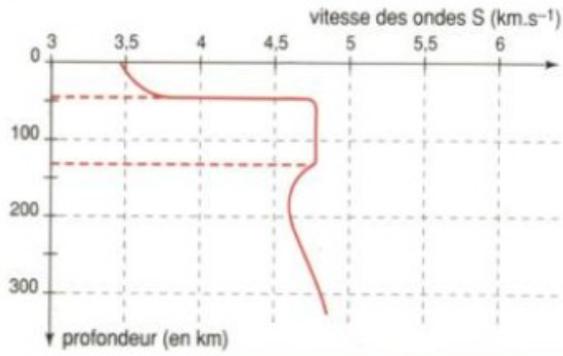
Le **moment d'inertie** de la Terre permet de contraindre le modèle de la Terre et de dire avec certitude qu'il y a quelque chose de lourd au centre de la Terre. **La sismologie** nous indique que la Terre globale = croûte (1 %) + manteau (74 %) + noyau (25 %) = silicates (olivine et pyroxène, connus plus ou moins directement, 75 %) + éléments lourds (inconnus directement, 25 %), bien séparés. **Le magnétisme** nous indique que l'intérieur de la terre doit contenir un fluide conducteur de l'électricité. Comme ce n'est pas le manteau (qui est isolant) cela ne peut être que le noyau, qui doit donc être métallique. **Les chondrites, les plus fréquentes des météorites**, contiennent justement 20 % de fer et 75 % d'olivine + pyroxène, et 5 % d'autres choses (du Ni, du S, du P...). Quel hasard. Mais là, dans les chondrites, fer et silicates sont intimement mélangés. **Si on fond et différencie une chondrite**, on obtient 25 % de fer (pur à 80 %, avec diverses impuretés dissoutes) qui se sépare par gravité des 75 % de surnageant silicaté. En fondant une chondrite, on retrouve donc la Terre aux incertitudes près.



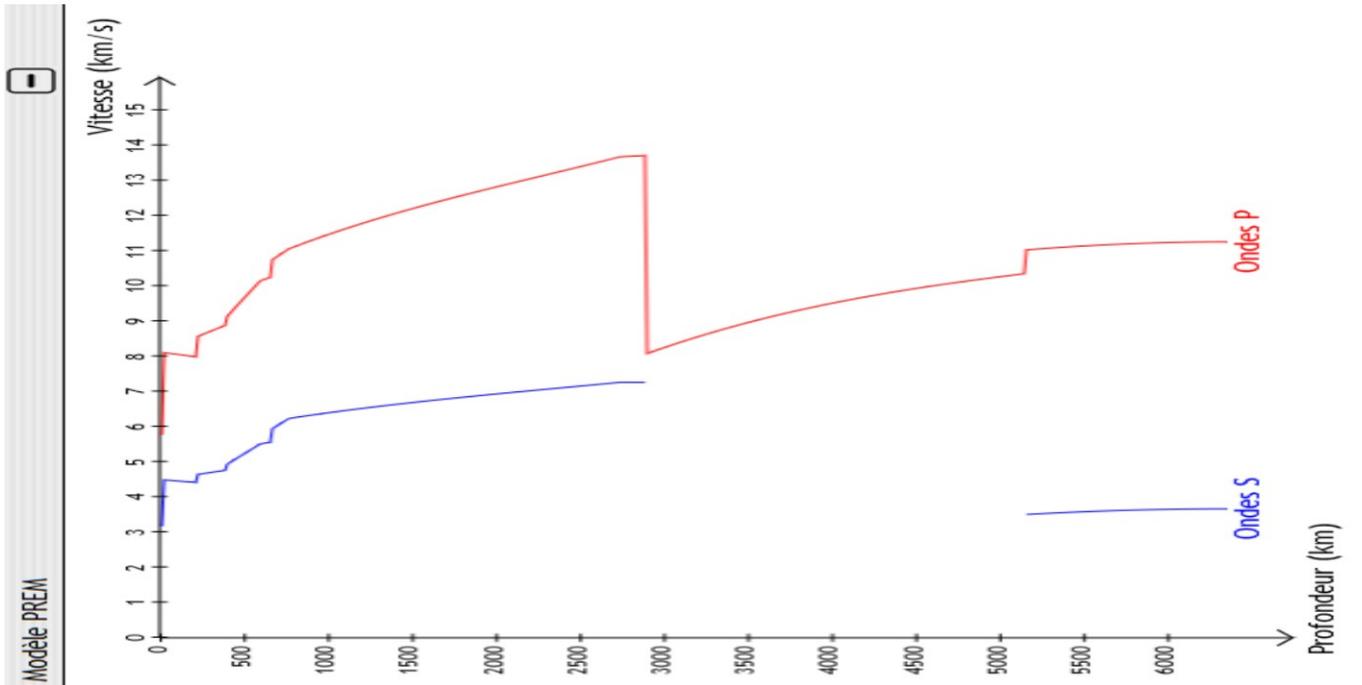
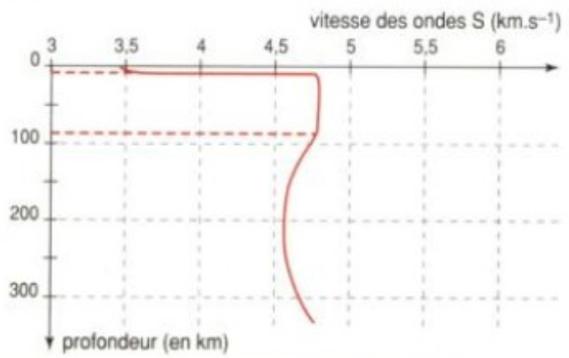
Doc 5 à sortir sur feuille pour les élèves.

Doc. 5 : Vitesses des ondes P et S sismiques en fonction de la profondeur de la Terre(modèle PREM publié en 1981) : détails pour les ondes S proches de la surface puis la totalité... Le douzième de disque est à remplir...

■ Vitesse des ondes S sous les continents (détail).



■ Vitesse des ondes S sous les océans (détail).



← zone de libre expression...

## Partie 2 : Apprendre des trajets des ondes... 40min + La seconde séance

La Terre n'ayant pas des propriétés homogènes (voir partie 1), les ondes vont s'y déplacer à des vitesses variables. Si l'onde arrive au contact de discontinuités brutales, sa trajectoire va être déviée.

On cherche à comprendre comment l'étude du trajet des ondes sismiques permet de mieux connaître la structure du globe.

### Consigne :

Compléter le modèle de structure de la Terre débuté en partie 1 grâce aux données tirées de l'étude des trajets des ondes.

### Aide à la résolution :

1- **Tracer deux courbes Hodochrones** (=courbe exprimant le temps d'arrivée des ondes en fonction du trajet parcouru par les ondes) une pour les ondes P, l'autre pour les ondes S à partir d'exemples tirés de la base [sismolog](#). (Choisir le séisme Hautes Alpes du 14/01/1992). et y ajouter les courbes de tendance (droites) pour **déterminer l'heure de survenue du séisme**.

Fichier de travail : Logiciel Sismolog, séisme Hautes Alpes, ne prendre en compte que 5 ou 6 enregistrements.....

2- **Tracer une courbe Hodochrone de la distance au foyer en fonction du delta temps P/S** à partir d'exemples tirés de la base [sismolog](#). (Choisir le séisme Hautes Alpes du 14/01/1992).

Fichier de travail : Logiciel Sismolog, utiliser le même tableau qu'à la consigne précédente.

Les géologues démontrent que la distance épacentrale exprimée en kilomètres est obtenue en multipliant la différence de temps d'arrivée en secondes entre les deux ondes par 8,1. Votre droite de tendance devrait montrer la même valeur....

### FIN DE SÉANCE !!!

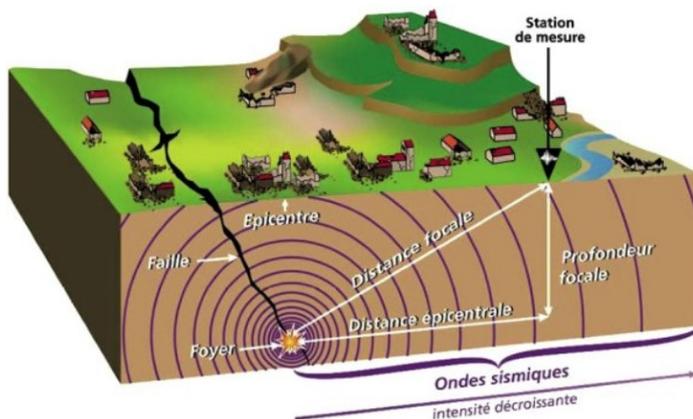
EM : 3- Comprendre la diversité des ondes sismiques et leurs attitudes au niveau des discontinuités (indispensable pour la suite)

4- Déterminer la profondeur du MOHO au niveau de quelques points continentaux grâce à la base [sismolog](#). Ceci afin d'affiner votre modèle produit dans la première partie.

Fichier de travail : **tableau donné dans le TP (Attention aux dates des séismes à étudier.)**

5- Expliquer les zones de réception des ondes présentés dans le document 7 afin d'affiner votre modèle produit dans la première partie. (Peut passer en cours, c'est complexe...)

### Ressources :



#### Doc.1 : Origine de l'onde :

Le **foyer de l'onde**, c'est à dire son point de départ, peut être :

- naturelle : au niveau d'une **faille** apparue du fait d'une contrainte (forces appliquées) dans la roche. Et, plus épisodiquement, des impacts atmosphériques.
- Anthropique : l'Homme peut générer lui même des **chocs** qui génèrent des ondes.

#### Doc 2 : Les courbes hodochromes.

On peut dresser une courbe hodochrone qui montre le temps de parcours des ondes en fonction de la distance au foyer... De plus, il existe donc un retard d'arrivée des ondes S par rapport à celle des ondes P (elles sont moins rapides...).

→ La conception de courbes hodochrones P et S permet de déterminer le moment de survenue d'un séisme à condition de connaître l'emplacement du foyer...

→ La conception de courbes hodochrones « retard S par rapport à P » permis de créer des références permettant de connaître la distance au foyer en fonction de ce temps de retard entre les ondes P et S....

C'est assez intéressant car on peut ainsi déterminer, avec l'aide d'une hodochrone P/S et trois sismogrammes concernant le même séisme, la localisation du foyer sismique.

+ [doc\\_ressources\\_sismogramme\\_hodochrones.pdf](#) pour plus de détails

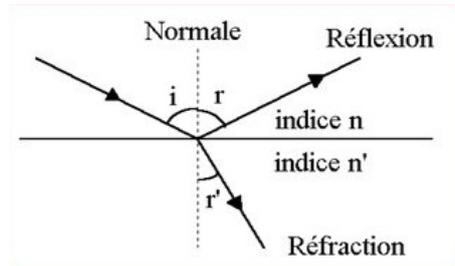
**Doc. 3 : Comportement des ondes lors des changements brutaux de milieu de propagation**

Lorsqu'une **onde** traverse un milieu homogène et arrive au niveau d'un **dioptré**(surface de rupture brutale des conditions du milieu physique ou chimique), il existe deux réactions de l'onde : la **réflexion** et la **réfraction**.

Réflexion :  $i = -r$  (1)

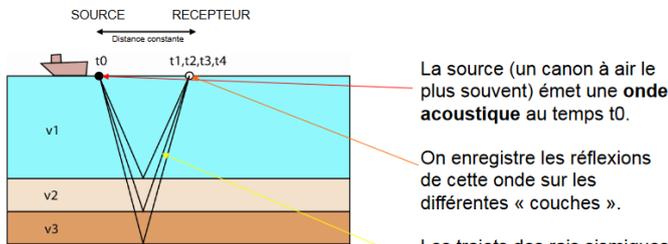
Réfraction :  $n \sin i = n' \sin r'$  (2)

Ces lois permettent de comprendre que plus  $n$ (indice de réfraction du milieu superficiel) est supérieur à  $n'$ , plus  $\sin r'$  doit être élevé et donc  $r'$  proche de  $90^\circ$ , l'onde va donc avoir tendance à suivre la limite(=dioptré) entre les deux milieux...

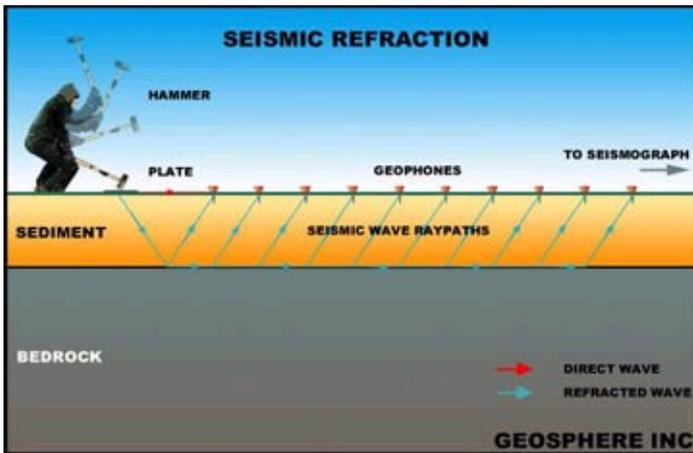


**Doc.4 : Deux modes d'études utilisés pour découvrir le sous sol terrestre :**

**La sismique réflexion :**



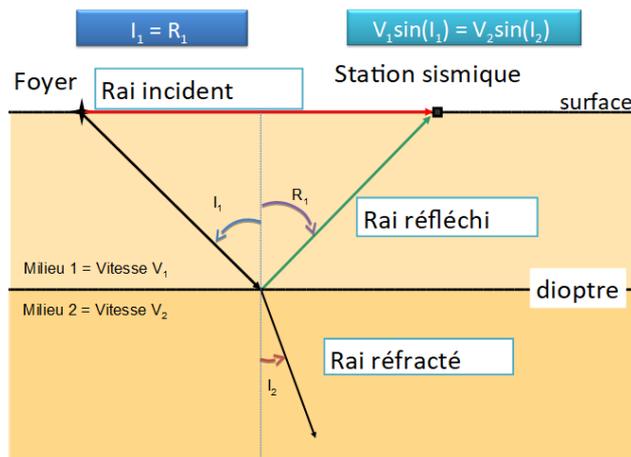
**La sismique réfraction :**



Cette technique est le plus souvent utilisée pour étudier les **surfaces assez superficielles**(sédimentaires par exemple). Les ondes qui arrivent à une de ces limites sous l'angle d'incidence correspondant à la réfraction limite(angle très ouvert) se **propagent ensuite le long de cette interface** qui leur sert de " guide d'onde " ce qui canalise leur énergie et leur permet de se propager plus loin. A cause des irrégularités de la surface limite, des **ondes remontent en permanence vers la surface**.

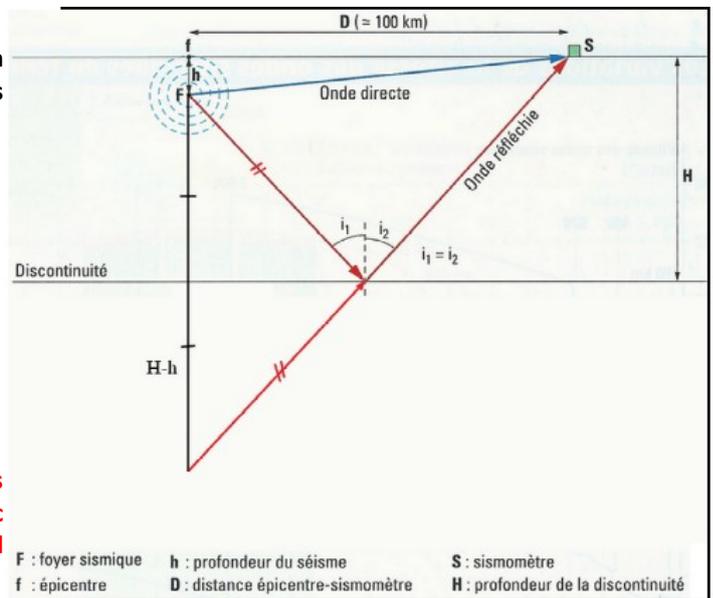
**Doc. 5 : une application de la sismique réflexion :** utiliser des ondes sismiques naturelles pour déterminer la profondeur d'une discontinuité.

Si le foyer est en surface : Étape indispensable : **trouver la formule permettant de connaître la profondeur de la discontinuité en fonction de : la vitesse connue des ondes V, la distance Foyer-Station FS.**



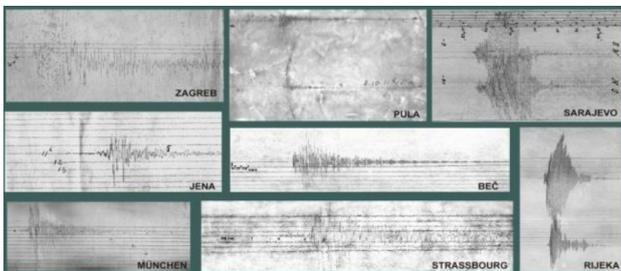
Les ondes P parviennent à la Station en ligne droite et les PmP après réflexion sur la discontinuité de Mohorovic.  
Vitesse des ondes P ou PmP dans la croûte :  $6,25 \text{ km.s}^{-1}$  en moyenne.

Et si le foyer est en profondeur :(le plus fréquent pour un séisme naturel!)... Tentez de trouver la formule... C'est plus complexe...->



Selon votre aisance avec les outils mathématiques, soit vous trouvez la formule avec un hypocentre(foyer) confondu avec l'épicentre(niveau +), soit vous vous attaquez au cas plus réel d'un foyer souterrain.

**Doc 6 : Le 8 octobre 1909, un séisme se produit au Sud de Zagreb** (dans l'actuelle Croatie). Andrija Mohorovicic, géophysicien croate, observe les sismogrammes fournis par les instruments. Le tremblement de terre a été enregistré par de nombreuses stations sismologiques européennes. Le sismographe le plus proche était à Zagreb. Mohorovicic voulait étudier le tremblement de terre plus en détail, donc il a demandé à ses collègues de lui envoyer des copies des sismogrammes de leurs stations ou leurs lectures des temps d'arrivée des ondes.



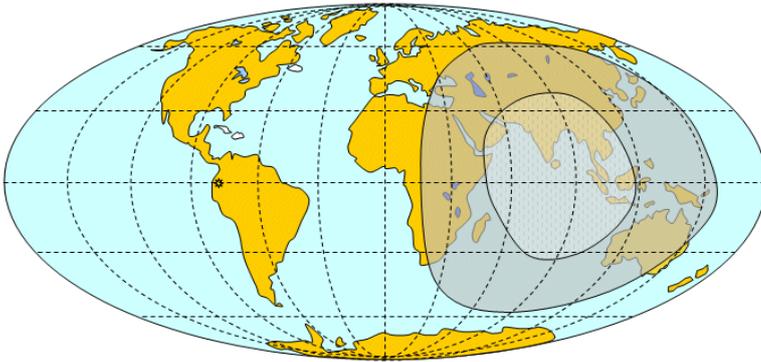
← Quelques enregistrements du séisme de Zagreb

Mohorovicic recueillit les données de bonne qualité, en particulier pour les distances jusqu'à 800 km du foyer. Cette étude lui permet d'évaluer la profondeur d'une discontinuité majeure : la limite croûte/manteau.

**Doc 6 : Tableau de référence à remplir : (chaque groupe n'en fait que deux ou trois..)-> positionnez ensuite les points sur la carte fournie.**

Séisme étudié (date et moment)	Station sismologique	déclinaison Epicentre/ Station	Distance épacentrale (en km)	Profondeur du foyer sismique (en km)	Moment d'arrivée des ondes P	temps arrivée P (en sec)	$\delta t$ (en sec) P-PmP	temps arrivée P (en sec)	Profondeur du Moho (en km)	Localisation du point de segment station-Epicentre
<b>Savoie</b> (19/01/1991) 03h12min04sec	OG02			11	03:12:15,50				2,96	
<b>Savoie</b> (19/01/1991)	OG03			11	03:12:16,50				3,1	
<b>Isère</b> (7/2/1991) 04:48:06,599	OG21			11	04:48:21,50				3,34	
<b>Alpes Haute Provence</b> (23/04/1991) 05:52:38,400	RSL (Roselend)			10	05:52:55,39				3,32	
<b>Isère</b> (09/03/1992) 01:54:34,4	OG04			6	01:54:51,00				3,599	
<b>Isère</b> (09/03/1992)	SURF			6	01:54:53,00				3,91	

**Doc 7 : Observation et interprétation du début du XX<sup>e</sup> siècle.** L'épicentre se trouve à l'antipode du centre de la zone « absence d'ondes S. »



-  absence d'ondes P et d'ondes S
-  absence d'ondes S
-  épicentre



L'utilisation de *sismolog* option *modèle de terre* vous aidera :  
- Piste : décrivez en expliquant le comportement des ondes pour chacun des modèles proposés :

Le modèle : « Terre homogène »....

### Le gradient géothermique terrestre

On cherche d'abord à construire un graphique de la température des roches en fonction de la profondeur de la surface au centre de la Terre. Ce graphique représente le gradient géothermique et s'oriente avec un axe profondeur vers le bas.

On cherche ensuite à comprendre quels types de transferts d'énergie thermique ont lieu dans les différentes couches terrestres.

**Doc 1 : Le gradient géothermique** est le rapport entre la différence de température mesurée entre deux points et leur différence de profondeur.

La mesure du gradient géothermique est réalisée grâce au suivi de la température le long de forages. Dans la croûte continentale, le gradient géothermique moyen est d'environ  $30^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ . Le forage le plus profond est d'environ 13 km. Il n'existe donc pas de mesure directe après 13 km de profondeur. Malgré cela, les scientifiques sont relativement certains des températures en deux points : à 670 km de profondeur (limite entre le manteau sup et inférieur) (1 900 K), et à 5 150 km de profondeur (limite noyau-graine) (5 000 K).

La connaissance des roches composant le manteau et le noyau permet de définir **leur gradient thermique** moyen ( $0,3 \text{ K.km}^{-1}$  pour le manteau et  $0,55 \text{ K.km}^{-1}$  pour le noyau). Le gradient n'est très fort (plusieurs dizaines de degrés par km) que dans la lithosphère et au niveau de l'interface manteau/noyau. [Tableur -> pentes](#)

Le manteau terrestre est totalement solide. Il doit donc régner des températures qui permettent aux roches mantelliques soumises à des pressions de l'ordre de 130 GPa de ne pas fondre. Dans ces conditions, la température du manteau ne peut pas dépasser 3 000 K à 2900 km.

### **Doc 2 : Les modes de transfert d'énergie thermique :**

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur est un mode d'échange d'énergie interne ou entre deux systèmes. On distingue trois types de transfert thermique, qui peuvent coexister :

- la **conduction**, due à la diffusion progressive de l'agitation thermique dans la matière de proche en proche ; ce mode de transfert est lent.
- la **convection**, transfert thermique qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière ; ce mode de transfert est rapide.
- le **rayonnement**, qui correspond à la propagation de photons, ce mode de transfert est rapide mais nécessite un milieu perméable au déplacement des photons.

**Représenter graphiquement le gradient géothermique terrestre grâce aux données du texte.**

**→ permettra en classe de comprendre les deux types de transferts thermiques en fonction des gradients au sein de chaque couche et des conclusions sur la propagation des ondes S.**

*Exercice d'entraînement facultatif :*

**On cherche à mettre en évidence et à calculer la profondeur de la discontinuité de Mohorovicic sous la croûte continentale. Afin de réaliser ce travail nous allons étudier un sismogramme réalisé à partir des ondes issues d'un séisme qui a eu lieu le 23/04/1991 à 135,8 km de Roselend.**

NB : La vitesse moyenne des ondes P dans la croûte sous les Alpes est de 6,25 km.s<sup>-1</sup> .

Profondeur focale  $h = 10$  km

Distance épacentrale  $\Delta = 135,8$  km

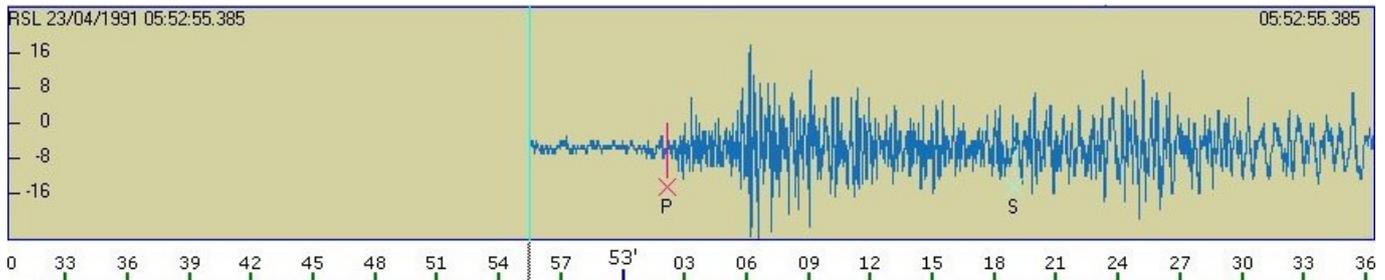
Arrivée des ondes P à 5 h 53 min 02,005 s

Arrivée des ondes PMP à 5 h 53 min 05,325 s

Arrivée des ondes S à 5 h 53 min 18,805 s

Les ondes PMP sont les ondes P ayant été réfléchies sur le Moho. La distance parcourue par les ondes PMP est plus long (foyer du séisme - Moho – surface (station d'enregistrement)) que la distance parcouru par les ondes P directes (foyer du séisme – surface (station d'enregistrement)). A même vitesse, le temps de propagation des ondes PMP est plus important

Vitesse = distance / temps, la vitesse des ondes sismiques étant connue et constante dans un milieu homogène (la croûte continentale), on peut en déduire que  $\delta t = (dPMP - dP) / V$



A vous de jouer... je vous conseille de tracer la figure

Une aide en pièce jointe.