La sismologie est un outil important pour connaître l'intérieur du globe terrestre. Les élèves découvriront quelques-unes de ses propriétés.

QUESTIONS DE RECHERCHE

- **Comment cartographier les plaques tectoniques en étudiant la répartition mondiale des séismes ?**
- **Comment, à partir de l'analyse de sismogrammes, imaginer l'intérieur de la Terre ?**

ACTIVITÉS PROPOSÉES

Sismo Sismicité 58

Cartographier, à l'aide d'un logiciel tableur, la répartition des épicentres des séismes à l'échelle régionale et mondiale. Confronter le résultat avec la théorie de la tectonique des plaques.

Sismo Benioff 60

Avec un tableur, réaliser la coupe transversale d'une zone de subduction en observant la répartition des foyers en profondeur. En comparant différentes zones de subduction, mettre en relation l'angle de subduction et "l'âge" de la plaque.

Sismo Moho 62

Évaluer l'épaisseur de la croûte terrestre dans une région donnée, à partir de l'analyse des sismogrammes et de l'identification des ondes réfléchies PMP.

Sismo Rais 64

Modéliser la zone d'ombre du globe terrestre. L'application des lois de Snell-Descartes avec la complicité d'un aquarium sphérique.

Sismo Noyau 66

Analyser le parcours des rais sismiques à l'intérieur du globe terrestre en utilisant des dioptres optiques en plexiglas. Modéliser le noyau terrestre et mettre en évidence la zone d'ombre.

SISMO SISMICITÉ

THÈME
Terre.

OBJECTIF
Cartographier la répartition des séismes dans le monde.

MOTS-CLÉS
Aléa sismique,
frontières de plaques.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences,
Mathématiques.

DÉROULEMENT
Les séismes sont fréquents dans certaines zones du globe, alors que d'autres zones ne sont pas ou rarement soumises à ce risque. On se propose de localiser avec précision les régions du globe exposées à l'aléa sismique.

1RE ÉTAPE

Les élèves vont télécharger un catalogue de sismicité annuelle enregistrée par les centres de recherche (➤ **document 1**).
Ils visualisent le catalogue à l'aide d'un logiciel tableur.
Dans un premier temps on vérifie que les élèves maîtrisent la lecture du catalogue. Chaque séisme étant défini notamment par la longitude et la latitude de son épicentre, la profondeur du foyer, la magnitude du séisme, on pourra demander de repérer quelques séismes caractéristiques de l'année, un séisme de forte magnitude, un séisme destructeur, un séisme régional particulier… (➤ **document 2**).

2E ÉTAPE

Une fois le catalogue maîtrisé, on va construire une carte sur laquelle chaque épicentre sera représenté par un point.
Ce point est défini par ses coordonnées géographiques (latitude et longitude).
Il suffit de sélectionner les colonnes latitude et longitude (attention, sélectionner longitude en abscisse et latitude en ordonnée) et demander à l'assistant graphique du tableur, un graphique en **"Nuage de points"** (équivalent à une carte avec longitude en abscisse et latitude en ordonnée).
Les épicentres se répartissent selon des zones étroites qui représentent l'aléa sismique à l'échelle mondiale. La zone grisée sur laquelle apparaissent les points symbolise la lithosphère cassante sans référence au découpage "continents-océans" (➤ **document 2**).

3E ÉTAPE

Il suffit alors de reporter les zones d'aléa sismique sur un planisphère. Pour cela, on se guidera avec les coordonnées géographiques (latitude et longitude) pour superposer les épicentres et les zones géographiques. On voit apparaître les zones étroites sismiques contrastant avec de vastes zones asismiques. On invitera alors les élèves à découper la surface terrestre en plaques en se référant aux zones sismiques (➤ **document 3**).
On finira par une confrontation du travail élève avec une carte des plaques et/ou des fonds océaniques pour réaliser une conclusion critique sur l'activité.

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

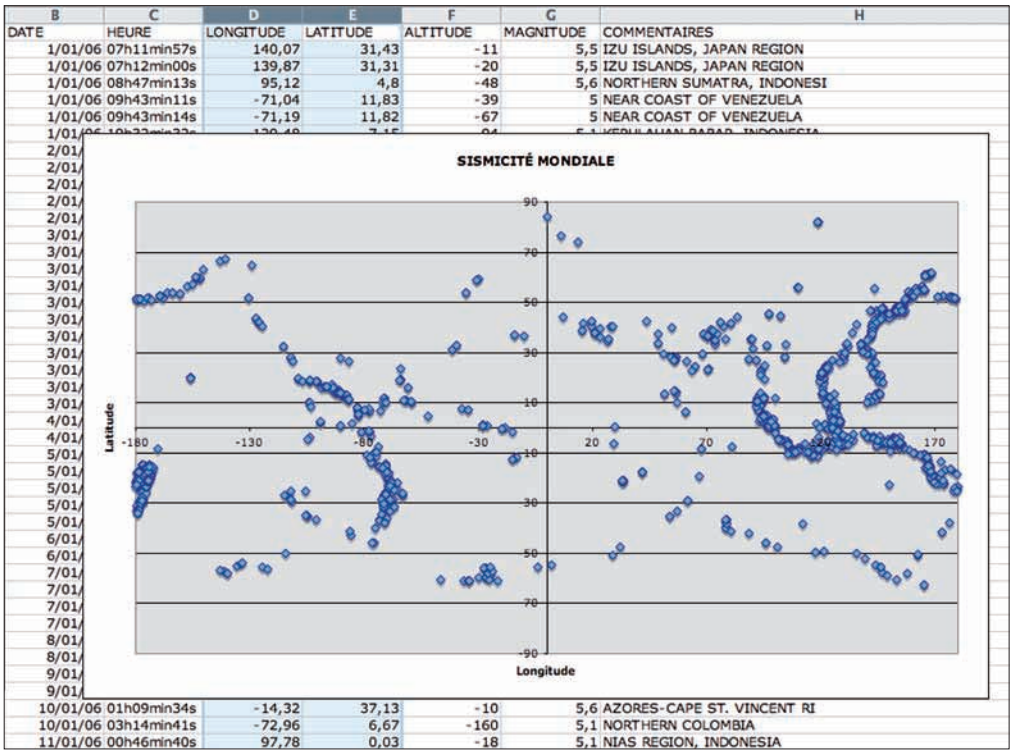
- Superposer une image d'un planisphère au graphique de la sismicité pour mettre en relation aléa sismique et références géographiques mondiales.
- Cartographier l'aléa sismique sur une région (sélectionner les séismes en fonction de critères géographiques à partir de la base de données en ligne).
- Coupler l'activité avec une étude du mouvement des plaques détecté par balises GPS en utilisant la cartothèque du site *Sismos à l'École* en ligne.

➤ DOCUMENT 1 Matériel et documentation

Télécharger un catalogue de sismicité annuelle depuis le site du *Sismos à l'École* (rubrique "banque de données sismiques" puis "sismicité" puis "catalogues"). Les catalogues sont fournis dans un format "tableur". On peut aussi obtenir un tel catalogue en effectuant une requête sur la base de données, rubrique "sismicité" puis "recherche selon critères" (on peut ainsi travailler sur une zone précise du globe).

➤ DOCUMENT 2 Cartographie des épicentres à l'échelle mondiale

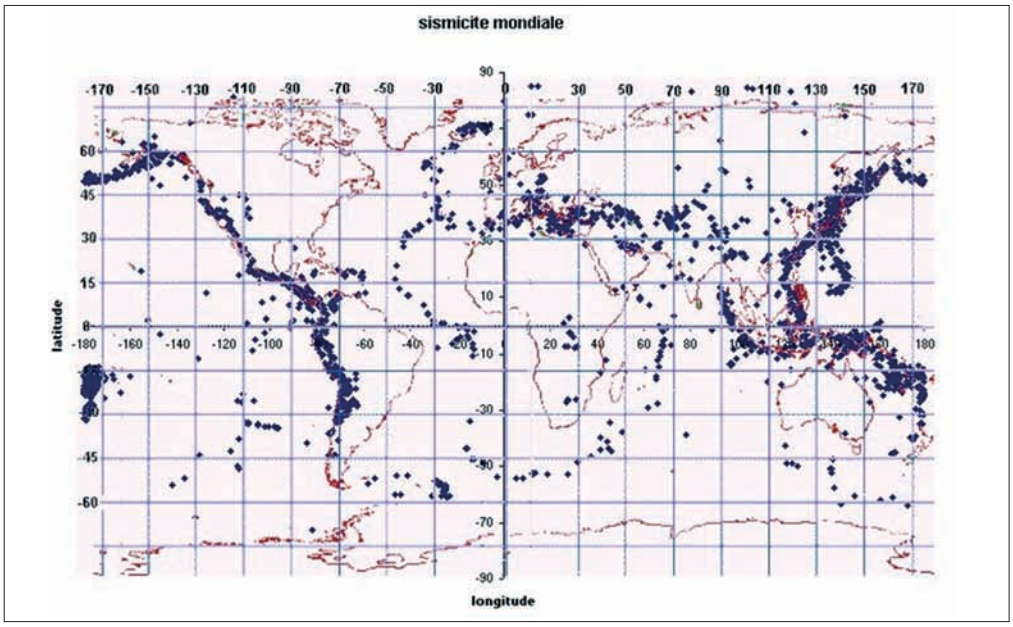
Sélectionner les colonnes longitude (axe des X) et latitude (axe des Y), puis insérer un graphique en nuage de points. S'affichent alors les épicentres sous forme de points en fonction de leur longitude et de leur latitude.



B	C	D	E	F	G	H
DATE	HEURE	LONGITUDE	LATITUDE	ALTITUDE	MAGNITUDE	COMMENTAIRES
1/01/06	07h11min57s	140,07	31,43	-11	5,5	IZU ISLANDS, JAPAN REGION
1/01/06	07h12min00s	139,87	31,31	-20	5,5	IZU ISLANDS, JAPAN REGION
1/01/06	08h47min13s	95,12	4,8	-48	5,6	NORTHERN SUMATRA, INDONESI
1/01/06	09h43min11s	-71,04	11,83	-39	5	NEAR COAST OF VENEZUELA
1/01/06	09h43min14s	-71,19	11,82	-67	5	NEAR COAST OF VENEZUELA
10/01/06	01h09min34s	-14,32	37,13	-10	5,6	AZORES-CAPE ST. VINCENT RI
10/01/06	03h14min41s	-72,96	6,67	-160	5,1	NORTHERN COLOMBIA
11/01/06	00h46min40s	97,78	0,03	-18	5,1	NIAS REGION, INDONESIA

➤ DOCUMENT 3 Cartographie des épicentres à l'échelle mondiale

On obtient un diagramme de points qu'il faut mettre en relation avec un planisphère où sont tracés des repères géographiques en se guidant avec les axes du graphique. Certains tableurs permettent de superposer à ce diagramme une image (➤ http://o3e.geoazur.net > image d'un planisphère à fond transparent).



SISMO BENIOFF

THÈME
Terre.

OBJECTIF
Cartographier la subduction d'une plaque lithosphérique au niveau d'une frontière de convergence.

MOTS-CLÉS
Subduction, densité de la lithosphère.

CHAMP DISCIPLINAIRE
Géosciences.

DÉROULEMENT
Le pourtour de l'océan Pacifique, qualifié souvent de "ceinture de feu", ne se distingue pas uniquement par ses volcans mais aussi par une sismicité très caractéristique. En effet, tout autour de cet océan, on est en présence d'une marge active où l'on enregistre très régulièrement des séismes, certains sont d'ailleurs destructeurs et meurtriers. Cette activité va nous permettre de cartographier, à partir de bases de données des centres de recherche en sismologie, l'activité sismique de ces marges actives et de mettre en relation cette sismicité avec la disparition de la lithosphère océanique.

1RE ÉTAPE

Les élèves téléchargent un catalogue annuel des séismes et vont trier les événements sismiques d'une année en fonction de la profondeur des foyers (➤ **document 1**). Ils vérifient alors que la grande majorité des séismes profonds peuvent être localisés notamment sur le pourtour de l'océan Pacifique. On les invite à repérer la zone de la fosse du Chili-Pérou et la fosse des îles Fidji de part et d'autre de l'océan Pacifique. Ils peuvent ainsi rapidement reporter, grâce au catalogue, quelques événements sismiques sur une carte du Pacifique.
Les élèves doivent alors réfléchir sur le problème suivant : montrer en quoi les profondeurs de ces séismes sont contradictoires avec leurs acquis sur l'épaisseur de la lithosphère (de l'ordre de 100 km).

2E ÉTAPE

On va proposer aux élèves, en vue de vérifier le modèle de la subduction évoquée précédemment, de cartographier sur une coupe les foyers des séismes identifiés sur le pourtour du Pacifique.
Les séismes identifiés précédemment se rencontrent dans l'arrière-pays des fosses océaniques qui caractérisent les marges continentales actives. Les élèves choisissent une marge active et identifient avec soin ses références géographiques (latitude, longitude).
On veillera à délimiter une zone étroite englobant la fosse et son arrière-pays.
Il ne reste plus qu'à télécharger les données de la zone géographique choisie et de visualiser les données à l'aide d'un tableur. Le logiciel permettra aux élèves de réaliser un graphique de la profondeur des foyers en fonction de la longitude.
Le plan de Benioff-Wadati de la plaque étudiée apparaît à l'écran et peut être imprimé (➤ **document 2**).

3E ÉTAPE

Les élèves confrontent leurs résultats et constatent facilement que le plan d'inclinaison des plaques diffère selon les zones géographiques. On montrera, carte des fonds océaniques à l'appui, que l'inclinaison de la plaque subduite peut être mise en relation avec son âge, donc avec sa densité. Cela est nettement visible entre la plaque Pacifique aux îles Fidji et la plaque Nazca au niveau du Chili.

On aura pu montrer que la répartition des foyers et la topographie des marges actives peuvent être interprétées comme la conséquence de l'enfoncement progressif (subduction) de la lithosphère océanique dans les zones profondes du globe.

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

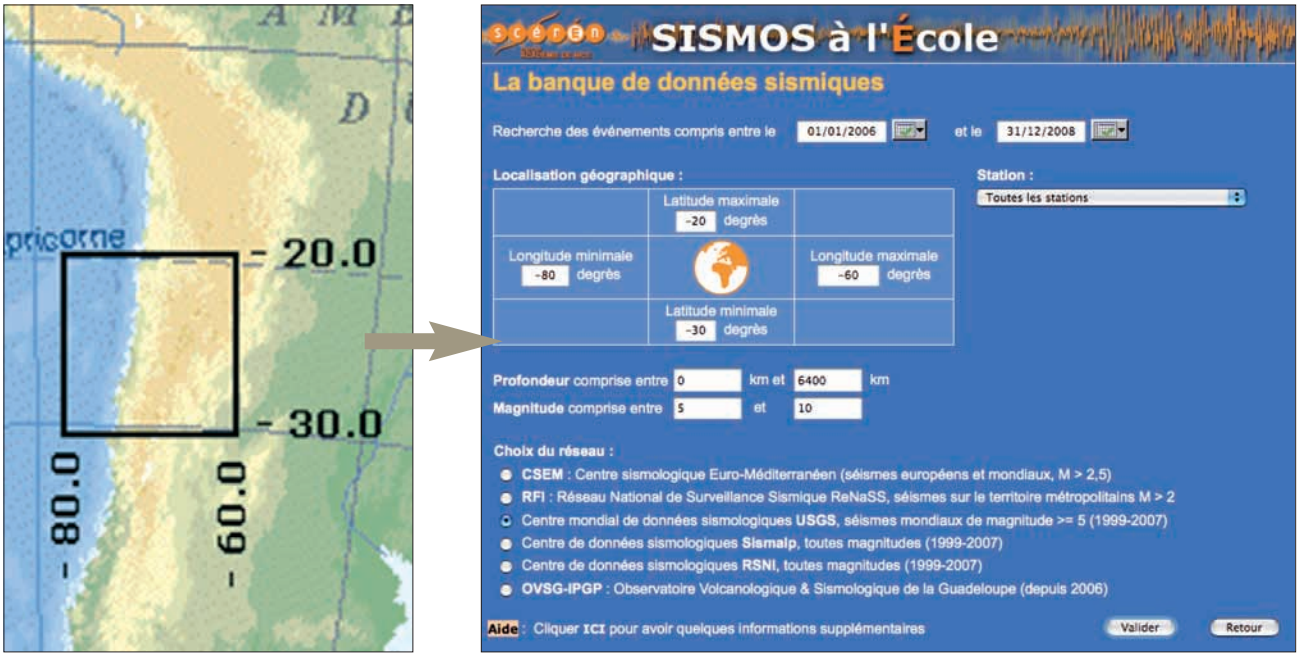
- Visualiser d'autres zones de subduction (Antilles, Sicile, etc.).
- Coupler l'activité avec une étude du mouvement détecté par balises GPS en utilisant *Educarte* sur *Sismos à l'École*.

➤ DOCUMENT 1 Récupérer un catalogue de sismicité

Pour télécharger un catalogue de sismicité, se rendre sur le site internet http://www.edusismo.org à la rubrique > Événements sismiques > Sismicité enregistrée par les observatoires et choisir une période à l'aide du calendrier.

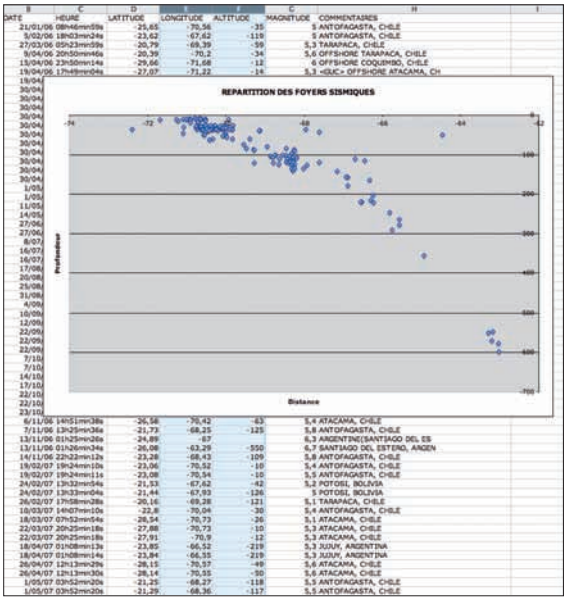
➤ DOCUMENT 2 Réaliser une requête de sismicité

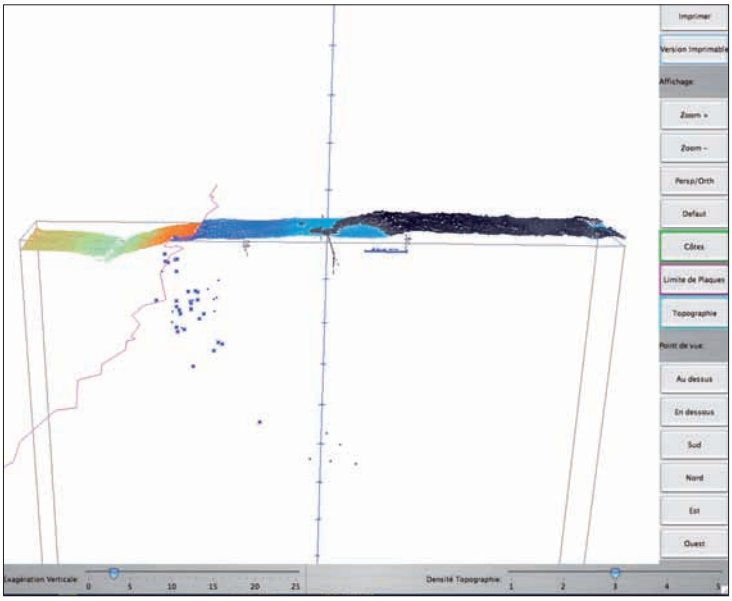
Pour sélectionner les données d'une zone géographique précise (par exemple, la zone de la fosse du Chili), renseigner les rubriques géographiques de la zone du Chili sur le moteur de recherche disponible sur le site en ligne > Événements sismiques > Sismicité enregistrée par les observatoires > Rechercher par critères géographiques.



Enregistrer le résultat de la recherche sur le disque dur de l'ordinateur sous la forme d'un fichier texte de données (.csv)

Ouvrir ce fichier exporté avec un tableur et réaliser alors, à l'aide de l'assistant graphique, une coupe montrant la localisation des foyers en fonction de la profondeur.





On peut aussi visualiser les foyers sismiques directement à partir du module de cartographie Educarte à l'aide du bloc diagramme 3D.

SISMO MOHO

THÈME
Terre.

OBJECTIF
Évaluer l'épaisseur de la croûte terrestre dans une région à partir de données sismiques.

MOTS-CLÉS
Moho, discontinuité.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Mathématiques.

DÉROULEMENT
Le but de cette activité est de trouver à quelle profondeur se trouve la discontinuité du Moho dans la région azuréenne. Cela revient à vouloir évaluer l'épaisseur de la croûte terrestre à partir de données sismiques enregistrées dans la région de Nice, région s'étendant du littoral marin aux hautes cimes enneigées du Mercantour.

1re ÉTAPE

Faire prendre conscience aux élèves de l'existence d'ondes P réfléchies sur le Moho et enregistrées par une station sismique (ondes PMP).
Préciser le contexte géologique à l'aide d'une documentation appropriée (➤ **document 1**). Les élèves sont amenés, à partir de la documentation, à travailler sur des séismes locaux et à choisir dans la base de données un séisme propice (ex : séisme du 01/11/1999 à Nice).

2e ÉTAPE

Les élèves recherchent dans la base de données les sismogrammes relatifs au séisme choisi pour les différentes stations du réseau.
Pour chaque station, ils vont repérer et pointer les ondes Pg (ondes directes), et les ondes PMP (réfléchies sur le Moho).
Ils vont en déduire le délai (Tpmp - Tp) puis le Moho H en exploitant la documentation proposée (➤ **document 2**).

3e ÉTAPE

Les élèves sont invités à comparer les résultats obtenus avec les données des centres de recherche.
Après discussion critique des résultats, ils sont amenés à réfléchir sur la signification de l'épaississement crustal constaté du littoral azuréen vers les Alpes. Le lien se fait tout naturellement avec le modèle de la structure du globe.

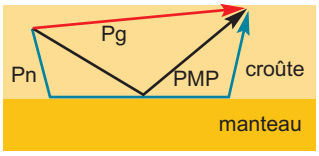
NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

- Coupler au préalable l'activité avec une recherche de l'épicentre à l'aide du délai Ts-Tp.
- Rechercher d'autres séismes se prêtant à une telle étude afin d'élargir la connaissance du Moho.

➤ DOCUMENT 1 Contexte géologique des trajectoires des ondes P

Parmi les ondes P, on distingue plusieurs sortes d'ondes, chacune se propageant jusqu'aux stations selon des parcours différents comme le montre le diagramme ci-dessous :

- les ondes Pg, directes avec une vitesse de l'ordre de 6 km/s,
- les ondes PMP, réfléchies sur le Moho (vitesse = 6 km/s),
- les ondes Pn, réfractées au tracé plus complexe.

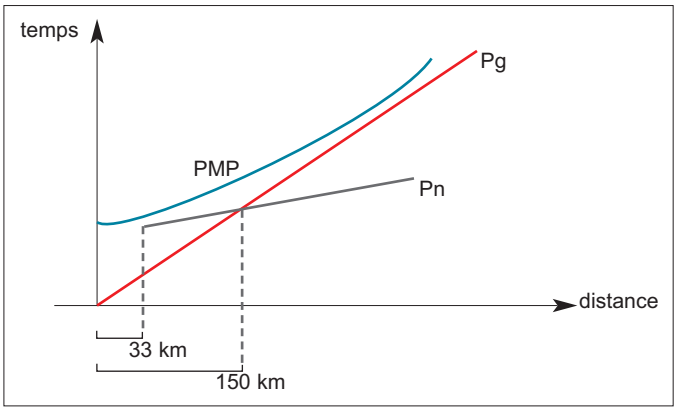


Le délai entre le temps d'arrivée des ondes PMP et des ondes Pg permet d'évaluer l'épaisseur de la croûte terrestre :

$$H = \frac{1}{2}\left[h + \sqrt{\left(V.\delta t + \sqrt{h^2 + \Delta^2}\right)^2 - \Delta^2}\right]$$

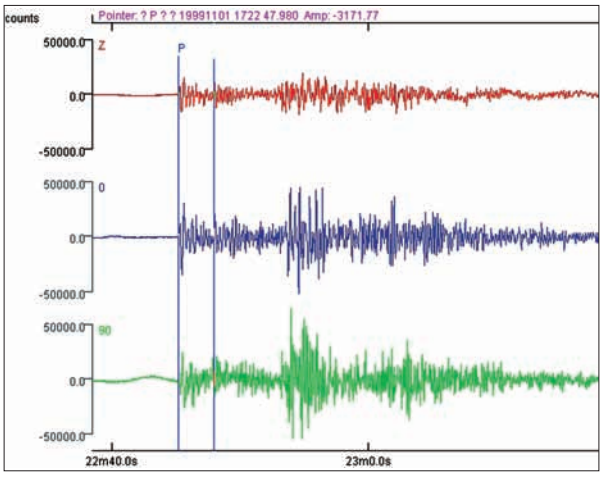
H = épaisseur croûte terrestre
h = profondeur du foyer
V = vitesse des ondes P dans la croûte
Δ = distance épicentrale
δ t = Tpmp - Tp

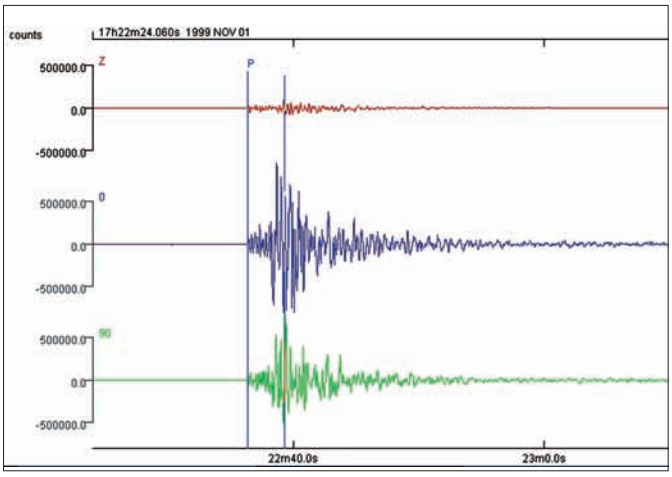
Cependant, il peut être difficile de distinguer les ondes PMP des ondes Pg suivant la distance épicentrale, comme le montre le graphique ci-contre, surtout si la station sismique est éloignée de l'épicentre de plus de 100 km.



➤ DOCUMENT 2 Exemples de pointés sur les sismogrammes

Ouvrir la base de données sismiques du site internet > Banque de données sismiques > Sismogrammes > Année 1999 > 01-11-99 Nice-Est (06) (séisme de Peille du 1er novembre 1999). Il faut connaître les coordonnées de l'épicentre de ce séisme ainsi que les distances qui le séparent des différentes stations. On peut le découvrir dans la base de données ou bien le faire calculer par les délais Ts-Tp.





Station de St-Étienne-de-Tinée (SETF).
Délai Tpmp – Tp = 3 s
Moho déduit : 27 km

Les pointés réalisés sur trois stations du réseau (Menton, St-Étienne-de-Tinée et St-Dalmas-de-Tende) aboutissent à la carte ci-contre.

SISMO RAIS

THÈME
Terre.

OBJECTIFS
Modéliser le trajet des ondes sismiques dans la Terre.
Expliquer la zone d'ombre.

MOTS-CLÉS
Rai sismique, réfraction, onde sismique, zone d'ombre.

CHAMP DISCIPLINAIRE
Physique.

DÉROULEMENT
Les ondes sismiques traversent la Terre avec des célérités dépendant de la densité et des propriétés élastiques des roches.
Ainsi, de la même manière qu'un rayon lumineux est dévié quand il pénètre dans un milieu aux propriétés physiques différentes de celui qu'il vient de traverser (c'est le phénomène de réfraction), les ondes sismiques sont déviées quand elles passent d'un milieu à un autre.
L'expérience proposée ici permet d'observer le trajet de rayons lumineux à travers différents milieux et de modéliser le trajet des ondes sismiques à l'intérieur de la Terre.

1RE ÉTAPE

Faire prendre conscience aux élèves de l'existence de la zone d'ombre à la surface de la Terre, à travers des articles scientifiques ou des documents iconographiques.
Éventuellement réaliser l'expérience décrite dans la fiche Sismo Noyau.

2E ÉTAPE

Pour cette simulation, nous allons travailler en 2 dimensions.
Le noyau sera représenté par un disque transparent en plexiglas (n = 1.4, rayon = 5 cm, épaisseur = 15 mm), l'onde sismique par un rayon laser. Le tout sera disposé sur un disque en papier gradué (avec 2 graduations différentes, une à r = 5 cm, l'autre à r = 10 cm) afin de mesurer les angles β et ϕ de la figure ci-contre.

3E ÉTAPE

On considère que la source de l'onde sismique est le point S où le rayon laser entre sur le disque papier qui représente la Terre.
On fait varier l'angle d'incidence du rayon laser sur le noyau (disque de plexiglas) et on mesure la distance angulaire du rayon émergent à la sortie du noyau et à la surface de la Terre.
Ainsi, on reconstitue et on trace le parcours du rayon lumineux à l'intérieur du dispositif.
On peut alors mesurer la valeur de l'angle d'incidence i et en déduire la valeur de n, puis la célérité dans le noyau supposée inconnue.

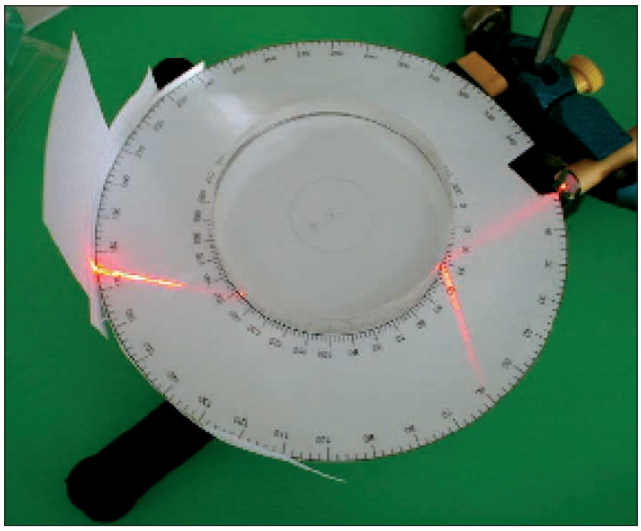
NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS
Modéliser la formation de la zone d'ombre (➤ sismo noyau).

Matériel pour réaliser l'activité

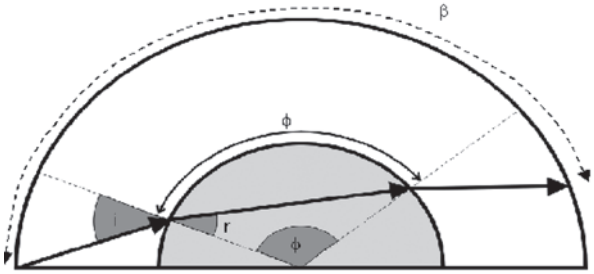
Il est important de respecter approximativement les proportions terrestres. Dans notre modèle, voici les paramètres utilisés :

Dans la Terre :
R(Terre) / R(Noyau) = 6371 / 3480 = 1.8
V_p(manteau) / V_p(Noyau) = 11 / 9 = 1.22

Dans notre modèle :
R(paroi ext) / R(plexi) = 10 / 5 = 2
V(air) / V(plexi) = 1.4 = n $_{(plexi)}$



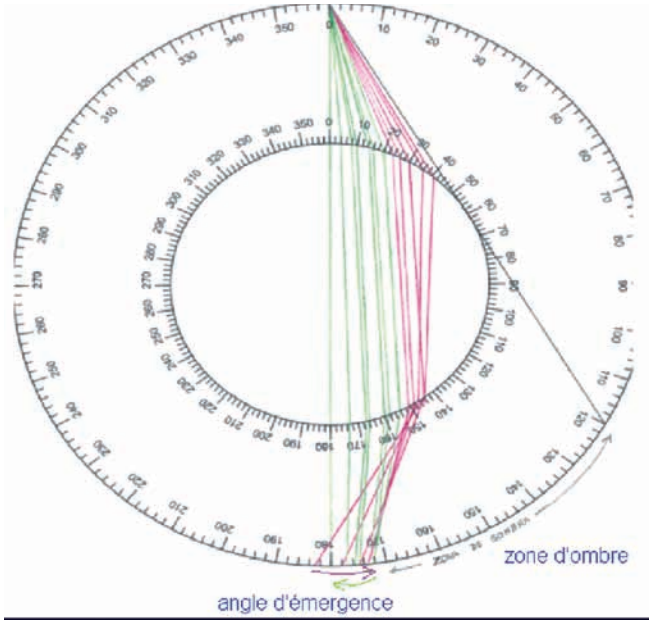
La distance angulaire du rayon laser sur le noyau et la distance émergente à la surface de la Terre peuvent être mesurées. En variant l'angle d'incidence (de 0 à 40°), on reconstruit le trajet des rayons (rais) à travers le dispositif.



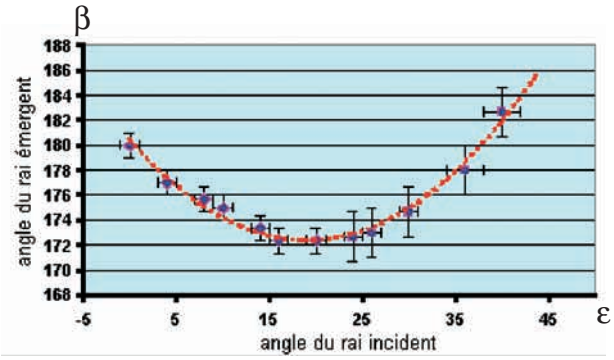
i : angle d'incidence du rayon
β : angle d'émergence du rayon

La valeur de l'indice de réfraction n du plexiglas est donnée par la relation :
n = sin (i) / sin (r)
où sin (r) = sin [(π - β) / 2] [1]
(ϕ est lu directement sur l'échelle du disque de papier) ; i est mesuré au rapporteur sur le trajet reconstitué par construction.
Une fois connu n, on peut calculer v $_{(plexi)}$[2].
Il faudra faire le calcul sur plusieurs trajets lumineux pour minimiser les incertitudes de mesure.

En traçant le trajet des rayons (rais) pour différentes incidences, on obtient la figure suivante :



On observe alors plusieurs phénomènes :
- la formation de la zone d'ombre à la surface du disque externe (comprise entre 120° et 172°)[3],
- le rebroussement des rayons pour des incidences comprises entre 20° et 45° (➤ ci-dessous).



1/ Dans le triangle OAB, la somme des 3 angles vaut 180°, donc β = 2π - 2r
2/ En transposant à la Terre : si on connaît $v_{(manteau)}$ on peut alors en déduire $v_{(noyau)}$ car n = $v_{(manteau)}$/ $v_{(noyau)}$
3/ Il y aurait une zone d'ombre symétrique au-delà de 180°. Par raison de symétrie, la zone d'ombre sera annulaire pour le cas de la Terre à 3 dimensions.

SISMO NOYAU

THÈME
Terre.

OBJECTIFS
Modéliser la zone d'ombre sur le globe terrestre.
Appliquer les lois de Snell-Descartes.
Montrer que l'existence d'une zone d'ombre implique un ralentissement des ondes sismiques dans le noyau de la Terre.

MOTS-CLÉS
Zone d'ombre, réfraction, onde sismique.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences,
Physique.

DÉROULEMENT
Les ondes sismiques traversent la Terre avec des vitesses de propagation dépendant de la densité et des propriétés élastiques des roches. Ainsi, de la même manière qu'un rayon lumineux est dévié quand il pénètre dans un milieu aux propriétés physiques différentes de celui qu'il vient de traverser, les rais sismiques sont déviés quand ils passent d'un milieu à un autre. L'expérience proposée ici permet de modéliser une zone d'ombre à la surface du globe pour les ondes P et d'en comprendre la présence et la forme.

1re ÉTAPE

Faire prendre conscience aux élèves de l'existence de la zone d'ombre à la surface de la Terre, à travers des articles scientifiques ou des documents iconographiques.

2e ÉTAPE

Expliquer l'expérience et le matériel utilisé.
- 1 aquarium sphérique (rayon 8 cm).
- 1 ampoule sphérique (rayon 4 cm).
  L'ampoule est utilisée comme récipient, il est donc nécessaire d'enlever la totalité du dispositif électrique à l'intérieur.
- 1 solution sucrée (30 %, n = 1,4).
- 1 lampe halogène (20 W, 12 V).
- 1 boîte de pellicule photo.
- 1 alimentation 12 V – DC.

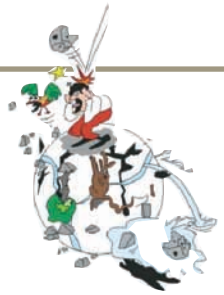
3e ÉTAPE

L'aquarium joue le rôle du manteau, l'ampoule celui du noyau.
L'onde sismique est modélisée par les rayons lumineux émis par la lampe halogène. Deux expériences seront mises en œuvre :
- l'aquarium contient de l'eau, l'ampoule contient de l'air : pas de zone d'ombre (➤ expérience 1).
- l'aquarium contient de l'air, l'ampoule contient la solution sucrée : apparition d'une zone d'ombre (➤ expérience 2).

L'analyse comparative des résultats permet de conclure sur la propagation des rais sismiques et sur l'existence d'une zone d'ombre.

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

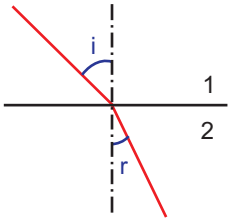
Expliquer la formation de cette zone d'ombre en observant le trajet des rayons (➤ sismo rais).
Comparer des sismogrammes de télé-séismes dont les ondes ont dû traverser le noyau et le manteau ou seulement le manteau pour atteindre une station (➤ sismo manteau).



➤ DOCUMENT Matériel pour réaliser l'activité

Dans ce modèle, les rayons lumineux émis par la lampe halogène jouent le rôle des ondes sismiques. L'intérieur de l'aquarium joue le rôle du manteau, et l'intérieur de l'ampoule celui du noyau. En remplissant l'aquarium et l'ampoule avec différentes solutions, on peut simuler (ou non) la formation de la zone d'ombre.

En appliquant les lois de Snell-Descartes, on peut prévoir l'inclinaison des rayons à la frontière séparant deux milieux 1 et 2. Ces lois nous permettent d'obtenir la relation suivante, liant la vitesse de propagation de la lumière, les indices de réfraction des milieux traversés et les angles d'incidence et de réfraction.



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

On rappelle que si c est la célérité de la lumière dans le vide et v cette célérité dans le milieu étudié, l'indice de réfraction n de ce milieu est, par définition : $n = \frac{c}{v}$

Les proportions noyau/manteau devront être approximativement respectées :

$$\frac{R_{aquarium}}{R_{ampoule}} = \frac{8}{4} = 2 \qquad \frac{R_{terre}}{R_{noyau}} = \frac{6371}{3480} = 1{,}8$$

➤ EXPÉRIENCE 1

Hypothèse : les ondes P se propagent plus vite dans le noyau que dans le manteau.
Pour cette expérience, l'aquarium est rempli d'eau, l'ampoule contient de l'air.
On a donc ici : milieu 1 = eau et milieu 2 = air
$n_2 / n_1 = 1/1.33$ donc $V_1 / V_2 = 0{,}75$

La vitesse de propagation des ondes est plus grande dans l'ampoule que dans l'aquarium, ce qui correspond bien à notre hypothèse de départ.

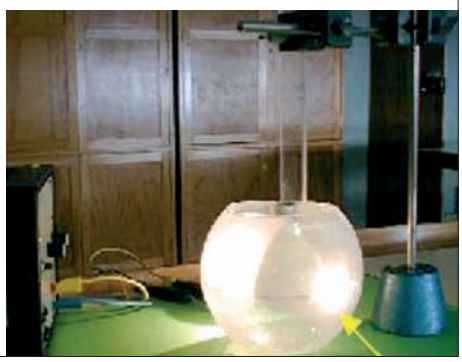
On n'observe pas de zone d'ombre.

➤ EXPÉRIENCE 2

Hypothèse : les ondes P se propagent plus vite dans le manteau que dans le noyau.
Pour cette expérience, l'aquarium est rempli d'air, l'ampoule contient l'eau.
On a donc ici : milieu 1 = air et milieu 2 = eau
$n_2 / n_1 = 1.33$ donc $V_1 / V_2 = 1.33$

La vitesse de propagation des ondes est plus grande dans l'aquarium que dans l'ampoule, ce qui correspond bien à notre hypothèse de départ.

On observe très bien la formation d'une zone d'ombre en forme de couronne sur la paroi de l'aquarium.



On prouve ainsi que la vitesse de propagation des ondes P est plus importante dans le manteau que dans le noyau. En recherchant de la documentation, on trouve généralement que :
$Vp_{(manteau)}$ = 11 km/s et $Vp_{(noyau)}$ = 9 km/s soit $Vp_{(manteau)} / Vp_{(noyau)}$ = 1,22

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS