

Musée de Sismologie et Magnétisme Terrestre

La profondeur du noyau

Notice à l'attention du professeur

- Public visé par l'activité : Lycéens
- Disciplines concernées : S.V.T., Sciences Physiques, Mathématiques
- Lieu pour l'activité : En classe ou à la maison
- Durée de l'activité : Environ 2 heures
- Nature de l'activité : Utiliser des données de temps d'arrivée d'ondes directes et d'ondes réfléchies sur le noyau pour déterminer la vitesse moyenne de propagation de ces ondes dans le manteau et la profondeur du noyau.
- Contenu du dossier : Fiche élève
- Proposition de correction sur demande émanant d'une adresse académique de préférence et adressée à l'un des contacts indiqués ci-dessous.
- Déroulement possible de l'activité :
- Cette activité peut tenir lieu de travail dirigé, d'activité en classe entière ou de travail à faire à la maison.

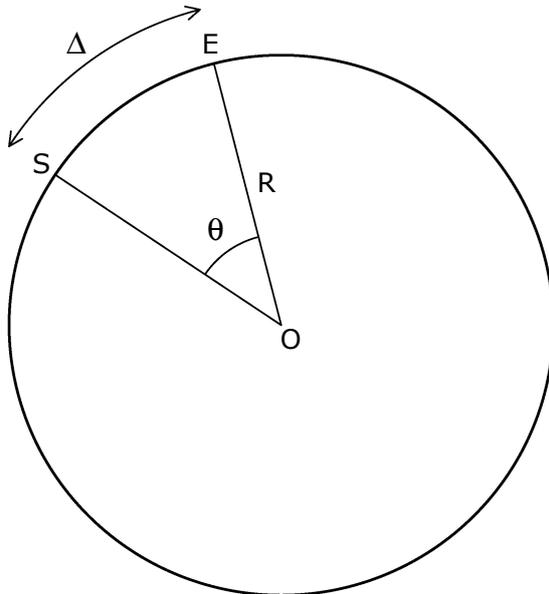
Contacts :

Pierre-André Labolle, Lycée des Pontonniers : plabolle@ac-strasbourg.fr
Valérie Ansel, EOST : valerie.ansel@unistra.fr

La profondeur du noyau

L'objectif de cette activité est de déterminer, à partir de données sismologiques, la profondeur du noyau de la Terre. À ces fins, on exploite les temps d'arrivée à une station sismologique des ondes P directes et des ondes PcP réfléchies par l'interface entre le manteau et le noyau.

En sismologie, les distances épacentrales séparant une station sismologique de l'épicentre d'un séisme sont souvent données en kilomètres lorsque l'épicentre est relativement proche de la station. Lorsque l'épicentre et la station sont bien plus éloignés et que l'on travaille à l'échelle de la Terre, ces distances épacentrales sont indiquées en degrés. Il s'agit en réalité de l'angle θ que forment le rayon terrestre passant par l'épicentre et le rayon terrestre passant par la station sismologique comme le montre le schéma ci-dessous.



Légende :

- O : centre de la Terre
- E : épicentre du séisme
- S : station sismologique
- $R=OE$: rayon de la Terre (6371 km)
- $\Delta=R \cdot \theta$: distance épacentrale (en km)
- θ : "distance" épacentrale (en degrés)

I/. Réflexions préliminaires

- I.1.** Démontrer que la relation qui lie la distance épacentrale en kilomètres Δ et l'angle θ est la suivante : $\Delta = R \cdot \theta$, l'angle θ étant exprimé en radians.
- I.2.** En utilisant la relation précédente et la valeur du rayon de la Terre précisé dans la légende du schéma, démontrer qu'un angle de 1° intercepte, à la surface de la Terre, un arc de cercle de longueur 111 km.
- I.3.** Les données que nous allons utiliser correspondent à des "distances" épacentrales comprises entre 10° et 90° . Quelles distances en kilomètres cela représente-t-il ?

II/. Données utilisées

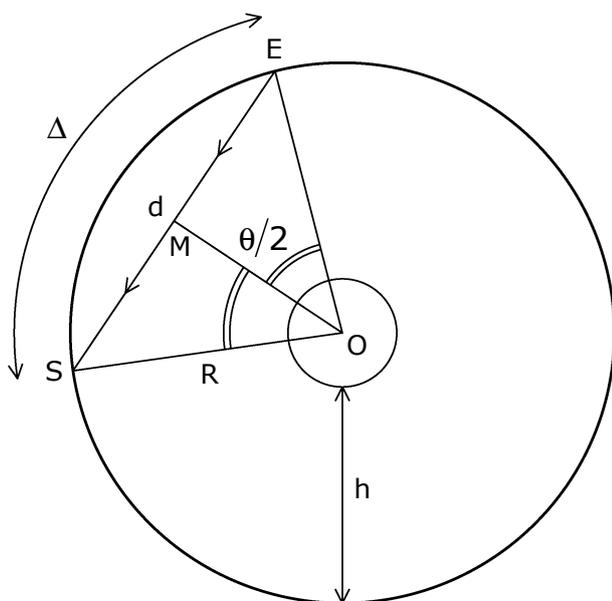
Les données que nous allons utiliser ici résultent d'une modélisation de la Terre établie en 1991 grâce à un grand nombre de données expérimentales. Ce modèle, appelé IASP91, est très utilisé par les sismologues pour déterminer les temps d'arrivée des différentes ondes à différentes distances de l'épicentre d'un séisme dont la profondeur est connue.

On détermine grâce à ce modèle les temps d'arrivée des ondes P directes et les temps d'arrivée des ondes PcP qui sont des ondes P ayant subi une réflexion sur la surface de séparation entre le manteau et le noyau. Ces temps d'arrivée sont déterminés pour différentes "distances" épacentrales, exprimées en degrés et figurent dans le tableau ci-dessous.

| "Distance" épacentrale θ (en°) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temps d'arrivée des ondes P directes (en secondes) | 145 | 274 | 370 | 456 | 535 | 608 | 673 | 731 | 781 |
| Temps d'arrivée des ondes PcP ayant été réfléchies (en secondes) | 516 | 530 | 552 | 581 | 615 | 654 | 695 | 738 | 782 |

III/. Étude des ondes P directes

Dans cette partie, nous considérerons que la Terre est sphérique, de rayon R et que le manteau est un milieu homogène dans lequel les ondes P se propagent rectilignement à la vitesse V. On fera également l'hypothèse que le noyau est homogène et on appellera h la profondeur à laquelle se trouve la surface de séparation entre le manteau et le noyau (voir le schéma ci-dessous).



Légende :

O : centre de la Terre

E : épicentre du séisme

S : station sismologique

$R=OE=OS$: rayon de la Terre (6371 km)

$\Delta=R \cdot \theta$: distance épacentrale (en km)

θ : "distance" épacentrale (en degrés)

h : profondeur du noyau

d : distance parcourue par les ondes P directes

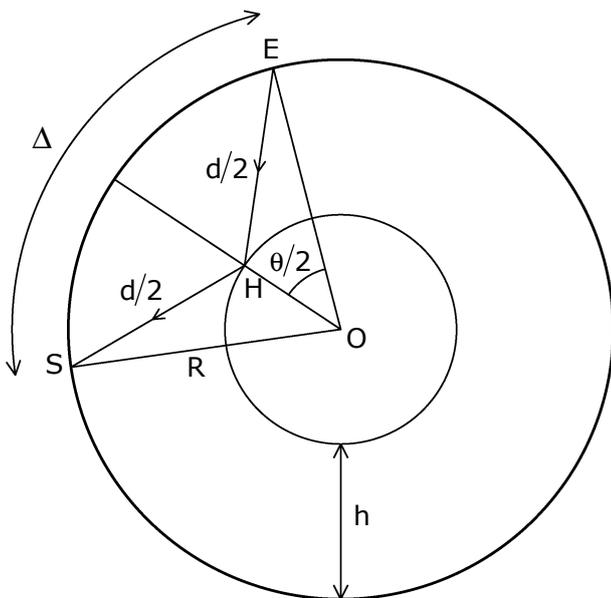
- III.1.** Exprimer le temps de parcours t dans le manteau des ondes P directes en fonction de la vitesse de propagation V de ces ondes et de la distance d qu'elles parcourent.
- III.2.** En utilisant la trigonométrie, exprimer la distance d en fonction de l'angle θ et en déduire l'expression du temps de parcours t en fonction de R , V et θ .
- III.3.** Utiliser un tableur-grapheur pour tracer la représentation graphique de t en fonction de l'angle θ en utilisant les données du tableau. À l'aide du tableur-grapheur, modéliser le nuage de points obtenu en tenant compte de l'expression trouvée dans la question **III.2.** et de la valeur du rayon terrestre donnée plus haut. Commenter les résultats de la modélisation et en déduire la valeur de la vitesse moyenne V des ondes P dans le manteau.
- III.4.** En réalité, les ondes P ne suivent pas des trajets rectilignes car le manteau n'est pas un matériau homogène. En réalité, les trajets réels des ondes P sont courbes et passent plus près du centre de la Terre.

Représenter qualitativement le trajet réel des ondes P entre les points E et S sur le schéma ci-dessus. En considérant la distance réelle parcourue pendant le temps de parcours, indiquer si l'on a surestimé ou sous-estimé la valeur de la vitesse des ondes P dans le manteau et justifier que l'on utilise dans la suite de cette activité la valeur de $11,4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

IV/. Étude des ondes PcP réfléchies par le noyau

On reprend les mêmes hypothèses que précédemment : la Terre est sphérique de rayon R , le manteau est homogène, les ondes P s'y propagent avec la vitesse $V = 11,4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ et le noyau est homogène et à la profondeur h .

On considère à présent les ondes PcP qui sont des ondes P subissant une réflexion à la surface de séparation entre le manteau et le noyau (voir schéma ci-dessous).



Légende :

- O : centre de la Terre
- E : épicode du séisme
- S : station sismologique
- $R=OE=OS$: rayon de la Terre (6371 km)
- $\Delta=R\cdot\theta$: distance épicode (en km)
- θ : "distance" épicode (en degrés)
- h : profondeur du noyau
- d : distance parcourue par les ondes PcP réfléchies

IV.1. Exprimer le temps de parcours t dans le manteau des ondes PcP réfléchies en fonction de la vitesse de propagation V de ces ondes et de la distance d qu'elles parcourent.

IV.2. En utilisant le théorème d'Al-Kashi dans le triangle OEH, exprimer la distance d en fonction de θ et démontrer que l'expression du temps de parcours t en fonction de R , V , h et θ est donnée par la relation suivante :

$$t = \frac{2}{V} \cdot \sqrt{R^2 + (R - h)^2 - 2 \cdot R \cdot (R - h) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

IV.3. Utiliser un tableur-grapheur pour tracer la représentation graphique de t en fonction de l'angle θ en utilisant les données du tableau. À l'aide du tableur-grapheur, modéliser le nuage de points obtenu en tenant compte de l'expression trouvée dans la question **IV.2.**, de la valeur du rayon terrestre donnée plus haut et de la valeur de la vitesse des ondes P trouvée dans la partie **III.**

Commenter les résultats de la modélisation et en déduire la profondeur h à laquelle se trouve la surface de séparation entre le manteau et le noyau encore appelée discontinuité de Gutenberg ou CMB (de l'anglais core-mantle boundary).

IV.4. La profondeur du noyau est estimée actuellement à 2900 km grâce à des méthodes plus précises tenant compte des approximations que nous avons faites ici. Calculer l'écart relatif entre la valeur retenue actuellement et la valeur trouvée dans cette activité et conclure.

Cet écart relatif, noté E , permet de quantifier l'erreur entre la valeur trouvée expérimentalement et la valeur attendue. Il se calcule de la façon suivante :

$$E = \frac{|\text{valeur expérimentale} - \text{valeur attendue}|}{\text{valeur attendue}}$$