



# Thème III Géologie interne de Mars versus Terre

Impact des  
paramètres  
atmosphériques sur  
les enregistrements  
sismiques

Planétologie  
comparée

Comment  
modéliser  
l'intérieur de  
Mars?

Localiser  
l'épicentre d'un  
séisme martien  
avec un seul  
sismomètre

Le  
sismogramme  
: un signal  
complexe

Localiser  
l'épicentre avec  
une seule station  
sur Terre



# Localiser l'épicentre avec une seule station sismique sur Terre

## 1. Introduction & Pb

En général, les élèves localisent l'épicentre en utilisant l'heure d'origine du tremblement de terre et l'heure d'arrivée des ondes sismiques à la station. Avec les données de trois stations sismiques, il est possible d'estimer l'emplacement de l'épicentre.

Sur Mars, il n'y a qu'un seul capteur pour détecter et estimer l'emplacement de l'épicentre. Nous proposons aux étudiants d'estimer l'épicentre du séisme Mw 9.0 Tohoku-Oki (11 mars 2011, Japon), avec une seule station sismique.

## 2. Age des étudiants 15 – 17 ans

## 3. Objectif

Utiliser une approche scientifique semblable celle utilisée par les chercheurs travaillant sur les données de la mission Insight pour estimer l'emplacement de l'épicentre d'un tremblement de terre avec un seul enregistrement provenant d'une station sismique à trois composantes.

## 4. Disciplines principales

Physique – Sciences de la Terre

## 5. Temps requis 2h

## 6. Mots clés

Ondes de Rayleigh, Distance Epicentrale, azimut

## 7. Matériel

### Supports utilisés :

- Data from RESIF network
- SeisGram2K80\_ECOLE© : téléchargeable gratuitement sur le Edumed <http://edumed.unice.fr/fr/tools-lab>

### Données :

- The Mw 9.0 Mars 11, 2011 Tohoku-Oki earthquake (Japan), recorded at the station CALF (Observatoire de la Côte d'Azur, Calern, France).

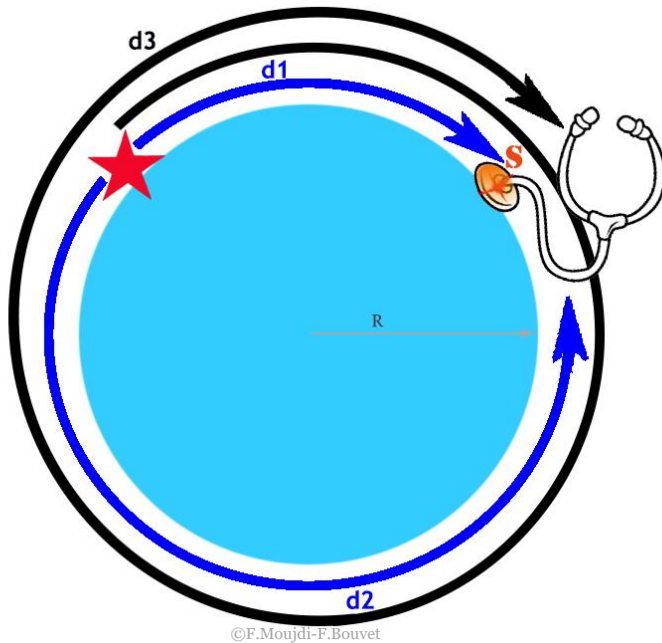
## 8. Connaissances requises

- Détection des ondes de Rayleigh :

Ce sont des ondes de périodes basses, les arcs associés sont plus longs que les arcs des ondes du corps. Ils sont également d'une plus grande amplitude.

Si le séisme a suffisamment d'énergie, l'onde de surface peut passer plusieurs fois à la station : des paquets de signaux de longue période peuvent apparaître dans le signal.

- Distance épacentrale par rapport aux temps d'arrivée des ondes de Rayleigh (Fig. 1)



$$distance_{(source/station)} = \frac{t_3 - t_2}{2} \cdot \frac{2\pi R}{t_3 - t_1}$$

**Figure 1:** Approche théorique pour estimer une distance épacentrale par rapport aux ondes de Rayleigh. *S* : Station sismique. *d1* : distance la plus courte entre la source et la station. *d2* : distance la plus longue entre la source et la station. *d3* : distance *d1* plus une rotation complète autour de la planète. *t1* : temps d'arrivée des ondes de Rayleigh après la propagation selon *d1*. *t2* : temps d'arrivée des ondes de Rayleigh après leur propagation selon *d2*. *t3* : temps d'arrivée des ondes de Rayleigh après la propagation le long de *d3*. *R* : rayon de la planète.

## 9. Protocole

Les élèves sont ensuite invités à choisir les ondes de Rayleigh du tremblement de terre de Tohoku-Oki, enregistré à la station CALF.

- Pointer les trois heures d'arrivée, et calcul de la distance épacentrale.

Ici, l'outil fourni par SeisGram2k n'est pas utilisé. Les élèves lisent les heures d'arrivée et calculent manuellement la distance à l'épicentre à partir de la formule de la figure 1.

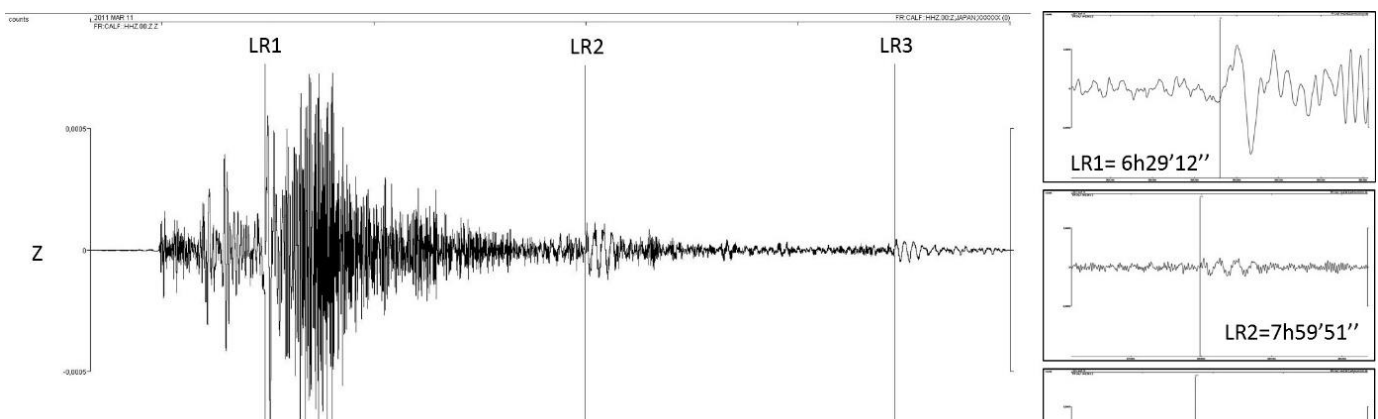


Figure 2. Sélection des trois passages des ondes de Rayleigh (séisme de Tohoku-Oki) à la station CALF. Colonne de droite : zoom de chaque pic, avec les heures d'arrivée observées (UTC).

## 10. Echange autour des résultats et conclusion

Dans ce cas, la distance épacentrale calculée est égale à 9841 km.

- Estimer le backazimuth.

La distance épacentrale calculée précédemment indique que l'épicentre est sur un cercle dont le rayon est égal à 9841 km. Deux paramètres sont nécessaires pour trouver la position correcte sur ce cercle : l'azimut et le backazimut. L'azimut donne la direction du premier mouvement du sol dans le plan horizontal de la station, dans le sens horaire positif. Le backazimut donne le sens où se trouve l'épicentre. La polarité de l'onde P de la composante verticale est requise : i) si la polarité est positive, le premier mouvement est vers le haut, le backazimut est égal à l'azimut plus  $180^\circ$  ; ii) si la polarité est négative le premier mouvement est vers le bas, le backazimut est égal à l'azimut.

SeisGram2k permet de déterminer la valeur d'azimut, avec l'outil de rotation. Il est possible de faire pivoter virtuellement le cadre géographique et de calculer les amplitudes dans le nouveau cadre. En faisant tourner le cadre, l'amplitude de l'onde P varie entre deux maximums, passant par une valeur nulle, sur chaque composante. La valeur de rotation qui permet d'annuler l'onde P sur la composante Est donne l'azimut : le mouvement est seulement dans la direction Nord du nouveau cadre géographique.

### a. Détecter les premières ondes P sur chaque composante horizontale.

Utilisez l'outil zoom du sismogramme pour sélectionner une fenêtre temporelle adaptée pour mettre en évidence la première onde P. L'outil d'augmentation/diminution de l'amplitude peut être utilisé.

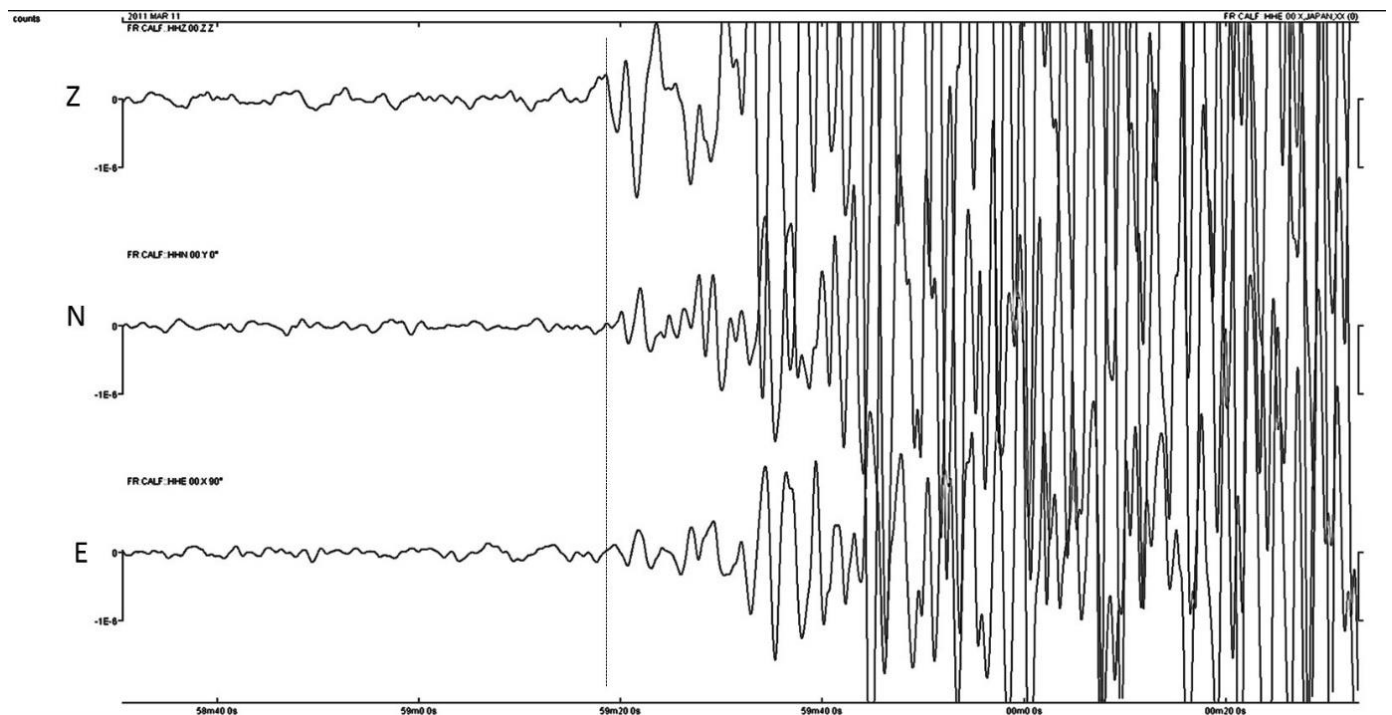


Figure 3. Enregistrements du tremblement de terre de Tohoku-Oki. Ligne verticale en pointillés noirs : pic de l'onde P. E : Composante Est. N : composante nord. Z : composante verticale.

**b. Tourner la composante horizontale (dans le sens des aiguilles d'une montre) pour annuler l'onde P de la composante Est horizontal component**

Dans ce cas, une rotation égale à  $+30^\circ$  permet d'annuler l'amplitude de l'onde P sur la composante Est. Le premier mouvement est dans une direction égale à  $+30^\circ$  (dans le sens des aiguilles d'une montre) du Nord dans le cadre géographique réel : c'est la valeur de l'azimut.

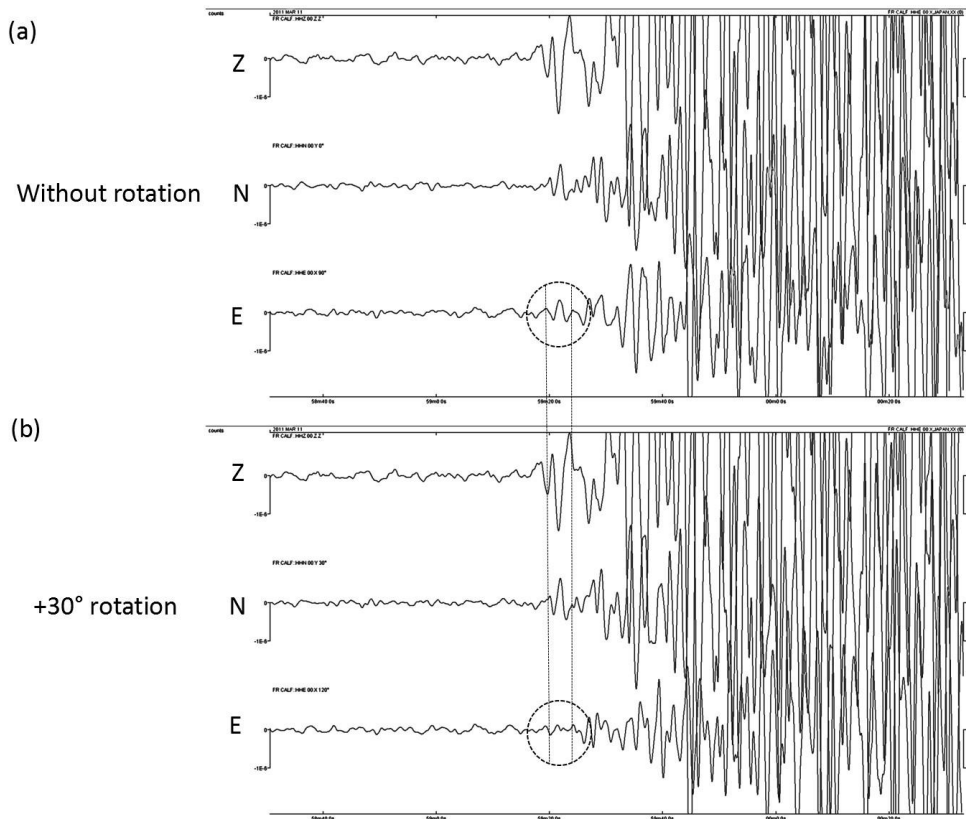


Figure 4. Enregistrements du tremblement de terre de Tohoku-Oki. (a) Sismogrammes bruts. Ellipse noire pointillée : identification de l'onde P de la composante est. (b) Sismogrammes après une rotation égale à  $+30^\circ$  : l'amplitude de l'onde P est annulée. E : Composante Est. N : composante nord. Z : composante verticale.

**c. Estimer la valeur du backazimut à partir de la polarité de l'onde P sur la composante vertical**

Dans ce cas, l'onde P est vers le bas sur la composante verticale (Fig. 3) : le backazimut est égal à l'azimut.

Le fichier d'information dans SeisGram2K indique un azimut égal à  $329,5^\circ$ . Cet azimut correspond à la direction à l'épicentre du nord géographique à la station : il est égal à l'angle entre le nord géographique moins le backazimuth (sens anti-horaire).

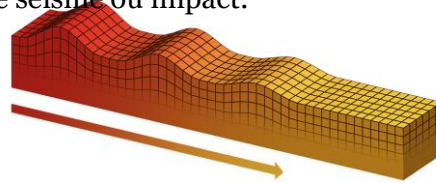
# Localiser l'épicentre d'un séisme martien avec un seul sismomètre

## 1. Introduction & Pb

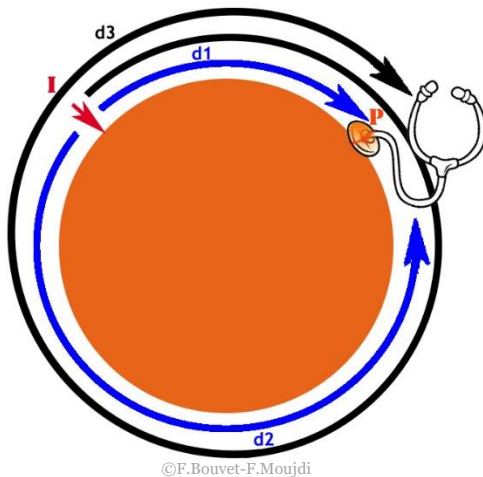
Essayons de comprendre comment, avec un seul sismomètre, les scientifiques de la mission Insight vont-ils pouvoir localiser l'origine des ondes sismiques créées par un impact de météorite ou un séisme.

Théoriquement, Mars ayant un petit périmètre, les scientifiques espèrent enregistrer plusieurs trains d'ondes, décalés dans le temps correspondant au même séisme ou impact.

Les ondes qui peuvent faire plusieurs fois le tour de la planète sont les ondes de surface de Rayleigh.



Principe de déplacement d'une onde de surface  
(© IPGP/David Ducros).



©F.Bouvet-F.Moujdi

**I:** Point d'impact, origine de l'onde sismique.

**P:** Sismomètre

**T<sub>1</sub>:** le temps mis par les ondes sismiques pour parcourir la distance **d<sub>1</sub>**

**T<sub>2</sub>:** le temps mis par les ondes sismiques pour parcourir la distance **d<sub>2</sub>**

**T<sub>3</sub>:** le temps mis par les ondes sismiques pour parcourir la distance **d<sub>2</sub>+2d<sub>1</sub>** or **d<sub>3</sub>**

## 2. Age des étudiants 15 – 17 ans

## 3. Objectif

Un des objectifs de la mission Insight est de localiser un séisme sur Mars à l'aide d'un seul sismomètre. La distance entre l'épicentre, le point en surface qui correspond au point de rupture des roches en profondeur (appelé foyer) et la station de réception peut facilement être calculée en mesurant la différence entre le temps d'arrivée des ondes P (qui arrivent les premières au sismomètre) et celui des ondes S (qui arrivent les secondes). L'erreur ici n'est que d'environ 10%.

Pour localiser l'épicentre, en plus de la distance par rapport à la station, il est également nécessaire de déterminer sa direction, c'est-à-dire son azimut. La direction dans laquelle les ondes sismiques arrivent peut-être déterminée par le fait que le sismomètre SEIS mesure les signaux sismiques dans les trois directions de l'espace.

En étudiant les données du plan horizontal fournies par les axes du sismomètre, la direction peut être connue avec une incertitude d'environ  $10^\circ$ . Dans notre expérience, nous utiliserons un accéléromètre pour simuler le travail de l'instrument SEIS.

## 4. Disciplines principales

Physique – Sciences de la Terre – Mathématiques

## 5. Disciplines complémentaires

Informatique: Arduino

## 6. Temps requis 2h

## 7. Mots clés

Epicentre, Ondes de surface, Fréquence, Sismogramme

## 8. Matériels

- Un ballon Pilates, périmètre 250 cm
- Audacity 1.2.6
- 1 cellule piézoélectrique
- 2 barres de polystyrène
- 1 ruban à mesurer
- 1 boule de 11,5g et 1,4cm suspendue à un fil de 1m fixé à un rapporteur d'angles

## 9. Connaissance requise

Les notions de propagation des ondes sismiques, les origines d'un séisme (rupture brutale des roches en profondeur).

## 10. Protocole

- Placer le ballon sur les barres de polystyrène pour éviter tout contact avec le sol.
- Fixez une cellule piézo sur le ballon.
- Déterminer une zone de frappe à 115 cm de la cellule piézoélectrique
- Suspendez le rapporteur de façon à ce que la balle soit au niveau de la zone de frappe.
- Expérimentons avec un modèle pour mieux comprendre la théorie

### Détail du dispositif expérimental



esponsib ©F.Bouvet-F.Moujdi



Such co

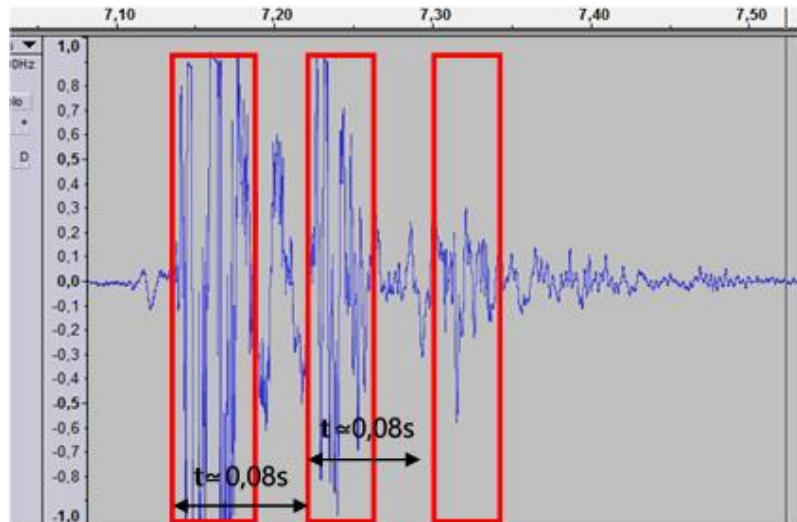


Réaliser plusieurs enregistrements successifs avec des impacts d'intensité constante. Pour ce faire, déplacez la bille de manière à ce que le fil soit orienté à  $60^\circ$  par rapport à la verticale.

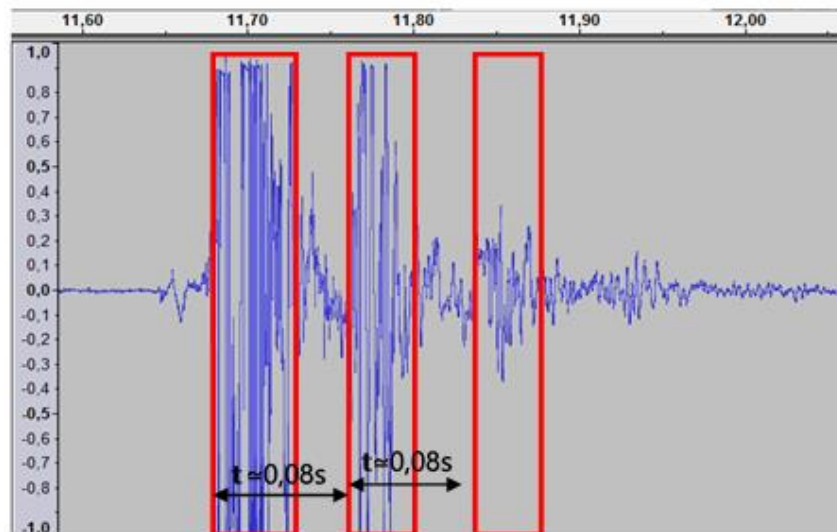
### Analysons les résultats obtenus :

Plusieurs trains d'ondes sont observés comme prévu par les simulations des scientifiques. Déterminons le temps écoulé entre les différents trains d'ondes

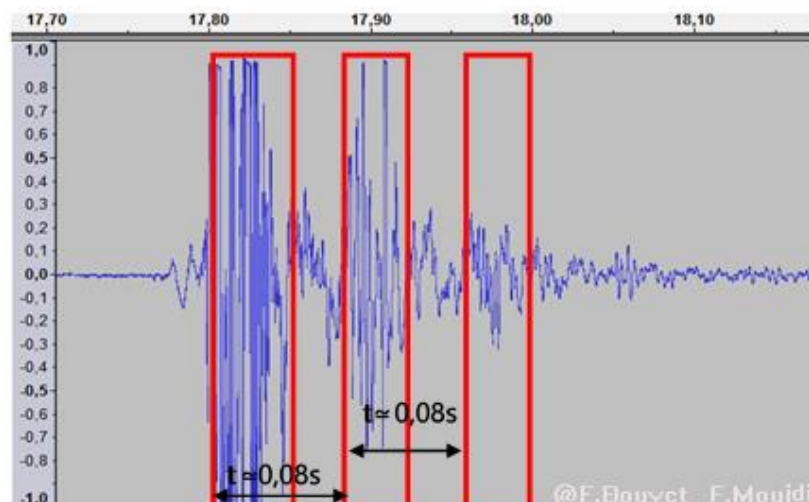
#### Enregistrement 1



#### Enregistrement 2



#### Enregistrement 3





From the obtained results, let us assume that the time elapsed between each wave train corresponds to the time taken by the latter to complete a complete balloon revolution  $d_2+d_1$

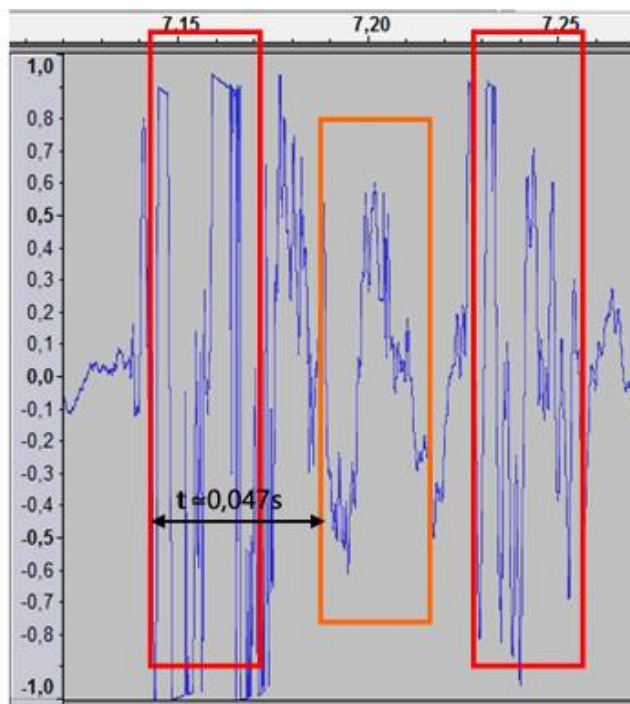
We can therefore determine an approximation for the speed of wave propagation on the surface of the balloon.

$$V = d / t = (d_1 + d_2) / t$$

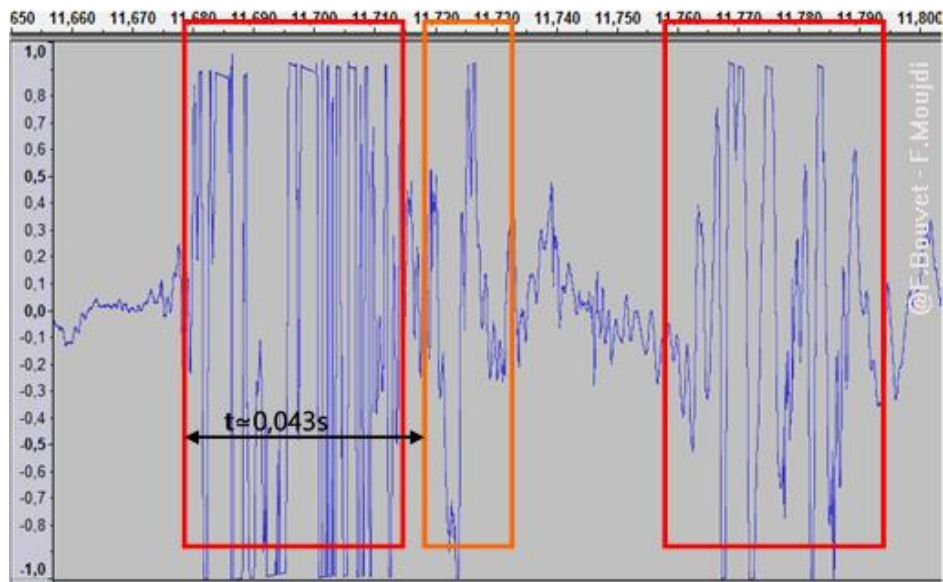
$$= 250 / 0,08 = 3125 \text{ cm.s}^{-1}$$

Let's take a closer look at the signals between the first two waves trains. We are trying to find out if the waves that travelled the distance  $d_2$  were detected by the piezo.

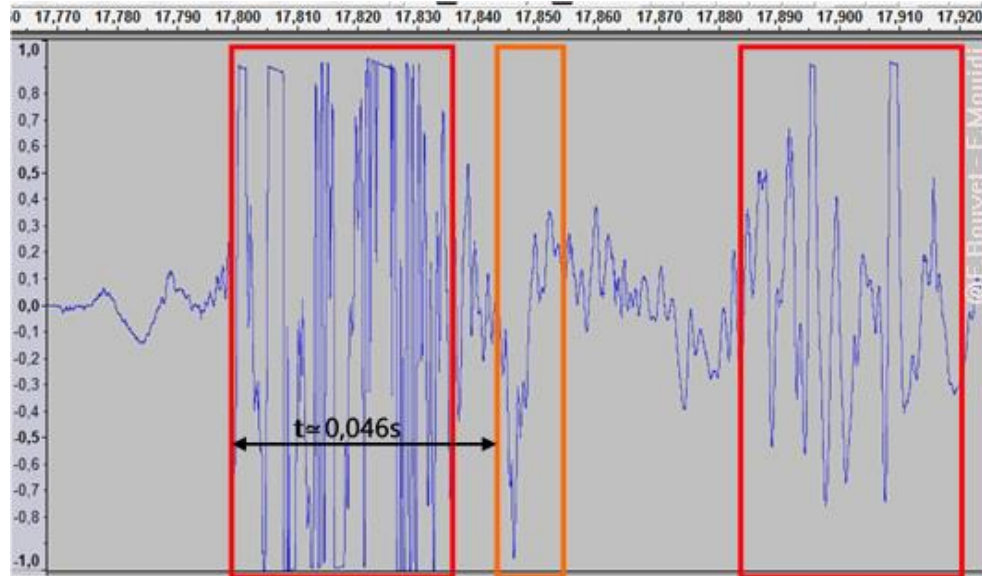
Enregistrement 1



Enregistrement 2



## Enregistrement 3



Supposons que ce signal corresponde aux ondes qui ont parcouru la distance  $d_2$ .

On peut estimer une zone d'impact.

$$d_2 = v \times t_2$$

En fonction des valeurs obtenues, on obtient

$$3125 \times 0,043 \leq d_2 \leq 3125 \times 0,047$$

$$134 \text{ cm} \leq d_2 \leq 146 \text{ cm}$$

On peut donc en déduire :

$$250 - 146 \leq d_1 \leq 250 - 134$$

$$104 \text{ cm} \leq d_1 \leq 116 \text{ cm}$$

On obtient une estimation de  $d_1$  correspondant à la zone de frappe réelle (115cm).

## 11. Echange autour des résultats et conclusion

La distance entre le sismomètre et la source du séisme, l'heure du séisme et la vitesse moyenne à laquelle les ondes se déplacent sur la surface de la planète peuvent être estimées en combinant les temps d'arrivée des ondes  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ . Les tremblements de terre de magnitude 4,5 ou plus sont relativement rares sur Mars, mais les géophysiciens estiment qu'au cours de la mission (une année martienne ou deux années terrestres), il devrait être possible d'observer entre 3 et 5 environ.

Il est important de noter que l'efficacité des techniques qui seront mises en œuvre par la mission InSight a été testée avec succès sur Terre à partir de données provenant de stations uniques. (cf : Localisation de l'épicentre sur Terre à partir d'un seul sismomètre). Ces travaux ont mené à la découverte de l'un des modèles de structure interne de la Terre couramment utilisés par les géophysiciens (PREM) avec une marge d'erreur acceptable.

Cependant, il reste des inconnues et la validité de la technique résumée ci-dessus ne peut être confirmée tant que les scientifiques n'auront pas reçu et analysé les données sismiques provenant de Mars.

## 12. Pour aller plus loin

Sur la Lune, les géophysiciens ont été étonnés de découvrir que la croûte lunaire provoquait une énorme diffraction des ondes sismiques, empêchant l'existence des ondes de surface. La croûte martienne, tout comme la croûte lunaire, a été exposée à un bombardement massif d'astéroïdes au début de la formation du système solaire, sa nature pulvérisée et ses nombreux cratères, en particulier dans l'hémisphère sud de la planète, pourraient également provoquer une diffraction des ondes sismiques, ce qui complique sérieusement les analyses.

## 13. Pour en savoir plus (Ressources pour les enseignants)

- <https://www.seis-insight.eu/en/public-2/martian-science/seismic-activity>

- The geology of Mars, edited by Mary Chapman

# Comment modéliser l'intérieur de Mars?

## 1. Introduction & Pb

Au cours des derniers siècles, de nombreux géoscientifiques ont contribué à la découverte de la structure interne de la Terre. Outre l'observation des roches à la surface de la Terre, leur analyse et leur expérimentation à l'aide de différentes méthodes, un large éventail d'outils ont été mis au point pour découvrir les couches qui composent la structure interne de la Terre.

En 1970, le forage de Kola Superdeep n'a pas atteint la profondeur pour laquelle il avait été conçu : forer à des profondeurs de 15 km dans la péninsule de Kola (ancienne URSS). Ce forage, le plus profond réalisé sur Terre, a atteint une profondeur de 12 262 mètres. Les géoscientifiques n'ont donc pas d'accès direct à la roche au-delà de cette profondeur.

Une fois avoir démontré que des méthodes directes comme le forage ne pouvaient pas fournir d'informations sur l'ensemble de la structure interne de la Terre (son rayon étant d'environ 6 400 km), les scientifiques se sont tournés vers des méthodes dites indirectes. Le perfectionnement et la précision de ces techniques ont contribué majoritairement à notre connaissance actuelle de la structure interne de la Terre ainsi qu'aux processus dynamiques qui l'animent.

Ces techniques reposent sur:

- Calcul de la densité moyenne de la Terre en connaissant sa masse et son volume.
- L'étude des ondes sismiques qui traversent ses couches chaque fois qu'un tremblement de terre se produit n'importe où sur la Terre.
- Etude et analyse des impacts de météorites à la surface de la Terre.
- Étude du champ magnétique de la Terre et de ses causes.
- Étude de la rotation de la Terre (son inertie de rotation).

## 2. Age of students 14 - 18 Ans

## 3. Objectifs

- Formuler des hypothèses et en discuter avec les élèves pour retenir les plus pertinentes
- Suggérer une modélisation ou expérience pour vérifier ces hypothèses
- Suggérer lesquelles d'entre elles pourraient être utilisées pour sonder Mars

## 4. Disciplines principales

Sciences de la Terre – Physique – Mathématiques

## 5. Disciplines complémentaires

Technologie

## 6. Temps requis 30 minutes

## 7. Mots-clés

Structure interne – Terre – Mars - hypothèse scientifique – essais – sondes – densité - ondes sismiques – magnétisme – sphères – météorites – densité - structure interne – Terre – Mars

## 8. Matériel

- Pâte à modeler de deux couleurs
- Billes de composition différente
- Plusieurs cure-dents
- une Magnaprobe™
- Règle

## 9. Connaissances requises

Les élèves doivent s'interroger sur le fait que les deux balles de même taille qu'on leur propose soient de poids différent. On leur demande de formuler une hypothèse qui pourrait correspondre au fait que deux sphères qui se ressemblent extérieurement (en dehors de leur couleur) puissent avoir une propriété physique très différente (masse et, par conséquent, densité).

Ensuite, on leur demande de suggérer des méthodes pour déterminer la structure interne des deux boules et de décider lesquelles pourraient être utiles pour étudier la structure interne d'une planète comme la Terre ou Mars.

## 10. Protocoles

Donnez à chaque groupe de trois élèves deux boules de pâte à modeler de couleurs différentes mais de la même taille et demandez-leur s'ils se sentent la différence entre les deux boules. Ils réalisent facilement que le poids, et donc la densité, est différente.



Figure 1 : Deux balles : la même taille, un poids différent. Vert plus léger, rouge plus lourd

Demandez-leur de formuler des hypothèses qui pourraient expliquer la différence entre les deux boules :

- Les deux balles sont constituées de deux types de pâte à modeler de densités différentes
- L'une des boules a quelque chose de plus lourd à l'intérieur
- La densité de l'une des boules augmente graduellement au fur et à mesure que l'on s'enfonce
- La densité de l'une des boules diminue progressivement au fur et à mesure que l'on s'enfonce

(La bonne réponse est que le plus lourd contient un boule d'acier à l'intérieur)

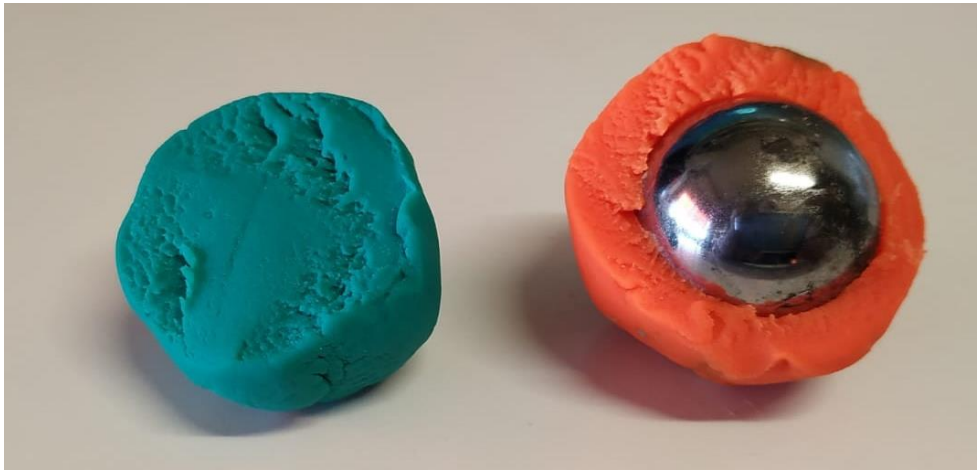


Figure 2 : Ouverture des deux billes pour montrer leur structure interne : verte, pure Pâte à modeler ; Boule en acier à l'intérieur.

Demandez-leur maintenant de réfléchir aux méthodes utilisées par les scientifiques pour découvrir la structure interne de la planète Terre.

*Réponses possibles :*

- Peser les deux billes (avec une balance) et calculer leur densité
- Les percer (avec des cure-dents, par exemple)
- Tester son magnétisme (avec une petite boussole)
- à l'aide de rayons X
- les ultrasons (comme celui utilisé pour voir les embryons à l'intérieur de l'utérus)
- la résonance électromagnétique (EMR) comme celles utilisées dans de nombreux hôpitaux
- les rayonnements ionisants (alpha, bêta ou gamma)

Ensuite, demandez aux élèves laquelle de ces méthodes convient à l'étude de la structure interne de la Terre.

*Réponses possibles :*

- Peser les deux boules (avec une balance) et calculer leur densité. Oui, les calculs en astronomie permettent aux scientifiques de connaître la masse de la Terre. Connaissant le rayon de la Terre, il est possible de calculer le volume, et donc la densité de la Terre.

- Les percer (avec des cure-dents, par exemple). Non, car les scientifiques n'ont pas pu forer à plus de 13 km de profondeur.

- Tester le magnétisme (avec une petite boussole). Oui, il y a un champ magnétique sur la Terre, lié à son noyau de fer externe (liquide) et interne (liquide). Il peut être détecté à l'aide d'une boussole.

- A l'aide de rayons X. Non, ils ne peuvent pas pénétrer la Terre.

- Les ultrasons (comme celui utilisé pour voir les embryons à l'intérieur de l'utérus). Non, ils ne peuvent pas pénétrer la Terre. Cependant, les infrasons ou les ondes sismiques peuvent pénétrer la Terre et fournir une information très utile sur ses couches ainsi que sur leur état physique (solide ou fluide).

- La résonance électromagnétique (EMR) comme celles utilisées dans de nombreux hôpitaux. Non, ils ne peuvent pas entrer dans la Terre.

- Les rayonnements ionisants (alpha, bêta ou gamma). Non, seuls les rayons gamma peuvent pénétrer quelques mètres dans le béton.

Donnez aux élèves deux autres boules de couleurs différentes : une plus légère que celle qu'ils ont déjà (avec une boule de mousse, à l'intérieur) et une autre du même poids que celle qu'ils ont déjà (avec une petite barre aimantée dedans).

Demandez-leur de les ordonner en augmentant la densité ; les résultats devraient être les suivants :

1. Balle avec la boule en mousse
2. Balle en pâte à modeler
3. Balle avec une petite barre aimantée

Maintenant, demandez-leur lequel de ces trois est le moins pertinent pour modéliser la structure interne d'une planète. (Répondez : 1 et 2, car la gravité pousse le matériau le plus lourd à "s'enfoncer" profondément au cœur des planètes).

Munissez-les d'une petite boussole et demandez-leur quelle balle correspond le mieux à la structure interne de la Terre et à celle de Mars. (Réponse : celui avec l'aimant à l'intérieur correspond mieux au modèle de la Terre car notre planète a un champ magnétique général lié à un noyau externe de fer liquide, tandis que Mars semble avoir un noyau de fer mais complètement solide et, par conséquent, il n'a pas de champ magnétique général)

## 11. Echange autour des résultats et conclusion

Les élèves peuvent comparer les propriétés physiques de la Terre et de Mars, discuter des meilleures méthodes pour les étudier, de celles qui sont disponibles dans chaque planète et comparer le degré de connaissance de la structure interne de la Terre et de Mars.

## 12. Pour aller plus loin

Les élèves peuvent utiliser un moteur de recherche sur Internet pour rechercher l'équipement de la sonde Insight qui a atterri sur Mars. A partir de ces informations, ils peuvent discuter des instruments embarqués par Insight pour étudier la structure interne de la Terre.

Ils peuvent aussi, calculer la densité des quatre sphères en sachant que la formule pour calculer le volume d'une sphère est la suivante:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

... et que de densité ( $D$ ) est:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

---

### 13. Pour en savoir plus (Ressources pour les enseignants)

- Cette activité a été développée à partir du programme Earthlearningidea “From clay balls to the structure of the Earth” in [www.earthlearningidea.com](http://www.earthlearningidea.com).
- <https://www.nasa.gov/>. Official website of the National and Aeronautics Space Administration (NASA)
- Toutes les informations pertinentes sur la mission InSight <https://www.nasa.gov/feature/jpl/for-insight-dust-cleanings-will-yield-new-science> .



# Planétologie comparée

## 1. Introduction & Pb

Cette activité est la suite de « l'Activité : Comment pouvons-nous explorer à l'intérieur de Mars " où les élèves ont appris les différentes méthodes d'étude de la structure interne d'une planète. Cependant elle peut aussi être indépendamment.

Deux aspects de l'étude de la structure interne d'une planète ont été développés au cours de cette activité : la distribution des masses à l'intérieur et la présence ou l'absence d'un magnétisme général.

**2. Age des étudiants** 14 - 18 ans

## 3. Objectifs

- Formuler des hypothèses et ne retenir que les plus pertinentes
- Suggérer des méthodes pour vérifier les hypothèses
- Comprendre comment ces caractéristiques permettent de distinguer les planètes Terre-Mars
- Calculer la densité des différentes balles et les comparer
- Décidez quelle balle modélise le mieux la Terre et Mars

## 4. Disciplines principales

Sciences de la Terre – Physique - Mathématiques

## 5. Disciplines complémentaires

Technologie

**6. Temps requis** 20 minutes

## 7. Mots-clés

Structure interne – Mars – Hypothèse scientifique – densité – magnétisme – sphere - météorite

## 8. Matériel

- Pâte à modeler de différente couleur
- Boule en acier
- Aimant
- Petite boule en mousse
- Magnaprobe
- Règle

## 9. Connaissances requises

Les élèves reçoivent quatre boules de pâte à modeler de couleurs différentes et sont informés de la composition des quatre boules.

Ils doivent décider lequel des quatre modèles de boules correspond le mieux aux caractéristiques (répartition des masses et magnétisme) des deux planètes, Mars et la Terre.

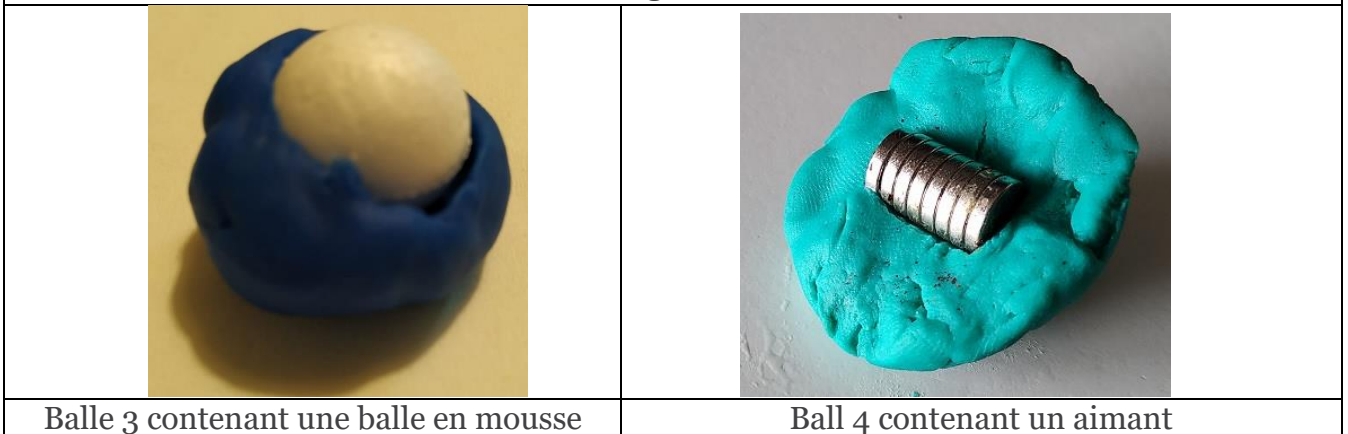
## 10. Protocole

Donnez à vos élèves les quatre boules, mais sans leur dire quelle est la couleur de chaque sphère. Les quatre sphères ont approximativement la même taille et leur composition respective est la même:

- sphère 1 : elle est entièrement en pâte à modeler
- sphère 2 : la balle en pâte à modeler contient une boule en mousse.
- sphère 3 : contient une boule en acier
- la sphère 4 contient un aimant dont le poids est à peu près le même que celui de la boule en acier de la sphère 3



Balles 1 et 2 (verte et rouge) utilisées dans l'Activité 3



Balle 3 contenant une balle en mousse

Ball 4 contenant un aimant

Maintenant, demandez-leur laquelle des quatre boules correspond le mieux à ce que l'on attend de la distribution des couches dans n'importe quelle planète rocheuse et laquelle des quatre correspond le mieux à la structure interne de la Terre et de Mars respectivement.

Demandez-leur maintenant comment, tous les appareils et technologies disponibles sur Terre, peuvent-ils tester ce qui fait la différence entre les deux boules.

Figure 2 : Ouverture des deux billes pour montrer leur structure interne : verte, pure Pâte à modeler ; Boule en acier à l'intérieur.

Demandez-leur maintenant de réfléchir aux méthodes utilisées par les scientifiques pour découvrir la structure interne de la planète Terre.

*Réponses possibles :*

- Peser les deux billes (avec une balance) et calculer leur densité
- Les percer (avec des cure-dents, par exemple)
- Tester son magnétisme (avec une petite boussole)
- à l'aide de rayons X
- les ultrasons (comme celui utilisé pour voir les embryons à l'intérieur de l'utérus)
- la résonance électromagnétique (EMR) comme celles utilisées dans de nombreux hôpitaux
- les rayonnements ionisants (alpha, bêta ou gamma)

Ensuite, demandez aux élèves laquelle de ces méthodes convient à l'étude de la structure interne de la Terre.

*Réponses possibles :*

- Peser les deux boules (avec une balance) et calculer leur densité. Oui, les calculs en astronomie permettent aux scientifiques de connaître la masse de la Terre. Connaissant le rayon de la Terre, il est possible de calculer le volume, et donc la densité de la Terre.

- Les percer (avec des cure-dents, par exemple). Non, car les scientifiques n'ont pas pu forer à plus de 13 km de profondeur.

- Tester le magnétisme (avec une petite boussole). Oui, il y a un champ magnétique sur la Terre, lié à son noyau de fer externe (liquide) et interne (liquide). Il peut être détecté à l'aide d'une boussole.

- A l'aide de rayons X. Non, ils ne peuvent pas pénétrer la Terre.

- Les ultrasons (comme celui utilisé pour voir les embryons à l'intérieur de l'utérus). Non, ils ne peuvent pas pénétrer la Terre. Cependant, les infrasons ou les ondes sismiques peuvent pénétrer la Terre et fournir une information très utile sur ses couches ainsi que sur leur état physique (solide ou fluide).

- La résonance électromagnétique (EMR) comme celles utilisées dans de nombreux hôpitaux. Non, ils ne peuvent pas entrer dans la Terre.

- Les rayonnements ionisants (alpha, bêta ou gamma). Non, seuls les rayons gamma peuvent pénétrer quelques mètres dans le béton.

Donnez aux élèves deux autres boules de couleurs différentes : une plus légère que celle qu'ils ont déjà (avec une boule de mousse, à l'intérieur) et une autre du même poids que celle qu'ils ont déjà (avec une petite barre aimantée dedans).

Demandez-leur de les ordonner en augmentant la densité ; les résultats devraient être les suivants :

1. Balle avec la boule en mousse
2. Balle en pâte à modeler
3. Balle avec une petite barre aimantée

Maintenant, demandez-leur lequel de ces trois est le moins pertinent pour modéliser la structure interne d'une planète. (Répondez : 1 et 2, car la gravité pousse le matériau le plus lourd à "s'enfoncer" profondément au cœur des planètes).

Munissez-les d'une petite boussole et demandez-leur quelle balle correspond le mieux à la structure interne de la Terre et à celle de Mars. (Réponse : celui avec l'aimant à l'intérieur correspond mieux au modèle de la Terre car notre planète a un champ magnétique général lié à un noyau externe de fer liquide, tandis que Mars semble avoir un noyau de fer mais complètement solide et, par conséquent, il n'a pas de champ magnétique général)

## 11. Discussion autour des résultats et conclusion

Les élèves peuvent comparer les propriétés physiques de la Terre et de Mars, discuter des meilleures méthodes pour les étudier, de celles qui sont disponibles dans chaque planète et comparer le degré de connaissance de la structure interne de la Terre et de Mars.

## 12. Pour aller plus loin

Les élèves peuvent utiliser un moteur de recherche sur Internet pour rechercher l'équipement de la sonde Insight qui a atterri sur Mars. A partir de ces informations, ils peuvent discuter des instruments embarqués par Insight pour étudier la structure interne de la Terre.

Ils peuvent aussi, calculer la densité des quatre sphères en sachant que la formule pour calculer le volume d'une sphère est la suivante:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

... et que de densité (D) est:

### 13. Pour en savoir plus (ressources pour enseignants)

- Cette activité a été développée à partir du programme Earthlearningidea “From clay balls to the structure of the Earth” in [www.earthlearningidea.com](http://www.earthlearningidea.com).
- <https://www.nasa.gov/>. Official website of the National and Aeronautics Space Administration (NASA)
- Toutes les informations pertinentes sur la mission InSight <https://www.nasa.gov/feature/jpl/for-insight-dust-cleanings-will-yield-new-science> .

# Le sismogramme : un signal complexe

## 1. Introduction & Pb

Le mouvement du sol est le résultat de l'arrivée de nombreuses ondes, qui ont leur propre fréquence. Les sismomètres enregistrent continuellement le mouvement du sol et ce signal continu, sans arrivée d'ondes sismiques, est considéré comme le bruit sismique ambiant.

Lorsqu'un séisme est bien enregistré, les ondes sismiques sont clairement identifiées par rapport au bruit sismique continu. Mais parfois, ces ondes avaient été enregistrées, mais elles ne sont pas perceptibles. Connaissant les gammes de fréquences des ondes sismiques, il est possible de trouver un tremblement de terre dissimulé dans le bruit sismique.

## 2. Age des étudiants 15 – 17 ans

## 3. Objectif

Filtrage d'un sismogramme avec une bande passante adaptée pour observer les ondes sismiques.

## 4. Disciplines principales

Sciences de la Terre - Physique

## 5. Disciplines complémentaires

Informatique : Prise en main du logiciel Audacity

## 6. Temps requis 2h

## 7. Mots-clés

Sismogramme – Fréquence – Ondes sismiques

## 8. Matériel

### Support logiciel :

- Données provenant de RESIF network
- SeisGram2K80\_ECOLE© : Téléchargeable gratuitement sur le site Edumed : <http://edumed.unice.fr/fr/tools-lab>

### Données

- Le séisme Mw 4.8 du 1er janvier 2019 (Grèce), enregistré à la station CALF (Observatoire de la Côte d'Azur, Calern, France).
- Le tremblement de terre Mw 6.3 Décembre First, 2018 (Indonésie), enregistré à la station CALF.

## 9. Connaissances requises

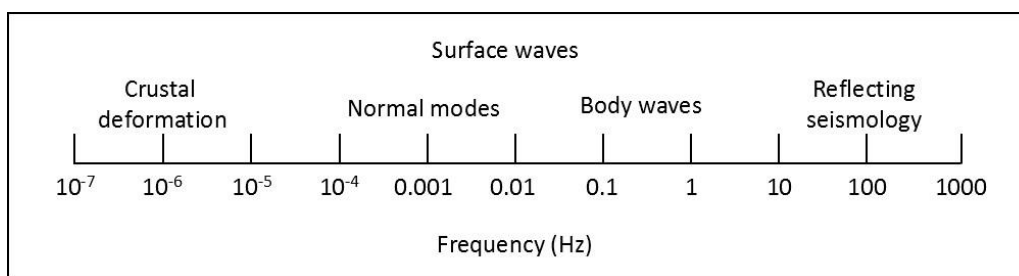
Prise en main de Seismogram2K.

## 10. Protocole

### Step one: processing of the Greek earthquake to display P waves

Les sismogrammes bruts sont des extractions de signaux sismiques continus où les ondes sismiques doivent être perceptibles. Sur chaque composant, aucune onde sismique n'est observable. Lié à la magnitude ( $M_w$  4,8) et à la distance épacentrale ( $15,87^\circ$ ). En considérant une vitesse moyenne de l'onde P de 8 km/s (par rapport à la distance épacentrale), la première onde P devrait arriver à 11h45:43.

En fournissant aux élèves l'échelle de fréquences suivante, ils peuvent estimer une plage de fréquences spécifique pour les ondes corporelles.

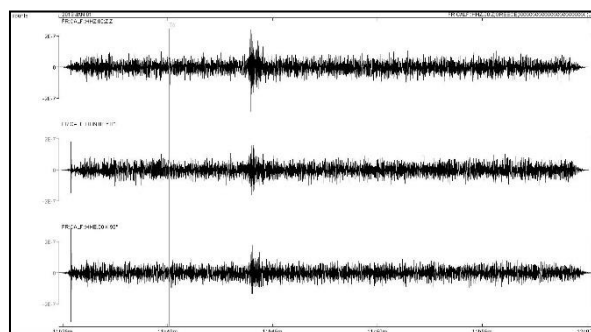
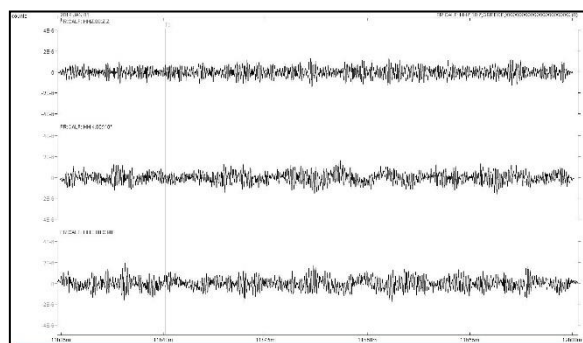


Cette échelle (extraite de Stein et Wysession, 2013) est une échelle indicative. L'élève peut observer que les fréquences des ondes de volume s'étendent à partir de valeurs inférieures à 0,01 Hz et supérieures à 1 Hz.

**Exercice :** tester différentes valeurs limites pour un filtrage passe-bande afin de mettre en évidence les ondes sismiques.

Dans ce cas, la valeur inférieure pour un filtrage passe-bande doit être supérieure ou égale à 1 Hz. La plus grande valeur n'a aucune influence sur les ondes sismiques.

### Résultat :



### Deuxième étape : traitement du tremblement de terre indonésien pour afficher les ondes P

Comme précédemment, aucune onde sismique n'est observable dans les données brutes.

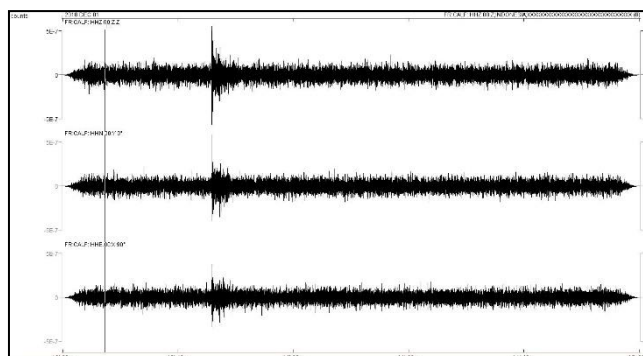
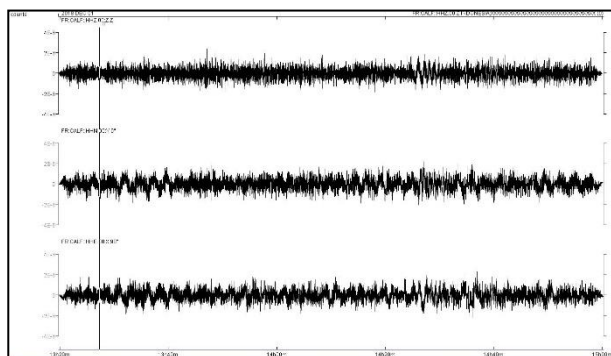
**Exercice :** on demande à nouveau aux élèves de trouver des valeurs adaptées pour le filtrage passe-bande qui permettent de mettre en évidence les ondes sismiques.

Dans ce cas, la valeur inférieure du filtrage passe-bande pour afficher l'onde P peut être supérieure ou égale à 0,5 Hz.

Première conclusion : bien que les ondes sismiques ne soient pas observables dans les sismogrammes, elles peuvent être mises en évidence par un traitement adapté. Ces deux étapes montrent que les ondes P sont facilement observables dans la gamme de fréquences supérieure à 1 Hz.

Mais qu'en est-il des ondes S et des ondes de surface ?

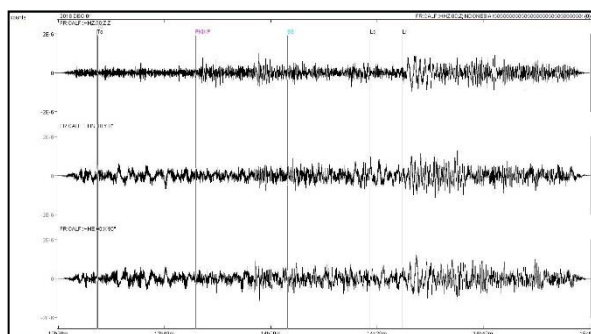
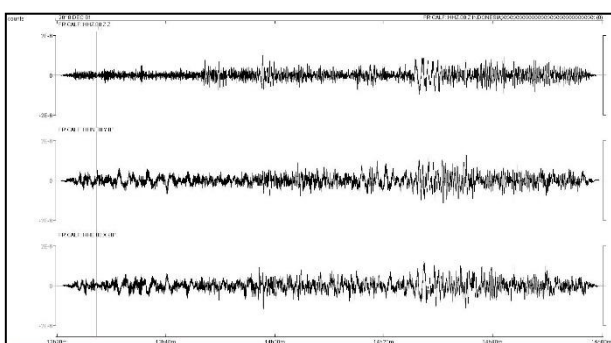
### Résultats :



**Troisième étape :** traitement du tremblement de terre indonésien pour afficher les ondes P, S et de surface

**Exercice :** on demande aux élèves de trouver des valeurs adaptées afin de mettre en évidence les ondes P, S et de surface.

Dans ce cas, des valeurs de plage comprises entre 0,01 et 0,1 Hz permettent d'afficher les ondes de corps et de surface. Le choix des heures d'arrivée théoriques avec SeisGram2K permet d'identifier facilement les différents packs de vagues. Pour cet événement téléseismique, les ondes P sont en fait des ondes PKIKP, et les ondes S sont des ondes SS. Les ondes de Rayleigh sont bien affichées et s'identifient facilement.



## 11. Echange autour des résultats et conclusion :

Les sismogrammes contiennent une grande quantité de fréquences, et les ondes sismiques pourraient être cachées dans le bruit sismique, sur Terre comme sur Mars. Les scientifiques devront traiter les données futures avec précision afin de détecter les ondes des impacts et des tremblements de terre futurs.

Les sismogrammes contiennent un grand intervalle de fréquences, et les ondes sismiques pourraient être cachées dans le bruit sismique, sur Terre comme sur Mars. Les scientifiques devront traiter les données futures avec précision afin de détecter les ondes des impacts et des tremblements de terre futurs.



# Impact des paramètres atmosphériques sur les enregistrements sismiques

## 1. Introduction & Pb

Une station sismique est conçue pour détecter les mouvements infimes du sol. Ses appareils électroniques peuvent être influencés par les mouvements du sol liés aux paramètres atmosphériques. Nous avons proposé ici des sismogrammes où le signal continu n'est pas plat : jour après jour de grandes variations quotidiennes sont observées.

## 2. Age des étudiants 15 – 17 ans

## 3. Objectif

Filterer le bruit sismique en détectant les variations atmosphériques du signal

## 4. Disciplines principales

Sciences de la Terre - Physique

## 5. Disciplines complémentaires

Informatique : SeisGram2K80\_ECOLE©

## 6. Temps requis 2h

## 7. Mots-clés

Sismogramme – Fréquence – Ondes sismiques

## 8. Matériel

### Supports:

- Données provenant de RESIF network
- SeisGram2K80\_ECOLE© : Téléchargeable gratuitement sur le site Edumed : <http://edumed.unice.fr/fr/tools-lab>

### Données :

- Signal sismique continu du 3 au 7 février 2019, enregistré à la station MYLF (Forcalquier, Alpes de Haute Provence, Observatoire de la Côte d'Azur).

## 9. Connaissance requise

Utilisation du logiciel SeisGram2K80\_ECOLE©

## 10. Protocole

**Première étape :** Analyse du signal continu.

Les élèves doivent décrire les signaux continus de l'image de la figure 1.

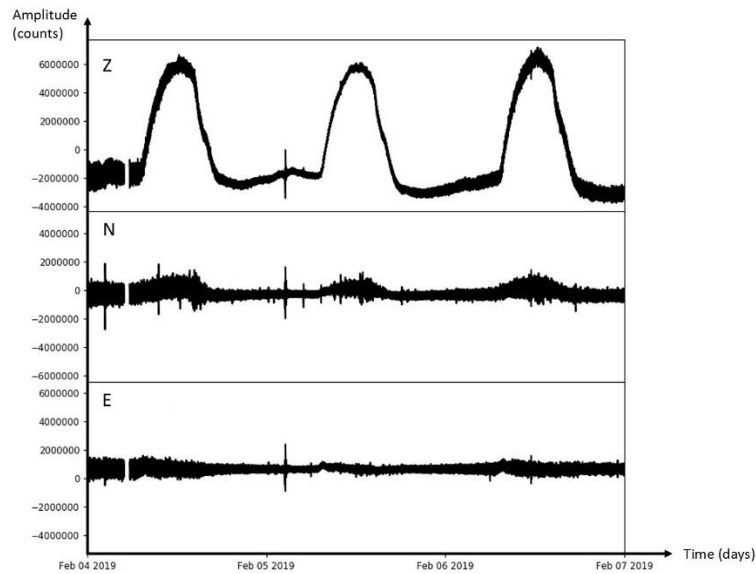


Figure 1. Enregistrements de la station FMJLF (du 4 février au 7 février 2019). E : Composante Est. N : Composante nord. Z : composante verticale.

Dans ce cas, les élèves doivent remarquer que le signal de la composante Z est clairement perturbé quotidiennement : chaque jour, le signal forme une arche qui augmente jusqu'à midi, et diminue après-midi. Ce phénomène est également observé dans le signal de la composante nord. La composante Est semble moins touché

**Deuxième étape : Trouver un paramètre physique qui peut induire cette variation du signal continu.**

Le sismogramme de la composante verticale peut être utilisé pour faciliter l'analyse du signal continu.

**Troisième étape :** Retrouvez des événements marquants à l'exception des arches du jour.

Dans ce cas, un séisme est enregistré sur 02h29m06s.

Mais dans ce signal continu, quatre autres tremblements de terre sont enregistrés (Fig. 2)

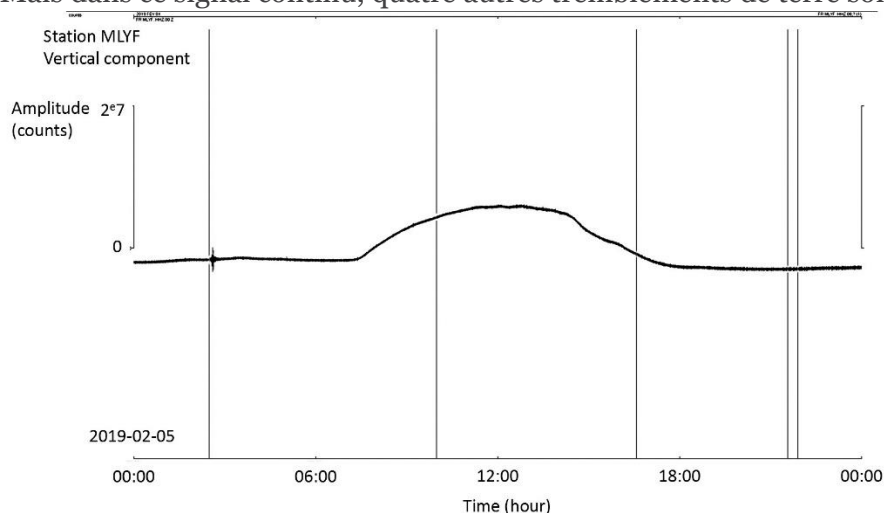


Figure 2. Signal continu de la station MLYF (5 février 2019). Lignes noires verticales : sélection des tremblements de terre enregistrés ce jour-là.

#### Quatrième étape : Observation de ces tremblements de terre

Avec SeisGram2K et les outils de zoom et de déplacement, essayez d'identifier les ondes sismiques enregistrées à chaque marqueur de sélection sur la Figure 2, et trouvez le séisme correspondant dans le Tableau 1.

time	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Depth (km)	Magnitude
02/05/2019 02:23:20	44.623	6.999	5.22619	1.10
02/05/2019 02:59:21	44.620	6.996	5.90243	0.98
02/05/2019 03:14:54	44.627	6.995	3.97904	1.05
02/05/2019 03:24:12	44.632	6.994	4.50887	0.67
02/05/2019 03:30:24	44.622	7.002	5.23938	0.78
02/05/2019 03:46:13	44.631	7.004	5.74260	0.99
02/05/2019 06:40:26	44.321	7.203	2.69562	0.89
02/05/2019 11:08:10	43.431	6.337	3.15283	1.66
02/05/2019 16:33:52	43.600	5.367	0.00	2.20
05/02/2019 02:19:15	44.510	10.100	22.00	2.3
05/02/2019 06:54:58	43.420	12.470	9.00	2.1
05/02/2019 08:30:59	45.860	7.050	2.00	3.1
05/02/2019 08:31:00	45.850	7.080	10.00	3.1
05/02/2019 09:02:50	45.840	7.030	5.00	2.4
05/02/2019 09:52:45	45.970	6.970	8.00	3.0
05/02/2019 09:55:54	45.880	7.040	8.00	1.5
05/02/2019 11:47:51	44.440	12.190	32.00	2.2
05/02/2019 21:32:59	46.030	5.600	5.00	3.4
05/02/2019 21:52:57	45.980	5.580	10.00	3.2

Tableau 1. Catalogue de sismicité le 5 février 2019 (Du catalogue du Centre Européen de Sismologie Méditerranéenne et du catalogue du laboratoire Géoazur). La zone couverte est centrée sur la Région PACA et le Nord de l'Italie

## 11. Echange autour des résultats et conclusion

Les paramètres météorologiques peuvent avoir une influence si les capteurs ne sont pas bien isolés de leur environnement proche. Sur Mars, le sismomètre SEIS est protégé par un dôme contre l'activité atmosphérique comme variation quotidienne de la température et du vent. Ce dôme pourrait résister à des rafales de 216 km/h et devrait même pouvoir résister à des vitesses de vent de 360 km/h (<https://www.seis-insight.eu/en/public-2/seis-instrument/wts>).