THÉMATIQUE TECTONIQUE

Les élèves situeront les séismes dans le contexte géologique d'une région soumise à des contraintes tectoniques et étudieront la notion de cycle sismique.

QUESTIONS DE RECHERCHE

- **Quelle est l'origine tectonique d'un tremblement de terre ?**
- **Quelles relations existe-t-il entre faille et séismes ?**

ACTIVITÉS PROPOSÉES

Sismo Cycle 22

À l'aide d'un dispositif adapté, étudier la périodicité des séismes liée à l'accumulation progressive d'énergie, puis à la libération brutale de celle-ci au niveau d'une faille. Aborder ainsi la notion de cycle sismique.

Sismo Rupture 24

À partir d'une maquette, on provoque la création d'une faille et on enregistre la genèse associée d'ondes propagées. Ainsi sont abordées les notions de contraintes, rupture au foyer et genèse des ondes sismiques.

Sismo Site 26

À l'aide d'une maquette, étudier l'importance du substratum géologique sur l'amplitude des secousses telluriques et aborder ainsi un des aspects de l'effet de site.

Sismo Tomo 28

Comprendre la signification des variations de vitesses des ondes sismiques dans le globe terrestre.

Sismo Magnitude 30

Comprendre les abaques donnant la magnitude d'un séisme en fonction de la distance du séisme et de l'amplitude de l'enregistrement.

THÈME
Tectonique.

OBJECTIF
Sur des temps longs (plusieurs millions d'années), les contraintes s'accumulent sur les failles. Le séisme intervient lorsque le seuil de rupture est atteint. Modéliser le cycle sismique avec accumulation d'énergie puis libération de cette énergie au niveau des failles par le séisme.

MOTS-CLÉS
Faille, énergie, cycle sismique, sismographie, contrainte.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Physique.

DÉROULEMENT
La compréhension du phénomène sismique repose sur les relations entre l'accumulation et le relâchement des contraintes qui s'exercent sur une faille tectonique. On va appréhender, à l'aide d'un dispositif, le cycle sismique avec ses différentes phases : accumulation d'énergie et contraintes, puis libération d'énergie, séisme et déplacement au niveau de la faille.

1RE ÉTAPE
On fournit aux élèves, après discussion, le dispositif (➤ document 2), on peut aussi faire imaginer le dispositif à partir de la documentation (➤ document 1).
Il faut en comprendre les différentes composantes et resituer cette modélisation dans le cadre tectonique voulu : blocs de matériaux de part et d'autre d'une faille. Leur cohésion est rendue possible par un matériel plus ou moins adhérent (papiers de verre de grains variés).

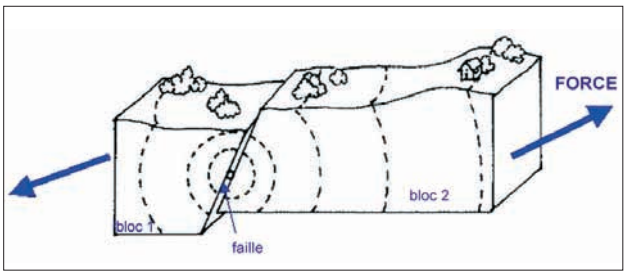
2E ÉTAPE
À partir du dispositif adopté, on cherchera à mesurer l'influence de certains paramètres sur le seuil de rupture (➤ document 2). Les élèves, en tirant progressivement sur le bloc mobile, enregistrent la tension qui s'accumule, puis le bloc cède, se déplace et matérialise le jeu de la faille et la libération d'énergie associée au séisme.

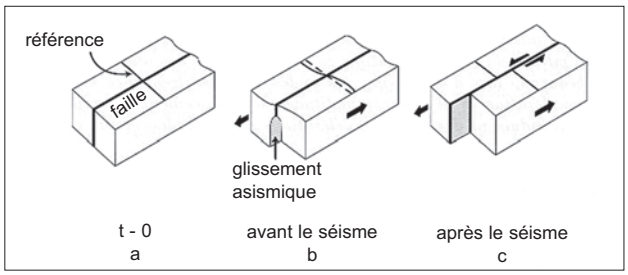
3E ÉTAPE
En poursuivant la même procédure, les élèves constatent la notion de cycle sismique avec ses deux phases bien enregistrées. Ils constatent aussi que les phases ne sont pas périodiques et que la prévision du moment exact du séisme demeure complexe (➤ document 3).

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS
- On peut faire varier la force de frottement entre les deux blocs (papier de verre, feutrine, papier bristol…).
- On peut utiliser un mini-tapis roulant pour automatiser et contrôler l'accumulation d'énergie, on peut aussi utiliser un capteur de force numérique et automatiser l'enregistrement.
- On peut visualiser les ondes générées lors du déplacement du mobile à l'aide d'un dispositif de cellules piézo-électriques (➤ annexe 4).

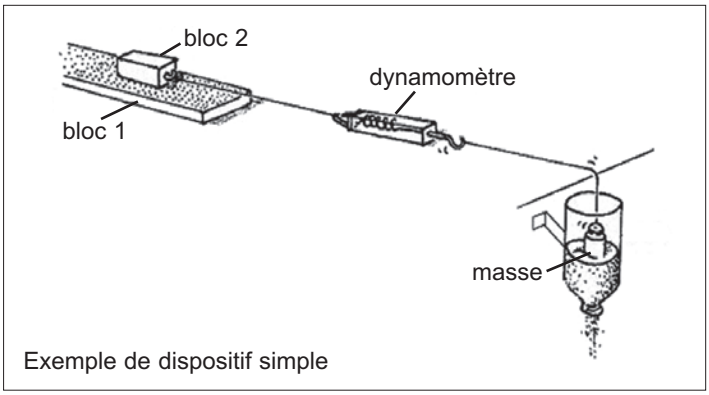
➤ DOCUMENT 1 Définitions

Lors d'un séisme, les forces responsables du déplacement d'un bloc rocheux par rapport à l'autre, le long d'une faille, s'exercent de façon continue sur chacun des deux blocs (➤ ci-dessous). La faille restant bloquée pendant de longues périodes, de très fortes contraintes y sont emmagasinées. À un moment donné, une rupture brutale se produit et les contraintes accumulées pendant des années sont relâchées en quelques secondes. Puis la faille est de nouveau bloquée et le cycle recommence. Chaque rupture est la cause d'un séisme.





➤ DOCUMENT 2 Deux blocs de matériaux (sur lesquels on exerce des forces opposées)

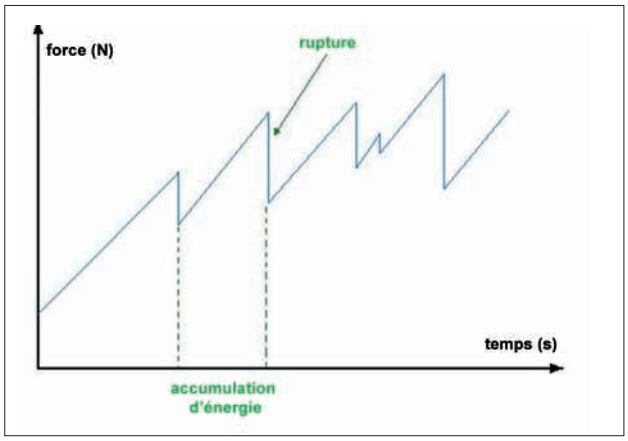


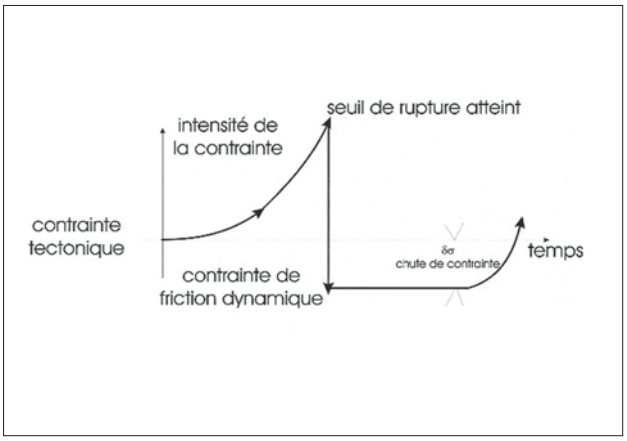
➤ DOCUMENT 3 Exemple d'organisation de la classe

Chaque élève au sein d'un groupe a un rôle précis :

- le premier mesure le temps qui s'écoule,
- le deuxième note la force indiquée sur le dynamomètre toutes les deux secondes,
- le troisième note au tableau le temps et l'intensité de la force exercée,
- le quatrième note chaque déplacement du tasseau.

À la fin de la mesure, les élèves peuvent tracer le graphique suivant, montrant l'évolution de la force exercée sur le bloc 2 au cours du temps :





Les élèves sont invités à réaliser l'expérience plusieurs fois, d'abord sans changer le papier de verre du bloc 2, puis en changeant ce paramètre. Les élèves comprennent que des aspérités de toutes tailles situées sur les faces des blocs en contact gênent le mouvement de ces derniers. L'accumulation d'énergie et sa libération à chaque déplacement varient au cours de l'expérience. Ce modèle explique le caractère imprévisible d'un séisme. On ne peut donc évaluer ni le moment de la rupture, ni la longueur du déplacement le long de la faille.

SISMO RUPTURE

THÈME
Tectonique.

OBJECTIFS
Créer des ruptures dans des matériaux divers et enregistrer la genèse d'ondes.

MOTS-CLÉS
Foyer, failles, ondes sismiques, sismogramme.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Physique.

DÉROULEMENT
On va construire un dispositif cassant matérialisant la lithosphère à l'aide d'un matériel simple. En exerçant progressivement une contrainte mécanique sur ces matériaux, on provoque leur rupture matérialisant une faille, et on enregistre à l'aide de cellules piézo-électriques (➤ **annexe 4**) la naissance d'ondes qui se propagent.

1RE ÉTAPE

Deux lames de polystyrène* sont placées dans le dispositif.
Une cellule piézo-électrique est solidarisée aux lames par un élastique et reliée à la "carte son" de l'ordinateur. Un temps de réflexion est nécessaire pour s'approprier le dispositif dans le cadre de la tectonique cassante de la lithosphère.

MATÉRIEL ➤ **document 1** : dispositif avec lames de polystyrène, et ➤ **annexe 4** : cellules piézo-électriques.

2E ÉTAPE

On exerce progressivement à l'aide d'un serre-joint une contrainte de haut en bas sur les lames. On constate que les lames plient.
On lance l'acquisition avec *Audacity* et on augmente la contrainte : les lames finissent par se rompre. On stoppe l'acquisition.

MATÉRIEL ➤ **documents 2 et 3** : serre-joint, ➤ **annexe 4** : cellules piézo-électriques et ➤ **à télécharger** : logiciel *Audacity***.

3E ÉTAPE

On constate que des "failles" se sont formées à partir du foyer et dans l'épaisseur des deux lames (➤ **document 3**).
On recherche sur l'écran de l'ordinateur les effets générés par la rupture des lames. On constate que la rupture a été à l'origine de vibrations (qui simulent les ondes sismiques) enregistrées par le capteur piézo (qui simule un sismomètre).

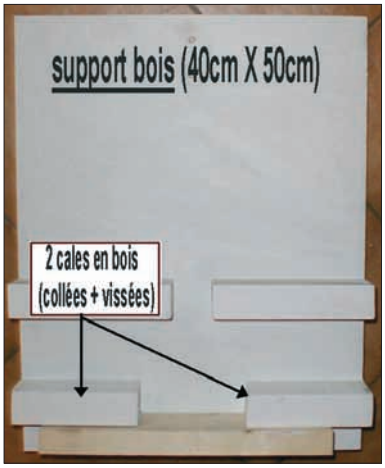
NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

* Les deux lames de polystyrène peuvent être remplacées par divers matériaux plus ou moins résistants à la cassure tels que bois, lames de plâtre différemment colorées et représentant des couches géologiques, etc.

** *Audacity* est un éditeur audio libre et facile d'utilisation pour Windows, Mac OSX, GNU/Linux. Il est téléchargeable gratuitement sur Internet (http://audacity.sourceforge.net).

➤ DOCUMENT 1 Dispositif

FIGURE 1a : dispositif utilisé



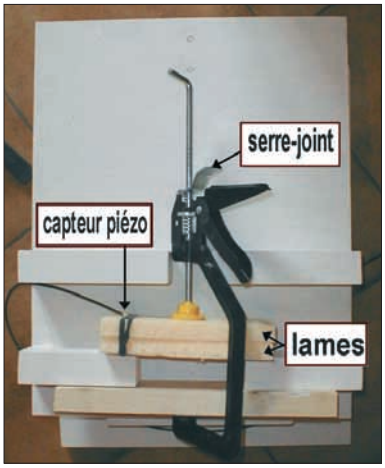


FIGURE 1b : le capteur piézo est relié à la “carte son” de l’ordinateur (entrée “line in”).

➤ DOCUMENT 2 Expérience

FIGURE 2a : on lance alors l’acquisition en “mono” avec *Audacity*

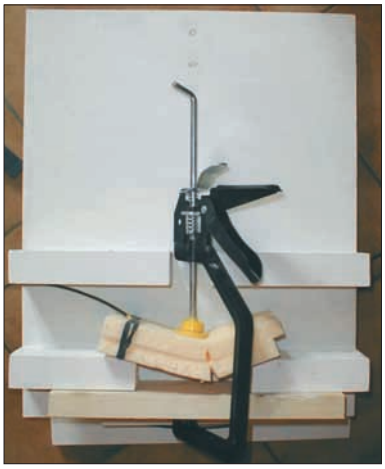
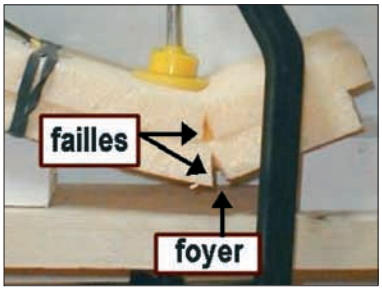


FIGURE 2b : les lames finissent par se rompre. Le bruit de la rupture est bien audible. Il s’est formé des failles.

➤ DOCUMENT 3 Résultat

FIGURE 3a : on observe sur l’écran de l’ordinateur les ondes sismiques enregistrées par le capteur piézo (sismogramme).



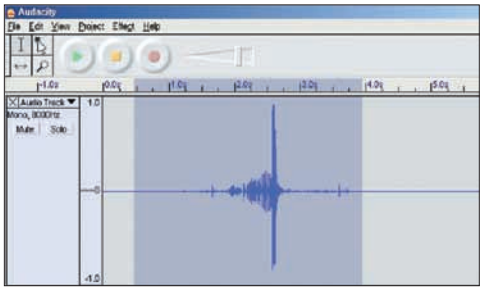


FIGURE 3b : enregistrement obtenu avec des lames de plâtre.

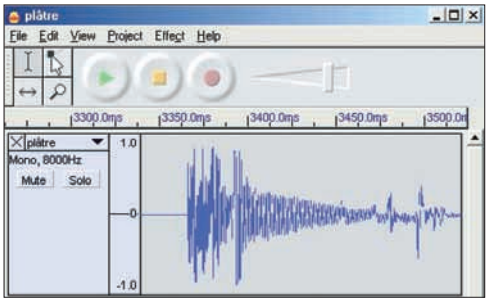


FIGURE 3c : enregistrement obtenu avec des lames de bois.

THÈME
Tectonique.

OBJECTIF
Faire comprendre le phénomène d'effet de site dû à une hétérogénéité du substratum géologique lors d'une secousse sismique.

MOTS-CLÉS
Amplitude, effet de site, secousse.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Physique.

DÉROULEMENT
En 1985, un séisme de magnitude 8,2 sur l'échelle de Richter frappe la ville de Mexico. La distance épicentrale est de l'ordre de 400 km. Les dégâts sont très importants et surtout très inégaux selon les différents endroits de la ville. Il s'agit d'expliquer cet effet de site, de comprendre la différence de dégâts selon les zones de la ville. Pourquoi cette amplification des dégâts si loin de l'épicentre ?

1re ÉTAPE

La compréhension de l'effet de site repose sur la connaissance des terrains sur lesquels la ville de Mexico est construite. L'examen d'une carte simplifiée de la région et de divers sismogrammes permet de mettre en évidence cette hétérogénéité de terrains.

2e ÉTAPE

Mettre au point un dispositif.
Les terrains meubles seront simulés par de la gelée de bougie, les terrains rigides par du bois (➤ **document 2**). On disposera un système d'enregistrement de secousses avec des cellules piézo-électriques (➤ **annexe 4**). L'enregistrement sur la "carte son" des vibrations parvenues aux deux cellules piézo-électriques devrait montrer quelques différences significatives (notion d'effet de site).

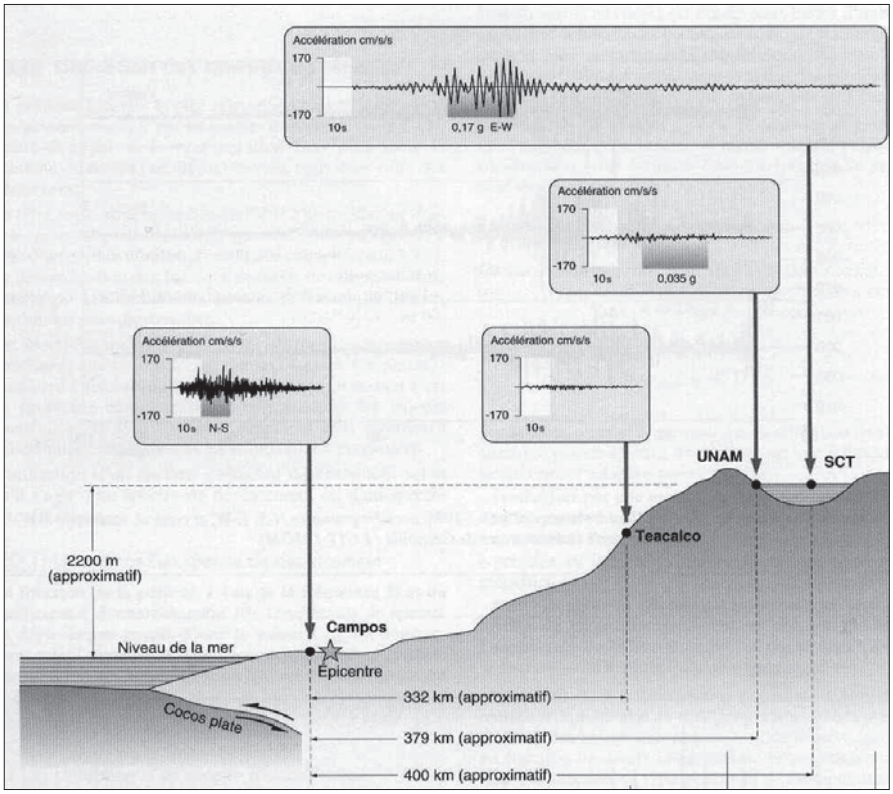
3e ÉTAPE

L'analyse des signaux enregistrés par une des cellules piézo-électriques permet de mettre en évidence la mise en résonance d'un milieu.
On peut mettre en relation ces résultats avec les enregistrements obtenus à Mexico en 1985 (➤ **document 1**).
L'expérience nécessite que les deux cellules piézo-électriques utilisées aient la même sensibilité.

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

Explication : la ville de Mexico est construite en partie sur des terrains meubles (sédiments lacustres) entourés par des roches rigides (type basaltes). Chacun de ces terrains possède une fréquence propre à laquelle il est susceptible de vibrer fortement.
La mise en résonance de ces terrains par les ondes sismiques ne se fait donc pas de la même façon. En effet, les ondes sismiques de fréquence plus faible (basse fréquence) mettent en résonance les terrains meubles ; or ce sont précisément ces ondes basses fréquences qui sont transmises lorsque l'épicentre est lointain. Les ondes basse fréquence du séisme ont donc été piégées dans la cuvette sédimentaire sur laquelle repose une partie de la ville, elles ont mis alors en résonance uniquement les terrains meubles.
Des exemples plus locaux peuvent servir de support à cette activité.

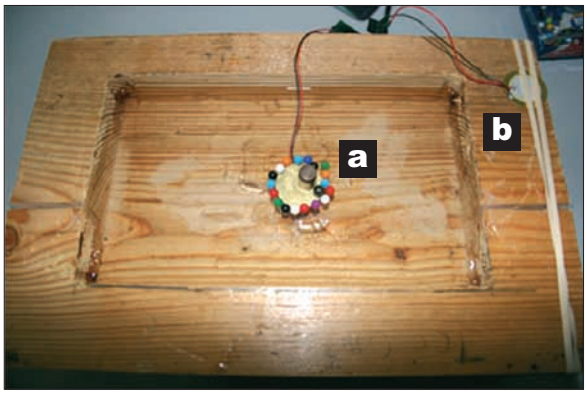
➤ DOCUMENT 1 Séisme de Mexico - 19 septembre 1985

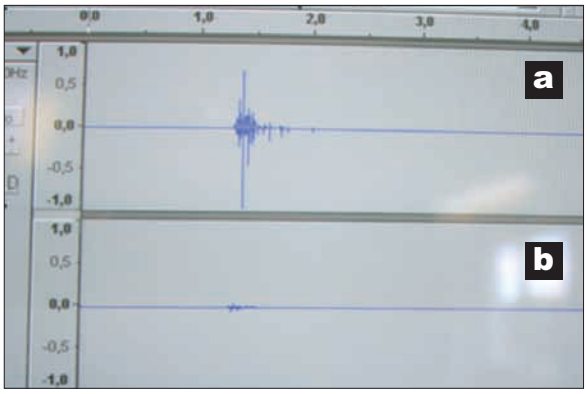


Le 19 septembre 1985, le séisme de Michoacan ne causa que des dégâts modérés près de son épicentre, mais provoqua de sérieux dommages à Mexico City, à 400 kilomètres de là.

Ce constat donne à penser que la géologie au niveau de Mexico City a joué un rôle important dans l'amplification des effets du séisme.

➤ DOCUMENT 2 Dispositif et résultats





Le capteur est fixé dans la gelée avec de petites aiguilles. Cela est impératif pour un bon enregistrement. L'autre capteur est fixé à l'aide d'un élastique sur le bois. Les enregistrements obtenus sont donnés ci-dessus. Ils sont cohérents avec les enregistrements obtenus aux stations UNAM (sur basalte) et SCT (sédiments) ➤ document 1. On met bien en évidence une amplification en durée et en amplitude du mécanisme sismique de cette région (effet de site).

SISMO TOMO

THÈME
Tectonique.

OBJECTIFS
Comprendre la signification des variations de vitesses des ondes sismiques dans le globe terrestre.

MOTS-CLÉS
Vitesse des ondes, différence thermique entre lithosphère et asthénosphère, tomographie sismique.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Physique.

DÉROULEMENT
Les anomalies thermiques positives ou négatives déterminées d'après les variations de la vitesse des ondes sismiques, sont calquées sur les dorsales et les zones de subduction.
Des mesures montrant des différences de vitesse de propagation dans de la pâte à modeler froide ou chaude vont permettre d'établir un modèle analogique pouvant expliquer l'utilisation des ondes sismiques pour la tomographie à l'échelle du globe.

1RE ÉTAPE

En créant un choc (avec un marteau) sur la pâte à modeler froide (dont on relève la température à l'aide de la sonde), on enregistre à l'aide du logiciel *Audacity** le passage du train d'ondes au niveau du premier, puis du deuxième capteur piézo, reliés à la carte son de l'ordinateur (➤ **document 1)**.
On renouvelle la manipulation avec une barre de pâte à modeler à température plus élevée (T° ambiante ou de l'étuve).

VARIANTE : on peut enregistrer une série de plusieurs mesures à partir de la barre sortie du congélateur (ou du réfrigérateur), qui se réchauffe très vite. On peut accélérer le réchauffement à l'aide d'un sèche-cheveux.

2E ÉTAPE

Connaissant la distance séparant les deux capteurs piézo-électriques, les élèves calculent la vitesse des ondes selon la température de la pâte à modeler (➤ **document 2)**.

Rappeler aux élèves la notion de vitesse et son calcul selon la formule mathématique : v = d / t.

Température	Temps (1/1 000 000 s)	Distance (cm)	Vitesse (km.s-1)
- 4,6	325	32	9,85
+ 20	916	32	3,49

On peut construire un tableau ou tracer une courbe montrant l'évolution de la vitesse en fonction de la température.
La vitesse mesurée diminue lorsque la température de la pâte à modeler augmente.
Les élèves peuvent constater aussi que la rigidité de la barre décroît avec l'augmentation de la température.

3E ÉTAPE

Les élèves de lycée disposent de documents de tomographie sismique (➤ **document 3)** à mettre en relation avec les enregistrements :
- mise en évidence des mouvements de convection mantellique ;
- mise en évidence de la double anomalie thermique au niveau d'une zone de subduction ;
- mise en évidence des discontinuités dans la structure interne du globe terrestre (graphe vitesse ondes P et S – profondeur).

Les élèves peuvent donc avoir une approche concrète de la tomographie sismique.

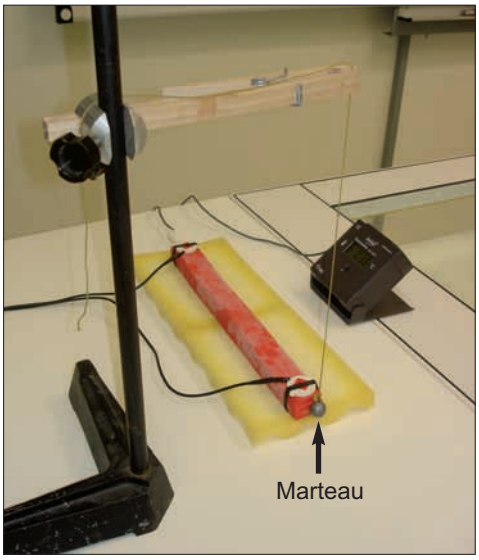
NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

* *Audacity* est un éditeur audio libre et facile d'utilisation pour Windows, Mac OSX, GNU/Linux. Il est téléchargeable gratuitement sur Internet (http://audacity.sourceforge.net).

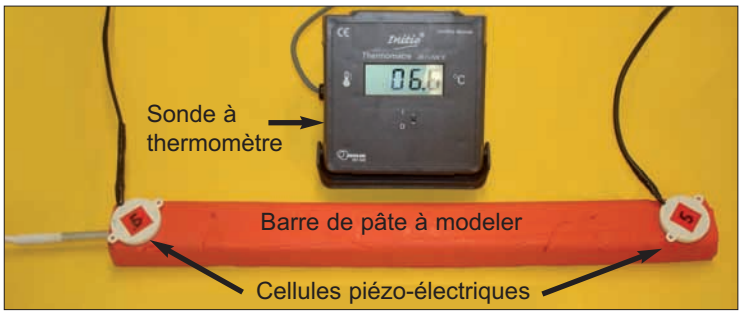
➤ DOCUMENT 1 Dispositif avec barre de pâte à modeler

Réalisation des barres :

Pour mouler les barres de pâte à modeler on peut réaliser un moule en bois. Dimensions intérieures : longueur 34 cm, largeur 3,5 cm, profondeur 2 cm pour 500 g de pâte à modeler.



Dispositif d'enregistrement

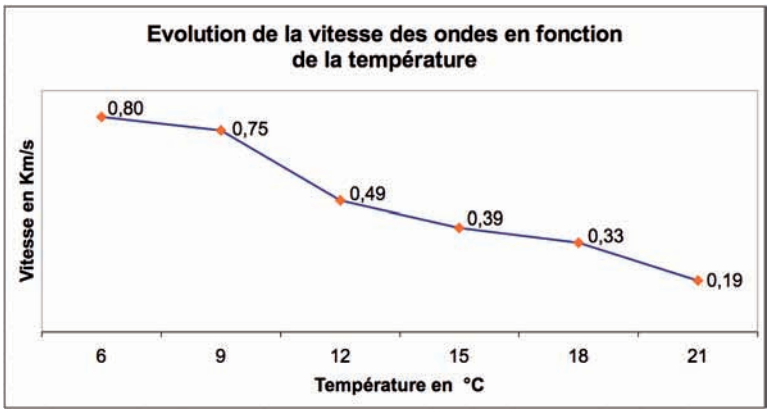


➤ DOCUMENT 2 Calcul des vitesses et représentation graphique

Connaissant la distance séparant les deux capteurs piézo-électriques on peut donc calculer la vitesse des ondes.

On peut répéter l'opération plusieurs fois au fur et à mesure du réchauffement de la barre de pâte à modeler en notant la température lors de chaque enregistrement. On peut soit tracer une courbe, soit remplir un tableau montrant l'évolution de la vitesse en fonction de la température.

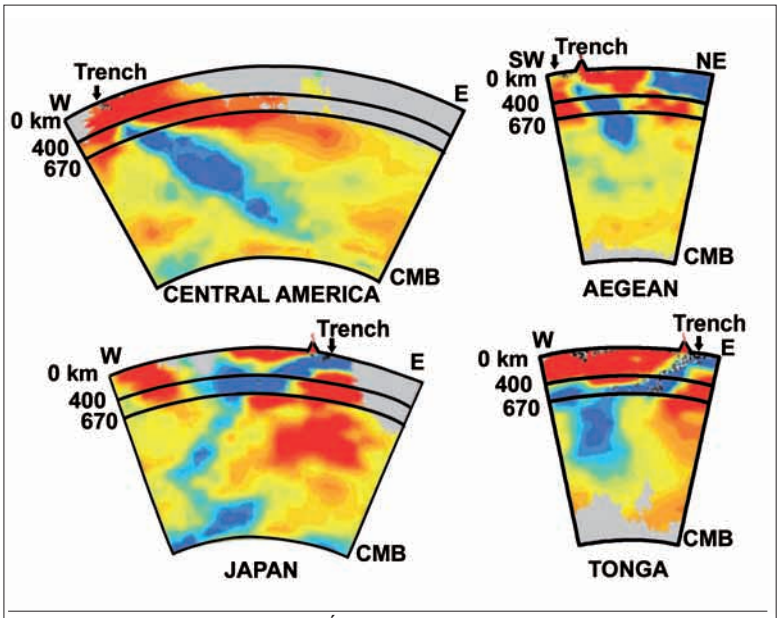
Exemple de graphique obtenu ➤



➤ DOCUMENT 3 Données tomographiques et sismiques

La tomographie sismique peut être comparée à la tomodensitométrie utilisée en médecine (scanner) :

l'étude des ondes traversant les structures internes à partir d'un grand nombre de trajectoires (séismes pour le globe, émetteur de rayons X mobile pour le scanner) permet après des calculs complexes de reconstituer des coupes des zones traversées. Dans le cas du globe, la vitesse des ondes sismiques est modifiée en fonction de la densité, de la température et de la fluidité des matériaux traversés. Les matériaux plus chauds (et plus fluides) ralentissent les ondes (=> valeurs négatives par rapport à la moyenne), alors que les matériaux les plus froids (moins fluides) les accélèrent (valeurs supérieures à la moyenne) => échelle de couleurs "Perturbations".



Trench = fosse / AEGEAN = mer Égée
CMB (Core-Mantle Boundary) = limite manteau noyau (discontinuité de Gutemberg

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosgeol/
rubrique "images" puis "subduction des plaques".

SISMO MAGNITUDE

THÈME
Tectonique.

OBJECTIF
Comprendre les abaques donnant la magnitude d'un séisme en fonction de la distance du séisme et de l'amplitude de l'enregistrement.

MOTS-CLÉS
Faille, sismogramme, onde P, onde S, épicentre, magnitude, amplitude.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Mathématiques, Physique.

DÉROULEMENT
Les élèves exploitent quelques sismogrammes d'événements sismiques de magnitude connue, enregistrés par les stations du réseau. À partir du délai T_P-T_S d'arrivée des ondes P et S, ils déduisent la distance épicentrale (➤ sismo épicentre).
Puis, ils déterminent l'amplitude maximale des ondes P.
À partir de ces données, ils pourront construire un outil (un abaque) permettant d'évaluer la magnitude d'un événement.

1RE ÉTAPE

Travail de construction de l'abaque des magnitudes.
On présente aux élèves un abaque des magnitudes sur lequel l'échelle des magnitudes n'est pas encore graduée. Ils prennent connaissance des graduations des deux échelles extrêmes : échelles logarithmiques (➤ document 4).
Les élèves analysent un sismogramme enregistré sur la station d'étude (➤ document 1) et placent les données ainsi recueillies sur l'abaque.

2E ÉTAPE

Utilisation de l'abaque (➤ document 2).
On étudie ensuite un enregistrement nouveau ; les élèves peuvent alors l'exploiter et déduire la magnitude de l'événement.
Chaque abaque est valable pour une station donnée.
Pourquoi et comment ces trois grandeurs (distance, magnitude et amplitude du séisme ressenti) sont-elles reliées ?
Pourquoi de cette façon ?

- On imagine d'abord un séisme enregistré avec une certaine amplitude de "x" counts : c'est un point fixe du segment sur l'axe de droite. Alors, si la distance de l'épicentre est plus grande, c'est que la magnitude est plus grande.
- On imagine ensuite un séisme à une distance "y" donnée : c'est un point fixe de l'axe de gauche, cette fois. Alors, si l'amplitude du séisme ressenti est plus grande, c'est que la magnitude est plus grande.
- Enfin et surtout, on considère un séisme de magnitude "M" donnée, on voit que le segment qui relie les trois grandeurs va pivoter autour de cette valeur de "M" : plus un séisme est éloigné, plus l'amplitude ressentie est faible, et inversement.

On comprend mieux maintenant cet abaque un peu complexe.

3E ÉTAPE

Atténuation de l'énergie.
L'étape précédente a montré que l'énergie propagée par l'onde décroît avec la distance où l'on se trouve par rapport à l'épicentre.
On peut laisser les élèves émettre des hypothèses.
La plus évidente est sans doute l'amortissement de l'onde : les frottements transforment une partie de l'énergie en énergie thermique au fil de la propagation.
On peut vérifier l'exactitude de cette hypothèse sur la cuve à onde propageant une onde plane (➤ document 3a). Mais pourquoi l'amplitude des ondes produites par la même cuve à onde diminue-t-elle plus rapidement dans le cas d'une onde circulaire ? (➤ document 3b). Il y a donc une autre raison qui produit une décroissance de l'amplitude (et donc de l'énergie reçue) à une distance donnée : la même énergie doit se répartir sur une surface de plus en plus grande à mesure que l'on s'éloigne de la source, car elle se répartit sur tout le cercle (tout le volume dans le cas d'une onde sismique).

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

Tous les résultats obtenus ne cadrent pas toujours avec l'échelle des magnitudes ; il faut privilégier les tracés les moins bruités ; mais on n'oubliera pas que toute mesure est incertaine et que, même dans le réseau professionnel, la détermination d'une magnitude ne se fait jamais sur un seul appareil mais par une moyenne sur une dizaine de sismographes.

➤ DOCUMENT 1 Enregistrement à SETF d'un événement sismique

Figure 1a

On distingue nettement les ondes P et S sur cet enregistrement du mouvement vertical. Le pointage de l'intervalle de temps Tp-Ts est possible. On peut aussi connaître directement la distance de l'épicentre grâce à la rubrique "information".

Distance épicentrale = 33 km.

EXEMPLE : séisme du 01/07/2001 enregistré à Saint-Étienne-de-Tinée (SETF). On mesure pour les ondes P sur la composante verticale Z une amplitude maximale de 25 587 counts, dont l'épicentre était à 33 km de la station, et dont la magnitude était 3,4. On place donc la graduation 3,4 de l'échelle des magnitudes.

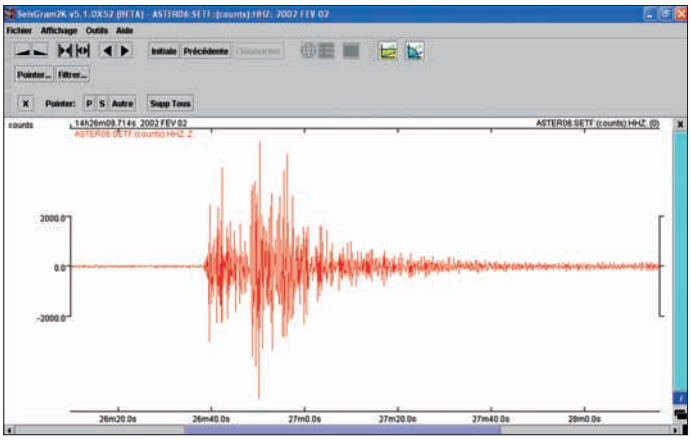
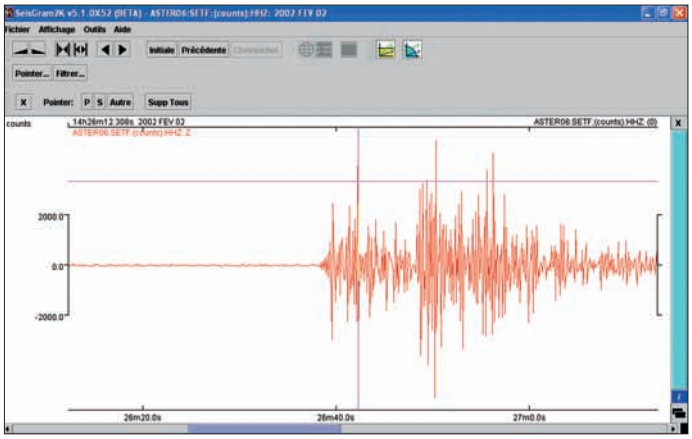


Figure 1b

On a agrandi l'enregistrement avec la fonction "zoom" et on a pointé la valeur maximale de l'amplitude de l'onde P :
Amp = 25 587 counts
(count : unité numérique, fournie en ordonnée sur les sismogrammes, proportionnelle à la vitesse de mouvement du sol mesuré par le sismomètre).

On mesurera toujours sur une même station l'amplitude des ondes P (ondes transversales de volume) sur la composante verticale Z.

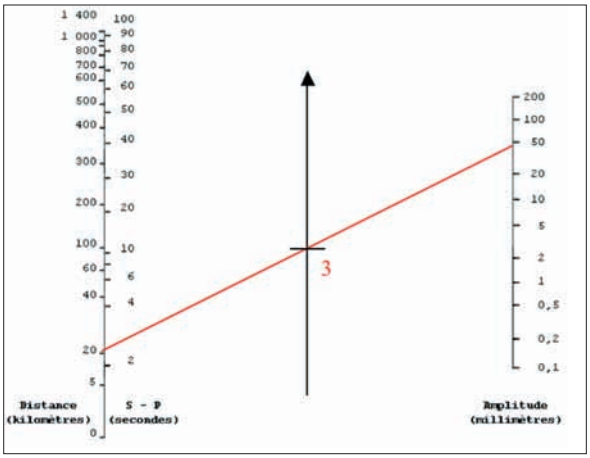


➤ DOCUMENT 2

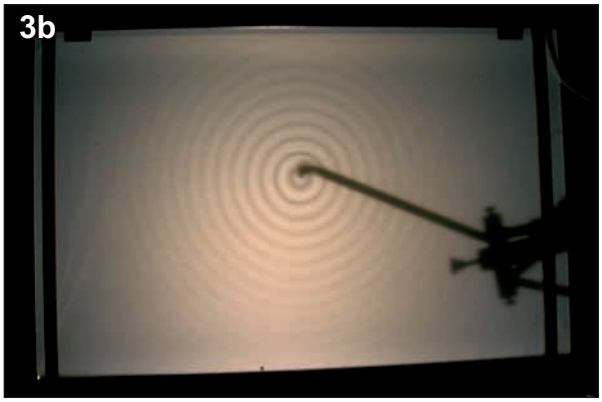
Un exemple d'abaque en construction.
L'axe central est l'axe des magnitudes.

Un premier séisme a permis de situer la valeur de magnitude 3.

On trouvera en ➤ document 4 un document permettant de travailler avec une classe.

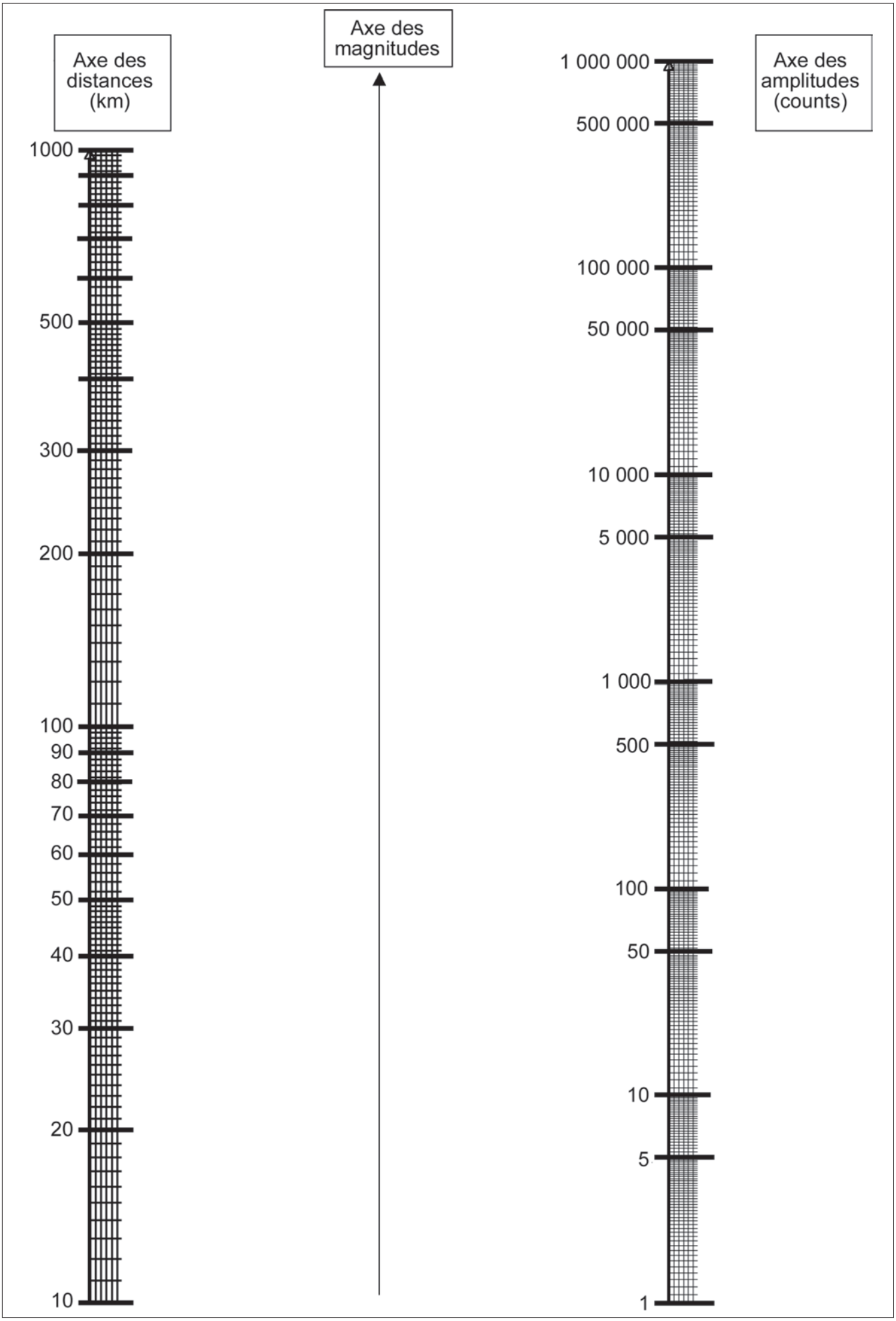


➤ DOCUMENT 3 Ondes à la surface de l'eau



On voit, soit une onde rectiligne à la surface de l'eau (3a), soit une onde circulaire (3b). Les deux ont la même amplitude à la source et la cuve est la même dans les deux cas. Pourtant, on voit l'amortissement plus rapide dans le second cas : l'énergie se répartit sur une ligne de plus en plus grande dans le cas d'une onde circulaire (3b).

➤ DOCUMENT 4


Axe des distances (km)
1000
500
300
200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
Axe des magnitudes
1 000 000
500 000
100 000
50 000
10 000
5 000
1 000
500
100
50
10
5
1
Axe des amplitudes (counts)