

Activité n°1 : Présentation des ondes mécaniques

On considère l'expérience suivante : Une balle vient frapper une tige métallique horizontale. On observe après le choc, la mise en mouvement d'une deuxième balle placée à l'autre extrémité de la tige : Pourquoi ? Est-ce instantané ?

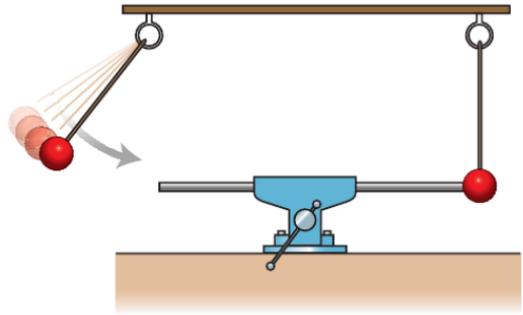


Schéma n°1

Expliquez cette expérience à l'aide des deux illustrations ci-dessous et des questions suivantes :

- Qu'est ce qu'une onde ?
- Que transporte ou ne transporte pas une onde ?
- Représenter la situation « d », sachant que dans la position « a » toutes les sphères sont immobiles.
- Déterminer le retard de l'onde entre les séquences « b » et « c ».
- Calculer sur le schéma « 3 » la vitesse de propagation de l'onde en supposant que l'image est à l'échelle réelle.

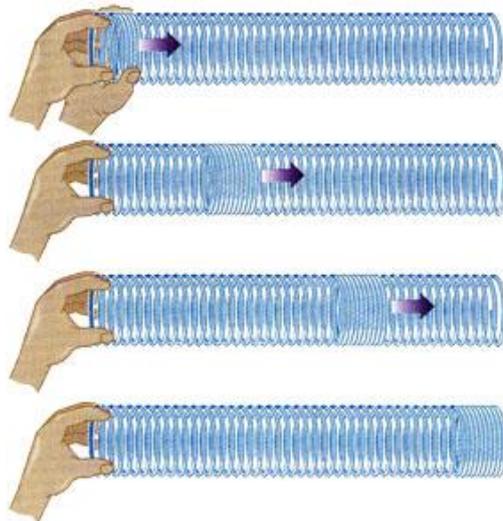
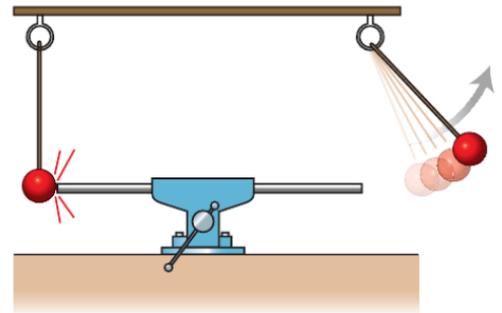


Figure 12.27 Onde longitudinale dans un ressort.

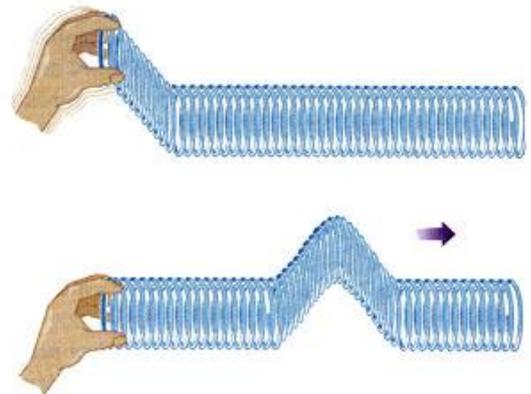


Figure 12.28 Onde transversale dans un ressort.

Schéma n°2

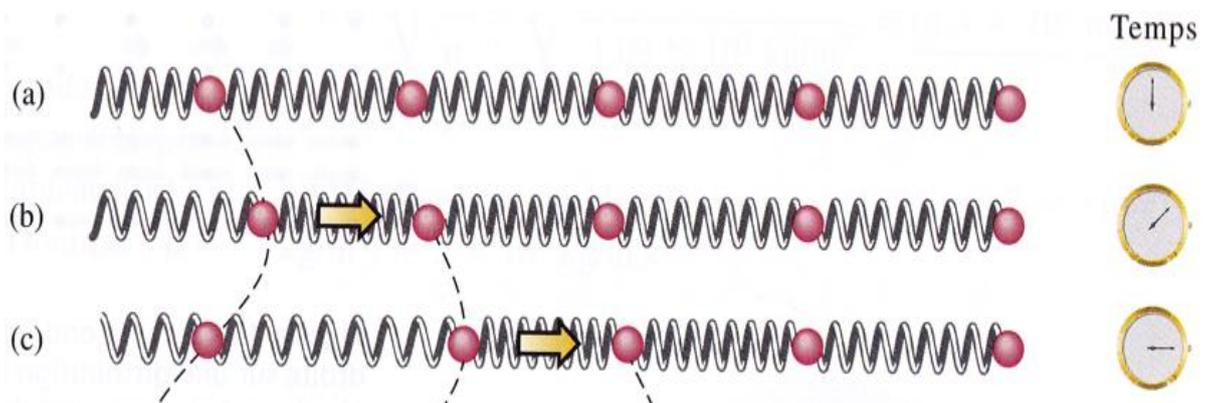


Schéma n° 3

Étude de documents

Un géophysicien raconte le séisme de Sendai au large de l'île d'Honshu (Japon)

« Le 11 mars vers 14 h 50 heure de Tokyo, nos travaux ont été interrompus par les premières arrivées (ondes P, mouvements verticaux) d'un gros séisme. [...] L'arrivée brutale des ondes secondaires de cisaillement (ondes S) m'a vite convaincu qu'il fallait sortir rapidement du bâtiment. [...] [Quelques minutes plus tard], les sismologues japonais faisaient déjà parvenir par Internet la localisation de l'épicentre du séisme à 130 km au large de la ville de Sendai, qui est à 350 km au nord de Tokyo. Ils précisaient par une première série d'estimations que la magnitude devait être de 7,8, ce qui m'a semblé sous-estimé d'après mon expérience de Sumatra, que la profondeur du séisme devait se situer à une vingtaine de km, et qu'un tsunami de l'ordre de 3 m était prévisible [...]. [Une heure trente plus tard,] j'ai regardé le site de l'USGS (US Geological Survey), qui donnait une magnitude de 8,9 au lieu de 7,8, ce qui correspond à une énergie libérée plus de 30 fois supérieure à celle initialement estimée. »

Extrait du récit du géophysicien Jean-Claude Sibuet
publié le 14 mars 2011 par Sylvestre Huet,
journaliste à *Libération*, sur son blog.

1. L'enregistrement du séisme

La date, la localisation et la magnitude d'un séisme sont calculables dès lors que le décalage temporel entre l'arrivée des différents types d'ondes et l'amplitude des secousses engendrées sont connues en au moins trois points du globe. La précision augmente avec le nombre de points utilisés.

Les sismomètres des stations de détection réparties à travers le monde enregistrent les vibrations du sol à l'aide de capteurs très sensibles, qui transforment les déplacements du sol en signaux électriques.

Le sismogramme obtenu à Canberra (Australie) le 11 mars 2011 (Fig. 1) suite au séisme de Sendai donne l'enregistrement des vibrations dans trois directions orthogonales : une verticale (trace rouge), et deux horizontales orientées Est-Ouest (trace bleue) et Nord-Sud (trace verte). Le temps est donné en temps universel TU. Les traits verticaux en pointillés repèrent les arrivées des ondes S et P et celle des ondes de surface.

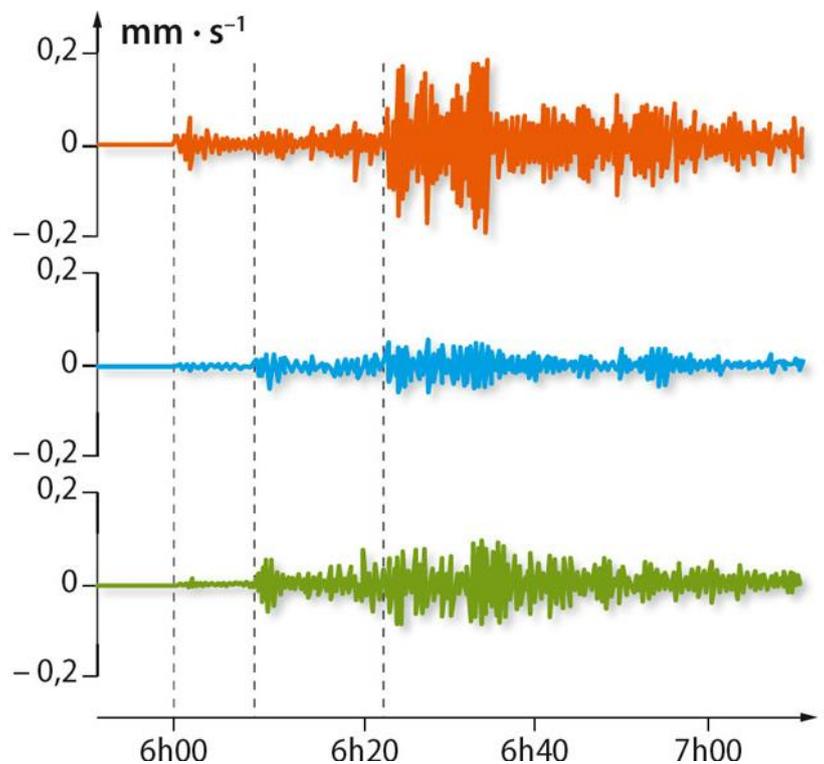


Fig. 1 : Sismogramme du 11 mars 2011 à

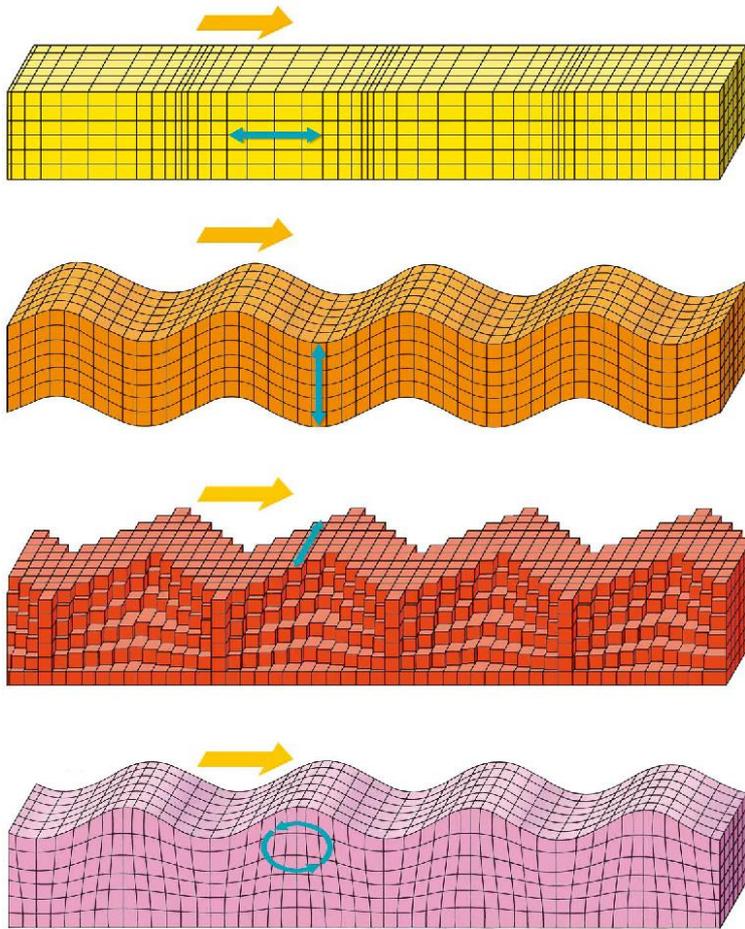


Fig. 2 : Déformation du sol lors du passage des différents types d'ondes sismiques.

2. Modélisation de la propagation des ondes sismiques

Quand la Terre tremble, les vibrations se propagent à partir du foyer dans toutes les directions. Elles sont initialement de deux types. Celles qui compriment et détendent alternativement les roches, à la manière d'un accordéon, et celles plus destructrices qui les cisailent. [...] les ondes P vibrent dans leur direction de propagation, elles soulèvent ou affaissent le sol, tandis que les ondes S vibrent perpendiculairement et nous secouent horizontalement. [...] Mais les secousses ne s'arrêtent pas là. D'autres ondes succèdent à ces premiers ébranlements. En effet la Terre n'étant pas homogène, les ondes P et S sont réfléchies, réfractées par les différentes couches. Elles peuvent être aussi guidées par la surface du sol et former alors les ondes de Rayleigh et de Love. Celles-ci arrivent plus tard et se propagent de manière complexe.

Hélène Le Meur, « Les séismes », *La Recherche* n° 310, juin 1998.

Sachant que les ondes P se propagent dans les solides, les liquides et les gaz, alors que les ondes S ne se propagent que dans les solides, l'étude des sismogrammes enregistrés lors de milliers de séismes a permis d'établir le comportement des ondes qui se propagent à l'intérieur de la Terre (**Fig. 3**), et ainsi de décrire les différentes enveloppes concentriques qui constituent l'intérieur du globe (**Fig.4**).

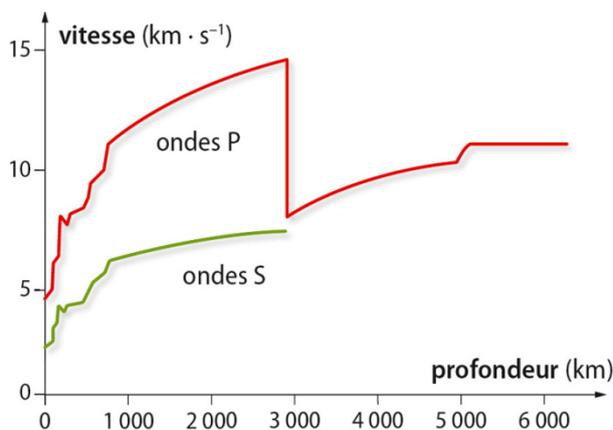


Fig. 3 : Variation avec la profondeur de la vitesse de propagation des ondes « de volume » dans le globe terrestre.

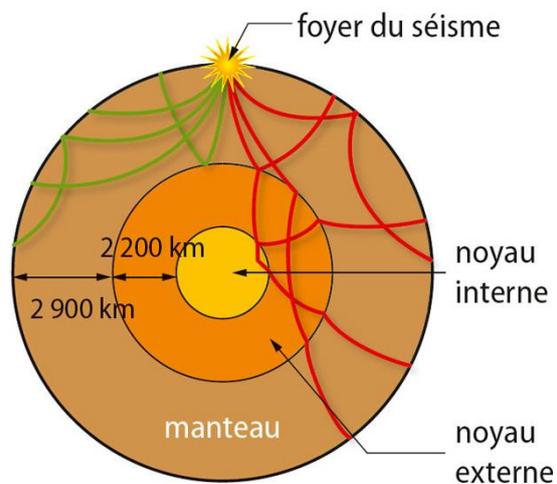


Fig. 4 : Exemples de trajectoires suivies à l'intérieur du globe terrestre par les ondes P (en rouge) et les ondes S (en vert)

3. Échelle de magnitude

La magnitude permet d'estimer l'énergie libérée par un séisme à partir de l'analyse des sismogrammes.

Cette grandeur a été introduite en 1935 par l'Américain C.F. Richter, pour comparer les tremblements de terre californiens sur une échelle logarithmique. Sa valeur, qui est un nombre sans dimension, se calcule à partir des amplitudes maximales des ondes enregistrées et nécessite des corrections pour tenir compte des caractéristiques du sismomètre et de sa distance au foyer du séisme. Cette mesure n'est valable que pour les stations de détection proches du séisme; elle est maintenant appelée magnitude locale. Les sismologues lui préfèrent aujourd'hui la magnitude de moment M , moins immédiate à déterminer, mais plus fiable, surtout pour les gros séismes.

L'énergie sismique ΔE émise au foyer sous forme d'ondes peut être évaluée (en joule) par la relation :

$$\log \Delta E = 1,5 M + 4,32$$

Pistes de réflexion

Propagation des ondes sismiques

- Dans quelle(s) direction(s) se propagent les ondes sismiques à partir du foyer ?
 - Citer les différents types d'ondes sismiques. Lesquelles sont émises au foyer ?
- Comparer la direction de propagation des ondes P et S à celle des déformations provoquées.
 - Associer à chacune d'elles le type d'onde correspondant :
 - onde mécanique de compression-dilatation;
 - onde mécanique de cisaillement.
- Commenter l'évolution de la vitesse des ondes P et S dans le manteau du globe terrestre. Comparer la valeur de leur vitesse.
 - Comment expliquer que la vitesse des ondes S s'annule à une profondeur de 2 900 km ?
- Sachant que les ondes mécaniques suivent les mêmes lois de propagation que la lumière, expliquer, à l'aide des figures 3 et 4, pourquoi à l'intérieur du globe les ondes :
 - ne se propagent pas en ligne droite ;
 - sont réfléchies et réfractées.

Exploitation d'un sismogramme

- Donner l'ordre d'arrivée des ondes P et S sur un sismogramme. Déterminer leur décalage temporel Δt à Canberra. Serait-il le même dans une autre station sismique ?
 - Montrer que si les ondes S et P se propageaient avec des vitesses constantes v_S et v_P , la distance d entre le foyer du séisme et Canberra vérifierait : $\Delta t = d \cdot (1/v_S - 1/v_P)$.
- Sur quelle trace de la figure 1 les ondes P sont-elles le mieux détectées ? Sont-elles observées sur les deux autres ?
- Calculer l'énergie ΔE émise lors du séisme de Sendai.
 - Vérifier qu'une magnitude de 8,9 au lieu de 7,8 correspond à une énergie libérée plus de 30 fois supérieure.

Pour conclure

- Quels intérêts y a-t-il à enregistrer les ondes sismiques ?
 - Expliquer pourquoi la localisation et l'évaluation de la magnitude d'un séisme sont complexes et nécessitent des mesures provenant de plusieurs stations sismiques.
 - Pourquoi caractériser un séisme par sa magnitude plutôt que par la valeur de l'énergie libérée au foyer ?

Activité n°3 : la houle

Document 1 : Caractéristiques des vagues

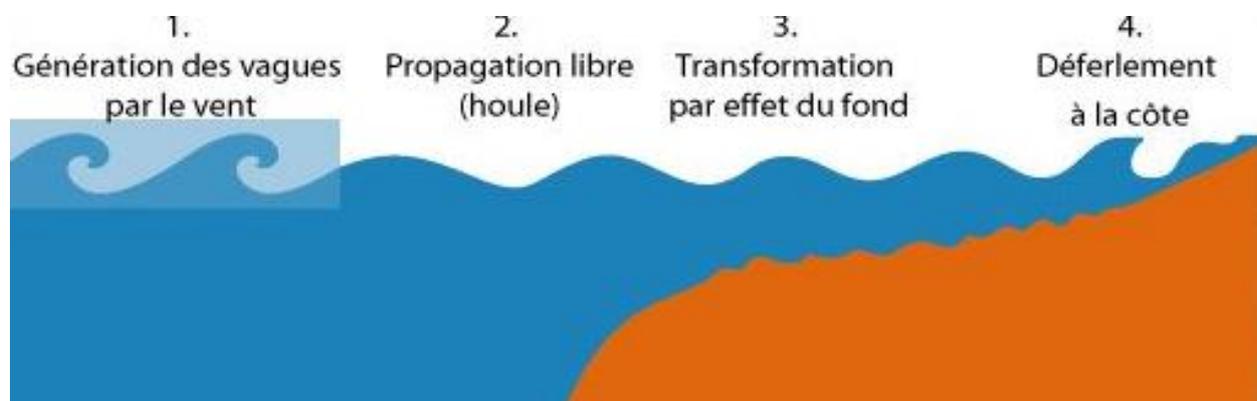
Les vagues sont le déplacement à la surface des océans d'ondes périodiques générées par le vent. En l'absence de vent les vagues continuent à se propager librement, c'est ce qu'on appelle la houle

Il faut faire la distinction entre les vagues ordinaires, dues à un simple vent sur la mer, et la houle causée par des courants atmosphériques éloignés. La hauteur, la longueur entre les crêtes, la période et la direction des vagues sont très variables.

Parmi les différents types de vagues, on nomme houle forte les ondes d'une période moyenne de 20 s, qui se traduit par des écartements de plus de 600 m et des vitesses de propagation supérieures à 30 m/s. Les vagues de houle ordinaire, plus rapprochées, ont une période d'environ 10 s pour un écartement de 150 m et une vitesse de 15 m/s. Les vagues de vent marin, d'une période de 7 s, ont un écartement de 75 m pour une vitesse de 11 m/s. Enfin les vagues du littoral, à l'intérieur des baies, ont des périodes plus courtes, de l'ordre de 3 s, ce qui se traduit par des écartements de 15 m et des vitesses de 5 m/s. Les rides à la surface des étangs ont une période de 0,5 s, une longueur de 0,4 m et une vitesse de 0,8 m/s.

D'après <http://users.belgacom.net/renebec/pagesci12.html>

Document 2 : vie et mort d'une vague



D'après <http://users.belgacom.net/renebec/pagesci12.html>

Document 3 : houle et hauteur

Le « déplacement » de la mer par la houle est une apparence, et les vagues y transportent de l'énergie, non de la matière : en fait, une particule élémentaire d'eau de mer, au creux d'une vague, est soulevée vers l'arrière et effectue sur place un mouvement presque circulaire avant de retrouver sa position de départ au bout d'un temps égal à la période (plus la particule est éloignée de la surface, plus petit est le rayon du cercle ainsi décrit).

La hauteur des vagues, précisément, est une caractéristique des plus importantes de la houle, dont elle mesure l'amplitude. La hauteur significative de vagues qui se forment va dépendre de la force du vent et de sa durée d'action, mais aussi du fetch, qui est la longueur du trajet suivant lequel le vent souffle au-dessus de la mer sans changer notablement de vitesse ni de direction.

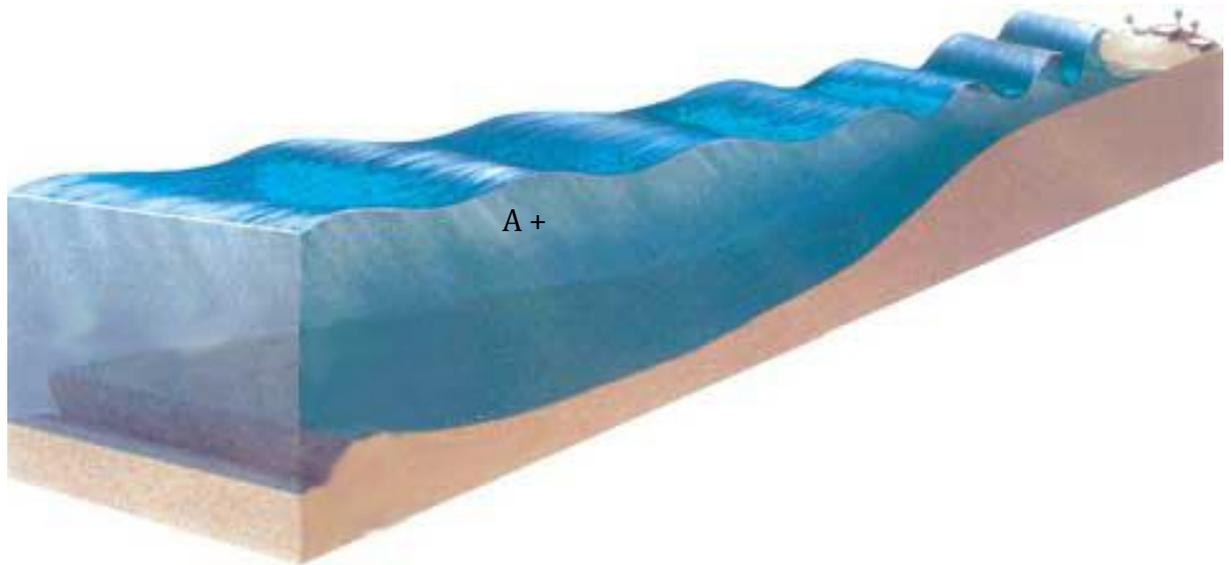
D'après :

http://comprendre.meteofrance.com/jsp/site/Portal.jsp?&page_id=2834&document_id=1648&portlet_id=1768

Questions

1. Quelle partie de l'existence d'une vague peut être modélisée par une onde ?
2. Quelle est l'origine de l'énergie transportée par ces ondes mécaniques ?

3. Sur le schéma ci-dessous, représentez ce que le document 1 appelle « écartement ».

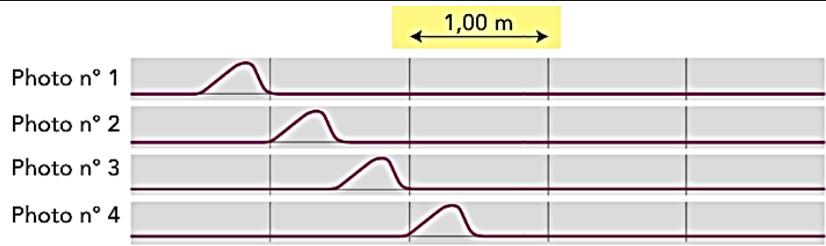


4. Sur le même schéma, représenter la trajectoire de la particule A.
5. Rappeler la définition d'une période.
6. Compléter le tableau suivant à l'aide des textes :

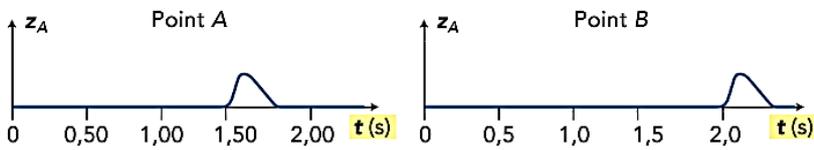
Type de vagues	Vitesse (.....)	Période (.....)	Ecartement (...)	Relation

7. En déduire une relation entre la vitesse de propagation, la période et « l'écartement ».
 Votre raisonnement pourra s'appuyer sur une équation aux dimensions.

Exercice 35 p59 : Propagation d'une onde le long d'une corde



La propagation d'une onde le long de la corde est étudiée par chronophotographie. Quatre images consécutives sont reproduites ci-dessus.
 L'intervalle de temps séparant deux photos consécutives est $\Delta t = 0,25 \text{ s}$.



L'évolution au cours du temps des altitudes z_A et z_B de deux points A et B de la corde est représentée sur les schémas ci-dessus. On note S le point situé à l'extrémité gauche de la corde.
 La date $t_0 = 0 \text{ s}$ correspond au début du mouvement de S.

1. Définir puis calculer la valeur de la vitesse de propagation d'une onde.
2. Pendant quelle durée un point de la corde est-il en mouvement?
3. Lequel des deux points A et B est atteint le premier par la perturbation?
4. Lequel de ces deux points est situé le plus près du point S de la corde?
5. Avec quel retard le point touché en second reproduit-il le mouvement du point touché en premier?
6. Quelle est la distance séparant les points A et B?
7. Expliquer pourquoi l'allure de la perturbation lors de l'évolution au cours du temps est inversée par rapport à l'allure de la perturbation lors de la chronophotographie.
8. Dessiner l'évolution au cours du temps d'un point C situé à 1,5 m de A.

Exercice 2 p31 : Les séismes

Le vendredi 11 mars 2011 un très violent séisme s'est produit au large du Japon. Des vagues de 10 m de hauteur ont ravagé Sendai, la ville la plus proche de l'épicentre, et ses environs. Les jours suivants, de nombreuses répliques se sont succédé.



Qu'est-ce qu'un séisme?

Les séismes sont, avec le volcanisme, l'une des manifestations de la tectonique des plaques. L'activité sismique est concentrée le long de failles (zones de rupture dans la roche), en général à proximité de frontières entre deux plaques tectoniques. Lorsque les frottements au niveau d'une faille deviennent importants, le mouvement entre les deux blocs de roche est bloqué. De l'énergie est alors accumulée le long de la faille. Quand la limite de résistance des roches est atteinte, il y a rupture et déplacement brutal de part et d'autre de cette faille; l'énergie accumulée parfois pendant des milliers d'années se trouve ainsi libérée. Après une secousse principale, il y a des répliques, qui correspondent à des réajustements des blocs au voisinage de la faille.

Comment mesurer l'importance d'un séisme?

Il ne faut pas confondre magnitude et intensité.

La **magnitude** traduit l'énergie libérée par le séisme. La magnitude de Richter est l'échelle la plus connue, mais, aujourd'hui, d'autres échelles de magnitude, comme la magnitude de moment, sont davantage utilisées. Augmenter la magnitude d'une unité signifie que l'énergie libérée lors du séisme sera multipliée environ par 30. Par exemple, un séisme de magnitude 7,2 libère 30 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 6,2.

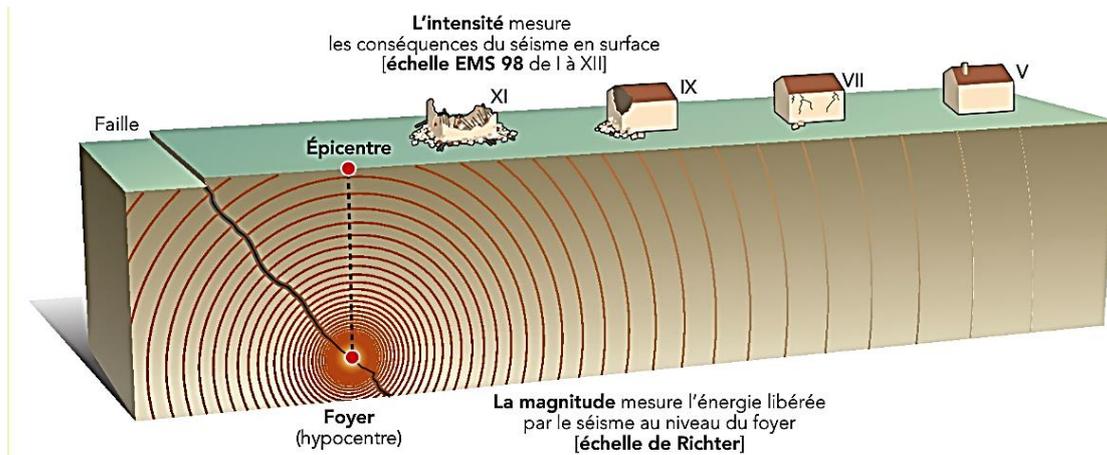
L'**intensité** mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné. Ce n'est pas une mesure par des instruments, mais une observation de la manière dont le séisme se traduit en surface et dont il est perçu. On utilise habituellement l'échelle EMS 98 ou MSK, qui comportent douze degrés (I à XII). L'intensité I correspond à un séisme non perceptible, le début de dégâts notables correspond à l'intensité VI, l'intensité XII correspond à un changement total du paysage. L'intensité n'est donc pas, contrairement à la magnitude, fonction uniquement du séisme,



Ruine d'une maison détruite par un séisme et un tsunami, Indonésie.

mais également des caractéristiques du lieu de l'observation (nature du sol et du sous-sol, bâtiments plus ou moins fragiles par exemple). En effet, les conditions topographiques (reliefs) ou géologiques locales (particulièrement des terrains mous reposant sur des roches plus dures) peuvent créer des effets de site qui amplifient l'intensité d'un séisme. Sans effet de site, l'intensité d'un séisme est en général maximale à l'épicentre et décroît avec la distance.

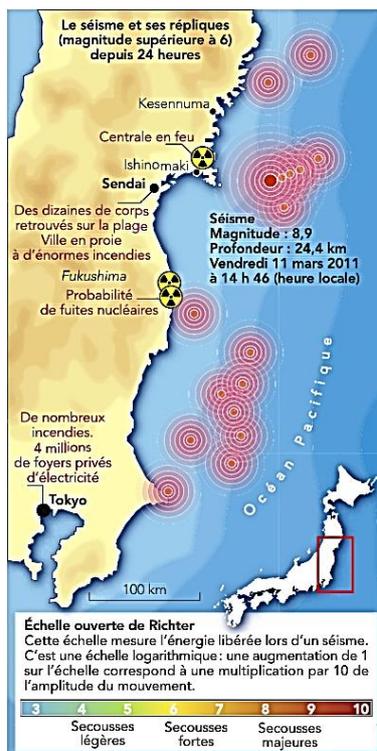
Extrait du site prim.net



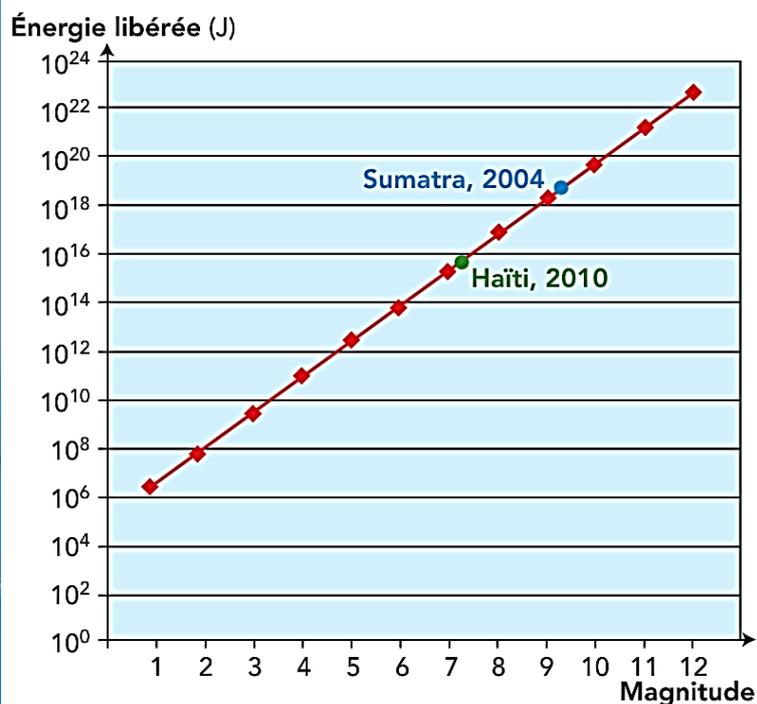
Doc. 1 Extrait du site Internet risquesmajeurs.fr, présentant la différence entre magnitude et intensité d'un séisme.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE SÉISMES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES (SELON L'ÉCHELLE DE RICHTER)			
MAGNITUDE	DESCRIPTION	EFFETS CONSTATÉS	FRÉQUENCE MOYENNE DANS LE MONDE
Moins de 2,0	Micro	Non ressenti	8 000 par jour
2,0 à 2,9	Très mineur	Généralement non ressenti, mais détecté par les sismographes	1 000 par jour
3,0 à 3,9	Mineur	Souvent ressenti, causant très peu de dommages	50 000 par an
4,0 à 4,9	Léger	Objets secoués à l'intérieur des maisons, bruits de chocs, quelques dommages	6 000 par an
5,0 à 5,9	Modéré	Dommages légers à majeurs selon les habitations	800 par an
6,0 à 6,9	Fort	Destructions jusqu'à environ 200 km de l'épicentre	120 par an
7,0 à 7,9	Majeur	Dommages sévères dans des zones plus vastes	18 par an
8,0 à 8,9	Important	Dommages sérieux jusqu'à des centaines de kilomètres de l'épicentre	1 par an
9,0 et plus	Exceptionnel	Dommages très sérieux jusqu'à des centaines de kilomètres de l'épicentre	1 à 5 par siècle

Doc. 2 Les différents types de séismes en fonction de leur magnitude.



Doc. 3 Infographie parue sur lemonde.fr et présentant le séisme du 11 mars 2011.



Doc. 4 Énergie libérée en fonction de la magnitude (échelle logarithmique des ordonnées).

1. Expliquer le terme « ouverte » dans l'expression du **document 3** « Échelle ouverte de Richter ».
2. À partir des exemples de Sumatra 2004 (magnitude 9,2) et Haïti 2010 (magnitude 7,2) présentés dans le **document 4**, retrouver le lien entre l'augmentation de magnitude et l'augmentation de l'énergie libérée indiqué dans le texte du **document 1**.
3. Critiquer la définition de l'échelle de Richter donnée dans le **document 3** : « C'est une échelle logarithmique : une augmentation de 1 sur l'échelle correspond à une multiplication par 10 de l'amplitude du mouvement. »
4. L'axe des ordonnées du **document 4** est gradué suivant une échelle logarithmique. Comment une telle échelle est-elle construite ?
5. Expliquer les terribles ravages qui ont suivi le tremblement de terre du vendredi 11 mars 2011.
6. De quoi dépend l'intensité d'un séisme ?

LES MARÉGRAPHES CÔTIERS NUMÉRIQUES

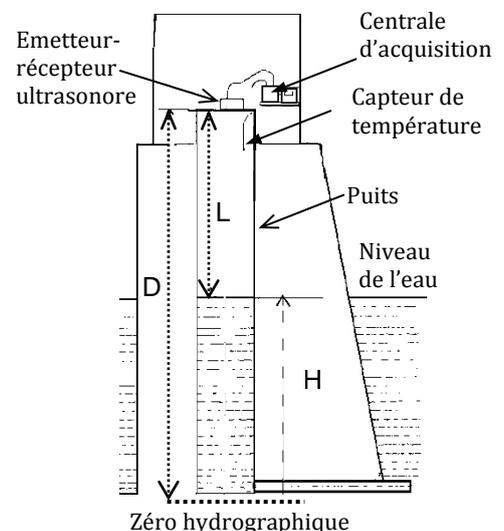
.... « *Quand tu vas commencer à mesurer le fond de la mer, fais bien attention de ne pas trop te pencher, et de ne pas tomber par-dessus bord – et là où ça sera trop profond laisse un peu mesurer les autres....* » .

D'après Fanny de PAGNOL (Acte premier, scène XIV)

Depuis 1992, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) a décidé de placer sur les côtes françaises un réseau de marégraphes numériques permanents, appelés MCN (marégraphes côtiers numériques). Ces dispositifs sont destinés à observer les hauteurs des marées.

Le MCN est équipé d'un télémètre. Certains télémètres en service sont constitués d'un émetteur et d'un récepteur d'ultrasons : placés au-dessus de l'eau, ils émettent des salves courtes d'ultrasons et détectent le signal réfléchi par la surface de l'eau. Le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal peut être traduit en hauteur d'eau : on utilise ainsi le MCN pour mesurer la hauteur de la marée.

Le schéma de l'observatoire de Brest-Penfeld illustre ce principe :



1. Principe de fonctionnement du MCN.

1.1. Les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques longitudinales.

1.1.1. Définir une onde mécanique.

1.1.2. Que signifie l'expression « onde longitudinale » ?

1.2. Exprimer la durée Δt écoulée entre l'émission et la réception d'une salve d'ultrasons, en fonction de L et v , où v désigne la célérité du son dans l'air.

1.3. La hauteur H de la marée est repérée par rapport à une référence appelée «zéro hydrographique».

Établir l'expression de H en fonction de D , v et Δt .

1.4. Le télémètre est placé à 10 m au-dessus du zéro hydrographique. On donne un extrait des hauteurs de marées mesurées le dimanche 31 juillet 2005 à Fort-Mahon :

Date	Heure	Hauteur
Dimanche 31/07/05	03h19	3,07 m
	09h00	7,50 m
	15h52	3,20 m
	21h32	7,63 m

Calculer la durée Δt_1 qui a permis de calculer la hauteur d'eau à marée basse à 15h52.

On supposera qu'au moment de cette mesure, la célérité du son dans l'air vaut 340 m.s^{-1} et la température de l'air est $\theta_1 = 14 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.5. Le même jour au Cap Ferret, avec une installation identique à celle de Fort-Mahon, une durée Δt_2 supérieure à Δt_1 a conduit à la même valeur de hauteur d'eau H que précédemment.

1.5.1. Dans l'expression établie à la question 1.3., quelle est la grandeur physique responsable de la différence de la durée Δt de propagation des salves d'ultrasons entre Le Cap Ferret et Fort-Mahon ? Justifier la réponse.

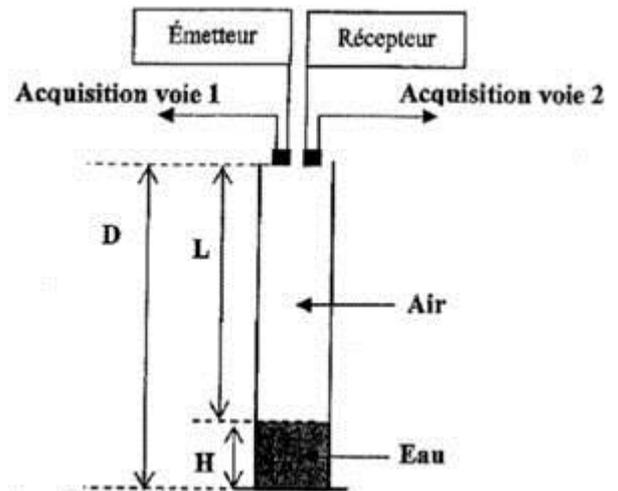
1.5.2. Cette grandeur a-t-elle augmenté ou diminué ?

1.5.3. Justifier la présence d'un capteur de température dans le marégraphe.

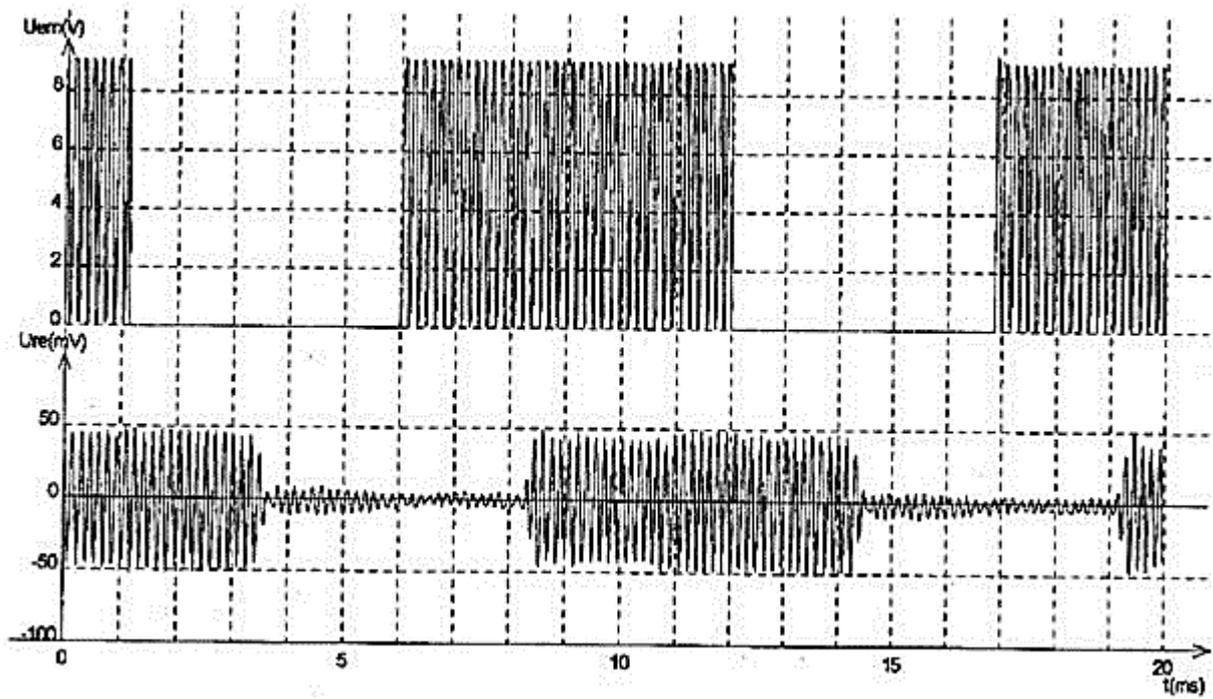
2. Une maquette du MCN.

Etienne, élève de terminale S, décide de mettre en œuvre, avec le matériel du lycée (une grande éprouvette, un émetteur et un récepteur d'ultrasons et un dispositif d'acquisition), le principe du marégraphe à ultrasons.

Il réalise le dispositif schématisé ci-contre, où l'alimentation nécessaire au fonctionnement de l'émetteur n'est pas représentée.



Etienne a réglé l'émetteur sur le mode « émission de salves ». L'enregistrement obtenu apparaît sur le document ci-dessous : les tensions U_{em} et U_{re} correspondent aux tensions acquises respectivement aux bornes de l'émetteur et du récepteur. Pour faciliter la lecture, on a placé les 2 graphes l'un sous l'autre.



Calculer la hauteur d'eau qu'Etienne a placée dans l'éprouvette.

données : $D = 43 \text{ cm}$

Célérité du son dans l'air à la température de l'expérience $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$.