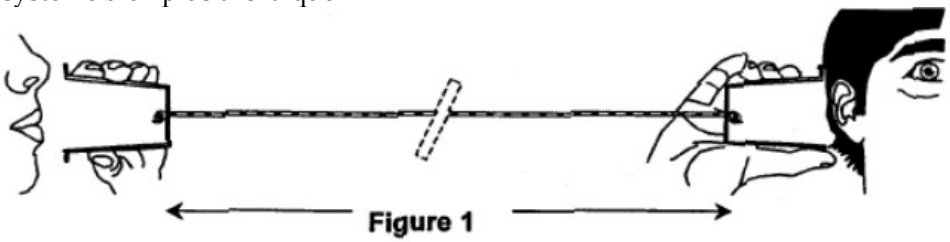
# Les ondes mécaniques – Exercices - Devoirs

## Exercice 1 corrigé disponible

A l'ère du téléphone portable, il est encore possible de communiquer avec un système bien plus archaïque…

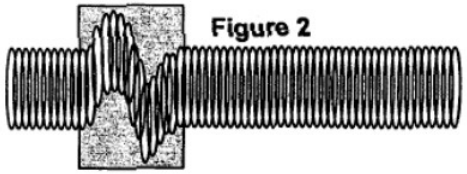


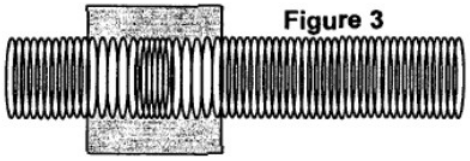

L'onde sonore produite par le premier interlocuteur fait vibrer le fond du pot de yaourt, le mouvement de va et vient de celui-ci, imperceptible à l'œil, crée une perturbation qui se propage le long du fil. Cette perturbation fait vibrer le fond du second pot de yaourt et l'énergie véhiculée par le fil peut être ainsi restituée sous la forme d'une onde sonore perceptible par un second protagoniste.
Données: célérité du son dans l'air à 25°C vair = 340 m.s–1

### A – A PROPOS DES ONDES

1. Identifier la chaîne des différents milieux de propagation des ondes mécaniques au sein du dispositif: de la bouche de la personne qui parle, à l'oreille de la personne qui écoute (figure1).

Ce fil légèrement élastique peut être modélisé par un ressort à spires non jointives. Les schémas suivants illustrent les conséquences de deux modes de déformation d'un ressort: l'écartement d'une extrémité du ressort selon une direction perpendiculaire à l'axe de celui-ci produit une onde de cisaillement (figure 2), alors qu'une déformation selon l'axe du ressort produit une onde de compression (figure 3).

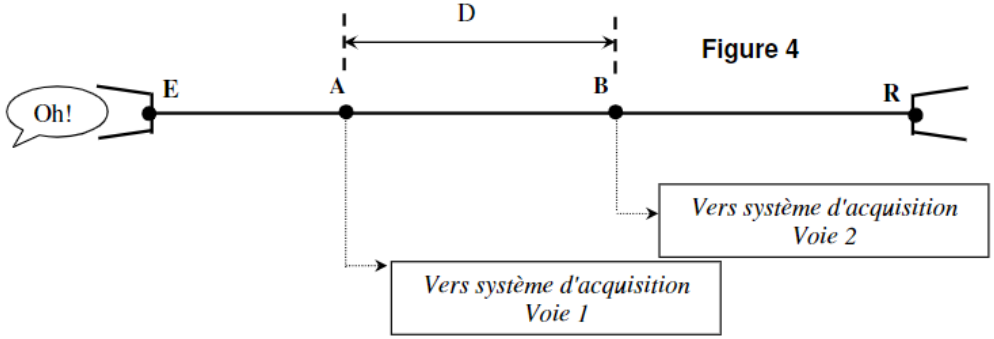



2. Attribuer, à chacune des situations représentées sur les figures 2 et 3, les termes d'onde longitudinale et d'onde transversale. Justifier votre réponse.
Seul le second mode de déformation (figure 3) correspond au phénomène observé sur le fil du dispositif étudié par la suite.

### B – CELERITE DE L'ONDE QUI SE PROPAGE LE LONG DU FIL

A 25°C, on réalise le montage suivant (figure 4), afin de mesurer la célérité des ondes sur le fil du dispositif. Deux capteurs, reliés en deux points A et B distants de D = 20 m sur le fil, du pot de yaourt émetteur E. Les capteurs enregistrent l'amplitude de cette perturbation au cours du temps.




1. A partir de l'enregistrement (figure 5), déterminer avec quel retard τ, par rapport au point A, le point B est atteint par le signal.

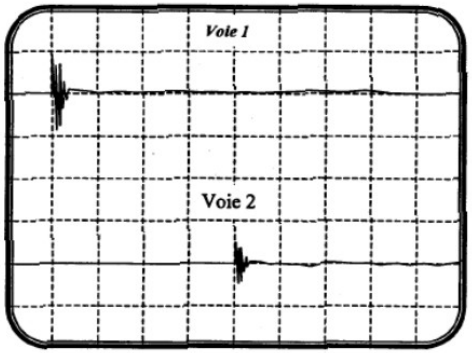



Figure 5

Sensibilité verticale 1 mV / div

Sensibilité horizontale 5 ms / div

2. Donner l'expression de la célérité v de l'onde sur ce fil en fonction de D et $\tau$. Calculer sa valeur. Comparer cette valeur à celle de la célérité du son dans l'air à 25°C. Quelle propriété justifie ce résultat?

Une autre méthode, permettant de déterminer la célérité v de l'onde se propageant dans le fil, consiste à placer, devant le pot de yaourt émetteur, un haut parleur (figure 6) qui émet des ondes sonores sinusoïdales de fréquence $f_E$. Les ondes sinusoïdales qui se propagent dans le fil ont la même fréquence.

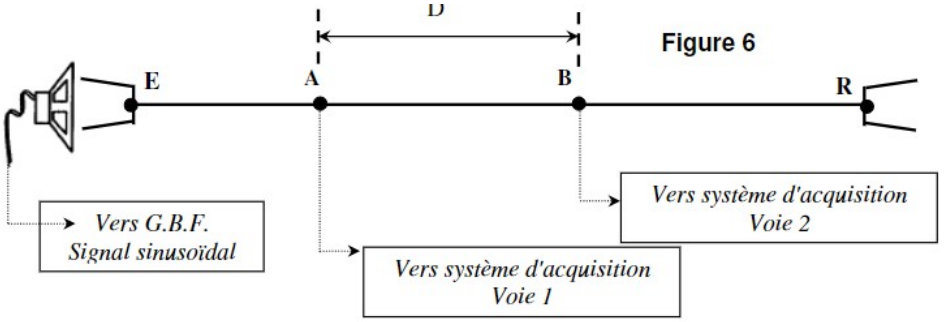


Figure 6

Lorsque la distance D est égale à 20,0 m, on obtient l'enregistrement de la figure 7.

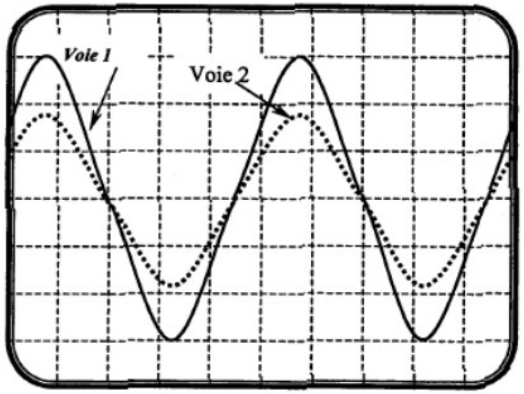


Figure 7

Sensibilité verticale 1 mV / div pour les deux voies
Sensibilité horizontale 1 ms / div

3. Comment peut-on expliquer que l'amplitude du signal au point B (voie 2) soit plus faible que l'amplitude du signal au point A (voie 1) ?
4. A partir de l'enregistrement de la figure 7, déterminer la fréquence de l'onde qui se propage dans le fil.
5. Lorsque l'on éloigne le point B, du point A, on constate que les signaux se retrouvent dans la même configuration pour les valeurs de la distance:
D = 25,0 m, D = 30,0 m, D = 35,0 m …

a) En déduire la valeur de la longueur d'onde $\lambda$ associée à l'onde qui se propage dans le fil, puis la célérité v de cette onde.

b) Sur la figure de l'annexe à rendre avec la copie, représenter l'allure de la courbe que l'on observerait sur la voie 2 si la distance D était égale à 27,5 m.

## Exercice 2 **corrigé disponible**

La houle est un train de vagues régulier généré par un vent soufflant sur une grande étendue de mer sans obstacle, le fetch. En arrivant près du rivage, sous certaines conditions, la houle déferle au grand bonheur des surfeurs ! Les documents utiles à la résolution sont rassemblés à la fin de l'exercice.
Donnée : intensité de la pesanteur : $g = 9{,}8\ m.s^{-2}$.
1. La houle, onde mécanique progressive
1.1. Pourquoi peut-on dire que la houle est une onde mécanique progressive ?
1.2. Il est possible de simuler la houle au laboratoire de physique avec une cuve à ondes en utilisant une lame vibrante qui crée à la surface de l'eau une onde progressive sinusoïdale de fréquence f = 23 Hz. On réalise une photographie du phénomène observé (document 1). Déterminer, en expliquant la méthode utilisée, la vitesse de propagation v de l'onde sinusoïdale générée par le vibreur.
1.3. Au large de la pointe bretonne, à une profondeur de 3000 m, la houle s'est formée avec une longueur d'onde de 60 m. En utilisant le document 2, calculer la vitesse de propagation $v_1$ de cette houle. En déduire sa période T.

2. Surfer sur la vague La houle atteint une côte sablonneuse et rentre dans la catégorie des ondes longues.

2.1. Calculer la nouvelle vitesse de propagation $v_2$ de la houle lorsque la profondeur est égale à 4,0 m, ainsi que sa nouvelle longueur d'onde $\lambda_2$. Les résultats obtenus sont-ils conformes aux informations données dans le document 4 ?

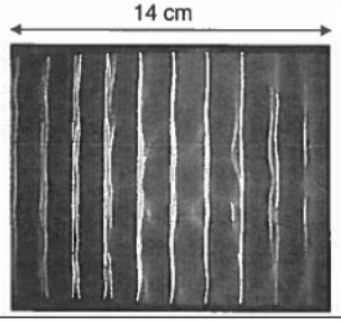
2.2. Pour la pratique du surf, la configuration optimale est :

- à marée montante c'est-à-dire entre le moment de basse mer et celui de pleine mer ;
- avec une direction du vent venant du Sud-Ouest. Un surfeur consulte au préalable un site internet qui lui donne toutes les prévisions concernant le vent, la houle et les horaires des marées (document 5).

Proposer en justifiant, un créneau favorable à la pratique du surf entre le jeudi 21 et le samedi 23 juin 2012.

2.3. Un autre phénomène très attendu par les surfeurs, lors des marées importantes est le mascaret. Le mascaret est une onde de marée qui remonte un fleuve. Cette onde se propage à une vitesse v de l'ordre de 5,1 $m.s^{-1}$. Le passage du mascaret étant observé sur la commune d'Arcins à 17h58, à quelle heure arrivera-t-il à un endroit situé à une distance d = 13 km en amont du fleuve ?

**Document 1 :** Simulation de la houle au laboratoire avec une cuve à ondes.




**Document 2 :** Vitesse de propagation des ondes à la surface de l'eau.

- cas des ondes dites « courtes » (en eau profonde) :

longueur d'onde $\lambda$ faible devant la profondeur h de l'océan ($\lambda < 0,5$ h)

$$v = \sqrt{\frac{g.\lambda}{2\pi}}$$

- cas des ondes dites « longues » (eau peu profonde) :

longueur d'onde $\lambda$ très grande devant la profondeur de l'océan ($\lambda > 10$h)

$$v = \sqrt{g.h}$$

g est l'intensité du champ de pesanteur terrestre.

D'après http://ifremer.fr/

**Document 4 :** Déferlement des vagues sur la côte

En arrivant près de la côte, la houle atteint des eaux peu profondes. Dès que la profondeur est inférieure à la moitié de la longueur d'onde, les particules d'eau sont freinées par frottement avec le sol. La houle est alors ralentie et sa longueur d'onde diminue. Ces modifications des caractéristiques de l'onde s'accompagnent d'une augmentation d'amplitude. La période est la seule propriété de l'onde qui ne change pas à l'approche de la côte.

Ainsi en arrivant près du rivage, la vitesse des particules sur la crête est plus importante que celle des particules dans le creux de l'onde, et lorsque la crête n'est plus en équilibre, la vague déferle.

D'après http://ifremer.fr/

**Document 5 :** Prévisions maritimes.

| GFS 21.06.2012 00 UTC | Je 21 05h | Je 21 08h | Je 21 11h | Je 21 14h | Je 21 17h | Je 21 20h | Ve 22 05h | Ve 22 08h | Ve 22 11h | Ve 22 14h | Ve 22 17h | Ve 22 20h | Sa 23 05h | Sa 23 08h | Sa 23 11h | Sa 23 14h | Sa 23 17h | Sa 23 20h |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vitesse du vent (noeuds) | 4 | 7 | 16 | 23 | 21 | 21 | 17 | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 10 | 10 | 10 | 13 | 14 | 15 |
| Rafales (noeuds) | 5 | 10 | 25 | 28 | 28 | 28 | 23 | 21 | 18 | 19 | 18 | 15 | 13 | 13 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| Direction du vent | ↗ | ↑ | ↑ | ↗ | → | → | → | → | → | → | → | → | ↗ | ↗ | ↗ | ↗ | ↗ | ↗ |
| Vagues (m) | 0.7 | 0.7 | 0.9 | 1.3 | 1.7 | 2.1 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| Période des vagues (s) | 6 | 7 | 4 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Direction des vagues | → | → | ↗ | → | → | → | → | → | → | → | → | → | → | → | → | → | → | → |
| *Température (°C) | 13 | 14 | 14 | 14 | 15 | 14 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 13 | 14 | 15 | 16 | 16 | 15 |

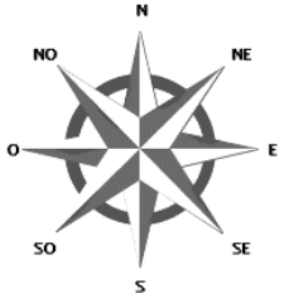



Tableau des marées – Juin 2012

| Jour | Pleine mer (h :min) | | Basse mer (h :min) | |
|---|---|---|---|---|
| Jeudi 21 juin | 06 :54 | 19 :08 | 00 :58 | 13 :10 |
| Vendredi 22 juin | 07 :31 | 19 :44 | 01 :34 | 13 :46 |
| Samedi 23 juin | 08 :08 | 20 :22 | 02 :10 | 14 :24 |
| Dimanche 24 juin | 08 :47 | 21 :02 | 02 :49 | 15 :04 |

D'après http://www.windguru.cz/fr/

## Exercice 3 corrigé disponible

Les données et les informations utilisées dans cet exercice sont issues des sites Internet du Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS) et de l'École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) : http://renass.u-strasbg.fr et http://eost.u-strasbg.fr Le 23 février 2004, un séisme de magnitude 5,1 selon le Réseau National de Surveillance Sismique s'est produit à Roulans (dans le département du Doubs), à 20 km au nord-est de Besançon. Ce séisme a été ressenti très largement en dehors du Doubs dans tout l'est de la France, en Suisse et dans le nord-ouest de l'Allemagne, sans faire de victimes ni de dégâts significatifs. Lors d'un séisme, des ondes traversent la Terre. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques traversées. C'est pourquoi les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure. Parmi les ondes sismiques, on distingue: - les ondes P ou ondes primaires, qui sont des ondes de compression ou ondes longitudinales ; leur célérité $v_p$ vaut en moyenne $v_p = 6{,}0\ km.s^{-1}$. - les ondes S ou ondes secondaires, appelées également ondes de cisaillement ou ondes transversales ; leur célérité $v_s$ vaut en moyenne $v_s = 3{,}5\ km.s^{-1}$.

1. Étude d'un sismogramme L'écart entre les dates d'arrivée des ondes P et S renseigne, connaissant la célérité des ondes, sur l'éloignement du lieu où le séisme s'est produit.Le document 1 présente un extrait de sismogramme relevé dans une station d'enregistrement après le séisme du 23 février de Roulans. On notera $t_0$ la date correspondant au début du séisme, date à laquelle les ondes P et S sont générées simultanément.

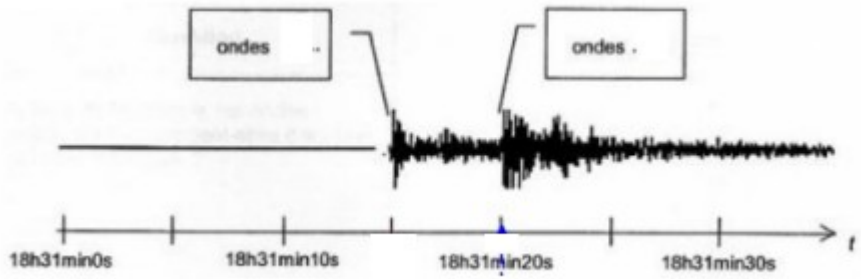
1.1. En utilisant des informations du texte encadré, associer, sur le document 1 , à chaque signal observé sur le sismographe, le type d'ondes détectées (ondes S ou ondes P). Justifier.

1.2.Relever sur ce document les dates d'arrivée des ondes S et P à la station d'enregistrement notées respectivement $t_s$ et $t_p$.

1.3.Soit d la distance qui sépare la station d'enregistrement du lieu où le séisme s'est produit.Exprimer la célérité notée $v_S$ des ondes S en fonction de la distance d parcourue et des dates $t_s$ et $t_0$. Faire de même pour les ondes P avec les dates $t_p$ et $t_0$.

1.4. Retrouver l'expression de la distance d : $d=\frac{v_S v_p}{v_p - v_S}(t_S - t_p)$

1.5. En déduire la valeur numérique de cette distance d.

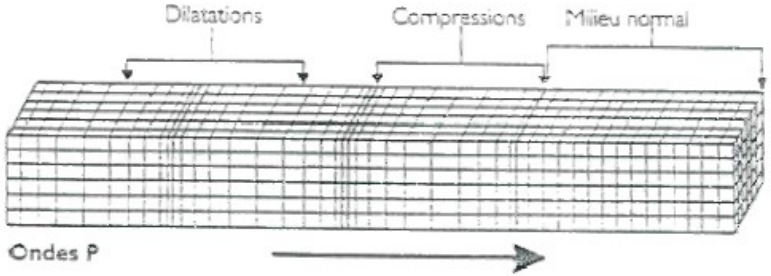



## Exercice 4 corrigé disponible

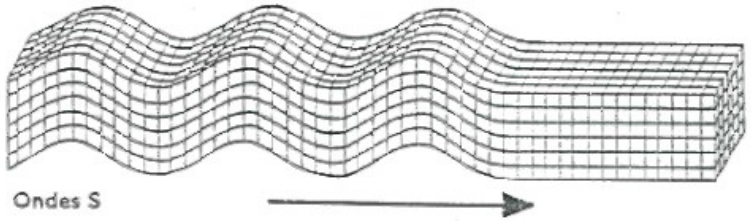
« Les ondes sismiques naturelles produites par les tremblements de Terre sont des ondes élastiques se propageant dans la croûte terrestre. (...) On distingue deux types d'ondes : les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont différentes du fait des diverses structures géologiques traversées. C'est pourquoi, les signaux enregistrés par les capteurs appelés sismomètres sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure. »

Les ondes de volume :

- L'onde P comprime et étire alternativement les roches.

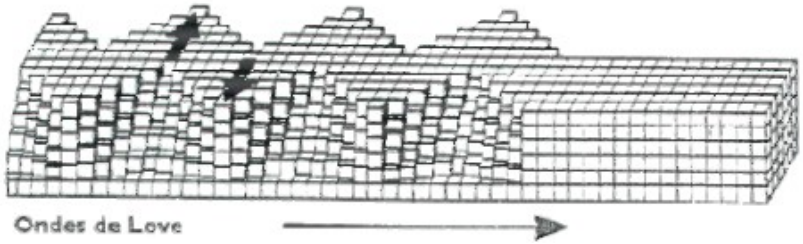


• L'onde S se propage en cisaillant les roches latéralement à angle droit par rapport à sa direction de propagation.




Une onde de surface :

• L'onde de Love L : elle déplace le sol d'un côté à l'autre dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation.




1. Nature des ondes

1.1. Pour chacune des trois ondes citées dans le texte, préciser en justifiant s'il s'agit d'une onde transversale ou d'une onde longitudinale.

1.2. Citer un autre exemple d'onde mécanique transversale.

2. La Terre a tremblé en France le 24 août 2006 à 20 h 01 min 00 s TU (temps universel). L'épicentre du séisme était proche de la ville de Rouillac en Charente. Un sismomètre du Bureau Central Sismologique Français situé à Strasbourg, a enregistré le tremblement. Les ondes les plus rapides se sont propagées en surface avec la célérité de 6,0 km.s$^{-1}$. La distance Rouillac-Strasbourg est d = 833 km, calculer la durée mise par les ondes les plus rapides pour parcourir cette distance d.

## Exercice 5 corrigé disponible

Membre d'un groupe de rock et très intéressé par la nature et la propagation du son, Julien réalise les observations suivantes :

- Observation 1 : Aucun signal sonore ne nous parvient du Soleil alors qu'il s'y déroule en permanence de gigantesques explosions.
- Observation 2 : Une bougie est placée devant un haut-parleur qui émet un son très grave. On constate que la flamme se rapproche et s'éloigne alternativement de la membrane du haut-parleur mais qu'elle n'oscille pas dans la direction perpendiculaire.

1. Préliminaires.

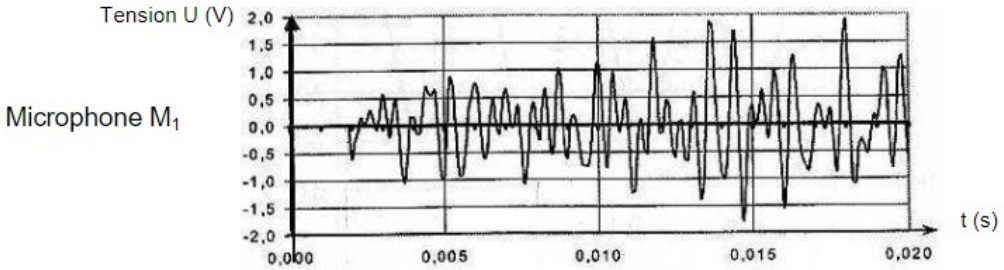
1.1. Définir de la manière la plus complète possible une onde mécanique progressive.

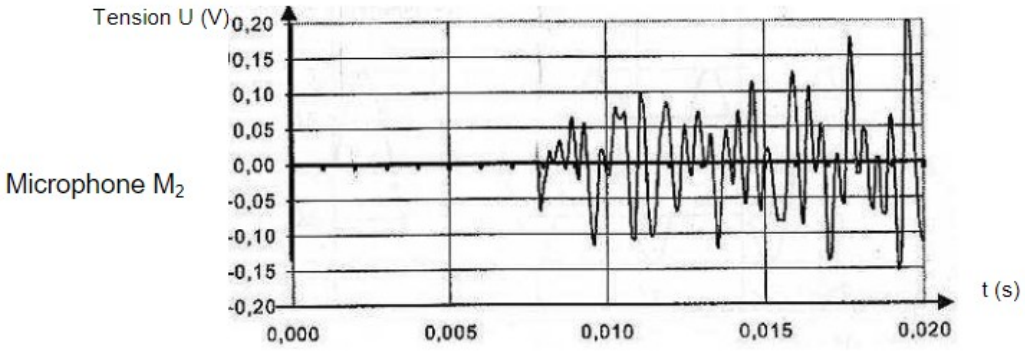
1.2. Compléter les cases blanches du tableau de l'annexe à rendre avec la copie avec les expressions suivantes : Onde sonore, onde le long d'une corde, onde lors de la compression-dilatation d'un ressort, onde à la surface de l'eau

2. Célérité de l'onde sonore : première méthode. Deux microphones $M_1$, et $M_2$ sont alignés de telle manière que les distances $M_1M_2$ valent 2,00 m . Les signaux électriques correspondant aux sons reçus par les microphones sont enregistrés grâce à un ordinateur. Julien donne un coup de cymbale devant le premier micro $M_1$ puis lance immédiatement l'enregistrement.

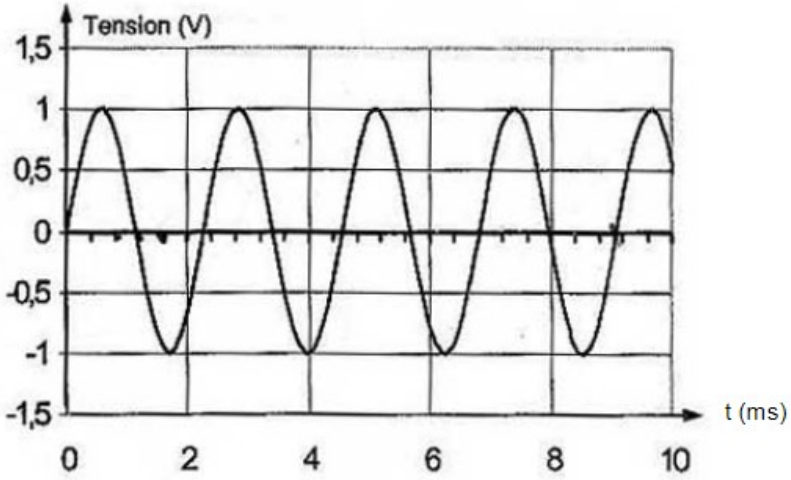
La température de la pièce est de 18°C.

Les courbes obtenues sont représentées ci-après :






2.1. Comment peut-on déterminer la célérité de l'onde sonore à l'aide des courbes obtenues ?
2.2. Effectuer le calcul de la célérité de l'onde sonore pour la distance $M_1M_2$.
2.3. Les résultats obtenus sont-ils cohérents ?
3. Célérité de l'onde : deuxième méthode.Julien dispose maintenant les deux microphones $M_1$ et $M_2$ à la même distance d d'un diapason. Il obtient les courbes représentées ci-dessous. On remarque que les signaux sont en phase



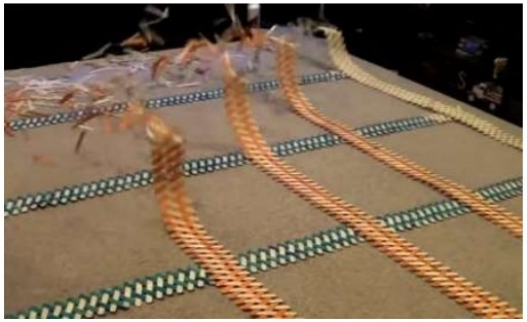

3.1. Déterminer la période puis la fréquence du son émis par le diapason.

Julien éloigne le microphone $M_2$ peu à peu jusqu'à ce que les courbes soient de nouveau en phase. Il réitère l'opération jusqu'à compter cinq positions pour lesquelles les courbes sont à nouveau en phase. La distance D entre les deux microphones est alors égale à 3,86 m.
3.2. Pourquoi compte-t-on plusieurs retours de phase plutôt qu'un seul ?
3.3. Définir la longueur d'onde. Déduire sa valeur numérique de l'expérience précédente.
3.4. Calculer alors la célérité de l'onde

| | Ondes à une dimension | Ondes à deux dimensions | Ondes à trois dimensions |
|---|---|---|---|
| Ondes longitudinales | | | |
| Ondes transversales | | | |

## Exercice 6

Le cobra est un serpent qui a la capacité de se redresser. C'est en référence à cette position que le jeu étudié ici a été nommé « onde cobra ». Il ressemble à ce jeu dans lequel on aligne des milliers de dominos pour ensuite les faire tomber en cascade.
Il s'agit ici d'entremêler en une succession de losanges des bâtonnets de bois, par exemple des bâtonnets de glace, pour constituer un long croisillon horizontal puis d'en lâcher une extrémité.
L'assemblage se soulève alors, se redresse telle une tête de cobra, en éjectant un à un les bâtonnets et en détruisant donc le croisillon (figure 1 ci-dessous).



http://www.random-good-stuff.com/2016/12/17/stick-bombs-not-stink-bombs/

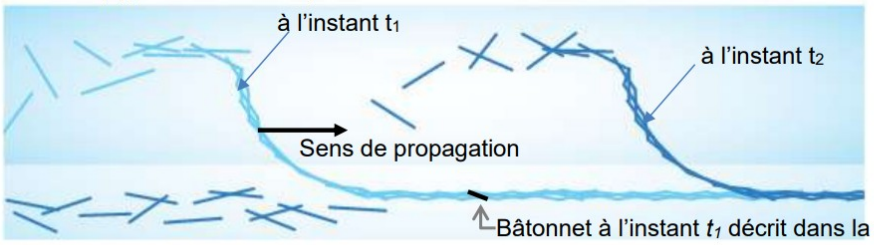



Figure 1 : Forme du croisillon de bâtonnets à deux instants différents $t_1$ et $t_2$ ($t_2>t_1$)

Pour constituer le croisillon (figure 2 ci-dessous), les bâtonnets se déforment avec des fléchissements qui sont de l'ordre de leur épaisseur (figure 3 ci-dessous), mais qui retrouvent leur forme initiale une fois libérés. Initialement, ils stockent ainsi non pas de l'énergie potentielle de pesanteur mais de l'énergie potentielle élastique. Des chercheurs ont montré que l'onde cobra résultait d'une propulsion par réaction, dans laquelle le « carburant » est cette énergie potentielle élastique stockée dans les déformations des bâtonnets et la propagation est assurée par leur éjection.
L'objectif de cet exercice est de déterminer la célérité de l'onde cobra, d'étudier l'influence de la forme du croisillon sur la célérité ainsi que de mener une analyse énergétique pour interpréter l'onde cobra et prévoir la hauteur maximale des bâtonnets lors de la propagation.
*Sources : journal Le Monde (21 août 2017), journal Pour la Science (n°490, août 2018).*

Figure 2 : Croisillon vu de dessus : le croisillon est caractérisé par le pas noté p, distance entre deux sommets consécutifs sur un des bords du croisillon

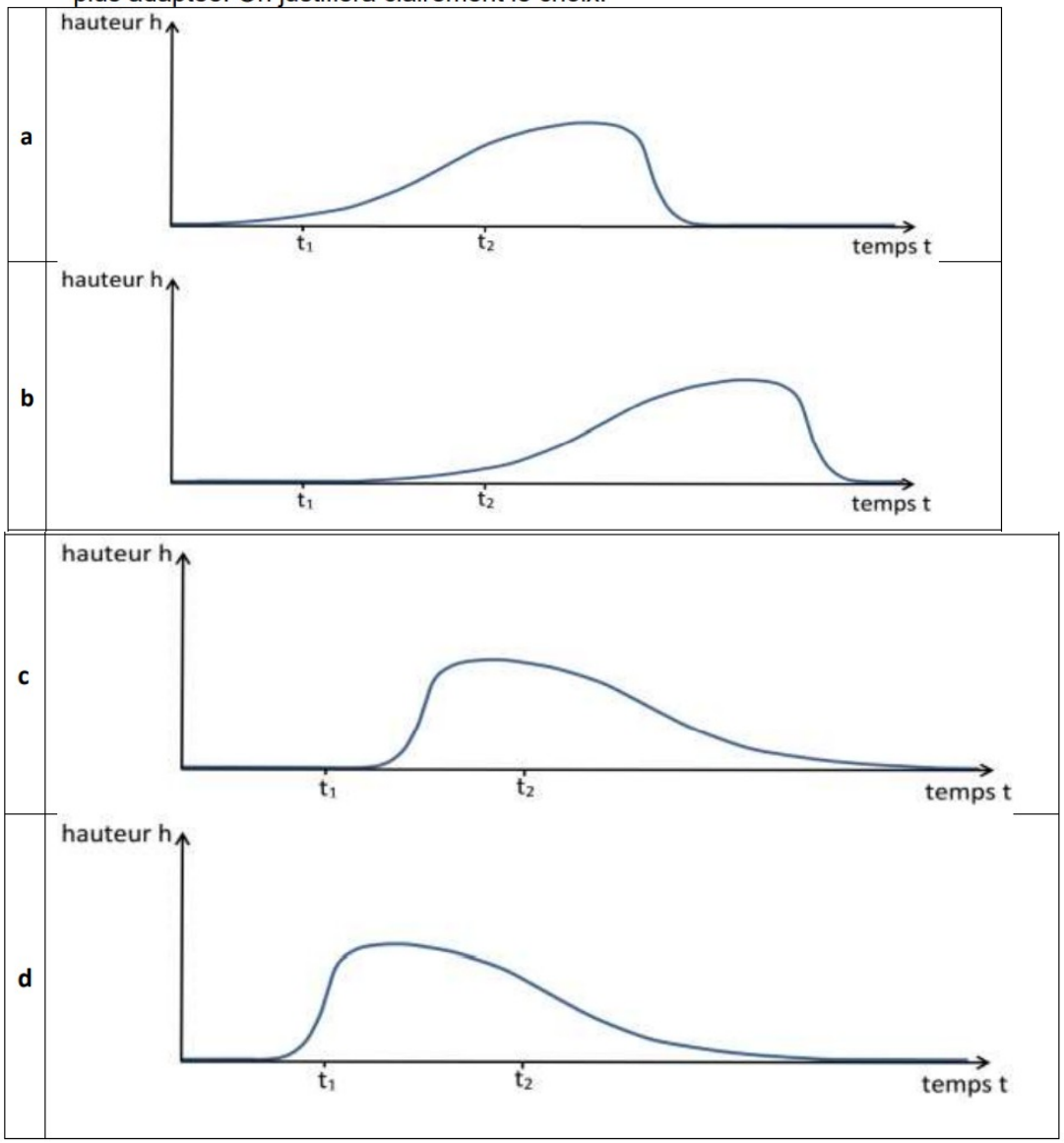
*Figure 3 : Schéma de profil d'un bâtonnet déformé dans le croisillon et photo correspondante*

**Analyse ondulatoire**

1. Indiquer la nature périodique ou non périodique de « l'onde cobra ».
2. On souhaite décrire l'évolution de la hauteur du centre de masse d'un bâtonnet au cours du temps (la hauteur est nulle lorsque le bâtonnet est au sol). Le bâtonnet décrit est figuré en noir à l'instant $t_1$ sur la figure 1, lorsqu'il est encore au sol, et on peut considérer que son mouvement ultérieur est approximativement vertical. Quatre représentations graphiques sont proposées ci-dessous.

**2.1.** Parmi les représentations graphiques proposées, éliminer la (ou les) représentation(s) qui ne rend(ent) pas compte de la position du bâtonnet à l'instant $t_1$.

**2.2.** Parmi les représentations restantes, choisir la représentation graphique qui paraît la plus adaptée. On justifiera clairement le choix.



Des chercheurs ont réalisé des photographies successives de la structure se soulevant au cours du temps. Quatre photographies successives sont fournies sur la figure 4 ci-dessous. Le croisillon a été réalisé avec des bâtonnets de longueur 11,4 cm et un pas voisin de 5 cm (ce qui correspond à des bâtonnets disposés perpendiculairement les uns par rapport aux autres comme sur la figure 2). L'échelle verticale et l'échelle horizontale ne sont pas les mêmes.

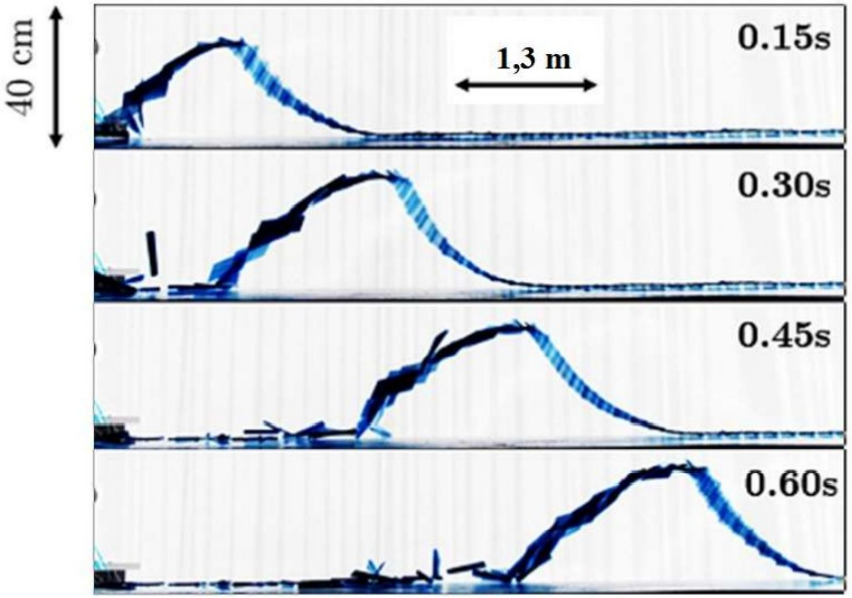



*Figure 4 : Photographies successives de la structure.*
*D'après : Jérémy Sautel, Andréane Bourges, Aude Caussarieu, Nicolas Plihon, and Nicolas Taberlet The physics of a popsicle stick bomb American Journal of Physics 85, 783 (2017)*

**3.** À l'aide de la figure 4, justifier sans calcul que la célérité de l'onde cobra semble approximativement constante.

**4.** Déterminer la valeur de la célérité de l'onde cobra. On explicitera clairement la méthode.

L'évolution de la célérité de l'onde et de la hauteur maximale atteinte par chaque bâtonnet en fonction du pas sont reproduites ci-dessous (pour des bâtonnets de longueur 11,4 cm). Les barres indiquent l'incertitude-type pour chaque mesure.

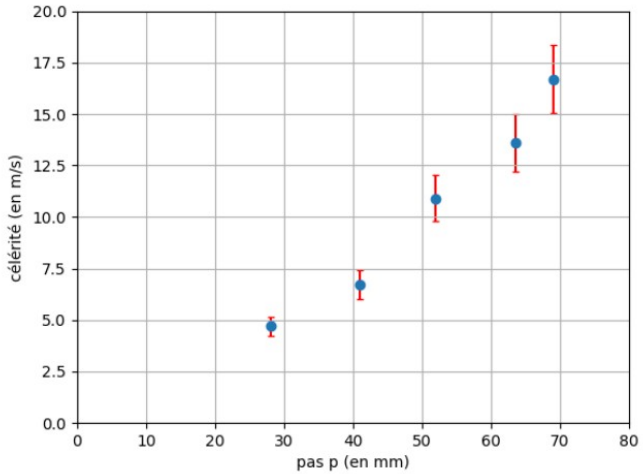



*Figure 5 : célérité en fonction du pas*

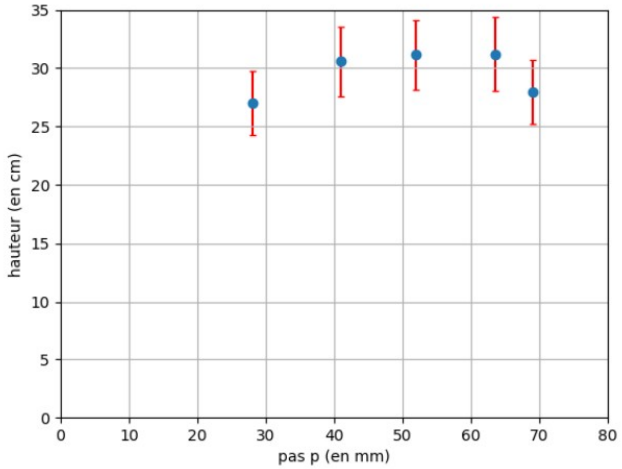



*Figure 6 : hauteur maximale en fonction du pas*

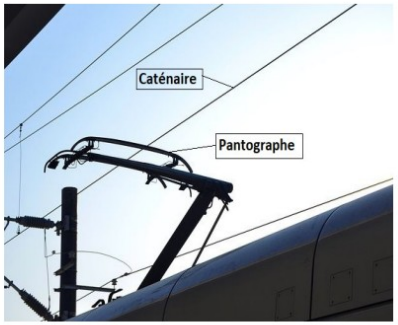
**5.** Indiquer comment on a intérêt à déformer le croisillon afin d'augmenter la vitesse par rapport à la situation étudiée aux questions 3 et 4. On pourra faire un schéma.

**6.** Indiquer en argumentant avec précision si la forme du croisillon a une influence sur la hauteur atteinte par les bâtonnets.

# Exercice 7

Le dernier record du monde de vitesse sur rail du TGV (Train à Grande Vitesse) a été homologué le 3 avril 2007. Une rame expérimentale a atteint à 13h14 la vitesse de 574,8 km·h$^{-1}$ sur la toute nouvelle ligne Est européenne.

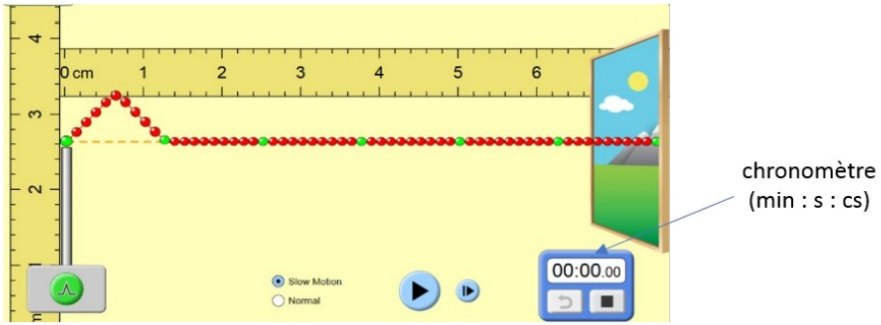
**Le mur de la caténaire**

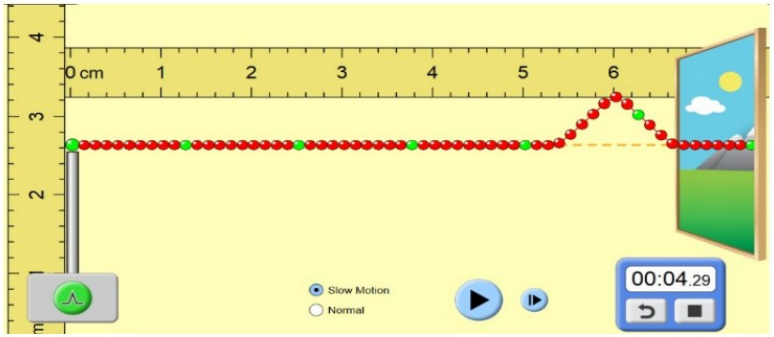



L'alimentation des moteurs électriques du TGV est réalisée à l'aide de la caténaire et du pantographe.
La caténaire (voir figure ci-contre) est le câble électrique tendu au-dessus des voies. Le pantographe (voir figure ci-contre) est le dispositif articulé fixé sur le toit de la locomotive, permettant une liaison électrique par frottement sur la caténaire.
Le pantographe appuie sur le câble et le soulève, créant une déformation en forme de V inversé. Lorsque le train se déplace, une onde mécanique progressive se propage dans la caténaire devant la locomotive. Si le train rattrape l'onde, le contact entre le pantographe et la caténaire est rompu et la puissance électrique transmise aux moteurs diminue. La célérité de l'onde dans la caténaire est une contrainte qui limite la vitesse du train, on parle d'un « **mur de la caténaire** » par analogie avec le mur du son.

1. L'onde qui se propage dans la caténaire est progressive et mécanique. Rappeler la définition d'une onde progressive puis indiquer ce qui permet de la qualifier de mécanique.

Un système de poulies et de contrepoids permet de tendre plus ou moins la caténaire. Pour étudier l'influence de cette tension mécanique $T$ (en Newton), on utilise un logiciel de simulation mis en ligne par l'université du Colorado. Dans cette simulation la caténaire du train est modélisée par la corde sur laquelle se propage une perturbation. Deux captures d'écran de ce logiciel sont données ci-dessous.




*D'après https://phet.colorado.edu/fr/simulations*

2. Déterminer, à l'aide des deux captures ci-dessus la valeur de la vitesse de propagation de l'onde dans la simulation.
3. Une deuxième simulation avec une valeur de tension plus élevée du câble donne une célérité de 6,3×10$^{-2}$ m·s$^{-1}$. Indiquer l'influence du paramètre tension sur la célérité de l'onde.

L'expression littérale de la célérité de l'onde mécanique qui se propage dans la caténaire est :

$$c=\sqrt{\frac{T}{\rho . S}} \qquad (1)$$

avec : $c$ la célérité de l'onde en mètres par seconde (m·s$^{-1}$) ;
$T$ la tension exercée sur la caténaire en Newton (N) ;
$S$ la section de la caténaire (m$^2$) ;
$\rho$ la masse volumique du matériau constitutif du câble (kg·m$^{-3}$).

La SNCF a spécifié que pour des trajets commerciaux, la vitesse de ses TGV ne devait pas dépasser 70 % de la vitesse de propagation des ondes dans la caténaire.

Nous disposons des informations suivantes sur les caténaires utilisées :

| Tension $T$ (N) | Section $S$ (mm$^2$) | Masse volumique $\rho$ du cuivre (kg·m$^{-3}$) |
|---|---|---|
| 2,6×10$^4$ | 150 | 8920 |

4. Vérifier la cohérence de cette relation avec les résultats obtenus lors de la simulation.
5. Déterminer, en m·s$^{-1}$ puis en km·h$^{-1}$, la valeur de la vitesse théorique maximale que ne doit pas dépasser un TGV en exploitation commerciale.
6. Proposer une argumentation d'une dizaine de lignes en indiquant sur quels paramètres les ingénieurs ont pu agir pour repousser le mur de la caténaire et ainsi faire franchir au TGV la barre symbolique des 500 km·h$^{-1}$.
   On précisera dans le raisonnement les paramètres modifiés, le sens d'évolution de leurs valeurs (plus élevée ou plus faible) ainsi que le choix le plus approprié et le plus économique.