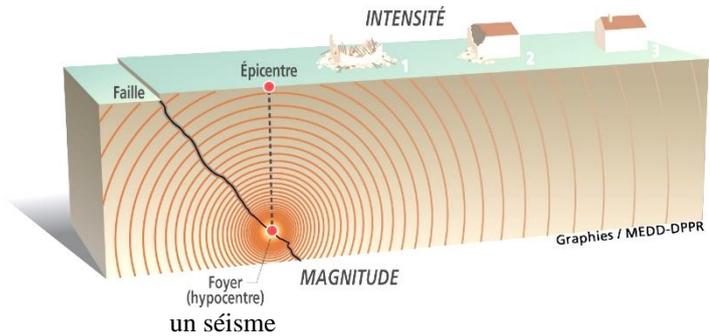


# Les objets de la physique, onde ou particule ?

## Comment caractériser une onde ?



L'écoulement d'un fleuve



un séisme



La lumière d'une ampoule



le vent



le son

### I Onde progressive et nombreux exemples

Définition (à deviner) :

Cette définition amène à se familiariser dans un premier temps avec les notions de perturbation et de propagation.

#### 1) Perturbation

Définition : une perturbation correspond à une

du milieu par rapport

##### a) Expérience de la corde.

Poser la corde sur le sol ou sur la table en fixant une de ses extrémités. La tendre très légèrement et imprimer un bref mouvement de haut en bas à l'autre extrémité.

Au repos \_\_\_\_\_

$t = 0^+ \text{ s}$  \_\_\_\_\_

$t_1$  \_\_\_\_\_

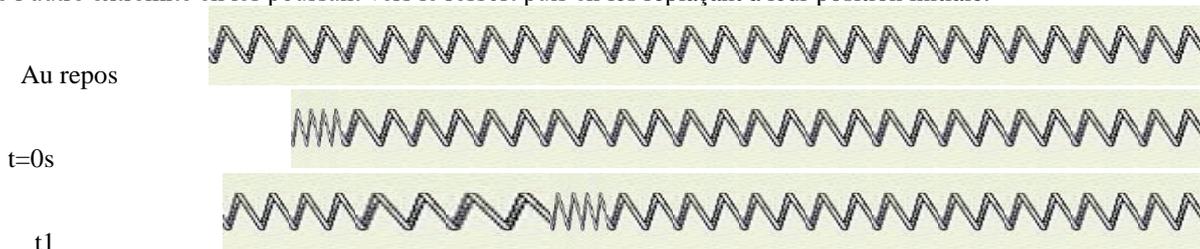
Le milieu de propagation est ici la corde. Comment qualifier son état de repos ?

Comment modifie-t-on un point du bout de la corde lorsqu'on imprime le mouvement bref ?

Quelle est la perturbation ici qui se propage ensuite le long des points de la corde ?

### b) expérience du ressort

Poser le ressort sur le bureau en fixant une de ses extrémités. Le tendre. Avec votre main, donner un bref mouvement des spires premières de l'autre extrémité en les poussant vers le ressort puis en les replaçant à leur position initiale.



Le milieu de propagation est ici le ressort. Comment qualifier son état de repos (parler de compression et/ou de dilatation) ?

Quelle modification subit un point des premières spires du ressort lorsque vous imprimez le mouvement bref ?

Quelle est la perturbation ici qui se propage le long des points du ressort ? (deux réponses possibles)

### c) Expérience avec l'échelle de perroquet (ondoscope)

Une échelle de perroquet est constituée d'une lame élastique verticale tendue sur laquelle sont fixés des barreaux horizontaux, tous identiques et qui portent à leurs extrémités des petites masses.

Ecarter de sa position d'équilibre le barreau situé à l'extrémité de l'échelle, puis le lâcher. Observer les barreaux à un instant  $t_1 > 0$ .

Comment qualifier l'état de repos de l'échelle de perroquet ?

Quelle modification imprimez-vous au premier barreau lors de votre impulsion ?

Quelle est la perturbation ici le long des barreaux successifs ?

### d) Expérience avec la cuve à onde

Envoyez un jet d'air à l'aide d'une poire et d'une pipette (ou avec une pissette d'air) en un point de la surface de l'eau. Observer.

Le milieu de propagation est ici l'eau. Quel est son état de repos ?

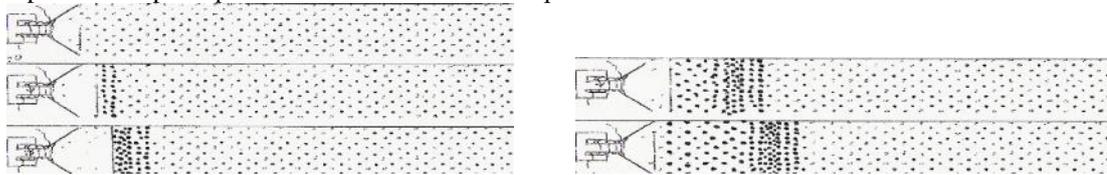
Quelle modification apportez-vous aux molécules d'eau en surface, à l'endroit du jet d'air lorsque vous envoyez ce dernier ?

Placer un flotteur, observer son mouvement au passage de l'onde. Quel est ce mouvement ?

En déduire quelle est la perturbation ici qui se propage de molécules en molécules

### e) Expérience avec le haut-parleur (ondes sonores) (en classe entière)

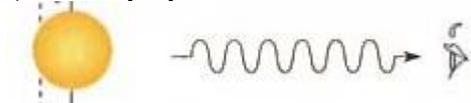
Imposez un courant sinusoïdal périodique de très faible fréquence traversant la bobine du haut-parleur. Celui-ci est à l'origine de la mise en vibration de la membrane avec une fréquence égale à celle de l'intensité. Tout instrument de musique repose sur ce principe : mise en vibration d'un corps solide ou d'une colonne d'air.



Comment sont perturbées les molécules d'air en contact avec le corps vibrant ? Placer la zone de compression et la zone de dilatation sur les dessins précédents.

Quelle est la perturbation qui se propage ici de molécules d'air en molécules d'air à partir d'un haut-parleur émettant dans toutes les directions ?

### f) Une lampe qu'on allume



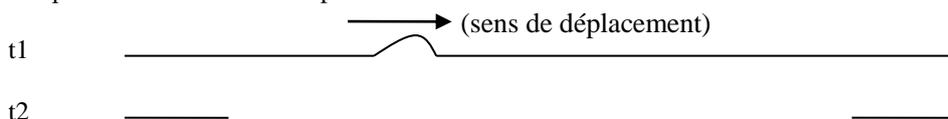
Quelle est la perturbation qui se propage ici ? Est-ce une perturbation d'ordre mécanique notamment ?

## 2) Propagation

### a) Expérience avec la corde

L'expérience est la même qu'en I.1.a

Dessiner l'aspect de la corde à un temps  $t_2 > t_1$ .



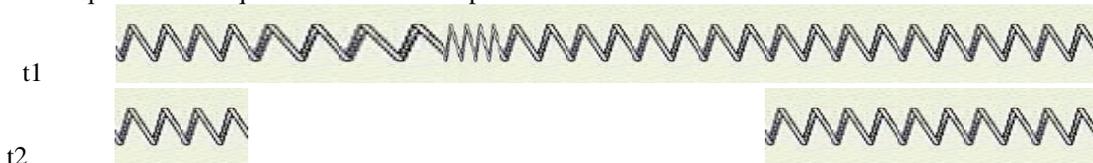
Dans quelle direction s'est faite la propagation ? Et dans quel sens ?

Y a-t-il déplacement des « morceaux » de corde ? Y a-t-il transport de morceaux de corde ?

### b) Expériences avec le ressort

i) L'expérience est la même qu'en I.1.b

Dessiner l'aspect du ressort à un temps  $t_2 > t_1$ . Indiquer les zones de compression et de dilatation sur les deux dessins.



Dans quelle direction s'est faite la propagation ? Et dans quel sens ?

Y a-t-il déplacement des « morceaux » du ressort ? Y a-t-il transport de morceaux de corde ?

ii) Faire une deuxième expérience dans laquelle vous fixez les deux extrémités du ressort légèrement tendu et dans laquelle vous lâchez quelques spires du milieu du ressort préalablement comprimées.

Dans quelle direction s'est faite la propagation ? Et dans quel sens ?

iii) Faire une troisième expérience dans laquelle une extrémité du ressort est fixe. Prendre l'autre extrémité et tendre le ressort. Lâcher alors d'un coup l'extrémité tenue.

Y a-t-il déplacement des « morceaux » du ressort ? Y a-t-il transport de morceaux de ressort ? S'agit-il d'un phénomène d'onde mécanique ?

### c) Expérience avec l'échelle de perroquet

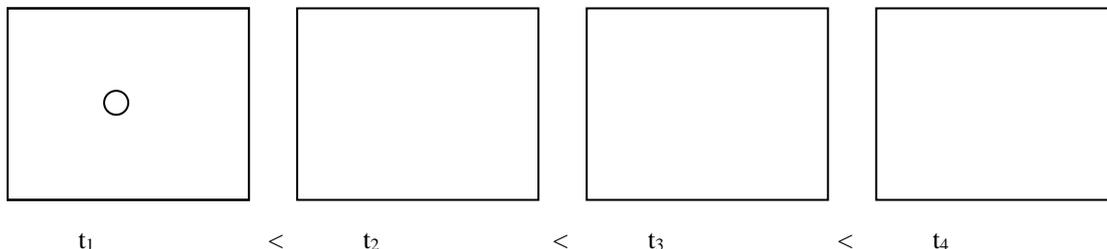
L'expérience est la même qu'en I.1.c.

Dans quelle direction se fait la propagation ? Et dans quel sens ?

### d) Expérience avec la cuve à onde

i) L'expérience est la même qu'en I.2.d

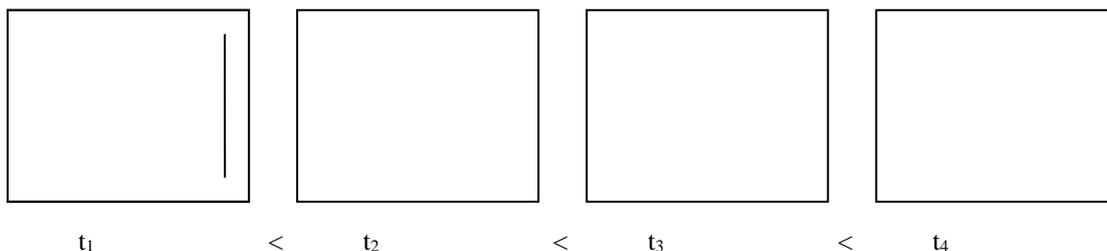
Représenter l'allure de la surface du fluide aux différents instants sur les schémas suivants.



Qualifiez les directions dans lesquelles s'est faite la propagation. Et dans quel sens ?

Placer un petit flotteur sur la surface de l'eau. Attendre qu'il s'immobilise et refaire l'expérience. Le flotteur a-t-il été entraîné vers les bords de la cuve avec la perturbation ? Que peut-on en déduire concernant les molécules d'eau ?

ii) Dans une deuxième expérience, placer un double décimètre dans l'eau du côté droit de la cuve. Pousser légèrement la règle sur  $\frac{1}{2}$  cm, assez rapidement, vers l'intérieur de la cuve. Représenter l'allure de la surface du fluide aux différents instants sur les schémas suivants.



Quelle est la direction de la propagation ici ?

**e) Expérience avec le haut-parleur (ondes sonores)**

Mettre le haut-parleur en marche de telle sorte que l'on perçoive un son (fréquence entre 20 et 20000 Hz). Positionnez-vous de plusieurs façons par rapport au haut-parleur. La propagation est-elle unidirectionnelle ?

Qualifier les directions dans lesquelles se fait la propagation.

Imaginer que l'on fasse cette expérience dans le vide. Que se passerait-il ?

**f) Lumière**

Qualifier la direction prise par la lumière depuis une source lumineuse.

Le milieu de propagation a-t-il besoin d'être matériel pour la propagation des ondes lumineuses ?

**Conclusions :**

L'onde, à partir de sa source, choisit-elle des directions de propagation particulières

L'onde progressive fait-elle intervenir un transport de matière ? Quelle grandeur physique importante transporte-t-elle néanmoins ?

**3) Ondes transversales, ondes longitudinales**

Définitions :

En comparant les directions des perturbations et les directions de propagation des différents exemples précédents d'ondes progressives, classer les en ondes transversales ou ondes longitudinales.

**II Etude des ondes progressives à une dimension (ou pouvant s'y rapporter)**

**1) Modélisation mathématique de l'onde**

L'onde peut être modélisée par la valeur  $u$  de la perturbation correspondante. Dans le cas de la corde,  $u$  correspond donc à .....

Elle est fonction de deux variables. Lesquelles ?

On notera ainsi  $u( \quad , \quad )$ .

**C'est ce qui fait toute la délicatesse de l'étude des ondes : la grandeur étudiée (ici appelée perturbation) dépend à la fois de \_\_\_\_\_ et de \_\_\_\_\_. Sur les graphiques ou schémas, il y aura toujours une de ces deux variables qui restera fixe tandis que l'étude de l'évolution de  $u$  se fera alors en fonction de l'autre.**

On donne la série de graphiques suivants ci-contre, la courbe de la fonction est en gras :

Quelle est la fonction représentée sur chaque graphique ?

Quelle est la variable de cette fonction ?

Quelle est la variable fixée pour chaque graphique ?

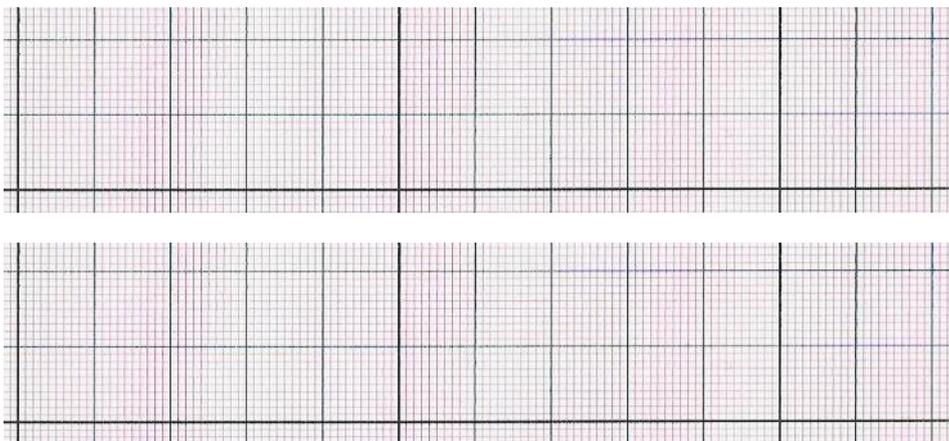
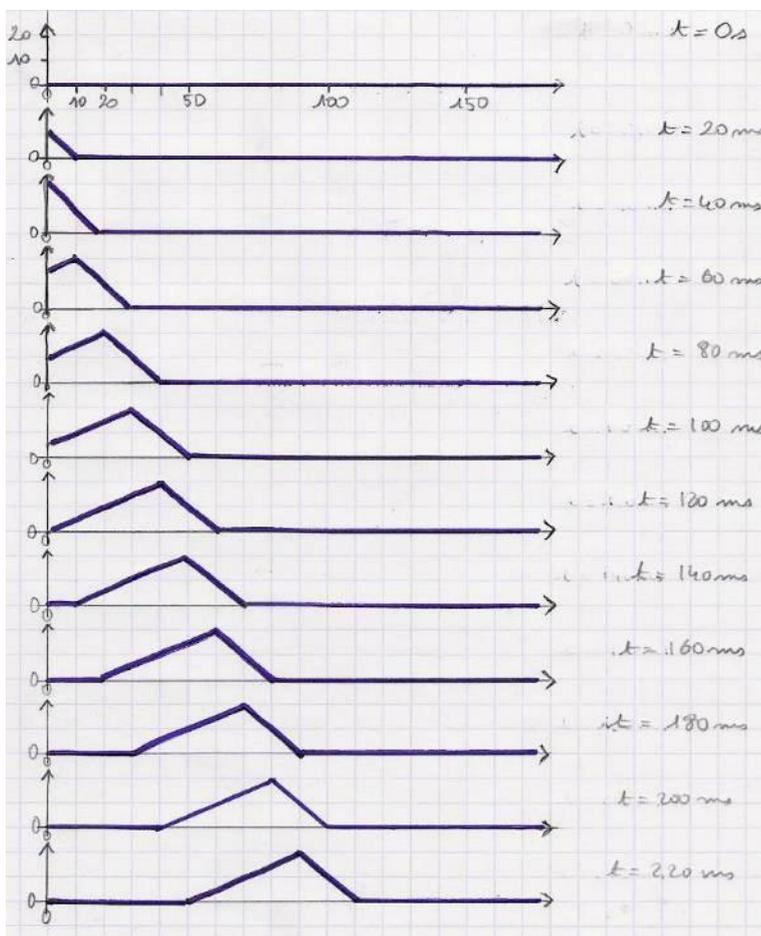
Compléter les axes non légendés.

Matérialiser le point M d'abscisse  $x_M = 10$  cm en bleu sur tous les schémas ci-contre

Faire de même avec le point N d'abscisse  $x_N = 80$  cm en rouge.

Sur le premier papier millimétré, dessiner en bleu la fonction amplitude  $u$  en  $x_M = 10$  cm en fonction du temps en vous aidant de la série de graphiques fournie. Sur le suivant, en rouge, la fonction  $u$  en  $x_N = 80$  cm en fonction du temps.

Sur chacun de ces nouveaux graphiques, quelle est la variable fixée ?



**Ces deux types de graphiques (même s'ils se ressemblent) sont de nature totalement différente ! Attention à ne pas les confondre et comprendre clairement ce qu'ils représentent.**

### 3) Retard

La perturbation atteint le point M à la date ..... et le point N à la date .....

La perturbation atteint le point ..... après le point ..... avec un certain retard noté  $\tau$ .

De même, la perturbation cesse d'affecter le point M à la date ..... Et le point N à la date ..... On retrouve à nouveau entre ces deux dates le .....

Compléter la phrase suivante :

La valeur de la perturbation en ..... à la date  $t$  est égale à la valeur de la perturbation qui existait en ..... à la date antérieure ..... ,  $\tau$  étant le retard entre les points ..... et .....

Remarque : le point M peut correspondre à la source qui crée la perturbation.

### 4) Célérité d'une onde

M et M' se trouvant selon une même direction de l'onde depuis la source, M' étant atteint par l'onde après un retard  $\tau$  à la suite de M, la célérité  $v$  de l'onde est définie par

## 5) Exemples d'applications

### a) Vocabulaire

\* amplitude

\* onde amortie

\* onde déformée

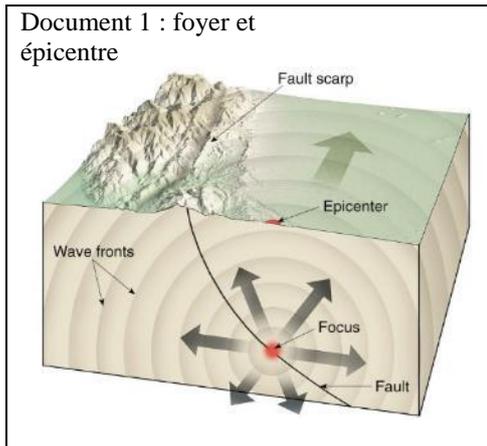
\* front d'onde

### b) Exemples de calculs (à partir des graphiques de la page précédente)

Calculer la célérité de l'onde (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Quelle est la position du front d'onde à la date 100 ms ? Quelle est la position du pic de l'onde (maximum) à 1,00 s ? A quel instant l'onde a-t-elle terminé son passage au point distant de 300 m exactement de la source ?

c) Cas particulier des séismes

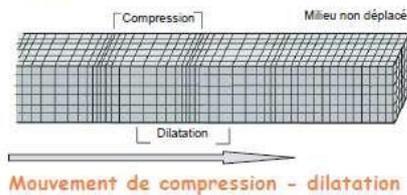
Document 1 : foyer et épicentre



Document 2 : les différentes ondes rencontrées lors d'un séisme

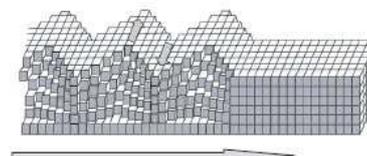
Il existe principalement 2 types d'ondes. Les ondes de volumes **P** (premières) et **S** (secondes) qui se propagent partout à l'intérieur de la Terre. Les ondes de Love et de Rayleigh dites ondes de surface qui se propagent guidées par la surface de la Terre.

Onde P



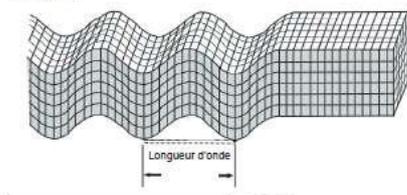
Mouvement de compression - dilatation

Onde de Love



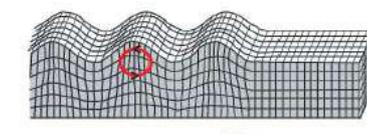
Mouvement latéral de cisaillement

Onde S



Mouvement de cisaillement

Onde de Rayleigh



Mouvement elliptique rétrograde

Document 3 : magnitude d'un séisme

La magnitude  $M$  d'un séisme mesure la quantité d'énergie libérée au foyer d'un séisme. L'échelle de Richter est une échelle logarithmique de la magnitude. Une différence de 5 entre deux séismes sur l'échelle de Richter indique que l'un  $10^{5 \cdot (3/2)}$  fois plus énergétique que l'autre. En notant  $A_0$  l'énergie de référence et  $A$  l'énergie d'un séisme, la magnitude sur l'échelle de Richter peut donc se calculer, en première approximation par  $M = \frac{3}{2} \log \left( \frac{A}{A_0} \right)$ . De la même façon (fonction réciproque), on a  $\frac{A}{A_0} = 10^{\frac{2}{3}M}$

Très souvent, on traduit l'échelle de Richter par les dégâts causés par le séisme. Il serait plus pertinent et plus juste de parler alors de l'intensité du séisme et non de magnitude. Cette intensité est donnée par d'autres échelles comme celle Merkali ou MSK.

Description	Magnitude	Effets	Fréquence
Micro	Moins de 1,9	Micro tremblement de terre, non ressenti	8 000/jour
Très mineur	2,0 à 2,9	Généralement non ressenti mais détecté-enregistré	1 000/jour
Mineur	3,0 à 3,9	Souvent ressenti mais causant rarement des dommages	49 000/an
Léger	4,0 à 4,9	Secousses notables d'objets à l'intérieur des maisons, bruits d'entrechoquement. Dommages importants peu communs	6 200/an
Modéré	5,0 à 5,9	Peut causer des dommages majeurs à des édifices mal conçus dans des zones restreintes. Cause de légers dommages aux édifices bien construits	800/an
Fort	6,0 à 6,9	Peut être destructeur dans des zones allant jusqu'à 180km à la ronde si elles sont peuplées	120/an
Majeur	7,0 à 7,9	Peut provoquer des dommages modérés à sévères dans des zones plus vastes	18/an
Important	8,0 à 8,9	Peut causer des dommages sérieux dans des zones à des centaines de km à la ronde	1/an
Dévastateur	9,0 et plus	Dévaste des zones de plusieurs milliers de km à la ronde	1 tous les 6 ans environ

D'après <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/seisme-magnitude-moment-energie.xml>

Questions :

- 1) Quelle définition donner à l'épicentre d'un séisme ?
- 2) Classer les types d'onde d'un séisme en transversales et longitudinales
- 3) Pourquoi l'échelle de Richter est-elle appelée logarithmique ? Pourquoi choisit-on une échelle logarithmique ?
- 4) Quelle a été le rapport d'énergie entre le séisme de Sumatra le 26 décembre 2004 (140 000 victimes) de magnitude 9 et celui au Chili le 22 mai 1960 (5 700 victimes) ? Même question entre le séisme de Sumatra et celui enregistré en France à Barcelonnette le 6 novembre 2015 de magnitude 4,4.

### III Ondes progressives périodiques (opp)

Que se passe-t-il si la perturbation créée dans un milieu (supposé illimité) est produite périodiquement ?

#### 1) Exemple et définition

On se place le long d'une corde de 7 m de long dont une extrémité est agitée périodiquement. L'étude est faite grâce au logiciel de simulation Hatier (en classe au vidéoprojecteur)

Paramétrages :

Corde : extrémité liée à un amortisseur, masse linéique de  $100 \text{ g m}^{-1}$ , tension 0,4 N.

Onde : périodique, amplitude  $u_{\text{max}} = 30 \text{ cm}$ , durée du signal de 300 s, fréquence  $\nu = 2,00 \text{ Hz}$ . ( $\nu$  est la lettre « nu » en grec)

Outils : durée de l'enregistrement : 10 min, pas d'enregistrement continu.

On appellera  $u(x,t)$  la perturbation de l'onde (c'est-à-dire ici l'élongation verticale) en un point de la corde de position horizontale  $x$  sur la corde ( $x = 0$  en S, source de l'onde) et au temps  $t$ .

Lancer l'agitation de la corde et observer le mouvement de la source.

La perturbation à la source est une fonction périodique du temps, c'est-à-dire qu'elle se répète identique à elle-même à intervalles de temps égaux. La perturbation, en chaque point qu'atteint l'onde, sera également périodique du temps. La source engendre ainsi une onde mécanique progressive dite « périodique ».

Une onde progressive est dite périodique si .....

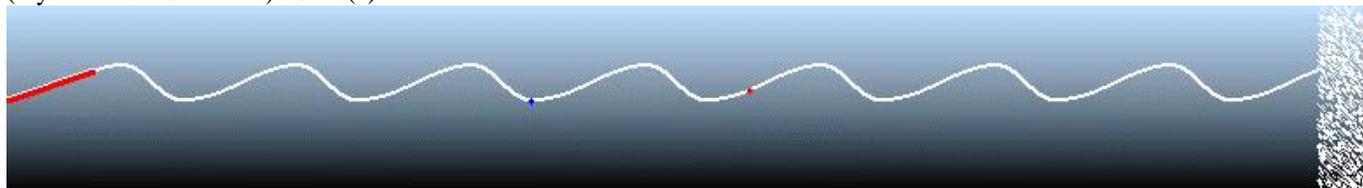
#### 2) Périodicité spatiale de l'onde

Lancer l'agitation de la corde.

Observer la propagation de l'onde le long de la corde sur l'image du haut.

Appuyer sur la pause : par ce moyen, quelle variable de  $u$  fixe-t-on ?

On observe ainsi, à partir directement de ce cliché, la variation de  $u$  en fonction de \_\_\_\_\_ à un temps/une position (rayer la mention inutile) donné(e).



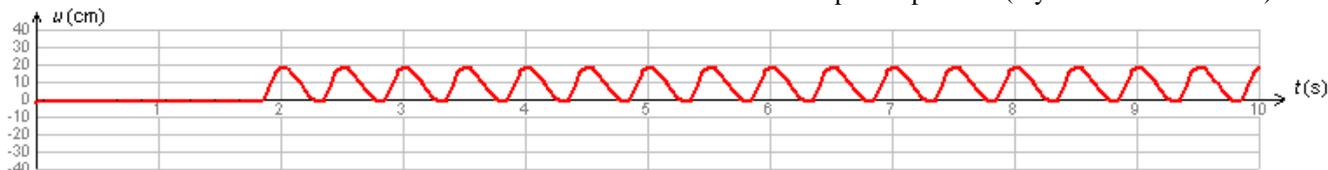
A tout instant, la forme de la corde se répète identique à elle-même à intervalles de **distance** égaux noté  $d$ .  $u(x, t_1)$  est donc une fonction \_\_\_\_\_ de la variable \_\_\_\_\_ (coordonnée de l'espace) (notée parfois rapidement  $u(x)$  lorsque l'instant est bien spécifié). Elle admet donc une période  $d$  appelée période spatiale de l'onde. C'est une \_\_\_\_\_.  
A l'aide du pointeur, déterminer la **période spatiale  $d$  de l'onde**. Justifier la démarche adoptée.

#### 3) Périodicité temporelle de l'onde

Repérer un point M de position  $x$  sur la corde.  $x =$  \_\_\_\_\_

Lancer le tracé du graphe. Observer le tracé du graphe en fonction du temps. Quelle variable de  $u$  est fixée sur le graphe ?

On observe ainsi la variation de  $u$  en fonction de \_\_\_\_\_ à un temps/une position (rayer la mention inutile) donné(e).



Que peut-on dire de la fonction  $u(x_M, t)$  (notée également  $u_M(t)$ ) ? Elle se répète identiquement à elle-même à intervalles de \_\_\_\_\_. Elle est donc périodique du \_\_\_\_\_. La période correspondante s'appelle période temporelle  $T$ . C'est une \_\_\_\_\_.

A l'aide du pointeur, mesurer la période temporelle  $T$  du mouvement de M. Vérifier qu'elle est égale à celle du mouvement imposé à la source S.

Que devient cette période temporelle pour tout autre point de la corde (prendre un deuxième point sur la corde si besoin est) ?

Cette période temporelle  $T$  est donc appelée **période temporelle de l'onde** car elle lui est caractéristique et ne dépend que d'elle et non de la position du point du milieu (homogène) auquel on se place.

## IV Ondes progressives périodiques sinusoïdales (opps)

### 1) Définition

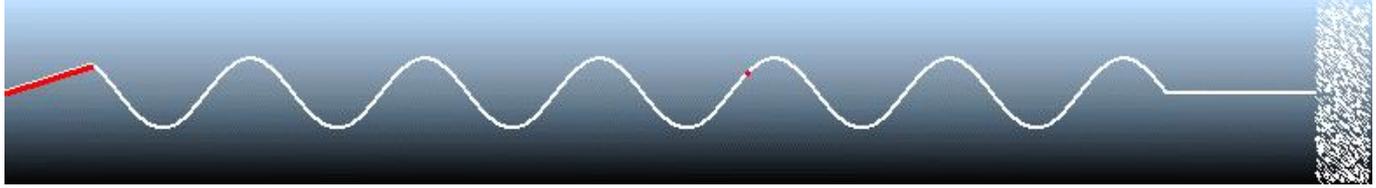
On utilise le logiciel de simulation.

*Paramétrage* : les mêmes que précédemment, on modifie seulement la nature de l'onde : onde sinusoïdale.

Avec le pointeur, choisir deux points M et N pas trop proches sur la corde.

Observer la propagation de l'onde le long de la corde.

Appuyer sur pause : on observe directement sur le cliché, étant donné que la perturbation est la position verticale des points de la corde, l'allure de  $u(x, t_1)$  avec  $t_1$  fixe qui est une fonction uniquement de  $x$  et une fonction **sinusoïdale** de  $x$  (notée pour simplifier  $u(x)$ )



Une onde progressive périodique sinusoïdale est une onde progressive périodique particulière dont la perturbation en chaque point est une fonction périodique du temps (càd ayant la forme de la fonction sinus).

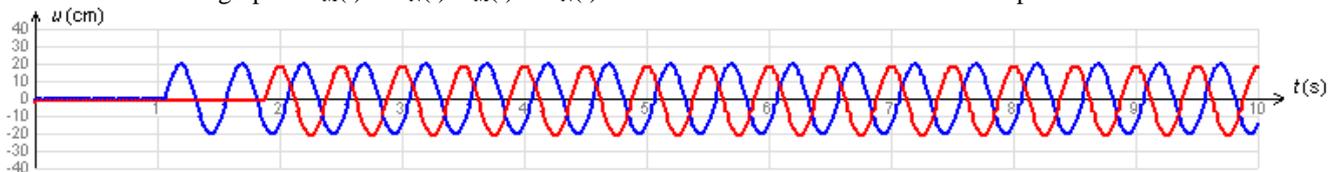
### 2) Longueur d'onde / période temporelle

L'opps est une opp particulière donc admet également une période spatiale **notée  $\lambda$**  (lambda) et appelée longueur d'onde dans ce cas, ainsi qu'une période temporelle notée  $T$  et nommée « période » dans ce cas.

A l'aide du pointeur, déterminer la période spatiale  $\lambda$  de cette onde.

Relancer l'animation.

Observer les graphes  $u_M(t)$  et  $u_N(t)$ .  $u_M(t)$  et  $u_N(t)$  sont des fonctions sinusoïdales du temps.



A l'aide du pointeur, on pourrait à nouveau mesurer la période temporelle du mouvement de M et de N (période temporelle de l'onde) et vérifier qu'elles sont égales à celle du mouvement imposé à la source S. On trouverait  $T = 0,50$  s.

### 3) Relation entre célérité, longueur d'onde et période temporelle de l'onde

Lancer l'animation et, en utilisant la commande pause, déterminer la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à la période, deux périodes, trois périodes.

Conclusion : quelle distance parcourt l'onde en une période ?

En déduire une relation entre célérité  $v$ , longueur d'onde  $\lambda$  et période (temporelle)  $T$  de l'onde en reprenant la définition correcte d'une vitesse. La vérifier avec les résultats numériques précédents et montrer l'homogénéité de la formule.

$$v =$$

Unités dans le système international (SI) :  $v$  en

;  $\lambda$  en

;  $T$  en

.

#### 4) Longueur d'onde et points du milieu

##### a) Simulation

Logiciel Hatier, Hatier Microméga, simulateurs, enseignement obligatoire, ondes...

Paramétrages :

Corde : extrémité liée à un amortisseur, masse linéique de  $100 \text{ g m}^{-1}$ , tension  $0,4 \text{ N}$ .

Onde : sinusoïdale, amplitude  $u_{\text{max}} = 20 \text{ cm}$ , durée du signal de  $300 \text{ ms}$ , fréquence  $\nu = 2,00 \text{ Hz}$ . ( $\nu$  est la lettre « nu » en grec)

Outils : durée de l'enregistrement :  $10 \text{ min}$ , pas d'enregistrement continu.

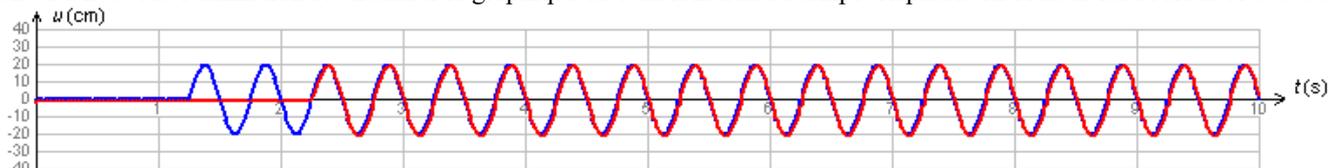
On appellera  $u(x,t)$  la perturbation de l'onde (c'est-à-dire ici l'élongation verticale) en un point de la corde de position horizontale  $x$  sur la corde ( $x = 0$  en  $S$ , source de l'onde) et au temps  $t$ .

Effacer pour l'instant les deux points sur la corde (clic droit)

Lancer l'animation et appuyer sur pause.

Placer alors deux points M et N sur la corde de manière à ce que l'onde affecte ces deux points de façon identique tout en ayant deux points distincts. Que peut-on dire de la distance entre ces deux points en fonction de la longueur d'onde ?

Lancer à nouveau l'animation et visualiser le graphique de  $u$  en fonction du temps. Repasser en couleur les courbes ci-dessous.



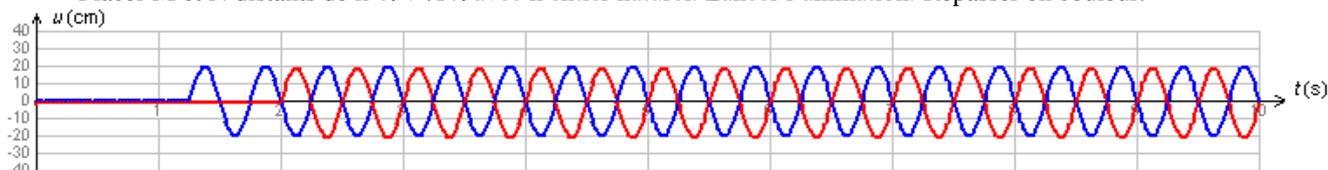
Que constate-t-on pour les points M et N (voir aussi l'animation du haut très visuelle) ?

On dit que les deux points sont dans le même état vibratoire au qu'ils sont en phase.

*Définition/propriété* : deux points du milieu de propagation d'une onde progressive sinusoïdale, situés sur une même direction de propagation depuis la source, sont dans le même état vibratoire (ou sont dits en phase) si et seulement si la distance  $d_{MN}$  les séparant vaut ..... et réciproquement.

Mathématiquement,  $d_{MN} = \dots$  avec  $k \in \dots$

Placer M et N distants de  $k \cdot \lambda + \frac{1}{2} \lambda$  avec  $k$  entier naturel. Lancer l'animation. Repasser en couleur.



Que constate-t-on ?

On dit que les points M et N vibrent (ou sont) en opposition de phase.

Mathématiquement :  $d_{MN} = \dots$

##### b) Ondes ultrasonores

On dispose du même matériel qu'au TP précédent (voir ce TP) – on utilisera cependant ici le mode « continu » de l'émetteur ultrasonore. L'onde sonore émise est sinusoïdale. La fréquence est de  $40 \text{ kHz}$ . Quel balayage (ou sensibilité horizontale) utiliser à l'oscilloscope pour visualiser à l'écran entre 2 et 5 périodes temporelles de l'onde ?

.....  
 .....  
 .....

Réaliser le même montage qu'au TP précédent avec un seul récepteur. Régler la voie 1 sur  $5 \text{ V/div}$  et la voie 2 sur  $1 \text{ V/div}$  en plaçant le récepteur à environ  $20 \text{ cm}$  de l'émetteur. Synchroniser l'oscilloscope sur CH1 (dans le menu trigger) et vérifier les menus de CH1 et CH2. Puis supprimer à l'écran la voie 1 pour ne visualiser que la voie 2 reliée au récepteur.

Protocole pour déterminer expérimentalement la fréquence  $f_{\text{exp}}$  de l'onde ultrasonore :

.....  
 .....  
 .....  
 .....

Déterminer  $f_{\text{exp}}$  et estimer l'incertitude commise (au pixel près de l'écran). Conclure.

.....  
 .....  
 .....

*Mesure de la longueur d'onde  $\lambda$ .*

On utilise deux récepteurs : relier le récepteur R1 à la voie 1 de l'oscilloscope et le récepteur R2 à la voie 2. Régler l'oscilloscope pour avoir des courbes assez grandes et stables Placer les 2 récepteurs côte à côte de telle façon que les 2 courbes présentent un maximum à la même date (et au milieu de l'écran).

Protocole pour déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde ultrasonore (le récepteur 1 restera fixe sur la pailasse) :

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Déterminer  $\lambda$  :

.....  
.....  
.....  
.....

En déduire la célérité des ondes sonores dans le laboratoire :

.....  
.....

Récréation : êtes-vous « en phase » avec les élèves de la classe ?

Sur le reste de cette page, placer un point au centre vous représentant. Placer au hasard une dizaine de points sur le reste de la page avec le nom de 10 élèves. En imaginant que vous êtes une source d'onde ultrasonore identique à celle utilisée en TP, dites avec quel élève vous vous retrouvez, apparemment (le hasard fait-il bien les choses ?) « en phase » ... Expliquer la démarche.

## V Cap sur les ondes sonores

### 1) Propagation, émetteurs et récepteurs sonores

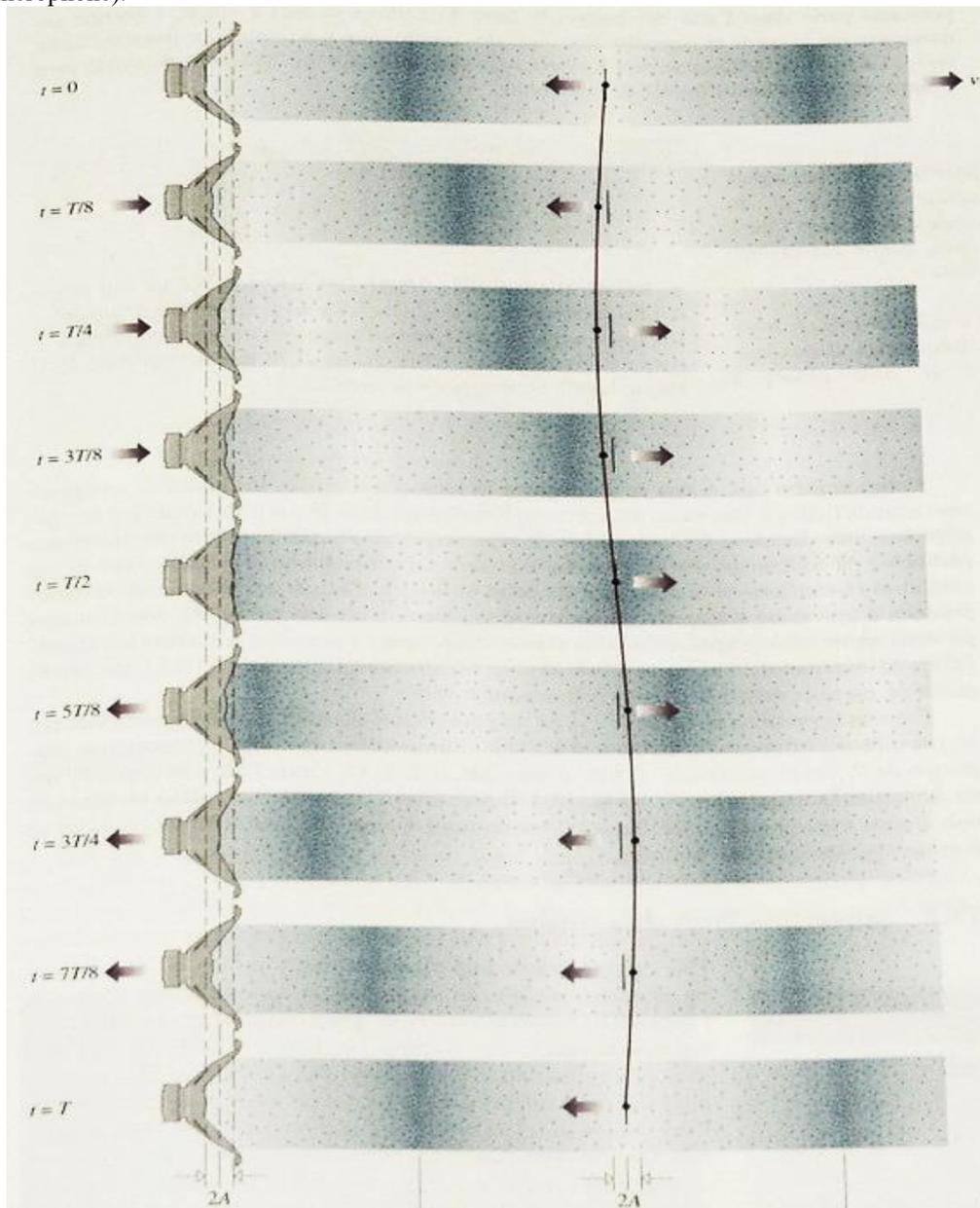
Le son se propage d'une ..... (ou .....) (.....)  
à un ..... (.....) en passant par le .....

L'oreille perçoit les fréquences entre .....

Au niveau microscopique, ce sont les molécules du milieu qui vibrent en entraînant leurs voisines dans leur mouvement de vibration, de proche en proche, engendrant une onde qui se déplace dans l'espace. Cette onde nécessite donc un milieu matériel pour se propager. C'est une onde .....

Au niveau macroscopique, il y a propagation de zones de (légère) dépression-dilatation (concentration faible en molécules du milieu) et de zones de (légère) surpression-compression (concentration plus élevée en molécules du milieu) par rapport à la pression atmosphérique. L'onde sonore est donc une onde de pression

Ces zones de dépression et de surpression sont dues, à l'origine, au mouvement vibratoire périodique d'un vibreux au niveau de la source, et peuvent être pressenties en mettant un autre vibreur en mouvement au niveau du récepteur (tympan, membrane d'un microphone).



(Hecht, Physique, de Boeck)

- Sur le schéma ci-dessus, repasser en rouge la membrane du haut-parleur. Son mouvement est-il périodique ?
- Faire visualiser, par exemple à  $t = T/8$ , les zones de compression et les zones de dilatation à l'aide d'accolades.
- Faire visualiser une zone de dépression-dilatation qui se propage, au moyen d'accolades, sur les 9 dessins.
- Une des molécules d'air est visible en plus gros au centre des dessins. Le petit trait vertical correspond à sa position en l'absence de son, c'est-à-dire au repos. Décrire son mouvement :  
En déduire un qualificatif pour l'onde sonore :
- Faire figurer la longueur d'onde du son émis.

## 2) Son et bruit

Un son en un point de l'espace correspond à une perturbation **périodique** de la pression atmosphérique en ce point, par opposition à un bruit (où la perturbation existe mais n'est pas périodique).

- Exemple : voici un graphique mesurant la pression en un lieu en fonction du temps. Positionner les axes, les orienter et les légènder (pression en Pascal Pa et temps en s) :



S'agit-il d'un son ? Pourquoi ?

Ce genre de graphique (..... en fonction du ..... ) est appelé .....

### 3) Caractéristiques d'un son

Ecouter les différents sons joués au bureau, proposer des expériences pour remplir le tableau suivant :

Un son possède quatre caractéristiques :

Caractéristique du son	Correspondance pour le signal	Qualificatifs du son
<u>Hauteur</u>	Liée à .....	
<u>Intensité</u>	Liée à .....	.....
<u>Durée</u>	Liée à .....	
<u>Timbre</u>	Lié à ..... Lié plus exactement .....	

(spécialement pour les musiciens) Sur la partition de musique suivante, comment le compositeur choisit-il les quatre caractéristiques du son qu'il désire obtenir pour sa symphonie ? (fagotti : basson)

Mozart  
Symphony No. 31  
in D Major  
K. 297  
"Paris"

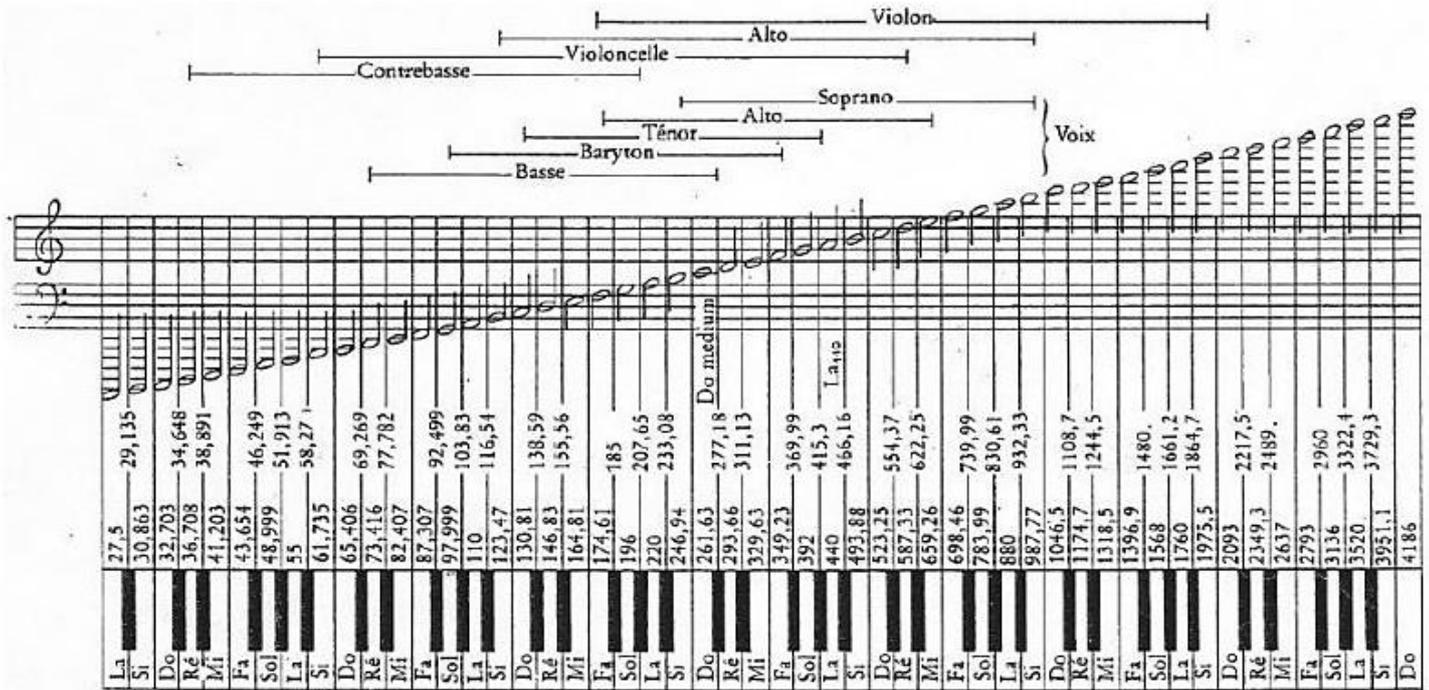
Allegro assai.

Flauti.  
Oboi.  
Clarineti in A.  
Fagotti.  
Corni in D.  
Trombe in D.  
Timpani in D.A.  
Violino I.  
Violino II.  
Viola.  
Violoncello e Basso.

Allegro assai.

### a) Hauteur d'un son

La référence est la note la4 à une fréquence de 440 Hz (celle du téléphone).

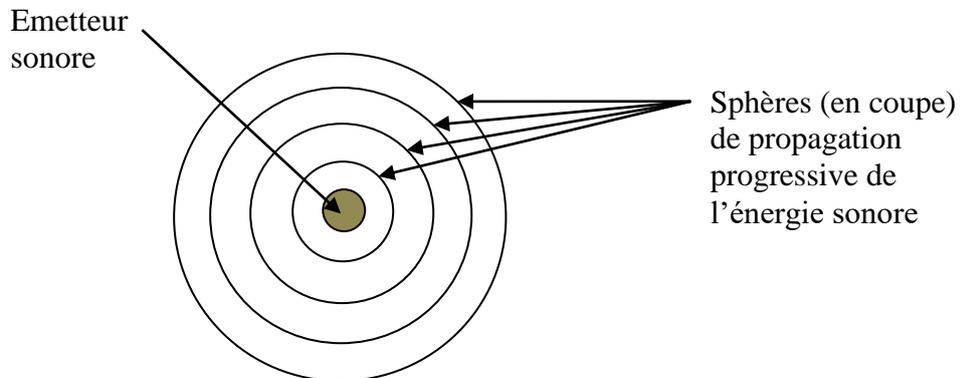


L'oreille perçoit les fréquences entre ..... En-deça, on trouve les ..... et au-delà, on trouve les .....

### b) Intensité et niveau sonore

Un son correspond à la propagation d'une énergie provenant d'un émetteur. De l'énergie est donc émise à la sortie d'un émetteur sonore. On lui associe une puissance sonore en W.

De part la propagation de l'onde sonore émise, cette énergie se propage alors dans l'air suivant des sphères de plus en plus grandes si la vitesse du son est la même en toute direction, concentriques, le centre de chacune correspondant à l'émetteur :



L'intensité sonore en un point quelconque de l'espace, du son émis par l'émetteur est notée I et s'exprime en W.m<sup>-2</sup>. C'est, en un point de l'espace, la puissance P reçue par unité de surface S du front d'onde passant par ce point.

$$I = P/S \quad \text{unités du SI : } P \text{ en W, } S \text{ en m}^2 \text{ et } I \text{ en W.m}^{-2}$$

Elle est, de plus, proportionnelle à l'inverse du carré de la distance à la source. Autrement dit, si on prend deux points quelconques A et A' distants de d et d' de l'émetteur alors on a la relation suivante entre l'intensité en A et l'intensité en A' :

$$\frac{I}{I'} = \frac{d'^2}{d^2}$$

C'est-à-dire que si la distance est 5 fois plus grande par rapport à l'émetteur, alors l'intensité sonore est 25 fois plus faible.

On définit l'intensité sonore de référence correspondant en moyenne au seuil d'audibilité pour l'oreille humaine et égale par convention à I<sub>0</sub> = 10<sup>-12</sup> W.m<sup>-2</sup>.

J'analyse le cadre précédent : en réalité tout doit me paraître logique :

Première phrase : Dès que je rencontre une grandeur connue, je me rappelle son unité dans le SI, ici l'unité d'une énergie.

Troisième phrase : je me rappelle à quoi correspond 1 W. Je fais une phrase expliquant ce que signifie par exemple que la puissance d'un haut-parleur vaut 40 W en utilisant les termes « émettre », « énergie », « durée » « joule » et « seconde » forcément.

Deuxième paragraphe et figure : j'analyse le document : je sais expliquer pourquoi les sphères sont de plus en plus grandes. Je comprends pourquoi ce sont des sphères si la vitesse du son est la même dans toutes les directions et je fais un nouveau dessin dans le cas par exemple où la vitesse dans la direction verticale est plus faible que la vitesse dans la direction horizontale.

Troisième paragraphe : on définit une nouvelle grandeur avec une unité donc SURTOUT je visualise ce qu'elle veut représenter : je fais une phrase en français expliquant ce que signifie par exemple une intensité sonore de  $2 \text{ W.m}^{-2}$  en utilisant déjà tous les termes introduits pour la puissance et des nouveaux termes correspondant au «  $\text{m}^{-2}$  » (c'est-à-dire le « par mètre carré »).

J'essaie alors de comprendre pourquoi cette intensité est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance au récepteur : pour cela j'imagine une certaine énergie émise  $E$  en une seconde pour faire simple et je me mets à la place de cette énergie : je sens que je me propage dans l'air suivant une sphère qui grossit, qui grossit ; une sphère de rayon  $d$  a une surface de  $4\pi d^2$  et même si je ne me rappelle pas cette formule, je sais obligatoirement qu'il y a un  $d^2$  qui intervient pour que cela corresponde à une surface en analyse dimensionnelle. J'en déduis alors  $I$  par la formule .....

Je sens que c'est normal que  $I$  décroît ainsi plus  $d$  augmente car la puissance totale est ..... mais se répartit sur une sphère de plus en plus grande. J'en déduis alors correctement la formule proposée entre  $I$  et  $I'$

et je vérifie la phrase suivante en prenant un exemple concret pour  $d$  et pour  $d'$  si je n'arrive pas à le faire dans le cas général.

Dernière phrase : je la comprends, notamment le terme « seuil » et le terme « convention » en utilisant des mots simples pour la reformuler.

### Niveau d'intensité sonore L

La loi de Fechner indique que « la sensation, liée au niveau d'intensité sonore ( $L$ ) perçu, varie comme le logarithme décimal de l'excitation du tympan liée à l'intensité sonore ( $I$ ) reçue », c'est-à-dire que si l'intensité sonore est multipliée par 10, je perçois un son qui aura augmenté de 10 dB mais si elle est multipliée par 100, je perçois un son qui n'a pas augmenté de 100 dB mais seulement de 20 dB. Et si l'intensité est multipliée par 1000, je ne perçois un son qui a augmenté que de 30 dB et non de 1000. Si l'intensité est multipliée par  $10^n$  alors je perçois un son qui augmente de  $10 \cdot n$  décibels et non de  $10^n$  décibels.

Le niveau sonore  $L$ , pour une intensité sonore  $I$ , est ainsi défini mathématiquement :

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Avec  $I$  en  $\text{W.m}^{-2}$  et  $I_0$  valant  $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$  (référence correspondant au seuil audible moyen),  $L$  en dB (décibel)

Inversement, comme  $\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{L}{10}$  alors  $\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}$  (fonction réciproque) et donc

$$I = I_0 10^{\frac{L}{10}}$$

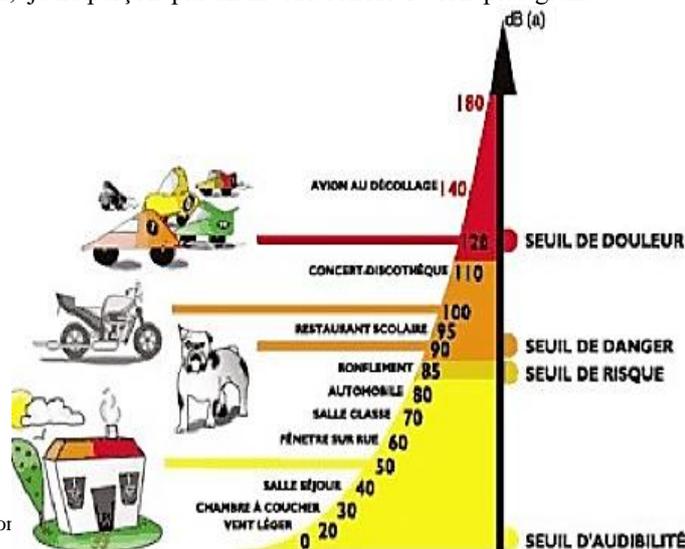
J'analyse le cadre proposé. La loi de Fechner peut paraître obscure dans sa première partie mais plus simple avec son explication. Je fais très attention aux termes employés dans les exemples cités : si l'intensité est **multipliée** par ... alors je perçois qqch qui n'est pas multiplié mais qui augmente de ... donc une MULTIPLICATION par 10 de l'intensité correspond à une ADDITION de 10 du niveau sonore perçu.

Je le vérifie sur ma chaîne hifi : si la puissance de ma chaîne est multipliée par 1000, je n'entends pas du tout 1000 fois plus fort mais on ajoute 30 dB en réalité. De même, lorsque j'entends 10 chanteurs, je ne perçois pas un niveau sonore 10 fois plus grand mais seulement qui a augmenté de 10 dB et si je veux encore augmenter ce niveau de 10 dB, je dois passer à ..... chanteurs.

Je fais des calculs alors avec la formule donnée en utilisant ma calculatrice et la touche log avec des exemples simples d'abord : taper  $\log(1)$ ,  $\log(10)$ ,  $\log(1000)$ ,  $\log(10000)$ ...  $\log(10^n)$ .

Puis déterminer, en ayant compris le mécanisme, de tête (sans calculatrice) le niveau sonore correspondant à une puissance  $I$  valant  $I_0$ , puis  $10 I_0$  puis  $100 I_0$  puis  $10^8 I_0$  etc.

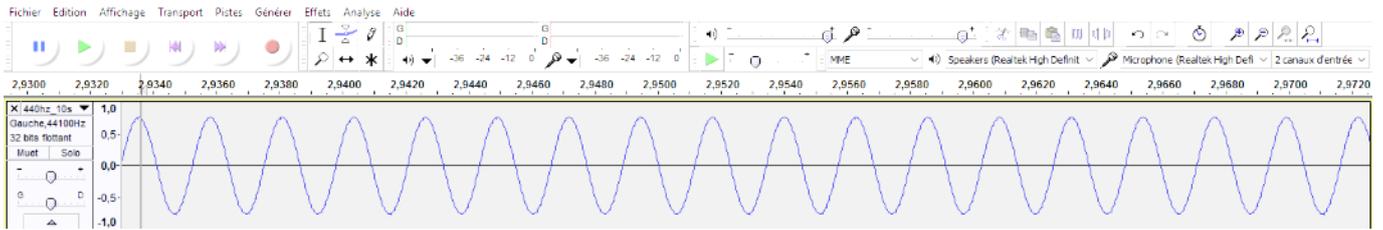
Je comprends, d'après la formule, d'où vient le préfixe « déci » dans *décibel*...



### c) Timbre d'un son

Visualisation du signal sonore d'un diapason et d'un violoncelle avec le logiciel libre Audacity.  
 Ecouter les deux sons, en quoi sont-ils différents ?

Signal correspondant à la note la4 jouée par un diapason ou le signal sonore de fermeture de porte du métro.



On remarque que le signal est ..... **On dit que le son est pur** (le mot « simple » est parfois rencontré).

Signal correspondant à la note la4 jouée par un violoncelle.



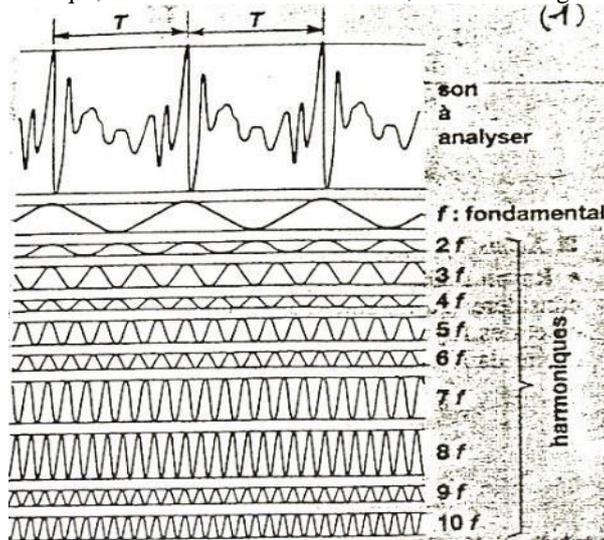
Le signal est bien ..... mais pas sinusoïdal. **On dit que le son est complexe.**

C'est grâce aux résultats du mathématicien Fourier qu'on peut aujourd'hui interpréter un son complexe comme ..... de sons purs. Il énonce à la fin du XIXème siècle

Tout signal périodique de fréquence  $f$  peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux dont les fréquences valent  $f_1 = f$ ,  $f_2 = 2*f$ ,  $f_3 = 3*f$ ,  $f_4 = 4*f$  ...  $f_n = n*f$  avec  $n$  un entier naturel non nul. et dont les amplitudes que l'on peut noter  $A_1$ ,  $A_2$  etc. sont calculable par des opérations mathématiques décrites par Fourier.

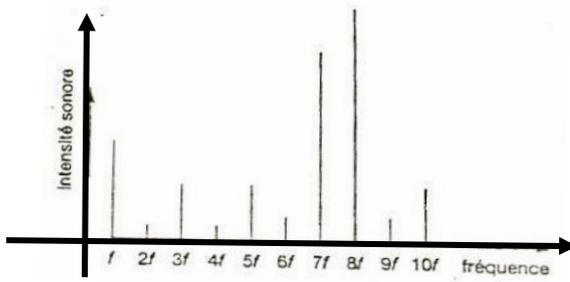
Le signal sinusoïdal correspondant à  $f_1 = f$  et à  $A_1$  s'appelle le fondamental ou 1<sup>er</sup> harmonique.  
 Le signal sinusoïdal correspondant à  $f_2 = 2*f$  et à  $A_2$  s'appelle le 2<sup>ème</sup> harmonique.  
 Le signal sinusoïdal correspondant à  $f_3 = 3*f$  et à  $A_3$  s'appelle le 3<sup>ème</sup> harmonique etc.

Le son présenté en V 2) peut être décomposé ainsi par l'analyse de Fourier : sous le signal périodique initial ont été figurés les différents signaux sinusoïdaux qui, en faisant toute leur somme, donnent le signal de départ :



- Compter le nombre de périodes du dernier signal sinusoïdal représenté et justifier que ce soit le 10<sup>ème</sup> harmonique.
- Quel est l'harmonique qui possède toujours la plus grande période (ou la plus petite fréquence) ?
- Quel est l'harmonique qui possède la plus grande amplitude ici ?
- Quel est l'harmonique qui possède la plus petite amplitude ici ?

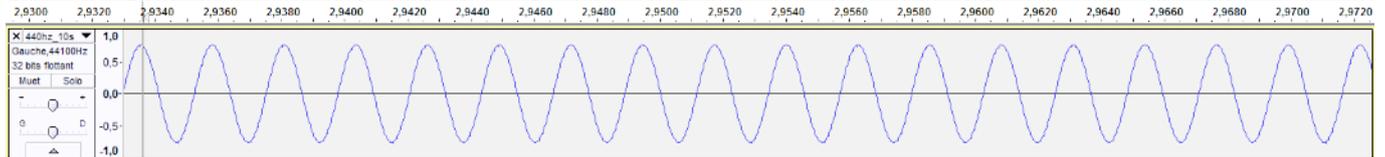
Pour réunir toutes ces informations, on fait figurer en abscisse les fréquences des différents harmoniques et en ordonnée les amplitudes de chacun d'eux. Ce nouveau graphique est appelé spectre du signal du départ, donc ici du son étudié.



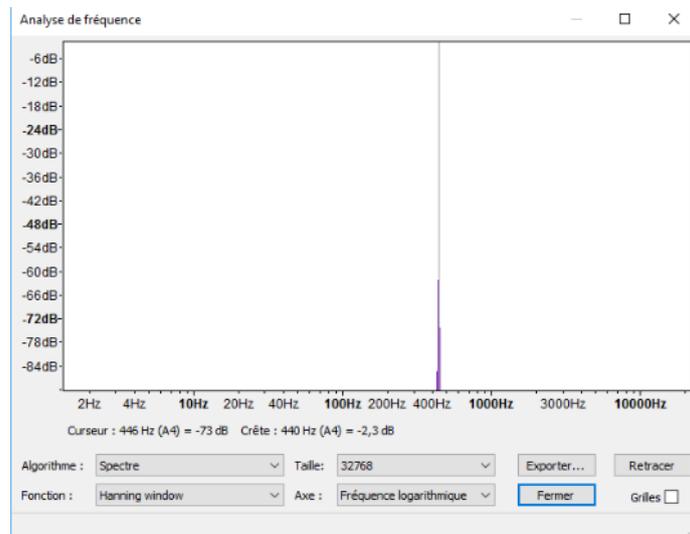
- Le spectre ci-contre est-il en adéquation avec vos réponses précédentes ?
  - Combien d'harmoniques possède le son étudié ici ?
  - Ce son est-il plutôt riche ou plutôt pauvre ?
  - Quel serait le spectre d'un son le plus pauvre possible ?
- Combien y aurait-il d'harmonique(s) ? Et quelle forme aurait donc le signal correspondant ?

Retour sur les sons étudiés avec Audacity :

Signal correspondant à la note la4 joué par un diapason ou le signal sonore de fermeture de porte du métro.



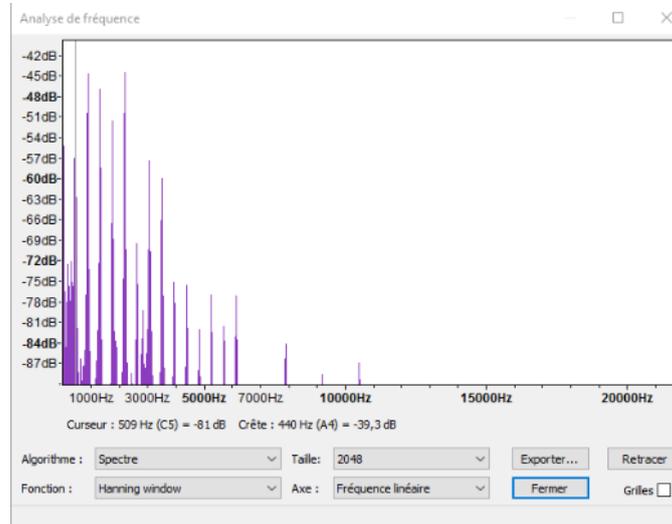
Spectre correspondant :



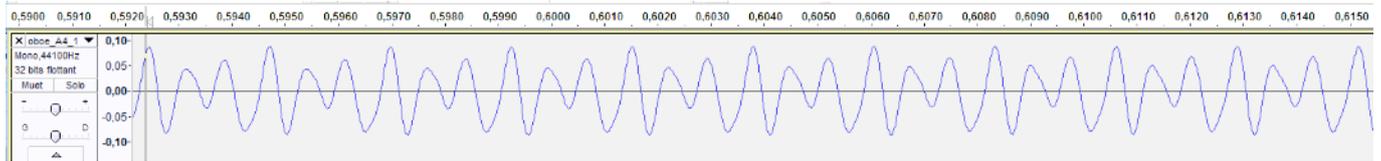
Violoncelle jouant un la4



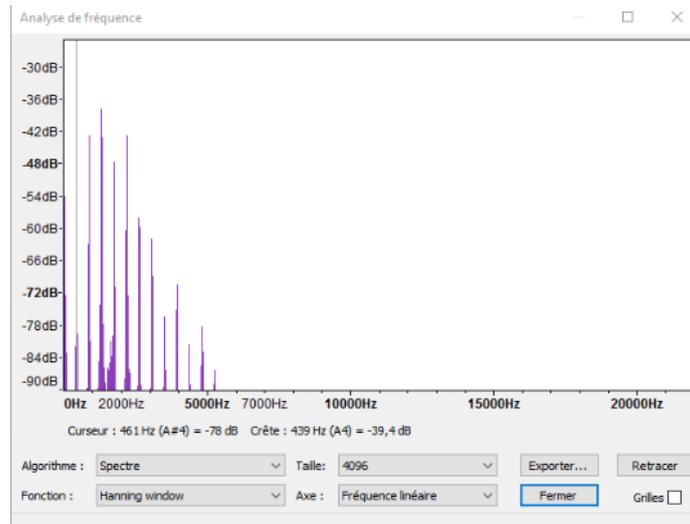
Spectre correspondant :



Spectre violoncelle



Hautbois la4



Spectre hautbois

- Comment retrouver rapidement la fréquence du son joué ?
- Le 1<sup>er</sup> harmonique est-il toujours celui de plus grande amplitude ?

Deux sons de même hauteur, de même intensité et de même durée peuvent pour autant donner des sensations différentes en raison de leur ..... Qui est lié à la composition spectrale (présence, amplitudes relatives des harmoniques) et également à son évolution dans le temps : on reconnaît un instrument de musique aussi par ..... et l'extinction du son.

Un sonagramme permet cette étude plus approfondie des harmoniques en fonction de la durée du son émis (voir notice Audacity, s'entraîner chez soi). Exemple : guitare

Pour les curieux : site pour créer des sons, principe du synthétiseur :

On peut facilement sommer des signaux électriques sinusoïdaux pour obtenir un signal global dit « synthétisé » que les **synthétiseurs** envoient à leurs haut-parleurs. C'est le principe d'un instrument de musique électronique.

Ouvrir internet à la page suivante :

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Ondes/general/synthese.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/general/synthese.html)

C'est la simulation d'un synthétiseur : vous pouvez envoyer au haut-parleur du casque audio une somme de signaux sinusoïdaux avec des amplitudes variables.

## d) La voix humaine

### Document : reconnaissance vocale et applications



Logo de reconnaissance vocale  
souvent rencontré

La reconnaissance vocale est une technologie relativement récente, qui séduit énormément les professionnels et le grand public par son aspect pratique, ludique et ergonomique.

Les applications de cette technologie sont nombreuses : navigation sur un serveur vocal au téléphone, apprentissage d'une langue étrangère, commandes vocales dans

les voitures, les téléphones ou bien encore dans les salles d'opérations chirurgicales, dictée vocale (écriture en direct d'un texte dicté), identification vocale dans les zones sécurisées ou bien dans le cadre d'une enquête judiciaire, etc.

Le vieux rêve de la communication avec les machines en utilisant simplement la parole n'a jamais été aussi près d'être atteint.

1) Proposer un protocole, en binôme, permettant de montrer qu'un ordinateur peut faire la différence entre la voyelle a et la voyelle i.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

2) Mettre en place le protocole et conclure.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3) Quelles limites rencontre la reconnaissance vocale aujourd'hui au niveau phonétique (« la citerne est pleine d'eau », « la scie terne est pleine d'os ») ? Comment y pallier ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....