

2 – PROPAGATION D'UN SIGNAL

Plan du chapitre

1 Généralités	2
1.1 Qu'est-ce qu'un signal ?	2
1.2 Acquisition d'un signal	2
1.3 Signaux périodiques	2
2 Propagation d'un signal	5
2.1 Mise en évidence	5
2.2 Différents types d'onde	5
2.3 Transparence ; atténuation	7
2.4 Célérité	8
2.5 Retard temporel	9
2.6 Ondes progressives sinusoïdales	10
Exercices	13
Travaux dirigés	16

Programme officiel – Premier semestre – **Thème S – ondes et signaux**

NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
<p>S.1 Propagation d'un signal physique</p> <p>Signaux physiques.</p> <p>Exemples de signaux physiques.</p>	<p>Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux mécaniques, acoustiques, électriques et sismiques.</p>
<p>Propagation d'un signal dans un milieu homogène, illimité, non dispersif et transparent</p> <p>Célérité.</p> <p>Retard temporel.</p> <p>Approche descriptive de la propagation d'un signal unidimensionnel.</p> <p>Cas particulier du signal sinusoïdal : amplitude, double périodicité spatiale et temporelle.</p>	<p>Obtenir l'expression de la célérité par analyse dimensionnelle à partir de grandeurs physiques fournies. Interpréter l'influence de ces grandeurs physiques sur la célérité. Citer des valeurs de la célérité du son dans l'air et dans l'eau dans les conditions usuelles.</p> <p>Exploiter la relation entre la distance parcourue par le signal, le retard temporel et la célérité.</p> <p>Exploiter des données pour localiser l'épicentre d'un séisme.</p> <p>Exploiter une représentation graphique donnant l'amplitude du signal en fonction du temps en un point donné, ou en fonction de la position à un instant donné.</p> <p>Exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.</p> <p>Citer les limites en termes de fréquences du spectre audible par l'être humain.</p> <p>Mesurer la célérité d'un phénomène ondulatoire.</p>

Protégé par la licence Creative Commons

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr>

1 Généralités

1.1 Qu'est-ce qu'un signal ?

Signal physique

Un signal physique est une grandeur dont on peut suivre l'évolution, le plus souvent au cours du temps.

Nature d'un signal

- Signaux électriques (tension ou courant), par exemple dans l'influx nerveux.
- Signaux optiques (intensité lumineuse) qui est à la base de phénomène de la vision.
- Signaux mécaniques (position, pression), telle la position de l'extrémité d'un ressort en mouvement dans un sismographe, ou la surpression détectée par l'oreille à l'origine des signaux sonores.
- Signaux thermiques (température).
- Signaux chimiques (concentration d'une espèce chimique), à la base de la régulation hormonale ou de la communication entre êtres vivants.

Transport d'information

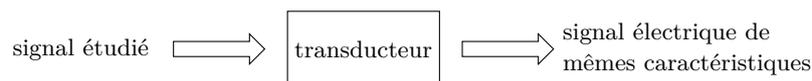
Un signal physique transmet de l'information à celui qui le capte.

1.2 Acquisition d'un signal

- Pour étudier un signal, on doit pouvoir mesurer sa valeur au cours du temps.
- La plupart du temps, cette mesure convertit le signal étudié en un signal électrique de mêmes caractéristiques.
- Le signal électrique peut être facilement visualisé (oscilloscope), enregistré, traité par un ordinateur ou stocké dans une mémoire.

Transducteur

Un transducteur convertit un signal quelconque en un signal électrique ou réciproquement.

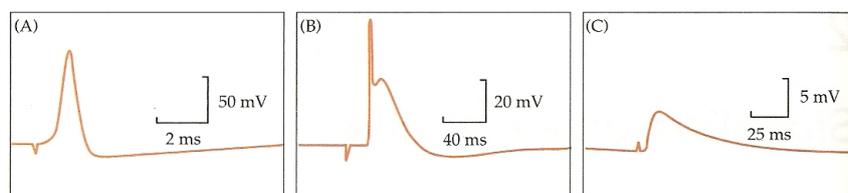


Exemples de transducteurs

- microphone et haut parleur
- œil
- oreille
- etc

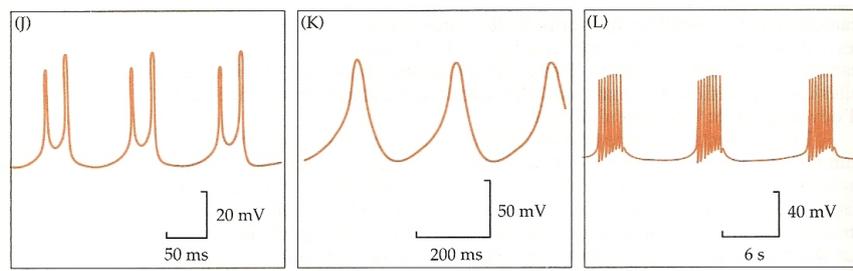
1.3 Signaux périodiques

Exemple de la tension entre l'intérieur et l'extérieur d'un neurone, après excitation de celui-ci ¹.



1. Extrait de Z.H. Hall, *Introduction à la neurobiologie moléculaire*, Flammarion, 1994.

Autres signaux obtenus par l'excitation d'un neurone.



Signal périodique

Un signal est périodique lorsqu'il se répète identiquement à intervalles de temps réguliers.

Caractéristiques d'un signal périodique

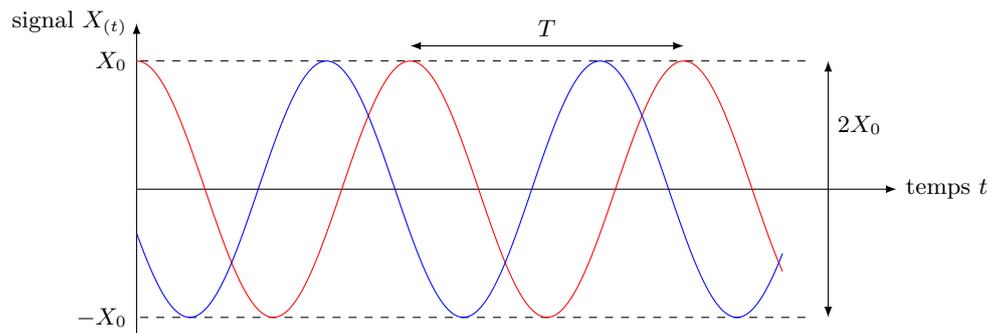
- La **période** T (en seconde) est l'intervalle de temps séparant deux parties identiques consécutives du signal, et qui s'exprime en secondes.
- La **fréquence** f (en hertz Hz) est le nombre de fois que le signal se répète identiquement par unité de temps.

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{avec} \quad 1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

Signal sinusoïdal

C'est le plus simple des signaux périodiques. La grandeur physique support du signal est de la forme :

$$X(t) = X_0 \times \cos(\omega t + \varphi)$$



Caractéristiques d'un signal sinusoïdal

- X_0 : **amplitude** de même unité que X
- $2X_0$: **valeur crête à crête**
- ω : **pulsation** en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
- φ : **phase** ou **déphasage**

Valeur efficace

La valeur efficace du signal sinusoïdal est : $X = X_m / \sqrt{2}$.

Lien entre pulsation et période

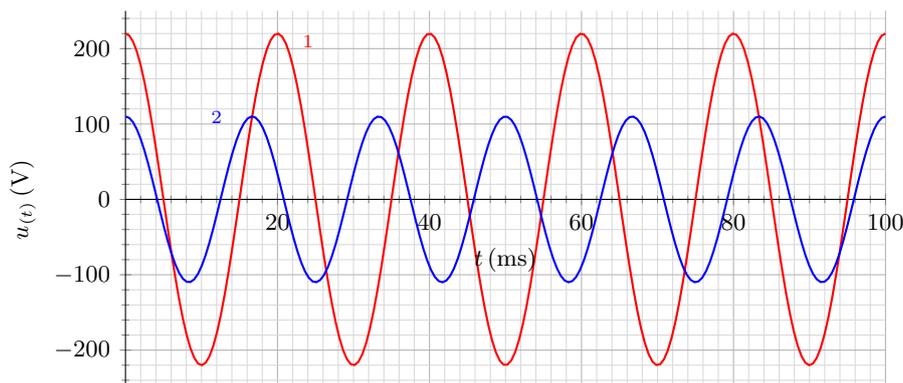
La pulsation, la fréquence et la période sont reliées par :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \times f$$

Démonstration (à connaître)

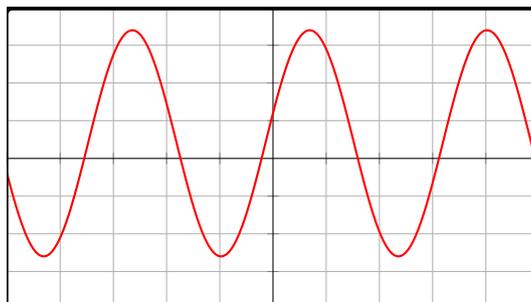
Application 1 : tension sur le réseau domestique

La tension électrique $u(t)$ délivrée aux consommateurs est sinusoïdale. On réalise un enregistrement de $u(t)$ en Europe (courbe 1) et en Amérique du Nord (courbe 2). Déterminer la fréquence, la pulsation ω , l'amplitude U_m et la valeur efficace U de la tension dans chaque cas. Écrire dans chaque cas l'expression de $u(t)$ en prenant un déphasage nul.



Application 2 : tension repérée sur un oscilloscope

On enregistre la courbe suivante sur un oscilloscope, réglé de la façon suivante : la base de temps en abscisses est de $0,02 \text{ ms/div}$ et l'échelle verticale est de $0,5 \text{ V/div}$. Une division 1 div correspond à un carreau. Déterminer la pulsation ω , l'amplitude U_m et la valeur du décalage vertical U_0 de cette tension : $U(t) = U_0 + U_m \times \cos(\omega t + \varphi)$.



2 Propagation d'un signal

2.1 Mise en évidence

Exemple de la propagation d'une déformation le long d'une corde sur le simulateur de Tristan RONDEPIERRE : http://proftr.fr/AccesLibre/Simulateurs_en_ligne/simulaCORDE/simulaCORDE.html

Émission d'un signal

L'émission d'un signal correspond à une perturbation locale de l'espace : la valeur d'une grandeur est localement écartée de sa valeur d'équilibre : surtension, suppression, déplacement, variation de température, etc.

Propagation d'un signal

Lorsque la perturbation se déplace dans l'espace, on parle de propagation du signal. La grandeur physique support du signal dépend alors du temps et de la position spatiale : $X_{(x,y,z,t)}$. C'est une **onde** (un phénomène ondulatoire).

Transport d'information et d'énergie

La propagation d'un signal permet la **transmission d'une information** d'un point de l'espace à un autre.
Elle permet le **transport d'énergie** d'un point de l'espace à un autre.

Cadre du modèle

En BCPST, on ne considère que les ondes qui se propagent dans un milieu ayant les propriétés suivantes.

- Le milieu est **homogène** : ses propriétés sont identiques en tous les points de l'espace.
- Le milieu est illimité : on ne considère pas les bords du milieu sur lesquels il peut y avoir réflexion de l'onde.
- Le milieu est non dispersif : le signal garde la même forme lors de sa propagation.
- Le milieu est **non absorbant** : l'énergie transportée n'est pas dissipée dans le milieu.

Un phénomène ondulatoire ne peut exister que si :

- une perturbation modifie le milieu en un point (le déplacement vertical d'un point de la corde),
- le milieu s'oppose à cette perturbation : force de frottement, force de rappel ou autre (la tension de la corde).

2.2 Différents types d'onde

2.2.1 Ondes transversales

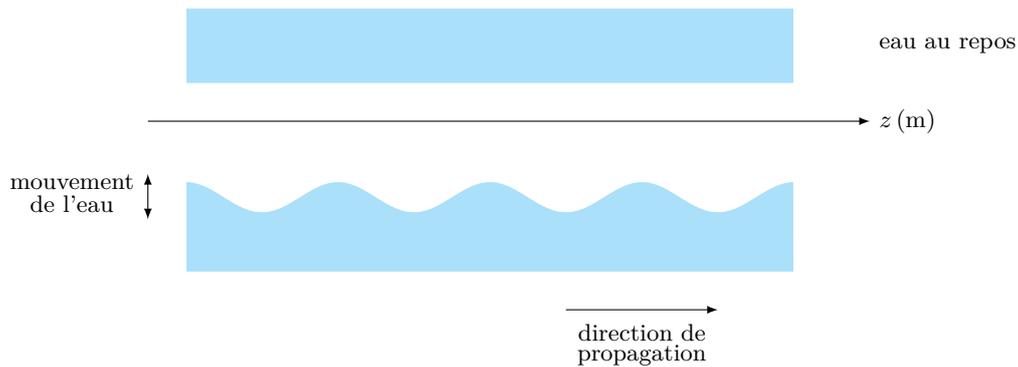
Onde transversale

Une onde est **transversale** si la perturbation a lieu dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation.

Exemple de la déformation de la corde : la propagation se fait le long de la corde, et la déformation est un mouvement perpendiculaire à la corde.

Exemple de la houle : le niveau de l'eau monte et descend verticalement alors que l'onde se propage horizontalement². Voir animation par KRAAIENEST (Travail personnel, CC BY-SA 4.0) : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3374585>

2. Le mouvement de l'eau est vertical, mais le mouvement d'une molécule d'eau est beaucoup plus complexe : elle avance beaucoup moins vite que l'onde selon une trajectoire décrivant quasiment un cercle vertical.



Exemple de la lumière : un champ électrique et un champ magnétique vibrent perpendiculairement à la direction de propagation.

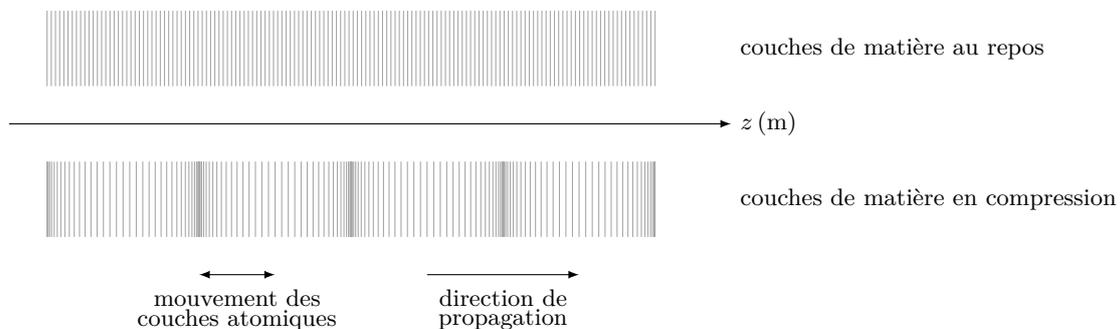
2.2.2 Ondes longitudinales

Onde longitudinale

Une onde est **longitudinale** si la perturbation a lieu dans une direction parallèle à la direction de propagation.

Onde sonore

Une onde sonore correspond à un mouvement oscillatoire des particules du milieu. Ce mouvement entraîne une surpression locale selon un plan perpendiculaire à leur mouvement. La surpression se propage de proche en proche selon une direction parallèle au mouvement oscillatoire des particules.



Simulation de la propagation d'une onde sonore selon une onde circulaire autour d'un émetteur multidirectionnel. Les zones plus sombres correspondent aux surfaces en compression (Thierry DUGNOLLE — Travail personnel) : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18812489>

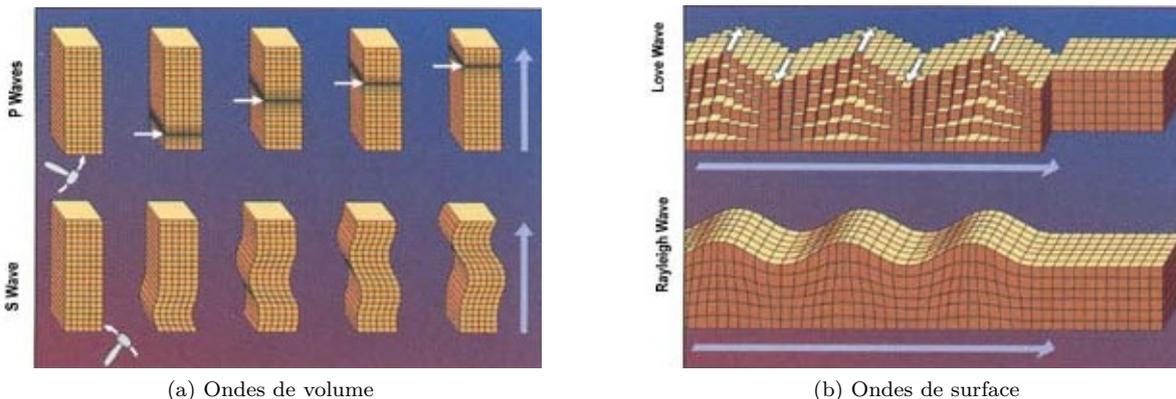
Le mouvement oscillatoire des molécules de matière se superpose à l'agitation désordonnée des molécules du milieu. Voir le simulateur de Tristan RONDEPIERRE : http://proftr.fr/AccesLibre/Simulateurs_en_ligne/simulaSON/simulaSON.html

2.2.3 Ondes sismiques

Les ondes sismiques peuvent être divisées en deux groupes. Les ondes de volume sont les plus rapides ; elles modifient la structure au sein du volume de la croûte terrestre :

- les onde P (primaire) correspondent à une vibration longitudinale (analogue à une onde sonore),

- les ondes S (secondaire) correspondent à une vibration transversale.



Pour visualiser la propagation d'une onde P et d'une onde S, voir les simulations de Christophe Dang NGOC CHAN (travail personnel CC BY-SA) :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_compression_impulsion_1d_30_petit.gif
et https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_cisaillement_impulsion_1d_30_petit.gif

Les ondes de surface modifient la forme de la surface et sont les plus destructrices :

- les ondes R (Rayleigh) correspondent à une déformation verticale (analogue à la houle),
- les ondes L (Love) correspondent à une déformation de cisaillement.

2.3 Transparence ; atténuation

Milieu transparent et milieu opaque

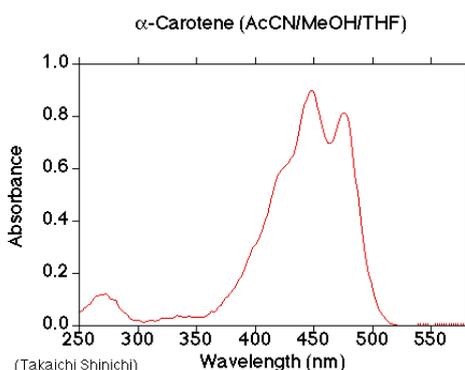
Un milieu est dit **transparent** s'il permet la propagation du signal. Dans le cas contraire, il est opaque. Un milieu peut être transparent à un signal dans certaines conditions et opaque dans d'autres (le verre est transparent à la lumière visible et opaque à la lumière ultraviolette).

Atténuation du signal

Si le milieu est absorbant, l'énergie transportée se dissipe lors de sa propagation et le signal s'atténue jusqu'à s'annuler.

Application 3 : spectrophotométrie

Le spectre UV-visible d'une solution aqueuse de carotène α est donné ci-dessous. Le carotène α est-il transparent à la lumière visible? Faire une réponse aussi précise que possible.



2.4 Célérité

2.4.1 Définition et exemples

Célérité d'une onde

La **célérité** c de l'onde est la vitesse de propagation du signal.

Elle correspond à la vitesse de transmission de l'information transportée par l'onde. C'est aussi la vitesse à laquelle l'énergie est transportée.

Unité de la célérité

La célérité s'exprime en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Célérité de la lumière

Dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. C'est une constante universelle.

Dans un milieu matériel : $v = \frac{c}{n}$ avec n l'indice optique du milieu.

L'indice optique est un nombre sans dimension, tel que $n \geq 1$.

Célérité du son

milieu	air (20 °C)	eau liquide	acier
célérité c	$\approx 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (à connaître)	$\approx 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (à connaître)	$\approx 5600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Application 4 : Jesse James était-il un bon physicien ?

Pourquoi Jesse James collait-il son oreille au rail lorsqu'il projetait d'attaquer un train ?

Application 5 : temps de propagation de la lumière

Calculer le temps nécessaire à la lumière émise par le Soleil pour parvenir à la Terre. La Terre est située à $150 \cdot 10^6 \text{ km}$ du Soleil (cette distance est appelée une unité astronomique 1 UA). Même question pour Neptune qui se situe à 30,07 UA du Soleil.

L'année-lumière

Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière dans le vide en une année. À quelle distance en kilomètres cela correspond-il ?

2.4.2 Expression de la célérité par une analyse dimensionnelle

La célérité d'une onde dépend des caractéristiques du milieu et du type d'onde. On peut trouver l'expression de la célérité par analyse dimensionnelle à partir des paramètres pertinents, à l'exception des éventuels coefficients numériques sans dimension.

Célérité d'une onde sonore dans un fluide

La célérité d'une onde sonore dans un fluide dépend de la masse volumique ρ du fluide (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et de la compressibilité χ du milieu (en Pa^{-1}). La pression est homogène à une force par unité de surface. Une force est homogène à une masse multipliée par une accélération. Exprimer c en fonction de ρ et χ .

Application 6 : célérité d'une onde sonore dans un gaz...

La célérité d'une onde sonore dans un gaz dépend de la masse volumique ρ du gaz (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et de la pression P du gaz (en Pa). Exprimer c en fonction de ρ et P .

... et amélioration de la formule

En réalité, l'expression précédent doit être multipliée par un coefficient numérique $\sqrt{\gamma}$, avec $\gamma = 7/5$. Calculer la vitesse du son dans l'air (masse volumique $1,185 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) sous pression atmosphérique ($1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$).

Application 7 : célérité d'une onde sonore dans un solide

La célérité d'une onde sonore dans un solide dépend de la masse volumique ρ du solide (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et du module de Young E du milieu, homogène à une pression. Exprimer c en fonction de ρ et E .

2.4.3 Facteurs influençant la célérité d'une onde sonore

La célérité du son dans un fluide varie en $\sqrt{1/\chi\rho}$. On peut interpréter les deux facteurs mis en jeu.

- Plus la masse volumique est grande, plus l'onde est lente. Un objet dense est plus difficile à mettre en mouvement qu'un objet peu dense.
- Plus la compressibilité est grande, plus l'onde est lente. Plus le matériau est rigide (peu compressible), plus le retour d'une couche atomique à sa position initiale est rapide.

2.5 Retard temporel

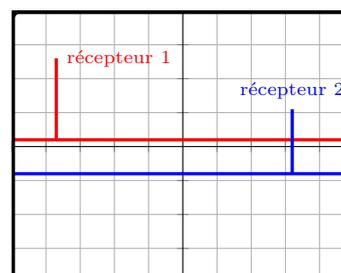
Retard temporel

On appelle retard temporel $\Delta t = t_2 - t_1$ entre deux points distants de d le temps nécessaire à l'onde pour parcourir la distance entre ces deux points. Δt et d sont reliés par la célérité de l'onde :

$$c = \frac{d}{\Delta t}$$

Mesure de la célérité à l'aide du retard temporel

Un bip sonore est envoyé par un émetteur et reçu par deux récepteurs situés à une distance $d = 12,2 \text{ cm}$ l'un de l'autre. Les signaux reçus par les deux récepteurs sont visualisés sur les deux voies d'un oscilloscope. L'échelle de temps de l'oscilloscope est de $50 \mu\text{s}$ par carreau. Déterminer la célérité de l'onde sonore.



Retard entre les ondes sismiques P et S

Les ondes sismiques P et S émises au niveau de l'épicentre d'un séisme ne se propagent pas à la même vitesse. Près de la surface, les ondes P se propagent à $v_p = 6,0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ et les ondes S se propagent à $v_s = 4,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Une station enregistre un séisme : les ondes S sont enregistrées 4,1 s après les ondes P. À quelle distance de la station l'épicentre du séisme se trouve-t-il ?

Pour visualiser la séparation des ondes P et S lors de la propagation, voir les simulations de Christophe Dang NGOC CHAN (travail personnel CC BY-SA) :

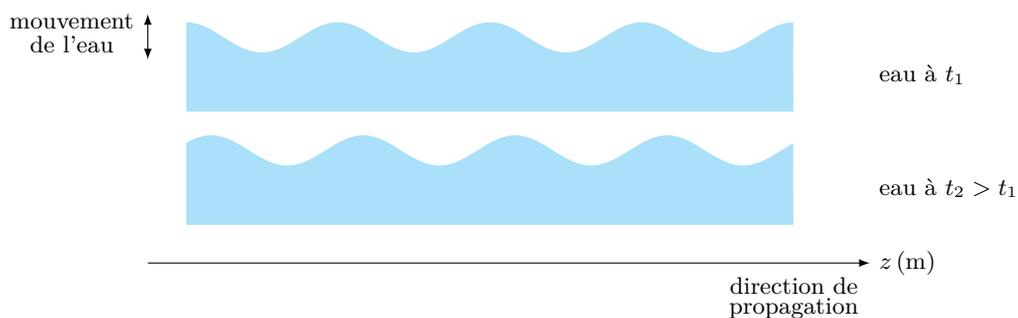
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ondes_P_et_S_1d_30_petit.gif

Application 8 : à quelle distance l'orage se trouve-t-il ?

Un vieux truc pour déterminer la distance à laquelle se trouve un orage est de compter le nombre de secondes qui séparent l'éclair du tonnerre. Établir une formule numérique facilement applicable, qui réponde au problème posé.

2.6 Ondes progressives sinusoïdales

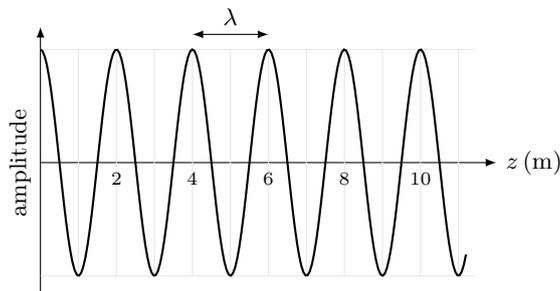
Les ondes les plus simples à étudier sont les ondes sinusoïdales. En réalité, cette étude simple a une portée très générale, car tout signal périodique peut être modélisé par une somme de signaux sinusoïdaux (théorème de Fourier). Un exemple d'onde quasiment sinusoïdale est la houle.



Les ondes sinusoïdales présentent une **double périodicité**.

Périodicité spatiale

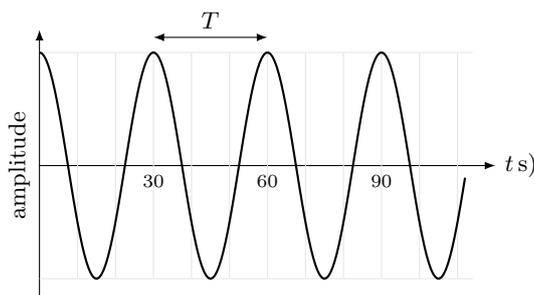
À une date t_0 donnée, le signal en fonction de l'abscisse z est :



L'amplitude varie avec l'abscisse z avec une **périodicité spatiale** appelée la **longueur d'onde** λ (en m).

Périodicité temporelle

En un point donné (abscisse z_0 fixée), le même signal ondulatoire sinusoïdal est :



L'amplitude varie avec le temps t avec une **périodicité temporelle** appelée la **période** T (en s). La fréquence correspondante est $f = 1/T$ (en Hz avec $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$).

La gamme de longueur d'onde de la lumière est très étendue.

domaine	rayons γ	rayons X	ultraviolet	visible
λ	$< 10 \text{ pm}$	$0,01 - 10 \text{ nm}$	$10 - 380 \text{ nm}$	$380 - 780 \text{ nm}$
domaine	infrarouge	micro-ondes	ondes radio	ondes radar
λ	$0,78 - 10 \text{ }\mu\text{m}$	$10^{-3} - 1 \text{ cm}$	$1 - 100 \text{ cm}$	$> 1 \text{ m}$

Perception des ondes lumineuses : spectre visible

Les êtres humains perçoivent la lumière entre 380 nm (limite de l'ultraviolet) et 780 nm (limite de l'infrarouge). C'est le spectre visible, souvent arrondi à 400 nm – 800 nm.

Perception des ondes sonores : spectre audible

Les êtres humains perçoivent les sons entre 16 Hz (limite des infrasons) et 16 kHz (limite des ultrasons). C'est le spectre audible, souvent arrondi à 20 Hz – 20 kHz.

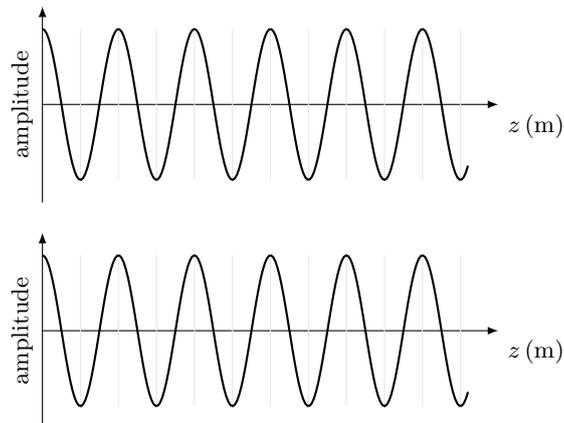
Les deux périodicités spatiale et temporelle sont reliées par la célérité de l'onde.

Relation entre longueur d'onde et période temporelle

La longueur d'onde λ et la période temporelle T vérifient :

$$T = \frac{\lambda}{c}$$

Démonstration (à connaître)



Application 9 : longueur d'onde audibles

Calculer les longueurs d'onde extrêmes du spectre audible pour un auditeur ayant son oreille dans l'air et dans l'eau.

Fréquences visibles

Calculer les fréquences extrêmes du spectre visible.

Exercices

Exercice 1 : célérité d'une onde sur une corde

La célérité d'une onde sur une corde dépend de sa tension F (qui est une force) et de sa masse linéique μ (masse par unité de longueur), selon une loi de la forme :

$$c = \left(\frac{F}{\mu} \right)^a$$

où a est un nombre fractionnaire.

1. Déterminer la valeur de a par analyse dimensionnelle.

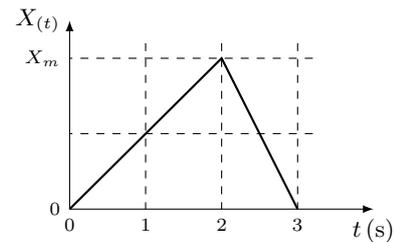
On considère une corde de piano en acier (masse volumique $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et de diamètre $d = 1,2 \text{ mm}$. Sa tension est $F = 850 \text{ N}$.

2. Calculer la masse linéique de la corde.
3. Calculer la vitesse de propagation de l'onde sur la corde.

Exercice 2 : propagation d'un signal

Un signal se propageant en ligne droite selon la direction x est enregistré par un capteur situé à la position $x = 0$. L'allure de l'enregistrement est donnée ci-contre. Un second capteur, placé à $1,5 \text{ m}$ derrière le premier, reçoit le début du signal à la date $t = 750 \text{ ms}$.

1. Déterminer la célérité de l'onde.
2. Représenter l'allure de l'enregistrement de ce second capteur.
3. Représenter l'allure du signal en fonction de x à la date $t = 5 \text{ s}$.



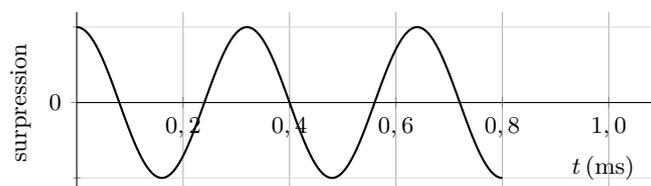
Exercice 3 : principe du sonar

Le mot sonar est un acronyme pour « SOund NAVigation and Ranging ». C'est une méthode de détection d'objets situés sous la mer, basée sur la propagation et la réflexion des ondes sonores. Il est utilisé pour la navigation des sous-marins et des navires (détection d'obstacles ou d'écueils), la pêche (détection des bancs de poissons), l'archéologie (images d'épaves), l'océanographie (cartographie des fonds sous-marins), etc.

On considère un sous-marin situé à une distance L d'un obstacle. Un sonar, situé à l'avant du sous-marin, envoie une impulsion sonore très brève. Le récepteur, situé juste à côté de l'émetteur, reçoit l'écho de cette impulsion après un délai de $38,8 \text{ ms}$.

1. Calculer la distance L du sous-marin à l'obstacle.

Le sonar émet alors une salve d'onde sonore sinusoïdale représentée ci-dessous. Une salve correspond à une émission pendant une durée limitée ; cette durée est de $\Delta t = 800 \mu\text{s}$ dans le cas de ce sonar.

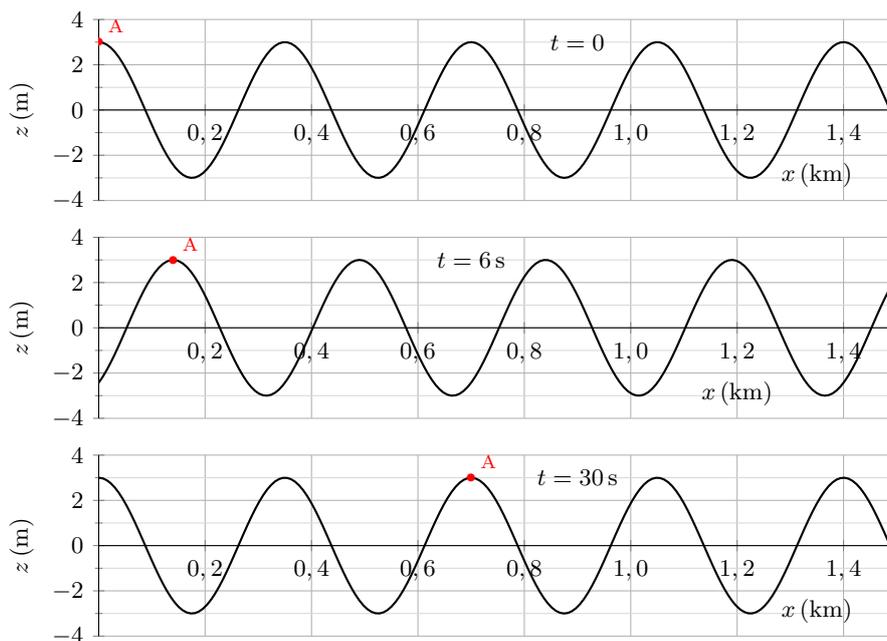


2. Déterminer la fréquence de l'onde émise par le sonar.

- Exprimer et calculer la longueur spatiale de cette salve.
- Calculer les positions du début et de la fin de la salve à la date 12 ms après l'émission. La représenter sur un schéma donnant la surpression en fonction de la distance au sonar.

Exercice 4 : modélisation de la houle

La houle est un ensemble de vagues régulières qui se forme sous l'action du vent lorsqu'il souffle régulièrement sur la mer pendant une durée assez longue. La houle peut se propager sur de très longues distances, jusqu'à 20 000 km, autrement dit la largeur de l'Océan Pacifique. En première approximation, et à une échelle très locale, la houle est assimilable à une onde sinusoïdale. Grâce à un ensemble de capteurs (bouées houlographes), on reconstitue l'allure d'une houle sur le graphique suivant à trois instants différents.



- Estimer la période temporelle, la longueur d'onde et la célérité de la houle (en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$).
- En combien de temps cette houle traverse-t-elle l'Océan Pacifique ?

L'amplitude de la houle est souvent décrite en mesurant la profondeur des « creux » : on parle d'une houle avec des creux de 7 m par exemple.

- À quelle caractéristique d'un signal sinusoïdal un creux correspond-il ?
- De combien sont les creux de la houle représentée ci-dessus ?

Exercice 5 : À propos d'instruments de musique

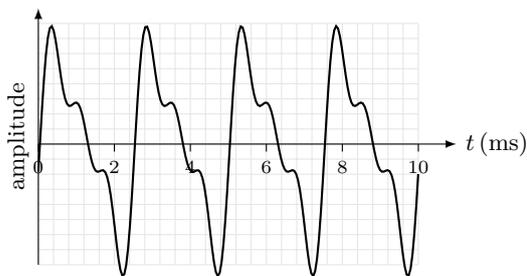
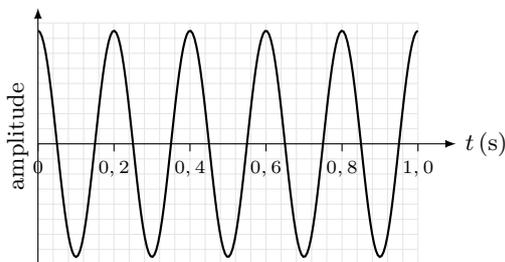
En acoustique musicale, on définit les termes suivants.

- Son : variation purement sinusoïdale à fréquence unique.
- Timbre : superposition de plusieurs sons d'amplitudes et de fréquences différentes, mais multiples entiers du son fondamental (harmonique).
- Bruit : superposition de plusieurs sons ayant des fréquences quelconques.

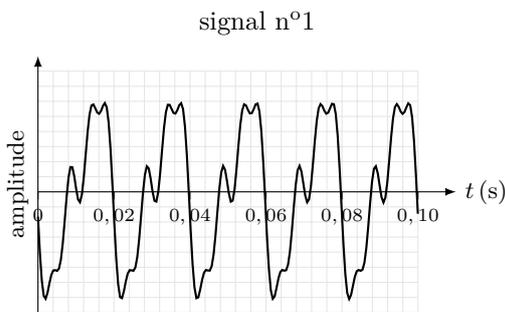
Les domaines de fréquence de quelques instruments de musique sont donnés ci-dessous.

- Domaine de fréquences audibles : 16 Hz à 20 000 Hz.
- Domaine d'émission d'une soprano : 250 Hz à 1200 Hz.
- Domaine d'émission du piano : 30 Hz à 4000 Hz.

Trois exemples de signaux sonores.



signal n°2



signal n°3

1. Pour les trois signaux précédents, préciser :

- s'il s'agit d'un son ou d'un timbre,
- s'il s'agit de signaux sonores audibles,
- lequel correspond à un son de soprano,
- lequel correspond à un son de piano, et si celui-ci joue une note grave ou aiguë.

2. De nombreux animaux communiquent à l'aide d'infrasons, c'est-à-dire dont la fréquence est plus faible que 20 Hz environ. Il est possible d'« écouter » ces sons à condition de modifier la vitesse à laquelle on fait passer l'enregistrement. Doit-on augmenter ou diminuer cette vitesse ?

Exercice 6 : À midi sur Jupiter

On considère une source lumineuse, le Soleil, qui émet de la lumière de façon isotrope³. Soit N le nombre total de photons émis par unité de temps. On considère deux sphères centrées sur le Soleil, l'une (S_T) de rayon égal au rayon de l'orbite terrestre $R_T = 150 \cdot 10^6$ km, et l'autre (S_J) de rayon égal au rayon de l'orbite de Jupiter $R_J = 5,2 \times R_T$.

1. En supposant que le milieu de propagation est parfaitement transparent, que dire du flux de photons à travers les sphères S_T et S_J ?
2. Calculer, en fonction de N et de R_T , le flux de photons à travers une surface de 1 m^2 sur les sphères S_T et S_J . Conclure sur la perception du Soleil d'un Juppitérien et d'un Terrien.
3. L'intensité du signal lumineux est-elle constante ? Discuter et interpréter.

Périmètre de l'équateur d'une sphère de rayon R : $2\pi R$.

Surface d'une sphère de rayon R : $4\pi R^2$.

Volume d'une sphère de rayon R : $4\pi R^3/3$.

3. Isotrope signifie : de façon identique selon toutes les directions.

Travaux dirigés

Exercice 1 : célérité des ondes sismiques

Les célérités des ondes P et S dans le manteau s'expriment sous la forme :

$$c_p = \left(\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right)^a \quad c_s = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^a$$

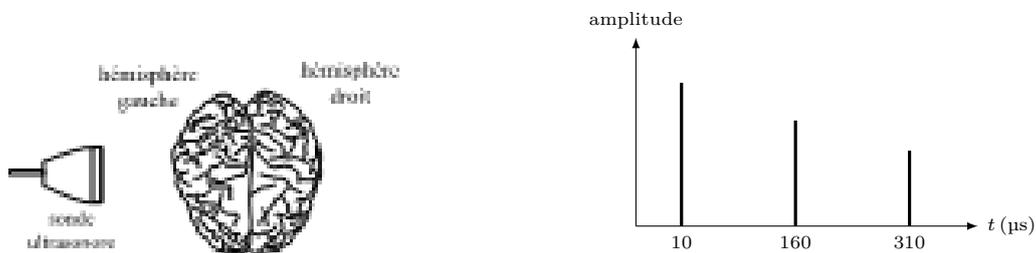
mettant en jeu les paramètres suivants :

- K est le module d'élasticité isostatique (en pascal), qui mesure la difficulté du matériau à se comprimer longitudinalement,
- μ est le module de cisaillement (en pascal) qui mesure la difficulté du matériau à se déformer latéralement,
- ρ la masse volumique.

1. Déterminer la valeur de a .
2. Dans un liquide, le module de cisaillement est $\mu = 0$. Que dire de la propagation des ondes sismiques dans le noyau terrestre ?

Exercice 2 : échographie du cerveau

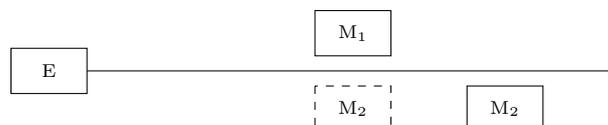
On réalise le dispositif expérimentale suivant (figure ci-dessous à gauche). Un émetteur d'ultrasons est positionné proche de la boîte crânienne d'un patient, et envoie une impulsion ultrasonore très brève. Cette impulsion est partiellement réfléchiée à chaque fois qu'elle parvient à une interface entre deux milieux différents ; l'écho est capté par un récepteur positionné à côté de l'émetteur. L'allure du signal reçu par le récepteur est représenté ci-dessous à droite.



1. Expliquer à quoi correspondent les trois pics.
2. Interpréter l'évolution de l'amplitude des signaux.
3. Calculer la largeur des hémisphères cérébraux. On assimilera le milieu cérébral à de l'eau.

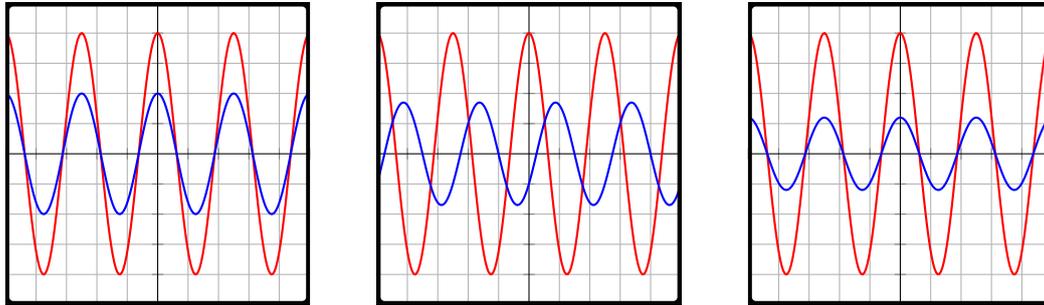
Exercice 3 : mesure de la célérité d'une onde ultrasonore

Pour mesurer la célérité d'une onde sonore en travaux pratiques, on peut procéder de la façon suivante. Un émetteur envoie un signal capté par deux récepteurs mobiles M_1 et M_2 , initialement situés à la même distance de l'émetteur. On éloigne progressivement le récepteur M_2 de l'émetteur en laissant fixe le récepteur M_1 .



On visualise sur les deux voies d'un oscilloscope les signaux reçus par les deux récepteurs dans la position initiale, pour un recul de 3 mm et pour un recul de 8,6 mm qui correspond à la première coïncidence des deux

courbes. L'échelle de temps de l'oscilloscope est de $10\ \mu\text{s}$ par carreau. Pour mieux distinguer les signaux, l'échelle verticale est deux fois plus grande sur la voie visualisant M_1 que sur celle visualisant M_2 .



1. Comment déterminer à quel récepteur correspond quelle courbe ?
2. Déterminer la fréquence et la longueur d'onde du signal ultrasonore.
3. Calculer la célérité de l'onde ultrasonore dans l'air.
4. Comment améliorer la précision de la mesure ?