

EMISSION ET PERCEPTION D'UN SON

1- Les ondes mécaniques

Une onde mécanique est la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel (solide, liquide ou gaz).

Une onde mécanique modifie localement et temporairement les propriétés mécaniques (vitesse, position, pression,) du milieu matériel.

On appelle onde mécanique le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu élastique, sans transport de matière, mais avec transport d'énergie.

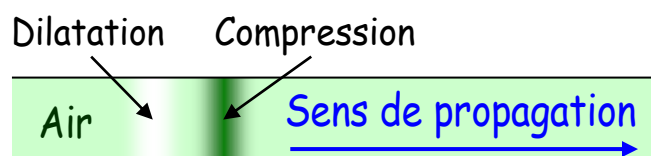
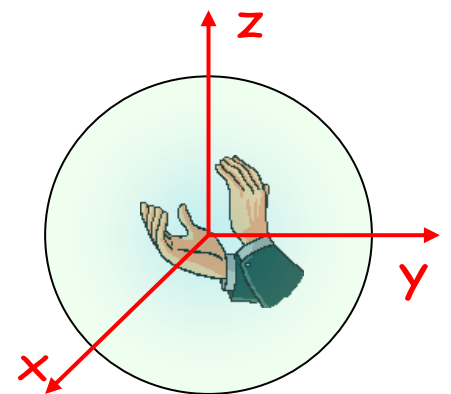
Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.

Le professeur situé dans une salle de cours claque des mains.
Les élèves situés autour de lui entendent le claquement.

Les ondes sonores se propagent dans les trois dimensions, mais à condition qu'elles soient en présence de matière (solide, liquide ou gaz).

Ces ondes sonores font vibrer les molécules présentes dans l'air près de la source sonore, et transmettent leur mouvement à leurs voisines lorsqu'elles se heurtent, qui elles-mêmes transmettent à leur tour le mouvement et ainsi de suite.

Cela provoque des zones de compressions et de dilatation.



L'air, milieu de propagation ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. L'air est un milieu élastique.

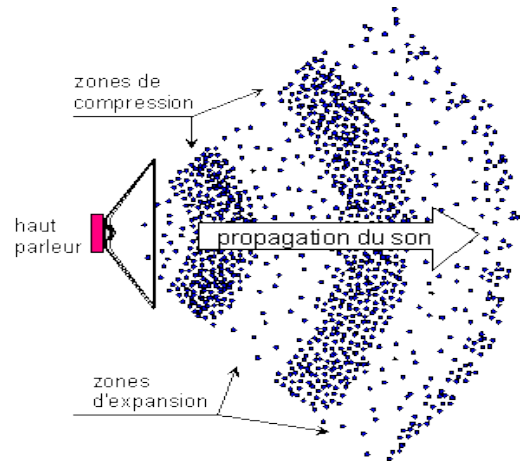
A cause des frottements existant lors du passage de la perturbation dans le milieu matériel, une partie de l'énergie transportée est perdue (elle se transforme en chaleur). On dit qu'il y a amortissement du signal.

2- Emission et détection des ondes

Pour qu'une perturbation prenne naissance dans une région, appelée source, d'un milieu matériel, il est nécessaire qu'il y ait un apport d'énergie. L'émetteur apporte l'énergie nécessaire à la création de cette perturbation.

La membrane d'un haut-parleur comprime et dilate la couche d'air avec laquelle elle est en contact pour créer une onde sonore.

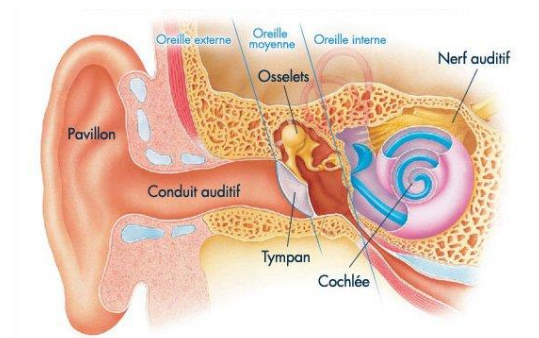
Les molécules de gaz proches de la membrane sont projetées par celle-ci. Ces molécules s'entrechoquent avec les molécules voisines. La zone de pression se déplace. Après le "choc" les molécules reprennent leur position initiale.



La détection d'une onde mécanique met en œuvre un capteur qui transforme une des grandeurs physiques du milieu modifiée par le passage de la perturbation en une grandeur facile à exploiter.

L'énergie mécanique transportée par l'onde est le plus souvent transformée en énergie électrique.

Dans notre oreille, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est réalisée grâce aux cellules ciliées de la cochlée.



Une onde sonore est une onde mécanique longitudinale (onde acoustique) qui se propage dans un milieu matériel élastique. Les petits déplacements des tranches de matière se font dans la direction de propagation. Le son ne se propage pas dans le vide.

3- Célérité d'une onde

On appelle célérité la vitesse de propagation de l'onde, pour la distinguer de la vitesse de déplacement d'un corps.

Si d est la distance parcourue par l'onde et Δt la durée de propagation, on définit une célérité moyenne V de l'onde par la relation:

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

V :	Vitesse en mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$)
d :	Distance parcourue en mètre (m)
Δt :	Durée de propagation en seconde (s)

La propagation d'une onde dans un milieu matériel se fait de proche en proche: elle n'est pas instantanée.

Dans un milieu homogène et isotrope, la célérité d'une onde est constante.

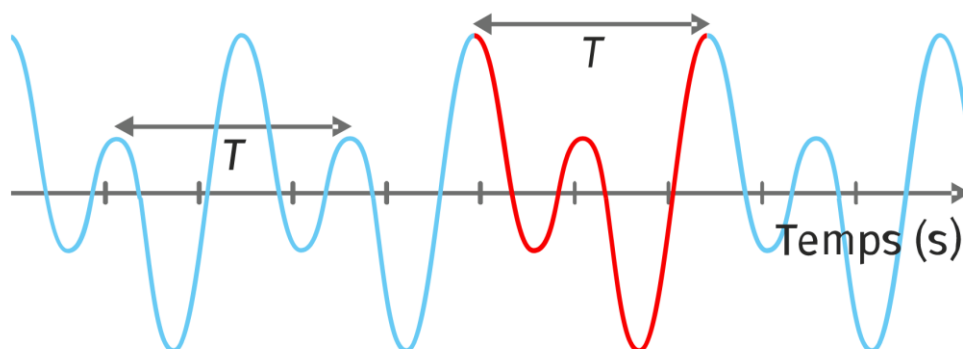
Une onde sonore se propage plus vite dans les liquides que dans les gaz et fréquemment plus vite dans les solides que dans les liquides

La vitesse du son dans l'air dépend de sa température.

4- Caractéristiques des ondes mécaniques progressives périodiques

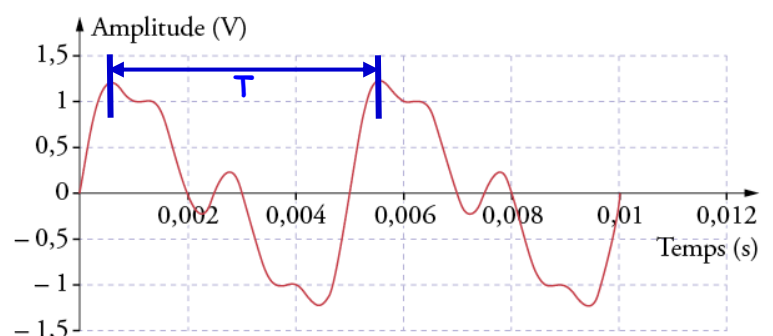
Lorsque le phénomène qui crée l'onde est périodique (vibration des ailes d'un moustique, gouttes qui tombent d'un robinet sur la surface de l'eau dans l'évier, etc.), les différentes ondes successives n'en forment plus qu'une appelée onde périodique.

Une onde périodique apparaît quand la perturbation se répète, identique à elle-même, sur un intervalle de temps régulier appelé période. Visuellement, un motif se répète



L'onde sonore reçue par un capteur (microphone) est convertie en une information électrique visualisée sur l'oscillogramme. Cette information a les mêmes caractéristiques que l'onde dont elle est issue.

Sur l'exemple ci-contre, elle se reproduit à intervalles de temps égaux.



Une onde progressive est périodique lorsque la perturbation se reproduit identique à elle-même à intervalles de temps égaux, appelés période temporelle T .

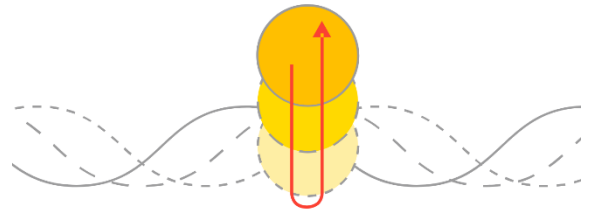
Une onde périodique de période T (exprimée en s) est aussi caractérisée par sa fréquence f (en Hertz, de symbole Hz).

La fréquence f de l'onde est le nombre de répétitions de la perturbation par seconde. Fréquence et période sont liées par la relation:

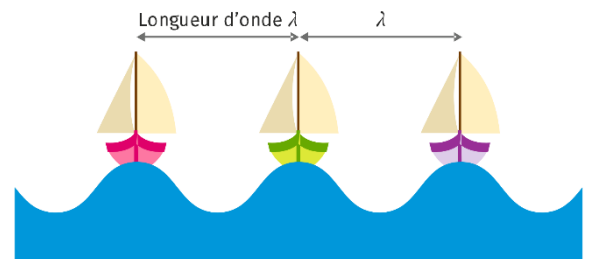
$$f = \frac{1}{T} \quad \left| \begin{array}{l} f: \text{Fréquence en Hertz (Hz)} \\ T: \text{Période temporelle en seconde (s)} \end{array} \right.$$

Une onde périodique présente une double périodicité:

Un point, à un instant sur un "sommet" de l'onde périodique, est soumis régulièrement à la même perturbation: il descend, puis remonte en suivant la forme de l'onde. La durée nécessaire pour retrouver la même position est la période temporelle (notée T et exprimée en secondes).



Deux points espacés qui suivent le même mouvement oscillent de la même façon, avec la même amplitude, en raison de la régularité de l'onde. La distance qui sépare ces points est appelée longueur d'onde ou période spatiale. On la note λ (lambda) et elle s'exprime en mètre.



La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde ayant une célérité V pendant une période.

Une onde progressive sinusoïdale présente une double périodicité, spatiale (définie par la longueur d'onde λ), et temporelle (définie par la période T).

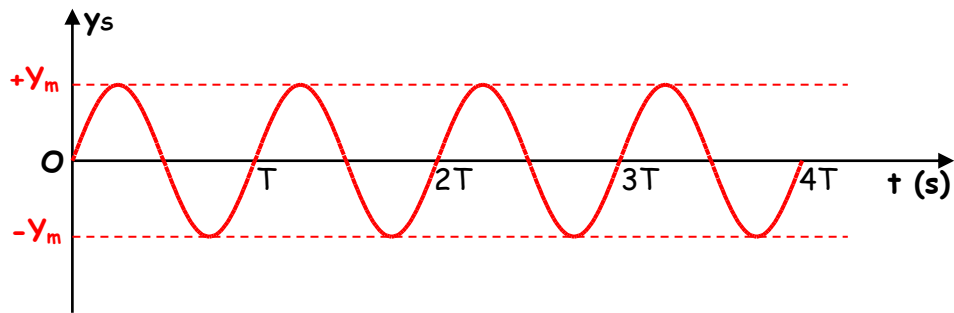
$$\lambda = V \cdot T \quad \left| \begin{array}{l} \lambda: \text{Longueur d'onde (m)} \\ V: \text{Célérité de l'onde (m.s}^{-1}\text{)} \\ T: \text{Période (s)} \end{array} \right.$$

On peut parfois représenter une onde progressive périodique par des fonctions sinusoïdales.

L'une de ces fonctions décrit le mouvement de la source S .

Le graphe des temps de la source S correspond alors à la représentation graphique associée à la fonction:

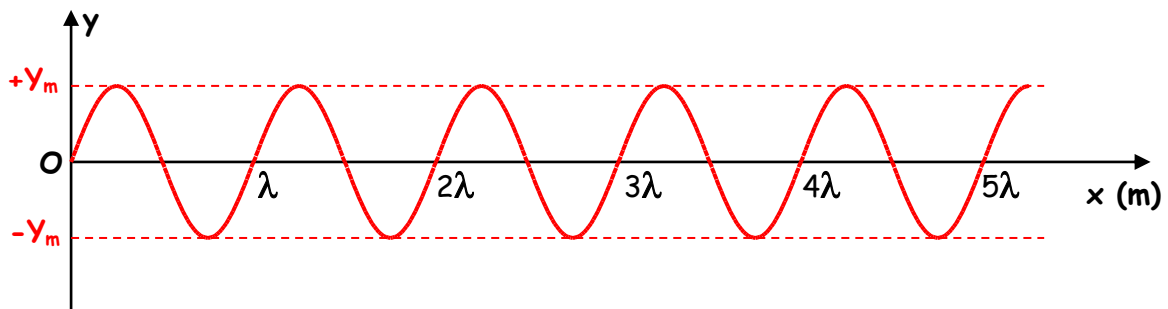
$$y(t) = y_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$



Sur celui-ci, apparaît bien la période temporelle T .

Le graphe des espaces correspond alors à la représentation graphique associée à la fonction:

$$y(x) = y_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right)$$



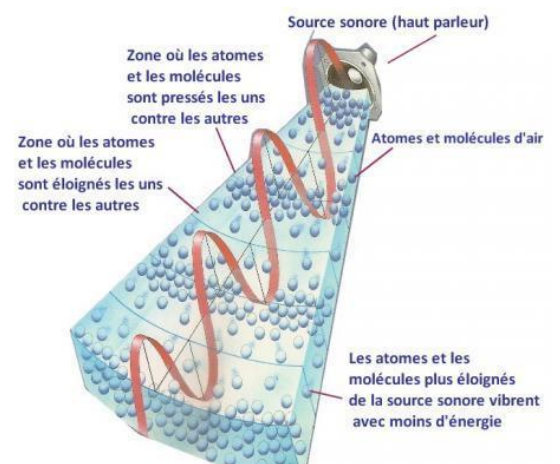
Sur ce graphe des espaces (à la date t) apparaît nettement la périodicité spatiale de l'onde se propageant sur la corde.

C'est ce que l'on obtiendrait si on photographiait la corde à un instant t .

5- Son et Ultra-Son

Un son est un phénomène périodique de nature ondulatoire.

La vibration d'un émetteur sonore, comme celle d'un haut-parleur, engendre une suite de compressions et de dilatations de l'air qui se propage jusqu'à faire vibrer le tympan de l'oreille, ce que le cerveau interprète ensuite comme un son.

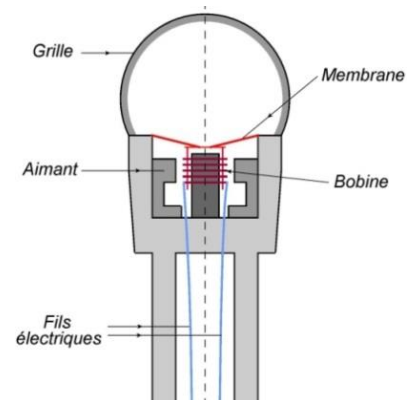


Une onde sonore est un phénomène périodique qui se propage par une suite de compression et de dilatations du milieu de propagation. Elle nécessite un support matériel et ne se propage pas dans le vide: c'est une onde mécanique progressive.

Un microphone permet de transformer un signal sonore en signal électrique analogique.

Les variations de tension obtenues en sortie du microphone sont analogues aux variations de la pression acoustique captées au niveau du microphone qui sont continues dans le temps.

La fréquence de ce signal électrique permet une première caractérisation de l'onde sonore.

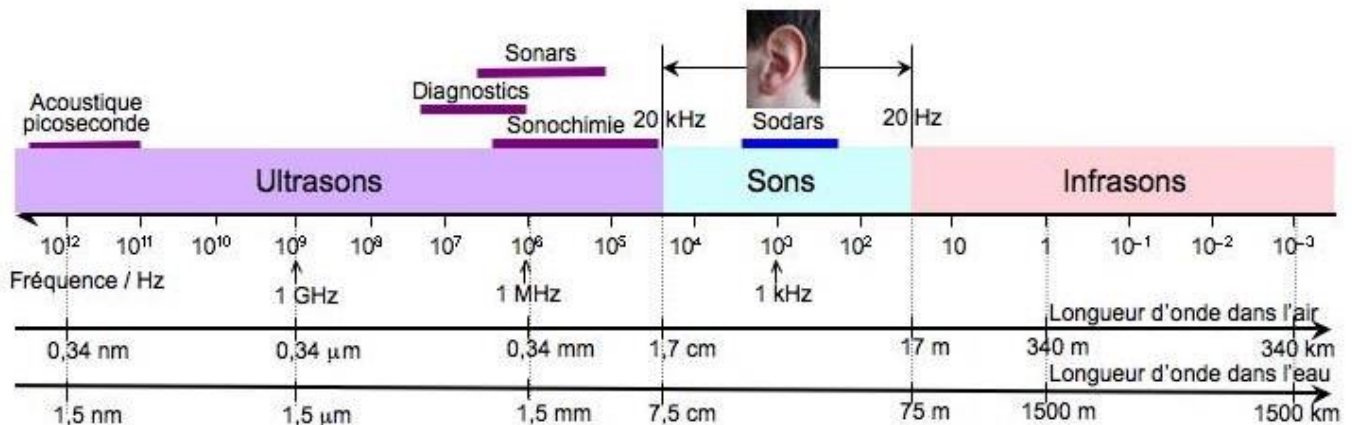


Le domaine des fréquences audibles concernant les sons se situe, selon les individus et leur âge, entre 20 et 20 000 Hz.

Au-delà d'une fréquence de 20 000 Hz, on parle d'ultrasons.

Les sons de fréquence inférieure à 20 Hz sont appelés infrasons.

Dans le domaine des fréquences audibles, les fréquences faibles correspondent aux sons graves et les fréquences élevées, aux sons aigus.

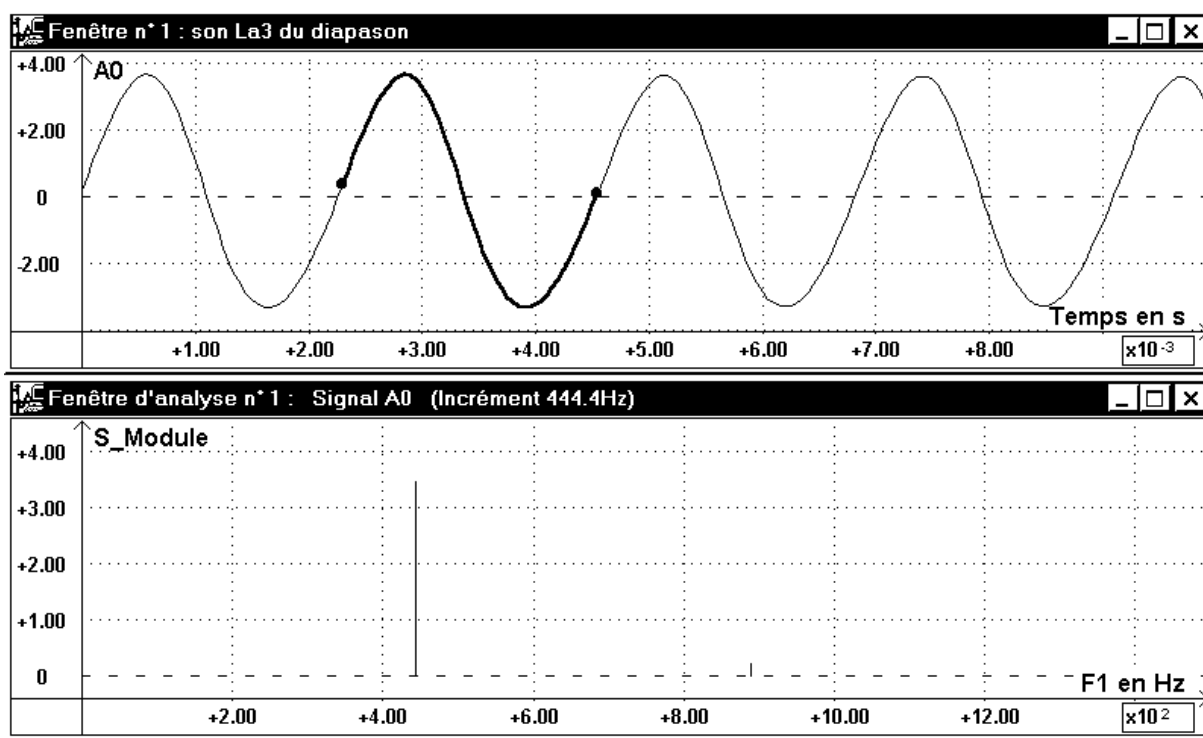


6- Analyse spectrale

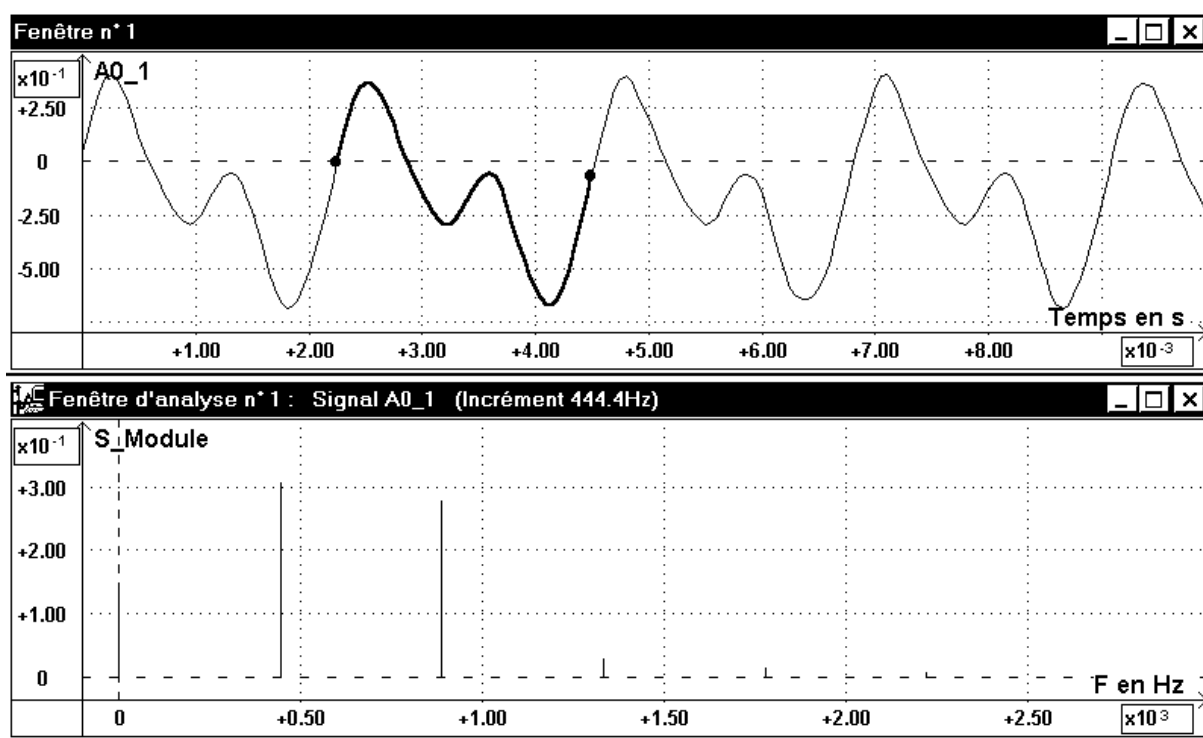
Pour accorder son instrument de musique, on peut utiliser un diapason qui, en vibrant, émet un "la₃". L'onde sonore produite est une onde progressive sinusoïdale. Le signal électrique obtenu à l'aide d'un microphone qui capte ce son est un signal parfaitement sinusoïdal: on dit que le son est pur.

Le signal électrique correspondant au son d'une voix ou d'un instrument de musique comme une guitare est un signal périodique, mais n'est pas parfaitement sinusoïdal: on dit que le son est complexe.

Pour comprendre la constitution d'un son complexe, on réalise une analyse spectrale du signal.



Signal d'un son pur et son spectre



Signal d'un son complexe et son spectre

Une analyse spectrale est la représentation de l'amplitude relative d'un signal en fonction de la fréquence.

Cette représentation est appelée spectre en fréquence.

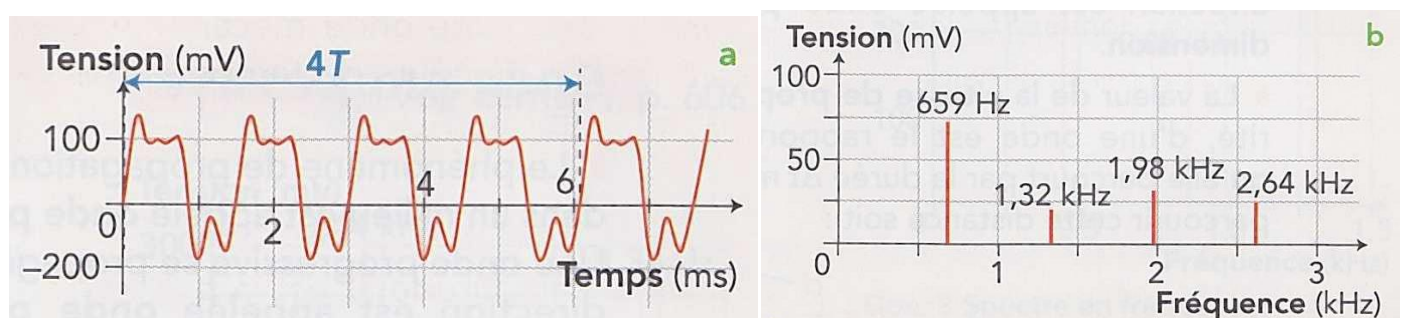
Le spectre en fréquence d'un son pur se traduit par un seul pic.

Le spectre d'un son complexe est constitué de plusieurs pics, qui sont régulièrement espacés pour un son harmonieux, et répartis aléatoirement pour un bruit.

Le mathématicien français Joseph FOURIER a montré que tout signal périodique de fréquence f_s peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences f_n multiples d'une fréquence f_1 dite fondamentale.

Ces signaux sinusoïdaux sont appelés harmoniques. L'analyse spectrale d'un son permet d'en obtenir le spectre en fréquences, une représentation graphique de l'amplitude de ses composantes sinusoïdales en fonction de la fréquence.

Le spectre en fréquences du son (mi₄) d'une guitare montre plusieurs pics de fréquences: à 659Hz, à 1,32kHz, à 1,98kHz et à 2,64kHz.



Ces fréquences sont celles des harmoniques, la fréquence la plus faible, $f_1=659\text{Hz}$ étant celle du fondamental (elle est aussi appelée hauteur du son).

Toutes les fréquences f_n des harmoniques du spectre sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental f_1 :

$$f_n = n \cdot f_1$$

7- Hauteur et timbre

La même note "la₃" émise par le diapason et par une corde de guitare produit des signaux de même fréquence: 440Hz.

La hauteur d'un son est la fréquence du signal correspondant, appelée fréquence fondamentale ou fondamental.

L'analyse spectrale de ces signaux montre que le "la₃" a un spectre en fréquence constitué d'un seul pic pour le diapason et de plusieurs pics pour une corde de guitare.

Le timbre d'un son dépend de la fréquence et de l'importance, dans le spectre de fréquences, de pics appelés harmoniques.

Dans le spectre en fréquence d'un son, le fondamental correspond à la hauteur du son et les harmoniques, aux multiples de cette fréquence.

8- Niveau d'intensité sonore

Nous percevons les sons de manière plus ou moins intense.

L'intensité sonore **I** correspond à l'intensité du signal sonore reçu par l'oreille. Son unité est le $W.m^{-2}$.

L'oreille humaine perçoit des signaux sonores dont l'intensité est comprise entre une valeur minimale $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} W.m^{-2}$ (seuil d'audibilité) et une valeur maximale égale à $25 W.m^{-2}$ (seuil de douleur).

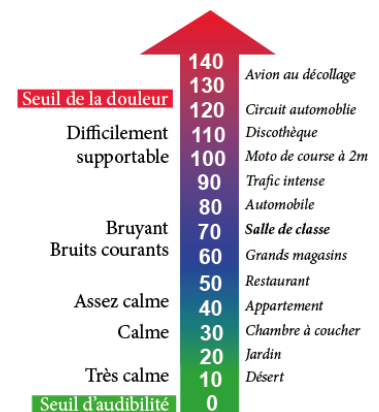
On a créé une autre grandeur, le niveau d'intensité sonore, plus aisée à exploiter que l'intensité sonore. Il est noté L (comme Level en anglais):

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

où I_0 est l'intensité au seuil d'audibilité.

Le niveau d'intensité sonore s'exprime en décibels (dB). Son échelle est graduée de 0 à 140 dB environ.

Remarque: Lorsque plusieurs instruments de musique jouent ensemble, lors d'un concert par exemple, les intensités sonores dues à chaque instrument s'ajoutent, mais pas les niveaux d'intensité sonore.



Echelle des bruits exprimés en décibels

Pression en Pa	Intensité en W/m ²	Niveau en dB	Nature des bruits	Impressions subjectives	Conversation
200	10 ²	140	Turboréacteur au banc d'essai. Sortie de la tuyère.	Destruction de l'oreille	Impossible
63,5	10 ¹	130	Marteau pilon.	Seuil de douleur	
20	10 ⁰ =1	120	Coups de marteau sur acier.	Bruit supportable un court instant	
6,35	10 ⁻¹	110	Atelier de chaudronnerie.	Bruit très pénible	En criant
2	10 ⁻²	100	Scie à bois à 1 m. Marteau pneumatique à 3 m.		
0,635	10 ⁻³	90	Forge.	Bruit supportable mais forts	A voix forte
0,2	10 ⁻⁴	80	Atelier de tournage. Circulation intense à 10 m.		
0,0635	10 ⁻⁵	70	Conversation à 1 m. Trafic moyen à 30 m.		
0,02	10 ⁻⁶	60	Compartiment confortable de chemin de fer.	Bruit courant	A voix normale
0,00635	10 ⁻⁷	50	Appartement donnant sur rue active fenêtres ouvertes.		
0,002	10 ⁻⁸	40	Bureau tranquille.	Calme	A voix chuchotée
0,000635	10 ⁻⁹	30	Jardin calme.	Très calme	
0,0002	10 ⁻¹⁰	20	Studio d'enregistrement.		
0,0000635	10 ⁻¹¹	10	Laboratoire acoustique.	Silence anormal	
0,00002	10 ⁻¹²	0	Seuil d'audibilité.		

9- Exercices d'application

Exercice 1

Un signal sonore met 3,0s pour parcourir 1000m dans l'air. Il parcourt 15m dans l'eau liquide en $1,0 \cdot 10^{-2}$ s.

- Calculer les valeurs des vitesses de propagation d'un signal sonore dans ces deux milieux, puis conclure.

Les vitesses du son dans ces deux milieux sont:

$$V_{\text{air}} = \frac{d}{\Delta t} = \frac{1000}{3,0} = 3,3 \cdot 10^2 \text{ m.s}^{-1}$$

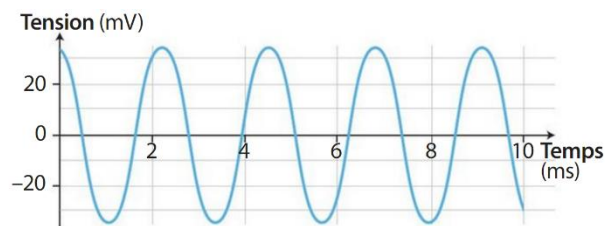
$$V_{\text{eau}} = \frac{d}{\Delta t} = \frac{15}{1,0 \cdot 10^{-2}} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ m.s}^{-1}$$

La valeur de la vitesse de propagation du signal sonore est plus importante dans l'eau que dans l'air.

Exercice 2

On considère le graphique ci-contre correspondant à un enregistrement sonore.

- Déterminer la période temporelle T de ce signal et en déduire sa fréquence f .



On aura d'après le graphique pour 4 périodes $4.T = 9,00 \text{ ms}$.

On en déduit ainsi la période du signal:

$$T = 2,25 \text{ ms}$$

La fréquence étant l'inverse de la période, on aura:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,25 \cdot 10^{-3}} = 444 \text{ Hz}$$

Exercice 3

On considère les graphiques ci-contre correspondant à des enregistrements sonores.

- Déterminer leurs périodes temporelle T et leurs fréquences f .
- En déduire quel est le son le plus haut.

On aura d'après le graphique A pour 4 périodes $4.T_A = 18,0 \text{ ms}$, soit une période de $T_A = 4,5 \text{ ms}$.

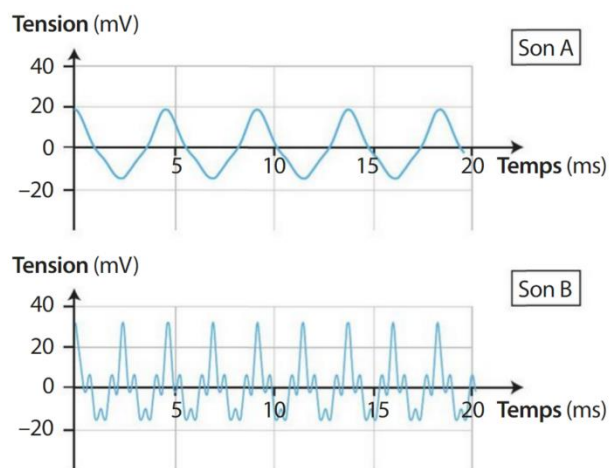
On aura d'après le graphique B pour 8 périodes $8.T_B = 18,0 \text{ ms}$, soit une période de $T_B = 2,25 \text{ ms}$.

La fréquence étant l'inverse de la période, on aura:

$$f_A = \frac{1}{T_A} = \frac{1}{4,5 \cdot 10^{-3}} = 222 \text{ Hz}$$

$$f_B = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{2,25 \cdot 10^{-3}} = 444 \text{ Hz}$$

Un son est d'autant plus haut que sa fréquence est élevée, c'est à dire que sa période est petite. On en déduit que le son le plus haut est donc le son B.

**Exercice 4**

Lorsque l'intensité sonore I double, le niveau d'intensité sonore L augmente de 3 décibels (dB).

- Compléter le tableau ci-dessous à l'aide de l'information précédente.

$I \text{ (W/m}^2\text{)}$	I_1	$I_2=5,0 \cdot 10^{-6}$	$I_3=1,0 \cdot 10^{-5}$	I_4	$I_5=8,0 \cdot 10^{-5}$
$L \text{ (dB)}$	$L_1=64$	$L_2=67$	$L_3=70$	$L_4=73$	L_5

Une multiplication par 2 de l'intensité sonore I correspond à une augmentation de 3 dB du niveau d'intensité sonore L .

- Comme $L_2=L_1+3\text{dB}$, on en déduit que $I_2=2.I_1$, d'où: $I_1=2,5.10^{-6} \text{ W/m}^2$
- Comme $L_4=L_3+3\text{dB}$, on en déduit que $I_4=2.I_3$, d'où: $I_4=2,0.10^{-5} \text{ W/m}^2$
- Comme $I_5=8.I_3$, on en déduit que $L_5=L_3+3\times 3\text{dB}$ d'où: $L_5=70+3\times 3\text{dB}=79\text{dB}$

D'où le tableau cidessous:

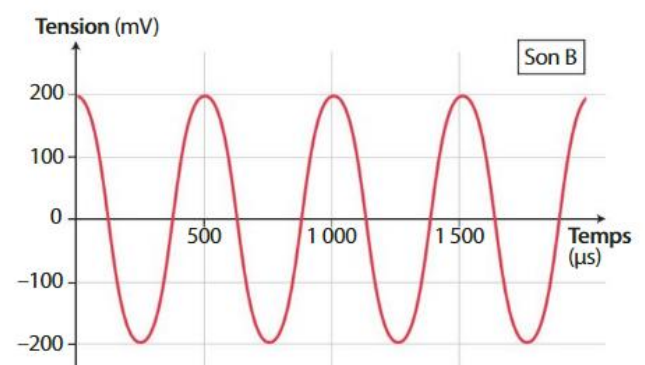
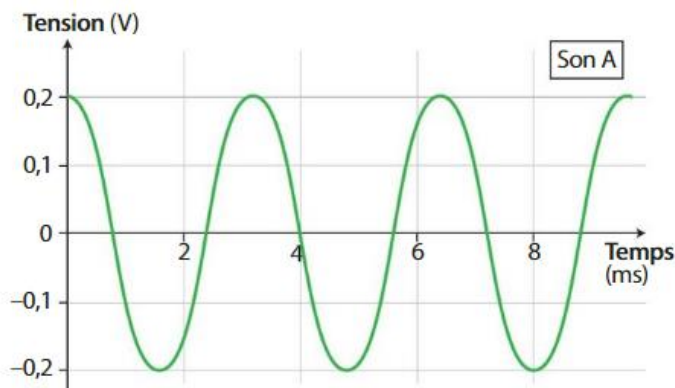
$I \text{ (W/m}^2\text{)}$	$I_1=2,5.10^{-6}$	$I_2=5,0.10^{-6}$	$I_3=1,0.10^{-5}$	$I_4=2,0.10^{-5}$	$I_5=8,0.10^{-5}$
$L \text{ (dB)}$	$L_1=64$	$L_2=67$	$L_3=70$	$L_4=73$	$L_5=79$

Exercice 5

L'audiométrie est un examen médical permettant de mesurer l'audition.

Des sons dont la fréquence varie de 125Hz à 8000Hz sont diffusés à l'aide d'écouteurs.

Les signaux sonores A et B ci-dessous sont utilisés lors de cet examen.



- Déterminer la période et la fréquence de chaque son.
- Quel son entre le A et le B, un patient ayant une grosse perte d'audition pour des sons de fréquence inférieure à 1000Hz, n'entend-il pas?

On aura d'après le graphique A pour 3 périodes $3.T_A = 9,6 \text{ ms}$, soit une période de $T_A = 3,2 \text{ ms}$.

On aura d'après le graphique B pour 3 périodes $3.T_B = 1500\mu\text{s}$, soit une période de $T_B = 500 \mu\text{s}$.

La fréquence étant l'inverse de la période, on aura:

$$f_A = \frac{1}{T_A} = \frac{1}{3,2.10^{-3}} = 312 \text{ Hz}$$

$$f_B = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{500.10^{-6}} = 2000 \text{ Hz}$$

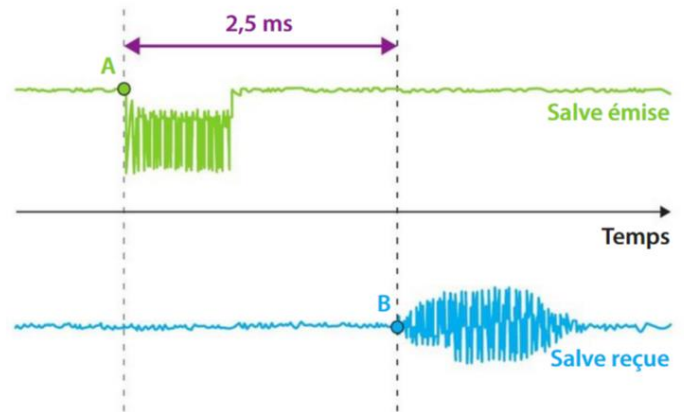
Le patient n'entend pas les sons dont la fréquence est en dessous de 1000 Hz, il ne pourra pas entendre le son A.

Exercice 6

On se propose de déterminer la valeur de la vitesse de propagation des ultrasons dans l'air.

Un émetteur et un récepteur de salves ultrasonores sont placés face à face, à une distance $d=84,0\text{cm}$ et sont connectés à un oscilloscope numérique.

On obtient les courbes ci-contre.



- Que se passe-t-il aux instants repérés par les points A et B sur les courbes?
- Calculer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les conditions de l'expérience.
- La vitesse du son dans l'air est de $V_{\text{air}}=340\text{m/s}$. Comparer la valeur calculée à cette valeur.

Le point A correspond au début de l'émission de la salve ultrasonore par l'émetteur d'ultrasons. Le point B correspond au début de la réception de cette salve ultrasonore par le récepteur d'ultrasons.

La vitesse des ondes ultrasonores est:

$$V = \frac{d}{\Delta t} = \frac{0,840}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 336 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Les deux valeurs sont très proches.

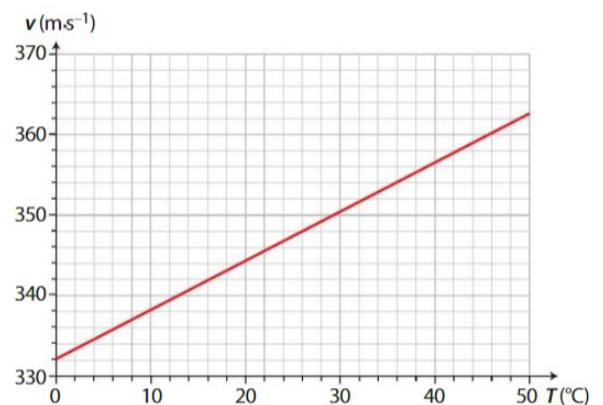
On peut effectuer un calcul d'erreur relative:

$$\text{Erreur} = 100 \times \frac{V_{\text{air}} - V}{V_{\text{air}}} = 100 \times \frac{340 - 336}{340} = 1,2 \%$$

Exercice 7

On a représenté, sur le graphique ci-dessous, l'évolution de la vitesse de propagation d'un signal sonore dans l'air en fonction de la température T .

- Comment évolue la valeur de la vitesse de propagation d'un signal sonore dans l'air en fonction de la température?
- Déterminer la valeur de la vitesse de propagation du son dans l'air à une température de 22°C .
- Modéliser, par une fonction affine du type $y = a \cdot x + b$, l'évolution de la valeur de la vitesse du son dans l'air en fonction de la température.
- Estimer alors la valeur de la vitesse du son dans l'air à -5°C puis à 100°C .



La valeur de la vitesse de propagation du son augmente avec la température de l'air.

Pour 22 °C on a une vitesse du son de 345 m.s⁻¹.

On peut modéliser cette droite par une fonction affine du type $y = a.x + b$.

Le coefficient directeur a est donné par:

$$a = \frac{356 - 338}{40 - 10} = 0,60 \text{ m.s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

L'ordonnée à l'origine b , se trouve par lecture graphique:

$$b = 332 \text{ m.s}^{-1}$$

D'où l'équation de la droite:

$$V = 0,60 \times T + 332$$

En utilisant cette équation on trouve les vitesses à -5°C et 100°C:

$$V_{-5^{\circ}\text{C}} = 0,60 \times (-5) + 332 = 329 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_{100^{\circ}\text{C}} = 0,60 \times 100 + 332 = 392 \text{ m.s}^{-1}$$