Physique

Chap.2 CARACTERISTIQUES DES ONDES

Programme officiel : Observer - Ondes et matière

Les ondes et les particules sont supports d'informations.
Comment les détecte-t-on ? Quelles sont les caractéristiques et les propriétés des ondes ?
Comment réaliser et exploiter des spectres pour identifier des atomes et des molécules ?

Notions et contenus	Compétences exigibles
Caractéristiques des ondes Ondes progressives. Grandeurs physiques associées. Retard.	Définir une onde progressive à une dimension. Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité). Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde.
Ondes progressives périodiques, ondes sinusoïdales.	Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde. Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.
Ondes sonores et ultrasonores. Analyse spectrale. Hauteur et timbre.	Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.

I. ONDE PROGRESSIVE :

1) Propagation d'une perturbation :

En lançant une pierre dans l'eau on provoque une perturbation du milieu matériel. Cette perturbation se propage en cercles concentriques déformant au passage la surface de l'eau.

On appelle onde mécanique progressive le phénomène de propagation d'une perturbation mécanique dans un milieu matériel élastique sans transport de matière mais avec transport d'énergie (énergie mécanique ; on dit que la perturbation se propage de proche en proche).

La propagation de la perturbation dans le milieu modifie temporairement ses propriétés (vitesse, position, énergie). Après le passage de la perturbation le milieu reprend ses propriétés initiales.

L'onde progressive se propage sans se déformer dans le milieu élastique et avance dans l'espace. Elle se caractérise par sa continuité.

A l'inverse, une onde de choc est un type d'onde, associé à l'idée d'une transition brutale. **Elle peut prendre la forme d'une vague de haute pression**, et elle est alors souvent créée par une explosion ou un choc de forte intensité.. Par exemple une onde sismique peut provoquer des raz de marée (tsunami) qui transportent une énergie dévastatrice.

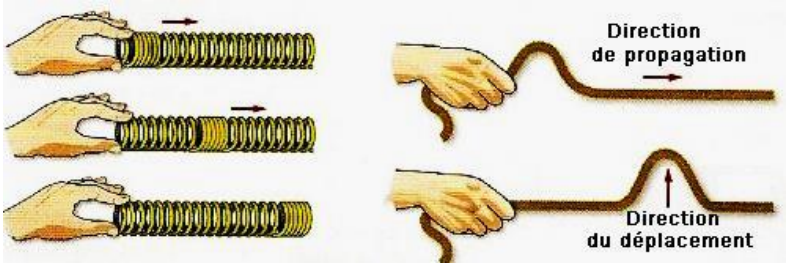
Une onde mécanique progressive à une dimension est une onde qui se propage dans une seule direction. *Une onde progressive à une dimension a pour direction de propagation une droite. C'est le cas d'une onde le long d'une corde, onde de compression le long d'un ressort, d'un rail.*

La direction de la propagation est la droite passant par la corde tendue.

Remarque : une onde à la surface de l'eau est à deux dimensions : la propagation a lieu dans un plan (espace à 2 dimensions) ; la propagation des ondes sonores ou des ondes lumineuses se fait dans toutes les directions : ondes à trois dimensions.

Exemple : perturbation le long d'une corde, un ressort.

*Une **onde transversale** provoque une perturbation dont la **direction est perpendiculaire** à la direction de propagation de l'onde.*
*Une **onde longitudinale** provoque une perturbation dont la **direction est parallèle** à la direction de propagation de l'onde.*

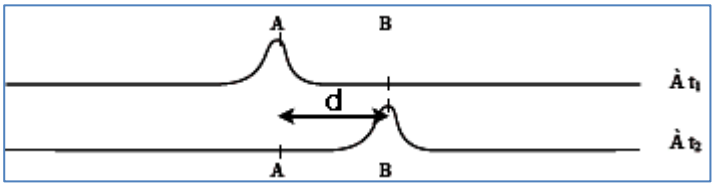


2) Différence entre vitesse et célérité

Le terme vitesse est utilisé pour les transports de matière, par exemple la vitesse de déplacement d'un véhicule. Le terme 'célérité est utilisé pour les ondes.

La célérité v d'une onde progressive correspond à la vitesse de déplacement d'une perturbation dans le milieu de propagation. La célérité est égale au **rapport de la distance d parcourue sur la durée Δt du parcourt: $v = \frac{d}{\Delta t}$**

Unité légale: v en mètre par seconde ($m.s^{-1}$), d en mètre (m), Δt en seconde (s).



3) Retard de la perturbation

Une perturbation arrive au point A à l'instant t_A , se propage, et arrive à l'instant t_B en un point B avec un retard τ. **Le retard, noté τ, est égale à la différence entre t_B et t_A: $\tau = t_B - t_A$. Le retard τ est la durée mise par l'onde pour se propager de A à B. C'est le rapport entre la distance parcourue AB parcourue par la perturbation et la célérité v de l'onde $\tau = \frac{AB}{v}$**

Unité légale: v en mètre par seconde, AB en mètre (m), τ en seconde (s)

Exercice : *pourquoi voit-on l'éclair avant d'entendre le tonnerre? Calculer le retard à la perturbation entre le lieu de l'éclair et l'observateur pour : l'onde lumineuse et l'onde sonore.* ***Données:*** *distance entre le lieu de l'éclair et l'observateur d = 4,0 km; célérité des ondes sonores v (son) = 340 $m.s^{-1}$; célérité des ondes lumineuses c = 3,00x10^8 $m.s^{-1}$.*

Remarque :
La célérité d'une onde dépend :
- De la température du milieu
- De la densité du milieu

Milieu/Température	Air à 20°C	Air à 100°C	Eau	Acier
Célérité	340 $m.s^{-1}$	390 $m.s^{-1}$	1500 $m.s^{-1}$	5800 $m.s^{-1}$

Exemple : variation de la célérité des ondes sonores

II. ONDE PROGRESSIVE PERIODIQUE

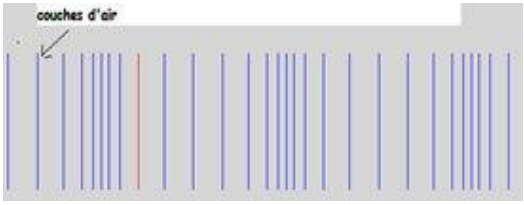
1) Définition / période temporelle / fréquence

Une onde progressive est périodique lorsque la perturbation se reproduit identique à elle-même à intervalle de temps T égaux. **T est appelé la période temporelle T de l'onde progressive**. T est la plus petite durée au bout de laquelle un point du milieu de propagation se retrouve dans le même état vibratoire. L'unité de période temporelle est la seconde (s).

La fréquence f de l'onde périodique est égale à l'inverse de sa période temporelle T: $\mathbf{f = \frac{1}{T}}$. Unité légale: le Hertz (Hz)

Exemple : l'onde sonore produit par un diapason à une fréquence de 440 Hz. 440 fois par seconde les couches d'air effectue un déplacement et reviennent à leur position initiale. Quelle est la période temporelle de vibration T de la couche d'air?

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{440} = 2{,}27\times10^{-3}\ s$$



2) Onde progressive périodique sinusoïdale

Rappel:

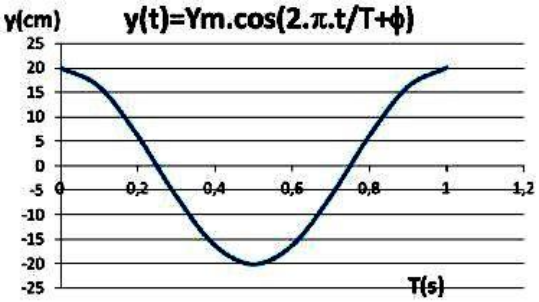
cos(0) = 1	sin(0) = 0	2 π rad = ... °
cos(π/4) = ...	sin (π/4) = ...	1 rad = $\frac{360}{2.\pi}$ =
cos(π/3) = ...	sin (π/3) = ...	
cos(π/2) = ...	sin (π/2) = ...	1° =
cos(π) = ...	sin (π) = ...	

Une onde progressive **périodique est** sinusoïdale lorsqu'une grandeur physique u(t) de tous points du milieu de propagation est une **fonction sinusoïdale du temps**:

$$\mathbf{u(t) = U_m.cos\left(\frac{2.\pi.t}{T} + \varphi\right) = U_m.cos(2.\pi.f.t + \varphi)}$$

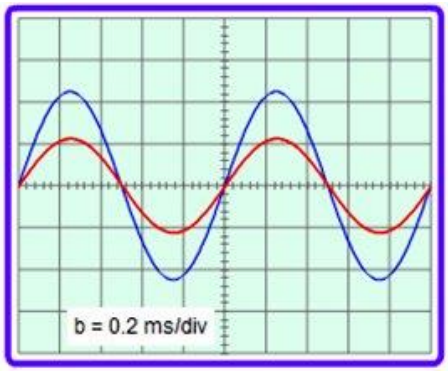
Um: amplitude de la grandeur physique associée à l'onde
T: périodicité temporelle de l'onde (seconde)
t: instant en seconde (s)
φ : phase à l'origine (valeur de l'angle à t = 0 s)

Exercice: Tracer sur un graphique l'élongation y(t) d'une corde au cours du temps possédant les caractéristiques suivantes:
Phase à l'origine φ =0; période T = 1,0 s; amplitude Y_m = 20 cm. On dessinera les points correspondant aux abscisses t = 0 s; t = T/4; t =T/2; t =3T/4; t =T.
Effectuer le même travail mais avec le tableur Excel en traçant les points toutes les 0,1 s

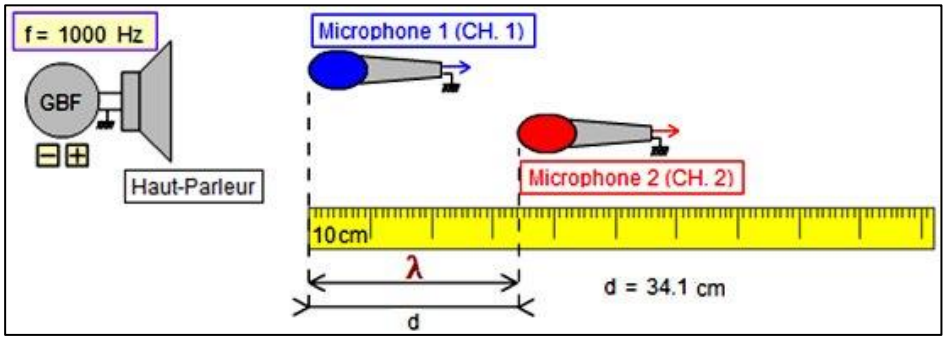


3) Périodicité spatiale : la longueur d'onde

Animation : http://fpassebon.pagesperso-orange.fr/animations/son.swf



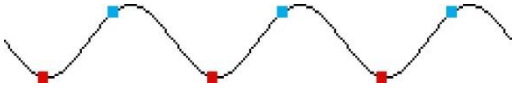
Éloigner les microphones. Donner une définition de la longueur d'onde.



La période spatiale ou longueur d'onde notée λ est :
- la plus petite distance séparant 2 positions pour lesquelles les élongations sont en phase (plus petite distance séparant 2 motifs élémentaires successifs). **La période spatiale d'une onde sinusoïdale est appelée longueur d'onde.**
- la distance parcourue par l'onde en une période temporelle T est : $\lambda = v.T = \frac{v}{f}$

v: célérité de l'onde ($m.s^{-1}$); T : périodicité temporelle (s); λ longueur d'onde (m); f: fréquence de l'onde (Hz)

- Deux points sont dits **en phase** s'ils sont espacés d'un nombre entier de longueurs d'onde. La distance mesurée entre ces points (2 points bleus) est donc **d = kλ**
- Un point rouge et un point bleu est espacé d'une demi longueur d'onde :



Deux points sont dits en **opposition de phase si la** distance entre ces points est : $\mathbf{d = (2k+1)\frac{\lambda}{2} = k + \frac{\lambda}{2}}$

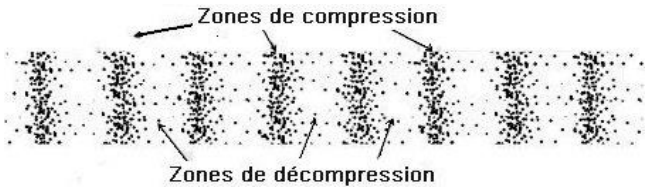
Animation corde : http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/meca/ondetran.html

Exemple: *une onde sonore de fréquence f = 1000 Hz est produite par un HP. Lorsque la distance entre les 2 couches d'air vaut d = 34 cm on remarque qu'elles vibrent en phase. Que vaut la célérité de l'onde sonore?*

III. ONDES SONORES ET ULTRASONORES

1) Quelle est la différence entre les sons, ultrasons et infrasons?

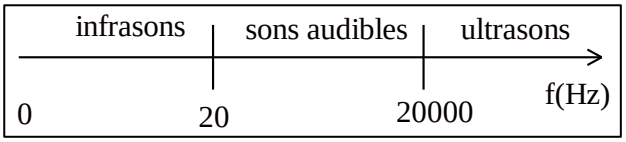
• Les sons sont une succession de zones de compressions et de décompressions se propageant dans un milieu. Les ondes sonores sont des ondes mécaniques.



• La sensibilité de l'oreille humaine dépend des personnes, mais elle s'étend en moyenne de 20 Hz (graves) à 20 kHz (aigus). La sensibilité dépend également de la fréquence, elle est maximale aux alentours de 3000 Hz.
Au-delà de 20 kHz s'étendent les ultrasons.
En-deçà de 20 Hz ce sont les infrasons (audibles par les chiens par exemple)..
Plus l'amplitude de la vibration mécanique est grande, plus l'intensité sonore est importante. Plus le son est **grave** plus la fréquence est **faible.**

La source de l'onde sonore se propage dans les 3 dimensions. L'oreille ne perçoit qu'une partie de l'énergie mécanique correspondant. De plus l'onde mécanique est en partie absorbée par le milieu.

Les ondes ultrasonores, de fréquences supérieures à 20 kHz, ne constituent pas un son musical, du moins pour l'Homme !
http://www.appareil-audition.com/comprendre-audition.php



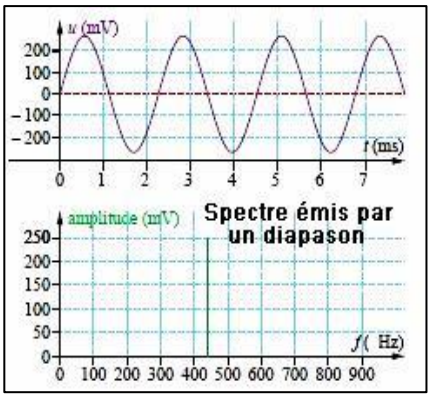
2) Caractéristiques d'un son musical

Un son musical a trois caractéristiques :
- sa **hauteur**, caractérisée par sa fréquence f_1, appelée aussi fréquence fondamentale ; Plus la fréquence est élevée plus le son est **aigu** et inversement.
  Pour un son de fréquence 100 Hz, **100 fois par seconde la couche d'air revient à sa position initiale**. Il s'agit d'un son grave.
- son **timbre**, auquel nos oreilles sont sensibles, qui en font un son plus ou moins harmonieux, caractérisé par l'allure du signal sonore et/ou par son spectre ;
- son **intensité**, traduisant un son plus ou moins fort, caractérisée par son intensité sonore (I en $W.m^{-2}$) **ou** le **niveau d'intensité sonore** (L en dB), qui est accessible par une mesure au sonomètre. A partir de 100 décibels, l'oreille est susceptible d'être détériorée! Voir paragraphe suivant.

3) Le spectre d'un son

a. Son pur

L'enregistrement du son pur émis par un diapason conduit à un signal (une tension) d'allure sinusoïdale ; la fréquence de ce signal est la fréquence du son ou sa hauteur. Ici la fréquence du La3 émis par le diapason est de 440 Hz. Déterminer la période du La3....



L'amplitude du signal est liée à l'intensité sonore.

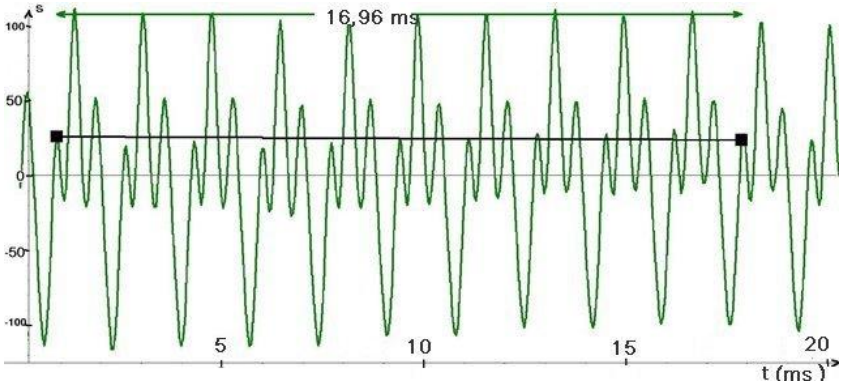
Un son comportant un seul harmonique est appelé son pur.

b. Son complexe

Un son comprenant fondamental et harmoniques est appelé son complexe, il n'est pas sinusoïdal.

Un son complexe, émis par une voix, un instrument, ..., est un signal **périodique** dont l'allure **n'est pas sinusoïdale**.
Le son émis par un instrument est la superposition de plusieurs ondes sinusoïdales simultanées. Il peut être décomposée en une somme de signaux sinusoïdaux appelé sa transformée de Fourier.

Exemple : une note jouée à la flûte ($ré_4$)



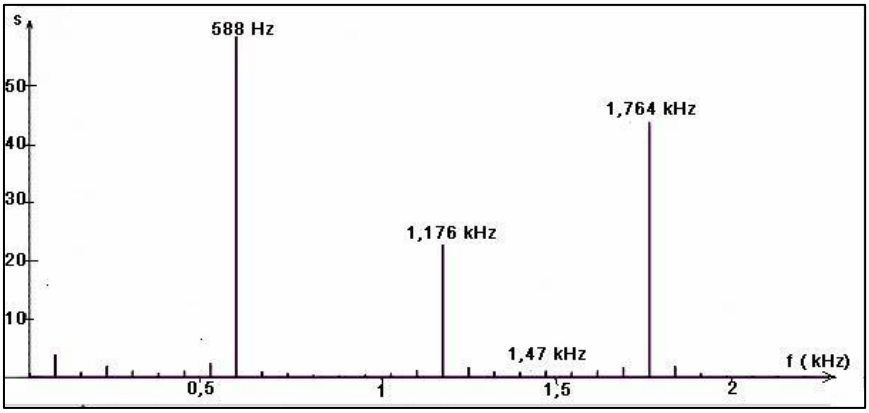
Déterminer la période et la fréquence de ce son.
10 T = 16,96 ms.
La période du signal est donc :
T = 16,96/10 = 1,696 ms.
La fréquence et donc la hauteur est donc : $f = \frac{1}{T}$ soit

$$f = \frac{1}{1{,}696\ x\ 10^{-3}}$$

f ≈ 590 Hz.

Le spectre en fréquence d'un son est la **représentation graphique de l'amplitude en fonction de la fréquence des différents harmoniques du son. L'onde de fréquence la plus faible** (f_1) est appelé le **fondamental : c'est** l'harmonique de rang 1. Elle possède **la même fréquence f_1 que le son**. La fréquence d'un son est appelé sa **hauteur.** Les fréquences f_n des autres harmoniques sont des multiples de la fréquence f du fondamental **f_n = n.f.**

Exemple : le spectre du « ré$_4$ »



Le **premier pic**, quelle que soit son amplitude, indique toujours la fréquence du son, c'est-à-dire sa **hauteur** : on lit 588 Hz ; cette valeur est aussi appelée **fréquence fondamentale**, $\mathbf{f_1}$ = 588 Hz ici.

Les deux **pics suivants**, de fréquence f_2 = 1176 Hz et f_3 = 1764 Hz, caractérisent les **harmoniques** de ce son. On a $f_2 = 2\times f_1$ et $f_3 = 3\times f_1$
Toutes les fréquences harmoniques sont des multiples de la fréquence fondamentale. $f_n = n\times f_1$

Le nombre et l'amplitude relative des harmoniques définissent **le timbre** d'un son.

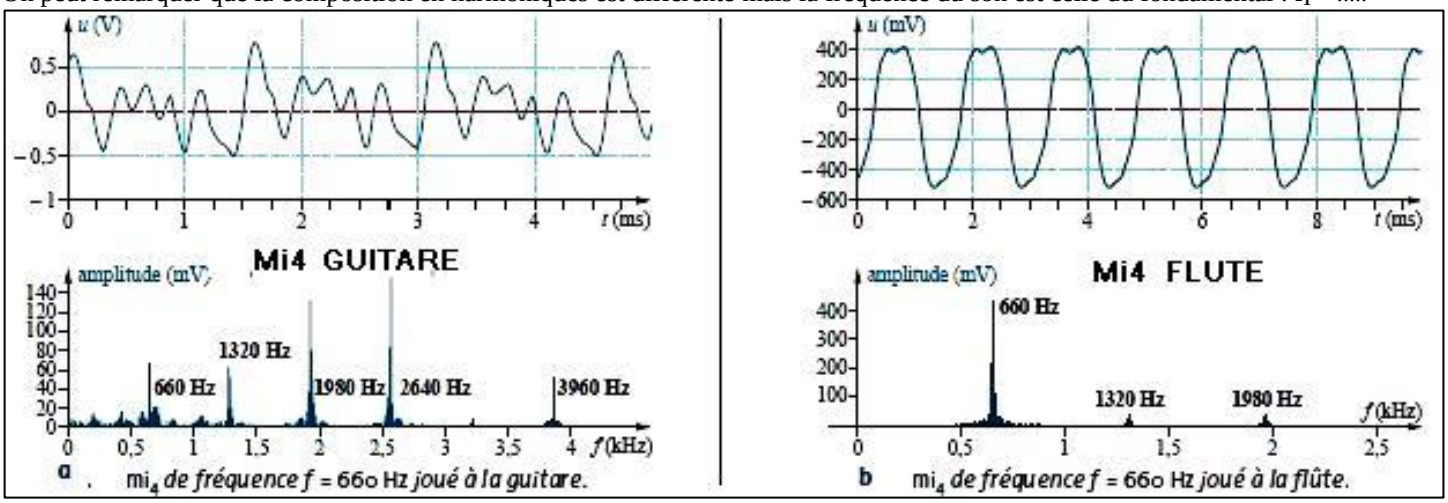
La fréquence d'un signal complexe est égale à la fréquence du fondamental.

4) Le timbre d'un instrument de musique

Deux instruments peuvent jouer la même note par exemple un La3 de fréquence 440 Hz. Cependant le son paraitra différent car **les harmoniques qui les constituent seront différents**. Les sons ont des **timbres différents.** Le timbre d'un son dépend des harmoniques qui le composent.

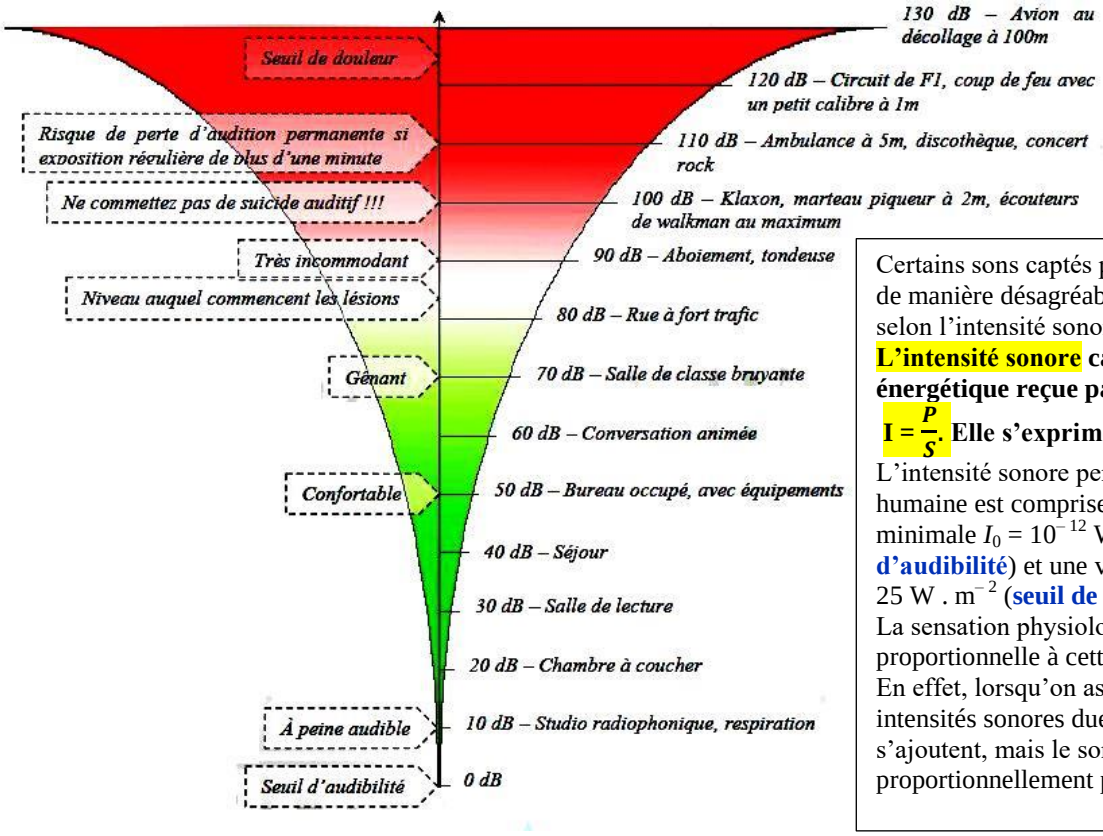
Le timbre permet de différencier deux notes de même hauteur jouées par des instruments différents.

Nous avons enregistré et analysé ci-dessous un mi4 joué par une guitare puis par une flûte.
Ces deux notes ont la même hauteur (même fondamental) mais proviennent d'instruments différents.
On peut remarquer que la composition en harmoniques est différente mais la fréquence du son est celle du fondamental : $\mathbf{f_1}$ = ...



5) Le niveau d'intensité sonore L

Vidéo : intensité acoustique reçue par l'oreille et niveau sonore.



Certains sons captés par l'oreille sont perçus de manière désagréable voire douloureuse selon l'intensité sonore.
L'intensité sonore caractérise la puissance énergétique reçue par unité de surface.
$\mathbf{I = \frac{P}{S}}$ **Elle s'exprime en W. m^{-2}.**
L'intensité sonore perceptible par l'oreille humaine est comprise entre une valeur minimale $I_0 = 10^{-12}$ W .m^{-2} (**seuil d'audibilité**) et une valeur maximale égale à 25 W . m^{-2} (**seuil de douleur**).
La sensation physiologique n'est pas proportionnelle à cette intensité sonore.
En effet, lorsqu'on assiste à un concert, les intensités sonores dues à chaque instrument s'ajoutent, mais le son ne paraît pas proportionnellement plus fort.

Le niveau d'intensité sonore L d'un son, d'intensité sonore I, est donné par la formule :

$$L = 10.\log\frac{I}{Io}$$ **avec Io 1,0x10^{-12} W.m^{-2} (seuil d'audibilité). *L* s'exprime en décibel, de symbole dB**

Le niveau sonore est mesuré par un **sonomètre.**

Cette grandeur ainsi définie est liée à la sensibilité de l'oreille humaine et de plus une échelle logarithmique est aisée à exploiter. En effet, le niveau d'intensité acoustique est gradué de 0 à 120 dB environ alors que l'intensité acoustique est graduée de 10^{-12} à 25 W. m^{-2}.

Exemple : Le seuil d'audibilité correspond à I = Io. Le niveau sonore correspondant est :....

Le seuil de douleur correspond à une intensité sonore I = 25 W.m^{-2}. Le niveau sonore L correspondant est :.....

Il est important de faire remarquer que chaque fois que l'intensité sonore est doublée, le niveau d'intensité sonore augmente de 3 dB. C'est important dans le choix d'un appareil électroménager par exemple....

p : 52 n°17 : *Au bord d'une voie ferrée, on mesure un niveau d'intensité sonore égal à 100 dB au passage d'un train. Donnée : $I_0 = 10^{-12}$ W .m^{-2}. 1) Quelle est l'intensité sonore correspondante ? 2) Quel sera le niveau sonore enregistré si 2 trains se croisent en produisant le même son ?*

Annexe : Décomposition en séries de Fourier d'un son complexe :

Fourier a montré que toute fonction **périodique** de fréquence f_1 est la somme de fonctions sinusoïdales de fréquence f_1, f_2, f_3 , ..., multiples de f_1.

Des logiciels permettent de réaliser une transformée de Fourier c'est-à-dire une décomposition d'un signal périodique en somme de sinusoïdes ; le résultat apparaît sous forme d'un spectre, c'est-à-dire d'un graphe « amplitude en fonction de la fréquence ». Chaque sinusoïde est représentée par un pic dont l'abscisse est la fréquence.

Un son complexe est une **superposition** de sons purs de fréquence f_1, $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$…… où f est la fréquence du fondamental.

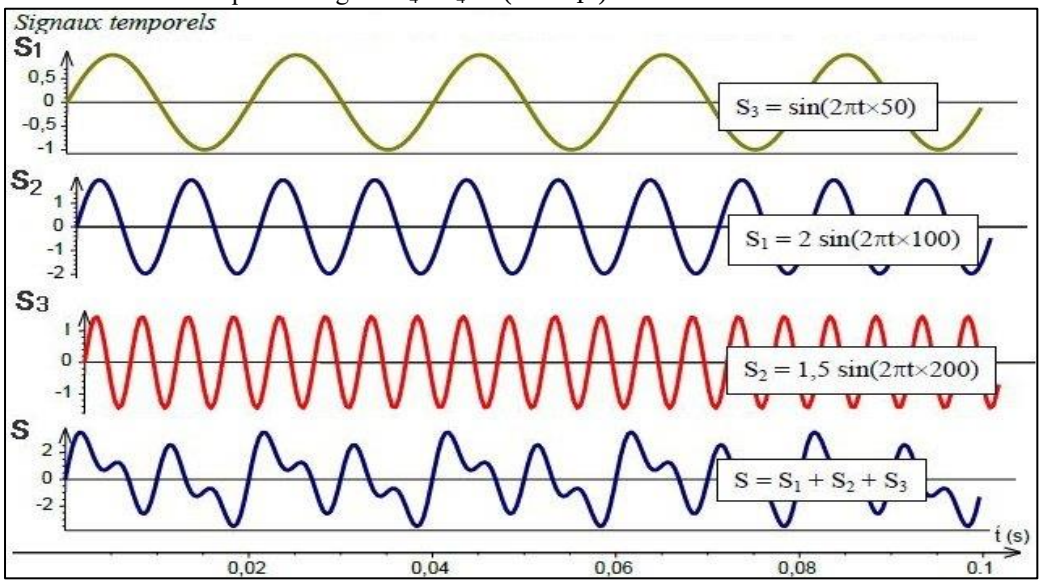
Soit V_1 la vibration sonore de fréquence f_1 et d'amplitude A_1 qui se modélise par la fonction $A_1.\sin(2.\pi.f_1.t)$

Harmonique de rang 1 ou fondamental : $V_1 = A_1.\sin(2.\pi.\mathbf{f_1}.t)$

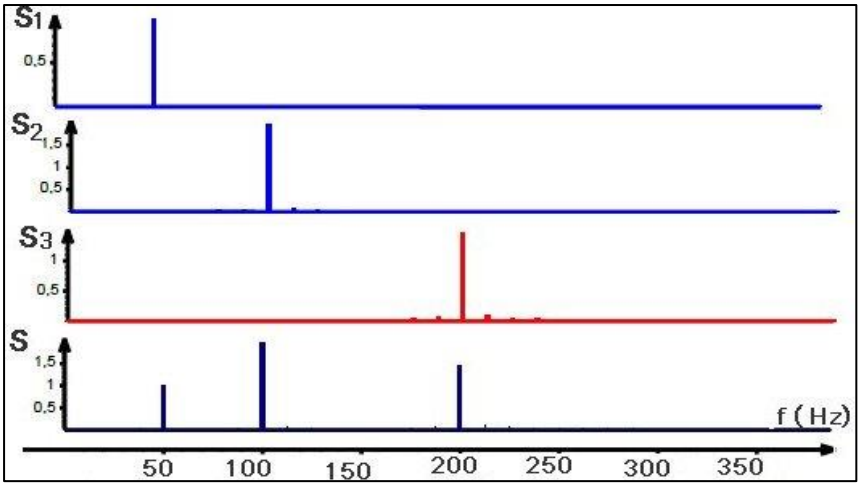
On définit : L'harmonique de rang 2 : $V_2 = A_2.\sin(2.\pi.\mathbf{2f_1}.t)$

L'harmonique de rang 3 : $V_3 = A_3.\sin(2.\pi.\mathbf{3f_1}.t)$

L'harmonique de rang 4 : $V_4 = A_4.\sin(2.\pi.\mathbf{4f_1}.t)$



SPECTRES

On retrouve dans S, signal somme, les fréquences des trois signaux ajoutés.

Remarque : si l'amplitude est conservée, c'est parce qu'il n'y a pas de déphasage entre les trois signaux