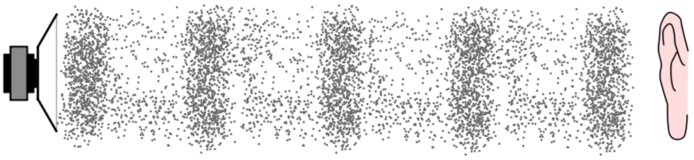
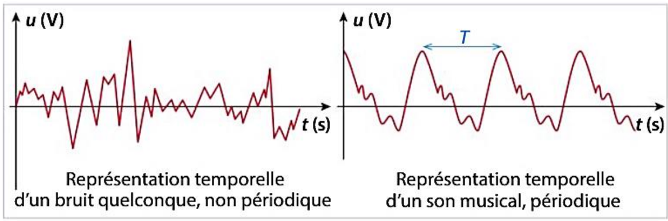
Le son – Un phénomène vibratoire

I Rappel : les signaux sonores



Une onde sonore dans l'air est constituée d'une succession de compressions et de dilatations des molécules de l'air.

On peut constater que, pour un **son musical**, un morceau de la courbe se répète régulièrement. On le qualifie de « **signal périodique** ». Le morceau de la courbe qui se répète est le **motif élémentaire**.

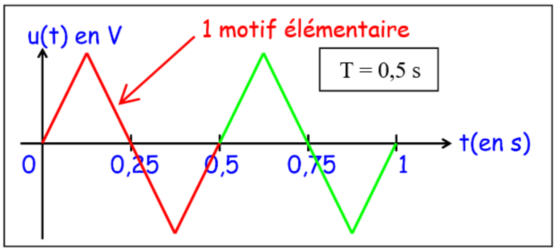


Représentation temporelle d'un bruit quelconque, non périodique

Représentation temporelle d'un son musical, périodique

La période d'un signal périodique correspond à la durée d'un motif élémentaire.
La période se note T et se mesure en seconde (symbole : s).

La fréquence correspond au nombre de répétitions du motif élémentaire par seconde.
Elle se note f et se mesure en hertz (symbole : Hz).



Pour la période, on utilise souvent des sous-multiples de la seconde :

- la **milliseconde** (symbole : ms)
- la **microseconde** (symbole : µs)

Rappel : 1 ms = 10^{-3} s et 1 µs = 10^{-6} s.

s			ms			µs

Pour la fréquence, on utilise souvent des multiples du hertz : le **kilohertz** (symbole : kHz), le **mégahertz** (symbole : MHz) et le **gigahertz** (symbole : GHz).
Rappel : 1 kHz = 10^3 Hz , 1 MHz = 10^6 Hz et 1 GHz = 10^9 Hz.

GHz			MHz			kHz			Hz

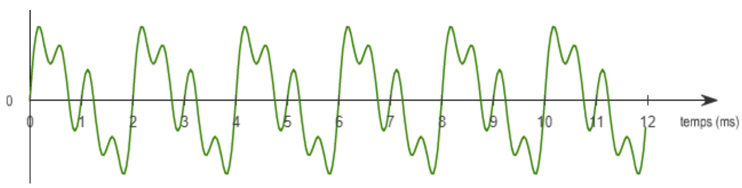
La période est l'inverse de la fréquence : $\boxed{f = \dfrac{1}{T}}$ ou $\boxed{T = \dfrac{1}{f}}$

Avec : f : fréquence en hertz (symbole : Hz)
T : période en seconde (symbole : s)

Attention : avant de calculer une fréquence, il faut donc convertir la **période** T en **seconde** !!

Exercice :

a) Quelle est la période T de ce signal ?
Période : T = 2 ms = 0,002 s
b) Calculer la fréquence f de ce signal.
Fréquence : f = $\dfrac{1}{T}$ = $\dfrac{1}{0{,}002}$ = 500 Hz



II Les sons purs et les sons complexes

Expérience : Utilisation du logiciel Audacity pour analyser différentes notes de musique.

Note de musique	Do	Ré	Mi	Fa	Sol	La	Si
Fréquence (en Hz)	262	294	330	350	392	440	494

- Lancer le logiciel Audacity .
- Ouvrir le fichier : **fichier1-diapason**, **fichier2-guitare** et **fichier3-piano**.

1) *Déterminer la fréquence émise par le diapason, puis la note correspondante.*

Durée de 10 motifs : 0,023 s. Période : T = $\frac{0,023}{10}$ = 0,0023 s.

Fréquence : f = $\frac{1}{0,0023}$ = 435 Hz. C'est la note La.

2) *Déterminer la fréquence émise par ces deux instruments, puis la note correspondante.*

La guitare et le piano joue également la note La car la durée de 10 motifs est également de 0,023 s. La fréquence est donc également de 435 Hz.

3) *Quelle différence y a-t-il sur la forme du signal entre celui du diapason et ceux de la guitare et du piano ?*

Pour le diapason, le motif élémentaire forme une « vague parfaite », appelée une sinusoïde.
Pour la guitare et le piano, les motifs ont une allure différente qui dépend de l'instrument. Cette différence s'appelle le timbre.

- Ouvrir le fichier : **fichier4-guitare**.

4) *Déterminer la fréquence émise par la guitare, puis la note correspondante.*

Durée de 10 motifs : 0,031 s. Période : T = $\frac{0,031}{10}$ = 0,0031 s.

Fréquence : f = $\frac{1}{0,0031}$ = 323 Hz. C'est la note Mi. Le son est plus grave et la fréquence est plus basse.

On peut représenter le **spectre en fréquence du son** en portant en ordonnées les amplitudes des sons purs qui sont présents et en abscisse leur fréquence.

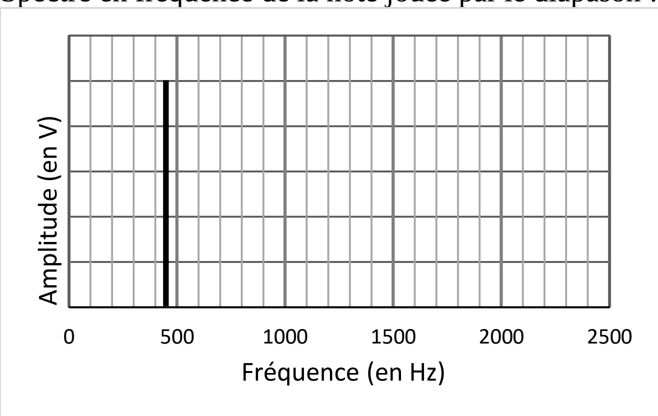
- Visualiser le spectre en fréquence de chaque son avec l'onglet « Analyse » puis « Tracer le spectre ».

5) *Relever la (ou les) fréquence(s) présente(s) dans le spectre en fréquence de chaque son (5 maxi).*

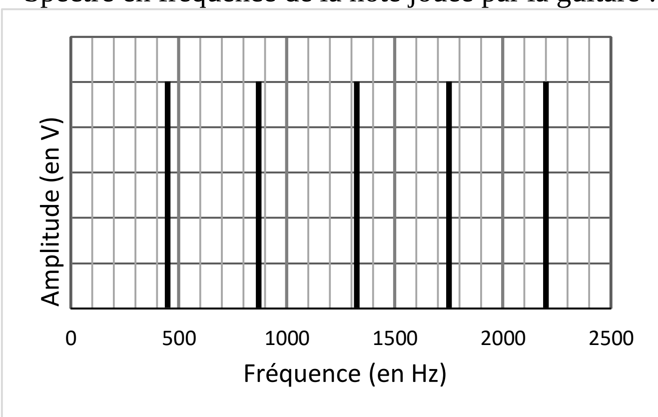
Diapason : 441 Hz
Guitare : 443 Hz / 881 Hz / 1315 Hz / 1756 Hz / 2203 Hz
Piano : 441 Hz / 881 Hz / 1319 Hz / 1768 Hz / 2218 Hz

6) *Dans les spectres en fréquence suivants, tracer un trait vertical pour chaque fréquence présente.*

Spectre en fréquence de la note jouée par le diapason :



Spectre en fréquence de la note jouée par la guitare :

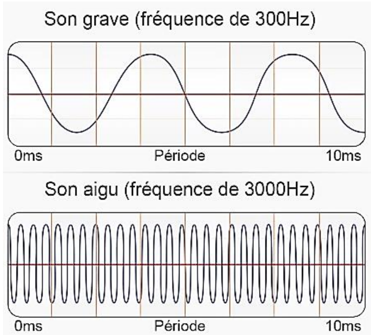


7) *Trouver un rapport (une relation) entre les différentes fréquences relevées pour la guitare.*

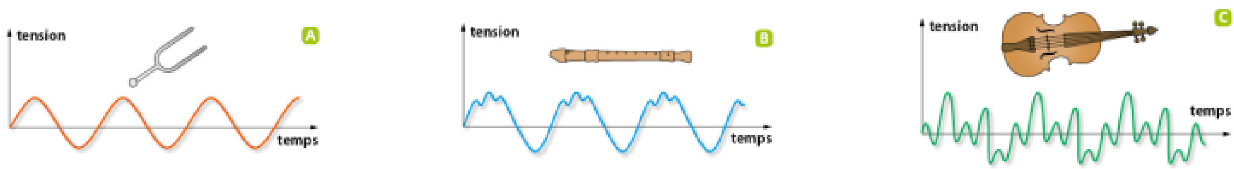
$\frac{881}{443} \approx 2$ $\frac{1315}{443} \approx 3$ $\frac{1756}{443} \approx 4$ $\frac{2203}{443} \approx 5$

Pour la guitare, on constate que le rapport entre chaque fréquence et la première fréquence donne un nombre entier.

La fréquence d'un son correspond à une hauteur de son, repérée par une note de musique.
Un son aigu a une fréquence plus élevée qu'un son grave.



Deux instruments de musique différents jouant la même note peuvent être différentiés par l'oreille car les deux sons émis n'ont pas le même timbre.

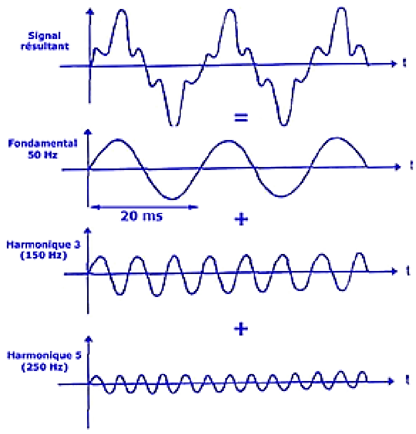


Le timbre est lié à la forme du motif élémentaire. Il correspond à l'identité sonore d'un instrument ou d'une voix.

Si on enregistre au cours du temps le son produit par un diapason, on observe sur l'écran une série de « vagues » parfaites appelées sinusoïde (de la fonction mathématique « sinus »). Le son est alors dit **pur**.
Une note jouée par un instrument de musique n'est en général pas un son pur. Sa représentation en fonction du temps n'est pas une sinusoïde, mais elle reste quand même **périodique**.
Le son est alors dit **complexe** (ou composé).

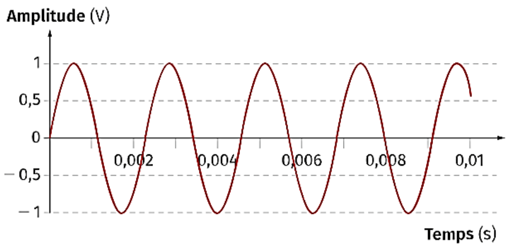

Joseph Fourier

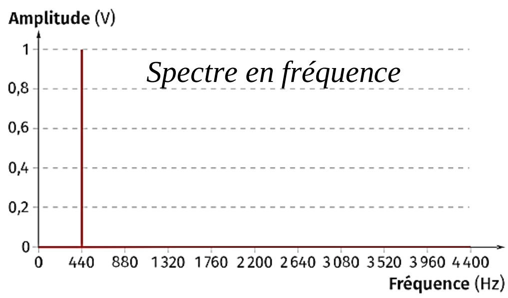
Au début du XIX^{e} siècle, un mathématicien et physicien français Joseph Fourier (1768-1830) élabore une méthode qui ouvrira des perspectives considérables aux scientifiques. Il affirme que **toute fonction périodique de fréquence f, peut s'écrire comme une somme de fonctions sinusoïdales de fréquence multiple de f**.

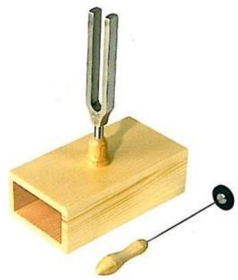


Sa méthode appelée « Transformée de Fourier », donne naissance à une nouvelle branche de la physique : **l'analyse spectrale**. Ses applications sont incontournables dans de nombreux domaines : les télécommunications, les courants électriques, le traitement d'image, l'analyse des sons.

Un son pur est représenté par un signal périodique sinusoïdal.
Le spectre montre la présence d'une seule fréquence (un seul pic).

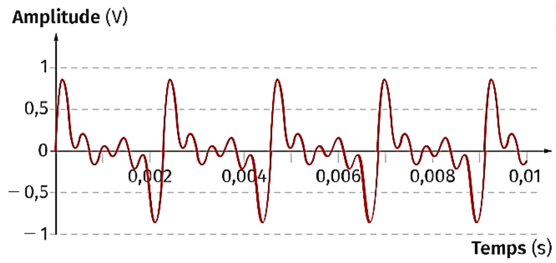


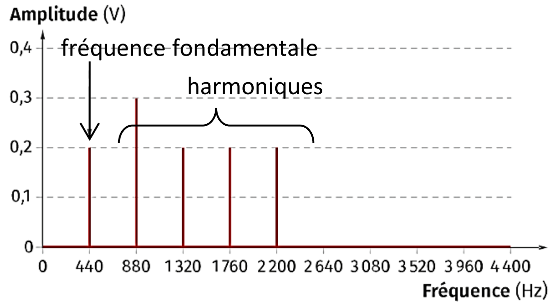




Un <u>son complexe</u> est représenté par un signal périodique mais <u>non sinusoïdal</u>.
Le spectre montre la présence de <u>plusieurs fréquences</u> (plusieurs pics).

Le signal peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux (de sons purs) dont les fréquences sont toutes multiples de la fréquence la plus basse : la <u>fréquence fondamentale</u>. Les fréquences multiples sont les <u>harmoniques</u> (notée f_2, f_3, …).
On a donc : $f_2 = 2 \times f$ $f_3 = 3 \times f$ $f_4 = 4 \times f$ **…**



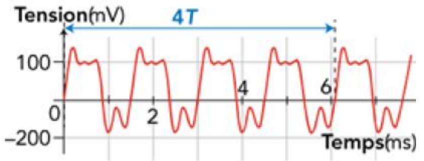


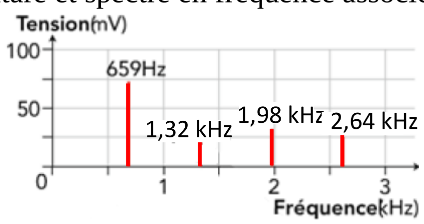
Selon les instruments qui jouent une même note, les **harmoniques** ont des importances différentes : elles sont plus ou moins présentes, donnant ainsi un **timbre** à la note, qui va nous permettre de reconnaitre cet instrument même si, pourtant, tous jouent la même note.
C'est cependant la **fréquence fondamentale** qui « fixe » la fréquence perçue par l'oreille, c'est-à-dire la **hauteur** du son (la note).

La <u>hauteur</u> d'une note de musique (grave ou aigüe) est liée à la <u>fréquence fondamentale</u>.
Le <u>timbre</u> d'une note est lié à la présence des <u>harmoniques</u> et à leur amplitude.

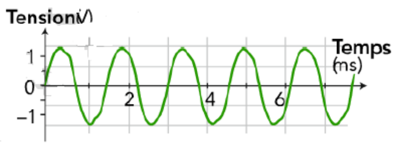
<u>Exercice</u> : On reproduit ici deux oscillogrammes :

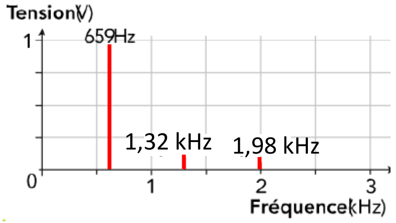
- Oscillogramme de la note Mi émise par une guitare et spectre en fréquence associé :





- Oscillogramme de la note Mi émise par une flûte et spectre en fréquence associé :





1) *À partir des courbes en fonction du temps, déterminer la période et la fréquence de la note émise par ces instruments. Vérifier que l'on retrouve bien la fréquence fondamentale indiquée sur le spectre.*

Un motif dure environ 1,5 ms. Période : $T = \underline{1{,}5\ ms} = 0{,}0015\ s$
Fréquence : $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}0015} = \underline{667\ Hz}$. On retrouve bien la fréquence fondamentale (f = 659 Hz) du spectre.

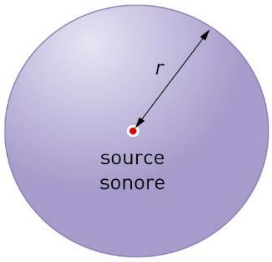
2) *Relever les fréquences des différentes harmoniques de chaque instrument. Vérifier qu'elles sont des multiples de la fréquence fondamentale f.*

Guitare : 1,32 kHz / 1,98 kHz / 2,64 kHz. **Flûte : 1,32 kHz / 1,98 kHz**
$f_2 = 1{,}32\ kHz = 1\,320\ Hz \approx 2 \times 659\ Hz \approx 2 \times f$
$f_3 = 1{,}98\ kHz = 1\,980\ Hz \approx 3 \times 659\ Hz \approx 3 \times f$
$f_4 = 2{,}64\ kHz = 2\,640\ Hz \approx 4 \times 659\ Hz \approx 4 \times f$

III La puissance et le niveau d'intensité sonore

1) Intensité sonore

La **puissance** d'une onde sonore produite par une source se note P et se mesure en **watt** (symbole : W). Elle représente l'énergie fournie au phénomène par unité de temps.

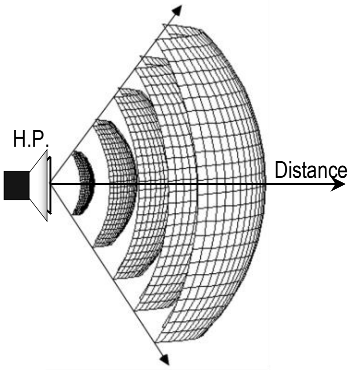


Le son se propage dans toutes les directions de l'espace. La puissance donnée à l'onde au départ se répartit donc sur une surface de plus en plus grande.
Dans un milieu homogène (une pièce sans obstacle), la puissance du son produit par une source sonore se répartit sur une **sphère**, ayant pour centre la source sonore.

L'intensité sonore se note I et représente la puissance de l'onde sonore reçue par unité de surface S. Elle se mesure en watt par mètre carré ($W.m^{-2}$).

$$I = \frac{P}{S}$$

I : Intensité sonore en $W.m^{-2}$
P : Puissance de l'onde sonore en W
S : surface en m^2



Plus on s'éloigne de la source, plus l'intensité sonore diminue car la puissance de l'onde sonore produite par la source se répartit sur une surface de plus en plus grande.

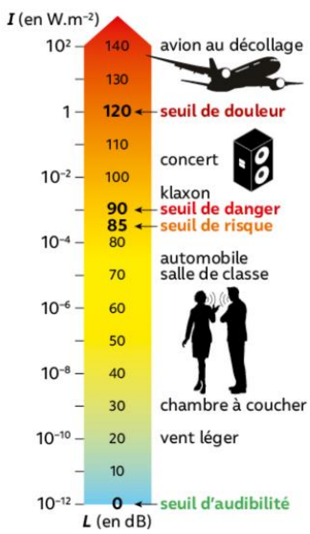
Exercices :

1) *Déterminer l'intensité perçue pour un son de puissance 1,5 W réparti sur une surface de 30 m².*
   $I = \frac{P}{S} = \frac{1{,}5\ W}{30\ m^2} = 0{,}05\ W.m^{-2}$
2) *Un chanteur émet un chant d'intensité sonore valant 8 $W.m^{-2}$. Ce son se répartit sur 5 m^2. Calculer la puissance sonore délivrée par le chanteur.*
   $P = I \times S = 8\ W.m^{-2} \times 5\ m^2 = 40\ W$
3) *Le son d'un instrument se propage de manière sphérique dans l'air et a une puissance d'environ 0,10 W. Calculer l'intensité sonore I perçue à une distance de 3 m de l'instrument.*
   Donnée : surface d'une sphère de rayon R : $S = 4 \times \pi \times R^2$
   $I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \times \pi \times R^2} = \frac{0{,}10}{4 \times \pi \times 3^2} = 8{,}84 \times 10^{-4}\ W.m^{-2}$

2) Niveau d'intensité sonore

La perception d'un son de fréquence 1000 Hz pour l'oreille humaine est telle que :

- Le seuil d'audibilité est : $I_0 = 10^{-12}\ W.m^{-2}$
- Le seuil de douleur est : $I_{max} = 1\ W.m^{-2}$



Les valeurs des intensités sonores s'étalent donc sur une grande échelle d'ordre de grandeur. Elles sont généralement exprimées avec les puissances de 10 et sont peu pratiques à manipuler.
On définit alors une échelle permettant d'exprimer la sensation auditive : c'est le niveau d'intensité sonore. Il permet d'utiliser une échelle plus petite et plus proche des sensations auditives.

Le niveau d'intensité sonore se note L (comme level) et se mesure en décibel (symbole : dB). Il se mesure avec un sonomètre. Il se calcule par la formule :

$$L = 10 \times \log \frac{I}{I_0}$$

L : niveau d'intensité sonore en décibel (dB)
I : Intensité sonore en $W.m^{-2}$
$I_0 = 10^{-12}\ W.m^{-2}$ (seuil d'audibilité)

Remarque : « log » est la fonction « logarithme décimal ». Les calculatrices ont une touche qui permet de le calculer.

Exercices :

1) *Calculer le niveau d'intensité sonore L pour une intensité* $I = 4 \times 10^{-4}$ *W.m*$^{-2}$.

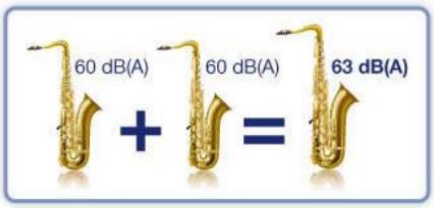
$$\mathbf{L = 10 \times \log \frac{I}{I_0} = 10 \times \log \frac{4 \times 10^{-4}}{10^{-12}} = 86\ dB}$$

2) *Calculer le niveau d'intensité sonore L pour une intensité double de la précédente.*

$$\mathbf{I = 4 \times 10^{-4} \times 2 = 8 \times 10^{-4}\ W}$$

$$\mathbf{L = 10 \times \log \frac{I}{I_0} = 10 \times \log \frac{8 \times 10^{-4}}{10^{-12}} = 89\ dB}$$

Le niveau d'intensité sonore L et l'intensité sonore I ne sont **pas proportionnels**.
Si une source sonore est deux fois plus intense (deux instruments au lieu d'un seul), l'intensité sonore est doublée mais le niveau d'intensité sonore L perçu augmente seulement de 3 dB. L'oreille ne perçoit pas un son « deux fois plus fort » mais « un petit peu plus fort ».



Exercices :

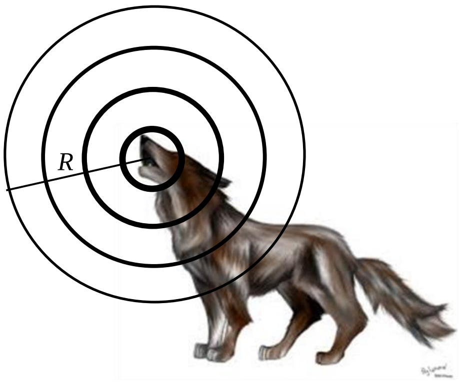
3) *Calculer le niveau d'intensité sonore L pour une intensité* $I = I_0 = 10^{-12}$ *W.m*$^{-2}$.

$$\mathbf{L = 10 \times \log \frac{I}{I_0} = 10 \times \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 0\ dB}$$

4) *Calculer le niveau d'intensité sonore pour une intensité I égale au seuil de douleur* I_{max}.

$$\mathbf{L = 10 \times \log \frac{I}{I_0} = 10 \times \log \frac{1}{10^{-12}} = 120\ dB}$$

5) *Un loup hurle avec une puissance sonore d'environ* $5,0 \times 10^{-2}$ *W.*
Le son du hurlement se propage de manière sphérique dans l'air.



a. *Calculer l'intensité sonore I du cri du loup à 1 km puis à 10 km.*

1 km = 1000 m **10 km = 10 000 m**

$$\mathbf{A\ 1\ km : I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \times \pi \times R^2} = \frac{5,0 \times 10^{-2}}{4 \times \pi \times 1000^2} = 3,98 \times 10^{-9}\ W.m^{-2}}$$

$$\mathbf{A\ 10\ km : I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \times \pi \times R^2} = \frac{5,0 \times 10^{-2}}{4 \times \pi \times 10000^2} = 3,98 \times 10^{-11}\ W.m^{-2}}$$

b. *Calculer le niveau d'intensité sonore L du cri du loup à 1 km puis à 10 km.*

$$\mathbf{A\ 1\ km : L = 10 \times \log \frac{3,98 \times 10^{-9}}{10^{-12}} = 36\ dB}$$

$$\mathbf{A\ 10\ km : L = 10 \times \log \frac{3,98 \times 10^{-11}}{10^{-12}} = 16\ dB}$$

Surface d'une sphère de rayon R : $S = 4 \times \pi \times R^2$

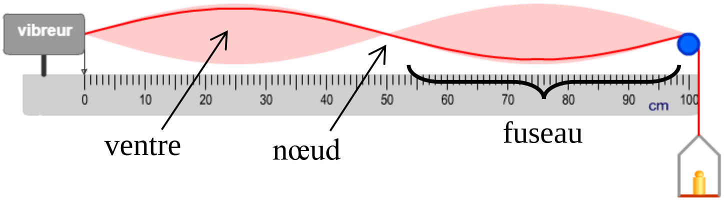
IV La production d'un son en musique

1) Les instruments à cordes

De nombreux instruments de musique utilisent des cordes tendues pour produire des sons (guitare, violon, piano, harpe, …), ils font partie de la famille des **instruments à cordes**.
Lorsque l'on pince la corde d'une guitare ou que l'on frappe la corde d'un piano, elle se met à vibrer. Cette vibration engendre un **son complexe**.

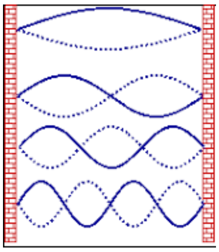
Lorsqu'une telle corde vibre dans toute sa longueur, la déformation initiale se propage de l'une à l'autre des extrémités fixes de la corde en donnant naissance à une onde appelée **onde stationnaire**.

La corde prend la forme d'un ou plusieurs **fuseaux**.
Les points fixes sont les **nœuds**.
Le centre, qui oscille avec une amplitude maximale, est le **ventre**.

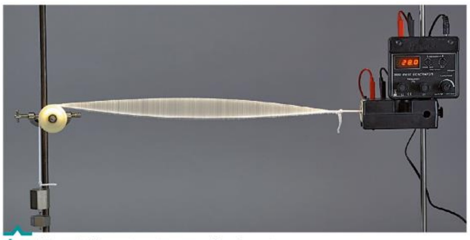


La vibration de la corde peut se décomposer en une somme de vibrations plus simples appelées **modes de vibration**.

- Le premier mode vibre à la **fréquence fondamentale**. Il correspond à une corde ne présentant qu'un seul fuseau.
- Les fréquences des autres modes correspondent aux **harmoniques** du signal sonore. Ils correspondent à une corde présentant plusieurs fuseaux.



Pour étudier les différents paramètres de la corde pouvant influencer la fréquence fondamentale, on utilise un dispositif expérimental appelé « **corde de Melde** ».
Une corde est attachée à un vibreur. À l'autre extrémité de la corde est accrochée un objet pesant qui permet de tendre la corde.


doc. Dispositif montrant une corde vibrante

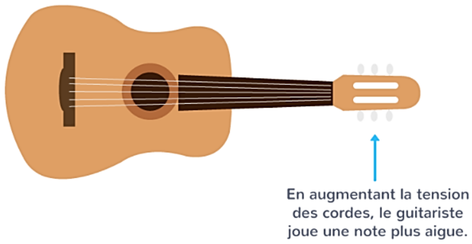
Animation : http://physique.ostralo.net/corde_guitare/

Influence de la tension de la corde

Le changement de la masse de l'objet suspendu permet de tendre plus ou moins la corde, en changeant sa tension.

1) *On change la masse de l'objet et on relève la fréquence fondamentale.*

Tension de la corde	Fréquence fondamentale
200 N	**83 Hz**
1 200 N	**204 Hz**
2 200 N	**276 Hz**



2) *Comment évolue la fréquence fondamentale en fonction de la tension de la corde ? Le son est-il plus aigu ou plus grave ?*

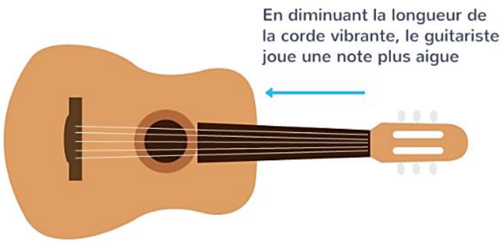
Plus la tension de la corde augmente, plus la fréquence fondamentale augmente, plus le son est aigu.

Influence de la longueur de la corde

Il est possible de diminuer la longueur de la corde qui vibre en appuyant sur des cases situées entre deux frettes du manche de la guitare.

3) *On change la longueur de la corde et on relève la fréquence fondamentale.*

Longueur de la corde	Fréquence fondamentale
20 cm	**1 225 Hz**
120 cm	**204 Hz**
220 cm	**111 Hz**



4) *Comment évolue la fréquence fondamentale en fonction de la longueur de la corde ? Le son est-il plus aigu ou plus grave ?*

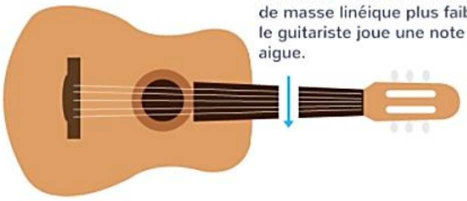
Plus la longueur de la corde diminue, plus la fréquence fondamentale augmente, plus le son est aigu.

Influence de l'épaisseur de la corde

Il est possible d'augmenter l'épaisseur de la corde qui vibre sur une guitare en changeant de corde. Cela augmente la « masse linéique » de la corde.

5) *On change l'épaisseur de la corde et on relève la fréquence fondamentale.*

Masse linéique de la corde	Fréquence fondamentale
0,5 g/m	**645 Hz**
5,0 g/m	**204 Hz**
9,5 g/m	**148 Hz**



6) *Comment évolue la fréquence fondamentale en fonction de l'épaisseur de la corde ? Le son est-il plus aigu ou plus grave ?*

Plus l'épaisseur de la corde diminue, plus la fréquence fondamentale augmente, plus le son est aigu.

Une corde tendue et mise en vibration émet un son complexe, dont la fréquence fondamentale dépend des caractéristiques de la corde :

- **La longueur L de la corde : plus la corde est courte, plus le son est aigu.**
- **La tension T avec laquelle la corde est tendue : plus la corde est tendue, plus le son est aigu.**
- **La masse linéique de la corde, liée à l'épaisseur de la corde : plus la corde est légère et fine, plus le son est aigu.**

La formule (non exigible) de la fréquence fondamentale en fonction de ces différents paramètres est :

$$\mathbf{f} = \frac{1}{2 \times L} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

L : longueur de la corde en mètre (m)
T : tension de la corde en newton (N)
μ : masse linéique en kilogramme par mètre ($kg.m^{-1}$)

2) Les instruments à vent

De nombreux instruments de musique utilisent des tuyaux remplis d'air pour produire des sons (flute, saxophone, clarinette, trompette, orgue, etc …), ils font partie de la famille des **instruments à vent**.

Pour les instruments à vent, le son est produit par la vibration de l'air dans le tuyau.
La hauteur de la note jouée dépend de la longueur *L* du tuyau et de la masse volumique de l'air qui vibre dans l'instrument.
Plus la colonne d'air est courte, plus le son est aigu.