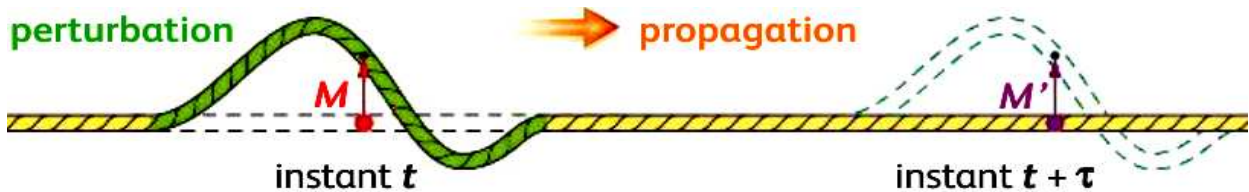


## CARACTERISTIQUES DES ONDES

### I. Propagation d'une onde

#### 1. Notion de retard

Soit une onde se propageant avec la célérité  $v$  le long d'une corde. Cette onde atteint le point  $M$  à la date  $t$  et le point  $M'$  à la date ultérieure  $t + \tau$ . Le point  $M'$  subit donc la même perturbation que le point  $M$  avec un certain retard que nous noterons  $\tau$ .



**Le retard d'une onde se propageant entre un point  $M$  et un point  $M'$  est la durée séparant le passage de la déformation entre ces deux points, il est noté  $\tau$  et s'exprime en seconde**

#### 2. Célérité d'une onde

**La célérité d'une onde est la « vitesse » à laquelle elle se propage Dans un milieu homogène\* et non dispersif\*\*, elle est définie par :**

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad \left\{ \begin{array}{l} v : \text{célérité de l'onde (m.s}^{-1}\text{)} \\ d : \text{distance parcourue par l'onde (m)} \\ \Delta t : \text{durée du parcours (s)} \end{array} \right.$$

*Célérité vient du latin celer [keler] : rapide*

*On préfère le terme célérité à celui de vitesse car il n'y a pas de transport de matière.*

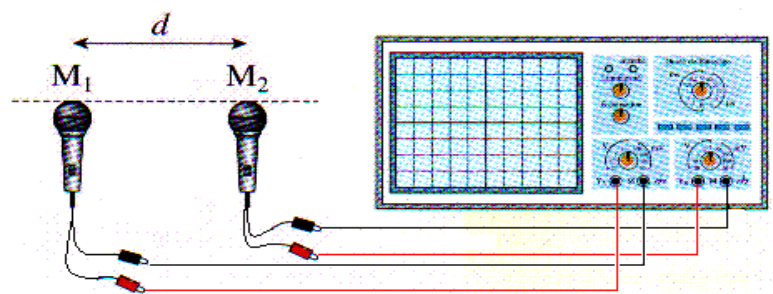
\* Dans un milieu non homogène la célérité de l'onde dépend de sa position dans le milieu

\*\* Dans un milieu dispersif la célérité des ondes dépend de leur fréquence.

Étant donnée la définition de la célérité on pourra écrire :  $v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{MM'}{\tau}$  alors  $\tau = \frac{MM'}{v}$

#### • Application :

On veut réaliser la mesure de la célérité  $v$  des ondes sonores dans l'air. Pour cela, on enregistre avec un oscilloscope la tension électrique qui apparaît aux bornes de 2 microphones  $M_1$  et  $M_2$  situés à la distance  $d$  l'un de l'autre et placés au voisinage d'un claquoir produisant un clap sonore.



Distance entre les deux micros :  $d =$

Mesure du retard  $\tau$  à l'oscilloscope :  $\tau =$

Calcul de la vitesse des ondes sonore :  $v = \frac{d}{\tau} =$

### 3. De quoi dépend la célérité ?

- **Influence de l'inertie du milieu**

L'inertie d'un corps mesure sa résistance à être mis en mouvement ou à toute modification de l'état de son mouvement.

Lors du passage d'une onde mécanique dans un milieu, chaque point du milieu va être mis en mouvement. **Plus l'inertie du milieu est grande, plus il est difficile pour chaque point de se déplacer et plus la célérité de l'onde sera faible**

- **Influence de la rigidité du milieu**

La rigidité du milieu mesure la résistance que ce milieu oppose lorsque l'on cherche à le déformer.

La célérité de l'onde dépend de la rigidité du milieu dans lequel elle se propage : **plus le milieu est rigide, plus la célérité sera grande.**

Milieu	air à température ambiante	eau	acier
Célérité ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	340	$1,5 \times 10^3$	$5,6 \times 10^3$ à $5,9 \times 10^3$

**19** Célérité des ondes sonores en fonction du milieu de propagation.

**La célérité d'une onde ne dépend pas des caractéristiques de la perturbation (amplitude, durée) ; en revanche, la célérité dépend de la nature du milieu.**

## II. Ondes progressives périodiques

### 1. Définition

Une onde mécanique progressive est dite périodique si la source impose une perturbation périodique du milieu

- **Exemples : la corde** (*animation corde*)

On provoque une perturbation périodique de la corde grâce à un exciteur :



On observe une perturbation de la corde qui se répète régulièrement dans l'espace. Le point M subit une suite ininterrompue de perturbations identiques à intervalle de temps régulier

### 2. Une double périodicité : temporelle et spatiale

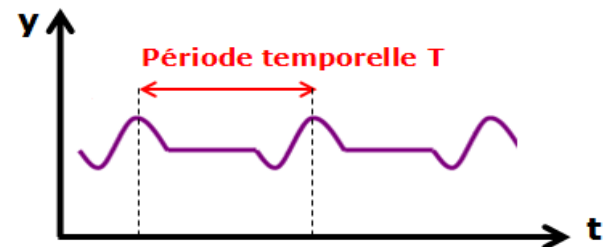
- **Périodicité temporelle :**

Chaque point du milieu de propagation subit une suite ininterrompue de perturbations identiques : La durée qui sépare l'arrivée de deux perturbations successives en un point est appelée période temporelle T.

La période temporelle T est la plus petite durée au bout de laquelle un phénomène se reproduit à l'identique. T s'exprime en seconde

L'inverse de la période  $f = \frac{1}{T}$  est la fréquence du phénomène en Hz.

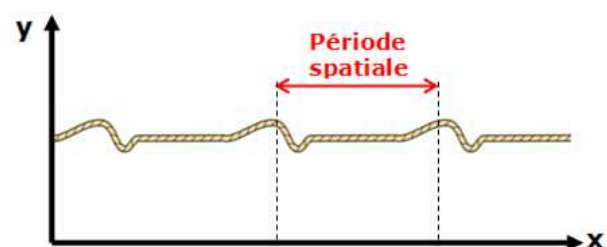
Evolution de la position d'un point M de la corde en fonction du temps :



- **Périodicité spatiale :**

Si on observe le milieu de propagation à un instant t donné, on observe des perturbations régulièrement espacées : La distance qui sépare deux perturbations consécutives est appelée période spatiale et s'exprime en mètre.

Représentation spatiale de la corde à l'instant t :



# III. Ondes progressives sinusoïdales

## 1. Définition

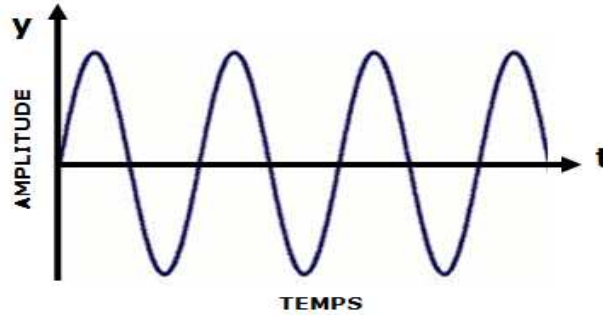
**Une onde mécanique progressive périodique est dite sinusoïdale si la perturbation est une fonction sinusoïdale du temps.**

En physique une grandeur  $y$ , fonction sinusoïdale du temps, de période  $T$  à pour équation :

$$y(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right) \quad \left\{ \begin{array}{l} A : \text{amplitudes des oscillations} \\ \phi : \text{phase à l'instant 0 que l'on prend généralement} = 0 \end{array} \right.$$



$$\begin{aligned} y(t=0) &= 0 \\ y\left(t=\frac{T}{4}\right) &= A \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = A \\ y\left(t=\frac{T}{2}\right) &= A \sin(\pi) = 0 \\ y\left(t=\frac{3T}{4}\right) &= A \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) = -A \\ y(t=T) &= A \sin(2\pi) = 0 \end{aligned}$$



- Exemples : la corde** (*animation*)

On provoque une perturbation périodique sinusoïdale d'une corde à l'aide d'un exciteur.

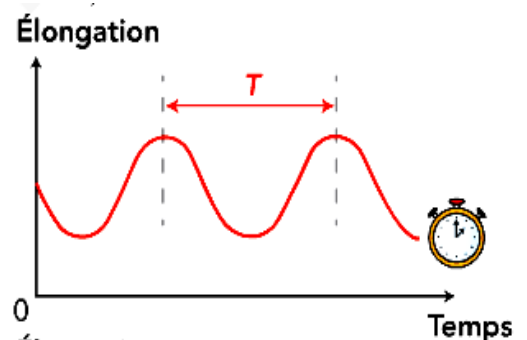
On observe que les perturbations se répètent régulièrement dans l'espace.

Un point  $M$  sur la corde subit une suite ininterrompue de perturbations identiques à intervalle de temps régulier. La perturbation subit par le point  $M$  est une fonction sinusoïdale du temps.

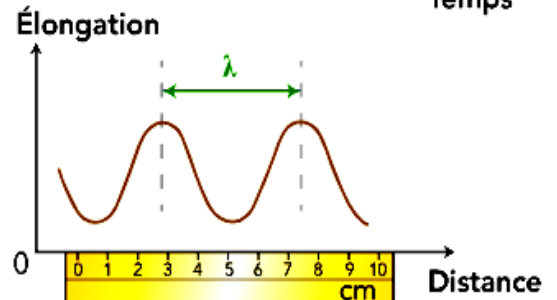
## 2. Une double périodicité : temporelle et spatiale

**L'onde est caractérisée par sa période temporelle  $T$  et sa fréquence  $f$  qui sont imposées par la source. On rappelle que :**

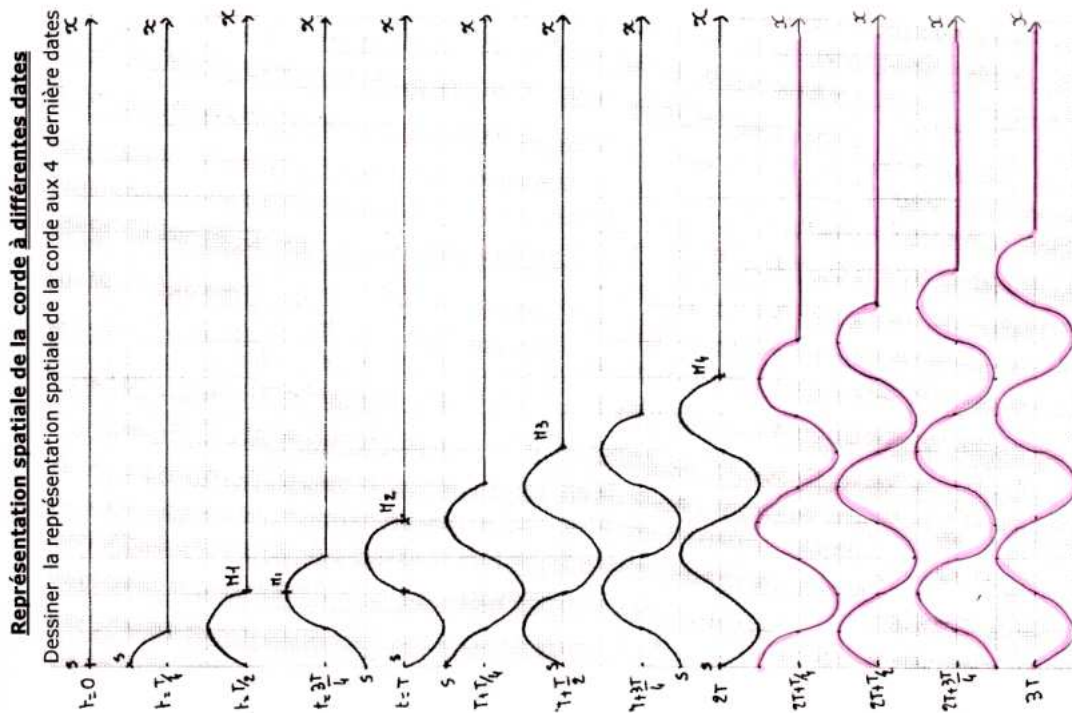
$$f = \frac{1}{T} \quad \left\{ \begin{array}{l} T : \text{période temporelle de l'onde (s)} \\ f : \text{fréquence de l'onde (Hz)} \end{array} \right.$$



**L'onde est aussi caractérisée par la période spatiale**  
**Dans le cas d'une onde sinusoïdale, on appelle cette période spatiale longueur d'onde. Elle est notée  $\lambda$  et est exprimé en mètres (m).**

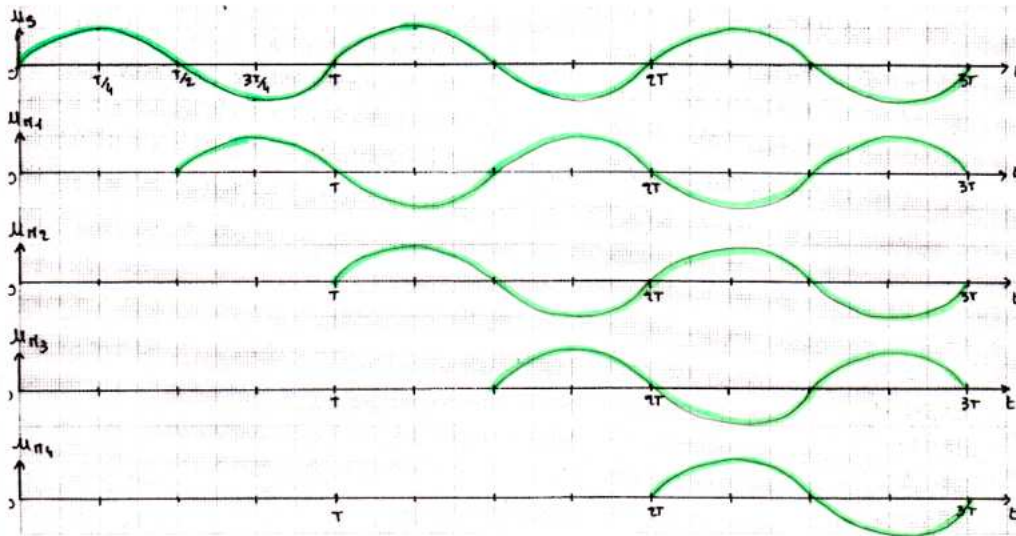


### 3. Relation entre période, longueur d'onde et célérité



**Evolution de la position d'un point de la corde en fonction du temps**

Dessiner l'évolution de la position du point S en fonction du temps. Idem pour M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>.  
 Comparer l'aspect des courbes. Ont-elles la même période ?  
 S, M<sub>2</sub> et M<sub>4</sub> vibrent en phase, que signifie cette expression ?  
 S et M<sub>1</sub> vibrent en opposition de phase, que signifie cette expression.  
 Comment vibrent M<sub>3</sub> par rapport à M<sub>1</sub> ? À M<sub>2</sub> ?



**La longueur d'onde  $\lambda$  correspond à la distance parcourue par l'onde en une période T. Ce qui donne naissance à une relation fondamentale :**

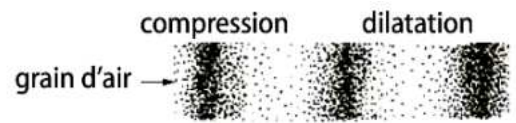
$$\boxed{v = \frac{\lambda}{T}} \Leftrightarrow \lambda = v \times T = \frac{v}{f} \begin{cases} \lambda : \text{longueur d'onde (m)} \\ T : \text{période temporelle de l'onde (s)} \\ f : \text{fréquence de l'onde (Hz)} \\ v : \text{célérité de l'onde dans le milieu (m/s)} \end{cases}$$

Des points séparés par n longueur d'onde ont des mouvements identiques simultanément. Dans ce cas on dit qu'ils sont en phase.

# IV. Cas des ondes sonores

## 1. Son et ultrason

Le son est un phénomène périodique de nature ondulatoire. La vibration d'un émetteur sonore, comme celle d'un haut parleur engendre une suite de compression dilatation des molécules d'air qui se propage jusqu'à faire vibrer le tympan de l'oreille, ce que le cerveau interprète ensuite comme un son.



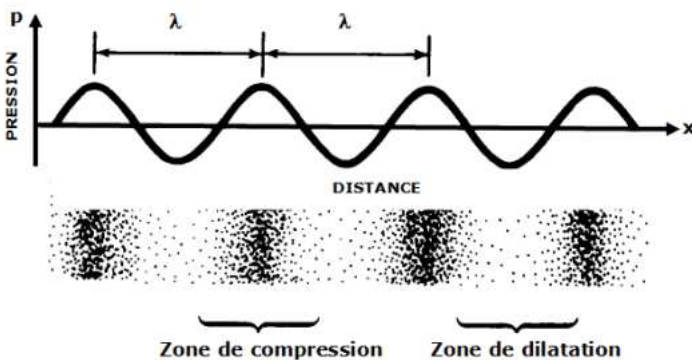
**Une onde sonore est un phénomène périodique (contrairement à un bruit) qui se propage par une suite de compression dilatation du milieu de propagation. Elle nécessite un support matériel et ne se propage donc pas dans le vide : il s'agit donc d'une onde mécanique progressive.**

### • Exemple

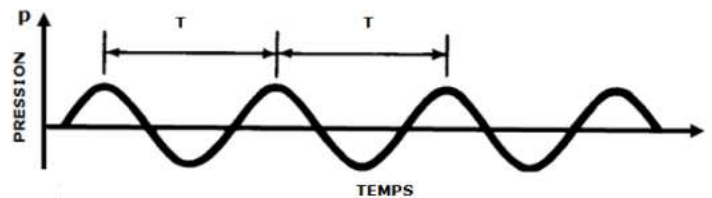
Un GBF relié à un haut parleur produit une onde sonore qui est capté par un micro relié à un oscilloscope.



Représentation spatiale de la pression à l'instant  $t$  :

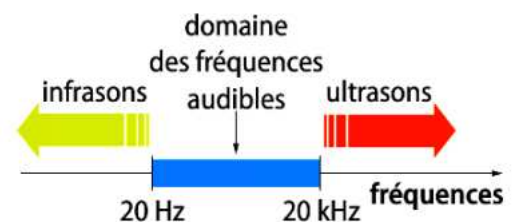


Evolution de la pression du point M en fonction du temps :



Le microphone permet de transformer le signal sonore en signal électrique. Les variations de tension obtenue en sortie du microphone sont proportionnelles aux variations de pression acoustique captées au point M, au niveau du microphone.

**Le domaine des fréquences audibles se situe, selon les individus et leur âge entre 20 et 20 000 Hz. Les sons graves correspondent aux faibles fréquences et les sons aigus aux fréquences élevées**

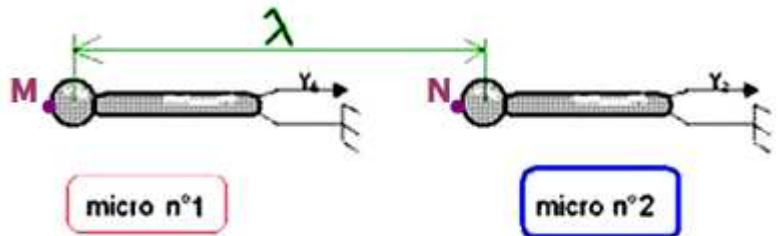
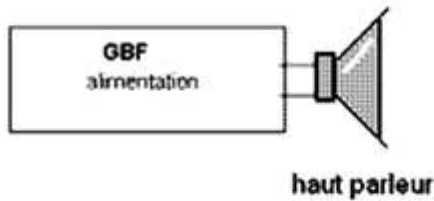


## 2. Mesure de la longueur d'onde d'une onde sonore

Mettons 2 micros faces au haut parleur et relié à l'oscilloscope. Le micro n°1 reste fixe et le micro n°2 se déplace en s'éloignant du haut parleur.

Lorsque les micros sont cotes à cote : les courbes visualisées à l'oscilloscope sont en phases : les point M et N sont donc dans le même état de perturbation.

Lorsque l'on éloigne le micro n°2, on remarque que pour une distance précise, les deux courbes sont de nouveaux en phase : les micros sont alors séparés d'une distance  $\lambda$  appelée longueur d'onde.

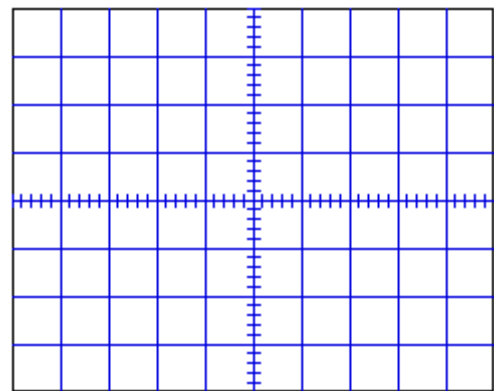


Les signaux sont en phases.

Le signal correspondant au micro n°2 à une amplitude plus faible que le signal reçu par le micro n°1.

La fréquence du signal émis et des signaux reçus sont les mêmes.

Oscillogramme obtenu :



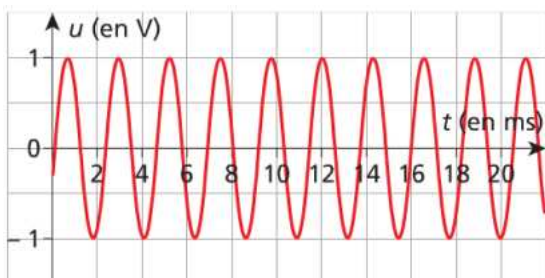
Vérification par le calcul :

## 3. Analyse temporelle d'un son

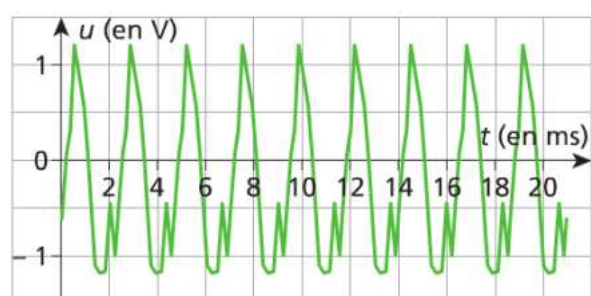
### • Sons purs et complexes

**Un son sinusoïdal comme celui du diapason est un son pur.**

**Un son non sinusoïdale, (mais périodique) comme celui d'un instrument de musique, est qualifié de complexe.**



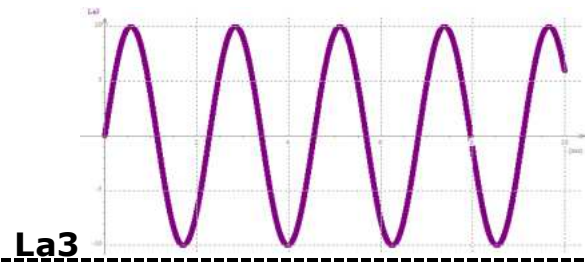
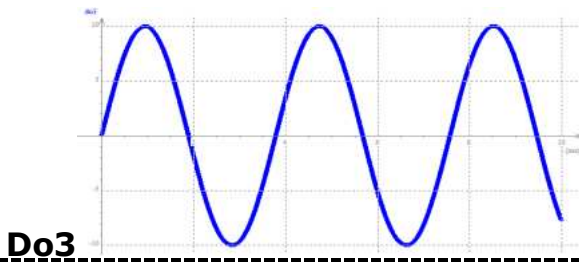
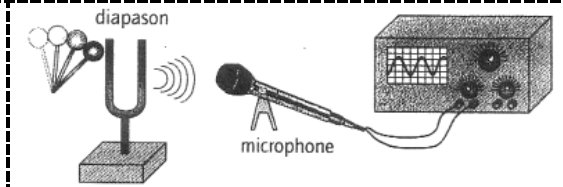
**Fig. 9** Signal obtenu avec un microphone enregistrant le diapason  $la_3$ .



**Fig. 10** Signal obtenu avec la guitare  $la_3$ .

- **Hauteur d'un son**

Un diapason est placé près d'un microphone relié à un oscilloscope.  
On frappe avec un diapason noté  $Do_3$  et un autre noté  $La_3$



**La qualité qui donne la sensation qu'un son est plus ou moins grave est appelée hauteur d'un son, elle dépend de la fréquence de la vibration sonore.**

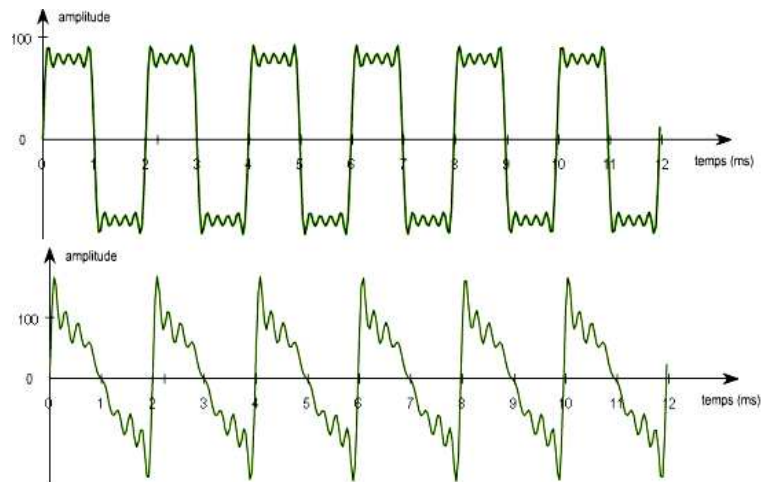
**Plus la fréquence est élevée, plus le son est aigue.**

**La fréquence du signal est appelée fréquence fondamentale, si la fréquence fondamentale est multipliée par deux, alors on passe à l'octave supérieur et inversement.**

- **Timbre d'un son**

On joue la même note (sons de même fréquence) avec deux instruments de musique différents :

**C'est le timbre d'un son qui permet de différencier une note émise par un instrument de la même note émise par un autre instrument. Le timbre d'un son est caractérisé par l'allure de la courbe représentant l'onde en fonction du temps.**

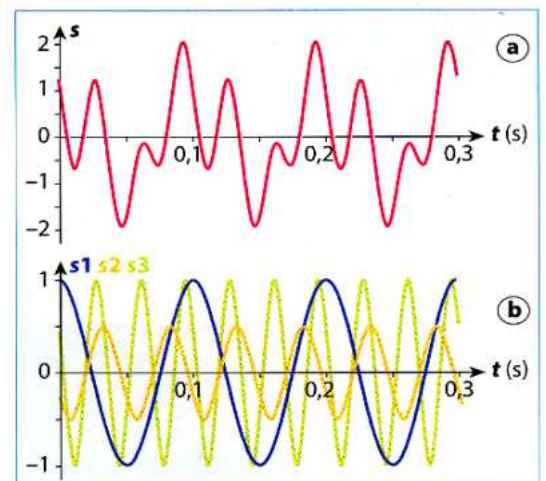


#### 4. **Analyse spectrale d'un son**

- **Décomposition de Fourier**

Le son produit par un instrument de musique comme une guitare est un son complexe (il est périodique mais pas sinusoïdal)

En 1822, le mathématicien français Joseph FOURIER a montré que tout signal périodique de fréquence  $f_1$  peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence  $f_n$ , multiple de  $f_1$ . Ces signaux sont appelés harmoniques.



**15** Le signal périodique (a) est décomposable en la somme de signaux sinusoïdaux représentés en (b).



L'analyse d'un son permet d'en obtenir le spectre en fréquence.

**Le spectre en fréquence d'un son est la représentation graphique de l'amplitude des ses composantes sinusoïdale en fonction de la fréquence.**

**Un son périodique de fréquence  $f$  peut ainsi être décomposé en une somme de sons pur, appelés harmoniques, de fréquence :**

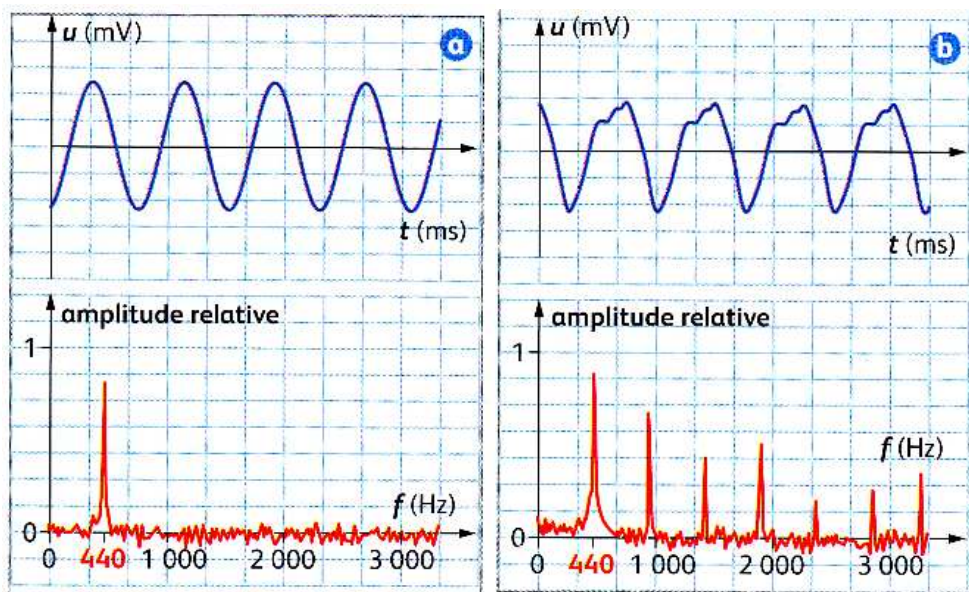
$$\boxed{F_n = n \cdot f_1} \quad \left\{ \begin{array}{l} n : \text{entier non nul} \\ f_n : \text{fréquence de l'armonique de rang } n \text{ (Hz)} \\ f_1 : \text{fréquence du fondamental} \end{array} \right.$$

Le son de fréquence  $f_1$  est appelé le fondamental et sa fréquence est égale à celle du son

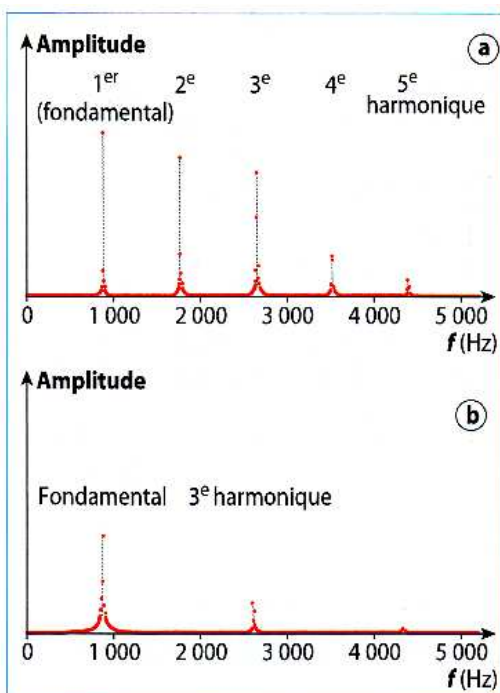
Comparaison des signaux et des spectres associés.

**a** Signal et spectre d'un son pur (diapason).

**b** Signal et spectre d'un son complexe (guitare) jouant une même note de même hauteur.



## • Hauteur et timbre



Sur le spectre en fréquence :

- la hauteur de son s'obtient en relevant la fréquence du fondamental
- le timbre est défini par le nombre et l'amplitude des harmoniques présents.

**17** Spectres de deux sons complexes correspondant à la même note, produits par deux instruments différents : (a) clarinette et (b) flûte.