

# Caractéristiques des ondes

## 1- Ondes mécaniques progressives

### 1-1- Définition

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

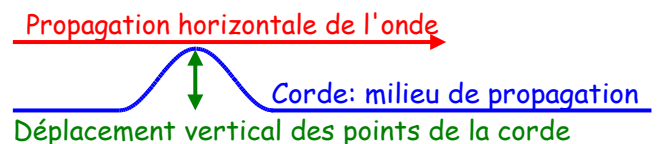
Remarque: Lorsque la perturbation est de courte durée on parle parfois de signal.

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

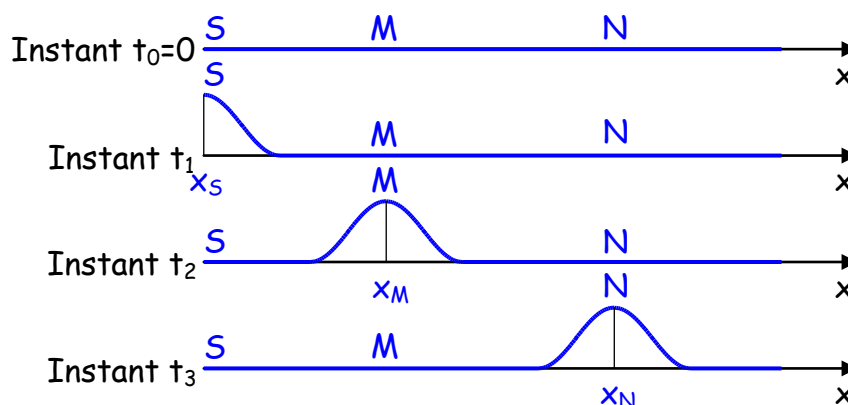
### 1-2- Exemples d'ondes mécaniques

#### 1-2-1- Onde mécanique à une dimension

On secoue verticalement l'origine S d'une corde tendue horizontalement. La perturbation de courte durée (ou signal) se propage le long de la corde.



Chaque point de la corde se soulève verticalement puis reprend sa position initiale alors que le signal se déplace horizontalement le long de la corde. On dit que l'onde est transversale.



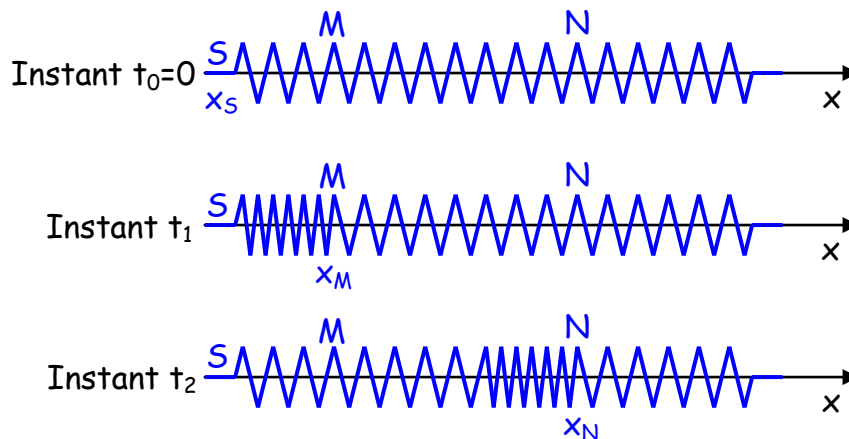
Une onde transversale provoque une perturbation dont la direction est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

La vitesse  $V$  de propagation de l'onde est donnée par la relation:

$$V = \frac{x_M - x_S}{t_2 - t_1} = \frac{x_N - x_M}{t_3 - t_2}$$

On pince quelques spires proches de l'origine  $S$  d'un ressort tendu horizontalement.

La perturbation de courte durée (ou signal) se propage le long du ressort. Chaque point  $P$  du ressort se déplace horizontalement puis reprend sa place. Le signal se déplace également horizontalement le long du ressort. On dit que l'onde est longitudinale.



La vitesse de propagation  $V$  de l'onde est donnée par la relation:

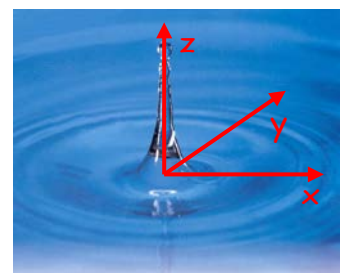
$$V = \frac{x_N - x_M}{t_2 - t_1}$$

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

### 1-2-2-Onde mécanique à deux dimensions

On laisse tomber une goutte d'eau en un point  $S$  de la surface de l'eau contenue dans une cuve à ondes.

Des rides circulaires prennent naissance, puis se propagent dans les deux dimensions du plan horizontal.



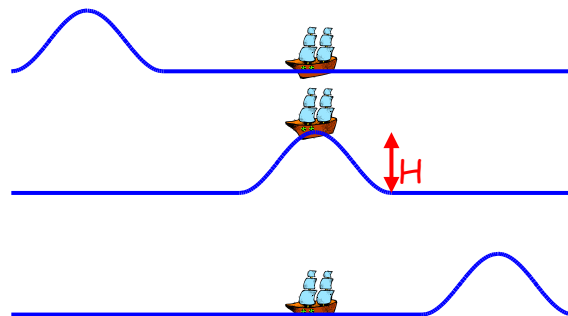
Chaque point de la surface se soulève verticalement puis reprend sa place alors que les rides se déplacent horizontalement à la surface de l'eau.

L'onde est transversale.

Au passage d'une vague, un bateau s'élève d'une hauteur  $H$  et voit donc son énergie potentielle de pesanteur augmenter de  $\Delta E_p = m \cdot g \cdot H$ .

Cette énergie lui a été fournie par la vague, mais le bateau est resté à la même abscisse.

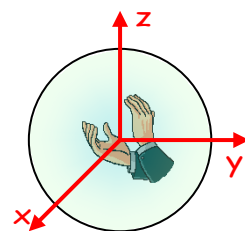
Il y a transport d'énergie mais pas de transport de matière.



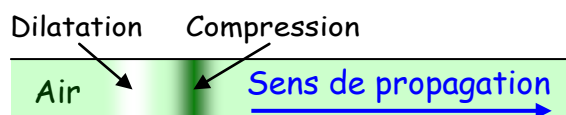
### 1-2-3- Onde mécanique à trois dimensions

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

L'onde sonore se propage dans les trois dimensions de l'espace. Chaque point vibre longitudinalement dans la direction de propagation du signal.



Le son dans l'air est une onde. La perturbation, qui est une succession de compression et de détente dans l'air, se propage de proche en proche horizontalement, les molécules constituant l'air effectuent un va-et-vient horizontalement.



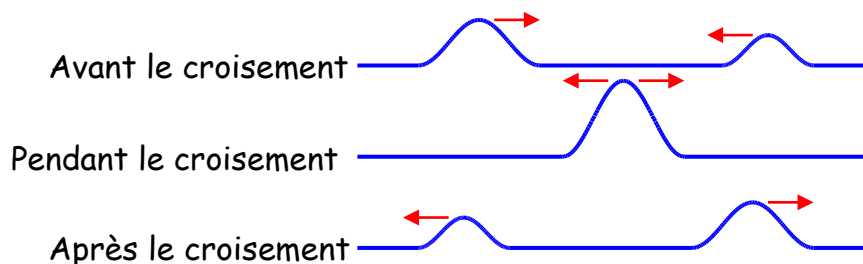
L'air, milieu de propagation ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. L'air est un milieu élastique.

*Remarque: une sonnerie, placée sous une cloche, devient inaudible lorsqu'on fait le vide. En effet, ce sont les molécules de gaz qui permettent, par leur vibration longitudinale, de transmettre le son depuis la source jusqu'au tympan de l'oreille de l'auditeur. Dans le vide, le son ne peut pas se propager.*

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.

### 1-3- Croisement de deux ondes

Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.



C'est le cas, notamment, des ondes sonores.

### 1-4- Célérité d'une onde

Si  $d$  est la distance parcourue par l'onde et  $\Delta t$  la durée de propagation; on définit une célérité moyenne  $V$  de l'onde par la relation:

$$V = \frac{d}{\Delta t} \quad \left| \begin{array}{l} V: \text{ Vitesse en mètre par seconde (m.s}^{-1}\text{)} \\ d: \text{ Distance parcourue en mètre (m)} \\ \Delta t: \text{ Durée de propagation en seconde (s)} \end{array} \right.$$

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

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

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

Souvent la célérité d'une onde ne dépend que du milieu matériel dans lequel elle se déplace.

Pour une corde, la vitesse de propagation d'une onde est d'autant plus grande que la corde est tendue. La vitesse est d'autant plus grande que la masse linéique de la corde est faible.

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

La vitesse du son est plus grande dans un solide que dans l'eau et elle est plus grande dans l'eau que dans l'air.

Plus le milieu est rigide, plus la vitesse est grande.

Plus l'inertie du milieu est grande, plus la vitesse diminue.

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

*Remarque: Une onde lumineuse n'est pas une onde mécanique. Elle peut se propager dans le vide. Nous verrons que dans le vide et dans l'air toutes les radiations lumineuses se propagent avec la même vitesse  $c=3.10^8 \text{ m. s}^{-1}$ .*

*Remarque: Dans l'eau la vitesse de propagation dépend de la fréquence de la radiation (chaque "couleur" est caractérisée par sa fréquence). On dit que, pour les ondes lumineuses, l'eau est un milieu dispersif.*

La propagation d'une onde n'obéit pas aux mêmes lois que le mouvement d'un solide:

- Le mouvement d'un solide se fait selon une trajectoire bien précise, tandis que la propagation d'une onde se fait, à partir d'une source, dans toutes les directions possibles.
- Le mouvement d'un solide correspond à un transport de matière, tandis que la propagation d'une onde ne correspond pas à un transport de matière.
- Le mouvement d'un mobile est ralenti par les frottements avec le milieu matériel, tandis que dans un milieu matériel une onde peut être amortie mais cet amortissement porte davantage sur son amplitude que sur sa célérité.
- Un solide se déplace plus facilement dans le vide que dans un gaz et plus facilement dans un gaz que dans un liquide, tandis qu'une onde mécanique ne se propage pas dans le vide.
- Le mouvement d'un solide est modifié par un choc avec un autre mobile (modification de la vitesse, de la trajectoire, de l'énergie cinétique, déformation du solide, ...), tandis qu'une onde mécanique conserve ses caractéristiques après la rencontre avec d'autres ondes (même célérité après la rencontre, même forme des surfaces d'ondes, même fréquence pour une onde périodique, ...).
- Le mouvement d'un solide se fait à une vitesse qui dépend des conditions initiales (vitesse et accélération initiales), tandis que la propagation d'une onde se fait à une célérité qui, pour de faibles amplitudes, ne dépend pas du mouvement initial de la source.

## **1-5- Onde progressive à une dimension**

### **1-5-1- Définition**

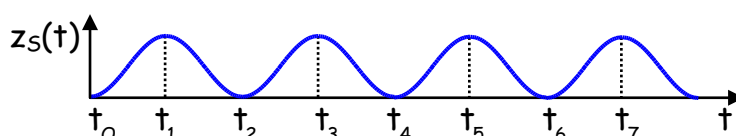
**On appelle onde mécanique progressive à une dimension le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu à une dimension sans propagation de matière.**

C'est par exemple le cas d'une onde transversale se propageant sur une corde ou d'une onde longitudinale se propageant sur un ressort.

### 1-5-2- Mouvement de la source

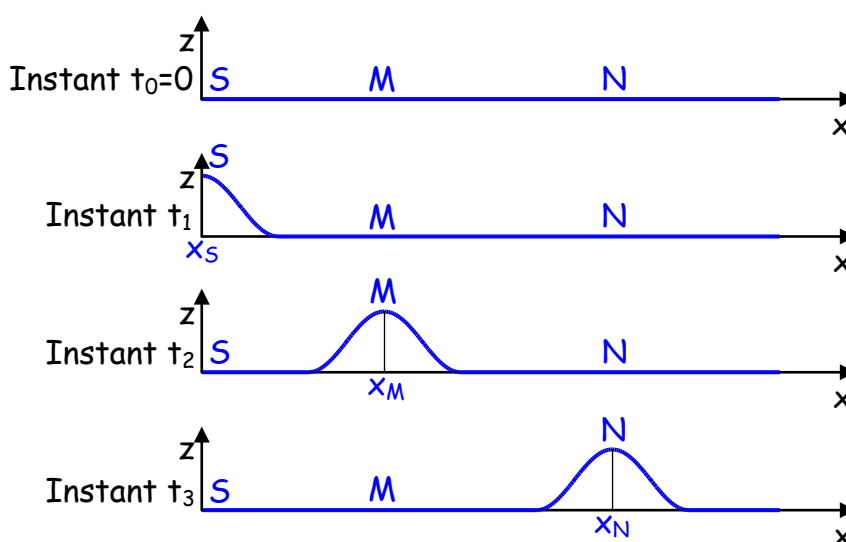
On considère la propagation d'une perturbation le long d'une corde horizontale. La déformation commence à l'instant initial  $t=0$ .

Le mouvement de la source située au point  $S$  est un mouvement rectiligne vertical selon l'axe des ordonnées  $z$ . On notera  $z_S(t)$  la fonction mathématique représentant la position de la source en fonction du temps  $t$ .



### 1-5-3- Mouvement d'un point M du milieu matériel

La déformation créée en  $S$  se propage de proche en proche dans le milieu matériel avec la célérité  $V$ .



Chaque point du milieu subit la même déformation, mais pas au même instant.

Le point  $M$  situé à la distance  $x_M$  ( $x_M > 0$ ) de la source, a un mouvement qui commence avec un retard  $\tau = \frac{x_M - x_S}{V}$  sur celui de la source.

Le point  $N$  situé à la distance  $x_N$  ( $x_N > 0$ ) de la source, a un mouvement qui commence avec un retard  $\tau' = \frac{x_N - x_S}{V}$  sur celui de la source.

Le point M situé à la distance  $x_N - x_M$  de la source, a un mouvement qui commence avec un retard  $\tau'' = \frac{x_N - x_M}{V}$  sur celui du point M.

La valeur  $z$  de la perturbation, à la date  $t$  fixée, varie avec l'abscisse  $x$ . Le graphe associé est un graphe des espaces à la date  $t$ .

La valeur  $z$  de la perturbation au point M, d'abscisse  $x_M$  donnée, varie avec la date  $t$ . Le graphe associé est un graphe des temps pour le point particulier M, d'abscisse  $x$ .

La valeur  $z$  de la perturbation dépend donc à la fois de la position  $x$  et de la date  $t$ .

**Le mouvement d'un point M situé à la distance  $x_M$  de la source est le même que celui de la source avec un retard:**

$$\tau = \frac{x_M - x_S}{V}$$

**Si le mouvement de la source est  $z_S(t)$ , le mouvement du point M est:**

$$z_M(t) = z_S(t - \tau)$$

*Remarque: On a supposé que l'amortissement était nul et que le milieu était non dispersif.*

#### **1-5-4- Aspect du milieu à un instant donné**

Si on connaît l'aspect du milieu matériel à un instant  $t$  et que l'on connaît la célérité  $V$  de l'onde dans le milieu, on obtient son aspect à l'instant  $t' = t + \tau$  par translation de la quantité  $V \cdot \tau$ .

Cette quantité correspondant à la distance parcourue par l'onde au cours de sa propagation pendant la durée  $\tau = t' - t$ .

#### **1-6- Atténuation des ondes**

Si une partie de l'énergie transportée par l'onde se transforme en chaleur, on dit que l'onde s'amortit.

Dans le cas d'une onde sur l'eau, l'énergie se répartit sur des rides circulaires de rayon croissant. La hauteur des vagues diminue. Cette atténuation de l'amplitude de la perturbation existe, dans les milieux à deux ou trois dimensions, même si l'énergie transportée par la perturbation se conserve. Cette atténuation n'est pas due à un amortissement.

## 2- Ondes mécaniques progressives périodiques

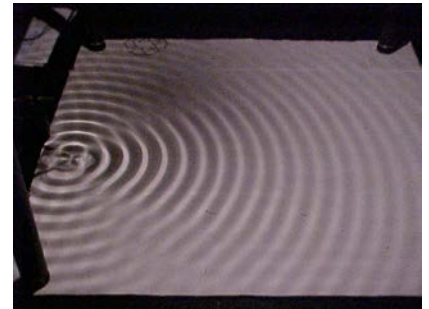
### 2-1- Exemple d'onde progressive périodique

Une onde mécanique transversale se propage sur l'eau lorsqu'on laisse tomber une goutte d'eau en un point de la surface.



Les rides circulaires ne perturbent que temporairement cette surface. Très vite, celle-ci redevient immobile.

Si, au lieu de laisser tomber une goutte d'eau, on frappe régulièrement la surface de l'eau avec une pointe, alors on provoque une onde progressive périodique transversale.



Chaque point de la surface de l'eau oscille suivant la verticale avec la même période temporelle  $T$  que celle du générateur d'ondes.

Une onde progressive est périodique si, une photographie du milieu de propagation, prise à un instant quelconque, montre une périodicité spatiale de l'onde.

### 2-2- Onde progressive sinusoïdale

#### 2-2-1- Mouvement sinusoïdal de la source

A l'instant initial  $t=0$ , un vibreur commence à fonctionner, entraînant dans son mouvement l'origine  $S$  d'une corde tendue horizontalement. Dans le repère  $(O, x, y)$ , le mouvement de  $S$  est sinusoïdal.

L'équation du mouvement du point  $S$ , suivant l'axe vertical  $Oy$ , s'écrit:

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

$Y_m$  correspond à l'amplitude du mouvement.

$T$  est la période temporelle dont l'unité est la seconde (s). C'est la plus petite durée au bout de laquelle la perturbation se reproduit identique à elle-même.

$$y_s(t) = y_s(t + n \cdot T)$$

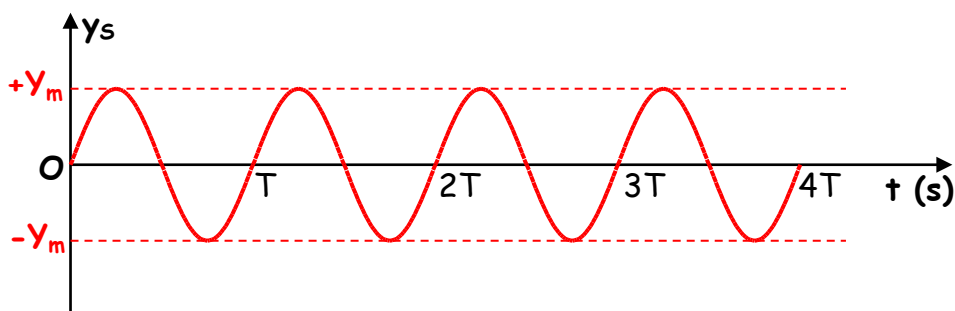


### 2-2-2 Graphe des temps de la source S

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

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

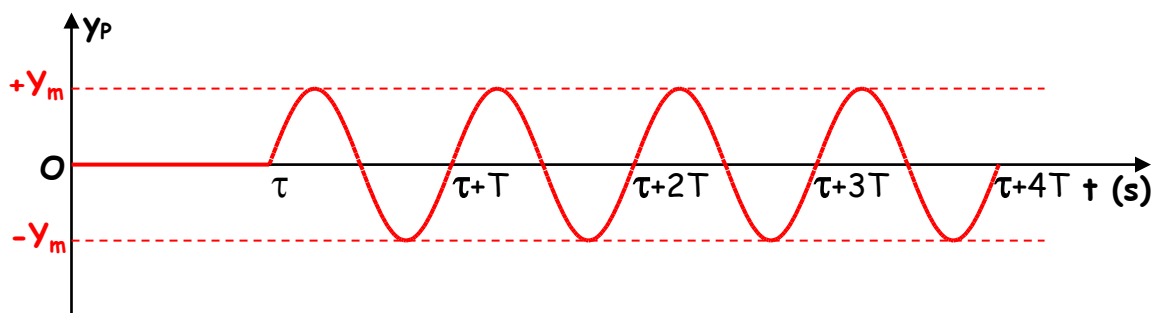
Sur celui-ci, apparaît bien la période temporelle T.



### 2-2-3- Graphe des temps d'un point de la corde

Si la célérité de l'onde (vitesse de propagation de l'onde) sur la corde est V, le front de l'onde mettra un temps  $\tau = \frac{OP}{V}$  pour atteindre le point P de la corde.

Le point P reproduit le mouvement sinusoidal de la source S avec un retard  $\tau = \frac{OP}{V}$ .



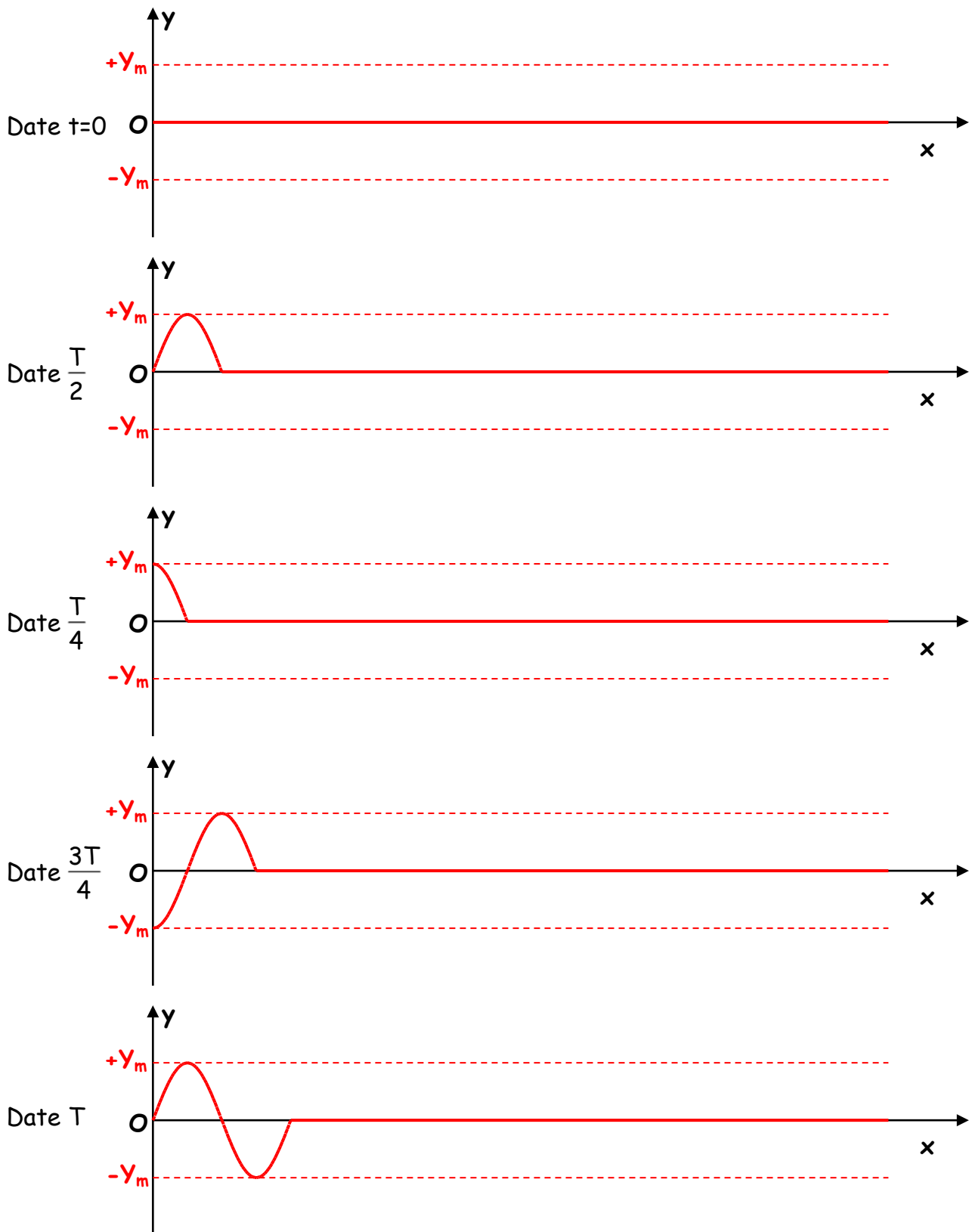
Sur ce graphe des temps du point P apparaît également la période temporelle T.

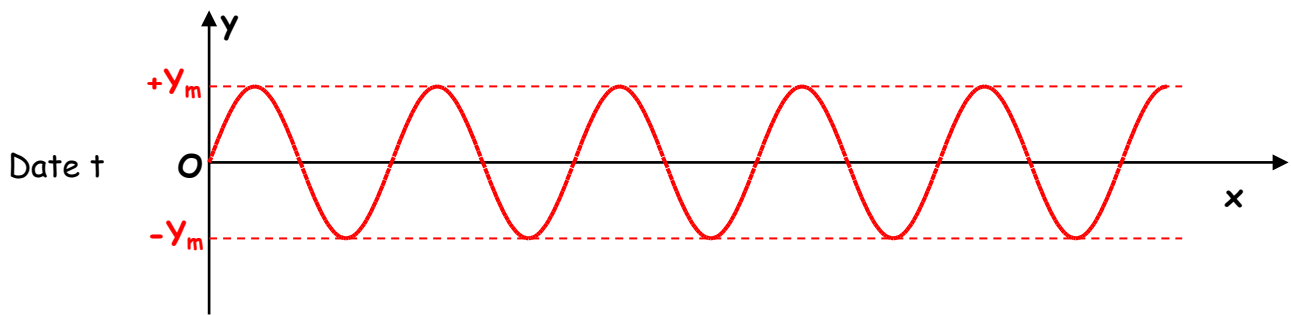
L'équation du mouvement du point P suivant l'axe vertical Oy, s'écrit:

$$y_p(t) = y_s(t-\tau) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (t-\tau)\right)$$

### 2-2-4- Graphe des espaces de la corde à la date $t$

Si on photographie la corde à différents instants, on obtient les graphiques suivants.





Sur le dernier graphe des espaces (à la date  $t$ ) apparaît nettement la périodicité spatiale de l'onde se propageant sur la corde. Cette période spatiale de l'onde est appelée la longueur d'onde. On la notera par la lettre grecque  $\lambda$ .

### 2-2-5- Relation entre la période spatiale $\lambda$ et la période temporelle $T$

Les photos prises aux dates  $\frac{T}{4}$ ,  $\frac{T}{2}$  et  $T$  montrent clairement que la longueur d'onde est égale à la distance parcourue par l'onde, à la célérité  $V$ , en une période  $T$ .

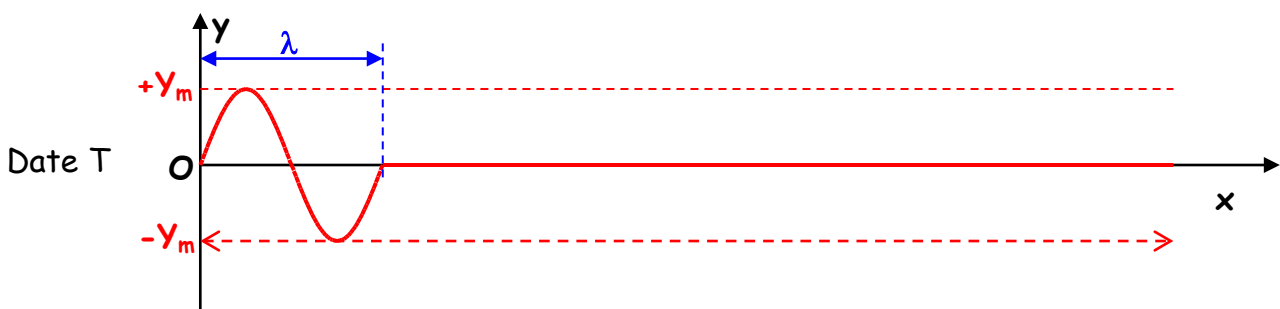
Une onde progressive sinusoïdale présente une double périodicité, spatiale (définie par la longueur d'onde  $\lambda$ ), et temporelle (définie par la période  $T$ ), telle que les fonctions  $y(x)$  et  $y(t)$  soient sinusoïdales.

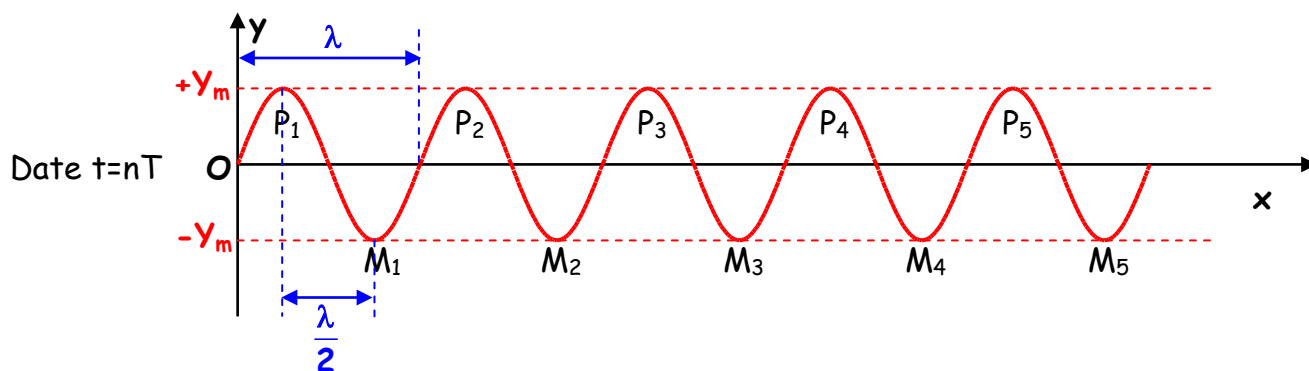
$$\lambda = V \cdot T \quad \left| \begin{array}{l} \lambda: \text{Longueur d'onde (m)} \\ V: \text{Célérité de l'onde (m.s}^{-1}\text{)} \\ T: \text{Période (s)} \end{array} \right.$$

$$y(x) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x\right) \quad y(t) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right)$$

### 2-2-6- Propriétés de la longueur d'onde

Si on photographie la corde aux dates  $t=T$  et  $t=n \cdot T$ , on obtient les graphiques suivants.





Le front de l'onde parti de  $O$  à la date  $t=0$  a parcouru la distance  $\lambda$  à la date  $t=T$ .

La longueur d'onde  $\lambda$  est égale à la distance parcourue par l'onde en une période  $T$ .

Tous les points  $P$ , distants de  $\lambda$ , passent en même temps par leur élongation maximale. Ils ont à chaque instant la même élongation  $y$ , comprise entre  $-y_m$  et  $+y_m$ . On dit qu'ils vibrent en phase.

Tous les points  $M$ , distants de  $\lambda$ , passent en même temps par leur élongation maximale. Ils ont à chaque instant la même élongation  $y$ , comprise entre  $-y_m$  et  $+y_m$ . On dit qu'ils vibrent en phase.

Les points  $P$  et  $M$ , distants de  $\frac{\lambda}{2}$ , sont en opposition de phase.

## 2-3 Dispersion des ondes se propageant dans certains milieux

### 2-3-1- Milieu dispersif

Un milieu matériel est dispersif lorsque la célérité  $V$  de l'onde sinusoïdale en propagation dans ce milieu dépend de la fréquence  $f$ .

Dans la cuve à onde on engendre, au moyen d'une règle solidaire du vibreur, des ondes planes se propageant à la surface de l'eau.

La fréquence  $f$  est réglable et peut être lue sur le générateur d'onde.

Une webcam permet d'observer, en arrêt sur image, les rides obtenues à un instant  $t$ .



Pour différentes fréquences  $f$ , on mesure la longueur d'onde  $\lambda$  puis on calcule  $V = \lambda \cdot f$ .

$f$ (Hz)	20	25	30	35
$\lambda$ (cm)	1,0	0,90	0,80	0,70
$V$ (m.s <sup>-1</sup> )	0,20	0,23	0,24	0,25

On s'aperçoit que la célérité  $V$  de l'onde dépend de la fréquence  $f$ .

Dans le cas d'une cuve à onde, la célérité des ondes dépend aussi de la profondeur de l'eau. Si la profondeur de l'eau est de 3mm environ, le phénomène de dispersion est très important. Pour une profondeur de 6mm environ, la dispersion est minimale.

**La célérité d'une onde progressive périodique plane à la surface de l'eau dépend de la fréquence de l'onde (égale à la fréquence de vibration de la source).**

### 2-3-2 Milieu non dispersif

Pour les ondes sonores de fréquences audibles (20Hz à 20kHz) l'air est un milieu non dispersif. Toutes les ondes sonores audibles se déplacent à la même vitesse (cela est heureux pour les auditeurs se trouvant au fond d'une salle de concert).

Pour des ondes sonores audibles de très grande amplitude l'air devient dispersif: le roulement du tonnerre s'explique par le fait que les ondes sonores de basses fréquences sont plus lentes que les autres.

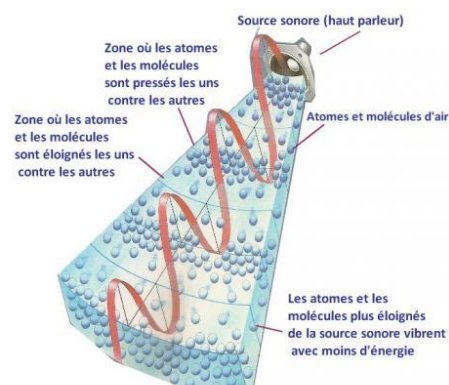
De même pour des ondes ultra sonores de très grandes fréquences (supérieures à 1GHz) l'air devient dispersif.

## 3- Ondes sonores

### 3-1- Son et Ultra-Son

Un son est un phénomène périodique de nature ondulatoire.

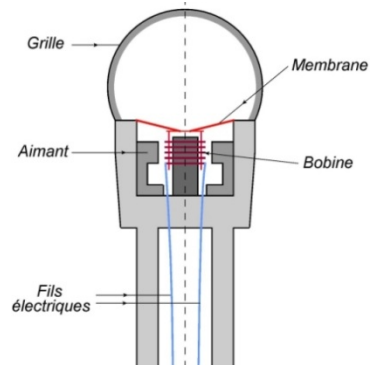
La vibration d'un émetteur sonore, comme celle d'un haut-parleur, engendre une suite de compressions et de dilatations de l'air qui se propage jusqu'à faire vibrer le tympan de l'oreille, ce que le cerveau interprète ensuite comme un son.



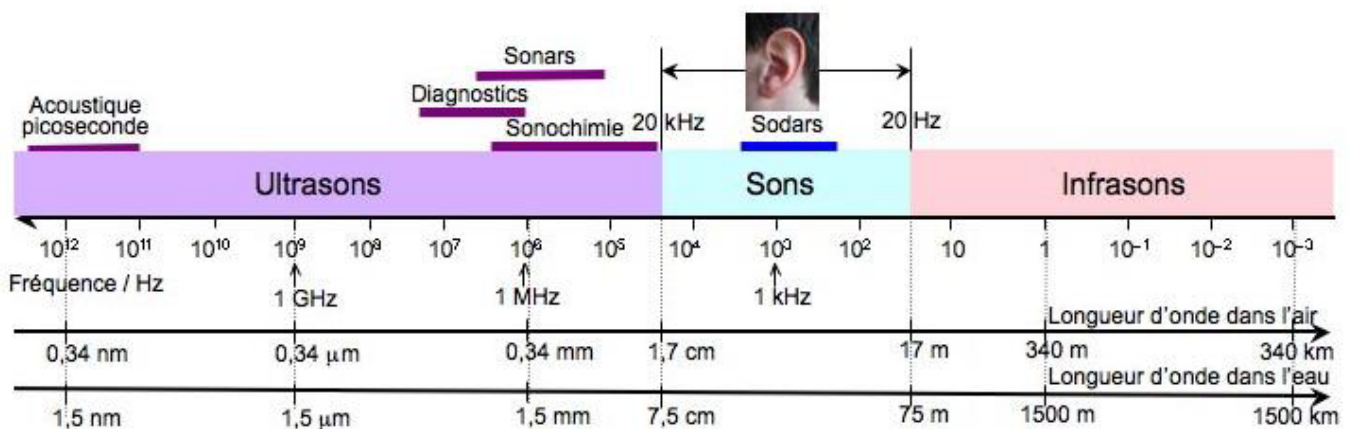
Une onde sonore est un phénomène périodique qui se propage par une suite de compression et de dilatations du milieu de propagation. Elle nécessite un support matériel et ne se propage pas dans le vide: c'est une onde mécanique progressive.

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.



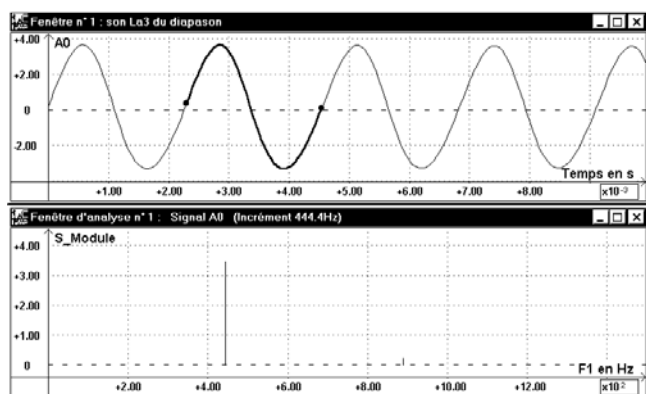
Dans le domaine des fréquences audibles, les fréquences faibles correspondent aux sons graves et les fréquences élevées, aux sons aigus.

### 3-2- Analyse spectrale

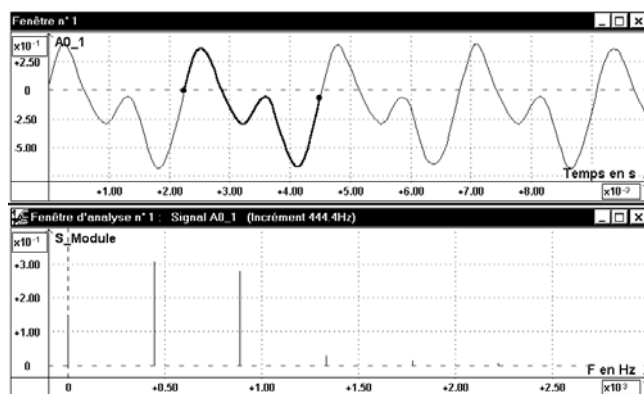
Pour accorder son instrument de musique, on peut utiliser un diapason qui, en vibrant, émet un "la<sub>3</sub>". L'onde sonore produite est une onde progressive sinusoïdale. Le signal électrique obtenu à l'aide d'un microphone qui capte ce son est un signal parfaitement sinusoïdal: on dit que le son 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.

### 3-1- Hauteur et timbre

La même note "la<sub>3</sub>" 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 "la<sub>3</sub>" 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.