

PARTIE I : OBSERVER

- Extraire et exploiter des informations sur les manifestations des ondes mécaniques dans la matière.
- Connaître et exploiter la relation liant le niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore.
- 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 la propagation d'une onde.
- 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.
- Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.

Chapitre 2

Caractéristiques des ondes

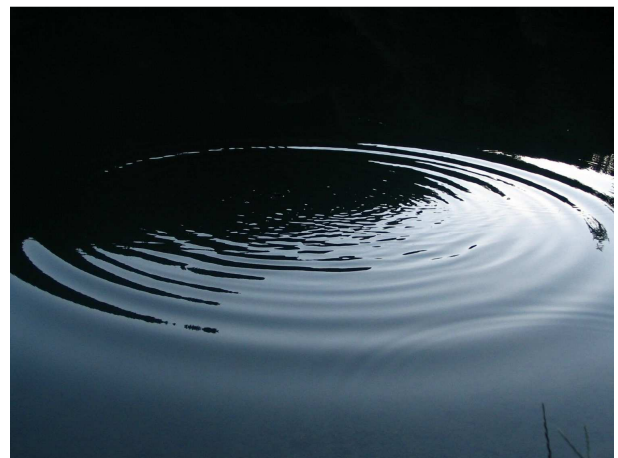
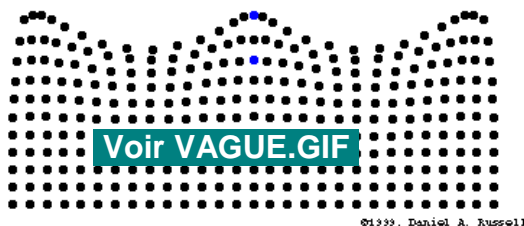
I. Les ondes progressives

I.1 Définition

Lorsqu'on jette une pierre sur un plan d'eau, on crée localement une perturbation qui se traduit par une déformation de la surface de l'eau qui se propage.

Une perturbation qui se propage de proche en proche dans un milieu est appelée onde progressive.

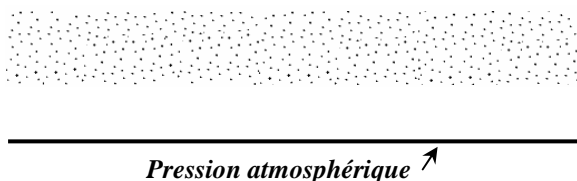
Une onde progressive ne transporte pas de matière, mais elle transporte de l'énergie.



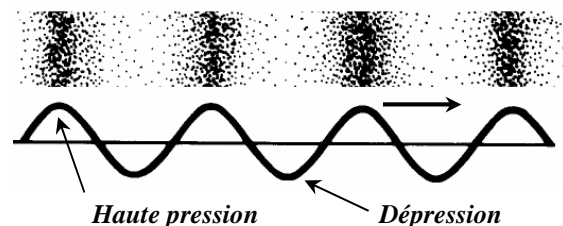
↑ Figure 1 : Onde à la surface d'un lac

Le son est une onde progressive : les molécules d'air se communiquent, de proche en proche, leur mouvement de va et viens propageant ainsi la perturbation dans l'air (ou tout autre milieu matériel). On observe alors des zones de haute pression et des zones de dépression.

Molécules d'air sans son



Molécules d'air avec son

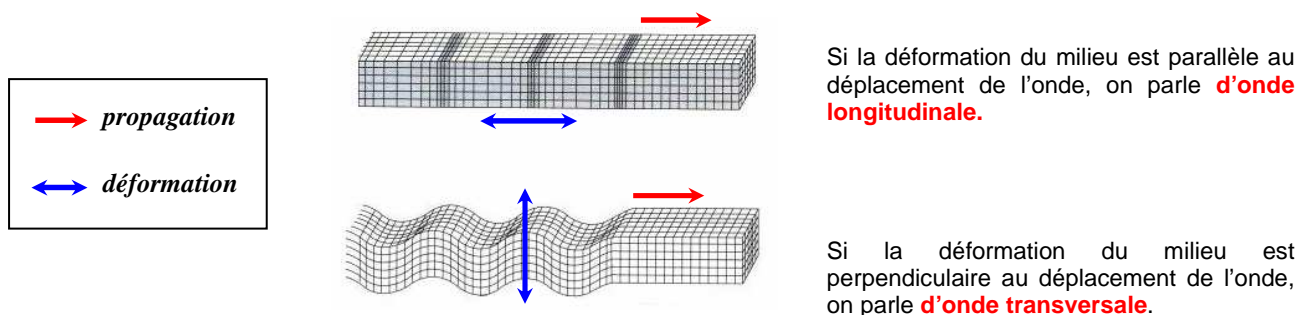


↑ Figure 2 : Visualisation du son dans l'air

I.2 Ondes progressives mécaniques

Une perturbation qui s'accompagne d'une déformation de la matière est appelée **onde mécanique**.

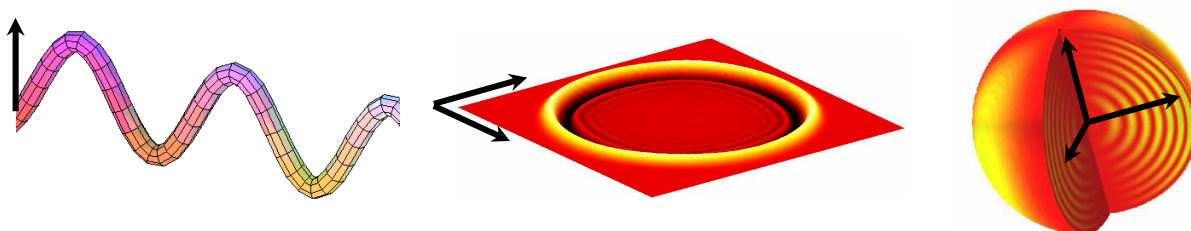
Ex : son, vague, onde sismique, ...



↑ Figure 3 : Type d'onde progressive

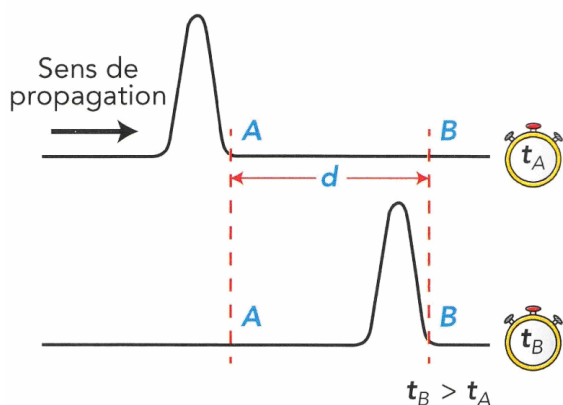
La lumière est une onde progressive qui n'est pas mécanique car elle ne déforme pas la matière qu'elle traverse. C'est une perturbation d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propage.

Une onde se propage dans toutes les directions qui lui sont offertes. Néanmoins, si le milieu, du fait de sa structure, ne permet que la propagation dans une direction donnée, on parle **d'onde à une dimension**.



↑ Figure 4 : Dimensions d'une onde progressive

I.3 Célérité d'une onde progressive



Considérons une perturbation se propageant le long d'une corde. La distance parcourue par cette perturbation durant la durée $\Delta t = t_B - t_A$ est $d = AB$.

Ainsi, la célérité v de l'onde est :

$$v = \frac{\text{longueur}}{\text{temps}} = \frac{AB}{\Delta t}$$

AB en m
 Δt en s
 v en $m \cdot s^{-1}$

⇐ Figure 5 :

Aspect de la corde à deux dates t_A et t_B

La perturbation arrive en B avec un retard τ (tau) sur A . Ce retard est défini par la relation :

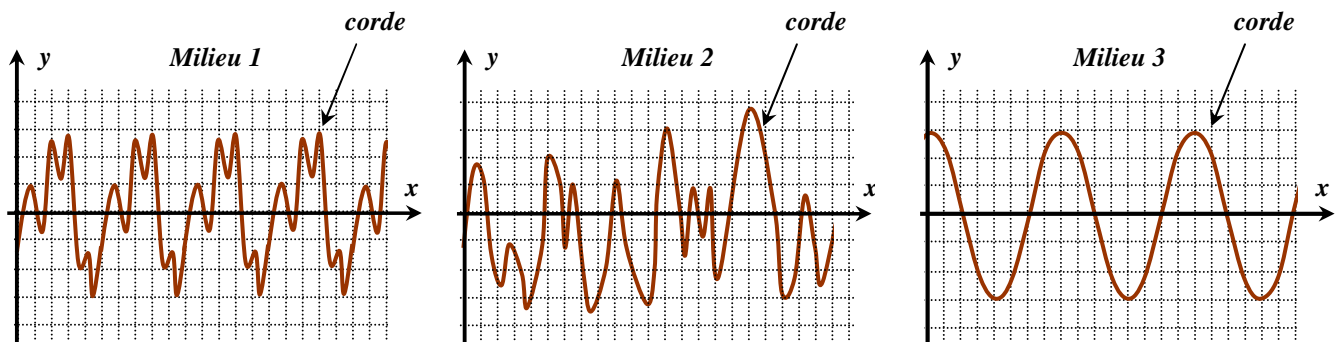
$$\tau = \frac{AB}{v}$$

II. Les ondes progressives sinusoïdales

II.1 Ondes périodiques sinusoïdales

- Un phénomène est dit **périodique** s'il se répète identique à lui-même **ET** à intervalle de temps régulier appelé **période** et noté **T** .
La fréquence f associée est définie par la relation : $f = 1 / T$

f en hertz (Hz)
 T en s
- Une onde progressive sinusoïdale est la propagation d'une perturbation décrite par une fonction sinusoïdale du temps : $y = Y_{\max} \cos(\omega t + \varphi)$
- La période T d'une onde périodique est la plus petite durée pour que chaque point du milieu se retrouve dans le même état vibratoire.



↑ Figure 6 : Etats vibratoires d'une corde

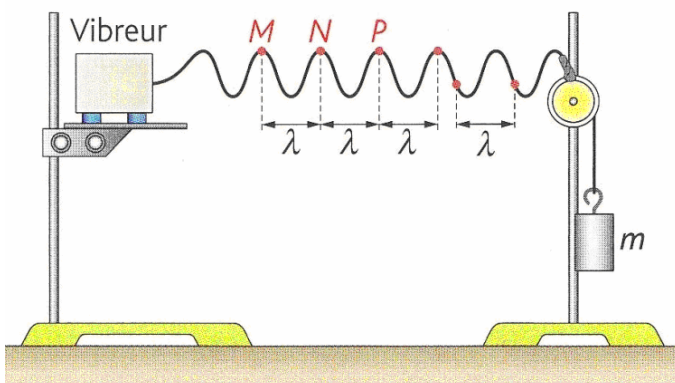
Echelle horizontale et verticale : $2,0 \text{ m / div}$
Célérité des trois ondes : $4,0 \text{ m s}^{-1}$

Questions :

- Parmi les ondes ci-dessus, déterminer la ou les ondes périodiques.
- Définir pour cette ou ces ondes périodiques la période T leur correspondant.
- Quelle est l'onde que l'on peut qualifier d'onde périodique sinusoïdale ?
- Déterminer sa fréquence f et son amplitude maximale Y_{\max} .

II.2 Double périodicité

Les ondes progressives périodiques présentent une double périodicité : temporelle T et spatiale λ



Périodicité spatiale λ :

Les points **M** et **N** sont distants d'une longueur d'onde, ainsi que les points **N** et **P**.
Tous les points distants d'un multiple entier de λ sont dans le même état vibratoire : ils sont en phase.

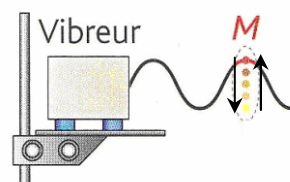
← Figure 7 :

Corde accrochée à un vibreur

↓ Figure 8 : Mouvement d'oscillation

Périodicité temporelle T :

Chaque point de la corde vibre (monte et descend) au passage de l'onde.
Ainsi le point **M** va mettre un certain temps à revenir dans sa position haute.
C'est la période temporelle T .



Durant une durée égale à la période T , l'onde progresse d'une distance égale à sa longueur d'onde λ . Ainsi, toute onde progressive périodique est caractérisée par la relation :

$$\boxed{v = \frac{\lambda}{T}} \quad \text{ou} \quad \boxed{v = \lambda f} \quad \left| \begin{array}{l} \lambda \text{ en } m \\ f \text{ en } Hz \\ T \text{ en } s \\ v \text{ en } m.s^{-1} \end{array} \right.$$

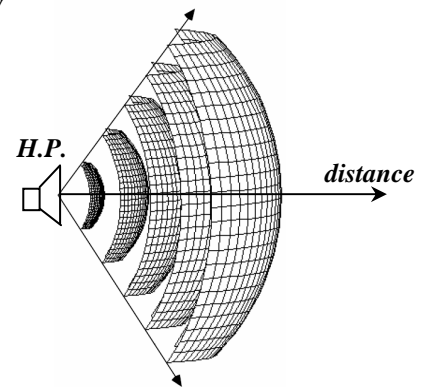
III. Les ondes sonores

III.1 Intensité et niveau sonores

L'intensité sonore I est la puissance P de la vibration sonore reçue par unité de surface S :

$$\boxed{I = \frac{P}{S}} \quad \left| \begin{array}{l} P \text{ en watt } W \\ I \text{ en } W.m^{-2} \\ S \text{ en } m^2 \end{array} \right.$$

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



↑ Figure 9 : dispersion de l'intensité

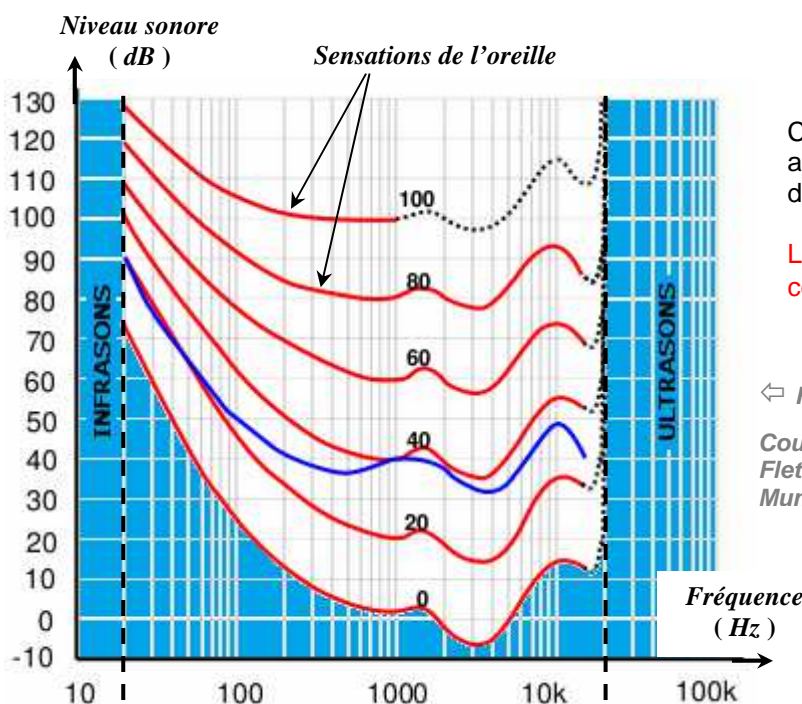
La perception d'un son de fréquence 1000 Hz pour l'oreille humaine est telle que :

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

On détermine alors une échelle permettant d'exprimer la sensation auditive : c'est le **niveau sonore** ou **niveau d'intensité sonore**. Le niveau sonore L exprime donc la sensation perçue par l'oreille.

Pour une intensité sonore I donnée, le niveau sonore L exprimé en décibels acoustiques (dB) est déterminé par la formule :

$$\boxed{L = 10 \times \log \frac{I}{I_0}} \quad \left| \begin{array}{l} L \text{ sans dim (dB)} \\ I \text{ et } I_0 \text{ en } W.m^{-2} \end{array} \right.$$



Ce diagramme indique la sensation auditive de l'oreille humaine en fonction de la fréquence du son.

Les sons audibles ont une fréquence comprise entre 20 et 20 000 Hz environ.

⇐ Figure 10 :

Courbe de Fletcher et Munson

Questions :

- a) Calculer le niveau sonore pour une intensité acoustique I à 1000 Hz égale à I_0 .
- b) Même question pour une intensité acoustique égale au seuil de douleur I_M .
- c) Montrer que si une intensité double ($I_2 = 2 I_1$) alors le niveau sonore augmente de 3 dB ($L_2 \approx 3 + L_1$)
- d) Quelle est la fréquence pour laquelle l'oreille humaine est la plus sensible ?
- e) Quelle est la sensation auditive pour un son de 1000 Hz de niveau sonore 40 dB ?
- f) Quel doit-être le niveau sonore d'un son de fréquence 100 Hz pour qu'il procure la même sensation que le son de 1000 Hz ?

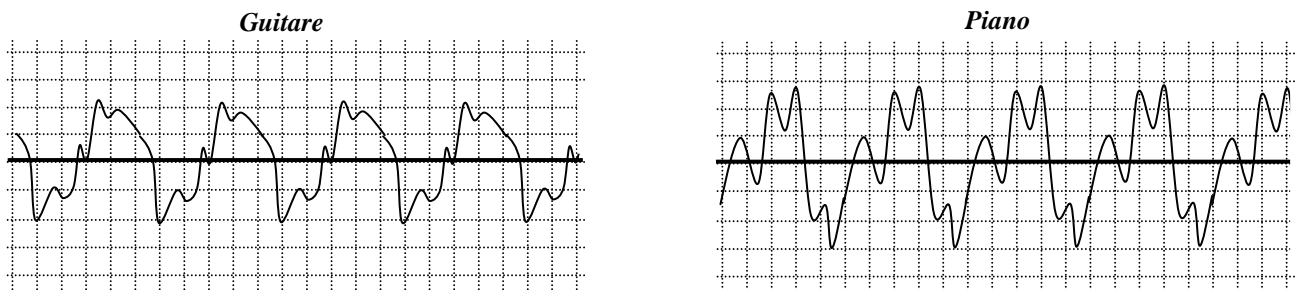
III.2 Timbre et spectre d'un son

La **hauteur d'un son** est la qualité qui distingue un son aigu d'un son grave. Par exemple, la note la_3 (444 Hz) a la même hauteur, qu'elle soit jouée par une flûte ou un piano.

Le **timbre du son** permet de reconnaître l'instrument qui joue la note.

Expérience :

On joue une note avec une guitare et la même note avec un piano. A l'aide d'un dispositif d'acquisition, on observe l'oscillogramme de ces deux notes sur l'écran d'un ordinateur.



↑ Figure 11 : oscillogrammes

1 carreau $\Leftrightarrow 1,0 \text{ ms}$

Observation :

On se rend compte à l'oreille que le son produit par chacun de ces instruments est différent, mais on reconnaît facilement qu'il s'agit de la même note (même hauteur).

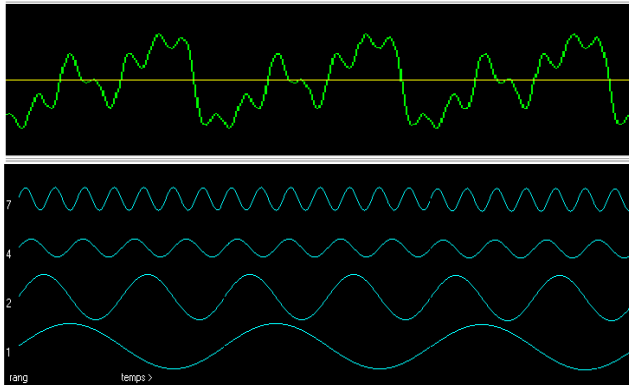
Questions :

- a) Ces vibrations sonores sont-elles périodiques ? Pourquoi ?
- b) Déterminer pour chacune d'elles la période T et en déduire leur fréquence respective.
- c) A quoi est liée la hauteur d'une note ?

L'enregistrement du son émis par un **diapason est une sinusoïde**. Ainsi, ce son est dit **pur**.

Si le son des autres instruments de musique n'est pas pur, il reste forcément périodique et peut donc être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux appelés **harmoniques** dont la **fréquence est un multiple entier de la fréquence du son de départ**.

↓ Figure 12 : décomposition de Fourier



Courbe verte : signal de la note joué par l'instrument. Ce signal est périodique de fréquence f

La **courbe verte** peut alors être obtenue en additionnant les courbes des harmoniques (**courbes bleues**)

← Harmonique de rang 7 : $f_7 = 7f_1$

← Harmonique de rang 4 : $f_4 = 4f_1$

← Harmonique de rang 2 : $f_2 = 2f_1$

← **Fondamental** ou Harmonique de rang 1 : $f_1 = f$

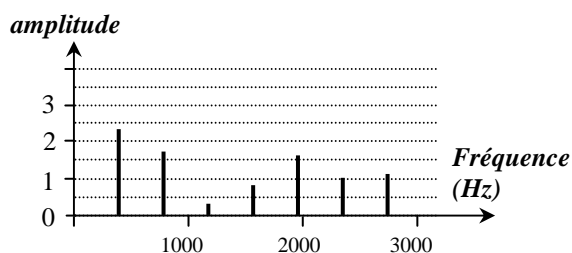
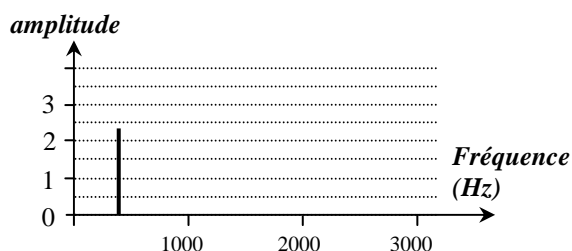
Un son périodique de fréquence f peut être décomposé en une somme de sons purs, appelés harmoniques, de fréquences :

$$f_n = n \times f$$

L'ensemble formé par le fondamental et ses harmoniques constitue le spectre du son.

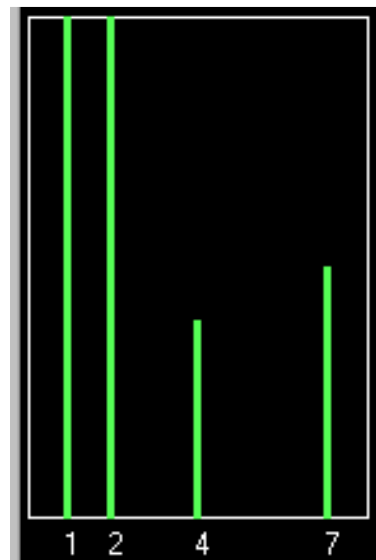
Conclusion :

- La hauteur d'une note est liée à la fréquence du fondamental (harmonique de rang 1)
- Le timbre d'une note est lié à la présence des harmoniques de rang $n > 1$ et à leur amplitude.



↓ Figure 13 : Spectre de la courbe verte

Amplitude



Rang Harmonique

Questions :

- Parmi ces deux spectres, déterminer celui qui correspond à une note jouée par un diapason.
- L'autre spectre correspond à une note jouée par un violon. Ce son a-t-il le même timbre que celui du diapason ? Justifier.
- Ces deux sons ont-ils la même hauteur ? Justifier.