

LES ONDES MECANIQUES

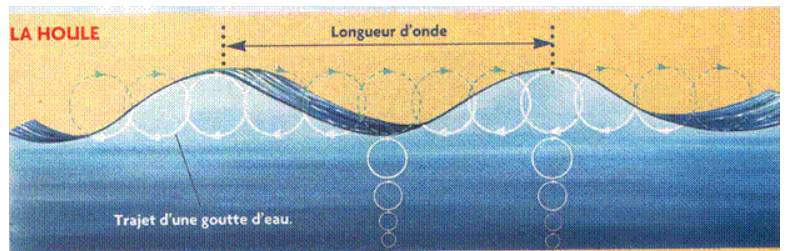
1- Ondes mécaniques

Une onde mécanique est la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel (solide, liquide ou gaz).

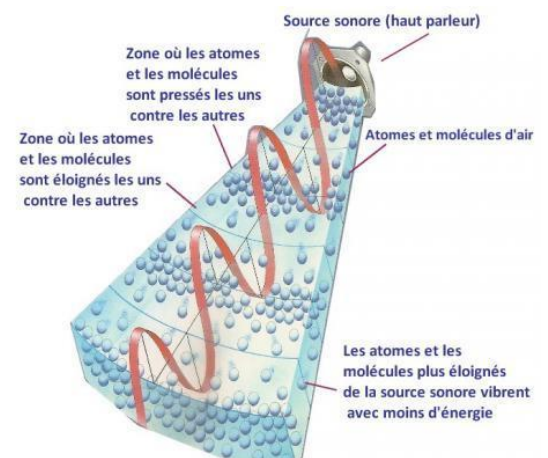
1.1- Modification du milieu matériel

Une onde mécanique modifie localement et temporairement les propriétés mécaniques (vitesse, position, pression,) du milieu matériel.

La houle est une onde résultant de la propagation des vagues hors de leur aire de génération. Comme dans toute onde mécanique, il n'y a pas transport d'eau, mais propagation du mouvement d'oscillation verticale de cette eau.



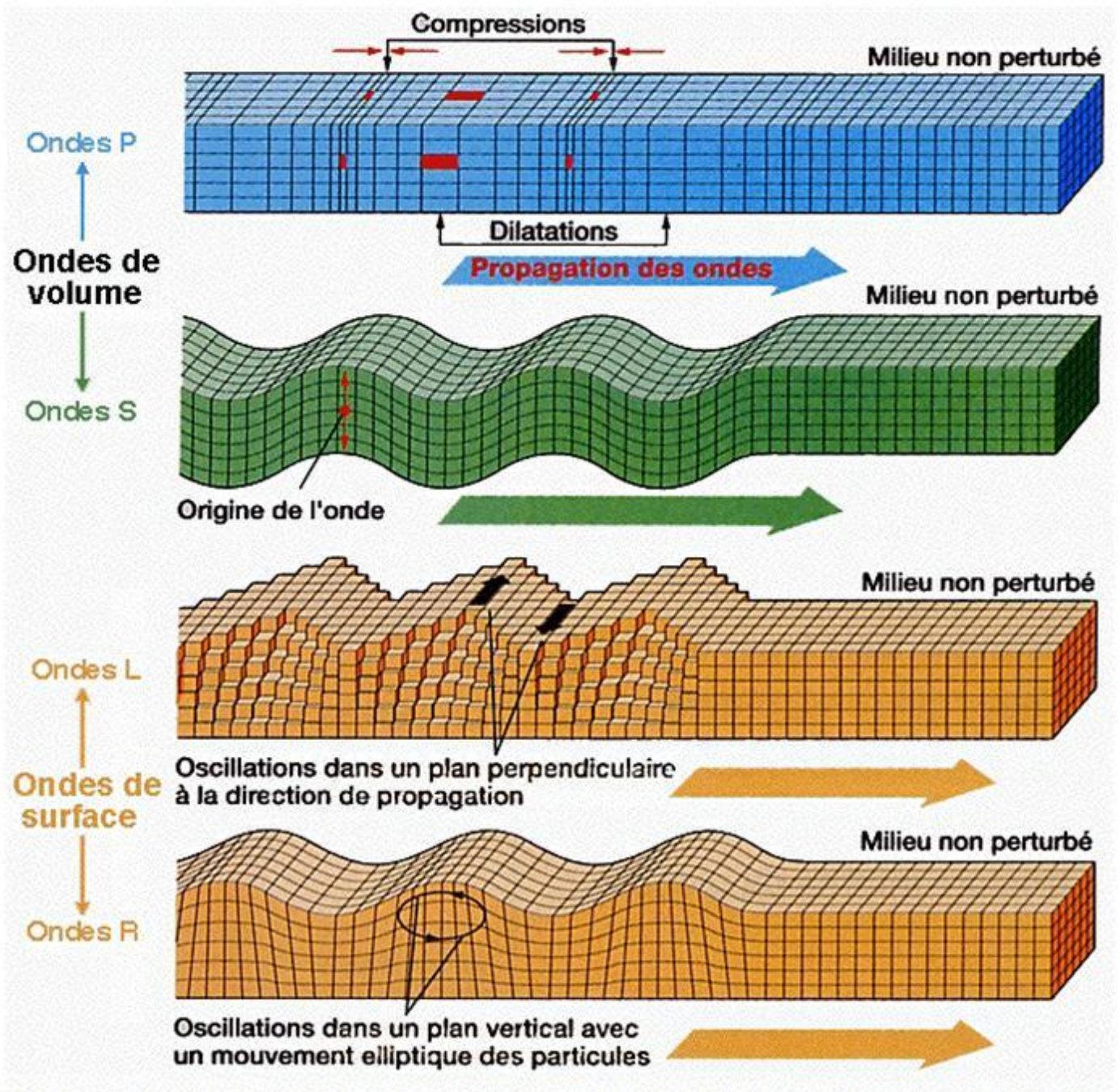
Les ondes sonores se propagent dans les trois dimensions, mais à condition qu'elles soient en présence de matière (solide, liquide ou gaz). Ces ondes sonores font vibrer les molécules présentes dans l'air près de la source sonore, et transmettent leur mouvement à leurs voisines lorsqu'elles se heurtent, qui elles-mêmes transmettent à leur tour le mouvement et ainsi de suite. Cela provoque des zones de compressions et de décompressions.



A l'intérieur de la matière, on distingue deux types d'onde:

- Les ondes de compression-dilatation, ou plus simplement des ondes de compression qui provoquent un déplacement local des éléments du milieu (solide, liquide ou gazeux) dans leur direction de propagation.
- Les ondes de cisaillement, qui se propagent que dans des milieux solides ou en provoquant un déplacement des éléments du milieu perpendiculairement à leur direction de propagation.

Les ondes peuvent être guidées le long de l'interface entre deux milieux. Ces ondes dites ondes de surface, combinent à la fois les caractéristiques des ondes de compression dilatation et des ondes de cisaillement.



Les ondes sonores et les ondes sismiques de type P (Ondes Primaires) sont des ondes de compression.

Les ondes sismiques de type S (Ondes Secondaires) sont des ondes de cisaillement.

La houle et les ondes sismiques de type L (Ondes de Love) ou de type R (onde de Rayleigh) sont des ondes de surface.

1.2- Transfert d'énergie sans transport de matière

Lors de la propagation d'une perturbation, la modification locale et temporelle des propriétés mécaniques du milieu matériel engendre des variations d'énergies cinétique et potentielle du milieu.

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

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

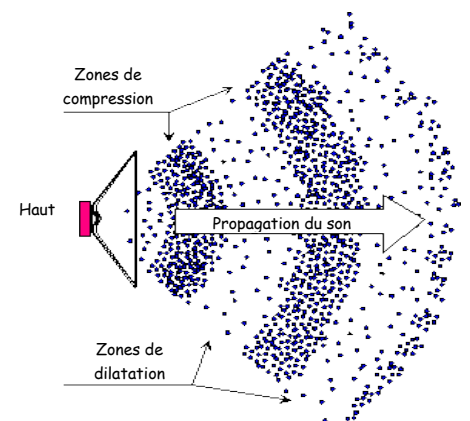
A cause des frottements existant lors du passage de la perturbation dans le milieu matériel, une partie de l'énergie transportée est perdue (elle se transforme en chaleur). On dit qu'il y a amortissement du signal.

2- Emission et détection des ondes

Pour qu'une perturbation prenne naissance dans une région, appelée source, d'un milieu matériel, il est nécessaire qu'il y ait un apport d'énergie. L'émetteur apporte l'énergie nécessaire à la création de cette perturbation.

La membrane d'un haut-parleur comprime et dilate la couche d'air avec laquelle elle est en contact pour créer une onde sonore.

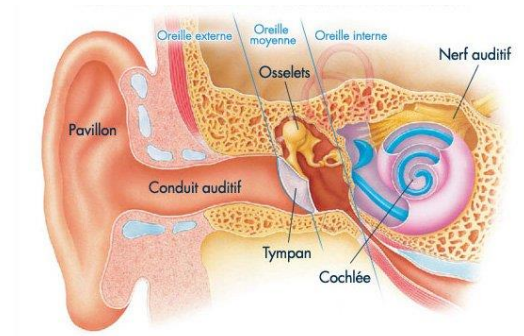
Les molécules de gaz proches de la membrane sont projetées par celle-ci. Ces molécules s'entrechoquent avec les molécules voisines. La zone de pression se déplace. Après le "choc" les molécules reprennent leur position initiale.



La détection d'une onde mécanique met en œuvre un capteur qui transforme une des grandeurs physiques du milieu modifiée par le passage de la perturbation en une grandeur facile à exploiter.

L'énergie mécanique transportée par l'onde est le plus souvent transformée en énergie électrique.

Dans notre oreille, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est réalisée grâce aux cellules ciliées de la cochlée.



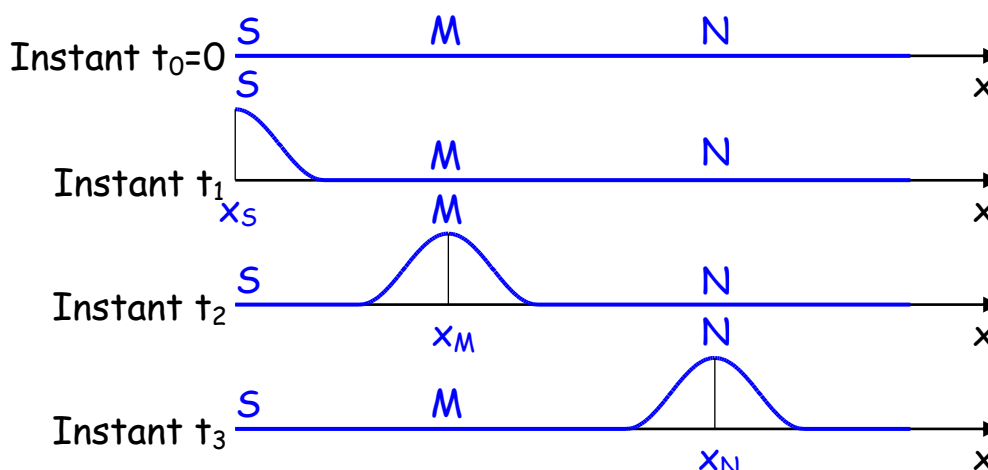
3- Exemples d'ondes mécaniques

3.1- 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.



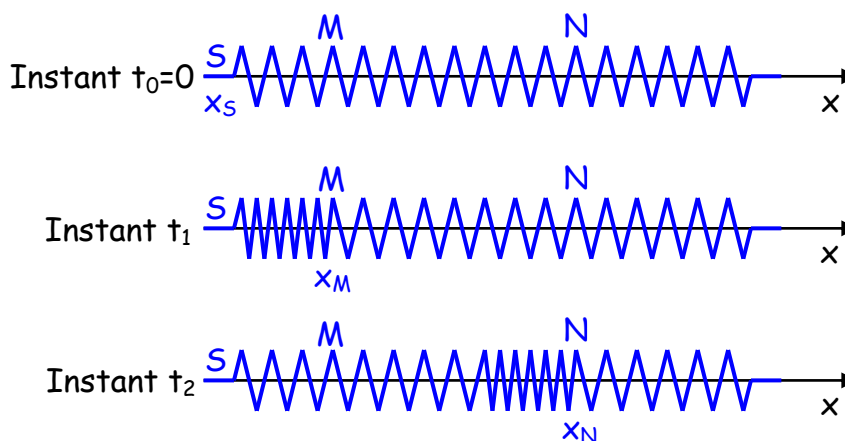
Une onde transversale provoque une perturbation dont la direction est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

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:

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

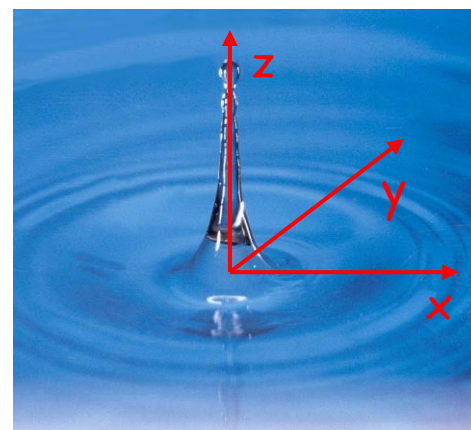
Une onde longitudinale provoque une perturbation dont la direction est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

3.2- 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.

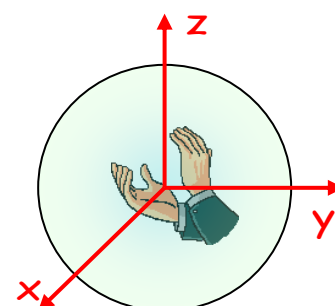


L'onde est transversale.

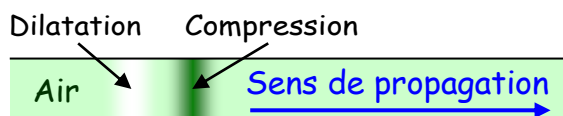
3.3- Onde mécanique à trois dimensions

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.

4- Célérité d'une onde

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

Si d est la distance parcourue par l'onde et Δt 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.

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

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

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

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

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

Remarques:

- Une onde lumineuse n'est pas une onde mécanique. Elle peut se propager dans le vide. Dans le vide et dans l'air toutes les radiations lumineuses se propagent avec la même vitesse $c=3.10^8\text{m.s}^{-1}$.
- Dans un milieu transparent la vitesse de propagation dépend de la fréquence de la radiation (chaque "couleur" est caractérisée par sa fréquence). Pour les ondes lumineuses un milieu transparent est dispersif.

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

- Une onde mécanique ne se propage pas dans le vide.
- Un solide se déplace plus facilement dans le vide que dans un gaz et plus facilement dans un gaz que dans un liquide.
- 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 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 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.
- 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.

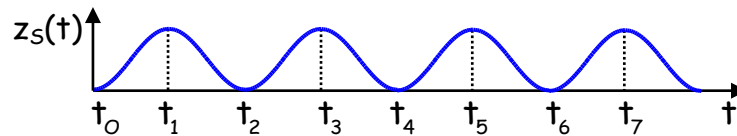
5- Onde progressive à une dimension

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.

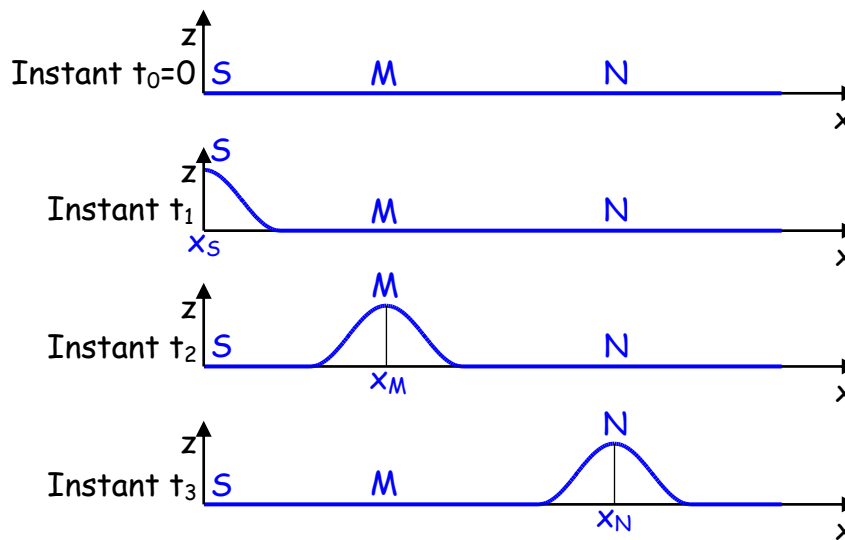
C'est par exemple le cas d'une onde transversale se propageant sur une corde ou d'une onde longitudinale se propageant sur un ressort.

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 .



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.

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:

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

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

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.

7- Ondes mécaniques progressives périodiques

7.1- 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.

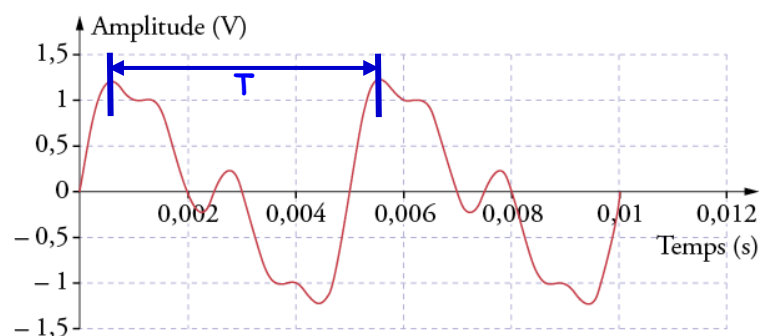
Si, au lieu de laisser tomber une goutte d'eau, on frappe régulièrement la surface de l'eau avec une pointe, alors on provoque une onde progressive périodique transversale.

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.

L'onde sonore reçue par un capteur (microphone) est convertie en une information électrique visualisée sur l'oscillogramme. Cette information a les mêmes caractéristiques que l'onde dont elle est issue.

Sur l'exemple ci-contre, elle se reproduit à intervalles de temps égaux.



Une onde progressive est périodique lorsque la perturbation se reproduit identique à elle-même à intervalles de temps égaux, appelés période temporelle T .

La fréquence f de l'onde est le nombre de répétitions de la perturbation par seconde. Fréquence et période sont liées par la relation:

$$f = \frac{1}{T} \quad \left| \begin{array}{l} f: \text{Fréquence en Hertz (Hz)} \\ T: \text{Période temporelle en seconde (s)} \end{array} \right.$$

7.2- Onde progressive sinusoïdale

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 , correspondant à la source, suivant l'axe vertical Oy , s'écrit:

$$y_s(t) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi\right) \quad \left| \begin{array}{l} Y_s(t): \text{Mouvement de la source } S \text{ (m, V, etc.)} \\ Y_m: \text{Amplitude du mouvement (m, V, etc.)} \\ T: \text{Période temporelle de l'onde (s)} \\ \varphi: \text{Déphasage de l'onde (rad)} \end{array} \right.$$

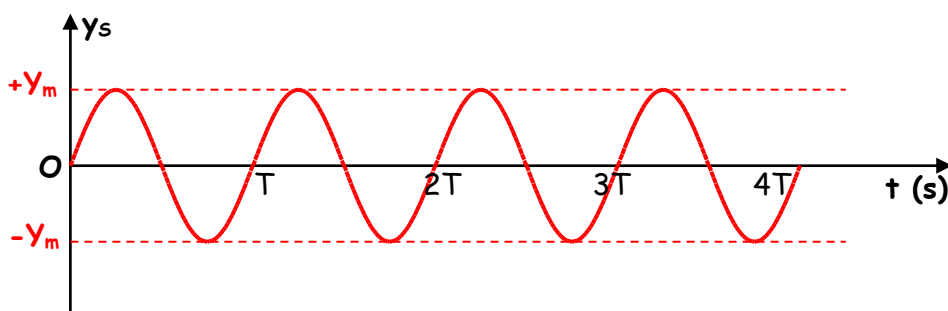
T est la période temporelle dont l'unité est la seconde (s). C'est la plus petite durée au bout de laquelle la perturbation se reproduit identique à elle-même.

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

où n est un entier.

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

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



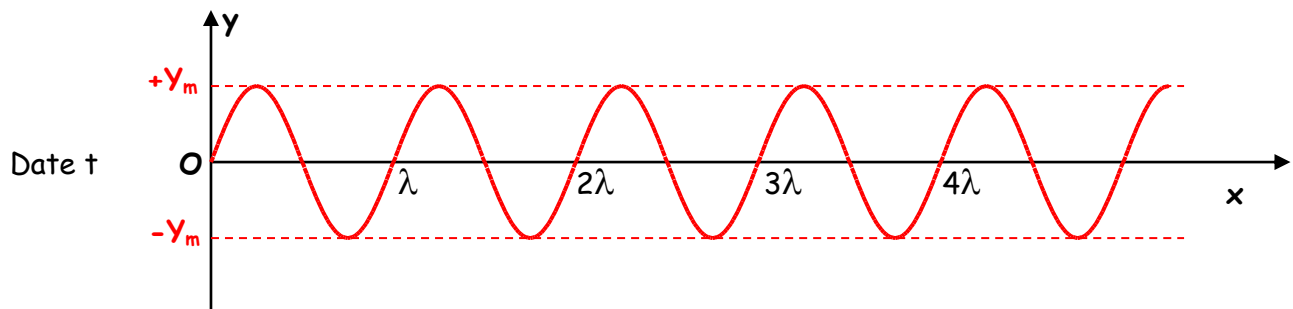
Sur ce graphe temporel (pour la source S) apparaît nettement la périodicité temporelle T de l'onde se propageant sur la corde.

L'équation du mouvement de la corde à un instant t s'écrit:

$$Y(x) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x + \varphi\right) \left| \begin{array}{l} Y_s(t): \text{Mouvement de la source } S \text{ (m)} \\ Y_m: \text{Amplitude du mouvement (m)} \\ \lambda: \text{Période spatiale de l'onde (m)} \\ \varphi: \text{Déphasage de l'onde (rad)} \end{array} \right.$$

λ est la période spatiale, appelée longueur d'onde, dont l'unité est le mètre (m).

Si on photographie la corde à un instant t , on obtient le graphique suivant.



Sur ce graphe des espaces (à la date t) apparaît nettement la périodicité spatiale λ de l'onde se propageant sur la corde.

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

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

$$Y(x) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x + \varphi\right)$$

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