La physique des ondes

I

Des vagues à la surface de l'eau, une corde de guitare qui vibre, le son d'une flûte ; voilà quelques exemples concrets de ce que les physiciens résument parfois en un seul mot : "onde".

Il s'agit là d'une démarche courante en physique : observer et essayer de dégager les points communs de phénomènes a priori fort différents. Au fil du temps, les observations s'affinent, se formalisent et s'unifient sous un même vocable tout en prenant une forme mathématique et rigoureuse.

Aujourd'hui, sous sa forme la plus pointue, les physiciens appellent "onde" "tout objet" qui vérifie une condition mathématique précise : l'équation d'onde. Autour de ces "objets", s'articule un ensemble cohérent de propriétés et de relations : une théorie des ondes. L'intérêt de cette démarche est que tout phénomène qui sous un angle ou un autre obéit à cette définition d'onde peut être décrit à l'aide de cette même théorie et profiter par conséquent des connaissances (motivées parfois par des domaines de recherche fort différents – mathématique, physique…) déjà acquises concernant celles-ci.

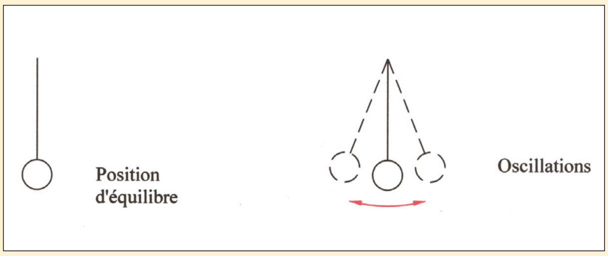
Ceci étant dit, il n'est absolument pas nécessaire de connaître les mathématiques dans ses moindres détails pour avoir une bonne compréhension des ondes. Les quelques lignes qui suivent donnent un aperçu de leurs propriétés les plus importantes. Ces propriétés seront décrites à partir d'exemples concrets : dans un premier temps, et en guise d'introduction, à l'aide du pendule et par la suite, plus en détails avec l'expérience de la corde vibrante (propagation d'une perturbation le long d'une corde tendue) ainsi que l'expérience de la cuve à ondes (propagation d'une perturbation à la surface d'un liquide). On utilisera alors indifféremment l'un, l'autre ou les deux, de manière à mettre au mieux en évidence les différents aspects de ces propriétés.

1. Le pendule

Un pendule célèbre : dans les aventures de Tintin, celui du Professeur Tryphon Tournesol.

Des pendules de la vie courante : un lustre, une balançoire.
Ces pendules sont constitués d'une masse suspendue pouvant osciller.

Ce sont des corps en équilibre stable, placés dans une position voisine de leur position d'équilibre.



On appelle :

Oscillation : le mouvement de va-et-vient de part et d'autre d'une position d'équilibre.

Élongation : la distance de l'objet par rapport à sa position d'équilibre [m]. On la note Y.

Amplitude : la valeur maximale de l'élongation [m]. On la note A.

Période : la durée d'une oscillation complète [s]. On la note T.

Fréquence : le nombre d'oscillations par seconde [*Hz*]. On la note f.

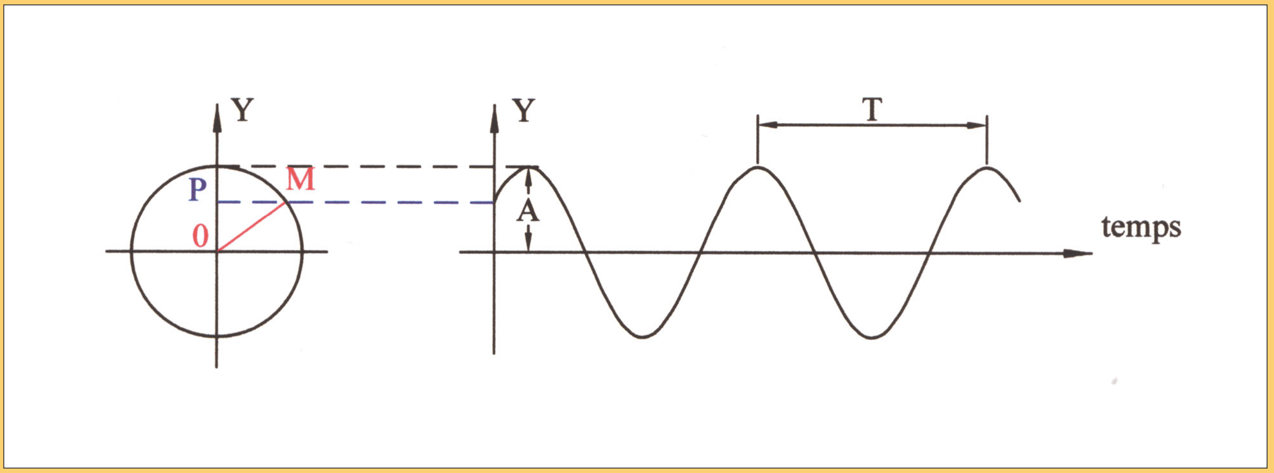
La physique des ondes

II

Parenthèse mathématique :
le Mouvement Circulaire Uniforme (MCU).

Un point M effectue un MCU de rayon A autour de O avec une période T.

On considère le point P, projection orthogonale de M sur l'axe Y : P effectue un mouvement vibratoire sur l'axe Y de même période T et d'amplitude A.



Fréquence angulaire : angle balayé par le segment OM par unité de temps [radians/s]. On la note ω (certains auteurs parlent de vitesse angulaire ou de pulsation).

Constante de phase : angle formé entre le segment OM et l'axe horizontal à l'instant initial [radians]. On la note φ.

1.1. Mouvement harmonique

Un pendule particulier, une bouteille de sable percée d'un trou, oscille au-dessus d'une feuille de papier placée horizontalement.

On écarte le pendule de sa position d'équilibre selon une direction perpendiculaire à celle du déplacement de la feuille et on le lâche.

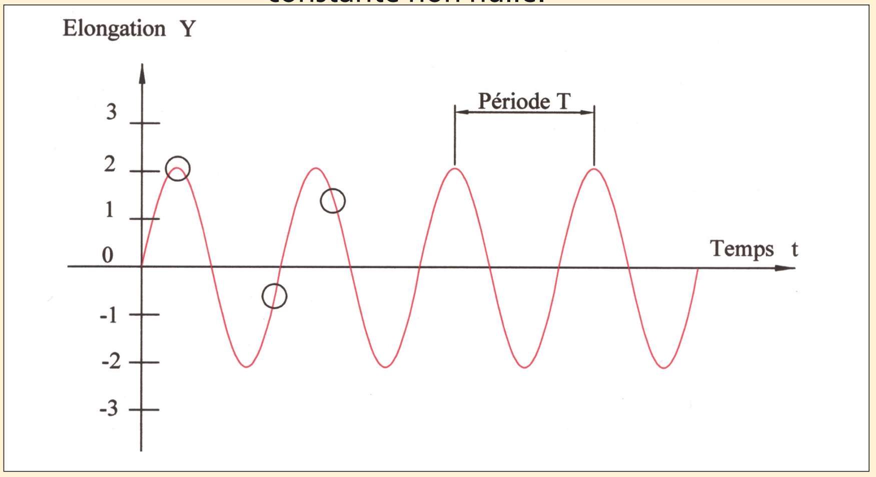
On tire sur la feuille de papier avec une vitesse constante non nulle.

Le cercle noir représente l'embout de la bouteille déposant le sable. Ce cercle a été dessiné pour différents instants.

On constate que le graphe de l'élongation en fonction du temps est une sinusoïde dont l'équation est la suivante :

$Y = A \sin(\omega t) + \varphi$

C'est la caractéristique d'un mouvement harmonique.



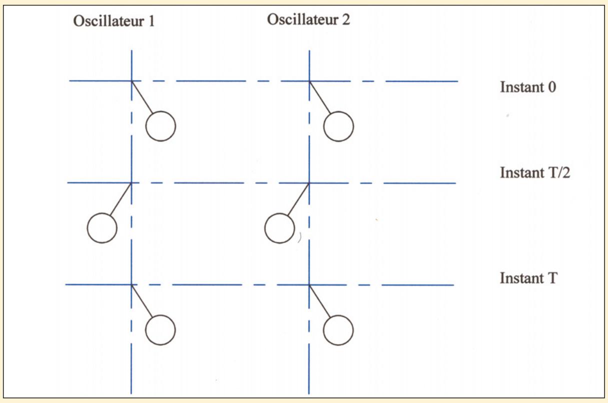
La physique des ondes

III

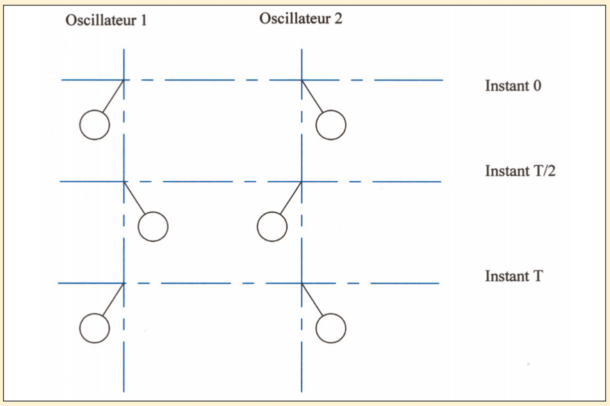
1.2. Déphasage

Considérons 2 oscillateurs de même période T.

Concordance de phase : les 2 oscillateurs ont aux mêmes instants des élongations maximales, minimales ou nulles.



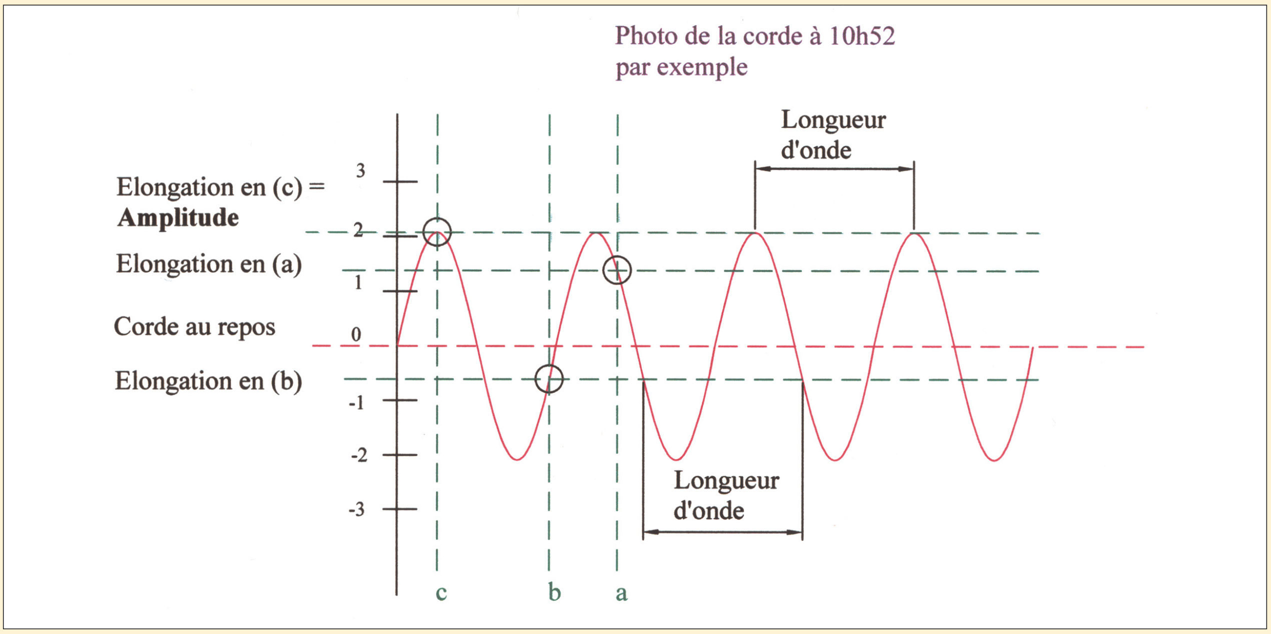
Opposition de phase : les 2 oscillateurs ont aux mêmes instants des élongations de signe opposé.



2. *Propriétés générales des ondes*

Avant de poursuivre, il convient ici de faire le point sur le vocabulaire utilisé: certaines notions déjà présentées pour le pendule nécessitent en effet quelques précisions et affinements.

Expérience de la corde vibrante :



La physique des ondes

IV

L'élongation [unité : mètre (dépend du phénomène étudié) – symbole : Y] :

comme pour le pendule, c'est une mesure de l'écartement de l'onde par rapport à la position de repos. Cependant, puisque le phénomène est ici étendu dans l'espace, cette mesure doit se faire en un lieu donné (ici a, b ou c).

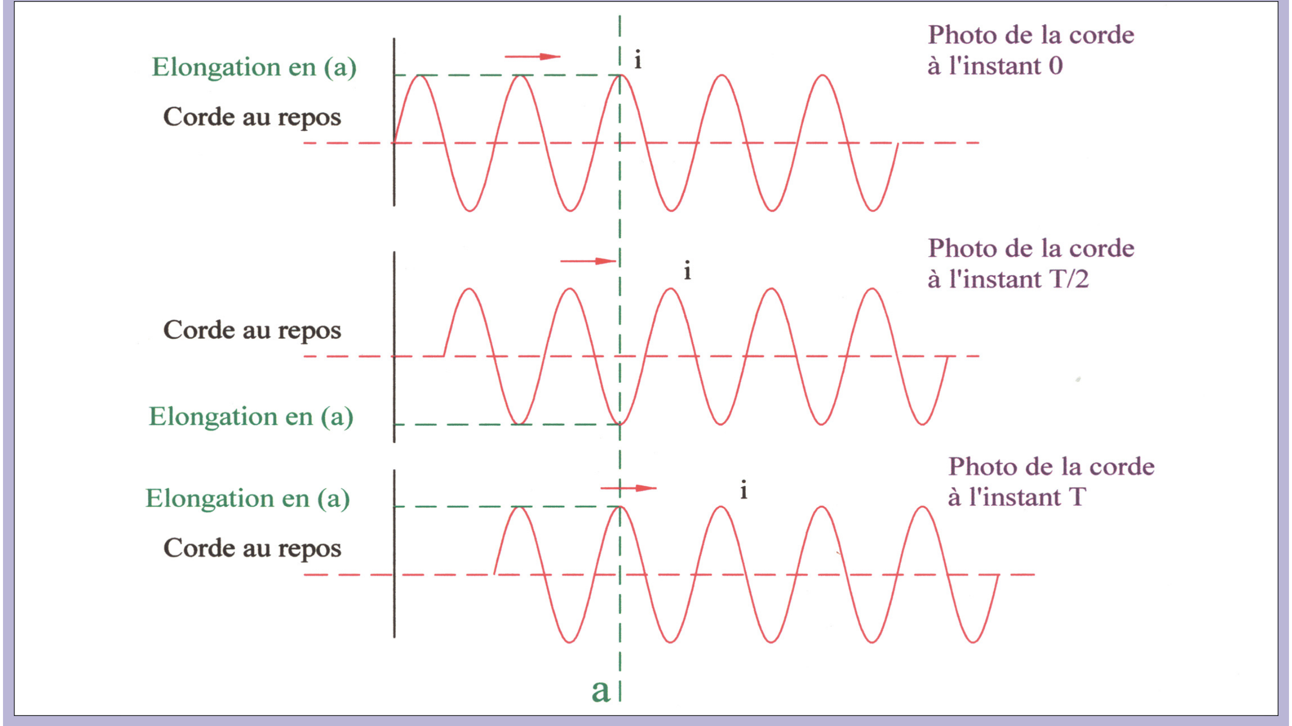
L'amplitude [unité : mètre (dépend du phénomène étudié) – symbole : A] :

la définition reste ici totalement identique à celle du pendule : l'amplitude est une mesure de l'élongation maximale de l'onde.

Dans le cas d'une onde périodique (qui a un caractère répétitif) comme c'est le cas ici (et comme ça l'était pour le pendule), on peut en plus définir :

La longueur d'onde [unité : mètre – symbole : λ] :

cette notion n'avait pas lieu d'être dans le cas du pendule : c'est une mesure de la distance minimale qui sépare 2 régions de l'espace dans le même état vibratoire.



La période [unité : seconde – symbole : T] :

cette notion avait déjà été définie pour le pendule. De nouveau, le phénomène ayant ici une extension spatiale, il faut se positionner en un lieu donné, ici (a). La période est alors le temps requis pour que cette région de l'espace (a) retrouve un même état vibratoire : c'est par exemple le temps qui s'écoule entre deux crêtes successives en (a).

La fréquence [unité : hertz – symbole : f] :

idem que pour le pendule, mais encore une fois, on ne s'intéresse qu'à une région donnée de l'espace : la fréquence est le nombre de fois où une région de l'espace se retrouve dans un même état vibratoire par unité de temps : c'est le nombre d'oscillations par seconde en un lieu donné.

La physique des ondes

V

Remarque :

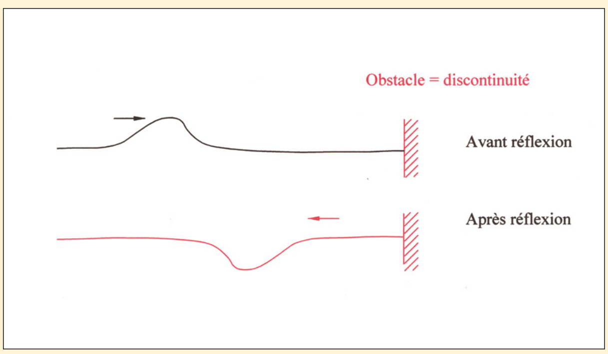
Il existe des liens mathématiques entre les différentes notions présentées ci-dessus. En voici les principaux :

- $f = 1/T$
- $v = \lambda f$ $\Rightarrow$ $v = \lambda/T$ où v est la vitesse de propagation de l'onde

2.1. La réflexion

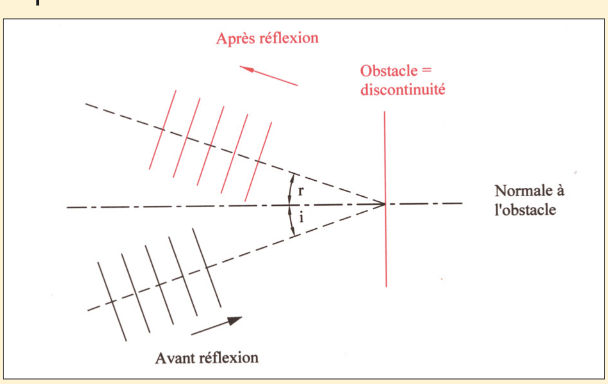
Ce phénomène se produit lorsque l'onde rencontre une discontinuité dans le milieu de propagation.

Expérience de la corde vibrante :



L' expérience de la corde vibrante permet de révéler le **retournement** de l'onde après réflexion sur un obstacle.

Expérience de la cuve à ondes :

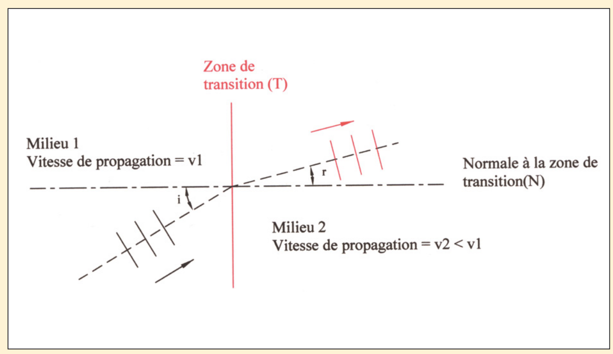


L'expérience de la cuve à ondes, permet de constater que l'angle de l'onde incidente **(i)** est **égal** à l'angle de l'onde réfléchie **(r)** après réflexion sur un obstacle (loi de la réflexion : **i = r**).

2.2. La réfraction

Il s'agit d'un changement de la direction de propagation de l'onde, qui se produit lorsque celle-ci subit une variation de vitesse.

Expérience de la cuve à ondes :



Lorsque l'onde passe du "milieu 1" caractérisé par une vitesse de propagation (v1) vers le "milieu 2" caractérisé par une vitesse de propagation **(v2) inférieure à (v1)**, elle est déviée vers la normale (N) : l'angle réfracté **(r) est inférieur à** l'angle d'incidence **(i)**. Le "milieu 2" est dit plus réfringent que le "milieu 1".

Remarques :

- Les milieux 1 et 2 peuvent par exemple se matérialiser par une différence de profondeur.
- Le schéma reste valable si l'onde se déplace en sens inverse (changez juste le sens des flèches).
- La valeur des angles est donnée par la loi de Sneel - Descartes : $\sin(i)/\sin(r) = v1/v2$

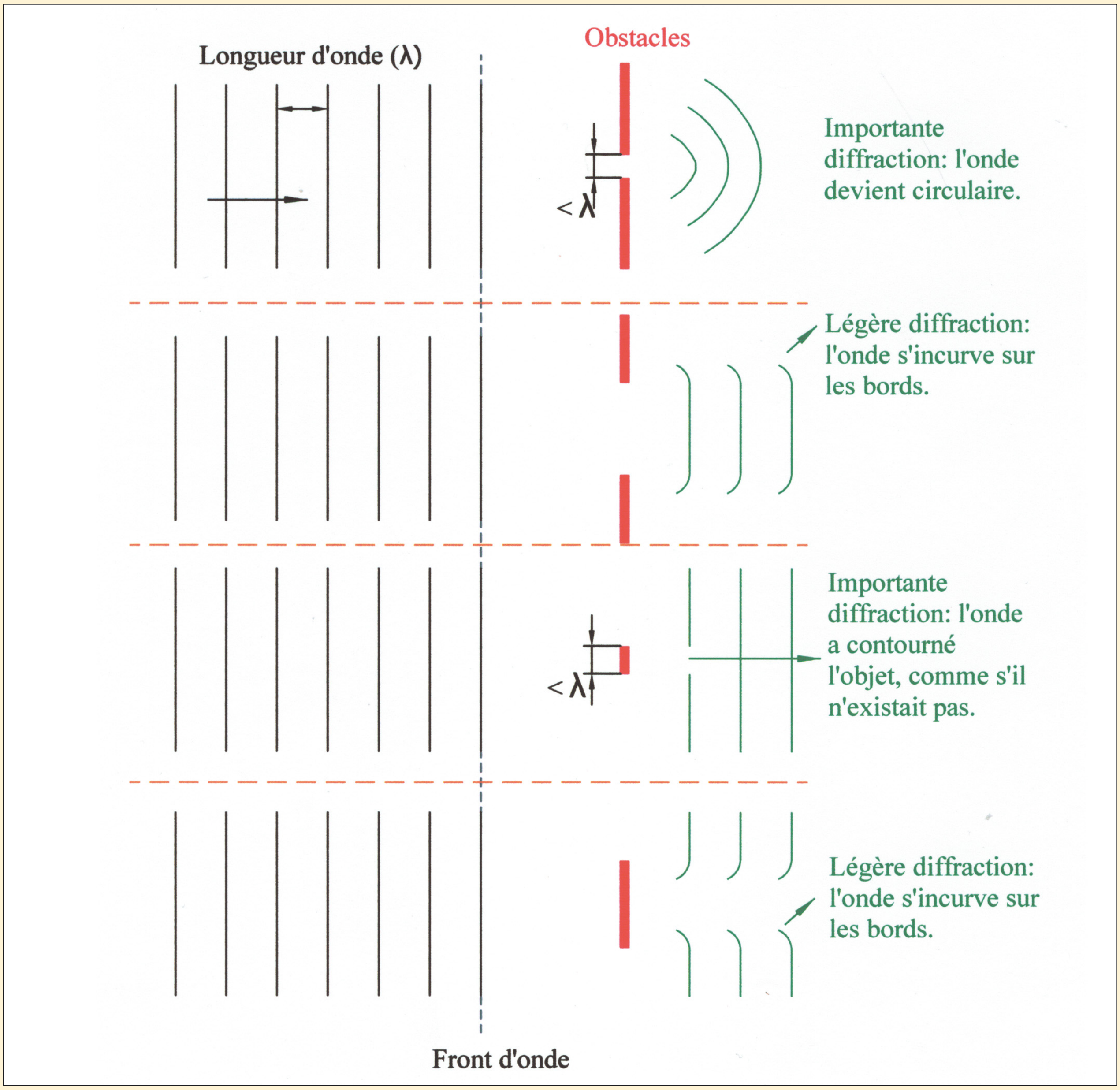
La physique des ondes

VI

2.3. La diffraction

Il s'agit d'un changement de "forme" de l'onde qui peut se produire lorsque celle-ci rencontre un obstacle. Le phénomène est d'autant plus marqué que la taille de cet obstacle est petite relativement à la longueur d'onde.

Expérience de la cuve à ondes :

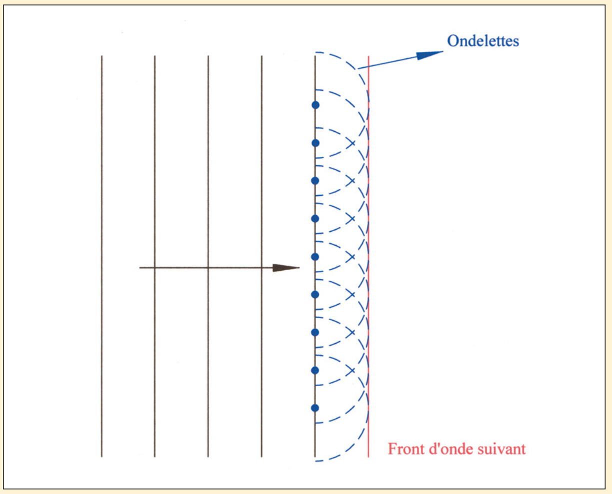


La physique des ondes VII

On a recours au principe d'Huygens pour expliquer ce phénomène. En voici l'énoncé :

"Tout point d'un front d'onde peut être considéré comme la source (ponctuelle) d'ondelettes minuscules qui se propagent vers l'avant à la même vitesse que l'onde ; le front d'onde suivant est l'enveloppe de toutes les ondelettes (c'est-à-dire la tangente à toutes ces ondelettes)."

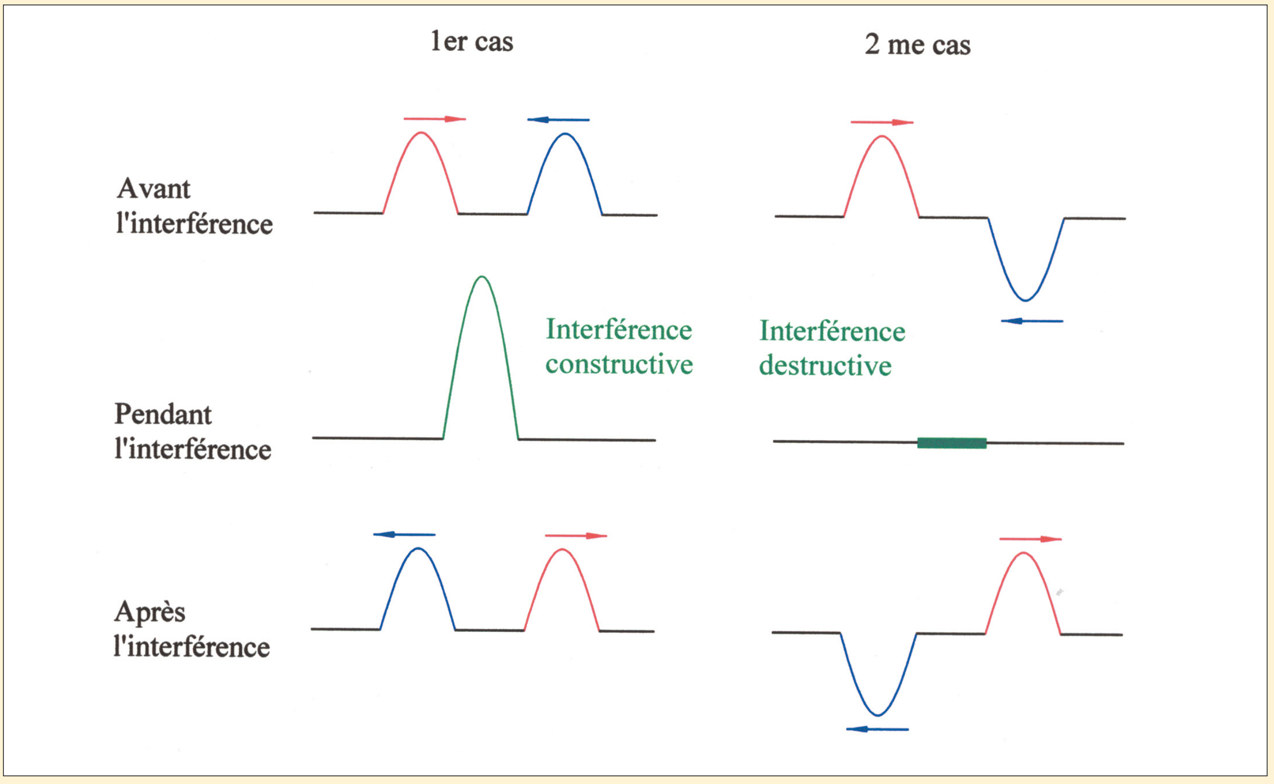
Comme une source ponctuelle émet des ondes circulaires (ou sphériques), on comprend mieux ainsi les recourbements qui se produisent et ce, même pour des ondes planes à l'origine.



2.4. Les interférences

Elles se produisent en tout point qui est le lieu de rencontre de plusieurs ondes.

Expérience de la corde vibrante :



La physique des ondes

VIII

Dans le premier cas, les 2 ondes (qui sont ici des impulsions de même forme) sont en **concordance de phase** au moment du croisement : elles se renforcent mutuellement – ce sont des **interférences constructives**.

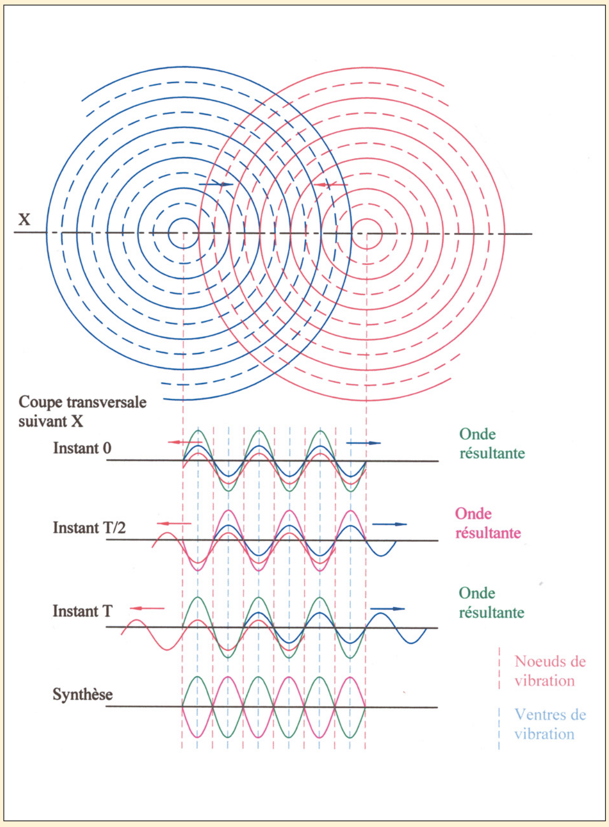
Dans le deuxième cas, les ondes sont en **opposition de phase** au moment du croisement : elles s'annihilent mutuellement – ce sont des **interférences destructives**.

Dans tous les cas, les 2 ondes ne sont pas modifiées par ce processus comme le montrent les schémas du bas. L'onde résultante s'obtient simplement en faisant la "somme" des 2 ondes : **c'est le principe de superposition**.

2.5. Les ondes stationnaires

Elles se produisent par exemple lorsque 2 ondes périodiques/sinusoïdales de même fréquence, même amplitude et se propageant dans des directions opposées se rencontrent en une région de l'espace. Il se crée alors des interférences dont le résultat est une onde qui semble ne plus se propager (ce qui lui vaut le qualificatif de stationnaire).

Expérience de la cuve à ondes :



On constate que certaines zones de l'espace ont une élongation nulle en permanence : on les nomme **nœuds de vibration**. Elles forment à la surface du liquide des lignes hyperboliques que l'on appelle **lignes nodales**. À l'inverse, certaines zones de l'espace passent périodiquement par des maxima d'élongation : on les nomme **ventres de vibration**. A la surface du liquide, ils forment des lignes hyperboliques que l'on appelle **lignes ventrales**.

La physique des ondes

2.6. Les ondes stationnaires résonantes

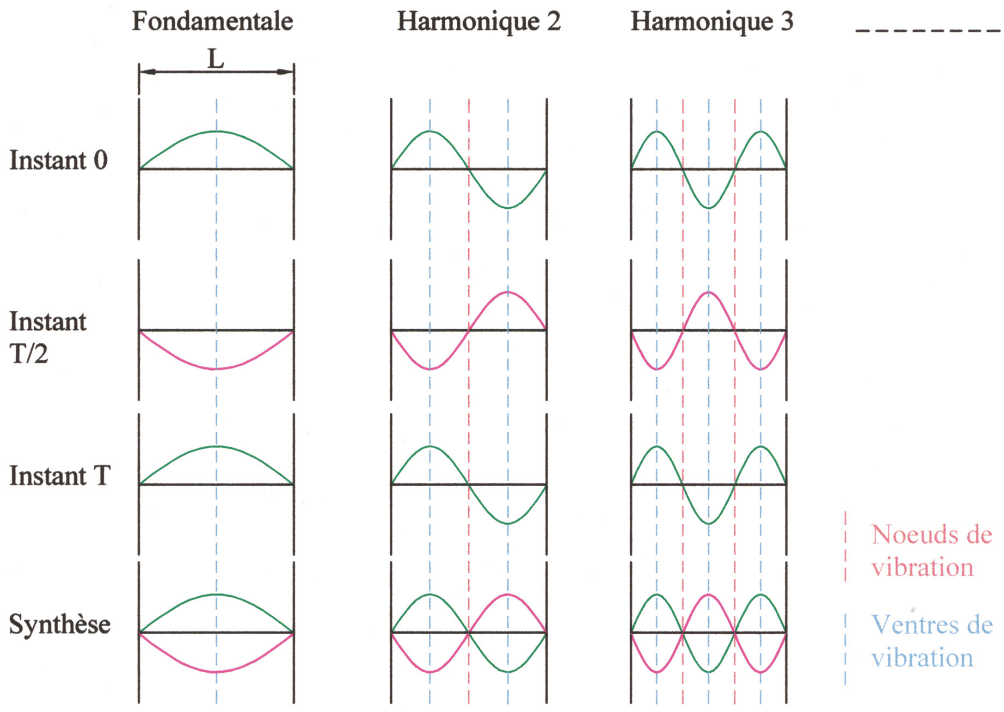
Elles peuvent se produire lorsqu'une onde périodique est "enfermée" dans une région de l'espace. Dans ce cas, celle-ci se réfléchit sur les "parois" disposées de part et d'autre.
Il se crée alors des interférences entre les multiples réflexions, qui donnent lieu la plupart du temps à une onde tout à fait quelconque. Dans certaines conditions néanmoins (fréquence, longueur du système…), ces interférences donnent lieu à des ondes stationnaires: on dit alors qu'il y a **résonance du système.**

Pour un système donné, il existe plusieurs **fréquences de résonance** possibles. Ces fréquences (f_n) sont appelées fondamentale, harmonique 2, harmonique 3… et sont données par :

$$f_n = \frac{nv}{2L}$$

n valant respectivement 1,2,3…
v est la vitesse de propagation de l'onde
L est la longueur entre les 2 extrémités fixes du système.

Expérience de la corde vibrante :



Remarque :

Les ondes dont la fréquence n'obéit pas aux conditions de résonance (mentionnées ci-dessus) ne subsistent pas longtemps au sein d'un tel système. Si l'on soumet celui-ci à un cocktail d'ondes quelconques, il sélectionnera naturellement les fréquences de résonance. Ce principe est mis en oeuvre dans la majorité des instruments de musique ; c'est comme ça qu'une corde de guitare par exemple émet un son harmonieux plutôt qu'un bruit quelconque.

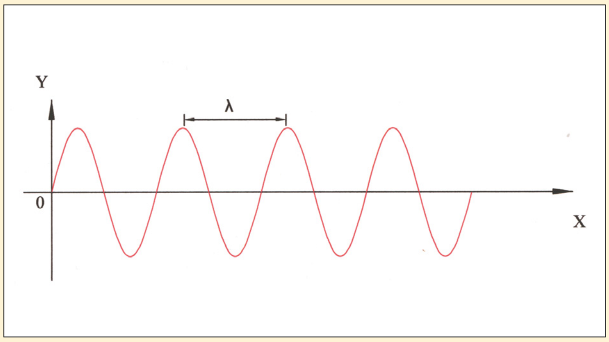
La physique des ondes

X

2.7. Aspects mathématiques

Les ondes “simples” telles que celles qui sont illustrées dans les chapitres précédents peuvent s’exprimer simplement sous forme mathématique.

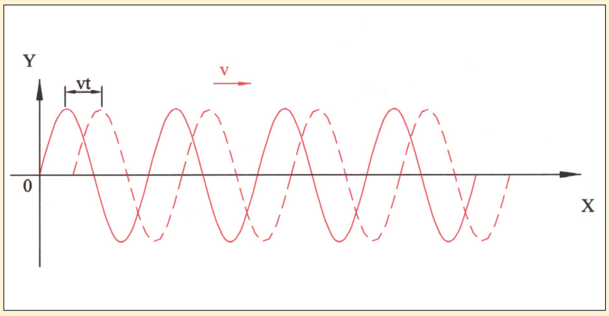
Considérons le graphe suivant :



Ce graphe est par exemple la représentation mathématique de la corde vibrante à un instant donné. L’espace est représenté en abscisse par la lettre x, tandis que l’élongation est représentée en ordonnée par la lettre Y. En reprenant les conventions symboliques mentionnées au début du chapitre, chaque point de la courbe vérifie l’expression :

$$Y = A \sin((2\pi/\lambda)(x)) \qquad (1)$$

Cependant, l’objet réel que l’on cherche à décrire (l’onde) est un objet en mouvement. Par conséquent, au cours du temps, sa position dans l’espace est en perpétuel changement. Il est donc important, si l’on veut le décrire correctement, de faire apparaître le temps (que l’on symbolisera par t) dans son expression mathématique.



La courbe en trait plein représente l’onde à l’instant 0. La courbe en pointillé représente l’onde à l’instant t : elle s’est déplacée vers l’avant d’une distance vt (v désigne sa vitesse).

L’équation (1) n’est valable que pour la courbe en trait plein. Cependant, il est possible de faire correspondre la courbe en pointillé à la courbe en trait plein : il suffit pour cela de lui faire subir un glissement vers l’arrière d’une distance vt, c.-à-d. soustraire à l’ensemble des abscisses des points qui la composent la valeur vt. L’équation dépendante du temps sera donc :

$$Y = A \sin((2\pi/\lambda)(x - vt)) \qquad (2)$$

Comme $v = \lambda/T$, on peut l’écrire :

$$Y = A \sin(2\pi x/\lambda - 2\pi t/T) \qquad (3)$$

Et puisque $\omega = 2\pi/T$:

$$Y = A \sin(2\pi x/\lambda - \omega t) \qquad (4)$$

Enfin, si on pose $k = 2\pi/\lambda$:

$$Y = A \sin(kx - \omega t) \qquad (5)$$

Cette dernière forme est la plus commune. On appelle “nombre d’onde” le paramètre k.

Retour