

# Physique 4 : Ondes mécaniques (Physique 3 sauté.)

Dans ce chapitre nous étudions les ondes mécaniques. La section 1 présente un phénomène très général en physique : les ondes, et en particulier les ondes mécaniques. Ensuite on s'intéresse à deux grandes familles d'ondes mécaniques : les ondes progressives, qui transportent de l'énergie sans transport de matière, dans la section 2 et les ondes périodiques dans la section 3.

Ce chapitre est très fourni en exemples : s'il vous semble long, référez-vous aux savoirs exigibles en dernière page pour faire le tri. Gardez en tête que les exemples sont utiles pour comprendre les définitions et vous aider à les assimiler.

## 1 Introduction : Les ondes - cas général

### 1.1 Présentation du phénomène

#### Définition 4.1: Onde

Une onde correspond à la propagation d'une perturbation dans un milieu. Elle s'accompagne d'une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu (Pression, Température, déformation etc...).

EXEMPLES :

- La lumière est une perturbation électro-magnétique.
- Les ondes gravitationnelles, prédites en 1916, mais seulement détectées en 2016<sup>1</sup> sont des ondes.
- Les ondes sonores sont des ondes de déformation compressive d'un milieu par rapport à un état de repos. (voir fig 1.2)

Un peu de vocabulaire, utile pour tout le chapitre :

- **PROPAGATION** Déplacement dans l'espace, qui s'effectue de proche en proche.
- **PERTURBATION** Faible modification d'un état de référence. L'état de référence peut être un état de repos (La houle sur l'océan au repos), ou un état stationnaire (Mascaret sur un cours d'eau en mouvement).
- **MILIEU** Zone de l'espace qui peut être remplie de matière ou vide.
- **VARIATION RÉVERSIBLE** Variation qui se résorbe spontanément : avant le passage de l'onde et après son passage, le milieu se trouve dans son état de référence, qui est inchangé.
- **PROPRIÉTÉS PHYSIQUES LOCALES** Propriétés physiques qui dépendent de la position, telles que la pression, la température, la déformation par rapport à un état de référence etc...
- **ÉTAT DE REPOS** État qui n'évolue pas dans le temps, qui n'est pas siège de courants
- **ÉTAT STATIONNAIRE** État qui n'évolue pas dans le temps, toutefois il peut y avoir des courants. L'écoulement d'un fleuve est un état stationnaire : le courant est constant, il n'évolue pas dans le temps).

1. Cette détection est à l'origine d'un prix Nobel de physique, décerné à Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.

## 1.2 Les ondes mécaniques

### Définition 4.2: Onde mécanique

Une onde mécanique correspond à la propagation d'une perturbation réversible dans un milieu matériel (i.e. constitué de matière) par rapport à un état de référence (de repos ou stationnaire.).

EXEMPLES :

- La lumière n'est pas une onde mécanique parce qu'il s'agit d'une perturbation électromagnétique. Elle n'a pas besoin de milieu matériel pour se propager puisqu'elle se propage dans le vide de l'espace, contrairement à la croyance répandue au *XIX*<sup>e</sup> siècle en l'existence d'un éther lumineux, milieu support de la propagation de la lumière.
- Le son a besoin d'un milieu matériel pour se propager, voir l'expérience de la [cloche à vide](#). Voir fig. 1.2.
- On peut perturber un solide au repos de deux façons : parallèlement à la direction de propagation de l'onde, et perpendiculairement (voir fig. 1.2). On parle d'ondes longitudinales et transversales (voir la vidéo : [Onde Transversale/Longitudinale](#)).

Les ondes longitudinales existent dans les fluides et dans les solides (le son en est un exemple), mais les ondes transversales n'existent que dans les solides.

- La propagation d'un feu de forêt n'est pas une onde, car la combustion des arbres n'est pas réversible (Voir fig. 1.2).

## 1.3 Description mathématique des ondes mécaniques

La diversité des perturbations mécaniques existantes, transversales, longitudinales etc... pourrait masquer l'aspect universel du phénomène étudié : les ondes. C'est pourquoi par la suite, nous parlerons de façon générique de la déformation du milieu<sup>2</sup>, que l'on notera  $e$ .

La déformation  $e(x, t)$  est le nombre (angle ou longueur par exemple) qui repère, à l'instant  $t$  le déplacement du point qui se situait à l'abscisse  $x$  dans sa configuration de repos (voir figure 4.4). Le déplacement dépend de la position et du temps.

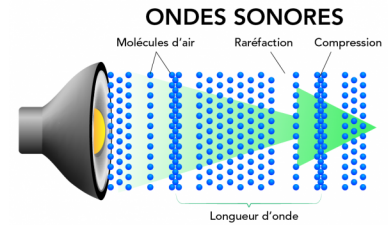


FIGURE 4.1: Propagation d'une onde sonore : perturbation compressive d'un milieu matériel par rapport à un état de repos. D'après le site [ParlonsSciences.ca](#)

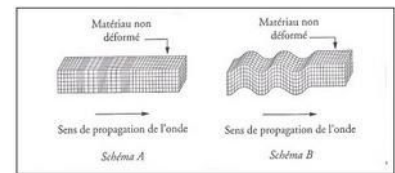


FIGURE 4.2: Dans un solide, il existe deux types d'ondes : les ondes longitudinales et les ondes transversales.

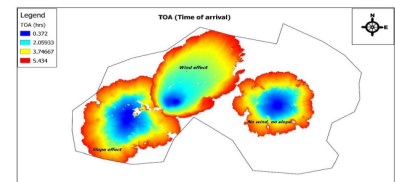


FIGURE 4.3: Propagation d'un feu de forêt : le temps mis par le feu pour arriver à un point est symbolisé par l'échelle de couleurs. La propagation d'un feu de forêt n'est pas une onde car le phénomène est irréversible.

La figure illustre l'effet de l'inclinaison du terrain et du vent sur la propagation d'un feu de forêt.

D'après [Bushfires spread modelling over Maalea in Northeastern Guinea, Avril 2019](#)

2. Certains manuels parlent d'élongation d'onde, mais votre professeur n'aime pas ce terme, car on peut le confondre avec un changement de longueur dans une corde.

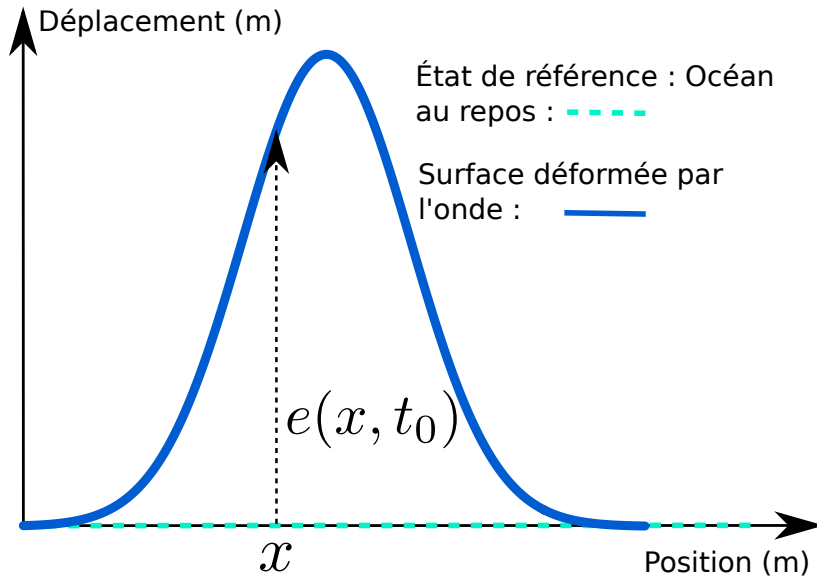


FIGURE 4.4: Déformation de la surface de l'océan lors de la propagation de la houle, à un instant particulier  $t_0$ . On y illustre la déformation  $e(x, t_0)$  par rapport à la configuration de référence (océan au repos).

## 2 Ondes mécaniques progressives

### 2.1 Le phénomène physique

#### Définition 4.3: Onde mécanique progressive

Une onde mécanique est dite progressive lorsqu'elle transporte de l'énergie sans transporter de matière.

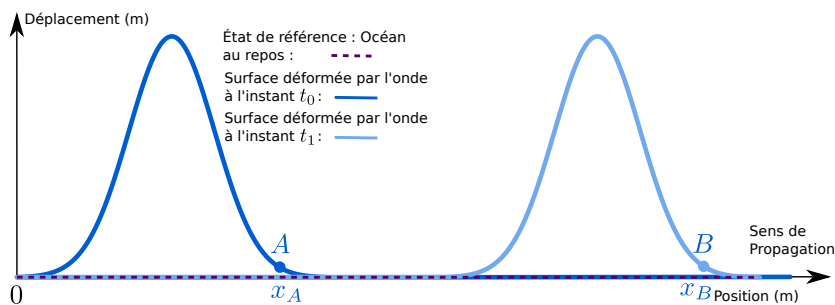


FIGURE 4.5: Lorsqu'on perturbe l'extrémité d'une corde d'un coup sec, l'énergie fournie par l'opérateur est transférée par l'onde de proche en proche. Après le passage de l'onde, la corde est de nouveau au repos : il n'y a pas de transfert de matière.

EXEMPLES :

- Onde propagée le long d'une corde (voir fig. 4.5)
- Onde circulaire propagée à la surface de l'eau lorsqu'on jette un caillou (voir fig. 2.1)
- Onde acoustique sphérique lorsqu'on claque de doigts dans l'air.



FIGURE 4.6: Lorsqu'on jette un caillou dans l'eau, une partie de son énergie cinétique est transmise au fluide sous forme de tension de surface : cette énergie se propage alors sous forme d'onde. Après le passage de l'onde, la surface est de nouveau au repos : il n'y a pas de transfert de matière.

CRÉDITS PHOTO : Roger McLassus

## 2.2 Propriétés des ondes progressives

### Définition 4.4: Célérité d'une onde

Sur la figure 4.5, considérons les deux événements suivants :

- La déformation arrive au point  $A$ , d'abscisse  $x_A$  à l'instant  $t_0$ .
- La déformation arrive au point  $B$ , d'abscisse  $x_B$  à l'instant  $t_1$ .

La célérité l'onde, notée  $c$ , est alors :

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_B - x_A}{t_1 - t_0}$$

EXEMPLES :

- La célérité du son dans l'air  $c_s = 340 \text{ m s}^{-1}$ . Si la foudre frappe à une distance de 1 km d'un observateur, après quelle durée entendra-t-il le tonnerre? En déduire une règle pour déterminer la distance d'un orage.
- Célérité du son dans l'eau :  $1500 \text{ m s}^{-1}$  : la célérité du son dépend (entre autres) du milieu de propagation.
- Lors d'un séisme, les ondes transversales et longitudinales ont une célérité différente.

## 3 Ondes mécaniques périodiques

### 3.1 Présentation du phénomène

#### Définition 4.5: Onde mécanique périodique

La déformation d'une onde mécanique est une fonction de la position et du temps, ainsi une onde peut avoir :

- Une périodicité temporelle : en un point donné de l'espace, la déformation se répète à l'identique à chaque fois qu'une certaine durée  $T$  s'écoule. La durée  $T$  (s) est appelée période, on utilise aussi la fréquence  $f = \frac{1}{T}$ .
- Une périodicité spatiale : en un instant donné, la déformation se répète à l'identique à chaque fois qu'une certaine longueur  $\lambda$  est parcourue. La longueur  $\lambda$  (m) est appelée longueur d'onde.

EXEMPLES :

- Une corde de La sur une guitare vibre à une fréquence de 440 Hz. Avec un stroboscope réglé à 440 Hz, on peut observer cette vibration, périodique dans l'espace pour mesurer la longueur d'onde.
- Les **figures de Chladni** sont obtenues lorsqu'on excite simultanément tous les points d'une plaque à une même fréquence. Cela témoigne de

Un événement est un phénomène physique qui se produit en un point donné à un instant donné. C'est une construction de pensée, qui idéalise les phénomènes physiques en les supposant de durée nulle et d'extension spatiale nulle.

Formaliser les problèmes en termes d'événements permet de clarifier des raisonnements en physique. Ce concept est à la base de la description mathématique de la théorie de la relativité d'Einstein.

Comme une onde n'est pas un simple point qui se déplace, dont on pourrait simplement mesurer la vitesse, il est nécessaire de définir la notion de vitesse.

Si vous poursuivez vos études en physique, vous verrez que l'on peut attribuer plusieurs « vitesses » à une onde.

La fréquence  $f$  en Hertz (Hz) s'interprète comme le nombre de vibrations qui s'effectuent chaque seconde.

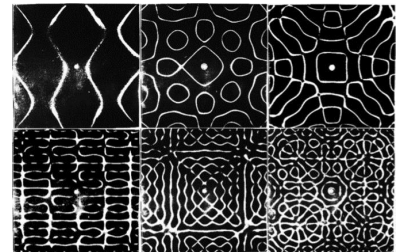


FIGURE 4.7: À certaines fréquences, tous les points d'une plaque métallique vibrent ensemble : une onde périodique dans le temps, appelée mode propre, se forme.

CRÉDITS PHOTO : Site Résonance-harmonie

l'existence, à certaines fréquences, d'ondes périodiques dans la plaque. On parle de modes propres de vibration, ou modes normaux.

#### Méthode 4.1: Mesurer une période

Pour mesurer une période temporelle ou spatiale (i.e. une longueur d'onde) sur un graphe de l'élongation, il suffit de trouver un motif qui se répète à l'identique et de le mesurer. Ce motif ne doit pas contenir de sous-motif qui se répète.

Voir exemple figure 3.2

### 3.2 Modèle de l'onde progressive sinusoïdale

#### Définition 4.6: Onde progressive sinusoïdale

On parle d'onde progressive sinusoïdale lorsque la déformation vérifie :

$$e(x, t) = A \cos\left(\frac{2\pi(x - ct)}{\lambda} + \phi\right)$$

où  $A$  est une amplitude,  $\phi$  est appelée « phase à l'origine ».  $c$  est la célérité de l'onde et  $\lambda$  la longueur d'onde.

NB : Il faut mettre la calculatrice en radians pour utiliser cette expression, ou remplacer  $\pi$  par 180, et mesurer  $\phi$  en degrés.

#### Propriété 4.1: À montrer $c$

La célérité d'une onde progressive sinusoïdale

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

Les ondes sinusoïdales jouent un rôle important en physique, car elles servent de fonctions élémentaires pour décrire n'importe quel type de perturbation.

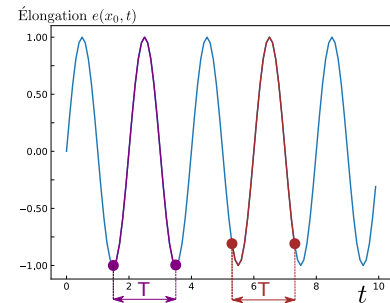


FIGURE 4.8: Mesure de période sur une fonction périodique : on trouve un motif élémentaire et on le mesure. La période ne dépend pas du motif choisi.

- TODO : Python : montrer que  $c = \frac{\lambda}{T}$
- TODO : Python : influence de  $\lambda$ , influence de  $T$
- TODO (non prio) : Python : construire modes propres : montrer que toute excitation d'une structure ne conduit pas à résonance.

**À la fin de ce chapitre, je sais (extrait du B.O.) :**

- Décrire, dans le cas d'une onde mécanique progressive, la propagation d'une perturbation mécanique d'un milieu dans l'espace au cours du temps : houle, ondes sismiques, ondes sonores, etc.
- Expliquer, à l'aide d'un modèle qualitatif, la propagation d'une perturbation mécanique dans un milieu matériel.
- (en TP) Produire une perturbation et visualiser sa propagation dans des situations variées, par exemple : onde sonore, onde le long d'une corde ou d'un ressort, onde à la surface de l'eau.
- Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité, notamment pour localiser une source d'onde.
- Distinguer périodicité spatiale et périodicité temporelle. Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité.
- Déterminer les caractéristiques d'une onde mécanique périodique à partir de représentations spatiales et temporelles.
- (En TP) Déterminer la période, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale à l'aide d'une chaîne de mesure.

CAPACITÉ NUMÉRIQUE : Représenter un signal périodique et illustrer l'influence de ses caractéristiques (période, amplitude) sur sa représentation. Simuler à l'aide d'un langage de programmation, la propagation d'une onde périodique.

CAPACITÉ MATHÉMATIQUE : Utiliser les représentations graphiques des fonctions sinus et cosinus.