

LP 2 – Ondes mécaniques

Manon LECONTE et Joachim GALIANA - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 17 juin 2020

Merci à Guillaume Laibe et F  nrl Montorier pour leur précieuse aide.

Mots-clé : ondes mécaniques, ondes transversales, ondes longitudinales, célérité, ondes sismiques, double-périodicité, longueur d'onde.

Niveau : 1^{re} enseignement de spécialité

Pré-requis :

- Constitution de la matière (atomes, molécules) [seconde]
- Ondes sonores et ondes lumineuses (  mission, propagation et réception) [seconde]
- Phénomènes périodiques (période, fréquence, célérité d'une onde) [seconde]

Bibliographie :

- *Physique-chimie 1^{re}*, Lelivrescolaire
- *Physique-Chimie 1^{re}*, Belin
- Taillet, *Dictionnaire de physique*

Plan proposé

I - Les ondes mécaniques	2
A/ Qu'est-ce qu'une onde mécanique ?	2
B/ Caractéristiques d'une onde mécanique progressive	3
C/ Célérité d'une onde mécanique	4
II - Les ondes mécaniques périodiques	5
A/ Double périodicité	5
B/ Ondes mécaniques sinusoïdales	6

Liste de matériel

Détermination de la célérité d'une onde sonore à l'aide d'un téléphone

- deux smartphones équipés d'un chronomètre sonore (phyphox) ;
- un décamètre.

Cuve à ondes

- cuve à ondes ;
- stroboscope.

Introduction pédagogique

On ne discutera pas beaucoup des ondes sonores puisqu'elles sont vues en enseignement scientifique. On ne traite également que des ondes progressives et pas des ondes stationnaires.

Difficultés :

- Les ondes mécaniques se propagent toujours dans un milieu matériel (l'air en est un), contrairement aux ondes électromagnétiques ;
- Double périodicité des OPPH → on le visualisera avec un script Python et une animation ;
- Lecture et compréhension d'un langage de programmation (Python) d'autant plus que cela est écrit dans le programme officiel.

Exemples de TD : étude de plusieurs types d'ondes (sismiques, ondes sur une corde, ...) → essayer d'en déterminer la périodicité, la célérité, si elles sont transversales ou longitudinales, ...

Exemples de TP : cuve à ondes et stroboscope, programme Python pour représenter une onde mécanique sinusoïdale qui se propage.

Introduction

La propagation des ondes lumineuses est un phénomène périodique, caractérisé par une **période/fréquence** (répétition à l'identique d'un signal au cours du temps) et une **célérité** (vitesse de propagation du signal). Ces notions vont être réinvesties pour la présentation d'un autre type d'ondes, les **ondes mécaniques**.

Objectifs – Comprendre ce qui caractérise une onde mécanique.
Poser un cadre mathématique autour de ce phénomène physique, quitte à le modéliser informatiquement.

I - Les ondes mécaniques

De nombreux exemples d'ondes mécaniques nous entourent : les vagues, les ondes sonores, les ondes sismiques...

A/ Qu'est-ce qu'une onde mécanique ?

Définition – **Onde mécanique** : perturbation qui se propage dans un milieu matériel.

Remarque – Une **perturbation** est un bouleversement ou une modification d'un équilibre/d'une situation invariable jusque là.

Définition – Onde mécanique progressive : onde mécanique dont la propagation entraîne un transfert d'énergie sans transport de matière.

Les séismes transportent bien de l'énergie, et c'est ce qui cause des destructions parfois. Par contre, au passage d'une vague, le bateau est soulevé verticalement mais n'a pas de mouvement horizontal : il n'y a pas de transport de matière (figure 1).

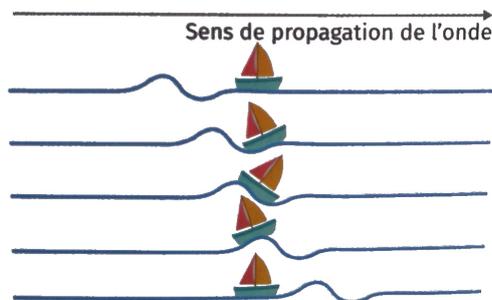


Figure 1 – Passage d'une vague sous un bateau (**Source** : Lelivrescolaire (p. 325)).

Le passage d'une onde mécanique perturbe le milieu, c'est-à-dire que les molécules qui le composent se déplacent : elles **oscillent** par rapport à leur position initiale. Il s'agit bien sûr d'un déplacement **local** et **microscopique**. Les molécules en mouvement vont entraîner leurs voisines et ainsi de suite avant de retourner à leur position d'équilibre. C'est ainsi que la perturbation se propage de proche en proche. C'est pourquoi les ondes mécaniques ont besoin d'un **milieu matériel** pour se propager.

I Vidéo – Pendule de Newton.

Remarque – Ce n'est pas le cas des ondes électromagnétiques, qui peuvent donc se propager dans le vide.

La propagation peut se faire à une dimension (sur une corde ou les vagues), à deux et même à trois dimensions (le son).

B/ Caractéristiques d'une onde mécanique progressive

On s'intéresse à une onde mécanique progressive sans périodicité, une excitation d'un bout d'une corde par exemple. Elle est premièrement caractérisée par son amplitude.

Définition – Amplitude : écart entre la valeur maximale d'une grandeur et sa valeur moyenne « au repos » au passage de l'onde.

On distingue ensuite deux types d'ondes mécaniques :

- **Les ondes transversales** pour lesquelles la direction de la perturbation est **perpendiculaire** à la direction de propagation de l'onde (ex : onde sur une corde) ;
- **Les ondes longitudinales** pour lesquelles la direction de la perturbation est **parallèle** à la direction de propagation de l'onde (ex : son).

Vidéo – Visualisation d'ondes transversales et longitudinales sur un ressort (mettre au ralenti).

Exemple – *Ondes sismiques* Il existe majoritairement deux types d'ondes sismiques :

- les **ondes P**, qui sont longitudinales et plus rapides ;
- les **ondes S** qui sont transversales.

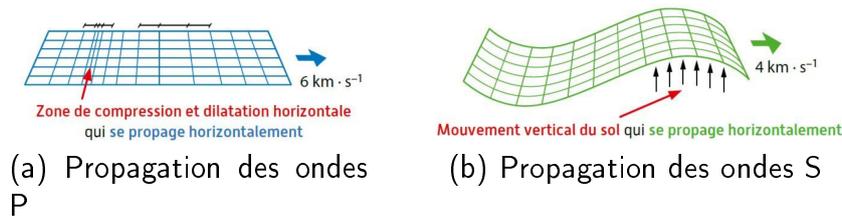


Figure 2 – Propagation des ondes sismiques (**Source** : Belin (p. 295)).

⇒ Pourquoi y a-t-il une différence de vitesse entre ces deux ondes ?

C/ Célérité d'une onde mécanique

Définition – **Célérité** : vitesse de propagation de l'onde dans un milieu donné.

Une onde mécanique a besoin d'un milieu matériel pour se propager et **sa célérité dépend du milieu** !

Si on mesure le retard $\tau = t_B - t_A$, c'est-à-dire le temps que le front d'onde prend pour aller de A à B, on peut avoir accès à la célérité de l'onde :

$$v_{\text{onde}} = \frac{x_B - x_A}{\tau} \quad (1)$$

Expérience – *Mesure de la vitesse d'une onde sonore dans l'air* (**Source** : Lelivrescolaire (p. 323)).

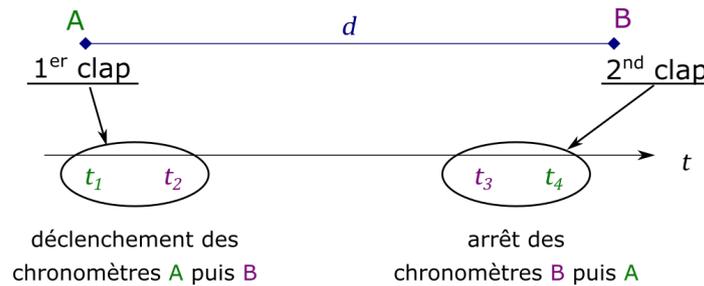
On utilise deux smartphones équipés d'un chronomètre sonore (application phyphox à télécharger).

Réaliser plusieurs mesures et faire des incertitudes de type A.

On peut lire sur les téléphones A et B $\Delta t_A = t_4 - t_1$ et $\Delta t_B = t_3 - t_2$ respectivement. La vitesse de l'onde vérifie la relation : $t_2 - t_1 = t_4 - t_3 = \frac{d}{v_{\text{onde}}}$.

Alors, $t_4 - t_1 = t_4 - t_3 + t_3 - t_2 + t_2 - t_1 = \frac{2d}{v_{\text{onde}}} + t_3 - t_1$

$$\Leftrightarrow v_{\text{onde}} = \frac{2d}{\Delta t_A - \Delta t_B} \quad (2)$$



Limites de l'expérience :

- mesure de la distance entre les deux téléphones ;
- distance non négligeable entre le clappement de mains et le premier téléphone ;
- téléphone lent pour détecter le clap.

En terminale, on pourra voir une méthode plus précise pour mesurer la célérité d'une onde en utilisant l'effet Doppler.

La célérité et le retard des ondes permettent également de localiser leur source.

Exemple – Localisation de l'épicentre d'un séisme

On utilise la différence de temps entre l'arrivée des ondes P (t_P) et celle des ondes S (t_S) pour déterminer la distance entre la station de mesure et l'épicentre du séisme :

$$d = \frac{t_P - t_S}{v_S - v_P} v_S v_P \quad (3)$$

Application numérique : $d = 427$ km pour Iris, et $d = 492$ km pour Detroit.

A partir des données de 3 stations, on peut localiser l'épicentre d'un séisme : il se trouve à l'intersection des sphères centrées en chacune des trois stations de rayon d calculé pour celles-ci.

II - Les ondes mécaniques périodiques

A/ Double périodicité

Définition – Onde mécanique périodique : onde mécanique dont la perturbation se répète, identique à elle-même, sur un intervalle de temps régulier appelé **période** $T = \frac{1}{f}$, où f est la fréquence de l'onde.

Les ondes mécaniques périodiques présentent en fait une **double-périodicité**.

- **périodicité temporelle**, caractérisée par la période T . Pour l'observer, on se place en une position de l'espace et on trace l'allure du signal en fonction du temps ;
- **périodicité spatiale**, caractérisée par la **longueur d'onde** λ (distance entre deux maxima consécutifs de l'amplitude de l'onde). Pour l'observer, on trace à un instant t l'allure du signal en fonction de l'axe des x (si la propagation se fait selon cet axe).

Une perturbation parcourt une longueur d'onde en une période temporelle. On en déduit une relation entre ces deux grandeurs et la célérité de l'onde :

$$v_{\text{onde}} = \lambda \times \frac{1}{T} = \lambda \times f \quad (4)$$

Expérience – Mesure de la période T , de la longueur d'onde λ et de la célérité v_{onde} d'une onde à l'aide d'une cuve à ondes.

B/ Ondes mécaniques sinusoïdales

Définition – **Onde mécanique sinusoïdale** : onde mécanique dont la perturbation est sinusoïdale.

Animation – Visualisation de la double périodicité d'une onde mécanique sinusoïdale.

Le signal a alors l'allure d'un sinus ou d'un cosinus. Si l'onde se propage selon les x croissants, on peut l'écrire avec la fonction mathématique :

$$s(x, t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v_{\text{onde}}}\right)\right) \quad (5)$$

ou encore :

$$s(x, t) = A \cos\left(2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right) \quad (6)$$

Script Python – Représentation de la propagation d'une onde mécanique sinusoïdale à l'aide d'un code Python (**Source** : Lelivrescolaire (p. 324)).

Conclusion

Une **onde mécanique** a besoin d'un **milieu matériel** pour se propager et sa **célérité dépend du milieu**. Une **onde progressive** est une perturbation qui entraîne un transfert d'énergie sans transport de matière. Un exemple particulier d'ondes progressives sont les **ondes progressives sinusoïdales**, que l'on peut modéliser mathématiquement et informatiquement.

Cependant, dans ce cours, on a supposé que le milieu était élastique, ce qui est loin d'être le cas. En effet, il **absorbe une partie de l'énergie** de l'onde qu'il ne lui restitue pas. L'onde finit par être **amortie** et son amplitude tend à s'annuler.

En enseignement scientifique, des ondes plus complexes, car sommes de plusieurs fonctions sinusoïdales, seront traitées. Pour les étudier, on aura recours à l'analyse spectrale de Fourier.