

P1 – Ondes progressives

Ondes

« La peau de la grande houle fondamentale [...] d'où émane la rumeur d'une matière en ébullition par l'infinie quantité de cris intimes, de déchirements et froissements, de plissements et de mélanges entre les eaux. »

Paul Valéry, *Mers, Tel quel.*

I. Caractéristiques

1. Définitions

Onde progressive

Une onde progressive est le phénomène de propagation d'une perturbation locale sans transport de matière, mais avec transport d'énergie.

Exemple : onde sur une corde



Onde de torsion unidimensionnelle sur une corde

- La corde reste sur place \Rightarrow pas de transport de matière.
- Le mouvement vertical de la corde et l'énergie cinétique associée se déplacent \Rightarrow transport d'énergie.

Onde mécanique

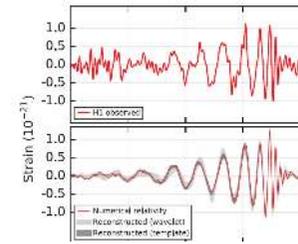
Une onde mécanique nécessite un milieu matériel pour se propager.



Onde sonore produite par une explosion

Exemple : onde sonore

- Les ondes sonores sont une suite de compressions et de dilatations d'un milieu (gazeux, liquide ou solide).
- Elles nécessitent de la matière pour se propager.
- Les sons sont des ondes mécaniques.



Première onde gravitationnelle détectée : GW150914

2. Front d'onde

Définition

Ligne ou surface où la perturbation et le temps de parcours depuis la source sont identiques.



Onde capillaire linéaire dans une cuve à onde

Exemple : onde plane

- Les fronts d'onde sont des droites pour une onde 2D (houle, onde capillaire...).
- Les fronts d'onde sont des plans pour une onde 3D (sons, onde sismique P et S).



Onde capillaire circulaire dans une cuve à onde

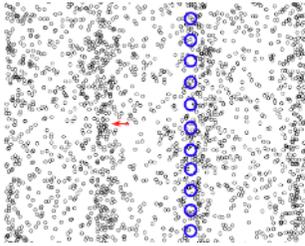
Exemple : onde sphérique

- Le front d'onde est circulaire pour une onde 2D.
- Le front d'onde est sphérique pour une onde 3D.

3. Type d'onde

Onde longitudinale

La direction de la perturbation est la même que la direction de propagation de l'onde.



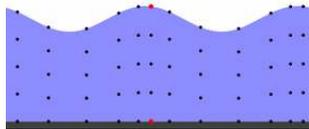
Mouvement de particules dans une onde sonore plane

Exemple : onde sonore

- Le son est une suite de compressions et de dilatations du milieu.
- Les particules oscillent dans la direction de propagation.
- Les ondes sonores sont des ondes longitudinales.

Onde transversale

La direction de la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.



Mouvement de particules dans la houle

Exemple : houle

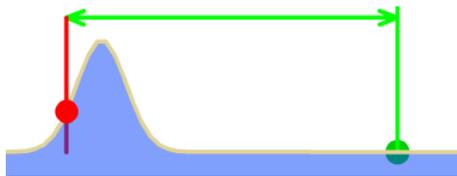
- Direction de propagation : horizontale.
- Perturbation : verticale (hauteur d'eau)
- La houle est une onde transversale.

4. Célérité

Célérité/vitesse d'une onde

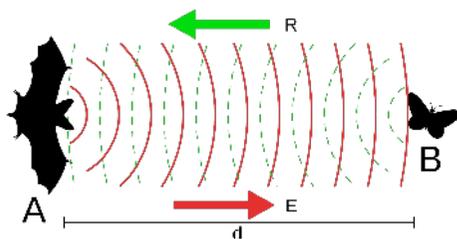
- La célérité c d'une onde ne dépend que du milieu de propagation.
- La vitesse d'une onde est indépendante de l'émetteur et du récepteur.

| Milieu | Air | Eau | Verre |
|---|-----|------|-------|
| $v_{\text{son}} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ | 340 | 1480 | 5300 |
| $v_{\text{lumière}} \text{ (} 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ | 3,0 | 2,2 | 2,0 |



On appelle retard le temps de propagation d'une onde entre deux points :

$$c = \frac{d}{\Delta t} \quad \Delta t = \frac{d}{c}$$



La mesure du retard d'une onde pour parvenir jusqu'à la cible et revenir jusqu'à l'émetteur/récepteur permet d'évaluer sa distance dans les systèmes d'écholocation (radar/sonar).

$$d = \frac{c\Delta t}{2}$$

Remarque

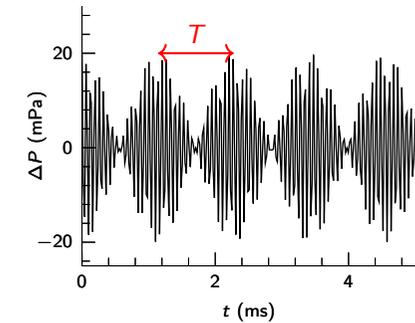
Le facteur 2 est dû à l'aller-retour de l'onde.

Ex. 5 p. 42 : mascaret

II. Ondes périodiques

1. Périodicités

Une onde périodique possède deux périodes, l'une temporelle, l'autre spatiale.



Période temporelle T

Elle est obtenue en observant la perturbation à un point fixe au cours du temps.

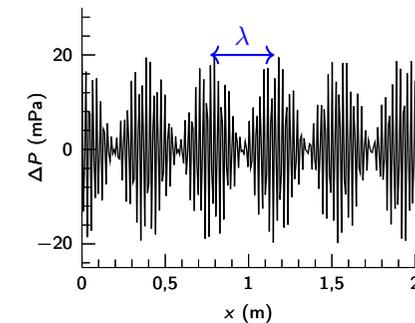
Fréquence

$$\nu = \frac{1}{T}$$

ν : Fréquence (Hz)
 T : Période (s)

Période spatiale λ (ou longueur d'onde)

Elle est obtenue en observant l'ensemble de la perturbation à un instant donné.



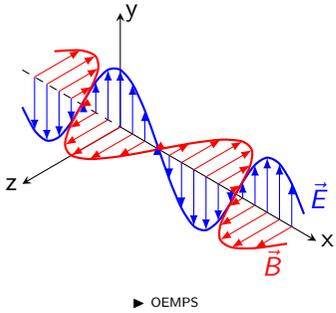
Ex. 8 p. 43 : relations entre périodes

2. Onde plane sinusoïdale

Une onde plane est infinie (sans début ni fin) et ses fronts d'onde sont des plans infinis perpendiculaires à direction de propagation. C'est un modèle simple, mais peu réaliste.

Pour une propagation suivant x la perturbation s'écrit :

$$A(x, t) = A_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t + \phi_0\right) \quad \left| \begin{array}{l} A_0 : \text{Amplitude à l'origine (SI)} \\ \phi_0 : \text{Phase à l'origine (sans dimension)} \end{array} \right.$$



Exemple : onde électromagnétique plane

- Ondes électromagnétiques : rayons γ , rayon X, UV, lumière, IR, micro-ondes, ondes radios...
- Perturbation des champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} .
- $\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t + \phi_0\right)$
- Caractéristiques : onde progressive, non mécanique, transversale, monochromatique.

3. Célérité d'une onde périodique

Dans un milieu non dispersif (c indépendant de λ et ν) :

$$c = \lambda\nu = \frac{\lambda}{T} \quad \left| \begin{array}{l} c : \text{Célérité de l'onde périodique (m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ \lambda : \text{Longueur d'onde (m)} \\ \nu : \text{Fréquence (Hz)} \\ T : \text{Période (s)} \end{array} \right.$$

Remarque sur la réfraction de la lumière

— La réfraction est causée par le changement de vitesse de l'onde lumineuse :

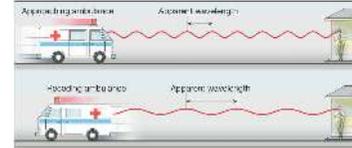
$$v = \frac{c}{n} \quad \left| \begin{array}{l} v : \text{Vitesse de la lumière dans le milieu (m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ c : \text{Célérité de la lumière dans le vide (3,0} \times \text{10}^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ n : \text{Indice de réfraction (sans dimension)} \end{array} \right.$$

- Lors de la réfraction, la fréquence ν de l'onde n'est pas modifiée.
- C'est la longueur d'onde λ qui change.

III. Effet Doppler-Fizeau

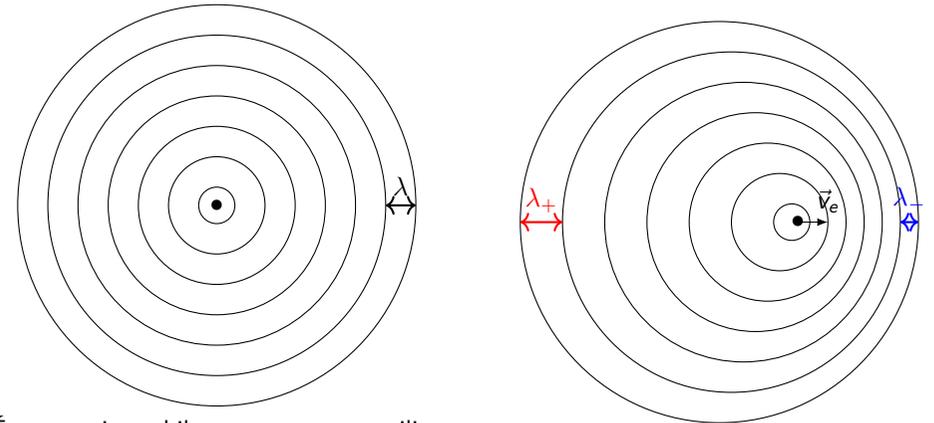
1. Observation

En 1842, Christian Doppler (1803-1853) montre que la fréquence d'une onde est décalée lorsque l'émetteur ou le récepteur sont en mouvement et tente d'interpréter la couleur des étoiles avec ce décalage.



- Lorsque la source s'approche le son est plus aigu.
- Lorsque la source s'éloigne le son est plus grave.

2. Effet Doppler sonore



Émetteur immobile par rapport au milieu de propagation : $v_e = 0$

$0 < v_e < c$ ► Cuve à onde

On observe que $\lambda_- < \lambda < \lambda_+$, donc $\frac{c}{\lambda_+} < \frac{c}{\lambda} < \frac{c}{\lambda_-}$, et finalement $\nu_+ < \nu < \nu_-$.

La fréquence est plus élevée si l'émetteur s'approche et plus faible s'il s'éloigne.

Dans le cas le plus général et dans le référentiel du milieu de propagation supposé galiléen :

$$f_r = \frac{c - v_r}{c - v_e} f_e \quad \left| \begin{array}{l} f_r : \text{Fréquence reçue (Hz)} \\ f_e : \text{Fréquence émise (Hz)} \\ v_r : \text{Vitesse du récepteur (m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ v_e : \text{Vitesse de l'émetteur (m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ c : \text{Célérité de l'onde (m} \cdot \text{s}^{-1}) \end{array} \right.$$

Convention

Le signe des vitesses est relatif au sens de propagation de l'onde.

Ex. 9 p. 63 : klaxon

Exemple

Les fréquences 580 Hz et 435 Hz sont utilisées par les sirènes deux tons de la police nationale. L'enregistrement d'une voiture de police en mouvement permet de mesurer des fréquences égales à 548 Hz et 411 Hz.

On donne $|f_{re\grave{c}ue} - f_{source}| = \frac{v}{v_{son}} f_{re\grave{c}ue}$

Cette voiture s'approchait-elle du dispositif d'enregistrement ?

Quelle est la vitesse de cette voiture ?

548 Hz < 580 Hz de même 411 Hz < 435 Hz,

$f_{re\grave{c}ue} < f_{source}$,

donc la voiture s'éloigne du dispositif.

$$v = \frac{v_{son} |f_{re\grave{c}ue} - f_{source}|}{f_{re\grave{c}ue}}$$

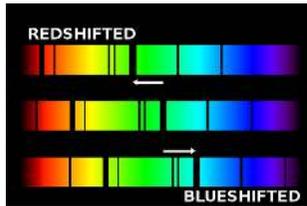
$$v = \frac{340 \times |548 - 580|}{548} = 19,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{ou } v = \frac{340 \times |411 - 435|}{411} = 19,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v = 19,9 \times 3,6 = 71,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

3. Effet Doppler lumineux (non relativiste)

En 1848, Hippolyte Fizeau (1819-1896) découvre indépendamment l'effet Doppler et prédit le décalage spectral des étoiles.



- Lorsque l'émetteur et le récepteur se rapprochent, il y a décalage vers le bleu (« blueshift »).
- Lorsque l'émetteur et le récepteur s'éloignent, il y a décalage vers le rouge (« redshift »).

La vitesse de la lumière étant la même dans tous les référentiels, on ne considère que la vitesse relative v entre l'émetteur et le récepteur, pour $v \ll c$:

$$f_r = \left(1 - \frac{v}{c}\right) f_e$$

| | |
|--|--|
| | f_r : Fréquence reçue (Hz) |
| | f_e : Fréquence émise (Hz) |
| | v : Vitesse relative émetteur/récepteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
| | c : Célérité de la lumière ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |

Convention

- Si l'émetteur et le récepteur se rapprochent : $v < 0$.
- Si l'émetteur et le récepteur s'éloignent : $v > 0$.

Big Bang

En 1929 Edwin Hubble mesure le décalage spectral des galaxies, il trouve que la plupart des galaxies sont décalées vers le rouge et que ce décalage ($z = \frac{\lambda_r - \lambda_e}{\lambda_e} \simeq \frac{v}{c}$ pour $v \ll c$) et donc leur vitesse d'éloignement est proportionnelle à leur distance ($v = H_0 d$).

C'est la première mise en évidence de l'expansion primordiale de l'univers !

Remarque

Le décalage vers le rouge des galaxies n'est pas dû à leur vitesse propre, mais à l'expansion de l'espace.