

# Physique des ondes

Alexis Brès

10 octobre 2019

# Introduction



Omniprésence des phénomènes ondulatoires en physique.  
Mathématiques : ondes = phénomène périodique. Théorie de Fourier : changement de paradigme.  
Ondes ou corpuscule : photons, mécanique ondulatoire et ouverture vers la mécanique quantique. Autre changement de paradigme.  
Les ondes ne sont pas de la vieille physique ! Applications modernes.

# Contents

- 1 Omniprésence des ondes en physique
- 2 Les ondes : un phénomène périodique
- 3 Le débat onde/corpuscule
- 4 Aspects modernes de la physique des ondes

## Une liste non-exhaustive

- Ondes électromagnétiques : le visible... et le reste
- Ondes sonores
- Ondes de surface (eau)
- 

Globalement, deux grands types : les ondes mécaniques et les ondes électromagnétiques.

On distingue les ondes transverses (perpendiculaire à la propagation) et longitudinale (dans le sens de propagation).

## Définitions

Une onde est un phénomène périodique se propageant dans l'espace, qui résulte en une transmission de signal/énergie à grande échelle.

Périodique : le phénomène se répète à l'identique toutes les périodes  $T$ . On définit la fréquence  $f = 1/T$ .

Phénomène qui corrèle l'espace et le temps : il existe également une périodicité spatiale liée à la longueur d'onde  $\lambda$ .

Les deux sont reliées pour des ondes "simples" par  $\lambda = cT$ .

Exemple : expérience des ultrasons.

## Pourquoi des ondes ?

En général, une onde résulte de deux mécanismes concurrents qui se "courent" après. On a en pratique deux grandeurs, les variations spatiales de l'une créent des variations temporelles de l'autre, et respectivement.

Exemple en acoustique : si la pression varie spatialement, les molécules d'air bougent, et leur vitesse change au cours du temps.

Exemple en EM : si le champ  $\vec{B}$  (magnétique) varie dans le temps, cela génère un courant, donc une tension, donc un champ  $\vec{E}$  (électrique) variable dans l'espace.

## Phénomènes associés aux ondes

- Réflexion
- Réfraction
- Diffraction
- Interférences
- Dispersion (*cf. infra*)
- Effet Doppler (animation)

# L'équation des ondes et ses solutions

L'équation des ondes s'écrit

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0$$

Deux grands types de solutions :

- les ondes progressives, qui se propagent dans un milieu infini : ondes électromagnétiques dans l'espace, ondes à la surface de l'eau, ...
- les ondes stationnaires : des conditions aux limites restreignent les solutions. On observe des noeuds et des ventres. Exemples : corde de Melde (expérience), ondes dans les instruments de musique, ...



# Ondes sonores

Pour les ondes sonores, ce sont la pression et la vitesse de l'air qui se répondent. Compression/décompression : ondes longitudinales.

Faible surpression  $\Rightarrow$  faible vitesse  $\Rightarrow$  différence de pression...

On mesure l'intensité acoustique en décibel. Échelle

logarithmique : si +3dB, on multiplie l'intensité par 2 ! Seuil d'audition à 0dB, avion qui décolle à 120dB.

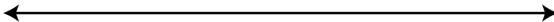
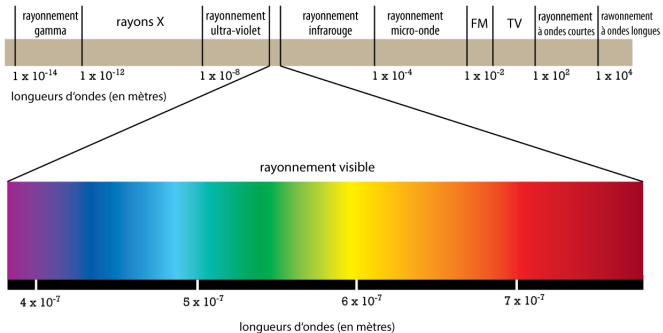
Les surpressions et déplacements associés sont très faibles : un dixième de diamètre atomique à 0dB pour quelques fractions de Pascal !

Différence de taille : on peut dépasser la vitesse du son, pas celle de la lumière.

# Ondes électromagnétiques

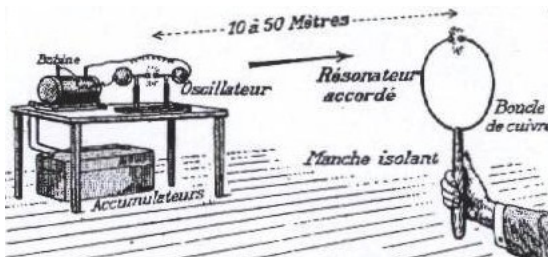
Ce sont des ondes qui peuvent se propager dans le vide (!) à la vitesse de la lumière  $c = 299792458$  m/s.

Spectre des ondes électromagnétiques :



# Utilité des OEM

En 1886, Heinrich Hertz veut montrer une application des équations de Maxwell : il existe des solutions ondulatoires se propageant à la vitesse de la lumière.

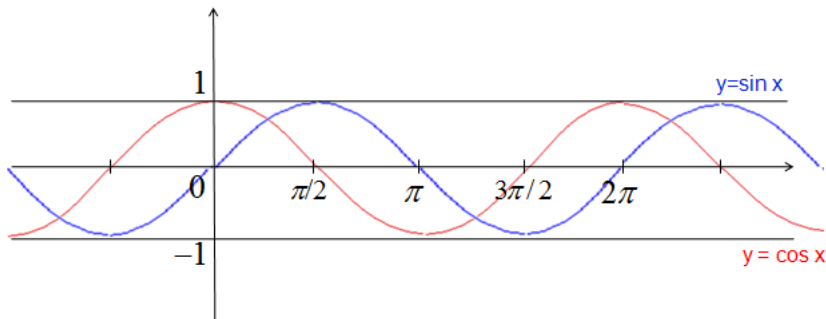


# Contents

- 1 Omniprésence des ondes en physique
- 2 Les ondes : un phénomène périodique**
- 3 Le débat onde/corpuscule
- 4 Aspects modernes de la physique des ondes

# Fonctions périodiques

Rappels (?) sur les fonctions sinus et cosinus.



# Décomposition de Fourier

En étudiant la théorie de propagation de la chaleur, Joseph Fourier utilise un théorème mathématique puissance : la décomposition en série de Fourier.

Toute (ou presque) fonction périodique peut-être décomposée en une somme de sinus et cosinus qui sont des harmoniques de la fréquence du signal.

Animation web : <http://www.jezzamon.com/fourier/>

## Spectre d'un signal ondulatoire

Un signal ondulatoire est donc entièrement caractérisé par son spectre : la répartition en amplitude de ses différentes composantes de Fourier.

On peut donc complètement caractériser un signal par sa décomposition. A fortiori, on peut se contenter d'étudier l'impact d'un signal sinusoïdal sur un système : c'est le théorème de superposition.

## Dispersion : quand les composantes se séparent

Les différentes composantes d'un signal vont-elle toujours à la même vitesse ? Pas forcément...

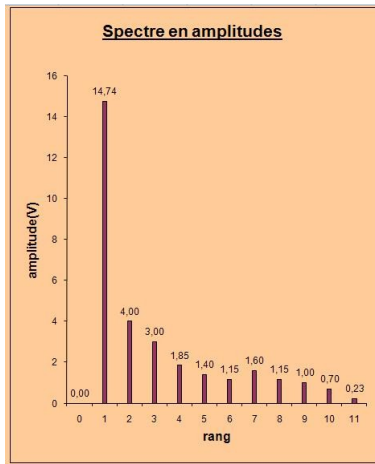


Un milieu où la vitesse d'une onde dépend de sa fréquence est dit dispersif. Dans certains milieux, cette dispersion empêche l'existence de certaines ondes en dessous/au-dessus d'une fréquence (de coupure) : exemple des ondes sismiques. Mais alors, qu'est-ce que la vitesse du signal ? Brillouin, *La science et la théorie de l'information*.



# Application aux instruments de musique

Quelle différence entre le son d'un piano et celui d'un clavecin ?



# Contents

- 1 Omniprésence des ondes en physique
- 2 Les ondes : un phénomène périodique
- 3 Le débat onde/corpuscule**
- 4 Aspects modernes de la physique des ondes

# Historique

- Querelle Huygens/Newton au XVII<sup>e</sup> : la lumière est une onde/une particule. Peu remise en question pour Newton car explique bien l'optique "géométrique".
- Fresnel, Maxwell, Young : expliquer les expériences d'optique ondulatoire ?
- Einstein et les photons (merci Planck et le corps noir) : expliquer l'effet photoélectrique.

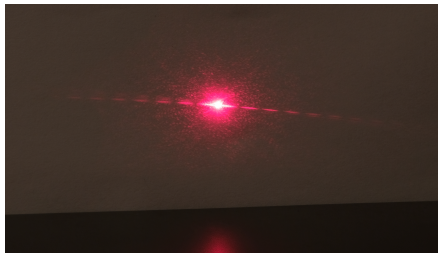


FIGURE – Diffraction d'un laser par un cheveu

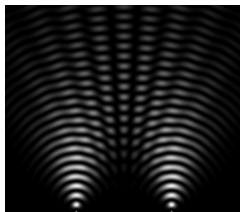
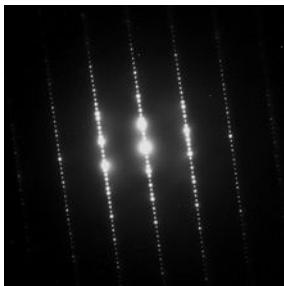


FIGURE – Représentation de l'expérience des fentes d'Young

# De Broglie et les ondes de matière



Dans sa thèse de 1924, De Broglie postule qu'à toute particule de matière est associée une onde de longueur d'onde  $\lambda = \frac{h}{mv}$ , où  $m$  est la masse de la particule et  $v$  sa vitesse.  $h$  est la constante de Planck.

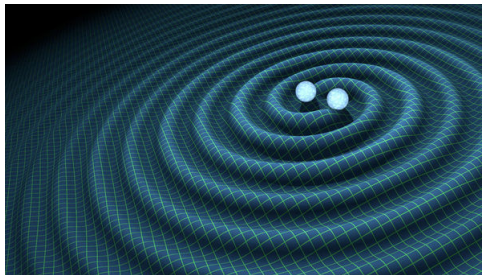
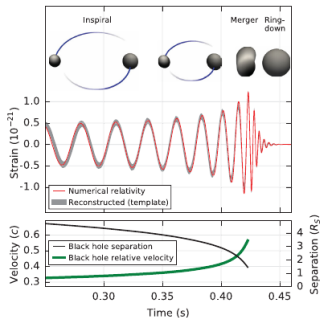
Ordres de grandeur pour la matière ?

# Contents

- 1 Omniprésence des ondes en physique
- 2 Les ondes : un phénomène périodique
- 3 Le débat onde/corpuscule
- 4 Aspects modernes de la physique des ondes**

# Ondes gravitationnelles (Nobel 2017)

Un nouveau type d'onde : c'est l'espace-temps qui vibre ! Très utile pour voir des phénomènes lointains entre astres massifs, ouvre des portes pour l'observation indirecte.



# Réversibilité de l'équation des ondes

L'équation des ondes s'écrit  $\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0$ .

Sans entrer dans les détails :  $s$  est aussi une solution de l'équation si on prend  $-t$  à la place de  $t$ .

Vidéo : renversement temporel en bassin

La réversibilité des équations de la physique est un problème encore complexe et très liés avec les mathématiques.



# Ondes non-linéaires : solitons

Se souvenir de la dispersion des ondes : les composantes ne vont pas à la même vitesse. On parle d'étalement du paquet d'onde. Sous certaines conditions, on peut produire un paquet d'ondes liés à une onde non-linéaire : le soliton.

Métaphore : les coureurs sur un tapis déformable.

Observé pour la première fois par Scott Russel au XIXème, on en rencontre en optique, en hydrodynamique, en mécanique, en électronique...

Vidéo : rencontre de deux solitons.

## Frontière classique/quantique : les marcheurs

On fait vibrer verticalement un bain d'huile siliconée. Lorsqu'on dépose une goutte dessus, pour un choix judicieux de fréquence/amplitude de vibration, la goutte ne se mélange pas et rebondit sans cesse : on a créé un "marcheur".

Ces marcheurs sont des créatures hybrides ondes/corpuscules macroscopiques.

Vidéo du projet Lutécium sur les marcheurs.