

# Les ondes

- Les signaux périodiques
- La fréquence propre d'un système
- Les ondes mécaniques
  - Les ondes sonores
- Les ondes électromagnétiques
  - Diffraction et les interférences
- Les ondes gravitationnelles



Notions utilisées :

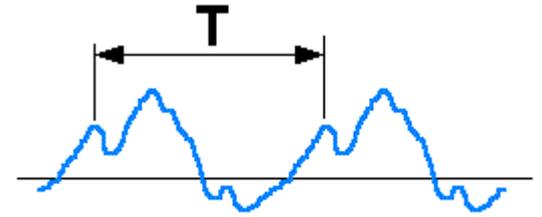
1. Introduction
2. Structure de la matière

# Définitions (larousse.fr)

1. Modification de l'état physique d'un milieu matériel ou immatériel, qui se propage à la suite d'une action locale avec une vitesse finie, déterminée par les caractéristiques des milieux traversés.
2. Chacune des rides qui se propagent à la surface d'un liquide à partir d'un point d'ébranlement de cette surface (surtout pluriel) : Les ondes concentriques créées par une pierre lancée dans l'eau.  
Synonymes : lame - vague
3. Littéraire. (Au singulier.) Eau de la mer, d'un lac, d'un cours d'eau.
4. Littéraire. Image de la propagation d'un vif sentiment ou d'une sensation dans son être tout entier : Onde de plaisir.

# Les signaux périodiques

- Wikipedia : Un signal est dit « **périodique** » si les variations de son amplitude se reproduisent régulièrement au bout d'une **période T** constante



- Mathématiquement, le signal est représenté par une fonction périodique de période T : pour tout t,  $f(t+T)=f(t)$

- La période s'exprime en secondes

- La **fréquence** est l'inverse de la période :  $f = \frac{1}{T}$

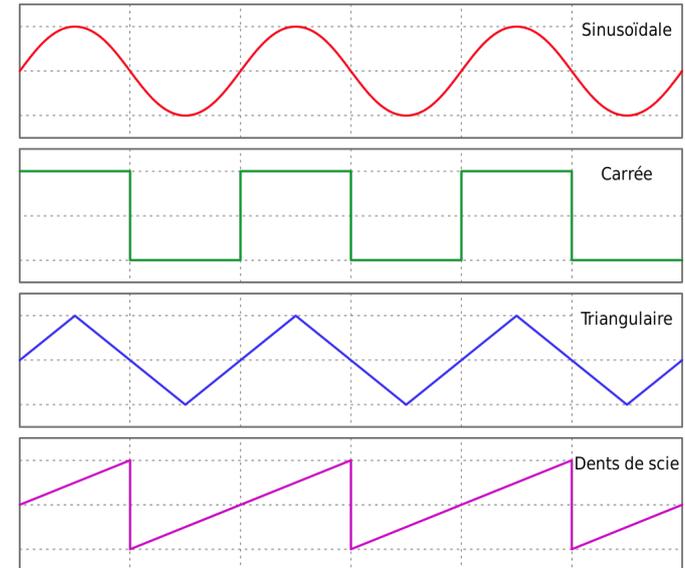
- elle s'exprime en  $1/s = s^{-1}$  (Hertz)

- Exemples :

- EDF :  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $T = 1/(50 \text{ Hz}) = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms}$

- Processeur :  $2 \text{ GHz} = 2 \times 10^9 \text{ Hz}$ ,  $T = 0,5 \text{ ns}$

- La « **pulsation** » est définie comme  $\omega = 2\pi \cdot f$



# La fréquence propre

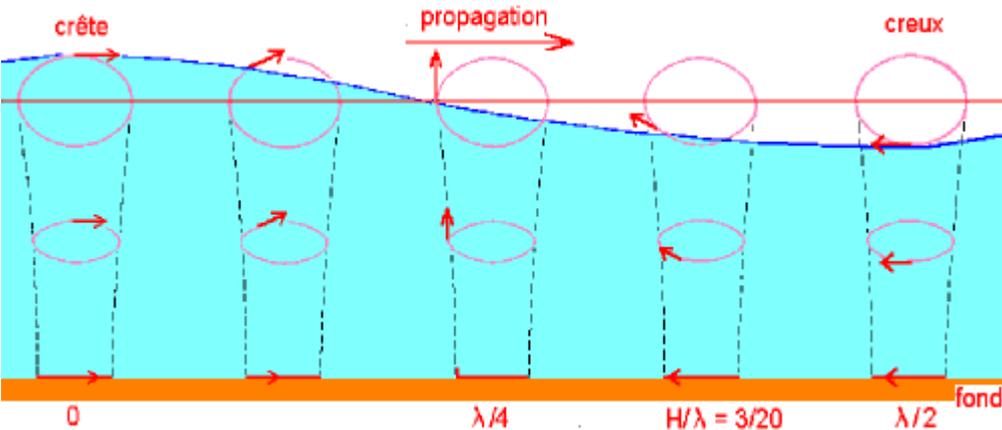
- Fréquence à laquelle un système **oscille naturellement**
  - Diapason : 440 Hz (la)
  - Pendule : 1 Hz
  - Suspensions d'une voiture
- Si on stimule un système à sa fréquence propre, il entre en « **résonance** »
  - Ecrroulement du pont de Broughton en 1831
  - Balançoire :  $T \approx 2,5$  s
  - Basses en discothèque



# Les ondes mécaniques

## Exemple : la houle

- Macroscopiquement : oscillations
- Microscopiquement :
  - Ellipses – pas de déplacement longitudinal



# Les ondes sonores

- Le son est une **vibration mécanique** qui se propage grâce à la **déformation élastique** du milieu
  - Pas de son dans le vide
  - Milieu fluide : ondes de pression (faibles par rapport à  $p_{\text{atm}}$ )
- Vitesses de propagation :
  - Dans l'air :
    - 330 m/s à 0° C au niveau de la mer
    - 295 m/s à -60°C à 12 000 m d'altitude
  - Dans l'eau : 1 500 m/s
  - Dans l'acier : 5 600 m/s
  - Dans le diamant : 18 km/s
- **Onde de choc**
  - Discontinuité de pression
    - Ex : bang supersonique : les ondes s'empilent sur le nez de l'avion

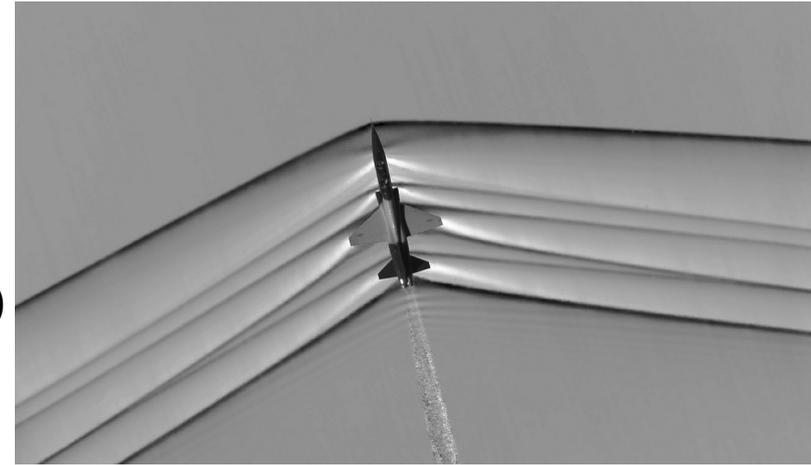
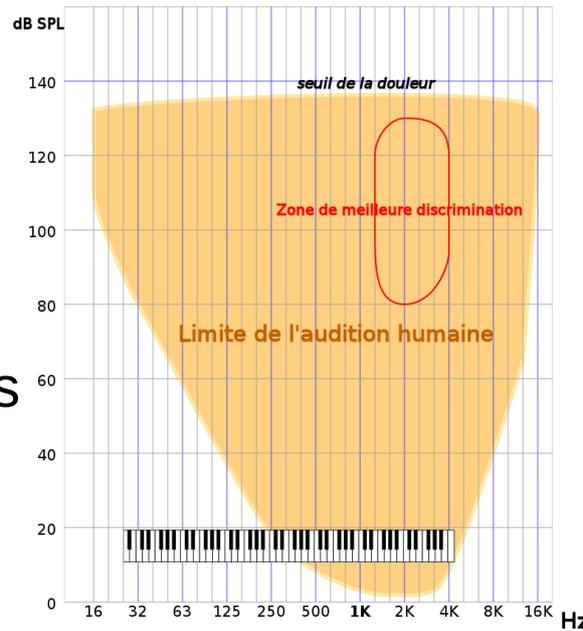


Image : Top Gun « Maverick »

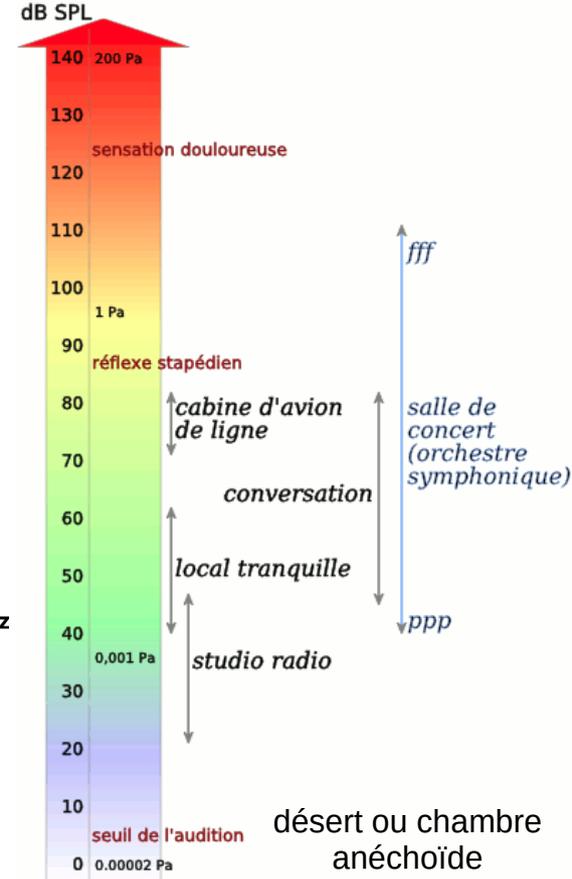
# Perception humaine

- L'oreille humaine perçoit les sons de fréquence comprise entre
  - 16 Hz pour les graves
  - 15 à 18 kHz pour les aiguës
- La sensibilité :
  - varie selon les individus
  - diminue aux fréquences extrêmes
  - diminue avec l'âge
- Domaines acoustiques :
  - en dessous de 16 Hz : « infrasons »
  - au-dessus de 20 kHz : « ultrasons »
  - au-dessus de 1 GHz : « hypersons »



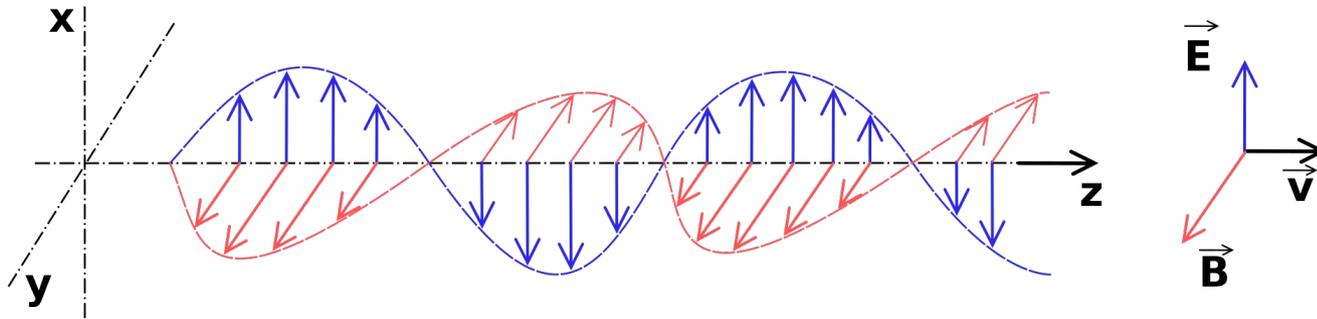
$$X_{dB} = 10 \log \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

avec  $P_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$



# Les ondes électromagnétiques

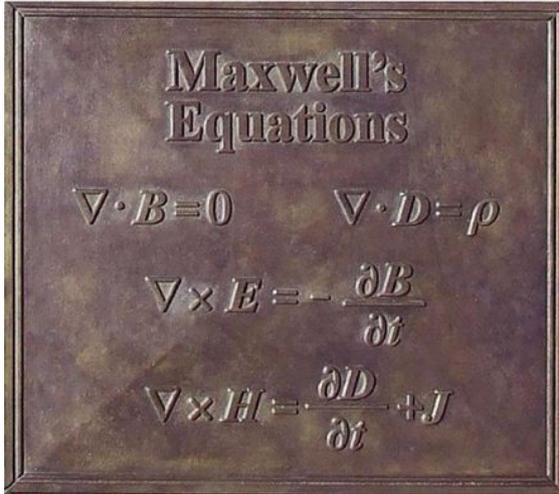
- On distingue
  - le **rayonnement électromagnétique** (le phénomène étudié)
  - l'onde électromagnétique (une de ses représentations)
    - Autre représentation : **photon** (quantique ou corpusculaire)



- Un champ électrique et un champ magnétique
  - Orthogonaux et sinusoïdaux

# Les équations de Maxwell

Permettent de calculer le **champ électrique** et le **champ magnétique** créés la présence / le mouvement de charges électriques



Plaque représentant les équations de Maxwell au pied de la statue en hommage à James Clerk Maxwell d'Edimbourg

Formulées en 1865 puis 1873 par Maxwell puis sous cette forme en 1884 par Olivier Heaviside

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- $\epsilon_0$  = permittivité (diélectrique) du vide =  $8,854 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
- $\mu_0$  = perméabilité (magnétique) du vide =  $1,256 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
- E = champ électrique
- B = champ (d'induction) magnétique
- $\rho$  = densité (volumique) de charge électrique
- j = densité (surfactive) de courant électrique

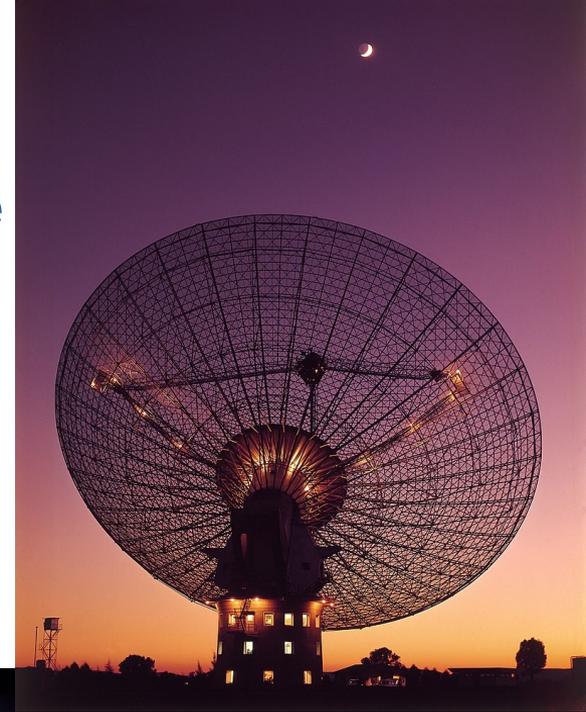
$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

Formulation d'Olivier Heaviside (1884)

# Conséquences

- **Prédiction de l'existence d'une onde électromagnétique**
  - la modification de la densité de charge ou de l'intensité du courant a des répercussions à **distance avec un certain retard**.
- Or, la vitesse de ces ondes, **calculée** avec les équations de Maxwell, est égale à la **vitesse de la lumière mesurée expérimentalement**
  - a permis de conclure que la lumière est une onde électromagnétique
- Ces équations concluent que  $c$  est **la même dans toutes les directions et indépendante du référentiel**
  - Un des fondements de la théorie de la relativité restreinte

Télescope Hubble et radio-télescope du Parkes Observatory



# Le spectre électromagnétique

## Longueur d'onde

(période spatiale) :

$$\lambda = c.T = c/f$$

## Fréquences et longueurs d'onde typiques

Radio FM = 100 MHz,  $\lambda \sim 3$  m

AM : 100kHz-10MHz,  $\lambda \sim 30-3000$  m

Micro-ondes : 2,4 GHz

Wifi : 2,4 / 5 GHz,  $\lambda \sim 5-10$  cm

3G : 1,8 GHz,  $\lambda \sim 15$  cm

4G : 2,6 GHz,  $\lambda \sim 10$  cm

5G : 3,5 GHz,  $\lambda \sim 8$  cm

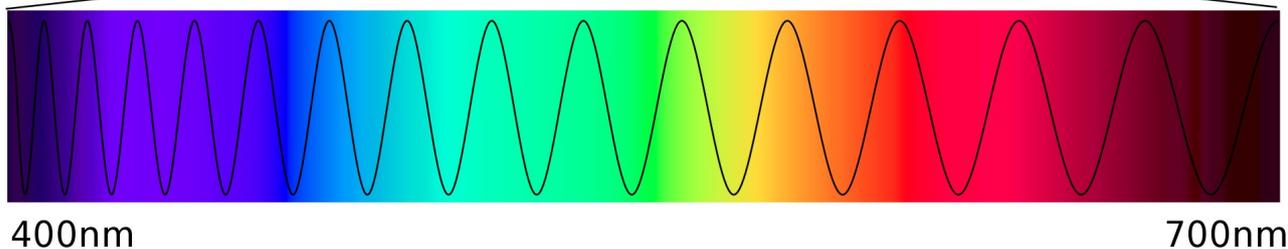
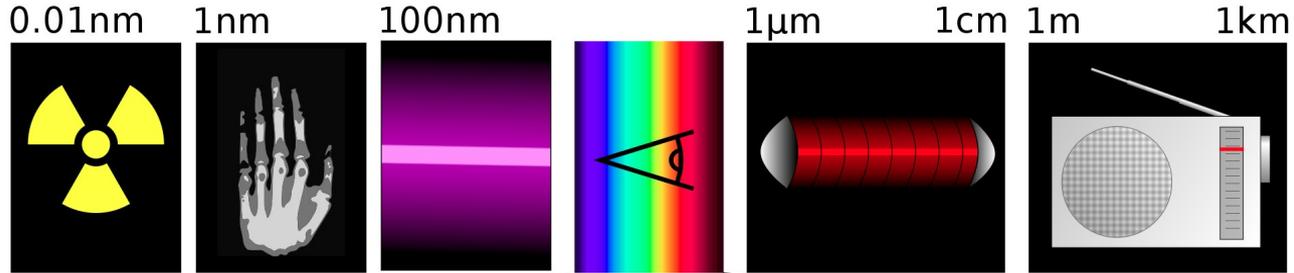
Infrarouge : 3 mm à 700 nm

Lumière visible : 700 nm à 400 nm

Ultraviolet : 400 nm à 10 nm

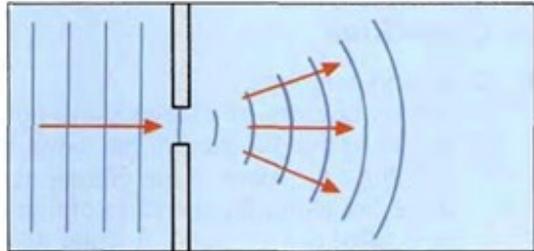
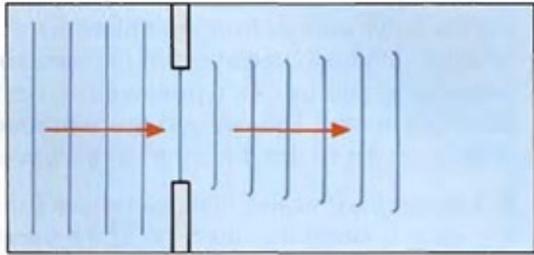
rayons X : 10 nm à 10 pm

rayon  $\gamma$  :  $< 10$  pm



# Diffraction

La **diffraction** a lieu lorsqu'une onde rencontre un obstacle ou une ouverture de faibles dimensions

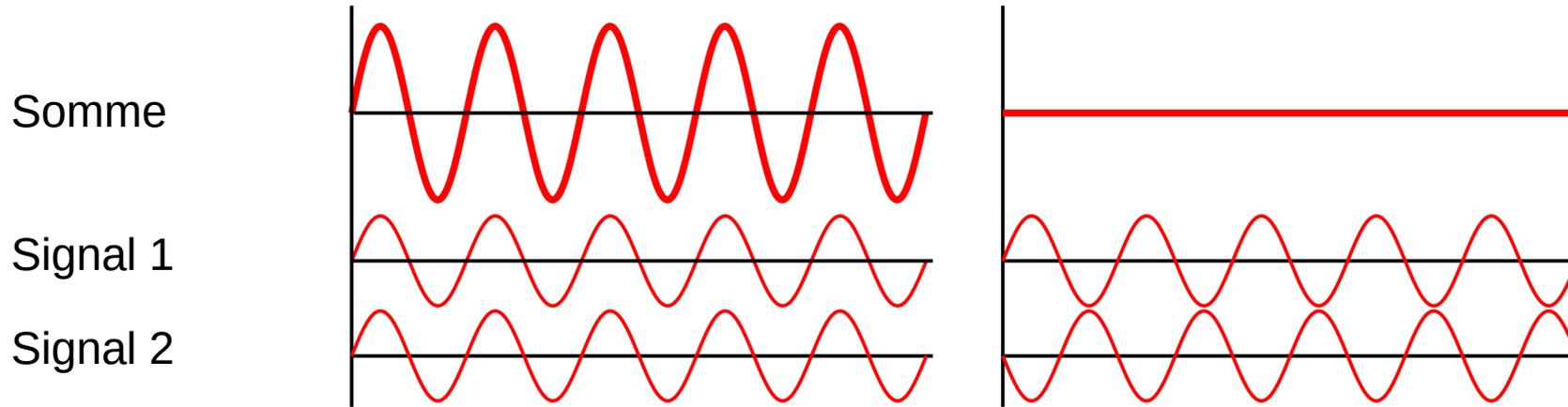


[frazerphysics.blogspot.com](http://frazerphysics.blogspot.com)

<https://tpevagues.weebly.com/diffraction-des-ondes.html>

# Interférences lumineuses

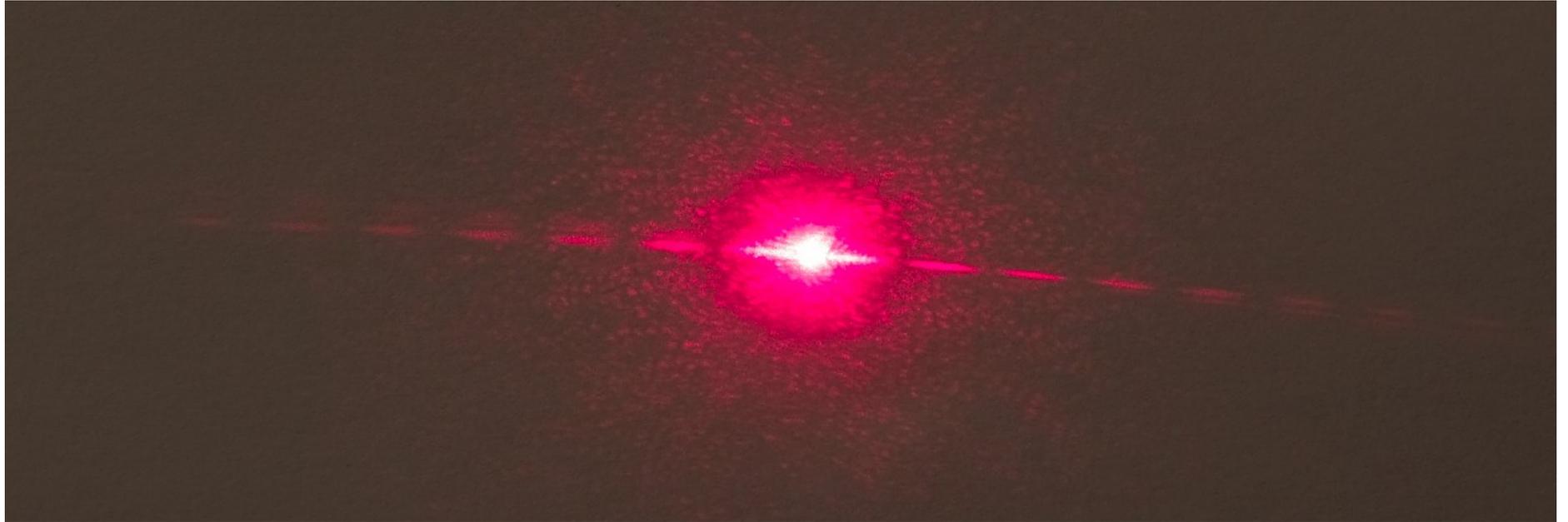
- Deux intensités lumineuses peuvent s'additionner
- En raison de la **nature ondulatoire** de la lumière, deux signaux lumineux cohérents en « **opposition de phase** » peuvent s'« **annuler** »



- Cela fonctionne également avec
  - des ondes sonores (casque à réduction de bruit)
  - des photons/électrons...

# Diffraction par un cheveu

- Réalisable chez soi avec un pointeur laser



→ Mesure du diamètre d'un cheveu ( $\sim 75 \mu\text{m}$ )

# Les ondes gravitationnelles

- Ondes de **déformation de l'espace-temps**
- Prédites en 1916 par la relativité générale
- Détection :
  - Effets mesurés dans les années 70-80 (PSR 1913+16 Prix Nobel 1993)
  - Directe en 2015 (Prix Nobel 2017)

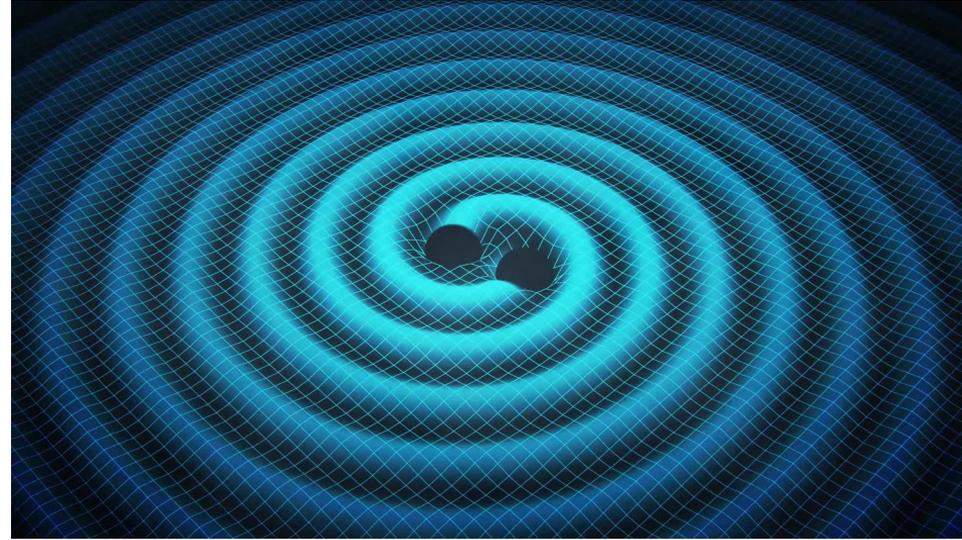
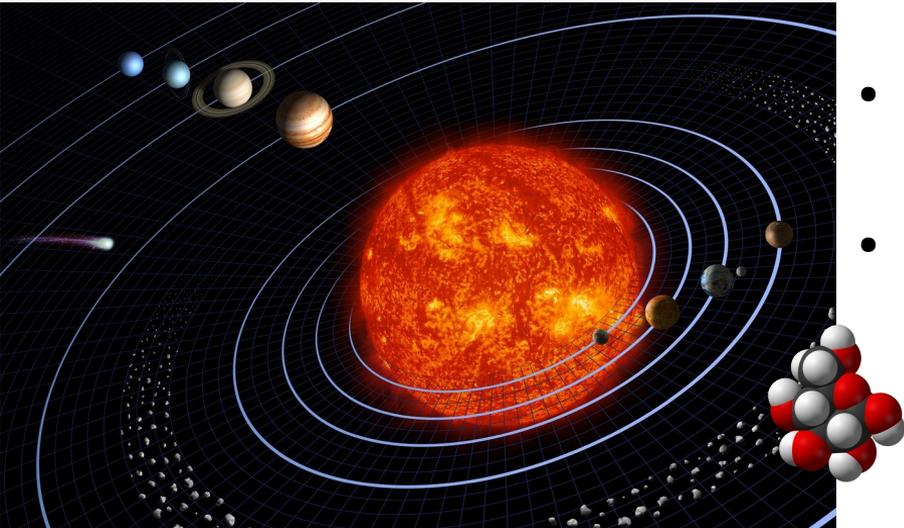


Image : Virgo



- Générées par des mouvements asymétriques de matière
- Modifient relativement la mesure du temps et de l'espace sur leur passage
  - Ordre de grandeur :  $10^{-20}$  → déformation de  $\pm 1 \times 10^{-9}$  m de la distance Terre-Soleil (150 Mkm) 16