

Physique ondulatoire (2 hours)

Joaquín Bermejo Ortiz

I. Introduction à la physique ondulatoire

- Notion de périodicité
- Transformé de Fourier
- Types d'ondes

II. Ondes mécaniques

- Qu'est-ce que le son?
- Les ondes de choc

III. Ondes électromagnétiques

- Contexte historique
- Qu'est-ce que la lumière?
- Le spectre électromagnétique

I. Introduction à la physique ondulatoire

- Notion de périodicité
- Transformé de Fourier
- Types d'ondes

II. Ondes mécaniques

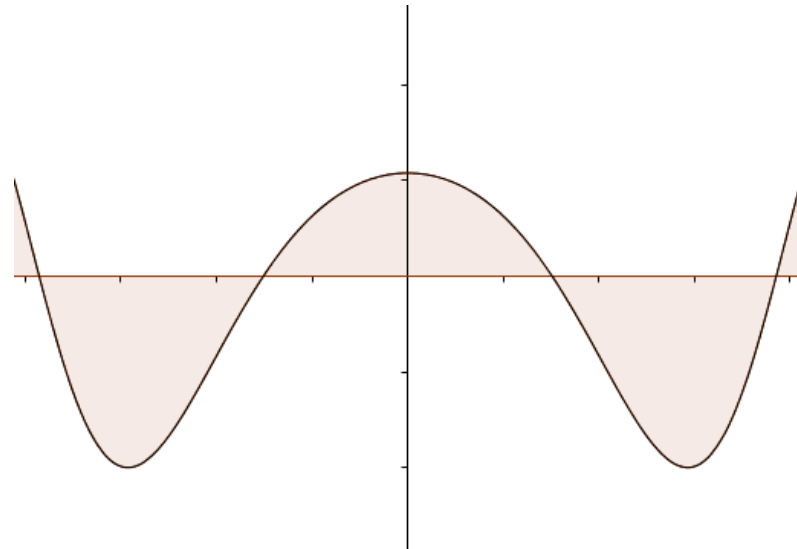
- Qu'est-ce que le son?
- Les ondes de choc

III. Ondes électromagnétiques

- Contexte historique
- Qu'est-ce que la lumière?
- Le spectre électromagnétique

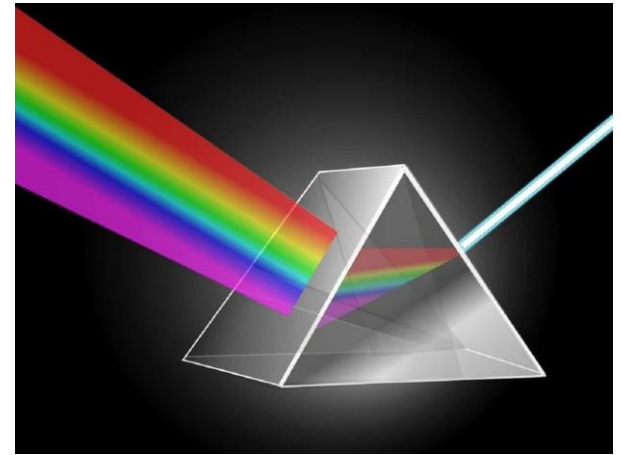
Qu'est-ce qu'une onde? Définition

- Une onde est une perturbation qui se propage à travers un milieu, transférant de l'énergie sans déplacement de matière
- Elle se déplace avec une vitesse déterminée qui dépend des caractéristiques du milieu de propagation



Qu'est-ce qu'une onde? Exemples quotidiens

- Les vagues à la surface de l'eau
- Le son qui se propage dans l'air
- La lumière

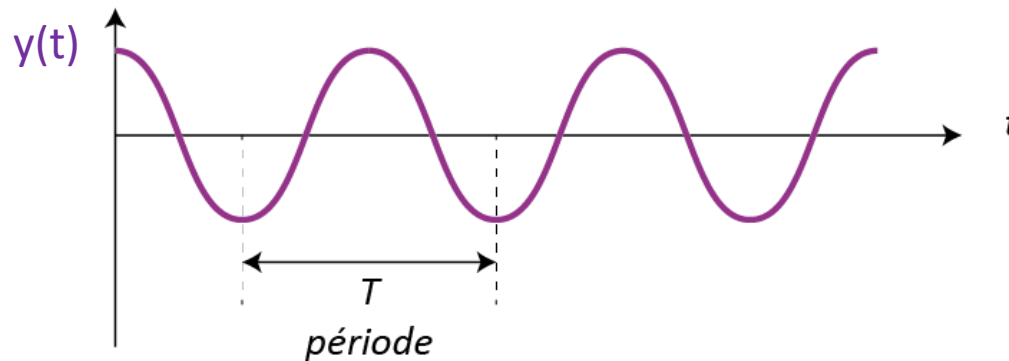


Qu'est-ce qu'une onde? Périodicité spatiale et temporelle

$$y_r(x, t) = y_0 \cos[2\pi(x/\lambda - ft)]$$

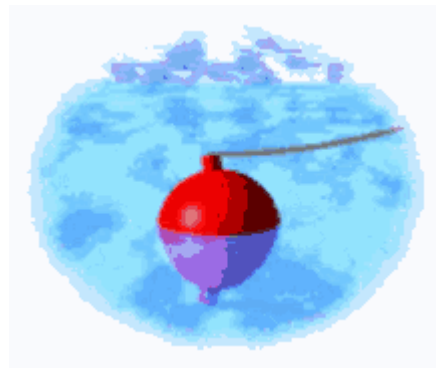
- Périodicité: phénomène qui se répète à intervalles réguliers dans le temps ou dans l'espace

grandeur vibratoire en **un point du milieu**



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

- Ex: Bouée en mer en fonction du temps

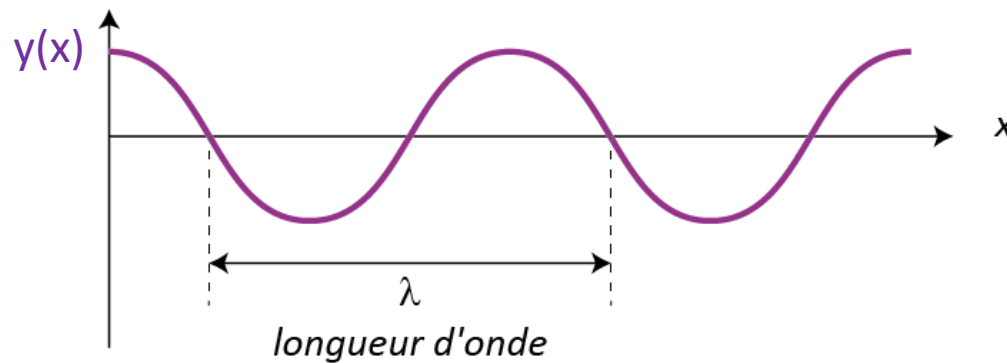


Qu'est-ce qu'une onde? Périodicité spatiale et temporelle

$$y_r(x, t) = y_0 \cos[2\pi(x/\lambda - ft)]$$

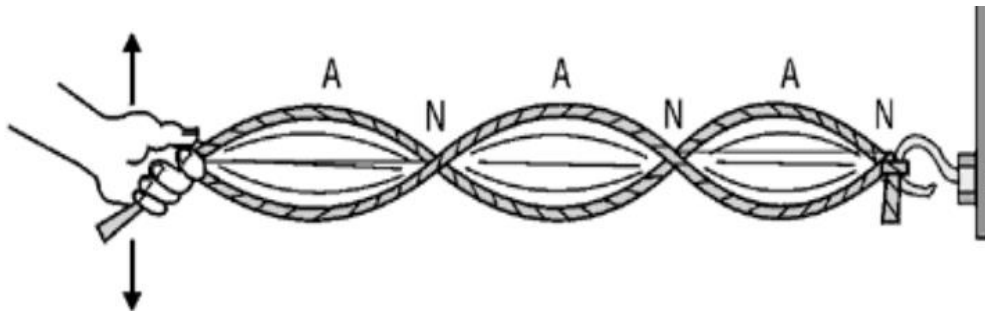
- Périodicité: phénomène qui se répète à intervalles réguliers dans le temps ou dans l'espace

grandeur vibratoire **à un instant donné**



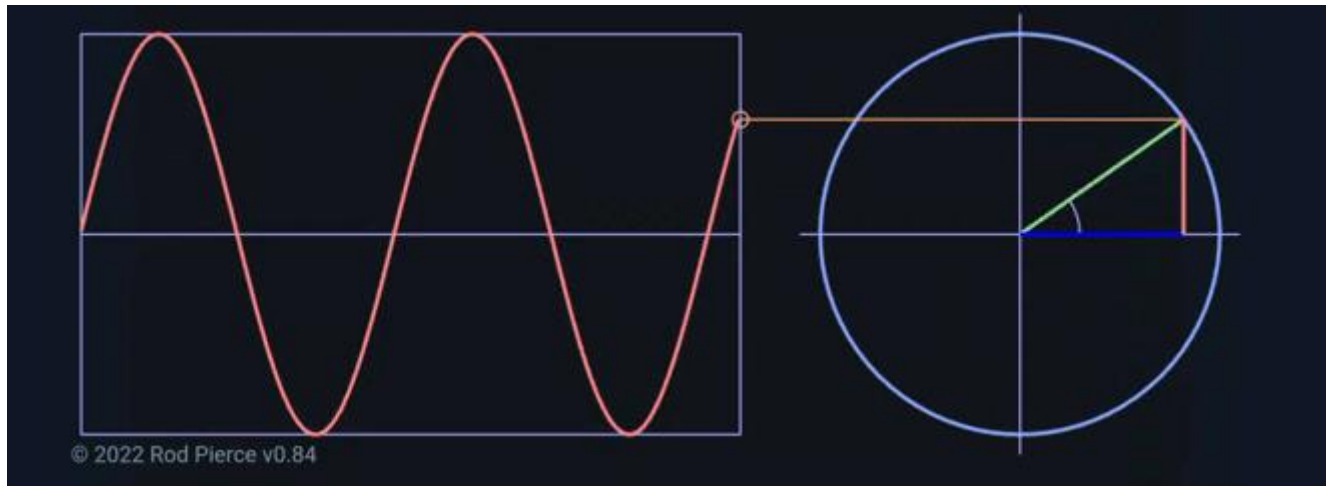
$$S = \frac{1}{\lambda}$$

- Ex: Une photo à un instant donnée d'une corde tendue



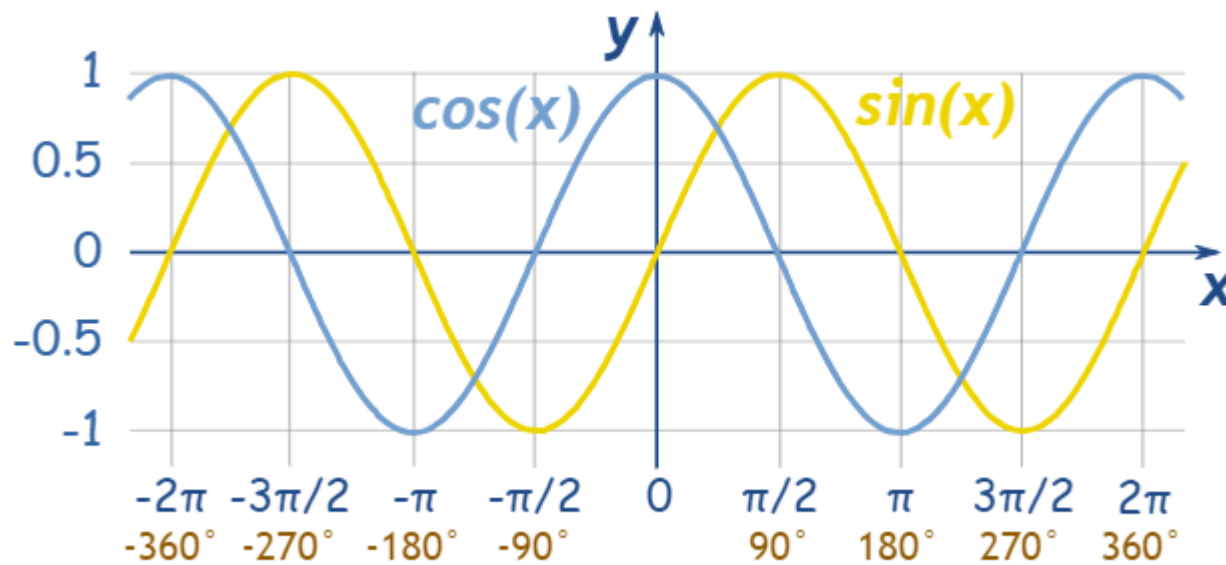
Qu'est-ce qu'une onde? fonctionnes périodiques

Sine wave made by a circle



Crédits: mathsisfun

Qu'est-ce qu'une onde? fonctionnes périodiques



Qu'est-ce qu'une onde? Analyse de Fourier

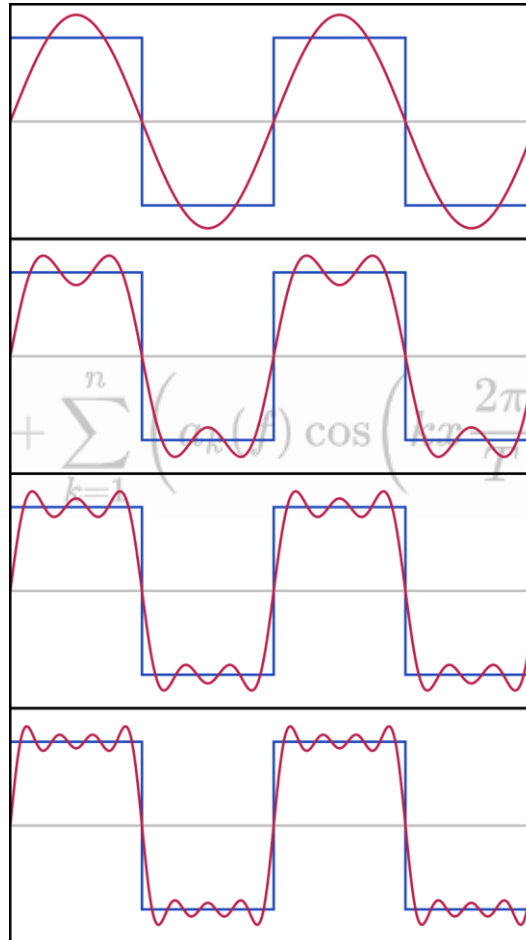
- (Presque) toute fonction périodique peut être exprimée comme une somme de cosinus et de sinus, les harmoniques

$$S_n(f(x)) = \frac{1}{2}a_0(f) + \sum_{k=1}^n \left(a_k(f) \cos\left(kx \frac{2\pi}{T}\right) + b_k(f) \sin\left(kx \frac{2\pi}{T}\right) \right)$$

Qu'est-ce qu'une onde? Analyse de Fourier

- (Presque) toute fonction périodique peut être exprimée comme une somme de cosinus et de sinus, les harmoniques

$$S_n(f(x)) = \frac{1}{2}a_0(f) + \sum_{k=1}^n \left(a_k(f) \cos\left(kx \frac{2\pi}{T}\right) + b_k(f) \sin\left(kx \frac{2\pi}{T}\right) \right)$$

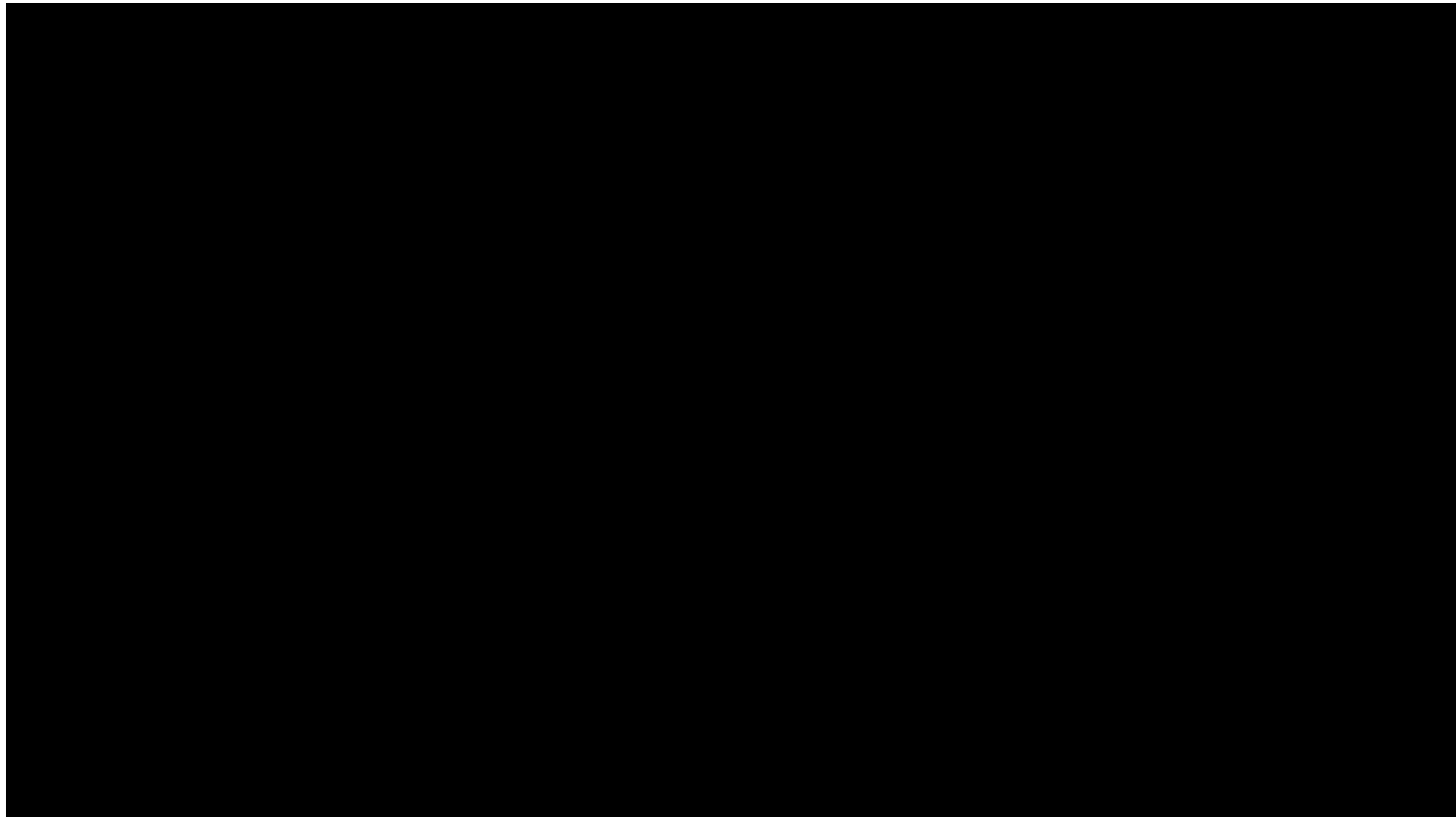


Les quatre premières sommes partielles de la série de Fourier pour un signal carré

Qu'est-ce qu'une onde? Analyse de Fourier

- (Presque) toute fonction périodique peut être exprimée comme une somme de cosinus et de sinus, les harmoniques

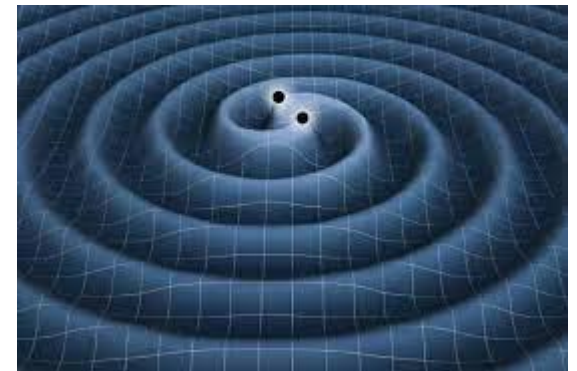
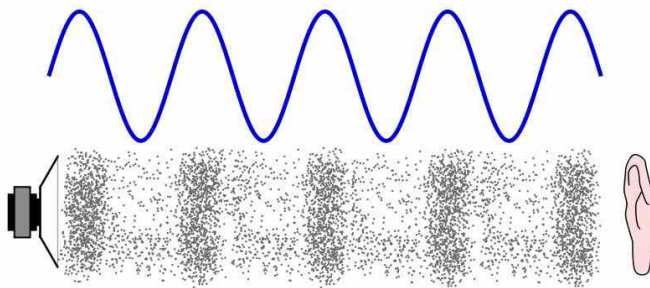
Applications: traitement du signal. Par exemple, compression audio (MP3)



Crédits: *Peter Selinger, Youtube*

Trois types d'onde

- Ondes mécaniques: nécessitent un milieu physique
- Les ondes électromagnétiques: ne nécessitent pas de support physique
Lumière, rayon x, ondes wifi, l'Infrarouge...
- Les ondes gravitationnelles: déformations de la géométrie de l'espace-temps



I. Introduction à la physique ondulatoire

- Notion de périodicité
- Transformé de Fourier
- Types d'ondes

II. Ondes mécaniques

- Qu'est-ce que le son?
- Les ondes de choc

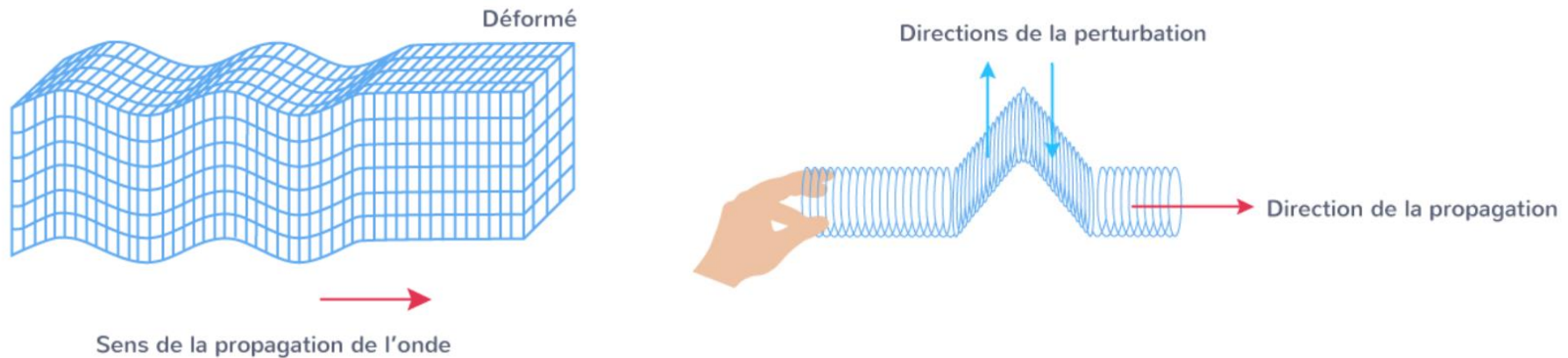
III. Ondes électromagnétiques

- Contexte historique
- Qu'est-ce que la lumière?
- Le spectre électromagnétique

Les ondes mécaniques: ondes longitudinales vs transversales

- Propagation d'une perturbation locale dans un milieu matériel

Ondes transversales

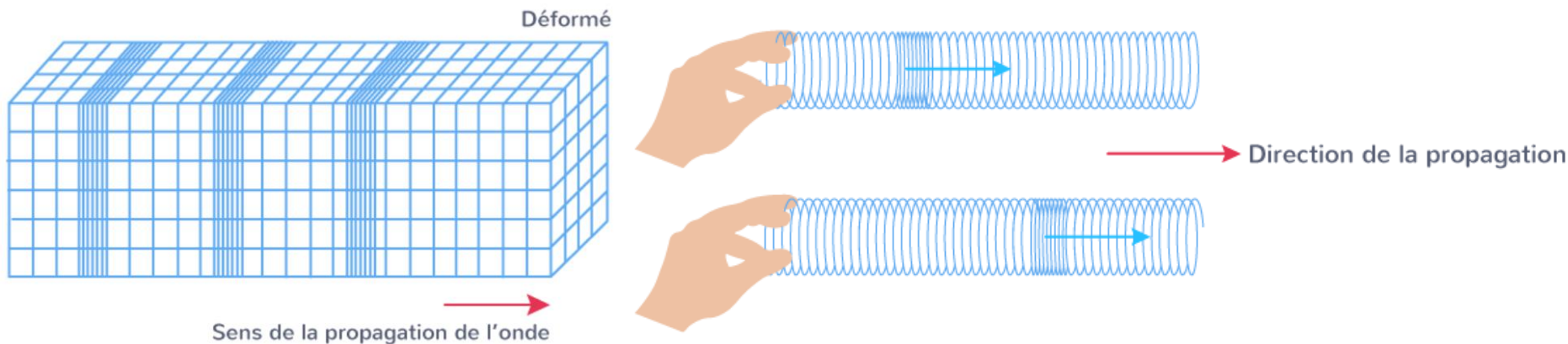


- Le mouvement d'une corde tendue entre deux points fixes

Les ondes mécaniques: ondes longitudinales vs transversales

- Propagation d'une perturbation locale dans un milieu matériel

Ondes longitudinales

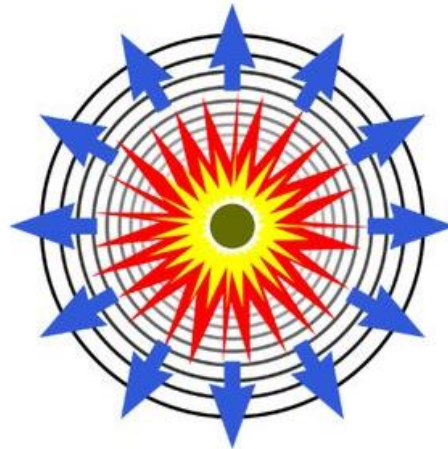


- Propagation d'une onde sur un ressort tendu
- Onde produite par le relâchement brutal d'un élastique étiré
- Propagation d'un son

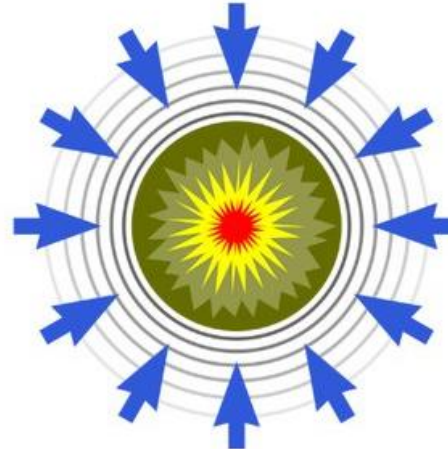
Les ondes mécaniques: qu'est-ce que le son?

- Vibration mécanique d'un fluide, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce fluide
- **Émission**

Explosión

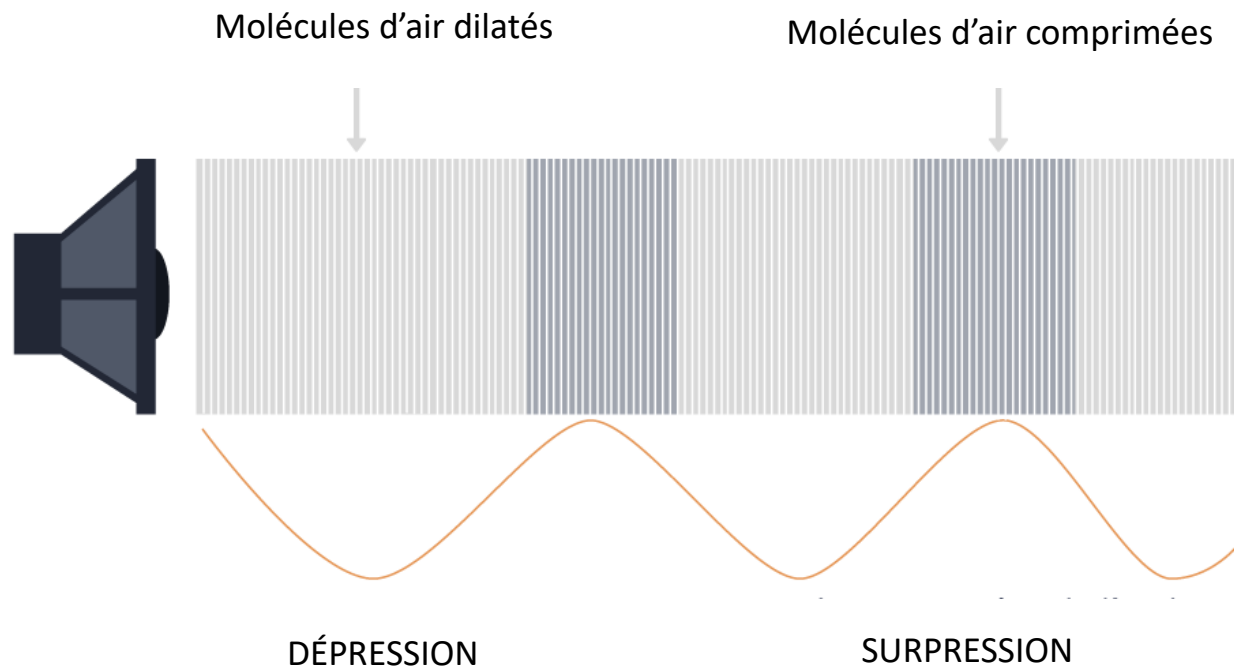


Implosión



Les ondes mécaniques: qu'est-ce que le son?

- Vibration mécanique d'un fluide, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce fluide
- **Propagation**
 - Les variations de la pression de l'air constituent le son



Les ondes mécaniques: qu'est-ce que le son?

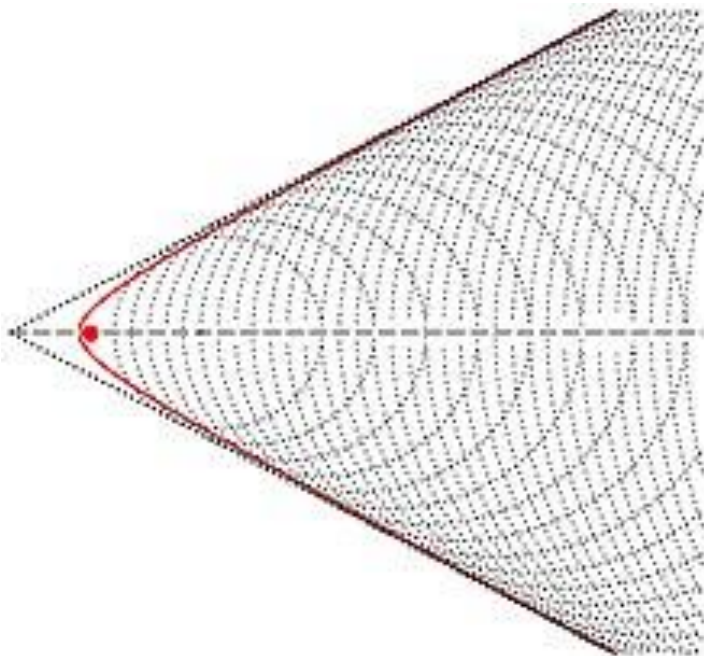
- Vibration mécanique d'un fluide, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce fluide
- **Propagation**
 - Les variations de la pression de l'air constituent le son
 - **Le son ne se propage pas dans le vide**

Milieu	Vitesse du son
Vide	0
Air	340 m/s
Eau	1450 m/s
Glace	3200 m/s
Verre	5300 m/s
Acier	5750 m/s

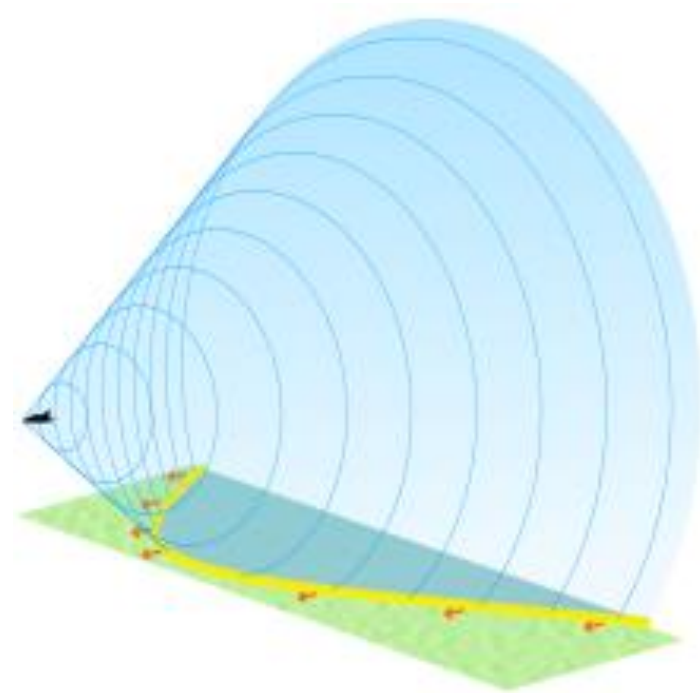
Les ondes mécaniques: qu'est-ce que le son?

Le bang supersonique

$$M = \frac{v_0}{v_s} \quad M > 1 \quad \theta_M = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right)$$



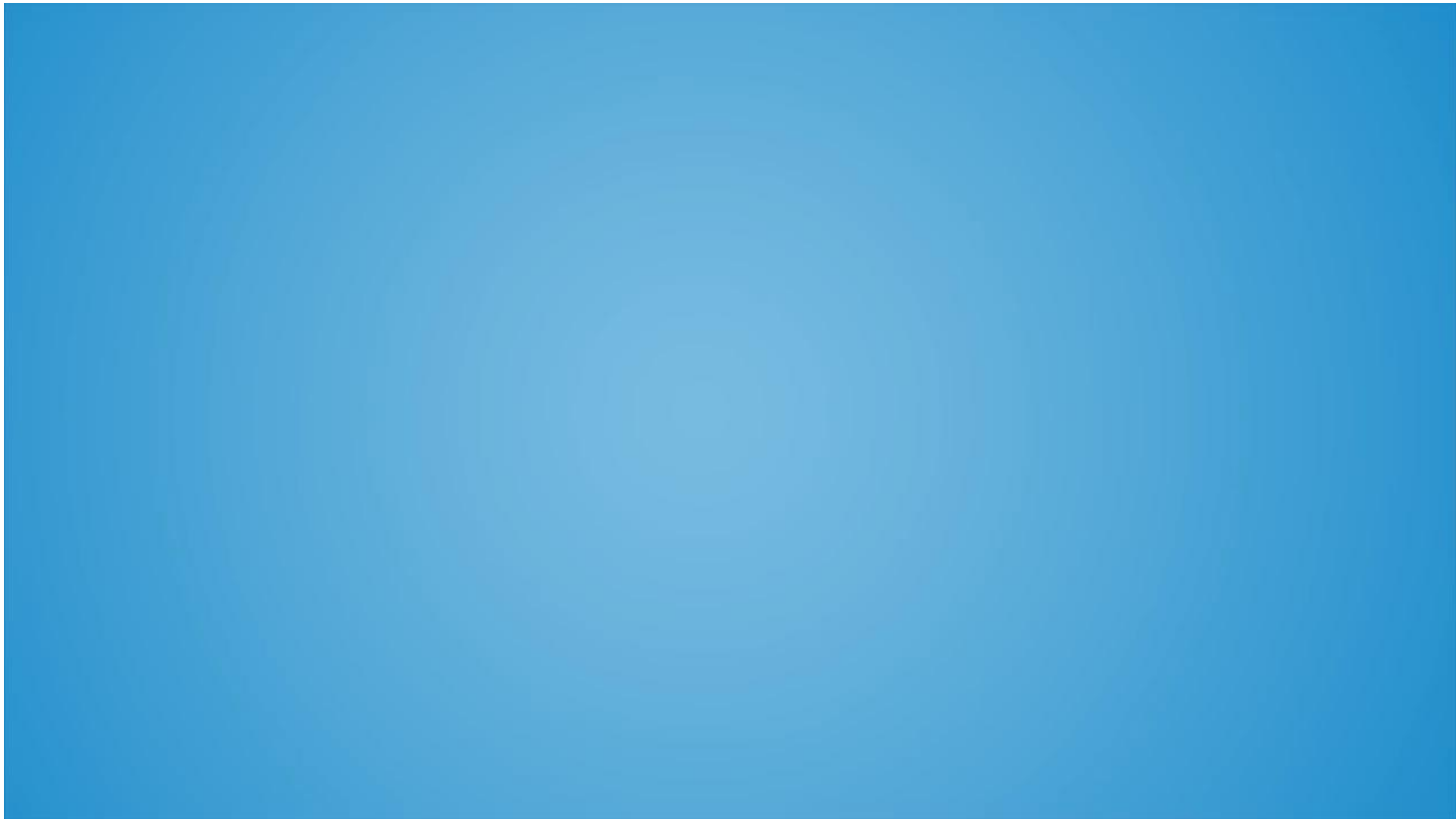
Écoulement autour d'une sphère à $M=2$
Onde de choc et cône de Mach



Balayage du sol par une onde de Mach (hyperbole)

Les ondes mécaniques: qu'est-ce que le son?

Le bang supersonique



Crédits: Sciences et avenir

I. Introduction à la physique ondulatoire

- Notion de périodicité
- Transformé de Fourier
- Types d'ondes

II. Ondes mécaniques

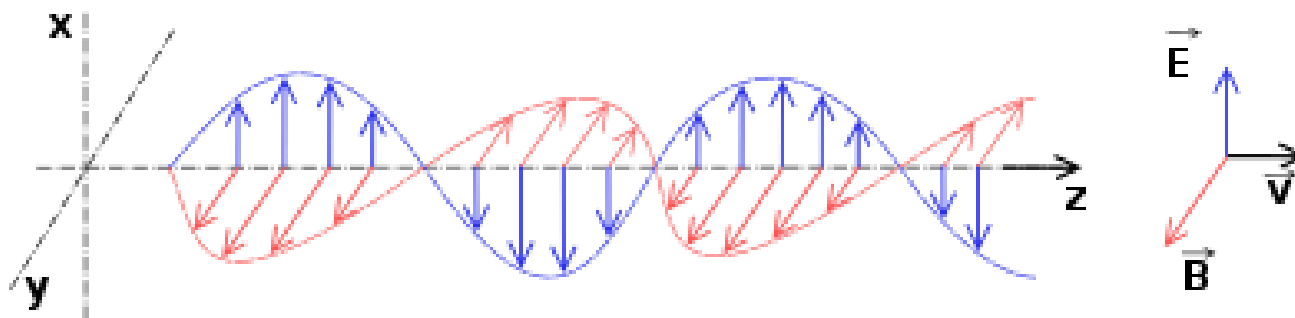
- Qu'est-ce que le son?
- Les ondes de choc

III. Ondes électromagnétiques

- Contexte historique
- Qu'est-ce que la lumière?
- Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques: la lumière comme une onde

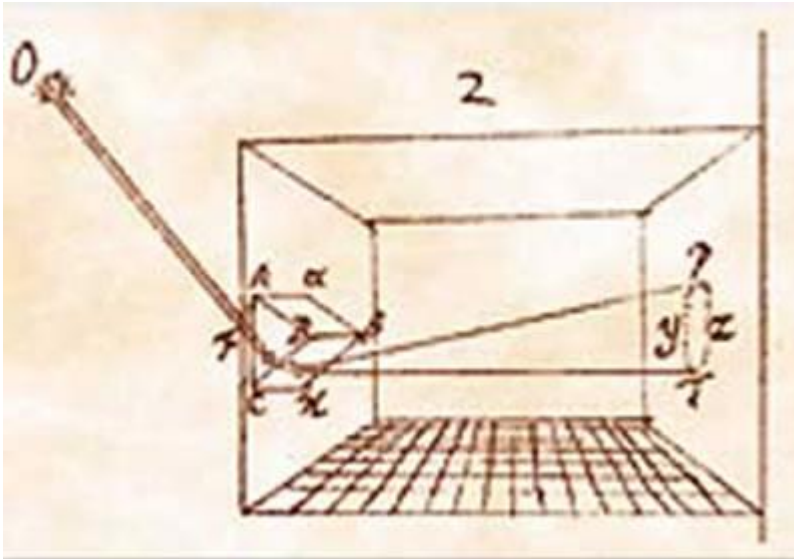
- Une onde électromagnétique est un modèle utilisé pour représenter les rayonnements électromagnétiques
- Il faut distinguer le phénomène (le rayonnement) du modèle (les ondes)
- Un autre modèle (quantique) considère la lumière comme de corpuscules, les photons



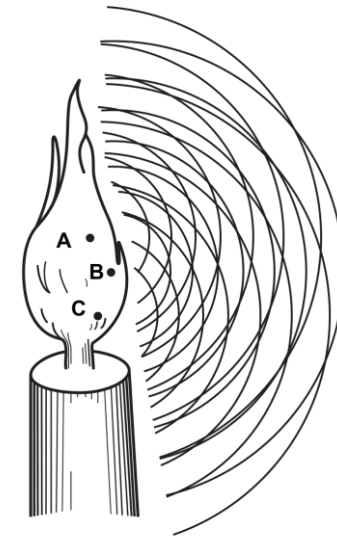
Les ondes électromagnétiques: contexte historique

Aux années 1670...

- Théorie corpusculaire de la matière... Isaac Newton
- Théorie ondulatoire de la lumière... Christian Huygens (réflexion et réfraction)



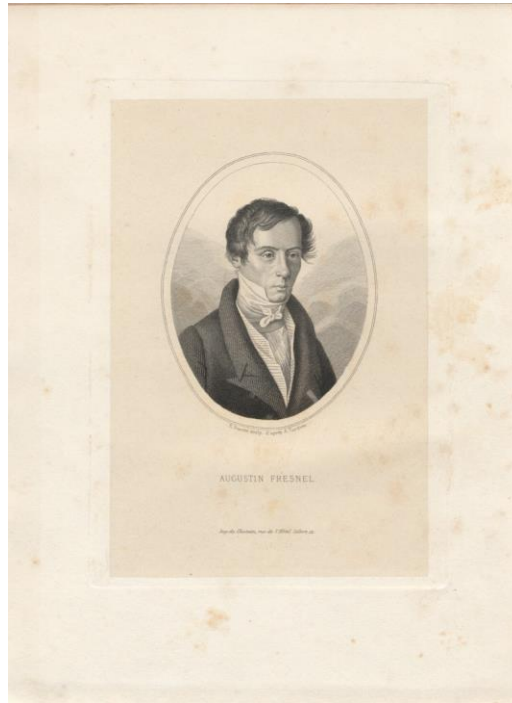
Dessin attribué à Newton. Un prisme est placé contre la fenêtre, et la tâche oblongue est observée sur le mur à droite



Origine des ondes lumineuses selon Christian Huygens

Les ondes électromagnétiques: contexte historique

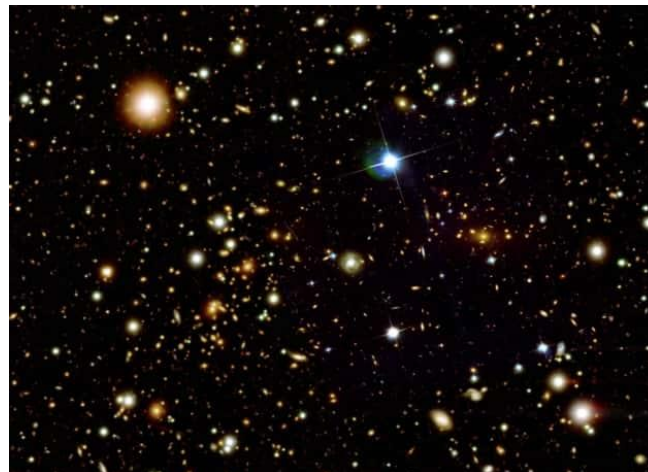
- Augustin Fresnel (1788-1827) développe la théorie ondulatoire (interférence et longueur d'onde)



Oeuvres complètes, 1866

Les ondes électromagnétiques: contexte historique

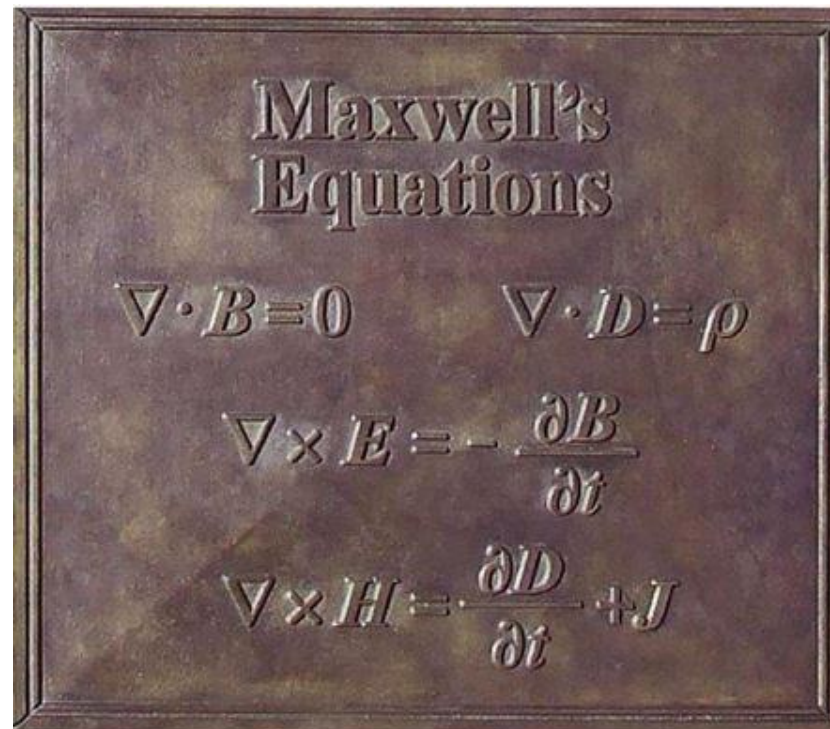
- La notion de la lumière comme ondulation incite les physiciens à imaginer un milieu de propagation, l'éther
- éther (Larousse): Milieu matériel hypothétique, remplissant tout l'espace mais impalpable, dans lequel les ondes lumineuses étaient censées se propager. (La notion d'éther a joué un rôle important dans l'élaboration de la théorie des phénomènes électromagnétiques. La théorie de la relativité restreinte a rendu inutile cette hypothèse ad hoc)



Les ondes électromagnétiques: contexte historique

Équations de Maxwell

- Ensembles d'équations introduits par James Clerk Maxwell au XIXe siècle pour formuler mathématiquement le rayonnement électromagnétique comme des ondes



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

Les ondes électromagnétiques: contexte historique

Équations de Maxwell

- Maxwell- Gauss: le champ électrique autour d'une charge électrique est plus fort là où il y a plus de charge, et plus faible là où il y en a moins

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

- Maxwell-Thomson: il n'y a pas de sources magnétiques monopôles (contrairement aux charges électriques)

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

- Maxwell-Faraday: la variation du champ magnétique crée un champ électrique

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

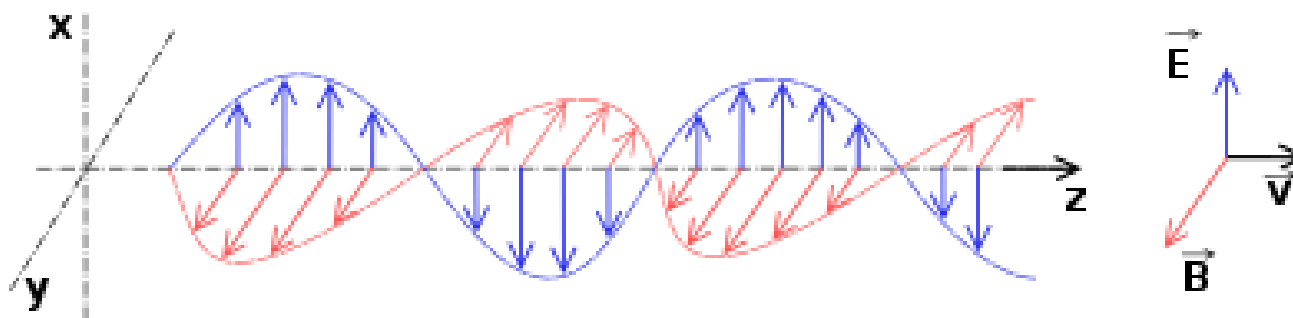
- Maxwell-Ampère: il n'y a pas de sources magnétiques monopôles (contrairement aux charges électriques)

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

Les ondes électromagnétiques: contexte historique

Équations de Maxwell

- Les ondes électromagnétiques sont formées par la combinaison de deux champs : un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires l'un à l'autre

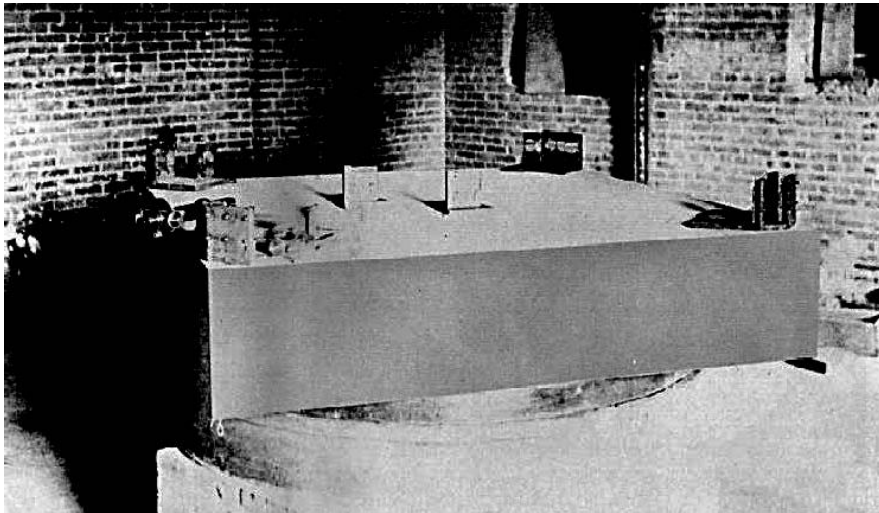


- Les ondes électromagnétiques se déplacent à travers l'espace transportant de l'énergie d'un point à un autre

Les ondes électromagnétiques: contexte historique

L'expérience de Michelson et Morley (1881-1887)

- Albert A. Michelson et Edward W. Morley cherchent à détecter le mouvement de la Terre à travers l'éther



L'interféromètre utilisé par Michelson et Morley en 1887

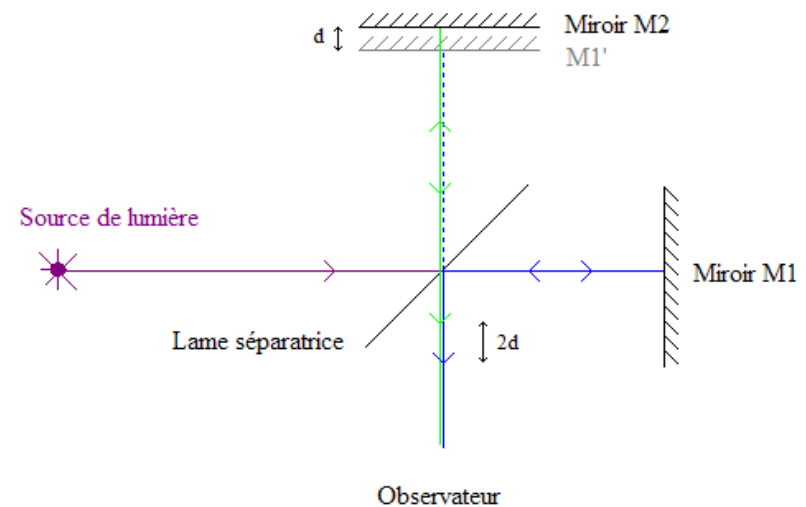


Illustration de l'expérience de Michelson-Morley

- La vitesse de la lumière (3×10^8 m/s) est indépendante de la direction de déplacement à travers l'éther
 → L'éther n'existe pas et les ondes électromagnétiques se déplacent dans le vide

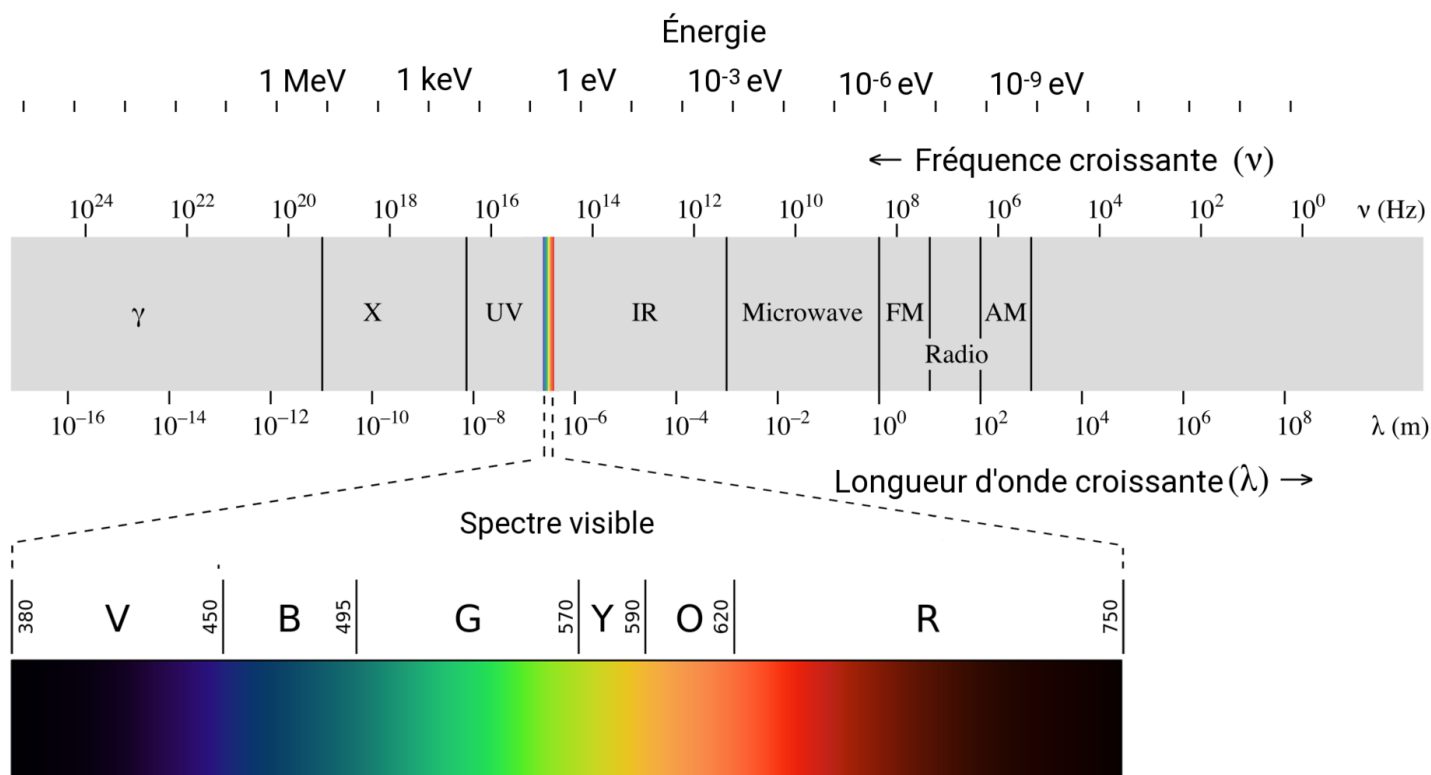
Les ondes électromagnétiques: contexte historique



La Fée Electricité, Raoul Dufy, 1901, Musée d'art moderne de Paris

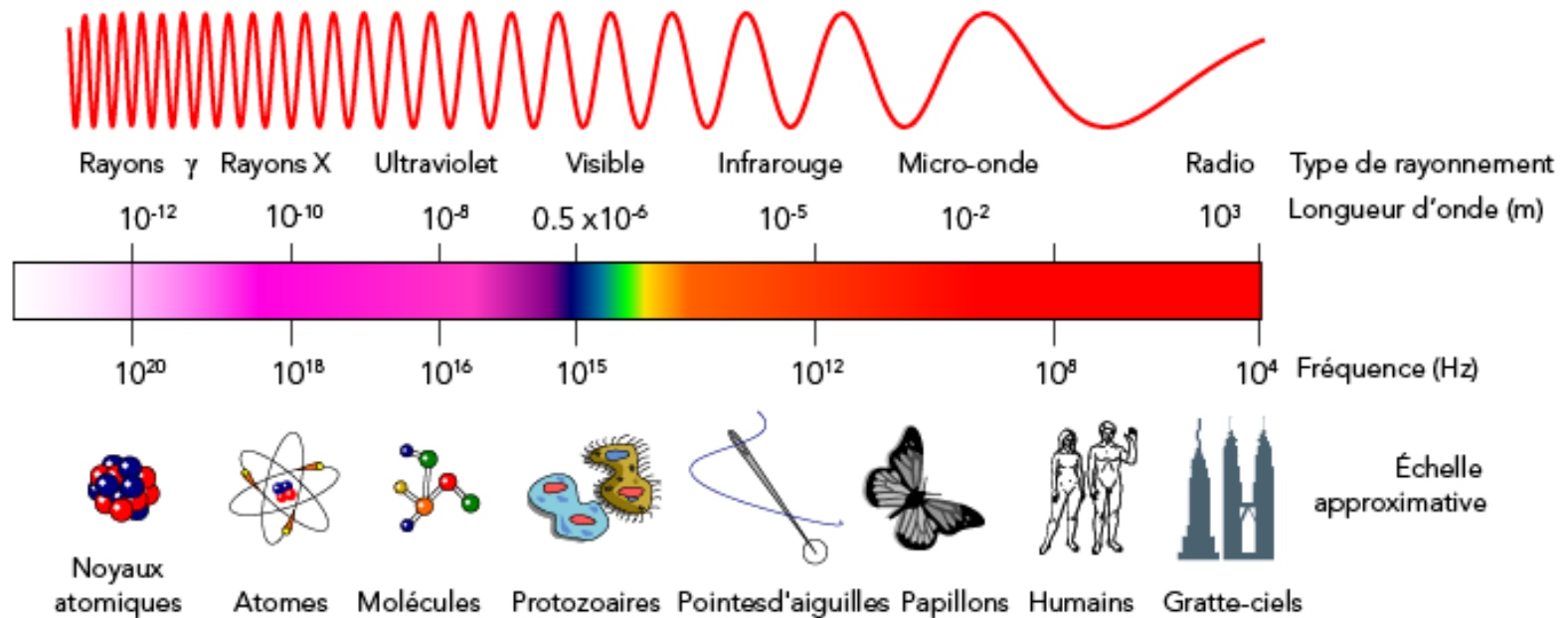
Les ondes électromagnétiques: qu'est-ce que la lumière?

- La lumière visible n'est qu'une très petite fraction de tout le spectre électromagnétique



Les ondes électromagnétiques

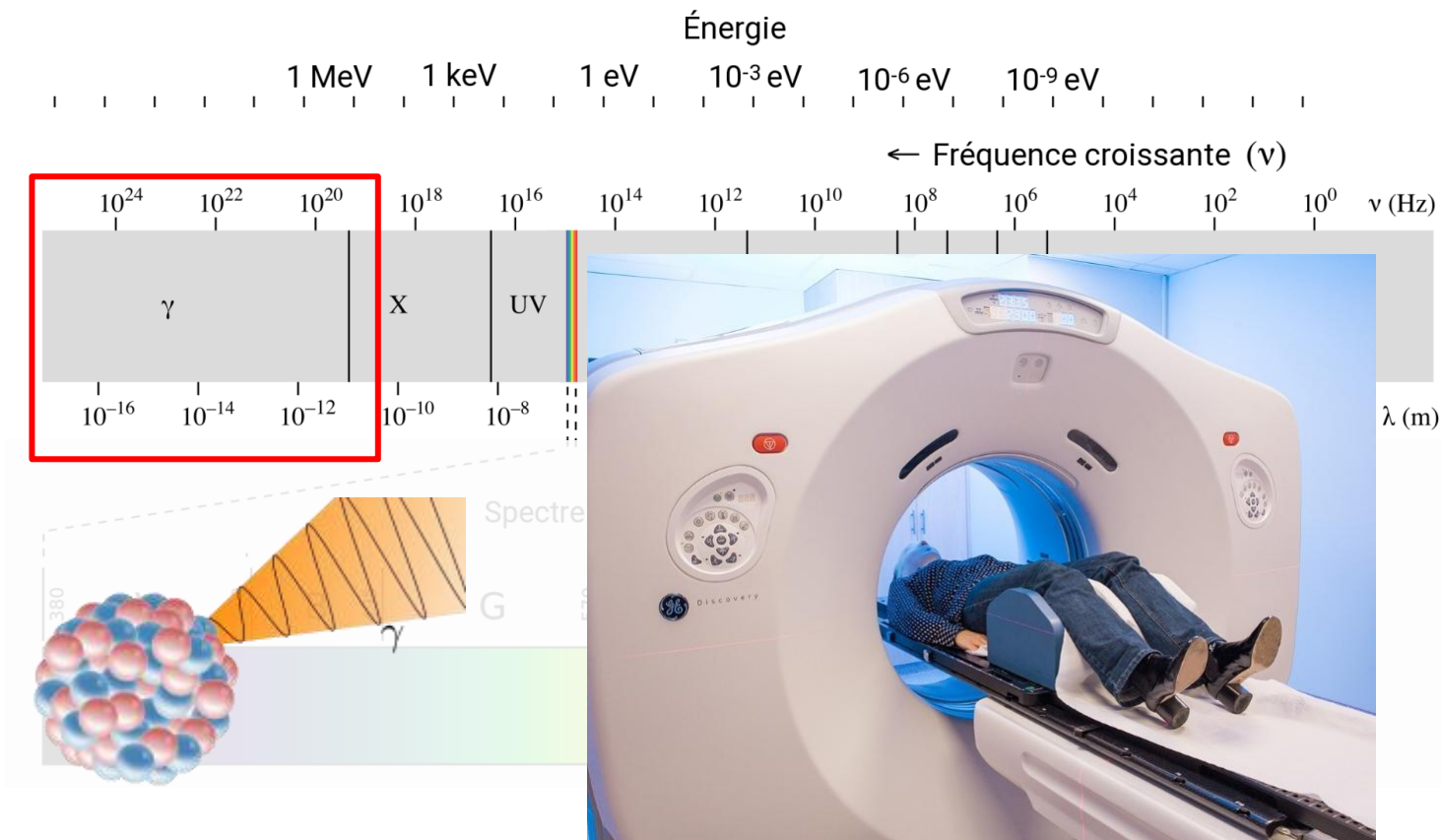
Le reste du spectre électromagnétique



Les ondes électromagnétiques

Les ondes gamma

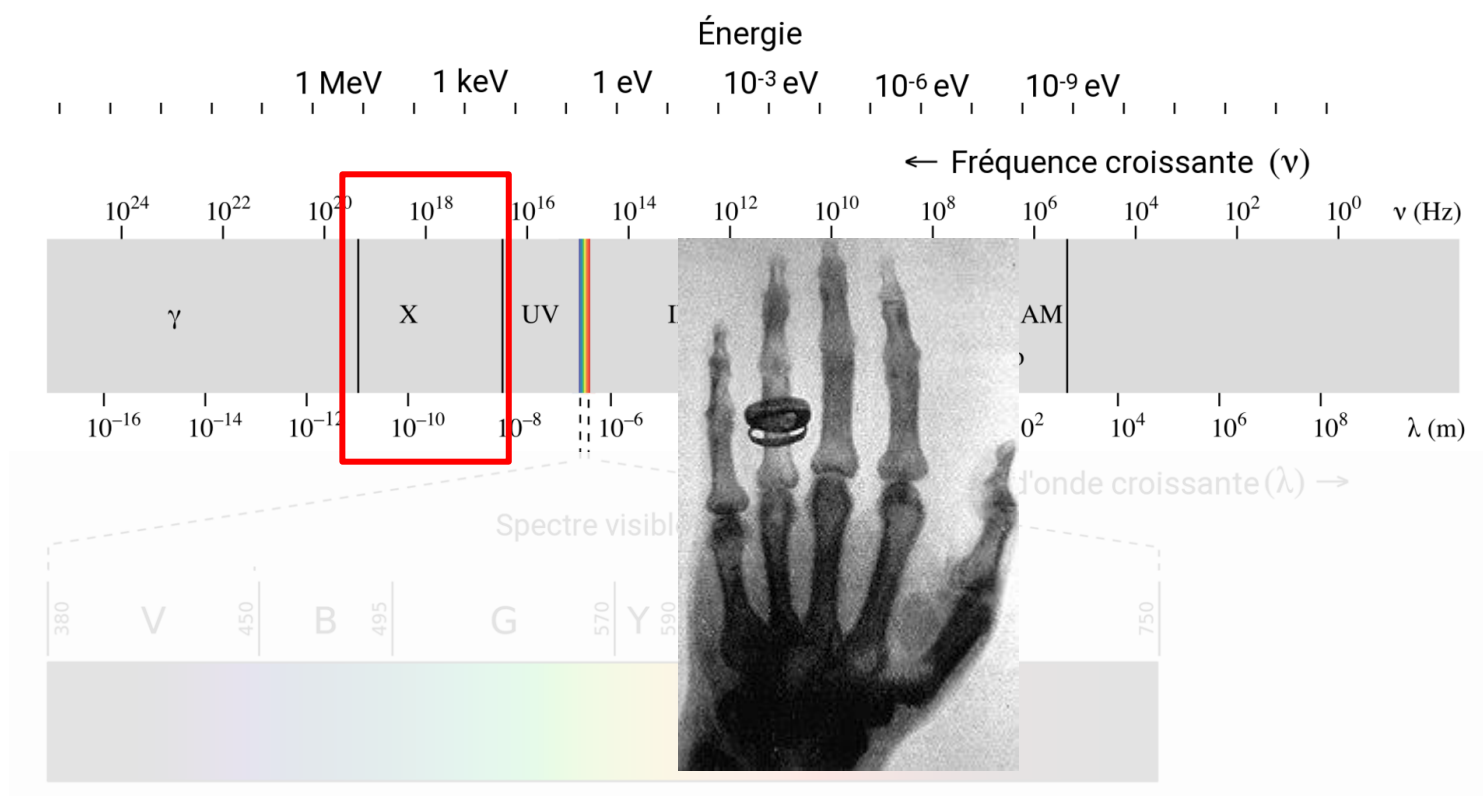
- **Traitement du cancer :** Les rayons gamma sont utilisés en radiothérapie pour traiter certains types de cancers



Les ondes électromagnétiques

Les rayons x

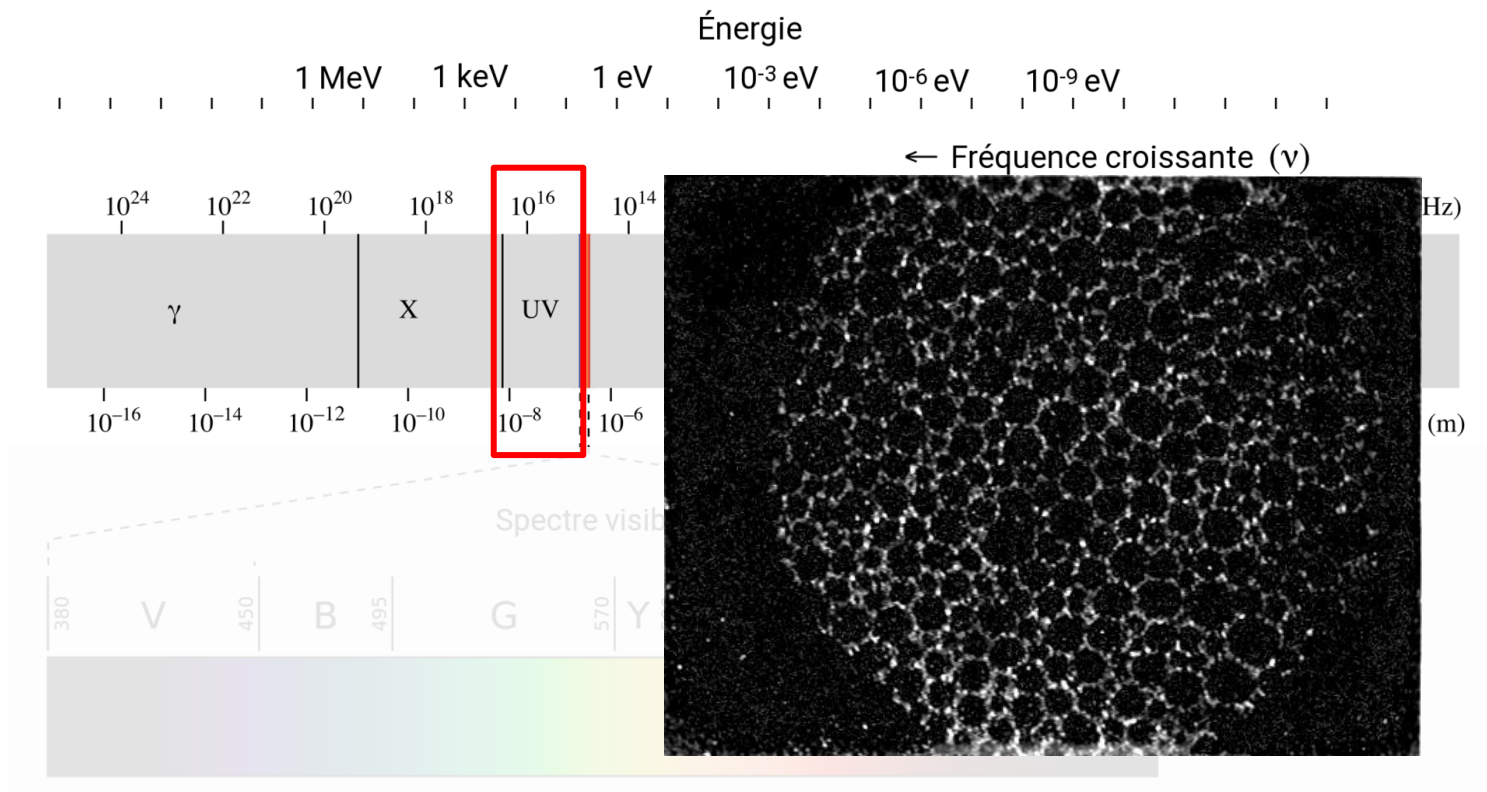
- **Imagerie médicale** : Les rayons X sont utilisés pour produire des images internes du corps humain, notamment dans les radiographies



Les ondes électromagnétiques

Ultraviolet (UV)

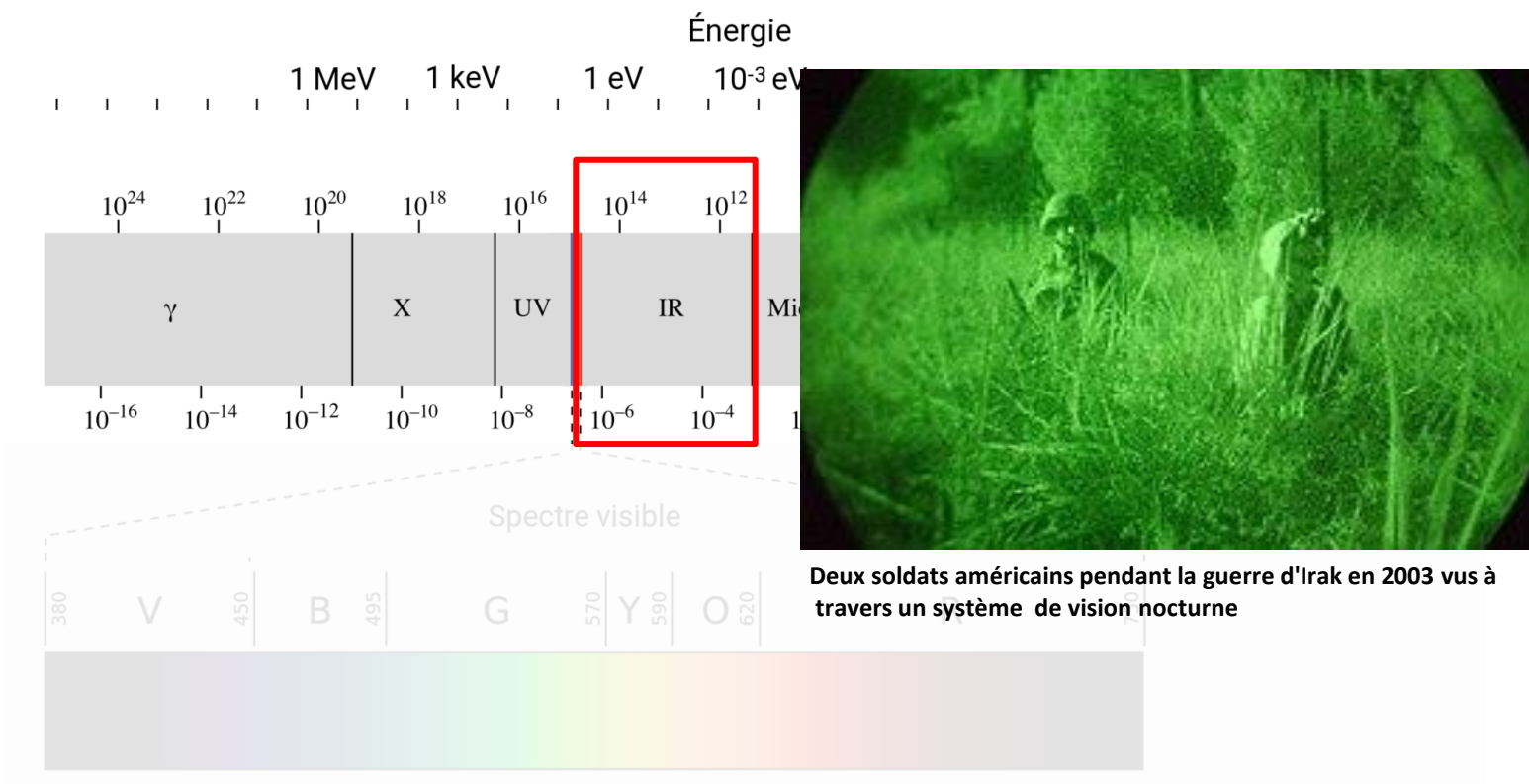
- **Microscopie à fluorescence:** émission lumineuse provoquée par l'excitation des électrons d'une molécule



Les ondes électromagnétiques

L'infrarouge

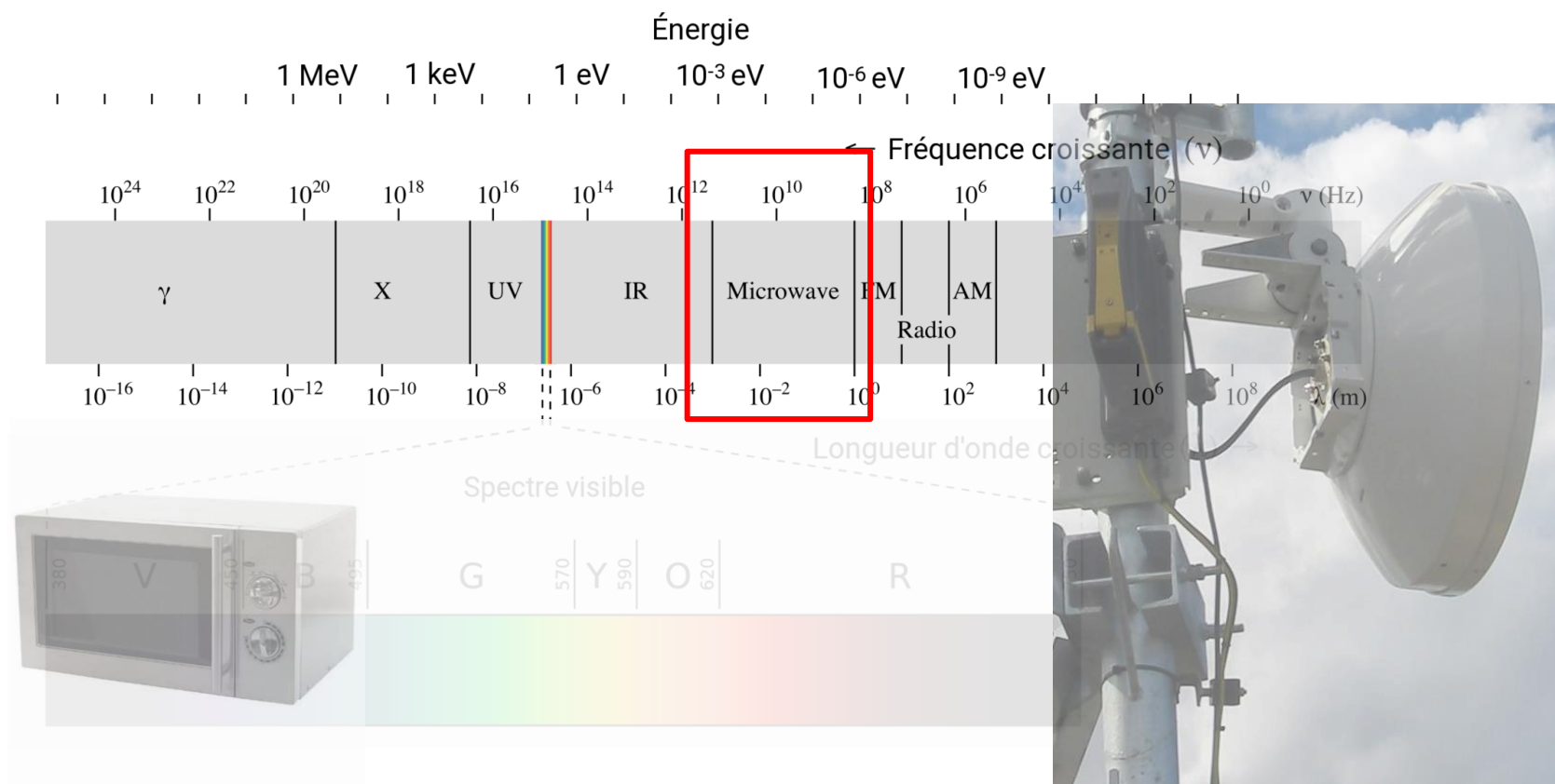
- **Vision nocturne:** des instruments optiques permettant de voir dans l'obscurité



Les ondes électromagnétiques

Micro-ondes

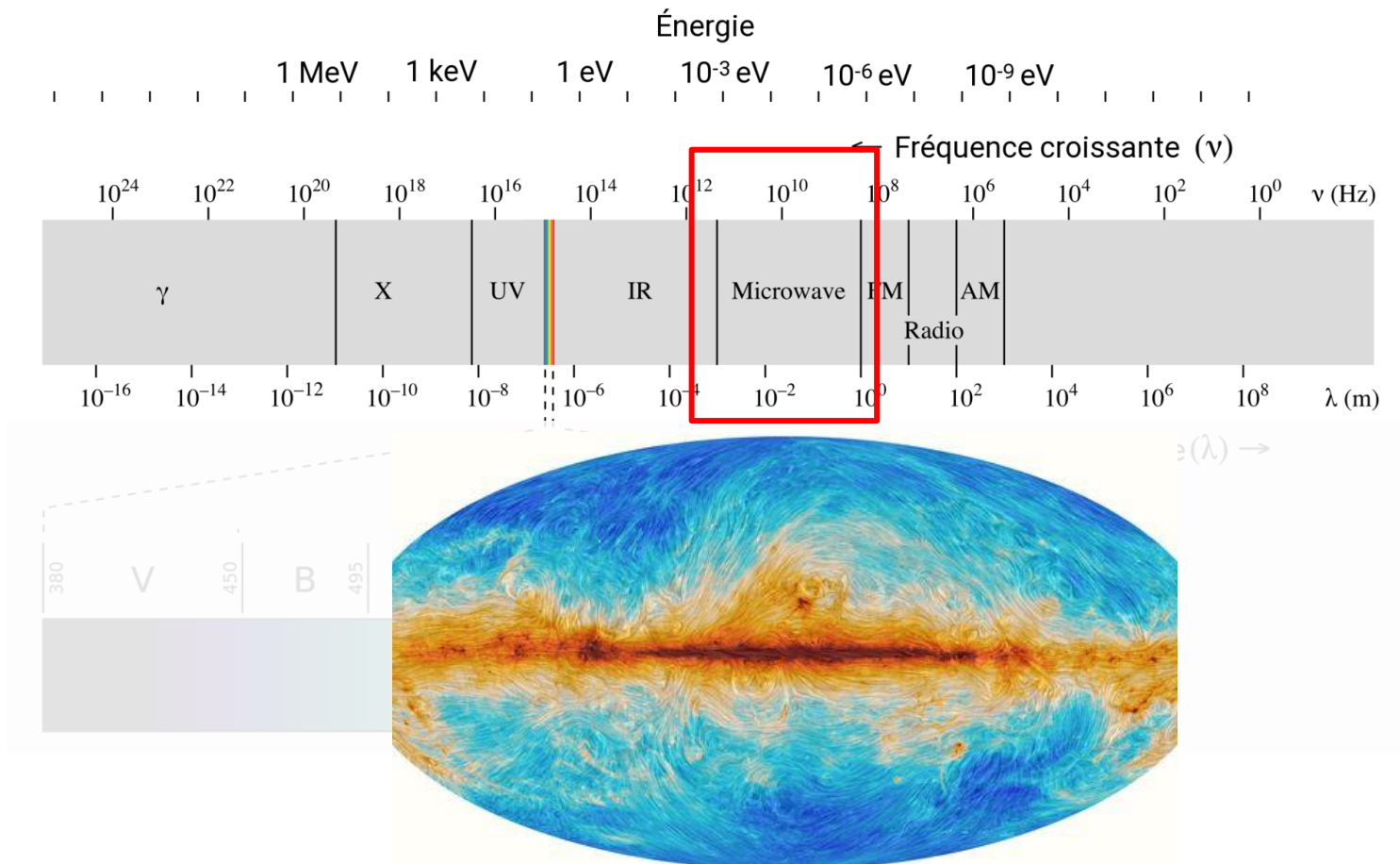
- **Communication:** transmissions par satellite parce que cette fréquence traverse facilement l'atmosphère terrestre et avec moins d'interférences pour les longueurs d'onde les plus élevées (GPS)



Les ondes électromagnétiques

Micro-ondes

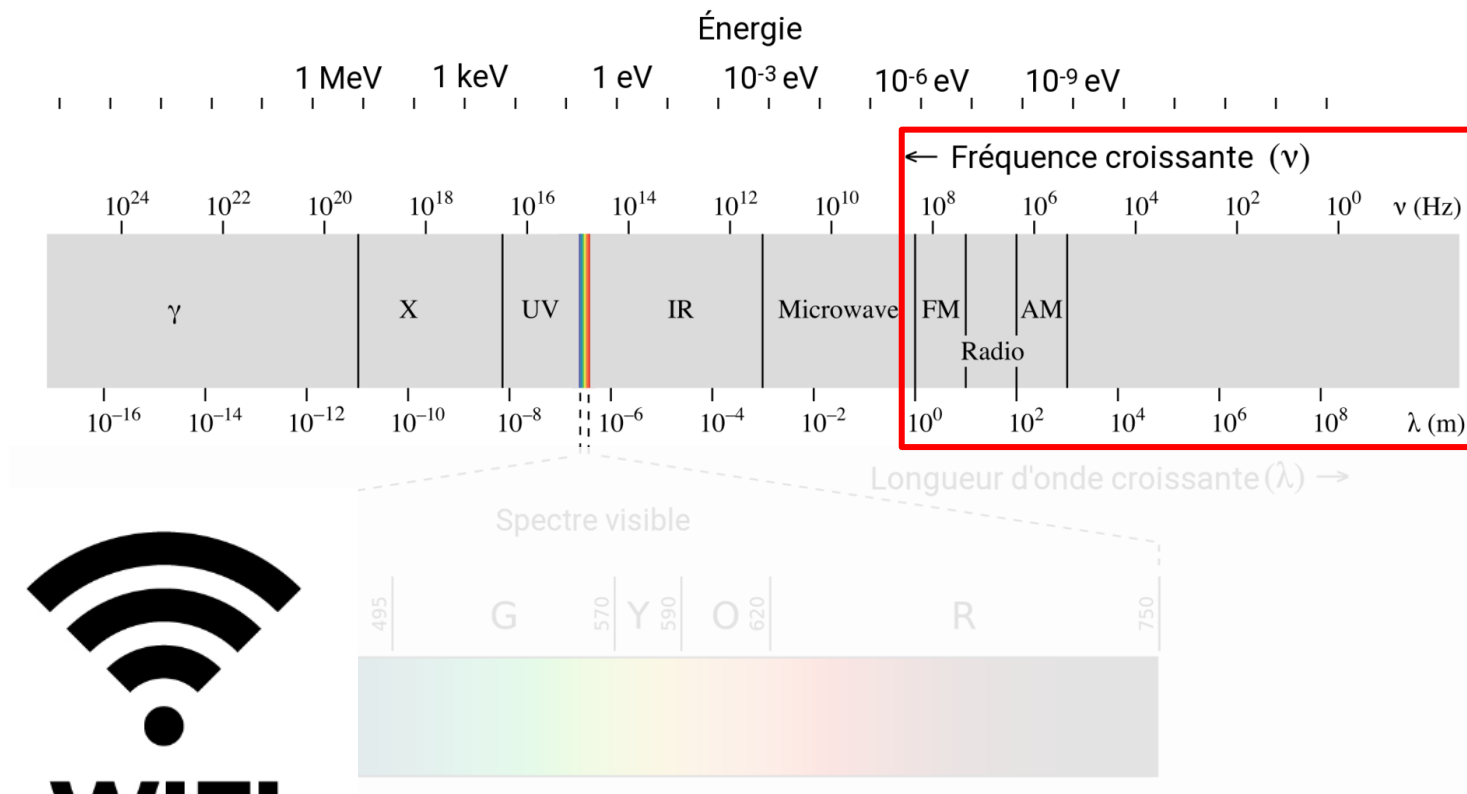
- **Fond diffus cosmologique** : première lumière émise par l'Univers, 380 000 ans après le Big Bang



Les ondes électromagnétiques

Ondes de radio

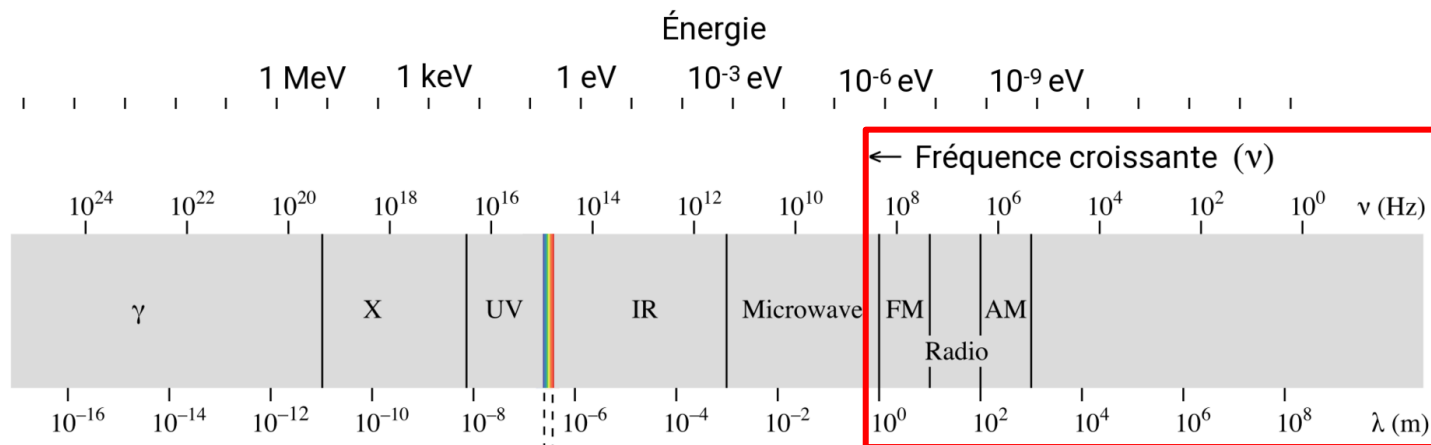
- **Communication:** Les ondes radio sont largement utilisées pour les communications sans fil, les radios, les téléphones mobiles, la télévision et les réseaux Wi-Fi...



Les ondes électromagnétiques

Ondes de radio

- **Radiotélescope:** télescope pour capter les ondes radioélectriques émises par les astres



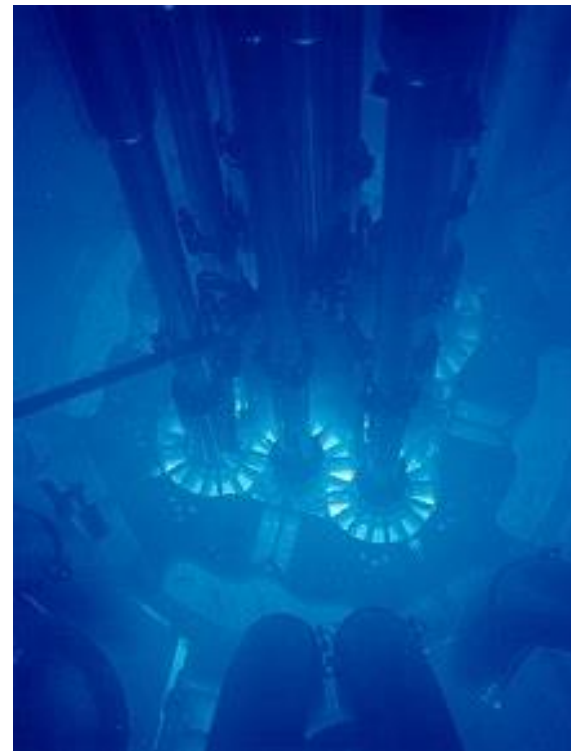
Aperçu des antennes d'ALMA dans le Désert d'Atacama



Idée pour exposé I: L'effet Tcherenkov

Peut une particule voyager plus rapide que la lumière?

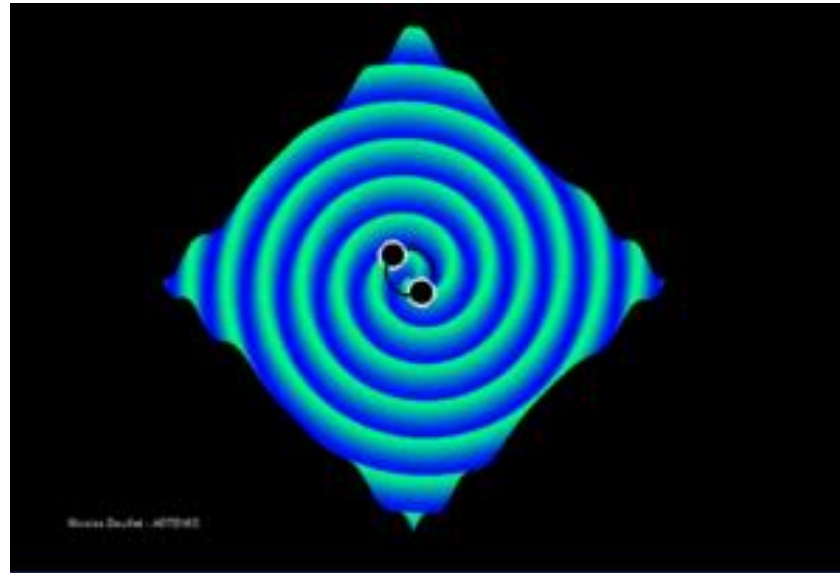
- Analogie avec les ondes de choc
- Non-contradiction de la théorie de la relativité



Radiation Tcherenkov dans le cœur de l'Advanced Test Reactor

Idée pour exposé II: Les ondes gravitationnelles

- Qu'est-ce que l'espace-temps?
- Analogies avec les ondes électromagnétiques
Masse vs charge, la gravité quantique, le graviton...



Ondes gravitationnelles engendrées par un système binaire.