

Les ondes électromagnétiques

Printemps des Sciences 2003 : La communication, de l'électron au papillon

Ondes mécaniques

Équation d'onde :

L'équation d'onde montre que la valeur de ψ en un point et à un instant donné dépend de la valeur de ψ aux points voisins et aux temps précédents.

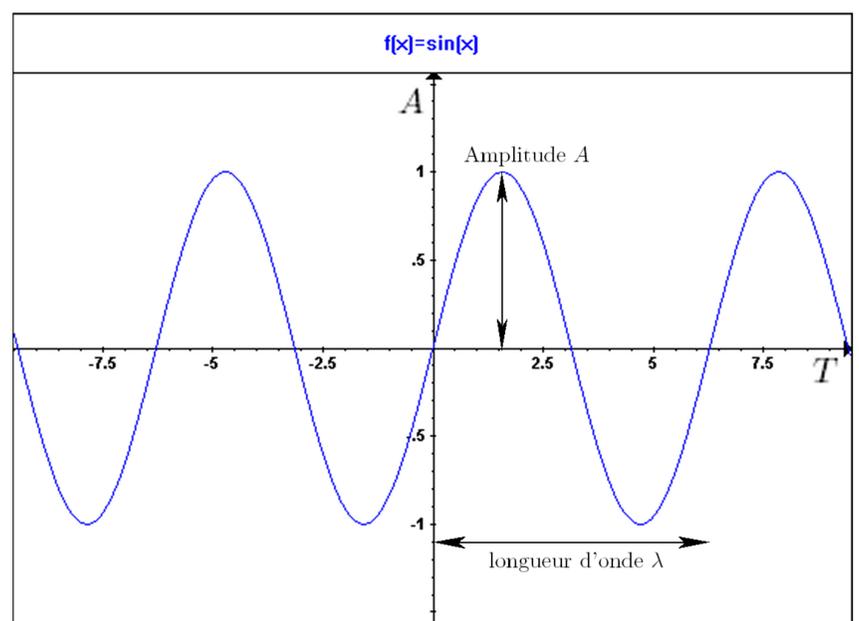
$$\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = T_0 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad \text{où} \quad \frac{T_0}{\mu} = v^2 \quad (1)$$

Une des solutions de l'équation d'onde est l'onde sinusoïdale, elle a pour équation :

$$\psi = A \sin[\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t + \varphi] \quad \text{où} \quad \mu \omega^2 = T_0 k^2 \quad (2)$$

L'onde sinusoïdale est caractérisée par :

- le nombre d'onde $|\vec{k}|$ lié à la longueur d'onde λ par la relation : $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$.
- la pulsation ω liée à la fréquence ν par : $\omega = 2\pi\nu$.
- l'amplitude A et la phase φ



Onde sinusoïdale

Principe de superposition :

L'équation d'onde étant linéaire, la somme ψ de 2 solutions ψ_1 et ψ_2 est aussi une solution. Par exemple, pour une onde dans le plan :

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 \quad \Longleftrightarrow \quad \psi = \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t) \quad (3)$$

Sur la figure, on a choisi $\omega_2 = \frac{9}{10}\omega_1$, et on peut construire l'onde résultante par le principe de superposition. Celle-ci peut être enfermée dans une enveloppe sinusoïdale (en vert ci-dessous). On appelle ce phénomène un *battement*. Il est caractérisé par une pulsation ω .

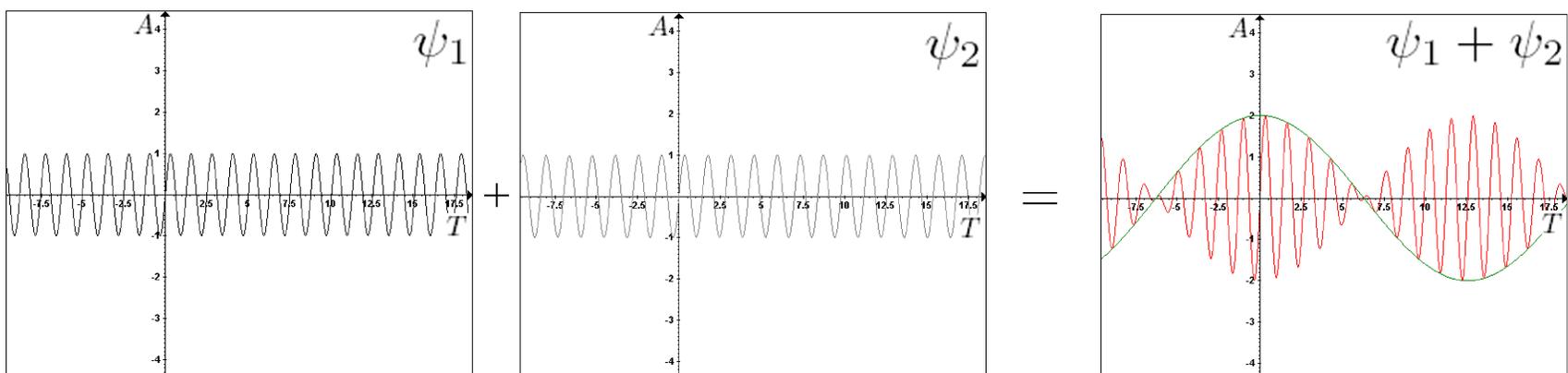


FIG. 1 – Battement

Équations de Maxwell :

Les champs électriques et magnétiques :

Le champ électrique \vec{E} est défini comme la solution de l'équation vectorielle qui lie la force \vec{F} agissant sur une charge et sa valeur q :

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (4)$$

On définit de même le champ magnétique \vec{B} comme la solution de l'équation vectorielle qui lie la force s'exerçant sur un fil de longueur l parcouru par un courant I :

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (5)$$

Sur la figure 2, on voit à gauche les lignes du champ électrique, au milieu celles du champ magnétique (on comprend l'analogie qui existe entre ces 2 champs), et à droite une représentation graphique de la définition du champ magnétique.

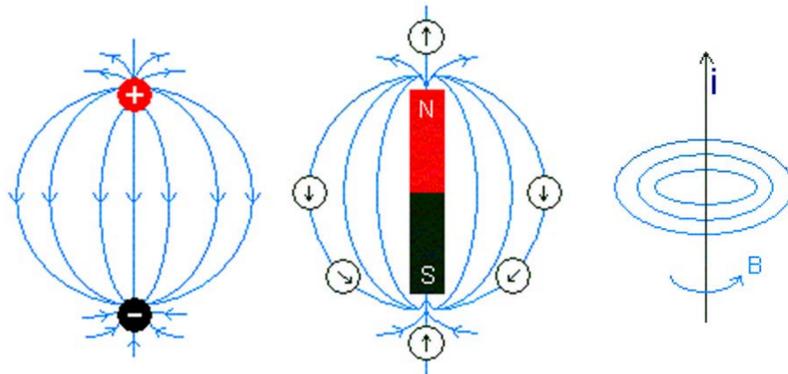


FIG. 2 - Lignes de champs \vec{B} et \vec{E}

Équations de Maxwell

Voici les quatre équations de Maxwell, à gauche sous forme locale et à droite sous forme intégrale :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \mapsto \quad \oint_{\Sigma} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \mapsto \quad \oint_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B} \quad \mapsto \quad \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{-d}{dt} \int_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{i} + \frac{1}{c^2} \partial_t \vec{E} \quad \mapsto \quad \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \vec{i} + \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int_{\Sigma} \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (9)$$

L'équation 6 est le théorème de Gauss qui stipule que le flux sortant d'une surface fermée est proportionnel à la charge contenue dans cette surface.

L'équation 7 est l'équivalent du théorème de Gauss pour le champ magnétique

L'équation 8 est la loi de Faraday, elle stipule qu'il existe une induction de courant lorsque le flux du champ magnétique varie dans le temps.

L'équation 9 est le théorème d'Ampère modifié par Maxwell, il stipule qu'un courant et une variation de flux électrique créent un champ magnétique.

Ondes électromagnétiques :

On peut écrire 2 équations très simples à partir des équations de Maxwell citées précédemment :

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = 0 \quad (11)$$

Ces équations sont les équations d'ondes électromagnétiques. Les solutions particulières de ces équations, que sont les ondes planes, se propagent perpendiculairement aux champs magnétiques et électriques comme on peut le voir sur la figure 3 et comme le traduisent les deux équations suivantes :

$$\vec{E} = E_0 \sin(\omega t - k_z z) \vec{1}_x \quad (12)$$

$$\vec{B} = \frac{k_z}{\omega} E_0 \sin(\omega t - k_z z) \vec{1}_y \quad (13)$$

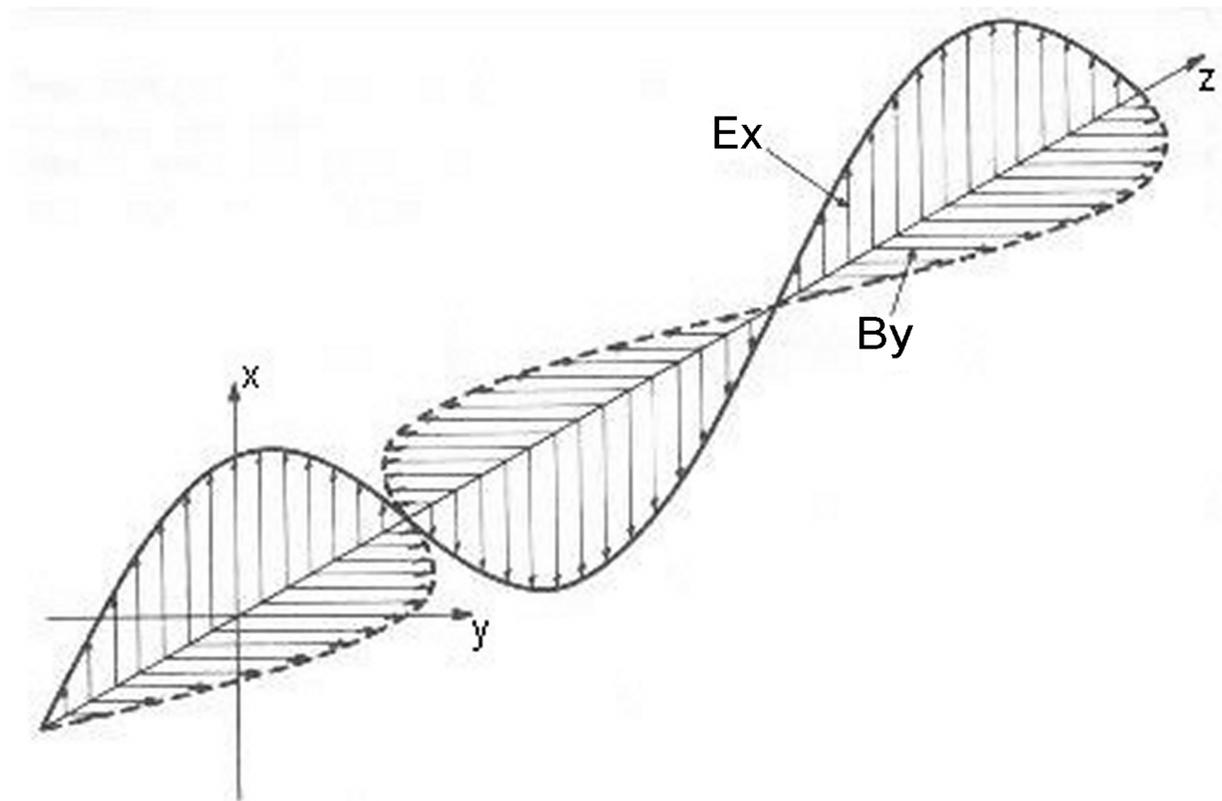


FIG. 3 – Onde Electromagnétique

Ces ondes ont des caractéristiques similaires aux ondes mécaniques mais s'en distinguent par des propriétés particulières telles que la propagation hors de tout milieu matériel (le vide), et la polarisation.

On a coutume de classer les ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde (ou en fonction de leur fréquence, de toute façon celle-ci est liée à la longueur d'onde par la relation : $c = \lambda\nu$ où c est la vitesse de la lumière) comme suit :

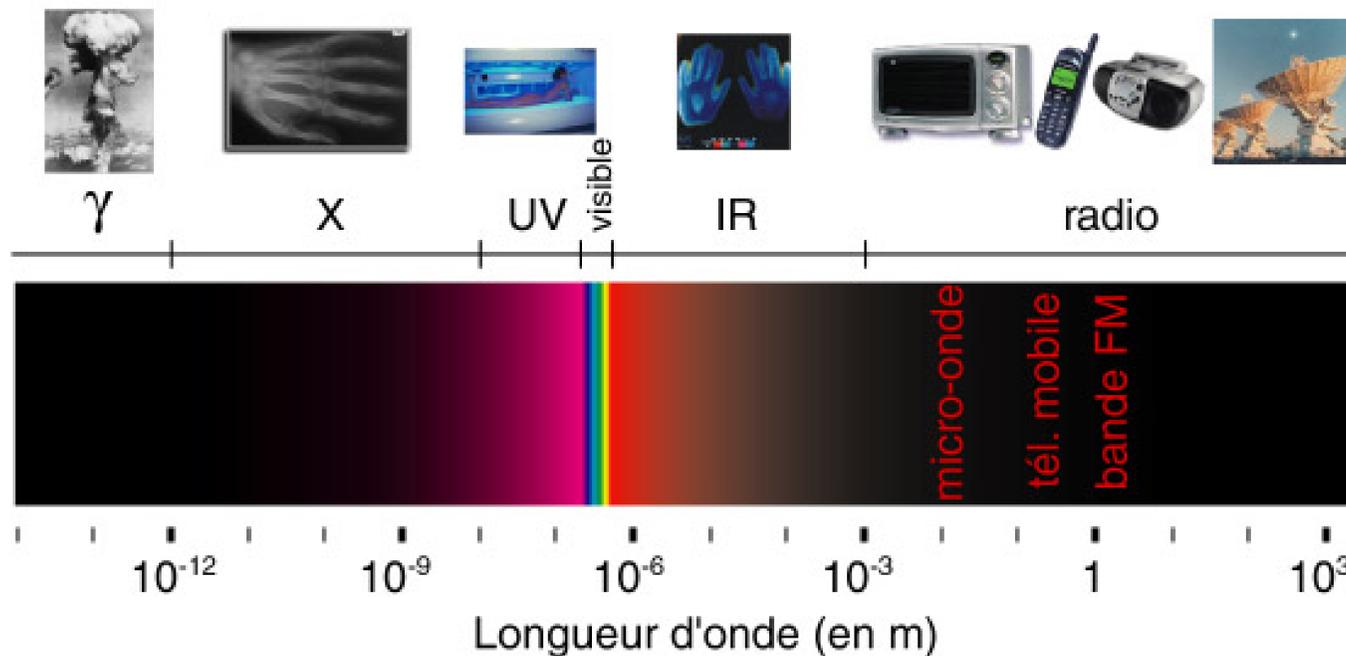


FIG. 4 – Spectre des ondes électromagnétiques et applications

Applications

Radio, G.S.M., TV, satellite, ...



Ce travail a été réalisé par Quentin Baire, Thomas Bury, et Stéphane Clemmen.



Expériences d'électromagnétisme

Induction magnétique :

Trois tubes similaires (de mêmes longueurs et de mêmes diamètres) dans lesquels on lâche, au même instant, 3 objets identiques. On remarque que dans un des tubes, l'objet tarde à tomber. Pourquoi ?

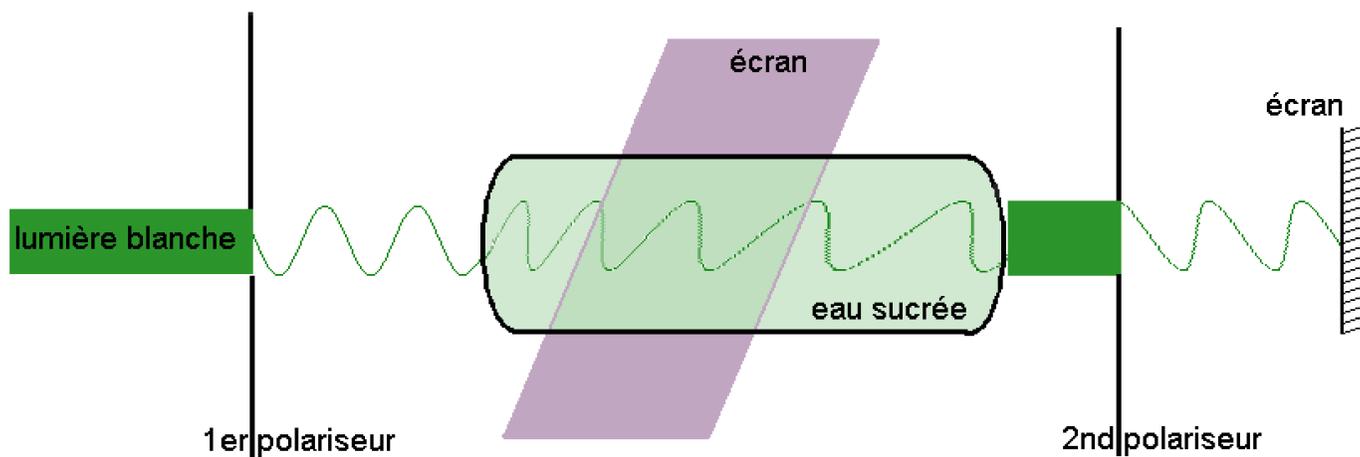
Explications : Les corps sont en fait des aimants. En tombant, ceux-ci créent une variation de flux magnétique, ce qui induit un courant dans le tube conducteur, c'est la loi de Faraday (équation 8). Ce courant crée un champ magnétique qui "repousse", freine l'aimant dans sa chute, c'est la loi de Lenz.

Polarisation d'une onde électromagnétique :

De la lumière blanche traverse un polariseur, passe ensuite dans de l'eau sucrée, et après passage dans un dernier polariseur, elle ressort colorée.

Explications : Le sucre est une molécule chirale, c'est-à-dire qu'elle est capable de faire tourner la polarisation de la lumière. La lumière entrant dans le tube est polarisée et est toujours blanche donc constituée d'un spectre d'ondes électromagnétiques de fréquences différentes. Or, l'eau sucrée fait tourner le plan de polarisation, mais d'une quantité différente en fonction de la fréquence de l'onde (couleur). Par conséquent, si on place un second polariseur à la sortie du tube, on ne verra que l'onde dont le plan a tourné de la quantité nécessaire.

D'autre part, dans le tube, une partie de la lumière est diffusée, c'est pourquoi on voit apparaître dans celui-ci des couleurs.



Onde électromagnétique stationnaire :

Un courant électrique passe dans 2 fils parallèles, lorsqu'on approche un tube TL de ces fils, le tube s'éclaire et s'éteint à des intervalles réguliers le long des fils.

Explications : Cette expérience montre des ondes électromagnétiques stationnaires. La lampe que l'on passe au-dessus nous permet de détecter les noeuds et les ventres de ces ondes stationnaires. La distance minimale entre deux noeuds nous permet de mesurer la longueur d'onde.

