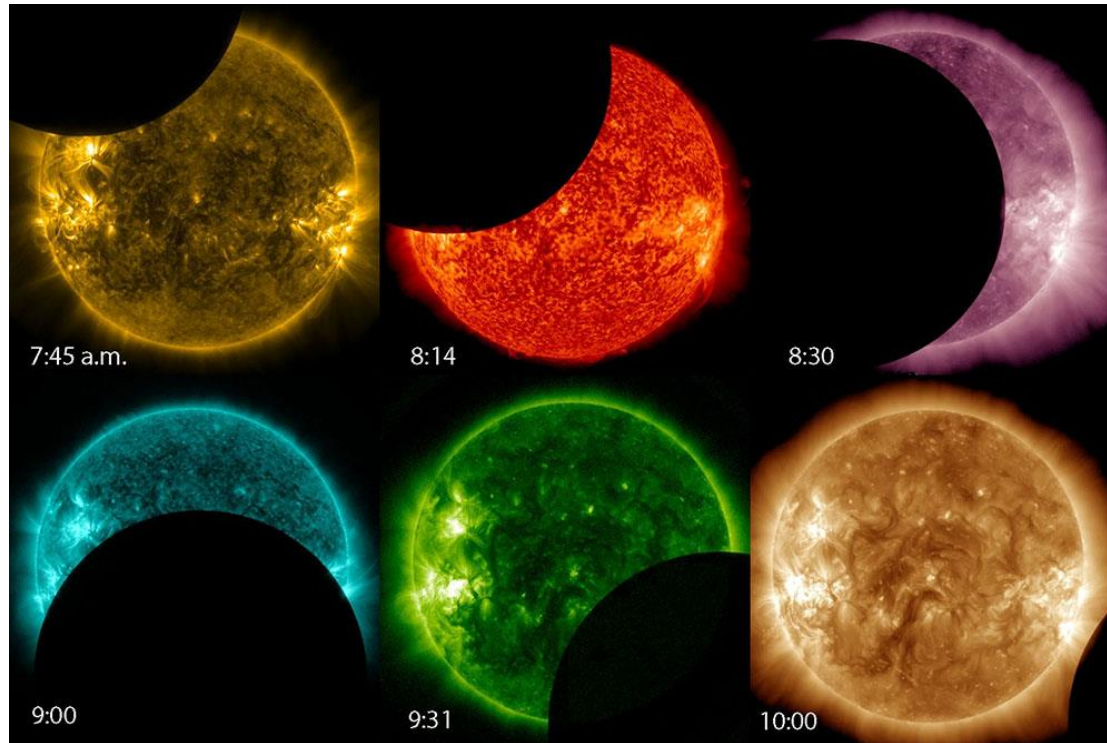


Optique

Chapitre 1 : Nature de la lumière



Soleil observé à différentes longueurs d'ondes par le satellite américain *Solar Dynamics Observatory* ©NASA/SDO

CUPGE 2 – 2025 – V3

Prof. Robert Georges – Université de Rennes

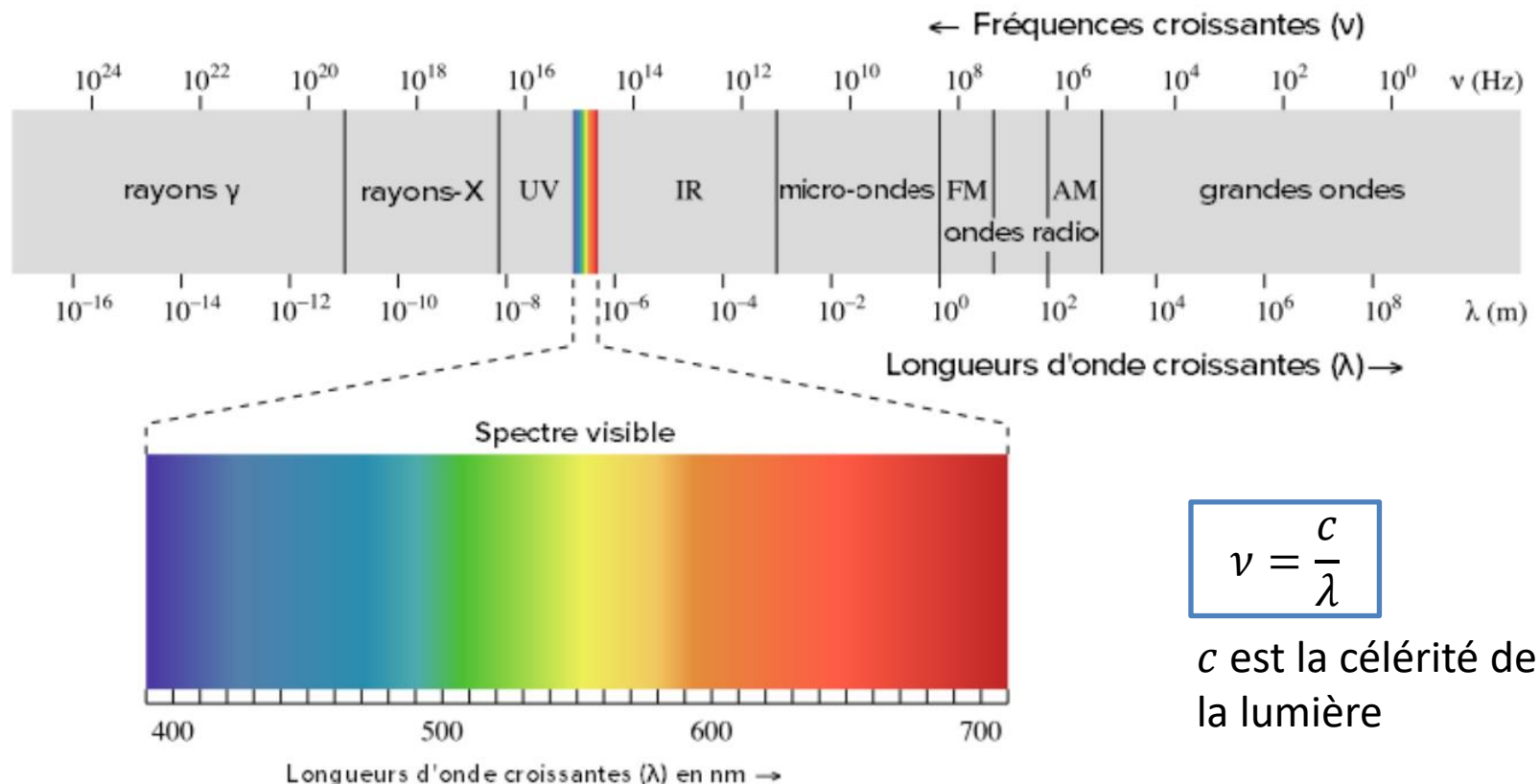
1. Introduction

1.1 Optique

1.2 Un peu d'histoire

1.1 Introduction – Optique

- L'optique est le domaine de la physique qui traite des propriétés de la lumière (visible) et plus largement des rayonnements électromagnétiques (invisibles) qui s'étendent au-delà du rouge et du violet.
- On caractérise une onde électromagnétique par sa **fréquence ν** ou sa **longueur d'onde λ** . Le découpage du domaine est arbitraire.



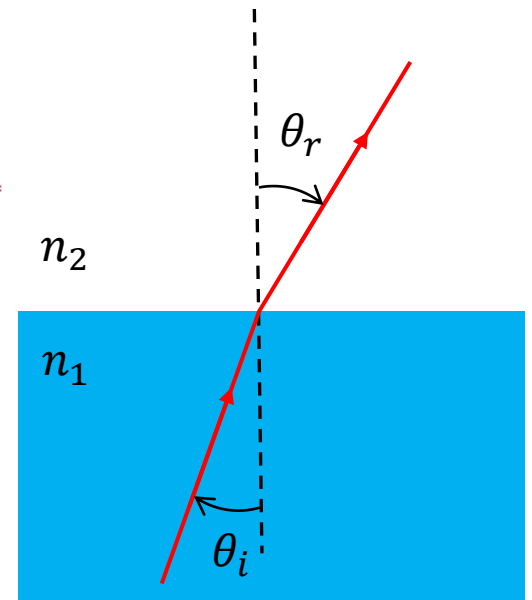
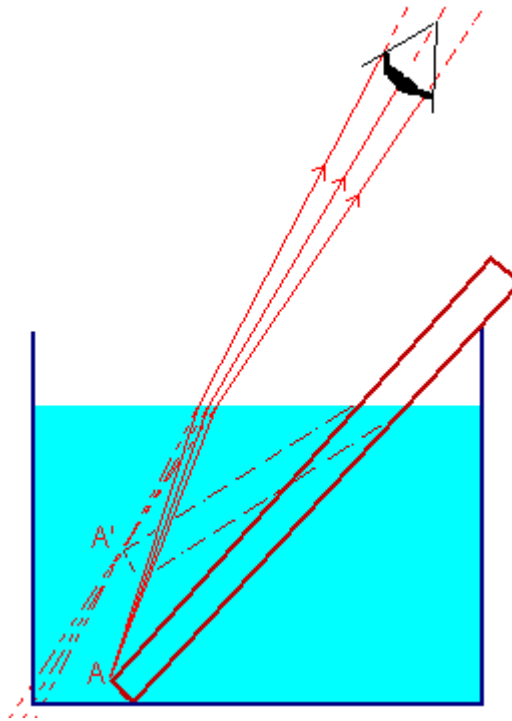
$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

c est la célérité de la lumière

1.2 Introduction – Un peu d'histoire

XVII^e siècle – Snell, Fermat, Descartes : optique géométrique

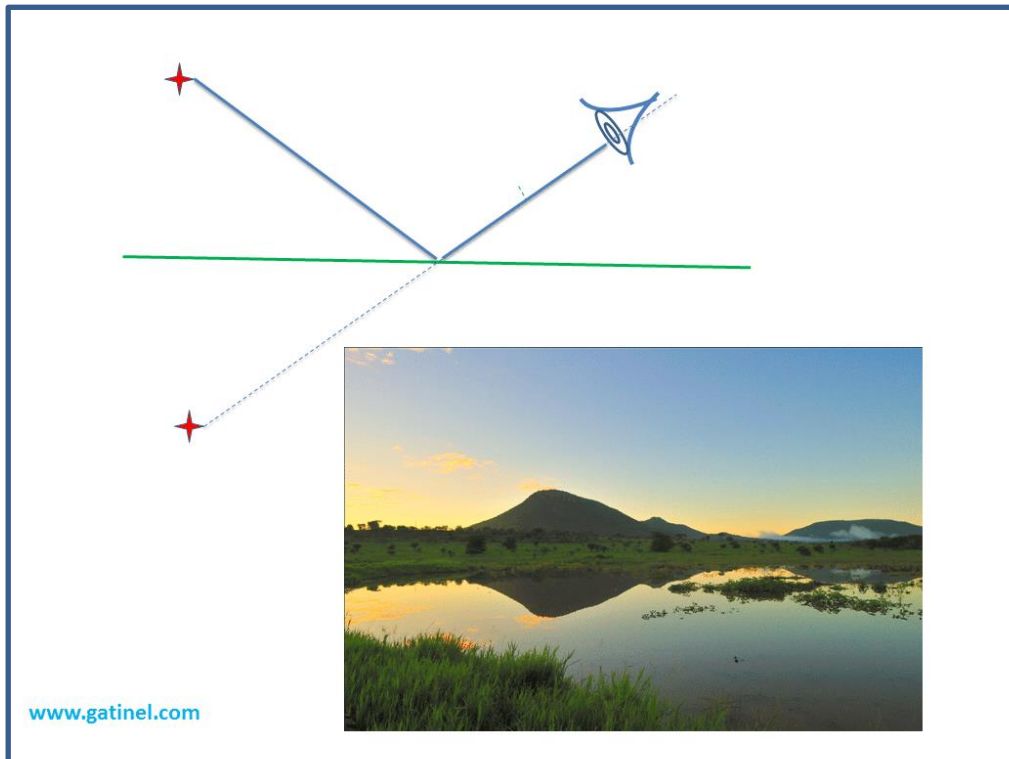
Réfraction : la lumière change de direction en traversant un milieu d'indice optique différent en suivant la loi de Snell-Descartes ($n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$)



1.2 Introduction – Un peu d'histoire

XVII^e siècle – Snell, Fermat, Descartes : optique géométrique

Réflexion : brusque changement de direction des rayons lumineux à l'interface de deux milieux d'indice optique différents



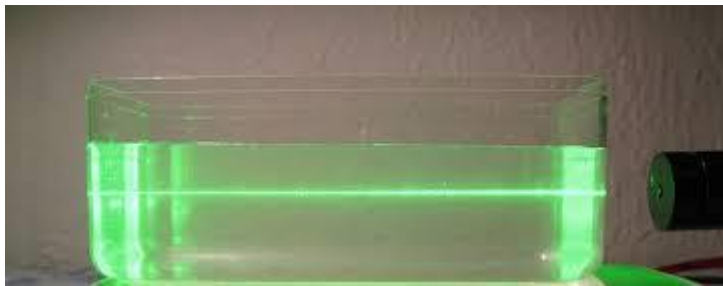
1.2 Introduction – Un peu d'histoire

XVII^e siècle – Snell, Fermat, Descartes : optique géométrique

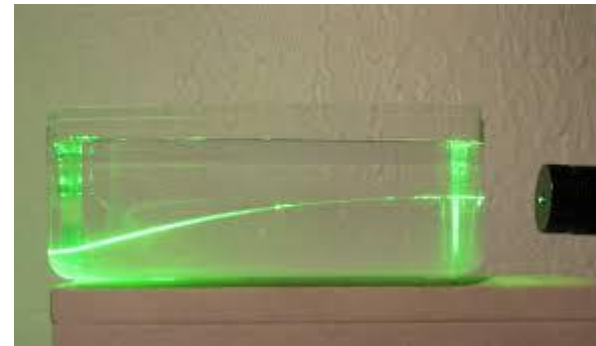
Principe de moindre temps (principe de Fermat) :

La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit localement extrême (localement signifiant : pour une trajectoire « petite »).

- Démonstration des relations de Snell-Descartes
- Propagation des rayons lumineux en ligne droite dans un milieu homogène



Milieu homogène



Milieu inhomogène

1.2 Introduction – Un peu d'histoire

XVII^e / XIX^e siècle – Huygens, Fresnel et la [théorie ondulatoire](#)

- [Huygens](#) s'oppose à la nature corpusculaire de la lumière soutenue par Newton. Il découvre en 1677 que les lois de réflexion et de réfraction de Snell-Descartes sont conservées si l'on suppose une propagation de la lumière sous [la forme d'ondes](#).
- Les recherches de [Fresnel](#) en optique (interférences et diffraction, polarisation) ont conduit à l'acceptation définitive de la [théorie ondulatoire de la lumière](#) en remplacement de la théorie balistique qui s'était imposée depuis Newton.

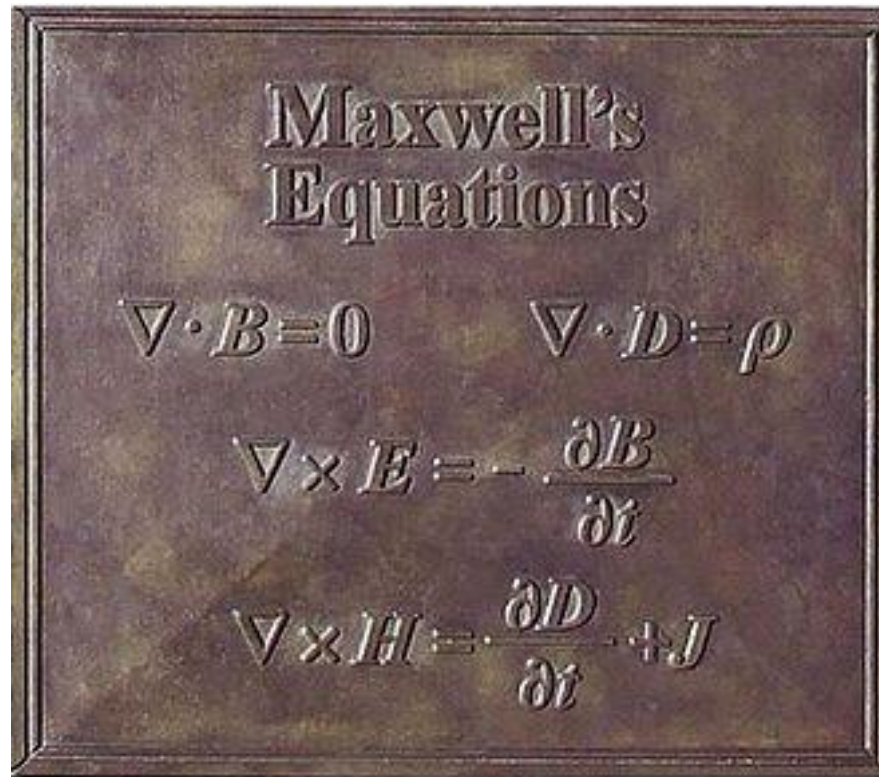
Christiaan
Huygens
(1629-1695)



Augustin
Fresnel
(1788-1827)

1.2 Introduction – Un peu d'histoire

Fin XIX^e siècle – Maxwell et la [théorie de l'électromagnétisme](#)



Les équations de Maxwell

1.2 Introduction – Un peu d'histoire

Début XX^e siècle – Avènement de la physique quantique

- **Louis de Broglie** propose qu'à chaque particule est associée une onde. C'est la dualité « onde-corpuscule »:

λ : longueur d'onde

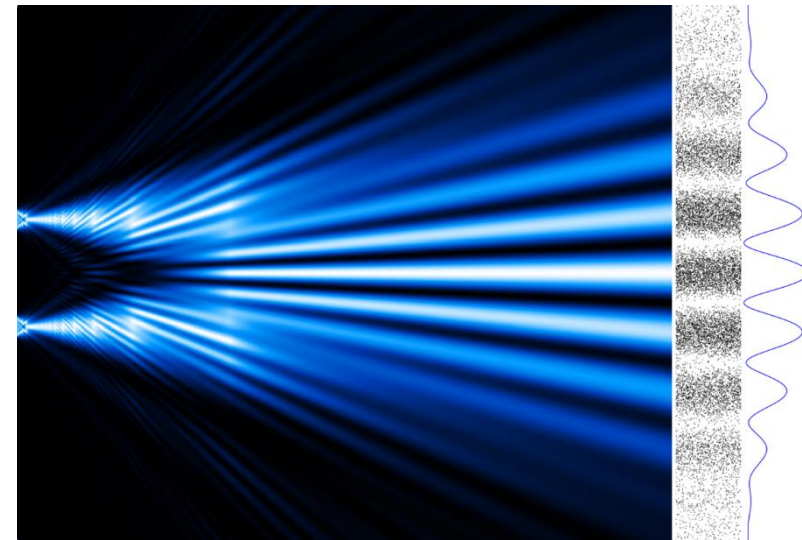
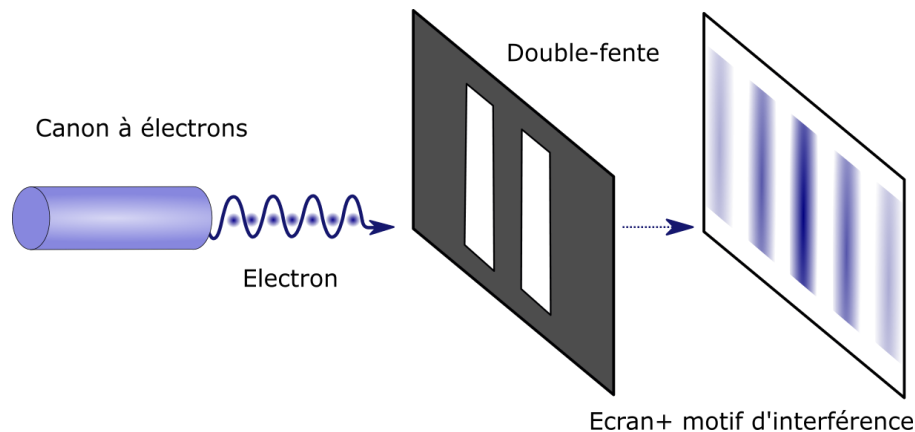
m : masse de la particule

h : constante de Planck

v : vitesse de la particule

c : vitesse de la lumière

$$\lambda = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



2. Nature ondulatoire de la lumière



La couleur bleue intense des ailes de papillon est le résultat de la diffraction de la lumière par les microstructures qui composent les ailes. Une conséquence de la nature ondulatoire de la lumière.

<https://asknature.org/fr/strategy/wing-scales-cause-light-to-diffract-and-interfere/>

2. Nature ondulatoire de la lumière

2.1 Onde électromagnétique (OEM)

2.2 Surface d'onde

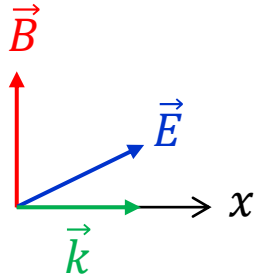
2.3 Onde plane

2.4 Indice de réfraction et vitesse de propagation

2.5 Equation d'onde

2.6 Onde plane progressive harmonique (OPPH)

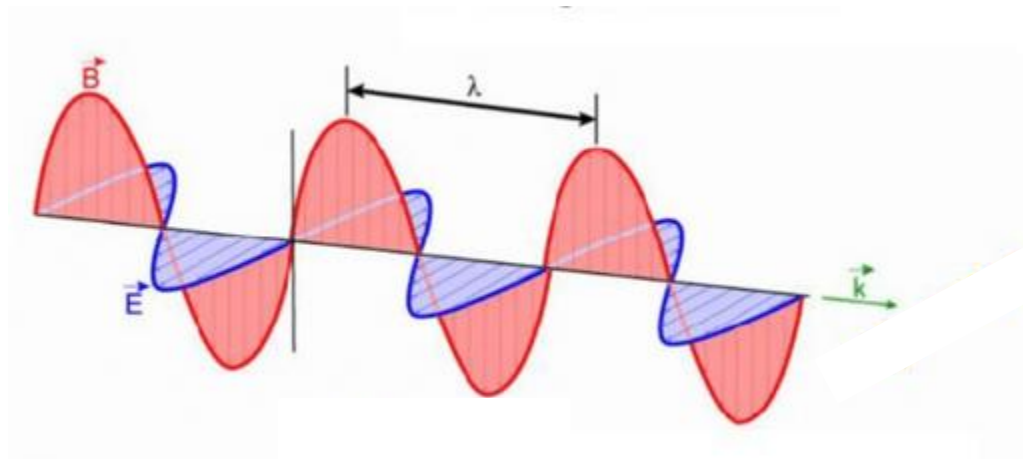
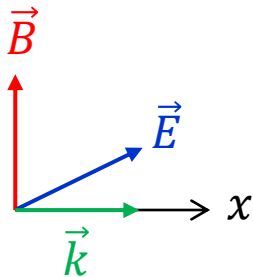
2.1 Onde électromagnétique (OEM)



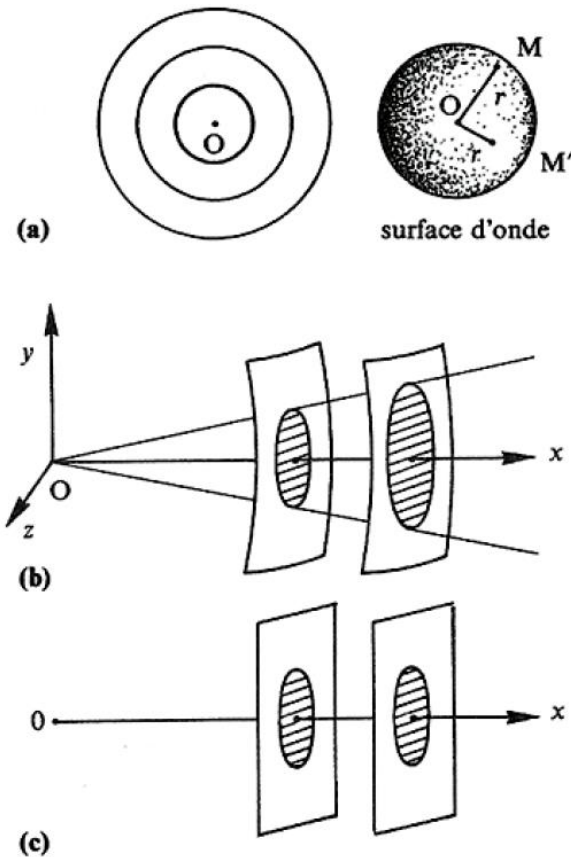
La lumière est caractérisée par :

- Un champ électrique \vec{E}
- Un champ magnétique \vec{B}
- Une direction de propagation définie par le vecteur \vec{k} , appelé nombre d'onde ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$, où λ est la longueur d'onde)

- La propagation du couple (\vec{E}, \vec{B}) , appelé champ électromagnétique, définit une onde électromagnétique progressive.



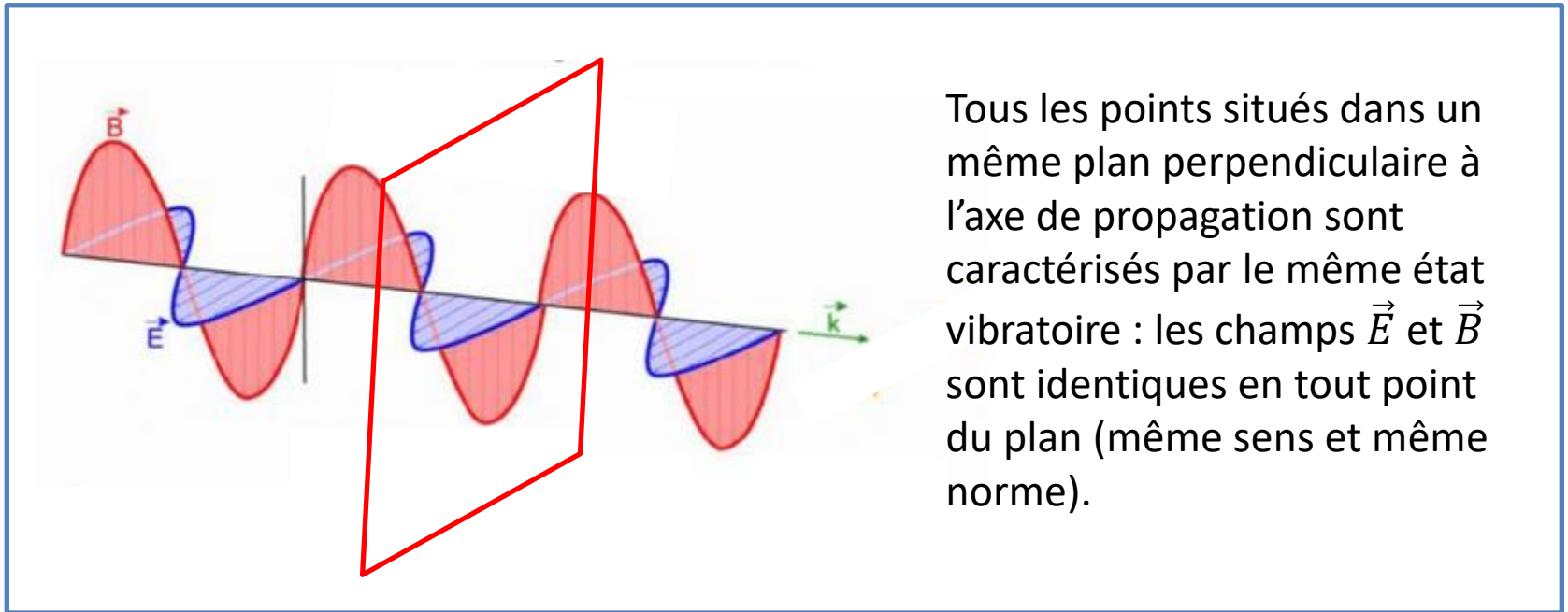
2.2 Surface d'onde



- Une onde émise par une source ponctuelle O se propage dans tout le milieu environnant dans les 3 dimensions de l'espace
- Pour une **propagation isotrope**, tous les points situés à la même distance r de O vont être atteints simultanément par la perturbation : la sphère de rayon r est une **surface d'onde**
- Dans ce cas, l'onde est dite **sphérique** : l'état de perturbation est une fonction des 3 coordonnées d'espace et du temps
- À grande distance, les surfaces sont localement **planes**
- Dans ce qui suit, nous ne traiterons que des ondes se propageant dans un milieu **homogène**, **transparent** et **isotrope** (**M.H.T.I.**)

2.3 Onde plane

Dans le cas particulier (et important) d'une **onde plane**, l'état de l'onde est le même en tout point d'un plan orthogonal à la direction de propagation.



2.3 Onde plane

Pour une onde plane : $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{k})$ forme un trièdre rectangle direct tel que :

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega}} \quad \text{où } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ et } T \text{ est la période (temporelle) de l'onde}$$

Pour une onde plane, \vec{E} et \vec{B} vibrent perpendiculairement à la direction de propagation. Il s'agit d'une onde transversale.

- Relation entre $\|\vec{E}\|$ et $\|\vec{B}\|$ (que l'on notera E et B) :

$$\|\vec{B}\| = \frac{1}{\omega} \|\vec{k}\| \cdot \|\vec{E}\| \sin \frac{\pi}{2}$$

$$B = \frac{T}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} E$$

$$B = \frac{T}{\lambda} E = \frac{E}{\lambda \nu} = \frac{E}{c}$$

- On retiendra que : $E = cB$, où c est la célérité de l'onde (i.e. sa vitesse de propagation)
- On remarque que les normes de \vec{E} et \vec{B} sont proportionnelles

2.4 Indice de réfraction et vitesse de propagation

- La vitesse apparente v de la lumière (encore appelée vitesse de phase et notée v_ϕ , nous y reviendrons) dans un milieu matériel d'indice de réfraction n , est telle que

$$n = \frac{c}{v}$$

- Pour le vide : $n_0 = 1$
- Pour différents matériaux :

Milieu	Indice moyen
Air	1,0003
Eau	1,333 à 273 K
Verre	1,4 – 1,6
Diamant	2,4

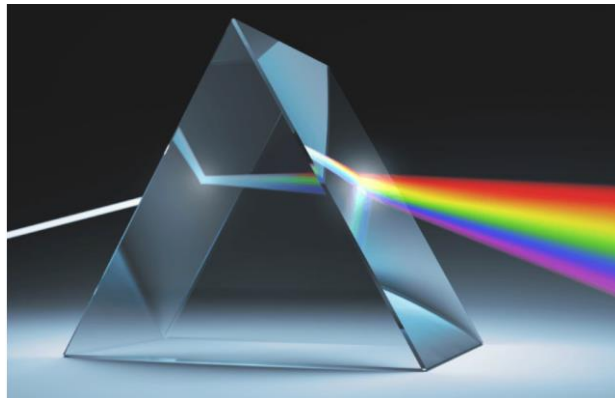
- La vitesse de propagation de la lumière dans un milieu matériel est inférieure à c

2.4 Indice de réfraction et vitesse de propagation

- La longueur d'onde d'une onde lumineuse de fréquence donnée (donc de période donnée), change en fonction du milieu qu'elle traverse :
 - dans le vide : $\lambda_0 = cT$
 - Dans un milieu d'indice n : $\lambda = vT = \frac{c}{n}T = \frac{\lambda_0}{n}$
 - La vitesse de l'onde contient donc une information sur le milieu traversé
 - Il serait plus exact de désigner une couleur par sa fréquence, plutôt que par sa longueur d'onde !

- Dispersion ($n = n(\lambda)$)

Si l'indice de réfraction d'un milieu dépend de λ , alors les composantes d'une lumière polychromatique ne se déplaceront pas à la même vitesse. C'est ce qui conduit à des phénomènes de dispersion :



2.5 Equation d'onde

2.5.1 Equations de propagation des champs

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \qquad \Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

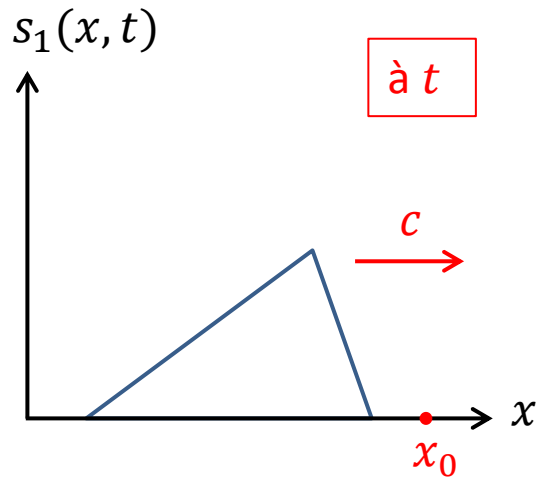
2.5.2 Solution de l'équation de propagation dans le vide

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

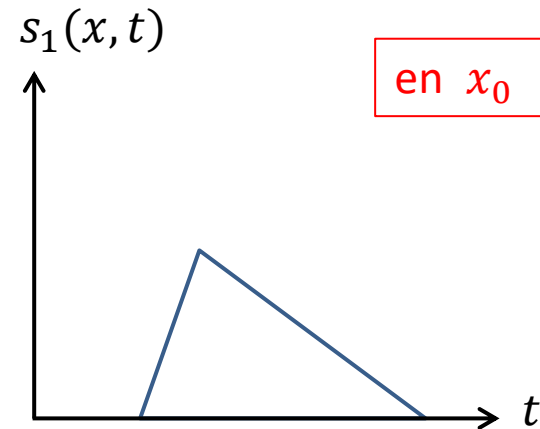
$$s(x, t) = f(c - xt) + g(c + xt)$$

2.5.3 Interprétation : onde progressive

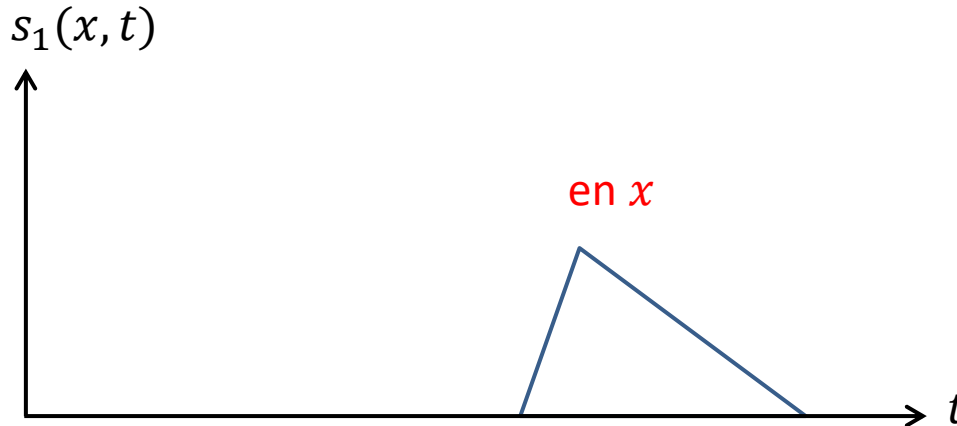
« Photographie » d'une perturbation
 $s_1(x, t) = f(c - xt)$ à l'instant t :



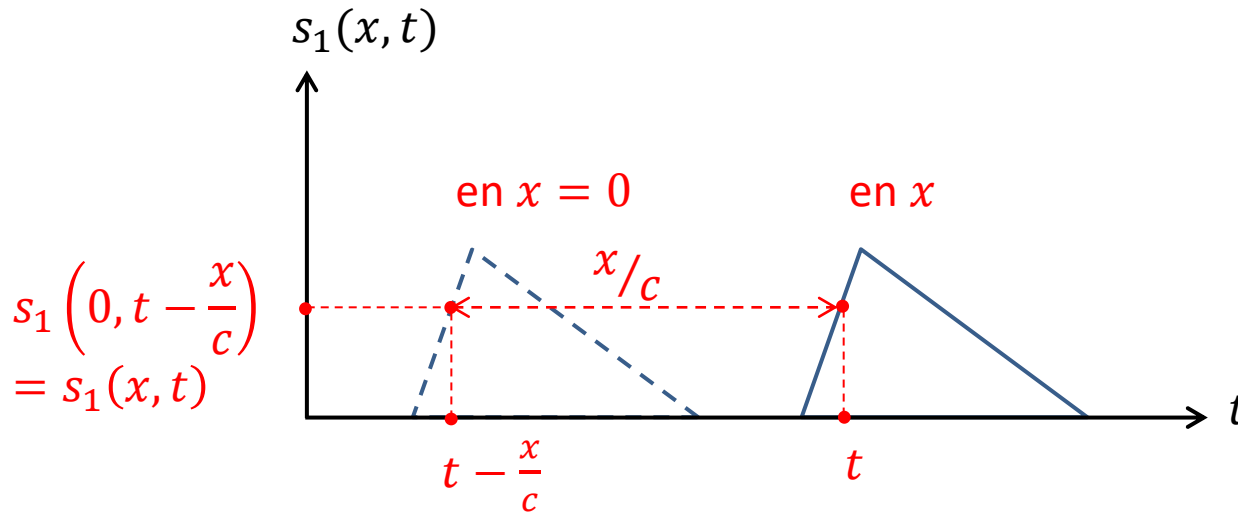
Evolution temporelle de la perturbation
en un point x_0 particulier :



2.5.3 Interprétation : onde progressive



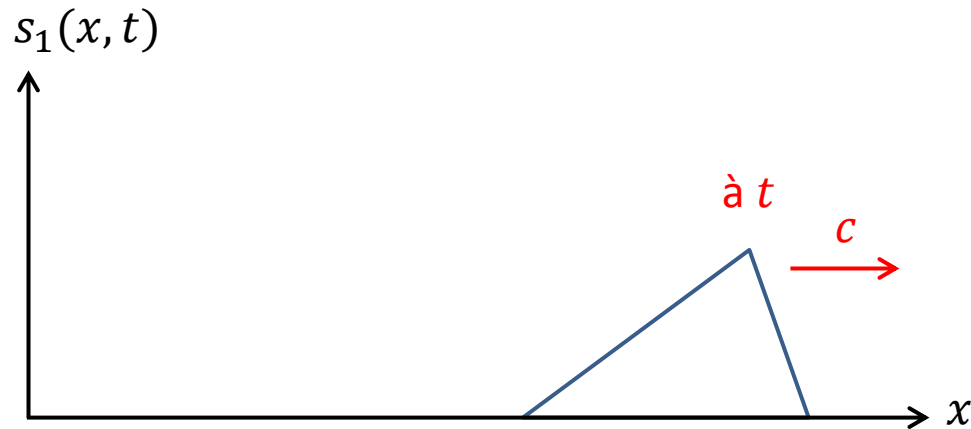
Quelle était l'amplitude
du signal en $x = 0$?
C'est-à-dire à un temps
antérieur $t - \frac{x}{c}$?



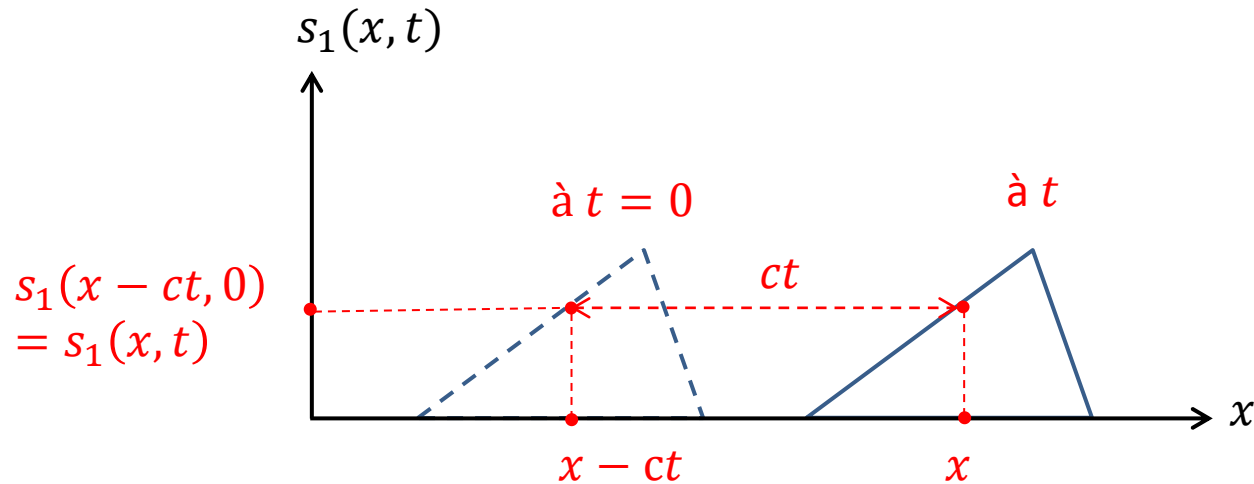
On montre facilement que
 $s_1\left(0, t - \frac{x}{c}\right) = s_1(x, t)$
La forme du signal se
conserve au cours du
temps.

2.5.3 Interprétation : onde progressive

Considérons maintenant le signal à l'instant t , comment était-il à $t = 0$?



Quelle était l'amplitude du signal en à $t = 0$?
C'est-à-dire à une distance ct avant ?



On montre facilement que $s_1(x - ct, 0) = s_1(x, t)$
La forme du signal se conserve au cours de sa propagation le long de l'axe x .

2.6 Onde plane progressive harmonique (OPPH)

Une OPPH est une onde sinusoïdale qui véhicule une seule fréquence (encore appelée OPP monochromatique)

Pour un champ scalaire :

$$s(x, t) = s_0 \cos(\omega t \pm kx - \phi_0)$$

Pour un champ vectoriel :

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t \pm kx - \phi_0)$$

Pour une onde progressive tridimensionnelle :

$$s(\vec{r}, t) = s_0 \cos(\omega t \pm \vec{k}\vec{r} - \phi_0)$$

3. Nature corpusculaire de la lumière

3.1 Effet photoélectrique

3.2 Quelques repères chronologiques

3. Nature corpusculaire de la lumière

- En 1905, Albert Einstein réintroduit l'idée d'une nature corpusculaire pour la lumière pour expliquer l'effet photoélectrique (prix Nobel 1921).
- Il postule l'existence de quanta d'énergie lumineuse : le photon.
- Relation de Planck-Einstein :

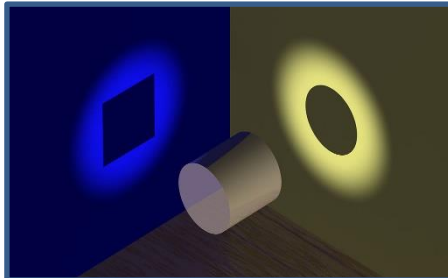
$$E = h\nu$$

E : Energie du photon (Joule)

ν : Fréquence de l'onde associée (Hz)

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ J s : constante de Planck

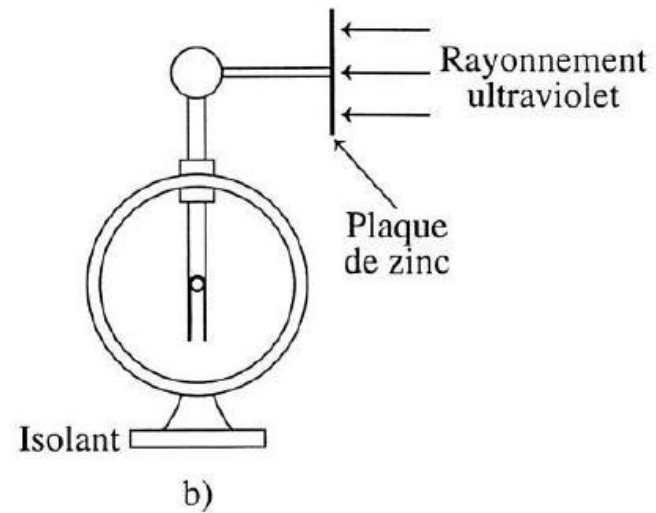
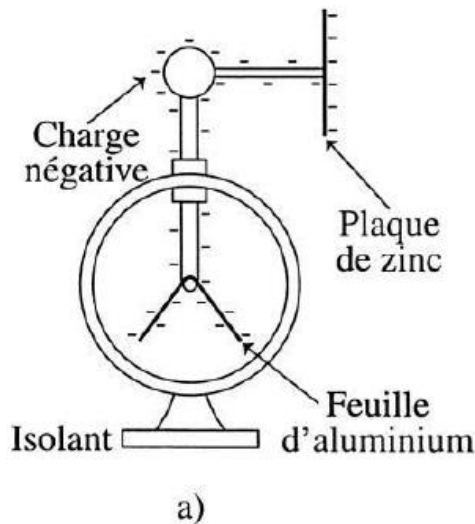
- Il ne faut pas opposer nature ondulatoire et corpusculaire de la lumière qui sont les deux facettes d'un même phénomène.



Métaphore du cylindre qui peut avoir à la fois les propriétés d'un disque et d'un cylindre

3.1 Effet photoélectrique

- Aspect expérimental : [expérience de Hallwachs \(1888\)](#)

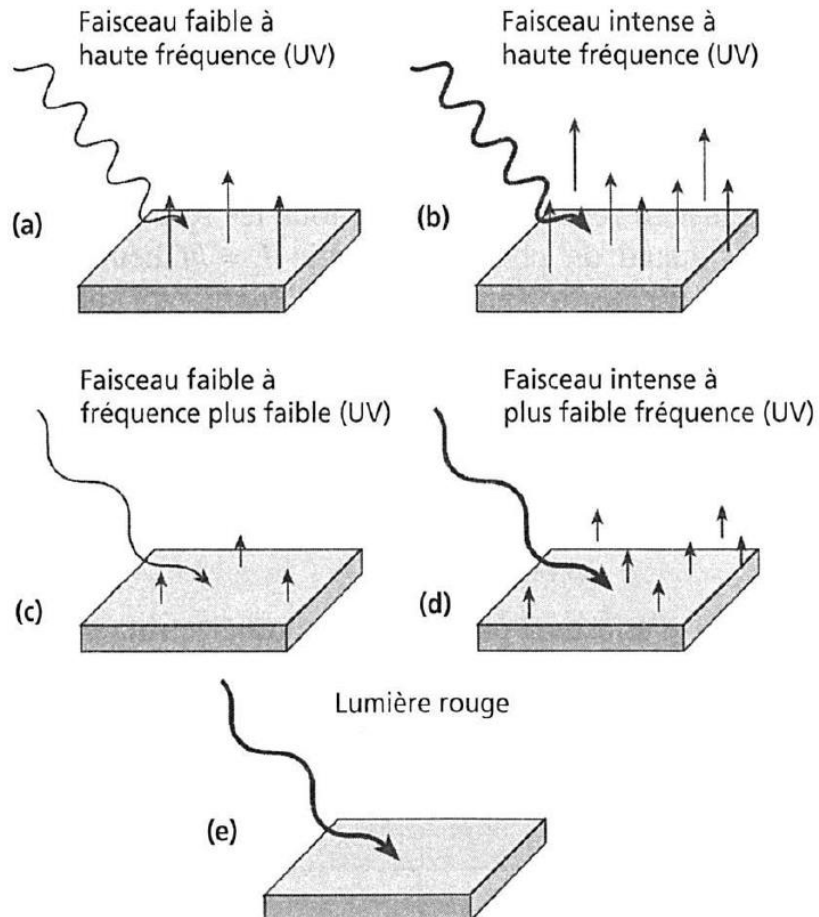


Une plaque de zinc est placée sur un électroscope initialement chargé négativement. L'électroscope se décharge instantanément dès lors qu'il est éclairé à l'aide d'une lampe qui émet des UV.

Source : Pérez, Charles, Pujol, Quantique, fondements et applications, de Boeck (2013)

3.1 Effet photoélectrique

- Aspect expérimental : observation

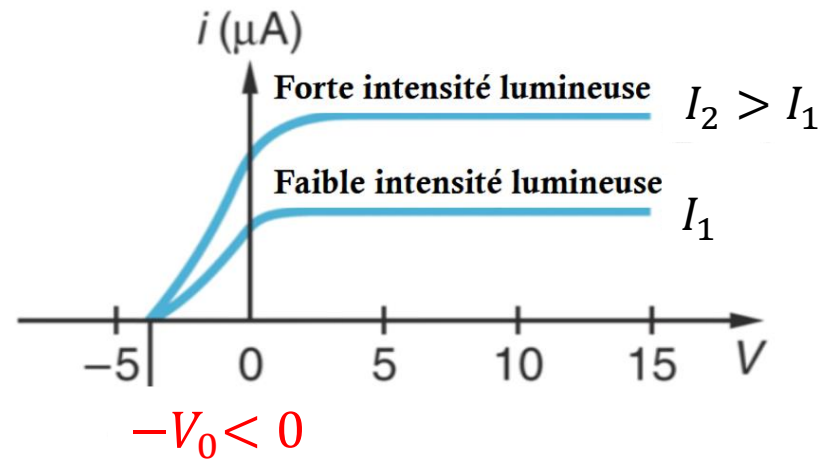
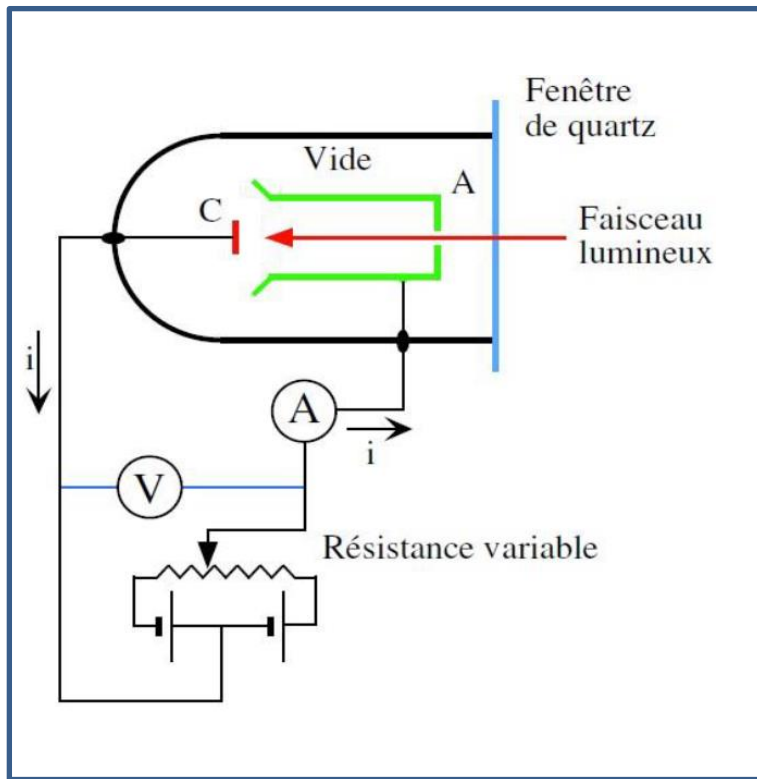


- Rayonnement **haute fréquence** (UV) → **émission**
- Rayonnement **plus basse fréquence** → **émission plus faible**
- Rayonnement **basse fréquence** (IR) → **aucune émission**
- Une intensité du rayonnement plus forte produit une émission plus importante sauf en deçà d'une certaine **fréquence seuil**

Hypothèse d'Einstein : les quanta de lumière, s'ils ont une énergie suffisante, peuvent transférer leur énergie aux électrons du métal pour les y en extraire.

3.1 Effet photoélectrique

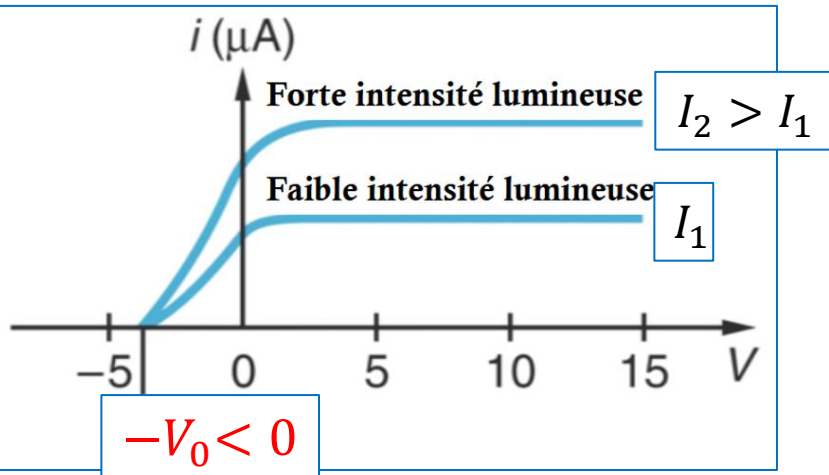
- Aspect expérimental : [travaux de Lenard](#) entre 1899 et 1902 (prix Nobel 1905)
 - Les électrons extraits de la cathode sont soumis à un champ électrique
 - La résistance variable permet de varier la tension appliquée entre l'anode et la cathode



$-V_0$ est le potentiel d'arrêt (négatif)
: en deçà de V_s le courant électrique devient nul

3.1 Effet photoélectrique

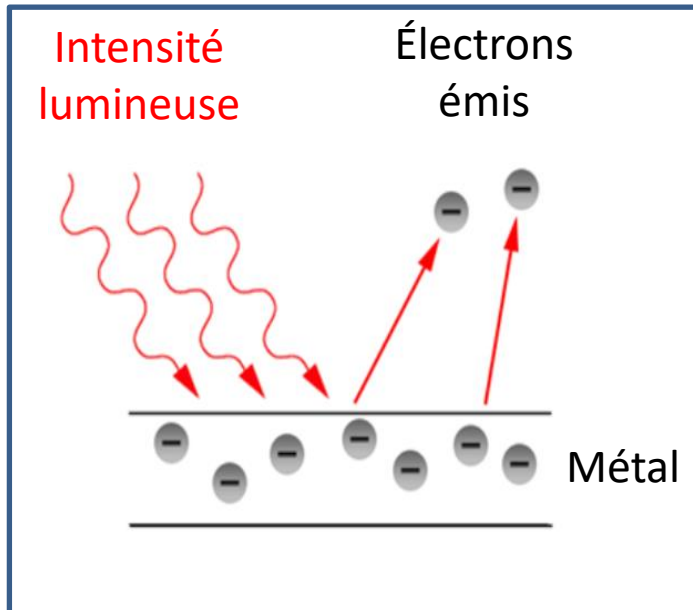
- Aspect expérimental : [travaux de Lenard](#) entre 1899 et 1902 (prix Nobel 1905)



- 1) Pas d'émission en-dessous d'une [fréquence seuil \$\nu_s\$](#) qui dépend du métal
- 2) Particules émises : [toujours des \$e^-\$](#)
- 3) Nombre d' e^- arrachés [proportionnel](#) à l'intensité I du rayonnement UV
- 4) Le [potentiel d'arrêt](#) ($-V_0$) ne dépend pas de l'intensité lumineuse
- 5) Emission [instantanée](#)

3.1 Effet photoélectrique

- Emission instantanée (en réalité $\leq 3 \times 10^{-9}$ s) impossible par la théorie ondulatoire

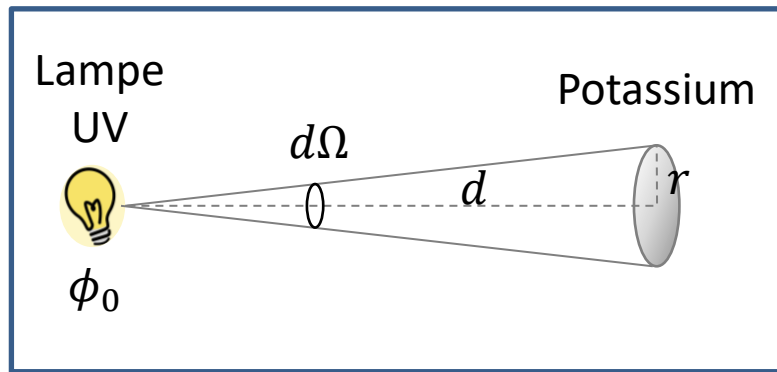


Interprétation (fausse) :

Sous l'influence de l'onde électromagnétique l' e^- dans le métal se met à vibrer à la même fréquence que l'onde et il s'échappe du métal lorsqu'il possède assez d'énergie pour vaincre la barrière de potentiel W_s qui le retient au métal.

3.1 Effet photoélectrique

- Emission instantanée (en réalité $\leq 3 \times 10^{-9}$ s) impossible par la théorie ondulatoire



Feuille de potassium éclairée :

- Hypothèse : l' e^- éjecté recueille son énergie dans un cercle de rayon $r = 10^{-10}$ m (soit 1 rayon atomique)
- $\phi_0 = 1$ W (flux isotrope réparti sur tout le front d'onde)
- $d = 1$ m
- Energie d'extraction d'un e^- du potassium : $W_s = 2,1$ eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ J)

Calcul :

- La puissance $d\phi$ reçue par l' e^- est contenue dans l'angle solide $d\Omega = \frac{\pi r^2}{d^2}$
- $d\phi = \phi_0 \frac{d\Omega}{4\pi} = \phi_0 \frac{r^2}{4d^2} = 1 \times \frac{10^{-20}}{4} = 0,25 \times 10^{-20}$ W
- Tps nécessaire pour accumuler l'énergie W_s : $\Delta t = \frac{W_s}{d\phi} = \frac{3.36 \times 10^{-19}}{0.25 \times 10^{-20}} = 134 \text{ s} = 2,24 \text{ min}$

3.1 Effet photoélectrique

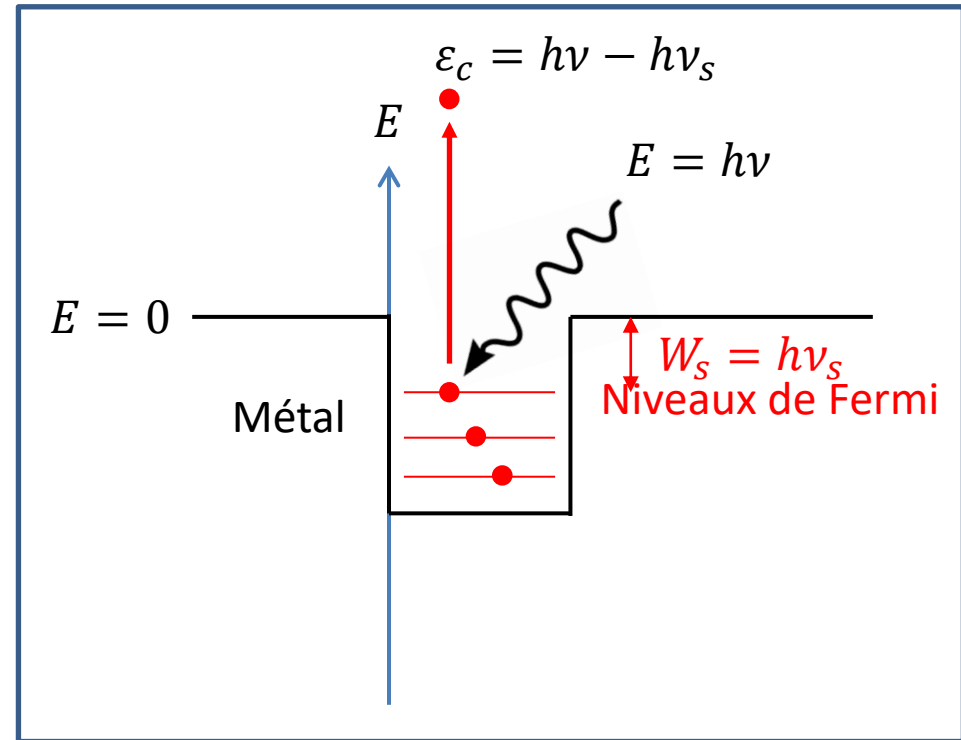
- Modélisation : Einstein

Le photon apporte l'énergie $h\nu$ qui sert à extraire l'électron du métal et à lui donner de l'énergie cinétique

$$h\nu = W_s + \varepsilon_c$$

W_s est le travail d'extraction qui dépend du métal considéré

ε_c est l'énergie cinétique des électrons



3.1 Effet photoélectrique

- Modélisation : Einstein

$$h\nu = W_s + E_c$$

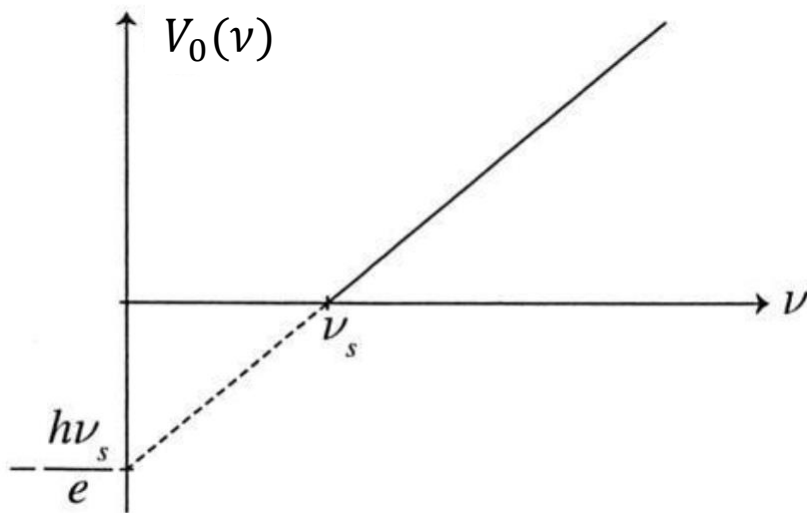
W_s est le travail d'extraction qui dépend du métal considéré

E_c est l'énergie cinétique des électrons

$h\nu < W_s$ ($\nu < \nu_s$)	Pas d'effet photoélectrique
$h\nu = W_s$ ($\nu = \nu_s$)	Extraction de l' e^- mais vitesse nulle. Pas de courant observé
$h\nu > W_s$ ($\nu > \nu_s$)	<ul style="list-style-type: none">- Extraction de l'e^- avec une vitesse : il quitte le métal et crée un courant électrique- L'e^- peut vaincre un potentiel négatif appliqué à l'anode (potentiel d'arrêt)

3.1 Effet photoélectrique

- Expérience de Millikan 1916 (prix Nobel 1923) (à l'origine pour contredire la théorie d'Einstein sur l'existence de quanta de lumière)



Il faut appliquer un potentiel négatif $-V_0$ (potentiel d'arrêt) à l'anode pour annuler le courant dans le circuit.

- Conservation énergie mécanique de l' e^- entre la cathode et l'anode :

$$(\varepsilon_c + \varepsilon_p)_{cath.} = (\varepsilon_c + \varepsilon_p)_{anode}$$

- Potentiel de la cathode choisi nul :

$$(\varepsilon_p)_{cath.} = 0$$

- Potentiel de l'anode :

$$(\varepsilon_p)_{cath.} = -e(-V_0) = +eV_0$$

- Le potentiel d'arrêt correspond à :

$$(\varepsilon_c)_{anode} = 0$$

- $(\varepsilon_c)_{cath.} = h\nu - W_s = h(\nu - \nu_s)$

$$V_0(\nu) = \frac{h}{e}(\nu - \nu_s)$$

Connaissant la charge de l' e^- , la pente de la droite donne h (constante de Planck)

3.2 Quelques repères chronologiques

- 1839 : Antoine Becquerel et son fils Alexandre Edmond Becquerel montrent le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide modifié par un éclairage
- 1887 : Heinrich Hertz réalise expérimentalement qu'un matériau métallique exposé à la lumière peut émettre des « rayons cathodiques »
- 1888 : Wilhelm Hallwachs attribue l'effet à l'émission de charges négatives
- 1892 : Julius Elster et Hans Geitel démontrent la proportionnalité entre le courant photoélectrique et le flux lumineux incident
- 1900 : Philipp Lenard identifie les charges négatives comme des électrons
- 1905 : Albert Einstein propose une explication en utilisant le concept de particule de lumière
- 1916 : Robert Andrews Millikan confirme la théorie d'Einstein et propose une valeur pour la constante de Planck