

# Modéliser la lumière

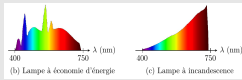
## I Théorie de l'optique ondulatoire : la lumière comme une onde

### 1 - Célérité et indice optique

$c = 3,00 \times 10^8$  m/s (vide)  
 $v = c/n$  (milieu transparent)

### 3 - Sources de lumière, spectres

- lumière blanche
- lampe spectrale
- laser
- source idéale



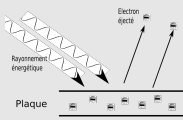
### 2 - Fréquence et longueur d'onde

onde lumineuse :  $s(x, t) = s_0 \cos(2\pi\nu t - kx)$

- fréquence  $\nu$
- longueur d'onde  $\lambda$   $\left\{ \begin{array}{l} \lambda\nu = c/n \end{array} \right.$
- passage vide  $\rightarrow$  milieu d'indice  $n$  :  $\nu = \nu_0$ ,  $\lambda = \lambda_0/n$
- $\lambda_0 =$  couleur

## II Théorie quantique : la lumière est faite de photons

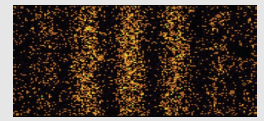
### 1 - Nécessité d'une description corpusculaire



- effet photoélectrique
- lame semi-réfléchissante

### 2 - Mais la nature ondulatoire est aussi nécessaire

- interférences à un photon à la fois



### 3 - Bilan sur la description quantique

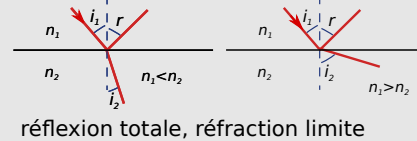
photon = particule + onde  $\Psi(x, t)$   $|\Psi(x, t)|^2 =$  probabilité de présence  $E = h\nu$

## III Théorie de l'optique géométrique : la lumière décrite par des rayons lumineux

### 1 - Concepts et hypothèses

- rayon, propagation rectiligne
- dioptre
- lois de Snell-Descartes  
 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

### 2 - Réfraction et réflexion



réflexion totale, réfraction limite

### 3 - Domaine de validité

- ~~diffraction~~ si obstacles  $\gg \lambda$
- ~~interférences~~

## Ce qu'il faut connaître

\_\_\_\_\_ (cours : I)

- <sub>1</sub> Quelle est la relation entre l'indice optique d'un milieu et la célérité de la lumière qui s'y propage ?
- <sub>2</sub> Quelle est la relation entre la fréquence et la longueur d'onde d'une onde lumineuse progressive harmonique se propageant dans un milieu d'indice  $n$  ?
- <sub>3</sub> Quelle est la relation qui donne la longueur d'onde de la lumière dans un milieu d'indice  $n$  en fonction de sa longueur d'onde dans le vide ?  $\rightarrow$  **EC1**
- <sub>4</sub> Entre quelles longueurs d'onde (dans le vide) le spectre du visible est-il compris ? À quelles couleurs chaque extrême correspond-il ?

\_\_\_\_\_ (cours : II)

- <sub>5</sub> Comment s'écrit la relation de Planck-Einstein qui donne l'énergie d'un photon en fonction de sa fréquence ? Comment se nomme la constante qui y intervient, et quel est son ordre de grandeur et son unité ?
- <sub>6</sub> Citer une expérience qui nécessite de décrire la lumière comme faite de corpuscule (les photons), et en citer une autre qui nécessite de la décrire en termes ondulatoires. (par ex. l'effet photoélectrique, les interférences de Young, l'expérience à lame semi-réfléchissante, etc.)
- <sub>7</sub> Savoir qu'un photon est décrit par une fonction d'onde, et qu'il y a donc à la fois nature corpusculaire (le photon) et ondulatoire (l'onde de probabilité de présence décrite par la fonction d'onde, qui explique interférences et diffraction). Quelle est la signification du module au carré de la fonction d'onde du photon ?

\_\_\_\_\_ (cours : III)

- <sub>8</sub> Qu'est-ce qu'un dioptre ? Écrire la relation de Snell-Descartes. On fera un schéma dans le cas  $n_1 > n_2$  en faisant figurer les angles.

## Ce qu'il faut savoir faire

---

\_\_\_\_\_ (cours : II)

►<sub>9</sub> Utiliser la relation de Planck-Einstein  $E = h\nu$ . →

EC2, TDII

►<sub>10</sub> Interpréter une expérience d'interférences photon par photon en termes probabilistes.

\_\_\_\_\_ (cours : III)

►<sub>11</sub> Utiliser les lois de Descartes. →

EC3, TDIV

►<sub>12</sub> Établir l'expression de l'angle de réfraction limite. →

EC4

►<sub>13</sub> Établir la condition de réflexion totale. →

EC5, TDII,III

►<sub>14</sub> Savoir dire si les conditions de l'optique géométrique sont applicables.

## Exercices de cours

---

### Exercice C1 – Longueur d'onde d'un laser dans l'air et dans l'eau

Un laser rouge émet un rayonnement de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ .

1 - Déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  si l'onde vient à pénétrer dans l'eau d'indice optique  $n = 1,33$ .

2 - La couleur du laser change-t-elle ?

**Correction :**

1 - Côté vide, on sait que  $\lambda_0\nu_0 = c$ .

Dans l'eau, on a  $\lambda\nu = c/n$  car la vitesse devient  $c/n$ . Or  $\nu = \nu_0$  (pas de changement de fréquence), donc on a  $\lambda\nu_0 = c/n$ .

De la relation côté vide, on déduit que  $\nu_0 = c/\lambda_0$ , et on injecte ceci dans l'autre relation :

$$\lambda\nu_0 = \frac{c}{n} \Rightarrow \lambda \frac{c}{\lambda_0} = \frac{c}{n} \Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = 476 \text{ nm.}}$$

2 - La couleur ne change pas, car elle est déterminée par la fréquence.

### Exercice C2 – Nombre de photons envoyés par un laser

On considère un laser rouge de longueur d'onde  $\lambda = 600 \text{ nm}$  et de puissance  $P = 1 \text{ mW}$ . Calculer l'ordre de grandeur du nombre de photons qu'il envoie en  $\Delta t = 1 \times 10^{-2} \text{ s}$  (ce qui est un temps plus court que la persistance rétinienne).

**Correction :**

Pendant  $\Delta t = 1 \times 10^{-2} \text{ s}$ , le laser produit une énergie  $E_{\text{tot}} = P \times \Delta t = 1 \times 10^{-5} \text{ J}$ .

Or chaque photon possède une énergie  $E_{1 \text{ photon}} = h \times \nu = h \times \frac{c}{\lambda}$  (on prend  $n = 1$  car on est dans l'air).

En notant  $N$  le nombre de photons émis pendant  $\Delta t$ , on a nécessairement la relation  $E_{\text{tot}} = N \times E_{1 \text{ photon}}$ .

D'où  $N = \frac{E_{\text{tot}}}{E_{1 \text{ photon}}} = \frac{P\Delta t \times \lambda}{hc}$ , soit  $\boxed{N = 3,0 \times 10^{13}}$ . Il y a donc beaucoup de photons !

### Exercice C3 – Appliquer les lois de Snell-Descartes

Un rayon lumineux se propage dans l'air et arrive sur un bloc de verre d'indice  $n = 1,5$ . Calculer l'angle d'incidence pour que le rayon réfléchi soit perpendiculaire au rayon réfracté.

(Cet angle est appelé angle de Brewster et a de nombreux intérêts lorsque l'on considère la polarisation de la lumière.)

**Correction :**

On commence toujours par un schéma. Ici on se place dans le cas où il y a un angle droit entre le rayon réfléchi et le rayon transmis.

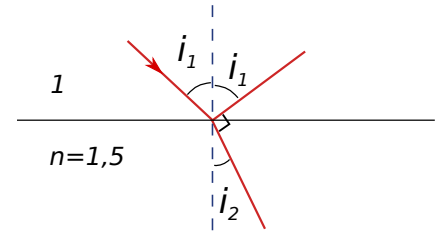
On a la relation  $1 \times \sin i_1 = n \sin i_2$  avec  $n = 1,5$ , et on voit aussi sur le schéma qu'ici on a  $i_1 + \pi/2 + i_2 = \pi$ , soit donc  $i_2 = \pi/2 - i_1$ .

On injecte ceci dans la relation de Descartes, qui devient :

$$\sin i_1 = n \sin(\pi/2 - i_1)$$

Or  $\sin(\pi/2 - x) = \cos x$ , donc on a

$$\sin i_1 = n \cos i_1, \quad \text{donc} \quad \tan i_1 = n \quad \text{donc} \quad \boxed{i_1 = \arctan n = 56^\circ.}$$



### Exercice C4 – Valeur maximale de l'angle de réfraction

On considère un dioptre plan séparant des milieux d'indice optique  $n_1$  et  $n_2$ . Un rayon lumineux arrive depuis le milieu 1. Supposons  $n_1 < n_2$ .

- 1 - Donner un exemple de deux milieux qui vérifient cette condition.
- 2 - Représenter la situation sur un schéma. À partir de ce schéma, expliquer qualitativement (= sans calculs) pourquoi le rayon réfracté existe toujours et pourquoi l'angle de réfraction  $i_2$  admet une valeur maximale  $i_{2,max}$ .
- 3 - Calculer  $i_{2,max}$  en fonction des indices  $n_1$  et  $n_2$ .

**Correction :**

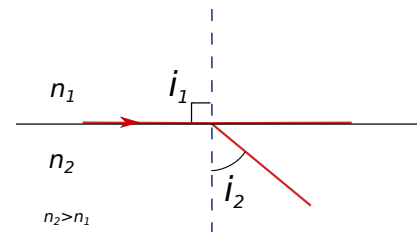
- 1 - Par exemple un passage de l'air ( $n_1 = 1$ ) à l'eau ( $n_2 = 1,3$ ).
- 2 - Plus on écarte le rayon incident de la normale, plus le rayon transmis s'écarte aussi de sa normale. Il arrive un moment (cf schéma ci-dessous) où le rayon incident est tout juste rasant : ainsi le rayon transmis ne pourra se déplacer davantage. On atteint une valeur  $i_{2,max}$  pour  $i_2$ .  
(voir l'animation avec le laser sur le site de la classe si besoin)

On se place dans la situation limite. On a alors  $i_1 = \pi/2$ , et donc  $n_1 \sin \pi/2 = n_2 \sin i_2$ .

Or  $\sin \pi/2 = 1$ , donc on a

$$3 - \quad \sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{donc} \quad \boxed{i_2 = \arcsin \frac{n_1}{n_2} = 50,3^\circ.}$$

(l'AN est pour  $n_1 = 1$  et  $n_2 = 1,3$ ).



### Exercice C5 – Condition de réflexion totale

On considère un dioptre plan séparant des milieux d'indice optique  $n_1$  et  $n_2$ . Un rayon lumineux arrive depuis le milieu 1. Supposons  $n_1 > n_2$ .

- 1 - Donner un exemple de deux milieux qui vérifient cette condition.
- 2 - Représenter la situation sur un schéma. À partir de ce schéma, expliquer qualitativement (= sans calculs) pourquoi il existe une valeur limite  $i_{1,lim}$  de l'angle d'incidence au delà de laquelle le rayon réfracté ne peut plus exister.
- 3 - Calculer  $i_{1,lim}$  en fonction des indices  $n_1$  et  $n_2$ .

**Correction :**

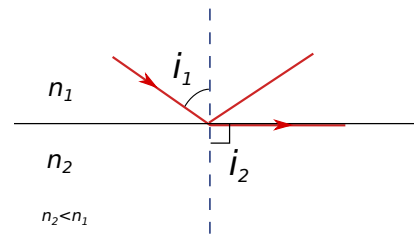
- 1 - Par exemple un passage de l'eau ( $n_1 = 1,3$ ) à l'air ( $n_2 = 1$ ).
- 2 - Lorsqu'on écarte le rayon incident de la normale, le rayon transmis s'écarte aussi de sa normale. Il arrive un moment (cf schéma ci-dessous) où le rayon transmis est tout juste rasant : si on incline davantage le rayon incident, alors le rayon transmis disparaît.  
(voir l'animation avec le laser sur le site de la classe si besoin)

On se place dans la situation limite. On a alors  $i_2 = \pi/2$ , et donc  $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin \pi/2$ .

Or  $\sin \pi/2 = 1$ , donc on a

3 - 
$$\sin i_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{donc} \quad i_1 = \arcsin \frac{n_2}{n_1} = 50,3^\circ.$$

(l'AN est pour  $n_1 = 1,3$  et  $n_2 = 1$ ).



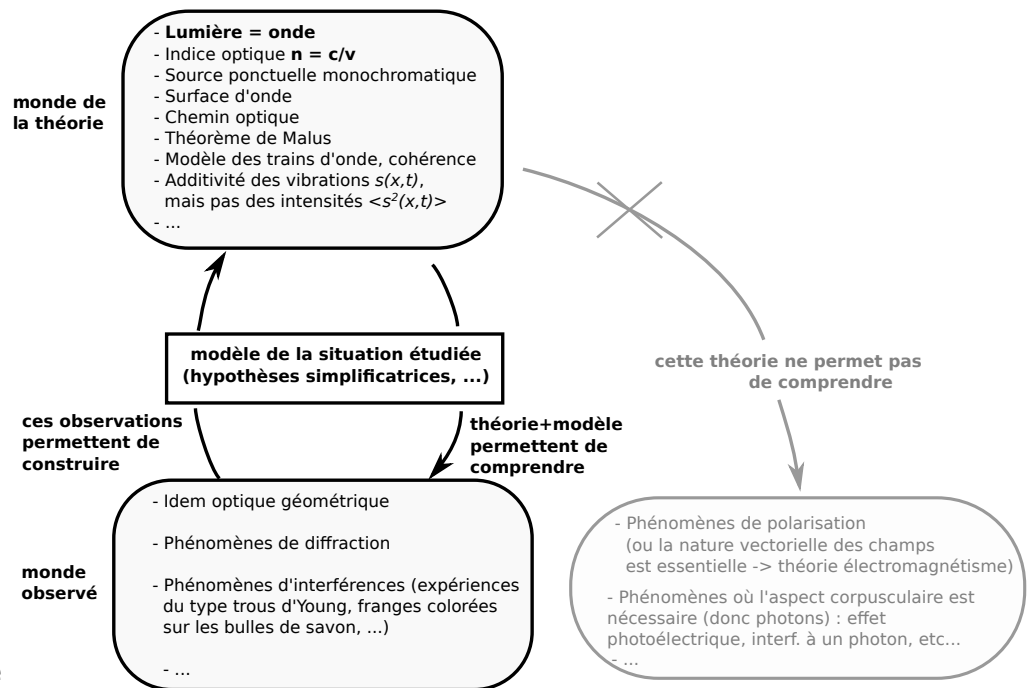
## Cours

### I – Théorie de l'optique ondulatoire : la lumière comme une onde

Expériences d'interférences ou de diffraction de la lumière  $\Rightarrow$  la lumière doit être décrite comme une onde.

La théorie ondulatoire de la lumière, développée à partir de 1700 par les travaux de Huygens, permet ainsi d'expliquer avec précision un grand nombre d'observations.

Nous en présentons des éléments dans cette première partie.



### 1 – Célérité et indice optique

#### a/ Célérité

##### Célérité dans le vide

La célérité des ondes lumineuses se propageant dans le vide est  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Remarque :** L'unité "un mètre" est aujourd'hui définie, par convention, comme la distance  $d$  parcourue par la lumière en  $t = 1/299\,792\,458$  seconde. Ainsi la célérité de la lumière a une valeur numérique exacte, et  $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

##### Célérité dans un milieu transparent (verre, eau, gaz...)

Dans un milieu transparent, la lumière se propage plus lentement que dans le vide, avec une célérité

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

où  $n$  est l'indice optique du milieu.

$n$  est sans unité :  $[n] = 1$ . On a toujours  $n \geq 1$  ( $n = 1$  correspond au vide).

Plus  $n$  est élevé, plus le milieu est dit **réfringent**.

Quelques valeurs :

- $n_{\text{eau}} = 1,3$
- $n_{\text{verre}} \simeq 1,5$  (peut aller de 1,2 à 1,8)
- $n_{\text{diamant}} = 2,4$  (c'est l'un des plus élevés)
- $n_{\text{air}} = 1,0003$  : on peut faire comme si  $n_{\text{air}} \simeq 1$ , donc une célérité de la lumière dans l'air d'environ  $c$ .

#### b/ Types de milieux

- On parle de **milieu homogène** lorsque l'indice optique prend la même valeur partout (contre exemple : l'atmosphère sous certaines conditions  $\rightarrow$  mirages).

- On parle de **milieu isotrope** lorsque la propagation de la lumière se fait de la même façon quelle que soit la direction (contre exemple : certains cristaux).
- On parle de **milieu dispersif** lorsque l'indice optique dépend de la longueur d'onde de la lumière. C'est le cas de tous les milieux (sauf le vide). Ceci explique par exemple les arc-en-ciel, car les différentes couleurs ne sont pas déviées d'un même angle dans les gouttes d'eau (loi de Snell-Descartes).

La formule de Cauchy donne  $n$  en fonction de  $\lambda$  :  $n(\lambda) = A + B/\lambda^2$ , avec  $A$  et  $B$  qui dépendent du milieu. C'est une formule approchée.

## 2 – Fréquence et longueur d'onde

### Ondes monochromatiques

On étudie des ondes planes progressives harmoniques. On les nomme aussi des **ondes monochromatiques** (ce qui signifie "une seule couleur").

Elles sont donc du type

$$s(t) = s_0 \cos(2\pi\nu t - kx),$$

avec  $\nu$  la fréquence,  $\lambda = 2\pi/k$  la longueur d'onde (et éventuellement une phase à l'origine  $\varphi$ ).

Nous avons également la relation de dispersion :  $\lambda\nu = v = c/n$ .

### a/ Dans le vide

Onde dans le vide : notons  $\nu_0$  et  $\lambda_0$  la fréquence et la longueur d'onde. On a donc  $\lambda_0\nu_0 = c$ .

### La lumière visible

Lumière visible = petite gamme de longueurs d'onde :  $\lambda_0 \in [400 \text{ nm}, 800 \text{ nm}]$ .

400 nm = bleu, 800 nm = rouge.

En dessous de 400 nm : ultraviolet, au dessus de 800 nm : infrarouge.

Couleur perçue par l'œil → dépend de la fréquence  $\nu_0$  → donc aussi de  $\lambda_0$ .

Ainsi à chaque longueur d'onde correspond une couleur pure, correspondance valable dans le vide uniquement (ou dans l'air en très bonne approximation).

**Remarque :** Toutes les couleurs ne correspondent pas à une onde monochromatique. Le rose par exemple est absent du spectre du visible, et est une couleur perçue lorsque l'œil reçoit un certain mélange de couleurs monochromatiques.

### b/ Dans un milieu d'indice $n$

Onde dans un milieu d'indice  $n$  : notons  $\nu$  et  $\lambda$  la fréquence et la longueur d'onde. On a  $\lambda\nu = c/n$ .

### Propriétés

Lors du passage d'un milieu à un autre :

- La fréquence de l'onde ne change pas :  $\nu = \nu_0$ .
- La longueur d'onde est modifiée pour que la relation de dispersion soit respectée :  $\lambda \neq \lambda_0$ .

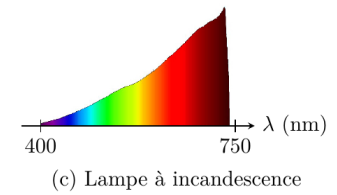
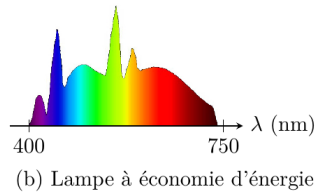
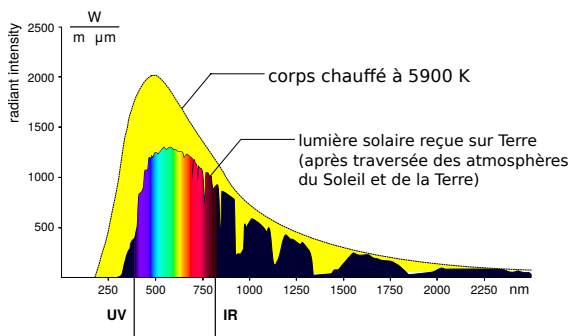
→<sub>1</sub> Faire l'exercice **EC1**.

## 3 – Sources de lumière, spectres

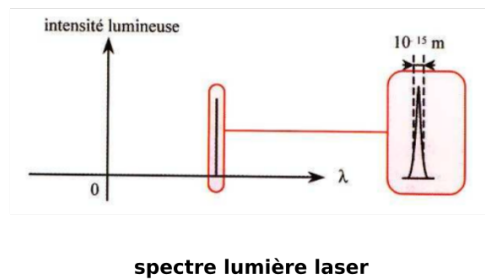
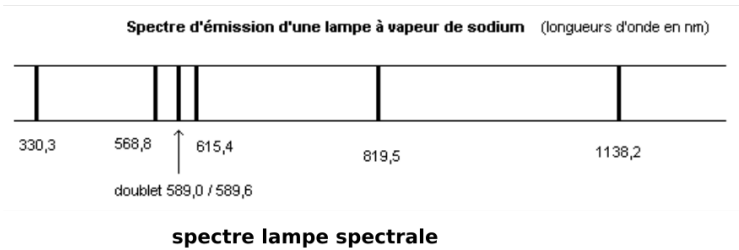
Une source de lumière est caractérisée par le spectre de la lumière qu'elle émet. On peut tracer ce spectre soit en fonction de la fréquence  $\nu$ , soit le plus souvent en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide.

### a/ Exemples de sources réelles

**Sources de lumière blanche :** elles produisent toutes les longueurs d'onde.



**Lampe spectrale :** il s'agit d'une ampoule dans laquelle est enfermé un gaz. Les atomes du gaz sont excités par des décharges électriques, ce qui a pour effet de faire passer leurs électrons dans des états d'énergie plus élevée. Lorsque les électrons repassent dans un niveau d'énergie plus bas, ceci émet une onde de fréquence toujours identique. Cf chapitre à venir sur la structure de la matière.



Voir site de la classe pour plus de spectres et des couleurs.

**Laser :** un laser produit un spectre composé d'une unique raie, très fine.

## b/ Le modèle de la source ponctuelle monochromatique

### Définition

Une source ponctuelle monochromatique est une source d'étendue réduite à un point (ponctuelle) et émettant une seule longueur d'onde (monochromatique).

Il s'agit d'un modèle, aucune source réelle n'atteignant ces spécifications. Le laser est celle s'en approchant le plus.

## II – Théorie quantique : la lumière est faite de photons

**Remarque :** Conformément au programme, cette partie est abordée sous la forme de l'étude de documents. Les points à retenir sont résumés dans le bilan de la partie 3.

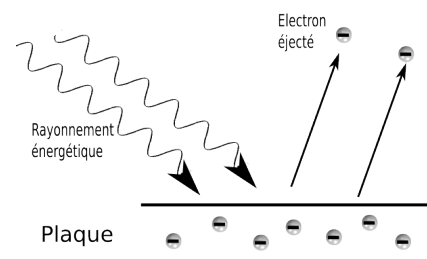
### 1 – Nécessité d'une description corpusculaire de la lumière

Nous venons de dire que la lumière doit être décrite comme une onde. Et pourtant, les expériences présentées ci-dessous vont montrer que ceci ne suffit pas.

#### a/ Expérience sur l'effet photoélectrique

##### Document 1 : expérience sur l'effet photoélectrique

Dès 1850, la nature ondulatoire de la lumière était clairement nécessaire pour expliquer les expériences d'interférence ou de diffraction. Une autre expérience, réalisée à partir de 1886 par Lenard, va pourtant jeter un trouble sur ces convictions : il s'agit de la mise en évidence de l'effet photoélectrique décrite ici.



L'expérience est schématisée ci-dessus. On a une plaque métallique enfermée dans une cellule sous vide. On la soumet à un rayonnement de fréquence  $\nu$ . On observe que sous certaines conditions, des électrons sont arrachés du métal.

### Observations :

On éclaire la plaque de métal avec un rayonnement de fréquence  $\nu$ . Les expériences montrent l'existence d'une fréquence limite  $\nu_{\text{lim}}$  telle que :

- Si  $\nu < \nu_{\text{lim}}$ , alors il n'y a aucun arrachement d'électrons, même si l'intensité lumineuse est très forte.
- Si  $\nu > \nu_{\text{lim}}$ , alors il y a toujours arrachement d'électrons, même à très très faible intensité lumineuse.

De plus, on constate que l'énergie cinétique des électrons arrachés est du type  $E_c = a\nu + b$ , indépendante de l'intensité lumineuse de la source.

On effectue par ailleurs les hypothèses suivantes, qui semblent raisonnables :

- Les électrons sont arrachés de la plaque car ils absorbent la lumière incidente. C'est donc le transfert de l'énergie lumineuse vers les électrons qui produit cet arrachement.
- Pour arracher un électron de la plaque de métal, c'est-à-dire pour l'éloigner des noyaux atomiques chargés positivement, il faut lui fournir une énergie minimale  $W > 0$ , appelé travail d'extraction.  $W$  est une constante qui ne dépend que du métal choisi.

### Explication qui ne convient pas :

- La lumière est une onde d'énergie proportionnelle à l'intensité de la source.

→ Expliquer pourquoi l'explication ci-dessus ne convient pas (quelles observations échoue-t-elle à expliquer?).

Si lumière = onde, alors il y aurait arrachement d'électrons pour toute fréquence (il suffirait d'utiliser une intensité lumineuse assez forte).

Mais ce n'est pas le cas : en dessous de  $\nu_{\text{lim}}$  il n'y a aucun arrachement, même à intensité très forte.

De plus, si lumière = onde alors  $E_{c,\text{électrons}}$  augmenterait avec l'intensité de la source, ce qui n'est pas le cas.

→ La théorie ondulatoire échoue donc à expliquer cette expérience !

**Possible explication :** (proposée par Einstein en 1905, lui vaudra le prix Nobel)

- La lumière est composée de particules individuelles (appelés **photons**), chacune d'énergie  $E$  proportionnelle à la fréquence de la lumière :  $E = h\nu$  avec  $h$  une constante.
- Les interactions entre lumière et électrons sont des interactions entre un photon à la fois et un électron. Les interactions ne se font donc pas de façon continue, mais se font de façon discrète : par interaction entre deux particules. Lorsqu'un électron absorbe un photon, il gagne son énergie. S'il n'est pas éjecté, cette énergie est redistribuée immédiatement dans le métal.

→ Pourquoi cela permet-il d'expliquer l'expérience ?

- Si  $h\nu < W$ , y a-t-il arrachement ?

Non car alors chaque photon ne possède pas assez d'énergie pour arracher un électron. (Augmenter l'intensité ne fait qu'augmenter le nombre de photons, mais pas leur énergie individuelle qui reste égale à  $h\nu < W$ .)

- Si  $h\nu > W$ , que ce passe-t-il ?

Chaque photon a suffisamment d'énergie pour arracher un électron, ce qui explique l'arrachement systématique.

(L'intensité lumineuse très faible signifie un faible nombre de photons, mais chaque photon possède la même énergie  $h\nu$  qui suffit à arracher un électron.)

De plus, les électrons ont bien une énergie cinétique  $E_c = h\nu - W$ .

→ Quelle est l'expression de la fréquence seuil en fonction de  $h$  et de  $W$  ?

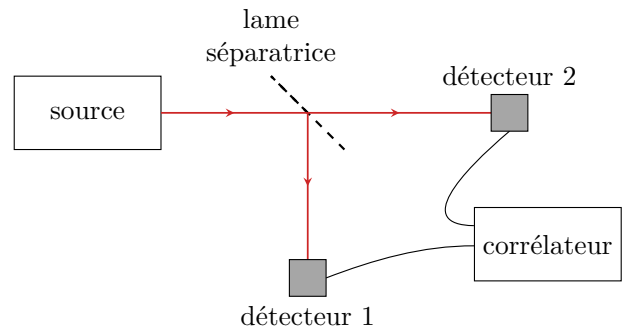
Elle vérifie donc  $h\nu_{\text{seuil}} = W$ .

## b/ Expérience avec lame semi-réfléchissante

### Document 2 : expérience avec lame semi-réfléchissante et source à un photon

La nécessité de la nature corpusculaire de la lumière est admise dès les années 1920. Les expériences la confirmant ont cependant encore continué. Nous présentons ici une telle autre expérience, réalisée en 1977 par Mandel, et qui vient montrer de façon frappante la nécessité du modèle des photons. On dispose d'une source de lumière d'intensité très faible : si la lumière est bien constituée de photons, alors on est certain que cette source n'envoie qu'un seul photon à la fois dans le reste du dispositif.

La lumière est envoyée sur une lame semi-réfléchissante, dispositif qui divise un faisceau de lumière en deux parties d'intensité égale. On dispose ensuite d'un détecteur vers chaque voie de sortie de la lame. On note  $I_1(t)$  l'intensité lumineuse enregistrée par le détecteur 1, et  $I_2(t)$  celle enregistrée par le second. Enfin, un dispositif appelé corrélateur permet de calculer les corrélations entre  $I_1$  et  $I_2$ , c'est-à-dire de voir si de la lumière arrive en même temps sur les deux détecteurs ou non.



**Observations :** On mesure une corrélation nulle (aux incertitudes près), c'est-à-dire que la lumière n'arrive jamais en même temps sur les deux détecteurs à la fois, mais soit sur l'un, soit sur l'autre.

**Explication qui ne convient pas :** la lumière est décrite comme une onde.

→<sub>5</sub> Expliquer pourquoi la description de la lumière par une onde ne convient pas, et pourquoi celle en tant que photons convient.

– Hypothèse ondulatoire : la lame séparatrice aurait alors pour effet de séparer l'intensité de l'onde en deux parties égales,  $I_1(t) = I_0/2$  et  $I_2(t) = I_0/2$ ; Les deux détecteurs seraient alors toujours éclairés en même temps.

– La lumière est décrite par des photons, envoyés individuellement par la source. La lame semi-réfléchissante envoie alors le photon soit sur le détecteur 1, soit sur le détecteur 2, mais jamais sur les deux en même temps ! La corrélation est donc bien nulle.

## c/ Bilan

Il est donc nécessaire pour comprendre certaines expériences, de décrire la lumière comme composée de corpuscules, les photons, se déplaçant à la vitesse  $c$  et dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence :  $E = h\nu$ .

On parle ainsi de **nature corpusculaire** de la lumière.

La constante  $h$  est appelée constante de Planck, et vaut environ  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

On utilise également la constante de Planck réduite  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

## 2 – Mais la nature ondulatoire est également nécessaire

### a/ Expérience des trous d'Young

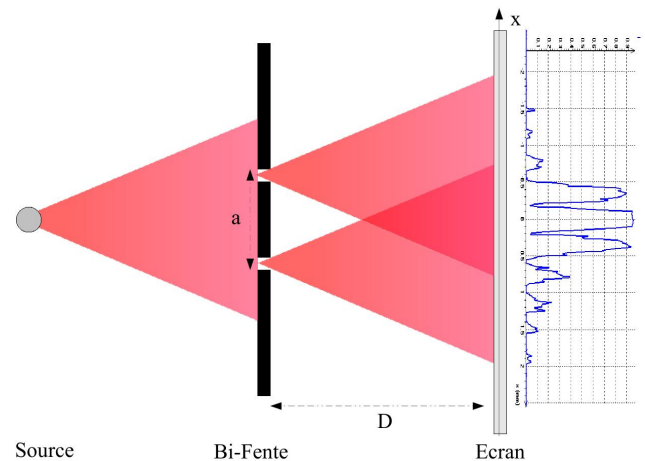
Revenons sur l'expérience d'interférence de Young (image ci-contre).

La description ondulatoire convient tout à fait : les deux trous agissent chacun comme une source, et il en résulte des interférences, avec des zones sombres là où les deux ondes sont en opposition de phase, et des zones brillantes là où elles sont en phase.

Mais la description corpusculaire semble échouer à comprendre cette expérience : en effet, un photon passe soit par un trou, soit par l'autre, pas par les deux à la fois, et tout devrait alors se passer comme s'il y avait un seul trou...

Nous sommes donc dans une situation inconfortable, avec deux théories qui semblent s'exclure mutuellement et qui pourtant sont nécessaires toutes les deux en fonction de l'expérience...

Revenons donc sur les expériences d'interférences, et voyons de plus près si elles ne peuvent pas être expliquées aussi par le modèle corpusculaire.



### Document 3 : interférences à un photon

Il s'agit de recommencer l'expérience de Young, mais avec une source de lumière qui envoie un photon à la fois.

**Observations :** À chaque photon envoyé, on observe un point quelque part sur le détecteur CCD. À mesure que les photons sont envoyés, l'image sur le capteur reconstitue celle de la figure d'interférence que l'on observe avec un laser classique.

Toutefois, si on ferme l'un des deux trous, alors l'image formée sur le capteur n'est plus celle d'une figure d'interférence : c'est donc que chaque photon "voit" les deux trous !



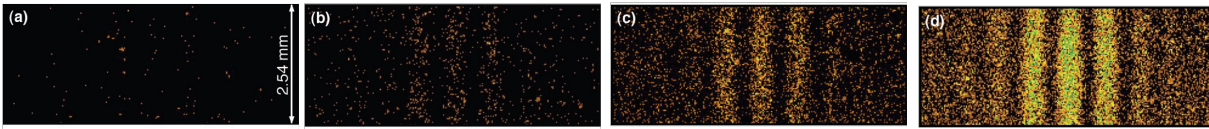


Figure : Images sur un capteur CCD d'expérience d'interférence avec envoi d'un photon à la fois. Les quatre images sont à des instants différents. (source : thèse de Vincent Jacques, 2007) Voir aussi la vidéo sur le site de la classe.

### Explication qui ne convient pas :

- La lumière est composée de particules qui passent par une fente à la fois et se comportent de façon classique.

→<sub>6</sub> Pourquoi ceci ne permet-il pas d'expliquer les observations ?

Il n'y aurait pas d'interférences

### Possible explication :

- La lumière est une onde, il y a interférence.
- Chaque photon individuel doit être décrit par une onde, qui passe par les deux trous à la fois. On note son amplitude  $\Psi(x,t)$ , nommée "fonction d'onde". (c'est la lettre grecque psi)
- La valeur de  $\Psi$  est liée à la probabilité de présence du photon. Au niveau du capteur CCD, si elle est importante en un point  $M$  alors le photon a une grande probabilité de se matérialiser ici. Si elle est nulle, aucun photon n'apparaîtra ici.

→<sub>7</sub> Pourquoi ceci permet-il d'expliquer les observations ?

La fonction d'onde  $\Psi$  du photon émis se comporte comme une onde habituelle.

Deux trous  $\Rightarrow$  deux sources secondaires  $\Rightarrow$  interférences avec max et min de probabilité de détecter un photon sur l'écran.

Cette explication appartient à la théorie de la mécanique quantique. Pour des raisons non abordées ici, il faut pour pouvoir prédire exactement les figures d'interférences que la fonction d'onde  $\Psi(x,t)$  soit non pas réelle mais complexe (à valeurs dans  $\mathbb{C}$ , et que la probabilité de présence du photon soit donnée par son module au carré.

## 3 – Bilan sur la description quantique de la lumière

### Propriétés

La lumière possède un comportement à la fois ondulatoire et corpusculaire. Elle peut être décrite par des photons, qui possèdent les propriétés suivantes :

- Un photon est associée à une onde  $\Psi(x,t)$  (appelée fonction d'onde).  
 $\Psi(x,t) \in \mathbb{C}$ .
- La probabilité de mesurer un photon en un point  $x$  à un instant  $t$  est proportionnelle à  $|\Psi(x,t)|^2$ .

Notons  $\nu$  la fréquence de l'onde.

- Énergie du photon :  $E = h\nu$  (relation de Planck-Einstein).
- Quantité de mouvement :  $\|\vec{p}\| = h/\lambda$ .
- Vitesse dans le vide :  $c$ .
- Masse : nulle.

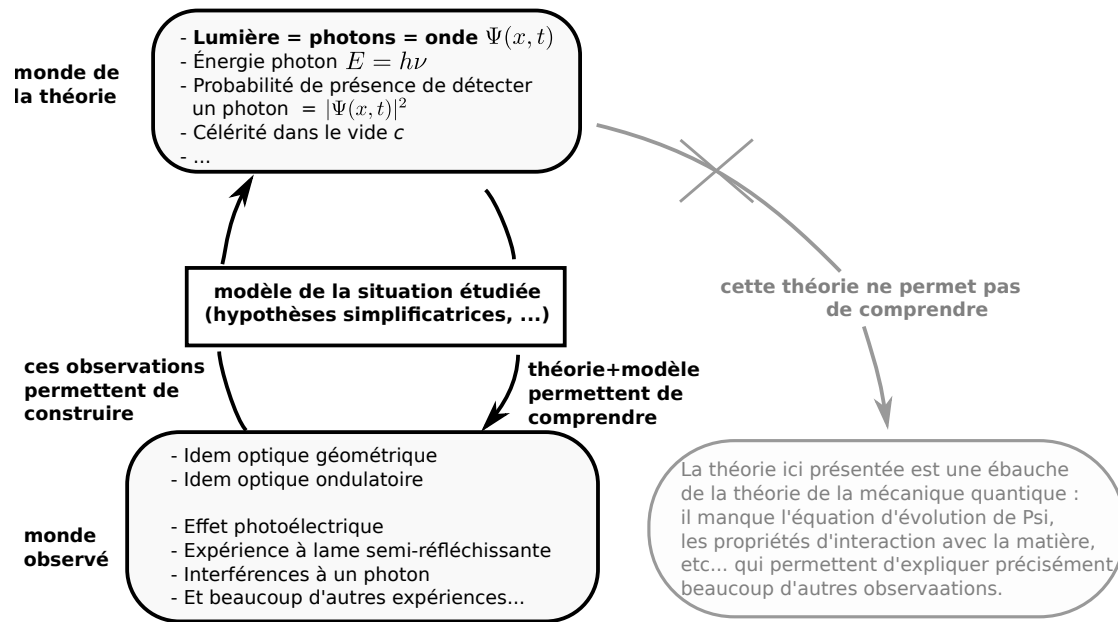
Comme la lumière possède à la fois des propriétés associées à une onde et à une particule, on parle de dualité onde-particule.

$h$  est la constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  environ.

**Remarque :** Les effets corpusculaires ne se manifestent pas toujours : ils le font dans des situations où le nombre de photons est petit (cas de la lame semi réfléchissante ou des interférences à un photon), ou encore lorsque les énergies en jeu sont de l'ordre de celle d'un unique photon (cas de l'effet photoélectrique).

Nous arrivons ainsi à une ébauche de la **théorie quantique de la lumière**.

Elle possède un domaine de validité plus grand que la théorie ondulatoire.



**Remarque :** La théorie quantique concerne la lumière (les photons), mais aussi toute la matière (électrons, atomes...). Nous aborderons la description de la matière dans la partie "structure de la matière".

→8 Faire l'exercice **EC2**.

### III – Théorie de l'optique géométrique : la lumière décrite par des rayons lumineux

#### 1 – Concepts et hypothèses de la théorie de l'optique géométrique

##### a/ Rayons lumineux, dioptries, indice optique

###### Définitions

**Rayon lumineux :** trajet suivi par le front de l'onde lumineuse dans le point de vue ondulatoire, ou par les photons dans le point de vue corpusculaire.

**Indice optique :** idem théorie ondulatoire :  $n = c/v$  avec  $v$  la vitesse du rayon lumineux.

**Milieu homogène et isotrope :** idem théorie ondulatoire.

**Dioptrie :** surface séparant deux milieux d'indices optiques différents.

##### Hypothèses de base :

- Les rayons lumineux sont indépendants (ils se croisent sans se perturber) : on ne prend donc pas en compte les interférences.
- Les rayons lumineux ne sont pas déviés par des obstacles ou des ouvertures petites : on ne prend donc pas en compte la diffraction.

Une source émet des rayons dans toutes les directions. L'objectif de la théorie de l'optique géométrique est de prévoir le trajet de ces rayons.

##### b/ Règles de propagation des rayons

###### Propriétés des rayons lumineux

- **Propagation rectiligne :** dans un milieu homogène, un rayon lumineux se propage en ligne droite.
- **Principe du retour inverse de la lumière :** si un rayon lumineux va de A à B, alors le trajet de retour de B à A est le même.
- **Changement de milieu :** lois de Snell-Descartes (voir ensuite).

Ces trois propriétés, en plus des deux hypothèses de base au dessus, permettent de démontrer toutes les relations de l'optique géométrique.

### Lois de Snell-Descartes

Soit un dioptre, dont on repère la normale. On appelle plan d'incidence le plan qui contient le rayon incident et la normale (c'est le plan de la feuille sur nos schémas).

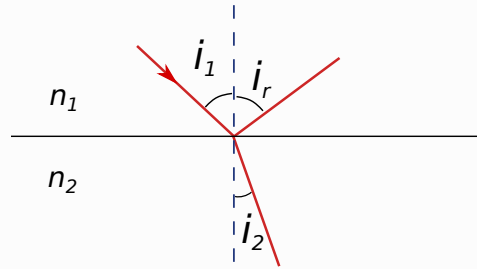
Un rayon incident sur le dioptre est en partie réfléchi, en partie transmis.

1/ Les rayons transmis et réfléchi sont dans le plan d'incidence (donc dans le plan de la feuille).

2/ Rayon réfléchi : l'angle est donné par  $i_r = i_1$ .

3/ Rayon transmis : aussi appelé rayon réfracté. S'il existe il vérifie  $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ .

Schéma :



**Attention** : les angles sont toujours repérés par rapport à la normale.

Les lois de Snell-Descartes ont été établies expérimentalement par Snell, puis Descartes, vers 1630.

**Remarque** : Toutes les propriétés ci-dessus (propagation rectiligne, retour inverse, lois de Descartes) peuvent en réalité être démontrées à partir d'un postulat plus fondamental encore, le principe de Fermat. Ce principe n'est pas au programme, mais il est parfois utile pour bien interpréter les déviations.

### Principe de Fermat

Les rayons lumineux suivent le chemin le plus rapide pour aller de la source jusqu'à un point d'arrivée donné.

→<sub>9</sub> Faire l'exercice **EC3**.

## 2 – Étude de la réflexion et réfraction lors d'un changement de milieu

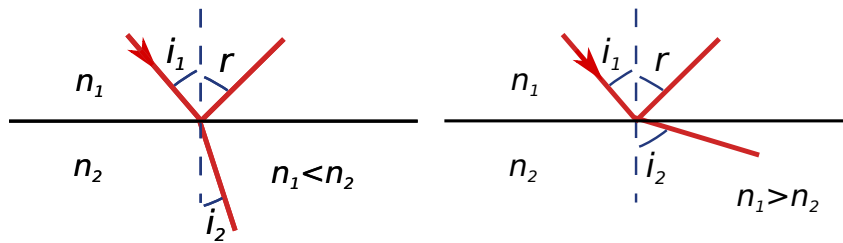
Nous passons maintenant à une étude plus détaillée de ce phénomène.

### a/ Déviation plus ou moins importante

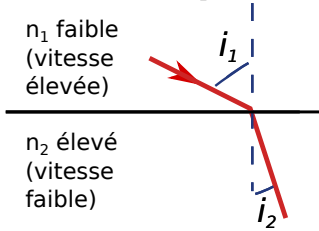
Considérons deux cas :

- Passage vers un milieu plus réfringent :  $n_1 < n_2$ .

- Passage vers un milieu moins réfringent :  $n_1 > n_2$ .



**Remarque :** Interprétation en terme de vitesse de propagation et du principe de Fermat :



Le trajet suivi est tel que le temps de parcours est minimal.

Pour passer moins de temps dans le milieu où  $n$  est élevé (et donc la vitesse faible!), la lumière se rapproche de la normale.

### b/ Angle de réfraction limite

Cas du passage vers un milieu plus réfringent :  $n_1 < n_2$ . L'angle  $i_2$  possède alors une valeur maximale  $i_{2,max}$ .

→<sub>10</sub> Faire l'exercice **EC4**.

### c/ Réflexion totale

Cas du passage vers un milieu moins réfringent :  $n_1 > n_2$ . Lorsque  $i_1$  est supérieur à un angle limite  $i_{1,lim}$ , alors il n'y a plus de rayon réfracté.

⇒ la réflexion est totale.

Ceci est utilisé par exemple pour guider la lumière dans les fibres optiques, pour les détecteurs de pluie, etc.

→<sub>11</sub> Faire l'exercice **EC5**.

## 3 – Domaine de validité de la théorie de l'optique géométrique

Pour que la théorie de l'optique géométrique mène à des prédictions correctes, il faut que les phénomènes de diffraction soient négligeables.

Or l'angle  $\theta$  de déviation (par la diffraction) d'un faisceau de lumière (de longueur d'onde  $\lambda$ ) lorsqu'il rencontre un objet de taille ou d'ouverture  $a$  vérifie

$$\sin \theta \simeq \frac{\lambda}{a}.$$

Cette déviation doit être négligeable, il faut donc  $\frac{\lambda}{a} \ll 1$ , donc il faut des objets ou ouvertures de taille  $a \gg \lambda$ .

Un bon ordre de grandeur est  $a \geq 1000\lambda \simeq 1 \text{ mm}$ .

Et pour conclure sur la théorie de l'optique géométrique, un résumé sous forme de diagramme :

