

Lumière, matière & physique quantique

Onde électro-
magnétique

λ, ν

interférences,
diffraction



Dualité
onde-corpuscule

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Photons
Quanta
d'énergie

$$E = h\nu$$

Effet photo-
électrique



Lumière, matière & physique quantique

Résumé des épisodes précédents

- ▶ -400 000 ans : Maîtrise du feu

- ▶ Antiquité : recherche sur la "vision"

- ▶ Idée de "vision" ; idée de "lumière"

- ▶ Concepts

- ▶ de *rayon visuel*
- ▶ d'*image virtuelle*

- ▶ Modélisation

- ▶ *Théorie corpusculaire*
- ▶ *Théorie ondulatoire*
 - ▶ Principe de Huygens
- ▶ *Principe du moindre temps de Fermat*

- ▶ Description des phénomènes de

- ▶ *réflexion*
- ▶ *réfraction*

- ▶ Expérience des fentes d'Young

- ▶ *Concept d'onde*
- ▶ *Notion de polarisation*

- ▶ L'*indice de réfraction*

- ▶ Caractéristique des matériaux
- ▶ Concept de dispersion

- ▶ **Nature de la perturbation ?**
- ▶ **Signification de la fréquence de vibration ?**

- ▶ Phénomènes naturels

- ▶ Les mirages inférieurs
- ▶ (l'arc-en-ciel)

La nature de la lumière

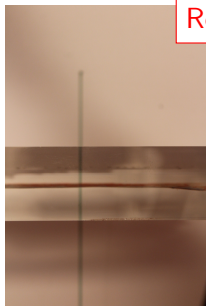
La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

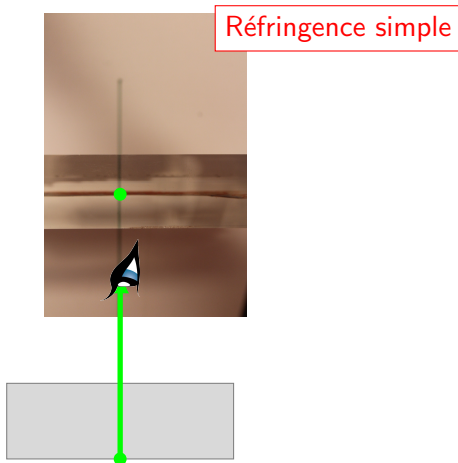


Réfringence simple

La nature de la lumière

La biréfringence

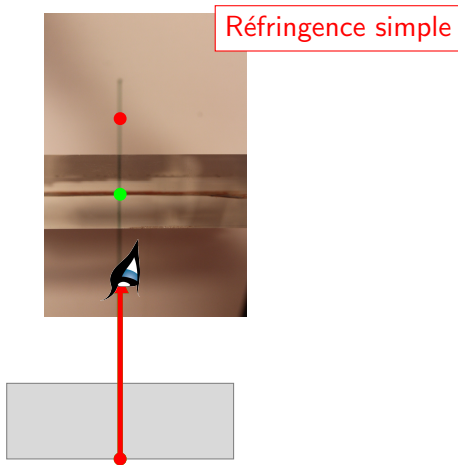
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.



La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

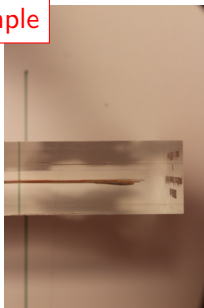
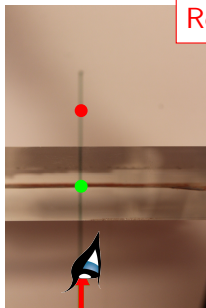


La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

Réfringence simple

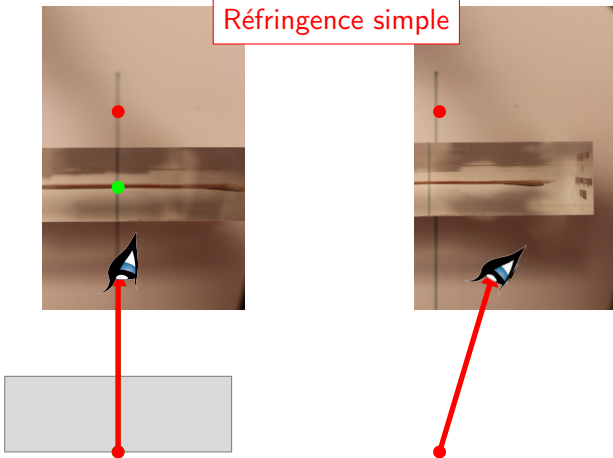


La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

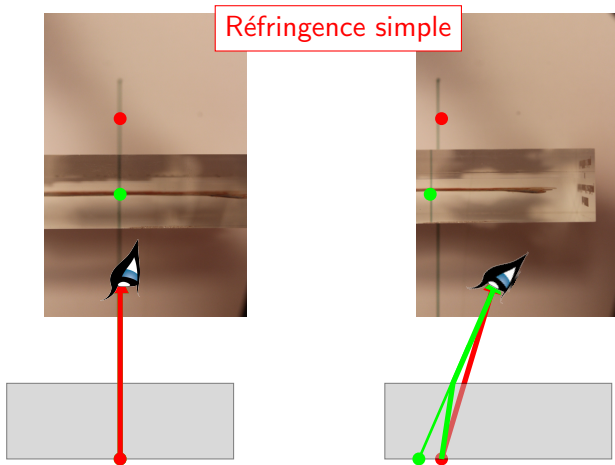
Réfringence simple



La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

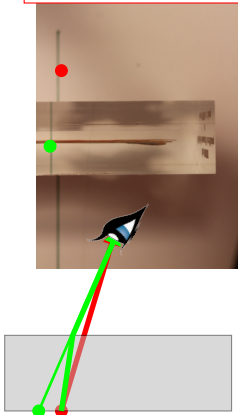


La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

Réfringence simple



Biréfringence

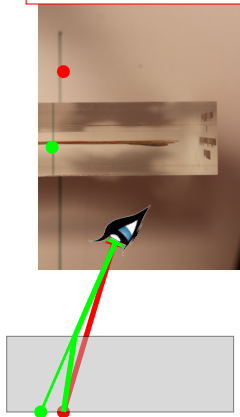


La nature de la lumière

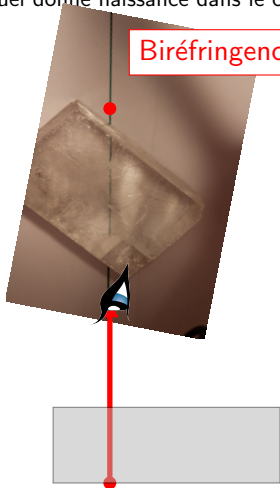
La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

Réfringence simple



Biréfringence

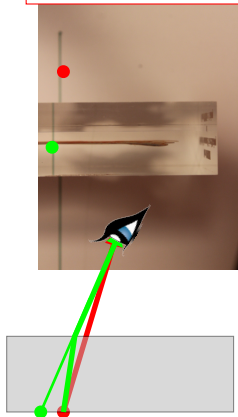


La nature de la lumière

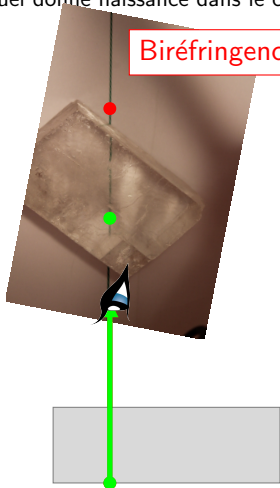
La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

Réfringence simple



Biréfringence

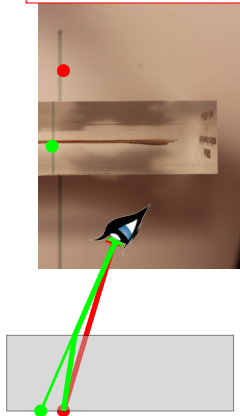


La nature de la lumière

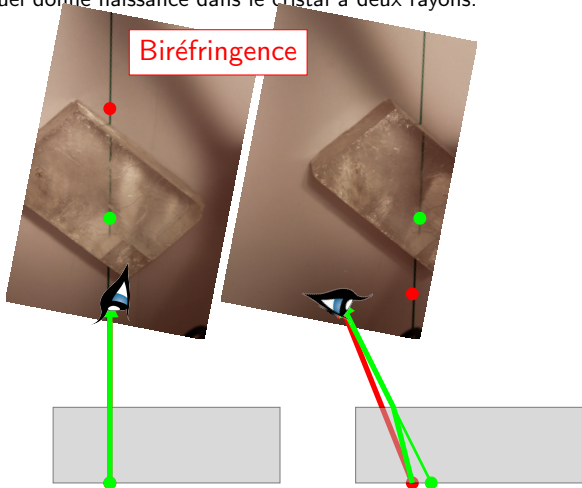
La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.

Réfringence simple



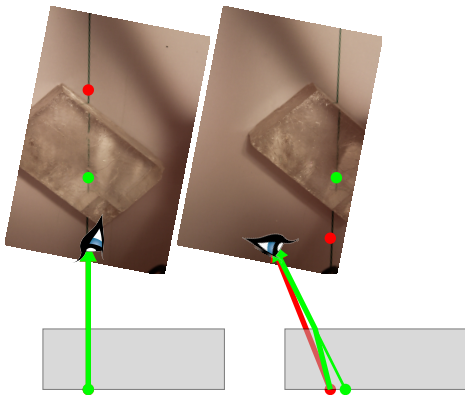
Biréfringence



La nature de la lumière

La biréfringence

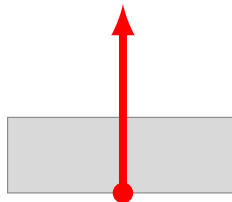
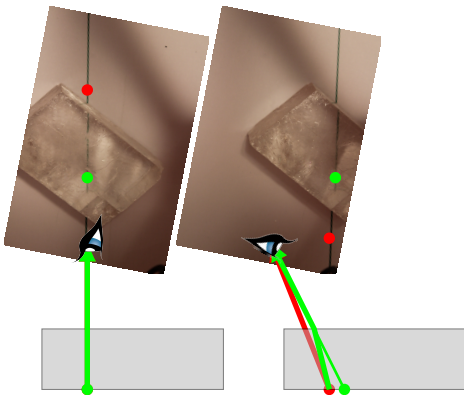
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.



La nature de la lumière

La biréfringence

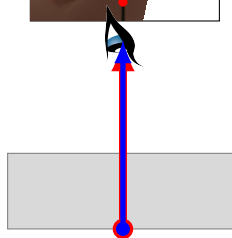
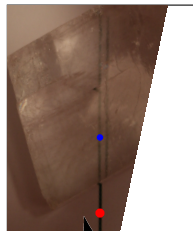
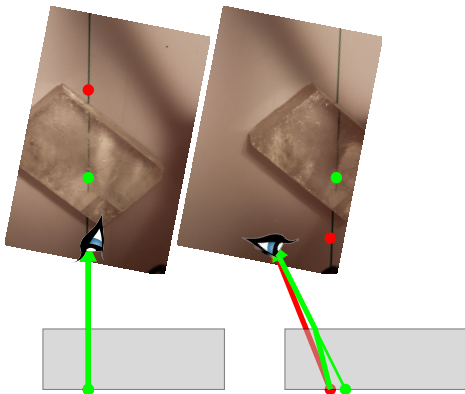
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.



La nature de la lumière

La biréfringence

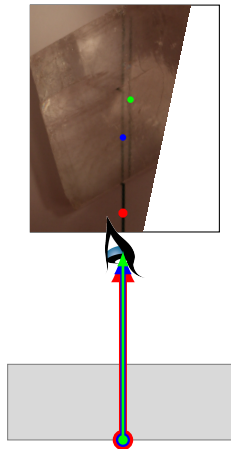
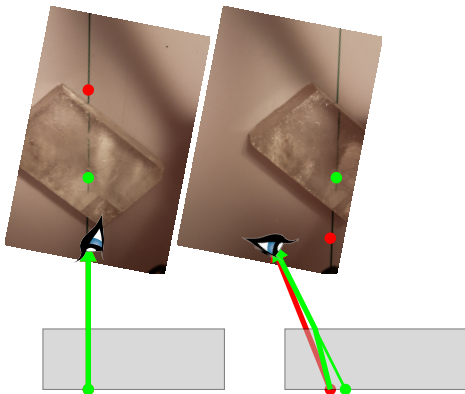
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.



La nature de la lumière

La biréfringence

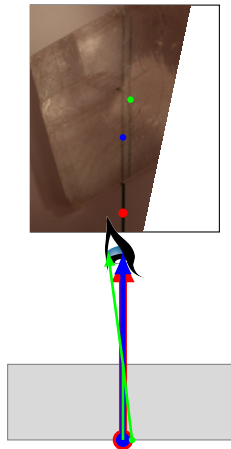
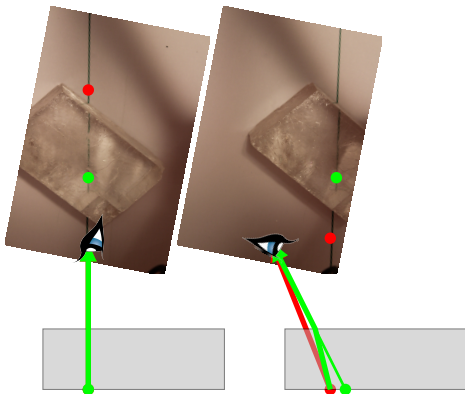
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.



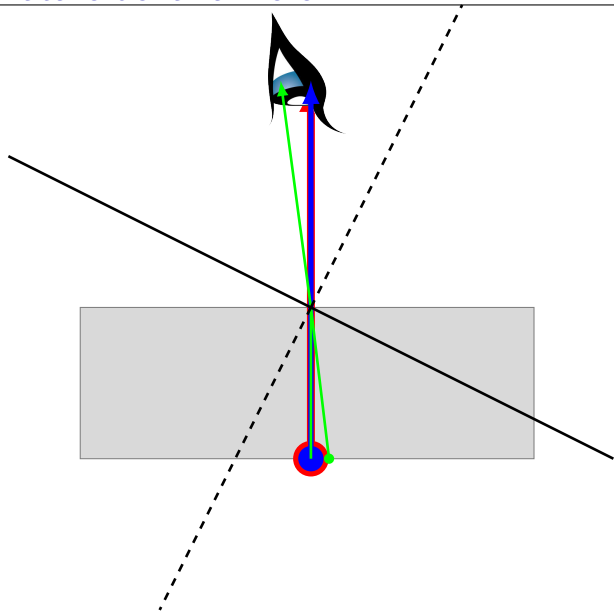
La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visual donne naissance dans le cristal à deux rayons.

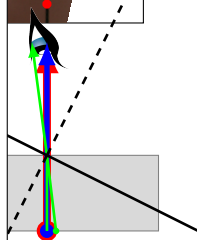
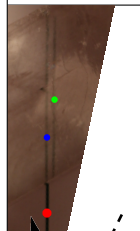


La nature de la lumière



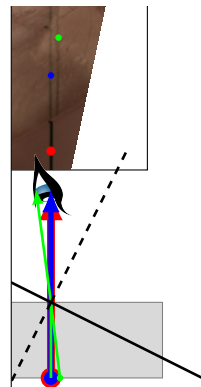
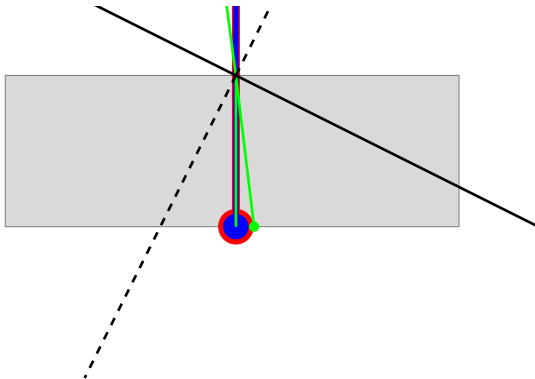
(biréfringence) du

ons.



La nature de la lumière

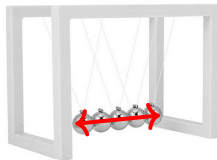
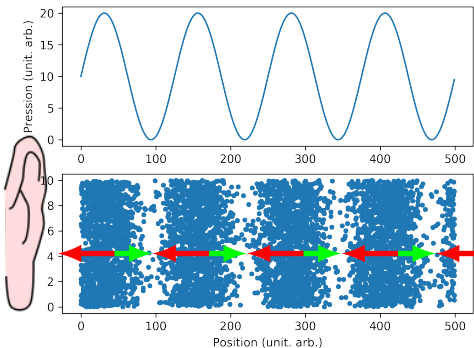
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.
- ▶ 1821, **Fresnel** propose l'idée, pour expliquer la biréfringence, que les vibrations lumineuses sont *transversales* et non pas longitudinales comme cela était admis jusqu'alors.



La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière jusqu'à Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation
→ **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son



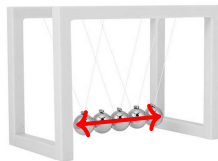
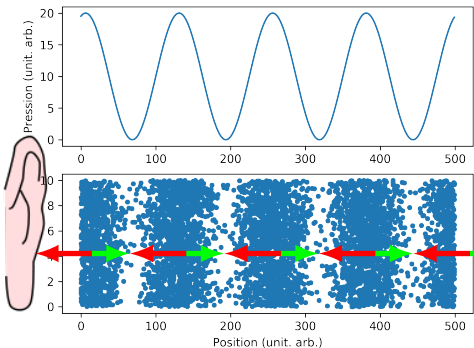
Onde longitudinale

- ▶ Vision de la vibration lumineuse pour Huygens et Young par exemple

La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière jusqu'à Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation → **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son



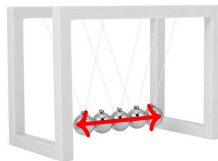
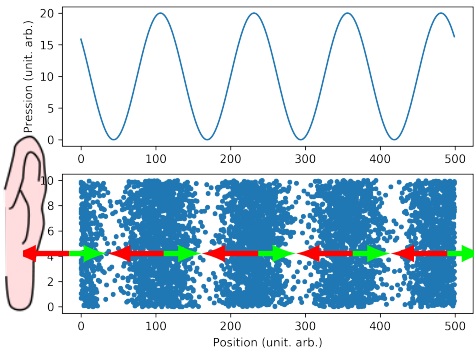
Onde longitudinale

- ▶ Vision de la vibration lumineuse pour Huygens et Young par exemple

La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière jusqu'à Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation
→ **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son



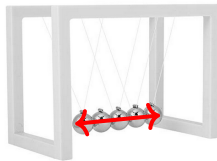
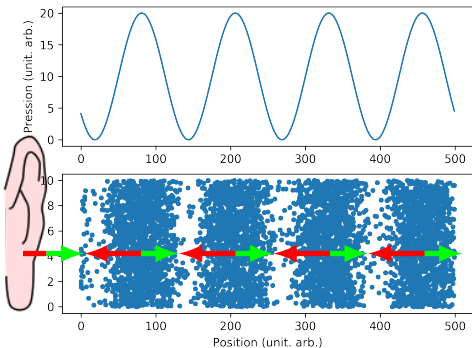
Onde longitudinale

- ▶ Vision de la vibration lumineuse pour Huygens et Young par exemple

La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière jusqu'à Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation
→ **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son



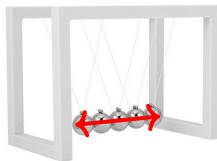
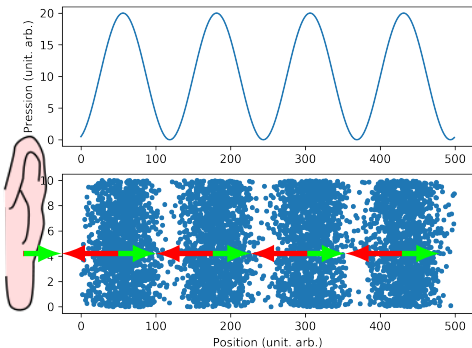
Onde longitudinale

- ▶ Vision de la vibration lumineuse pour Huygens et Young par exemple

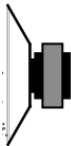
La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière jusqu'à Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation
→ **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son



Onde longitudinale

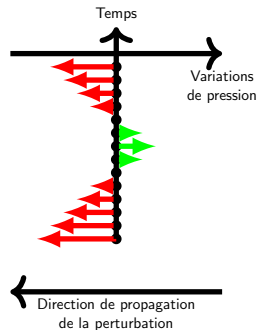
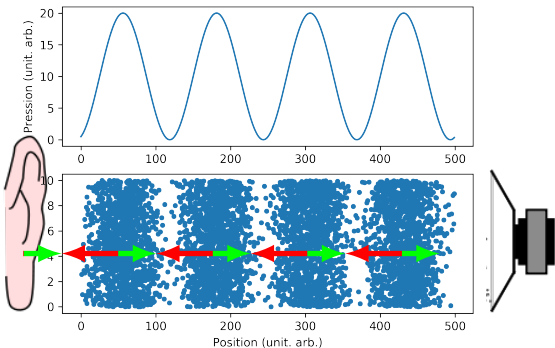


- ▶ Vision de la vibration lumineuse pour Huygens et Young par exemple

La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière jusqu'à Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation → **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son

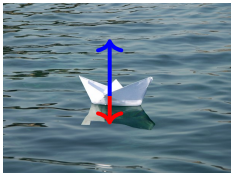


- ▶ Vision de la vibration lumineuse pour Huygens et Young par exemple

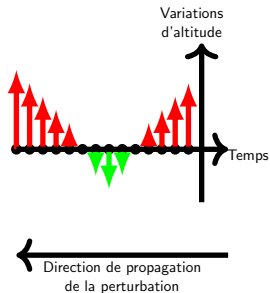
La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière jusqu'à Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation → **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **perpendiculaire** à la direction de propagation → **polarisation transversale**
 - ▶ le bateau sur l'eau : propagation à 2D → Une seule direction de polarisation



Onde Transversale

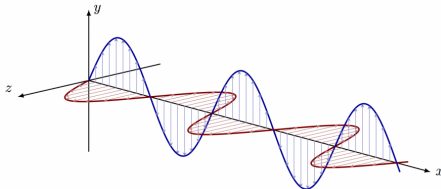
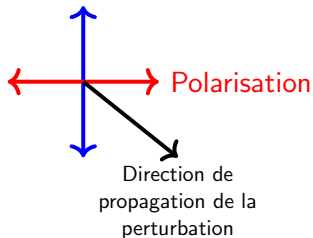


La polarisation

La vision de la polarisation de la lumière selon Fresnel

- ▶ Une onde est un mode de propagation d'une grandeur dont les variations en un point de l'espace, au cours du temps, sont reliées à ses variations d'un point à un autre
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **parallèle** à la direction de propagation → **polarisation longitudinale** ; Exemple : le son
- ▶ Si la grandeur varie selon la direction **perpendiculaire** à la direction de propagation → **polarisation transversale**
 - ▶ le bateau sur l'eau : propagation à 2D → Une seule direction de polarisation
 - ▶ lumière : propagation unidimensionnelle → Deux directions de polarisation transversales

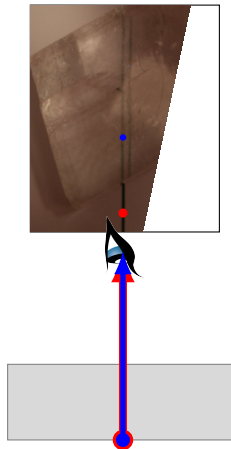
Polarisation 2



La nature de la lumière

La biréfringence

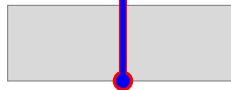
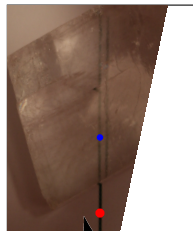
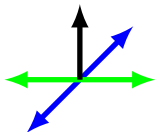
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.
- ▶ 1821, **Fresnel** propose l'idée, pour expliquer la biréfringence, que les vibrations lumineuses sont *transversales* et non pas longitudinales comme cela était admis jusqu'alors.



La nature de la lumière

La biréfringence

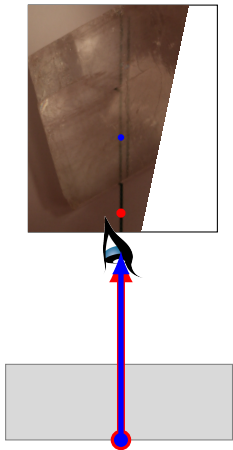
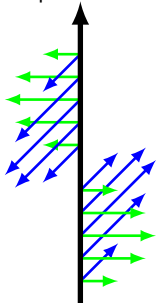
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.
- ▶ 1821, **Fresnel** propose l'idée, pour expliquer la biréfringence, que les vibrations lumineuses sont *transversales* et non pas longitudinales comme cela était admis jusqu'alors.
- ▶ La propagation étant unidirectionnelle, cela permet deux directions de polarisation
→ chacun des deux rayons correspond à une polarisation spécifique



La nature de la lumière

La biréfringence

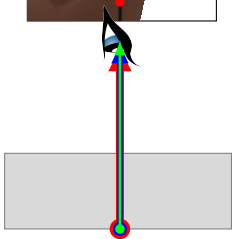
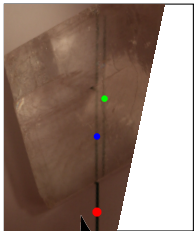
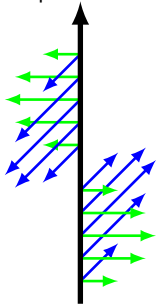
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.
- ▶ 1821, **Fresnel** propose l'idée, pour expliquer la biréfringence, que les vibrations lumineuses sont *transversales* et non pas longitudinales comme cela était admis jusqu'alors.
- ▶ La propagation étant unidirectionnelle, cela permet deux directions de polarisation
→ chacun des deux rayons correspond à une polarisation spécifique



La nature de la lumière

La biréfringence

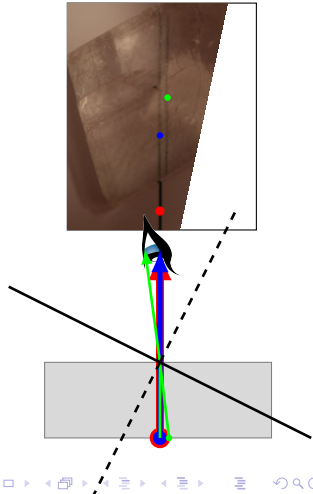
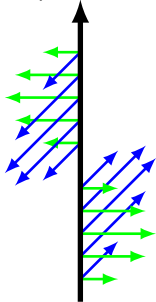
- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.
- ▶ 1821, **Fresnel** propose l'idée, pour expliquer la biréfringence, que les vibrations lumineuses sont *transversales* et non pas longitudinales comme cela était admis jusqu'alors.
- ▶ La propagation étant unidirectionnelle, cela permet deux directions de polarisation
→ chacun des deux rayons correspond à une polarisation spécifique



La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.
- ▶ 1821, **Fresnel** propose l'idée, pour expliquer la biréfringence, que les vibrations lumineuses sont *transversales* et non pas longitudinales comme cela était admis jusqu'alors.
- ▶ La propagation étant unidirectionnelle, cela permet deux directions de polarisation
→ chacun des deux rayons correspond à une polarisation spécifique

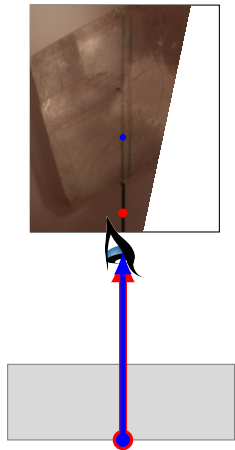
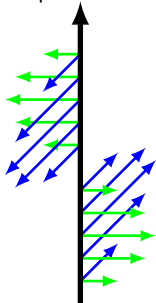


La nature de la lumière

La biréfringence

- ▶ 1669, **Bartholin**, observe pour la première fois la *double réfraction* (ou *biréfringence*) du spath d'Islande (calcite).
- ▶ *Biréfringence* : un rayon visuel donne naissance dans le cristal à deux rayons.
- ▶ 1821, **Fresnel** propose l'idée, pour expliquer la biréfringence, que les vibrations lumineuses sont *transversales* et non pas longitudinales comme cela était admis jusqu'alors.
- ▶ La propagation étant unidirectionnelle, cela permet deux directions de polarisation
→ chacun des deux rayons correspond à une polarisation spécifique

Nature des
vibrations
lumineuses ?

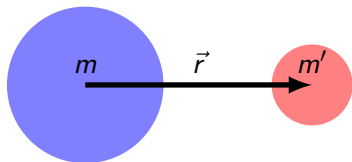


La notion de champ

- **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- **Exemple** : *le champ de gravitation terrestre*. Newton énonça, en 1687, dans ses *Principes*, la loi de gravitation universelle : deux particules matérielles quelconques de masse m et m' , distantes de r , s'attirent suivant la loi

$$\vec{F}_{m/m'} = -G \frac{mm'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la masse m exerce sur la masse m'

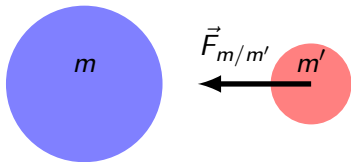


La notion de champ

- **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- **Exemple** : *le champ de gravitation terrestre*. Newton énonça, en 1687, dans ses *Principes*, la loi de gravitation universelle : deux particules matérielles quelconques de masse m et m' , distantes de r , s'attirent suivant la loi

$$\vec{F}_{m/m'} = -G \frac{mm'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la masse m exerce sur la masse m'

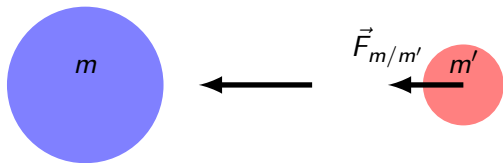


La notion de champ

- **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- **Exemple** : *le champ de gravitation terrestre*. Newton énonça, en 1687, dans ses *Principes*, la loi de gravitation universelle : deux particules matérielles quelconques de masse m et m' , distantes de r , s'attirent suivant la loi

$$\vec{F}_{m/m'} = -G \frac{mm'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la masse m exerce sur la masse m'

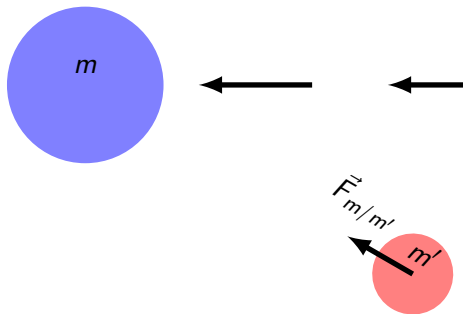


La notion de champ

- **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- **Exemple** : *le champ de gravitation terrestre*. Newton énonça, en 1687, dans ses *Principes*, la loi de gravitation universelle : deux particules matérielles quelconques de masse m et m' , distantes de r , s'attirent suivant la loi

$$\vec{F}_{m/m'} = -G \frac{mm'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la masse m exerce sur la masse m'

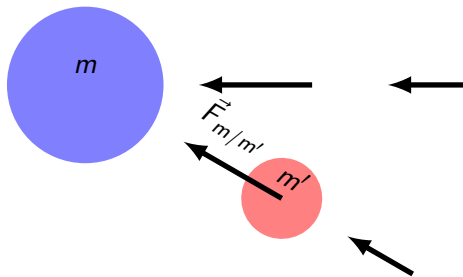


La notion de champ

- **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- **Exemple** : *le champ de gravitation terrestre*. Newton énonça, en 1687, dans ses *Principes*, la loi de gravitation universelle : deux particules matérielles quelconques de masse m et m' , distantes de r , s'attirent suivant la loi

$$\vec{F}_{m/m'} = -G \frac{mm'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la masse m exerce sur la masse m'

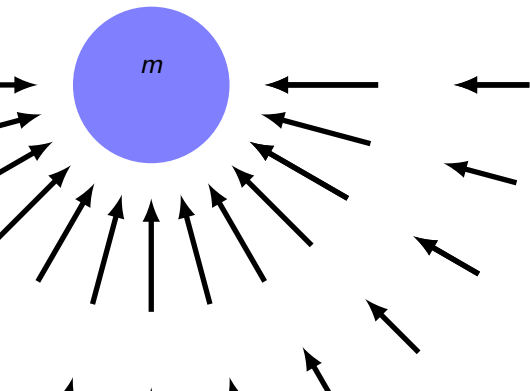


La notion de champ

- **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- **Exemple** : *le champ de gravitation terrestre*. Newton énonça, en 1687, dans ses *Principes*, la loi de gravitation universelle : deux particules matérielles quelconques de masse m et m' , distantes de r , s'attirent suivant la loi

$$\vec{F}_{m/m'} = -G \frac{mm'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la masse m exerce sur la masse m'



Champ de gravitation : il existe indépendamment du fait qu'il y ait ou non une masse m'

$$\vec{g}_m = -G \frac{m}{r^3} \vec{r}$$

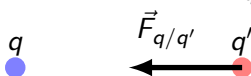
$$\vec{F}_{m/m'} = m' \vec{g}_m$$

Le champ électromagnétique

- ▶ **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- ▶ *Exemples*
 - ▶ champ de gravitation,
 - ▶ champ magnétique,
 - ▶ champ électrique,
 - ▶ ...

Le champ électromagnétique

- ▶ **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- ▶ *Exemples*
 - ▶ champ de gravitation,
 - ▶ champ magnétique,
 - ▶ champ électrique,
 - ▶ ...
- ▶ 1784, **Coulomb** détermine que l'interaction entre deux particules chargées est une force proportionnelle aux charges électriques et inversement proportionnelle au carré de leur distance


$$\vec{F}_{q/q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la charge q exerce sur la charge q'

Le champ électromagnétique

- ▶ **Champ d'une grandeur physique** : le champ d'une grandeur physique est défini dans un domaine de l'espace ou d'un milieu matériel lorsqu'en tout point de ce domaine il existe une détermination complète de cette grandeur.
- ▶ *Exemples*
 - ▶ champ de gravitation,
 - ▶ champ magnétique,
 - ▶ champ électrique,
 - ▶ ...
- ▶ 1784, **Coulomb** détermine que l'interaction entre deux particules chargées est une force proportionnelle aux charges électriques et inversement proportionnelle au carré de leur distance

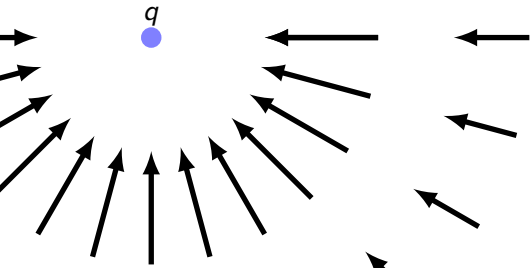
$$\vec{F}_{q/q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^3} \vec{r}$$

Force que la charge q exerce sur la charge q'

Champ électrostatique généré par la source q : il existe indépendamment du fait qu'il y ait ou non une charge q'

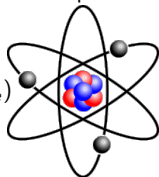
$$\vec{E}_q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r}$$

$$\vec{F}_{q/q'} = q' \vec{E}_q$$



Le champ électromagnétique

- ▶ **Source de lumière** : le feu
- ▶ Assemblée d'atomes et/ou de molécules en agitation thermique
- ▶ Un atome : un noyau (charge $+$) très localisé entouré d'un nuage électronique (charge $-$)
- ▶ Rayon atome $\gg$ rayon du noyau (≈ 100000)
- ▶ Masse noyau $\gg$ masse du cortège électronique ($m_{proton} \approx 2000m_e$)
- ▶ $\rightarrow$ lorsque 2 atomes vont entrer en collision l'un avec l'autre en raison de l'agitation thermique, il va y avoir une forte répulsion coulombienne entre les nuages électroniques
- ▶ déformation de l'atome $\rightarrow$ modification de répartition des électrons autour du noyau
- ▶ $\rightarrow$ excitation

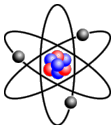


Un atome dans son état fondamental $+e$
 $\Leftrightarrow$ une charge positive et une charge 
négative confondue $-e$

L'excitation de l'atome correspond à une oscillation de la position des charges positive et négative de l'atome autour de leur position d'équilibre

Le champ électromagnétique

- **Champs et ondes** : lorsqu'un champ est perturbé localement, la perturbation ne reste pas localisée mais elle va se propager en formant une onde progressive.

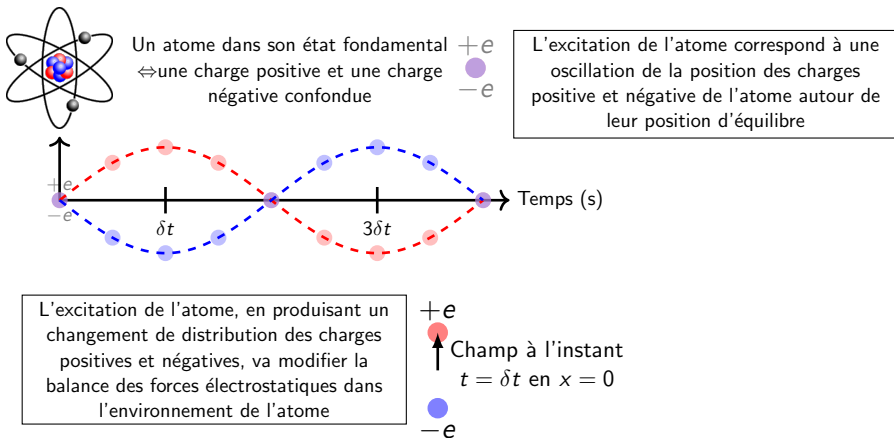


Un atome dans son état fondamental
 $\Leftrightarrow$ une charge positive et une charge
négative confondue



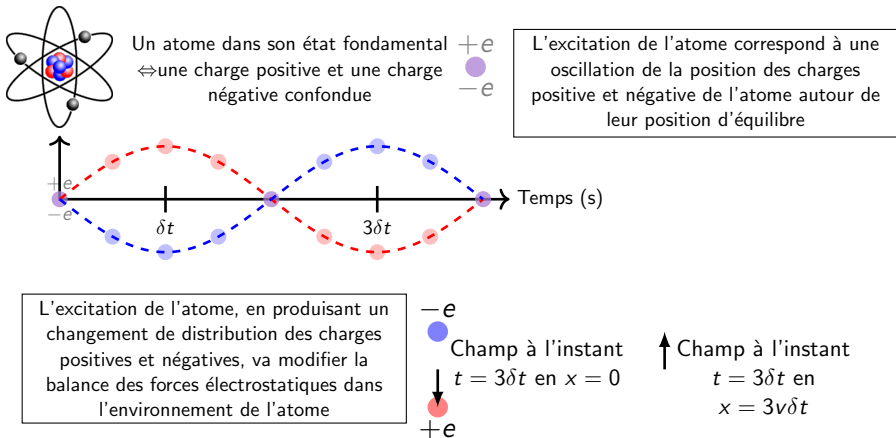
Le champ électromagnétique

- **Champs et ondes** : lorsqu'un champ est perturbé localement, la perturbation ne reste pas localisée mais elle va se propager en formant une onde progressive.



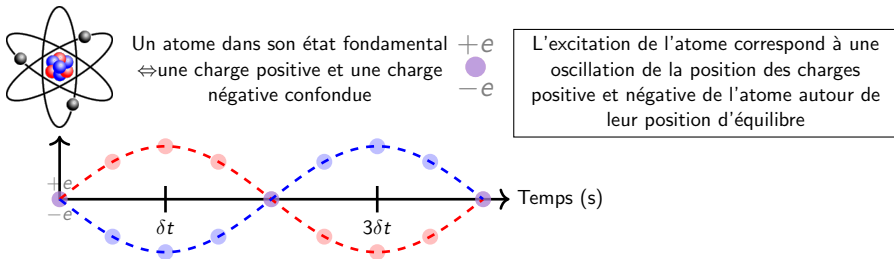
Le champ électromagnétique

- **Champs et ondes** : lorsqu'un champ est perturbé localement, la perturbation ne reste pas localisée mais elle va se propager en formant une onde progressive.

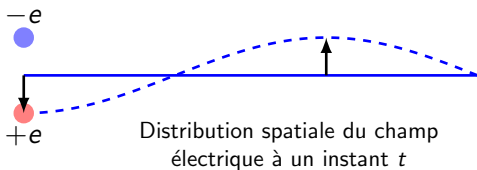


Le champ électromagnétique

- **Champs et ondes** : lorsqu'un champ est perturbé localement, la perturbation ne reste pas localisée mais elle va se propager en formant une onde progressive.



L'excitation de l'atome, en produisant un changement de distribution des charges positives et négatives, va modifier la balance des forces électrostatiques dans l'environnement de l'atome



L'expérience de Hertz



- 1865, **Maxwell** parvient à mettre en équation tous les phénomènes électriques & magnétiques observés jusqu'alors séparément, en les unifiant en une seule doctrine

Loi de Coulomb	$\Phi = \int \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \int \int_V \rho dV$	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Loi d'Ampère	$\int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Loi de Gauss	$\int \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Loi de Faraday	$\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \int_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \int \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

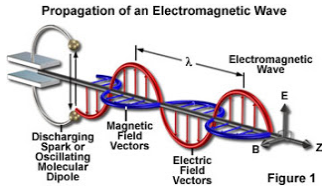
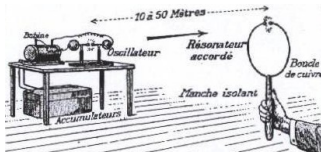
- A partir de ses équations, Maxwell prédit que des ondes électromagnétiques peuvent être produites lorsque des charges électriques sont accélérées

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

Equation de propagation reliant les variations de champs au point x au temps t aux variations de champ électrique au point $x + \delta x$ au temps $t + \delta t$

- Maxwell constate que **la vitesse de propagation de la perturbation coïncide avec celle de la lumière**

L'expérience de Hertz (1887)



- ▶ Il s'agit de l'expérience qui démontre expérimentalement que **la lumière est une onde électromagnétique**
- ▶ En se basant sur la théorie de Maxwell, Hertz élabore un **générateur d'ondes électromagnétiques (oscillateur)** : il génère un flux d'électrons (étincelle) oscillant entre deux électrodes.
- ▶ Il démontre le caractère propagatif de ces ondes en disposant un récepteur (la boucle de cuivre) à quelques dizaines de mètres de l'émetteur avec lequel il va détecter un signal lorsqu'il active l'émetteur
- ▶ Enfin en disposant de grands miroirs en zinc sur le trajet de ces radiations électriques, il montre que l'on peut les **réfléchir**, et **répéter toutes les expériences classiques d'optique sur les rayons lumineux**.

La lumière est une onde : fin de l'histoire ?

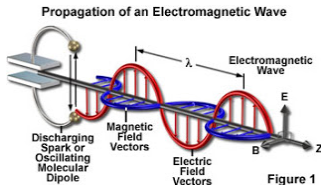
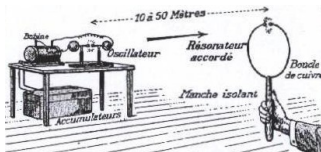
La lumière est une onde : fin de l'histoire ?

- ▶ 1892, William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907) : **“La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance”**.

La lumière est une onde : fin de l'histoire ?

... pas tout à fait en réalité !

- ▶ 1892, William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907) : “La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance”.
- ▶ En réalité, il y a un troisième problème : c'est l'**effet photoélectrique** découvert par Hertz. Au cours de ses expériences, Hertz observe que l'apparition des étincelles entre les électrodes est facilitée lorsqu'il éclaire le résonateur avec de la lumière.



La lumière est une onde : fin de l'histoire ?

... pas tout à fait en réalité !

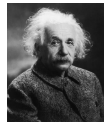
- ▶ En réalité, il y a un troisième problème : c'est l'**effet photoélectrique** découvert par Hertz. Au cours de ses expériences, Hertz observe que l'apparition des étincelles entre les électrodes est facilitée lorsqu'il éclaire le résonateur avec de la lumière.
- ▶ En 1900, **Planck** (1858-1947) propose que les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font de façon discontinue, par un *quantum d'énergie* $h\nu$, où ν désigne la fréquence du rayonnement.



La lumière est une onde : fin de l'histoire ?

... pas tout à fait en réalité !

- ▶ En réalité, il y a un troisième problème : c'est l'**effet photoélectrique** découvert par Hertz. Au cours de ses expériences, Hertz observe que l'apparition des étincelles entre les électrodes est facilitée lorsqu'il éclaire le résonateur avec de la lumière.
- ▶ En 1900, **Planck** (1858-1947) propose que les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font de façon discontinue, par un *quantum d'énergie* $h\nu$, où ν désigne la fréquence du rayonnement.
- ▶ En 1905, **Einstein** explique l'effet photoélectrique en supposant que le rayonnement électromagnétique est lui-même quantifié : *la lumière extrait des électrons du métal à condition que sa fréquence soit suffisante* → notion de **photon** d'énergie $h\nu$.
- ▶ La théorie corpusculaire revient sur le devant de la scène !



La lumière : onde & corpuscule

La lumière : onde & corpuscule

... comme la matière !

- 1924, **De Broglie** postule que toute matière, comme la lumière, est dotée d'une onde associée → **dualité onde-particule**

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

relation de De Broglie liant la quantité de mouvement, p , d'une particule à sa longueur d'onde, λ



La lumière : onde & corpuscule

... comme la matière !

- 1924, **De Broglie** postule que toute matière, comme la lumière, est dotée d'une onde associée → **dualité onde-particule**

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

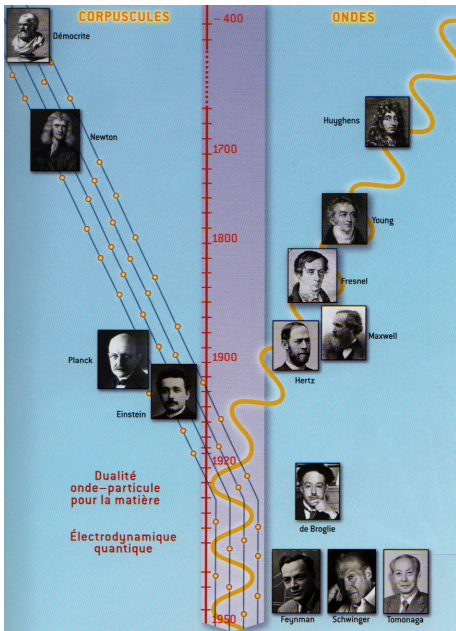
relation de De Broglie liant la quantité de mouvement, p , d'une particule à sa longueur d'onde, λ

- 1927, **Davidson** (1881-1958) & **Germer** (1886-1971) bombarde un cible de nickel cristallin par des électrons et mesure une figure de diffraction similaire à celle obtenue avec des rayons X. Ils prouvent ainsi la nature ondulatoire de la matière.



La lumière : onde & corpuscule

... comme la matière !

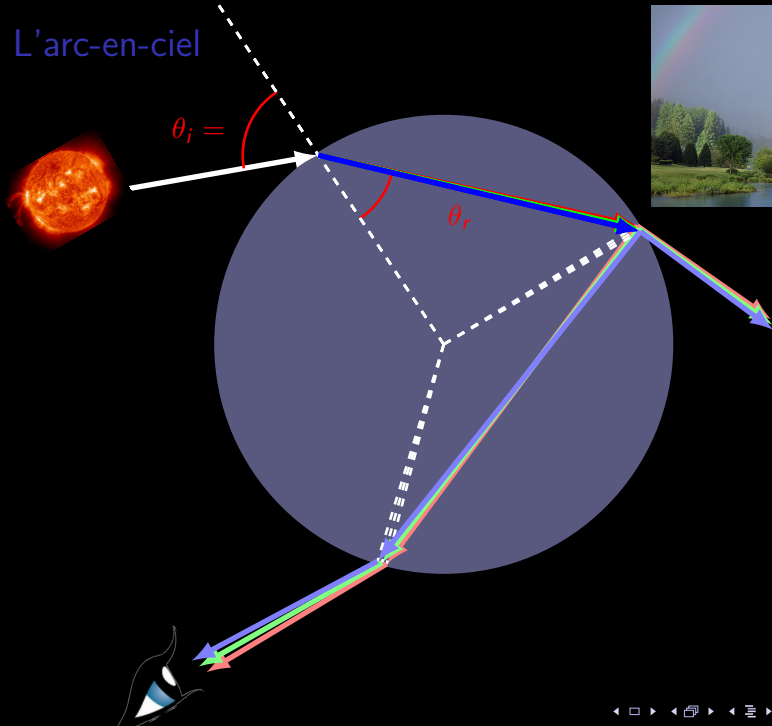


Lumière

Référence

- ▶ R. Rashed, " Le *Discours de la lumière* d'Ibn al-Haytham (Alhazen) : Traduction française critique", Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **21**, n° 3, 1968, p. 197-223.
- ▶ "Iliade", Homère, Trad. Victor Bérard, Folio, 1988.
- ▶ "Les origines de la physique moderne", I. Bernard Cohen, Ed. Seuil, 1993.
- ▶ "Histoire générale des Sciences", René Taton, Eds. Quadrige, 1994.
- ▶ "Histoire de la Philosophie", Emile Bréhier, Eds. Quadrige, 1994.
- ▶ "La lumière", Émile Biémont, collection Que sais-je, 1996.
- ▶ "Optique", Jean-Paul Parisot, Patricia Segonds, Sylvie Le Boiteux, Dunod, 2003.
- ▶ "Optique géométrique", Tamer Becherrawy, De Boeck Université, 2006.
- ▶ "Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences", Thomas Bourgeois et Dominique Lecourt, Presses Universitaires de France, 2006.
- ▶ "La vue et la lumière", Michel Blay, Revue d'Histoire des Sciences **60**, 119 (2007).
- ▶ "Histoire de l'optique ondulatoire de Fresnel à Maxwell", André Chappert, Eds. Belin, 2007.
- ▶ "Histoire de la Physique", Jean Perdijon, Dunod, 2008.
- ▶ "Le Mémoire de Fresnel sur la diffraction de la lumière", Jean-Louis Basdevant, Bibnum, 2009.
- ▶ "Optique : Une approche expérimentale et pratique", Sylvain Houard, Eds. De Boeck, 2011.
- ▶ "A history of optics", Olivier Darrigol, Oxford University Press, 2012.
- ▶ "Initiation à la Philosophie", Roger Caratini, Archipoche Eds, 2012.
- ▶ "Le double chemin de la lumière", Bernard Maitte, La Recherche N° 493, Novembre 2014.
- ▶ "Une histoire de la lumière", Bernard Maitte, Eds. Seuil, 2015.
- ▶ "Brève histoire des théories de la lumière", Michel Blay, Union Rationaliste **196**, 7 (2015).
- ▶ "Les plus grandes dates de la Science", Jean C. Baudet, La Boîte à Pandore Eds, 2016.
- ▶ "Optics", Eugene Hecht, Eds. Pearson, 2017.
- ▶ "Lumière et luminescence", Bernard Valeur, Eds. Belin, 2017.

L'arc-en-ciel



L'arc-en-ciel

