



La lumière dans tous ses états...

Courte histoire commentée de la lumière

2. Nature de la lumière

Charles Hirlimann

Directeur de recherche émérite CNRS à l'institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg

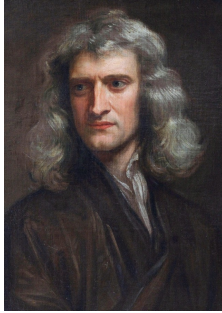
Membre de l'académie d'Alsace des sciences, des lettres et des arts

La Physique pour Tous

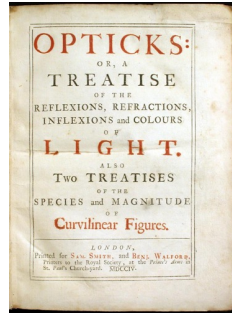


Sur la nature de la lumière : composition de la lumière blanche

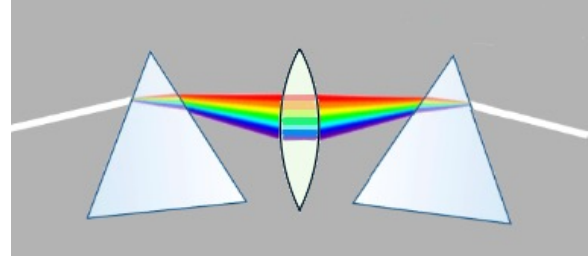
Étude de la lumière, 1704



Isaac Newton
1642-1727



Optique de Newton
1704



décomposition de la lumière blanche



La physique pour Tous

La lumière blanche
est composée

3/31

Newton publie son « Opticks » en 1714. Il y expose de superbes expériences sur la décomposition de la lumière par les prismes. Il montre que la lumière blanche est composée de la superposition de lumières colorées qui respectent un certain ordre. Pour corriger les aberrations colorées produites par les lentilles il invente le télescope à miroir.

La décomposition de la lumière par les prismes sera à l'origine de la spectroscopie, l'analyse de la lumière quand elle a interagi avec la matière.

Le prisme

La Physique pour Tous

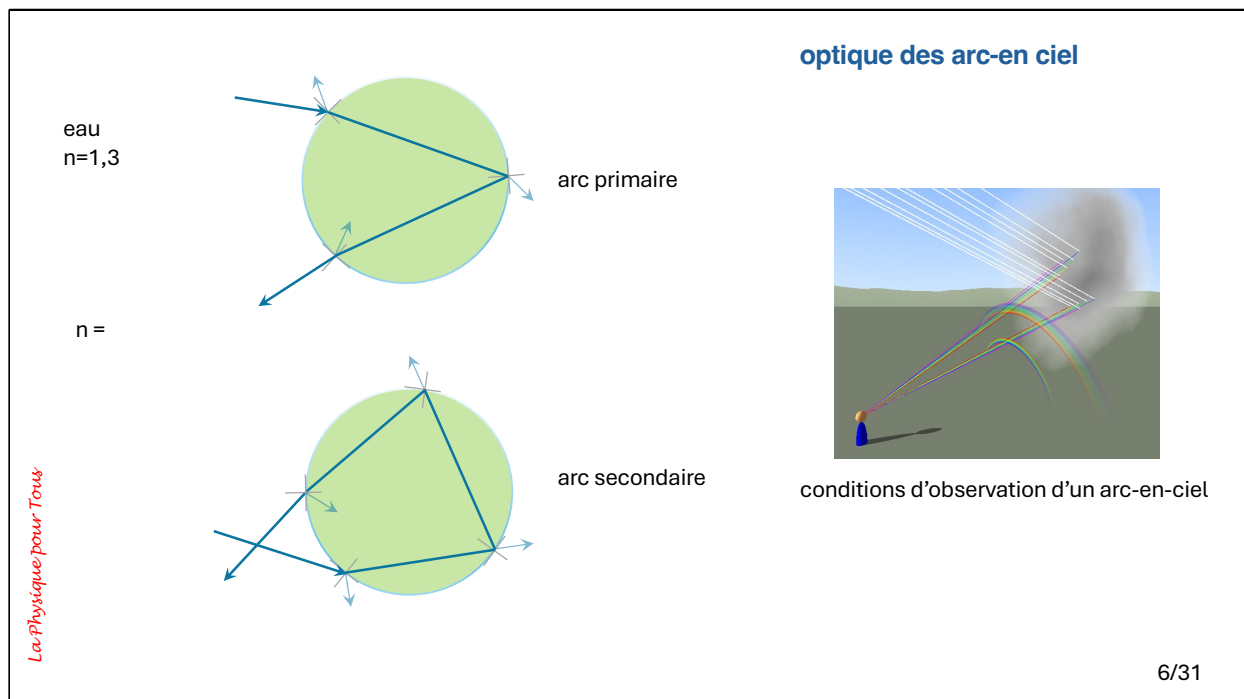
minimum de déviation

$$D = i + i_3 - \alpha = i + \arcsin \left(n \sin \left(\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i}{n} \right) \right) \right) - \alpha$$

- loi des sinus
- Somme des angles = 180°

4/31

La décomposition de la lumière par les prismes sera à l'origine de la spectroscopie, l'analyse de la lumière quand elle a interagi avec la matière. Les prismes ont un angle d'incidence particulier pour lequel leur déviation est minimum et les distorsions de faisceau elles aussi minimum. Cet angle de déviation minimum dépend de l'indice de réfraction de la matière du prisme et donc cet angle dépend de la couleur de la lumière.



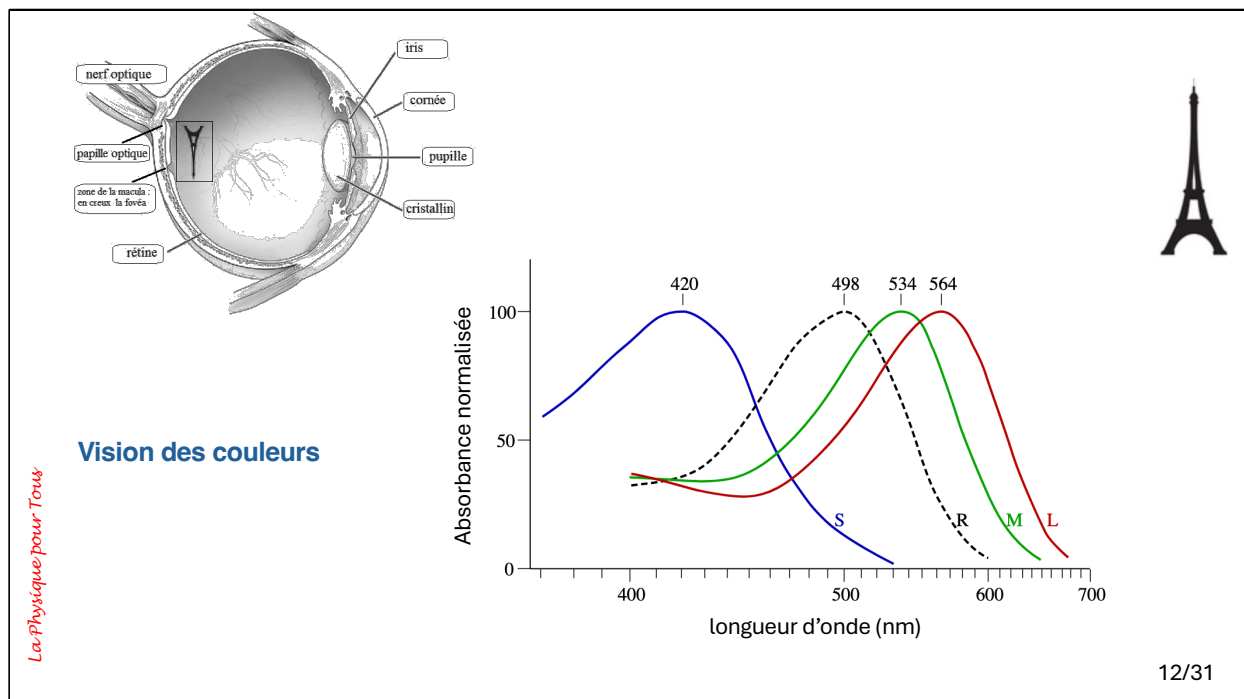
Newton donne la première explication scientifique de l'arc-en-ciel. L'arc-en-ciel s'observe lorsque l'on a devant soi un rideau de pluie et derrière soi le Soleil éclairant ce rideau de pluie. En haut. Il existe un angle d'incidence des rayons lumineux du Soleil sur les gouttes d'eau tel que la lumière se réfléchisse dans la goutte et ressorte sous l'angle qui atteint l'œil de l'observateur. Le plan d'incidence de la lumière qui se réfléchit dans la goutte est inchangé dans une rotation du rayon incident autour de la normale au dioptré, ce qui explique la forme circulaire du phénomène météorologique. Le rouge est moins réfracté que le bleu explique que les couleurs s'étendent du rouge au bleu du bord extérieur au bord intérieur de l'arc-en-ciel. En bas. Il existe un autre angle d'incidence sur les gouttes, tel, cette fois, que les rayons lumineux se réfléchissent deux fois dans la goutte. Dans ce cas les angles font que la dispersion du rouge au bleu se fait de l'intérieur à l'extérieur du cercle. À cause de la double réflexion les rayons lumineux subissent une perte par réflexion de plus dans l'arc secondaire ce qui explique sa plus faible intensité. Le découpage des sept couleurs de l'arc-en-ciel est arbitraire et n'a pas de signification physique particulière.

sur la couleur du ciel : optique atmosphérique

La vision

La Physique pour Tous

11/31



La Physique pour Tous

Vision des couleurs

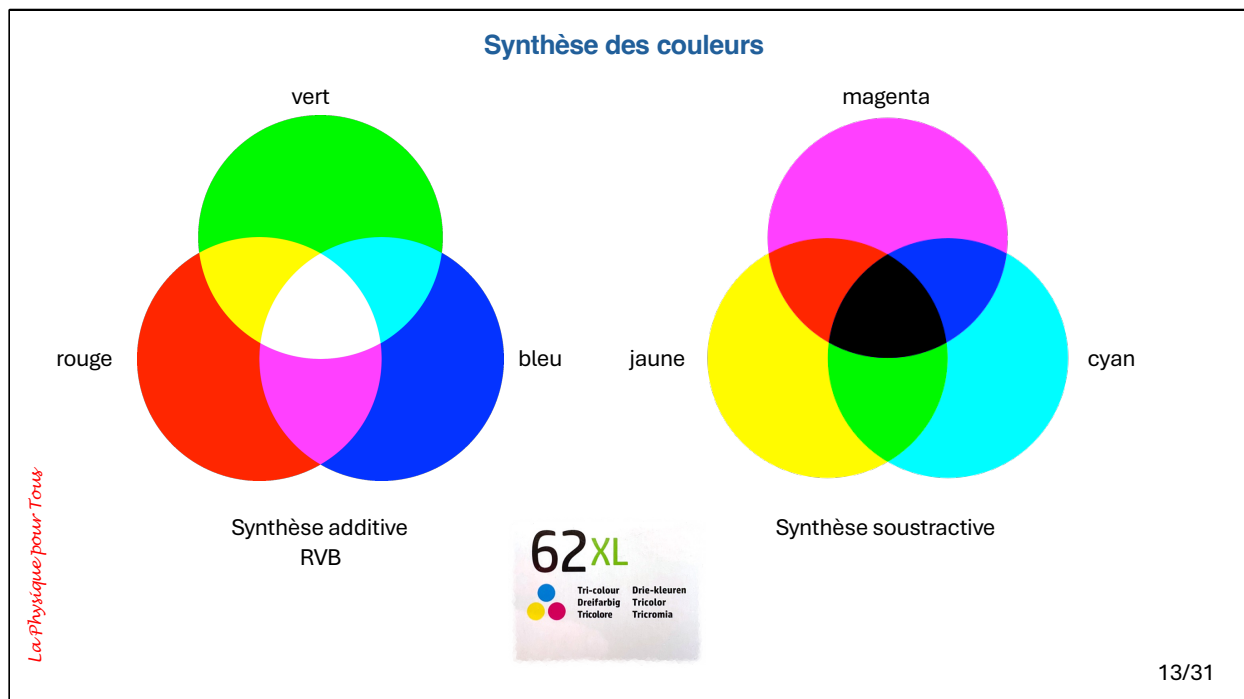
12/31

L'œil est un instrument d'optique « simple » composé d'une lentille à focale variable (cristallin), d'un diaphragme contrôlant l'intensité entrante (iris), et d'un écran détecteur (rétine), Le tout est protégé par un dôme transparent (cornée). La rétine est constituée de deux familles de cellules : les cônes et les bâtonnets. Les types de cônes sont au nombre de trois, L, M et S respectivement sensibles aux lumières rouge, verte et bleue (RVB). Les bâtonnets, plus sensibles que les cônes, ne réagissent qu'à l'intensité de la lumière quel qu'en soit la couleur : ils permettent la vision à faible éclairage, la nuit par exemple. La partie centrale de la rétine (fovéa) contient une forte densité de cônes permettant la construction d'images à haute définition tandis que le reste de la rétine produit des images à basse définition : le champ visuel.

Les déformations génétiques, accidentelles ou de vieillesse de la lentille apparaissent sous la forme de presbytie ou de myopie, tandis que les dysfonctionnements des cônes et bâtonnets se manifestent dans les daltonismes.

Il est intéressant de remarquer que l'image d'un objet lointain sur la rétine est inversée ! Les signaux électriques produits par les cônes et bâtonnets sont manipulés par plusieurs couches de neurones établis en réseau dans l'épaisseur de la rétine avant d'être envoyés au cerveau via le nerf optique. Ce

type de structure est repris dans les réseaux de neurone de l'intelligence artificielle.



Synthèse additive : rouge, vert, bleu (RVB) sont dites couleurs primaires. En superposant un faisceau de lumière verte avec un faisceau de lumière rouge on obtient du jaune, bleu et rouge donnent magenta et bleu et vert donnent cyan, ces couleurs sont dites complémentaires des couleurs primaires. Au vert correspond le magenta, au bleu le jaune et au rouge le cyan. La superposition des couleurs primaires redonne le blanc. Sur tous nos écrans les pixels émettent de la lumière et la synthèse est additive et elle l'est aussi dans les capteurs photo dont les pixels absorbent le RVB.

Synthèse soustractive. Si on éclaire un objet de couleur magenta avec de la lumière blanche, la lumière réfléchi ne contient pas de vert, le cyan réfléchi ne contient pas de rouge et le jaune ne contient pas de bleu. La superposition des trois couleurs complémentaires ne réfléchit rien, elle est noire.

Les imprimantes fonctionnent en mode soustractif en déposant sur le papier les couleurs complémentaires qui absorbent ces couleurs en réflexion de la lumière blanche.

Myopie

Ophtalmologie

Presbytie

Unité de mesure : la dioptrie

$1 \delta = 1 m^{-1}$

la vergence ou la puissance mesurent l'inverse de la focale $p = \frac{1}{f}$

La Physique pour Tous

14/31

Les deux plus gros défauts de l'œil sont la myopie et la presbytie. Dans la myopie la focale du cristallin est trop courte pour former une image nette sur la rétine. Cela se corrige en plaçant devant l'œil une lentille divergente, tandis que pour la presbytie la distance focale du cristallin est trop longue, ce qui se corrige en plaçant devant l'œil une lentille convergente.

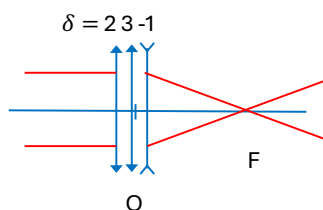
Les ophtalmologues utilisent une unité particulière de mesure de l'inverse de la focale image des lentilles, appelée vergence ou puissance. La dioptrie vaut l'inverse d'un mètre. Dans un assemblage de lentilles minces en contact la puissance de l'ensemble est simplement la somme (algébrique, + pour les lentilles convergentes, - pour les lentilles divergentes) des puissances des lentilles.

Exercices

1. Quelle est la distance focale f d'une lentille de 20 dioptries ?

$$f = \frac{1}{20} \text{ m} = 5 \text{ cm}$$

2. Focale du triplet :



$$\delta_t = 2 + 3 - 1 = 4$$

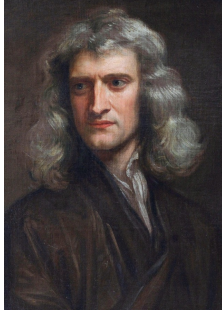
$$f = \frac{1}{4} \text{ m} = 25 \text{ cm}$$

$$1 \text{ } \delta = 1 \text{ m}^{-1}$$

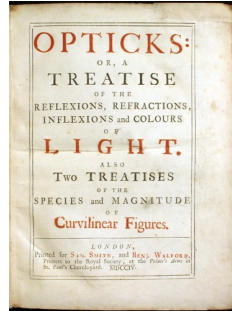
la vergence ou la puissance mesurent l'inverse de la focale

Nature de la lumière : corpuscule ou onde ?

Les corpuscules de Newton, 1704



Isaac Newton
1642-1727



Optique de Newton
1704

- la lumière est un flux de particules
- particules soumises à une force au passage d'un dioptre
- netteté des ombres

La physique pour Tous

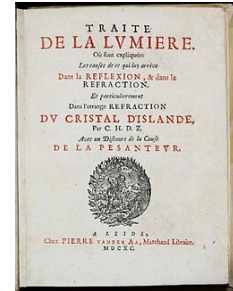
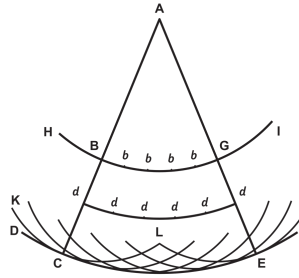
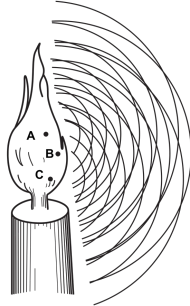
17/31

Newton a tiré l'idée de la nature corpusculaire de la lumière principalement à partir de ses propres expériences en optique, particulièrement sur la **réflexion** et la **réfraction**, et en s'inspirant des traditions **atomistes** et **mécanistes** de son époque. Il considérait que la lumière se comportait comme un flux de particules matérielles, ce qui expliquait selon lui des phénomènes comme la netteté des ombres et la trajectoire régulière des rayons lumineux dans les lentilles et les prismes.

Les ondelettes de Huygens, 1690



Christian Huygens
1629-1690



1690

La Physique pour Tous

Hypothèse ondulatoire

18/31

En 1690 Huygens publie son « Traité de la Lumière » dans lequel il montre que la loi des sinus peut parfaitement être construite à partir d'une hypothèse ondulatoire sur la nature de la lumière. Il s'ensuivra une longue dispute avec Newton qui est lui partisan d'une hypothèse corpusculaire sur la nature de la lumière.

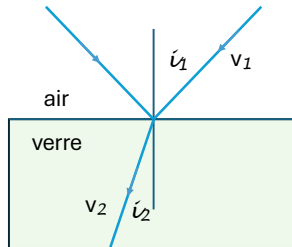
Le dilemme, passage du XVII^e au XVIII^e siècle



Huygens

↓
Ondes

↓
 $v_1 > v_2$



$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

incompatibles



Newton

↓
Corpuscules

↓
 $v_1 < v_2$

La Physique pour Tous

19/31

La nature ondulatoire de la lumière considérée par Huygens conduit à penser que la vitesse de la lumière dans la matière transparente est moins rapide que dans l'air. À l'inverse l'hypothèse corpusculaire chère à Newton conduit à une vitesse de la lumière dans la matière supérieure à celle dans l'air. Il y avait là une occasion de pratiquer la méthode scientifique en construisant une expérience pour départager les deux hypothèses. Malheureusement l'état de la technologie de l'époque ne le permettait pas.

Éclairage à la chandelle



Georges de la Tour
St Joseph charpentier, ca 1640



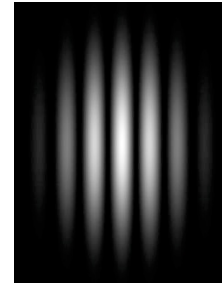
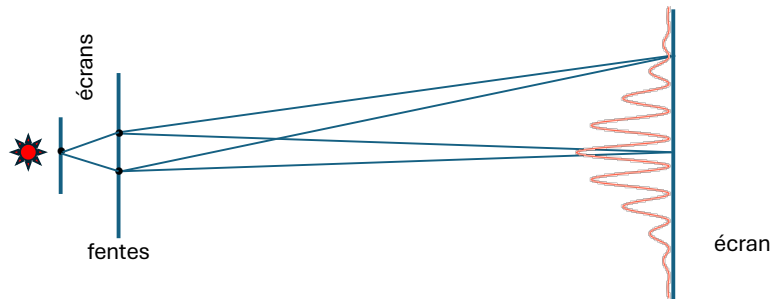
DALLE
La galerie des glaces à Versailles
éclairée à la chandelle

La physique pour Tous

20/31

La chandelle est attestée depuis la Mésopotamie, elle est restée très longtemps un objet cher et a été de fait moins employée que les lampes à huile. Constituée d'un cylindre de suif contenant sur son axe de symétrie une mèche de fil tressée (coton, lin), elle fumait beaucoup, éclairait mal et nécessitait sans cesse de moucher la partie brûlée de la mèche. Le suif est obtenu par ébouillantage de graisse animale, surtout de mouton et de bœuf.

L'expérience des fentes de Young, 1801



domaine public

La Physique pour Tous



Thomas Young
1773-1829

La lumière est de
nature ondulatoire

21/31

L'expérience des fentes de Young a montré la nature ondulatoire de la lumière. La figure d'interférence dans l'expérience n'est cependant pas une simple succession périodique de pics d'intensité, la figure est modulée par une courbe en cloche. Cette modulation est la conséquence de la diffraction de la lumière au passage des fentes.

Sur la nature de la lumière : le concept d'onde

Onde

- Une onde transporte de l'énergie
- Une onde peut être solitaire, Ou périodique
- Une onde peut être matérielle, Ou pas
- Une onde peut être transverse, Ou longitudinale



© 4ever.eu

La Physique pour Tous

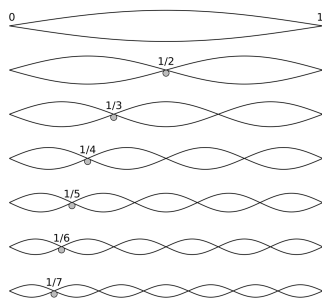
Une onde est la propagation d'une variation réversible locale d'une quantité physique

23/31

Une onde est la propagation d'une variation réversible locale d'une quantité physique. Il existe un grand nombre de variétés d'ondes. Les ondes peuvent être périodiques comme le sont les ronds dans l'eau, mais elles peuvent être solitaires ou impulsionnelles. Une onde peut être matérielle, c'est-à-dire nécessiter le support de la matière pour exister. Ainsi des sons qui se propagent dans les gaz, les liquides et les solides. Les ondes radio, la lumière n'ont pas de support matériel elles correspondent à la variation d'un champ électrique et d'un champ magnétique en chaque point de leur passage, les ondes de gravitation correspondent à une variation locale de l'espace-temps. Nous déclenchons chaque jour un grand nombre d'ondes simplement en allumant ou en éteignant la lumière dans une pièce. Il s'agit

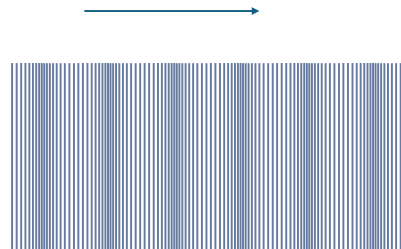
dans ce cas d'une onde de mise en mouvement des électrons dans les fils conducteurs ; les électrons dans le cuivre se déplacent à la vitesse de quelques cm/s alors que l'onde de leur mise en mouvement se meut aux $\frac{2}{3}$ de la vitesse de la lumière. Une onde peut être longitudinale ou transverse. Les sons sont portés par des ondes longitudinales, des variations de pression dans l'air (par exemple) : les mouvements des molécules d'air se font dans le sens de la propagation. Les ronds dans l'eau sont des ondes transversales, les mouvements des molécules d'eau se font transversalement à la direction de propagation de l'onde.

Onde



corde vibrante

=>

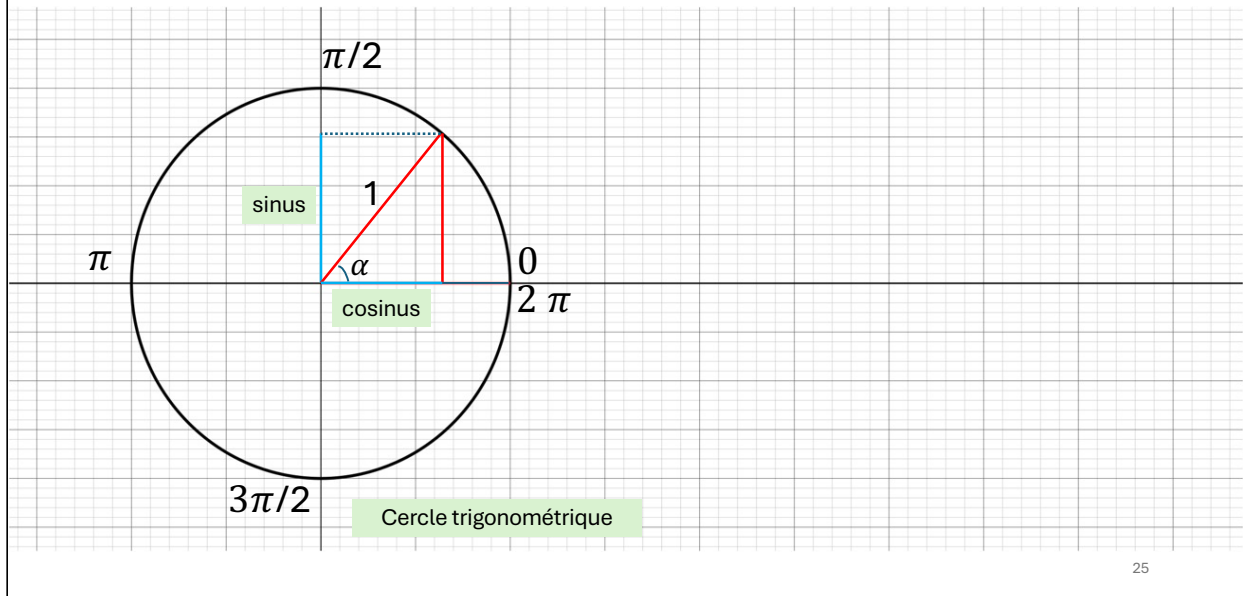


son

Une onde est la propagation d'une variation réversible locale d'une quantité physique

Deux exemples d'onde. Une corde vibrante fixe à ses extrémités est une onde stationnaire transversale. Elle peut vibrer suivant une infinité de modes. La vibration la plus générale est une superposition de tous les modes. Chaque mode correspond à la présence d'un nombre entier de demi-longueur d'onde entre les deux points fixes. Cette corde émet un son qui est une onde longitudinale de compression de l'air. Ces deux ondes ont pour support la matière.

Fonction sinus



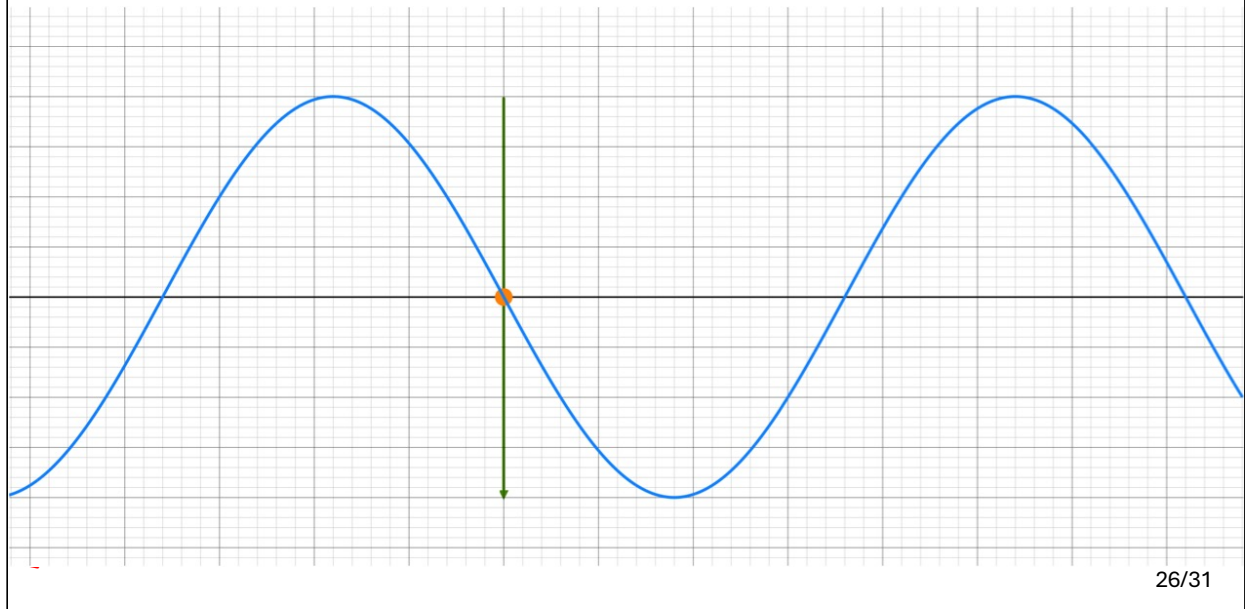
Cercle trigonométrique. Pour définir les fonctions sinus et cosinus on utilise un cercle de rayon 1. Le sinus de l'angle α est alors simplement la projection du rayon sur l'axe des ordonnées (le cosinus du même angle correspond à la projection de ce même rayon sur l'axe des abscisses).

Mesure des angles. Il y a 3800 ans environ les Babyloniens décident, à des fins d'astronomie divinatoire, de partager le cercle en 360° , nombre proche du nombre de jours dans une année et prennent comme base de comptage la base 60 ($3 \times 60 = 360$) divisible par 2, 3, 4, 5 et 6. C'est la notation en degrés de la mesure des angles que nous avons conservée. En trigonométrie, on utilise une notation basée sur la longueur de l'arc l'arc de cercle sous-tendu par l'angle en unités de la longueur de la circonférence du cercle. La circonférence ($2\pi r$) d'un cercle de rayon $r=1$ vaut 2π .

Onde. Faisons varier l'angle α de 0 à 2π et reportons la valeur de son sinus sur l'axe des abscisses, on obtient une visualisation de la fonction sinus. La même opération répétée avec le cosinus de cet angle donne la même fonction démarrant à la valeur 1 et décalée de $\pi/2$.

Les fonctions sinusoïdales sont couramment employées pour modéliser certaines ondes.

Onde matérielle transverse



26/31

Représentation d'une onde matérielle transverse à l'aide d'une fonction sinusoïdale. Supposons qu'il s'agisse de « ronds dans l'eau » ou de vagues sur la mer. On observe qu'un bouchon posé à la surface de l'eau (disque orange sur la figure) ne subit qu'un déplacement vertical orthogonal à la direction de propagation de l'onde. L'onde ne transporte pas de matière, mais elle transporte de l'énergie.

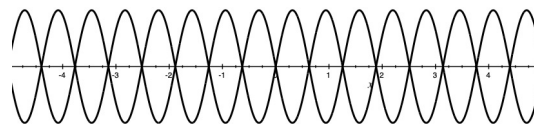
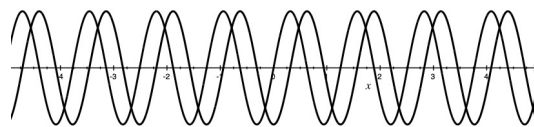
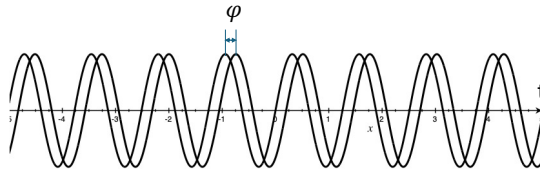
Superposition de deux ondes

φ est le déphasage
d'une onde par
rapport à l'autre

$\varphi = 0$ les ondes sont en phase

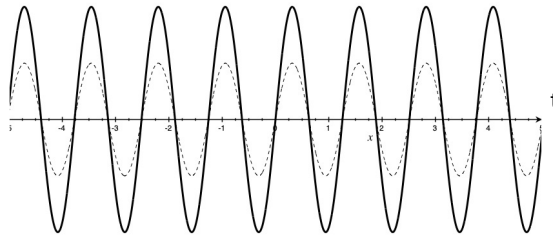
$\varphi = \pi/2$ les ondes sont en quadrature

$\varphi = \pi$ les ondes sont en opposition

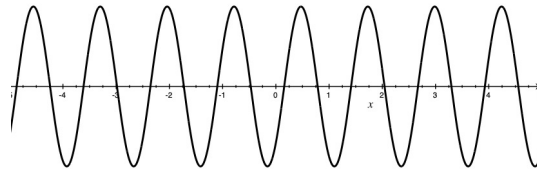


Somme de deux ondes sinusoïdales

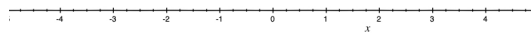
$\varphi = 0$ ondes en phase



$\varphi = \pi/2$ ondes en quadrature

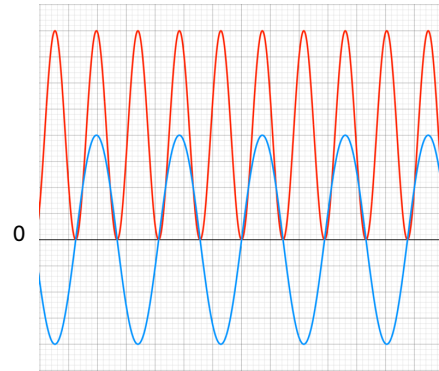


$\varphi = \pi$ ondes en opposition

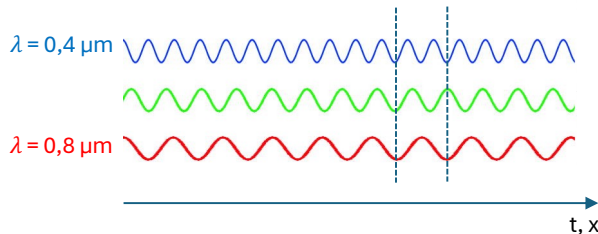


Cas de la lumière

Dans le cas la lumière, les détecteurs ne sont sensibles qu'au carré de l'amplitude de l'onde qui la sous-tend



Onde sinusoïdale : longueur d'onde, période, fréquence



$$\omega = 2\pi \nu \text{ pulsation}$$

λ longueur d'onde = distance entre 2 passages successifs dans le même sens

T Période = durée entre 2 passages successifs dans le même sens

$$\lambda = v T \quad T = \lambda / v$$

ν La fréquence est le nombre d'oscillations par seconde

$$\nu = 1/T = v / \lambda$$

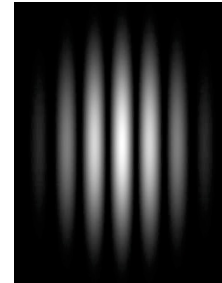
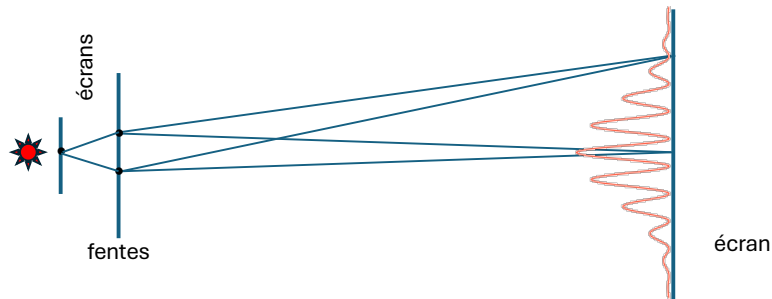
La physique pour Tous

30/31

Une onde se propage dans l'espace avec une vitesse v . À un instant donné, la distance qui sépare deux points équivalents successifs s'appelle la longueur d'onde λ . En un point donné de l'espace la durée qui sépare le passage de l'amplitude par la même valeur dans le même sens s'appelle la période T . Ces deux quantités sont reliées par la relation $\lambda = v T$. L'inverse de la période mesure la fréquence ν des oscillations, cad le nombre d'oscillations par seconde. Pour des raisons utilitaires les physiciens ont choisi de considérer la pulsation ω pour mesurer la fréquence. La pulsation mesure le nombre de tours (2π) effectués par seconde par l'angle trigonométrique.

Sur la nature de la lumière : les interférences

L'expérience des fentes de Young, 1801



domaine public

La Physique pour Tous



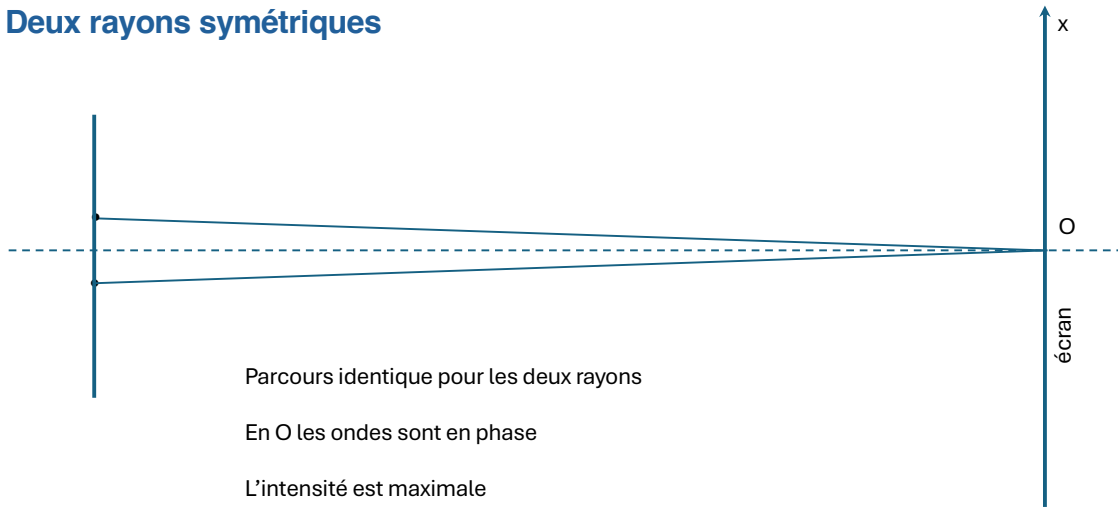
Thomas Young
1773-1829

La lumière est de
nature ondulatoire

32/31

L'expérience des fentes de Young a montré la nature ondulatoire de la lumière. La figure d'interférence dans l'expérience n'est cependant pas une simple succession périodique de pics d'intensité, la figure est modulée par une courbe en cloche. Cette modulation est la conséquence de la diffraction de la lumière au passage des fentes.

Deux rayons symétriques

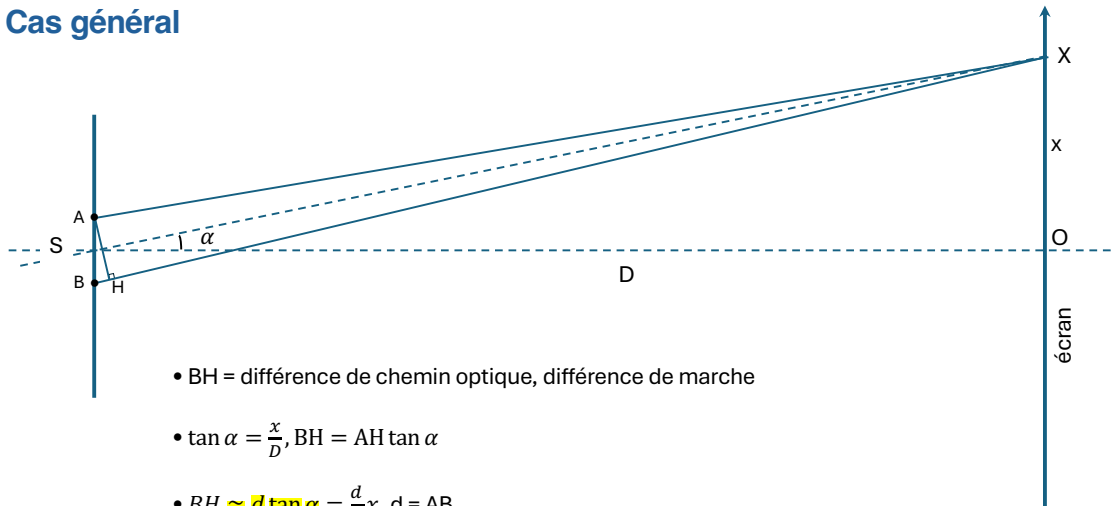


Parcours identique pour les deux rayons

En O les ondes sont en phase

L'intensité est maximale

Cas général



• BH = différence de chemin optique, différence de marche

• $\tan \alpha = \frac{x}{D}$, $BH = AH \tan \alpha$

• $BH \approx d \tan \alpha = \frac{d}{D} x$, $d = AB$

• $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{D} x$

$$\varphi = \pm 2\pi \Rightarrow x = \pm \frac{\lambda D}{d}$$

La Physique pour Tous

34/31

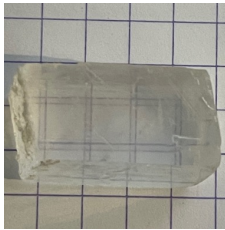
Calcul de l'amplitude des ondes en un point x de l'écran dans l'expérience des fentes de Young.

- La condition d'interférences des deux ondes provenant des sources A et B , impactant le point x de l'écran est gouverné par la différence de marche BH entre leurs trajets optiques. α est l'angle de déviation médiane des deux rayons.
- Dans le triangle rectangle OXS la tangente de l'angle α est le rapport du côté Ox au côté SO , $\operatorname{tg} \alpha = OX/SO$, or $\sin \alpha = OX/SX$ et $\cos \alpha = OS/SX$ et donc $\tan \alpha = \sin \alpha / \cos \alpha$. La tangente d'un angle est un concept connu de tous puisque qu'elle indique la pente des routes. Une route à 6% correspond à une tangente telle que la route s'élève de 6m lorsque l'on progresse de 100 m (pour information $\arctan 0,06 = 3,4^\circ$)
- Dans le triangle ABH , l'angle $\widehat{BAH} = \alpha$ et donc $BH = AH \tan \alpha$. Pour simplifier le calcul remplaçons AH par $AB = d$ la distance séparant les deux fentes. Nous faisons ainsi une approximation qui est d'autant plus proche du résultat vrai que la distance D à l'écran est grande par rapport à d la distance entre les fentes. On obtient ainsi que BH , la différence de marche, est telle que $BH \sim d \tan \alpha$.

- Le déphasage entre les deux ondes est alors donné par le rapport de la différence de marche entre les rayons et la longueur d'onde mesurée en circonférence du cercle trigonométrique : $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{D} x$.
- On trouve un maximum d'amplitude en $x = 0$ (planche précédente) et on retrouve un maximum lorsque le déphasage entre les deux ondes vaut 2π : $\varphi = \pm 2\pi \Rightarrow x = \pm \frac{\lambda D}{d}$. Avec des fentes séparées de 1 mm les premières franges sont espacées de 1 mm sur un écran disposé à 2 m.
- La mesure des interférences permet d'accéder à la mesure de la longueur d'onde de la lumière utilisée $\lambda = \frac{x d}{D}$, par une « simple » mesure des grandeurs caractéristiques de l'instrument utilisé.

sur la nature de la lumière : la polarisation

Polarisation de la lumière, 1809, 1815

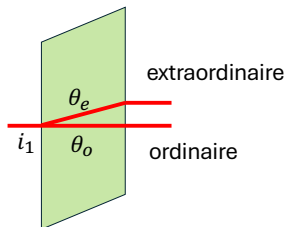


calcite biréfringente



Étienne Louis Malus
1775 - 1812

La Physique pour Tous



36/31

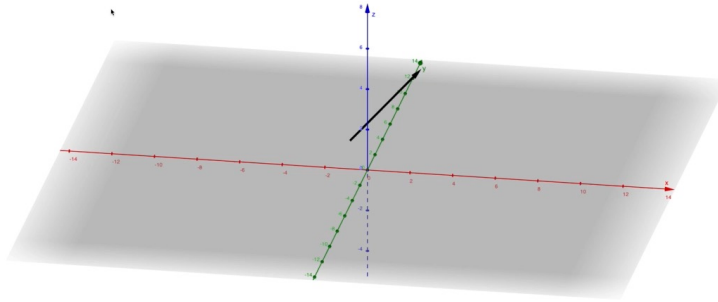
En 1808, observant de sa chambre les reflets du soleil couchant sur les vitres du palais du Luxembourg à Paris, tout en manipulant un spath d'Islande, Étienne Louis Malus découvre l'extinction partielle de la lumière pour certaines positions de son cristal. Il a découvert la polarisation de la lumière. La calcite est un cristal possédant un axe optique unique pour lequel la loi des sinus s'applique. Dans les autres directions il existe deux indices de réfraction ce qui entraîne l'apparition de deux rayons à la traversée d'un cristal. La découverte de Malus est souvent utilisée pour illustrer la sérendipité.

La découverte de Malus a été interprétée comme une propriété d'une onde transverse dans le modèle de Huygens. La lumière naturelle vibre dans toutes les directions transverses et la réflexion vitreuse sélectionne une propriété particulière. On tient là une propriété vectorielle de la lumière qui n'avait jamais été envisagée.

Qu'est-ce qu'un vecteur ?

$$A = (x_1 = -1, y_1 = 1, z_1 = 1)$$

$$B = (x_2 = 2, y_2 = 3, z_2 = 4)$$



Un ensemble de 6 nombres

segment de droite dans 3D

une direction, un sens, une longueur

$$\|\vec{E}\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

37/31

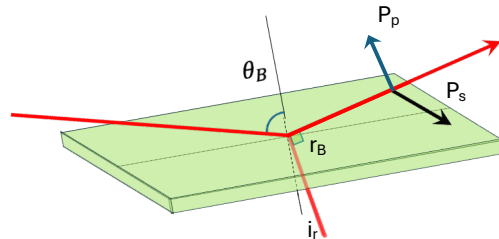
Un vecteur, ici \vec{E} , dans un espace à 3 dimensions, est un objet géométrique défini par un ensemble de 6 nombres. Ces nombres définissent deux points A et B qui eux-mêmes définissent le segment de droite qui porte le vecteur. Le sens du vecteur sur la droite qui donne sa direction est défini par l'ordre dans lequel sont donnés les points A et B. Ce vecteur a la longueur de la distance entre A et B dont le calcul est donné en bas de la figure. Cette formule est une simple extension du théorème de Pythagore et se transpose à toutes les dimensions d'espace.

Exercice : calculer la longueur d'un vecteur dans le plan donné par $A = (-1, -1)$ et $B = (3, 3)$.

Polarisation de la lumière, 1815

angle de Brewster

$$\text{Loi de Brewster : } \tan(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1}$$



$P_s \perp \text{plan } i \text{ et } \perp \text{ rayon}$
 $P_p \parallel \text{plan } i \text{ et } \perp \text{ rayon}$



David Brewster
1781 - 1868

s = senkrecht
p = parallel

air : $n_1=1$, verre : $n_2=1,28$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{1,28}{1} \Rightarrow \theta_B = \tan^{-1}(1,28) = 52^\circ$$

$$\frac{\sin(\theta_B)}{\sin(i_r)} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin(i_r) = \frac{\sin(\theta_B)}{n_2} \Rightarrow i_r = 38^\circ$$

$$r_B = 90^\circ - i_r + 90^\circ - \theta_B = 90^\circ !!$$

La polarisation par réflexion vitreuse est rectiligne et orthogonale au plan de réflexion P_s

La Physique pour Tous

38/31

En 1815, l'anglais Brewster, découvre qu'il existe



À suivre...

Charles.Hirlimann@ipcms.unistra.fr

La Physique pour Tous

