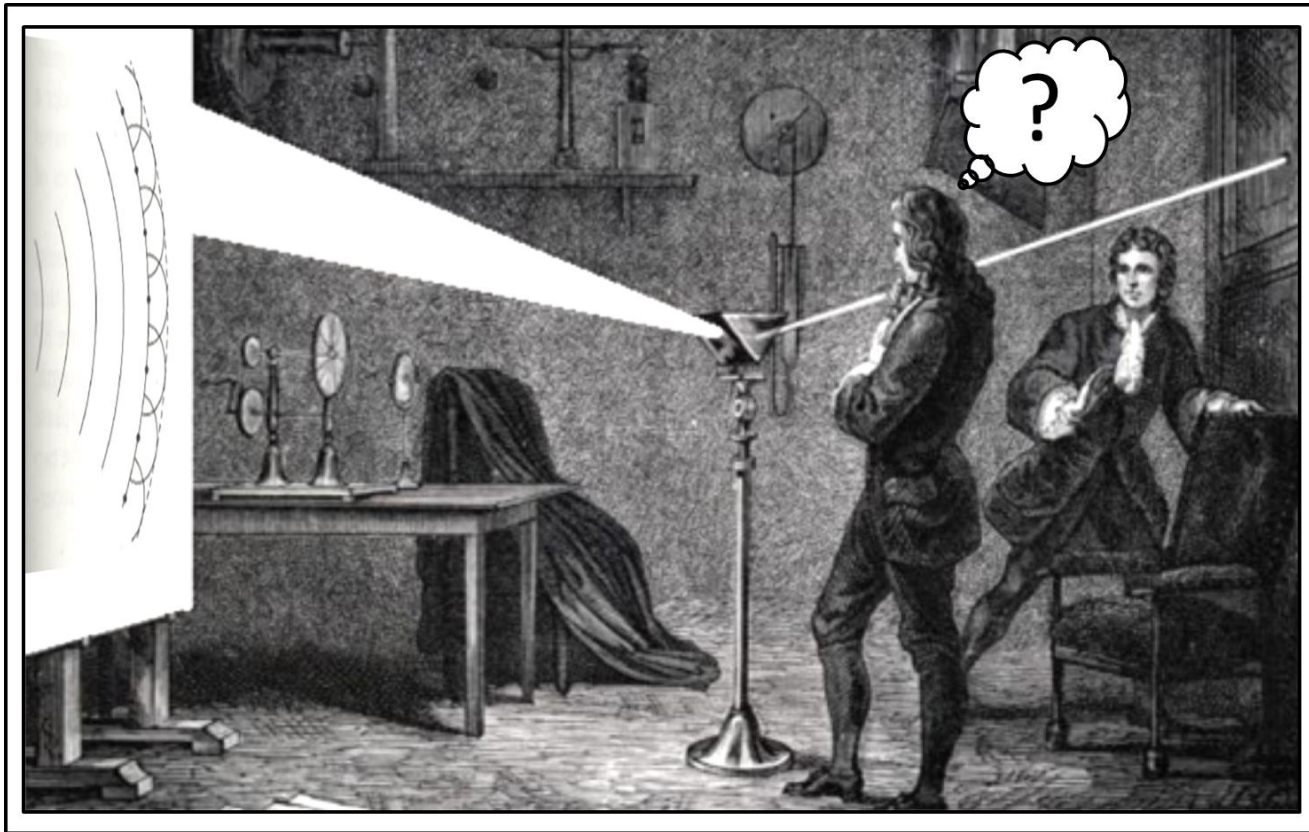


Optique : Fresnel et Newton...

pas sur la même longueur d'onde!

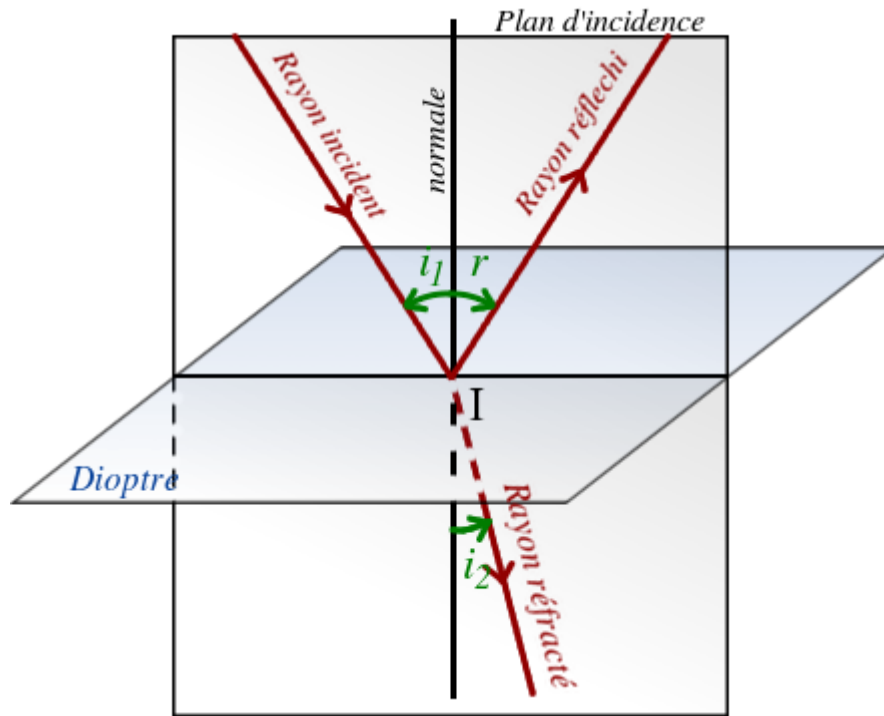


Avant le XVII^{ème} siècle

- Premiers miroirs découverts dans la vallée du Nil (-1900).
- Idée de propagation rectiligne de la lumière et loi de la réflexion (Euclide, -300).
- Sénèque (-4, 65)) remarque qu'un globe de verre rempli d'eau présente un effet « loupe ».
- Alhazen (savant d'origine Perse) améliore la formulation des lois de la réflexion et de la réfraction, étudie les miroirs sphériques et paraboliques, décrit l'œil humain (1000).
- Utilisation de lentilles pour corriger la vue au XIV^{ème} siècle.
- Découverte de la chambre noire par Léonard de Vinci (1452-1519).
- Un hollandais nommé Hans Lippershey dépose une demande de brevet pour une lunette d'observation en 1608.
- En 1611, Kepler publie sa « Dioptrice ».

Loi de la réflexion/réfraction

Snell (1621), Descartes (1637)



Willebrord Snell
(1580 -1626)



René Descartes
(1596 -1650)

$$i_1 = r$$

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = cste$$

Formulation actuelle:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

Avec n l'indice de réfraction du matériau.

Indice de réfraction

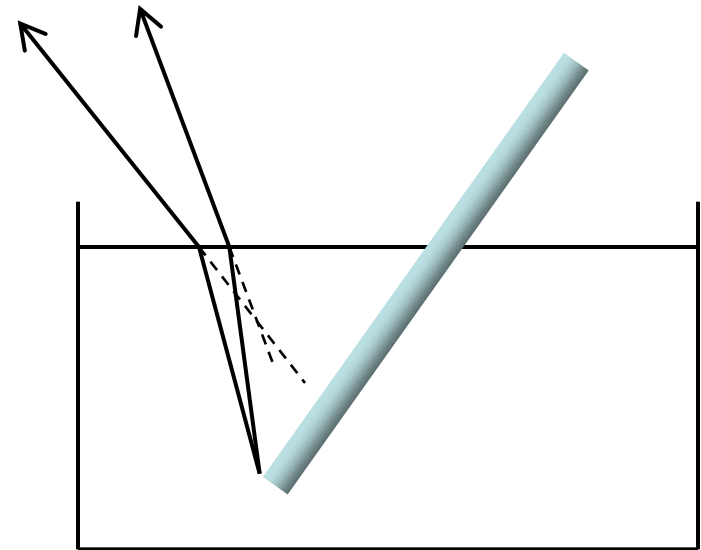
$$v = \frac{c}{n}$$

c : vitesse de la lumière dans le vide

v : vitesse de la lumière dans le milieu d'indice n

Matériau	Indice
Air	1,00029
Dioxyde de carbone	1,00045
Eau	1,333
Alcool éthylique	1,362
Benzène	1,501
Disulfure de carbone	1,628
Verre, Crown léger	1,517
Verre, Flint lourd	1,647
Fluorine	1,434
Diamant	2,417

Illustration: « le bâton brisé »



Vitesse de la lumière

En 1676, l'astronome danois **Ole Christensen Rømer** étudie le cycle des éclipses de Io, satellite de Jupiter.



Ole Christensen Rømer
(1644-1710)

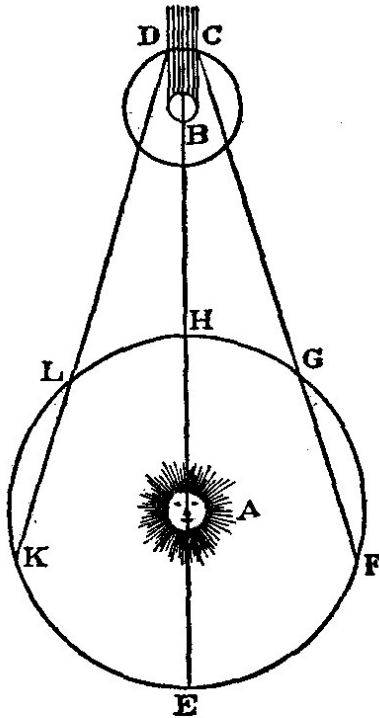


FIG. 70.

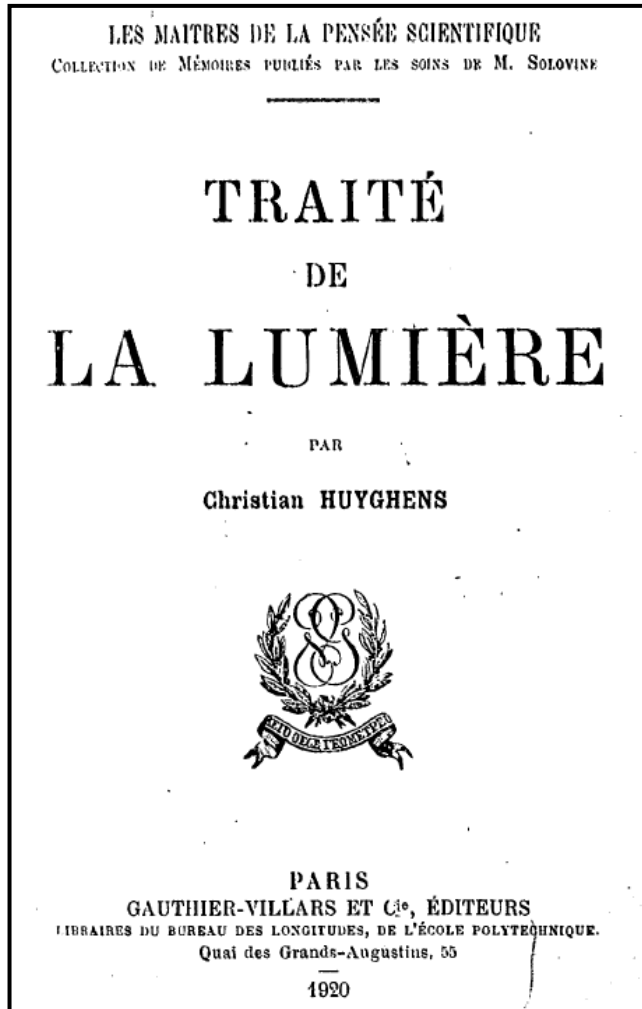
La période du satellite Io diffère de $\Delta t = 22$ min selon qu'elle est mesurée en conjonction ou en opposition.

La période est modifiée selon que la terre s'éloigne ou se rapproche de Jupiter.

La lumière a une vitesse de propagation finie

$$c \sim 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Théorie ondulatoire de Huygens (1690)



Christian Huygens
(1629 - 1695)

Qu'est qu'une onde?

Définition: une onde est une **perturbation** qui se propage dans un **milieu matériel**.

Exemples:

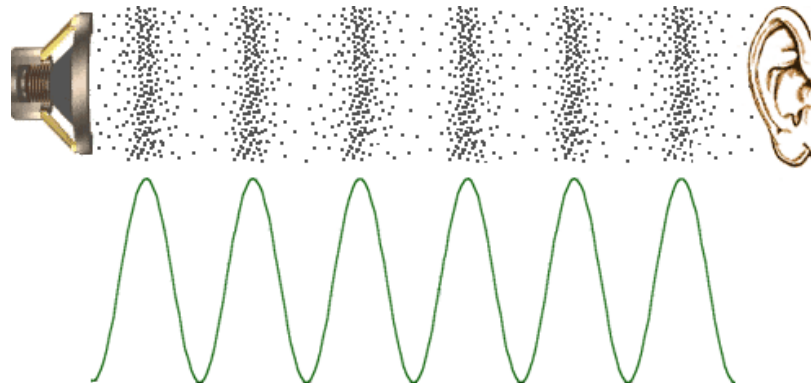
Les cercles à la surface de l'eau



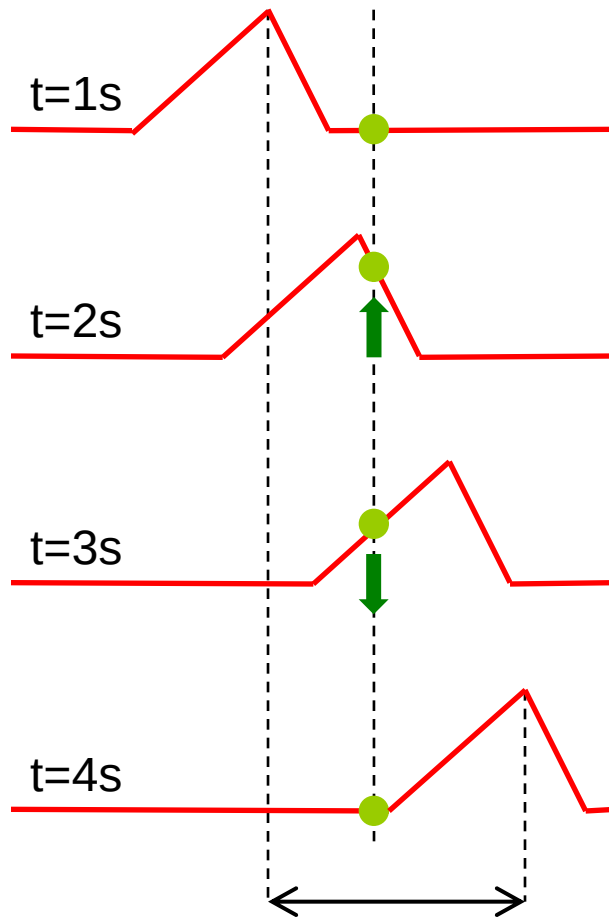
La déformation d'une corde



Le son dans l'air



Propagation



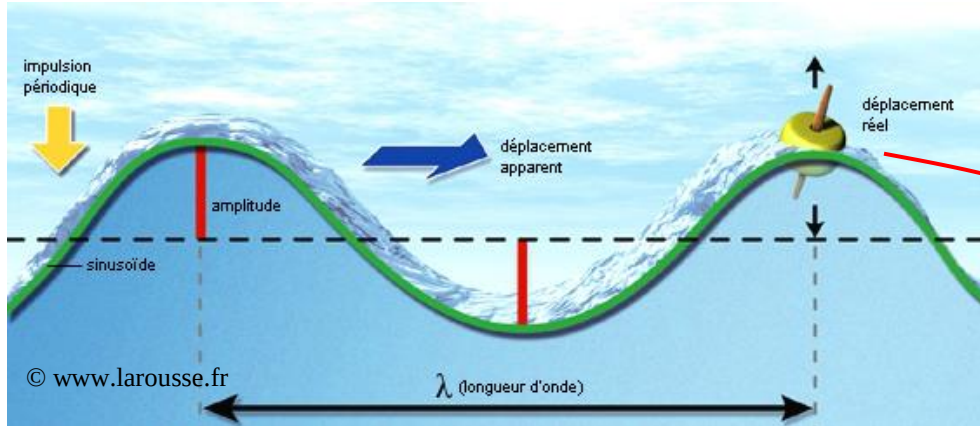
Il y a **propagation d'énergie et non de matière!**

Chaque point de la corde se déplace verticalement autour de sa position d'équilibre mais ne se déplace pas le long de la corde.

Après le passage de la perturbation chaque point de la corde reprend sa position de repos.

Ondes périodiques

Le phénomène est **périodique** dans l'**espace**



λ est la **longueur d'onde** en m

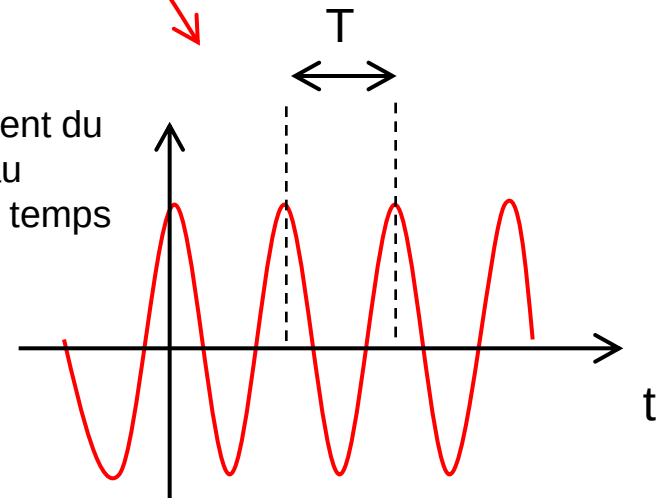
T est la **période** en s

$$\lambda = cT$$

On définit également la **fréquence** en Hertz

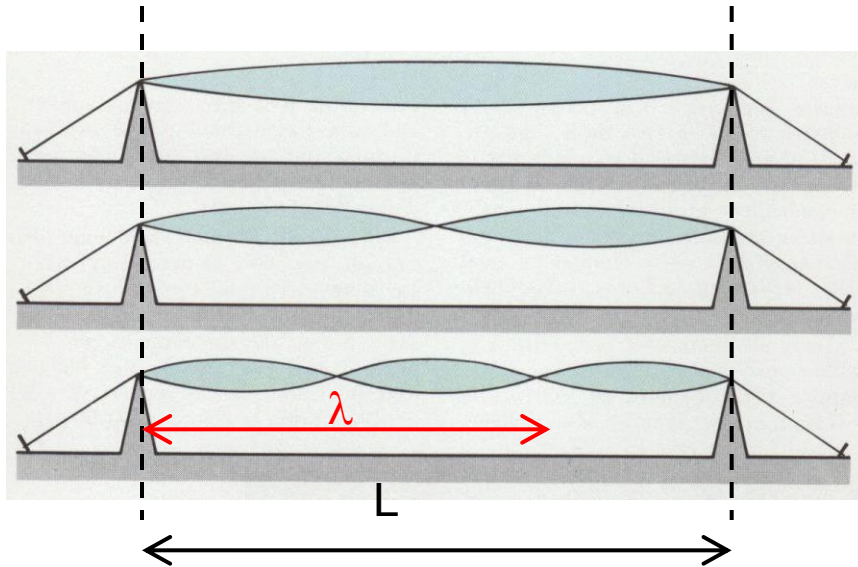
$$f = \frac{1}{T}$$

Mouvement du
flotteur au
cours du temps



Le phénomène est **périodique** dans le **temps**

Ondes stationnaires

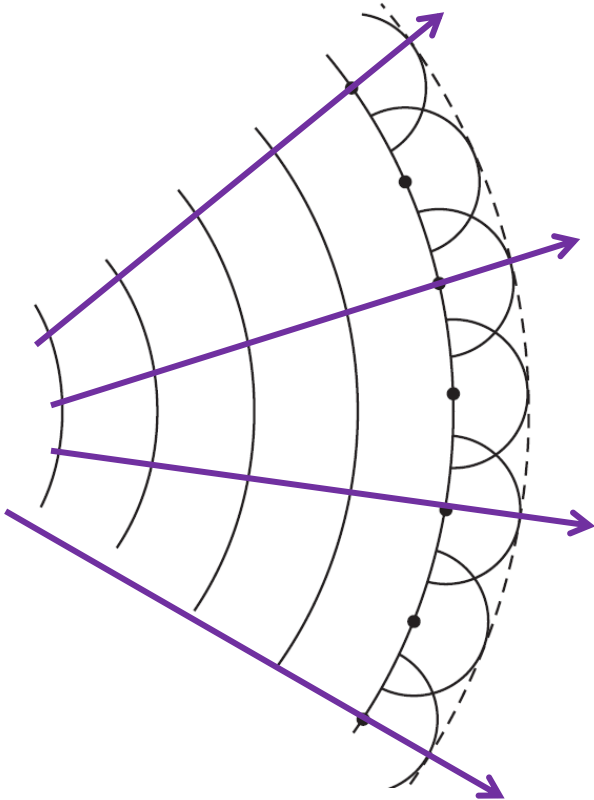


L'amplitude de vibration est **nulle** aux **extrémités**. Les **conditions aux limites** imposent les **longueurs d'onde permises**.

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

Application: calcul des fréquences de vibration des instruments de musique à cordes.

Le principe de Huygens



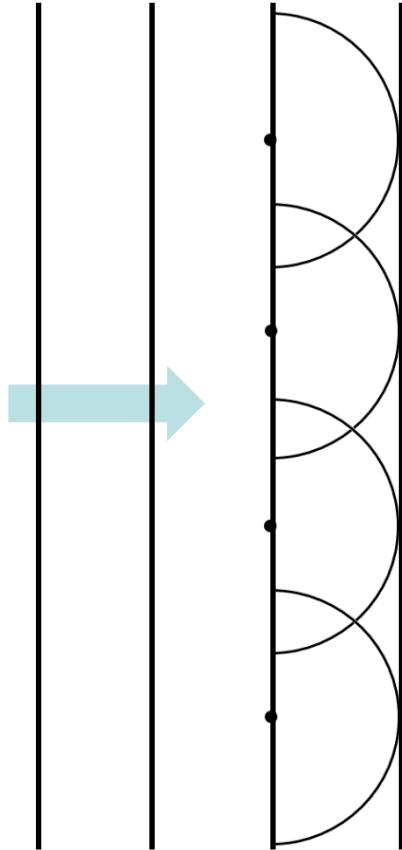
Front d'onde sphérique

Chaque point de l'espace atteint par le front d'onde se comporte comme une **source ponctuelle d'ondelettes sphériques**.

L'**enveloppe** de toutes les ondelettes est **identique** au **front d'onde original**.

La **direction des rayons lumineux** est donnée par la **perpendiculaire aux surfaces d'onde**.

Le principe de Huygens



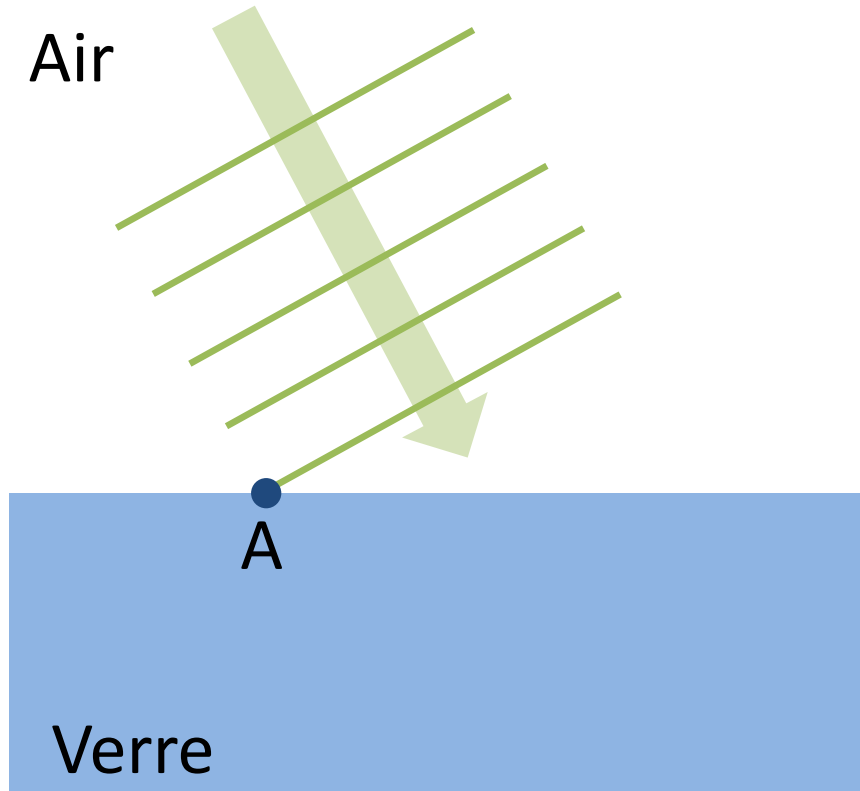
Front d'onde plan

Chaque point de l'espace atteint par le front d'onde se comporte comme une **source ponctuelle d'ondelettes sphériques**.

L'**enveloppe** de toutes les ondelettes est **identique** au **front d'onde original**.

La **direction des rayons lumineux** est donnée par la **perpendiculaire aux surfaces d'onde**.

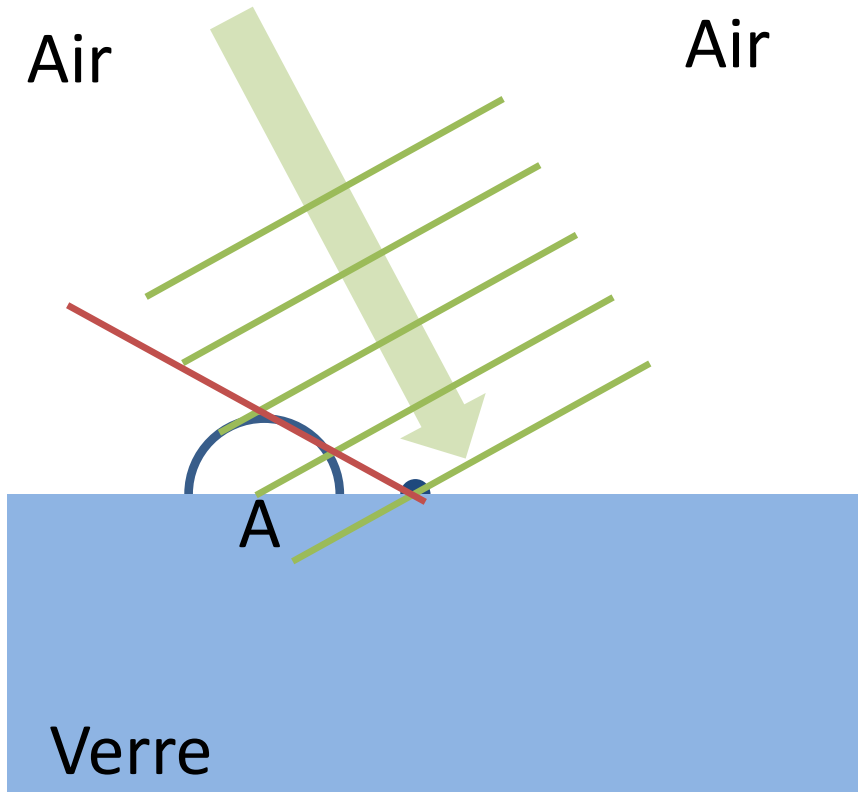
De la réflexion



La source est supposée suffisamment loin de la surface pour que le **front d'onde** soit considéré comme **plan**.

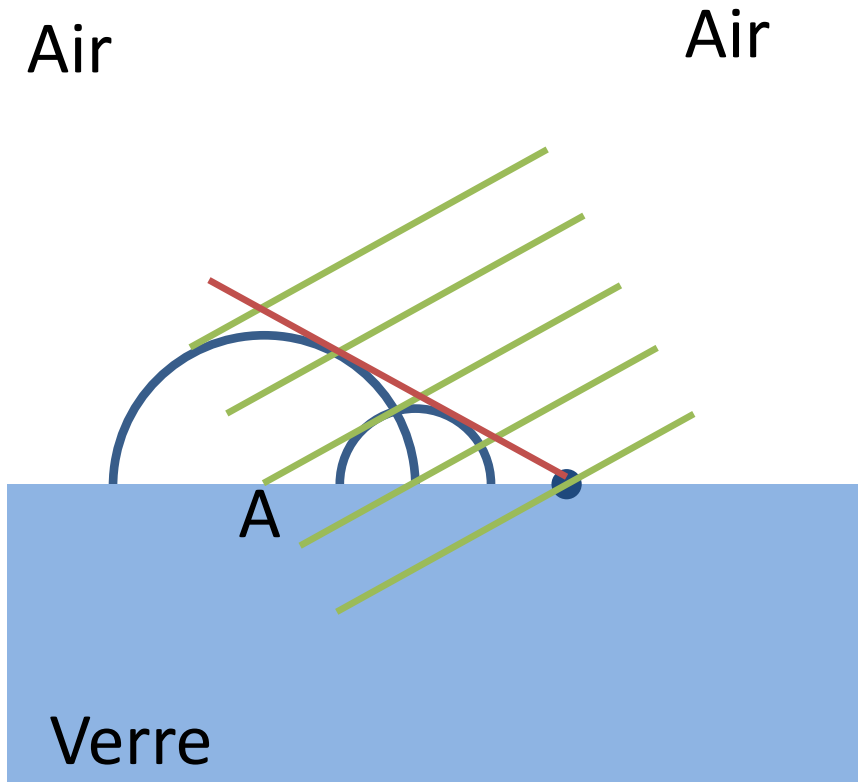
La **direction de propagation** est **perpendiculaire** aux plans d'onde.

De la réflexion



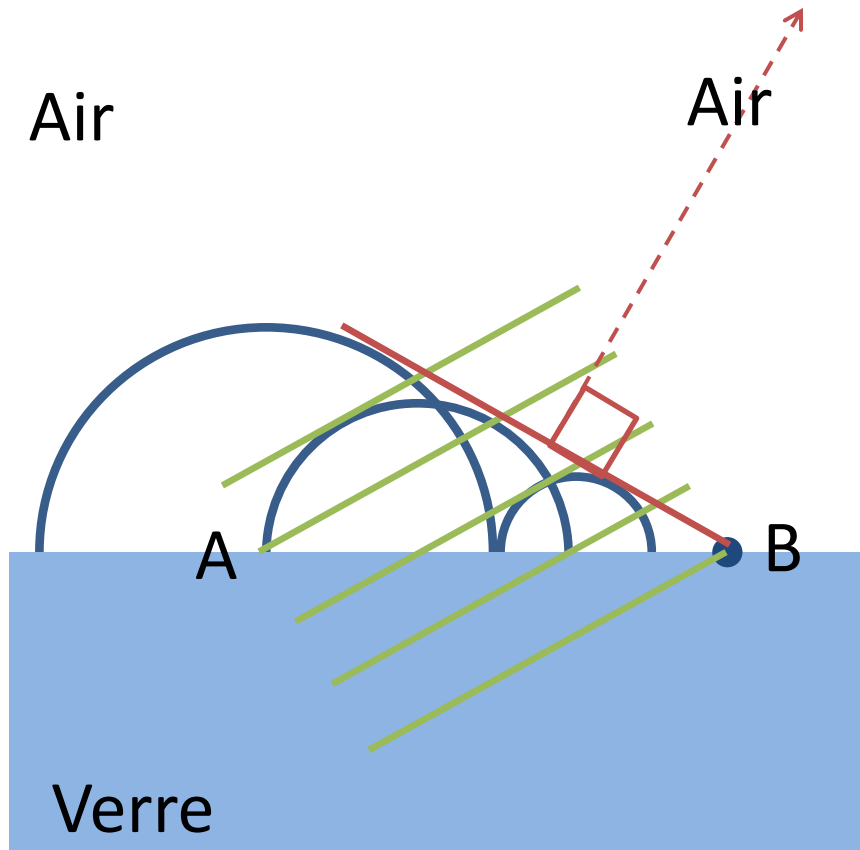
Chaque point de la surface atteint par le front d'onde émet à son tour des ondelettes sphériques.

De la réflexion



Chaque point de la surface atteint par le front d'onde émet à son tour des ondelettes sphériques.

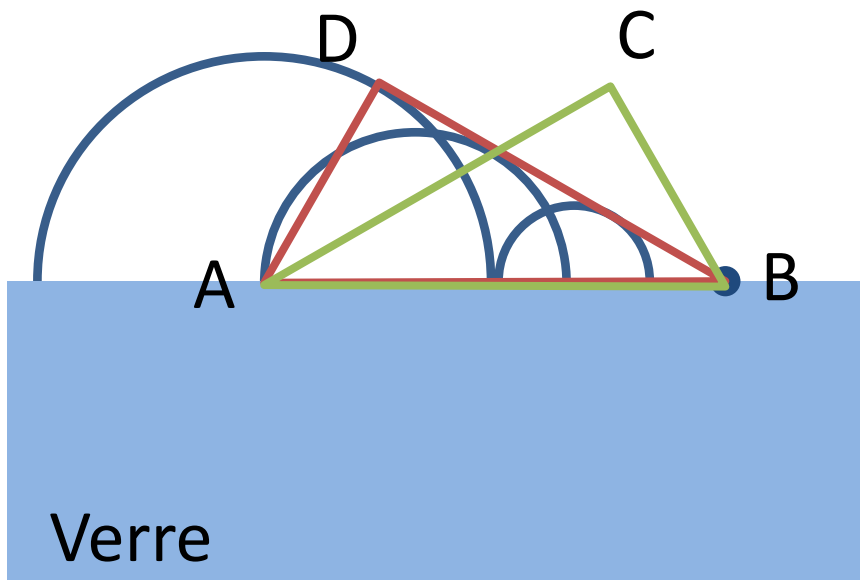
De la réflexion



La **superposition** de toute les ondelettes sphériques redonne un **front d'onde plan**, dont la direction est donnée par la **tangente commune aux cercles**. La **direction de l'onde réfléchi**e est la droite **perpendiculaire** à ce plan.

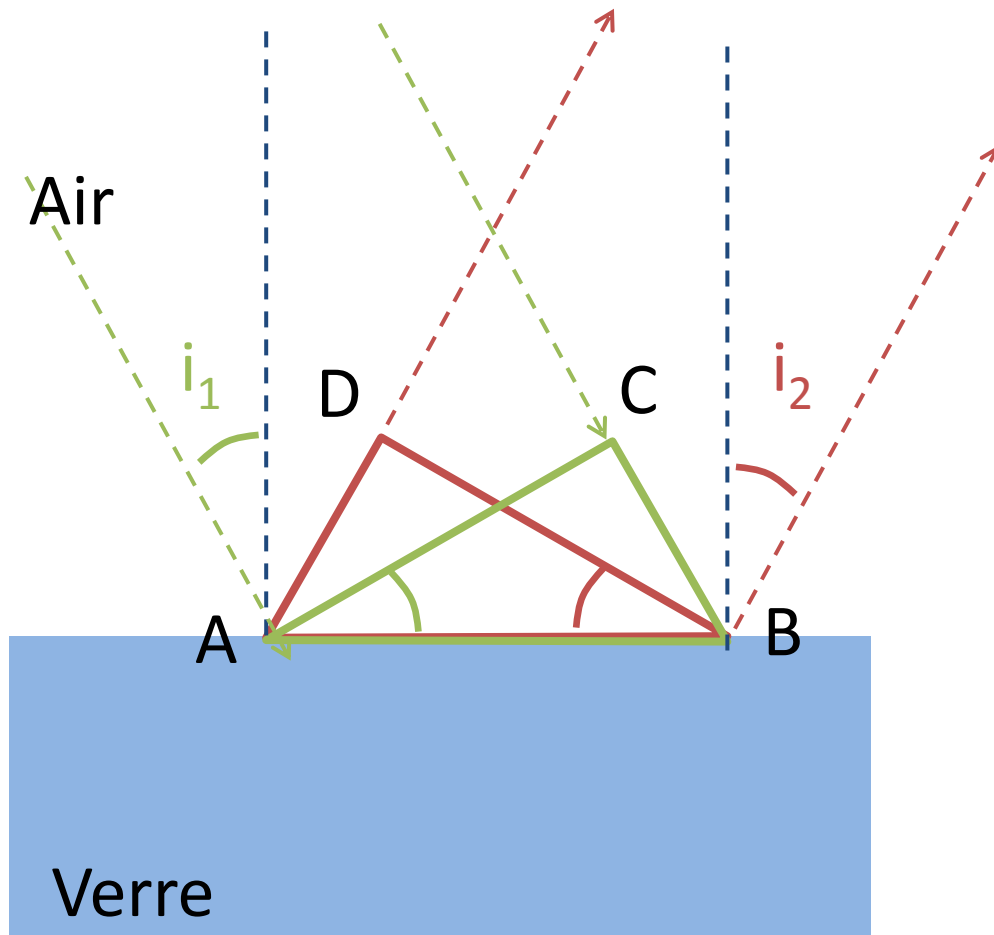
De la réflexion

Air



Verre

De la réflexion

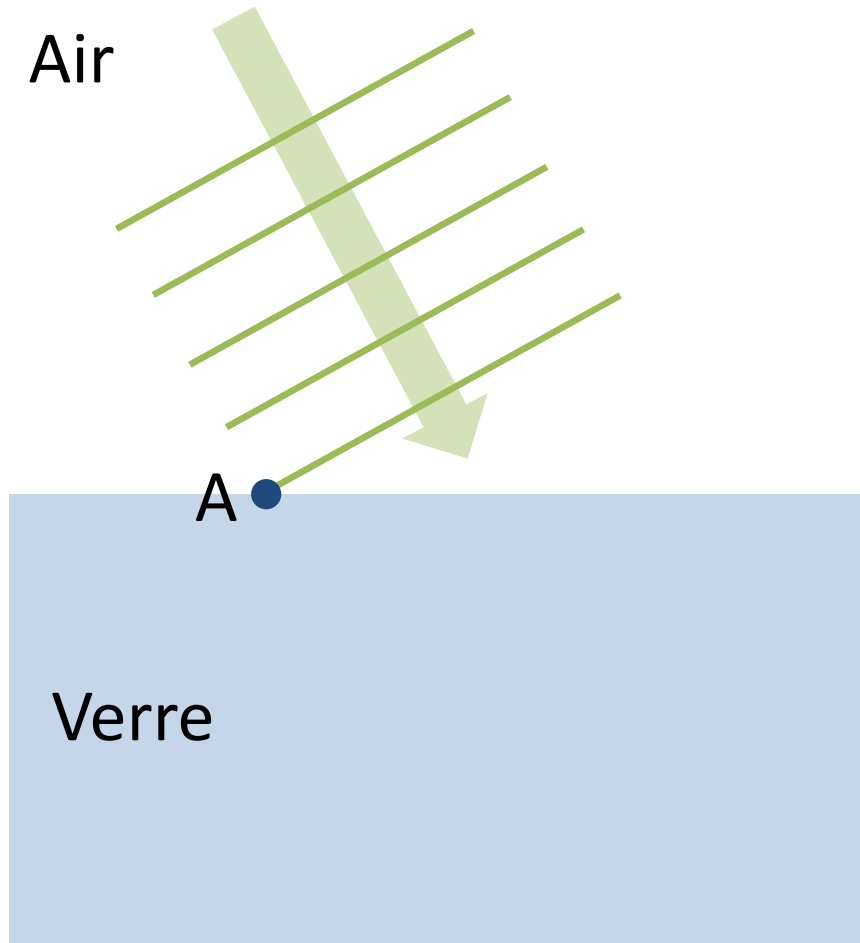


$$\sin i_1 = AC / AB$$

$$\sin i_2 = AD / AB$$

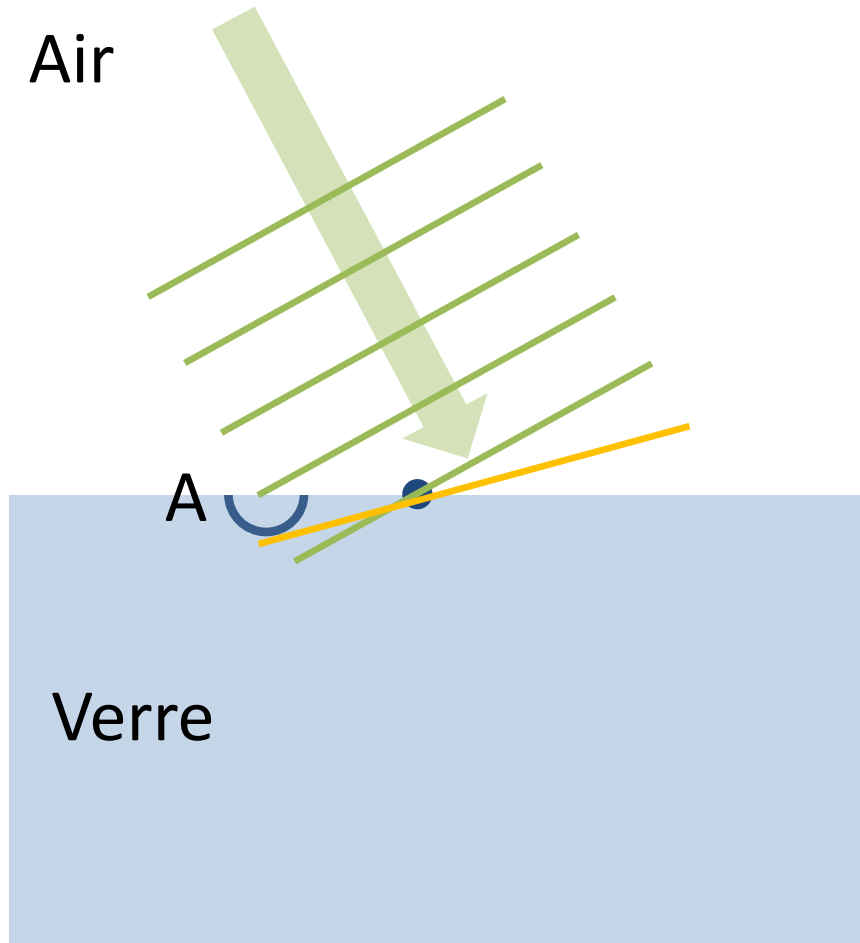
$$(\sin i_1) / (\sin i_2) = AC / AD$$

De la réfraction

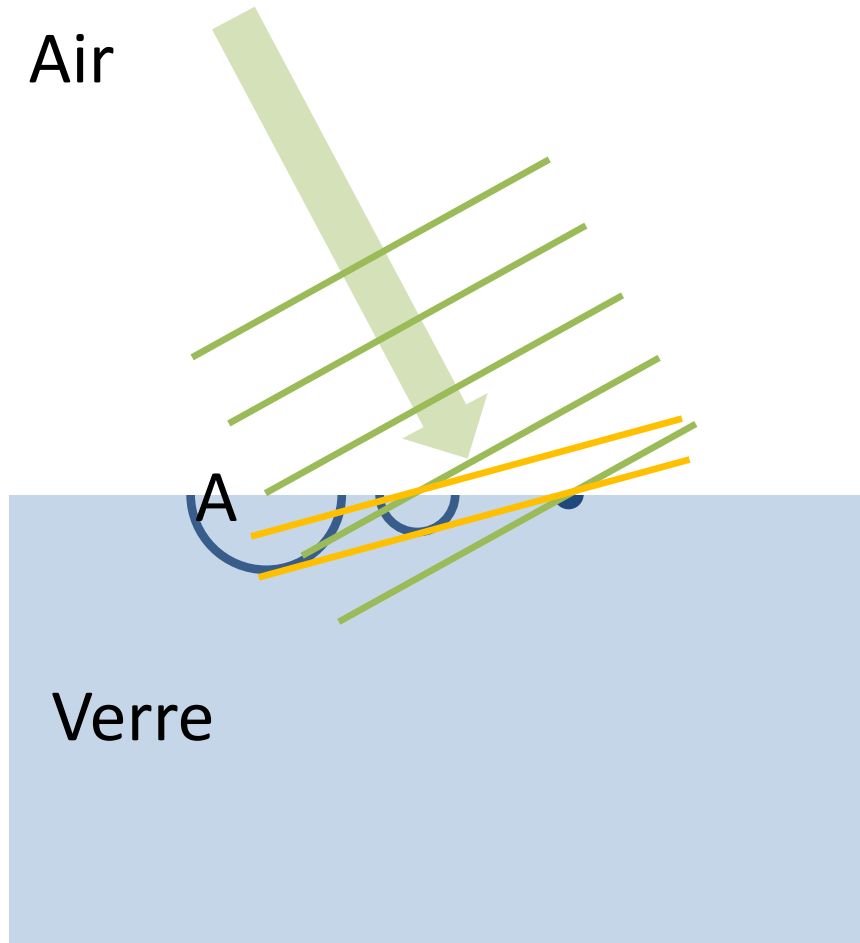


Chaque point de la surface atteint par le front d'onde émet à son tour des ondelettes sphériques.

De la réfraction

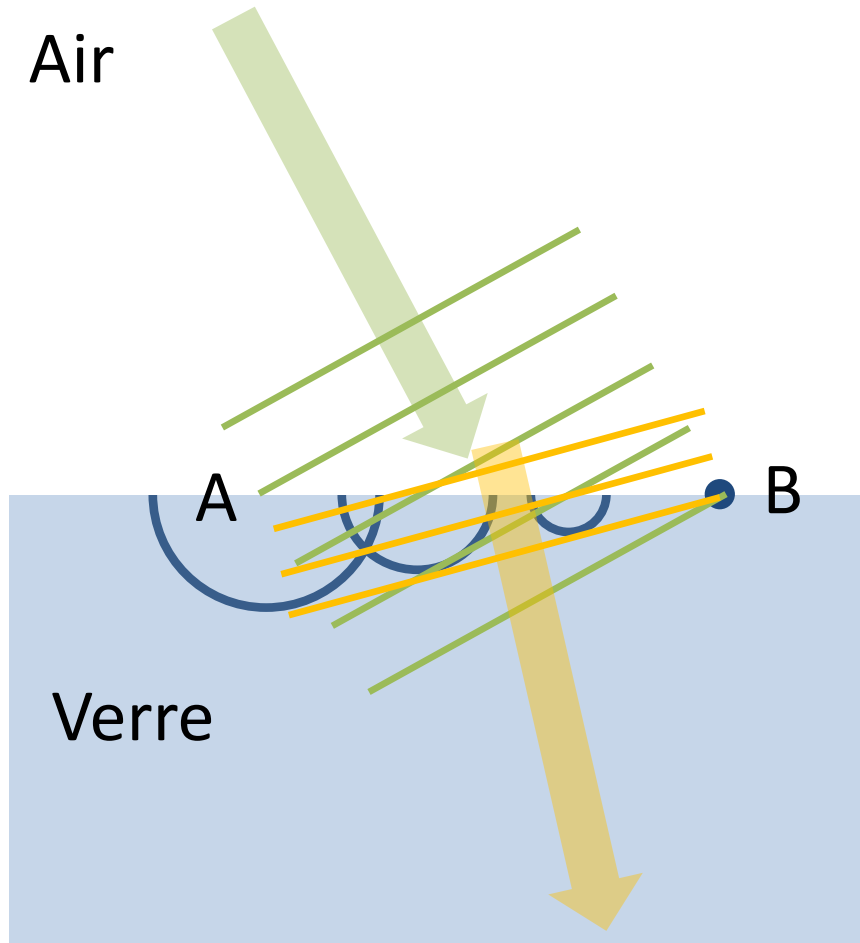


De la réfraction



Les ondelettes se propagent
moins vite dans le verre
qu'elle ne le ferait dans l'air.

De la réfraction



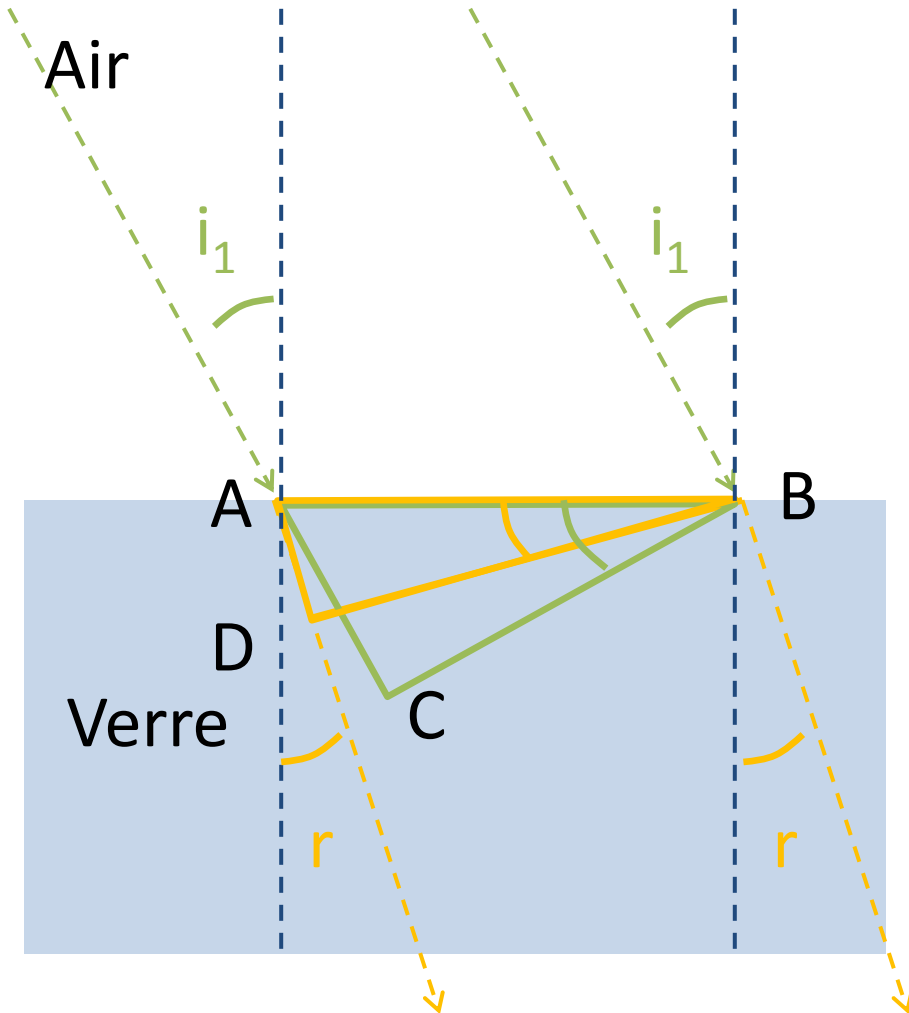
Les ondelettes se propagent **moins vite** dans le verre qu'elle ne le ferait dans l'air. Le front d'onde transmis présente **une inclinaison différente** du front d'onde incident.

De la réfraction

$$\sin i_1 = AC / AB$$

$$\sin r = AD / AB$$

$$(\sin i_1) / (\sin r) = AC / AD$$



Quel est le support de propagation de l'onde lumineuse?

Hypothèse de l'éther luminifère

un **fluide** qui emplit tout l'espace, y compris l'espace entre les atomes, fait de particules plus petites que les atomes eux-mêmes et pouvant s'écouler au travers de la matière.

Il doit également présenter une **rigidité et une élasticité** plus **élevées** que l'acier pour rendre compte de la vitesse extrêmement élevée de la lumière.

Quel est le support de propagation de l'onde lumineuse?

Hypothèse de l'éther luminifère

un **fluide** qui emplirait tout l'espace, y compris l'espace entre les atomes, fait de particules plus petites que les atomes eux-mêmes et pouvant s'écouler au travers de la matière.

Il doit également présenter une **rigidité et une élasticité** plus **élevées** que l'acier pour rendre compte de la vitesse extrêmement élevée de la lumière.



L'analyse de Newton



« Un fluide dense ne peut être d'aucune usage pour expliquer les Phénomènes de la Nature; puisque sans cela l'on explique beaucoup mieux les mouvements des Planète & des Comètes.

Un tel fluide ne servirait qu'à confondre & à retarder les mouvements de ces grands Corps, & à faire languir toute la fabrique de la Nature[...]. »

L'analyse de Newton



LA CAMÉRA
PLACÉE EN
POSITION
BASSE PAR
RAPPORT
AU SUJET,
DONNE LA
CONTRE-
PLONGÉE,
QUI FAIT
NAÎTRE UNE
IMPRESSION
DE SUPÉ-
RIORITÉ
ET DE
TRIOMPHE.

« Et comme ce Fluide n'est d'aucun usage, & qu'il ferait obstacle aux opérations de la Nature, & la rendrait languissante, aussi n'y a-t-il point de preuve de son existence son existence; & par conséquent il doit être rejeté.

Et s'il est rejeté, les Hypothèses qui font consister la lumière dans une pression, ou dans un mouvement continue au travers d'un tel milieu, sont insoutenables. »

Opticks

TRAITÉ D'OPTIQUE

SUR

LES REFLEXIONS, REFRACTIONS,
INFLEXIONS, ET LES COULEURS,

DE

LA LUMIERE.

Par Monsieur LE CHEVALIER NEWTON.

*Traduit par M. COSTE, sur la seconde Edition Angloise,
augmentée par l'Auteur.*

SECONDE EDITION FRANCOISE,
beaucoup plus correcte que la premiere.



A PARIS,

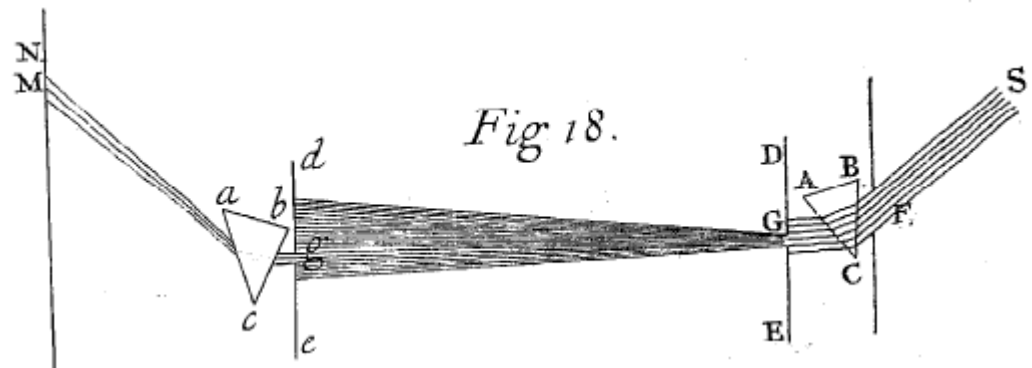
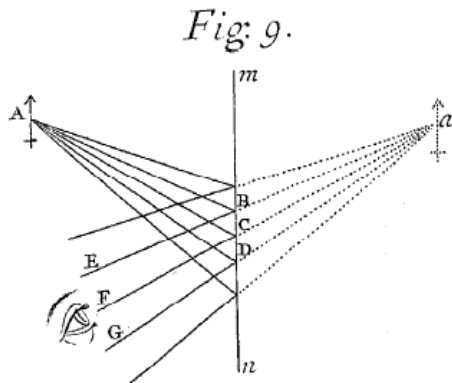
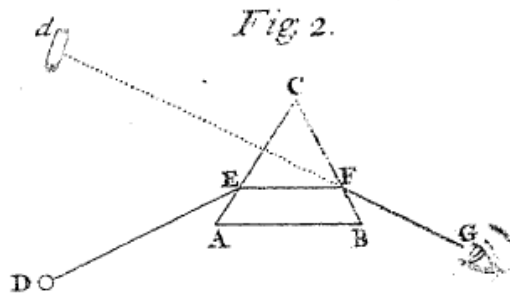
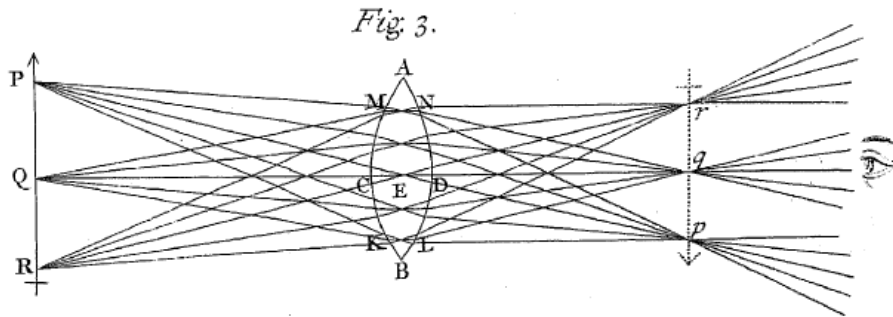
Chez MONTALANT, Quay des Augustins, du côté
du Pont saint Michel.

M. DCC. XXII.

Newton publie un traité d'optique en trois volumes dans lequel il décrit un grand nombre d'expériences.

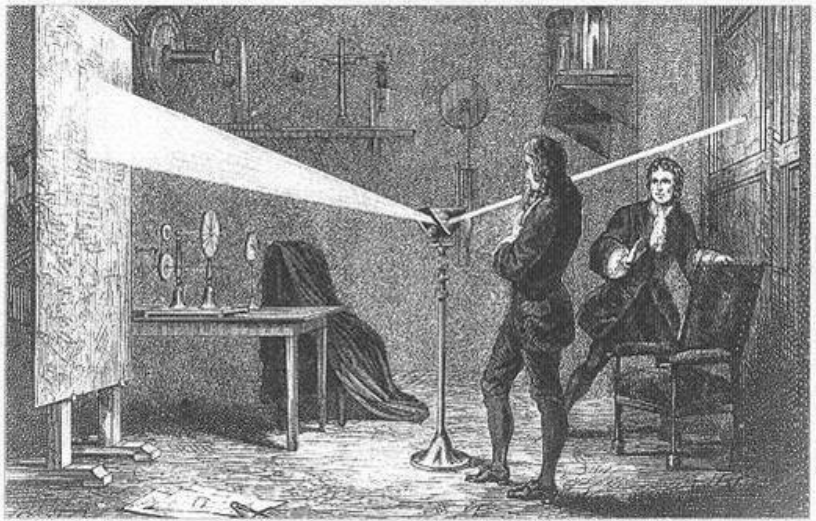
Il y présente également une théorie corpusculaire de la lumière dont le succès persistera longtemps après sa disparition.

Opticks

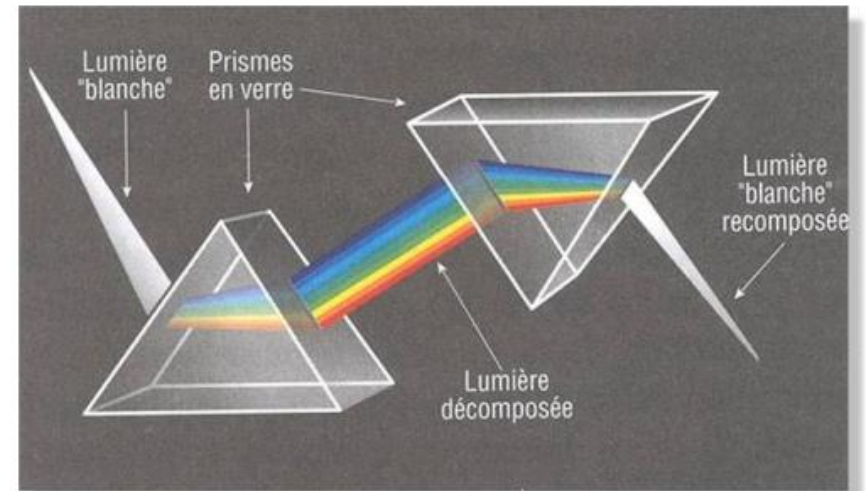


Newton publie un **traité d'optique** en trois volumes dans lequel il décrit un grand nombre d'expériences. Il y présente également une **théorie corpusculaire** de la lumière dont le succès persistera longtemps après sa disparition.

L'expérience du prisme de Newton (1666)



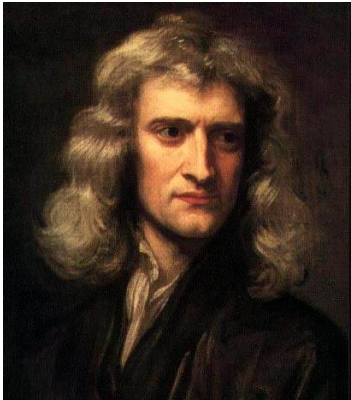
Newton en train de réaliser l'expérience des couleurs (1666) (Gravure du XIX^e siècle.)



Observations: La **lumière blanche** est décomposée en **couleurs de l'arc en ciel**. Les **différentes couleurs** subissent des **réfractions différentes**, le violet est plus dévié que le rouge. Si **chacune des couleurs** ainsi obtenue traverse alors un **deuxième prisme**, le faisceau est dévié mais **ne se sépare pas** en de **nouvelles composantes** colorée. De plus, la traversée d'un **second prisme** recombine les **couleurs** pour donner de la **lumière blanche**.

Conclusions: Une **lumière blanche** est la **superposition** de plusieurs composantes colorées. La **couleur** est une **propriété intrinsèque** de la lumière.

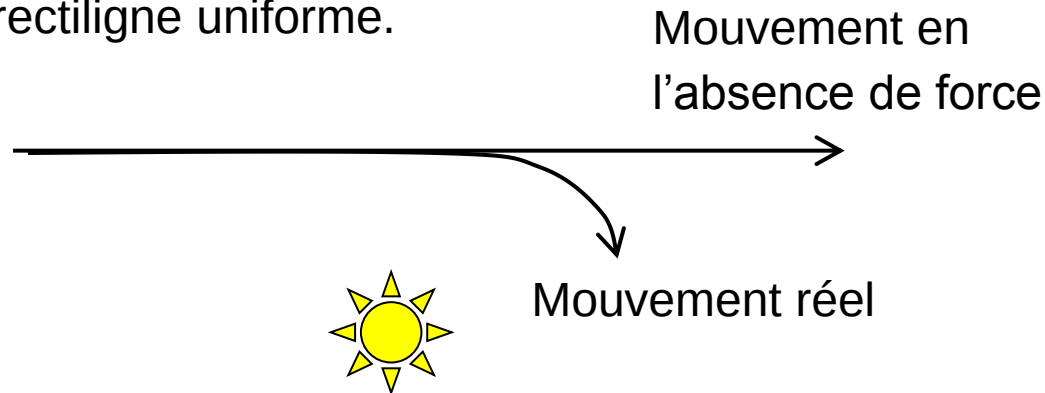
La mécanique de Newton



Sir Isaac Newton
(1642 – 1727)

Newton a montré que le **mouvement des objets sur Terre** et des **corps célestes** sont gouvernés par les **mêmes lois naturelles** ; en se basant sur les lois de Kepler sur le mouvement des planètes, il développa la loi universelle de la gravitation.

Principe d'inertie: tout corps qui est soumis à une force résultante nulle est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme.



L'action d'une force est nécessaire pour infléchir la trajectoire.

Les forces et l'inertie

- Principe fondamental de la dynamique: La force résultante appliquée à un corps est égale à l'accélération de ce corps multipliée par sa masse

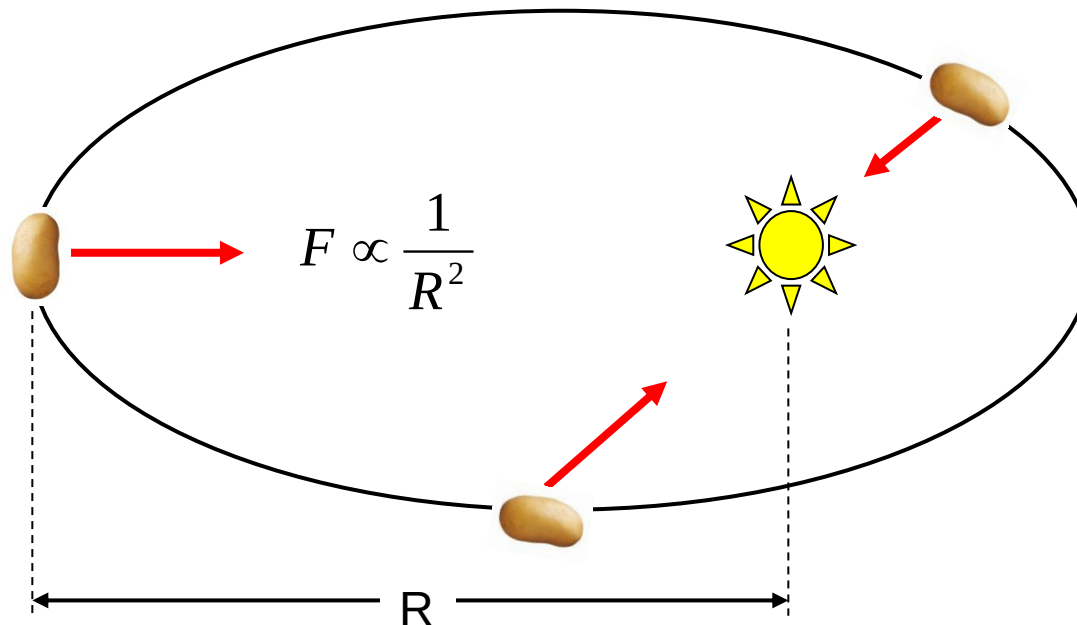
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

La **masse** caractérise l'**inertie**: pour une force d'intensité donnée l'accélération est d'autant plus faible que la masse est importante.

Un objet de **grande masse** est **difficile à mettre en mouvement** mais également **difficile à freiner**!

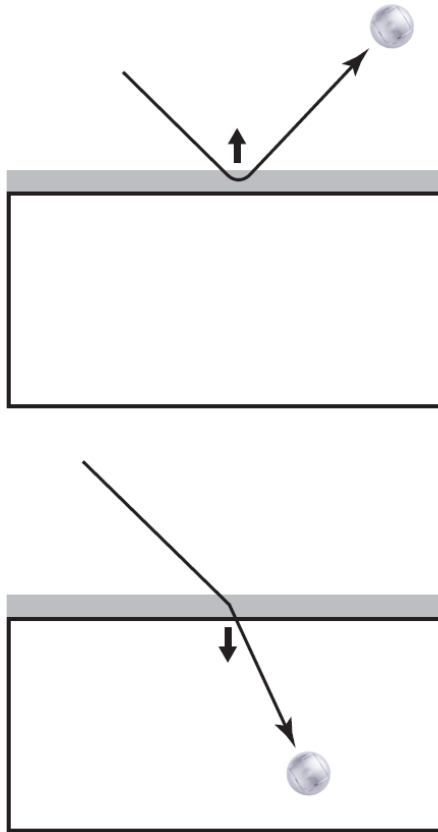
Interprétation des lois de Kepler

Le soleil exerce sur les planètes une **force centrale attractive** dont l'intensité varie comme l'**inverse du carré de la distance**.



Ces deux hypothèses simples sont suffisantes pour retrouver les trois lois empiriques de Kepler.

Théorie corpusculaire (Newton)



La lumière est un flux de particules dont la **taille** est liée à la **perception de la couleur**.

Un **rayon lumineux** représente la **direction** dans laquelle les **particules se déplacent**.

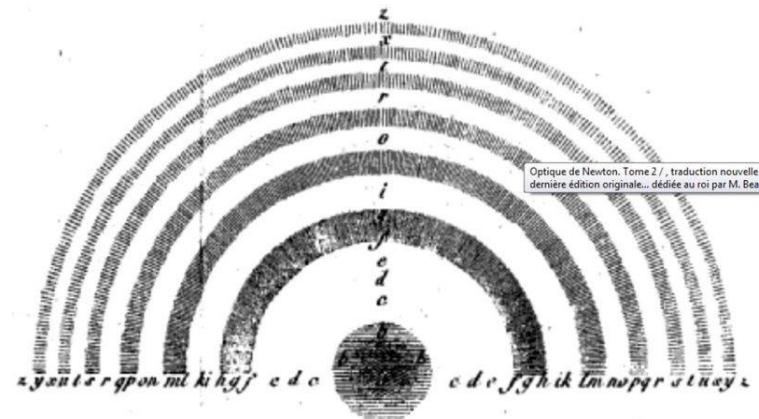
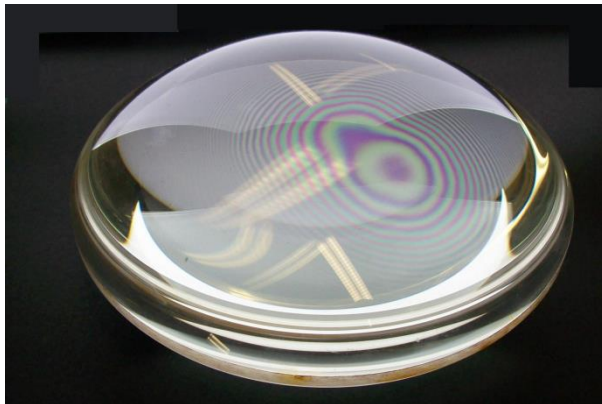
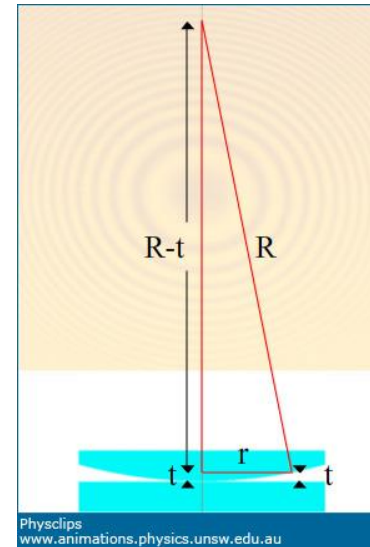
À la **réflexion**, les **angles** d'incidence et de réflexion sont **égaux** (conservation de la quantité de mouvement).

La **réfraction** implique un changement de vitesse des particules lorsqu'elles changent de milieu. L'**inclinaison** du rayon vers la normale à la surface est associée à une **augmentation de la vitesse**.

Newton transpose sa théorie mécanique des forces à l'optique.

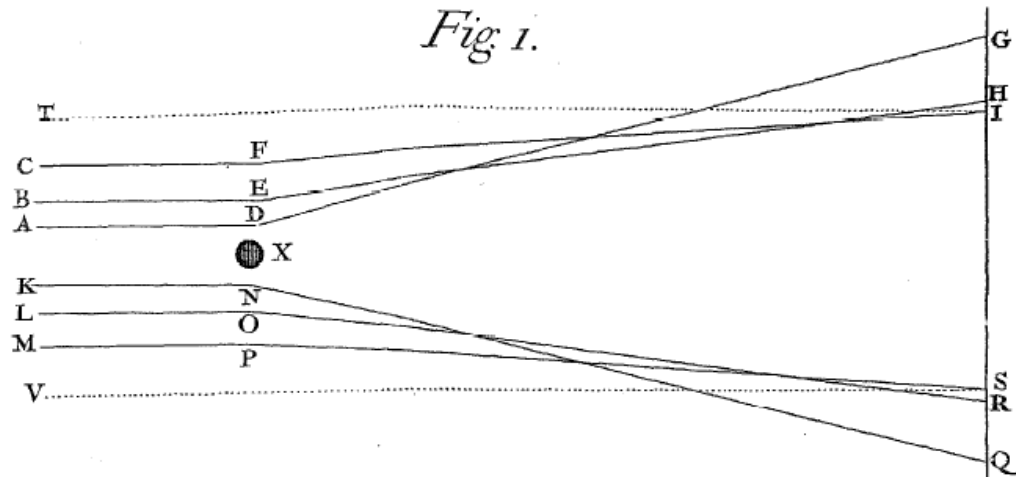
Quelques comportements plus complexes à expliquer

Anneaux dits « de Newton »

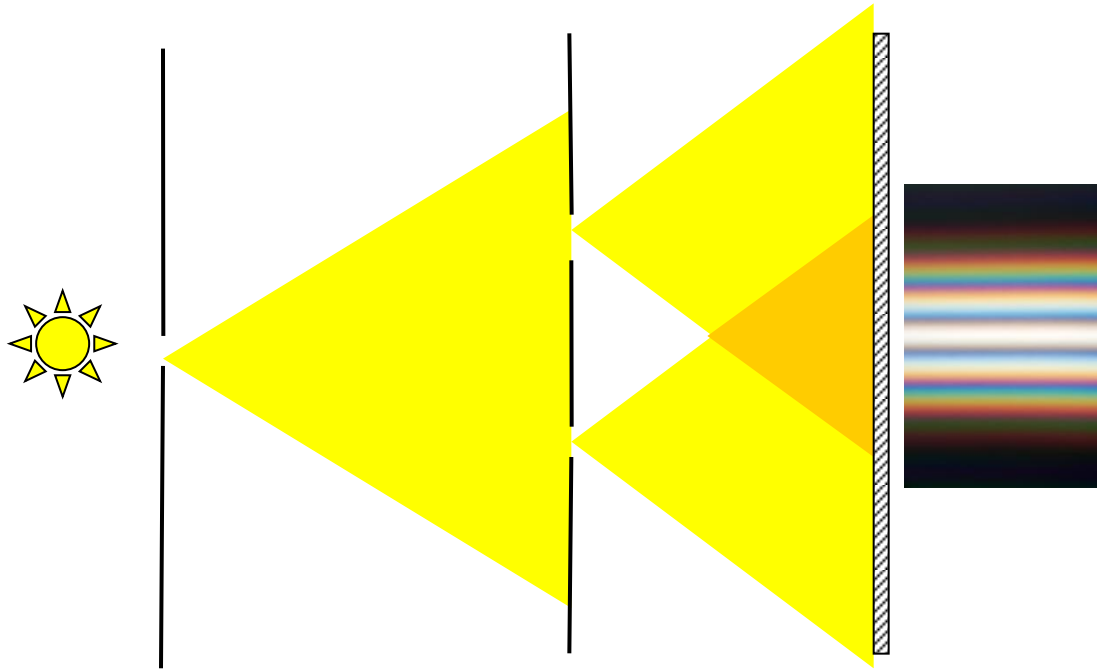


Quelques comportements plus complexes à expliquer

Diffraction par un obstacle de faible épaisseur (fil ou cheveux).



L'expérience de Young (1801)

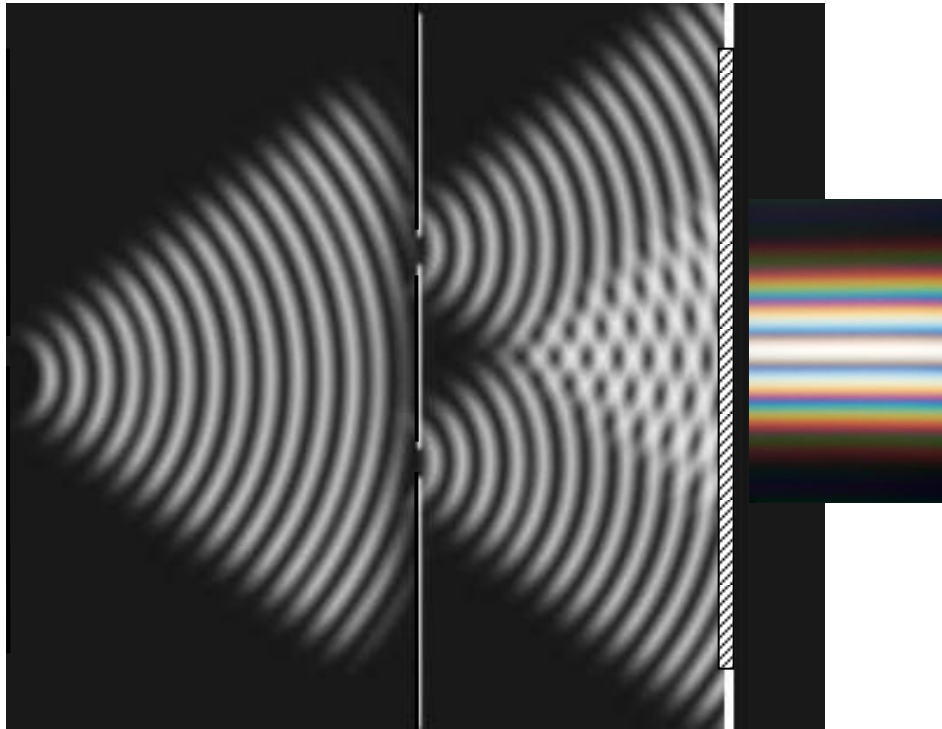


Thomas Young
(1773 -1829)

Dans la zone de recouvrement des deux faisceaux, on observe une alternance de **franges lumineuses et sombres**.

Ce type d'observation est impossible à interpréter dans un modèle corpusculaire classique.

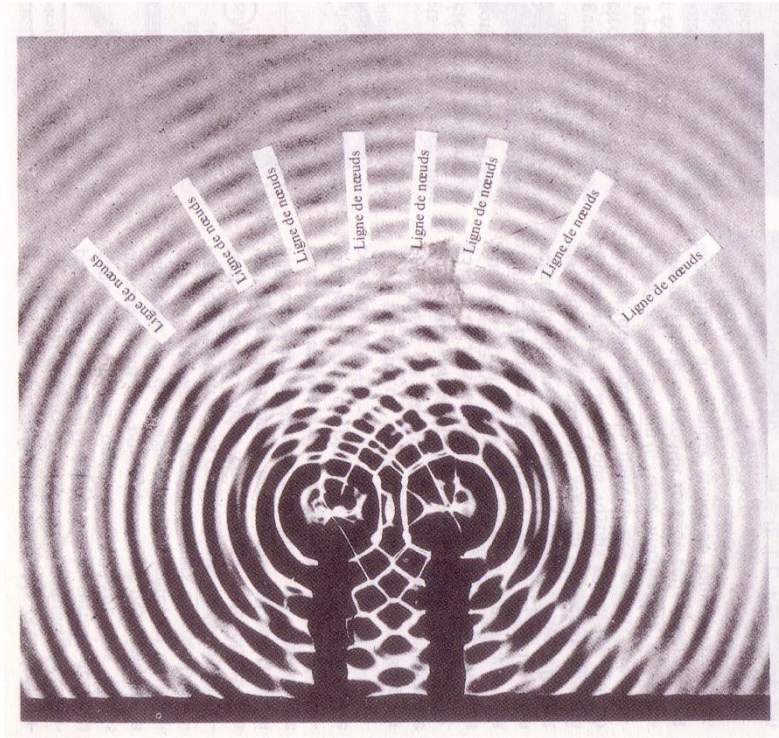
Interprétation de l'expérience de Young



Thomas Young
(1773 -1829)

La **lumière** se comporte comme une **onde** : les fentes sont des sources secondaires synchrones qui interfèrent sur l'écran d'observation. Le phénomène est identique aux interférences des ondes mécaniques.

Interférence



Deux sources périodiques créent des ondelettes à la surface de l'eau. La forme de la surface à un instant donnée est la superposition des ondes correspondant à chacune des sources si elle était seule. On observe un motif d'interférence. Il est stationnaire.



Interférence

Aux points où les deux ondes sont **en phase** il y a **interférence constructive**: 2 crêtes s'ajoutent pour donner une amplitude double.

Aux points où les deux ondes sont **en opposition de phase** il y a **interférence destructive**: 1 crête et 1 creux s'ajoutent pour donner une amplitude nulle.

Le motif d'interférence est stationnaire.

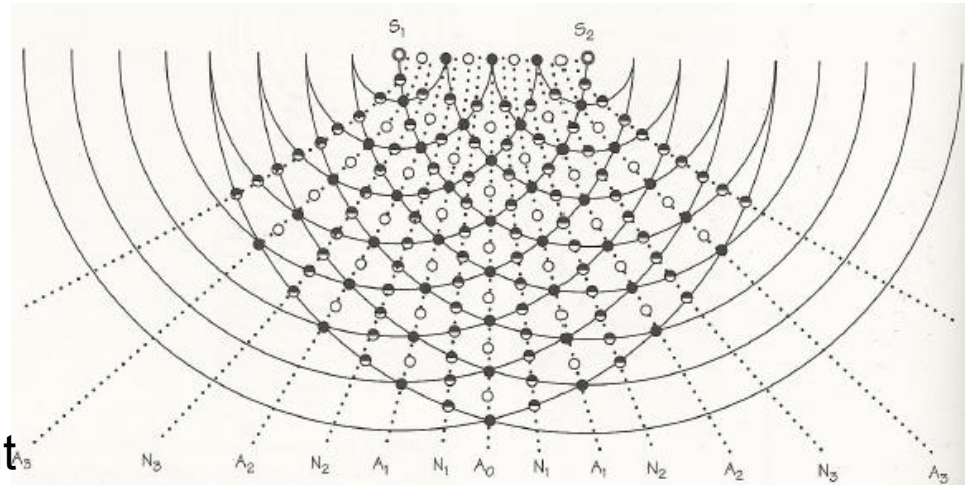
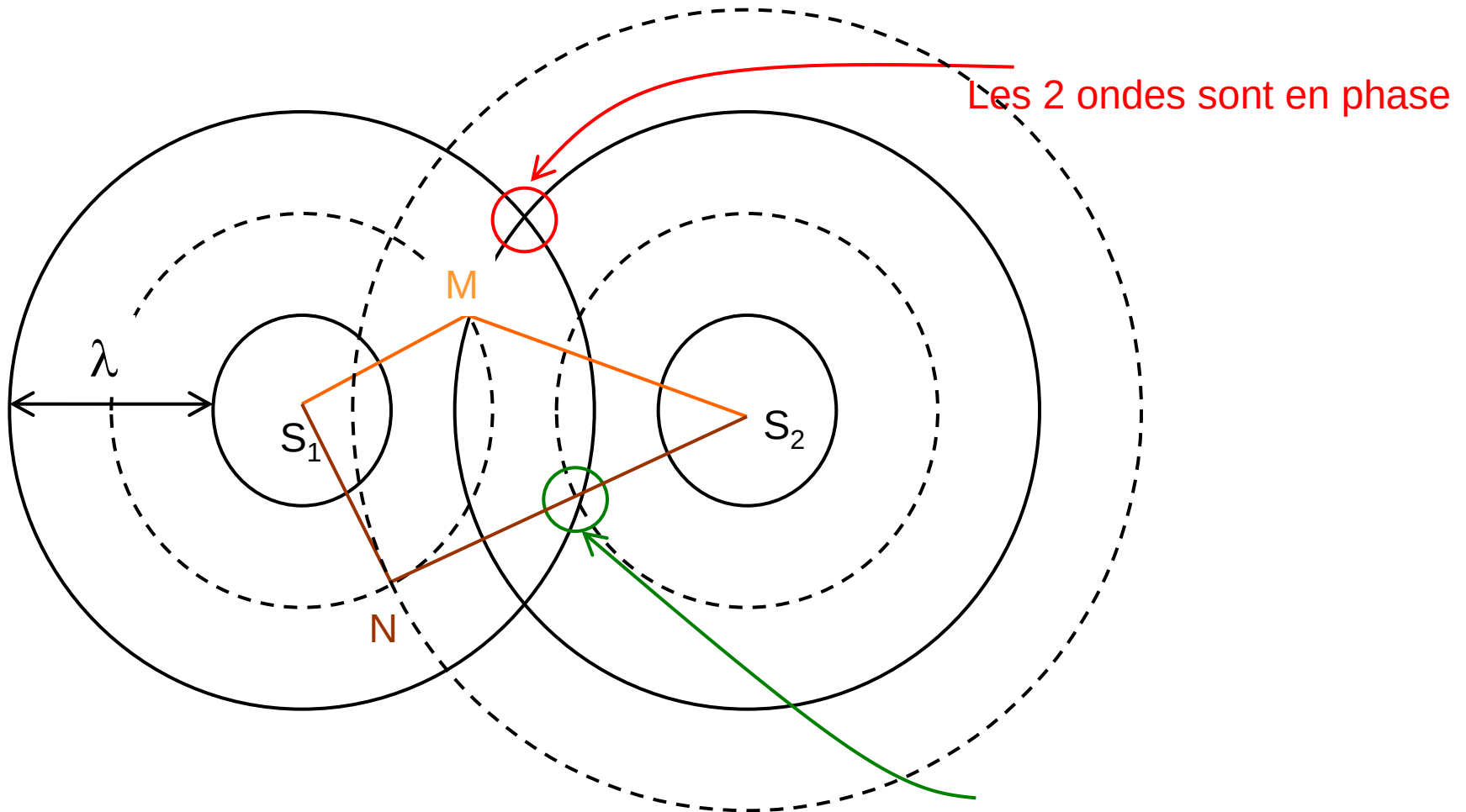


FIGURE 8.17 Analysis of interference pattern. The dark circles indicate where crest is meeting crest, the blank circles where trough is meeting trough, and the half-dark circles where crest is meeting trough. The other lines of maximum constructive interference are labeled A_0, A_1, A_2 , etc. Points on these lines move up and down much more than they would because of waves from either source alone. The lines labeled N_1, N_2 , etc. represent bands along which there is maximum destructive interference. Points on these lines move up and down much less than they would because of waves from either source alone.

Les points M correspondant à des interférences constructives sont tels que

$$S_2M - S_1M = n\lambda$$

C'est l'équation d'une **hyperbole** dont S_1 et S_2 sont les foyers.



$S_2M - S_1M = \lambda/2 \rightarrow$ interférence destructive

$S_2N - S_1N = \lambda \rightarrow$ interférence constructive

Les 2 ondes sont en phase

Les 2 ondes sont en
opposition de phase

VII. ON THE
THEORY OF LIGHT AND COLOURS.

BY

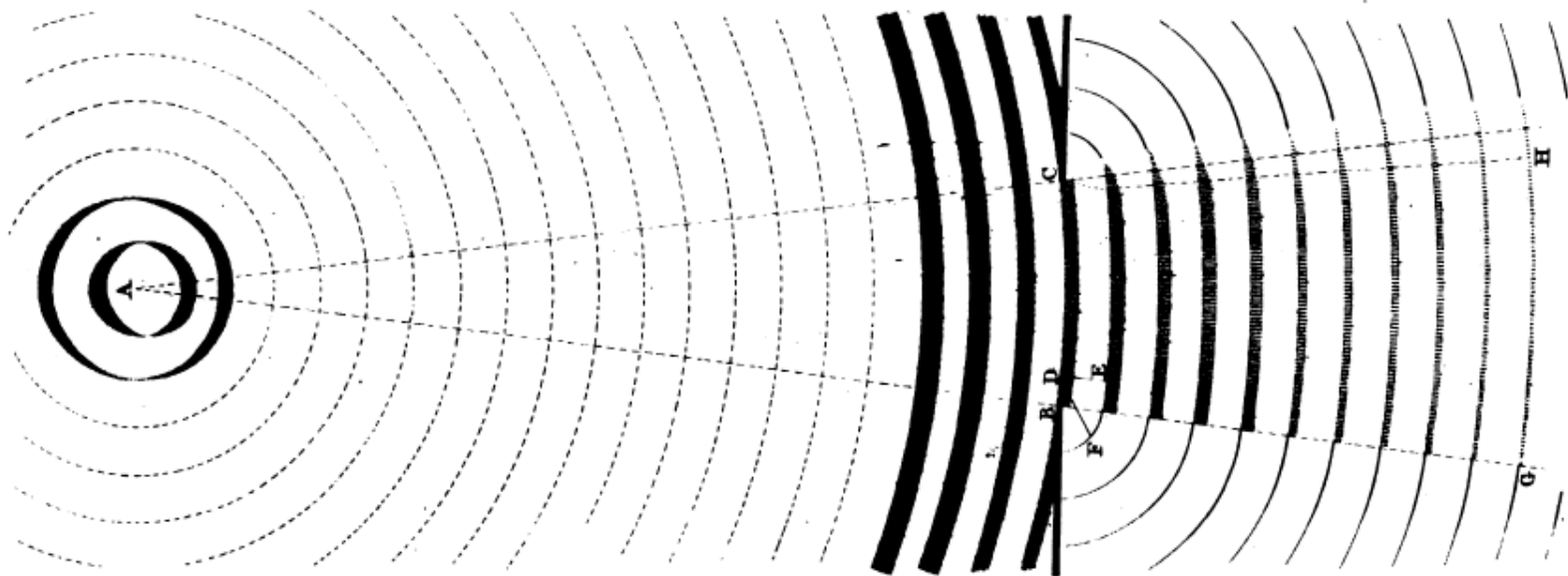
THOMAS YOUNG, M. D. F. R. S.
PROFESSOR OF NATURAL PHILOSOPHY IN THE ROYAL INSTITUTION.

FROM THE PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

Read before the ROYAL SOCIETY, November 12, 1801.

PROPOSITION IX. *Radiant Light consists
in Undulations of the luminiferous Ether.*

Fig. 105.

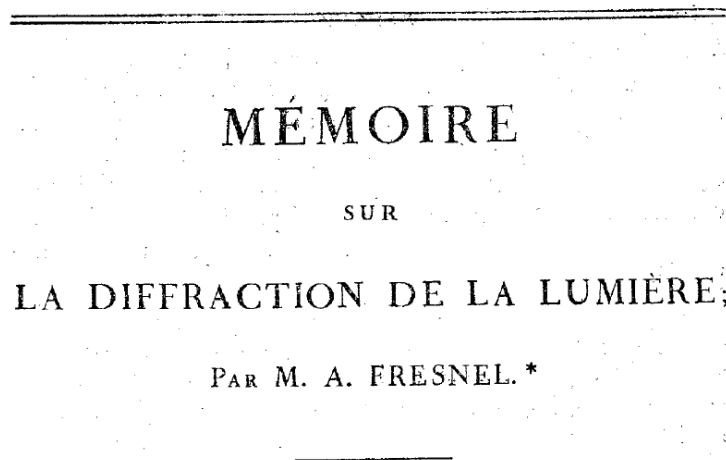


Les travaux d'Augustin Fresnel

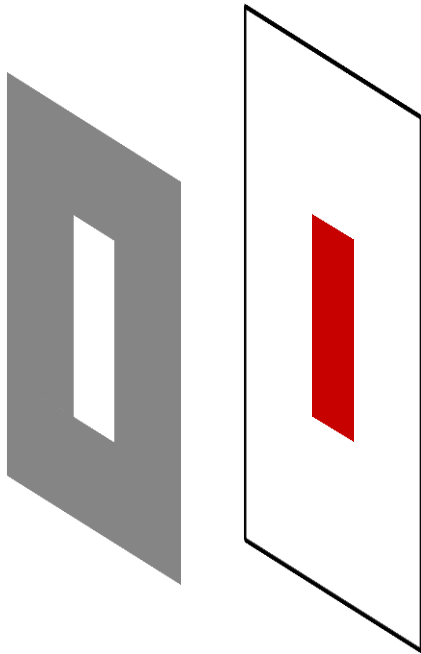
- Contemporain de Young, **Fresnel** étudie à la même époque les **interférences** et la **diffraction**.
- Il propose sa **théorie ondulatoire** de la lumière inspirée des travaux de Huygens et la présente, en 1818, devant l'académie des sciences.
- Il envisage la lumière comme la **propagation d'une onde mécanique** sur un support matériel.



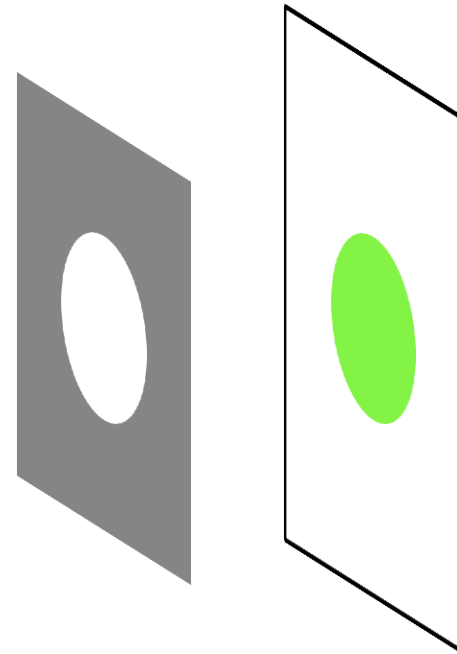
Augustin Jean Fresnel
1788 - 1827



Diffraction de la lumière

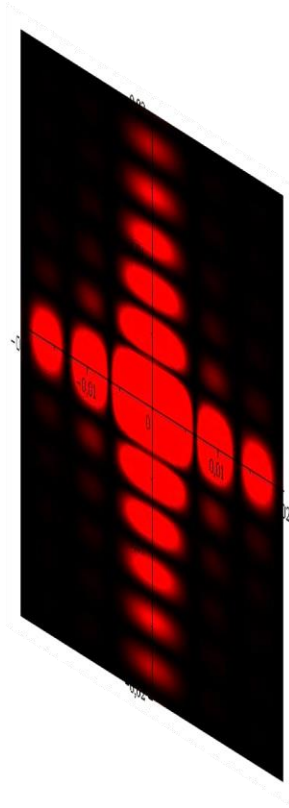


Fente rectangulaire

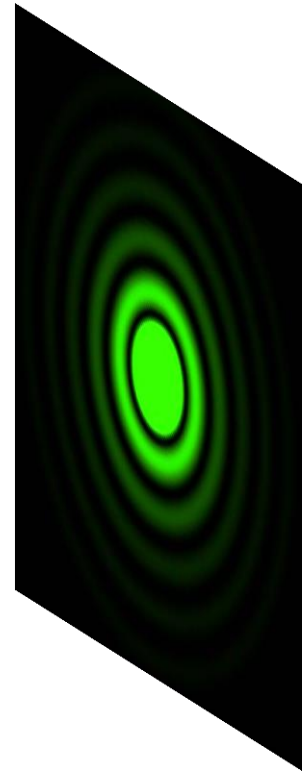


Ouverture circulaire

Diffraction de la lumière



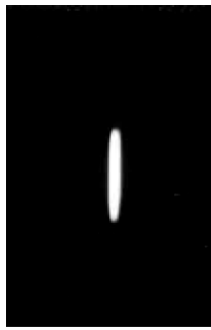
Fente rectangulaire



Ouverture circulaire

Diffraction par une fente

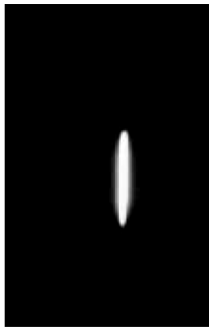
la largeur de la fente diminue



(a)



(b)



(c)



(d)

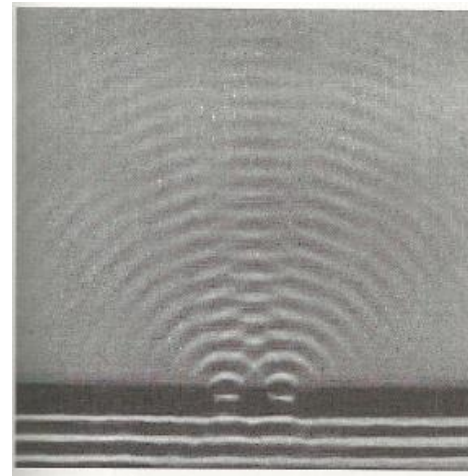
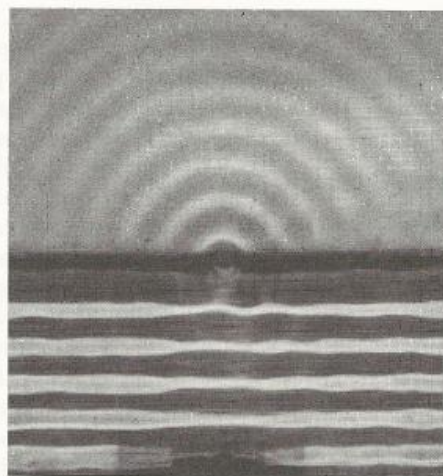
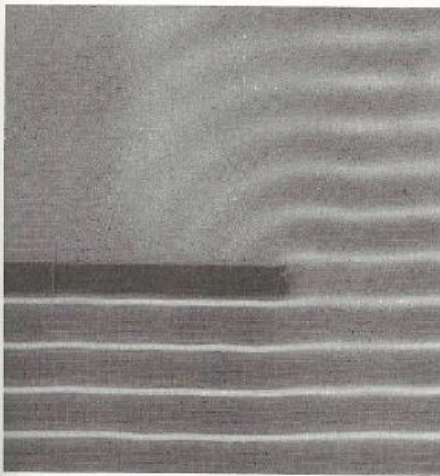


(e)

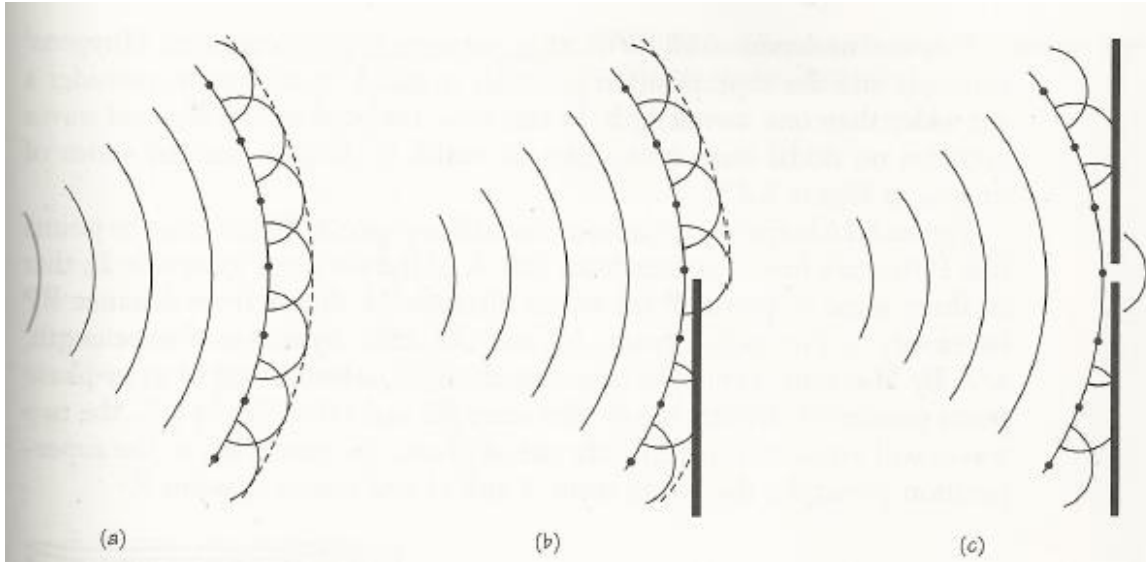
Diffraction des ondes mécaniques



La diffraction est un phénomène caractéristique des phénomènes ondulatoire.

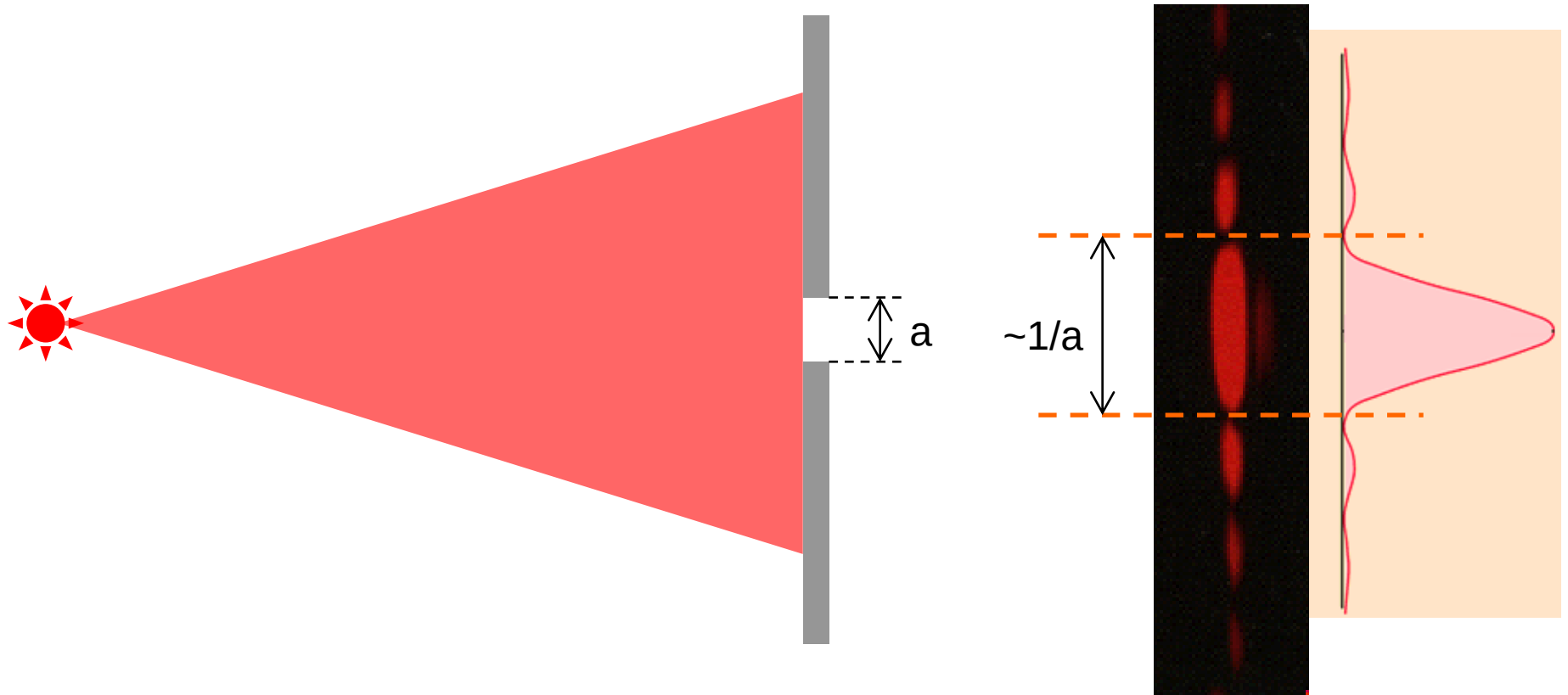


Interprétation de la diffraction selon Fresnel



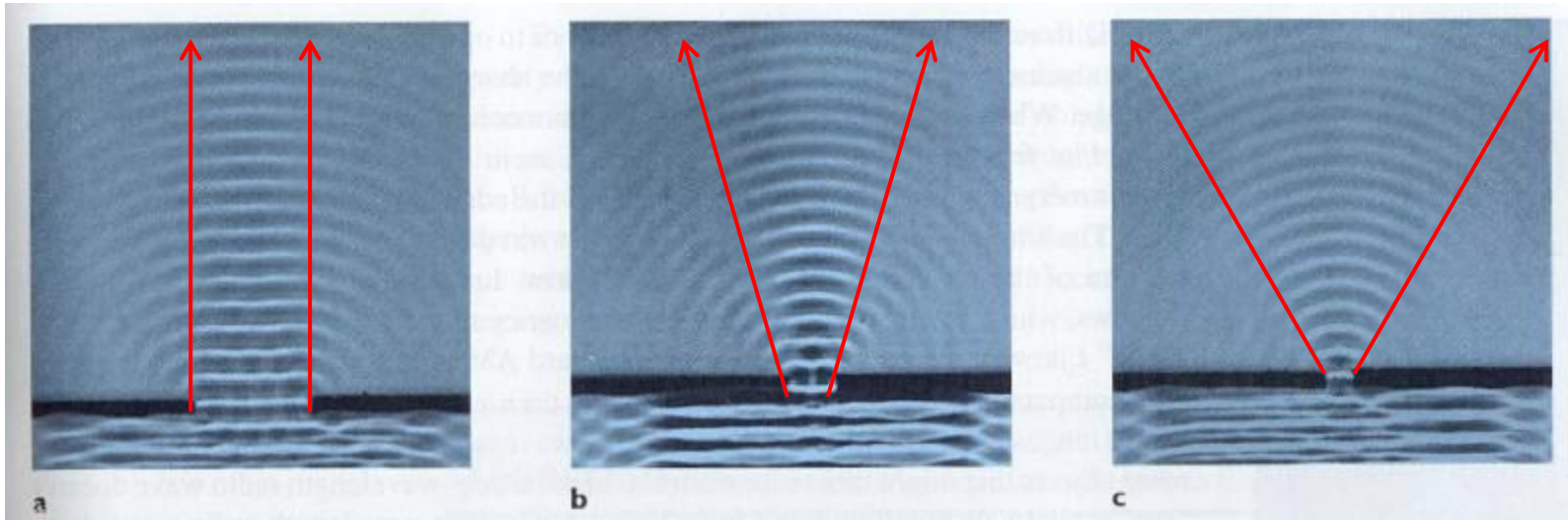
(a) Chaque point atteint par le front d'onde se comporte lui-même comme **une source secondaire** qui émet des ondelettes sphérique dans tout l'espace. Les sources secondaires n'interfèrent constructivement que selon leur **enveloppe** qui constitue le **nouveau front d'onde**. (b) Quand une partie de l'onde est bloquée, les interférences constructives dues aux sources secondaires **s'étendent dans la région d'ombre**. (c) Quand toute l'onde est bloquée, exceptée une très petite portion, l'onde qui se propage au travers de la petite ouverture est **équivalente à une source ponctuelle**.

Diffraction par une fente et variables conjuguées



La largeur de la tâche est inversement proportionnelle à la largeur de l'ouverture diffractante.

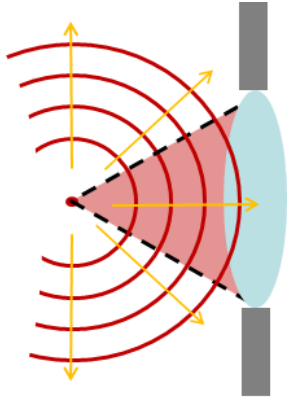
Diffraction par une fente et variables conjuguées



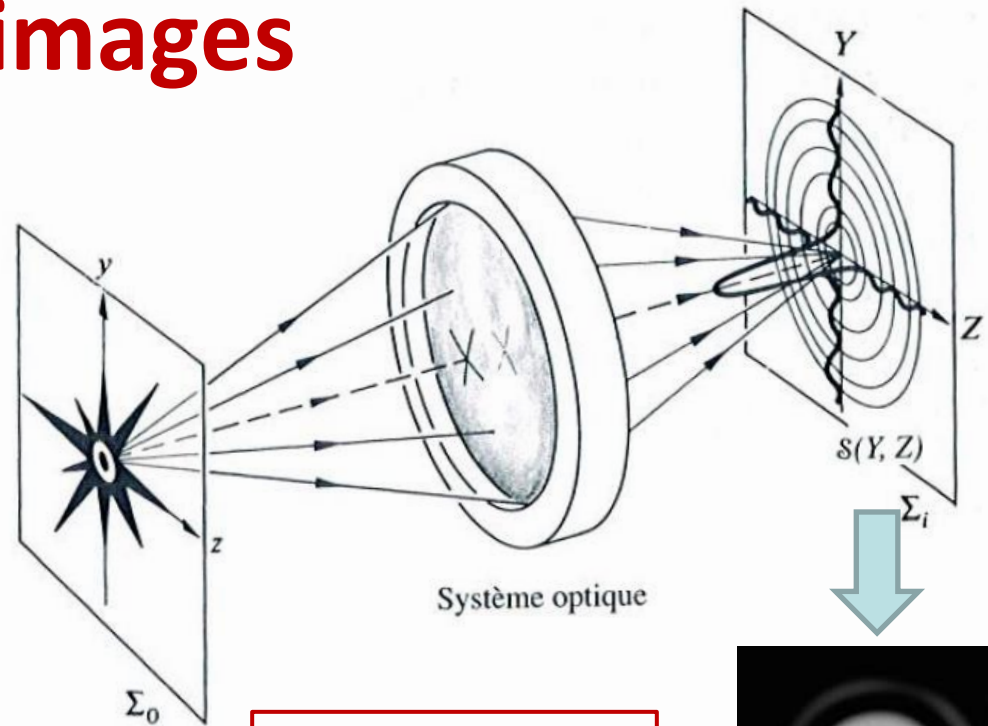
La largeur de l'ouverture diffractante a et la dispersion angulaire du front d'onde diffracté $\Delta\theta$ sont des grandeurs conjuguées:

$$\Delta\theta \propto \frac{1}{a}$$

Conséquence sur la formation des images

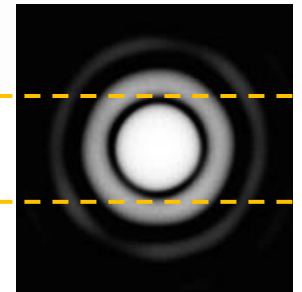


L'ouverture finie de la lentille limite la propagation du front d'onde.
L'image d'un point géométrique est une **tâche d'Airy**.



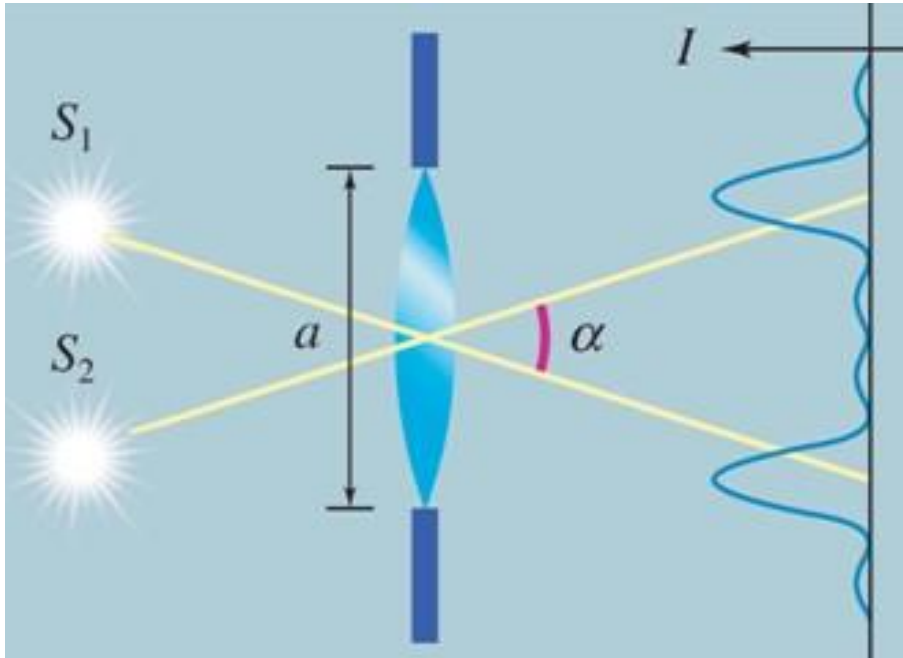
$$d = 2,44 \times \frac{\lambda \times f}{a}$$

λ : longueur d'onde de la lumière
 f : distance focale de la lentille
 a : diamètre de la lentille



La diffraction a une influence sur la formation d'une image par un système optique

Pouvoir de résolution

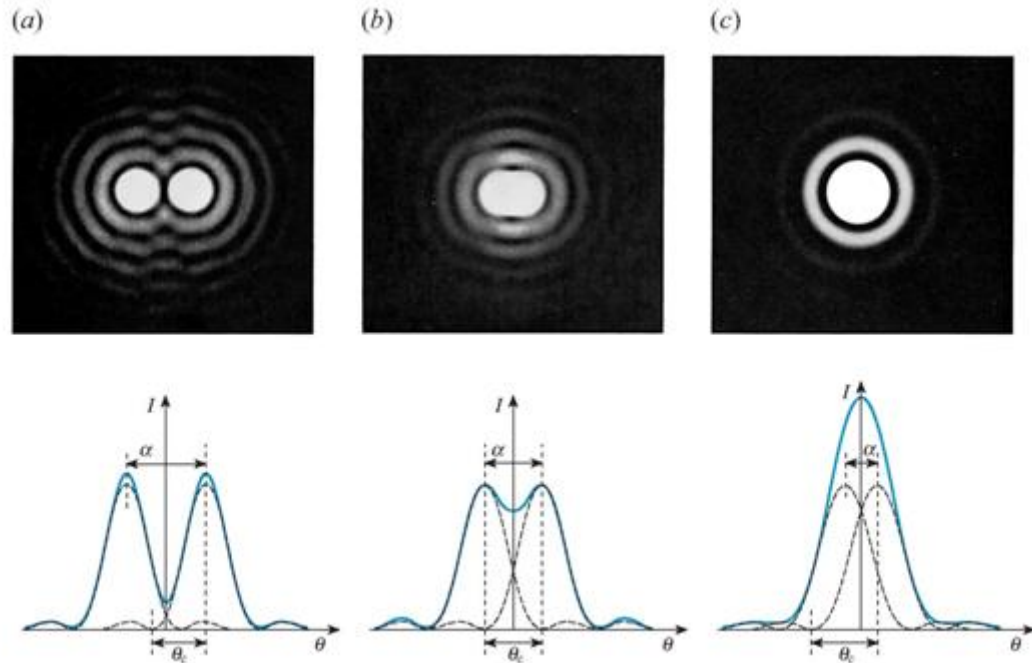


L'image d'une source ponctuelle n'est pas un point mais une figure de diffraction.

Deux sources lumineuses peuvent être discernées si leurs figures de diffraction ne se superposent pas.

Le pouvoir de résolution d'un système optique est limité par la diffraction.

Critère de Rayleigh



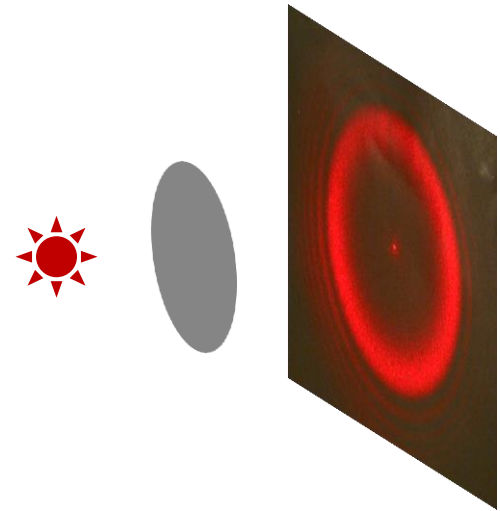
Deux images sont discernables tant que la **distance** entre les maxima centraux des figures de diffraction est **supérieure** au **rayon de la tâche d'Airy**.

Le succès de la théorie ondulatoire

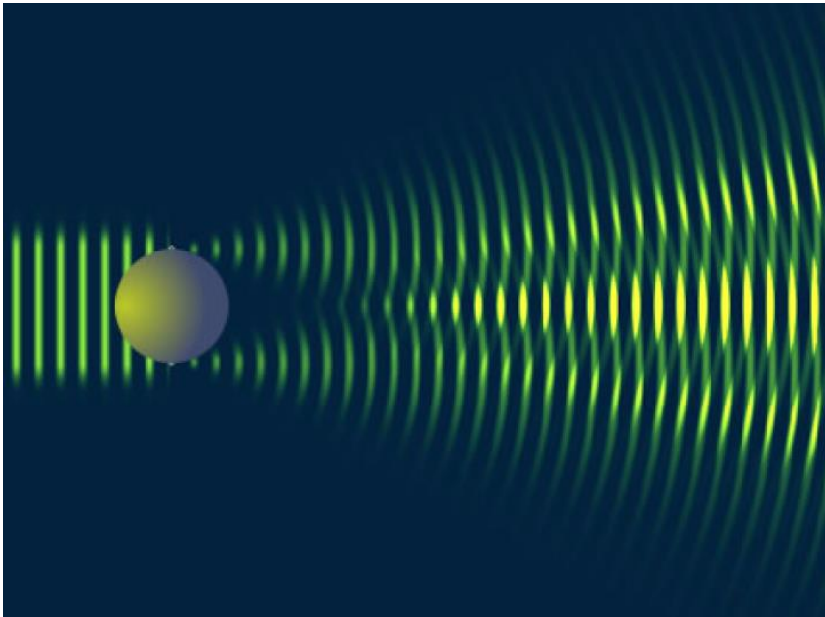
La théorie de Fresnel prévoit que l'ombre d'un disque opaque, placé sur le trajet d'un faisceau lumineux, comporte un point en son centre **aussi brillant qu'en l'absence du disque**.

Cette prédiction, caractéristique de la **nature ondulatoire** de la théorie de Fresnel, suscite une polémique au sein de l'académie des sciences.

La confirmation expérimentale de cette prédiction théorique vaut à Fresnel **prix de l'Académie des Sciences** en 1819.



Diffraction par une bille opaque



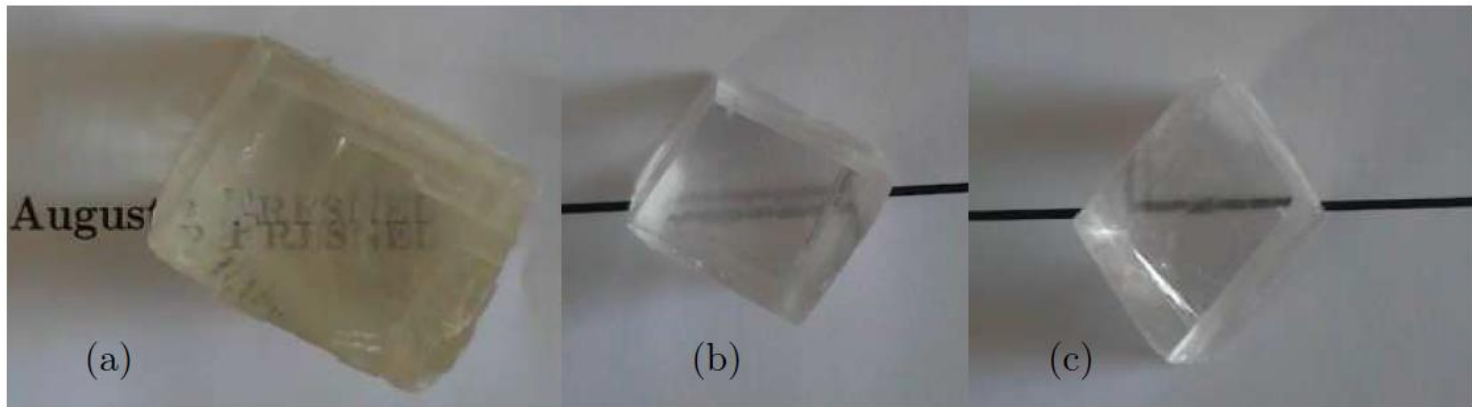
La lumière propagée après la sphère est la **somme** des contributions des **sources secondaires** situées à la périphérie de la bille.

Ces contributions sont **en phase** le long de l'**axe** passant par le **centre de la bille**.

L'intensité d'éclairement est **non-nulle** au **centre de l'ombre** projetée par la sphère.

Double réfraction

- Lorsqu'on place un cristal de calcite sur un texte imprimé, l'image se dédouble.
- Si on fait tourner le cristal, l'image ordinaire reste immobile, tandis que l'image extraordinaire, tourne et disparaît lorsque le trait tracé sur la feuille est orienté suivant la bissectrice des angles de la base du cristal.
- Fresnel suppose qu'il s'agit de deux états différents (ou polarisation) de la lumière.



Polarisation

- Fresnel fait l'hypothèse que la lumière, comme le son, est une onde **polarisée longitudinalement**.

-Onde de déformation longitudinale d'un ressort tendu

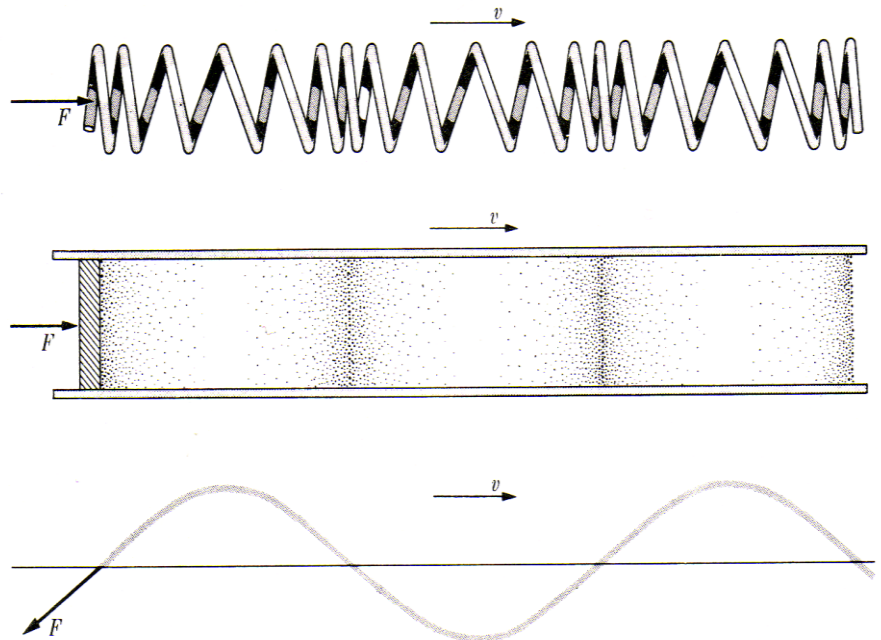
$$v \approx 1 \text{ m s}^{-1}$$

- Onde acoustique longitudinale dans un tuyau rempli d'air

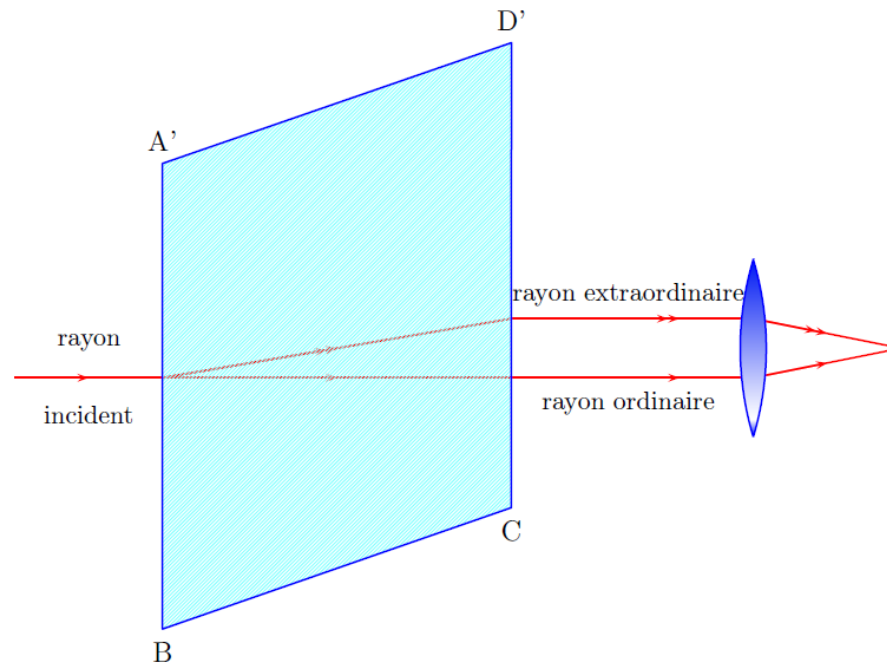
$$v \approx 300 \text{ m s}^{-1}$$

-Onde de déformation transversale d'une corde tendue (ex. violon)

$$v \approx 1000 \text{ m s}^{-1}$$



- Fresnel essaie de créer des **interférences** avec le rayon **ordinaire** et le rayon **extraordinaire**.
- Les deux faisceaux superposés par l'intermédiaire d'une lentille convergente sur un écran, ne donnent **pas de franges d'interférences**.



La lumière est une onde transverse

Conclusion

- Jusqu'au milieu du XVIII^{ème} siècle, la lumière est envisagée comme un **flux de particules microscopique**.
- Sa **propagation** est bien comprise en terme d'**optique géométrique**.
- Les travaux de **Young** et de **Fresnel** ont été décisifs car ils ont permis l'observation de **phénomènes physiques difficilement explicables en terme de propagation balistique**.
- Il faudra attendre le début du XX^{ème} siècle pour que la théorie ondulatoire montre ses limites.