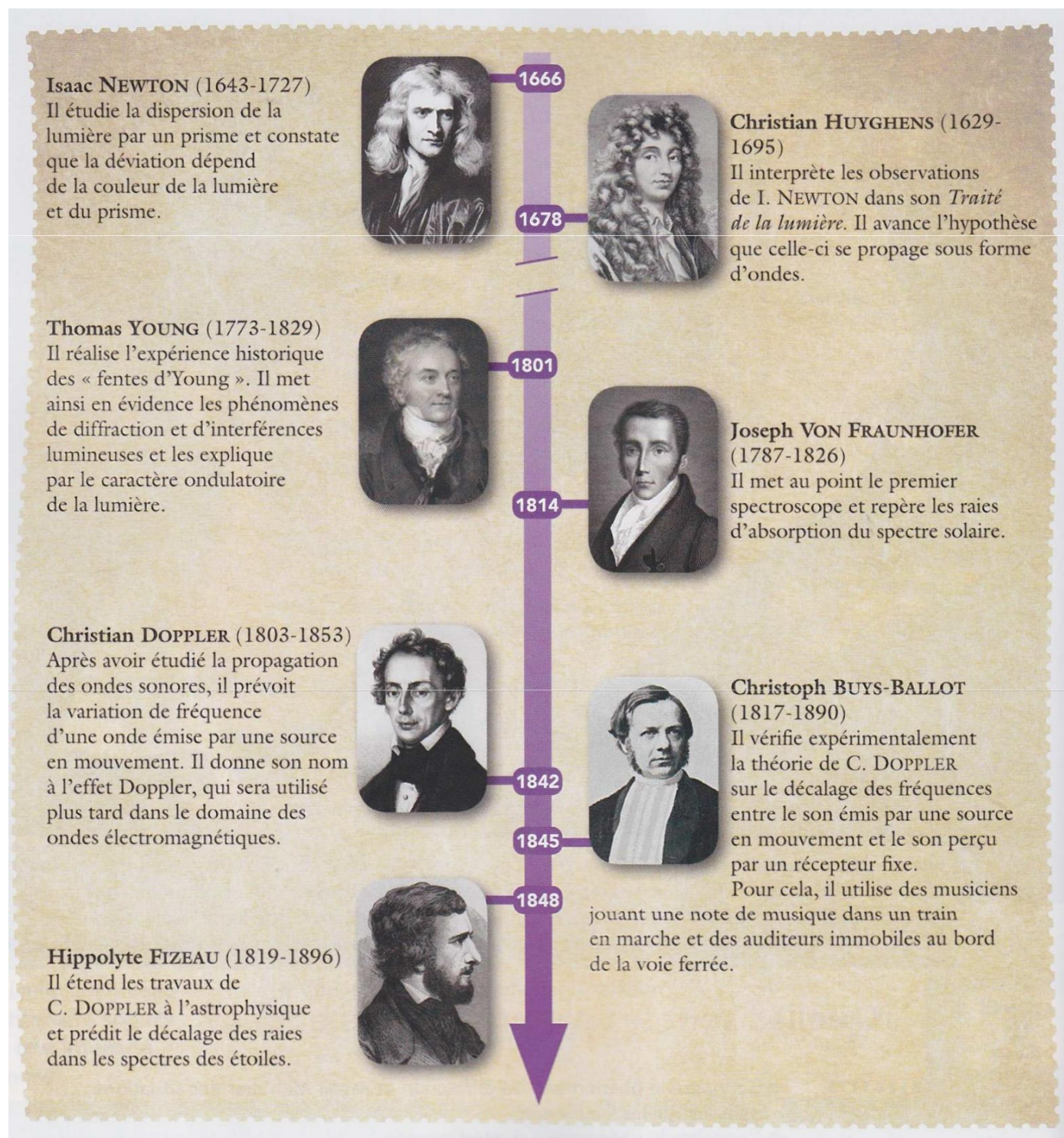


ONDES LUMINEUSES

DIFFRACTION - INTERFERENCES

1 - Bref historique



2- La lumière

La lumière présente deux aspects, à priori contradictoires:

- D'une part, elle présente un aspect ondulatoire qui permet d'interpréter certaines expériences comme la diffraction de la lumière par des obstacles ou des ouvertures.
- D'autre part elle présente un aspect corpusculaire qui permet d'interpréter d'autres expériences comme l'effet photoélectrique.

La Physique Quantique permet de concilier ces deux aspects corpusculaire et ondulatoire de la lumière.

2.1- Généralités

Une lumière monochromatique est une onde électromagnétique progressive sinusoïdale de fréquence unique. La couleur de cette lumière dépend de sa fréquence ν .

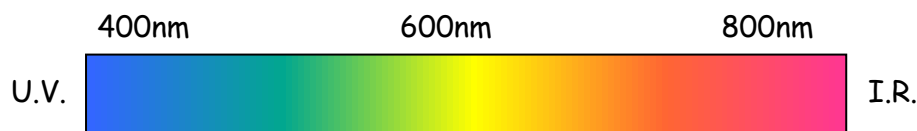
Ces ondes présentent une double périodicité temporelle T et spatiale λ .

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

λ : Longueur d'onde (m)
c : Célérité de la lumière ($m \cdot s^{-1}$)
T : Période (s)
ν : Fréquence (Hz)

On définit une lumière visible par rapport à l'œil humain. Les longueurs d'onde du domaine visible sont comprises entre **400 nm** et **800 nm**.

Les radiations ultra violettes (U.V.) ont une longueur d'onde inférieure à **400 nm** et les radiations infra rouge (I.R.) ont une longueur d'onde supérieure à **800 nm**.



Dans le vide ou dans un milieu transparent (air, eau, gaz, verre, etc...) homogène (toutes ses parties sont identiques) et isotrope (mêmes propriétés dans toutes les directions), la lumière se propage en ligne droite.

Remarque: Le principe de propagation rectiligne de la lumière, valable que si le milieu est transparent, homogène et isotrope amène à postuler l'existence de rayons lumineux.

Un rayon lumineux est modélisé par une demi-droite issue d'un point de la source et orienté dans le sens de propagation de la lumière.

Un rayon lumineux ne peut pas être isolé. Il n'a pas de réalité physique. Il modélise simplement le trajet suivi par la lumière.

2.2- Réflexion, réfraction et dispersion de la lumière

La réflexion est le changement de direction d'un rayon lumineux se propageant dans un milieu transparent lorsqu'il frappe une surface polie et est renvoyé dans ce même milieu.

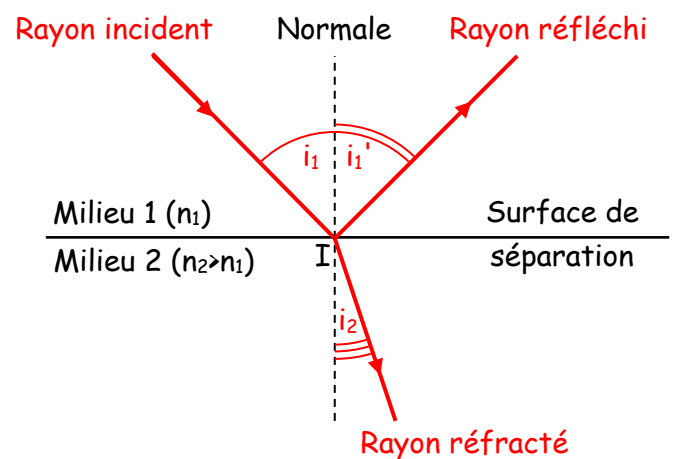
La réfraction est le changement de direction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un **milieu 1**, transparent, homogène et isotrope dans un autre **milieu 2**, transparent, également homogène et isotrope.

On considère une lumière monochromatique de fréquence f donnée.

Dans le schéma ci-contre, le **milieu 1** est de l'air d'indice de réfraction n_1 , et le **milieu 2** est du verre d'indice de réfraction $n_2 > n_1$.

Une partie de la lumière incidente est transmise de l'air dans le verre, l'autre partie est réfléchi à la surface du verre.

Le plan formé par le rayon incident et la normale à la surface de séparation est appelé plan d'incidence.



Les rayons de lumière obéissent aux lois de Descartes.

- Les rayons réfléchi et réfracté restent dans le plan d'incidence.
- Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux: $i_1 = i_1'$
- Les angles d'incidence et de réfraction vérifient la relation: $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$

On rappelle que dans le vide toutes les couleurs se propagent avec la même célérité et qu'il en est pratiquement de même dans l'air.

Lorsqu'un faisceau de lumière polychromatique (composé par exemple de lumière rouge et bleu) passe de l'air dans un verre, sous une incidence différente de zéro, il se produit une décomposition de la lumière.

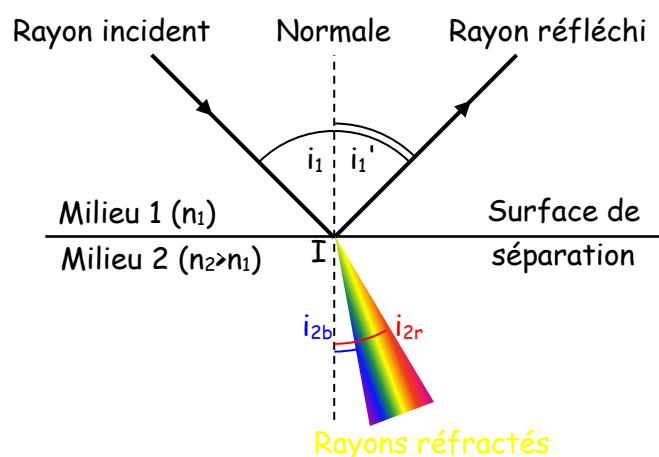
Dans le vide (et en première approximation l'air) toutes les lumières colorées se déplacent à la même vitesse ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Dans le verre, la vitesse de la lumière rouge est plus grande que la vitesse de la lumière bleue.

On dit que le verre est un milieu dispersif.

Si un faisceau de lumière blanche (constituée de toutes les lumières du spectre visible) passe de l'air dans un verre sous une incidence différente de zéro, il se produit une décomposition de la lumière. On observe un spectre continu.

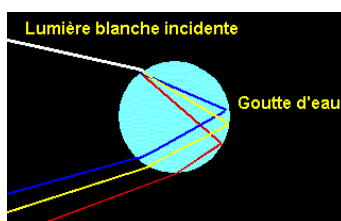
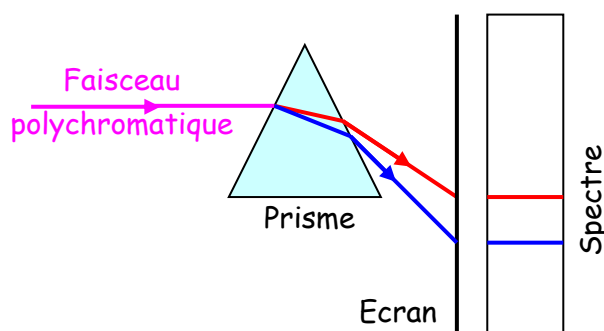
La décomposition de la lumière par un dioptre s'explique par le fait que la célérité de la lumière dans un milieu transparent donné (autre que le vide ou l'air), dépend de la couleur étudiée.



2.3- Spectres lumineux

On peut décomposer la lumière blanche artificiellement en décomposant la lumière à travers un prisme.

La lumière blanche est aussi décomposée naturellement lors de la réfraction de la lumière solaire dans les gouttes d'eau. Il se forme alors un arc en ciel.

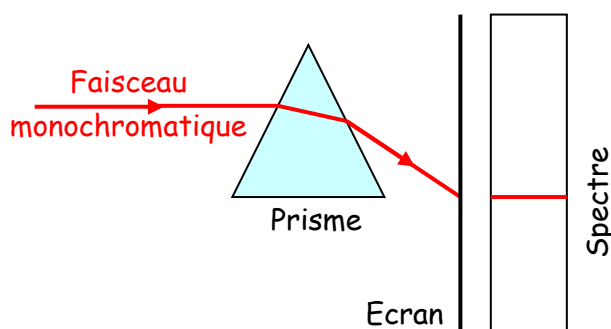


Pour étudier la composition d'une lumière, on la décompose grâce à un milieu dispersif (prisme ou réseau).

On obtient ainsi un spectre qui renseigne sur la nature de la lumière.

Une source laser émet dans la plupart des cas de la lumière monochromatique.

Sur l'écran, on observe une seule raie, ce qui confirme que la radiation est monochromatique.

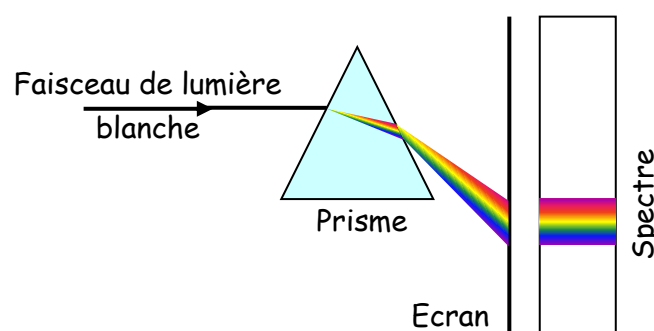


Le spectre d'une lumière monochromatique est composé d'une seule raie.

Une lumière polychromatique est composée de plusieurs ondes monochromatiques.

Sur l'écran, on observe plusieurs raies, ce qui confirme que la radiation est polychromatique.

Le spectre d'une lumière polychromatique est composé de plusieurs raies.



La lumière blanche émise par le soleil est une lumière polychromatique.

Le spectre de la lumière blanche est continu.

C'est celui de la lumière visible.

Remarque : Lors de la réfraction d'une lumière polychromatique par un prisme, les radiations de faibles longueurs d'onde comme le bleu sont plus déviées alors que celles de grandes longueurs d'onde comme le rouge sont moins déviées.

Un corps rayonnant, solide ou liquide, émet de la lumière sur toutes les longueurs d'ondes. Il présentera un spectre continu d'émission.



Un gaz lumineux, incandescent, émet de la lumière sous forme de raies brillantes appelées spectre de raies d'émission ou spectre discontinu auquel se superpose quelquefois un spectre continu.

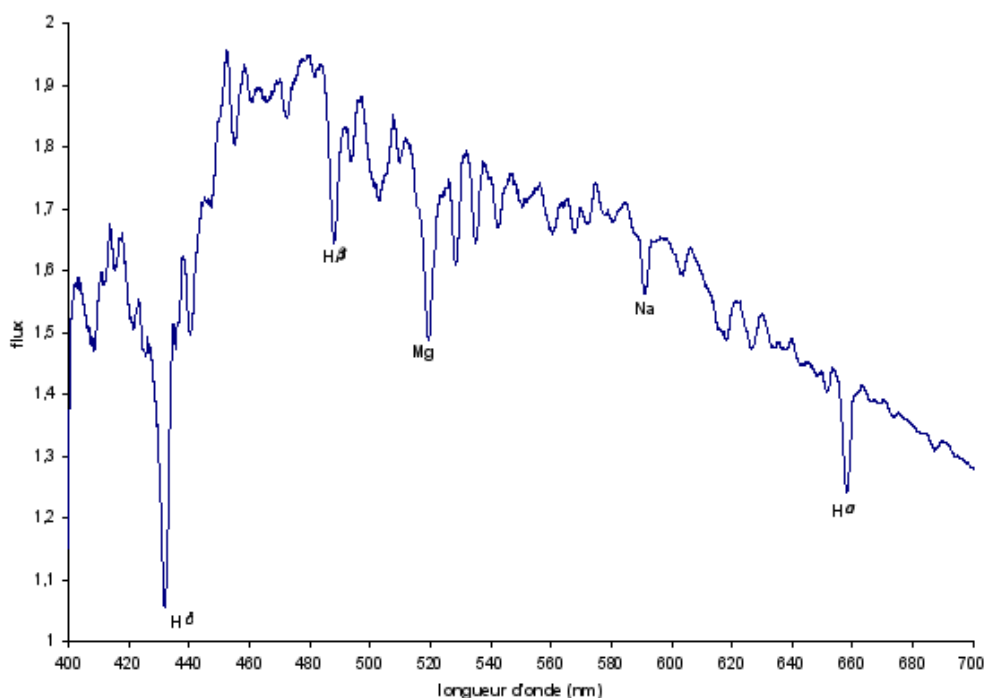


Si la lumière blanche d'une source lumineuse traverse un gaz, celui-ci peut éteindre certaines longueurs d'ondes du spectre continu et les remplacer par des raies sombres qui se superposent au spectre continu de la source lumineuse, c'est le spectre de raies d'absorption.



L'importance de ces lois vient du fait que nous pouvons dès lors conclure qu'à chaque corps correspond un spectre caractéristique et que chaque atome ou molécule peut absorber ou émettre certaines longueurs d'ondes qui le caractérisent.

L'étude du spectre d'une étoile permet d'en connaître sa composition.



2.4- Propagation d'une onde lumineuse dans un milieu transparent

L'indice de réfraction n d'un milieu transparent est le rapport entre la célérité d'une onde se propageant dans le vide et sa célérité dans le milieu considéré.

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

n : Indice de réfraction du milieu transparent (sans unité)
 c : Célérité de l'onde dans le vide ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)
 v : Célérité de l'onde dans le milieu transparent (m.s^{-1})

Le milieu est dit dispersif si la célérité d'une onde lumineuse monochromatique qui se propage dans ce milieu dépend de sa fréquence (donc de sa longueur d'onde dans le vide).

La célérité v d'une onde dépend du milieu de propagation. Elle est toujours inférieure à celle de cette onde dans le vide ($v < c$).

L'indice de réfraction d'un milieu dispersif dépend donc de la fréquence de l'onde qui s'y propage.

L'indice n d'un milieu transparent est toujours supérieur à 1 ($n > 1$).

Remarque: La fréquence ν d'une onde ne dépend que de la fréquence de la source. Elle ne dépend pas de la fréquence de l'onde.

La célérité de la lumière dans le vide ($c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$) ne dépend pas de la fréquence de l'onde.

La célérité v_{air} de la lumière dans l'air est, en première approximation, pratiquement égale à sa célérité c dans le vide ($v_{\text{air}} \approx c$).

3- La diffraction de la lumière

Les ondes mécaniques sont diffractées lorsqu'elles rencontrent un obstacle ou une ouverture de dimension voisine de leur longueur d'onde.

3.1- Ouverture circulaire

On dispose d'un laser émettant de la lumière de longueur d'onde de $\lambda_R = 632,8 \text{ nm}$ (laser rouge).

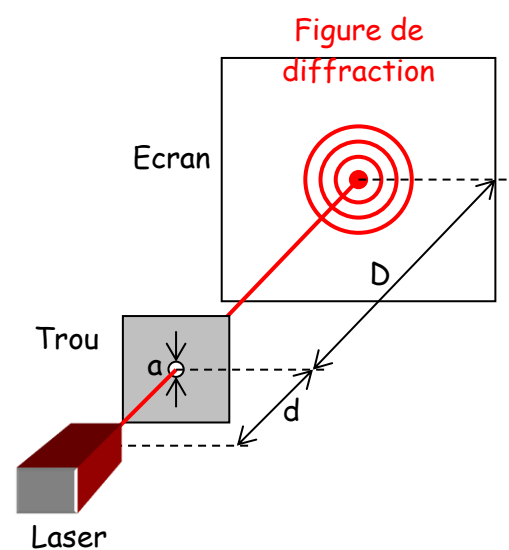
On dirige le faisceau du laser vers un objet, percé d'un petit trou de diamètre a , placé à une distance d .

On observe sur l'écran, placé à une distance D du trou, une figure de diffraction.

Ce phénomène se produit lorsque la lumière passe par une ouverture de petite taille.

La lumière du laser a été diffractée.

On constate que la largeur des taches de diffraction augmente lorsque le diamètre du trou diminue.



3.2- Ouverture en forme de fente

On dispose d'un laser émettant de la lumière de longueur d'onde de $\lambda_R = 632,8 \text{ nm}$ (laser rouge).

On dirige le faisceau du laser vers un objet, percé d'une fente de largeur a , placé à une distance d .

On observe sur l'écran, placé à une distance D de la fente, une figure de diffraction.

La lumière du laser a été diffractée.

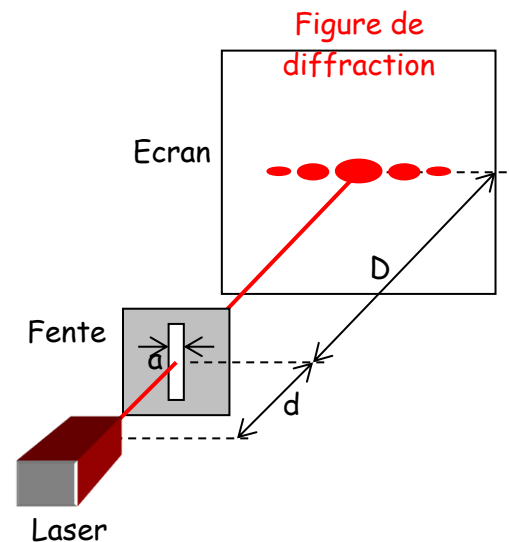
La figure de diffraction est constituée d'une tache centrale double des taches voisines.

Ces taches sont alignées selon une direction perpendiculaire à la fente.

On constate que plus la largeur des taches de diffraction augmente lorsque la largeur de la fente diminue.

Remarque: La tache centrale est nettement plus large et plus lumineuse que les traces latérales.

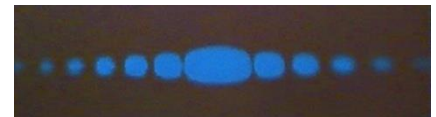
On constate que la largeur des taches de diffraction augmente avec la longueur d'onde.



Laser rouge
 $\lambda = 632 \text{ nm}$
Fente de largeur a



Laser rouge
 $\lambda = 632 \text{ nm}$
Fente de largeur $a' < a$

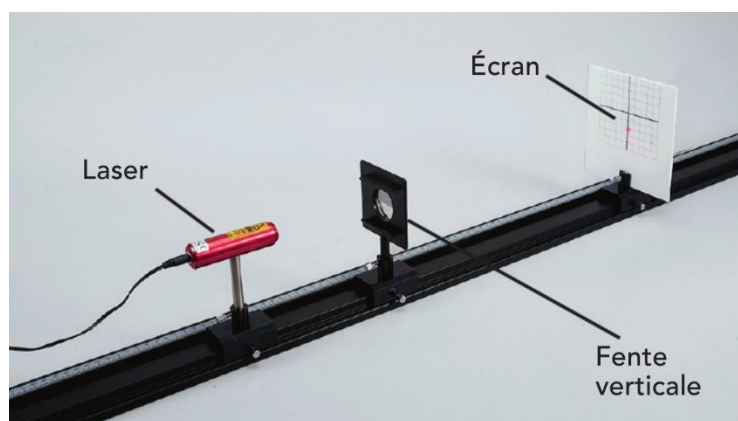


Laser bleu
 $\lambda = 532 \text{ nm}$
Fente de largeur a'

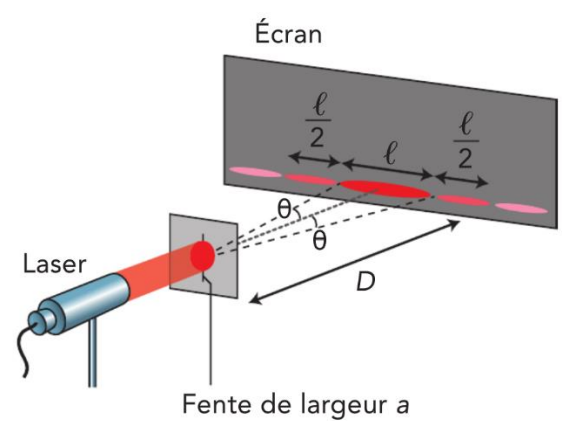
Quand la dimension de l'objet diffractant diminue, ou que la longueur d'onde de la lumière monochromatique incidente augmente, les effets du phénomène de diffraction augmentent.

3.3- Etude détaillée de la diffraction par une fente

On dirige le faisceau d'un laser, émettant de la lumière de longueur d'onde λ , vers un objet, percé d'une fente de largeur a , placé à une distance d . On dispose un écran à la distance D de la fente.



Montage expérimental

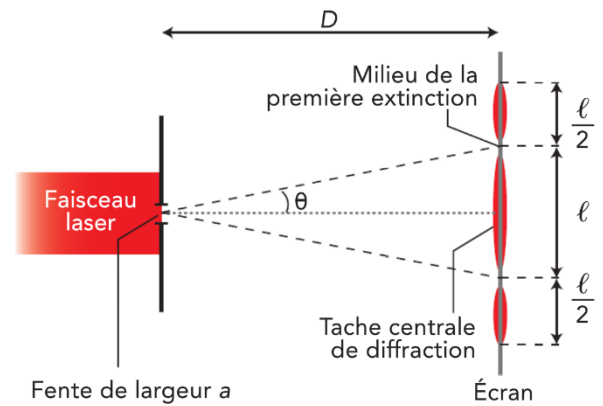


Observation de la diffraction

La distance D entre l'objet diffractant et l'écran est très grande par rapport à la dimension a de l'objet diffractant ($D \gg a$).

La figure de diffraction observée sur l'écran est constituée d'une tache centrale, de largeur ℓ .

Les taches sont alignées selon une direction perpendiculaire à la fente.



L'écart angulaire θ sous lequel est observée la moitié de la tache centrale depuis l'objet diffractant est donné par la relation:

$$\theta = \frac{\lambda}{a} \quad \begin{array}{l} \theta: \text{Ecart angulaire (rad)} \\ \lambda: \text{Longueur d'onde (m)} \\ a: \text{Dimension de l'objet diffractant (m)} \end{array}$$

D'après le schéma on a:

$$\tan \theta = \frac{\ell/2}{D}$$

Si l'angle θ est petit alors on a $\tan \theta \approx \theta$ et donc:

$$\theta = \frac{\ell}{2D}$$

On en déduit la relation donnant la largeur ℓ de la tache centrale de diffraction en fonction de la longueur d'onde λ , de la distance D et de la dimension a de l'objet diffractant:

$$\ell = \frac{2 \cdot \lambda \cdot D}{a}$$

Remarque: Dans cette relation toutes les distances sont en mètres.

3.4- Condition d'observation du phénomène de diffraction

Le phénomène de diffraction dépend du rapport entre la longueur d'onde λ de la lumière incidente et la dimension a de l'objet diffractant (fente, trou, fil, cheveu, etc.).

Pour une onde monochromatique dans le domaine du visible et une fente de largeur de l'ordre du centimètre on observe sur l'écran un point lumineux où se concentre toute la lumière. Dans ce cas la fente n'a pas d'effet perturbateur visible.

Si on utilise des fentes de largeurs décroissantes, les taches de diffraction apparaissent progressivement sur l'écran, et croissent à mesure que la largeur de la fente se rapproche de la longueur d'onde de la lumière incidente.

Plus la dimension a de l'objet diffractant se rapproche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ de la lumière incidente, plus la diffraction est importante.

3.5- Diffraction de la lumière blanche

Si on envoie un faisceau de lumière blanche sur une fente fine et longue, on observe sur l'écran des taches irisées. Chaque radiation de longueur d'onde λ donne sa propre figure de diffraction. La tache centrale est blanche mais bordée de rouge. En effet, au centre, toutes les radiations sont présentes mais la tâche rouge est plus large que les autres. Les taches latérales sont également irisées.

Lorsqu'on observe la lumière du soleil à travers un voilage de tergal, on obtient aussi une diffraction, avec des taches irisées bordées de rouge d'un côté et de violet de l'autre, formant une croix.

4- Les interférences

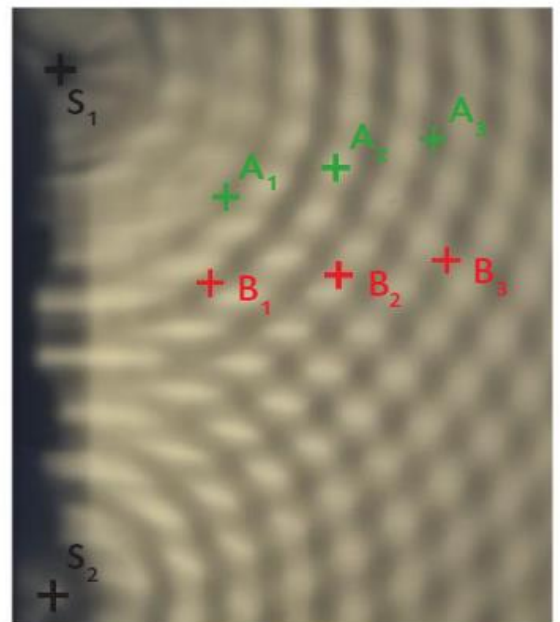
4.1- Conditions d'observation

Deux vibreurs, jouant le rôle de sources ponctuelles, oscillent au-dessus de la surface de l'eau d'une cuve à ondes, de manière synchrone, avec la même fréquence f et un déphasage (différence de phase) constant.

Il en résulte la propagation de deux ondes progressives circulaires qui se superposent pour donner une figure d'interférences.

On observe des zones fortement agitées (points A_1 , A_2 et A_3) et d'autres zones peu agitées (points B_1 , B_2 et B_3).

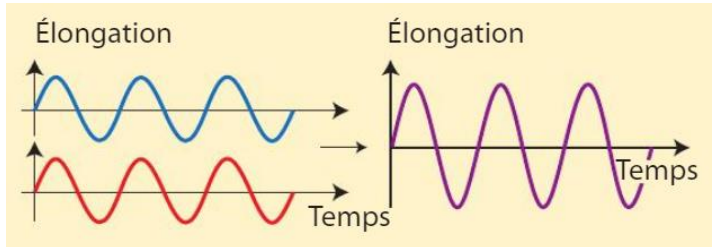
C'est le phénomène d'interférences.



Des interférences s'obtiennent avec des ondes même fréquence et présentant un déphasage constant. Les sources qui émettent ces ondes sont des sources ponctuelles en phase.

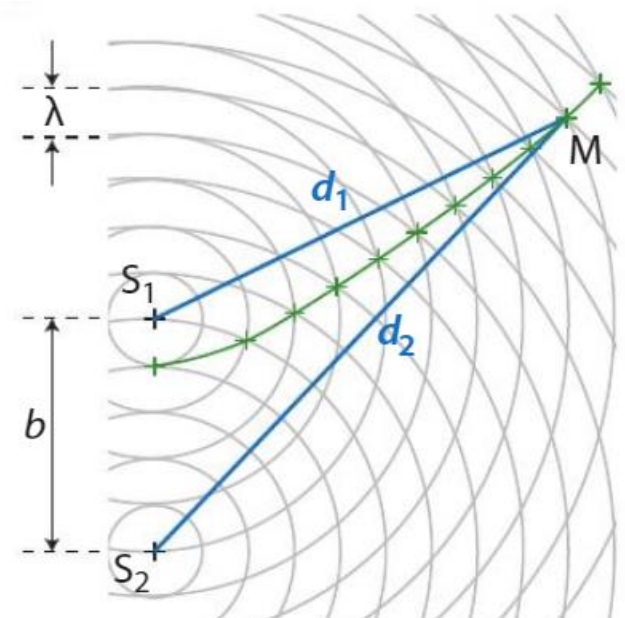
4.2- Interférences constructives et destructives

A la surface de l'eau, les interférences constructives correspondent à la superposition de deux ondes en phase, c'est-à-dire d'élongations toutes deux maximales ou toutes deux minimales.



Il y a interférences constructives quand deux ondes de longueur d'onde λ , se déplaçant dans un milieu homogène et provenant de deux sources ponctuelles en phase, arrivent en phase en un point.

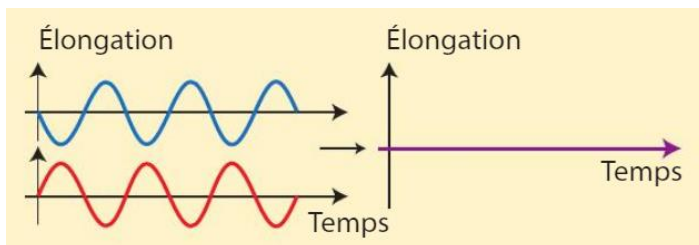
L'amplitude de l'onde résultante est alors supérieure à celle des ondes de départ.



En un point M où les interférences sont constructives parviennent des ondes qui ont parcouru les distances $d_1 = S_1M$ et $d_2 = S_2M$ de sorte que: $d_2 - d_1 = k.\lambda$, avec k entier relatif.

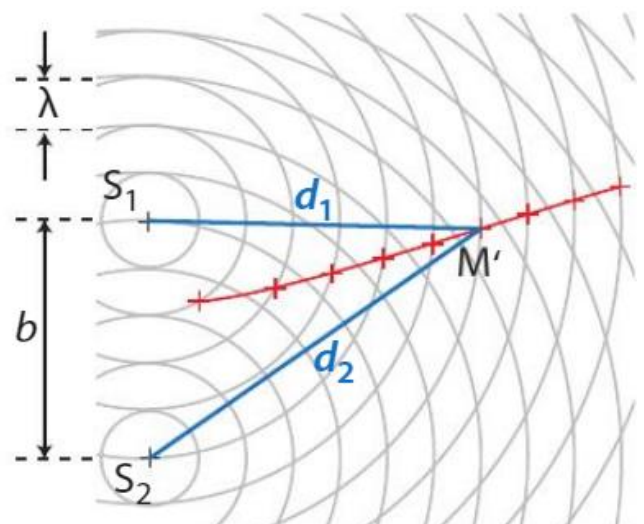
C'est la condition d'interférences constructives.

A la surface de l'eau, les interférences destructives correspondent à la superposition de deux ondes en opposition de phase, c'est-à-dire l'une d'élongation maximale et l'autre d'élongation minimale.



Il y a interférences destructives quand deux ondes de longueur d'onde λ , se déplaçant dans un milieu homogène et provenant de deux sources ponctuelles en phase, arrivent en opposition de phase en un point.

L'amplitude de l'onde résultante est alors nulle.



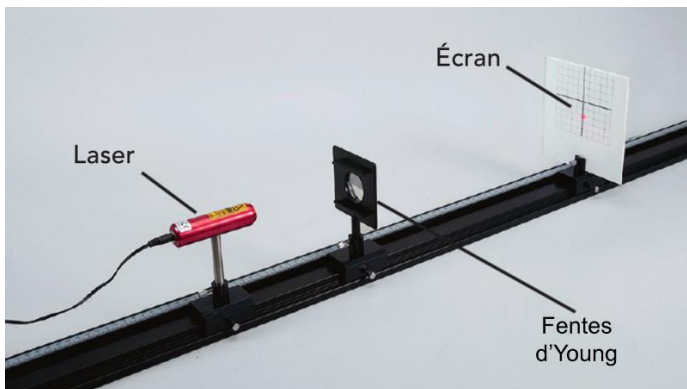
En un point M' où les interférences sont destructives parviennent des ondes qui ont parcouru les distances $d_1 = S_1M'$ et $d_2 = S_2M'$ de sorte que: $d_1 - d_2 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$, avec k entier relatif.

C'est la condition d'interférences destructives.

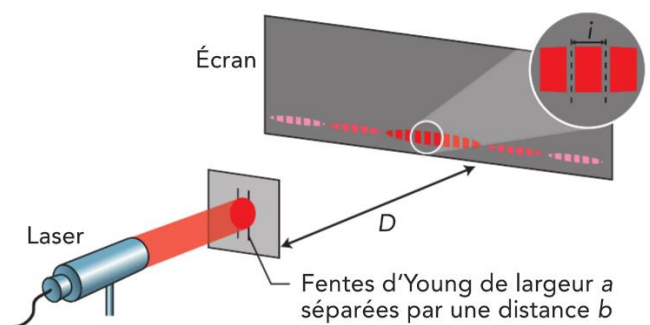
Remarque: En d'autres points où les interférences ne sont ni constructives ni destructives, on observe des ondes d'amplitude intermédiaire.

5- Les interférences lumineuses

On dirige le faisceau d'un laser, émettant de la lumière de longueur d'onde λ , vers un objet, percé de deux fentes séparées d'une distance b , placé à une distance d . On dispose un écran à la distance D de la fente.



Montage expérimental



Observation des interférences

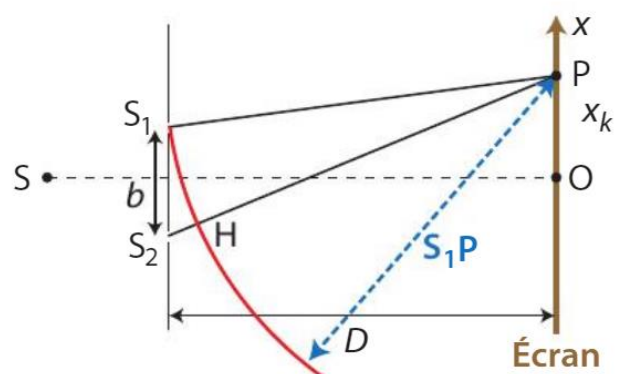
Pour observer une figure d'interférences stable avec de la lumière, il faut éclairer deux fentes (fentes d'Young) avec une unique source lumineuse monochromatique.

Ces fentes, dites sources secondaires, émettent alors des ondes de même fréquence et de déphasage constant. Ils jouent le rôle de sources ponctuelles en phase.

5.1- Différence de chemin optique

Deux ondes lumineuses de longueur d'onde dans le vide λ_0 émises par les sources secondaires S_1 et S_2 se superposent en un point P de l'écran après avoir parcouru les distances S_1P et S_2P .

Les ondes arrivant en P après passage par S_2 ont parcouru une plus grande distance que celles arrivant en P après passage par S_1 .



Si n est l'indice du milieu de propagation, la différence de distances, appelé aussi différence de chemin optique ou différence de marche δ est:

$$\delta = n.S_2H = n.(S_2P - S_1P)$$

Si la différence de chemin optique δ est telle que $\delta = k.\lambda_0$ où k est un entier relatif, les ondes arrivent en phase en P. Les interférences sont constructives. on observe alors des franges brillantes.

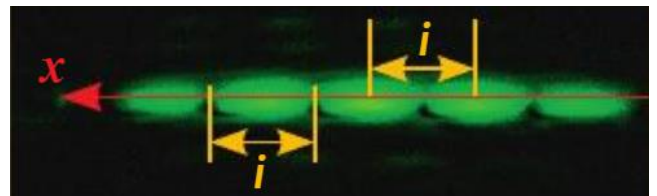
Si la différence de chemin optique δ est telle que $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right).\lambda_0$ où k est un entier relatif, les ondes arrivent en opposition de phase en P. Les interférences sont destructives. On observe alors des franges sombres.

Remarque: L'indice de l'air étant très proche de $n = 1,0$ la longueur d'onde dans l'air est telle que $\lambda = \lambda_0$, donc:

$$\delta = S_2H = S_2P - S_1P$$

5.2- Interfrange

L'interfrange i est la distance $x_{k+1} - x_k$ séparant les centres de deux franges brillantes ou sombres consécutives.

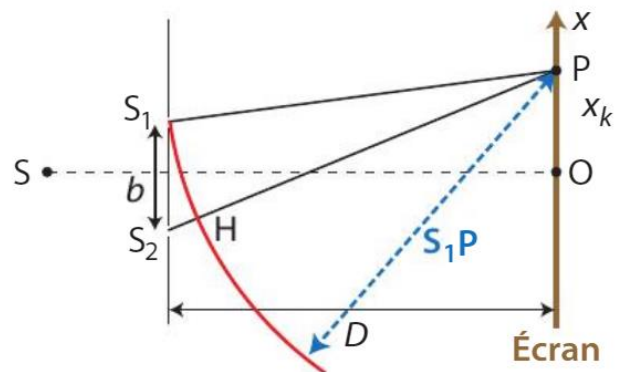


La différence de chemin optique δ_k en P d'abscisse x_k a pour expression:

$$\delta_k = \frac{n.x_k.b}{D}$$

Avec:

- δ_k : Différence de chemin optique (m)
- n : Indice du milieu (sans unité)
- x_k : Abscisse de point P (m)
- b : Distance séparant les sources S_1 et S_2 (m)
- D : Distance entre les sources S_1 et S_2 et l'écran (m)



L'interfrange $i = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda_0.D}{n.b}$ est déterminé en combinant la condition d'interférences constructives ou celle d'interférences destructives avec l'expression fournie de la différence de chemin optique.

Considérons le cas de deux franges brillantes consécutives, c'est à dire des interférences constructives. Nous aurons:

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \cdot D}{n \cdot b} - \frac{\Delta L_k \cdot D}{n \cdot b}$$

Soit:

$$i = \frac{(k+1) \cdot \lambda_0 \cdot D}{n \cdot b} - \frac{k \cdot \lambda_0 \cdot D}{n \cdot b}$$

D'où l'expression de l'interfrange:

$$i = \frac{\lambda_0 \cdot D}{n \cdot b}$$

Considérons le cas de deux franges sombres consécutives, c'est à dire des interférences destructrices. Nous aurons:

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \cdot D}{n \cdot b} - \frac{\Delta L_k \cdot D}{n \cdot b}$$

Soit:

$$i = \frac{(k+1+\frac{1}{2}) \cdot \lambda_0 \cdot D}{n \cdot b} - \frac{(k+\frac{1}{2}) \cdot \lambda_0 \cdot D}{n \cdot b}$$

D'où l'expression de l'interfrange:

$$i = \frac{\lambda_0 \cdot D}{n \cdot b}$$

La valeur de l'interfrange est toujours la même que soit le type de franges, c'est à dire que ce soient des interférences constructives ou destructrices.