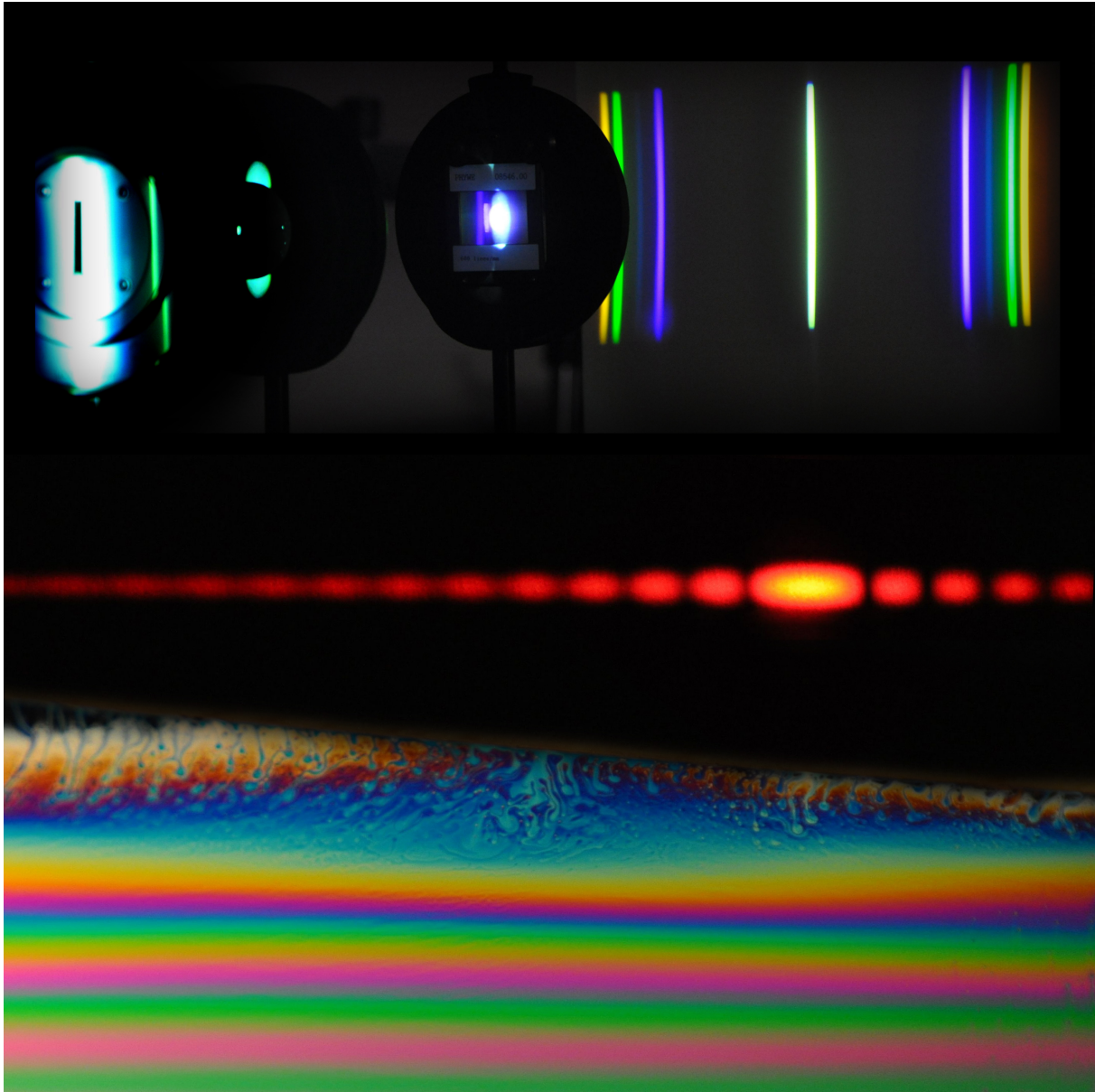


# OPTIQUE ONDULATOIRE



# OPTIQUE ONDULATOIRE

## Table de matière

➤ Introduction: déficience de l'optique géométrique	W2
➤ Qu'est-ce que la lumière ?	W2
➤ Le principe de Huygens	W3
➤ Interférence de la lumière	W4
➤ Diffraction et interférence par une fente simple	W7
➤ L'expérience de Young : diffraction par une fente double	W10
➤ Diffraction et interférence par un réseau optique	W13
➤ Interférence par les couches minces	W15
➤ Interférence par une couche en forme de coin	W19
➤ Anneaux de Newton	W23
➤ Formulaire	W26
➤ Exercices	W27

## Optique ondulatoire

### Introduction :

### Déficience de l'optique géométrique

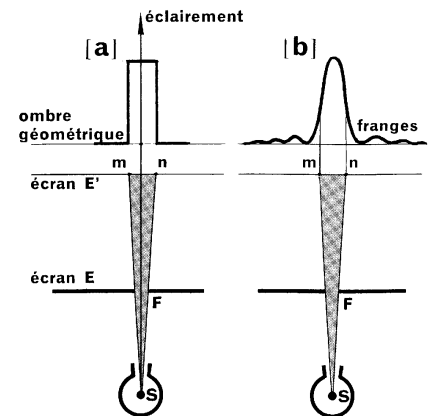
L'optique géométrique proclame « la propagation rectiligne de la lumière ». Or, ceci n'est qu'une bonne *approximation* comme l'expérience suivante va le montrer :

Une source lumineuse ponctuelle éclaire un écran opaque muni d'une fente. Un deuxième écran montre le motif formé par la lumière transmise. Si la fente est large, les prévisions de l'optique géométrique correspondent aux observations : on reconnaît une image nette de la fente éclairée.

Si la largeur de la fente est réduite (fig. 1), on observe que l'image de la fente s'estompe progressivement ; un système de franges claires et sombres se forme aux bords de « l'image » : on observe donc de la **lumière dans l'ombre géométrique** de l'écran !

Ces franges claires et sombres ne peuvent pas être expliquées par l'optique géométrique.

L'optique géométrique est alors considérée comme un cas limite d'une théorie plus générale de la lumière. L'apparence des franges claires et sombres fait avancer l'hypothèse d'un phénomène d'interférence (cf. exemples en mécanique : superposition d'ondes mécaniques). Selon cette idée, la lumière serait une onde.



1. a) Observations selon l'optique géométrique

b) Fente mince : franges claires dans l'ombre géométrique

## Qu'est-ce que la lumière ?

Isaac Newton proposa vers 1600 une théorie corpusculaire de la lumière. D'après sa théorie, une source lumineuse émet une quantité considérable de particules lumineuses minuscules qui se déplacent à vitesse constante et en ligne droite à travers l'espace. Ces particules devraient causer une sensation de clarté lors de leur impact sur la rétine de l'œil.

Bien que cette théorie parût expliquer des phénomènes aussi divers que la réflexion, la réfraction et la réflexion totale, elle ne sut pas expliquer pourquoi même des faisceaux lumineux très intenses peuvent s'interpénétrer sans s'influencer mutuellement ou pourquoi une partie d'un faisceau lumineux est renvoyée par la surface d'un objet tandis que l'autre partie est absorbée.

Ces phénomènes-ci conduisirent le physicien néerlandais Christian Huygens à proposer une théorie ondulatoire de la lumière. Il présenta sa théorie à l'Académie des Sciences à Paris en 1678 et la publia douze ans plus tard dans le fameux „*Traité de la Lumière*“. Si la théorie ondulatoire s'avérait, alors la lumière pourrait contourner, comme le son, des obstacles. Comme les preuves expérimentales étaient peu convaincantes du temps de Huygens, sa théorie fut presque oubliée.

L'Anglais Thomas Young observa 1801 des interférences entre deux faisceaux lumineux et réussit à les expliquer. La base d'une nouvelle théorie ondulatoire était née. Léon Foucault mesura pour la première fois la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau et dans le sulfure de carbone. Il trouva des valeurs inférieures à la célérité dans le vide. La théorie de Newton contredit ces résultats et fut abolie.

La célérité de la lumière est plus petite dans un milieu matériel (substance) que dans le vide.

La célérité dans un milieu donné dépend de la couleur spectrale. Ce phénomène est appelé **dispersion**. La lumière rouge se propage plus vite que la lumière violette.

## Principe de Huygens

Selon Huygens tout l'espace, même le vide et l'intérieur des objets, est rempli d'un fluide particulier, le fameux *éther*. Chaque point éclairé est source d'une onde. Ces ondes se propagent et se superposent.

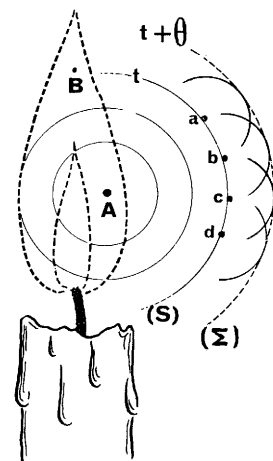
Les points atteints au même instant par une onde forment le *front d'onde*. Puisque les points du front d'onde effectuent la même oscillation que la source de l'onde, Huygens les considère comme des sources de nouvelles ondes appelées **ondes élémentaires**. La superposition des ondes élémentaires donne finalement l'onde observée.

Tout point d'un front d'onde est source d'une onde élémentaire. Les ondes élémentaires se propagent dans toutes les directions et forment par superposition de nouveaux fronts d'onde.

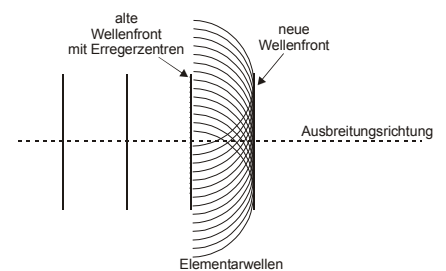
Éclairons le principe de Huygens à l'aide d'un exemple :

Chaque point (p. ex. d'une flamme de bougie) émet une onde sphérique. Le point A dans la fig. 1 est source d'une onde sphérique. Le front d'onde rencontre à l'instant  $t$  les points  $a, b, c, d$  sur le cercle (S). Selon le principe de Huygens, ces points sont à nouveau des sources de nouvelles ondes sphériques, des ondes élémentaires. À l'instant  $t + \theta$ , toutes les ondes élémentaires atteignent la surface ( $\Sigma$ ): ( $\Sigma$ ) représente le front d'onde résultant de la superposition des ondes élémentaires.

Le principe de Huygens permet de prédire correctement le comportement des ondes sphériques et des ondes planes (fig. 1 et 2).



1. Ondes sphériques émanant d'une flamme de bougie



2. Fronts d'ondes planes

La figure 1 montre l'application du principe de Huygens sur des ondes d'eau lors de leur passage à travers une ou plusieurs fentes.

## Interférence de la lumière

Conformément à l'interférence des ondes mécaniques (cf. 12GE), on observe une ...

- ... interférence **constructive** si la différence de marche  $\Delta s$  est un multiple pair d'une demi-longueur d'onde :

$$\Delta s = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda \quad \text{avec } k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

- ... interférence **destructive** si la différence de marche  $\Delta s$  est un multiple impair d'une demi-longueur d'onde :

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{avec } k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

En général, nous avons constaté que les phénomènes d'interférence apparaissent seulement si les deux ondes ...

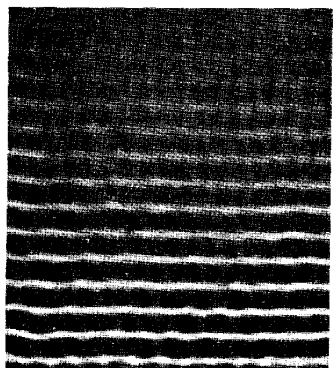
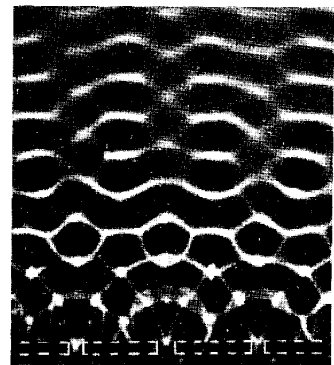
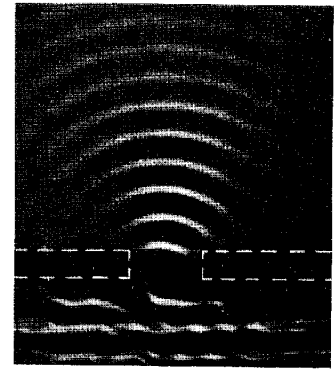
- ont la même fréquence,
- proviennent du même point de la source lumineuse,
- présentent une différence de phase constante, c'est-à-dire qu'elles ont parcouru des distances qui diffèrent tout au plus d'une longueur de cohérence.

## Diffraction

La figure 1 de la page suivante montre un exemple de diffraction : la diffraction d'une onde d'eau plane lors du passage à travers une fente. Si la fente est large (fig. 1a) alors les ondes d'eau traversent la fente sans être perturbées. La largeur de l'onde derrière la fente est approximativement égale à la largeur de la fente. L'obstacle produit une ombre nette. Seulement au bord de la fente on reconnaît des fronts d'onde courbés. On a l'impression que les bords de la fente émettent des ondes sphériques.

Si la fente est plus étroite (fig. 1b), ce phénomène apparaît plus clairement. Finalement, si l'ouverture est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde (fig. 1c), une onde sphérique se propage derrière la fente. On n'aperçoit plus d'ombre.

La **transgression de l'onde** dans l'ombre géométrique est appelée **diffraction**. On observe des phénomènes de diffraction si l'ouverture est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.



1. Ondes d'eau lors du passage à travers une respectivement plusieurs fentes

**Conditions de cohérence :**

Nous connaissons depuis longtemps l'interférence résultant de la superposition d'ondes mécaniques. Une différence majeure par rapport aux ondes lumineuses a conduit à ce que les interférences lumineuses ne fussent pas observées pendant un certain temps. Leur mise en évidence expérimentale est délicate.

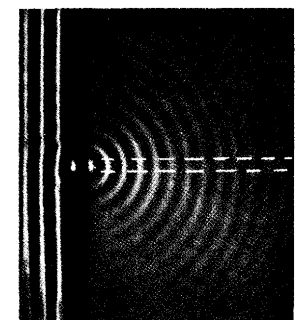
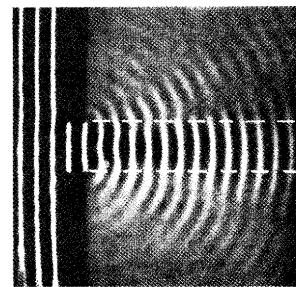
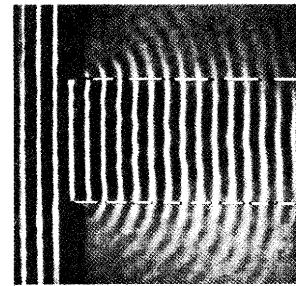
Comme nous l'avons vu, la lumière possède des propriétés ondulatoires. D'autre part, nous savons que des faisceaux lumineux doivent se superposer partout. Pourquoi n'observe-t-on pas toujours des phénomènes d'interférence ?

Pour que deux ondes puissent interférer, elles doivent être cohérentes, c'est-à-dire elles doivent présenter une différence de phase constante.

Dans une source lumineuse (p. ex. le soleil ou une lampe à incandescence) un grand nombre d'atomes sont excités chaque instant de façon que chaque atome émette pendant un bref instant (ca.  $10^{-8}$  s) une courte onde de fréquence définie. Ainsi, tout le rayonnement émis par la source lumineuse est constitué de courtes ondes de différentes longueurs d'onde et de différentes phases. La lumière émise par une telle source lumineuse n'est donc pas cohérente : on n'observera pas d'interférence.

Pour observer des phénomènes d'interférence, il faut que la longueur des ondes superposées soit supérieure à leur différence de marche. Si les ondes sont plus courtes, elles n'atteignent pas le même point au même instant et ne peuvent pas interférer.

Des interférences entre deux faisceaux lumineux apparaissent seulement si les ondes superposées proviennent de la même source lumineuse et si elles présentent une différence de phase constante pendant un certain temps.



1. Diffraction d'une onde d'eau par ...
- ... une fente large
  - ... une fente étroite
  - ... une fente de la taille d'une longueur d'onde

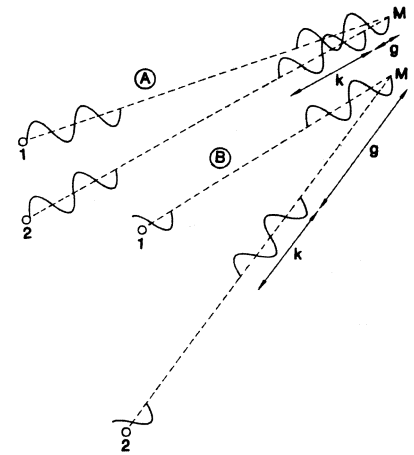
Si l'on veut observer des interférences, on doit diviser la lumière venant d'une source relativement petite en deux faisceaux prenant deux trajets différents. Si ensuite ces faisceaux sont recombinaés, des ondes provenant des mêmes atomes peuvent interférer deux par deux si la différence de marche n'excède pas la longueur moyenne des ondes émises par un atome. Cette longueur est appelée *longueur de cohérence*.

Figure 1 :

(A) Longueur de cohérence  $k >$  différence de marche  $g$  :  
Interférence possible.

(B) Longueur de cohérence  $k <$  différence de marche  $g$  :  
Interférence impossible.

La lumière monochromatique d'un laser présente une longueur de cohérence de plusieurs kilomètres. La lumière provenant d'une source lumineuse thermique a une longueur de cohérence de quelques mètres. Si la lumière de différentes couleurs est superposée la longueur de cohérence vaut seulement  $10^{-4}$  m.



1. Condition d'interférence :  
longueur de cohérence

### Chemin optique :

Si la lumière se propage dans un seul milieu, l'indice de réfraction  $n$  ne joue pas de rôle. Il n'influence pas la différence de marche.

Si la lumière traverse un milieu d'un indice de réfraction  $n$ , la vitesse de propagation dans ce milieu est inférieure à la célérité dans le vide :  $c < c_0$ .

Pour parcourir une distance  $d$  dans ce milieu, la lumière met le temps

$$t = \frac{d}{c}$$

Dans le vide, la lumière parcourt pendant le même temps une distance  $d'$  plus longue :

$$d' = c_0 \cdot t = c_0 \cdot \frac{d}{c} = n \cdot d$$

avec l'indice de réfraction  $n = \frac{c_0}{c}$ .

On appelle  $d'$  le **chemin optique**. Le chemin optique est le produit de l'indice de réfraction  $n$  et le chemin géométrique  $d$  dans ce milieu.

La notion de chemin optique est importante, car dans un milieu d'indice de réfraction  $n$ , la lumière est retardée ce qui influence la superposition de faisceaux lumineux traversant deux milieux différents.

## Diffraction et interférence par une fente simple

Si un faisceau lumineux mince (p. ex. un faisceau laser) tombe sur une fente étroite, tous les points situés entre les bords de la fente sont considérés comme des sources d'ondes sphériques selon le principe de Huygens (fig. 1). Ces ondes élémentaires remplissent l'espace derrière la fente : on y observe des interférences.

L'angle entre la direction de propagation initiale et la nouvelle direction de propagation est appelé **angle de diffraction**  $\alpha$  (fig. 2).

La différence de marche entre les deux ondes élémentaires émanant des extrémités de la fente vaut :

$$\Delta s = \ell \cdot \sin \alpha$$

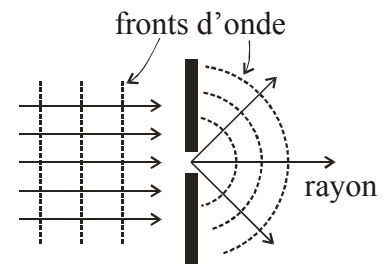
où  $\ell$  représente la largeur de la fente.

Nous considérons maintenant les interférences derrière la fente simple. Une réflexion simple permet même des prédictions sur la clarté relative des franges observées.

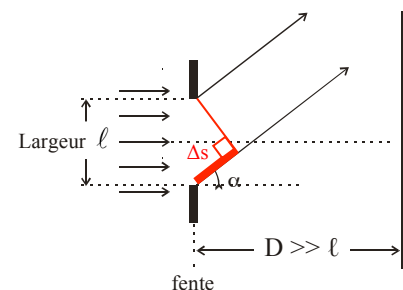
Nous augmentons graduellement l'angle de diffraction à partir de  $0^\circ$ .

- $\alpha = 0^\circ$  : (fig. 3)  
Il n'y a pas de différence de marche entre les ondes élémentaires : on observe une interférence constructive sur l'écran ce qui correspond à la frange claire centrale (maximum d'intensité de l'ordre 0)!
- Si l'angle de diffraction augmente, la différence de marche  $\Delta s$  entre les ondes élémentaires limites atteint une demi-longueur d'onde. Ces ondes interfèrent alors de façon destructive (extinction). Les ondes intermédiaires se détruisent seulement en partie, car leur différence de marche est inférieure à une demi-longueur d'onde :  $\Delta s < \lambda/2$ . Il s'ensuit que l'intensité de la frange claire centrale diminue vers les bords.
- Pour un angle de diffraction plus grand (fig. 4), la différence de marche entre les deux ondes limites est égale à une longueur d'onde complète. Étant donné que  $D \gg \ell$ , tous les rayons peuvent être considérés comme étant parallèles. Si le faisceau est divisé en deux faisceaux parallèles (1) et (2), alors tout rayon du premier faisceau peut être associé à un rayon dans le deuxième faisceau tel que leur différence de marche corresponde à une demi-longueur d'onde. Toutes les ondes élémentaires se détruisent donc par paires. On observe alors sur l'écran une frange sombre (interférence destructive) pour le cas  $\Delta s = \lambda$ .

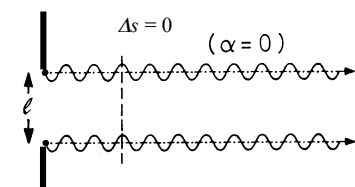
$$\text{Interférence destructive : } \Delta s = \ell \cdot \lambda$$



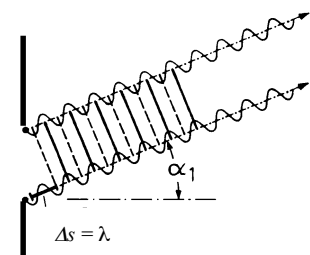
1. Principe de Huygens



2. Fente simple



3. Fente simple avec  $\alpha = 0^\circ$



4. Fente simple : interférence destructive



- En augmentant toujours l'angle de diffraction  $\alpha$ , on observe que  $\Delta s = 3\lambda/2$  (fig. 1). À l'instar des réflexions précédentes, le faisceau est subdivisé en trois faisceaux partiels. Les ondes appartenant au premier et au deuxième faisceau présentent entre eux une différence de marche de  $\lambda/2$  et interfèrent de façon destructive. Seuls les rayons du troisième faisceau subsistent et forment une frange claire sur l'écran. Puisque dans ce cas la plus grande partie de la lumière se perd par interférence destructive, la première frange claire après la frange centrale est moins éclairée que celle-ci.

Interférence constructive :  $\Delta s = 3\lambda/2$

- Si l'angle de diffraction est toujours augmenté, la différence de marche entre les rayons limites est le double d'une longueur d'onde ( $\Delta s = 2\lambda$ ) et toutes les ondes se détruisent par paires (fig. 2) : une frange sombre se forme sur l'écran.

Interférence destructive :  $\Delta s = 2\lambda$

En général, on obtient :

- Interférence constructive par une fente simple**

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

$$\ell \cdot \sin \alpha_k = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\sin \alpha_k = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \ell}$$

et  $\sin \alpha_0 = 0$  (ordre 0), donc  $\alpha = 0^\circ$  : frange claire centrale

$$\sin \alpha_k = \frac{2k + 1}{2} \cdot \frac{\lambda}{\ell} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad \text{et} \quad \alpha = 0^\circ$$

La frange est claire, si la différence de marche est un multiple impair d'une demi-longueur d'onde ou si  $\alpha = 0^\circ$ .

- Interférence destructive par une fente simple**

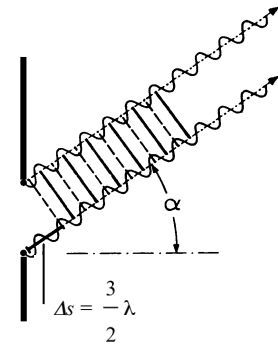
$$\Delta s = k \cdot \lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\ell \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

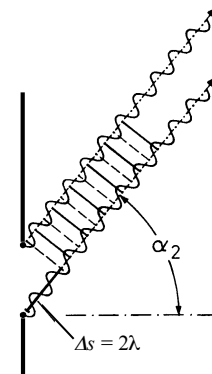
$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{\ell}$$

$$\sin \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda}{\ell} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

La frange est sombre si la différence de marche est un multiple pair d'une demi-longueur d'onde.



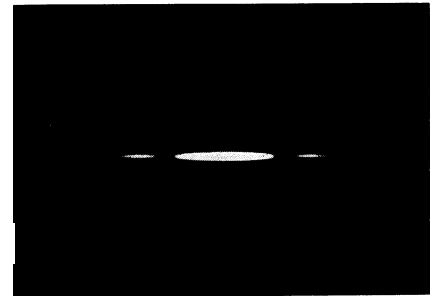
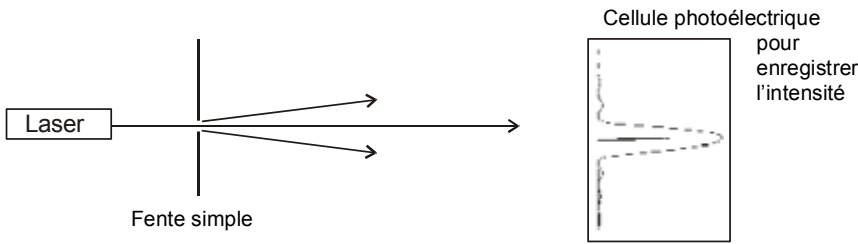
1. Fente simple : extinction partielle



2. Fente simple : interférence destructive

L'intensité (luminosité) des franges claires diminue avec le nombre d'ordre  $k$  croissant. Des deux côtés du maximum d'intensité (milieu d'une frange claire) l'intensité diminue progressivement pour faire place à l'obscurité (franges sombres voisines). Les figures 1 et 2 montrent l'évolution de l'intensité dans la diffraction par une fente simple.

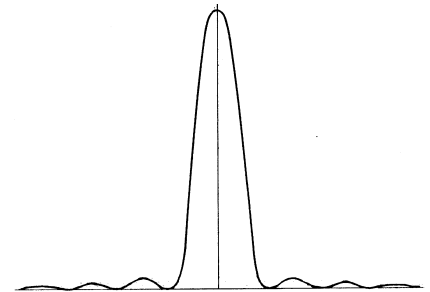
Le dispositif expérimental suivant permet de confirmer l'évolution de l'intensité :



1. Intensité lumineuse lors de la diffraction par une fente simple

Discussion :

- $\sin \alpha \sim 1/\ell$  : si la largeur  $\ell$  de la fente diminue, la distance entre les franges claires s'agrandit, car l'angle de diffraction augmente alors.
- $\sin \alpha \sim \lambda$  : la distance entre les franges claires est plus grande pour la lumière rouge que pour la lumière violette, car la lumière rouge a une longueur d'onde plus grande.
- Si la fente est éclairée avec de la lumière blanche, les différentes couleurs sont diffractées différemment : les franges claires des différentes couleurs se superposent. Il se forme une image colorée et floue.



2. Profil d'intensité lors de la diffraction par une fente simple

Exercice :

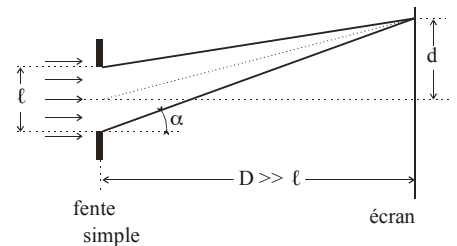
La longueur d'onde de la lumière utilisée peut être mesurée d'une manière très précise à partir de la position des franges de diffraction à travers une fente simple (fig. 3).

On a alors :

$$\tan \alpha = \frac{d}{D}$$

et

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s}{\ell}$$



3. Position des franges de diffraction et d'interférence

Pour un angle de diffraction  $\alpha$  petit,  $\sin \alpha$  et  $\tan \alpha$  sont approximativement égaux :

$$(\text{si } \alpha \leq 5^\circ) \quad \tan \alpha \approx \sin \alpha \Rightarrow \frac{d}{D} = \frac{\Delta s}{\ell} \Rightarrow d = \frac{D \cdot \Delta s}{\ell}$$

La frange centrale est claire :  $\Delta s = 0$  et  $d = 0$ .

Déterminez la position  $d_{1dest}$  de la première frange sombre. Utilisez cette formule pour déduire une expression pour la longueur d'onde  $\lambda$ .

La différence de marche au niveau de la première frange sombre vaut  $\Delta s = \lambda$ , d'où :

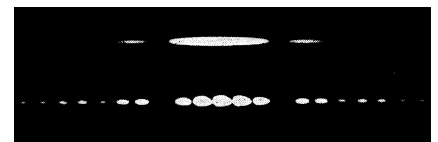
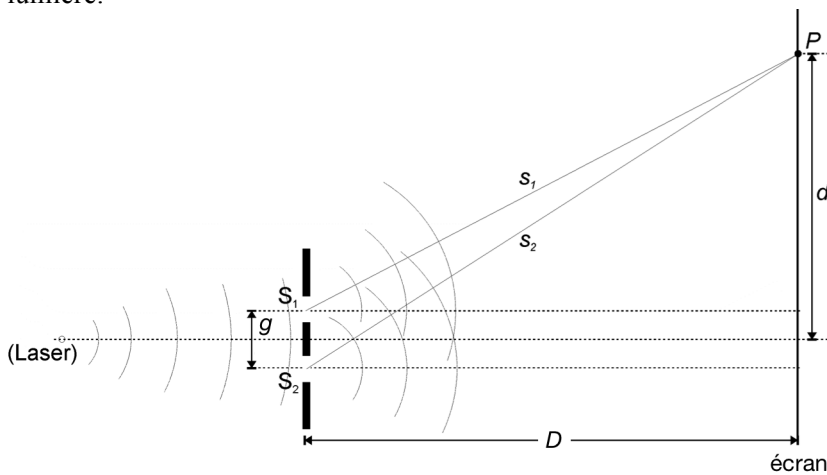
$$d_{1dest} = \frac{D \cdot \lambda}{\ell} \Rightarrow \lambda = \frac{\ell \cdot d_{1dest}}{D}$$

En général :  $\lambda = \frac{\ell \cdot d_{kdest}}{k \cdot D}$  (car  $\Delta s_{dest} = k \cdot \lambda$ )

où  $d_k$  est la distance de la frange  $k$  par rapport à la frange claire centrale.

## L'expérience de Young : diffraction par une fente double

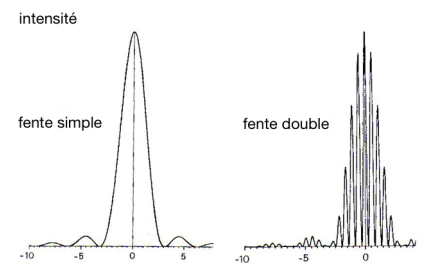
Les fentes de Young sont l'objet d'une expérience de physique réalisée en 1801 par Thomas Young mettant en évidence la nature ondulatoire de la lumière.



1. Figures d'interférence à travers une fente simple (en haut) et à travers une fente double (en bas)

La fig. 1 montre les motifs de diffraction et d'interférence de la fente simple et de la fente double. À la position des maxima en intensité de la fente simple, on reconnaît un ensemble de franges claires et sombres.

Le profil d'intensité est représenté dans la fig. 2 pour une fente simple et une fente double.



2. Profil d'intensité dans l'expérience de la fente simple et de la fente double

Dans l'axe de symétrie ( $\alpha = 0^\circ$ ), les ondes lumineuses interfèrent de façon constructive, puisqu'elles ont parcouru la même distance. Il se forme une frange claire au centre de la figure de diffraction. Ce résultat est surprenant comme cette région est masquée par la paroi entre les deux fentes : elle se trouve dans l'ombre géométrique des deux fentes de Young (fig. 1).

Si l'angle de diffraction augmente, la situation apparaît où la différence de marche  $\Delta s$  entre les ondes élémentaires émanant des deux fentes correspond exactement à une longueur d'onde. Ces deux ondes interfèrent alors de façon constructive (fig. 2).

$$\text{Interférence constructive : } \Delta s = l \cdot \lambda$$

On augmente l'angle de diffraction jusqu'à une différence de marche  $\Delta s$  de  $\frac{3}{2} \lambda$ . Ces ondes interfèrent de façon destructive (fig. 3).

$$\text{Interférence destructive : } \Delta s = \frac{3}{2} \lambda$$

À un angle de diffraction plus grand, la différence de marche  $\Delta s$  vaut  $2 \cdot \lambda$ . Alors, les deux ondes interfèrent à nouveau de façon constructive (fig. 4).

$$\text{Interférence constructive : } \Delta s = 2 \lambda$$

En général, on obtient :

- **Interférence constructive par une fente double**

$$\begin{aligned} \Delta s &= k \cdot \lambda \\ g \cdot \sin \alpha_k &= k \cdot \lambda \end{aligned}$$

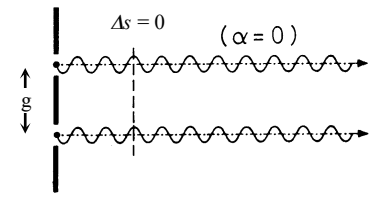
$$\sin \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda}{g} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Si la différence de marche est un multiple pair d'une demi-longueur d'onde, on observe une interférence constructive (frange claire) sur l'écran.

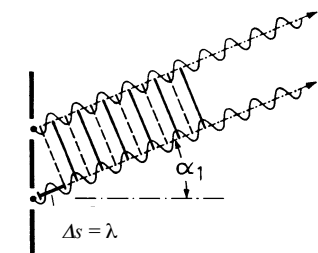
- **Interférence destructive pour une fente double**

$$\begin{aligned} \Delta s &= (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \\ g \cdot \sin \alpha_k &= (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \sin \alpha_k &= (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot g} \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

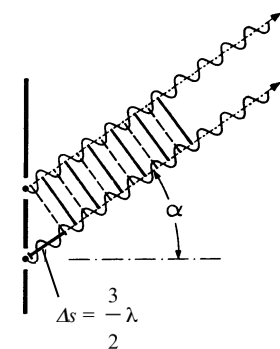
Dans les régions intermédiaires où la différence de marche est un multiple impair d'une demi-longueur d'onde, on observe une interférence destructive (frange sombre).



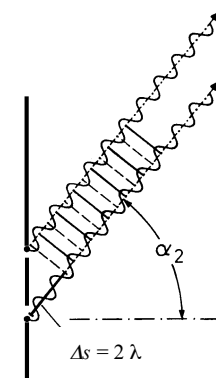
1. Fente double :  $\alpha = 0^\circ$



2. Fente double : interférence constructive



3. Fente double : interférence destructive



4. Fente double : interférence constructive

Remarque : Si une des deux fentes est obturée, la figure d'interférence de la fente double disparaît et il se forme la figure d'interférence d'une fente simple.

Sans varier d'autres paramètres du dispositif expérimental, on observe que les franges de diffraction bleues sont plus rapprochées que les franges de diffraction rouges. La cause en est que :

$$\lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{rouge}}$$

Si la lumière blanche est utilisée dans l'expérience de Young, toutes les franges, sauf celle qui correspond à  $k = 0$ , sont colorées (fig. 1).

Thomas Young calcula que la lumière visible présente des longueurs d'onde entre 380 nm et 780 nm :

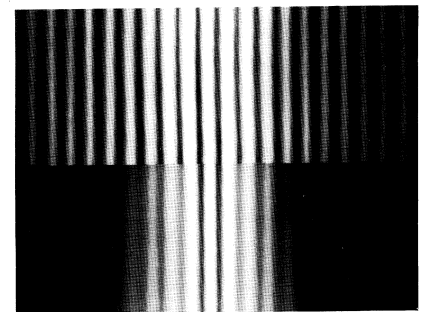
$$\text{(violet)} \quad 380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm} \quad \text{(rouge)}$$



Longueur d'onde  $\lambda$

violet	390 nm
bleu	455 nm
vert	492 nm
jaune	577 nm
orange	597 nm
rouge	622 nm

Remarque : Les longueurs d'onde indiquées sont celles mesurées dans le vide. Lorsque la lumière passe d'un milieu dans un autre, la longueur d'onde change étant donné que la vitesse de propagation de la lumière est différente dans un milieu matériel par rapport au vide.



1. Interférence par une fente double

En haut : lumière rouge  
En bas : lumière blanche

## Diffraction et interférence par un réseau optique

Si la distance entre les fentes est réduite, les maxima en intensité s'éloignent l'un de l'autre. L'intensité lumineuse peut être augmentée si, au lieu de deux rayons, un nombre plus élevé de rayons est superposé, chaque rayon passant par une autre fente.

Un réseau (de diffraction) optique est composé d'une série de fentes parallèles qui sont espacées régulièrement. Chaque fente est appelée **trait**. L'espacement entre les centres de deux traits voisins est appelé **pas du réseau  $g$** .

Si l'on envoie un faisceau lumineux parallèle sur un réseau optique, les fentes du réseau optique se comportent comme des sources cohérentes.

L'interférence est constructive dans une direction donnée (angle de diffraction  $\alpha$ ), si la différence de marche entre deux ondes émanant de traits voisins est un multiple pair d'une demi-longueur d'onde :

$$\Delta s = k \cdot \lambda \Rightarrow g \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

$$\sin \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda}{g}$$

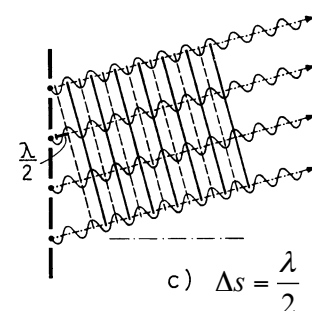
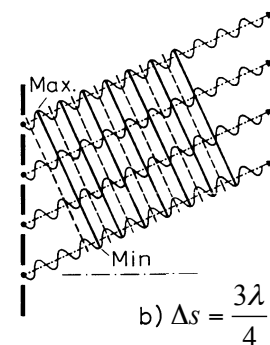
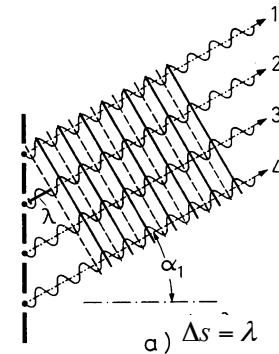
La fig. 1a) montre une différence de marche égale à une longueur d'onde  $\lambda$ . Il se forme une frange claire sur l'écran.

Mais une petite différence dans l'angle de diffraction entraîne une diminution rapide de l'intensité : un effet typique de la diffraction par un réseau optique. La différence de marche dans la fig. 1b) vaut  $\frac{3\lambda}{4}$  : toutes les quatrièmes ondes sont entre elles en opposition de phase. La première onde interfère de façon destructive avec la quatrième onde. Simultanément, la deuxième onde et la cinquième onde interfèrent de façon destructive, ainsi que la troisième avec la sixième onde, etc. On observe une extinction de presque toutes les ondes ; seules quelques ondes aux bords du réseau persistent selon le nombre  $n$  de fentes. L'intensité lumineuse est donc beaucoup plus petite, surtout pour un réseau avec un grand  $n$ .

Une différence de marche égale à une demi-longueur d'onde est représentée dans la fig. 1c). Des ondes voisines interfèrent de façon destructive : au plus, un faisceau non détruit persiste.

Ces réflexions montrent qualitativement (fig. 1 et 2 à la page suivante) que les interférences derrière un réseau optique avec un nombre  $n$  élevé de traits produisent des maxima principaux très nets et d'une forte intensité lumineuse tandis que le rayonnement entre ces maxima est pratiquement éliminé.

- Plus les traits sont nombreux (nombre  $n$  élevé), plus les maxima sont étroits (nets) et intenses. De même, les maxima secondaires sont d'autant plus estompés (atténués).
- Plus le pas du réseau  $g$  est petit, plus les maxima principaux sont éloignés les uns des autres.



1. Réseau optique : interférence de quatre ondes parallèles avec une différence de marche ...

- a) ...  $\Delta s = \lambda \Rightarrow$  frange claire
- b) ...  $\Delta s = \frac{3\lambda}{4} \Rightarrow$  frange sombre
- c) ...  $\Delta s = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow$  annihilation

Discussion : Diffraction par un réseau optique

- Au milieu de la figure de diffraction, il se forme le maximum en intensité d'ordre  $k = 0$  (frange claire centrale). En lumière blanche, la frange centrale est blanche, car toutes les couleurs s'y additionnent (*synthèse additive*).
- Les maxima en intensité d'ordre supérieur ( $k > 0$ ) sont rouges au bord extérieur et violets au bord intérieur (fig. 3). En comparant la disposition des couleurs avec la formule  $\sin \alpha \sim \lambda/g$ , on reconnaît que différentes longueurs d'onde doivent être attribuées aux couleurs spectrales.

Plus précisément : le rouge a une longueur d'onde plus grande que le bleu, car le rouge est diffracté plus fortement que le bleu.

Les formules établies pour la fente double sont toujours valables pour le réseau optique :

$$g \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda \Rightarrow \sin \alpha = \frac{k \cdot \lambda}{g} \quad \text{avec } k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad \tan \alpha = \frac{d}{D}$$

Mais ATTENTION à la signification exacte du  $d$  :

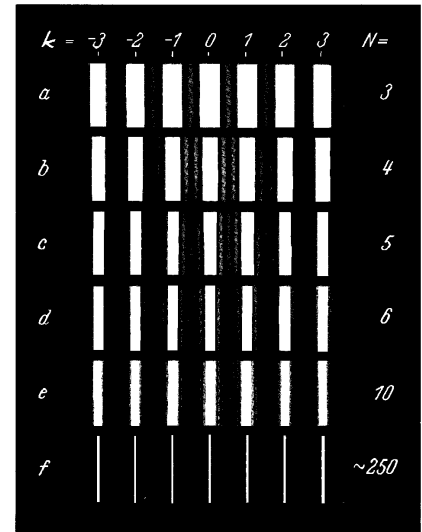
Dans la diffraction par le réseau,  $d$  est la distance entre le milieu de la frange centrale jusqu'au milieu de la première frange claire suivante.

Dans la diffraction par la fente simple,  $d$  est la distance entre le milieu de la frange centrale et le milieu de la première frange sombre.

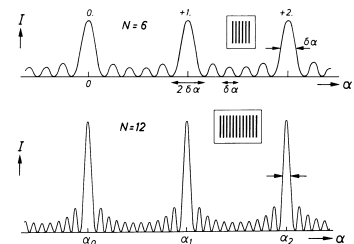
- Le pas du réseau  $g$  ne doit pas être choisi trop petit. Si  $g$  atteint la longueur d'onde  $\lambda$ , alors le maximum d'ordre 1 est déjà dévié de  $90^\circ$  :

$$g \cong \lambda \Rightarrow \sin \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda}{\lambda} \cong k = 1 \Rightarrow \alpha_1 = 90^\circ$$

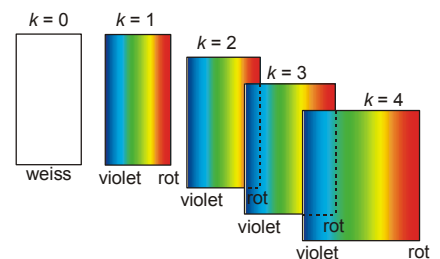
- Les maxima d'ordre supérieur ( $k > 1$ ) n'apparaissent alors plus, puisque l'on obtient  $\sin \alpha_k > 1$ .
- Si le pas du réseau  $g$  est plus petit que la longueur d'onde  $\lambda$ , seul le maximum d'ordre 0 correspondant à la frange centrale peut être observé.
- Souvent, le nombre  $n$  de traits (ou de lignes) par mm est indiqué sur les réseaux commerciaux. Le pas du réseau s'obtient alors :  $g = 1/n$ . Par exemple, un réseau optique avec  $n = 600$  traits/mm possède un pas de réseau :  $g = 1/600 \text{ mm} = 1,6 \mu\text{m}$ .



1. Diffraction par des réseaux avec différents nombres de traits ( $n$  dans le texte,  $N$  sur la figure)



2. Profil d'intensité pour un réseau avec 6 respectivement 12 traits



3. Dans les figures de diffraction en lumière blanche, des spectres d'ordres différents peuvent être superposés

Remarque :

Si la lumière passe du vide dans un milieu matériel, sa fréquence ne change pas. Par contre, la longueur d'onde diminue avec la vitesse de propagation. C'est donc la fréquence, et non pas la longueur d'onde, qui caractérise sans équivoque les couleurs spectrales.

La lumière blanche est composée d'ondes de différentes fréquences. La lumière rouge a une fréquence plus petite que la lumière bleue. Dans le vide, la célérité est indépendante de la fréquence. Dans les milieux matériels, les ondes de fréquence élevée (lumière bleue) se propagent plus lentement que les ondes de fréquence plus petite (lumière rouge).

Le fait que la vitesse de propagation dépend de la fréquence d'une onde est appelé **dispersion**. Ce mot rappelle l'éventail des couleurs spectrales obtenu par la réfraction dans un prisme, un phénomène qui résulte justement de la dispersion. On utilise la même notion pour d'autres ondes qui ne sont pas forcément des ondes lumineuses. Ainsi, les ondes acoustiques dans l'air ou les ondes d'eau ne montrent pas de dispersion. Et la dispersion des ondes lumineuses n'apparaît que dans les milieux matériels, non pas dans le vide.

## Interférence par les couches minces

Newton découvrit les couleurs provenant de couches minces que l'on peut observer sous un éclairage par la lumière solaire sur des bulles de savon (fig. 1), sur les fines couches d'huile sur l'eau (fig. 2) ou sur les couches oxydées des surfaces métalliques. Les conditions suivantes doivent être remplies pour que ces phénomènes d'interférence apparaissent :

- Les couches (lames) doivent être suffisamment minces de façon que la différence de marche soit inférieure à la longueur de cohérence.
- L'angle d'ouverture entre les rayons incidents doit être petit (condition de cohérence). Cette condition est remplie par les rayons solaires qui sont pratiquement parallèles lorsqu'ils atteignent la surface de la Terre.



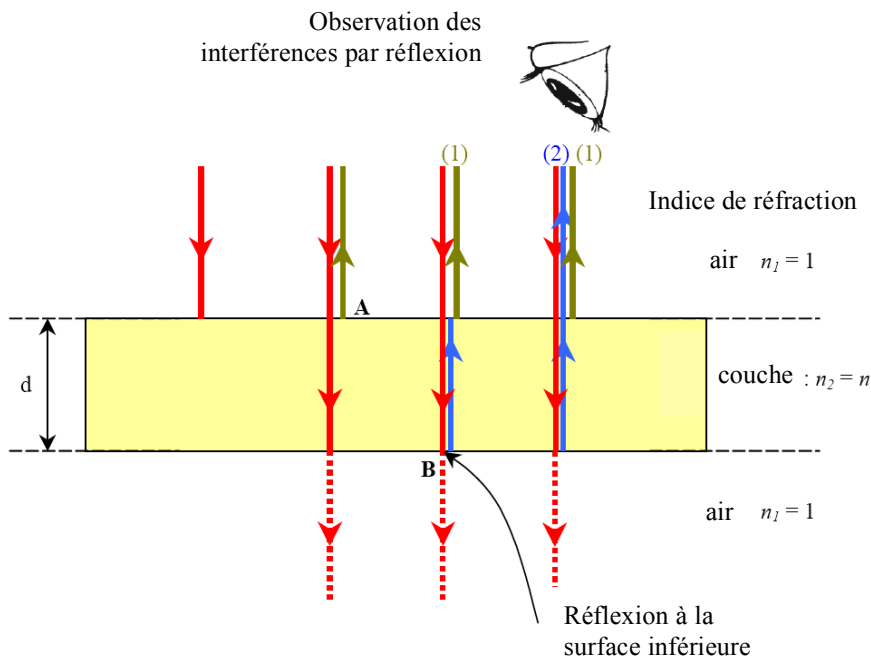
1. Interférences sur les bulles de savon



2. Interférences par un film d'huile sur une flaque d'eau



## Observation sous la lumière réfléchie (par réflexion)



Les rayons lumineux (1) et (2) peuvent interférer, car ils présentent une différence de phase entre eux.

Le rayon lumineux (1) se forme par réflexion de la lumière incidente à la surface supérieure au point A. Le rayon (2) provient de la lumière incidente réfléchie à la surface inférieure au point B.

La différence de marche géométrique entre les deux rayons pour une incidence perpendiculaire vaut :

$$\Delta s_{\text{geom}} = 2 \cdot d$$

La différence de marche optique entre les deux rayons est alors égale à :

$$\Delta s_{\text{opt}} = 2 \cdot d \cdot n_2$$

Ceci ne correspond pas encore à la différence de marche optique totale entre les rayons (1) et (2), puisque :

Lors de la réflexion par un milieu plus réfringent, le faisceau incident subit un changement de phase de  $\pi$  rad (ou  $180^\circ$ ). Ceci correspond à un saut spatial de  $\frac{\lambda}{2}$  (cf. les ondes mécaniques en classe de 12GE).

Dans le cas présent, comme le rayon (1) subit un changement de phase de  $180^\circ$  dû à sa réflexion au point A sur une surface de séparation vers un milieu plus réfringent, on obtient pour la différence de marche optique totale :

$$\Delta s = \Delta s_{\text{opt}} + \frac{\lambda}{2} \quad (\text{ou } \dots - \frac{\lambda}{2})$$

c'est-à-dire : 
$$\Delta s = 2 \cdot d \cdot n \pm \frac{\lambda}{2}$$

Discussion :

- Interférence constructive par réflexion :

$$\Delta s = 2 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$\Rightarrow 2 \cdot d_k \cdot n - \frac{\lambda}{2} = 2 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{donc : } d_k = \frac{(2k + 1) \lambda}{4 \cdot n} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

- Interférence destructive par réflexion :

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$\Rightarrow 2 \cdot d_k \cdot n + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

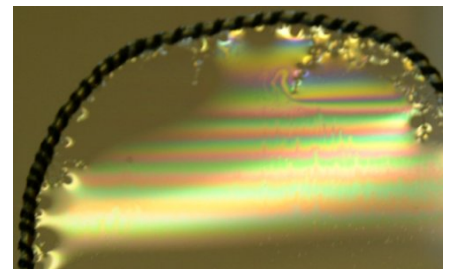
$$\text{donc : } d_k = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot n} \quad (k = 1, 2, 3 \dots, \text{ car } d > 0)$$

Si la lumière solaire tombe sur une telle couche mince, alors l'angle d'incidence  $\alpha$  est constant et la différence de marche optique a la même valeur à tous les points où la couche a la même épaisseur  $d$ . On observe alors une interférence constructive ou destructive en fonction de la différence de marche optique qui est un multiple pair ou impair d'une demi-longueur d'onde.

Le motif formé par les franges claires et sombres dépend donc de la longueur d'onde ; à un point donné, on observe par exemple l'élimination de la lumière rouge tandis que la lumière bleue est renforcée.

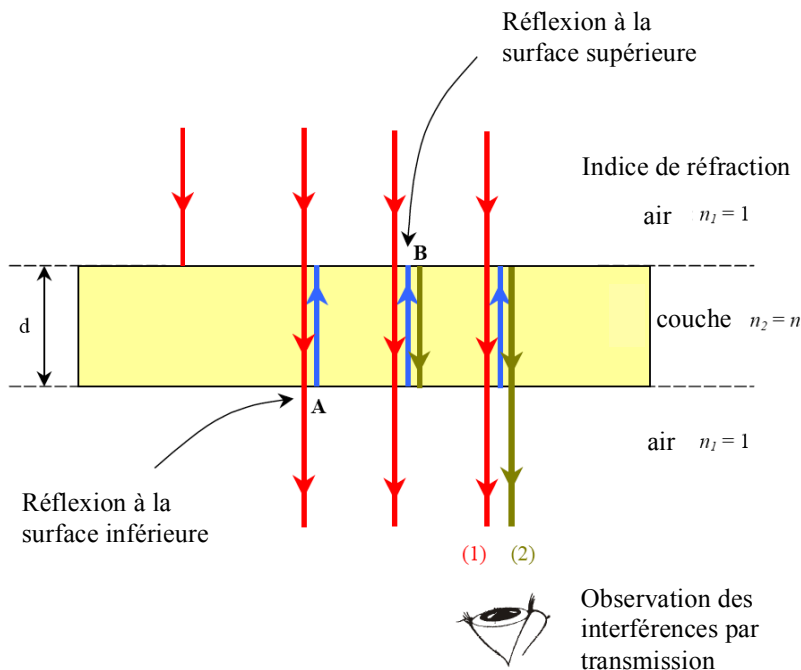
Si la lumière incidente est blanche (lumière solaire), les couches à différentes épaisseurs donnent naissance à des franges colorées (figure 1). Comme ces couleurs apparaissent par l'interférence, on parle de **couleurs interférentielles**.

Si la lumière incidente est monochromatique, des franges alternativement claires et sombres apparaissent sur les couches à épaisseur variante.



1. Interférences sur un film de savon

## Observation sous la lumière transmise (par transmission)



Le rayon lumineux (2) est réfléchi aux points *A* et *B* de la couche mince ; le rayon (1) n'est pas réfléchi.

La différence de marche géométrique entre les deux rayons pour une incidence perpendiculaire vaut :

$$\Delta s_{geom} = 2 \cdot d$$

La différence de marche optique entre les deux rayons est alors égale à :

$$\Delta s_{opt} = 2 \cdot d \cdot n_2$$

Les deux réflexions du rayon lumineux (2) ont lieu chaque fois sur un milieu moins réfringent : aucun changement de phase n'apparaît ! La différence de marche optique totale est alors égale à :

$$\Delta s = \Delta s_{opt} = 2 \cdot d \cdot n_2$$

Discussion :

- Interférence constructive par transmission :

$$\Delta s = 2 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$\Rightarrow 2 \cdot d_k \cdot n = 2 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{donc : } d_k = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot n} \quad (k = 1, 2, 3 \dots)$$

- Interférence destructive par transmission :

$$\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

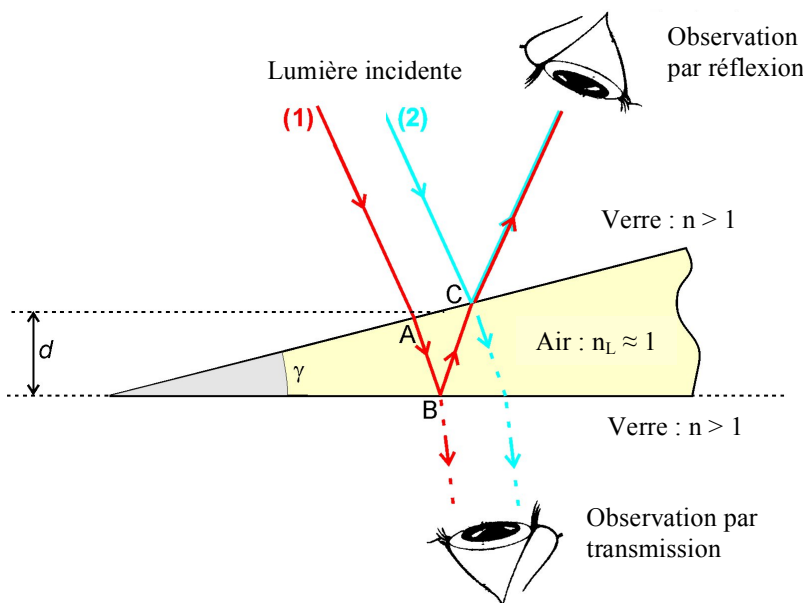
$$\Rightarrow 2 \cdot d_k \cdot n = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{donc : } d_k = \frac{(2k + 1) \cdot \lambda}{4 \cdot n} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

En comparant les conditions d'interférence constructive et d'interférence destructive pour la réflexion et pour la transmission, on constate que ces conditions sont justement inversées. Ceci tient du fait que la différence de marche *géométrique* est la même, mais le terme  $\frac{1}{2}$  n'apparaît pas dans la différence de marche *optique* pour la transmission. Il s'ensuit que les franges claires observées par transmission apparaissent là où l'on décèle les franges sombres dans une observation par réflexion.

## Interférences par une couche en forme de coin

Une couche en forme de coin (couche cunéiforme) est formée par exemple, si deux plaques en verre sont posées l'une sur l'autre de façon qu'elles se touchent d'un côté et qu'elles soient séparées par un objet mince sur le côté opposé. Les deux plaques en verre créent alors un coin d'air entre elles.



Dans la suite, seul le cas simplifié d'une incidence perpendiculaire de la lumière est considéré.

La différence de marche géométrique pour une incidence perpendiculaire vaut :

$$\Delta s_{geom} = 2n_L \cdot d$$

$$\Rightarrow \Delta s_{geom} = 2 \cdot d \text{ avec } n_L \cong 1$$

Comme la couche d'air est très mince, on a le droit de considérer  $AB \cong BC \cong d$ , si  $d$  est l'épaisseur du coin d'air au point en question.

### Observation par réflexion

Comme au point  $B$  la lumière est réfléchiée par un milieu plus réfringent, il faut ajouter à la différence de marche un terme  $\frac{\lambda}{2}$  (changement de phase de  $180^\circ$ ). On obtient pour la différence de marche optique totale :

$$\Delta s_{opt} = 2 \cdot d \pm \frac{\lambda}{2}$$

Discussion :

- Interférence constructive par réflexion :

$$\Delta s_{opt,ges} = k \cdot \lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$\Rightarrow 2 \cdot d \pm \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda$$

$$d_k = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

- Interférence destructive par réflexion :

$$\Delta s_{opt,ges} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$\Rightarrow 2 \cdot d \pm \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$d_k = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

La première frange sombre (interférence destructive avec  $k = 0$ ) se trouve alors à l'arête du coin, si les interférences sont observées par réflexion.

Observation par transmission

La lumière transmise subit deux changements de phase parce qu'elle est réfléchiée deux fois par un milieu plus réfringent (voir figure : points *B* et *C*). Il s'ensuit pour la différence de marche optique :

$$\Delta s_{opt_{ges}} = \Delta s_{opt} \pm \frac{\lambda}{2} \pm \frac{\lambda}{2} = 2 \cdot d \pm \lambda = 2 \cdot d$$

Un changement de phase de  $\lambda$  n'a pas d'influence sur les conditions d'interférence.

Discussion :

- Interférence constructive par transmission :

$$\begin{aligned} \Delta s_{opt_{ges}} &= k \cdot \lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots) \\ \Rightarrow 2 \cdot d &= k \cdot \lambda \\ d_k &= k \cdot \lambda \\ \text{donc : } d_k &= k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots) \end{aligned}$$

Dans une observation par transmission, la première frange claire se trouve à l'arête du coin.

- Interférence destructive par transmission :

$$\begin{aligned} \Delta s_{opt_{ges}} &= (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots) \\ \Rightarrow 2 \cdot d &= (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \text{donc : } d_k &= (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots) \end{aligned}$$

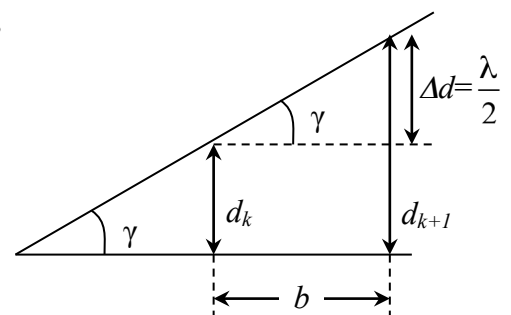
Les franges claires par transmission se transforment en franges sombres lors de l'observation par réflexion (et inversement).

La largeur  $b$  des franges se calcule aisément (figure 1) :

$$\begin{aligned} \text{p. ex. } d_k &= k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{et} \quad d_{k+1} = (k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \Rightarrow \Delta d &= \frac{\lambda}{2} \end{aligned}$$

largeur des franges :

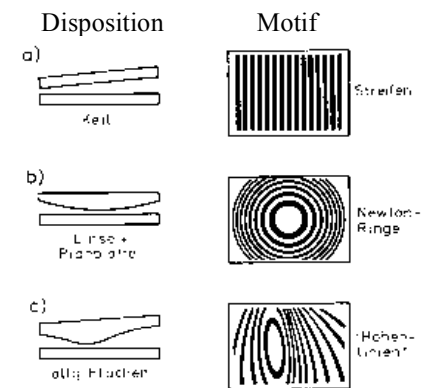
$$\begin{aligned} \tan \gamma &= \frac{\Delta d}{b} = \frac{\lambda/2}{b} \\ \Rightarrow b &= \frac{\lambda}{2 \cdot \tan \gamma} \end{aligned}$$



1. coin d'air : largeur  $b$  des franges

Le coin est souvent constitué par un espace d'air entre deux plaques de verre. Si l'on pose une lentille d'une faible courbure sur une plaque en verre, il se forme un ensemble d'anneaux d'interférence (figure 2) dont la distance entre les anneaux diminue du centre vers l'extérieur ; ce motif est appelé *anneaux de Newton*.

Des diapositives ou des vitres de fenêtres présentent souvent des surfaces peu lisses. Les figures d'interférence obtenues avec de la lumière de laser montrent des motifs de franges souvent déformées, mais nettes. Ces franges représentent les courbes de niveau de l'épaisseur des lames. L'équidistance est égale à  $\frac{\lambda}{2}$ .



### Autres applications des interférences lumineuses

En mécanique, les interférences sont utilisées pour mesurer l'épaisseur des objets avec une précision de quelques  $\mu\text{m}$ .

En optique, on recouvre les appareils optiques pour diminuer d'une part les réflexions gênantes et pour augmenter d'autre part l'intensité de la lumière transmise.

Les couches minces déposées sur les appareils optiques (p. ex. des objectifs) constituent une application importante. On dépose sur la surface des lentilles une couche très fine d'une substance transparente dont l'indice de réfraction est beaucoup plus petit que celui du verre. Alors, la lumière est réfléchi à la surface avant et à la surface arrière en subissant à chaque réflexion une différence de marche d'une demi-longueur d'onde. Si la couche déposée a une épaisseur d'un quart d'une longueur d'onde, alors les rayons lumineux obtiennent une différence de marche entre eux d'une demi-longueur d'onde et s'annihilent en grande partie par interférence destructive. L'annihilation est complète si les rayons lumineux sont réfléchis à surface avant et à la surface arrière avec la même intensité. Ceci est le cas si les indices de réfraction suivent :

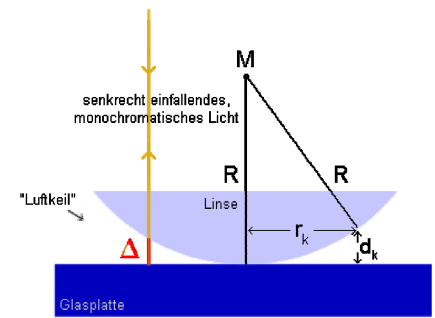
$n_{\text{couche}} = \sqrt{n_{\text{verre}}}$ . Cette condition ne peut être remplie pour une seule longueur d'onde. Si la couche est capable d'éliminer la lumière verte, alors elle est trop mince pour la lumière rouge et trop épaisse pour la lumière violette. Ces parties du spectre sont donc toujours réfléchies et donnent ainsi à ces couches leur apparence rouge-bleu caractéristique.

De cette manière-là, on arrive à réduire considérablement l'intensité de la lumière réfléchi. Les rayons lumineux transmis subissent une différence de marche d'une longueur d'onde complète. Ils se renforcent de façon que l'intensité de la lumière transmise augmente. En plus, l'image sera plus riche en contraste, puisque les réflexions gênantes sont éliminées. On utilise aujourd'hui presque partout des objectifs traités selon cette procédure.

### 1. Interférences en lumière de laser pour différentes dispositions des lames

## Anneaux de Newton

Une lentille convexe avec un grand rayon de courbure est posée sur une plaque plane en verre. Elle est éclairée avec de la lumière parallèle tombant perpendiculairement sur la lentille (figure 1). On reconnaît alors dans la lumière réfléchie des anneaux alternativement clairs et sombres (figure 2) concentriques au point de contact qui, lui, est sombre. Il se forme entre la plaque et la lentille un coin d'air  $\Delta$ , dont l'épaisseur augmente vers l'extérieur à cause de la courbure de la lentille. Comme l'inclinaison de la lentille est petite, elle peut être négligée. Ce dispositif est appelé *verre chromatique de Newton*.



1. Dispositif expérimental pour l'observation des anneaux de Newton

### Observation par réflexion

La lumière incidente (rayon rouge) est réfléchi à la surface supérieure (rayon vert) respectivement à la surface inférieure (rayon bleu) du coin d'air (figure 3). Les rayons 1 et 2 subissent alors une différence de phase. La réflexion par la plaque en verre conduit à un changement de phase de  $\frac{1}{2}$ , car le verre est plus réfringent que l'air.

À cause de la symétrie du système, des anneaux concentriques sont observés, appelés *anneaux de Newton*.

La différence de marche optique est obtenue en tenant compte du changement de phase d'une demi-longueur d'onde :

$$\Delta s_{\text{ges}} = 2d + \frac{\lambda}{2}$$

Discussion:

- Interférence constructive par réflexion :

$$\Delta s_{\text{opt}_{\text{ges}}} = k \cdot \lambda \quad \Rightarrow \quad 2d + \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda$$

$$\text{Donc : } 2d_{\text{konst}(k)} = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, 3 \dots)$$

$$\text{Ou : } 2d_{\text{konst}(k)} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$\text{C'est-à-dire : } d_0 = \frac{\lambda}{4} \quad ; \quad d_1 = \frac{3\lambda}{4} \quad \dots$$

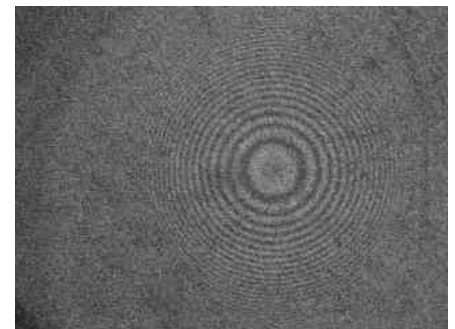
- Interférence destructive par réflexion :

$$\Delta s_{\text{opt}_{\text{ges}}} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad 2d + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

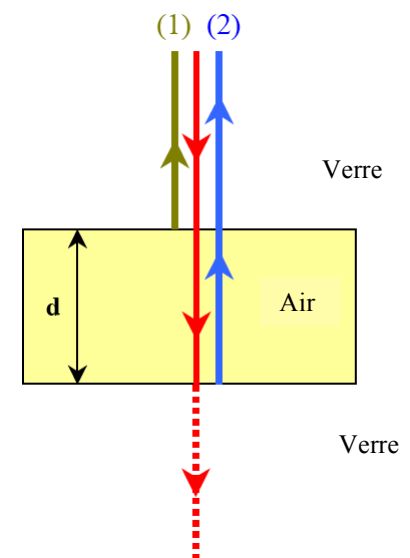
$$\text{Donc : } 2d_{\text{dest}(k)} = k \cdot \lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

$$\text{C'est-à-dire : } d_0 = 0 \quad ; \quad d_1 = \frac{\lambda}{2} \quad ; \quad d_2 = \lambda \quad \dots$$

Dans la lumière réfléchi, le point de contact sombre est entouré d'anneaux clairs d'une intensité réduite.



2. Anneaux de Newton



3. Observation des anneaux de Newton par réflexion



### Observation par transmission

La lumière incidente (rayon rouge) est à nouveau réfléchi à la surface inférieure (rayon bleu) et à la surface supérieure (rayon vert) du coin d'air (figure 1). Les rayons 1 et 2 subissent alors une différence de phase. Les réflexions par la plaque en verre conduisent chaque fois à un changement de phase de  $\frac{1}{2}$ , car le verre est plus réfringent que l'air.

La différence de marche optique est égale à une longueur d'onde à cause du double changement de phase et donne alors :

$$\Delta s_{ges} = 2d$$

- Interférence constructive par transmission :

$$\Delta s_{opt_{ges}} = k \cdot \lambda \Rightarrow 2d = k \cdot \lambda$$

Donc :  $2d_{konst(k)} = k \cdot \lambda$  ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

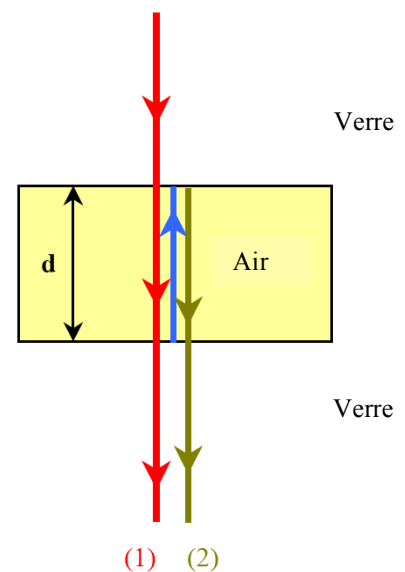
C'est-à-dire :  $d_0 = 0$  ;  $d_1 = \frac{\lambda}{2}$  ;  $d_2 = \lambda$  ;  $d_3 = \frac{3\lambda}{2}$  ...

- Interférence destructive par transmission :

$$\Delta s_{opt_{ges}} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow 2d = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Donc :  $2d_{dest(k)} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$  ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

C'est-à-dire :  $d_0 = \frac{\lambda}{4}$  ;  $d_1 = \frac{3\lambda}{4}$  ;  $d_2 = \frac{5\lambda}{4}$  ...



1. Observation des anneaux de Newton par transmission

Dans la lumière transmise, le point de contact est **brillant**.

Les observations par réflexion et par transmission sont donc complémentaires.

À l'aide de la figure 1, on trouve le rayon  $r_k$  de l'anneau sombre  $k$  :

$$R^2 = (R - d_k)^2 + r_k^2$$

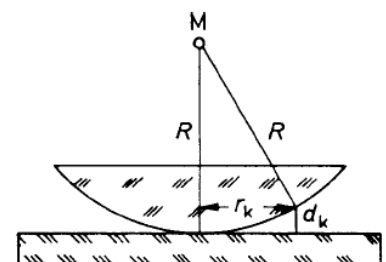
$$r_k^2 = R^2 - (R - d_k)^2$$

$$r_k^2 = R^2 - R^2 + 2 \cdot R \cdot d_k - d_k^2$$

$$r_k^2 = 2 \cdot R \cdot d_k - d_k^2$$

Comme  $d_k \ll R$ , on peut négliger  $d_k^2$  par rapport à  $2 \cdot R \cdot d_k$  et il s'ensuit pour  $r_k^2$  :

$$r_k^2 = 2 \cdot R \cdot d_k$$



1. Considérations géométriques sur le verre chromatique de Newton

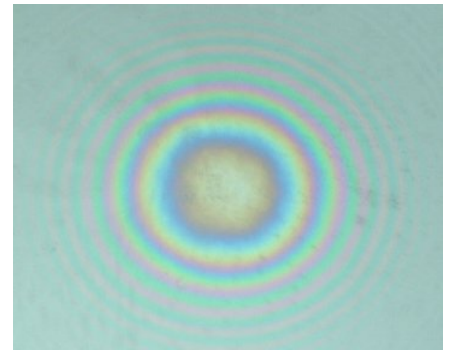
Ainsi, on obtient le rayon des anneaux pour l'interférence destructive dans une observation par réflexion (anneaux sombres), ce qui est également le rayon des anneaux pour l'interférence constructive dans une observation par transmission (anneaux clairs) :

$$r_k = \sqrt{2 \cdot R \cdot d_k} = \sqrt{k \cdot R \cdot \lambda} \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{r_k^2}{k \cdot R}$$

Si le verre chromatique de Newton est éclairé avec de la lumière rouge et bleue, on observe que les anneaux bleus sont plus serrés que les anneaux rouges. Ce phénomène s'explique par la plus grande longueur d'onde de la lumière rouge : le rayon  $r_k$  des anneaux est proportionnel à  $\sqrt{\lambda}$ .

Si le verre chromatique de Newton est éclairé avec de la **lumière blanche**, différentes lumières colorées sont annihilées à certains endroits tandis que d'autres couleurs sont renforcées à d'autres points (figure 4) : il se forme des anneaux en couleurs.

En s'éloignant du centre commun des anneaux, l'épaisseur du coin d'air augmente et les couleurs se succèdent de plus en plus vite. Finalement, les anneaux de couleurs différentes sont tellement proches les uns des autres que l'œil humain ne les différencie plus : les couleurs interférentielles s'estompent de plus en plus et passent finalement au blanc.



2. Anneaux de Newton avec de la lumière blanche

## Formulaire

### Chemin optique

(W1) 
$$d' = c_0 \cdot t = c_0 \cdot \frac{d}{c} = n \cdot d$$

$d'$  chemin optique  
 $c_0$  célérité de la lumière dans le vide ( $3 \cdot 10^8$  m/s)  
 $d$  chemin géométrique  
 $n$  indice de réfraction  $n = \frac{c_0}{c}$   
 $c$  célérité de la lumière dans le milieu optique

### Fente simple

(W2) 
$$\Delta s = \ell \cdot \sin \alpha = \begin{cases} 0 \text{ ou } (2k+1) \frac{\lambda}{2} & \text{interférence constructive} \\ 2k \cdot \frac{\lambda}{2} & \text{interférence destructive} \end{cases}$$

$\Delta s$  différence de marche  
 $\ell$  largeur de la fente  
 $\alpha$  angle de diffraction  
 $k = 1, 2, 3, \dots$

### Fente double

(W3) 
$$\Delta s = g \cdot \sin \alpha = \begin{cases} 2k \cdot \frac{\lambda}{2} & \text{interférence constructive} \\ (2k+1) \frac{\lambda}{2} & \text{interférence destructive} \end{cases}$$

$\Delta s$  différence de marche  
 $g$  espace entre les deux fentes  
 $\alpha$  angle de diffraction  
 $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

### Réseau optique

(W4) 
$$\Delta s = g \cdot \sin \alpha = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{interférence constructive}$$

$\Delta s$  différence de marche  
 $g$  pas du réseau  
 $\alpha$  angle de diffraction  
 $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

## Exercices

- 1) Une fente simple a une largeur de 0,2 mm. Elle est éclairée avec de la lumière cohérente et parallèle. L'écran se trouve à une distance de 4 m de la fente. Les deux maxima en intensité du 2<sup>e</sup> ordre sont espacés de 5,6 cm. Calculez la longueur d'onde de la lumière ! [560 nm]
- 2) Une fente simple de 0,4 mm est éclairée par de la lumière monochromatique parallèle. L'écran se trouve derrière la fente à une distance de 3,20 m.
  - a) Calculez la longueur d'onde de la lumière si les deux franges sombres au milieu sont espacées de 8,6 mm. [537,5 nm]
  - b) Comment est-ce qu'une réduction de la largeur de la fente à seulement 0,2 mm se manifeste si la longueur d'onde reste la même ? [La distance entre les franges sombres est doublée.]
- 3) Des ondes lumineuses planes tombent sur une fente double. Les fentes sont espacées de 0,1 mm. On observe les franges d'interférence sur un mur à 5 m derrière la fente double. La distance entre deux franges voisines vaut 3,25 cm. Calculez la longueur d'onde de la lumière. [650 nm]
- 4) Un faisceau lumineux (longueur d'onde : 600 nm) est dirigé sur une fente simple d'une largeur de 0,4 mm.
  - a) Sous quel angle de diffraction le premier maximum en intensité apparaît-il, hormis la frange centrale ? [0,129°]
  - b) Qu'est-ce que l'on observe dans cette direction, si l'on masque avec un cache :
    - un tiers latéral de la fente ? [fente plus étroite : frange sombre]
    - le tiers central de la fente ? [fente double : frange claire]
- 5) Des ondes lumineuses tombent sur un réseau optique (pas du réseau  $g = 0,01$  mm).
  - a) Quel angle de diffraction obtient-on pour le maximum en intensité du 1<sup>er</sup> ordre avec la lumière rouge ( $\lambda = 700$  nm) et avec la lumière violette ( $\lambda = 400$  nm) ? [4,0° resp. 2,3°]
  - b) Est-ce qu'une couleur spectrale d'un maximum du 1<sup>er</sup> ordre peut être superposée avec une couleur spectrale d'un maximum du 2<sup>e</sup> ordre ? Justifiez votre réponse ! [les spectres se touchent : rouge à 760 nm avec violet à 380 nm]
- 6) Une lumière jaune de  $\lambda = 600$  nm tombe sur un réseau optique. La figure de diffraction est observée sur un écran situé à 2 m derrière le réseau. Le maximum en intensité du second ordre est espacé du maximum d'ordre 0 de 24 cm. Quel est le pas du réseau ? [0,01 mm]
- 7) Le spectre continu et visible du premier ordre d'une lampe à arc s'étend de 380 nm jusqu'à 780 nm. C'est un réseau optique avec un pas de 10  $\mu$ m qui produit le spectre. À quelle distance du réseau faut-il placer l'écran pour que le spectre ait une largeur de 12 cm ? [3 m]
- 8) La ligne 579 nm d'une lampe à vapeur de mercure est observée à travers un réseau optique avec 500 traits par mm. La distance entre le réseau optique et l'écran mesure 0,80 m.
  - a) Quel est l'ordre maximal des franges visibles sur l'écran ? [3<sup>e</sup> ordre]
  - b) Calculez la distance entre les franges du 1<sup>er</sup> et du 3<sup>e</sup> ordre. [116 cm]
- 9) Une lampe à arc émet une lumière blanche avec des longueurs d'onde entre 400 nm et 750 nm. La lumière tombe sur un réseau optique avec 500 traits par mm.
  - a) Calculez la longueur d'onde dans le spectre du 3<sup>e</sup> ordre à l'endroit où le spectre du 2<sup>e</sup> ordre finit. [500 nm]
  - b) Quelle largeur le spectre du 2<sup>e</sup> ordre a-t-il sur un écran situé à 1,80 m ? [125 cm]
  - c) Est-ce que le spectre du 3<sup>e</sup> ordre peut être capté complètement sur l'écran ? Justifiez votre réponse. [Non, la longueur d'onde limite vaut 667 nm]

10) L'indice de réfraction de l'eau vaut  $4/3$  et celui du verre  $3/2$ .

a) Complétez le tableau suivant !

Couleurs	rouge	jaune	vert	violet
$\lambda$ dans l'air	700 nm	600 nm	500 nm	400 nm
$\lambda$ dans l'eau				
$\lambda$ dans le verre				

[eau : 525 nm ; 450 nm ; 375 nm ; 300 nm ; verre : 467 nm ; 400 nm ; 333 nm ; 267 nm]

b) Quelle est l'épaisseur d'une couche d'air respectivement d'une lame de verre, si le jaune est annihilé par interférence sous une observation par réflexion lors d'une incidence perpendiculaire de la lumière? La couche d'air est entourée de verre. [ $d_{\text{air}} = 300 \text{ nm}$  ;  $d_{\text{verre}} = 200 \text{ nm}$ ]

11) Un film de savon avec un indice de réfraction  $n = 4/3$  est éclairé avec de la lumière jaune. La longueur d'onde de la lumière mesurée dans le vide  $\lambda = 540 \text{ nm}$ . Quelle doit être l'épaisseur minimale du film de savon pour que la lumière réfléchie soit renforcée par interférence ? [101 nm]

12) Un verre chromatique de Newton a un rayon de courbure de 15 m. Dans la lumière réfléchie, le rayon du dixième anneau sombre mesure  $r = 10 \text{ mm}$ .  
 a) Quelle est la longueur d'onde de la lumière utilisée ? [667 nm]  
 b) Quel rayon le même anneau aura-t-il, si le verre chromatique est rempli d'eau ? [8,66 mm]

13) Un fil très mince en quartz se trouve sur un miroir plan. Ensuite, on pose une plaque de verre à faces parallèles sur le fil de façon qu'elle touche le miroir à 10 cm du fil. Le dispositif est éclairé perpendiculairement avec de la lumière de sodium ( $\lambda = 589 \text{ nm}$ ).  
 a) Quelle est l'épaisseur du fil de quartz, si l'on décèle entre le fil et le point de contact de la plaque 20 franges sombres ? [5,89  $\mu\text{m}$ ]  
 b) Combien de franges compterait-on, si le dispositif était éclairé avec de la lumière bleue ( $\lambda = 480 \text{ nm}$ ) ? [ $k = 25$ ]  
 c) Est-ce qu'à l'extrémité du coin d'air, au point où la plaque touche le miroir, il y a une frange sombre ou une frange claire ? [une frange sombre]

14) Un film de savon a une épaisseur de  $0,6 \mu\text{m}$ . Son indice de réfraction vaut 1,33. Le film est éclairé perpendiculairement avec de la lumière blanche.  
 a) Quelles longueurs d'onde du spectre visible (400 nm – 800 nm) sont annihilées par interférence dans la lumière réfléchie ? [798 nm ; 532 nm]  
 b) Quelles longueurs d'onde du spectre visible (400 nm – 800 nm) sont annihilées par interférence dans la lumière transmise ? [638 nm ; 456 nm]

15) Une fine couche antireflet, déposée sur un verre correcteur d'une paire de lunettes, est constituée d'un matériau avec un indice de réfraction de 1,24, tandis que le verre a un indice de réfraction de 1,50. Calculez l'épaisseur minimale de cette couche pour que la longueur d'onde de 560 nm soit annihilée par interférence dans la lumière réfléchie. On suppose une incidence perpendiculaire de la lumière. [0,113  $\mu\text{m}$ ]