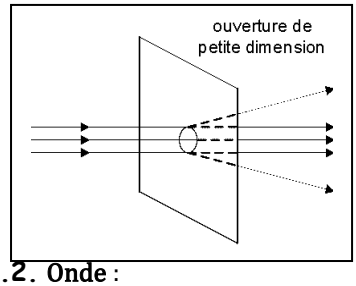
INTERFERENCES LUMINEUSES

I. GENERALITES SUR LES ONDES

L'optique est la branche de la physique qui étudie la lumière et ses relations avec la vision.
L'optique géométrique propose une analyse de la propagation de la lumière basée sur des principes simples : la propagation rectiligne et le retour inverse. Elle a pu expliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction.

I.1. Insuffisance de l'optique géométrique



Les rayons lumineux sont déviés lors du passage par l'ouverture : l'optique géométrique (propagation en ligne droite ...) n'explique pas ce phénomène $\Rightarrow$ optique ondulatoire.

I.2. Onde :

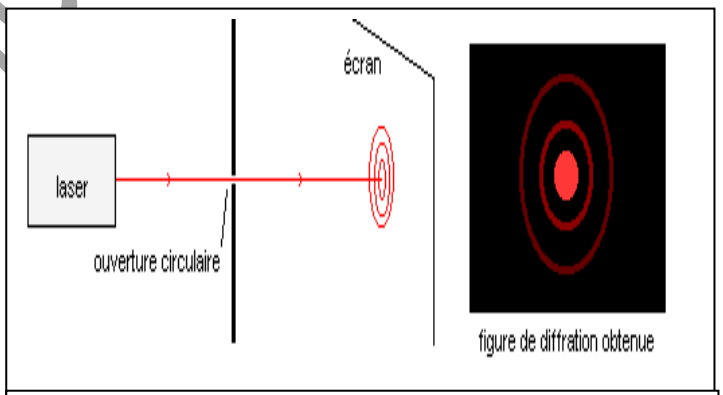
Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu. Elle se déplace avec une vitesse déterminée, appelée célérité C , qui dépend des caractéristiques du milieu de propagation. Une onde transporte de l'énergie sans transporter de la matière.
L'onde présente une double périodicité: une périodicité temporelle T(s) et une périodicité spatiale λ appelée longueur d'onde (en mètres).

La fréquence de l'onde est associée à sa période : $\nu = \frac{1}{T}$ en hertz(Hz=s^{-1}). La longueur d'onde λ étant la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à sa période ; si C est la célérité de l'onde alors $C = \frac{\lambda}{T}, avec\, \nu = \frac{1}{T}$ et $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

II. MISE EN EVIDENCE DE LA DIFFRACTION DE LA LUMIERE:

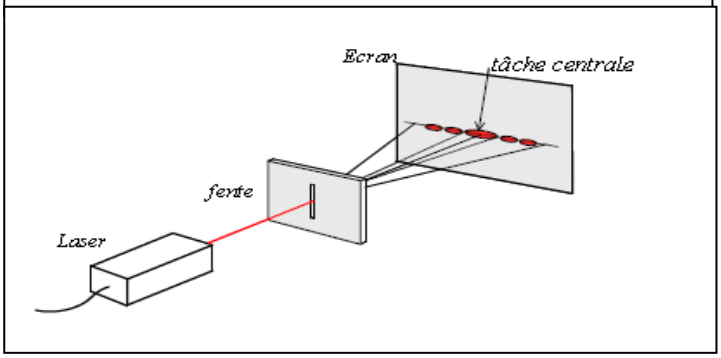
a. Diffraction par une ouverture circulaire

On éclaire un écran percé de trous de diamètres de plus en plus petits : (1,0 mm; 0,5 mm; 0,2 mm) avec un faisceau de lumière émis par un LASER.
On observe sur l'écran une figure de diffraction. Ce phénomène se produit lorsque l'ouverture par la quelle passe la lumière est de petite taille. On dit que l'ouverture a diffracté la lumière du laser.



b. Diffraction par une fente

Renouvelons l'expérience précédente en utilisant cette fois une mince fente disposée verticalement sur le trajet du rayon laser. La figure de diffraction est formée d'une tache centrale brillante et de part et d'autres, dans une direction perpendiculaire à l'axe de la fente, des taches plus petites et moins lumineuses.



Plus l'ouverture est petite, plus le phénomène de diffraction est marqué. L'étendue de la tache de diffraction augmente quand :

- **l'ouverture de la fente diminue ;**
- **la longueur d'onde de la lumière est plus grande.**

D'une façon générale le phénomène de diffraction devient notable quand la lumière rencontre des ouvertures dont les dimensions sont inférieures ou du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

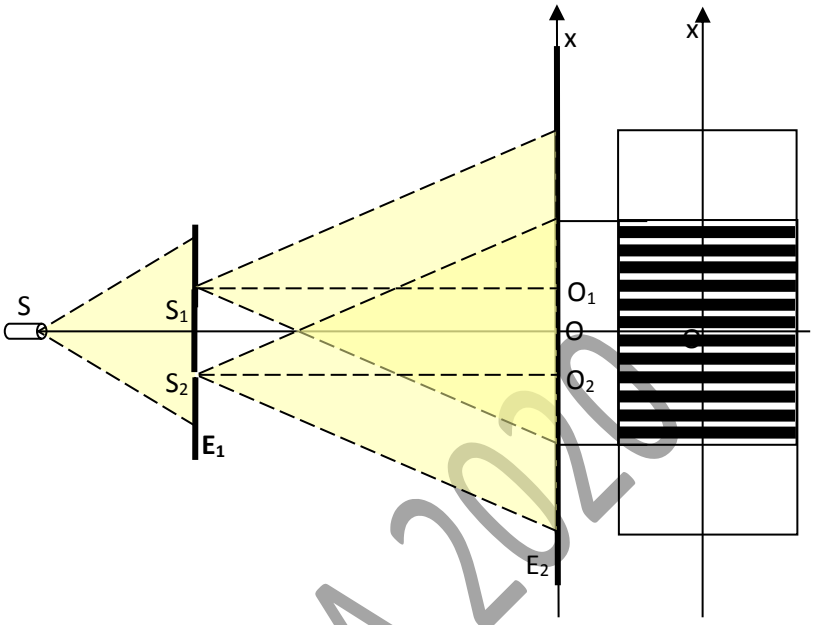
Le phénomène de diffraction met en défaut le principe de propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène.

COLLECTION MOBAMA 2023

III. EXPERIENCE DE YOUNG

1. Montage expérimental

Une lampe émettant une lumière monochromatique éclaire une fente S horizontale devant laquelle est placé un écran vertical E_1 comportant deux fentes très fines et horizontales S_1 et S_2 distantes de quelques millimètres, disposées symétriquement par rapport à S. Un écran E_2 placé à une distance (D) des deux fentes permet de recueillir les faisceaux issus de S_1 et S_2.



2. Observations :

Sur l'écran E_2 on observe trois zones :

- une zone éclairée par le faisceau issu de S_1;
- une zone éclairée par le faisceau issu de S_2;
- une zone communément éclairée par les deux faisceaux, appelée zone d'interférence

ou champ interférentiel qui présente des bandes sombres (obscures) et des bandes claires (brillantes). Ces bandes sont appelées franges d'interférences.

Sur un écran E_2 placé dans la zone où les faisceaux lumineux issus de S_1 et S_2 se recouvrent, on observe des bandes ou raies alternativement claires et sombres disposées perpendiculairement au plan contenant (S_1, S_2 , S_3). Ces bandes sont appelées franges d'interférences (franges alternativement brillantes et sombres) : Ce sont des franges d'interférences.

La question qu'on se pose alors est comment peut-on obtenir sur la zone d'interférence des franges sombres ?

L'explication de ce phénomène a été donnée successivement par Young (1804) et par Fresnel (1815) grâce à la théorie ondulatoire de la lumière.

Le phénomène d'interférence de la lumière est une manifestation du caractère ondulatoire de la lumière

3. Interprétation du phénomène d'interférences

Un point M quelconque de la zone d'interférence reçoit une lumière issue de S_1et en même temps une lumière issue de S_2. Mais selon la position de ce point M sur la zone d'interférence, il peut se trouver sur une frange claire ou sur une frange sombre.

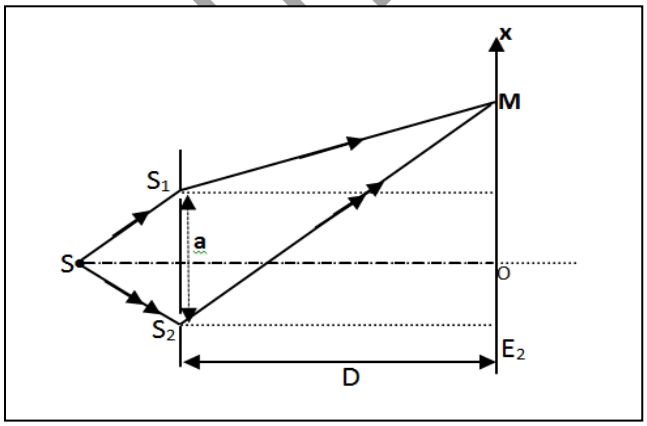
IV. Etude quantitative des interférences lumineuses

1. Différence de marche

Reprenons l'expérience des fentes d'Young. La lumière émise par la source S est diffractée suivant deux faisceaux par les fentes S_1 et S_2. Celles-ci se comportent donc comme deux sources émettant des radiations lumineuses de longueurs d'onde rigoureusement identiques. Une partie de l'écran d'observation reçoit donc deux ondes lumineuses : l'une issue de S_1, et l'autre de S_2. On dit que cette partie de l'écran est dans le champ d'interférences.

On considère un point M de la zone d'interférence ; le rayon lumineux issu de S_1 parcourt le chemin $S_1M=d_1$ plus court que le chemin $S_2M=d_2$ parcouru par le rayon lumineux issu de S_2.

On appelle différence de marche, la différence des deux distances d_1 et d_2 notée $\delta = d_2 - d_1$.



$d_1^2 = S_1M^2 = D^2 + (x - \frac{a}{2})^2$ et $d_2^2 = S_2M^2 = D^2 + (x + \frac{a}{2})^2 \Rightarrow d_2^2 - d_1^2 = 2.a.x$

$\Rightarrow (d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = 2.a.x$

Approximation: $a \ll D \Rightarrow (d_2 + d_1) \approx 2.D \Rightarrow (d_2 - d_1).2.D = 2.a.x$

$\Rightarrow d_2 - d_1 = \frac{a.x}{D}$

Différence de marche $\delta = \frac{a.x}{D}$

SELECTION MOBAMA 2020

2. Composition de deux vibrations sinusoïdales de même fréquence

En M, il y a superposition de deux vibrations de même fréquence issues de S_1et S_2 notées

$y_1(S_1,t) = A\cos(\omega t)\ et\ \ y_2(S_2,t) = A\cos(\omega t)$ qui y parviennent avec des retards respectifs

$\Delta t_1 = d_1/C\ \ et\ \Delta t_2 = d_2/C$ et deviennent $y_1(M,t) = A\cos[\omega(t-\Delta t_1)] et\ \ y_2(M,t) = A\cos[\omega(t-\Delta t_2)]$.

Le principe de superposition des deux vibrations donne une vibration résultante telle que :

$y(M,t) = y_1(M,t) + y_2(M,t) = A\cos[\omega(t-d_1/C)] + A\cos[\omega(t-d_2/C)]$. A l'aide des formules de transformation trigonométriques, on obtient : $y(M,t) = 2A\cos\left[\frac{\omega}{2C}(d_2-d_1)\right].\cos\left[\omega(t-\frac{d_1+d_2}{2C})\right]$ qui est une fonction sinusoïdale d'amplitude $Y_m = 2A\cos\left[\frac{\omega}{2C}(d_2-d_1)\right]$ or $\frac{\omega}{2C} = \frac{\pi N}{C} = \frac{\pi}{\lambda} \Rightarrow$ $\boxed{Y_m = 2A\cos\left[\frac{\pi}{\lambda}(d_2-d_1)\right]}$ qui dépend de λ et de $\delta = d_2 - d_1$.

➢ Si les deux vibrations arrivant en M **ajoutent** leurs effets, elles sont dites en phase, et l'éclairement résultant au point M a donc une amplitude maximale : $\cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(d_2-d_1)\right) = \pm 1$; on parle alors d'interférence constructive ; le point M est alors sur une frange claire.

➢ $\cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(d_2-d_1)\right) = \pm 1 \ \Rightarrow\ \frac{\pi}{\lambda}\delta = K\pi \Rightarrow \mathbf{\delta = K\lambda}$ **: la différence de marche est égale à un nombre entier de longueurs d'onde de la lumière utilisée.**

➢ Si les deux vibrations arrivant en M **détruisent** leurs effets, elles sont dites en opposition de phase, et l'éclairement résultant au point M a une amplitude minimale : $\cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(d_2-d_1)\right) = 0$, on parle alors d'interférence destructive ; le point M est alors sur une frange sombre.

$\cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(d_2-d_1)\right) = 0 \Rightarrow\ \frac{\pi}{\lambda}\delta = (2K+1)\frac{\pi}{2} \Rightarrow \mathbf{\delta = (2K+1)\frac{\lambda}{2}}$ **: la différence de marche est égale à un nombre impair de demi-longueur d'onde de la lumière utilisée**

Intensité lumineuse : l'intensité lumineuse qui est la grandeur à laquelle l'œil est sensible est proportionnelle au carré de l'amplitude de la vibration résultante en M ; on la note en général **I** et s'exprime watt/m^2.

$$I = y_m^2 = \left[2A\cos\left[\frac{\pi}{\lambda}(d_2-d_1)\right]\right]^2 = I_0\cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}(d_2-d_1)\right)\ avec\ I_0 = 4A^2.$$

Si les deux vibrations arrivant en M ajoutent leurs effets, elles sont en phase, et l'éclairement résultant au point M est donc maximum on parle d'interférence constructive : la différence de marche est égale à un nombre entier de longueurs d'onde de la lumière utilisée.

Interférence constructive ⇒ frange claire ⇒ δ = K.λ avec K ∈ Z

Si les deux vibrations arrivant en M détruisent leurs effets; elles sont en opposition de phase, et l'éclairement résultant au point M est donc minimum on parle d'interférence destructive : la différence de marche est égale à un nombre impair de demi-longueur d'onde de la lumière utilisée

Interférence destructive ⇒ frange sombre ⇒ δ = (2.K−1). $\frac{\lambda}{2}$ K ∈ Z

3. POSITIONS DES FRANGES – INTERFRANGE – ORDRE D'INTERFERENCE

COLLECTION MOBAMA 2020

a. **Positions des franges**

Franges claires : $\delta = \frac{a.x}{D}$ et $\delta = K.\lambda \Rightarrow \boxed{x = K.\frac{\lambda.D}{a} \quad \text{avec } K \in Z}$

K=0 frange centrale brillante
K=1 première frange brillante après la frange centrale.
K=2 deuxième frange brillante…….

Franges sombres : $\delta = \frac{a.x}{D}$ et $\delta = (2.K+1).\frac{\lambda}{2} \Rightarrow \boxed{x = (K+\frac{1}{2}).\frac{\lambda.D}{a} \quad \text{avec } K \in Z}$

K=0 première frange sombre
K=1 deuxième frange sombre

Remarque : $\delta = (2.K-1).\frac{\lambda}{2} \Rightarrow \boxed{x = (K-\frac{1}{2}).\frac{\lambda.D}{a} \quad \text{avec } K \in Z}$

K=1 première frange sombre
K=2 deuxième frange sombre

b. **Interfrange i :**

L'interfrange i est la distance qui sépare les milieux de deux franges consécutives brillantes ou deux franges consécutives obscures : $i = X_{K+1} - X_k = (K+1).\frac{\lambda.D}{a} - K.\frac{\lambda.D}{a} \Rightarrow \boxed{i = \frac{\lambda.D}{a}}$

Elle dépend de a, D et de la longueur d'onde de la radiation.

Remarque : frange claire : $x = K.i$

frange sombre : $x = (K+\frac{1}{2}).i$

c. **Ordre d'interférence p :**

C'est un nombre qui nous permet de connaitre la nature (obscure ou brillante) d'une frange : $\boxed{P = \frac{x}{i} = \frac{\delta}{\lambda}}$

Si p est entier relatif alors la frange correspondante est brillante.

Si p est un demi-entier relatif alors la frange correspondante est sombre.

4. <u>Interfrange</u> :

L'interfrange i est la distance qui sépare les milieux de deux franges consécutives brillantes ou deux franges consécutives obscures.

Considérons la frange brillante numéro k et la frange brillante suivante, consécutive de numéro k+1 **ou bien** la frange sombre numéro $k+\frac{1}{2}$ et la frange sombre suivante, consécutive numéro $k+\frac{1}{2}+1$;

on note $i = X_{K+1} - X_k = (K+1).\frac{\lambda.D}{a} - K.\frac{\lambda.D}{a}$ On trouve : $\boxed{i = \frac{\lambda D}{a}}$.

On remarque que les milieux des franges brillantes se trouvent de part et d'autre du milieu de la frange centrale d'abscisse x=0, à des distances $\frac{\lambda D}{a}, \frac{2\lambda D}{a}, \frac{3\lambda D}{a}$,…… ……; et les franges sombres à des distances $\frac{\lambda D}{2a}, \frac{3\lambda D}{2a}, \frac{5\lambda D}{2a}$,……

5. <u>Ordre d'interférence</u> :

C'est le nombre p qui nous permet de connaitre la nature (obscure ou brillante) d'une frange : $\boxed{P = \frac{x}{i} = \frac{\delta}{\lambda}}$

Si p est entier relatif alors la frange correspondante est brillante.

Si p est un demi-entier relatif alors la frange correspondante est sombre.
La valeur de p nous renseigne sur le numéro de la frange considérée, comptée à partir de la frange centrale pour laquelle son numéro p=0 et pour x=0.

- Si p est entier relatif $(p = k)$ on a la $k^{ième}$ frange brillante après la frange centrale.
- Si p est un demi-entier relatif $(p = k + \frac{1}{2})$ on a la $(k-1)^{ième}$ frange sombre après la frange centrale.

<u>IV .Interférence en lumière polychromatique</u>

<u>Lumière monochromatique</u> : On appelle lumière monochromatique une onde électromagnétique progressive sinusoïdale de fréquence donnée. La couleur de cette radiation est liée à la valeur de sa fréquence.

<u>Lumière visible</u> : on appelle lumière visible une onde électromagnétique visible par l'œil humain. Les longueurs d'ondes de la lumière visible sont comprises entre 400 nm et 800 nm.

<u>Lumière polychromatique</u> : on appelle lumière polychromatique une lumière composée de plusieurs ondes monochromatiques de fréquences différentes (la lumière blanche, par exemple, est une lumière polychromatique).

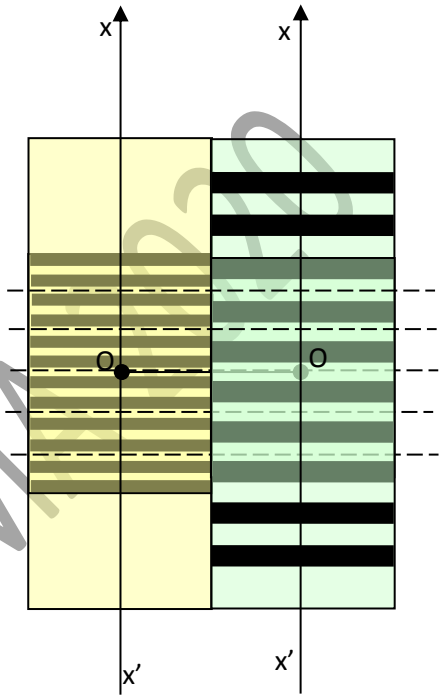
1. <u>Interférence en lumière dichromatique :</u>

COLLECTION MOBAMA 2020

Considérons maintenant une source S de lumière dichromatique constituée des longueurs d'onde λ_1 et λ_2 qui éclaire les deux sources S_1 et S_2 simultanément. Chaque longueur d'onde provoque un système d'interférence ; nous constatons que les franges centrales brillantes des deux systèmes coïncident d'abord au centre de l'écran et cette coïncidence se répète périodiquement de part et d'autre du centre de l'écran (voir figure suivante).

Ceci se traduit par la relation : $x_{k_1} = x_{k_2} \Leftrightarrow k_1 \frac{\lambda_1 D}{a} = k_2 \frac{\lambda_2 D}{a} \Rightarrow \frac{k_1}{k_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{n_2}{n_1}$

Ce rapport irréductible permet de trouver les numéros $k_1=n_2$ et $k_2=n_1$ des franges claires des deux longueurs d'onde qui se superposent. Cette superposition se répète périodiquement dans toute la zone d'interférence.



6. Interférence en lumière blanche (lumière polychromatique)

La figure d'interférence présente :

- Au centre de l'écran(E), une frange centrale brillante blanche.
- De part et d'autre de celle-ci, on observe des franges aux bords colorés dites franges irisées.
- Enfin, plus loin d'elle, une coloration uniforme blanchâtre pour les franges brillantes : coloration appelée blanc d'ordre supérieure.

Explication :

✓ La frange centrale est une superposition de toutes les vibrations monochromatiques de la lumière. Chaque radiation de longueur d'onde λ produisant son phénomène d'interférence lumineuse constructive.

✓ Les franges irisées résultent de la superposition des figures d'interférences lumineuse propres à chaque longueur d'onde λ. Les interfranges étant différents, les franges ne se superposent pas exactement d'où leur irisation. L'apparition du blanc d'ordre supérieur est le résultat des interférences constructives propres à chaque longueur d'onde mais certaines radiations manquent en ces points.

7. Conditions d'interférence

Dans l'expérience des fentes d'Young, les deux fentes sources S_1 S_2 sont éclairées par la même source de lumière S monochromatique. Si l'on tente l'expérience en utilisant deux sources de lumière indépendantes, on n'observe plus de phénomène d'interférences; l'éclairement de l'écran d'observation est quasiment uniforme : il résulte de la somme des éclairements dus aux deux sources considérées séparément. On dit que les deux sources indépendantes ne sont pas cohérentes. Pour que deux sources soient cohérentes, il est nécessaire qu'elles aient rigoureusement la même fréquence ; de plus, elles doivent être synchrones, c'est-à-dire conserver un déphasage constant au cours du temps.

En optique, cette condition n'est satisfaite que si l'on utilise certains LASERS ou une source unique dédoublée optiquement. Cette condition est donc satisfaite dans le dispositif des fentes d'Young.

CONCLUSION

- **Les interférences sont utilisées dans divers domaines :**

l'holographie permet de créer des tableaux en trois dimensions, mais bientôt va permettre de stocker des informations sous forme d'images optiques en trois dimensions, ce qui permettra d'utiliser le support dans son épaisseur.

- **la mesure avec la détermination d'épaisseur de surface.**
- **La construction avec la mise au point de réseau par transmission et de couches anti-reflets**

La meilleure source lumineuse pour obtenir des interférences est le laser, cette source respectant des règles de cohérence.

Une conséquence importante du phénomène de diffraction est la limitation du pouvoir de résolution des instruments optiques, en particulier du microscope. L'intérêt du microscope électronique dans lequel sont mis en jeu des faisceaux d'électrons, est justement d'utiliser des phénomènes ayant des longueurs d'onde beaucoup plus courtes, ce qui permet une plus grande résolution. C'est par l'interprétation des figures de diffraction que nous connaissons les structures cristallines. Compte tenu des distances entre les plans atomiques (de l'ordre de 0,1 nm), les ondes électromagnétiques efficacement diffractées par les cristaux seront les rayons X, dont les longueurs d'onde sont de l'ordre de 1 nm à 10^{-2} nm

COLLECTION MOBAM