

P4 Etude expérimentale sur les interférences lumineuses

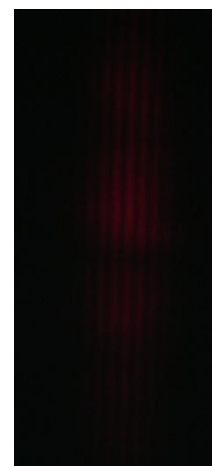
La lumière est une onde électromagnétique. Deux ondes sont à même d'interagir en se sommant. Dans certains cas particuliers, notamment pour deux rayons issus d'une même source (et ayant donc la même pulsation) mais étant déphasés l'un par rapport à l'autre, ces interactions peuvent résulter en un phénomène d'interférences.

Lors de ce montage, les conditions d'obtention de ces interférences seront étudiées au travers d'expériences utilisant les fentes d'Young et d'autres interféromètres connus.

1. LES FENTES D'YOUNG

1.1. OBSERVATION DU PHENOMENE

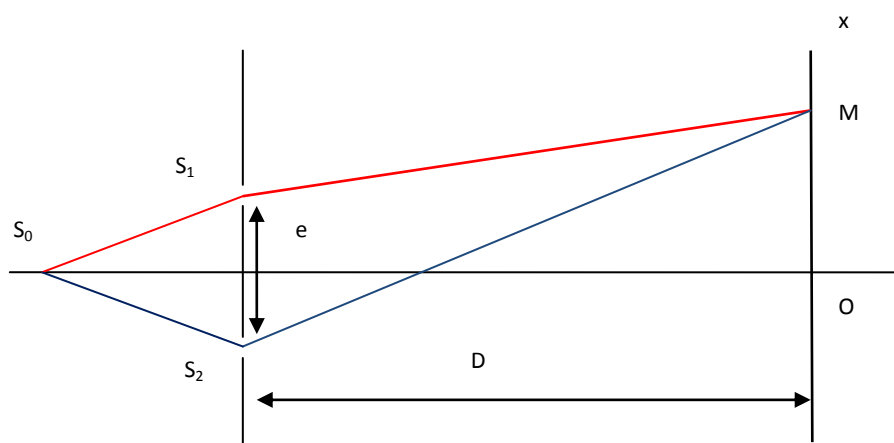
Les fentes d'Young sont deux fentes sur un écran espacées d'une distance e et de largeur a . Dans un premier temps, on observe la figure obtenue à l'infini à partir du faisceau LASER (lumière cohérente) rendu divergent par une lentille de très courte focale (5mm) à la suite de laquelle on place les fentes d'Young.



On obtient la figure d'interférence que observée sur un écran à bonne distance. On observe une succession régulière de franges sombres et claires. Il s'agit d'un phénomène d'interférences.

Selon le principe d'Huygens-Fresnel, les deux fentes se comportent alors comme deux sources de lumière cohérente S_1 et S_2 de même longueur d'onde λ .

Au point $M(x)$ situé sur un écran à distance D , la différence de marche entre les deux ondes est $\delta = \frac{ex}{D}$.

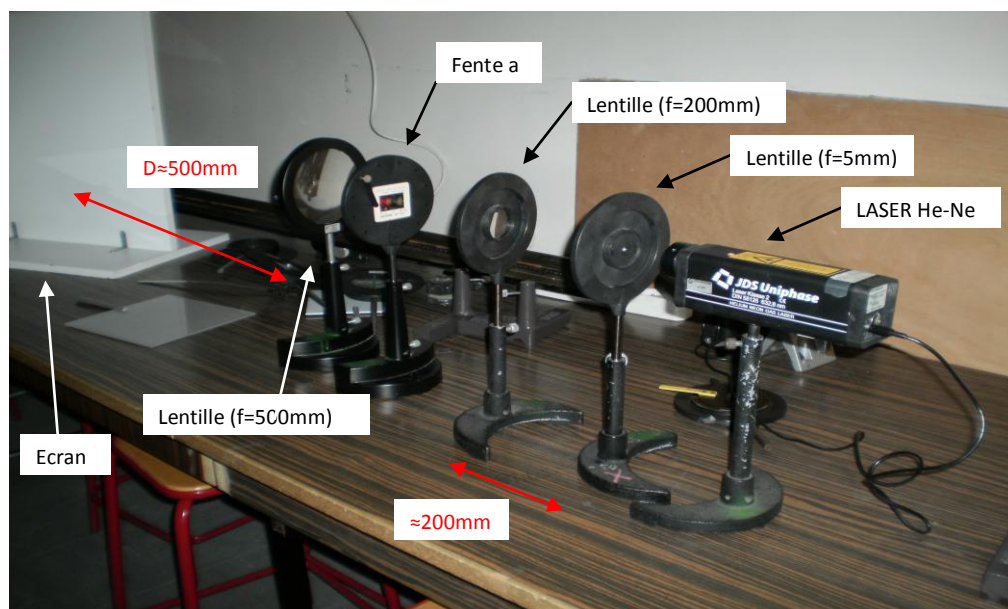


Les franges claires sont lieu d'interférences constructives où les rayonnements des deux sources sont en phases ($\delta = k\lambda$). Inversement les interférences sont destructives au niveau des franges sombres car les rayonnements sont en opposition de phase ($\delta = (k + \frac{1}{2})\lambda$).

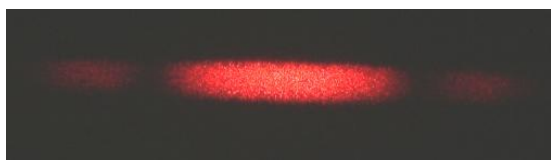
Ceci conduit à une largeur d'interfrange $i = \frac{\lambda D}{e}$.

1.2. DIFFRACTION

On se place à présent dans le cas d'un faisceau parallèle (opération nécessaire si l'on veut observer une diffraction). Pour ce faire, on place une lentille de focale plus importante (200mm) après celle qui sert à faire diverger le faisceau laser (5mm). En espaçant les deux lentilles de la somme de leurs focales, on obtient le faisceau parallèle désiré.



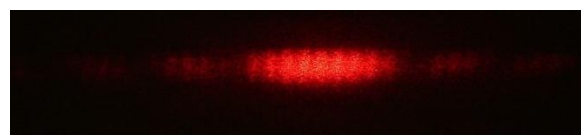
Sur le trajet du faisceau, on place tout d'abord une fente unique. Le phénomène de diffraction se produit lorsque la largeur de la fente est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du rayonnement incident. La figure de diffraction est alors rejetée à l'infini et on utilise pour la visualiser une autre lentille permettant sa projection dans le plan focal objet.



Sans rentrer dans les détails, on dira que la largeur de la tâche centrale (distance entre le milieu des deux premières franges sombres) est telle que $l = 2 \frac{\lambda D}{a}$.

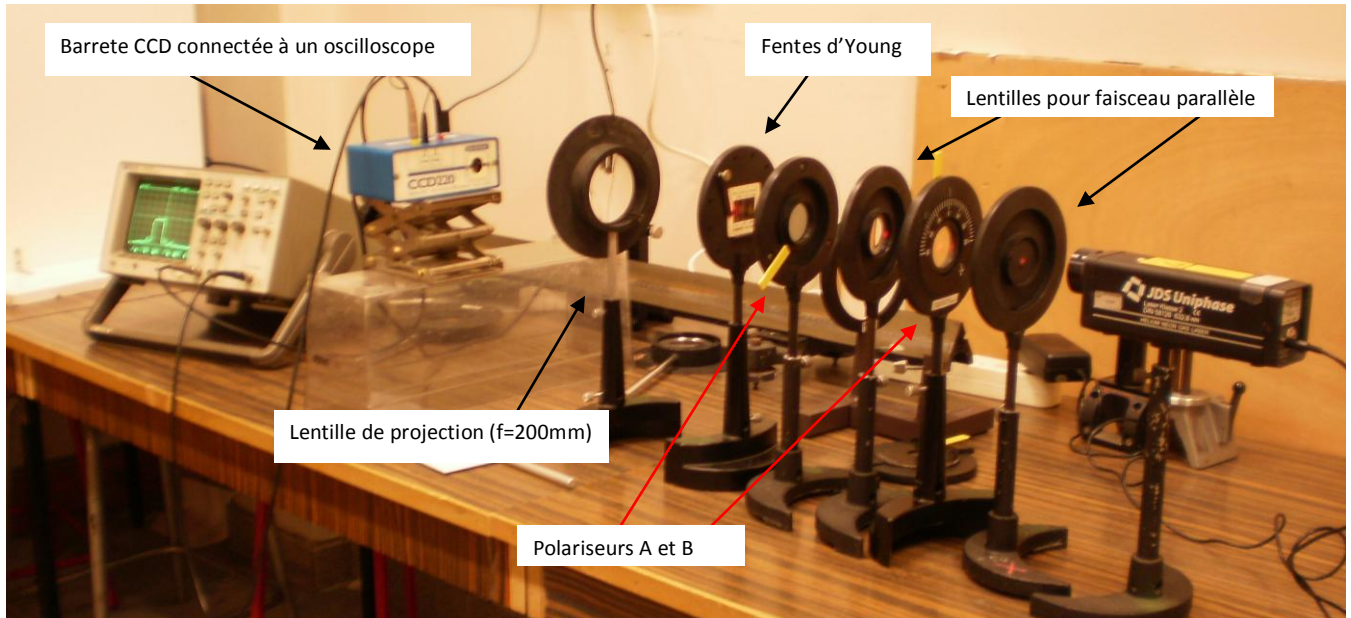
1.3. ETUDE SUR BARRETTE CCD

On remplace, dans le montage précédent, la fente simple par les fentes d'Young ayant déjà servies dans l'expérience précédente. On observe que la figure de diffraction précédente est bien là mais qu'il y a en plus des franges



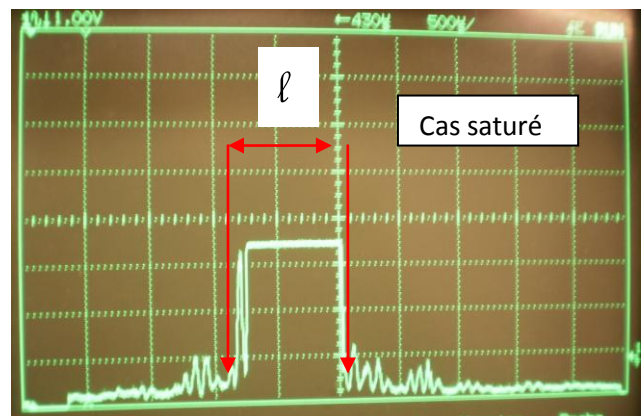
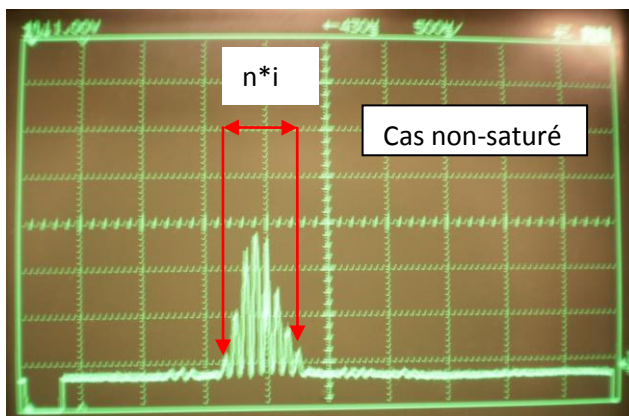
d'interférences dans les tâches de diffraction.

On se propose d'étudier la combinaison des deux phénomènes à l'aide d'une barrette CCD. Celle-ci est composée de nombreuses cellules CCD capable d'enregistrer le flux lumineux parvenant sur leur surface. Les cellules sont disposées en ligne et permettent donc une étude de l'intensité sur cet axe.



On remplace la lentille de projection par une de distance focale plus courte afin d'avoir une figure plus petite (200mm) tenant sur la longueur de la barrette. Le placement de la barrette CCD doit se faire le plus proche possible du plan focal objet de la lentille. Il faut aussi veiller à ce qu'elle soit correctement alignée avec la figure d'interférence.

Un oscilloscope est connecté au capteur et est synchronisé à celui-ci (external trigger). On peut ainsi afficher dans la base de temps le signal perçu par le capteur. Connaissant la taille de celui-ci (1,4336 cm) et la durée du signal (4590 μ s) on en tire par un simple produit en croix une estimation des distances entre les différentes parties de la figure.



Problème : Les capteurs CCD sont très facilement saturés. Pour éviter ce problème, on ajoute un couple de polariseurs afin de pouvoir régler l'intensité parvenant aux capteurs. Le réel problème repose dans la grande différence d'intensité entre la première tâche de diffraction et les secondes. Ainsi si on veut observer les interférences de la tâche centrale correctement, on ne verra pas les tâches secondaires. Inversement si on

étudie ces dernières, la tâche principale donne un signal saturé. Ceci implique deux études séparée (ou un meilleur capteur...).

Exploitation des résultats :

En premier lieu on a

$$l = \frac{880\mu s}{4590\mu s} * 1,4336cm = 2,75mm$$

Il faut aussi prendre en compte les incertitudes sur la mesure. La position des maxima n'est pas toujours évidente. On constate un écart possible :

$$\Delta l = \frac{90\mu s}{4590\mu s} * 1,4336cm = 0,3mm \quad \text{soit} \quad l = 2,8 \pm 0,3 mm$$

$$\text{dont on tire} \quad a = \frac{2\lambda D}{l} = \frac{2 * 632,8nm * 200mm}{2,8mm} = 92,1\mu m$$

$$\text{et} \quad \Delta a = a \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) \approx a \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta l}{l} \right) = 92,1\mu m * \left(\frac{5mm}{200mm} + \frac{0,3mm}{2,8mm} \right) = 10\mu m$$

$$\text{soit} \quad a = 90 \pm 10 \mu m$$

NB : Comme on peut le voir sur la photographie de l'oscilloscope, la mesure de la largeur de la tâche centrale est difficile et comporte d'importantes incertitudes. Ceci conduit à un valeur peu précise de la largeur a des fentes.

De même, on trouve aussi

$$i = \frac{1}{8} * \frac{670\mu s}{4590\mu s} * 1,4336cm = 262\mu m$$

$$\Delta i = \frac{1}{8} * \frac{10\mu s}{4590\mu s} * 1,4336cm = 4\mu m \quad \text{soit} \quad i = 262 \pm 4 \mu m$$

$$\text{dont on tire} \quad e = \frac{\lambda D}{i} = \frac{632,8nm * 200mm}{262\mu m} = 484\mu m$$

$$\text{et} \quad \Delta e = e \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) \approx e \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta i}{i} \right) = 484\mu m * \left(\frac{5mm}{200mm} + \frac{4\mu m}{262\mu m} \right) = 20\mu m$$

$$\text{soit} \quad e = 0,48 \pm 0,01 mm$$

Les valeurs réelles notées sur la diapositive support aux fentes sont a = 1mm et e = 0.5mm. Les valeurs sont au dessus des valeurs majorées expérimentales. On peut attribuer en partie ces écarts au fait que les diapositives des fentes d'Young sont endommagées et les valeurs indiquées probablement imprécises.

Cette expérience illustre l'une des utilisations possibles du phénomène d'interférences. En effet, à partir de matériel relativement simple, on est en mesure de déterminer avec précision des dimensions très petites. En envisageant d'autres types de rayonnements électromagnétiques (par exemples des rayons X) et des capteurs plus précis, on pourrait déterminer des dimensions de l'ordre de l'Angström (à l'échelle de l'atome).

2. NOTION DE COHERENCE

On travaille à présent avec une lampe quartz-iode équipée d'un condenseur afin d'éclairer les fentes d'Young. Contrairement au LASER, la source produit un très large faisceau divergent. Il faut donc placer une fente source réglable en sortie afin de pouvoir limiter sa taille. On s'arrange pour que le condenseur équipé sur la lampe focalise les rayons sur la fente. Ceci permet de conserver une intensité maximale. On place ensuite les fentes sur l'axe optique puis un écran. Il faut prendre soin de bien aligner l'axe de la fente source avec celui des fentes d'Young si l'on veut avoir une image bien nette.

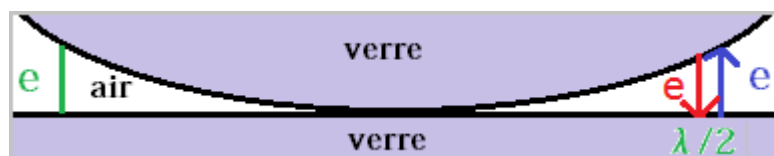
La lumière blanche est composée d'une infinité de radiations. Parmi celles-ci, les infrarouges sont dangereux pour le matériel optique car ils causent un échauffement. Il est donc impératif de munir la source d'un filtre anti-calorique éliminant ces radiations.

2.1. COHERENCE TEMPORELLE

On commence par observer la figure d'interférence en lumière blanche. Les interférences sont bien moins nettes que lorsque l'on utilisait la lumière monochromatique du LASER.

On s'aperçoit aussi que la première frange sombre est bordée de bleu à l'extérieur et de rouge à l'intérieur. Ceci est dû au fait que la position et la largeur des franges dépend de la longueur d'onde de la radiation considérée (cf les parties précédentes). Ainsi si un point de l'écran est lieu d'interférences destructives pour une longueur d'onde donnée, il ne l'est pas forcément pour les autres.

Le phénomène peut être observé encore plus clairement avec l'aide d'un autre interféromètre : les anneaux de Newton. Le système est constitué d'une lentille de verre dont la partie arrondie est en contact avec une surface plane du même matériau. Les rayons qui traversent le dioptre air/verre de la lentille sont partiellement réfléchis sur la surface plane et traversent à nouveau le dioptre interagissant alors avec les rayons réfléchis sur celui-ci. Il existe alors une différence de marche $d = 2e + \frac{\lambda}{2}$ (le terme $\frac{\lambda}{2}$ étant dû à la réflexion air/verre alors que la réflexion verre/air n'entraîne pas de différence de marche).



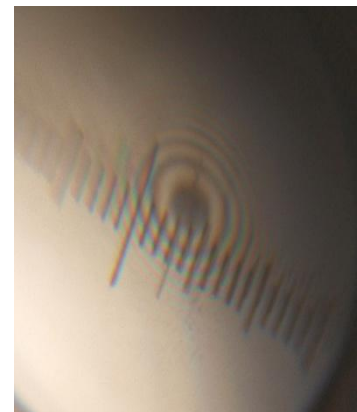
Le système a une symétrie de révolution. Ainsi les zones où la différence de marche est la même sont des cercles. Ceci explique l'observation d'anneaux d'interférence observables directement sur le système. On note que l'on peut changer le centre grâce à des vis changeant l'orientation de la lentille.



La particularité de ces interférences est dans le fait qu'elles sont localisées sur le système. Dans le cas des fentes d'Young, on pouvait les observer partout sur l'axe optique. Les observer sur un écran nécessite donc un système de projection. On utilise une lentille convergente ($f=125\text{mm}$) placée de manière à recueillir les rayons réfléchis sur la lentille.

Avec la lumière blanche, on observe une nouvelle fois les irisations dues à la cohérence temporelle. Plus on s'éloigne du centre et plus les décalages entre franges pour les différentes longueurs d'ondes sont importants. Les interférences se superposent et l'on ne les distingue plus. Il ne reste plus qu'une tâche blanchâtre que l'on qualifie de blanc d'ordre supérieur.

On parle de cohérence temporelle car celle-ci repose sur les longueurs d'ondes (et donc les pulsations) des radiations interagissant. Plus celles-ci sont nombreuses et moins il est aisé d'observer les interférences issues de deux sources (ou plus). On dit que la cohérence temporelle du rayonnement décroît.



Un autre exemple intéressant qui n'est pas abordé ici est celui du doublet jaune du Sodium. Son spectre comprend deux raies très proches ($589,00\text{nm}$ et $589,59\text{nm}$). Lorsque l'on étudie la figure d'interférence de cette lumière, on s'aperçoit que les interférences disparaissent à intervalles réguliers. On parle alors d'extinction. Cet intervalle est d'autant plus court que les longueurs d'ondes sont différentes.

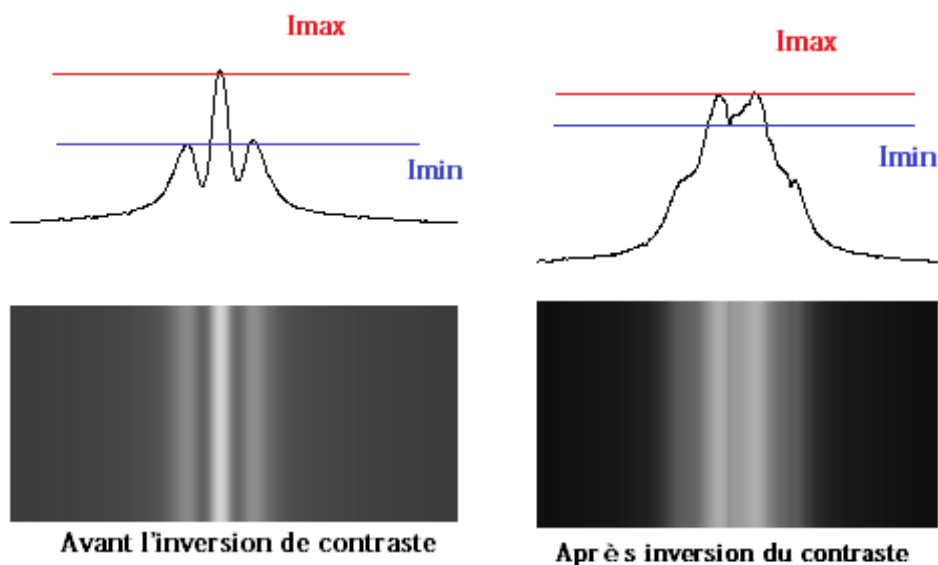
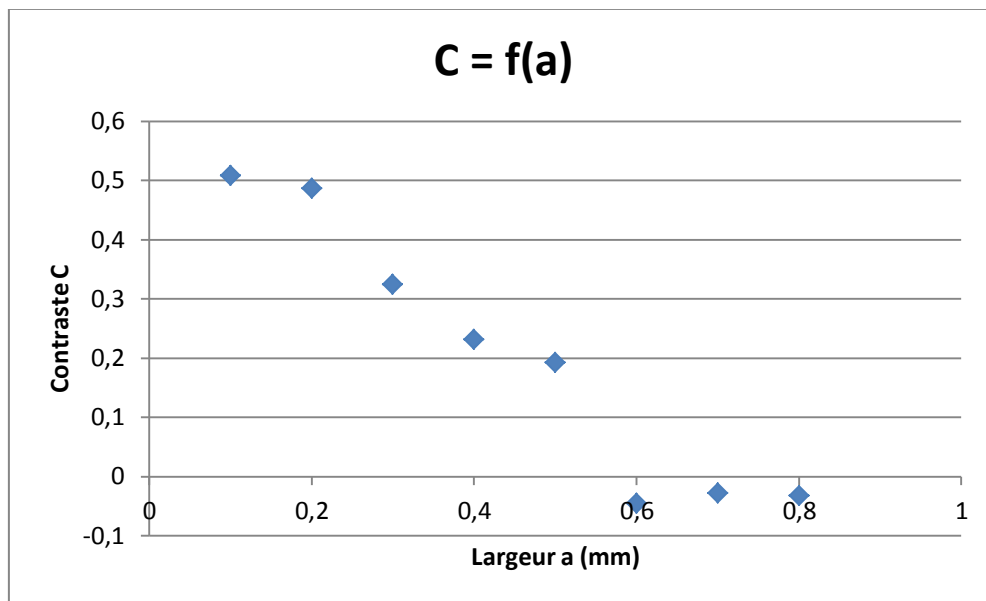
2.2. COHERENCE SPATIALE

Sur le montage des fentes d'Young en lumière blanche, on place un détecteur Caliens sur l'axe optique afin de visualiser la figure d'interférence. Le logiciel permet de mesurer l'intensité précisément du signal.

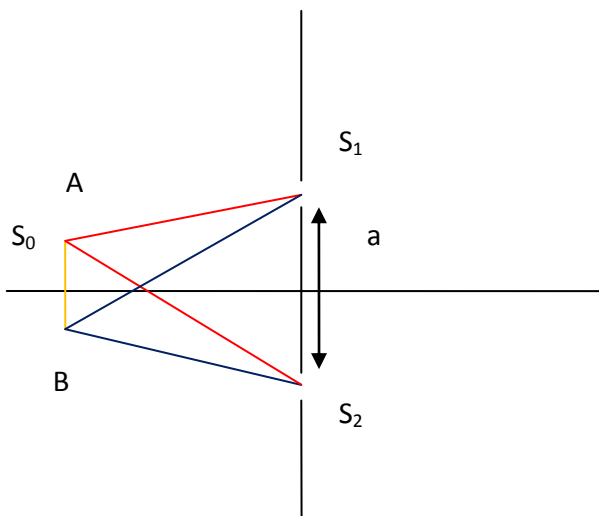
On définit le contraste d'une figure comme
$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Cette valeur illustre la capacité de discerner entre les franges sombres (I_{\min}) et les franges claires (I_{\max}).

Lorsque l'on augmente la largeur a de la fente source, on s'aperçoit que le contraste de la figure diminue puis éventuellement s'inverse. On se propose d'étudier ce phénomène avec le logiciel Caliens et une fente réglable dont on peut lire l'ouverture. On relève la valeur du contraste en fonction de a . On peut éviter un problème de saturation du détecteur en utilisant deux polarisateurs comme pour la plaque CCD précédente. En effet, lors de la mesure, c'est un rapport d'intensité que l'on calcule. On peut donc régler les polariseurs à notre guise.



Le principe des interférences des fentes d'Young repose sur le fait que les deux fentes jouent le rôle de sources identiques. Or plus la source s'élargie et plus il y aura de « points sources » engendrant de multiples différences de marches. On s'en aperçoit bien sur la figure ci-dessous : le rayon issu de A ne parcourt pas la même distance que celui issu de B pour atteindre la fente S_1 . La même chose vaut pour S_2 . Ceci équivaut au final à superposer plusieurs figures d'interférences différentes sur l'écran : le contraste diminue.



On retrouve ici le même problème que pour la perte de cohérence temporelle. La différence étant que pour cette dernière il y avait superposition des figures d'interférences des différentes longueurs d'ondes alors qu'ici on superpose les figures d'interférences d'ondes issues de différents points de la source.

On peut trouver des applications à un tel phénomène. En effet il est possible de relier la largeur de la fente source à l'inversion de contraste et la distance séparant les fentes à l'angle apparent sous lequel on voit la source. Cette relation est utilisée en astrophysique pour étudier les étoiles et leurs dimensions.

CONCLUSION

Il est connu que la lumière est une particule : le photon. Sa particularité repose dans son comportement ondulatoire. La notion de dualité onde/particule est un élément principal lors de l'étude des rayonnements électromagnétiques.

La nature ondulatoire du photon est source de nombreuses expériences et inventions. Les phénomènes d'interférences en sont l'une des conséquences. Ils offrent de nombreuses applications dont la mesure de distances dans le domaine de l'infiniment grand ou de l'infiniment petit.

On notera aussi que cette dualité n'est pas réservée à la lumière et au photon. On le retrouve aussi pour d'autres particules sous certaines conditions. L'expérience des fentes d'Young, qui nous a amplement servie ici à illustrer le phénomène d'interférences, peut aussi par exemple être réalisée avec un jet d'électrons (particules massiques).