

I. Etude du phénomène d'interférence.

1. Mise en évidence du phénomène d'interférence.

Introduction :

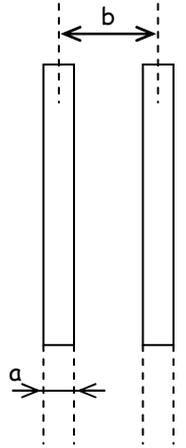
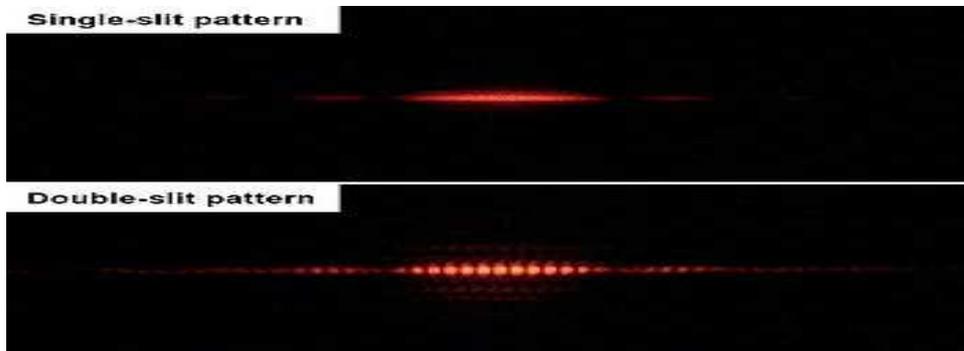
Thomas Young, en 1801, réalisa une expérience historique en faveur de la nature ondulatoire de la lumière. Il superposa deux faisceaux lumineux issus d'une même source, en les faisant passer à travers deux fentes fines parallèles et proches, et observa le résultat sur un écran.

Le phénomène d'interférences lumineuses est capable d'augmenter ou de diminuer l'intensité lumineuse observée. Nous allons voir comment la superposition de deux ondes lumineuses peut produire ... de l'obscurité !

Mise en évidence expérimentale :

Le TP précédent nous a permis de mettre en évidence et d'étudier le phénomène de diffraction. Pour cela nous avons placé sur le trajet d'un faisceau LASER un obstacle de très petite dimension. Pour mettre en évidence le phénomène d'interférences, nous allons maintenant remplacer la fente simple permettant d'obtenir une figure de diffraction par une fente double, c'est-à-dire deux fentes de largeur a séparées d'une distance b de l'ordre du dixième de millimètre comme le montre la figure ci-contre.

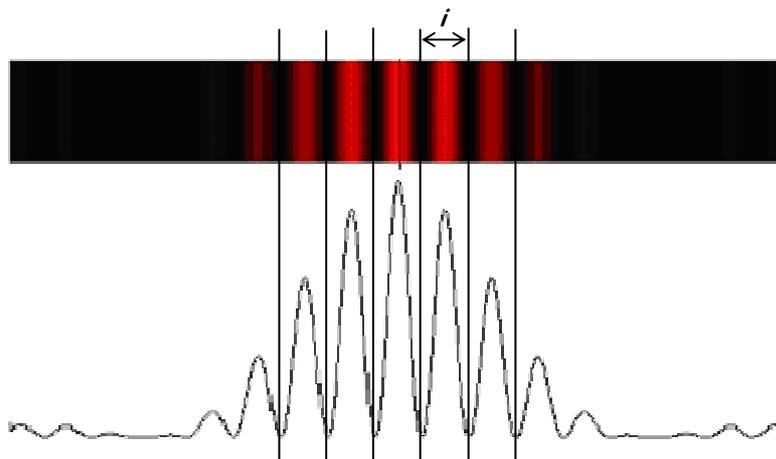
Les deux photos ci-dessous montrent les résultats des deux manipulations.



- Que signifient les termes « single-slit pattern » et « double-slit pattern » ?
- Quels commentaires ces clichés appellent-ils ?

2. Etude quantitative.

Le phénomène d'interférence créée par une double fente fait apparaître des franges lumineuses qui sont séparées par une distance constante comme le montre la figure ci-dessous.



Cette distance est appelée l'interfrange « i » qui dépend de plusieurs paramètres dont :

- D : distance entre la fente double et l'écran sur lequel on observe la figure d'interférence ;
- b : distance entre le centre des fentes (voir schéma précédent)
- λ : longueur d'onde de la lumière éclairant la double fente.

Problème à résoudre :

« Plusieurs relations permettant de calculer l'interfrange en fonction des paramètres précédents vous sont proposées.

Éliminez, par analyse dimensionnelle (analyse d'unité) les expressions incohérentes.

Déterminer la bonne relation parmi celle restante à l'aide de deux mesures judicieuses. »

(1) $i = \lambda \cdot D \cdot b$ (2) $i = \frac{b \cdot D}{\lambda}$ (3) $i = \frac{\lambda \cdot b}{D}$ (4) $i = \frac{\lambda \cdot D}{b}$ (5) $i = \frac{b}{\lambda \cdot D}$ (6) $i = \frac{1}{b \cdot \lambda \cdot D}$ (7) $i = \frac{\lambda \cdot D^2}{b^2}$

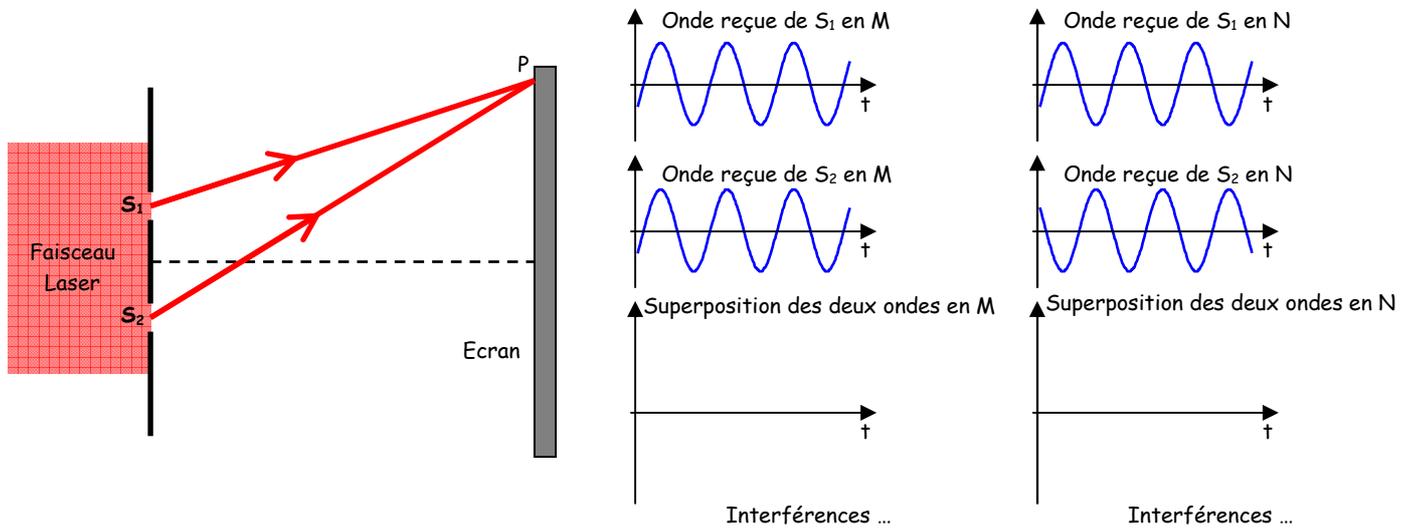
Données utiles et matériel disponible :

- Une diode Laser rouge dont la longueur d'onde est $\lambda = 650 \text{ nm}$
- Un mètre
- Une diapositive contenant une série de doubles fentes pour lesquelles la largeur des fentes est constante mais la distance entre les fentes varie comme indiqué sur la diapositive.
- Un écran

Précisions :

La présence de franges à l'intérieur du motif de diffraction peut s'expliquer en utilisant les termes « d'interférences constructives » et « d'interférences destructives ».

Ces termes sont liés au fait que les ondes lumineuses passant par chaque fente et reçue en un point de l'écran sont soit « en opposition de phase » soit « en phase » (voir schéma ci-dessous).



L'intensité lumineuse perçue par l'œil étant proportionnelle « au carré de l'onde » diffusée par l'écran, expliquer pourquoi « lumière » + « lumière » = « obscurité » dans certains cas !

II. Application : détermination de distance entre les pistes d'un CD ; DVD ou BD.

1. Comportement de la lumière avec un réseau.

Un réseau est un matériau transparent sur lequel est tracé une multitude de traits (réseaux disponibles au Lycée : 140, 530 ou 740 traits par mm).

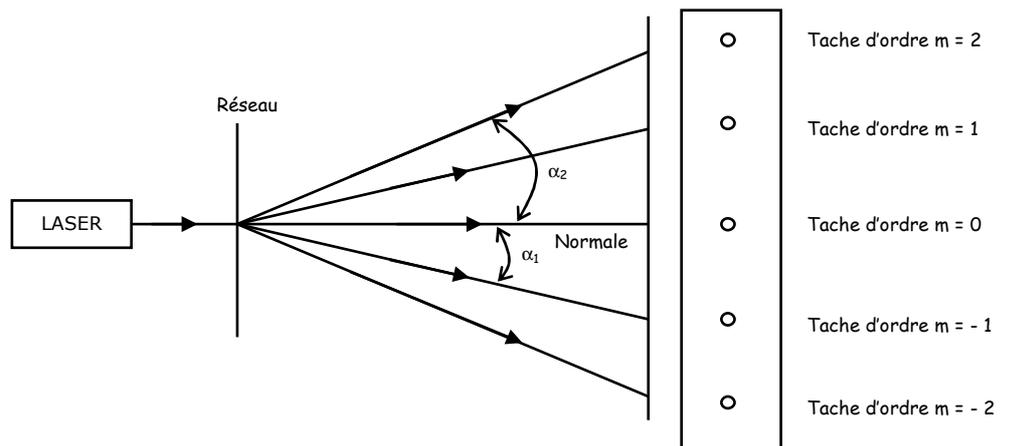
Les réseaux sont des éléments dispersifs (comme un ...) permettant de décomposer une lumière polychromatique.

Les traits se comportent comme des obstacles de petites dimensions et génère un phénomène d'interférence non pas par 2 fentes mais par N fentes.

Le phénomène est un peu plus complexe que dans le cas d'une fente double mais on peut démontrer que la lumière laser de longueur d'onde λ issue des différentes fentes du réseau interfère dans des directions α_m repérées par rapport à la normale au réseau et telles que :

$$\sin(\alpha_m) = m \times \frac{\lambda}{b}$$

où m correspond à l'ordre de l'interférence et b la distance entre deux traits.



- Placer un réseau sur le trajet de la lumière issu d'une diode laser et placer l'écran à $D = 30,0$ cm (du réseau).
- Mesurer la distance l entre deux points lumineux d'ordre opposés (de $+1$ à -1 ou de $+2$ à -2).
- Compléter le tableau suivant :

Réseau	140 trait/mm	530 trait/mm	740 trait/mm
l (cm)			
Ordres utilisés (1, 2, ...)			
$\tan \alpha_m$			
α_m (rad)			
$\sin \alpha_m$			
b (m)			
Espacement b entre 2 traits (m) (d'après les données)			

- Conclusion.

Remarque : que constate-t-on quand α_m est petit ?

2. Application au CD et DVD

Le CD fut inventé en 1981 par Sony et Phillips. Les disques compacts sont constitués d'une galette de polycarbonate de 1,2 millimètre d'épaisseur recouvert d'une fine couche d'aluminium. Les informations sur un CD standard sont codées sur une piste d'alvéoles en spirale moulées dans le polycarbonate. Chaque alvéole mesure environ entre 125 nm et 500 nm de large et varie entre 833 nm et 3,5 μm en longueur. Sur un CD, l'information est codée sous forme de creux et de plats (codage binaire 0 et 1) le long d'une piste *en forme de spirale qui s'enroule sur elle-même* (figure 1). Celle-ci démarre à une distance $R_1 = 2,50$ cm de l'axe du CD et se termine à la distance $R_2 = 5,80$ cm. Le disque à un diamètre total de 12,00 cm.

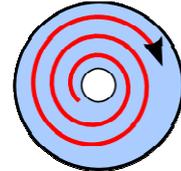


Figure 1

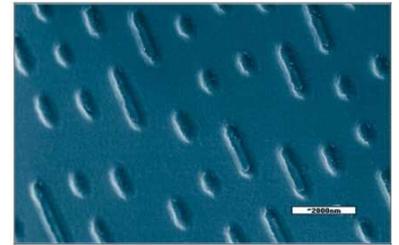


Figure 2 : Photo de la surface d'un CD

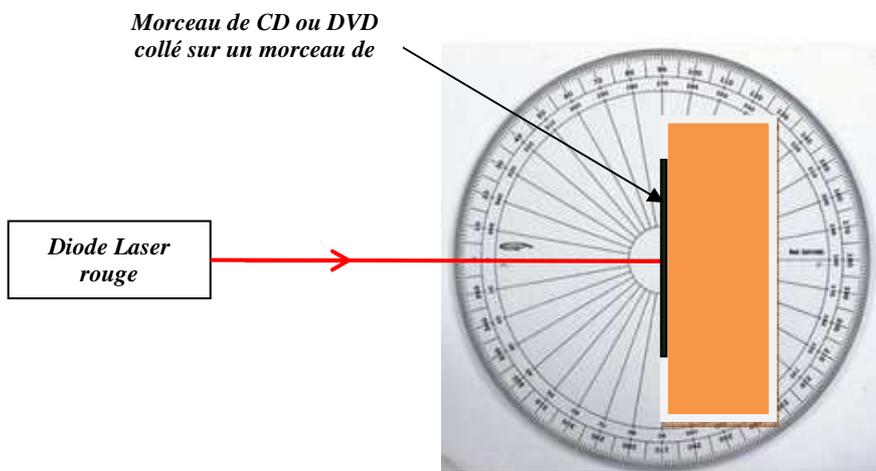
D'un point de vue physique une petite portion du CD peut-être vue comme une succession de traits parallèles entre eux et de très petite dimension (figure 2).

Une portion d'un CD peut donc être assimilée à un réseau.

L'inconvénient est que le CD n'est pas transparent mais réfléchissant. On travaillera donc en réflexion et non en transmission.

L'expression $\sin(\alpha_m) = m \times \frac{\lambda}{b}$ reste valable.

- Mesurer l'angle de réflexion pour l'ordre 1 ($m = 1$) à l'aide du dispositif schématisé ci-dessous.
- Compléter le schéma pour décrire ce qui est observé.
- Déterminer la distance entre chaque piste d'un CD. Comparer à la valeur habituellement admise de 1,6 μm .
- Déterminer la distance entre chaque piste d'un DVD. Comparer à la valeur habituellement admise de 0,74 μm .
- Expliquer pourquoi le DVD peut stocker plus d'informations.



Pour aller plus loin (à faire à la maison):

La piste s'enroule en spirale sur le CD et le DVD, et est comprise entre les rayons $R_1 = 2,50$ cm et $R_2 = 5,80$ cm mesurables simplement à la règle !

On peut déterminer la longueur L totale des pistes car la surface d'aire $b.L$ recouverte par cette piste spiralée correspond à l'aire comprise entre les rayons R_1 et R_2 .

$$b.L = \pi.(R_2^2 - R_1^2)$$

- Déterminer la longueur totale des pistes sur un CD puis sur un DVD.
- Sur ces pistes, l'information est codée par une succession d'alvéoles. Pour un CD, la taille la plus petite que peut prendre une alvéole est d'environ $0,85 \mu\text{m}$ et correspond environ à la taille d'un bit. Ainsi 8 bit correspondent à une longueur de $l_0 = 8 \times 0,85 = 6,8 \mu\text{m}$.
- En déduire la capacité de stockage du CD en mégaoctet (Attention, $1 \text{ Mo} = 1024 \times 1024$ octet). De manière générale, la capacité d'un CD est comprise entre 214 Mo et 921 Mo. Le résultat précédent est-il cohérent ?
- Pour un DVD, la taille la plus petite que peut prendre une alvéole est d'environ $0,40 \mu\text{m}$ et correspond à la taille d'un bit. Ainsi 8 bit correspondent à une longueur de $l_0 = 8 \times 0,4 = 3,2 \mu\text{m}$.
- Répondre aux mêmes questions pour le DVD sachant que de manière générale, la capacité d'un DVD simple couche est de 4,7 Go.

Application : Expliquer le procédé de lecture d'un CD.

La piste physique d'un CD est constituée d'alvéoles d'une profondeur de $0,125 \mu\text{m}$, d'une largeur de $0,67 \mu\text{m}$ et de longueur variable. On nomme creux (en anglais *pit*) le fond de l'alvéole et on nomme plat (en anglais *land*) les espaces entre les alvéoles (figure 3).

Pour coder des données numériques, il faut une série de 0 et de 1. On pourrait penser que les creux représentent les « 1 » et les plats les « 0 » (ou vice-versa) mais la réalité est plus complexe. Tous les creux et plats sont des « 0 » et c'est le passage d'un creux à un plat (ou l'inverse) qui représentera un « 1 » (figure 4). En pratique, la cellule chargée de lire les données regarde l'état de la surface tous les $0,278 \mu\text{m}$: s'il n'y a pas de transition, elle renvoie un « 0 », sinon elle renvoie un « 1 ». Toutes les 8 lectures (chaque lecture représente un bit), on obtient un octet qui contient l'information contenue sur le CD (texte, musique etc...). Un CD contient environ 700 Mo. Cela correspond à 74 minutes de musique (voire 80 min sur certains CD)

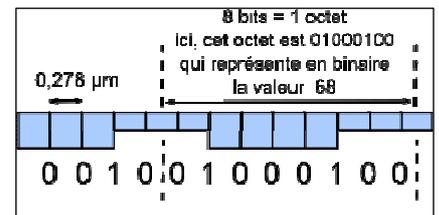
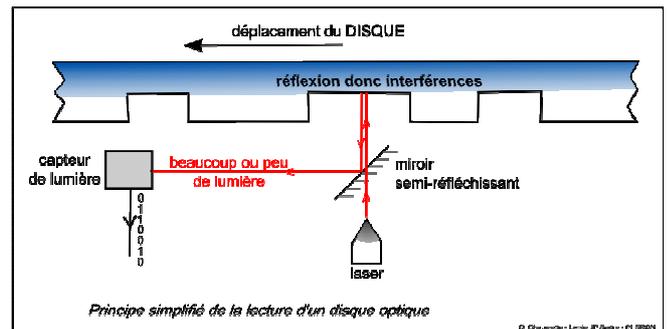


Figure 4

La lecture est effectuée au moyen d'une diode laser de longueur d'onde le vide selon $\lambda = 780$ nm selon le schéma ci contre. Le principe de lecture du CD est basé sur le phénomène d'interférence lors d'une transition entre un « plat » et un « creux ». Lorsque le faisceau Laser est réfléchi par un « plat » ou un « creux » uniquement, l'intensité lumineuse détectée après réflexion est maximale (il n'y a pas d'interférences). Lorsque le faisceau Laser atteint une transition entre un « plat » et un « creux » une partie du faisceau est réfléchi par un « creux » et l'autre partie est réfléchi par le « plat » de la surface du disque, il y a interférence entre les deux faisceaux réfléchis. L'intensité lumineuse détectée après réflexion est alors minimale car il y aura interférence destructive. Ce phénomène d'interférence destructive ne peut être observé que si le creux possède une profondeur particulière : le quart de la longueur d'onde de la lumière utilisée pour la lecture du CD.



Questions :

- Justifier que le creux doit avoir une profondeur du quart de la longueur d'onde de la lumière utilisée pour la lecture du CD.
- La profondeur de $0,12 \mu\text{m}$ dans le cas du CD est-elle justifiée ?

Attention toutefois le phénomène d'interférence se produit dans le polycarbonate (plastique) qui recouvre la partie réfléchissante gravée. L'indice de réfraction de ce milieu est $n_p = 1,55$.

On rappelle que l'indice de réfraction est lié à la différence de célérité de la lumière en fonction du milieu traversé. Il est défini comme le rapport entre la célérité de la lumière dans le vide et la célérité de la lumière dans le milieu considéré :

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{où } c \text{ célérité de la lumière dans le vide } c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1} \text{ et } v \text{ la célérité dans le milieu transparent.}$$

Le changement de célérité implique la modification de la longueur d'onde car la fréquence du signal lumineux reste la même quel que soit le milieu de propagation.

- Rappeler la relation entre la célérité, la longueur d'onde et la fréquence.
- En tenant compte du texte établir une relation entre l'indice de réfraction du polycarbonate, la longueur d'onde dans le vide λ_0 et la longueur d'onde dans le polycarbonate λ_p .
- En déduire la nouvelle longueur d'onde du Laser dans le polycarbonate.
- La profondeur de $0,125 \mu\text{m}$ dans le cas du CD est-elle justifiée maintenant ?