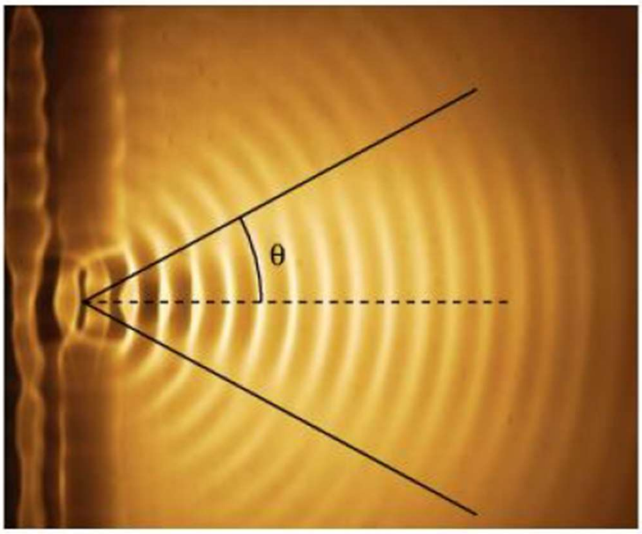
Diffraction et Interférences

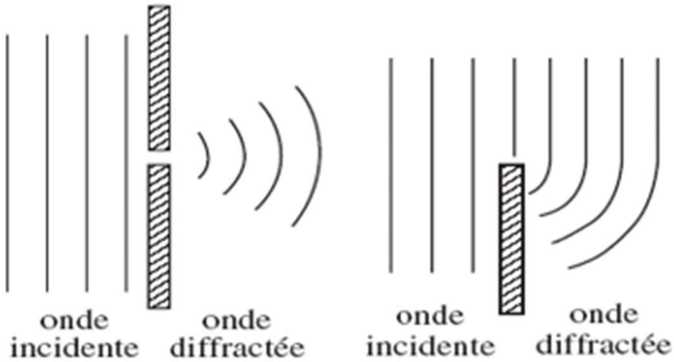
Diffraction d'une onde

Définition

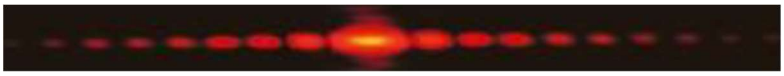
La diffraction est une modification de la direction de propagation d'une onde au passage d'une petite ouverture, sans modification de sa fréquence ou de sa longueur d'onde.
Condition : le phénomène de diffraction est observable lorsque les dimensions de l'ouverture sont de l'ordre de la longueur d'onde pour une onde mécanique, voire de plusieurs longueurs d'onde pour une onde lumineuse.

- Diffraction d'une onde mécanique plane sur l'eau

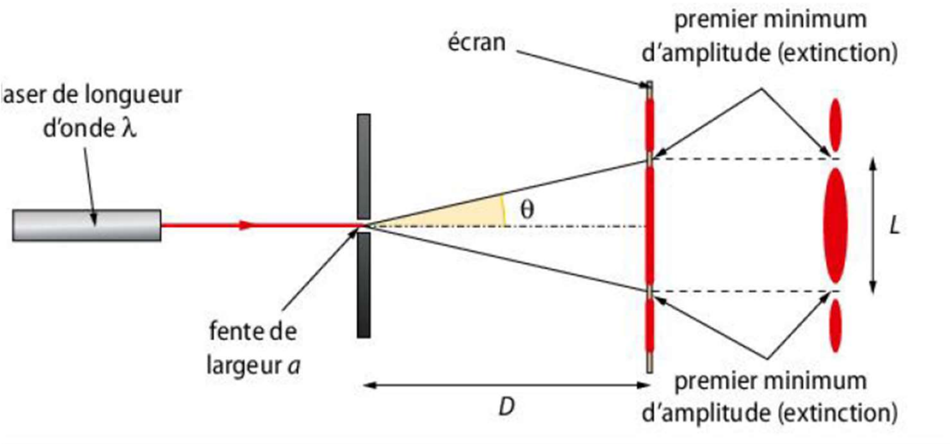




- Diffraction de la lumière d'un laser



- Schéma d'une expérience de diffraction avec la lumière laser par une fente de largeur a



Angle caractéristique

Dans le cas d'une ouverture rectangulaire de largeur a, le sinus de l'angle caractéristique de diffraction θ, a pour expression :

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Si le rapport $\frac{\lambda}{a} \ll 1$ alors peut faire l'approximation suivante : $\sin\theta \approx \theta$

D'où la nouvelle expression :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Pour une onde lumineuse dans le cas d'une ouverture circulaire de diamètre d et d'un rapport $\frac{\lambda}{d}$ petit :

$$\theta = 1{,}22 \times \frac{\lambda}{a}$$

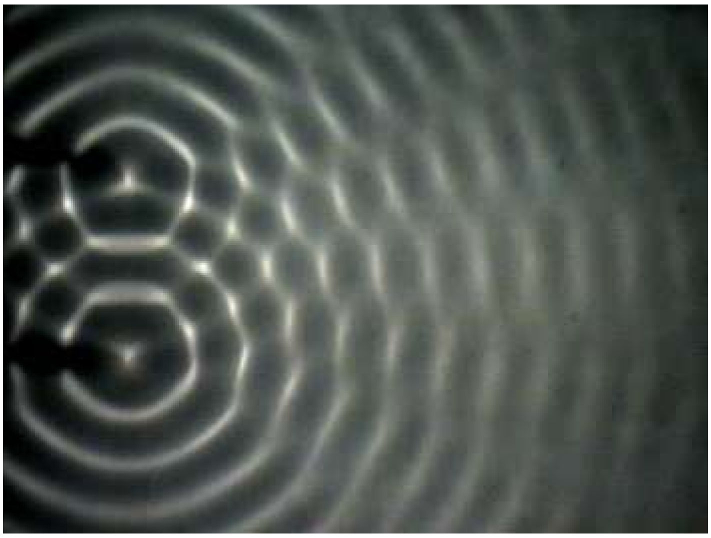
Remarque : En utilisant la relation trigonométrique du triangle rectangle, on trouve :

$$\tan\theta = \frac{L}{2D}$$

Interférence de deux ondes

Observations

Interférence à la surface de l'eau d'une cuve à onde



Interférence en lumière monochromatique (la source lumineuse est un laser)

Présentation des interférences.

Lorsque deux ondes mécaniques se croisent, leurs élongations s'additionnent : elles interfèrent.

Après le croisement, chaque onde continue de se propager : le croisement n'a pas modifié les ondes incidentes.

Pour les ondes mécaniques et pour les ondes lumineuses, on peut observer des figures d'interférences à la condition que :

- Les deux sources d'ondes ont la même fréquence
- Les deux sources d'ondes ont un déphasage constant

Interférences constructives et destructives pour les ondes à la surface de l'eau

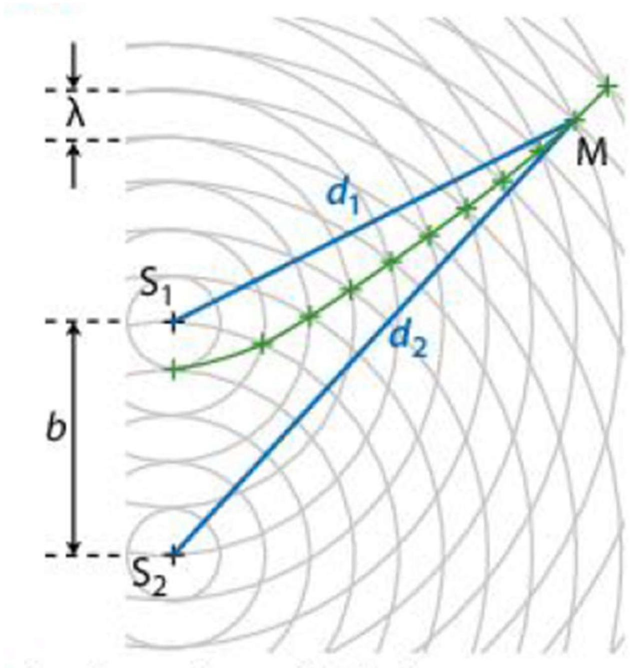
Interférences constructives

L'ensemble des points repérés par des croix correspondent à la superposition des maximums de chacune des ondes issues de S_1 et S_2 :

$$d_2 - d_1 = k.\lambda$$

Avec k entier relatif.

Il en est de même si on choisit des points situés entre les croix.



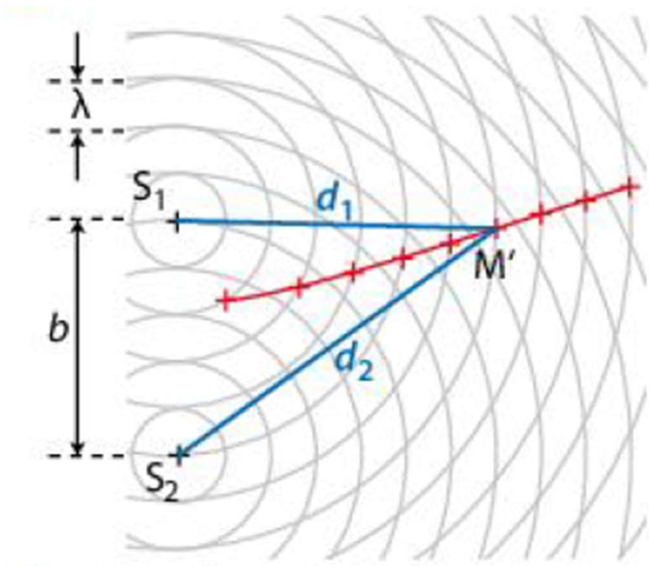
Interférences destructives

L'ensemble des points repérés par des croix correspondent à la superposition d'un maximum de l'onde issue de S_1 et d'un minimum de l'onde issue de S_2 :

$$d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right).\lambda$$

Avec k un entier relatif.

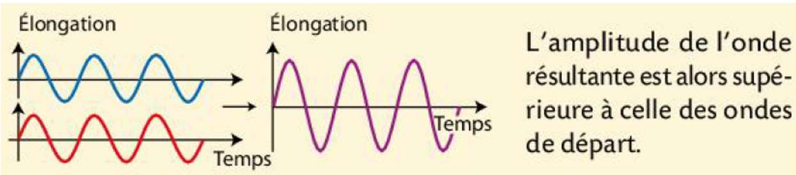
Il en est de même pour tous les autres points situés sur la même ligne reliant



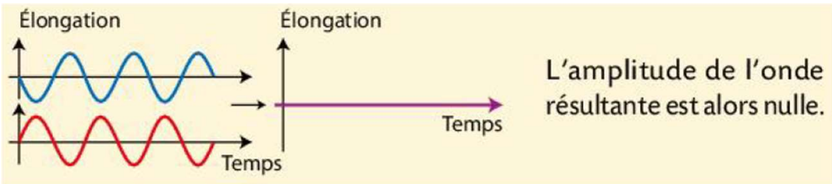
Remarque : la différence $d_2 - d_1$ s'appelle la différence de marche et est notée : δ

Conclusion

- Condition d'interférences constructives : $d_2 - d_1 = k.\lambda$



- Condition d'interférence destructives : $d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right).\lambda$

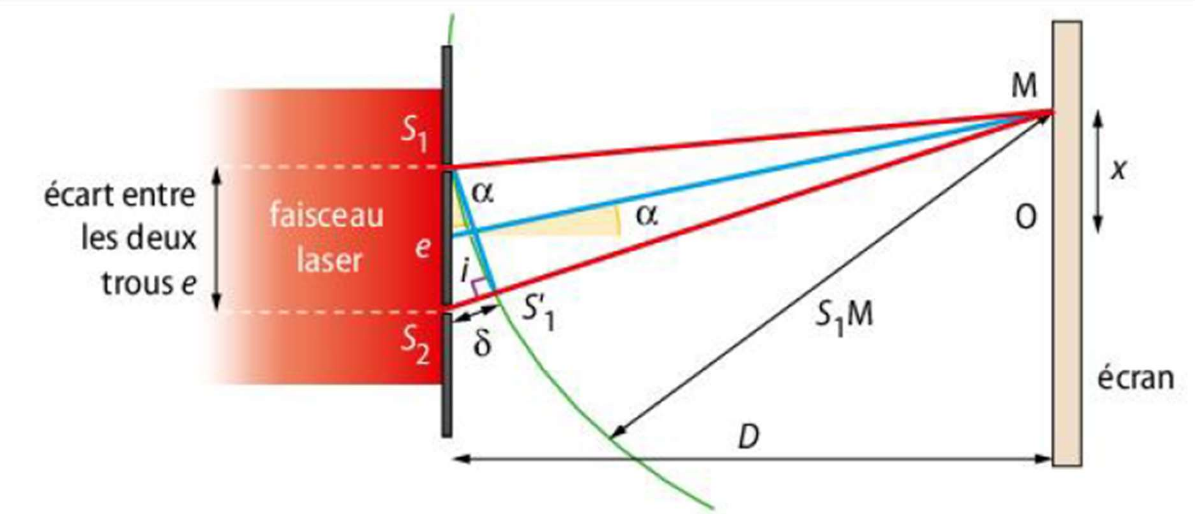


Interférences de deux ondes lumineuses monochromatiques cohérentes

Pour observer une figure d'interférences avec de la lumière, il faut éclairer deux trous ou deux fentes avec une unique source lumineuse monochromatique.
A la différence des ondes produites par la cuve à onde, les sources lumineuses émettent des milliards de trains d'ondes de façon aléatoire.

Par conséquent, si on prend deux sources de lumière distinctes, le déphasage entre les trains d'onde change en permanence, et donc la superposition de ces trains d'ondes ne donnera jamais le même résultat en un même point ! Les interférences ne seront donc pas observables.

Pour contourner ce problème, on utilise une seule source laser dont le faisceau lumineux va éclairer les deux trous ou les deux fentes. Ainsi, les trains d'onde issus des deux trous ou des deux fentes auront toujours le même décalage (même déphasage) et donneront le même type d'interférences sur le même point.



Différence de chemin optique

La différence de chemin optique, pour deux ondes issues de S_1 et S_2 et qui se rejoignent en M, est donnée :

$$\boldsymbol{\delta = S_1M - S_2M}$$

Pour des petits angles, on a : $\delta = S_2S'_1$
Dans le triangle rectangle IOM, on a la relation trigonométrique :

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

En utilisant l'approximation des petits angles, on en déduit :

$$\alpha = \frac{x}{D}$$

Dans le triangle rectangle $S_1S'_1S_2$, on a la relation trigonométrique :

$$\sin \alpha = \frac{\delta}{e}$$

En utilisant l'approximation des petits angles, on a :

$$\sin \alpha = \alpha$$

D'où la relation :

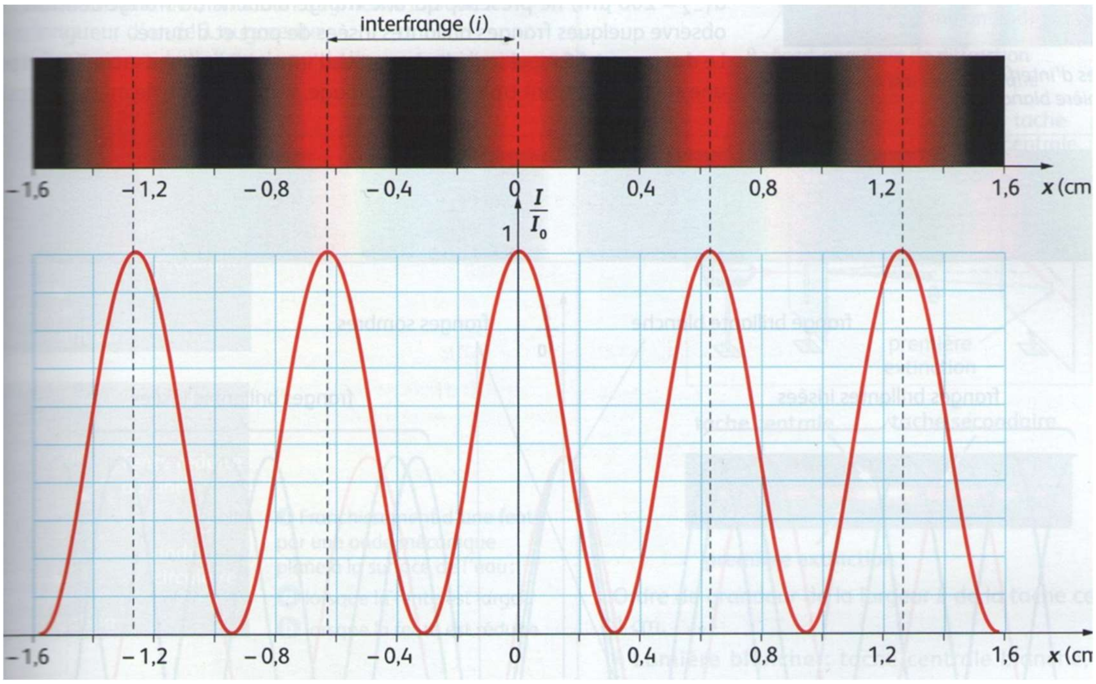
$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{e}$$

Et donc :

$$\boldsymbol{\delta = \frac{x.e}{D}}$$

Interfrange

L'interfrange est la distance séparant les centres de deux franges brillantes ou de deux franges sombres consécutives.



Si M est au centre d'une frange brillante, on a la relation : $\delta = k.\lambda$.
Si M' est au centre de la frange brillante consécutive de M, on a la relation : $\delta' = (k+1).\lambda$

D'après l'expression de la différence de marche trouvée au paragraphe précédent :

$$\delta = k.\lambda = \frac{e.x}{D} \Rightarrow x = \frac{k.\lambda.D}{e}$$

$$\delta' = (k+1).\lambda = \frac{e.x'}{D} \Rightarrow x' = \frac{(k+1).\lambda.D}{e}$$

En en déduit l'expression de l'interfrange :

$$i = x' - x$$

$$\boldsymbol{i = \frac{\lambda.D}{e}}$$

Cette démonstration est à connaitre !

Exercices

Exercice 1 : QCM

Exercice 2 : Illustrer le phénomène de diffraction

Citer deux exemples de la vie courante dans lesquels le phénomène de diffraction intervient.

Exercice 3 : Calculer un angle caractéristique de diffraction

En éclairant une ouverture de diamètre $d = 30$ µm à l'aide d'une radiation de longueur d'onde $\lambda = 532$ nm, on obtient sur un écran une figure de diffraction.

1. Schématiser le dispositif expérimental.

2. Calculer l'angle caractéristique de diffraction θ.

Exercice 4 : Reconnaitre le phénomène d'interférence

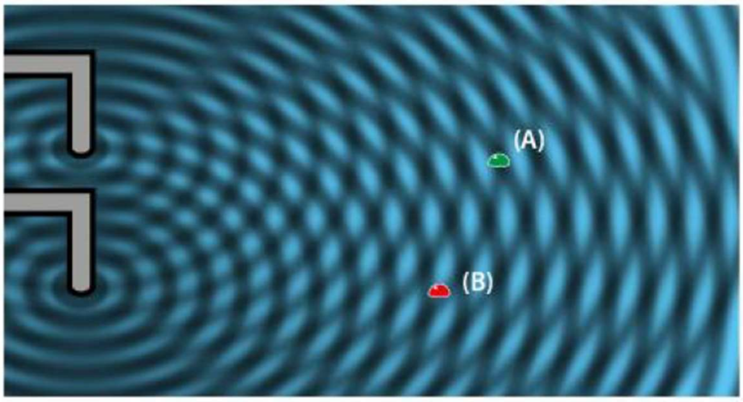
• Parmi les situations suivantes, repérer celle qui met en jeu un phénomène d'interférences.

a Casque antibruit qui émet des ondes sonores en opposition de phase avec le bruit ambiant.

b Discours entendu derrière une porte entrouverte.

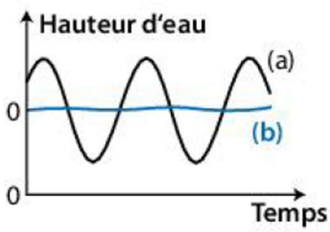
Exercice 5 : Reconnaitre des ondes

Deux vibreurs frappent la surface de l'eau d'une cuve à ondes et donnent naissance à des interférences. On place deux flotteurs (A) et (B) sur ce plan d'eau.



1. À quelle condition peut-on observer le phénomène d'interférences ?

2. On représente ci-contre la hauteur d'eau sous les flotteurs en fonction du temps. Attribuer, à chaque flotteur (A) et (B), la courbe **(a)** ou **(b)** qui lui correspond.



Exercice 6 : Connaitre le phénomène d'interférence

1. Quelle(s) condition(s) doivent remplir des sources lumineuses pour qu'il y ait des interférences ?

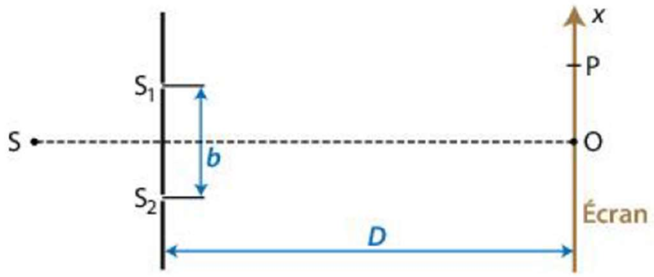
2. Quelle condition la différence de chemin optique entre deux ondes doit-elle respecter pour observer :

a. des interférences constructives ?

b. des interférences destructives ?

Exercice 7 : Déterminer la position des franges brillantes et des franges sombres

On réalise, dans l'air, une expérience d'interférences avec un système de deux fentes d'Young éclairées par une source de radiation de longueur d'onde $\lambda_0 = 650$ nm. On observe la figure d'interférences sur un écran.



1. Qu'observe-t-on sur l'écran au point O ?

2. Les ondes arrivent en P avec une différence de chemin optique $\Delta L = 1{,}625$ µm. Qu'observe-t-on en P ?

Au point P d'abscisse x_k la différence de chemin optique est :

$$\Delta L = \frac{x_k \times b}{D}$$

1. Exprimer x_k en fonction de ΔL, b et D.

2. En déduire l'interfrange i.

Exercice 8 : Calculer une longueur d'onde

On réalise une figure d'interférences lumineuses à l'aide de fentes d'Young séparées par une distance $b = 0{,}20$ mm. La figure est obtenue sur un écran situé à une distance $D = 2{,}0$ m.

Dans une telle situation, la valeur de l'interfrange est donnée par la relation :

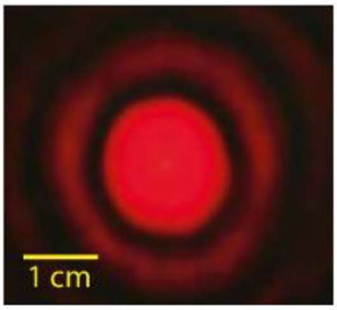
$$i = \frac{\lambda \times D}{b}$$

1. Donner l'expression de la longueur d'onde en fonction de l'interfrange i, de b et de D.

2. Calculer la longueur d'onde de la lumière utilisée sachant que, dans les conditions de l'expérience, on mesure $i = 6{,}3$ mm.

Exercice 9 : Pointeur LASER

On dispose d'un pointeur laser émettant, dans l'air, des radiations rouges de longueur d'onde λ_R.
On souhaite vérifier expérimentalement la longueur d'onde λ_R. Pour cela, on réalise un montage permettant d'obtenir une figure de diffraction à travers une ouverture circulaire de rayon $r = 0,20$ mm sur un écran placé à une distance $D = 5,0$ m. La figure obtenue est la suivante :



1. Schématiser le montage du dispositif expérimental.

2. En utilisant le schéma, exprimer la longueur d'onde λ_R en fonction de la distance D, du rayon r de l'ouverture et de la largeur ℓ de la tache centrale.

3. Calculer la longueur d'onde des radiations émises par la diode laser du pointeur rouge.

4. Dans les mêmes conditions, on utilise un laser émettant, dans l'air, des radiations de longueur d'onde $\lambda_V = 405$ nm. Comment la largeur de la tache centrale évolue-t-elle ?

Donnée

L'angle θ étant petit et en radian, on a $\tan \theta = \theta$.

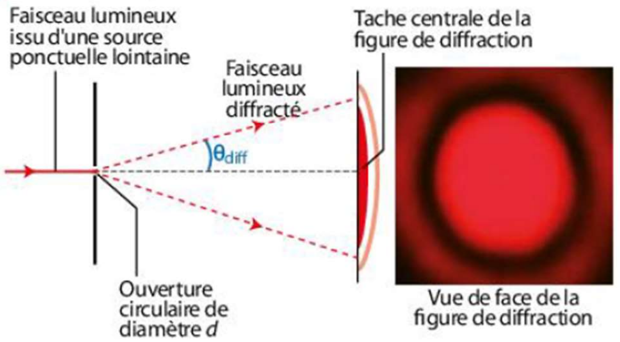
D'après Baccalauréat Antilles-Guyane, 2017

Les exoplanètes (planètes situées en dehors du système solaire) sont difficiles à détecter de par leur éloignement et leur manque de luminosité par rapport aux étoiles autour desquelles elles tournent.

Actuellement, l'observation de détails avec un télescope terrestre est principalement limitée par le phénomène de diffraction lié à l'ouverture circulaire d du télescope.

La première exoplanète dont on a pu faire une image par observation directe dans le proche infrarouge s'appelle 2M1207b. Cette exoplanète orbite à une distance estimée à 55 unités astronomiques (ua) autour de l'étoile 2M1207a, située elle-même à 230 années-lumière (al) de la Terre.

A Diffraction par une ouverture circulaire



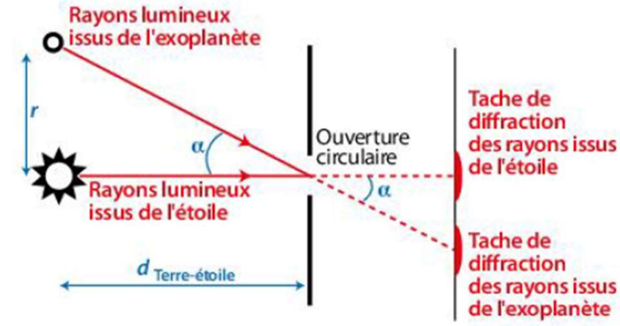
Dans le cas d'une ouverture circulaire, on admet que l'angle caractéristique de diffraction θ_{diff} (en radian) vérifie la relation :

$$\theta_{diff} = 1{,}22 \times \frac{\lambda}{d}$$

où λ est la longueur d'onde du faisceau incident et d le diamètre de l'ouverture.

B Écart angulaire et diffraction

Des rayons lumineux issus d'un couple étoile-planète et passant par l'ouverture circulaire d'un télescope terrestre sont représentés sur le schéma ci-dessous.



α est l'écart angulaire entre l'étoile et la planète, c'est-à-dire l'angle séparant l'étoile de la planète vues depuis la Terre.

Il est petit et se calcule par : $\alpha = \tan \alpha = \frac{r}{d_{Terre\text{-}étoile}}$ avec r la distance planète-étoile et $d_{Terre\text{-}étoile}$ la distance Terre-étoile.

C Critère de Rayleigh pour distinguer deux objets

Un télescope permet de distinguer deux objets à condition que l'écart angulaire α entre ces deux objets soit supérieur ou égal à l'angle de diffraction θ_{diff}.

$\alpha > \theta_{diff}$
On peut distinguer les deux objets.

$\alpha = \theta_{diff}$

$\alpha < \theta_{diff}$
On ne peut pas distinguer les deux objets.

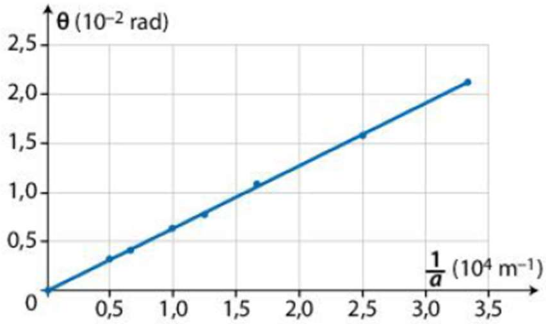
1. À quelle condition l'étoile et la planète seront-elles vues séparément ?

2. Déterminer le diamètre D du télescope terrestre permettant de distinguer la planète 2M1207b de l'étoile 2M1207a sachant que la longueur d'onde des rayons lumineux provenant des deux objets célestes est $\lambda = 2{,}0\ \mu m$.

Données
- Unité astronomique : 1 ua $= 1{,}496 \times 10^{11}$ m.
- Année-lumière : 1 al $= 9{,}461 \times 10^{15}$ m.

Exercice 11 : Diffraction de la lumière

On réalise une expérience de diffraction à l'aide d'un laser émettant une radiation de longueur d'onde λ.
Face au laser, on place successivement des fentes verticales de largeurs a connues. Pour chacune des fentes, on mesure la largeur ℓ de la tache centrale de la figure de diffraction observée sur un écran.
À partir de ces mesures, il est possible de calculer l'angle caractéristique de diffraction θ.
On donne ci-contre la représentation graphique $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$.

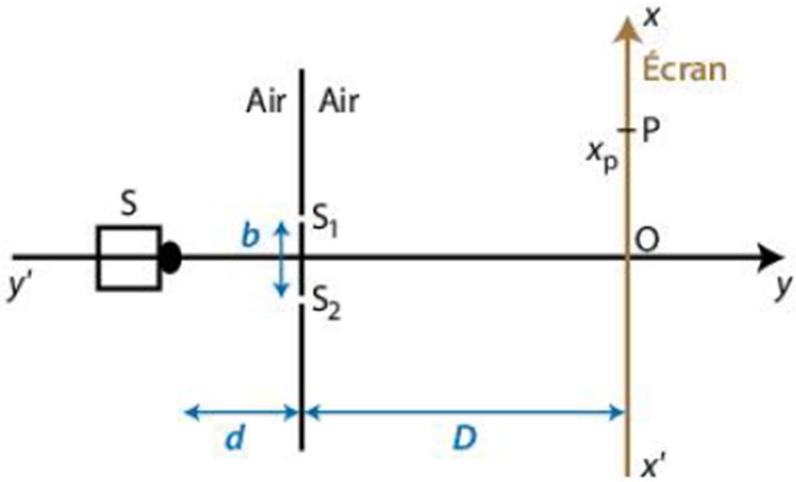


1. À quelle condition le phénomène de diffraction est-il observable ?

2. a. Donner la relation liant θ, λ et a en précisant les unités des grandeurs utilisées.
b. Montrer que la fonction qui modélise la courbe obtenue est en accord avec la réponse à la question précédente.
c. À partir de l'expression de la fonction modélisant la courbe, déterminer la longueur d'onde de la radiation du laser utilisé.

Exercice 12 : Détermination d'une interfrange

On utilise comme source une diode laser émettant une radiation de longueur d'onde $\lambda_0 = 650$ nm. Une plaque, percée de deux trous d'Young distants de $b = 0,20$ mm et de même diamètre, est placée à une distance $D = 2,0$ m de l'écran.



1. Quelles sont les conditions nécessaires pour observer le phénomène d'interférences ?

2. Au point O, la frange est-elle brillante ou sombre ? Justifier.

3. Par analyse dimensionnelle, choisir la bonne expression de la différence de chemin optique ΔL en un point P parmi les suivantes :

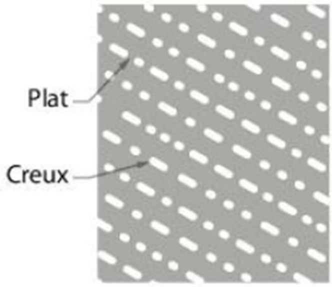
(1) $\Delta L = \dfrac{x_P \times b}{D}$ (2) $\Delta L = x_P \times b \times D$ (3) $\Delta L = \dfrac{x_P}{b \times D}$

4. À partir du résultat de la question **3**, déterminer l'expression de l'interfrange i, puis le calculer.

5. En un point P d'abscisse 9,8 mm, observe-t-on une frange brillante ou une frange sombre ?

Exercice 13 : Disque Blu-Ray

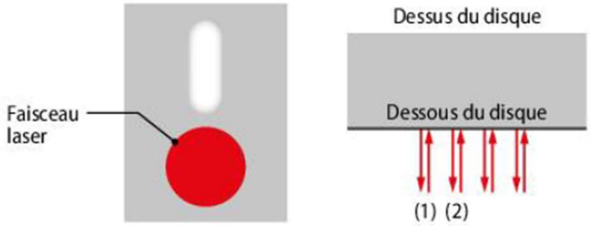
Sur un disque optique (CD, DVD, Blu-ray), les données sont gravées sous forme de minuscules cavités, de longueur variable, appelées « creux ». Les espaces entre les creux sont appelés « plats ».



C'est la variation d'intensité lumineuse au cours de la lecture qui permet de repérer les creux et les plats, et de décoder l'information numérique.
Afin de lire les données du disque, un faisceau laser est dirigé vers le disque optique. Le faisceau se propage dans du polycarbonate puis se réfléchit et est renvoyé vers un capteur de lumière qui détecte l'intensité lumineuse réfléchie.
Les diodes lasers utilisées dans les lecteurs Blu-ray émettent une lumière de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 405$ nm.

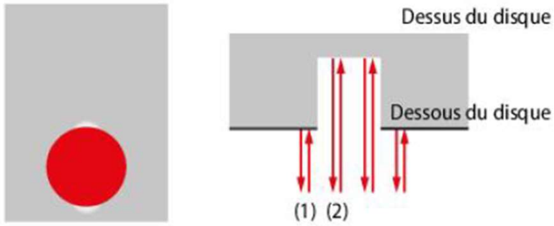
A **Lecture des données sur le disque optique**

ⓐ Le faisceau laser se réfléchit totalement sur un plat.



VUE DE DESSOUS **VUE EN COUPE**

ⓑ Le faisceau laser est positionné en face d'un creux : le rayon (1) situé au bord du faisceau se réfléchit sur un plat, tandis que le rayon (2) situé au centre du faisceau se réfléchit dans un creux.



VUE DE DESSOUS **VUE EN COUPE**

1. À quelle condition des interférences sont-elles constructives ? destructives ?

2. a. Dans le cas ⓐ, les interférences entre les rayons (1) et (2) sont-elles constructives ? destructives ?
b. Dans le cas ⓑ, la différence de chemin optique ΔL entre les rayons (1) et (2) est $\Delta L = 2n \times h$.
Que représente h ? Calculer sa valeur minimale pour que les interférences soient destructives.

Donnée
Indice de réfraction du polycarbonate : $n = 1{,}55$.