



*École Nationale
Des Sciences
Appliquées
(ENSA)*

2020 - 2021



**Polycopie de Travaux
Pratiques de Physique 4
Semestre 2**

Fonctionnement des Travaux Pratiques

Ce polycopié regroupe les textes des travaux pratiques de physique 4 (optique géométrique et optique ondulatoire).

L'objectif principal des travaux pratiques d'optique est de réaliser des expériences qui vous permettront de mettre en pratique des principes de base de physique. C'est à dire :

- mesurer des grandeurs physiques à partir de diverses procédures expérimentales en utilisant les instruments appropriés.*
- être capable de mener une analyse basée sur une confrontation de connaissances théoriques et d'observations expérimentales.*
- rédiger un compte-rendu de vos observations expérimentales et de l'analyse que vous réaliserez.*

Les travaux pratiques de physique 4 (semestre 2) sont répartis en quatre séances de deux heures.

Au cours de chaque séance, il vous sera demandé :

- d'effectuer l'ensemble des manipulations demandées et de répondre aux questions posées.*
- de remplir la fiche de l'évaluation expérimentale et la rendre à la fin de la séance.*
- comparer le résultat de vos mesures aux prédictions théoriques.*

Un compte-rendu précisant clairement votre démarche expérimentale, vos résultats et leur analyse, doit être rédigé et rendu la séance suivante.

Il convient de préparer chaque séance à l'avance : réfléchir aux questions expérimentales qui vous sont posées et faire les analyses théoriques demandées.

Penser qu'un résultat sans unité ni incertitude n'a aucune valeur scientifique.

Une description détaillée du matériel est disponible sur chaque table.

Soyez curieux et inventifs ; n'hésitez pas à poser des questions à votre enseignant(e).

TABLE DES MATIERES

TP N° 1 : Focométrie.

- 1) But de la manipulation
- 2) Rappels Théoriques
 - 2-a. Définitions
 - 2-b. Centre optique
 - 2-c. Foyers principaux
- 3) Détermination expérimentale des distances focales d'une lentille
 - 3-a. Méthode des points conjugués
 - 3-b. Méthode de Bessel
 - 3-c. Méthode d'autocollimation.
- 4) Travail à effectuer
 - 4-a. Détermination de la distance focale de la lentille convergente par la méthode des points conjugués
 - 4-b. Détermination de la distance focale de la lentille convergente par la méthode d'autocollimation.
 - 4-c. Détermination de la distance focale de la lentille convergente par la méthode de Bessel.
 - 4-d. Détermination de la distance focale de la lentille divergente par la méthode des points conjugués.

TP N° 2: Interférences non localisées par division du front d'onde.

- 1) But de la manipulation
- 2) Principe
- 3) Miroirs de Fresnel
- 4) Travail à effectuer.
 - 4-a. Obtention de la figure d'interférence
 - 4-b. Mesures
 - 4-c. Détermination de l'interfrange i
 - 4-d. Détermination de a et D .
 - 4-d. détermination de la longueur d'onde de la source.

TP N° 3: Etude de la diffraction.

1. But de la manipulation
2. Rappels théoriques
 - 2-a. Principe de Huygens-Fresnel :
 - 2-b. Diffraction par une ouverture rectangulaire.
 - 2-c. Diffraction par une fente circulaire
- 3) Travail à effectuer
 - 3-a. Etude de la diffraction par une fente rectangulaire de largeur a
 - 3-b. Etude de la diffraction par une fente circulaire

Erreurs et incertitudes

La physique travaille continuellement avec des approximations. Une des raisons en est que toute mesure d'une grandeur quelconque est nécessairement entachée d'erreur. Il est impossible d'effectuer des mesures rigoureusement exactes.

Pour prendre conscience du degré d'approximation avec lequel on travaille, on fait l'estimation des erreurs qui peuvent avoir été commises dans les diverses mesures et on calcule leurs conséquences dans les résultats obtenus. Ceci constitue le calcul d'erreur, ou calcul d'incertitude.

Une grandeur physique peut être:

- Soit mesurée directement au moyen d'un instrument ou d'un appareil électrique.
- Soit calculée à partir d'autres grandeurs mesurées directement. Le calcul se fait à l'aide d'une relation qui relie la grandeur calculée avec celles mesurées.

I. Erreur et incertitude : définitions.

I.1. Erreur

L'erreur associée à une mesure est la différence entre la valeur mesurée et la vraie valeur. On la note habituellement par δ , suivi du symbole représentant la grandeur mesurée : δX pour une longueur X , δT pour une température T , etc...

$$\delta X = X_{\text{mesuré}} - X_{\text{vrai}}$$

Naturellement, X_{vrai} ne nous est à jamais accessible (sinon, la mesure serait inutile) et donc δX est toujours inconnu. Il est toujours impossible de connaître l'erreur sur une mesure.

L'erreur a un signe : elle peut être positive ou négative.

I.2. Incertitude

Puisque l'erreur est à jamais inconnue. Nous cherchons à encadrer l'erreur. On ne peut pas connaître la valeur précise de δX mais on va se donner le moyen de dire : pour la majorité des mesures, δX est compris entre $-\Delta X$ et $+\Delta X$:

$$-\Delta X \leq \delta X \leq \Delta X$$

L'incertitude ΔX , définie ci-dessus est l'incertitude absolue sur la mesure de X . Cette incertitude a la même unité que la grandeur physique X , elle permet de définir un intervalle dans lequel il y a une forte probabilité de trouver la valeur « vraie » de la quantité que l'on mesure : $[X_{\text{vrai}} - \Delta X, X_{\text{vrai}} + \Delta X]$.

II. Origine des incertitudes

Il existe plusieurs causes d'incertitudes. On les divise en deux catégories.

II.1. Les incertitudes systématiques ou directes:

Elles sont dues à l'opérateur et à la construction des instruments ou des appareils de mesure pour effectuer la mesure. On la définit comme suit:

- **erreur de l'opérateur** qui dépend de la manière dont ce dernier a fait la mesure et la relevée à l'aide d'un appareil de mesure. Elle est limitée par les capacités visuelles de l'expérimentateur.
- **Erreur instrumentale** due à la résolution et l'imperfection des appareils de mesure. Cette erreur est généralement indiquée par le constructeur.

Si X est la valeur de la grandeur physique mesurée. Son incertitude absolue directe sera:

$$\Delta X = \Delta X_{\text{opérateur}} + \Delta X_{\text{instrument}}$$

$\Delta X_{\text{opérateur}}$, n'est évaluée que par celui qui effectue la mesure.

$\Delta X_{\text{instrument}}$, (instrument ou constructeur) est indiquée sur l'instrument de mesure.

II.2 Les incertitudes accidentelles

Ces erreurs sont aléatoires, donc imprévisibles, intervenant au hasard et introduisant des fluctuations de la valeur mesurée.

L'incertitude accidentelle peut être évaluée en effectuant plusieurs fois la même mesure et en prenant la moyenne arithmétique des valeurs obtenues. Cette incertitude est égale à la différence entre la moyenne et la mesure qui s'en écarte le plus.

Si $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ sont les résultats de n mesures identiques, alors la valeur moyenne sera:

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Et l'incertitude accidentelle sera donnée par:

$$\Delta a = \sup |a_m - a_i|, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

Compte tenue de l'incertitude accidentelle, l'incertitude absolue (ΔX) est maintenant:

$$\Delta X = \Delta X_{\text{opérateur}} + \Delta X_{\text{instrument}} + \Delta X_{\text{accidentelle}}$$

Les trois termes de l'incertitude absolue doivent être pris en considération, sauf si l'un d'eux est négligeable devant les autres.

III. Incertitudes absolues et incertitudes relatives

Erreur = valeur mesurée (X) - valeur vraie (X_{vraie}).

Incertitude absolue = ΔX (toujours positif) telle que: la valeur mesurée X a de grandes chances de différer de la valeur vraie X_{vraie} de moins de ΔX :

$$X_{\text{vraie}} - \Delta X \leq X \leq X_{\text{vraie}} + \Delta X,$$

ou encore :

$$X_{\text{vraie}} = X \pm \Delta X.$$

Incertitude relative = $\frac{\Delta X}{X}$ (positive, sans unité, souvent exprimée en %).

IV. Incertitudes sur les mesures indirectes

Une mesure indirecte est une valeur que l'on calcule à partir d'une ou plusieurs mesures directes.

IV.1. Calculs d'incertitude

Souvent la mesure de la grandeur physique recherchée n'est pas directe mais dépend de plusieurs paramètres mesurés indépendamment. L'incertitude sur la mesure finale dépend alors des incertitudes sur les grandeurs intermédiaires. Il faut alors faire un calcul d'incertitude pour estimer l'incertitude finale.

Connaissant les incertitudes de mesure sur x, y, z, u, v , on doit déterminer les incertitudes absolue Δf et relative $\Delta f/f$. On effectue le calcul par la méthode mathématique des différentielles :

Par définition, la différentielle totale de G est :

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial u} du + \frac{\partial f}{\partial v} dv$$

On effectue une majoration (on se place dans le cas le plus défavorable) en prenant la valeur absolue de chaque terme :

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \left| \frac{\partial f}{\partial u} \right| \Delta u + \left| \frac{\partial f}{\partial v} \right| \Delta v$$

IV.2. Cas d'une somme (addition ou soustraction)

$$f = u + v \text{ ou } f = u - v :$$

$\Delta f = \Delta u + \Delta v$: on somme les incertitudes absolues

IV.3. Cas d'un Produit ou d'un quotient:

$$f = u.v \text{ ou } f = \frac{u}{v} \text{ en différentiant } \ln f :$$

($\ln f = \ln u + \ln v$, pour le produit et $\ln f = \ln u - \ln v$, pour le quotient) on obtient:

$$\frac{df}{f} = \frac{du}{u} + \frac{dv}{v} \quad \text{ou} \quad \frac{df}{f} = \frac{du}{u} - \frac{dv}{v}$$

Dans les deux cas : $\frac{\Delta f}{|f|} = \frac{\Delta u}{|u|} + \frac{\Delta v}{|v|}$ on additionne les incertitudes relatives.

IV.4. Cas plus complexes :

Exemple 1 : $f(x, y, z, u) = xy + \frac{u}{z} + \frac{x}{u}$

On procède en plusieurs étapes:

Étape 1: on différencie la fonction f :

$$df = ydx + xdy + \frac{1}{z} du - \frac{u}{z^2} dz + \frac{1}{u} dx - \frac{x}{u^2} du$$

Étape 2: on regroupe les termes :

$$df = (y + \frac{1}{u})dx + xdy - \frac{u}{z^2} dz + (\frac{1}{z} - \frac{x}{u^2})du$$

Étape 3: pour obtenir l'incertitude absolue, on prend la valeur absolue des différents termes:

$$\Delta f = \left| y + \frac{1}{u} \right| \Delta x + |x| \Delta y + \left| \frac{u}{z^2} \right| \Delta z + \left| \frac{1}{z} - \frac{x}{u^2} \right| \Delta u$$

Exemple 2: $f(x, y, z, u) = \frac{x-u}{y-u}$, Ici, la fonction f s'écrit comme un rapport de deux

fonctions, donc le calcul sera plus rapide en différenciant $\ln f$:

Étape 1 : prendre le logarithme népérien de f. $\ln|f| = \ln|x-u| - \ln|y-u|$

Étape 2 : différencier $\ln f$ (et non pas f). $d \ln f = \frac{df}{f}$

$$\frac{df}{f} = \frac{d(x-u)}{x-u} - \frac{d(y-u)}{y-u} = \frac{dx}{x-u} - \frac{du}{x-u} - \frac{dy}{y-u} + \frac{du}{y-u}$$

Étape 3 : regrouper les termes.

$$\frac{df}{f} = \frac{dx}{x-u} - \frac{dy}{y-u} + du \left(\frac{1}{y-u} - \frac{1}{x-u} \right)$$

Étape 4 : prendre la valeur absolue de chaque terme. On obtient:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{|x-u|} + \frac{\Delta y}{|y-u|} + \left| \frac{1}{y-u} - \frac{1}{x-u} \right| \Delta u$$

IV.5. Nombre de chiffres significatifs.

On appelle chiffres significatifs, les chiffres qui interviennent dans le nombre qui exprime une mesure. Le nombre de chiffres significatifs sous-entend la précision de la valeur numérique, par exemple:

- 2 et 2,0 sont deux choses différentes : 2 sous-entend une précision de l'ordre de ± 1 , alors que 2,0 sous-entend une précision de l'ordre de $\pm 0,1$
- annoncer par exemple $f = 6,2136 \pm 0,1$ ne signifie rien. On notera $f = 6,2 \pm 0,1$ (le « 1 » de Δf s'ajoute au « 2 » de f): il doit y avoir le même nombre de chiffres après la virgule dans l'écriture de f et de Δf .

- Si $f = x/y$, où $x = 1,0$ et $y = 3,0$ (2 chiffres significatifs), alors $f = 1,0 / 3,0 = 0,33$ (2 chiffres significatifs également) et non $0,3333\dots$ (ce que donne votre calculatrice), ni $0,3$. Ici, on doit écrire le même nombre de chiffres significatifs pour $f = x/y$ que pour x et y .

V. Exploitation des résultats et tracé des graphiques

V.1. Notions générales sur le tracé des graphiques

Souvent les expériences fournissent un tableau de valeurs d'une fonction Y en fonction de la variable X . chaque couple de valeurs (X,Y) représente un point expérimental.

La courbe est tracée de manière qu'elle passe le plus près possible de tous les points expérimentaux. En pratique, une infinité de courbes peuvent passer très près des points expérimentaux, et le tracé est assez difficile.

Les points expérimentaux doivent être encadrés par des "*rectangles d'incertitudes*", centrés sur ces points expérimentaux, des cotés $2\Delta X$ et $2\Delta Y$ parallèles respectivement aux axes OX et OY . ΔX et ΔY étant les incertitudes absolues sur X et Y .

Les points réels, se trouvent à l'intérieur de ces "*rectangles d'incertitudes*", qui sont en fait des zones de probabilité. On fera passer la courbe par le maximum de "*rectangles d'incertitudes*".

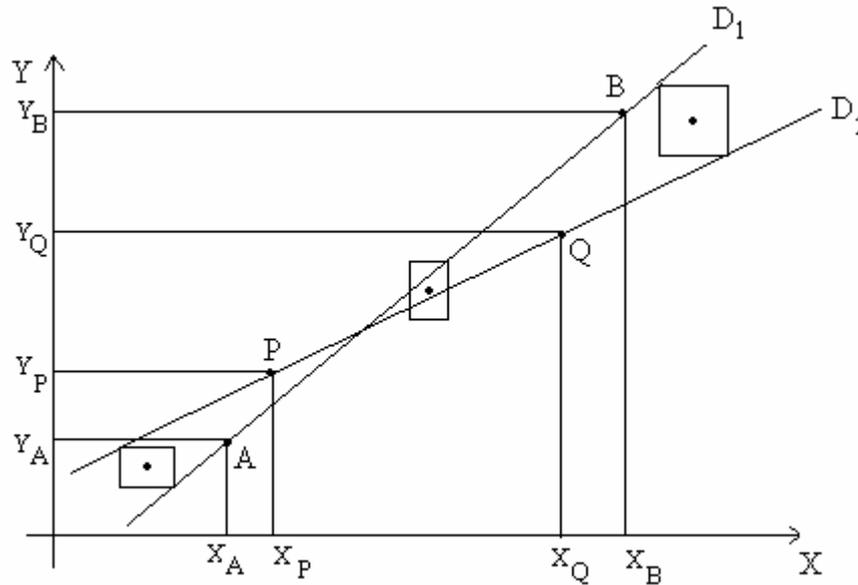
Les courbes seront tracées sur du papier millimétré. Sur les axes de coordonnées doivent être indiqués le nom de la grandeur physique représentée. Il faut préciser l'unité et l'échelle choisie. Il est inutile de porter sur les axes de coordonnées les valeurs associés aux mesures expérimentales.

Les échelles en abscisse et ordonnée sont choisies de façon à ce que le graphe utilisé occupe la surface maximale du papier millimétré.

Si le point $(X,Y) = (0,0)$ n'intervient pas dans la courbe, on peut décaler l'origine des deux axes.

Les points expérimentaux doivent être représentés par un point cerclé ou une petite croix afin de les distinguer lorsque la courbe est tracée.

V.2. Calcul de la pente et incertitude sur la pente.



Parmi toutes les droites qui passent par "les rectangles d'incertitudes" on trace les deux droites limites (D_1) et (D_2).

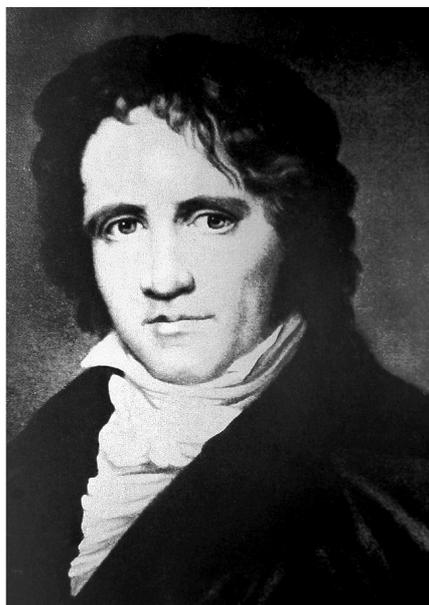
Si $A(X_A, Y_A)$ et $B(X_B, Y_B)$ sont deux points de la droite limite (D_1) et $P(X_P, Y_P)$ et $Q(X_Q, Y_Q)$ deux points de l'autre droite limite (D_2) leurs pentes respectives sont déterminées par:

$$P_1 = \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} \quad \text{et} \quad P_2 = \frac{Y_Q - Y_P}{X_Q - X_P}$$

A partir de ces deux pentes on détermine la pente moyenne et son incertitude

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad \text{et} \quad \Delta P = \frac{|P_2 - P_1|}{2}$$

Et c'est cette pente qui représentera la droite expérimentale.



Friedrich Wilhelm Bessel

Friedrich Wilhelm Bessel (22 juillet 1784, Minden — 17 mars 1846, Königsberg) est un astronome et mathématicien allemand.

Bessel est le premier à déterminer avec succès la parallaxe, et par là même la distance d'une étoile fixe, 61 Cygni, apportant une preuve supplémentaire de la nature héliocentrique du Système solaire. Il précise également, pour la Terre, le diamètre, la masse et la valeur de l'aplatissement aux pôles. Il introduit, dans la résolution des problèmes de mécanique céleste faisant intervenir la théorie des perturbations, les fonctions mathématiques dites de Bessel, solutions d'équations différentielles particulières. Ces fonctions jouent un rôle important dans l'analyse de la répartition et de la conduction de la chaleur ou de l'électricité à travers un cylindre. Elles sont aussi utilisées pour résoudre des problèmes de mécanique ondulatoire, d'élasticité et d'hydrodynamique

TP N° 1 : Focométrie

1) But de la manipulation

La focométrie est l'ensemble des méthodes de détermination expérimentale des éléments d'un système optique centré dans l'approximation de Gauss.

La distance focale est la plus importante des propriétés utilisées pour les lentilles et systèmes de lentilles. Celle-ci sera déterminée par différentes méthodes:

- Relation de conjugaison
- Méthode de Bessel
- Méthode d'autocollimation.

2) Rappels Théoriques

a) définition

Une lentille est l'association de deux dioptries de sommets S_1 et S_2 dont au moins un est sphérique. Une lentille est dite mince si son épaisseur est négligeable. On distingue six formes de lentilles minces.



Figure 2-a



Figure 2-b

- Les lentilles à bords pointus sont dites convergentes (Figure 2-a).
- Les lentilles à bords épais sont dites divergentes (Figure 2-b).

Une lentille mince est caractérisée par:

- son centre optique O .
- Sa distance focale objet $\overline{OF} = f$ et sa distance focale image $\overline{OF'} = f'$

b) Centre optique

On appelle centre optique d'une lentille mince, le point O de la lentille où tout rayon lumineux incident passant par ce point, traverse la lentille sans déviation.

c) Foyers principaux

Cas des lentilles convergentes

Une lentille convergente L donne d'un objet AB réel, une image $A'B'$ réelle (figure 3-a).

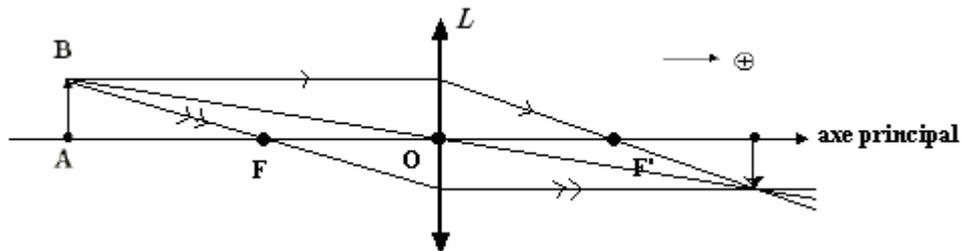


Figure 3-a

Tout rayon lumineux incident parallèle à l'axe principal passe F' et tout rayon incident issu de F émerge de la lentille parallèlement à l'axe principal. Les points F et F' de l'axe principal, symétriques par rapport au centre optique O de la lentille, sont appelés respectivement foyer principal objet et foyer principal image.

Cas des lentilles divergentes

Une lentille divergente L donne d'un objet AB réel, une image $A'B'$ virtuelle (figure 3-b).

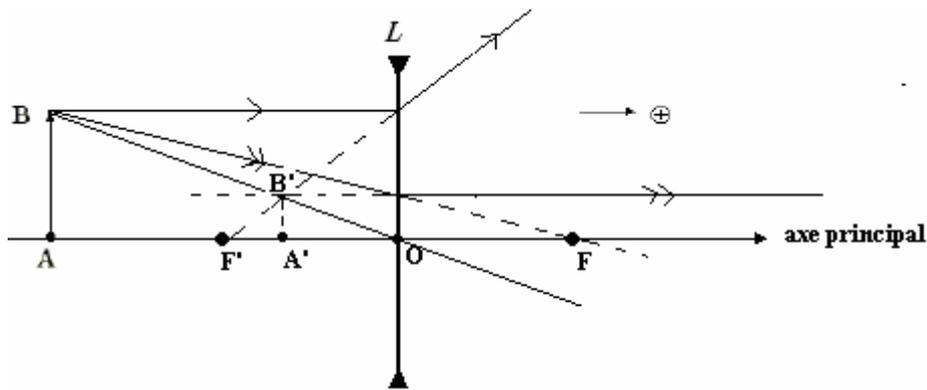


Figure 3-b

Une lentille divergente possède aussi deux foyers principaux **F** et **F'** symétriques par rapport au centre optique **O**. Les foyers de la lentille divergente sont virtuels puisqu'ils se trouvent dans les prolongements des rayons lumineux.

Distances focales

La distance séparant le point **F** ou le point **F'** du centre optique **O** est appelée distance focale et notée par f ou f' :

$$\overline{OF} = f \quad \text{et} \quad \overline{OF'} = f' \quad \Rightarrow \quad f' = -f$$

Il est important de noter que:

- $f' > 0$ pour une lentille convergente
- $f' < 0$ pour une lentille divergente.

3) Détermination expérimentale des distances focales d'une lentille

a) Méthode des points conjugués

Cette méthode s'applique aussi bien à des lentilles minces convergentes qu'à des lentilles minces divergentes. Pour déterminer la distance focale on se sert de la formule de conjugaison suivante:

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad ; \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} \quad \text{avec } \overline{OA} = p \quad \text{et } \overline{OA'} = p'$$

A: point objet sur l'axe principal

A': point image sur l'axe principal.

Cas des lentilles convergentes

Une lentille convergente donne d'un objet **AB** réel, une image **A'B'** réelle (figure 3-a).

Les positions (p') de l'image, pour différentes positions de l'objet (p), sont données par

la relation de conjugaison ($\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$). La distance focale est donnée par;

$$f' = \frac{p \cdot p'}{p - p'}$$

Cas des lentilles divergentes

La lentille divergente donne d'un objet réel une image virtuelle (figure 3-b). Pour avoir une image réelle, il faut utiliser un objet virtuel. Cet objet virtuel peut être obtenu à l'aide d'un objet et d'une lentille convergente (figure 4).

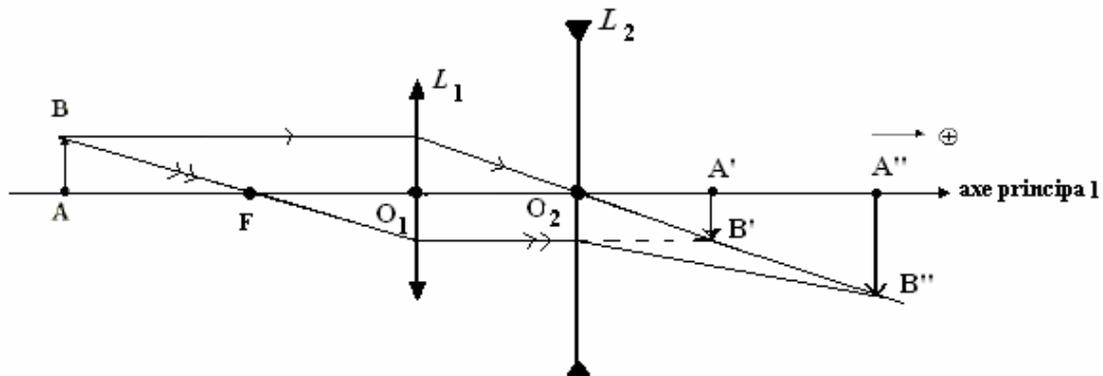


Figure 4

La lentille convergente L_1 donne de l'objet réel **AB**, une image réelle **A'B'**. En plaçant la lentille divergente L_2 entre la lentille convergente L_1 et l'image **A'B'**, **A'B'** joue le rôle d'un objet virtuel pour la lentille divergente L_2 .

On règle l'ensemble jusqu'à obtention d'une image **A''B''** nette sur l'écran. On mesurant O_1A' et O_2A'' , on peut calculer la distance focale f'_2 de la lentille divergente à l'aide de la formule de conjugaison et en prenant dans ce cas:

$$\overline{O_2A'} = p \quad \text{et} \quad \overline{O_2A''} = p'$$

b) méthode de Bessel

Cette méthode s'applique uniquement aux lentilles convergentes. Elle consiste à imposer une distance D fixe entre l'objet et l'écran. Il existe deux positions (P_1 et P_2) possibles de la lentille L (figure 5) pour lesquelles on obtient une image nette sur l'écran et qui réalisent la formule de conjugaison si $D > 4f_1'$:

On montre que $f_1' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$ avec $d = P_2 - P_1$

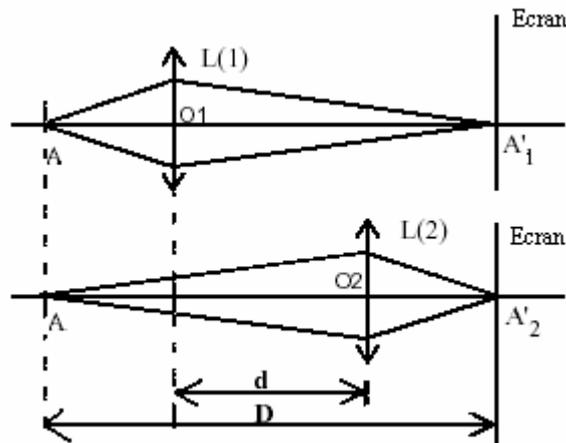


Figure 5

D étant alors fixée, la mesure de d séparant les deux positions O_1 et O_2 de la lentille permet de calculer la valeur de f_1' .

c) Méthode d'autocollimation.

L'objet étant dans le plan focal objet de la lentille, son image sera rejetée à l'infini et le faisceau émergent est parallèle. la réflexion sur un miroir plan est un faisceau parallèle (figure 6). la distance focale de la lentille est égale à la distance de celle-ci à l'objet.

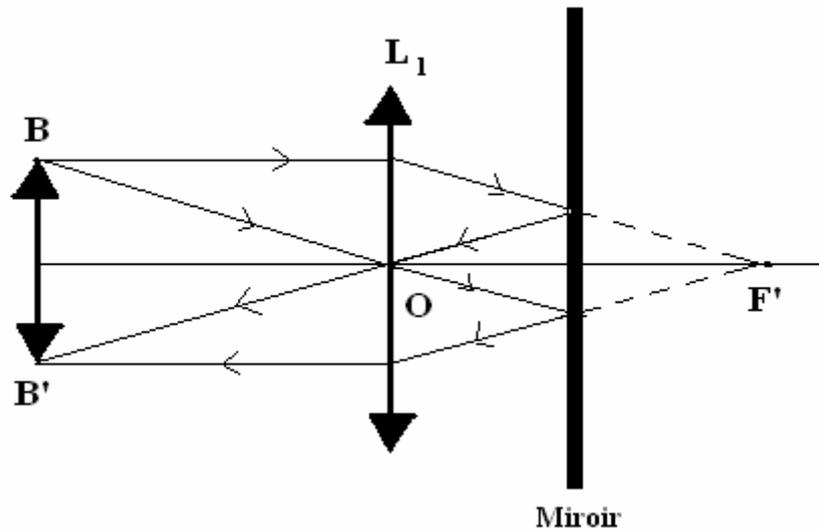


Figure 6

4) Travail à effectuer

Matériel disponible:

- Un banc optique gradué (en mm) sur lequel peuvent coulisser des cavaliers où l'on fixe les supports de l'objet, des lentilles, des miroirs ou de l'écran.
- Une source de lumière blanche
- Une fente qui sert d'objet
- Une lentille L_1 convergente
- Une lentille L_2 divergente
- Un écran sur lequel on observe les images.
- un miroir plan

a) Détermination de la distance focale de la lentille convergente par la méthode des points conjugués

- Réaliser le montage ci-dessous (schéma 1).

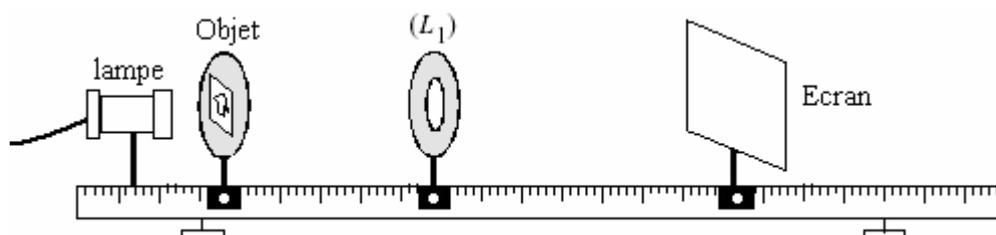


Schéma 1

- Placer la lentille (L_1) à une distance p de l'objet et déplacer l'écran pour obtenir une image nette de l'objet.

On obtient une image nette sur une plage appelée profondeur du champ. Cette plage est notée $\Delta p'_{pc}$ et devient importante lorsque p' devient petite.

- Mesurer p' pour les valeurs de p indiquées sur la table de manipulation.
- Regrouper les valeurs dans le tableau ci-dessous

P (cm)	P' (cm)	$\frac{1}{P}$ (m^{-1})	$\frac{1}{P'}$ (m^{-1})	$\Delta(\frac{1}{P})$ (m^{-1})	$\Delta(\frac{1}{P'})$ (m^{-1})

- Tracer les variations de $\frac{1}{p'} = f(\frac{1}{p})$ avec les rectangles d'incertitudes.
- En déduire la distance focale f et Δf .

b) Détermination de la distance focale de la lentille convergente par la méthode d'autocollimation.

- Réaliser le montage ci-dessous (Schéma 2)

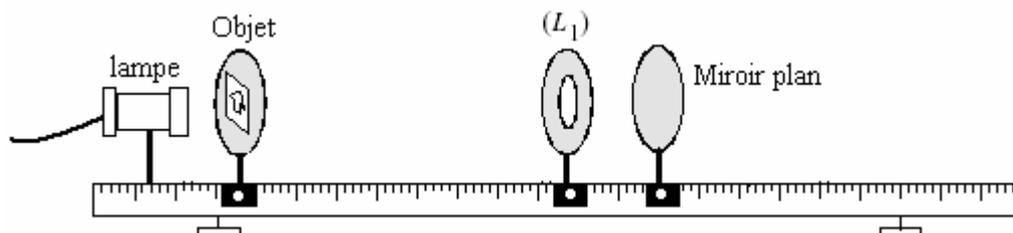


Schéma 2

- Déplacer l'ensemble lentille (L_1) et miroir plan réfléchissant de manière à former l'image de l'objet dans le plan de ce dernier. (On pourra éventuellement incliner légèrement le miroir).
- En déduire la distance focale f' et $\Delta f'$.

c) Détermination de la distance focale de la lentille convergente par la méthode de Bessel.

- fixer l'écran à une distance de 1 m de l'objet.
- trouver les deux positions du centre optique de L_1 donnant une image nette sur l'écran.
- connaissant d , D , Δd et ΔD calculer f'_1 et $\Delta f'_1$.

d) Détermination de la distance focale de la lentille divergente par la méthode des points conjugués.

- Réaliser le montage ci-dessous (Schéma 3) sans la lentille divergente.

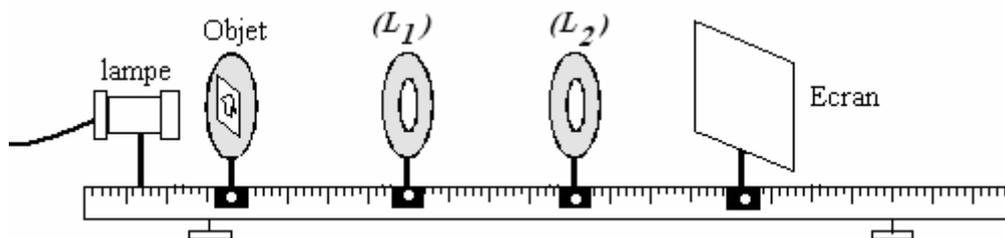


Schéma 3

- Trouver la position de la lentille convergente (L_1) de telle façon à obtenir une image plus petite que l'objet.
- Noter $\overline{OA'}$ et $\Delta \overline{OA'}$
- Sans déplacer la lentille convergente (L_1), interposer la lentille divergente (L_2) entre la lentille convergente (L_1) et l'écran.
- Chercher la position de la nouvelle image en déplaçant l'écran.
- Mesurer $\overline{O_1O_2}$ et $\overline{O_2A''}$, puis donner $\overline{O_2A'}$
- Déterminer la distance focale f'_2 de la lentille divergente et son incertitude $\Delta f'_2$.

3-d) Mesure des dimensions d'objets

On se propose de mesurer le diamètre de deux fils fins F1 et F2.

- Placer l'objet, fil F1 sur la platine et effectuer la mise au point.
- Compter le nombre de divisions du micromètre oculaire qui couvrent la section (diamètre) image du fil.
- Faire trois mesures en différentes sections du fil et donner $d_1 \pm \Delta d_1$.
- Refaire les mêmes opérations avec le fil F₂ et en déduire $d_2 \pm \Delta d_2$.
- Donner l'expression générale d'un diamètre réel D de l'objet en fonction de d et γ_{oc} .
En déduire $D_1 \pm \Delta D_1$ et $D_2 \pm \Delta D_2$ les diamètres des deux fils.



Augustin Jean Fresnel

Augustin Jean Fresnel, né le 10 mai 1788 à Broglie et mort le 14 juillet 1827 à Ville-d'Avray, est un physicien français.

Fondateur de l'optique moderne, il proposa une explication de tous les phénomènes optiques dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière.

Il a réalisé de nombreuses expériences sur les interférences lumineuses indépendamment de celles de Young, pour lesquelles il a forgé la notion de longueur d'onde. Il a calculé les intégrales dites de Fresnel. Il a prouvé pour la première fois que deux faisceaux de lumière polarisés dans des plans différents n'ont aucun effet d'interférence. De cette expérience, il déduit que le mouvement ondulatoire de la lumière polarisée est transversal et non longitudinal (comme celui du son) ainsi que l'on croyait avant lui.

Il est le premier à produire une lumière polarisée circulaire. Ses formules dites de Fresnel, sur la réfraction sont toujours utilisées. Dans le domaine de l'optique appliquée, Fresnel invente la lentille à échelon utilisée pour accroître le pouvoir de l'éclairage des phares.

TP N° 2: Interférences non localisées par division du front d'onde.

1. But de la manipulation

le but de cette séance de travaux pratiques est la réalisation des interférences lumineuses non localisées à l'aide des miroirs de Fresnel.

2. Principe

La source monochromatique S utilisée est ponctuelle de longueur d'onde λ . Le dispositif interférentiel permet une division du front d'onde issu de la source principale S en deux faisceaux cohérents (1) et (2) provenant de deux sources secondaires S_1 et S_2 .

Dans la partie commune des faisceaux (1) et (2), on observe des franges non localisées (figure 1).

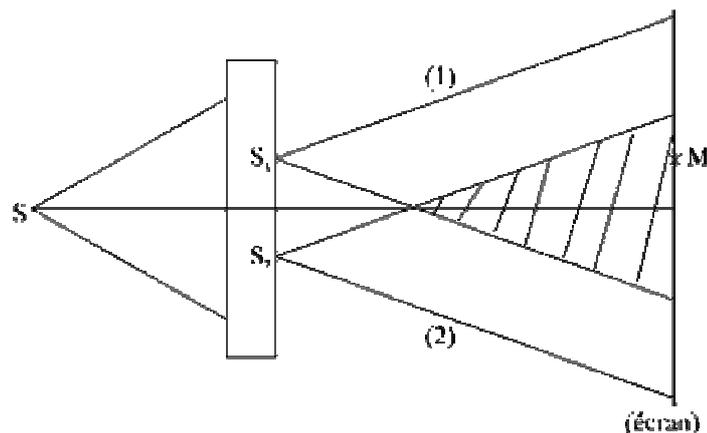


Figure 1

Soit a l'écartement des sources secondaires S_1 et S_2 et D la distance du plan des sources à l'écran d'observation (E) (figure 2).

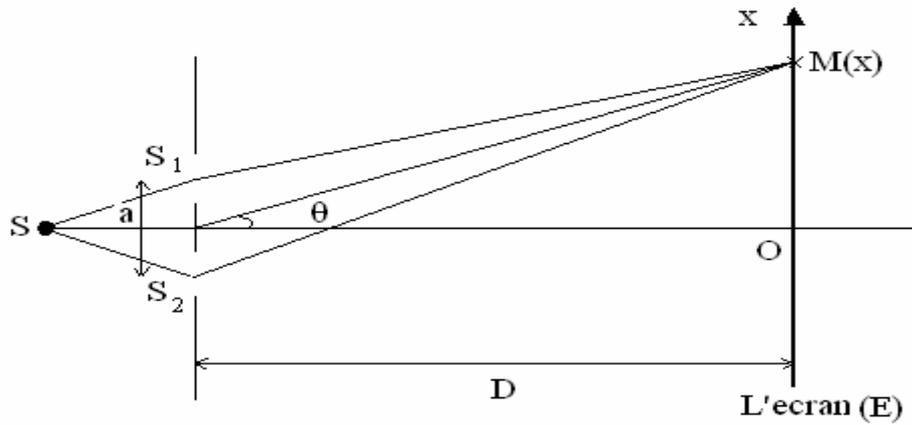


Figure 2

L'éclairement $I(x)$ en un point M de l'écran, résultant de la superposition des deux vibrations lumineuses issues des sources secondaires S_1 et S_2 est:

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \cos \phi \quad \text{avec} \quad I_1 = I_2 = I_0$$

$$I(M) = 2I_0(1 + \cos \phi) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad \text{où} \quad \phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad \text{et} \quad \delta = \frac{ax}{D}$$

$\delta = (S_2M) - (S_1M) = \frac{ax}{D}$ est La différence de marche entre les rayons S_1M et S_2M , en un point M de l'écran (E) dont x est l'ordonnée suivant l'axe vertical Ox .

Sur l'écran on observe des franges rectilignes équidistantes perpendiculaires à Ox (à l'axe de S_1S_2) (figure 3).

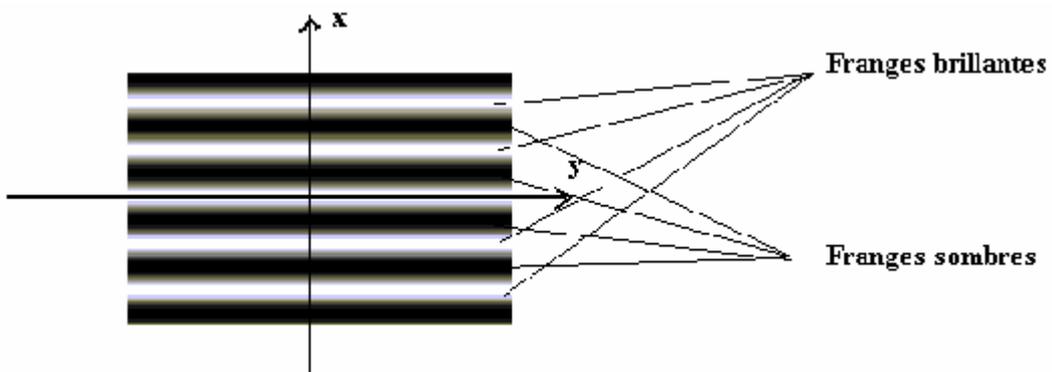


Figure 3

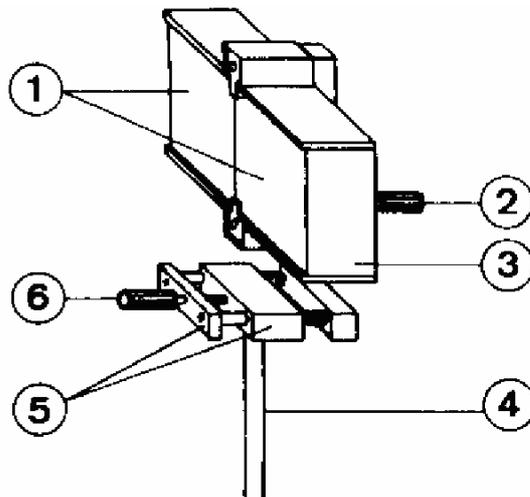
L'interfrange i est la distance entre deux franges consécutives de même nature: $i = \frac{\lambda D}{a}$

où $a = 2.\alpha.L$ et L est la distance de la source S à l'arrête commune Δ des deux miroirs ($L = S\Delta$).

3) Miroirs de Fresnel

Le système interférentiel des miroirs de Fresnel est constitué de deux miroirs plans légèrement inclinés l'un vers l'autre d'un angle dont le complément α est très petit (Figure 4).

Une source lumineuse ponctuelle, qui se réfléchit sur les deux miroirs, apparaît comme une paire de sources lumineuses virtuelles, étroitement voisines et cohérentes.



- (1) Miroirs M1 et M2 (l'un est mobile et l'autre est fixe)
- (2) vis moletée pour le réglage du miroir mobile (variation de l'angle α).
- (3) cadre en matière plastique
- (4) tige
- (5) dispositif de déplacement parallèle
- (6) vis moletée agissant sur le déplacement parallèle.

Figure 4

La source lumineuse principale ponctuelle S éclaire les deux Miroirs M_1 et M_2 . Les faisceaux lumineux réfléchis par les miroirs, semblent provenir des sources secondaires S_1 et S_2 images de S respectivement par rapport à M_1 et à M_2 . La partie commune des faisceaux réfléchis est la zone d'interférence (Figure 5)

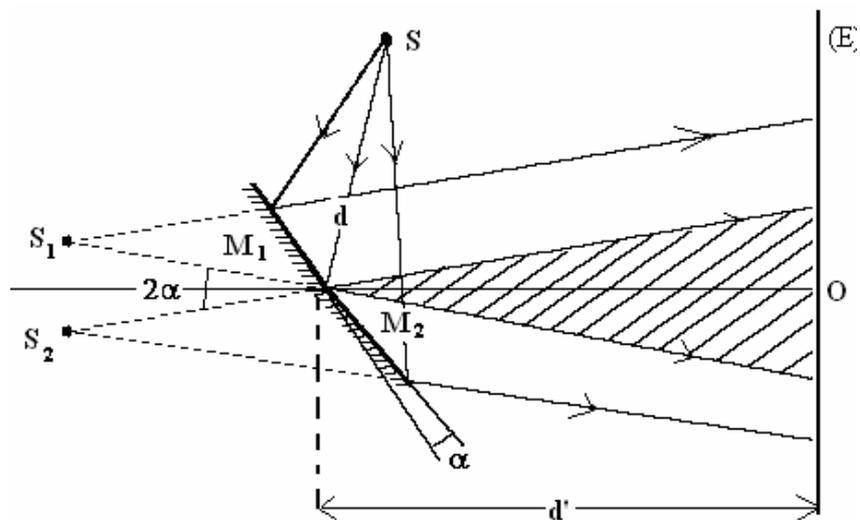


Figure 5

4) Travail à effectuer.

4-a) Obtention de la figure d'interférence

On utilise une source laser qui émet dans le rouge

Attention ! Ne placer en aucun cas l'œil dans l'axe du faisceau Laser. La rétine de l'œil est détruite si le faisceau laser pénètre dans l'œil. Prendre garde aux réflexions parasites (éloigner les objets métalliques: règles, montres et bijoux).

1. Monter les appareils selon la figure 6.

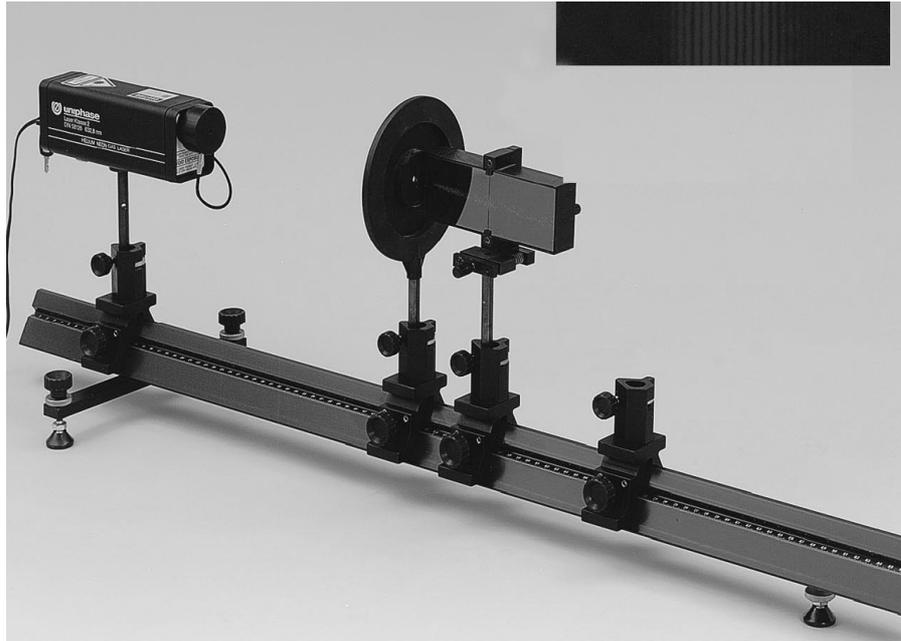


Figure 6

- (1) laser
- (2) lentille de +5 mm
- (3) miroirs de Fresnel

Remarque: éviter de toucher les surfaces réfléchissantes des miroirs.

2. La lentille (2) de +5 mm doit être fixée sur le banc d'optique environ 15 cm derrière l'ouverture du rayon laser. Son rôle étant d'élargir le faisceau du laser.
3. Placer les miroirs de Fresnel (3) très près de la lentille (2) et orienter la partie mobile des miroirs du côté de l'écran.
4. Placer d'abord les miroirs de Fresnel (3) en dehors des rayons lumineux à l'aide de (6). Actionner la vis moletée (2) de façon à faire pivoter le miroir mobile le plus possible en arrière.
5. A l'aide du dispositif de déplacement parallèle (6) amener les miroirs dans la trajectoire du faisceau lumineux de façon à ce que le spot sur l'écran (ou le mur) soit recouvert aux trois quarts environ. Deux réflexions provenant des deux miroirs apparaissent.
6. Tourner la vis moletée (2) pour positionner la réflexion provenant du miroir réglable entre le spot direct et la réflexion du miroir fixe.
7. Agir sur (6) afin d'égaliser la luminosité des deux réflexions.

8. Réduire l'angle entre les miroirs à l'aide de (2) afin de couvrir de plus en plus les réflexions. On voit alors un système de franges d'interférence dans la partie commune des faisceaux lumineux.

En faisant varier l'angle entre les miroirs à l'aide de (2) les franges d'interférence sont plus ou moins serrées.

4-b) Mesures

On propose de déterminer la longueur d'onde λ du laser. Pour cela, il nous faut connaître l'écartement a des deux sources S_1 et S_2 , la distance D qui sépare les sources et l'écran et la valeur de l'interfrange i .

1) Détermination de l'interfrange i

- Mesurer l'interfrange i en utilisant trois intervalles différents contenant plusieurs franges brillantes.
- En déduire la valeur moyenne de l'interfrange i et son incertitude Δi .

2) Détermination de a et D .

Pour déterminer ces deux grandeurs on projette sur l'écran l'image des sources S_1 et S_2 à l'aide d'une lentille (4) de distance focale $f = 200\text{mm}$.

Sans toucher au réglage du montage précédent, placer la lentille(4) de distance focale $f' = 200\text{mm}$, entre les miroirs et l'écran (E) (Figure 7)

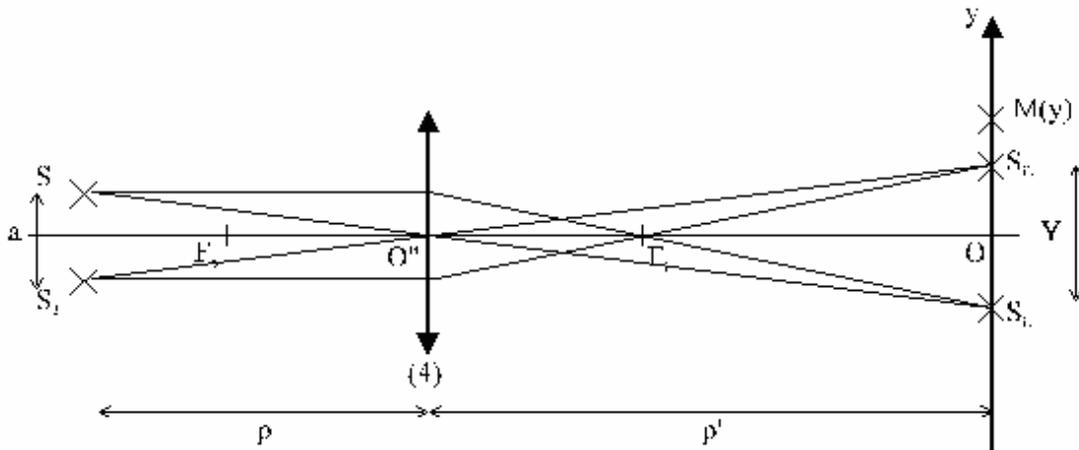
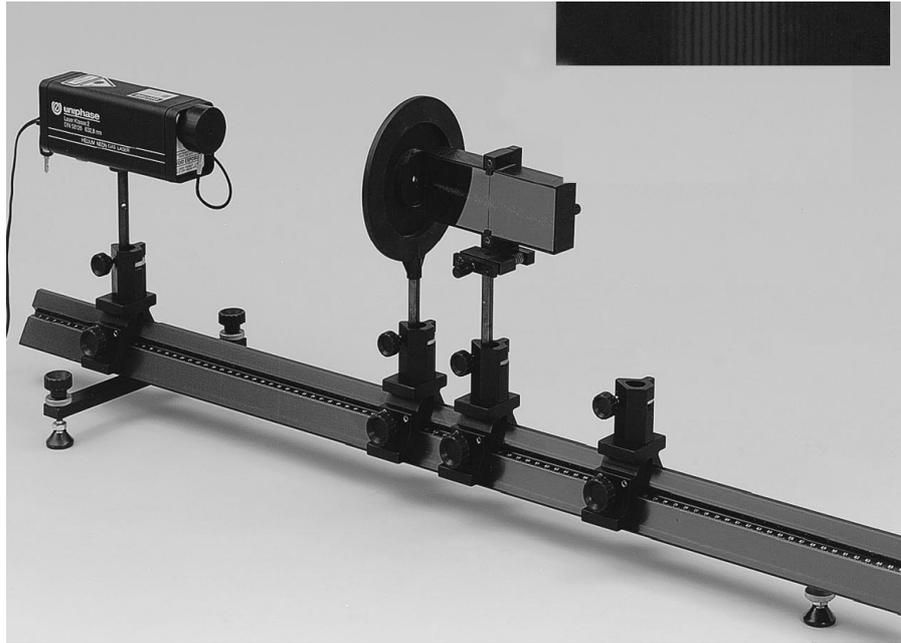


Figure 8

a) En utilisant la formule de conjugaison de la lentille (4) $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f'}$ et son

grandissement $\gamma = \frac{a'}{a}$ ($a = S_1S_2$ et $a' = S'_1S'_2$), Montrer que:

- $a = \frac{f'}{p' - f'} a'$
- $D = p + p' = \frac{p'^2}{p' - f'}$
- $\lambda = \frac{f' a'}{p'^2} i$

b) Donner les expressions de Δa , ΔD et $\Delta \lambda$.

c) Procéder à la projection de S1 et S2

- Mesurer p' et $\Delta p'$
- Mesurer a' et $\Delta a'$.

d) Remplir le tableau ci-dessous

i (mm)	
p' (cm)	
a' (cm)	
D (cm)	
γ	
a (mm)	
λ (unite)	
Δi (mm)	
$\Delta p'$ (cm)	
$\Delta a'$ (cm)	
ΔD (cm)	
$\Delta \gamma$	
Δa (mm)	
$\Delta \lambda$ (unite)	



Christian Huygens

Christian Huygens (14 avril 1629, La Haye — 8 juillet 1695) est mathématicien, un astronome et un physicien néerlandais.

TP N° 3: Etude de la diffraction.

1. But de la manipulation

Le but de la manipulation est d'étudier la diffraction de Fraunhofer (à l'infini) à l'aide de différents objets diffractant:

- fente unique
- diaphragme circulaire

2. Rappels théoriques

Considérons une source lumineuse ponctuelle S qui éclaire un écran E à travers un diaphragme d'ouverture réglable O . On observe alors sur l'écran l'image du diaphragme. Lorsqu'on réduit l'ouverture O , on voit apparaître sur l'écran une tache lumineuse qui déborde le cercle géométrique de la source S . En fait, l'onde lumineuse a été diffractée par le diaphragme O . Ce dernier se comporte comme une source de lumière dont les rayons prennent des directions non alignées avec celles de la source S . Ceci montre qu'il n'y a plus de propagation rectiligne de la lumière.

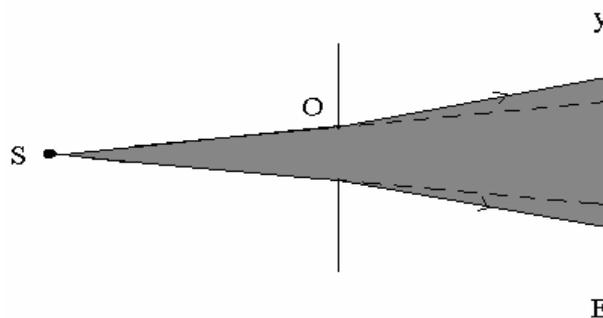


Figure 1

2-a. Principe de Huygens-Fresnel :

Le principe de Huygens admet que la lumière se propage de proche en proche et chaque point atteint par une vibration devient à son tour une source de vibration lumineuse, source dite secondaire.

Ce principe est complété par le postulat de Fresnel avec une hypothèse sur l'amplitude et la phase des sources secondaires. L'ensemble du principe et du postulat forme ainsi le principe de Huygens-Fresnel dont l'énoncé est le suivant :

Les vibrations lumineuses qui se propagent à l'extérieur d'une surface fermée Σ à l'intérieur de laquelle se trouve une source ponctuelle S sont identiques à celles que l'on obtiendrait en remplaçant la source S par des sources secondaires (S_1, S_2, S_3, \dots) réparties sur la surface Σ . Selon le principe de Huygens-Fresnel, l'amplitude (dA) des ondes secondaires émises par l'élément de surface dS est proportionnelle à l'amplitude de l'onde incidente a_0 et à l'aire de la surface :

$$dA = \frac{k \cdot a_0 \cdot dS}{S}$$

2-b. Diffraction par une ouverture rectangulaire.

Soit une ouverture constituée par un rectangle de côtés a et b dans le plan xOy .

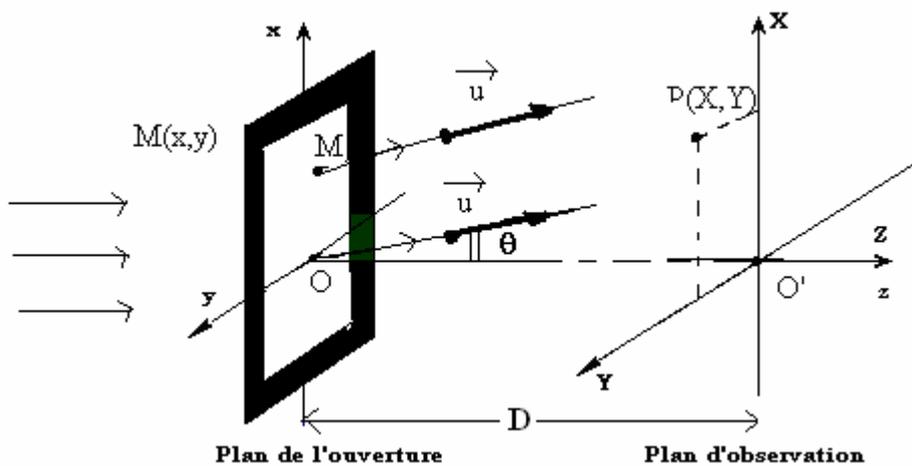


Figure 2

L'onde diffractée dans la direction \vec{u} par l'élément de surface dS autour du point $M(x,y)$ du rectangle, en prenant pour origine des phases celle de la vibration émise par O dans la direction \vec{u} , est :

$$kA_0 \frac{dS}{S} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha x + \beta y))$$

où α et β sont les cosinus directeurs du vecteur unitaire \vec{u}

L'amplitude complexe de l'onde diffractée dans la direction \vec{u} par dS (au point $P(X,Y)$ de l'écran E) est:

$$dA(P) = kA_0 \frac{dS}{S} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha x + \beta y))$$

L'amplitude de l'onde diffractée dans la direction \vec{u} par la surface entière S est donc :

$$\bar{A}(P) = \frac{kA_0}{S} \int_{-a/2}^{a/2} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha x)) dx \int_{-b/2}^{b/2} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda}(\beta y)) dy$$

$$\bar{A}(P) = \frac{kA_0}{S} \left[\frac{\exp(-j \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha x))}{-j \frac{2\pi}{\lambda} \alpha} \right]_{-a/2}^{a/2} \left[\frac{\exp(-j \frac{2\pi}{\lambda}(\beta y))}{-j \frac{2\pi}{\lambda} \beta} \right]_{-b/2}^{b/2}$$

$$\bar{A}(P) = kA_0 \frac{\sin(\frac{\pi}{\lambda}(\alpha.a))}{\frac{\pi}{\lambda} \alpha.a} \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{\lambda}(\beta.b))}{\frac{\pi}{\lambda} \beta.b}$$

Pour une fente fine ($b \gg a$) parallèle à l'axe Oy , L'amplitude de l'onde diffractée dans la direction \vec{u} par la surface entière S lorsque, $\beta = 0$ et $\alpha = \sin\theta$, est:

$$\bar{A}(P) = kA_0 \frac{\sin(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda})}{\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}}$$

Pour θ faible on peut écrire:

$$\sin \theta \cong \text{tg} \theta = \frac{X}{D} \quad \text{et} \quad \bar{A}(P) = kA_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi a X}{\lambda D}\right)}{\frac{\pi a X}{\lambda D}}$$

Si I_0 est l'intensité de l'onde lumineuse incidente, l'intensité de l'onde diffractée au point P (X,Y) est:

$$I(P) = I(X) = |A(p)|^2 = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a X}{\lambda D}\right)}{\left(\frac{\pi a X}{\lambda D}\right)^2}$$

On observe des taches lumineuses réparties sur l'axe OX de l'écran. Ce qui conduit à la variation d'intensité lumineuse suivante:

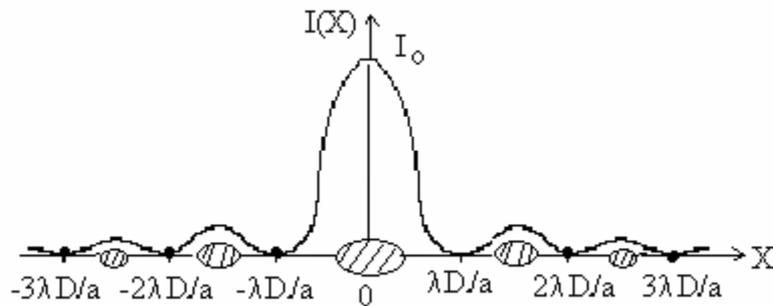


Figure 3

Les franges sont sombres quand l'intensité lumineuse s'annule et sont données par:

$$\frac{\pi a X}{\lambda D} = n\pi \quad \Rightarrow \quad X(n) = n \left(\frac{\lambda D}{a} \right) \quad \text{avec} \quad n \in \mathbb{Z}^*$$

L'interfrange i est donnée par:

$$i = X(n+1) - X(n) = \lambda D/a$$

2-c. Diffraction par une fente circulaire

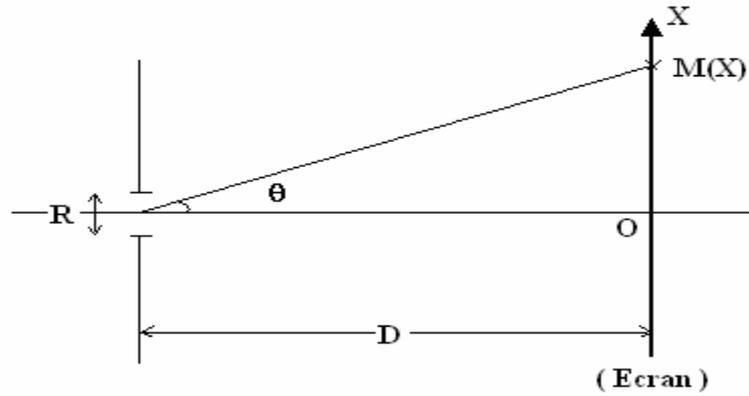


Figure 4

Pour une ouverture circulaire de rayon R , on montre que l'intensité de la lumière diffractée en M est:

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(m)}{m} \right]^2 \quad \text{avec} \quad m = \frac{2\pi R}{\lambda} \sin \chi$$

$J_1(m)$: Fonction de Bessel

On observe sur l'écran une succession d'anneaux concentriques sombres et brillants. Ce qui conduit à la variation d'intensité lumineuse suivante:

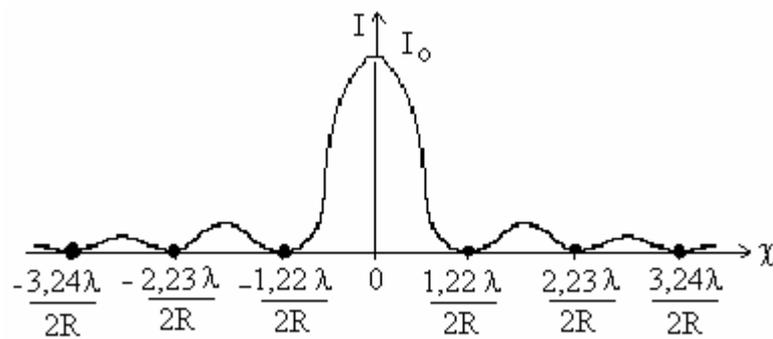


Figure 5

Les rayons R_1 et R_2 des deux premiers anneaux sombres sont donnés par:

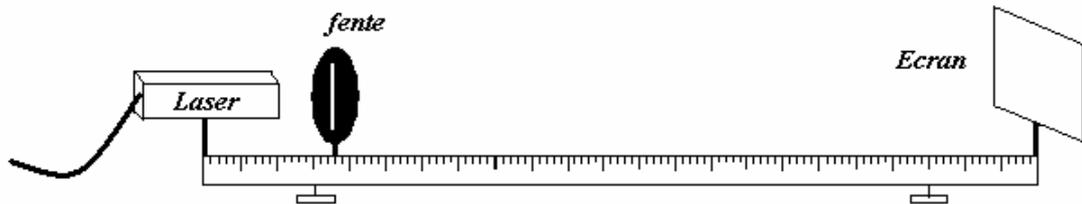
$$R_1 = \frac{1,22 \cdot \lambda}{2R} \sin \chi \quad \text{et} \quad R_2 = \frac{2,23 \cdot \lambda}{2R} \sin \chi$$

3) Travail à effectuer

3-a. Diffraction par une fente rectangulaire de largeur a

On utilise une source **Laser** (Hélium-Néon) émettant un faisceau lumineux parallèle. L'observation du phénomène de diffraction s'effectue sur un écran.

- Aligner le **Laser** avec l'écran d'observation
- Placer la fente rectangulaire devant le **Laser** à environ **1m** de l'écran.
- Faire bien centrée la fente par rapport au faisceau **Laser**.



Attention ! Ne placer en aucun cas l'œil dans l'axe du faisceau Laser. La rétine de l'œil est détruite si le faisceau laser pénètre dans l'œil. Prendre garde aux réflexions parasites (éloigner les objets métalliques: règles, montres et bijoux).

Pour les deux fentes **F₁** et **F₂**:

- A l'aide d'un papier millimétré qu'on colle sur l'écran (E), noter à partir de la frange centrale ($X_0 = 0$), positivement à droite et négativement à gauche les positions (X_n (n)) des trois premières franges sombres. Regrouper les mesures dans le tableau suivant:

Fentes	$- X_3 \pm \Delta X$ (mm)	$- X_2 \pm \Delta X$ (mm)	$- X_1 \pm \Delta X$ (mm)	$X_1 \pm \Delta X$ (mm)	$X_2 \pm \Delta X$ (mm)	$X_3 \pm \Delta X$ (mm)
F₁						
F₂						

- Tracer sur des papiers millimétrés séparés, X_n en fonction de n , ($n = -3, -2, -1, 1, 2, 3$), avec les incertitudes pour les deux fentes **F₁** et **F₂**.

- Calculer pour chaque courbe la pente moyenne P_{moy} et en déduire la valeur moyenne i_{moy} de l'interfrange et son incertitude.
- Sachant que la longueur d'onde du Laser utilisée est $\lambda = (0,6328 \pm)\mu\text{m}$, et à partir des valeurs mesurés de i_{moy} , détermine la largeur a de chaque fente.
- Regrouper les résultats dans le tableau suivant;

Fentes	i_{moy} (mm)	Δi_{moy} (mm)	a (mm)	Δa (mm)
F1				
F2				

3-b. Diffraction par une fente circulaire

- Remplacer la fente rectangulaire fine par la fente circulaire
- Mesures les rayons R_1 et R_2 des deux premiers anneaux sombres et donner ΔR_1 et ΔR_2 .
- En déduire le rapport expérimental $\mu_{\text{exp}} = \frac{R_1}{R_2}$ et $\Delta\mu$.
- Comparer μ_{exp} et $\mu_{\text{Théo}}$.

3-c. Diffraction par un objet.

- Remplacer la fente par un fil fin.
- Noter à partir de la frange centrale ($X_0 = 0$), positivement à droite et négativement à gauche les positions (X_n (n)) des trois premières franges sombres. Regrouper les mesures dans le tableau suivant:

	$- X_3 \pm \Delta X$ (mm)	$- X_2 \pm \Delta X$ (mm)	$- X_1 \pm \Delta X$ (mm)	$X_1 \pm \Delta X$ (mm)	$X_2 \pm \Delta X$ (mm)	$X_3 \pm \Delta X$ (mm)
Fil						

En déduire le diamètre du d fil.

