

Quelques expériences réalisables à l'aide d'un laser

L'existence sur le marché de lasers à gaz (He — Ne) à fonctionnement continu a permis de réaliser un certain nombre d'expériences nouvelles d'un grand intérêt. D'autre part, la réalisation de nombreuses expériences classiques se trouve grandement facilitée par l'emploi du laser.

Nous avons surtout pensé, en rédigeant cet article, aux possibilités d'utilisation du laser dans l'enseignement secondaire. C'est pourquoi il sera souvent fait appel à la finesse du pinceau lumineux et à son intensité exceptionnelle. Il ne faut pas oublier cependant que l'intérêt principal du faisceau laser réside dans le fait qu'il possède une monochromaticité et une cohérence inhabituelles.

C'est ainsi qu'on verra que l'étude de l'optique physique et géométrique peut être rendue spectaculaire pour un large public. Certaines vérifications de lois, certaines mesures, seront beaucoup plus précises.

Nous présentons ici un certain nombre d'expériences qui peuvent être réalisées avec des moyens très simples, en général avec un matériel disponible dans toutes les collections de lycée.

D'autres expériences qui dépassent le niveau de l'enseignement secondaire sont signalées. Les collègues intéressés pourront se reporter à la bibliographie sommaire.

Nous n'avons pas craint de donner quelques détails pratiques pour la réalisation de certaines expériences. On en trouvera un certain nombre en annexe. Enfin, quelques photographies permettront de se rendre compte de ce qu'il est possible d'obtenir dans des conditions qui n'ont rien d'exceptionnel.

I. QUELQUES PROPRIETES DU FAISCEAU LASER.

Le laser à Hélium-Néon émet, en régime continu, une radiation très monochromatique de longueur d'onde voisine de 6 328 Å.

Par rapport à une source ordinaire, le laser présente trois différences essentielles portant sur :

- la cohérence temporelle,
- la cohérence spatiale,
- l'intensité lumineuse.

Pour les notions de cohérence, voir les ouvrages cités [1, 2, 3].

On vérifiera facilement que tous les points du faisceau laser sont spatialement cohérents. Ainsi, il ne sera pas nécessaire d'utiliser un trou source pour réaliser les expériences d'YOUNG ou de FRESNEL.

A titre d'exemple, si on considère une source ordinaire, on aura, à une distance de l'ordre du mètre, un front d'onde cohérent si le diamètre de la source est de l'ordre de 0,2 mm. Avec le laser, ce diamètre sera de 10 mm, soit 50 fois plus.

L'énergie lumineuse du faisceau est répartie selon une courbe gaussienne. Le faisceau diverge faiblement (de l'ordre de quelques milliradians). La puissance transportée par unité de surface est de l'ordre de 10^3 à 10^5 fois supérieure à celle d'une source monochromatique ordinaire.

Le fait que l'intensité du faisceau soit répartie selon une courbe de GAUSS entraîne une conséquence qu'on vérifiera facilement. A l'aide d'une lentille de grande distance focale, on forme une image de la source. Contrairement à ce qu'on observerait avec un pinceau ordinaire aussi diaphragmé, on ne voit pas d'anneaux de diffraction autour de l'image. On a affaire à un phénomène d'apodisation [4]. Pour faire apparaître la figure d'IRY classique, il suffira de diaphragmer le faisceau jusqu'à ce que la répartition de la lumière traversant le diaphragme soit nettement différente d'une gaussienne.

Certains lasers munis de miroirs externes, avec fenêtres de BREWSTER donnent une lumière polarisée rectilignement. Si on observe alors la lumière diffusée, il faudra orienter convenablement le plan de polarisation par rapport à la direction d'observation (voir II.2).

II. EXPERIENCES D'ORDRE GENERAL.

1. Il convient d'abord d'observer une certaine *prudence* pendant toutes les expériences. Le faisceau ne doit jamais être dirigé vers les spectateurs (lésions de la rétine). On se méfiera également des réflexions possibles sur les différentes surfaces (miroirs, lentilles,...).

Il est commode de prévoir un support à plusieurs degrés de liberté pour orienter convenablement le faisceau.

2. On peut matérialiser le faisceau par les propriétés diffusantes de fines particules :

— dans l'air, on ajoutera des fumées (par exemple NH_4Cl) qu'on pourra enfermer dans un caisson (voir annexe),

- dans l'eau, il suffira d'ajouter une solution très diluée de savon ou quelques gouttes de lait ;
- la fluorescéine est sans intérêt, la lumière rouge du laser n'excite pas la fluorescence ;
- l'utilisation d'un écran diffusant est délicate à cause de l'extrême finesse du faisceau. Elle sera cependant possible avec un écran parfaitement plan ou si l'on peut élargir le faisceau et le diaphragmer ensuite par une fente fine, mais alors la largeur du pinceau est à nouveau limitée par les phénomènes de diffraction ;
- si la lumière est polarisée, on se souviendra que la diffusion est minimale dans la direction de vibration (constater cette propriété en faisant tourner le polariseur).

3. Si l'on veut obtenir deux pinceaux fins, on pourra utiliser un spath convenablement taillé (les deux faisceaux seront polarisés à angle droit).

Pour obtenir plusieurs pinceaux, la meilleure solution est de posséder un réseau à profil convenable (voir photo n° 1) [9],

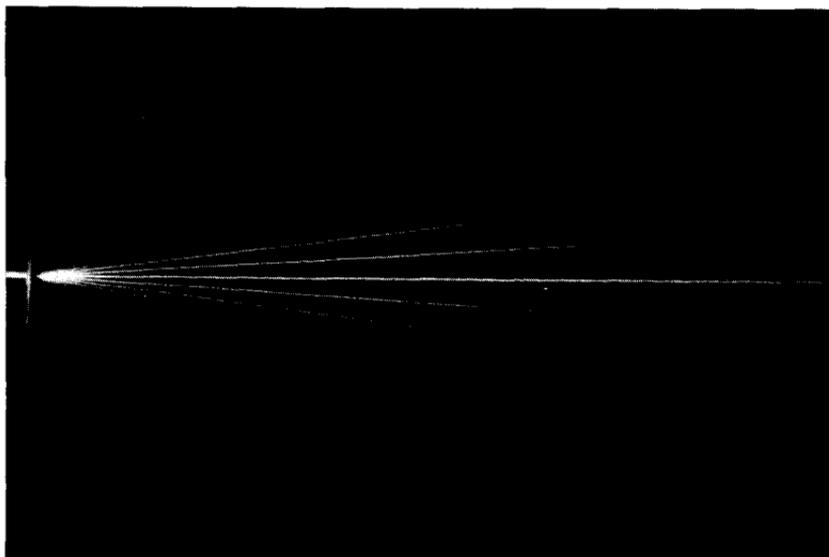


Photo n° 1 : Obtention d'un faisceau de rayons lumineux à l'aide d'un réseau par transmission (104 traits au mm).

comprenant de 50 à 100 traits au mm. A défaut, une fine trame métallique ou en tissu peut être utile. On peut aussi utiliser une règle métallique (réglet d'atelier) éclairée sous incidence rasante (fig. 1).

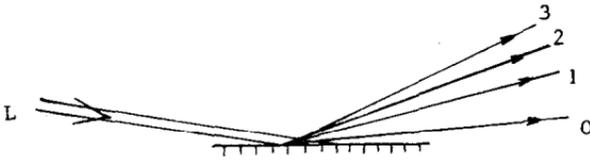


Fig. 1

4. Pour certaines expériences, on peut avoir intérêt à affiner le faisceau sur une petite étendue. On utilisera alors une lentille convergente de distance focale convenable (fig. 2).

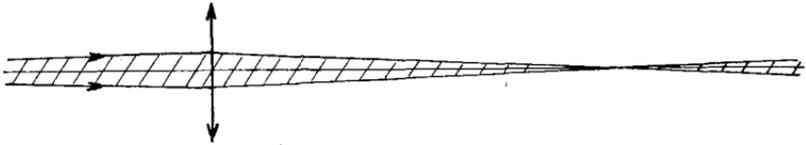


Fig. 2

Par exemple, dans l'expérience du § 3 précédent, il sera possible d'affiner les différents pinceaux tout en les rendant parallèles entre eux (fig. 3).

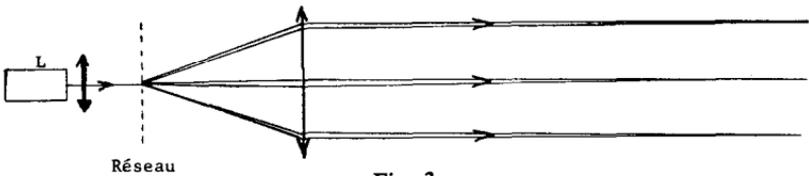


Fig. 3

5. Si on veut élargir le faisceau (par exemple pour observer commodément les franges des miroirs de FRESNEL), on peut utiliser une lentille divergente ou un objectif de microscope (fig. 4 et 5).

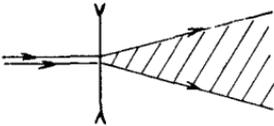


Fig. 4

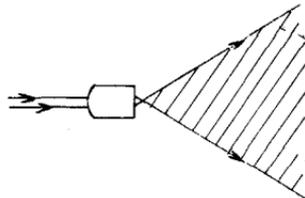


Fig. 5

6. Réalisation d'un faisceau parallèle large (fig. 6). A l'aide d'un objectif de microscope de distance focale f_1 et d'une lentille

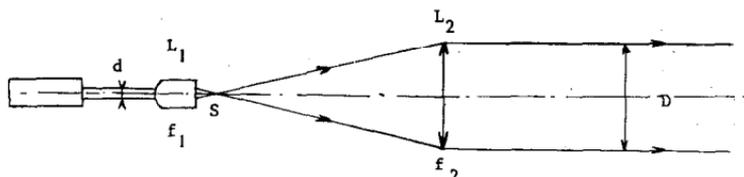


Fig. 6

de distance focale f_2 , on obtiendra un faisceau parallèle de diamètre D tel que :

$$\frac{D}{d} = \frac{f_2}{f_1}$$

avec $d = 1 \text{ mm}$ $f_1 = 10 \text{ mm}$ $f_2 = 300 \text{ mm}$ $D = 30 \text{ mm}$.

Au point S , on obtient une image de très petite dimension dont la structure dépend des phénomènes de diffraction et le plus souvent des imperfections de l'objectif. On observera cependant une image ponctuelle utilisable sans commune mesure avec ce qu'on obtient avec une source usuelle. On pourra considérer le faisceau issu de L_2 comme un « vrai » faisceau parallèle.

Pour certaines expériences, on peut avoir intérêt à épurer ou « laver » le faisceau en plaçant en S un « filtre spatial » c'est-à-dire un trou de dimensions convenables (voir plus loin la notion de filtrage). Les trous ne doivent pas avoir cependant un diamètre trop faible (par exemple inférieur à 50μ) sinon on verrait apparaître les figures de diffraction du trou.

III. EXPERIENCES UTILISANT LA FINESSE DU PINCEAU.

Le pinceau très fin et très intense issu du laser peut être utilisé pour améliorer la visibilité d'un grand nombre d'expériences et rendre précises certaines vérifications.

1. Trajectoire de la lumière - milieu homogène ou non (voir photo n° 2).

On obtiendra simplement un milieu inhomogène en déposant une couche de sucre au fond d'une cuve et en versant l'eau; au bout d'un certain temps, on obtient un milieu à fort gradient d'indice de réfraction.

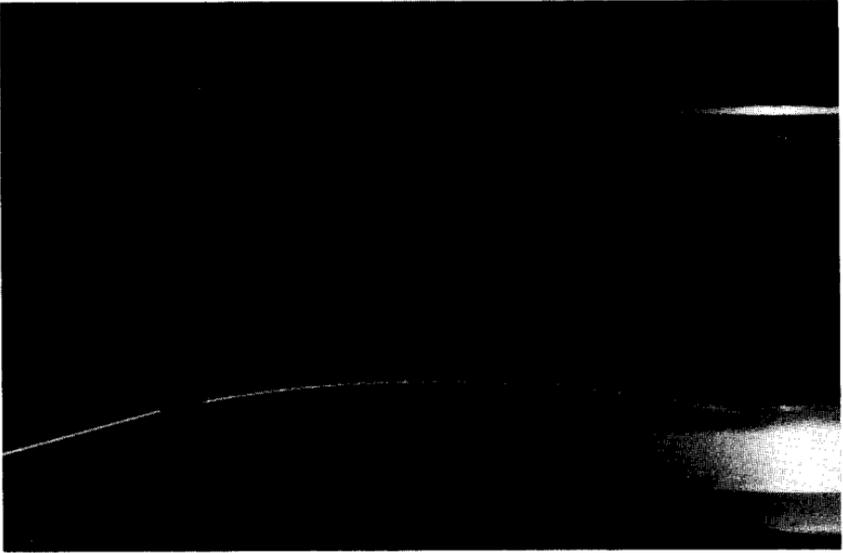


Photo n° 2 : Trajectoire de la lumière dans un milieu homogène et dans un milieu inhomogène.

2. Réflexion de la lumière.

Même en incidence normale sur une surface vitreuse, on observera nettement la lumière réfléchie. Cette propriété sera mise à profit pour centrer les instruments d'optique, pour obtenir une incidence nulle avec grande précision.

On pourra illustrer la méthode de POGGENDORF en utilisant de grandes distances.

Une expérience simple et spectaculaire peut être réalisée à l'aide d'une grosse aiguille à coudre servant de miroir cylindrique (fig. 7).

On obtient un cône de lumière ayant même axe que l'aiguille.

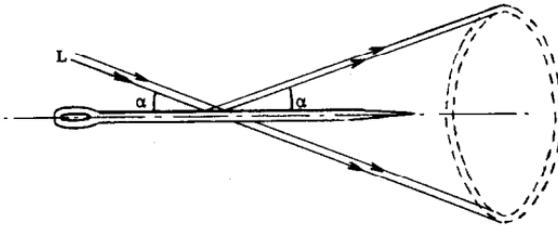


Fig. 7

En interceptant le cône par un écran, on pourra matérialiser cercle, ellipse et parabole.

La conduction de la lumière par réflexion totale dans les fibres optiques sera schématisée simplement en utilisant des objets courants : tube à essai, petit ballon, pipette (fig. 8).



Fig. 8

3. Réfraction, prisme.

Toutes les formules sont susceptibles de vérifications précises directes. On pourra utiliser un dispositif (quelquefois appelé appareil de PESCHARD) formé d'un grand disque comportant des graduations en degrés sur la périphérie et au centre duquel on peut fixer un prisme, un hémicylindre de plexiglas, etc.

Par exemple, on vérifiera les formules du prisme, on tracera $D = f(i)$... devant toute une classe.

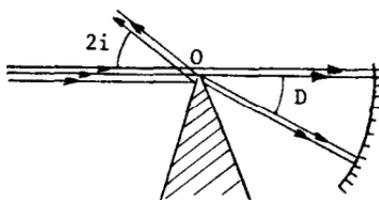


Fig. 9

L'utilisation du prisme à eau permet une mesure de l'indice à quelques millièmes près car on peut rendre l'angle d'incidence sur la première face très voisin de zéro et d'autre part orienter très facilement le faisceau dans une direction quelconque.

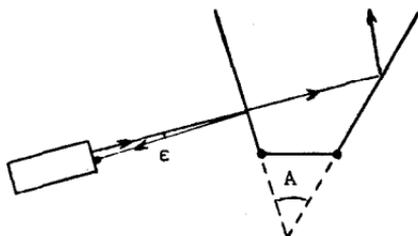


Fig. 10

4. Formation des images.

Grâce au caisson à fumée et au faisceau de rayons issus d'un réseau, on pourra matérialiser facilement la formation des images données par divers instruments d'optique.

Par exemple, on montrera l'image réelle d'un objet virtuel donnée par un miroir plan (photo 3). Pour l'étude des lentilles, les notions d'approximation de GAUSS, foyers principaux, foyers secondaires, centre optique, etc. seront perçues clairement (voir photos nos 4, 5, 6, 7).

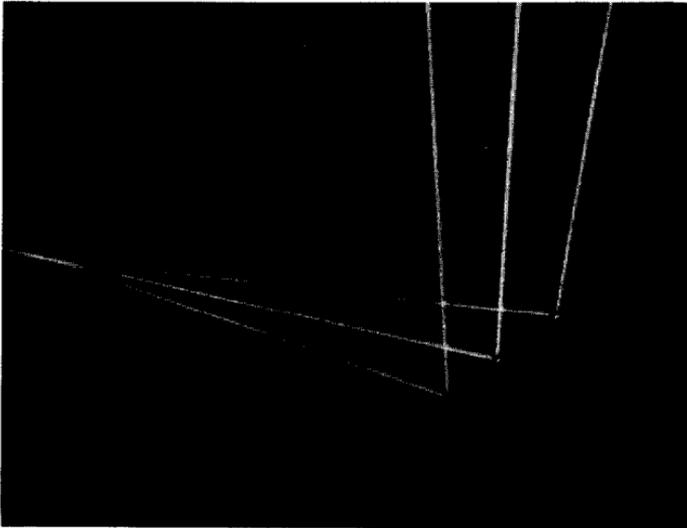


Photo n° 3 : Image réelle d'un objet virtuel à l'aide d'un miroir plan.

On pourra introduire les notions d'aberrations géométriques, d'astigmatisme, etc.

On pourra mesurer une distance focale directement et on sera amené à critiquer la notion de lentille « mince ».

5. Polarisation de la lumière.

De très nombreuses expériences sont possibles. Nous ne citons ici que l'expérience fondamentale de réflexion vitreuse.

Alors qu'avec la lumière ordinaire, il est très difficile d'obtenir une extinction totale du faisceau (à cause de l'impossibilité pratique d'obtenir un faisceau suffisamment parallèle), avec le laser la vérification est bien plus précise.

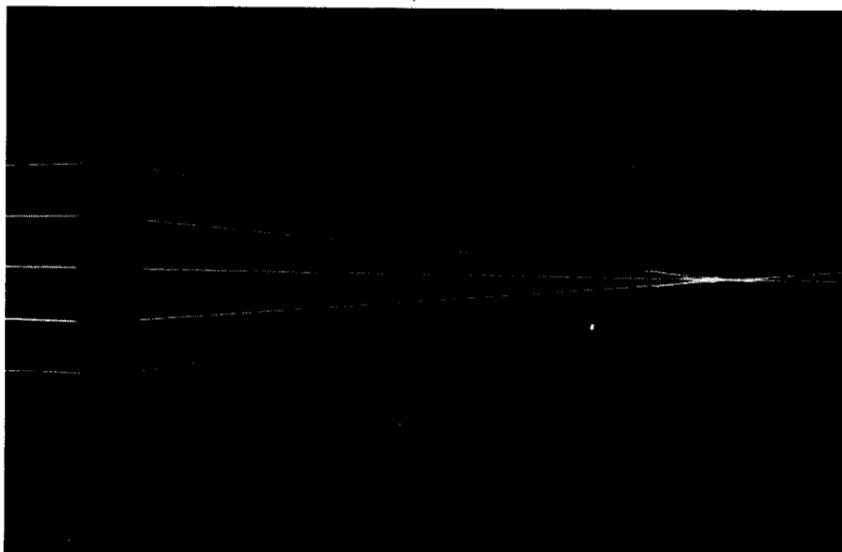


Photo n° 4 : Lentille plan convexe utilisée correctement pour donner l'image d'un point à l'infini.

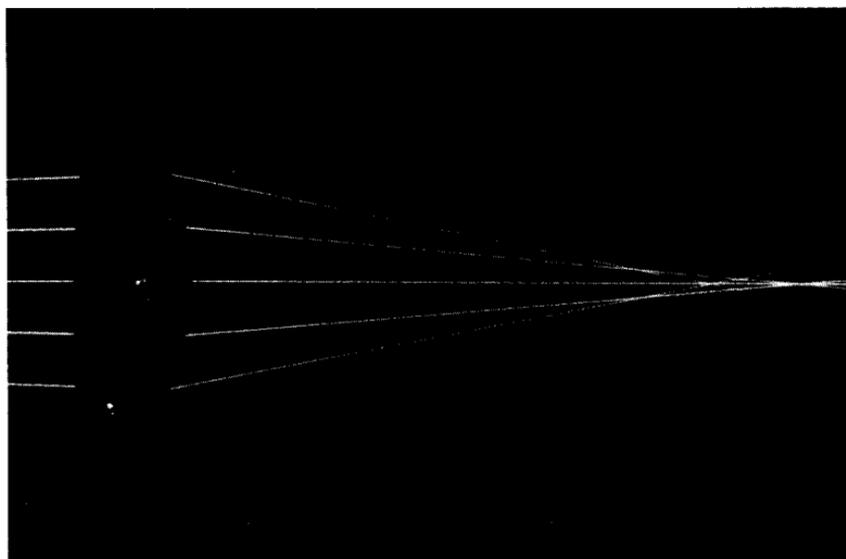


Photo n° 5 : Même lentille retournée face pour face. Noter le très net accroissement de l'aberration géométrique.

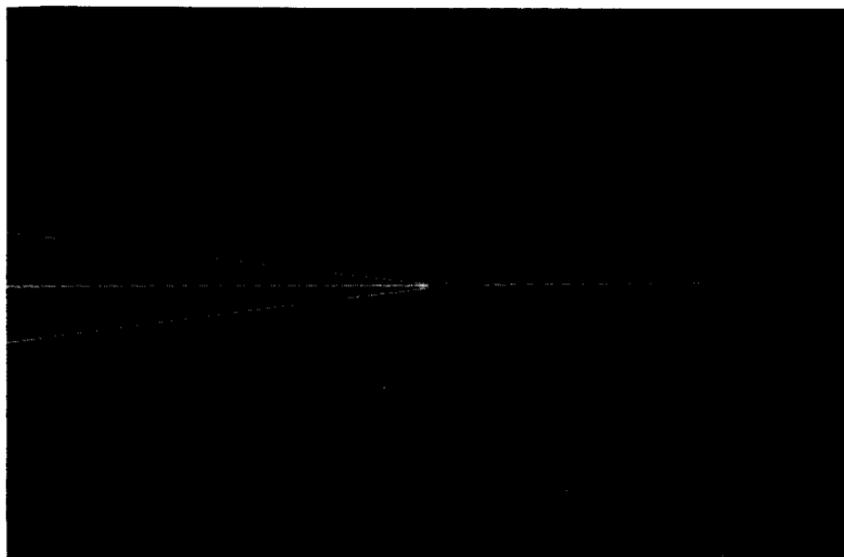


Photo n° 6 : Recherche du centre optique d'une lentille.

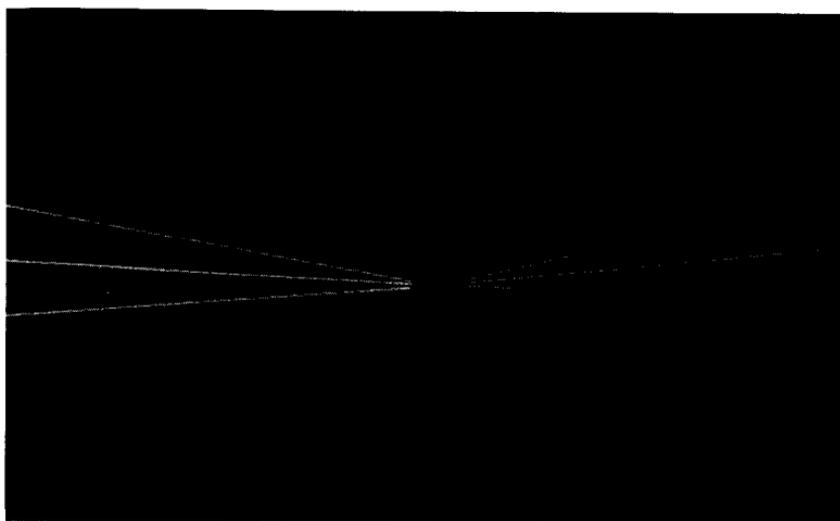


Photo n° 7 : Le faisceau converge en un point de la lentille différent du centre optique.

On pourra, par exemple, mesurer l'indice d'une substance très absorbante ou l'indice d'une lentille en appliquant la relation

$$\operatorname{tg} i_B = n.$$

6. Autres utilisations du pinceau laser.

Citons seulement la possibilité de réaliser facilement l'analyse des vibrations avec un miroir tournant.

Par exemple, on étudiera les vibrations d'un diapason, d'une membrane de haut-parleur (fixer alors un miroir très léger, feuille de plastique aluminée, afin de ne pas perturber le mouvement à analyser).

La composition des vibrations de fréquences différentes, les courbes de LISSAJOUS, seront faciles à observer.

IV. PHENOMENES D'INTERFERENCE ET DE DIFFRACTION [10].

1. Miroirs de Fresnel.

On supprimera la fente source et on éclairera les deux miroirs à l'aide d'un faisceau élargi grâce à un objectif de microscope faiblement grossissant qui donnera un point source.

On montrera qu'il est possible d'obtenir des franges à l'aide d'un seul miroir (franges de LLOYD) en faisant interférer le faisceau direct et le faisceau réfléchi.

2. Franges d'Young.

Compte tenu de la symétrie du faisceau, il est plus intéressant de réaliser l'expérience historique des trous d'YOUNG que celle des fentes d'YOUNG.

A défaut de trous de qualité (voir annexe), chacun pourra réaliser des trous rudimentaires à l'aide d'une épingle et d'un morceau de papier bristol ou d'une feuille d'aluminium (éliminer les bavures). Dans ce dernier cas, on ne pourra observer que quelques ordres de diffraction (voir photos nos 8 et 9). Cette expérience permet de mesurer λ . D'autres montages permettent des expériences spectaculaires (photos nos 10 et 11).

3. Franges d'égale épaisseur d'une lame de verre ordinaire.

On fait interférer les faisceaux réfléchis sur la face avant et arrière de la lame (fig. 11 et photo n° 12).

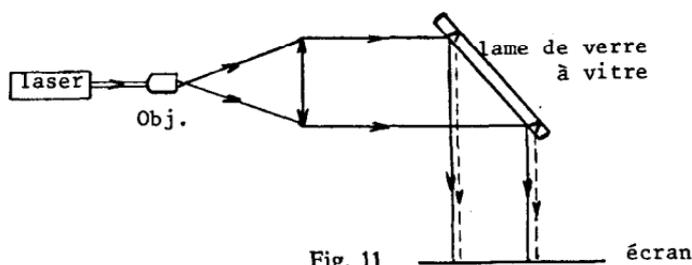


Fig. 11

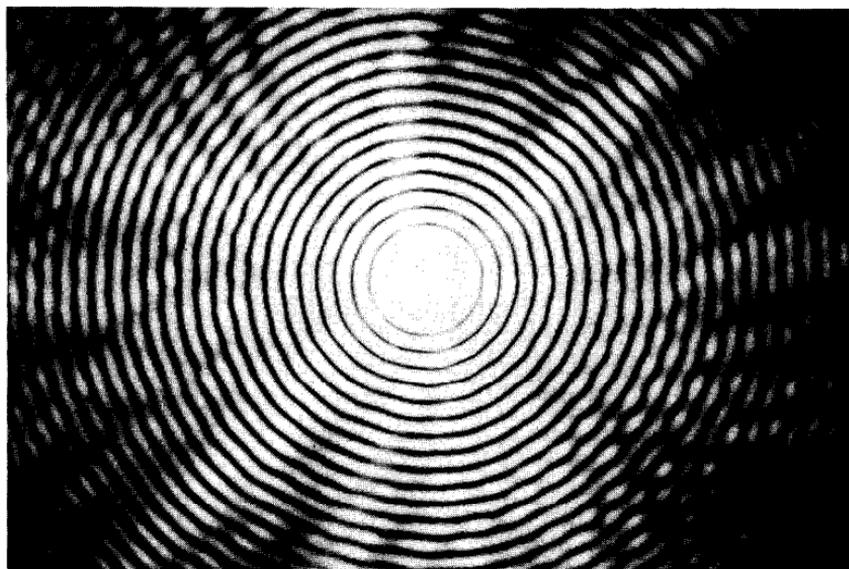


Photo n° 8 : Figure de diffraction d'une ouverture circulaire.

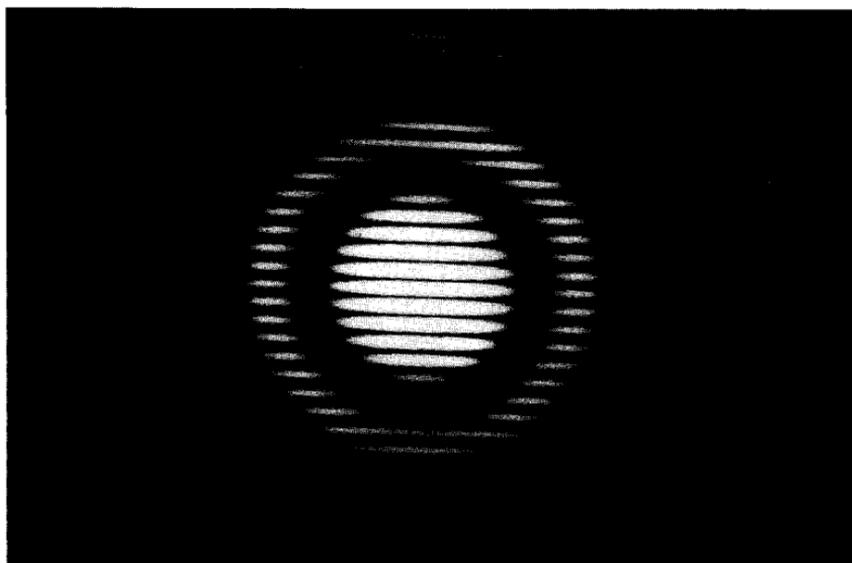


Photo n° 9 : Franges d'interférences obtenues à l'aide des trous d'Young.

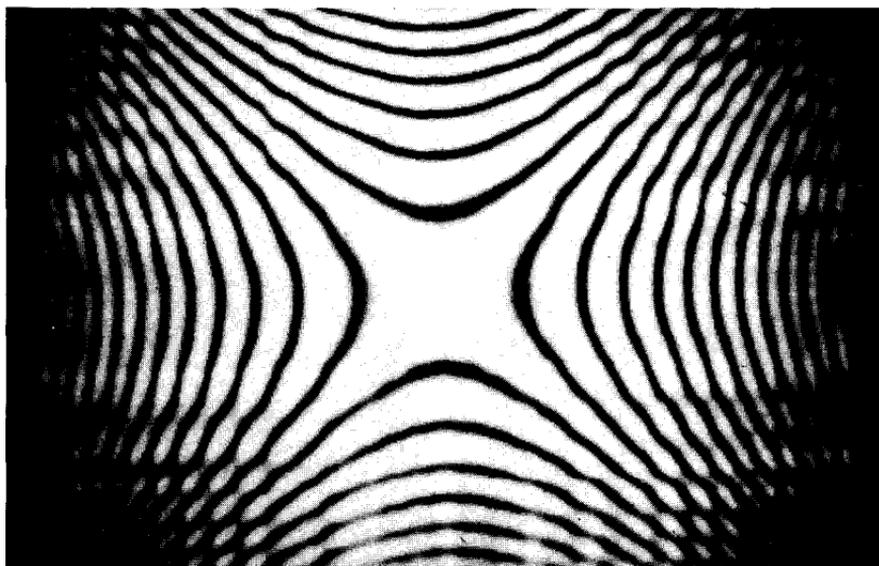


Photo n° 10 : Figure d'interférence obtenue à l'aide de deux fentes rectangulaires.

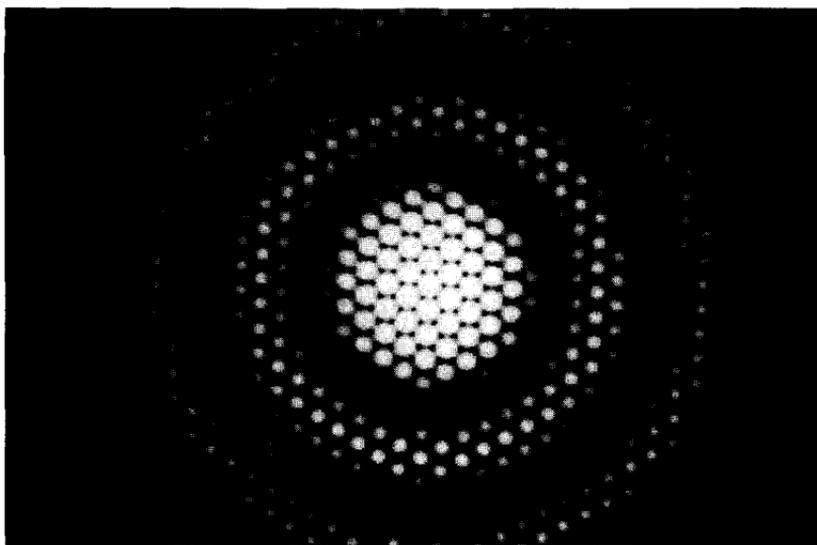


Photo n° 11 : Figure d'interférence obtenue à l'aide de trois trous disposés au sommet d'un triangle équilatéral.

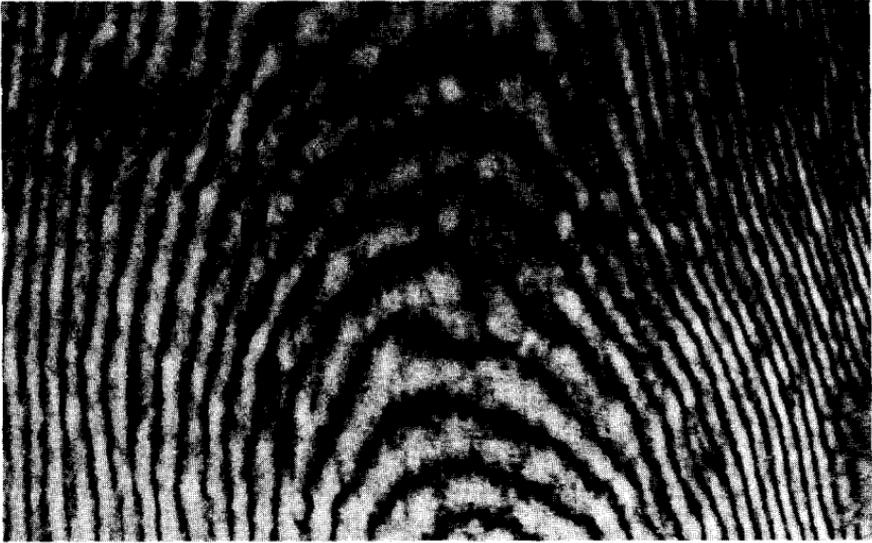


Photo n° 12 : Franges d'épaisseur d'une lame de verre à vitre.

En chauffant localement la lame de verre avec une allumette enflammée, on verra défiler les franges (variation de différence de marche due à la variation d'épaisseur et d'indice).

4. Phénomènes de diffraction.

Toutes les expériences classiques seront réalisées facilement à l'aide de trous, bords d'écran, lames de rasoir, fils fins, réseaux, etc. (photos nos 1 et 8).

Signalons seulement la mesure de la longueur d'onde à l'aide d'une règle graduée [7].

Un réglet d'atelier, la tige d'un pied à coulisse, comportent des traits distants de 1 ou 1/2 mm. Si ces traits sont assez profonds, ils se comportent comme les traits d'un réseau par réflexion (fig. 12).

D'après la théorie des réseaux, on obtient des maximums principaux dans les directions telles que :

$$n\lambda = d(\cos \beta_0 - \cos \beta_n) \simeq \frac{d}{2} \frac{x_n^2 - x_0^2}{D^2} \quad \text{si } x_n \ll D$$

n : numéro d'ordre du spectre, λ longueur d'onde de la lumière,
 d : distance entre deux traits du réseau, β_n l'angle correspondant à l'ordre n .

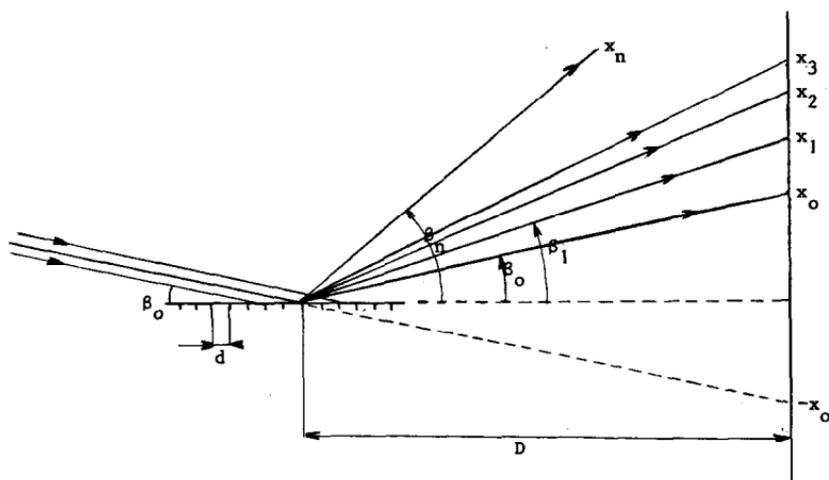


Fig. 12

En translatant vers le bas, la règle fixée sur un support à crémaillère, on peut repérer la direction du faisceau incident ($-x_0$).

On vérifiera que x_0 correspond bien à la réflexion spéculaire car il est possible de faire apparaître l'ordre -1 .

On peut espérer obtenir λ à quelques $\frac{0}{00}$ près.

(On placera une règle graduée sur un mur situé à une dizaine de mètres du régle. On peut observer une centaine d'ordres de diffraction).

5. Les speckles [5] [11].

Les phénomènes d'interférences sont aisés à obtenir par suite de la grande cohérence du faisceau. Dans la pratique, ces phénomènes peuvent même devenir gênants et compliquer l'interprétation de certaines expériences.

Parmi ces phénomènes, on retiendra l'exemple du « speckle » (granularité) obtenu lorsqu'on éclaire une surface non polie avec le faisceau. On observe alors un fourmillement de la surface dû à des interférences, dans l'espace voisin de la surface, entre les faisceaux diffusés.

On observera ces speckles en plaçant un écran derrière un verre dépoli éclairé par le faisceau [voir photo n° 13].

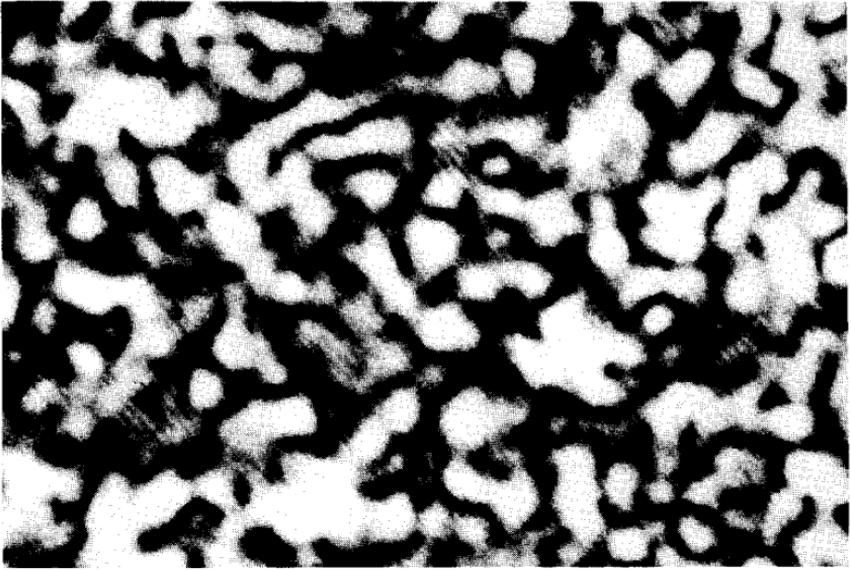


Photo n° 13 : « Speckle » obtenu par diffusion à travers un verre dépoli.

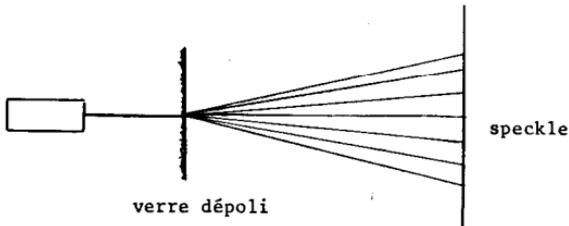


Fig. 13

Ces speckles sont à la base de nombreuses recherches actuellement [5]. Citons une expérience simple montrant le principe de l'utilisation.

Photographions sur une même plaque deux speckles identiques (analogues à celui de la photo n° 13) mais décalés par une petite translation d de quelques $1/10^e$ de mm. On obtient ainsi une figure comprenant un ensemble de couples de points tels que AA' , BB' ,... et tels que :

$$AA' = BB' = \dots = d.$$

En éclairant ensuite la plaque comprenant ce speckle double en lumière cohérente, on obtient des franges d'YOUNG perpendi-

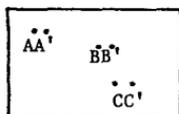


Fig. 14

culaires à la direction de translation et dont l'interfrange dépend de d (fig. 15) (voir photo n° 14).

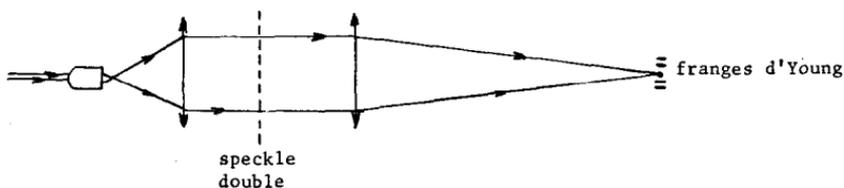


Fig. 15

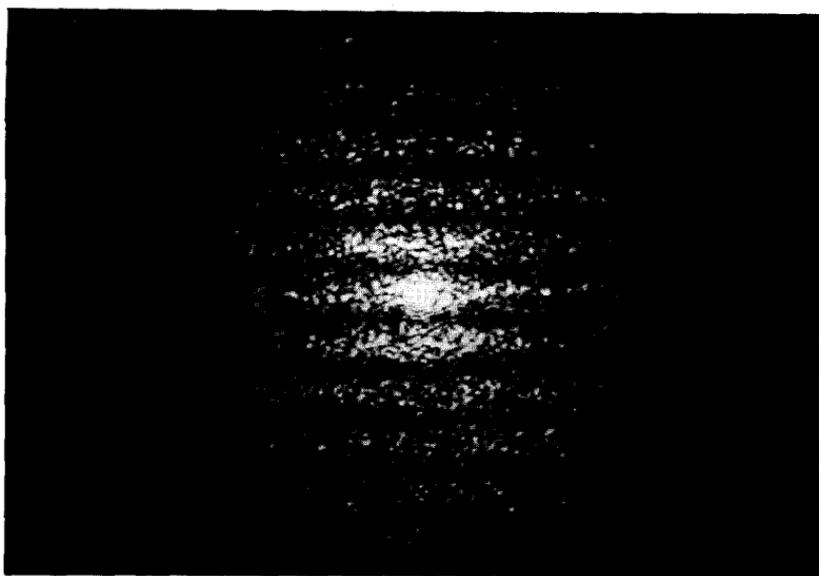


Photo n° 14 : Franges d'Young obtenues à l'aide de deux speckles identiques et légèrement translétés.

La photographie a été en fait obtenue à partir de deux négatifs identiques superposés et translétés l'un par rapport à l'autre.

Des techniques de filtrage permettent d'éliminer les figures correspondant au déplacement de deux speckles identiques et de

faire apparaître une information qui était masquée par ce bruit de fond (exemple : une étoile double invisible à cause de la perturbation atmosphérique qui donne une figure analogue au speckle) [12].

6. Etude des aberrations des systèmes centrés [6].

Le montage de la fig. 16 permet d'étudier les aberrations d'un objectif L_1 ou L_2 (ou de l'ensemble).

O_1 : objectif de microscope de distance focale voisine de 30 mm,

O_2 : objectif de microscope de distance focale voisine de 15 mm.

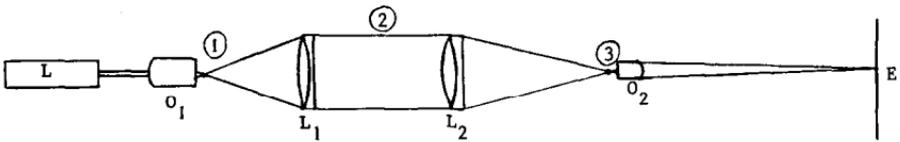


Fig. 16

L_1 et L_2 objectifs destinés à l'observation d'objets à l'infini (corrigés des aberrations du 1^{er} ordre).

Le système L_1, L_2 donne de l'objet 1 une image en 3 que l'on observe en l'agrandissant considérablement en E.

— Un défaut de mise au point se manifeste par des anneaux d'interférences.

— Si l'un des objectifs n'est pas utilisé correctement (mauvaise face d'entrée), on voit apparaître des anneaux dus à l'aberration géométrique. Si les deux objectifs sont mal utilisés, l'aberration est pire. Si l'on incline, par rapport à l'axe, l'un des objectifs, on voit apparaître la coma ; si les deux sont inclinés du même angle, on voit l'astigmatisme, les droites focales, le cercle de moindre diffusion (il faut alors modifier la mise au point).

V. NOTIONS DE FILTRAGE OPTIQUE [8].

1. Filtre passe-bande.

La purification du faisceau abordée plus haut (II.6) peut être mise en évidence par l'expérience de la fig. 17.

Des poussières, rayures, traces de doigt telles que A ou B diffractent de la lumière qui est en grande partie éliminée par le filtre T (trou) placé à l'endroit où est focalisé le faisceau.

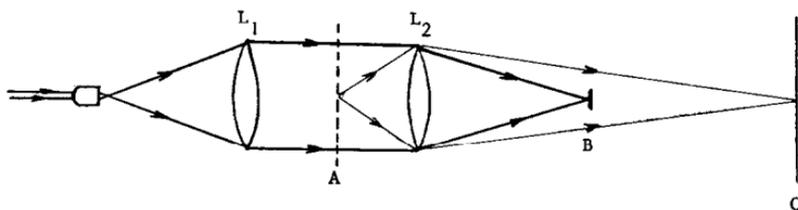


Fig. 17

2. Strioscopie. Ultra-microscopie.

Le montage de la fig. 18 montre le principe d'un filtre passe-bande étroit.

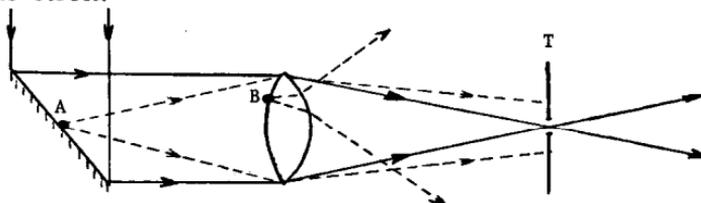


Fig. 18

Un écran de petites dimensions (une tête d'épingle) intercepte le faisceau en B. Par contre, la lumière diffractée par un objet placé en A donnera une image claire sur fond noir dans le plan C conjugué de A par rapport à la lentille L_2 .

— On place, par exemple en A, une lame de verre comprenant des rayures, ou une cuve à eau dans laquelle on verse un filet de glycérine.

— Une expérience peu connue et très spectaculaire peut être réalisée de la manière suivante : Prendre comme objet en A une aiguille ou le bord d'une lame de rasoir et faire son image très agrandie en C grâce à un objectif de bonne qualité (objectif photographique). On pourra contrôler la mise au point à l'aide d'un viseur. Quand on place en B une tête d'épingle, on voit apparaître en clair sur fond sombre les contours de l'objet grâce à la lumière diffractée. Si on observe attentivement à l'aide d'un viseur, on voit nettement une ligne noire très fine qui occupe la place du contour géométrique de l'objet et qui donne davantage de détails que l'image géométrique normale (photo n° 15).

3. Image d'un objet en lumière cohérente. Expérience d'Abbe [6].

A l'aide du montage de la fig. 19, on peut illustrer la théorie d'ABBE pour la vision des objets périodiques en lumière cohérente.

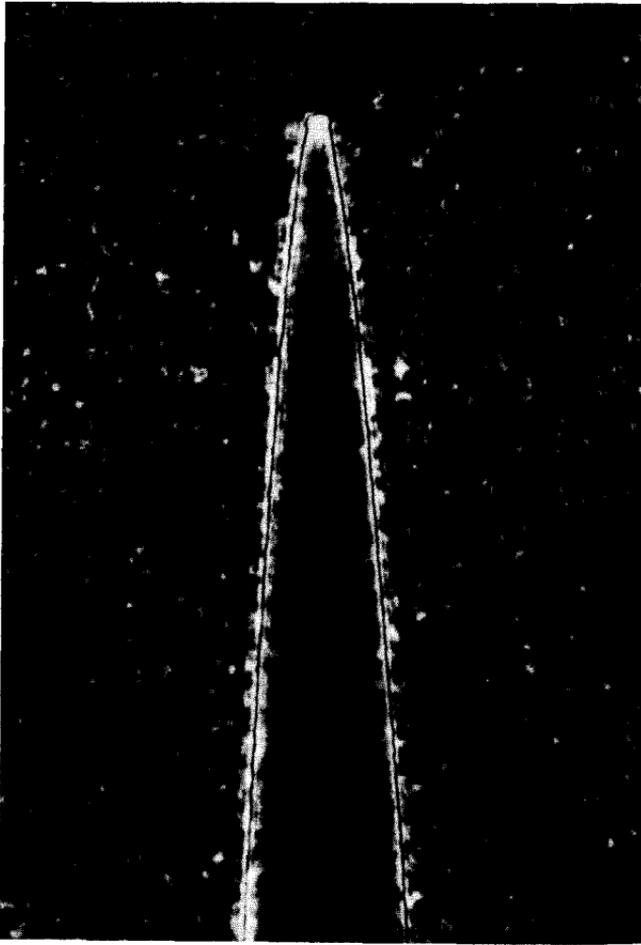


Photo n° 15 : Image géométrique du contour d'une aiguille à coudre obtenue par strioscopie.

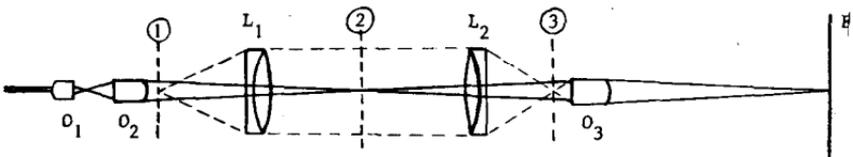


Fig. 19

O_1 , O_2 et O_3 sont des objectifs de microscope (O_3 de très courte distance focale), L_1 et L_2 des objectifs d'environ 30 cm de distance focale.

L'objet sera un réseau croisé d'environ 50 traits au mm placé en 1. La figure de diffraction se forme dans le plan 2. C'est dans ce plan que l'on dispose les filtres. Les figures de diffraction étant distantes d'environ un cm, on pourra réaliser facilement à l'emporte-pièce des diaphragmes ne laissant passer que certains ordres.

— En l'absence de filtre, on observe une image semblable à l'objet sur l'écran E, c'est-à-dire un quadrillage.

— Si on laisse passer seulement l'ordre zéro de la figure de diffraction, l'image de l'objet disparaît : on a un éclaircissement uniforme sur l'écran (pas d'information).

— Si on laisse passer uniquement les ordres horizontaux, les traits verticaux subsistent seuls,

— Si on laisse passer un ordre sur deux, on observe une image ayant des traits deux fois plus serrés, etc.

Cette technique est utilisée pour modifier l'apparence d'une image ; par exemple, pour éliminer certains harmoniques gênants.

Les techniques de filtrage permettent par exemple de rendre lisible une photographie floue par défaut de mise au point.

ANNEXES

Réalisation d'ouvertures circulaires de qualité.

La technique nous ayant donné les résultats les plus satisfaisants est la suivante : à l'aide d'un pointeau très bien affûté, le « trou » est pointé sur une feuille de clinquant de laiton de 0,3 à 0,5 mm d'épaisseur, la feuille reposant sur un morceau de bois dur dont la surface a été bien dressée. Le trou est percé par ponçage, à l'aide d'une toile émeri la plus fine possible, sur la face opposée de la feuille métallique. La finition est obtenue en retournant les bavures et en arrondissant le trou au moyen d'une petite aiguille à coudre. Le contrôle de la finition et la mesure des caractéristiques des trous sont faits sous microscope. Par cette méthode, il est possible de réaliser des trous presque parfaitement circulaires (comme le montrent les figures de diffraction obtenues) dont le diamètre peut descendre jusqu'à 0,1 ou 0,2 mm. Pour la réalisation d'un couple de trous (expérience d'YOUNG), la principale difficulté est d'obtenir des ouvertures circulaires dont les diamètres soient le plus voisin possible. Nous sommes arrivés à obtenir des écarts inférieurs au 1/100^e de mm.

Visualisation des pinceaux lumineux à l'aide d'un caisson à fumée.

Le caisson à fumée est une boîte présentant une étanchéité toute relative. A défaut d'autres gaz, on peut se contenter de fumée de tabac. Il est de forme parallélépipédique et comporte deux faces adjacentes vitrées (une pour la pénétration du faisceau, l'autre pour l'observation), une face amovible destinée à l'introduction des accessoires (lentilles, cuves...) et de la fumée, les autres faces étant noircies. Ses dimensions doivent être adaptées aux caractéristiques des accessoires utilisés.

La boîte vitrée d'une ancienne balance de précision convient très bien.

Quelques renseignements pratiques pour la réalisation de photographies.

Les photographies d'illustration ont été réalisées sur film lent à grain fin (50 ASA) à l'aide d'un appareil réflex 24×36 . Le laser dont nous disposons était un He—Ne ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) d'une puissance de 1 mW.

Les photographies nos 1 à 7 prises dans le caisson à fumée ont nécessité des temps de pose de l'ordre de 10 s pour un objectif ouvert à $f : 2,8$.

Toutes les photographies suivantes ont été réalisées sans optique photographique, l'image se formant directement dans le plan du film, les temps de pose variant de 1/15 à 1/2 s.

R. JOUANISSON,
G. FABRE,
(U.E.R. Sciences - Clermont).

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- [1] J. ROIG. — *Optique physique*, tome 1, Masson (1967).
 - [2] M. FRANÇON. — *Optique ; Formation et traitement des images*, Masson (1972).
 - [3] Max BORN et E. WOLF. — *Principles of optics*, Pergamon Press, 5^{me} édition (1975).
 - [4] M. BRUHAT et A. KASTLER. — *Optique*, 6^{me} édition, Masson (1965).
 - [5] M. FRANÇON. — *Granularité laser speckles*, Masson (1977).
 - [6] D. DUTTON. — *Some demonstrations experiments in optics using a gas laser*. Am. J. Phys. 32, 355 (1964).
 - [7] L. SCHAWLOW. — *Mesuring the wave length of light with a Ruler*. Am. J. Phys. 33, 922 (1965).
 - [8] H.-F. MEINERS. — *Physics demonstration experiments*, tome II, the Ronald Press Company (1970).
 - [9] P. ROCHE et J. CRETON. — B.U.P. n° 610, page 467.
 - [10] M. CRENN. — B.U.P. n° 570, page 327.
 - [11] H. GIÉ. — B.U.P. n° 596, page 1321.
 - [12] M. HENRY. — B.U.P. n° 596, page 1333.
-