

Expériences d'optique à l'aide d'un projecteur de diapositives

par R. JOUANISSON

ADASTA

19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand

J'ai déjà attiré l'attention de nos collègues physiciens sur l'intérêt que présente le projecteur de diapositives pour la réalisation de nombreuses expériences d'optique (voir bibliographie [1] et [2]).

En effet, le maniement de cet appareil compact est extrêmement simple et les réglages peuvent être faits à distance. De plus, les objectifs utilisés permettent d'obtenir des images exemptes des principaux défauts qu'on rencontre avec des lentilles ordinaires. Enfin ce projecteur, conçu pour un large public, est bon marché si on le compare aux lanternes de projection des collections de lycée.

Son utilisation nécessite toutefois la réalisation d'accessoires adaptés que l'on montera dans des cadres de diapositives. Ce sont des ouvertures circulaires et des fentes de dimensions variées, ainsi que des structures diverses qui seront décrites ultérieurement. Tous ces accessoires sont très bon marché et peuvent être réalisés par l'opérateur lui-même.*

Les nouveaux programmes de terminale nous donnent l'occasion de décrire quelques expériences pour lesquelles le projecteur de diapositives se révèle un outil précieux : aberrations géométriques, aberrations chromatiques, réalisation d'instruments d'optique schématiques, diffraction, etc.

* L'ADASTA fournit un lot de six diapositives pour l'étude des aberrations et de la diffraction.

1. DESCRIPTION DE L'APPAREIL (figure 1)

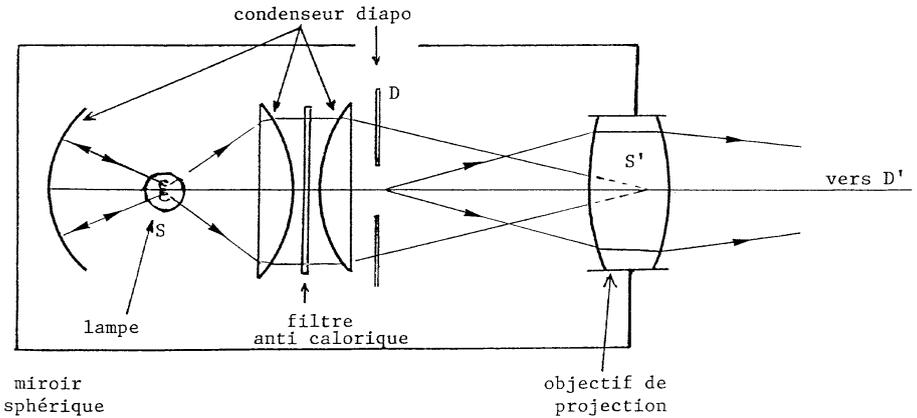


Figure 1

L'appareil comprend les éléments suivants :

- Une alimentation basse tension (12 ou 24 V en courant alternatif).
- Une lampe à halogène avec enveloppe de quartz dont la puissance est en général de 150 ou 250 W selon les modèles. Le filament constitue la source de lumière (notée S).
- Un système condenseur formé de deux parties :
 - à l'avant : un ensemble de deux lentilles plan convexas,
 - à l'arrière : un miroir sphérique qui redonne de la source une image en S.

Le condenseur focalise la lumière en S'. Ce point constitue la position optimale pour l'objectif de projection.

- Un mécanisme pouvant être télécommandé permettant d'introduire la diapositive près de la face de sortie du condenseur. Cette position, notée D, est la position optimale pour obtenir une image de bonne qualité (champ uniformément éclairé, absence de chromatisme notamment).

Le format le plus courant des diapositives est 50 × 50 mm (hors tout).

- Un objectif de courte focale (en général 85 mm) dont la position, réglable, permet de former l'image D' agrandie de la diapositive dans un plan situé depuis environ 50 cm de l'objectif jusqu'à l'infini. Cet objectif est exempt des principales aberrations géométriques et chromatiques.

- Un ventilateur pour refroidir les différents éléments de l'appareil et notamment le filtre anticalorique (absorption de l'infrarouge) placé entre les deux lentilles du condenseur.
- Un système de télécommande (non indispensable) pour faire défiler les diapositives et régler la mise au point.

Remarque : Pour les expériences qui suivent il est indispensable de se procurer un appareil dont on peut facilement retirer l'objectif.

2. UTILISATION DE L'APPAREIL SANS OBJECTIF

L'objectif étant retiré on peut utiliser la source S' dans différentes conditions : soit directement, soit en plaçant à l'endroit convenable une ouverture appropriée.

- Une diapositive comprenant une petite ouverture circulaire placée en D (près du condenseur) donne un pinceau de lumière peu ouvert (figure 2).

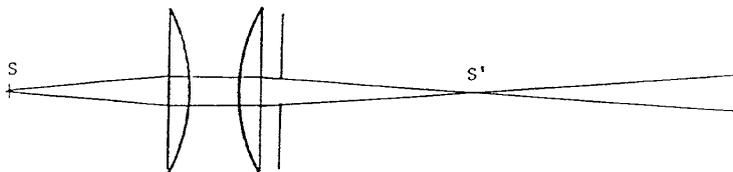


Figure 2

- La même diapositive placée au voisinage de S' (sur un support approprié) donne un faisceau plus ouvert (figure 3) aux bords irisés par suite de l'aberration chromatique du condenseur.

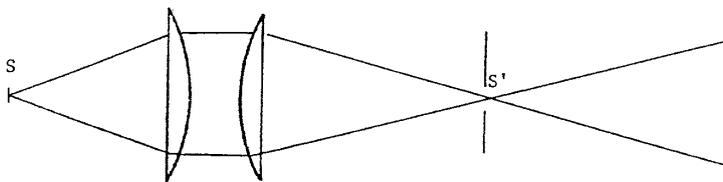


Figure 3

- Il peut être avantageux dans certains cas d'utiliser un dispositif permettant de positionner avec précision l'ouverture à l'intérieur de

l'appareil : réaliser pour cela un tube muni en son centre de l'ouverture et pouvant coulisser à la place de l'objectif (figure 4).

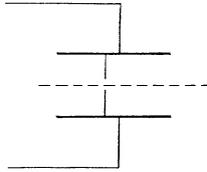


Figure 4

2.1. Exemples de manipulations utilisant le projecteur sans objectif

2.1.1. Ombroscopie

Pour la projection d'objets en ombres chinoises, on place en S' une petite ouverture circulaire qui se comporte comme une source d'autant plus ponctuelle que l'angle sous lequel on voit cette ouverture depuis l'objet est petit. En éloignant l'objet de la source on améliore la qualité de l'image mais sa grandeur diminue. En réduisant le diamètre de la source, l'éclairement de l'écran diminue. On cherche un compromis entre la qualité de l'image et l'éclairement de l'écran en tenant compte du fait que les phénomènes de diffraction limitent, en dernier ressort, la qualité des images.

On utilise l'ombroscopie quand la projection ordinaire n'est pas indispensable ou n'est pas réalisable : objets opaques ou trop volumineux par exemple. Ainsi on étudiera les ombres et pénombres, les mouvements pendulaires, les écoulements de fluides, etc. (figure 5).

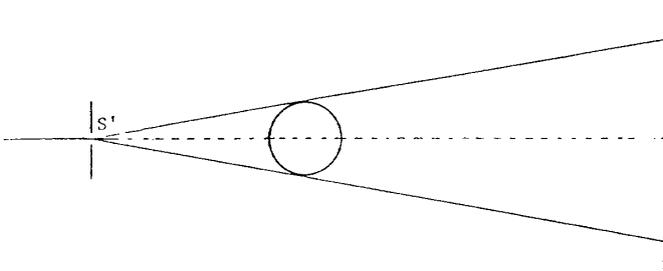


Figure 5

2.1.2. Diffraction de Fresnel

On utilise le montage de la figure 3 où D est une fente source. Comme objet diffractant on utilisera un bord d'écran, une fente, un ensemble de fentes, ... (bords et fentes parallèles à la fente source). L'aspect de la figure de diffraction dépend des distances source-objet et objet-écran.

Avec un trou source les phénomènes sont peu lumineux : on utilisera alors avantageusement un faisceau laser qu'on aura focalisé à l'aide d'une lentille convergente de courte focale.

Pour la **diffraction de Fraunhofer** on utilise l'objectif du projecteur (voir le chapitre suivant).

2.1.3. Interférences à l'aide des miroirs de Fresnel (figure 6)

La source est une fente de 0,3 mm de largeur environ placée en D. L'arête des miroirs, parallèle à la fente, sera placée avantageusement en S' image du filament. Le phénomène sera ainsi plus lumineux et on ne sera pas gêné par l'image du filament sur l'écran d'observation.

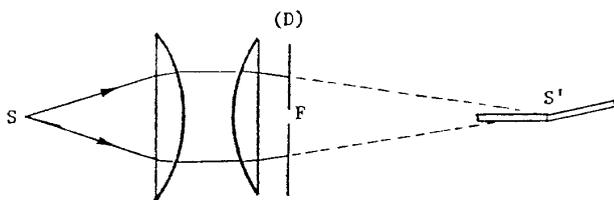


Figure 6

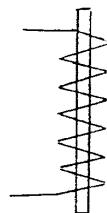


Figure 7

Remarque : A noter qu'on obtient un champ d'interférence plus lumineux si le filament est disposé parallèlement à la fente (figure 7). Comme on a intérêt pour des raisons de commodité à réaliser des franges verticales, avec une fente verticale, il serait souhaitable que le filament soit lui-même disposé verticalement, ce qui n'est pas le cas des appareils du commerce. On peut alors exceptionnellement tourner l'appareil et le faire reposer sur un côté.

Les franges d'interférence à l'aide des fentes d'Young sont réalisées avantageusement avec le montage de Fraunhofer (voir le chapitre suivant).

2.1.4. Aberrations géométriques

a) Structure d'un pinceau de lumière : droites focales

Placer une petite ouverture circulaire en (D) de l'ordre du mm de diamètre et former son image sur un écran à l'aide d'une lentille ordinaire (30 cm de focale par exemple). Limiter l'ouverture du faisceau à l'aide d'un diaphragme (figure 8).

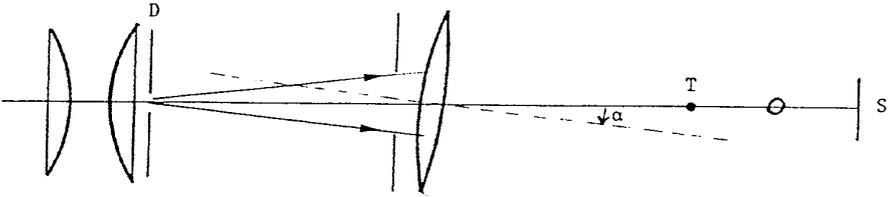


Figure 8

Si la source est sur l'axe de la lentille, l'image est semblable à l'objet (on est dans le domaine de l'optique paraxiale). Si l'on fait subir à l'axe de la lentille (par exemple autour d'un axe vertical) une rotation d'angle α le faisceau issu de la lentille prend les aspects successifs suivants qu'on observe sur un écran normal à l'axe : rétrécissement progressif, droite focale verticale (dite focale tangentielle), droite focale horizontale (focale sagittale), puis élargissement du faisceau. La distance entre les deux focales dite **distance d'astigmatisme** croît lorsque α augmente.

Utiliser un filtre coloré pour éliminer l'aberration chromatique. Choisir l'ouverture la plus petite possible compte tenu des conditions de visibilité.

Remarque : Au lieu d'observer sur un écran mobile l'évolution de la section du pinceau issu de la lentille, on peut avoir avantage, pour présenter l'expérience à toute une classe, à projeter cette section sur un écran fixe éloigné, à l'aide d'une lentille auxiliaire qu'on translate le long de l'axe du pinceau (figure 9).

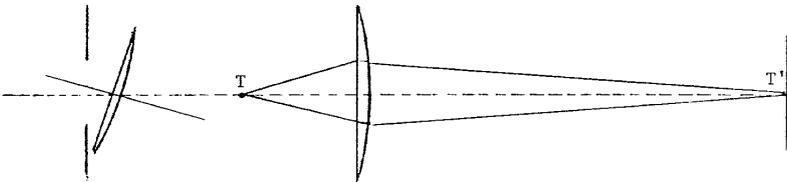


Figure 8

Focales du miroir sphérique

Le pinceau de lumière limité par un diaphragme rencontre le miroir sphérique sous une incidence de l'ordre de 45° . L'expérience est plus simple et plus spectaculaire qu'avec une lentille. De plus il n'y a pas d'aberration chromatique (figure 10).

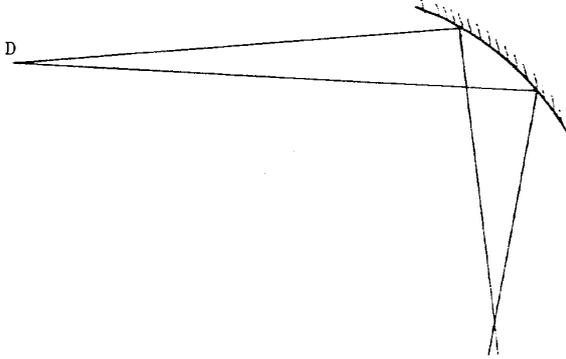


Figure 10

b) Aberration sphérique

Prendre une petite ouverture circulaire (de l'ordre de 1 ou 2 mm de diamètre) qu'on place en D et une lentille plan convexe L de grande ouverture (par exemple $d > 10$ cm) et de distance focale de l'ordre de 20 cm. La lentille est placée à un ou deux mètres du trou source. Veiller à ce que le faisceau couvre entièrement la lentille et que le trou source soit bien sur l'axe (position critique). Interposer un filtre coloré (un filtre ordinaire rouge est suffisamment monochromatique). Dans ces conditions seule l'aberration sphérique est observable.

Pour montrer les deux nappes de la caustique, utiliser un écran bien plan. Quand le plan contient l'axe on observe l'aspect de la figure 11. Quand le plan est perpendiculaire à l'axe on observe un cercle lumineux avec, à partir d'une certaine distance de la lentille un point lumineux (figure 12). Pour mieux mettre en évidence ce phénomène projeter sur un écran éloigné, à l'aide d'une lentille auxiliaire L' qu'on translate, les différents aspects successifs de la figure 12 : on montre d'abord l'image de la lentille uniformément éclairée, puis on observe les aspects précédemment décrits (figure 13).

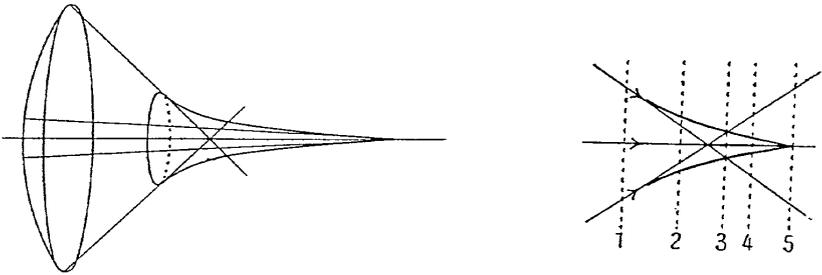


Figure 11

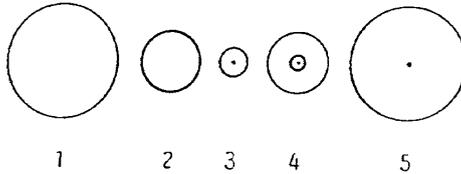


Figure 12

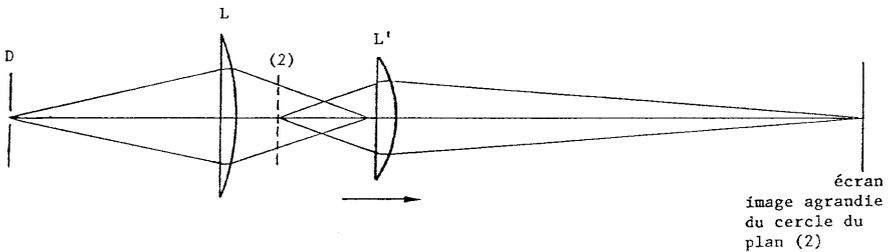


Figure 13

Recommencer l'expérience en retournant la lentille face pour face : l'importance de l'aberration dépend de la forme de la lentille.

Remarque : Pour la projection précédente ne pas interposer d'écran dépoli entre L et L' !

c) La coma

Pour observer la coma en l'absence d'aberration sphérique on utilise par exemple un achromat (distance focale de 30 ou 50 cm) corrigé de ce défaut. On forme avec cette lentille l'image de la source en D, puis on incline progressivement l'axe de la lentille de manière que l'objet soit en dehors de l'axe. L'image d'abord circulaire prend l'aspect d'une comète (figure 14).

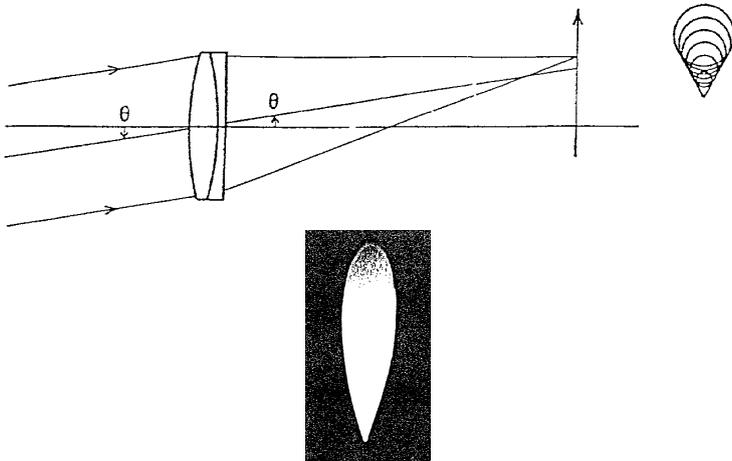


Figure 14

Pour éviter d'être gêné par l'image du filament utiliser un trou recouvert d'un verre légèrement dépoli. Si on utilise une lentille ordinaire placer un filtre coloré. (On réalisera une diapositive constituée d'une ouverture circulaire sur dépoli recouvert d'un filtre).

d) L'aberration chromatique

On utilise de même une ouverture circulaire de petites dimensions (diamètre de l'ordre du mm) placée soit en D soit en S'. La lentille utilisée au § b, munie d'un diaphragme annulaire D.A. étroit (largeur de l'ordre de quelques mm) et de grand diamètre est placée suffisamment loin, par exemple à un mètre de la source. On obtient ainsi une image plus petite que l'objet. L'observation de l'aberration chromatique se fait comme dans l'expérience précédente à l'aide d'un écran contenant l'axe et dans un plan perpendiculaire à cet axe placé successivement en (1), (2), (3)... (figure 15).

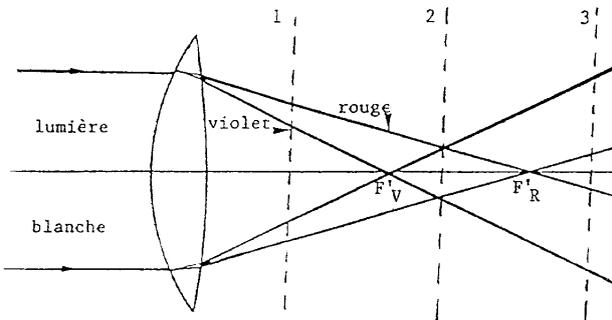


Figure 15

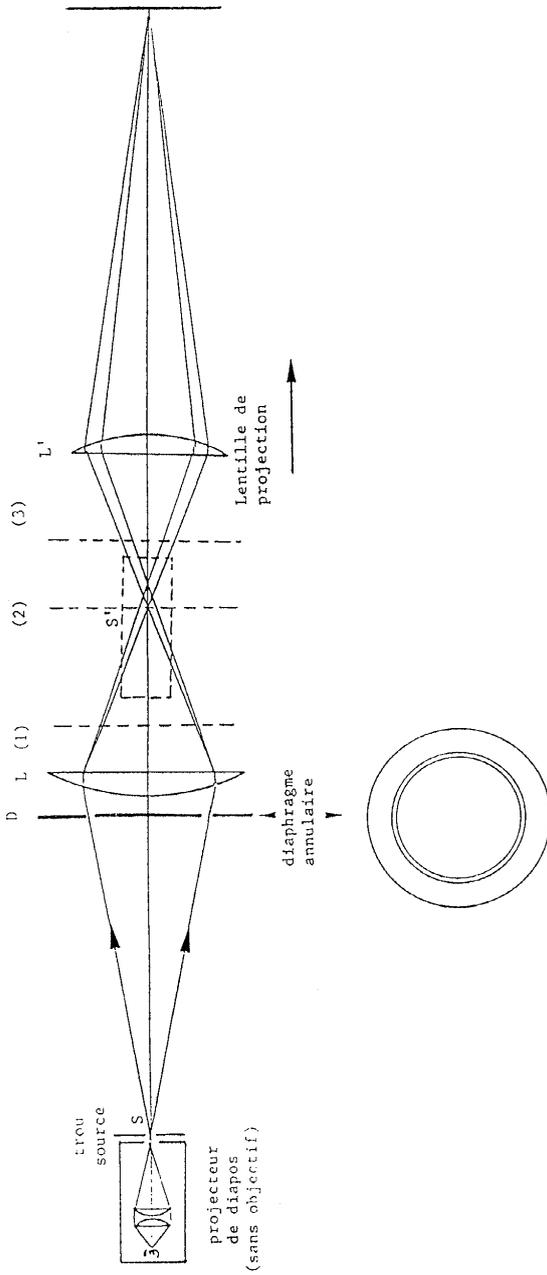


Figure 16 : La lentille de projection est réglée de manière à former l'image de la lentille à étudier.

Pour rendre l'expérience visible de toute une classe projeter sur un écran, à l'aide d'une lentille auxiliaire qu'on translate, les divers aspects de la figure obtenue quand on s'éloigne de la lentille. On montre d'abord l'image du diaphragme annulaire puis le spectre annulaire bordé de rouge à l'extérieur et de bleu à l'intérieur qui s'élargit quand on s'approche des foyers. Au-delà des foyers le spectre est bordé de bleu à l'extérieur et de rouge à l'intérieur. (Pour une description plus complète de cette expérience voir [3]) (figure 16).

Même avec une lentille ordinaire le chromatisme latéral introduit par la lentille de projection est négligeable.

3. UTILISATION DE L'APPAREIL MUNI DE SON OBJECTIF

Les utilisations étant très nombreuses et variées nous nous bornerons à signaler dans ce paragraphe des expériences simples (et parfois peu connues) susceptibles d'illustrer les nouveaux programmes d'optique de la classe terminale.

3.1. Formation des images

Utiliser une diapositive représentant un quadrillage avec une lettre dissymétrique (figure 17) sur dépoli. Faire l'image sur un écran éloigné (quelques mètres). Observer le renversement de l'image par rapport à l'objet. Évaluer les abscisses x et x' (figure 18). Mesurer le grandissement $\gamma = \frac{x'}{x}$. Faire varier x ; x' varie. Chercher une relation entre x et x' . Si l'on dispose d'un zoom montrer qu'il existe une relation entre x , x' et f .

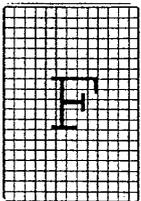


Figure 17

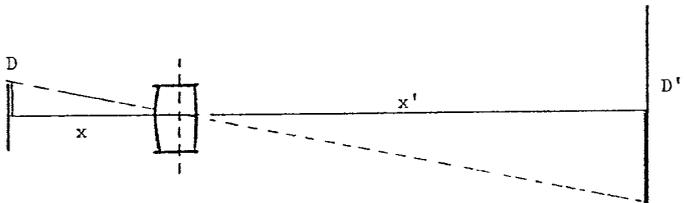


Figure 18

Évaluer le grandissement minimal correspondant à l'éloignement maximal de l'objectif dans son tube.

3.2. Utilisation des images données par le projecteur

L'image D' de la diapositive D va servir d'objet pour diverses expériences :

- objet réel dans la configuration de la figure 19,
- objet virtuel dans la configuration de la figure 20.

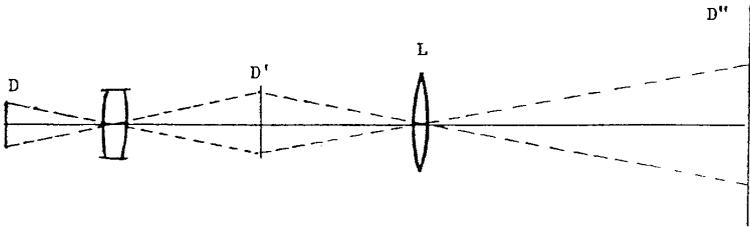


Figure 19

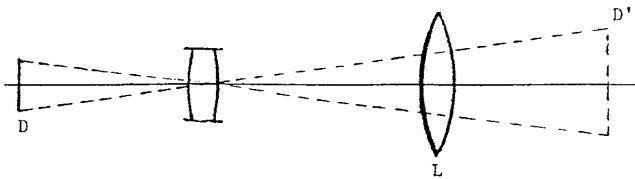


Figure 20

a) Formules de conjugaison d'une lentille

Utiliser un banc d'optique, un écran mobile et la lentille à étudier. L'objet est l'image D' dont la lentille L donne une image D'' (figures 19 ou 20).

b) Le montage peut être utilisé pour obtenir un objet virtuel avec lequel une lentille divergente peut donner, dans certaines conditions, une image réelle (figure 21).

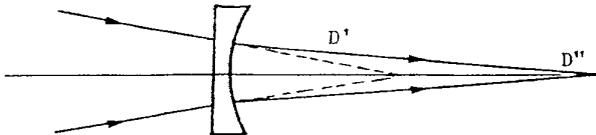


Figure 21

c) Étude des aberrations géométriques d'une lentille

Réaliser une diapositive D selon le modèle de la figure 22. Former son image D' près de l'objectif. Former, à l'aide d'une lentille de courte focale (par exemple 15 cm) et de grande ouverture, son image D'' sur un écran. On constate simultanément plusieurs défauts :

- la courbure de champ : la mise au point n'est pas la même pour les cercles des différents diamètres ;
- l'astigmatisme : la mise au point n'est pas la même pour le cercle et un segment de droite qui lui est perpendiculaire ;
- le chromatisme latéral : les cercles sont bordés de liserés jaunes à l'extérieur et de bleu-vert à l'intérieur (voir plus loin).

Utiliser maintenant la diapositive représentée à l'aide de la figure 23.

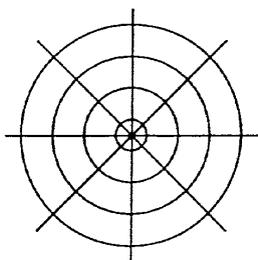


Figure 22

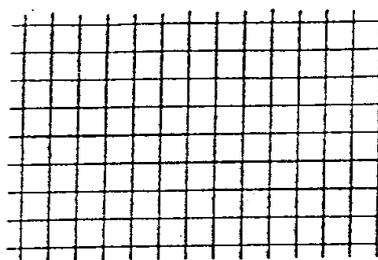


Figure 23

Dans les mêmes conditions que précédemment on observe à nouveau les défauts cités et en plus il y a distorsion en croissant (figure 24), due au fait que le diaphragme Δ se trouve situé après la lentille (figure 25).

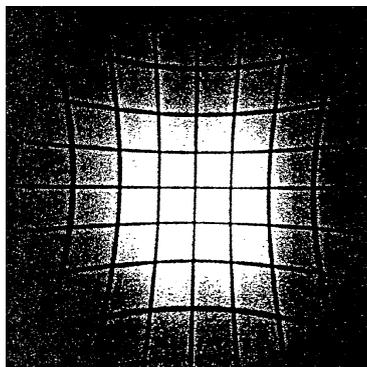


Figure 24

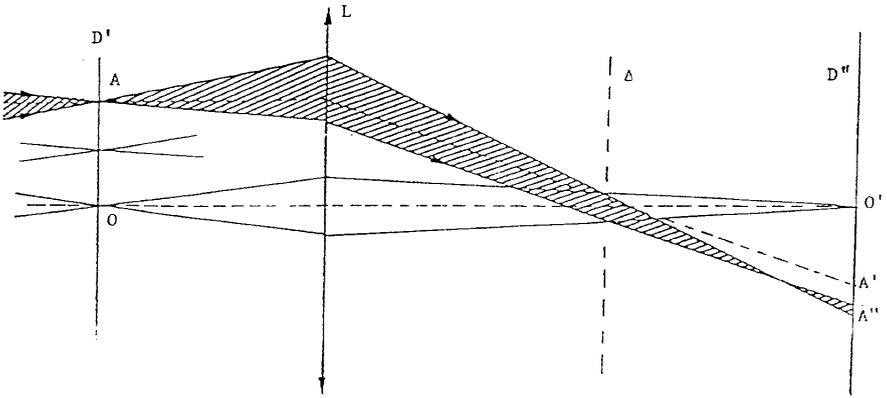


Figure 25

Pour observer la distorsion en barillet faire l'image de la diapositive à l'infini puis placer à la suite du projecteur la lentille L à étudier de manière à obtenir une image définitive en D'' (figure 26). Le diaphragme est cette fois situé avant la lentille. A l'aide d'une lentille auxiliaire projeter l'image obtenue sur un écran pour qu'elle soit visible de toute une classe (figure 27).

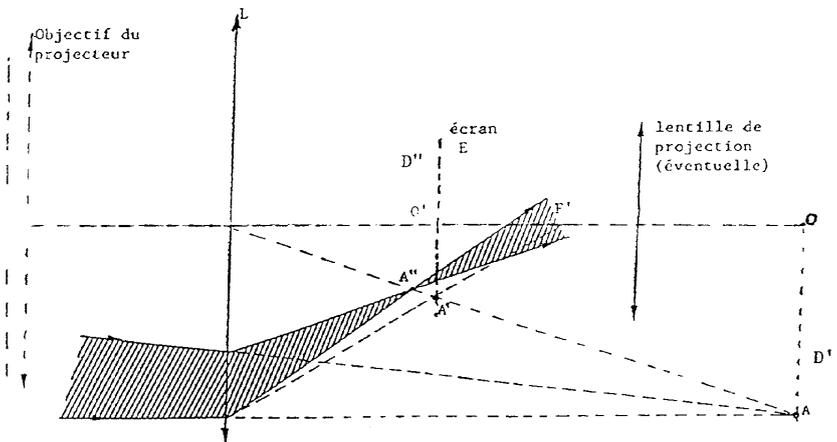


Figure 26 : Si l'on utilise la lentille de projection il faut retirer l'écran E.

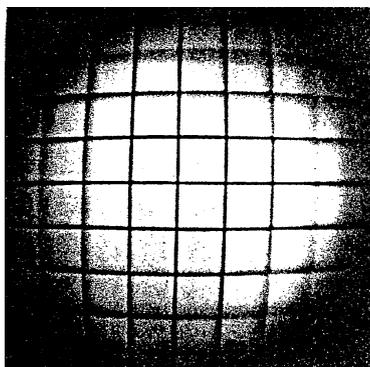


Figure 27

Rapprocher la lentille L de l'objectif du projecteur : la distorsion s'atténue ; elle devient négligeable lorsque L est très près de l'objectif : le faisceau est alors focalisé sur l'ensemble objectif + lentille ; cette condition, nécessaire pour éliminer ce type de défaut, est réalisée par construction (diaphragme au voisinage du centre de l'objectif de projection).

d) Pseudo-images

On reprend le montage de la figure 19 avec la diapositive de la figure 22 formée de cercles concentriques et des lignes radiales. Il est possible de mettre au point simultanément au centre de l'image sur le cercle de petit rayon et sur les lignes radiales correspondantes car cette image est obtenue dans les conditions de Gauss (optique paraxiale). Au-delà d'une certaine valeur du rayon, la netteté de l'image disparaît et plus rapidement pour les cercles que pour les lignes radiales.

Pour observer une image plus nette il est nécessaire de rapprocher l'écran de la lentille (courbure de champ).

En même temps apparaît l'astigmatisme. Comme on l'a vu plus haut, à chaque point objet en dehors de l'axe, correspond un pinceau de lumière qui donne deux focales T et S perpendiculaires entre elles (tangentielle et sagittale) avec, entre les deux, un cercle de moindre diffusion qui correspond à l'«image» la moins mauvaise possible. Si l'objet est un cercle centré sur l'axe, par raison de symétrie, à chaque point du cercle correspond une petite droite focale tangente au cercle.

L'image qui est constituée de petits segments de droite (figure 28) a l'aspect d'un cercle : c'est une pseudo-image.

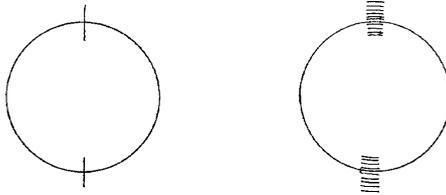


Figure 28

Si maintenant on considère un objet constitué par un petit segment de droite normal au cercle, il lui correspond des focales tangentielles constituées de petites droites perpendiculaires au segment considéré : l'image du segment est très élargie (sa largeur est égale à la longueur des focales).

C'est l'inverse qui se produit pour les focales sagittales.

Le lieu des focales tangentielles et sagittales correspondant à l'objet de la figure 22 est constitué respectivement de deux surfaces T et S qui s'éloignent de plus en plus du plan où se trouve l'image dans le cas de l'optique paraxiale (figure 29).

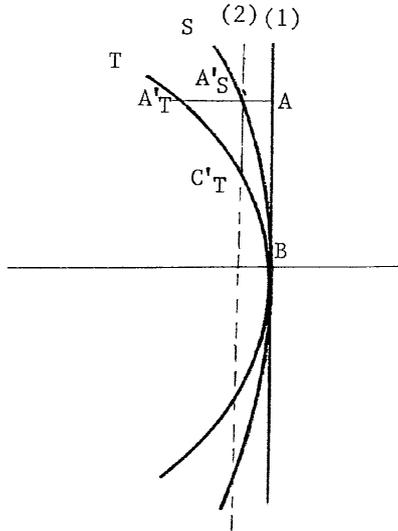


Figure 29

Pour analyser ces aspects successifs de l'image il est commode de faire appel à un objet formé d'un ensemble de points comme celui représenté figure 30. La petite couronne dont tous les points (B) sont situés près de l'axe, donne une image dans le plan (1) (figure 29) (optique paraxiale) ; les points A de la grande couronne n'ont pas d'image dans ce plan : il leur correspond, comme on l'a vu au chapitre 2.1.4.c., une coma d'axe radial (voir figure 31).

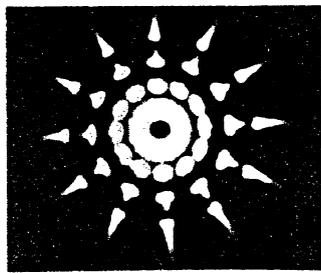
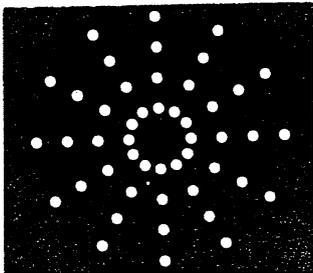
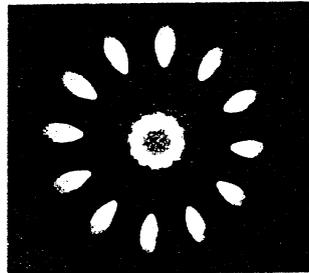
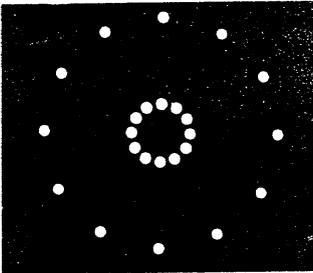


Figure 30

Figure 31

Si maintenant on rapproche l'écran de la lentille, les points B de l'axe ont une image qui devient progressivement floue. Les points A donnent successivement les focales sagittales A'_S (plan 2), puis tangentielles (A'_T) ; on observe dans ces plans les pseudo-images décrites précédemment.

On remarquera que dans le plan (2), par exemple, il y a mise au point à la fois sur A'_S (segment de droite) et C'_T (cercle correspondant à un rayon plus petit que celui du cercle passant par A), comme le montrent les documents 32 et 33.

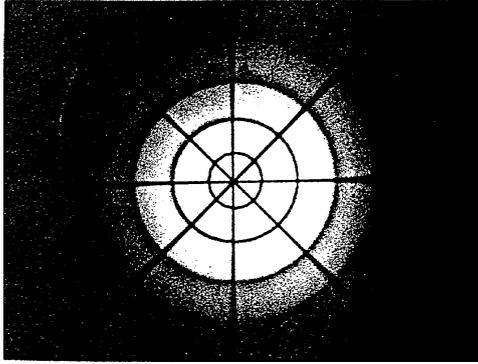


Figure 32

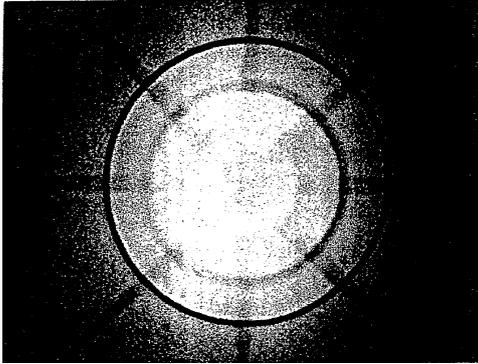


Figure 33

e) Chromatisme latéral

La position de l'image d'un objet dépend de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Si l'on observe par exemple l'image $A'B'$ de l'objet AB (figure 34) dans le plan de l'image rouge ($A'_R B'_R$) on voit un petit spectre qui s'étale du point rouge (r) à la tache bleue (b) correspondant à l'intersection du faisceau bleu avec le plan d'observation. Ce petit spectre caractérise le **chromatisme latéral**.

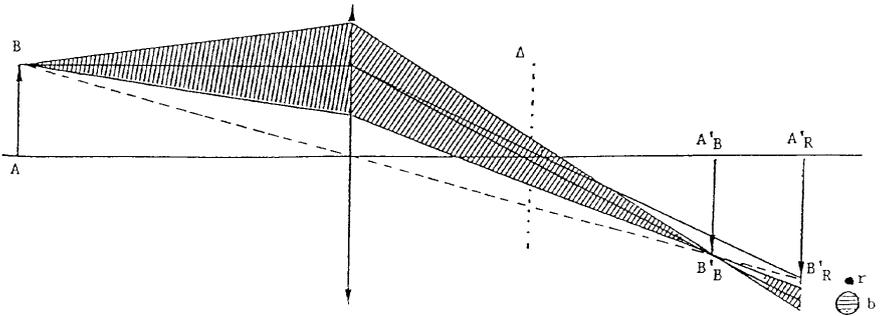


Figure 34

Pour analyser ce phénomène faire l'image en D' , près du projecteur, de la diapositive de la figure 35 qui comporte deux parties complémentaires. A l'aide d'une lentille ordinaire de grand diamètre faire l'image de D' en D'' selon la technique décrite au 3.2.c. On constate que le demi-cercle opaque sur fond transparent donne un spectre annulaire dont l'aspect s'interprète à partir de la figure 34, tandis que le demi-cercle opaque sur fond clair, bordé de jaune à l'extérieur et de bleu-vert à l'intérieur est le complémentaire du précédent (voir [3]).

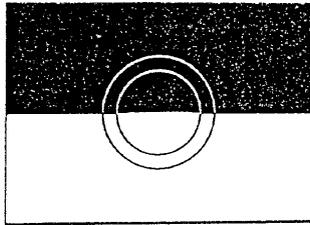


Figure 35

3.3. Diffraction de Fraunhofer

Dans la plupart des expériences de diffraction on utilise de petites ouvertures (trous ou fentes) qui doivent être fortement éclairées. Pour cela on réalise un montage avec condenseur qui focalise l'image d'un filament d'une source sur l'ouverture S . Le montage classique, représenté à l'aide de la figure 36, permet d'observer la figure de diffraction de Fraunhofer d'un objet (O) au voisinage de l'image S' de la source S donnée par l'objectif.

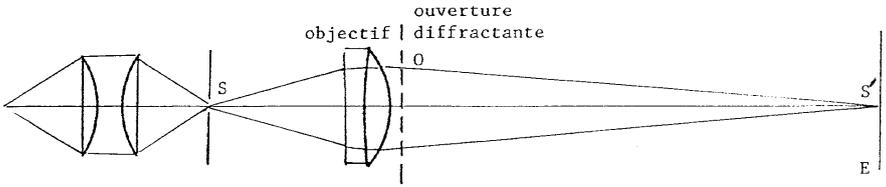


Figure 36

Si l'on veut réaliser strictement le montage précédent avec un projecteur de diapositives il faut déplacer l'objectif vers la droite car l'image du filament se forme précisément au voisinage du centre de l'objectif. Le montage n'est pas pratique car il faut en plus disposer d'un support pour placer des ouvertures en S.

On obtient cependant des résultats satisfaisants en utilisant normalement le projecteur de diapositives muni de son objectif (figure 37). La source est placée en (D) dans un cadre de diapositive. La méthode est bien adaptée quand la source est une fente, un ensemble de fentes, un quadrillage, un objet étendu quelconque. (Seule une source «ponctuelle» conviendrait mal car elle serait beaucoup moins éclairée que dans le cas de la figure 36).

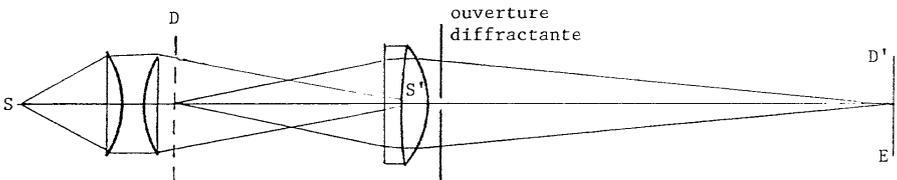


Figure 37

Le montage est alors extrêmement simple : on fait l'image de la diapositive sur un écran E, plus ou moins éloigné (selon les conditions de visibilité), et on place, à la suite de l'objectif, l'ouverture diffractante. On observe la figure de diffraction dans le plan E.

a) Diffraction par une fente

La fente source, montée sur cadre de diapositive, est réalisée avec les deux bords d'une lame de rasoir distants de 0,3 ou 0,4 mm. La fente diffractante est une fente de largeur réglable, parallèle à la précédente (le réglage n'est pas critique comme pour la diffraction de Fresnel).

Quand on rétrécit la fente diffractante on observe sur l'écran la figure de diffraction caractéristique (figure 38) : frange centrale colorée sur les bords, de largeur angulaire $2 \frac{\lambda}{a}$, encadrée de franges peu lumineuses de largeur $\frac{\lambda}{a}$. Le résultat essentiel est que lorsqu'on diminue la largeur de la fente diffractante la frange de diffraction s'élargit.

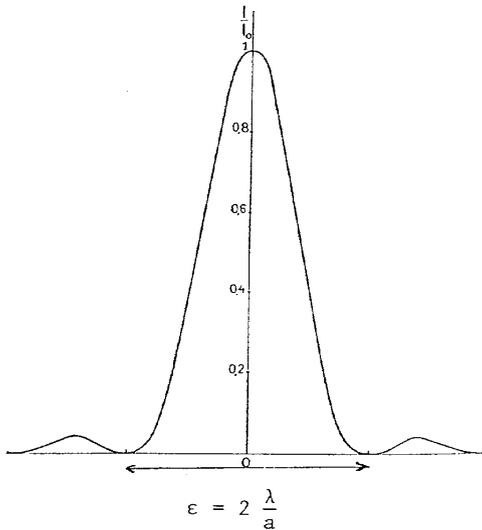


Figure 38

b) Pouvoir séparateur

La source est constituée de deux fentes A et B parallèles, distantes de 1 mm environ, et l'ouverture diffractante est une fente réglable parallèle aux fentes sources. Les images A' et B' de A et B sont constituées en fait des figures de diffraction centrées sur l'image géométrique vue précédemment. Si la fente diffractante est suffisamment large ces images sont séparées (figure 39a) ; quand on rétrécit la fente les figures de diffraction s'élargissent ; il arrive un moment où les figures ne sont plus discernables (figure 39b).

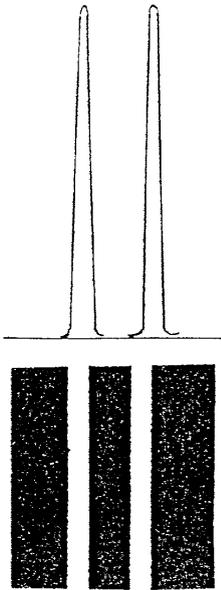


Figure 39a

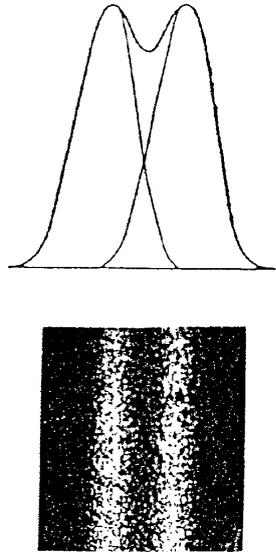


Figure 39b

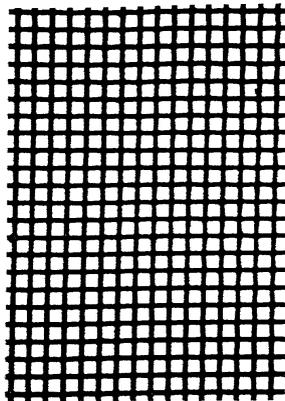


Figure 40

A noter qu'on peut définir dans ce cas de figure un critère de Rayleigh analogue à celui concernant des sources ponctuelles. Cette expérience permet d'évaluer le pouvoir séparateur du microscope (voir le chapitre suivant).

c) Image d'un quadrillage régulier

On réalise une diapositive formée d'un quadrillage régulier formé de lignes horizontales et verticales. Par exemple, on utilise un morceau de treillage en fils de laiton (de pas voisin de 0,5 mm) ou la photocopie sur transparent d'un quadrillage prélevé sur une planche de transfert à sec... (figure 40).

L'objectif est diaphragmé par une fente réglable et orientable dans son plan. Cette fente est supposée d'abord verticale. Quand on diminue la largeur de la fente on constate que les traits verticaux deviennent de plus en plus flous puis finissent par disparaître : seuls subsistent les traits horizontaux (figure 41). Le phénomène inverse se produit avec les traits horizontaux quand la fente est horizontale.

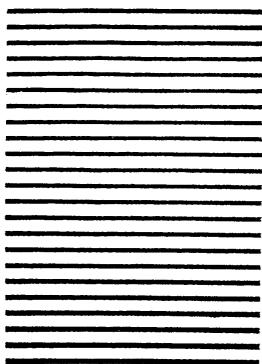


Figure 41a

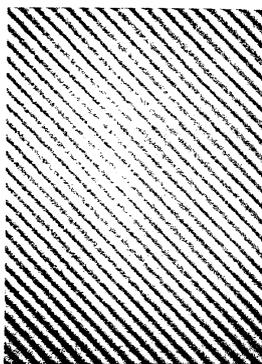


Figure 41b

Si maintenant, à partir d'une des positions précédentes, on fait tourner la fente dans son plan on observe des phénomènes plus surprenants. Pour des angles α voisins de 18° , 26° , 45° , 63° , 71° on voit apparaître des lignes normales aux positions correspondantes des fentes. Si a est la distance entre deux traits sur l'écran lorsque la fente est dans l'une des positions initiales, la distance est voisine de :

$$\frac{a}{\sqrt{2}} \quad \text{pour } \alpha = 45^\circ$$

$$\frac{a}{\sqrt{5}} \quad \text{pour } \alpha = 26^\circ \text{ et } 63^\circ$$

$$\frac{a}{\sqrt{10}} \quad \text{pour } \alpha = 18^\circ \text{ et } 71^\circ$$

Interprétation - Expérience d'Abbe

Pour l'interprétation de ces expériences nous renvoyons le lecteur à des ouvrages spécialisés (comme par exemple [5]). Faisons remarquer que dans les expériences précédentes, et notamment le § 3.3.b, il n'est pas nécessaire de supposer que les sources sont cohérentes. Il en est de même pour l'expérience de la figure 41.

Cependant l'éclairage fourni par le condenseur procure toujours une lumière partiellement cohérente, de sorte qu'on peut considérer que la vision d'un objet à structure périodique peut être interprétée comme des phénomènes d'interférences entre faisceaux diffractés.

Un éclairage très cohérent peut être réalisé selon le schéma de la figure 42 où S est un trou de très faible diamètre (ordre du mm). L'objectif donne de ce trou une image en S'. Le diaphragme placé dans ce plan permet de «traiter» l'information contenue dans le spectre de l'objet, ce qui a pour effet de modifier l'aspect de l'image en O'.

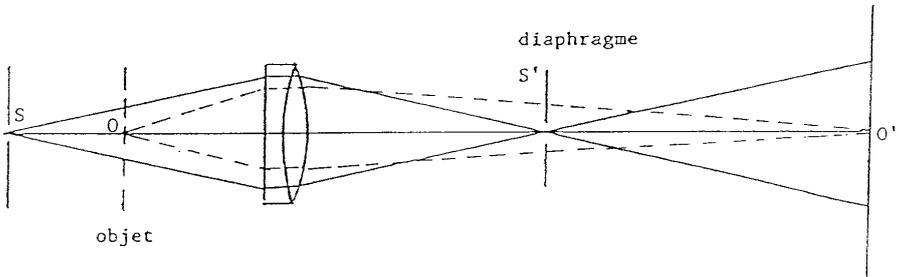


Figure 42

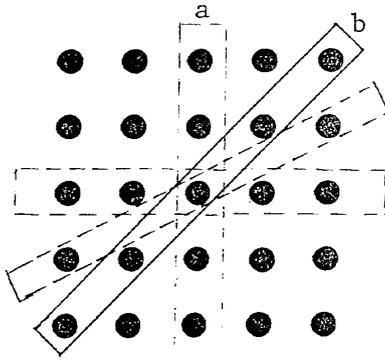


Figure 43

Les expériences précédentes s'expliquent alors de la manière suivante : le spectre du quadrillage qui constitue un réseau est représenté à l'aide de la figure 43 (on se limite aux deux premiers ordres). La distance entre deux ordres est inversement proportionnelle à la distance entre deux traits du réseau.

Quand la fente est orientée à 45° des lignes du réseau elle ne laisse passer que les ordres $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, 3$ etc. de sorte qu'on isole un spectre qui

correspond à un réseau fictif de pas égal à $\frac{a}{\sqrt{2}}$ et situé perpendiculairement à la fente. Si la fente fait un angle tel que $\text{tg } \alpha = 0,5$ (soit $\alpha \sim 26,6^\circ$)

on isole les ordres $0, \frac{2}{1}, \frac{4}{2}$ etc. qui correspondent à un réseau fictif de pas

$$\frac{a}{\sqrt{2^2 + 1^2}} = \frac{a}{\sqrt{5}}.$$

L'expérience peut être réalisée très simplement avec le montage de la figure 44. Il suffit de faire l'image de la figure 40 sur l'écran E et de placer la fente F contre l'objectif.

Remarque : Pour observer les différentes structures quand on fait tourner la fente dans son plan il convient de ne pas faire l'image trop loin du projecteur (environ un mètre). Les réseaux de pas $\frac{a}{\sqrt{2}}$ et $\frac{a}{\sqrt{5}}$ sont les plus faciles à obtenir.

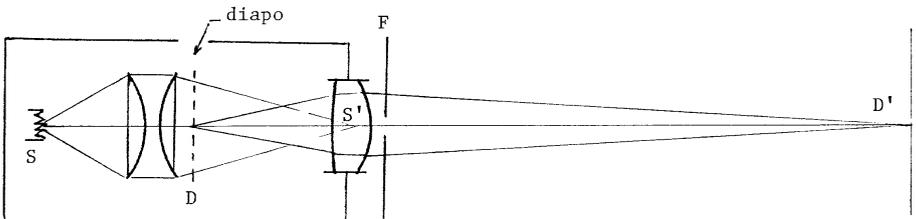


Figure 44

4. RÉALISATION D'INSTRUMENTS D'OPTIQUE : CAS DU MICROSCOPE SCHÉMATIQUE

Le projecteur de diapositives se révèle un outil pratique pour réaliser et étudier des instruments d'optique schématiques.

Par un simple déplacement de l'objectif (éventuellement télécommandé) on obtient des images réelles ou virtuelles qui serviront d'objets pour un autre appareil.

4.1. Exemple n° 1

On se propose de réaliser un œil schématique avec lequel on règle une lunette astronomique afocale.

On choisit dans la collection de diapositives un quadrillage sur dépoli (papier calque) ; on en fait l'image à l'infini (une dizaine de mètres au moins). D'autre part on monte sur une tige une lentille convergente L de 30 cm (environ) de distance focale suivie d'un écran qui symbolise la rétine. Cet «œil» schématique est orienté vers la source : on règle la distance lentille-écran pour que l'image de la diapositive soit nette : l'œil est alors réglé pour la vision à l'infini. On vérifie que l'image reste nette quand on déplace l'œil le long de l'axe.

On réalise alors une lunette schématique comprenant un objectif et un oculaire. La lunette regarde l'image à l'infini dans la direction du projecteur.

On règle la lunette en déplaçant l'oculaire jusqu'à ce que l'image définitive soit nette dans le plan de la rétine (figure 45).

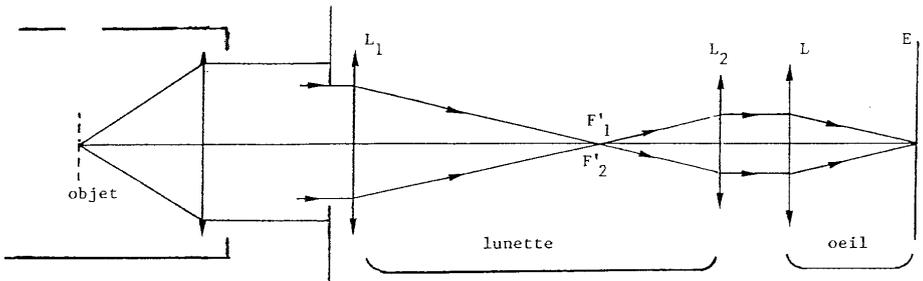


Figure 45

Pour simuler le cas de l'œil myope, remplacer la lentille L par une lentille un peu plus convergente sans changer sa position. On montre alors que le myope doit éloigner l'oculaire de l'œil pour obtenir une vision correcte. C'est l'inverse pour l'hypermétrope.

4.2. Exemple n° 2 : microscope schématique

4.2.1. Principe

Le projecteur de diapositives fournit d'emblée une source de lumière avec condenseur éclairant vivement un objet plan (une diapositive) sur une «platine» fixe. L'objectif du projecteur mobile, qui joue le rôle de l'objectif du microscope, donne de l'objet une image réelle très agrandie qui sera examinée à l'aide d'un oculaire.

On s'intéresse à la vision d'**objets rapprochés**. On est donc amené à comparer les images vues à travers l'instrument aux images vues à l'œil nu, l'œil étant déjà placé dans les meilleures conditions d'observation.

On réalise donc un œil réglé pour la vision rapprochée.

4.2.2. Réalisation d'un œil schématique

On s'impose une distance minimum de vision distincte qui correspond à la longueur du microscope schématique qui sera de l'ordre du mètre.

La position de l'œil est fixée ainsi que celle de l'objet (diapositive D). L'objectif de projection étant retiré on règle la position de l'écran E pour obtenir une image nette sur la rétine (figure 46a). L'image, très petite, ne permet pas d'analyser les traits millimétriques.

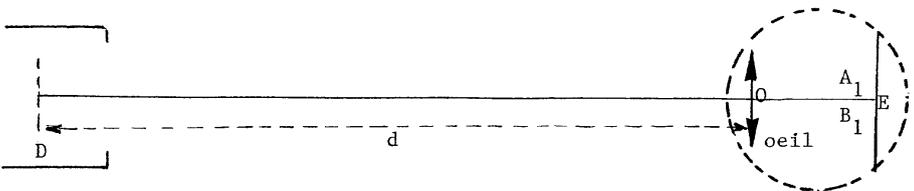


Figure 46a

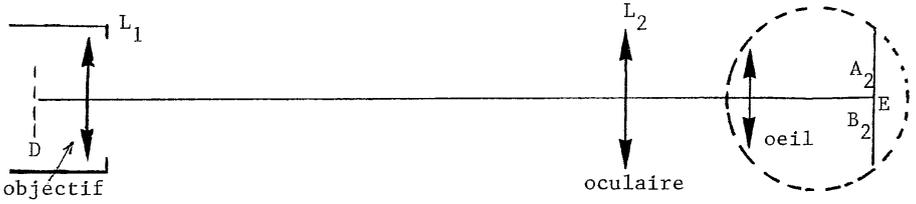


Figure 46b

4.2.3. Réalisation du microscope

L'œil étant placé à la distance d de l'objet, on met en place l'objectif du projecteur qui joue le rôle d'objectif (L_1) pour le microscope, puis l'oculaire L_2 (une lentille convergente de 20 cm de distance focale par exemple). L'oculaire est placé de manière que son foyer image soit proche de l'œil (afin que l'œil se trouve convenablement placé par rapport au cercle oculaire). On règle alors la position de l'objectif par rapport à l'objet pour obtenir sur la rétine une image nette. Cette image est très agrandie par rapport à celle obtenue à l'œil nu (figures 46b et 47).

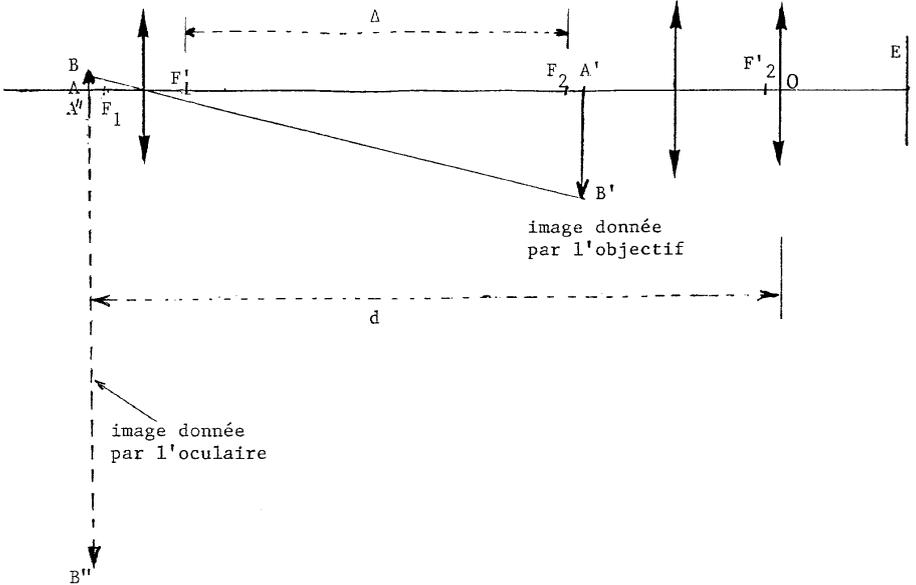


Figure 47

Avec $f'_1 = 7,5$ cm (objectif),
 $f'_2 = 20$ cm (oculaire),
 $AO \sim F_1O = d = 130$ cm.

On trouve $\Delta = F'_1F'_2 \sim 75$ cm.

Le grandissement de l'objectif est alors de l'ordre de 10 (valeur à ne pas dépasser).

Remarque : Dans la pratique le réglage s'effectue en déplaçant l'ensemble objectif plus l'oculaire. Cette opération serait possible ici si on désolidarisait l'objectif du support du projecteur mais cela conduirait à une situation peu commode à gérer.

4.2.4. Mesures

Avec ce dispositif on peut procéder à toutes les mesures classiques : puissance, grossissement, champ, cercle oculaire, ...

Donnons quelques exemples :

Grossissement

Dans le plan de la rétine on mesure la dimension de l'image d'un objet AB sans l'instrument puis avec l'instrument :

$$G = \frac{\text{tg}\theta'}{\text{tg}\theta} = \frac{A_2B_2}{A_1B_1}$$

Grandissement de l'objectif

On réalise une diapositive D obtenue par photocopie sur transparent d'un papier millimétré qui constitue un micromètre objectif. Comme le grandissement à mesurer est relativement faible, une diapositive identique, placée dans le plan de l'image D' constitue un micromètre oculaire. On compare directement dans le plan de l'image intermédiaire (ce qui n'est pas possible dans le cas d'un microscope réel) ou dans le plan de la rétine, les deux images superposées. On en déduit le grandissement (figure 48) :

$$\gamma_1 = \frac{A'B'}{AB}$$

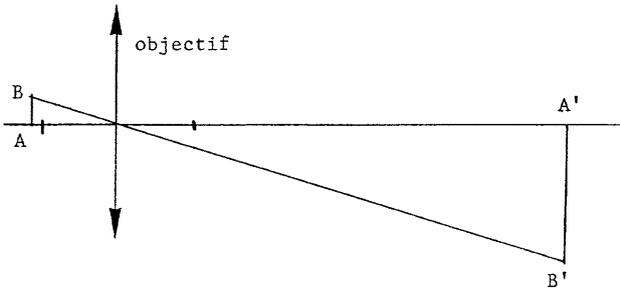


Figure 48

Cercle oculaire

Rechercher le cercle oculaire à l'aide d'un petit écran. Vérifier qu'il correspond à l'image de l'objectif donnée par l'oculaire.

Mesurer son diamètre et sa position par rapport à l'oculaire (figure 49).

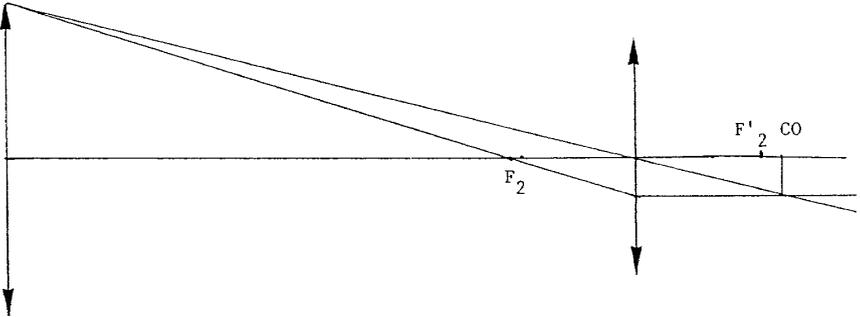


Figure 49

Ouverture numérique

Déterminer l'angle α sous lequel on voit depuis l'objet le rayon de l'objectif. L'ouverture numérique est :

$$O_N = n \sin \alpha = \sin \alpha$$

Changement d'oculaire

Réaliser un autre appareil en changeant d'oculaire. Refaire les mesures précédentes. Montrer en particulier que le cercle oculaire devient plus petit quand la puissance augmente.

Résultats

Avec les données ci-dessus on a : $G = 70$, $\gamma_1 = 10$.

La puissance de l'oculaire est : $p_2 = \frac{1}{f'_2} = 5 \delta$.

On en déduit la puissance du microscope :

$$P = \gamma_1 p_2 \sim \frac{\gamma_1}{f'_2} = 50 \delta$$

D'autre part : $G = P.d = 50 \times 1,3 = 65$
valeur compatible avec la valeur donnée par la mesure directe, compte tenu de la précision des mesures.

Distance focale f' du microscope :

$$P = \frac{1}{f'} \quad \text{d'où} \quad f' = 2 \text{ cm}$$

Cercle oculaire : comparer à la valeur théorique donnant le rayon :

$$\rho = \frac{n \sin \alpha}{P}$$

4.2.5. Mesure d'une faible longueur

Le dispositif mis en place pour mesurer le grandissement de l'objectif permet de mesurer de faibles longueurs (de l'ordre du mm). Après avoir déterminé le grandissement de l'objectif et «étalonné» le micromètre oculaire, on remplace le micromètre objectif par l'objet à mesurer : on mesurera ainsi le diamètre d'ouvertures circulaires, la largeur des fentes, etc.

4.2.6. Profondeur de champ

Réaliser une diapositive à l'aide d'un morceau de verre de 5 cm de côté, d'indice n et d'épaisseur e égale à 3 mm par exemple. Sur une face coller un quadrillage et faire un repère sur l'autre face.

Mettre au point sur la face D_1 tournée vers l'objectif puis sur l'image de l'autre face vue à travers la lame (D'_2) : il a fallu déplacer l'objectif de $\delta = \frac{e}{n}$ soit 2 mm environ (figure 50). Évaluer le déplacement de l'objectif (si celui-ci se visse mesurer l'angle de rotation et le pas de vis en mesurant le déplacement pour un nombre de tours connu).

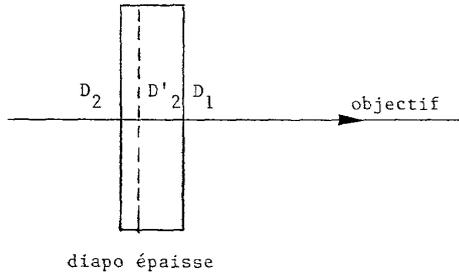


Figure 50

En déduire la latitude de mise au point. Dans notre cas elle est de l'ordre d'une fraction de mm.

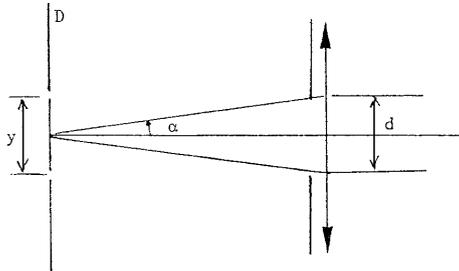


Figure 51

4.2.7. Pouvoir séparateur du microscope

Reprendre l'expérience 3.3.c. du chapitre précédent. L'objet est une diapositive formée d'un quadrillage régulier ayant un pas de l'ordre d'une fraction de millimètre. Limiter l'ouverture du projecteur à l'aide

d'une fente réglable. Quand les traits distants de y et parallèles à la fente disparaissent mesurer la largeur de la fente d et en déduire $\sin \alpha$. (figure 51).

Le pouvoir séparateur est donné par : $y = \frac{1,22 \lambda}{2n \sin \alpha}$ avec $n = 1$.

Vérifier que y est de l'ordre de grandeur de $\frac{\lambda}{\sin \alpha}$

si y est de l'ordre de $0,1 \text{ mm}$ $\lambda = 0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$

on a : $d = 2\alpha f_1 \sim \frac{\lambda}{y} f_1 = \frac{10^{-3}}{0,1} \times 75$

$d \sim 0,8 \text{ mm}$.

4.2.8. Éclairages de microscope

L'éclairage utilisé pour l'étude qui précède ne correspond pas aux éclairages effectivement mis en œuvre dans un microscope à fort grossissement. Si l'on désire réaliser des éclairages conformes à ceux-ci on modifiera le montage en conséquence.

a) Éclairage incohérent

L'image S' du filament est formée sur l'objet A à projeter, ce qui implique que l'objectif soit déplacé vers la droite (figure 52). L'image de la source est limitée par un diaphragme : on peut ainsi modifier le champ à examiner.

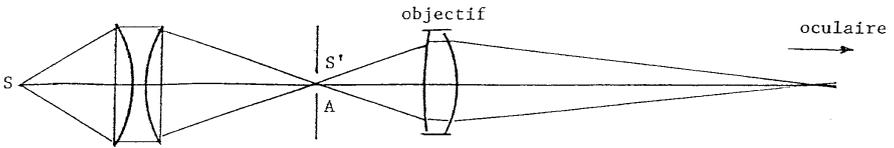


Figure 52

b) Éclairage cohérent de Köhler

L'image S' du filament est formée sur un diaphragme réglable Δ_1 placé au foyer objet du condenseur. L'objet A placé à la suite est éclairé en lumière plus ou moins cohérente selon la dimension de l'ouverture Δ_1 (figure 53). Dans le plan conjugué de A par rapport au condenseur

on place un deuxième diaphragme (Δ_2) qui joue le rôle de diaphragme de champ, Δ_1 étant diaphragme d'ouverture. Ainsi avec les deux diaphragmes indépendants on contrôle le champ et l'éclairement de l'objet.

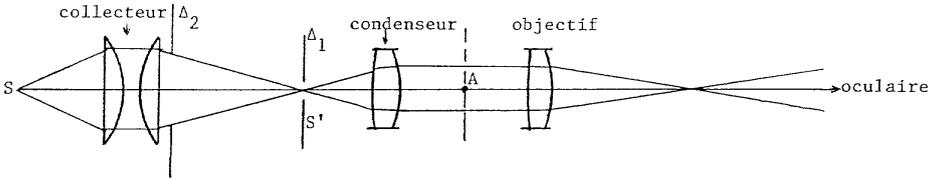


Figure 53

Pour réaliser un tel montage on utilise le projecteur de diapositives ; le diaphragme Δ_2 placé contre le condenseur est constitué par une série d'ouvertures différentes montées sur cadres de diapositives et qu'on peut choisir. Δ_1 est placé au point de focalisation S' ; l'objectif du projecteur, déplacé vers la droite, sert de condenseur pour le microscope (il faut donc se procurer un objectif supplémentaire pour réaliser le microscope).

c) Éclairage par réflexion

Pour montrer le principe de l'éclairage par réflexion (utilisé par exemple dans le microscope métallographique) on utilise deux projecteurs de diapositives comme l'indique la figure 54.

Le projecteur n° 1 contient une diapositive formée d'un morceau de miroir plan argenté en surface (ou une surface réfléchissante quelconque) tourné vers l'avant. Sa source de lumière ne fonctionne pas. Le deuxième projecteur éclaire, par l'intermédiaire d'un miroir semi-réfléchissant*, la surface réfléchissante à examiner. L'objectif du premier projecteur joue ainsi à la fois le rôle de condenseur et de projecteur pour obtenir une image de D en D'. Sur cette image on observe par exemple les rayures sur le métal.

* On trouve des miroirs semi-réfléchissants, à bon marché, dans des chutes de vitres parasoleil utilisées notamment dans la construction d'immeubles.

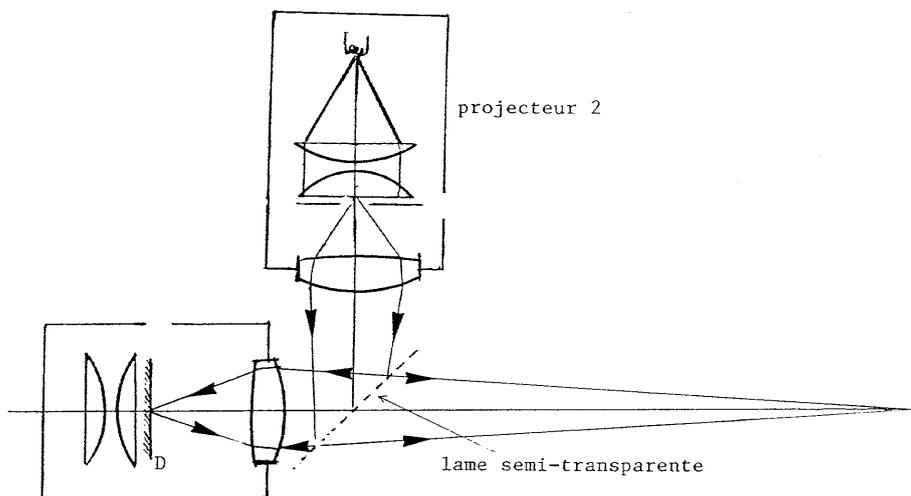


Figure 54

CONCLUSION

Les différents exemples qu'on vient de voir ont montré que le projecteur de diapositives est un appareil capable de faciliter grandement la tâche de l'expérimentateur pour la réalisation de nombreuses expériences d'optique. Cette liste n'est évidemment pas exhaustive et chacun des utilisateurs est en mesure de trouver de nouvelles applications. Une contrainte toutefois : il est indispensable de fabriquer soi-même une collection d'accessoires montés sur cadres de diapositives, accessoires qu'on rangera soigneusement dans un classeur...

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bulletin de l'ADASTA, supplément pédagogique n° 9, décembre 1991.
- [2] Bulletin de l'Union des Physiciens, n° 743, avril 1992.
- [3] R. JOUANISSON : «*Formation des images, étude expérimentale*», tome 1, Dossier pédagogique n° 39, ADASTA, décembre 1994.
- [4] M. BRUHAT et A. MARÉCHAL : «*Cours de Physique, optique géométrique*», Masson 1956.
- [5] G. BRUHAT : «*Optique*», 6^e édition, Masson 1965.

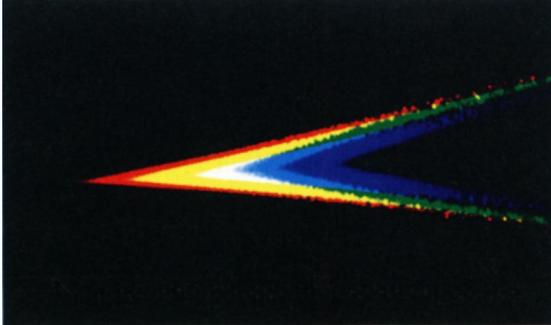


Photo 1 : Aberration chromatique d'une lentille convergente : dispersion des foyers dans un plan contenant l'ax (voir figure 15).

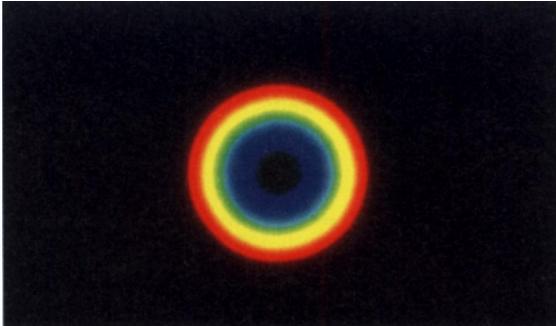


Photo 2 : Aberration chromatique de la même lentille : observation dans un plan de front entre la lentille et les foyers (voir position 1, figure 16).

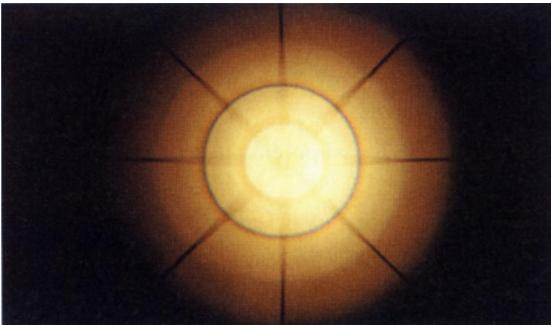


Photo 3 : Courbure de champ et astigmatisme d'une lentille. Noter également le chromatisme latéral (voir figures 32 et 33).

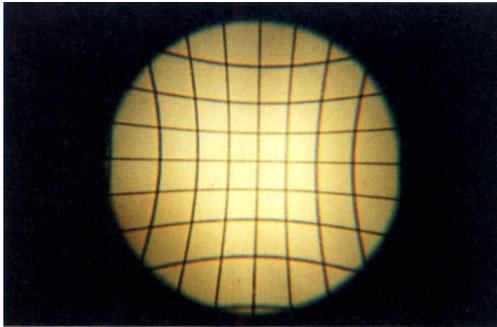


Photo 4 : Distorsion en croissant (*voir figure 24*).

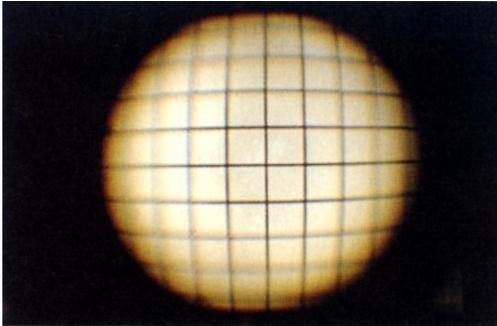


Photo 5 : Distorsion en barillet (*voir figure 27*).



Photo 6 : Modification de l'image par filtrage optique. L'objet est une trame régulière formant un réseau croisé (*voir figure 40*) ; le filtrage est obtenu à l'aide d'une fente (*voir le montage de la figure 44*). Quand la fente est perpendiculaire aux diagonales du réseau, on obtient une image fictive formée d'un ensemble de traits perpendiculaires à la fente. En fait, la répartition de la lumière est pratiquement sinusoïdale à cause de la disparition des hautes fréquences.