

Observation collective d'une image du Soleil à l'aide d'une chambre noire inattendue

par V. BROCHIER
Lycée Val de Saône - 01600 Trévoux

Le reflet de la lumière du Soleil avec un miroir plan (2 à 4 cm de côté), jeu que beaucoup de nos élèves connaissent, permet de former une image du Soleil suffisamment nette et lumineuse par projection sur un écran (un mur par exemple) situé à une dizaine de mètres.

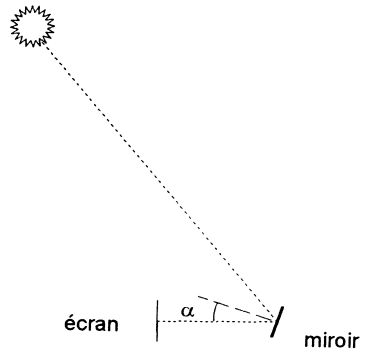


Figure 1

1. DESCRIPTION

La manipulation (figure 1) peut être décrite comme celle qui utilise une chambre noire à sténopé¹ (figure 2) dont la profondeur f est égale à la distance miroir - écran. On assimilera le miroir à un sténopé circulaire² de diamètre D . L'image du Soleil mesure³ 9 cm de diamètre environ pour un écran placé à 10 m du miroir, si $D \gg 9$ cm, si le miroir est bien plan, et si la diffraction est négligeable.

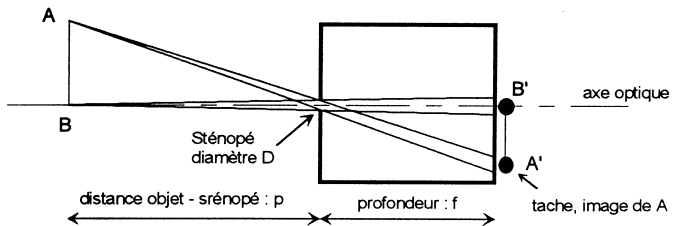


Figure 2

1. Le sténopé est l'ouverture qui laisse entrer la lumière dans une chambre noire.
2. α représente l'angle d'incidence (voir figure 1). Le miroir est disposé obliquement sur l'axe optique ; un miroir circulaire est donc vu, sous cet angle α , comme une ouverture elliptique.
3. En confondant le diamètre apparent du Soleil exprimé en radian ($0,5^\circ$ ou $0,009$ rad) avec sa tangente, pour un écran placé à une distance $f = 10$ m du miroir : diamètre de l'image $\cong f \times \text{diamètre apparent du Soleil en radian} = 10 \text{ m} \times 0,009 \text{ rad} \cong 9 \text{ cm}$.

2. QUELQUES ÉLÉMENTS À PROPOS D'UNE CHAMBRE NOIRE À STÉNOPÉ

Les autres paramètres étant fixés (distance objet-sténopé p , profondeur f , longueur d'onde λ et forme du sténopé), la définition de l'image dépend du diamètre D du sténopé :

- chaque point de l'objet forme une tache étendue. Deux points de l'objet seront distingués si les taches images ne se recouvrent pas. On considérera que deux taches images sont distinctes si le centre de l'une est au bord de l'autre. Il faut donc diminuer le diamètre du sténopé, ce qui diminue le diamètre d'une tache image, pour améliorer la définition de l'image (ceci tant que D est assez grand pour que les lois de l'optique géométrique s'appliquent),
- l'utilisation d'un sténopé circulaire et de petite dimension étale, par diffraction, l'image de chaque point de l'objet. Il faut augmenter le diamètre du sténopé pour améliorer la définition de l'image (ceci tant que D est assez petit pour qu'on observe sur l'écran quasiment une figure de diffraction de Fraunhofer).

Une diminution du diamètre D du sténopé diminue la taille de la tache image considérée en optique géométrique (voir figure 2), mais augmente la dimension de la tache en diffraction de Fraunhofer ; et inversement si on augmente D .

Le compromis (voir annexe 1) qui donne la meilleure définition est donné par la relation suivante (en lumière jaune : $\lambda = 600$ nm), pour des longueurs exprimées en millimètre, et pour un objet à l'infini ($p \gg f$) :

$$D_0 \approx 0,024 \text{ mm}^{1/2} \sqrt{f}$$

(D_0 : diamètre optimum du sténopé ; f : profondeur de la chambre noire).

Pour une profondeur f de 10 m : $D_0 \approx 0,024 \text{ mm}^{1/2} \sqrt{10} \text{ m} \approx 2,4 \text{ mm}$.

L'ouverture relative⁴ correspondante s'exprime par le rapport⁵ D/f ; dans cet exemple $D_0/f \approx 1/4\ 200$, ce qui est très petit, l'image est peu lumineuse.

-
4. L'ouverture relative est définie par le rapport f/D : cela revient à prendre la profondeur f de la chambre comme unité de mesure du diamètre du sténopé. Deux systèmes optiques de mêmes ouvertures relatives donneront du même objet, toutes choses égales par ailleurs, des images de même luminosité.
 5. Quand on exprime l'ouverture relative sous la forme d'un inverse, en $1/X$, le dénominateur $X = D/f$ de ce rapport est le nombre qui apparaît dans l'échelle en $f/$ des photographes. Le rapport $f/X = D$ donne l'ouverture absolue du système optique (diamètre du sténopé, ou, plus généralement diamètre de la pupille d'entrée).

3. EN PRATIQUE

Un diaphragme circulaire, du diamètre désiré, découpé dans un carton léger, sera fixé contre le miroir⁶ tenu à la main, l'image étant projetée sur un mur. L'expérience montre que, pour une projection à 10 m, la luminosité obtenue avec un sténopé de 2 ou 3 mm de diamètre est trop faible pour une observation aisée en plein jour. Ne pas hésiter à augmenter ce diamètre jusqu'à 2 ou 3 cm (ouverture relative : $D/f \cong 1/300$) ; le gain en luminosité est important, alors que l'image du Soleil garde une définition suffisante pour voir une image circulaire, aux bords assez nets.

Cette possibilité d'agrandissement du sténopé a été essayée lors de prises de vue photographiques à l'aide d'une chambre noire ($f = 150$ mm, sténopé optimum 0,3 mm). Un sténopé de 5 mm et même 10 mm de diamètre a donné une image encore discernable.

4. COMMENT AMÉLIORER L'OBSERVATION

Il sera utile de fixer le miroir, sur un support orientable et stable (pied photo par exemple) avec une pâte collante (genre Blu Tack).

Il faudra placer l'écran et le diaphragme perpendiculairement à la ligne «centre du sténopé-centre de l'image» (axe optique de la chambre noire) pour éviter une déformation de l'image du Soleil (voir figure 3).

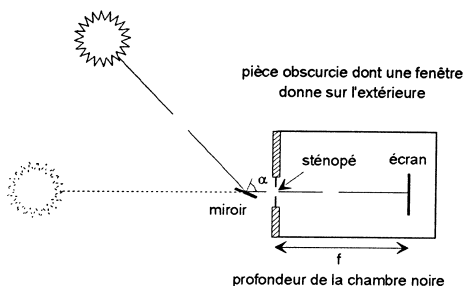


Figure 3

6. Un miroir circulaire, vu obliquement, apparaît comme une ellipse et se comporte comme un sténopé ayant cette forme. La recherche de la meilleure résolution exige un sténopé circulaire, ce qui minimise les phénomènes de diffraction. Pour améliorer la situation, il faudrait utiliser un diaphragme circulaire, disposé perpendiculairement à la direction du Soleil. Cette dernière disposition est préférable pour la recherche de la définition maximale.

Le diaphragme sera préparé avec soin, afin que son contour soit net, sans irrégularités, ce qui augmenterait l'importance des phénomènes de diffraction.

Si on prévoit un diaphragme circulaire fixé perpendiculairement à l'axe de la chambre noire (diaphragme-sténopé et écran), le miroir peut avoir une assez grande dimension, car il sert alors uniquement à aligner l'image du Soleil avec l'axe de la chambre noire.

La projection se fera sur un écran blanc, dans une pièce aussi obscure que possible ; idéalement, il faudrait que la seule ouverture de cette pièce soit constituée par le diaphragme, celui-ci étant collé contre une fenêtre par ailleurs complètement obscurcie. La pièce est transformée en une très grande chambre noire.

5. OBSERVATION D'UNE ÉCLIPSE

Une expérimentation conduite durant l'éclipse partielle du 12 octobre 1996, à l'aide d'un petit miroir rectangulaire tenu à la main, montre qu'il est possible de régler très rapidement l'ouverture relative (rapport D/f) en masquant une partie du miroir avec les mains. Un compromis acceptable entre la netteté de l'image et sa luminosité se trouve facilement.

6. PEUT-ON RÉSOUDRE LES TACHES SOLAIRES ?

Pour un objet situé à l'infini ($p \gg f$) la limite de la résolution angulaire ρ de la chambre est égale à l'angle sous lequel est vu le sténopé depuis le fond de la chambre noire (voir annexe 2).

Pour $f = 10$ m, et pour un sténopé de diamètre optimum $D_0 = 2,4$ mm :

$$\rho \approx D_0/f = (2,4 \text{ mm}/10 \text{ m}) = 0,000 24 \text{ rad}$$

$$\rho \approx 0,000 24 \text{ rad}$$

soit environ 0,014 degré, ce qui représente environ 1/35 du diamètre apparent du Soleil (environ 0,5°), les plus grandes taches solaires⁷ devraient être discernables.

Le phénomène à observer est de l'ordre de grandeur des limites du dispositif, il faudra procéder avec le plus grand soin (voir figure 3), avec un diaphragme dont le diamètre optimum D_0 respecte la relation : $D_0 \approx 0,024 \text{ mm}^{1/2} \sqrt{f}$.

7. Les photographies du Soleil montrent que les plus grandes taches solaires ont une dimension de cet ordre de grandeur.

Il faut donc travailler avec un sténopé de très petit diamètre, l'image du Soleil sera très peu lumineuse.

7. REMPLACEMENT DU STÉNOPÉ PAR UNE LENTILLE MINCE - INTÉRÊT D'UN SYSTÈME OPTIQUE

On pourra améliorer la luminosité en augmentant le diamètre du sténopé. Pour garder une image suffisamment petite d'un point lumineux situé à l'infini, il faut alors utiliser un système convergent. Une simple lentille convergente pour la correction de l'hypermétropie convient (vergence δ de + 0,1 à + 0,05 dioptrie pour une distance de projection f de 10 à 20 m). Il faudra que la distance lentille - écran soit la plus proche possible de la focale de la lentille ($f = 1/\delta$).

Cette lentille sera montée, avec un diaphragme de 1 à 2 cm de diamètre (ou davantage si l'expérience le montre possible), parallèlement à l'écran. On travaille alors avec un diamètre très petit, les rayons lumineux passent près du centre, sous un angle très faible ; dans ces conditions les défauts traditionnels des lentilles minces (achromatisme en particulier) seront atténués.

8. CONCLUSION

Cet article développe une idée très ancienne, dont j'ai sommairement vérifié la validité, en quelques minutes, à l'occasion de l'éclipse de Soleil du 12 octobre 1996 (miroir tenu à la main, projection contre un mur).

Je n'ai pas expérimenté les autres développements proposés. Au travail donc, et merci à ceux qui me communiqueront leurs résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- «*Encyclopédie pratique de la photo*» : Alpha Édition, Paris, deuxième trimestre 1979, ISBN 2-8270-0268-X ; voir l'entrée «chambre noire à sténopé», volume 1, pages 284 et suivantes.
- «Pour la science» : Expériences d'amateur de Jean WALKER, numéro de mars 1983, «Les délices de l'appareil photographique à sténopé et de l'appareil à tache noire».

Annexe 1

Diamètre optimum du sténopé

Évaluation du diamètre Δ de la tache image d'un point objet proche de l'axe : on se placera d'abord dans la condition où l'optique géométrique est applicable, puis dans la condition où les phénomènes de diffraction de Fraunhofer sont prépondérants.

1. Le sténopé présente un diamètre D suffisamment grand pour que l'optique géométrique soit applicable :

$$\Delta_{\text{géométrique}} \cong D \frac{p+f}{p}$$

2. Le diamètre D est suffisamment petit pour que la tache de diffraction obtenue sur l'écran soit assimilée à une tache de diffraction de Fraunhofer :

pour une longueur d'onde λ dans l'air, $\Delta_{\text{diffraction}} \cong \frac{\lambda}{D} f$.

Ces deux diamètres évoluent en sens inverse l'un de l'autre quand D varie. On obtient une bonne estimation du diamètre optimum D_0 en posant que le meilleur compromis est obtenu quand ces deux diamètres sont égaux : $\Delta_{\text{géométrique}} = \Delta_{\text{diffraction}}$, ce qui peut s'écrire :

$$D_0 \frac{p+f}{p} \approx \frac{\lambda}{D_0} f$$

ce qui donne :

$$D_0 \approx \sqrt{\lambda \frac{pf}{p+f}}$$

et, pour un objet à l'infini (cas du Soleil) avec $p \gg f$: alors $D_0 \approx \sqrt{\lambda f}$.

Pour une longueur d'onde $\lambda = 600 \text{ nm}$ (milieu du spectre visible du Soleil)
 $D_0 \approx 0,024 \text{ mm}^{1/2} \sqrt{f}$.

Annexe 2

Résolution angulaire d'une chambre noire à sténopé

Si on utilise un sténopé de diamètre optimum D_0 , la tache de diffraction est de dimension comparable à celle considérée en optique géométrique. On peut raisonner en optique géométrique tant que les phénomènes de diffraction conduisent à une tache de diffraction plus petite que celle considérée en optique géométrique.

Le calcul suivant, conduit en optique géométrique, sous la condition $D \geq D_0$, donnera donc une estimation approchée de la résolution angulaire d'une chambre noire, pour deux points objets A et B proches de l'axe optique.

On considérera que deux taches images (comme A' et B', figure 4) peuvent être distinguées si elles sont au plus tangentes.

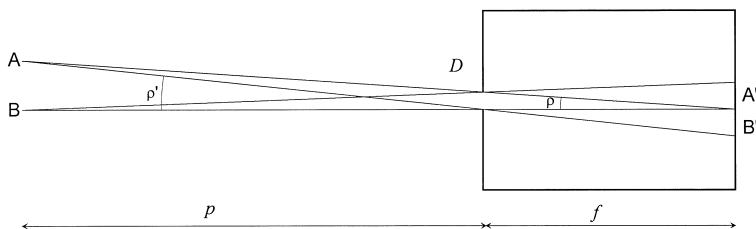


Figure 4

La limite de résolution angulaire ρ de la chambre est égale à la distance angulaire entre deux points objet qui forment des taches image tangentes.

Soit ρ l'angle sous lequel le sténopé est vu depuis le fond de la chambre, au point de tangence entre les taches images A' et B' :

$$\rho \text{ rad} \approx \text{tg } \rho \approx \frac{d(AB)}{p + f} = \frac{D}{f}$$

d'où il vient :

$$d(AB) = \frac{D(f + p)}{f}$$

La résolution angulaire de la chambre ρ' est l'angle sous lequel les deux points objets A et B sont vus depuis le centre du sténopé ; cet angle est petit :

$$\rho' \text{ (rad)} \approx \text{tg } \rho' \approx \frac{d(\text{AB})}{p}$$

on remplace $d(\text{AB})$ par l'expression précédente :

$$\rho' \text{ (rad)} \approx \frac{d(\text{AB})}{p} = \frac{D(f+p)}{p f}$$

Dès que $p \gg f$, on peut écrire :

$$\rho' \text{ rad} \approx \frac{D(f+p)}{p f} \approx \frac{D p}{p f} = \frac{D}{f} \approx \rho \text{ rad}$$

Pour un objet suffisamment lointain ($p \gg f$) on peut remplacer ρ' par ρ et poser :

$$\rho' \text{ rad} \approx \rho \text{ rad} = \frac{D}{f}$$

Pour un objet à l'infini ($p \gg f$) et avec un sténopé d'un diamètre suffisant ($D \geq D_0$), la résolution angulaire de la chambre noire est égale à l'angle sous lequel le sténopé est vu depuis le fond de la chambre noire depuis un point proche de l'intersection de ce fond avec l'axe optique du montage.