ARTICLE DE FOND

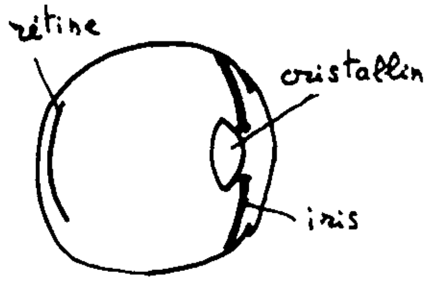
Quelques notions d'optique
utiles pour la photo et l'astro

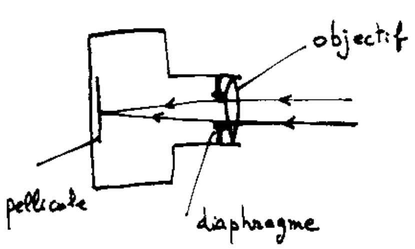
Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Georges Paturel nous explique ici le principe de l'appareil photo (en rappelant les notions d'optique sous-jacentes) et son utilisation en astronomie.
Comme d'habitude, il a agrémenté son exposé de dessins parfaitement limpides.
Cet article est utile pour les débutants et pour les enseignants chargés de les former.

Principe de l'appareil photo

Un appareil photographique est semblable à un oeil car il est constitué des mêmes éléments principaux : la pellicule joue le rôle de la rétine ; l'objectif joue le rôle du cristallin et le diaphragme joue le rôle de l'iris. Les dessins ci-après seront plus clairs qu'un long discours :

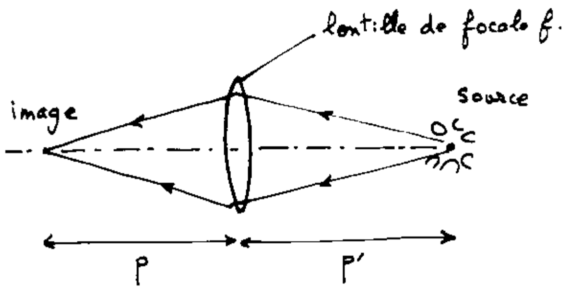


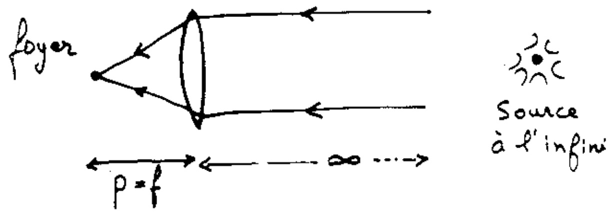


A quelle distance de la pellicule doit se trouver l'objectif ? Vous pouvez répondre que c'est le constructeur qui doit le savoir. Certes ! mais nous allons voir qu'il peut être utile pour nous de le savoir.

La relation liant la distance d'un objet et de son image donnée par une lentille convergente (comme un objectif d'appareil photo) est la suivante :

$$1 / p + 1 / p' = 1 / f$$





f est la distance focale (ou focale tout court) de la lentille. C'est une valeur fixée par construction. Pour déterminer cette distance focale rien de plus simple : Vous prenez la lentille, vous la placez perpendiculairement aux rayons du Soleil et vous mesurez à quelle distance se forme l'image bien nette du Soleil. Cette distance est la distance focale. La raison est évidente : le Soleil est très loin, donc p' est très très grand, ce qui signifie que 1 / p' est tout petit petit ... donc 1 / p = 1 / f ou, dit autrement : p = f.

Si l'objet à photographier est proche (p' pas trop grand) la relation générale nous montre que p (distance entre l'objectif et la pellicule) n'est pas égale à f. Calculons les valeurs extrêmes de p pour un appareil photo équipé d'un objectif de distance focale f = 50 mm (c'est la valeur standard la plus courante) :

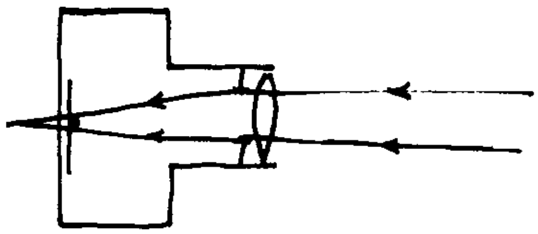
objet très lointain : si p' = infini (ou presque) alors p = 50 mm
objet intermédiaire : si p' = 5 000 mm (5 m) alors p = 51 mm
objet très proche : si p' = 500 mm (50 cm) alors p = 55 mm.

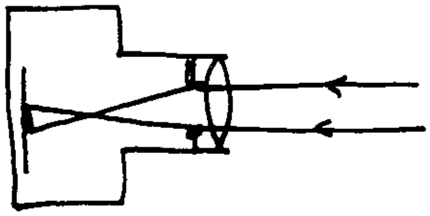
Le déplacement que doit subir l'objectif pour ajuster la mise au point entre un objet à l'infini et un objet très proche n'est que de 5 millimètres. Etonnant, non ?! C'est si peu que certains appareils bon marché n'ont pas de réglage du tout. L'objectif est mis dans une position intermédiaire et ça marche (sous certaines conditions que nous allons préciser plus loin).

Si votre appareil comporte un réglage de la distance, essayez. Tournez la bague de mise au point vous pourrez voir l'objectif avancer ou reculer de quelques millimètres.

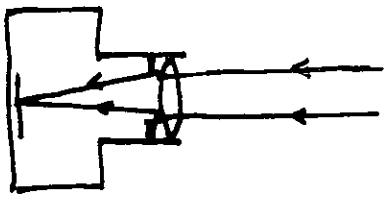
Mise au point et ouverture

Que se passe-t-il si la mise aupoint n'est pas bien faite? L'image d'un point lumineux se formera devant ou derrière la pellicule de sorte que, sur la pellicule elle-même nous aurons une tache et non un point. Le dessin suivant illustre cette évidence :



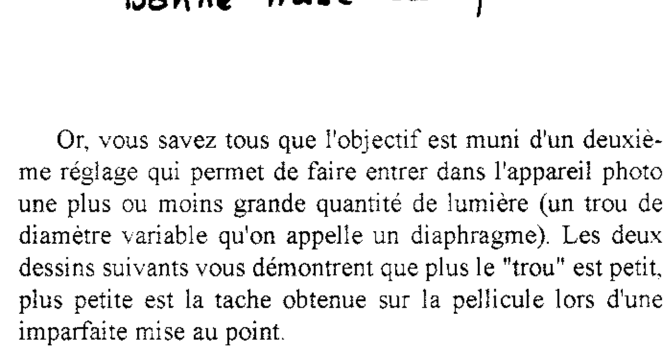


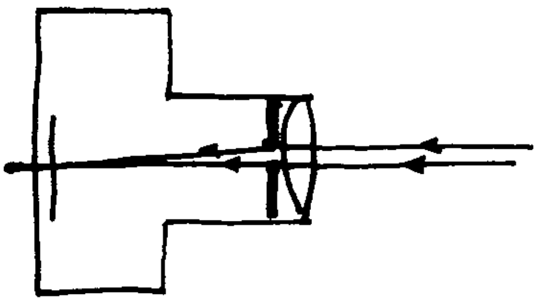
mauvaises mises au point



bonne mise au point

Or, vous savez tous que l'objectif est muni d'un deuxième réglage qui permet de faire entrer dans l'appareil photo une plus ou moins grande quantité de lumière (un trou de diamètre variable qu'on appelle un diaphragme). Les deux dessins suivants vous démontrent que plus le "trou" est petit, plus petite est la tache obtenue sur la pellicule lors d'une imparfaite mise au point.





Un petit diaphragme améliore la netteté

Mise au point à pleine ouverture.

Pour faire une mise au point parfaite la méthode se déduit aisément de nos propos précédents :

1) On choisit le plus grand diaphragme.

2) On fait la mise au point aussi bien que possible (ce sera très facile de juger puisque le plus petit décalage donnera une image.

3) On referme le diaphragme à sa valeur correcte.

Cette technique, appelée "*mise au point à pleine ouverture*", peut être utilisée également avec un agrandisseur.

La profondeur de champ.

Pour une mise au point donnée (p fixé) seuls les points à la distance p' sont nets (en toute rigueur). Evidemment les points voisins auront une netteté acceptable. Autrement dit, il y aura un domaine pour lequel les images seront nettes. Ce domaine s'appelle la profondeur de champ. Avec un petit diaphragme la profondeur de champ est plus grande. A pleine ouverture, au contraire seuls les objets à la distance p' seront nets.

Cette caractéristique est mise à profit pour réaliser de beaux portraits: on fait une mise au point précise sur le visage à photographier et on prend la photo avec une grande ouverture (au besoin on augmente la vitesse de prise de vue pour avoir une exposition correcte). Le visage de l'être cher se détache alors sur un fond flou.

Les différentes ouvertures d'un appareil photo.

Regardez les valeurs des ouvertures inscrites sur l'objectif de votre appareil. Vous verrez des nombres : 2,8 ; 4,0 ; 5,6 ; 8,0 ; 11 ; 16 signifiant que selon la position de la molette l'ouverture est dite à f / 2,8 ; f / 4,0 ; f / 5,6 etc ... .

L'origine de ces nombres mystérieux est facile à comprendre. Là encore nous allons raisonner sur un exemple, c'est bien plus facile. Je considère mon appareil photo. L'ouverture maximum est f / 2,8 et sa focale est de 35 mm (ces renseignements sont marqués sur la partie frontale de tous les objectifs qui se respectent). Je déduis que le diamètre maximum du diaphragme est de 12,5 mm (puisque 35 / 2,8 = 12,5). L'ouverture immédiatement inférieure est 4,0 ; ceci correspond à un diaphragme de 8,75 mm (puisque 35 / 4 = 8,75).

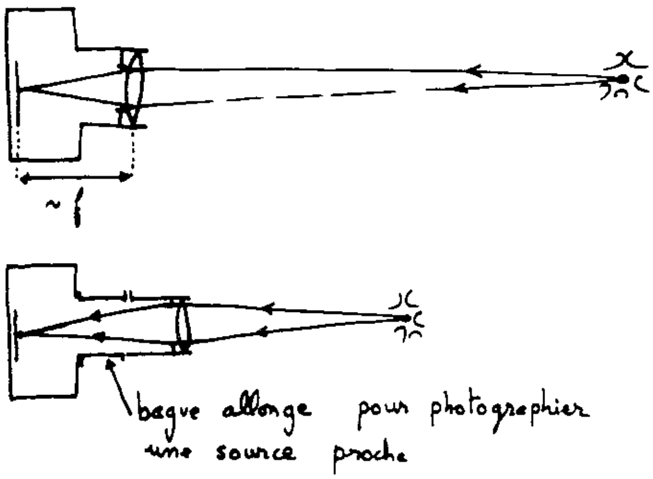
D'une ouverture à l'autre le diamètre du diaphragme a diminué de 12,5 / 8,75 = 1,4 ; c'est à dire racine de deux. la surface du diaphragme a donc été réduite d'un facteur 2 exactement. On trouve la relation simple : d'une ouverture à l'ouverture inférieure suivante la surface du diaphragme est divisée par deux (il entrera deux fois moins de lumière pour une même vitesse de prise de vue).

Photo rapprochée

Dans les conditions normales de prise de vue, le sujet à photographier est plus éloigné de l'objectif que ne l'est la pellicule. Par exemple le sujet est situé à quelques mètres alors que, nous l'avons vu, la pellicule est à quelques centimètres de l'objectif (5 centimètres pour un objectif de longueur focale 50 mm).

Les bagues allonges.

Que se passe-t-il quand on approche l'appareil photo du sujet à photographier ? L'objectif doit être "tiré". Ce tirage est prévu par le constructeur pour permettre la mise au point jusqu'à un minimum de 50 cm environ (c'est le calcul fait au début). Que faire pour pouvoir se rapprocher encore plus du sujet à photographier ? La réponse est simple: il faut poursuivre le tirage de l'objectif au-delà de ce que le constructeur a prévu. Cela se réalise facilement en interposant entre le boîtier de l'appareil photo et l'objectif un tube vide. Ce tube se comporte comme une rallonge munie de bagues de fixation (une pour fixer l'objectif sur le tube et une pour fixer le tube sur le boîtier) ; pour cette raison on l'appelle une bague allonge. Ces bagues allonge existent en plusieurs longueurs 5 mm, 10 mm, 20 mm. La bague de 5 mm est peu utile puisque nous avons vu que le réglage autorisé par l'objectif seul permet un tirage de l'ordre de 4 à 5 mm. Un choix astucieux est de prendre 3 bagues de longueur respectives: 10, 20 et 20 mm. En les combinant on peut obtenir les allonges 10, 20, 30, 40 et 50 mm.



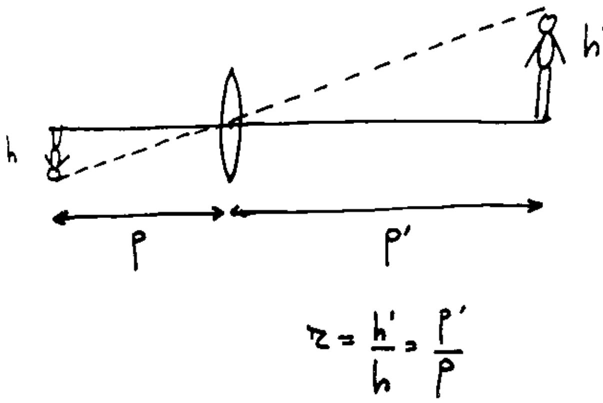
Longueur du tirage.

Mais, me direz-vous, quelle longueur de tirage doit-on utiliser ?

Evidemment cela va dépendre du but recherché. Prenons quelques exemples classiques. Si vous voulez reproduire la page d'un petit livre. Il ne faudra surtout pas la photographier en vous plaçant à 5 mètres du livre. Sur la pellicule la page apparaîtrait toute petite et elle serait entourée d'un grand bord inutile. Il faut vous approcher suffisamment pour que la page couvre toute la pellicule. Avec une bague de 10 mm on peut photographier à peu près la taille d'une carte postale. Si vous voulez reproduire un timbre-poste vous devrez utiliser un tirage plus important (40 ou 50 mm d'allonge). Reprenons notre formule du début :

$$1 / p + 1 / p' = 1 / f$$

Le petit dessin ci-dessous et le souvenir des triangles semblables (ou homothétiques pour prendre un langage plus moderne) vous montrent que le rapport de la taille de l'image d'un objet sur celle de l'objet lui-même est égal à $r = p' / p$. C'est ce rapport qui est connu au départ.



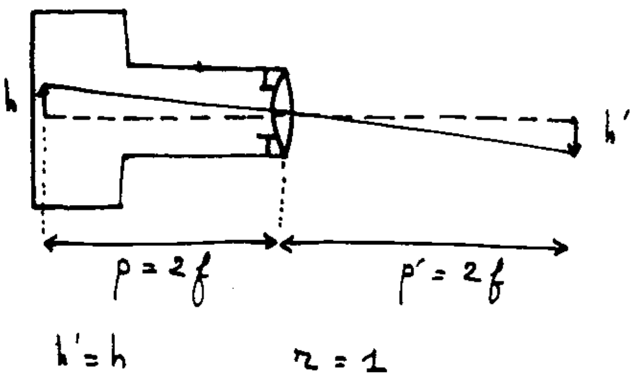
Si vous utilisez un tirage de longueur t et si votre objectif de focale f est réglé sur l'infini, vous verrez aisément que $p' = t + f$. On peut avec un peu de mathématique élémentaire trouver la relation simplissime :

$$t = r . f$$

Revenons à nos deux exemples.

J'ai une carte postale de format 10 x 15 cm. Je veux qu'elle couvre toute la pellicule de format 24 x 36 mm. Le rapport r sera donc $r = 36 / 150$ ou $r = 24 / 100$ c'est à dire $r = 0{,}24$. Avec un objectif de focale $f = 50$ mm on devra utiliser une bague allonge de $t = 0{,}24 \times 50$ soit 12 mm. Dans la pratique on prendra une bague de 10 mm et on peaufinera le réglage avec la mise au point de l'objectif

J'ai maintenant un timbre-poste de format 24 x 36 mm (quelle chance !) et je veux le voir en entier sur la pellicule de même format. On a alors $r = 1$ et donc $t = 50$ mm. C'est le montage dit 2f - 2f car il y a une longueur 2f entre le sujet et l'objectif et une longueur 2f entre l'objectif et la pellicule.



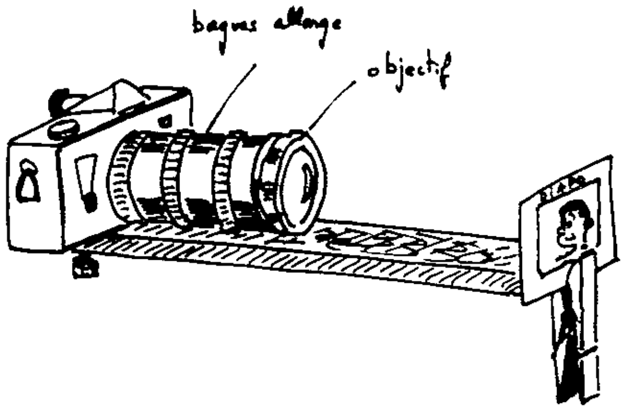
Choix de l'objectif.

Dans les conditions normales de prise de vue, le faisceau venant de l'objet est plus fermé que le faisceau allant à la pellicule ; les objectifs courants sont prévus pour travailler dans ces conditions là : grande ouverture sur l'arrière de l'objectif et faible ouverture sur l'avant.

Plus on s'approche de l'objet à photographier plus le faisceau avant s'ouvre et, conjointement, plus le faisceau arrière se ferme (car l'objectif est de plus en plus tiré). Autrement dit, on s'écarte progressivement des conditions optimales prévues par le constructeur et cela bien sûr, au détriment de la qualité. La seule solution raisonnable est d'acheter un objectif "macro" donnant de bonnes images dans ces conditions exceptionnelles. Disons toutefois qu'un objectif normal donne encore un résultat acceptable. Cependant quand on atteint le montage 2f - 2f vu précédemment, les faisceaux avant et arrière ont la même ouverture. C'est la limite extrême au-delà de laquelle l'objectif travaille dans les conditions inverses de celles pour lesquelles il avait été prévu. On entre dans le domaine de la macro-photo. Si on veut garder l'objectif normal on a alors avantage à le retourner sur lui-même pour retrouver de bonnes conditions. Les constructeurs vendent des bagues de retournement. Mais redisons le, la bonne solution est un objectif adapté.

Un cas important : la reproduction de diapositives.

Les principes sont les mêmes. On est dans le cas simple où le rapport image / objet vaut $r = 1$. Le tirage sera égal à la focale de l'objectif : c'est le montage 2f - 2f, rien de neuf ! Le seul changement concerne l'éclairage. La solution la plus pratique est d'utiliser l'éclairage solaire. On peut fabriquer un banc optique comme celui de la figure de la page suivante. Cela vous demandera trois minutes de travail et vous obtiendrez un appareil d'un excellent rapport qualité / prix.



L'utilisation est des plus simples : insérer la diapo à reproduire dans la pince à linge, ajuster le diaphragme pour une région du ciel bien uniformément éclairée et appuyer sur le déclencheur. Si vous bougez, la photo sera nette quand même : génial ! non ?

Utilisation d'un appareil photo en astronomie

Si vous enlevez l'objectif de votre appareil photo et que vous l'adaptez à la place de l'oculaire de la grande lunette de l'observatoire de Meudon, vous aurez un magnifique télé-objectif. En effet, lunettes astronomiques et télescopes constituent des objectifs de grande longueur focale, simplement. Il n'y a pas de différence fondamentale entre l'objectif de votre appareil photo et la grande lunette de l'observatoire de Meudon, (cf. figure ci-contre) mais...

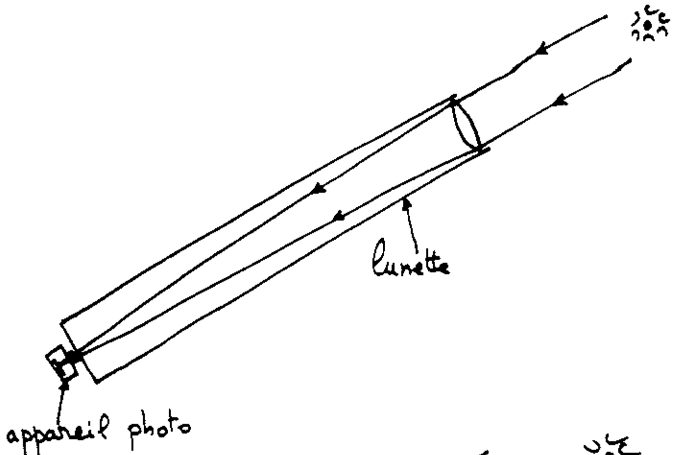
Ouverture d'un télescope.

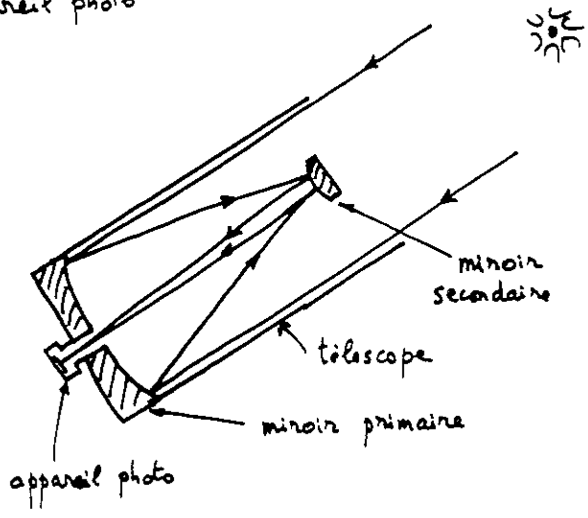
La plus grosse différence vient de ce qu'une lunette astronomique ou un télescope ne sont pas équipés de diaphragme variable. En effet, les astronomes cherchent à collecter la lumière avec une surface réceptrice maximum pour voir les objets les plus faibles. Il n'y a bien que la photo du Soleil ou de la Lune qui peuvent nécessiter une réduction de la surface collectrice de lumière.

De ce fait les télescopes ont une ouverture fixe. Prenons l'exemple du gros télescope de Saint-Genis Laval: son miroir a un diamètre D = 1 mètre et sa longueur focale est de 8 mètres (ceci signifie qu'il est équivalent pour notre appareil photo à une lentille f = 8000 mm). Son ouverture est de 1000 / 8000. Il est ouvert à f / 8. Cette comparaison vous montre qu'un télescope classique (celui de Saint-Genis Laval en est un) n'est pas très ouvert malgré son énorme miroir.

Echelle du cliché astronomique.

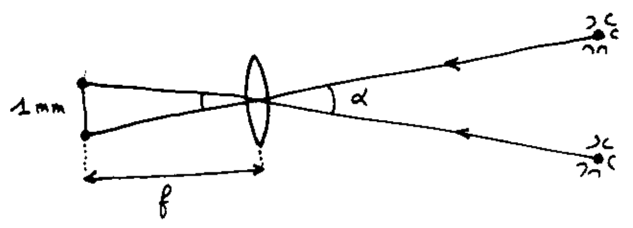
Quand un astronome fait une photo du ciel il détermine une caractéristique essentielle de son cliché: l'échelle. Cette





échelle lui permettra de calculer l'angle de séparation entre deux étoiles en mesurant la distance séparant leurs images sur le cliché. L'échelle s'exprime en secondes d'arc par millimètre (" / mm en abrégé). Par exemple, si l'échelle du cliché est de 1 " / mm cela signifie que deux points séparés par un millimètre sur le cliché correspondent à deux points du ciel séparés par une seconde d'arc (1 / 3600^e de degré). Calculons l'échelle obtenue au foyer d'un télescope d'amateur : supposons un miroir de 20 cm de diamètre ouvert à f / 10. On calcule la longueur focale aisément: f = 10 × 20 = 200 cm.

L'échelle se déduit en considérant le schéma ci-dessous; deux points séparés de 1 mm au foyer (c'est à dire sur le film) correspondent à un angle α tel que :



$$\mathbf{tg}\ \alpha = 1 / f \text{ soit } \alpha = \mathbf{tg}^{-1} (1 / f)$$

f étant exprimé en millimètres. La valeur de α convertie en secondes d'arc mesure l'échelle cherchée d'après la définition même. Si vous faites le calcul avec une calculette de poche la valeur de α sera obtenue en degrés, d'où :

$$\text{échelle ('' / mm)} = 3600\,\alpha \quad (\alpha \text{ en degrés})$$

On trouve pour notre télescope d'amateur :

$$\alpha = tg^{-1}(1 / 2000) = 0{,}0286 \text{ degrés}$$

d'où l'échelle = 103 " / mm

A titre d'exercice vous pourrez vous amuser à calculer que la Lune qui a un diamètre apparent d'un demi degré, photographiée avec un appareil classique muni d'un objectif de 50 mm de focale, aura une dimension de 0,4 mm sur le film. C'est bien peu pour voir des détails.

Champ d'un télescope ou d'une lunette.

Une dernière notion capitale est celle de champ. Elle est très simple. Le champ est la surface angulaire que peut voir l'instrument. Ainsi, notre télescope d'amateur vu précédemment aurait un champ de 103 secondes d'arc si le film ne couvrait qu'un petit cercle de 1 mm. Avec un film de 24 mm de large (cas où on utilise un film 24 x 36) le champ serait 24 fois plus large, c'est à dire: 24 x 103 = 2475 secondes d'arc (2475" en abrégé) c'est à dire encore 0,68 degrés.

Autrement dit, la Lune avec son demi-degré de diamètre, tiendra juste sur la largeur de notre cliché.

NDLR : on pourra relire l'article de Christian Larcher "Initiation aux instruments d'astronomie" (CC 83 ; automne 1998).

■