ACCUEIL

Frédéric Elie on ResearchGate

Chambre noire et photographie

Frédéric Élie

mai 2004

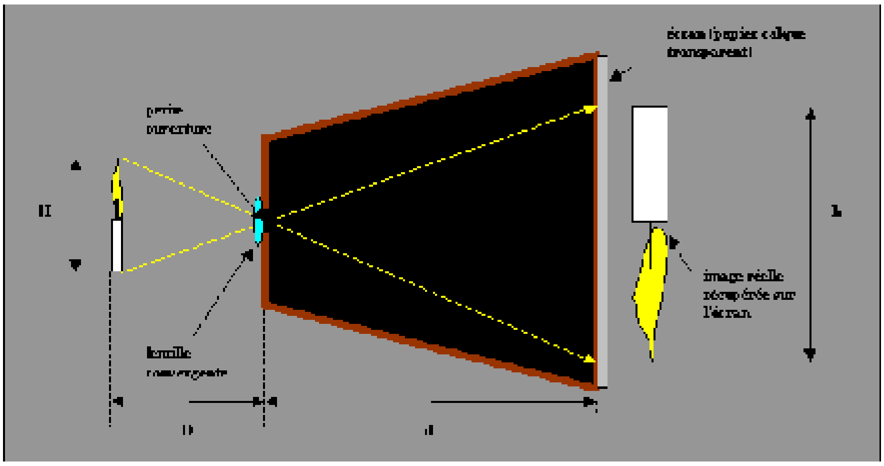
« Si vous de dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Dans cet article l'expérience bien connue de la chambre noire, ou sténopé, est abordée. On va voir que le résultat est une conséquence des lois de l'optique géométrique. Mais les conditions pour obtenir une image nette au fond de la boîte font déjà appel à l'optique ondulatoire, et plus précisément aux phénomènes de diffraction...

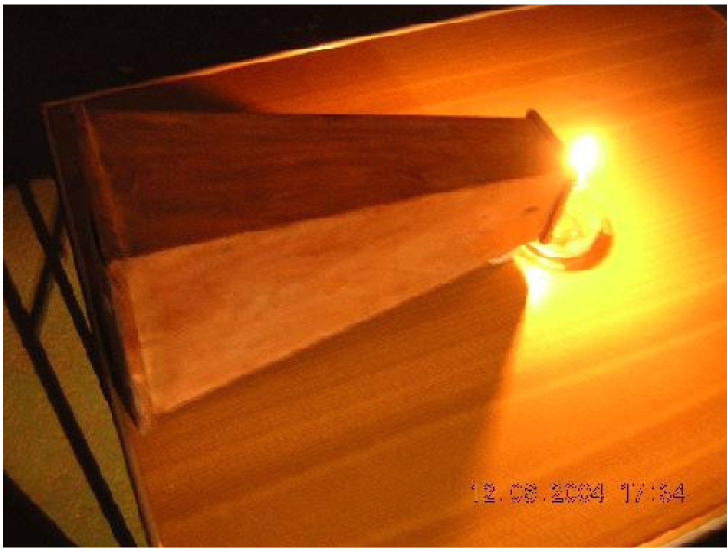
SOMMAIRE

1 - Présentation de l'expérience

Le but de l'expérience est d'obtenir l'image réelle d'un objet à l'intérieur d'une boîte obscure, projetée sur un support translucide tel une feuille calque par exemple, au moyen d'un petit trou aménagé dans la boîte. La construction de la chambre noire ne pose aucun problème (voir schéma). Je l'ai choisie de forme évasée vers l'arrière de façon à permettre aux rayons lumineux issus de l'objet de se propager le plus librement possible, sans rencontrer de paroi, pour donner une image de taille suffisante. A l'avant un trou circulaire de 1mm de diamètre est fermé par une petite lentille convergente. L'intérieur de la chambre a été peinte en noire pour parer à tout phénomène de réflexion ou de diffusion. Sur la face ouverte à l'arrière une feuille de papier calque transparent est collée et joue le rôle d'écran.



On observe sur l'écran une image assez peu lumineuse de l'objet, inversée, et qui peut avoir des dimensions plus grandes que l'objet source selon la distance qui sépare celui-ci de l'ouverture et selon également la profondeur de la chambre.
J'ai utilisé comme source lumineuse une bougie. Il faut veiller à minimiser la lumière ambiante car, l'image étant plus terne que l'originale, on ne la verrait pratiquement plus en pleine lumière (contraste très faible). La chambre noire et l'image obtenue sont représentées sur les photos suivantes.



Dispositif de la chambre noir avec la bougie allumée à son ouverture

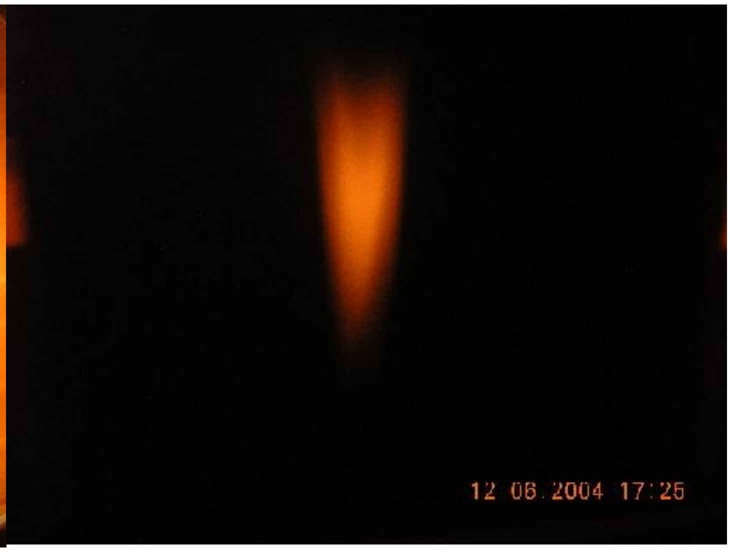
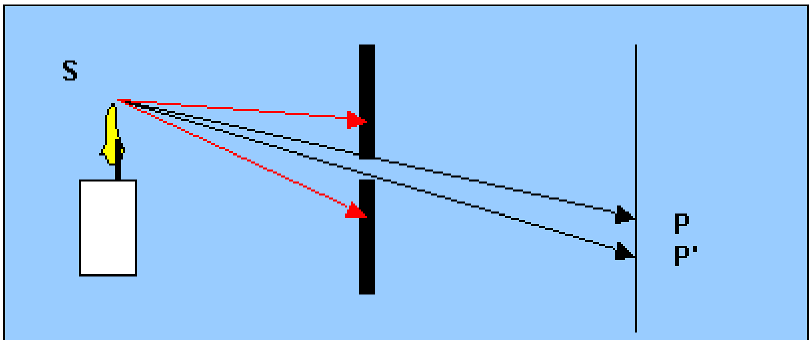


Image réelle de la flamme sur l'écran formé du papier calque transparent

2 - Que s'est-il passé?

2-1 - Pourquoi obtient-on une image inversée?

C'est une conséquence du principe fondamental de l'optique géométrique, ou ***principe de Fermat***, appliqué à un trajet lumineux passant par un petit trou et dans un milieu d'indice de réfraction uniforme. Reportons-nous au schéma ci-dessus. Le principe de Fermat énonce que la lumière suit le plus court chemin. Dans un milieu homogène, tel que l'air situé dans et hors de la chambre noire, les rayons lumineux issus d'un point quelconque de l'objet source parcourent donc une droite. Une très petite portion de surface quelconque donnée de l'objet se comporte comme une source de lumière, qu'elle soit intrinsèque (comme la flamme) ou non (comme le corps de la bougie). Dans l'approximation de l'optique géométrique, on peut assimiler cette portion à une source ponctuelle. De ce point partent une infinité de rayons lumineux rectilignes dans toutes les directions de l'espace. Mais, en vertu du principe de Fermat, ne passeront par le trou que les rayons lumineux regroupés en un faisceau très fin issus d'un même point de l'objet, l'enveloppe de ce faisceau allant s'élargissant du point source et s'appuyant sur le contour du trou au niveau de l'ouverture. Comme l'ouverture est supposée suffisamment étroite le pinceau lumineux donnera du point source une image elle aussi ponctuelle en première approximation. Poursuivant un trajet rectiligne depuis l'objet jusqu'à l'écran, tous les pinceaux issus de chaque point de l'objet se croisent à l'ouverture et il en résulte que ceux qui partent du sommet de la bougie arrivent en bas de l'écran et que ceux qui partent du pied de la bougie arrivent en haut de ce même écran: l'image de toutes les sources ponctuelles de l'objet, elle-même constituée d'images élémentaires quasi ponctuelles à cause des faibles dimensions de l'ouverture, reproduit de ce fait l'apparence de l'objet mais de manière inversée.



pour une ouverture suffisamment étroite les rayons issus de S donneront de lui sur l'écran une image PP' encore quasi ponctuelle. Dans ces conditions on aura une image nette de la bougie

Conclusion: plus l'ouverture de la chambre noire est petite plus l'image obtenue sur l'écran est nette. Mais l'écran ne doit pas être trop éloigné du diaphragme, sinon dans le cas contraire les points PP' issus d'une même source ponctuelle S sont d'autant plus écartés que la distance écran-diaphragme est grande.

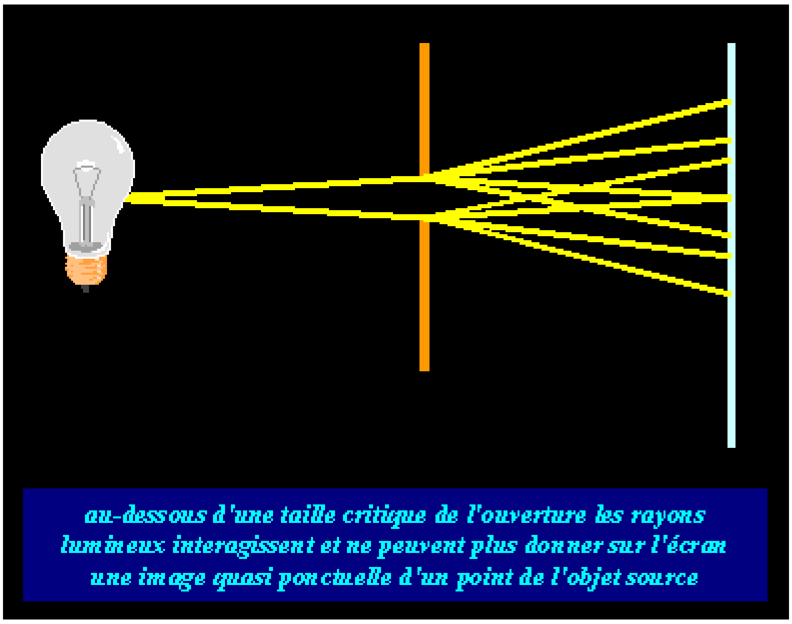
2-2 - Pourquoi obtient-on une image peu lumineuse?

C'est évidemment à cause de la faible taille de l'ouverture. Celle-ci ne laisse passer qu'un nombre très restreint de faisceaux lumineux issus de chaque point de l'objet par rapport au très grand nombre qui partent de l'objet dans toutes les directions de l'espace. Par conséquent une très faible proportion de lumière sera transmise par l'ouverture. On démontre en photométrie que l'intensité lumineuse reçue sur l'écran est proportionnelle à la surface de l'ouverture et inversement proportionnelle au carré de la distance. Il en découle que l'on obtient une image faiblement lumineuse avec des petites ouvertures et des éloignements de la source et/ou de l'écran importants.
On voit ainsi apparaître une sorte d'incompatibilité entre l'exigence de netteté de l'image et sa luminosité au niveau de l'emploi de l'ouverture (on dit encore pupille).

2-3 - Pourquoi obtient-on une image peu nette?

On vient de voir une des raisons précédemment: une ouverture trop importante est responsable du fait que l'image obtenue d'une zone quasi-ponctuelle de la source est plus étalée. C'est une conséquence du principe de Fermat lorsque le milieu de propagation est identique entre la source et l'écran (même indice de réfraction). Pour améliorer la netteté il faut donc intercaler un milieu d'indice de réfraction différent et qui permette à deux rayons divergents issus d'un même point source de se rencontrer en un même point de l'écran récepteur. Autrement dit il faut intercaler une lentille, et la distance qui la sépare de l'écran doit pouvoir varier en fonction de l'éloignement de l'objet de façon à obtenir une image aussi nette que possible. Ou bien il faut pouvoir adapter la distance focale de la lentille pour cela. Comme cette opération n'est pas possible avec une seule lentille il faut utiliser plusieurs lentilles entre lesquelles la distance peut bouger et conduire à une focale équivalente qui réponde au besoin ([1]). On a ainsi défini un objectif photographique.

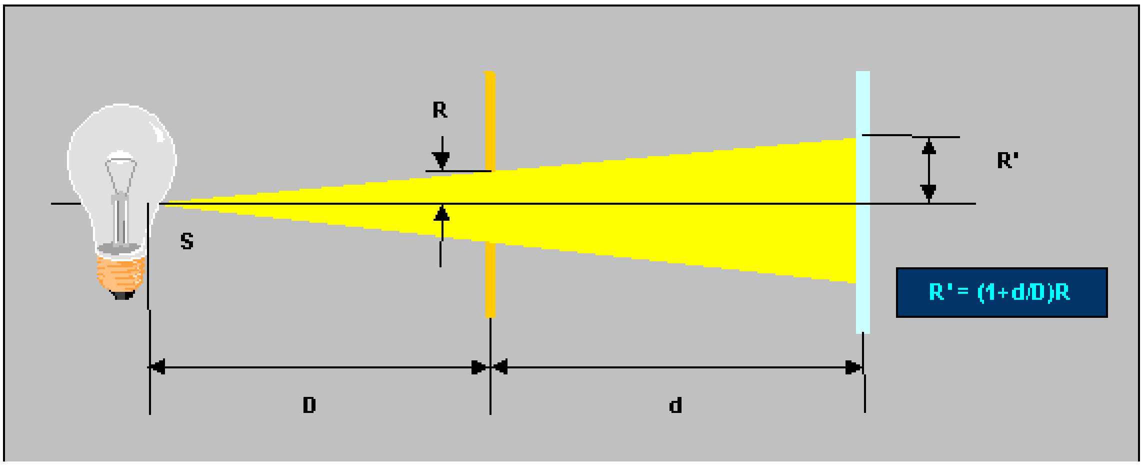
Une autre raison du défaut de netteté provient, à l'inverse, d'un diamètre d'ouverture trop petit. En effet, au-dessous d'une dimension limite les phénomènes de diffraction deviennent prédominants et l'approximation de l'optique géométrique n'est plus valable. La nature ondulatoire de la lumière doit alors être prise en compte. Dit de manière très simplifiée, lorsque les obstacles ou les ouvertures rencontrés par les rayons lumineux ont des dimensions caractéristiques du même ordre de grandeur que leurs longueurs d'onde, chaque point de ces obstacles ou ouvertures deviennent à leur tour des sources lumineuses secondaires qui vont interagir entre elles par phénomène d'interférence. Il s'ensuit que les faisceaux lumineux qui traversent ces irrégularités ne peuvent plus être considérés comme des faisceaux fins: ils donnent sur un écran des taches de diffraction responsables de la perte de netteté de l'image de l'objet.



Voir la notion de diffraction de la lumière. La netteté de l'image, caractérisée par le pouvoir de résolution c'est-à-dire l'écart le plus faible entre deux points de l'image, est liée au diamètre de l'ouverture. Pour être distingués, deux points voisins de l'objet source doivent avoir leurs images séparées d'une distance au moins égale à celle qui sépare leurs taches de diffraction respectives. On obtient alors une condition sur le diamètre de l'ouverture pour satisfaire ce critère de netteté. Voyons cela de manière quantitative.
Désignons par D la distance entre l'objet et l'ouverture du sténopé, d celle entre cette dernière et l'écran, R le rayon de l'ouverture supposée circulaire, λ la longueur d'onde moyenne de la lumière émise. En l'absence de diffraction, chaque rayon lumineux suit une trajectoire rectiligne: le rayon R' de la tache de lumière sur l'écran issue du point S de la source est donc tel que (***théorème de Thalès***):

$$R/d = R'/(D+d) \rightarrow \text{d'où: } R' = (1 + d/D)R \qquad (1)$$

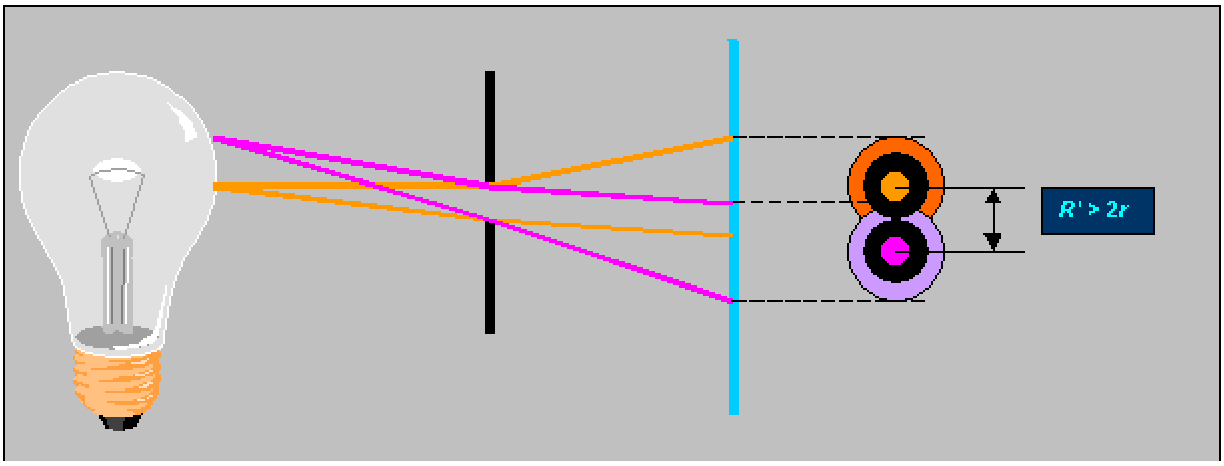
1 Pour l'œil humain il n'y a qu'une seule lentille (le cristallin) et la modification de la distance focale pour obtenir sur la rétine une image nette d'un objet plus ou moins éloigné, consiste à agir au moyen de muscles sur le rayon de courbure du cristallin: c'est l'accommodation.



La relation (1) montre que, lorsque l'objet est situé à l'infini (d << D), le rayon de la tache est égal au rayon de l'ouverture: tout le monde a pu constater en effet qu'un rai de lumière passant par un trou projette sur le mur d'en face une tache de même taille que ce trou! Que se passe-t-il maintenant en présence de diffraction ? On sait que le rayon de la tache principale de diffraction due à une ouverture circulaire, pour une longueur d'onde donnée, est par la ***relation de Rayleigh***:

$$r = 0{,}61\ \lambda\ d/R \qquad (2)$$

Le critère de netteté est que deux points sources peuvent être vus séparés si leurs taches de diffraction sont séparées d'une distance au moins égale à leurs rayons (voir figure ci-après).



La recherche d'une bonne résolution implique que r soit inférieure à une valeur maximale. Celle-ci n'est autre que le rayon de la tache de lumière sans diffraction donné par (1); on doit donc choisir R tel que $r \leq R'$ ce qui avec (1) et (2) donne la condition sur l'ouverture pour avoir la meilleure netteté:

$$R = [0{,}61\lambda\ d/(1 + d/D)]^{1/2} \qquad (3)$$

(ou encore $R = r/(1 + d/D)$ compte tenu de (2))

qui, pour une source à l'infini, devient:

$$R = (0{,}61\lambda\ d)^{1/2} \qquad (4)$$

Le critère de netteté dépend de la couleur observée (longueur d'onde). En lumière blanche la longueur d'onde moyenne est d'environ 0,5 µm. Avec une chambre noire de profondeur d = 500mm (comme celle que j'ai faite), la relation (4) donne un trou de diamètre 0,8 mm.

3 - Remarque: quelques considérations d'optique photographique

3-1 - Présentation

La condition de netteté (3) met en jeu un triplet de paramètres que l'on peut ajuster corrélativement: R, d, D. Un objet situé à la distance D aura une image nette si R et d sont ajustés selon (3) ou (4) à l'infini. Pour des distances qui tendent vers 0 (objet très près de la pupille) on doit avoir $R^2/d << 1$, condition toujours réalisée en pratique (la profondeur de la chambre est très grande devant le diamètre du trou). Il en résulte que dès lors que le réglage à l'infini (4) est assuré toute distance de l'objet observé permet d'avoir une image nette. On dit que la profondeur de champ est infinie dans le cas du sténopé dont la netteté est réglée sur l'infini.

Il en va tout autrement lors de l'emploi d'un objectif à la place d'un simple trou. Si f est la distance focale image de la lentille équivalente de l'objectif, et dans l'hypothèse où le point focal est situé sur l'écran pour avoir une image nette (donc d = f), on *n'a pas le droit* d'utiliser la relation (3) en remplaçant d par f:

$$R = r/(1 + f/D)$$

parce qu'il faut tenir compte de la modification des trajets lumineux à la traversée de l'objectif et du fait que ces trajets dépendent alors de la distance, de l'ouverture de la pupille et de la focale. Ces deux derniers paramètres interviennent, comme on va le voir, sous la forme d'une quantité appelée "ouverture relative de l'appareil" définie par 1/N telle que

$$N = f/2R \qquad (5)$$

N est indiqué sur l'objectif de l'appareil photographique: à focale f donnée, plus N est faible plus l'ouverture de la pupille 2R est grande. On dit que l'appareil travaille à f/N: par exemple, si une notice indique f:4 cela signifie un diamètre d'ouverture égal à 2R = f/4, la connaissance de la focale permet alors de le déterminer et d'évaluer par conséquent les conditions d'éclairement de l'émulsion photographique (film) ou du capteur (en photo numérique), et par suite la vitesse d'obturation.

Ces quelques notions vont être présentées sommairement, ainsi que les conditions de netteté qui les mettent en jeu, introduisant des grandeurs comme la profondeur de champ, l'hyperfocale, le champ angulaire...

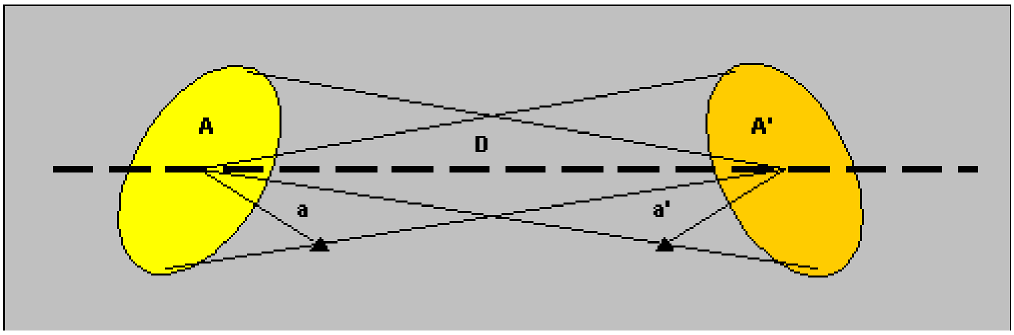
3-2 - Ouverture relative, éclairement et vitesse d'obturation

Le diamètre de l'ouverture 2R, donc l'ouverture relative 1/N, conditionne l'éclairement E sur une surface, qui est par définition le rapport du flux lumineux total reçu F de la part de la source et la surface A du récepteur:

$$E = dF/dA \text{ (en W/m}^2\text{ ou lux)} \qquad (6)$$

On trouvera en annexe 1 quelques valeurs d'éclairement types. Or le flux F est le produit de la luminance L par l'étendue géométrique G. L'étendue géométrique caractérise l'étendue du faisceau lumineux qui relie la surface de la source A' à la surface du récepteur A; si D est la distance entre la source et la surface réceptrice, a et a' les angles que font avec l'axe les normales à ces surfaces (voir figure), l'étendue géométrique est définie par:

$$d^2G = dAdA' \cos a \cos a'/D^2 \qquad (7)$$



La luminance, ou radiance énergétique, caractérise le pouvoir émissif d'une source: c'est une donnée intrinsèque. Elle s'exprime par le rapport du flux de puissance émise à la surface d'émission dans un secteur donné de l'espace (angle solide $d\Omega$ sous lequel la source A' "voit" la surface réceptrice A):

$$L(A') = d^2F/dA'\cos a'd\Omega \text{ (unité: W/m}^2\text{/sr)}$$

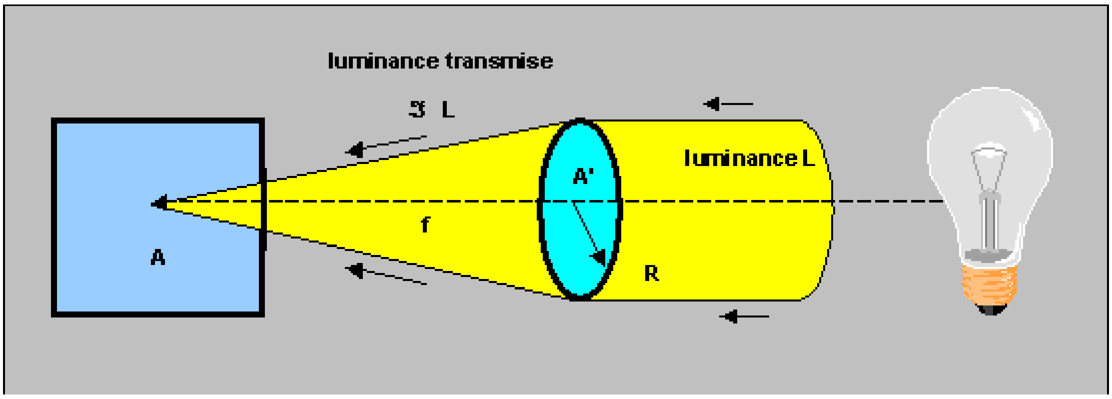
et l'on a bien:

$$d^2F = L(A')d^2G \qquad (8)$$

Ces définitions rappelées, on s'intéresse maintenant à l'éclairement au niveau de la surface réceptrice placée après l'objectif et qui peut être un écran, un film d'appareil photo argentique ou un capteur d'appareil photo numérique. Sa surface est notée A. Le flux de lumière qu'elle reçoit n'est pas celui en provenance de l'objet source mais est celui-ci après traversée de l'objectif, donc avec correction par un facteur de transmission de l'optique $\Im$. Dans ce cas, la surface d'émission à considérer A' est celle de l'ouverture circulaire de la pupille au niveau de l'objectif et non la surface intrinsèque de l'objet source. L'objet source a une luminance L qui, après traversée de l'objectif, devient $\Im$ L. L'étendue géométrique G entre l'ouverture et la surface réceptrice supposée placée à la distance focale f est, d'après les définitions précédentes:

$$G = \pi A (R/f)^2 = \pi A/4N^2 \qquad (9)$$

(voir figure). On voit que l'étendue géométrique fait intervenir l'ouverture relative.



D'après (8), le flux transmis est alors: $F = \Im L\pi A/4N^2$, et l'éclairement de la surface réceptrice A sur l'axe, défini par (6), s'écrit:

$$E = F/A = \Im L\pi /4N^2 \qquad (10)$$

(10) montre que l'éclairement est proportionnel au carré de l'ouverture relative $(1/N)^2$, la luminance transmise étant fixée. Donc l'éclairement sera divisé par 2 chaque fois que N sera multipliée par $\sqrt{2}$. C'est sur cette base que les ouvertures relatives indiquées sur les objectifs des appareils photo suivent une progression géométrique de raison $\sqrt{2}$ (voir tableau en annexe 2): chaque valeur de N correspond à la moitié d'éclairement de la précédente.
Le flux est transmis aussi longtemps que le facteur de transmission $\Im$ est actif. Or pour obtenir

une image photographique qui ne présente pas la trace des mouvements de l'objet, il faut bien que la durée de la transmission soit la plus brève possible. Soit T cette durée appelée temps de pose (son inverse est la vitesse d'obturation du diaphragme). Il est clair que le facteur de transmission est proportionnel au temps de pose: $\Im = KT$. De (10) il découle alors que:

$$E = K\pi\, L/4.\ (T/N^2) = \text{cste} \times T/N^2 \qquad (11)$$

d'où la conclusion importante: le temps de pose ne peut pas être choisi quelconque; pour un éclairement recherché fixé E, il est inversement proportionnel au carré de l'ouverture relative $(1/N)^2$, l'objectif restant le même. Par conséquent le temps de pose doublera chaque fois que l'on passera d'une ouverture relative (1/N) à celle immédiatement inférieure. Le tableau de l'annexe 2 donne la correspondance entre N et T lequel est exprimé en inverse de la vitesse d'obturation.
Remarque : *clarté de l'appareil* - C'est une grandeur qui représente la perte de puissance lumineuse entre la source d'émission et la surface réceptrice, donc le rapport entre l'éclairement et la luminance de l'objet source supposé à l'infini sur l'axe:

$$C = E/L$$

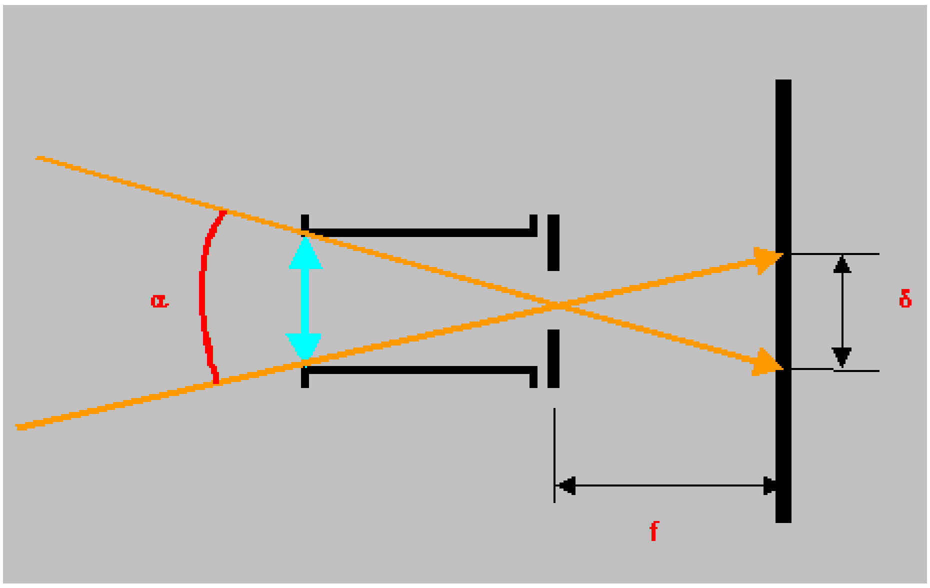
la clarté dépend elle aussi de l'ouverture relative et du temps de pose (voir annexe 3).

3-3 - Champ, profondeur de champ et hyperfocale

On a vu dans le baratin liminaire que la condition de netteté d'une image avec un appareil photographique n'a plus rien à voir avec celle du sténopé, mais, bien entendu, la limitation du pouvoir séparateur reste toujours décrite par la relation (2). Comme ici d = f, compte tenu de la définition de l'ouverture relative (5), et pour une longueur d'onde moyenne de 0,5 µm, la limite inférieure du pouvoir séparateur devient:

$$r = 0{,}6\ N \text{ (en µm)} \qquad (12)$$

qui dépend elle aussi de l'ouverture relative.
Le champ angulaire dépend de la focale: c'est le domaine angulaire délimité par l'angle maximal du faisceau lumineux passant par les bords de la lentille d'entrée de l'objectif et le centre de la pupille (voir figure). Pour un objet situé à l'infini l'image est dans le plan focal image qui coïncide avec la surface réceptrice (film ou capteur). Le champ angulaire est tel que tout point de la surface réceptrice (film ou capteur) reçoit l'image d'un faisceau lumineux contenu dans ce domaine angulaire.



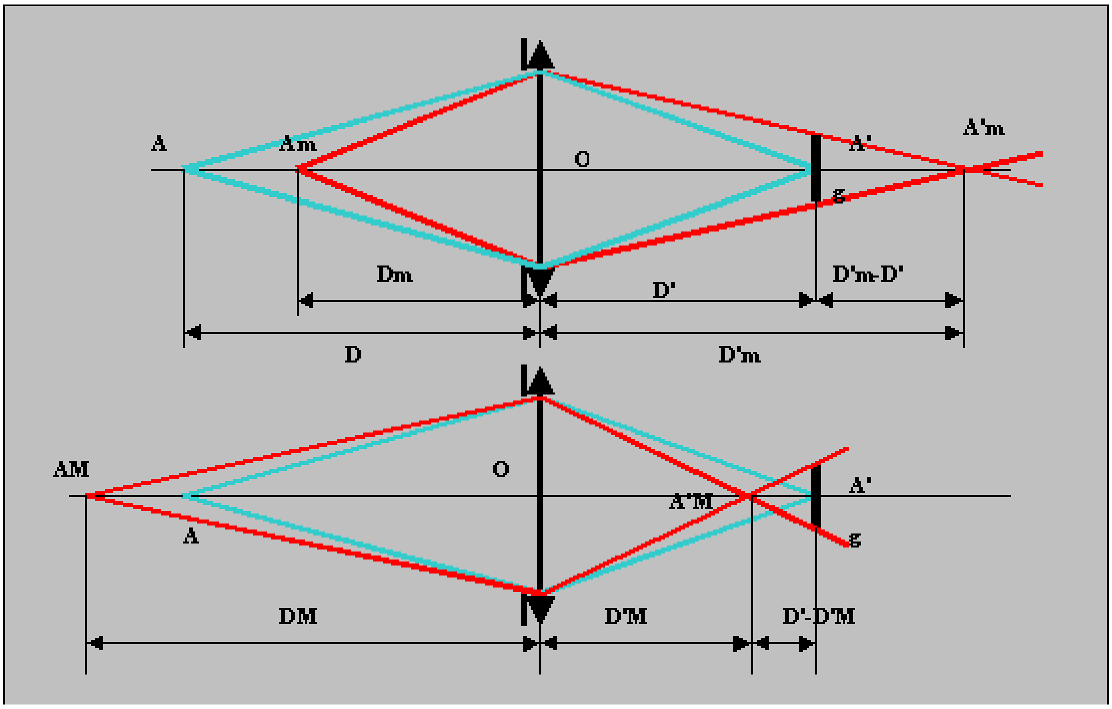
Avec les notations de la figure ci-dessus, le champ angulaire est donné par:

$$\mathrm{tg}\ \alpha/2 = \delta/2f \qquad (13)$$

où δ est la dimension caractéristique du film (ou du capteur), en l'occurrence sa diagonale. Par exemple, un film 24x36 a une diagonale δ = 43 mm. Avec un objectif de focale f = 50 mm, le champ est de 47° (à peu près le champ angulaire de l'œil humain). Le champ angulaire dépend de la focale et des dimensions de l'objectif. (13) montre qu'en focale courte le champ est large et que, inversement, en focale longue, il est étroit. Or une grande focale permet des grandissements angulaires (ou grossissements) importants. Ainsi, lorsqu'on veut avoir l'image grossie d'un objet éloigné, par l'emploi d'un zoom par exemple, le champ angulaire est faible.
Le tableau de l'annexe 4 donne quelques objectifs types avec leurs champs angulaires.
Que ce soit en photographie argentique (emploi de film) ou numérique (emploi de capteurs) les plus petits détails visibles sont limités par la taille des grains pour les émulsions photographiques, ou des pixels pour les photos numériques. Et comme l'oeil humain possède une acuité finie (ou pouvoir séparateur) égale à $\alpha_{min} \approx 3.10^{-4}$ rad $\approx$ 1' d'arc, deux points qui seront séparés par un écart angulaire inférieur à cette valeur ne seront pas distingués. Il s'avère donc inutile, en photographie usuelle, de chercher une résolution poussée au-delà de cette limite; par contre, pour que l'image donne une impression de continuité, il faudra que les éléments de la surface réceptrice (grains ou pixels) aient une taille au plus égale au pouvoir séparateur de l'oeil humain. Soit r cette taille. Si la plus petite taille de la tache lumineuse issue d'un point de l'objet est limitée par la diffraction, alors r est donné par la relation de Rayleigh ou (12). D'autre part si la surface réceptrice est à la distance focale image f de la pupille, la plus petite tache observable par l'oeil humain aura une taille de l'ordre de $f \times 2\alpha_{min}$. Avec un objectif normal de focale f = 55 mm cela donne une résolution de 0,033 mm, pourvu bien sûr que la photo soit observée à une distance égale à la focale à laquelle elle a été prise ([2]). La relation (12) montre alors que cette résolution, désormais notée g = 0,033 mm, est du même ordre de grandeur que la tache de diffraction obtenue avec une ouverture relative des plus faibles (N = 45).

De façon générale, on constate que pour avoir une image nette vis-à-vis de l'acuité visuelle, il n'est pas nécessaire que les rayons lumineux convergent strictement sur le plan focal image. Il suffit pour cela que chaque grain (ou chaque pixel) intercepte une section du cône lumineux qui soit inférieure ou égale à sa taille g. Deux cas se présentent: si le point focal est situé légèrement en avant de la surface réceptrice, la section sera l'intersection du cône émergeant après le point focal et de la surface; si le point focal est situé légèrement après la surface réceptrice, la section sera l'intersection avec cette surface du premier cône convergeant (voir figure). Il existe donc une zone sur l'axe, qui ne se réduit pas à un point, où la netteté, définie par rapport à l'acuité visuelle humaine, peut être obtenue. A l'intérieur de cette zone, la variation de la distance écran-objectif conserve la netteté de l'image. Aux valeurs extrêmes de cette zone correspond une plage de distances de l'objet auxquelles il peut être observé ou photographié avec netteté. L'étendue de cette plage de distances s'appelle la profondeur de champ.

2 Une règle d'observation adaptée des photographies stipule que, pour avoir la meilleure impression de finesse, la photo doit être observée avec une distance d'éloignement des yeux égale à la distance focale à laquelle elle a été prise. Bien entendu, si la photo a été prise avec des grandes focales (au téléobjectif par exemple) il n'est plus question de le faire: tout le monde a pu constater qu'une telle photo est moins nette qu'une photo prise à focale normale...



On calcule ci-après la profondeur de champ. Soit p = OA = -D, p' = OA'. La mise au point est effectuée pour A. Pour les points compris entre A_m et A_M (avec $D_m = A_mO < D$ et $A_MO = D_M > D$), le faisceau dans l'espace image donne sur la surface réceptrice une tache de diamètre inférieure ou égale à g. La profondeur de champ est notée $\Delta D = D_M - D_m$. La relation de conjugaison des systèmes optiques centrés (relations de Descartes ou Newton) donnent:

$$1/D' + 1/D = 1/f = 1/D'_M + 1/D_M = 1/D'_m + 1/D_m$$

avec D suffisamment grand on a $D' \approx f$. Comme 2R est le diamètre de l'objectif et utilisant l'homothétie des triangles, on a d'autre part:

$$(D'_m - D')/g = D'_m/2R \text{ et } (D' - D'_M)/g = D'_M/2R$$

avec l'approximation $D' \approx f$, cela conduit aux relations:

$$1/D' - 1/D'_m = 1/D'_M - 1/D' = gN/f^2$$
$$1/D_m - 1/D = 1/D - 1/D_M = gN/f^2$$

On en déduit la profondeur de champ:

$$\Delta D = 2gND^2f^2/(f4 - (gND)^2) \qquad (14)$$

elle dépend de la distance à laquelle la mise au point est faite. Elle augmente si la distance de mise au point D augmente, si l'ouverture relative 1/N diminue et si la focale f diminue.
Pour une mise au point à l'infini $D \to \infty$ la borne maxi de la profondeur de champ D_M est rejetée à l'infini et la plus petite distance Dm au-delà de laquelle on obtient la netteté est par définition l'hyperfocale:

$$D_m = DH = f^2/gN \qquad (15)$$

L'hyperfocale, c'est-à-dire la plus petite distance à partir de laquelle on obtient la netteté, diminue (se rapproche de l'objectif) si la focale diminue, et si l'ouverture relative diminue.

Annexe 1: Quelques valeurs d'éclairement

L'éclairement E est le rapport du flux de lumière incidente et de la surface éclairée. Le flux est une puissance et s'exprime en watt (W) lorsqu'on le considère en unités énergétiques (comme par exemple lorsqu'il délivre un courant électrique au niveau d'un photocapteur, ou lorsqu'il fait augmenter la température). Cependant son action sur la vision humaine dépend de la réponse de l'œil à cette puissance: elle s'exprime à l'aide d'une unité particulière, le lumen (lm). La réponse de l'œil à la puissance lumineuse incidente prend le nom de flux lumineux et n'est pas la même selon la longueur d'onde (couleur): en vision photopique (c'est-à-dire diurne), elle passe par un maximum pour la longueur d'onde 0,555 µm (couleur jaune, à laquelle l'oeil humain est le plus sensible). A ce maximum, la réponse de l'œil (ou efficacité lumineuse) est k = 683 lm/W. Par contre, en vision scotopique (nocturne), la réponse maximale est décalée vers le bleu (λ = 0,507 µm) avec une efficacité lumineuse qui vaut k' = 1707 lm/W. Rappelons qu'en vision photopique ce sont essentiellement les cônes (cellules du centre de la rétine) qui sont sollicités et permettent la vision en couleur, tandis qu'en vision scotopique ce sont les bâtonnets (cellules situées au pourtour de la rétine) qui le sont et sont plutôt sensibles à la luminance (vision noir et blanc, sensibilité à l'intensité). Il s'ensuit qu'en faible lumière l'oeil humain soit moins sensible aux couleurs mais répond mieux aux variations d'intensité. Ce qui est à l'origine du fait qu'à la tombée de la nuit "on est entre chiens et loups" ou que "tous les chats sont gris" !
Compte tenu de la définition de l'éclairement, le lux est le flux lumineux par unité de surface éclairée: 1 lux = 1 lm/m². En vision photopique, à la sensibilité maximale, pour trouver l'équivalent en W/m² il faut donc diviser l'éclairement par 683, et en vision scotopique il faut diviser par 1707.
Bien sûr ce sont des études statistiques qui ont conduit aux valeurs standard ci-dessus: elles définissent l'œil moyen. Celui-ci est sensible à un flux lumineux minimal de 10^{-13} lumen, ce qui est une performance honorable: par exemple, en l'absence de toute pollution lumineuse un être humain est capable de voir la lumière de la flamme d'une bougie distante de 2 km !...
Ces précisions étant faites, voici quelques valeurs de l'éclairement, en lux:

éclairement en lux	exemples
100 000	éclairement par le soleil d'une surface sans incidence
10 000	salle d'opération
1000	papier blanc au soleil
100	intérieur d'une maison en plein jour
10	éclairage public (sans les enseignes)
0,2	éclairement par la pleine lune d'une surface sans incidence
10^{-2}	paysage éclairé par la lune voilée
10^{-4}	nuit étoilée
10^{-6}	nuit noire et couverte

Annexe 2: Valeurs normalisées des ouvertures relatives et temps de pose

N	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32	45
T	1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4
N²/T	8000	7840	8000	7840	8000	7840	8000	7260	7680	7260	8192	8100

On remarque que N²/T, quantité inversement proportionnelle à l'éclairement E, reste sensiblement constante pour chaque couple (N, T). Pour obtenir le même éclairement il faut donc:

- soit choisir une ouverture relative élevée (1/N), donc N faible, et corrélativement un temps de pose très court (vitesse d'obturation élevée): c'est le cas où l'on veut photographier un objet en mouvement
- soit choisir une ouverture relative faible (1/N), donc N grand, et corrélativement un temps de pose long (vitesse d'obturation lente): c'est le cas où l'on veut photographier un objet immobile, mais dans ce cas l'opérateur ne doit pas bouger.

Annexe 3: Notion de clarté

Définition de la clarté au centre du champ (sur l'axe optique de l'appareil):

$$C = E/L$$

où E éclairement sur la surface réceptrice, L luminance de l'objet source sur l'axe et supposé à l'infini. De (10) on tire:

$$C = \Im\, \pi /4N^2$$

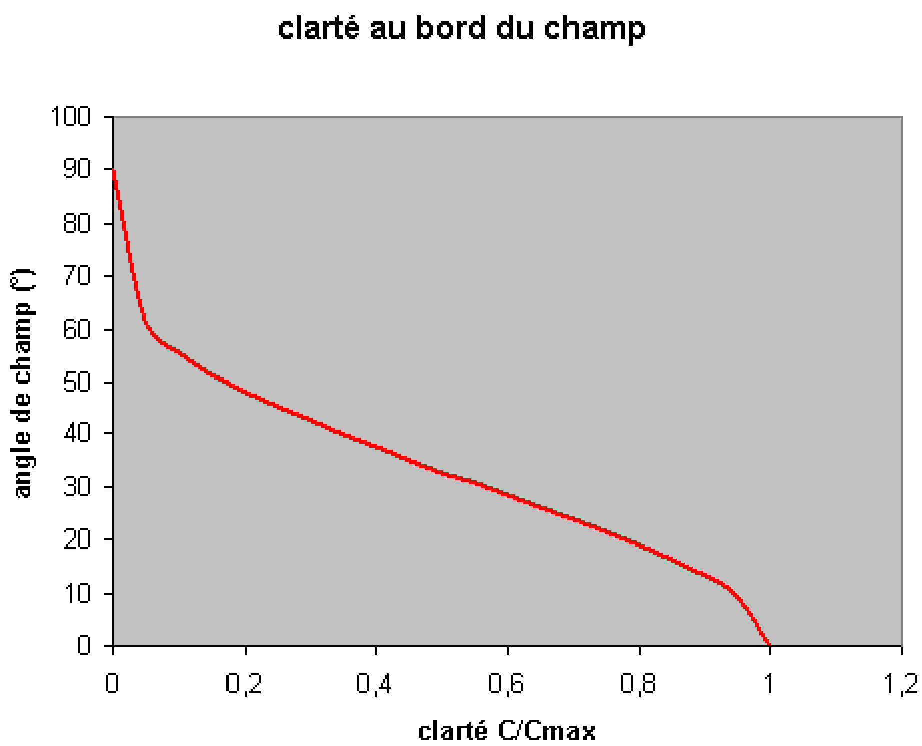
et d'après (11):

$$C = k\pi /4.\ (T/N^2)$$

le temps de pose et l'ouverture relative agissent sur la clarté de la même façon que sur l'éclairement.

Comment se comporte la clarté lorsqu'on s'écarte de l'axe optique? On peut montrer qu'elle évolue suivant l'angle de champ θ (angle entre l'axe optique et une direction dans le champ observé) suivant la loi:

$$C(\theta) = k\pi /4.\ (T/N^2) \cos^4 \theta = C_{max} \cos^4 \theta$$



La clarté diminue considérablement aux bords du champ.

Annexe 4: Quelques champs angulaires d'objectifs

objectifs	fish-eye	Grand angle		normal	téléobjectif		super-téléobjectif	
Focale f mm	15	24	35	50	135	200	400	1200
Champ (°)	180	84	63	46	18	8	6	2
remarques		Courte focale, faible ouverture ; utile pour reportages en intérieur			Longue focale pour un encombrement réduit ; aberrations chromatiques difficilement corrigées			

Les objectifs à focale variable s'appellent zooms: ils rassemblent les grands angles, les objectifs normaux et les téléobjectifs

Bibliographie

- Jean-Pierre Faroux, Jacques Renault: *Cours d'optique*, Dunod, Paris 1998
- DGA/CFBS: *Cours mesure et imagerie infrarouge*, DGA, 27 mai 2003
- G. Gaussorgues : *Initiation à l'optique instrumentale et appliquée*, DCAN Toulon, CEFCA, avril 1974
- Christian Judei: *Cours de photographie* (en ligne), 1988-1991, révision avril 1999
- Thierry Lombry: *Les bases de la photographie*, site Luxorion
- Renaud Gaglione: *Bases photographiques* (ge9804@cust.univ-bpclermont.fr)
- Joseph Caniou: *L'observation et le mesurage par thermographie*, AFNOR, Paris, 1991