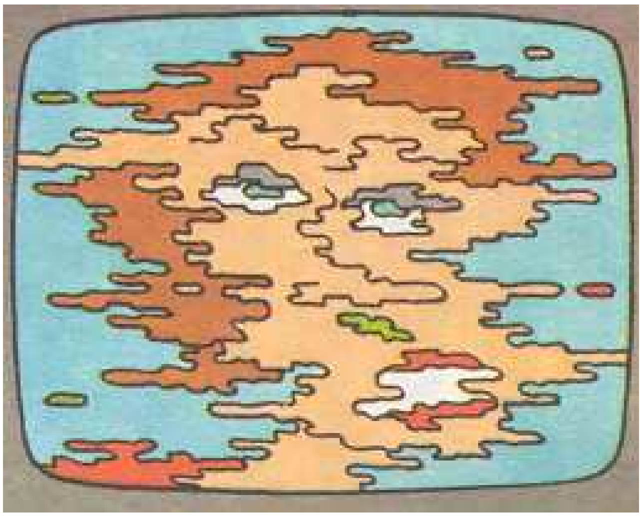
Le Sténopé



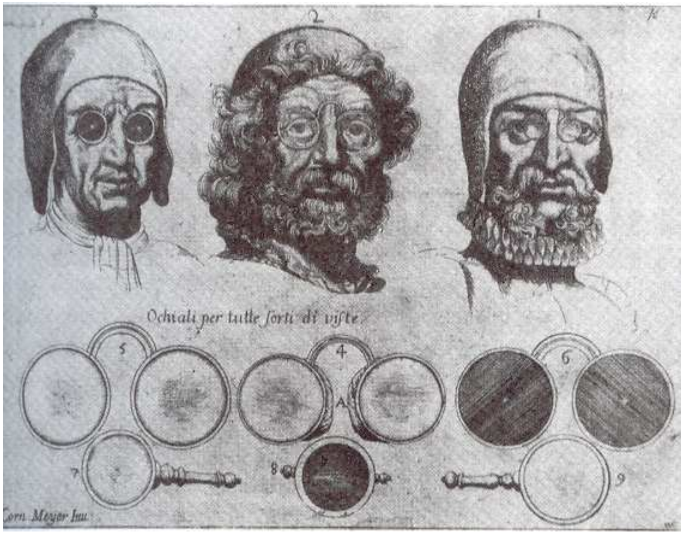
par Claude Boutet

1. Avant-propos

Sténopé : quel nom barbare pour désigner un trou ! (Sténopé : trou étroit en Grec). Les Anglais disent pinhole (trou d'aiguille) ce qui est déjà beaucoup plus parlant. Le nom savant français cache bien évidemment la simplicité du procédé et fait paraître ceux qui en parlent beaucoup plus intelligent !
D'abord, pour le commun des mortels, qu'elle est cette « bête » et comment çà marche ?

2. Un peu d'histoire

Le phénomène sténopé a été découvert naturellement dans les temps les plus reculés lorsque les gens ont observé la formation d'images au sol lorsque la lumière passait dans un trou relativement étroit. L'image était le plus souvent l'image du soleil. Le trou pouvait être naturelle (un feuillage épais dans lequel est formé un trou) ou artificiel (un trou dans une tente). Les premières images sténopé ont donc été observées d'une façon très rudimentaire. Des écrits plus ou moins anciens et plus ont moins clairs font apparaître que, dans l'antiquité, le phénomène était déjà connu. Des écrits plus récents (environ 10è siècle) permettent de montrer que le phénomène était étudié d'une façon plus scientifique. Et au moyen âge, le phénomène physique a été utilisé en peinture pour faire ressortir les perspectives (fenêtre de Léonard de Vinci), voir les peintures tridimensionnelles dans les boîtes « peep-show », les « trompes l'œil » et en architecture. Dans certaines églises et cathédrales, surtout en Italie, le sténopé était utilisé (et est toujours en service) pour évaluer les dates, notamment les solstices. Des lunettes de vue ont même été proposées au 17è siècle.



Cornelius Mayer, Lunettes montrant toutes les façons de voir, dessin de 1689. Notez que l'homme sur la gauche porte des lunettes sténopé, montrées en détail en bas à droite.

D'ailleurs si vous n'avez pas vos lunettes ou bien que vous ayez besoin de lunettes, faites un trou d'aiguille dans un morceau de carton et regardez au travers, le résultat est surprenant.

Le procédé a été oublié pendant plusieurs siècles dès l'apparition des lentilles. Le principe a été repris dès l'apparition de la photographie car il était une alternative très peu coûteuse à l'objectif photographique et présentait des caractéristiques avantageuses (profondeur de champ très importante). Mais l'objectif photographique a stoppé son utilisation car les sensibilités des films photographiques ne permettaient pas de courts temps de pose limitant ainsi l'utilisation. Depuis les années 70, un nouvel engouement a vu le jour et beaucoup ont recommencé à s'y intéresser.

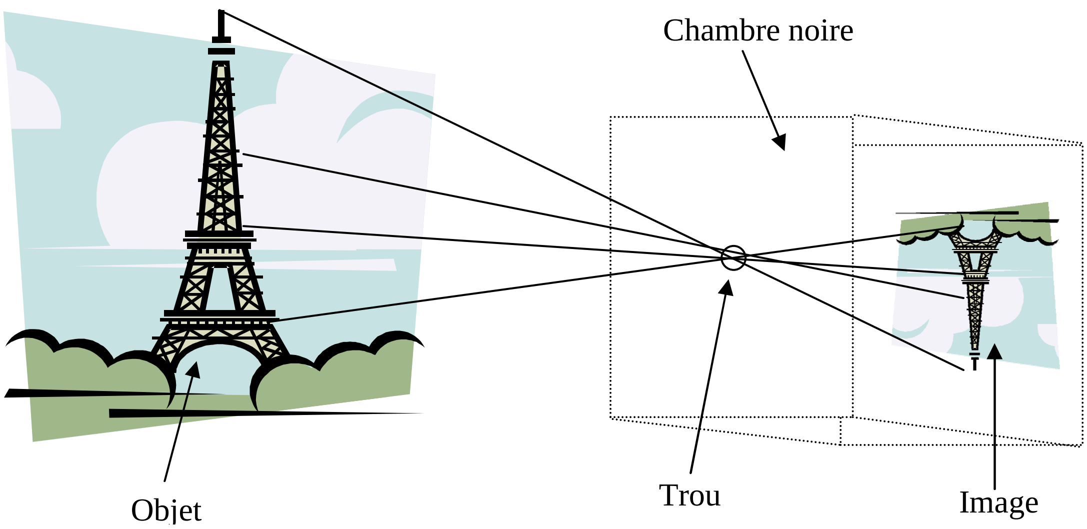
3. Principe de l' « image sténopé »

Les trois éléments du principe sténopé sont :

- l'objet à reproduire
- le trou
- l'écran ou le film.

Bien entendu pour observer l'image il faut que l'écran ou le film soit dans un volume fermé étanche à la lumière (chambre noire).

Le schéma suivant montre le principe de fonctionnement :



Chaque point de l'objet est projeté sur l'écran ou le film en passant par le trou. Au niveau de l'écran, la vision pour une position donnée, est une toute petite partie de l'objet. L'image est donc une juxtaposition de toutes petites parties sécantes de la projection de l'objet.

En utilisant un film, pour réaliser une bonne photographie, il y a 4 paramètres essentiels :

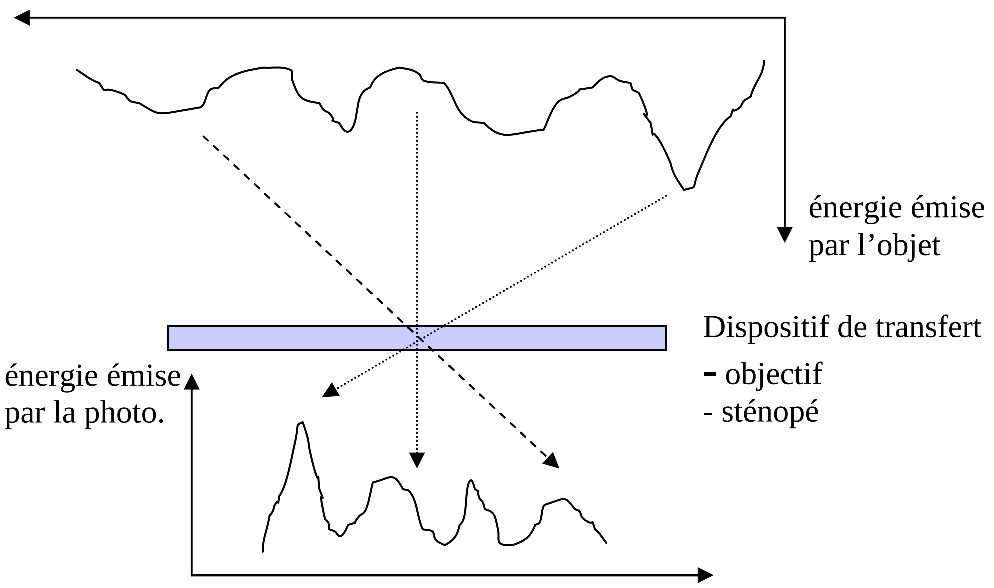
- la distance objet-trou (L)
- les caractéristiques du trou
- la distance trou-film (l)
- le film

Le problème est de définir ce qu'est une bonne photographie. Habituellement, on la définit par la netteté.

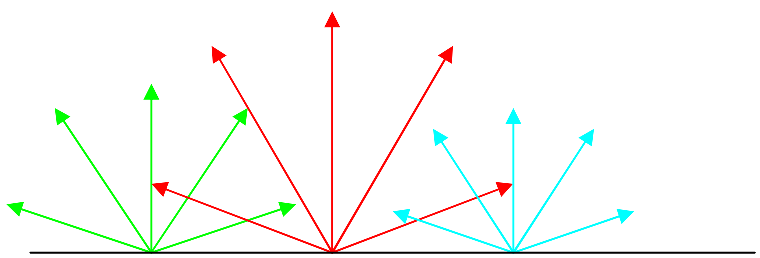
4. Hypothèses de base

Vu de l'œil, appareil optique très complexe, une photo nette est une représentation exacte de l'objet, c'est-à-dire la même distribution d'énergie relative émise par la photo qui représente exactement la distribution de l'énergie émise par l'objet.

Processus de transfert de l'énergie

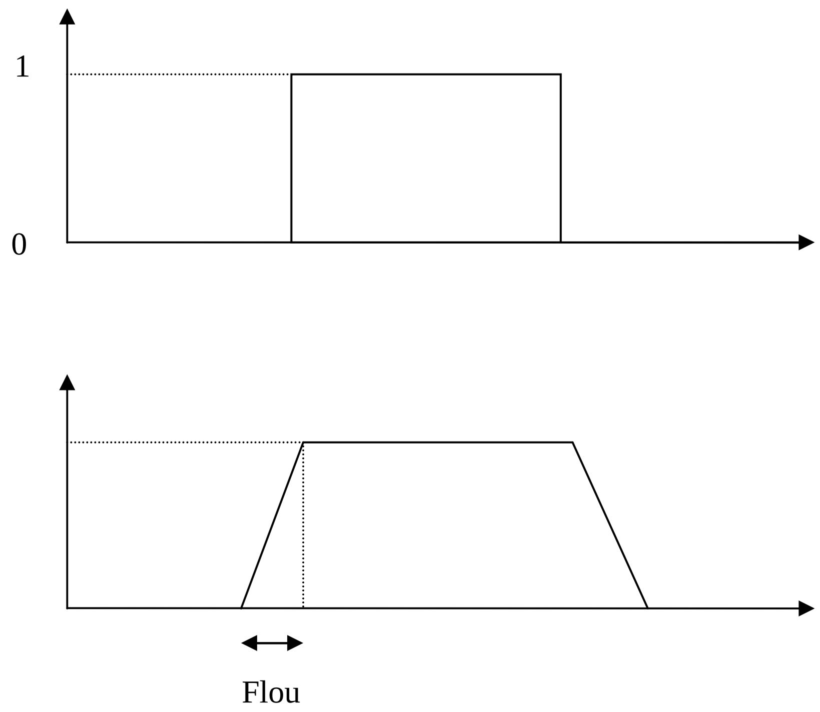


En réalité, vu de l'œil, l'image est une succession de points qui émettent dans toutes les directions la même énergie avec la même longueur d'onde :



L'énergie émise pendant un temps donné (puissance) est bien entendu de valeur finie ; la succession de points d'émission peut être considérée comme également finie et la distance entre les points d'émission est probablement de l'ordre de la taille moléculaire.

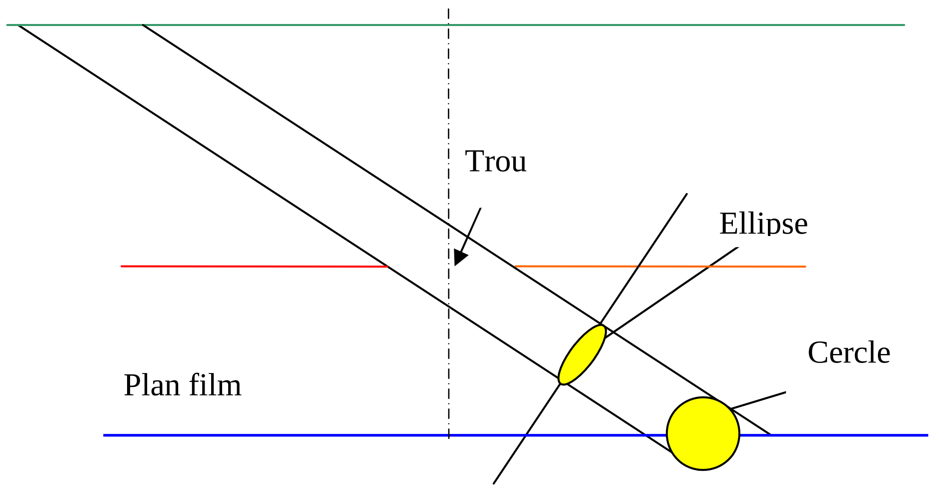
Pour essayer d'être plus précis sur la qualité de l'image, on peut définir la netteté ou plutôt le flou en considérant un objet avec un contraste absolu, comme le montre le schéma suivant. L'objet est représenté par un créneau de niveau 1 sur le créneau et 0 en dehors :



Le flou peut alors être défini comme étant une variation de niveau d'énergie qui entraîne un contraste moins marqué que dans la réalité.

5. Analyse vue sous l'aspect énergétique

Une photographie est un processus de transfert de l'énergie de l'objet vers le film que l'on va considérer dans ce cas, comme des rayonnements parallèles. Dans le cas du sténopé, le transfert a lieu au travers du trou. Les caractéristiques du trou sont donc fondamentales.
Si l'on raisonne dans le cas idéal, le schéma simplifié du transfert d'énergie est le suivant :

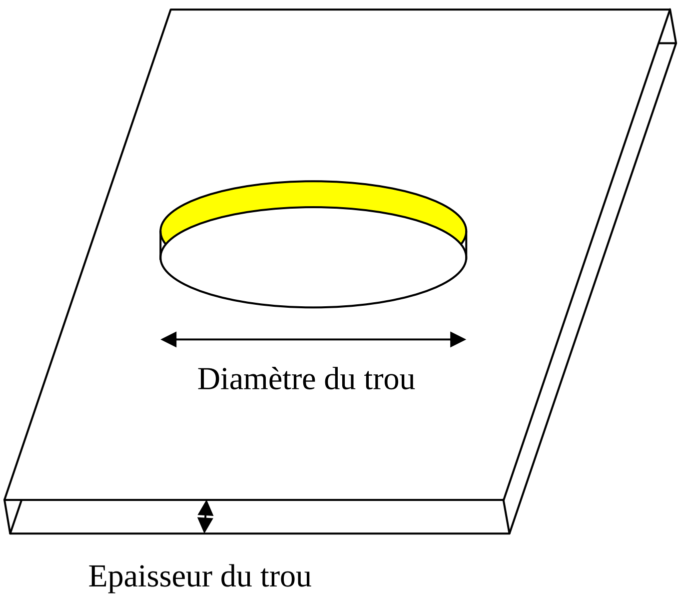


Lorsque l’émission d’énergie pour une surface donnée a lieu à 90° par rapport au plan trou, l’image dans un plan perpendiculaire à l’émission est un cercle. Si l’on s’écarte de la perpendiculaire comme sur le schéma, la totalité de l’énergie émise ne passe plus du fait de la perspective et l’on voit une ellipse qui redevient un cercle lorsqu’elle se projette sur le plan film. Ceci veut dire du point énergétique, que l’énergie captée par le film est d’autant plus petite que le point observé est éloigné de la perpendiculaire au trou (angle de vision). Tout se passe comme si l’on réduisait la dimension du trou lorsque l’on s’éloigne de la médiane.

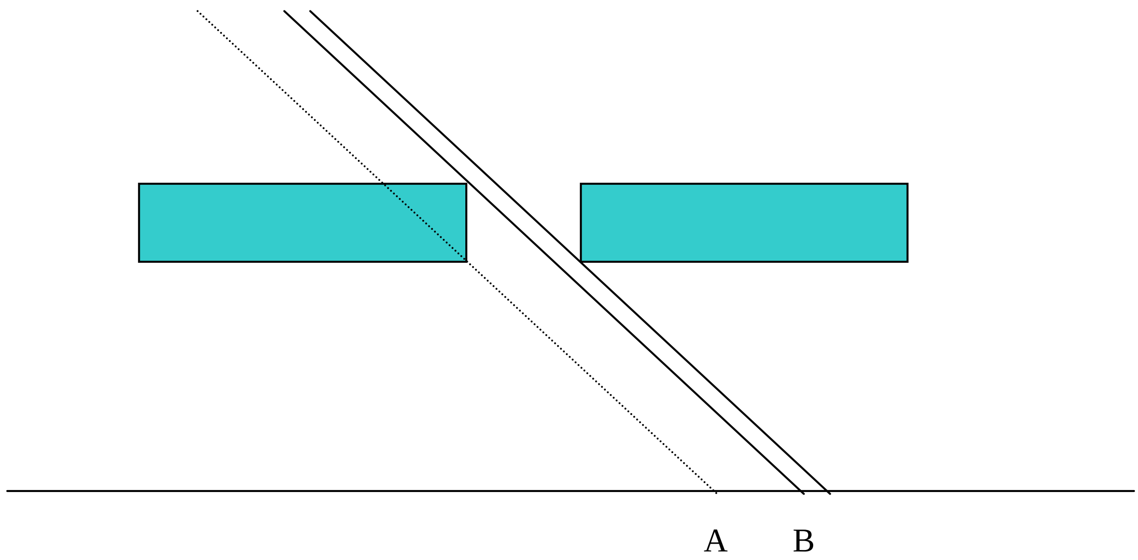
Le problème est maintenant de quantifier les niveaux d’énergie en fonction des paramètres suivants :

- diamètre du trou
- épaisseur du trou
- angle de vision.

Le schéma réel devient donc :



Ceci signifie que l’épaisseur du trou est un paramètre à prendre en considération comme le montre le schéma suivant :

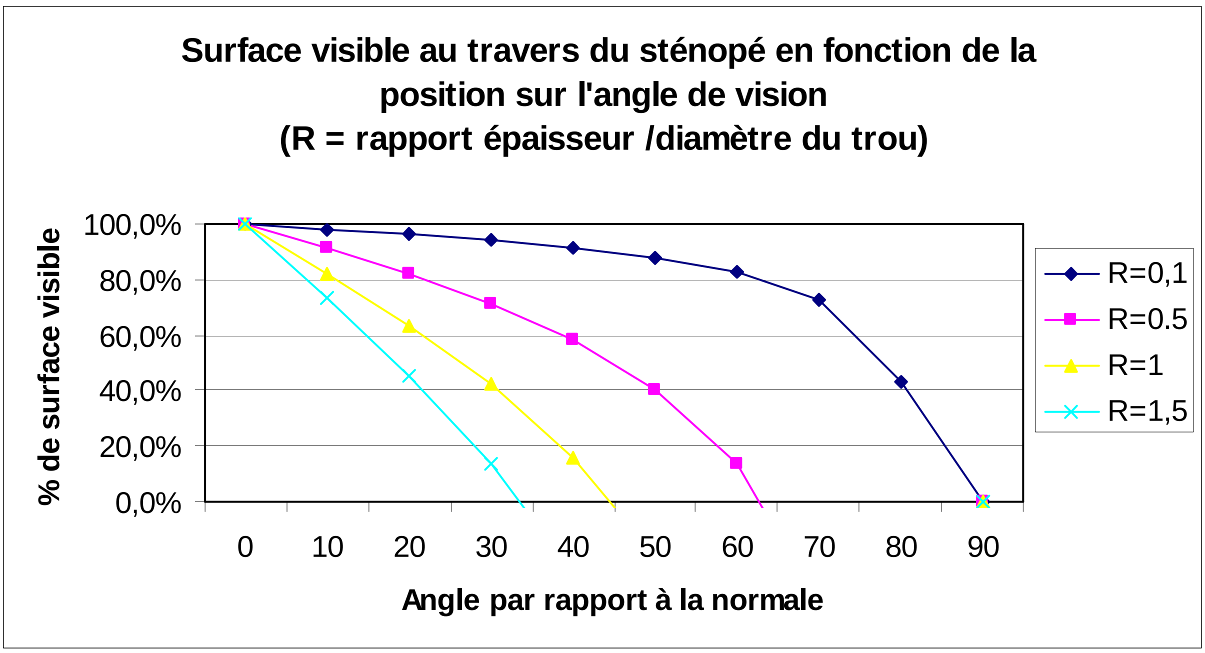


L’écart AB représente l’influence de l’épaisseur du trou (ou de la plaque dans laquelle est percé le trou).

Si l’on calcule la surface visible du trou en fonction de la position de l’élément rayonnant, c’est-à-dire la position sur l’angle de vision, on obtiendra la surface de passage de l’énergie. On fait l’hypothèse que la projection est une ellipse ce qui n’est pas tout à fait vrai car ce sont en réalité deux demi ellipses mais l’écart est jugé négligeable. Pour simplifier :

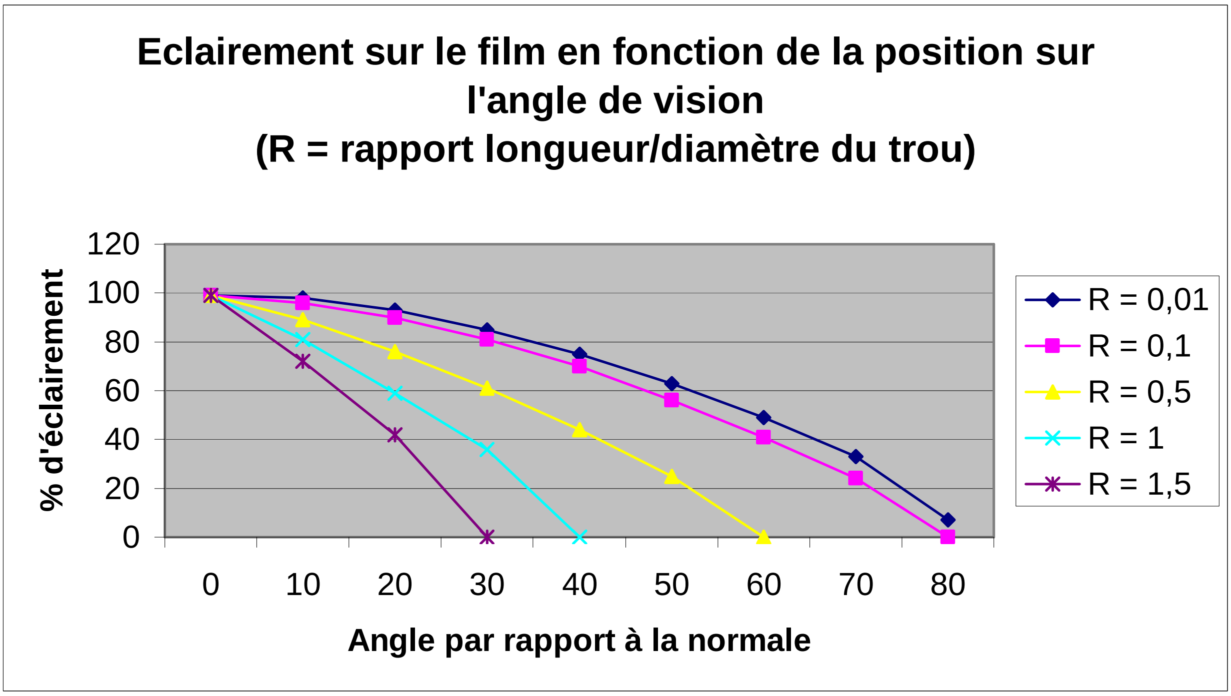
- on considère que l’angle de calcul est l’angle que fait le point analysé avec la perpendiculaire au plan trou dans l’axe du trou. Pour trouver l’angle total de vision, il faudra multiplier le résultat par 2
- les résultats sont donnés en fonction du paramètre R qui est le rapport du diamètre du trou sur l’épaisseur de la plaque
- les résultats sont donnés en valeur relative (%) par rapport à l’énergie maximale (angle de 0°) par unité de surface

Les résultats figurent dans le graphe suivant :



On voit donc que le rapport épaisseur sur diamètre influe fortement sur la quantité d'énergie passant par le trou.

Lorsque cette énergie est projetée sur le plan film, à partir des mêmes critères, on obtient les résultats suivants :



Le rapport épaisseur sur diamètre est un paramètre encore plus important du fait que la même énergie est projetée sur une surface plus grande.
A titre d'exemple, si l'on a un trou de 0.3 mm de diamètre dans une plaque de 0.3 mm, le rapport R est de 1 et si l'on considère qu'un écart énergétique de 20% n'est pas trop visible sur un film, on relève que l'angle est de 10° environ donc que l'angle de vision de la photo ne devra pas excéder 20°. On voit, en comparant les 2 graphes, de l'intérêt de courber le plan film pour améliorer la qualité de l'image. Comme courber un film de façon sphérique est pratiquement impossible (sauf déposer la couche sensible à l'intérieur d'une demi sphère), on le courbe suivant un seul plan rendant la photographie meilleure mais essentiellement dans ce plan.
Dans le meilleur des cas, l'angle maximal de vision est d'environ 150°.

Il faut bien noter que, plus le rapport R est petit, donc a priori plus l'épaisseur de la plaque est faible, plus la situation est favorable.

On constate également qu'au-delà de R = 0.1 le gain est négligeable.

Ce type d'analyse ne permet pas de définir correctement les paramètres pour obtenir une netteté satisfaisante puisque les distances objet et film par rapport au trou ne sont pas pris en compte.

6. Remarque relative aux formules de calcul de sténopé figurant dans la littérature

Habituellement on trouve dans la littérature une formule du type

$$B = \sqrt{W \times C \times F} \quad \text{d'où} \quad F = \frac{B^2}{W \times C}$$

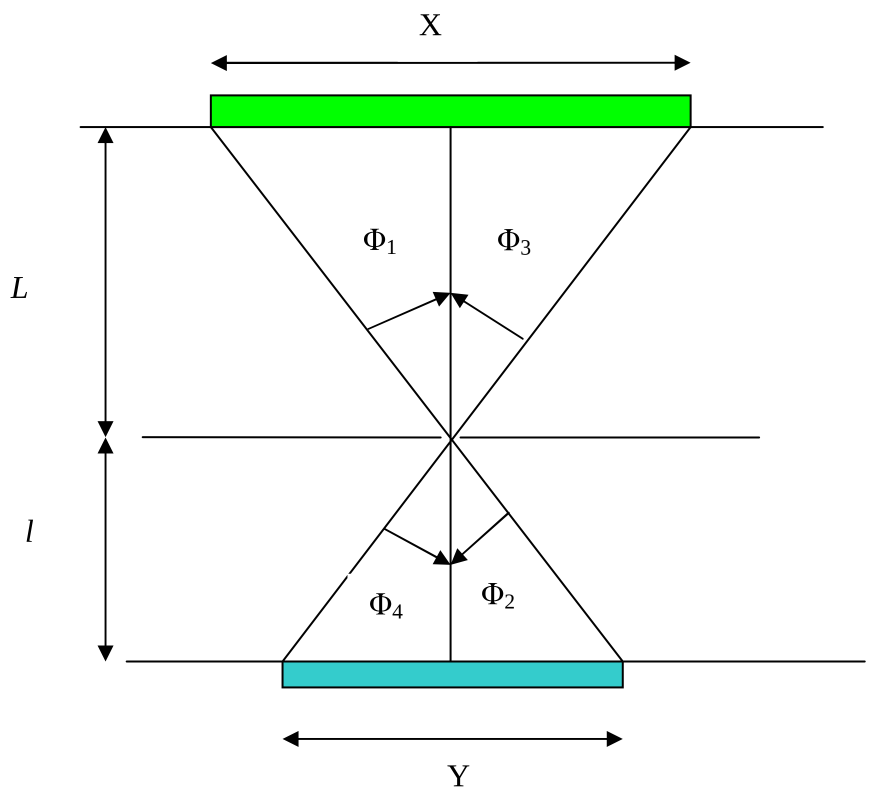
Avec B = rayon du trou
W = longueur d'onde de la lumière
C = constante
F = distance trou-film

On sait que la longueur d'onde de la lumière visible s'étale de 0.4 à 0.8 µm donc un rapport de 2. La constante peut être comprise entre 0.5 et 1, ce qui donne également un rapport de 2. La distance trou-film peut donc, aux limites, varier dans un rapport de 4 ce qui est très important et peu réaliste.
Comme il y a diffraction de la lumière en fonction de la longueur d'onde, il ne devrait pas y avoir une restitution correcte des couleurs de l'image.
Il semble que cette formule est plus une simulation qui essaie de reproduire des expérimentations et la présence d'une longueur d'onde fait très « savant ».
On note également que la distance trou-objet n'intervient pas.

7. Analyse géométrique de problème

7.1. Grandissement de l'objet

Comme dans tout système photographique on peut évaluer la valeur du grandissement (taille de l'objet par rapport à la taille de l'image).
En reprenant le principe de base, on peut représenter le système :



En disposant l'objet dans l'axe du sténopé, on a $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_4$ et il vient :

$$\frac{Y}{2\times L} = Tg\phi_1 \quad \text{et} \quad \frac{X}{2\times l} = Tg\phi_2 \text{, comme } Tg\phi_1 = Tg\phi_2$$

$$\frac{Y}{L} = \frac{X}{l}$$

D'où

$$\boxed{G = \frac{l}{L}}$$

Le rapport de la taille de l'image sur la taille de l'objet est directement fonction du rapport de la distance trou-film sur la distance trou-objet.
Le grandissement est inférieur à 1 pour $L > l$ (l'image est plus petite que l'objet) et supérieur à 1 pour $L < l$ (dans ce cas on a donc un grossissement).

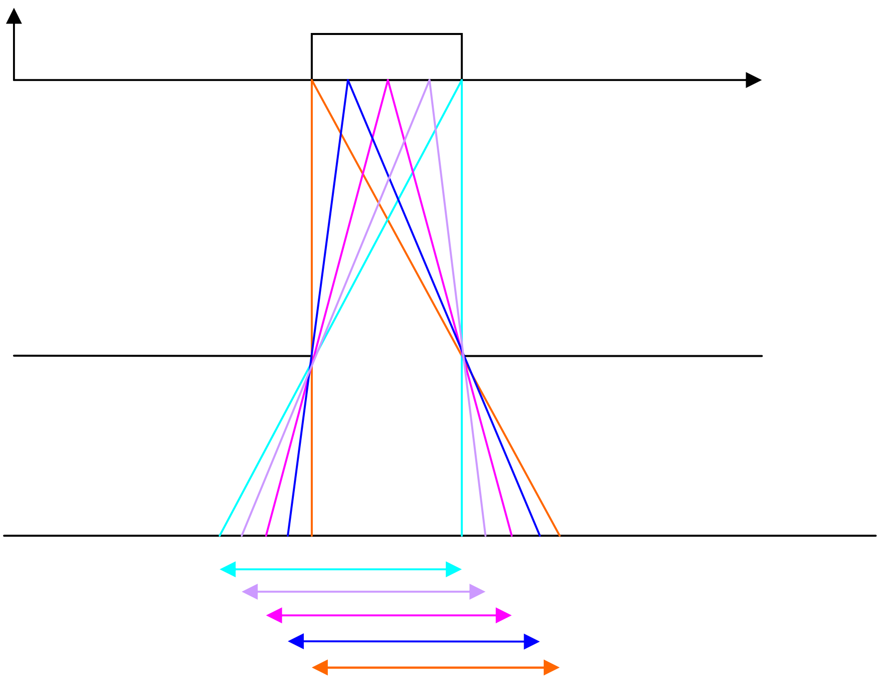
7.2. Evaluation de la netteté

La netteté d'une photographie peut être due à 3 paramètres :

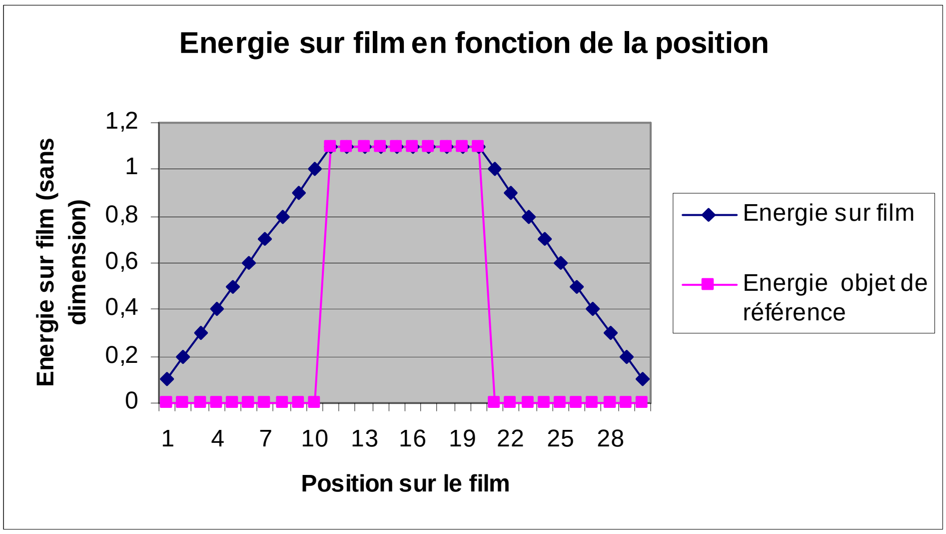
- le paramètre géométrique
- la diffraction de la lumière sur les bords du trou
- la diffusion de l'énergie dans le support photographique

Dans un premier temps et faute d'informations quantifiées, on va ne s'intéresser qu'à l'aspect géométrique.

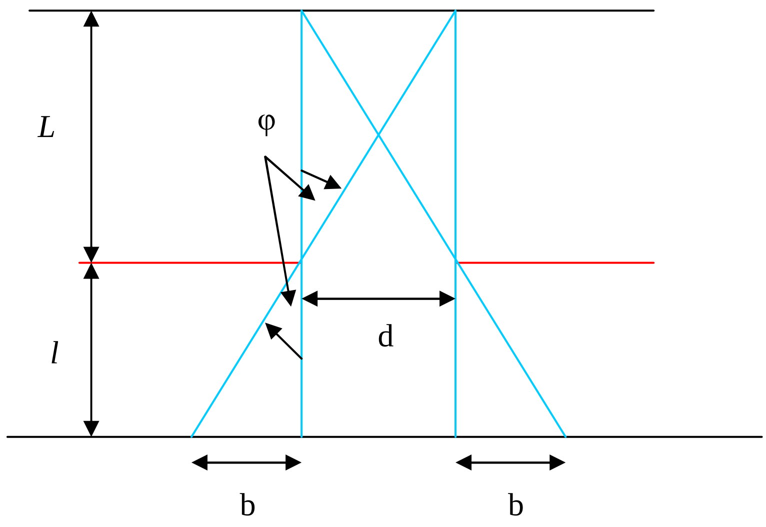
Pour déterminer le flou, il est plus simple de se placer dans un cas particulier où l'objet est de la taille du trou et émet sous la forme d'un créneau (émission = 0 en dehors du créneau). Le phénomène physique est alors le suivant :



On constate qu'un point balaye une zone qui est toujours plus grande que la dimension du trou. L'image sur le film est la somme des énergies apportées par chaque point. Le nombre de points est très grand (mais fini – taille moléculaire ?) mais le niveau du créneau d'énergie est fini. On peut toujours raisonner sur un nombre limité de point pour examiner le phénomène. Si l'on fait la somme de tous les points, on trouve une courbe de la forme :



On voit donc que la courbe restituée n'a pas la même forme que le créneau de départ de l'objet. On peut donc considérer que les parties extérieures au créneau constituent le flou qui peut être alors calculé. Le flou est alors défini comme étant la zone qui évolue en énergie de 0 à 1.



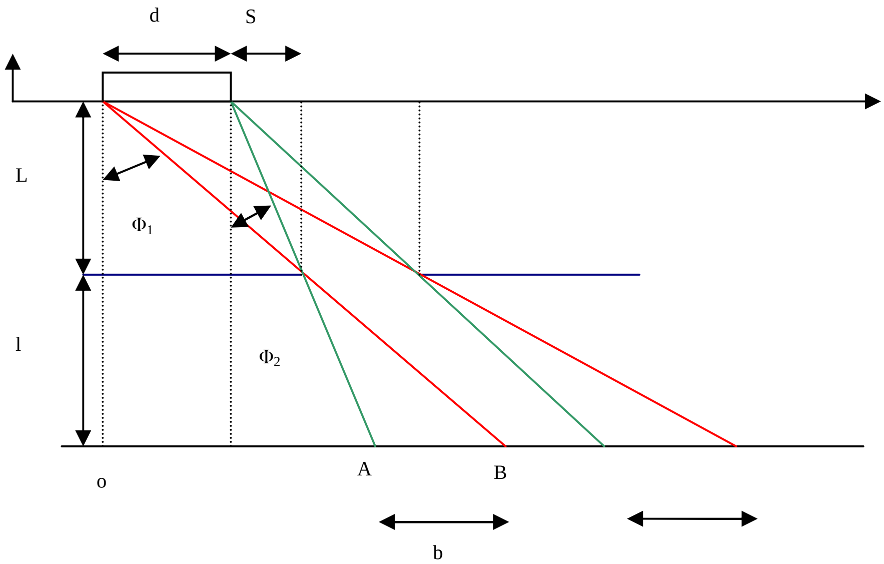
$Tg\varphi = \dfrac{d}{L}$ et $Tg\varphi = \dfrac{b}{l}$ d'où $\dfrac{b}{l} = \dfrac{d}{L}$ donc on arrive à la **formule dite d'Hélios** :

$$\boxed{b = \frac{d \times l}{L}}$$

Avec :
l = distance trou film
d = diamètre du trou
L = distance objet trou
b = flou

Toutes les valeurs doivent être prise dans la même unité.

Maintenant si l'on raisonne avec un angle de vision non nul, on a :



On a:

$$Tg\phi_1 = \frac{S+d}{L}$$

$$Tg\phi_2 = \frac{S}{L}$$

$$oB = (L+l)\times Tg\phi_1$$

$$oA = (L+l)\times Tg\phi_2 + d$$

$$b = oB - oA = \frac{(L+l)\times(S+d)}{L} - \frac{(L+l)\times S}{L} - d$$

Il reste:

$$\boxed{b = \frac{d\times l}{L}}$$

On retrouve la même formule que précédemment. La valeur du flou est indépendante de la position sur l'angle de vision, donc la même sur tout le film.

Pratiquement, que veut dire cette formule :

- la valeur du flou est directement liée au diamètre du sténopé. Plus le trou sera petit plus le flou sera faible
- la valeur du flou est directement fonction du rapport *l*/*L*. Ceci veut dire par exemple que si l'on photographie à faible distance *l*/*L* = 1 le flou est égal au diamètre du trou.
- plus l'objet est éloigné plus le flou est faible
- plus la distance trou-film est grande plus le flou est important. Ceci signifie aussi que plus la distance l est faible, plus la photographie est petite et le flou augmentera après agrandissement.

Pour utiliser cette formule, il faut procéder de la façon suivante :

- déterminer la distance *l* qui est une donnée de base de la caméra sténopé
- déterminer la dimension de la photographie après tirage
- déterminer la valeur (B) du flou souhaité sur le tirage
- déterminer la valeur G de l'agrandissement par rapport au film
- déterminer la valeur de la distance L de l'objet

Il faut après cela calculer le flou sur le film qui est :

$$b = B\times G$$

Connaissant b, L et l, on calcule le diamètre du trou :

$$d = \frac{b\times L}{l}$$

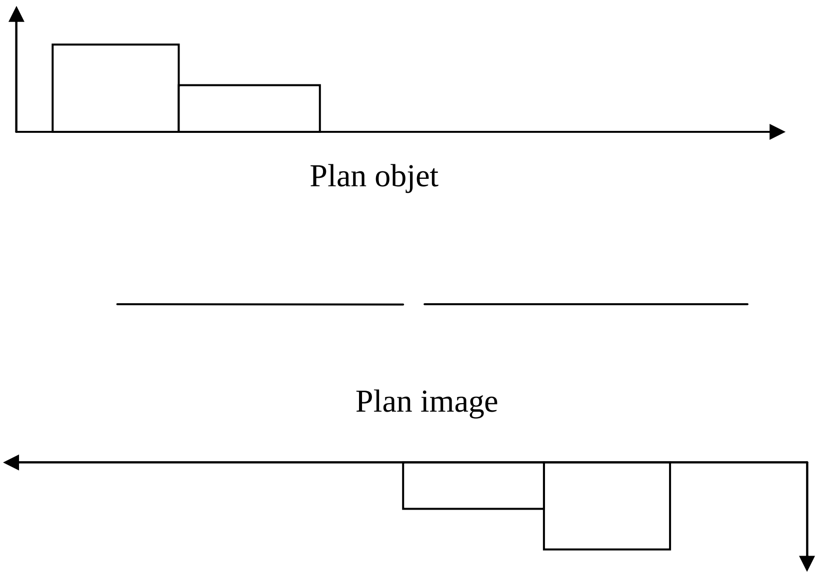
A titre d'exemple, si l'on a une caméra sténopé avec *l* = 100 mm et que l'on veut photographier à 1m (1000 mm) avec un flou sur le film de 0.02 mm, le diamètre du trou devra être inférieur ou égal à :

$$d = \frac{0.02 \times 1000}{100} = 0.2mm$$

7.3 Evaluation du pouvoir séparateur

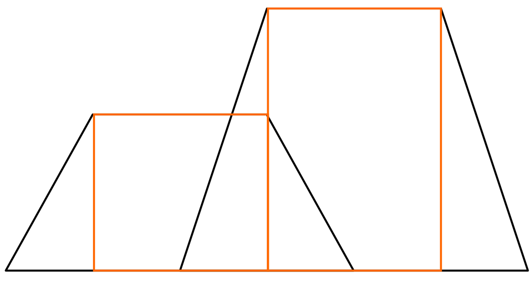
Il est important de connaître, sur l’objet, le niveau de détail qu’il est possible de photographier. Compte tenu des flous qui « débordent » une image, on peut montrer ce qui se passe en reprenant une représentation graphique.

Si l’on n’avait pas de flou, on aurait une image de la forme suivante :

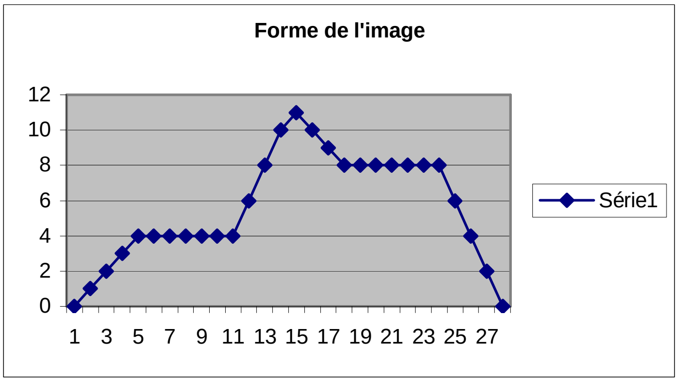


Il n’y aurait aucune déformation.

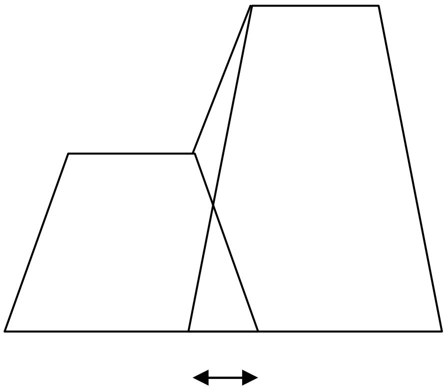
Mais un créneau devient un trapèze isocèle :



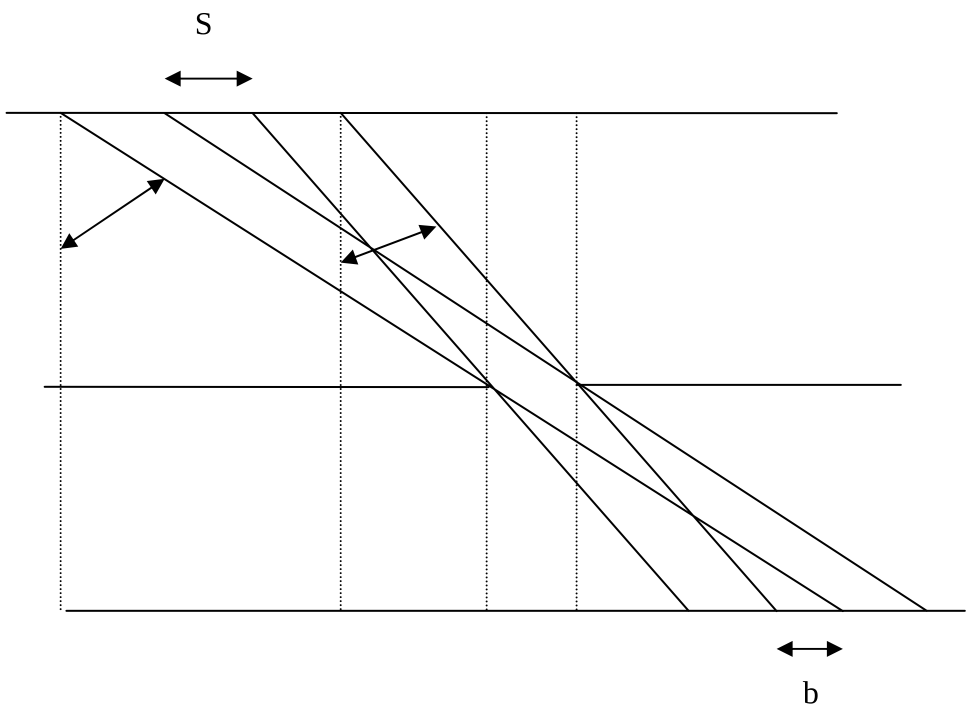
Or, les énergies doivent s’additionner et la forme de 2 créneaux côte à côte devient :



On voit donc que l'image est très déformée et présente des niveaux supérieurs au créneau de base.
Pour que la forme soit respectée au plus près, il faut que la distance entre les 2 créneaux soit égale au flou calculé. On aura ainsi le schéma suivant :



En reconstituant la construction de l'image, on a :



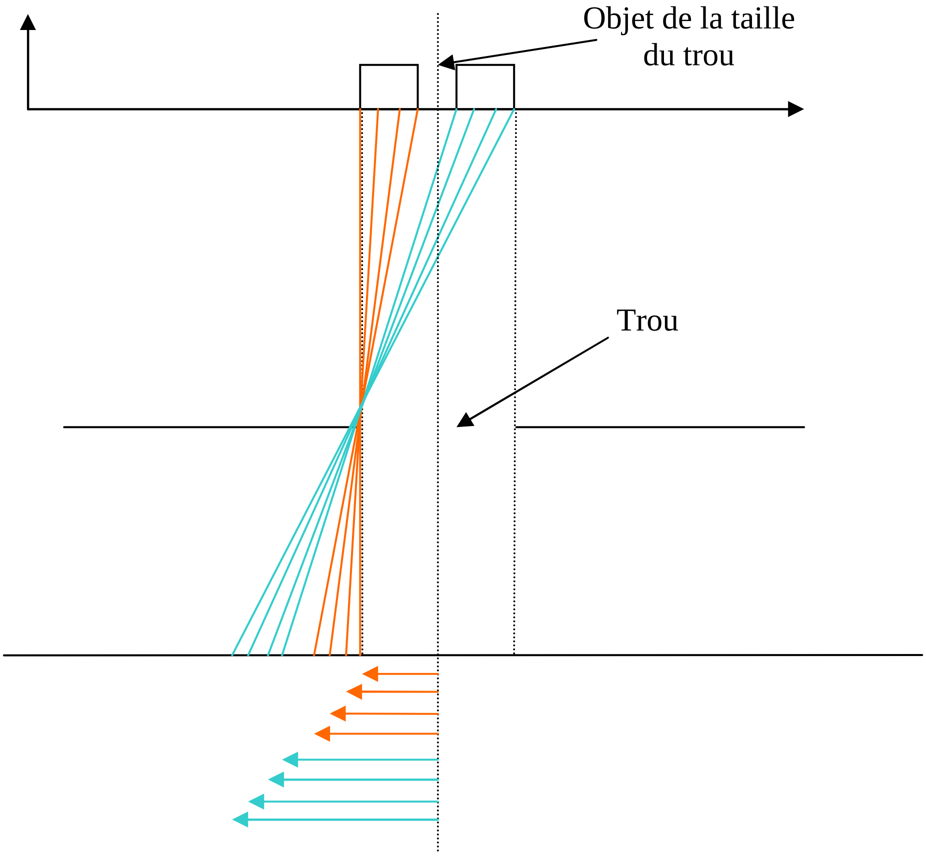
En calculant S en fonction de b, on trouve tous calculs faits :

$$\boxed{S = \frac{d \times L}{l}}$$

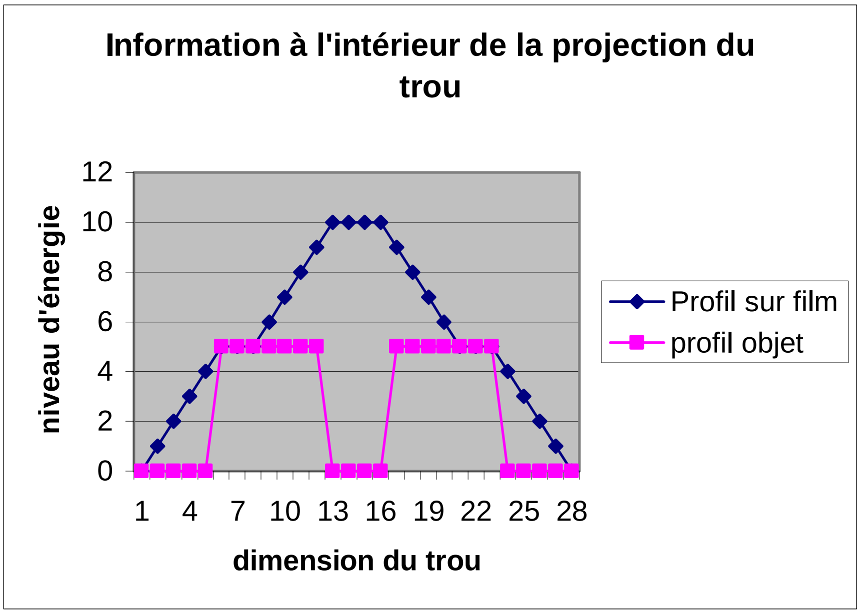
Physiquement cela veut dire que le pouvoir séparateur est au maximum égale à S et est fonction directement du diamètre du trou et de l'inverse du grandissement. On ne peut pas dissocier 2 éléments sur l'objet distants d'une valeur inférieure à S.

7.4. Phénomène observé dans la projection du trou

Le problème posé est de savoir ce qui se passe réellement à l'intérieur de la projection du trou. A-t-on une information fiable. Si l'objet émet une information dans une surface correspondante au diamètre du trou, on a le schéma suivant (en ne montrant qu'une partie symétrique) :



On obtient donc les formes suivantes :



On voit donc que l'information projetée par le trou est très différente de la réalité. L'image est reconstituée par la juxtaposition séquents de surfaces élémentaires. Bien entendu l'énergie est conservée. Pour éviter que la dimension du trou apporte des informations erronées, il paraît indispensable de réduire au maximum sa taille.

7.5. Influence de l'épaisseur de la plaque

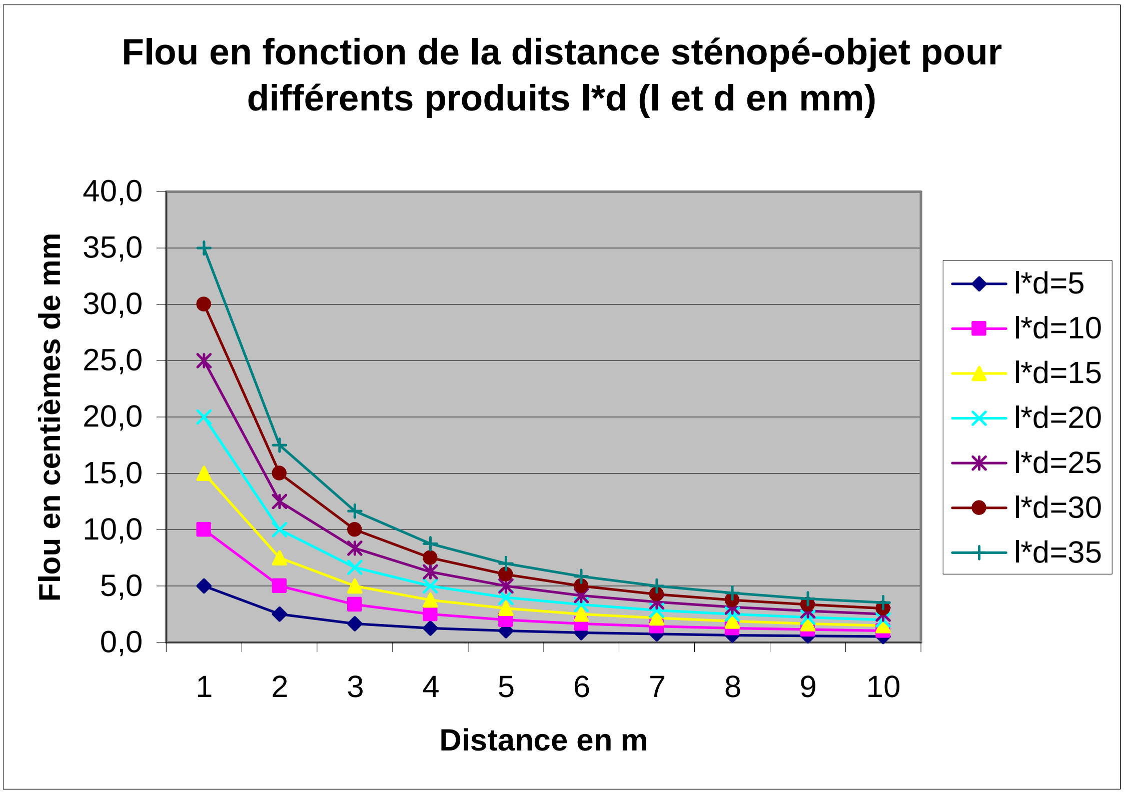
En reprenant le même raisonnement mais en prenant en compte une épaisseur de plaque et en faisant quelques hypothèses simplificatrices (valeurs très petites devant d'autres), on démontre que le flou est très peu différent de :

$$b = \frac{d \times l}{L}$$

On retrouve la formule d'**Hélios**.

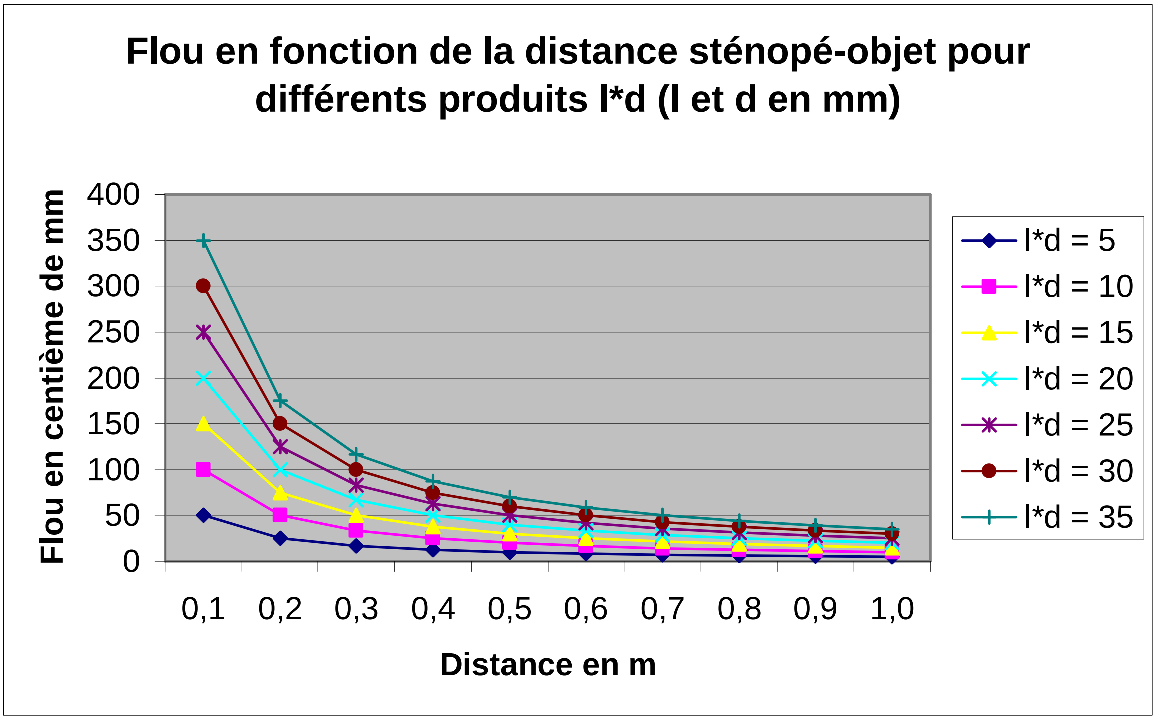
7.6. Abaques pratiques

Afin de faciliter l'exploitation, il est pratique de donner des abaques représentatifs de la formule d'Hélios :



Les différentes courbes sont données pour une constante de construction qui est le diamètre du trou multiplié par la distance trou-film.

Ces courbes montrent que le flou augmente pour les faibles distances de prise de vue. Il n'est pas facile de photographier à moins de 1 m. Mais l'on peut donner les valeurs pour les distances inférieures à 1 m.



On voit que l'on atteint des valeurs importantes qui peuvent peut-être plaire aux artistes.
Dans les 2 cas, il s'agit bien du flou sur le négatif.

8. Temps de pose

Le temps de pose est un paramètre très important pour obtenir une qualité de photographie satisfaisante car on a des limites qu'il ne faut pas dépasser. Par exemple si l'exposition est trop longue, c'est-à-dire l'apport d'énergie est trop grand, il y a saturation sur les parties les plus claires de l'objet. Le rapport entre les parties claires et foncées ne sont plus les réelles et la photographie paraît flou. Le film est donc un capteur d'énergie non linéaire.
Deux paramètres semblent importants dans l'analyse du phénomène :

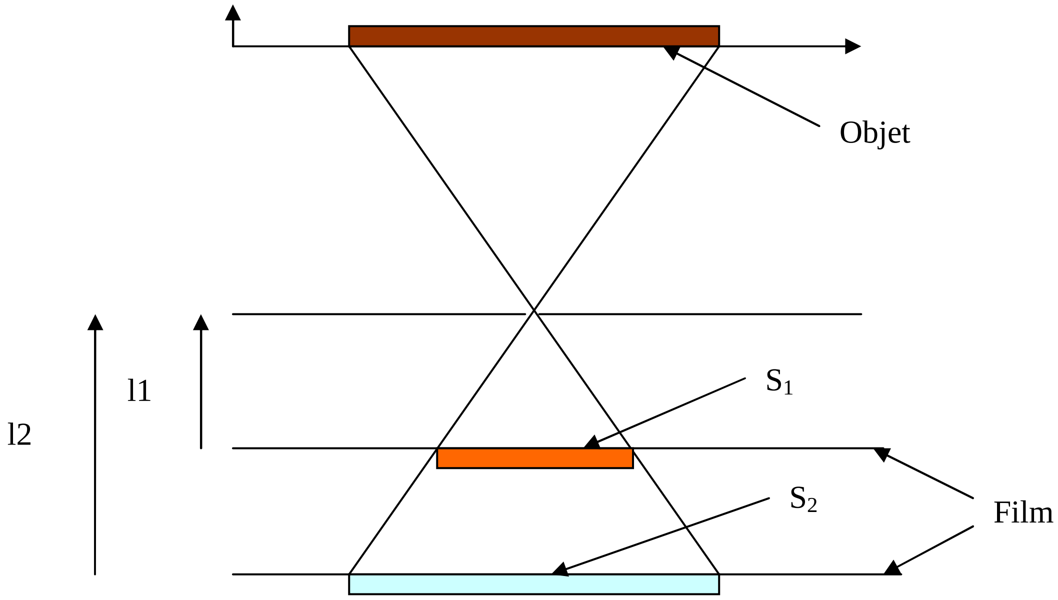
- la distance trou-film
- le diamètre du trou

Le paramètre le plus global est la distance trou-film. En effet, l'énergie totale reçue sur le film est la somme de toutes les énergies élémentaires de l'image passant par le trou pendant un temps donné. Si l'on raisonne à partir d'énergies surfaciques :

$$E_S = \frac{E_g}{S}$$

S étant la surface exposée du film, Eg l'énergie globale passant par le trou et Es l'énergie par unité se surface sur le film

La surface exposée dépend de la distance trou-film :



Si on éloigne le film du trou, on aura toujours la même énergie passant par le trou (pour les faibles distances, il n'y a pas de perte d'énergie dans l'air) et l'on peut écrire :

$$E(S_1) = \frac{E_g}{S_1}$$

$$E(S_2) = \frac{Eg}{S_2}$$

D'où

$$\frac{E(S_1)}{E(S_2)} = \frac{S_2}{S_1}$$

en raisonnant pendant un temps donné.

Pour que les images soient identiques sur S_1 et S_2, il faut que les temps d'exposition soient dans le rapport inverse des énergies surfaciques, d'où on a :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{S_2}{S_1}$$

En calculant *S* en fonction de *l*, on a :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{L^2{}_2}{L^2{}_1}$$

Ou

$$\boxed{T_2 = \frac{T_1 \times L_2{}^2}{L_1{}^2}}$$

Pratiquement ceci veut dire que lorsque l'on double la distance trou-film, le temps d'exposition doit être multiplié par 4.

Pour ce qui concerne le diamètre du trou, un raisonnement similaire peut être fait et l'on peut considérer que l'énergie est directement fonction du diamètre du trou et donc les temps de pose relatifs entre des trous de diamètres différents sont :

$$\boxed{T_2 = \frac{T_1 \times \Phi_1^{\,2}}{\Phi_2^{\,2}}}$$

Lorsque l'on double le diamètre du trou, tout étant égal par ailleurs, le temps doit être divisé par 4 ou vis versa.

Il est bien évident que ces formules sont exactes si et seulement si le phénomène d'accumulation de l'énergie par le film est un phénomène linéaire ce qui n'est probablement pas le cas. Par contre, on peu considérer que cette hypothèse est exacte si les écarts ne sont pas trop importants.

Par rapport à un trou de diamètre donné (référence 1), les coefficients multiplicateurs pour les rapports diamètre initial sur diamètre utilisé sont les suivants :

Rapport des diamètres	0.1	0.25	0.5	**1**	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Coefficient multiplicateur	0.01	0.06	0.25	**1**	2.25	4	6.25	9	12.25	16	20.25	25

La valeur absolue du temps de pose est directement fonction de la nature du film utilisé et fait partie du savoir faire du photographe mais reste relativement grande par rapport à un système classique photographique à objectif.

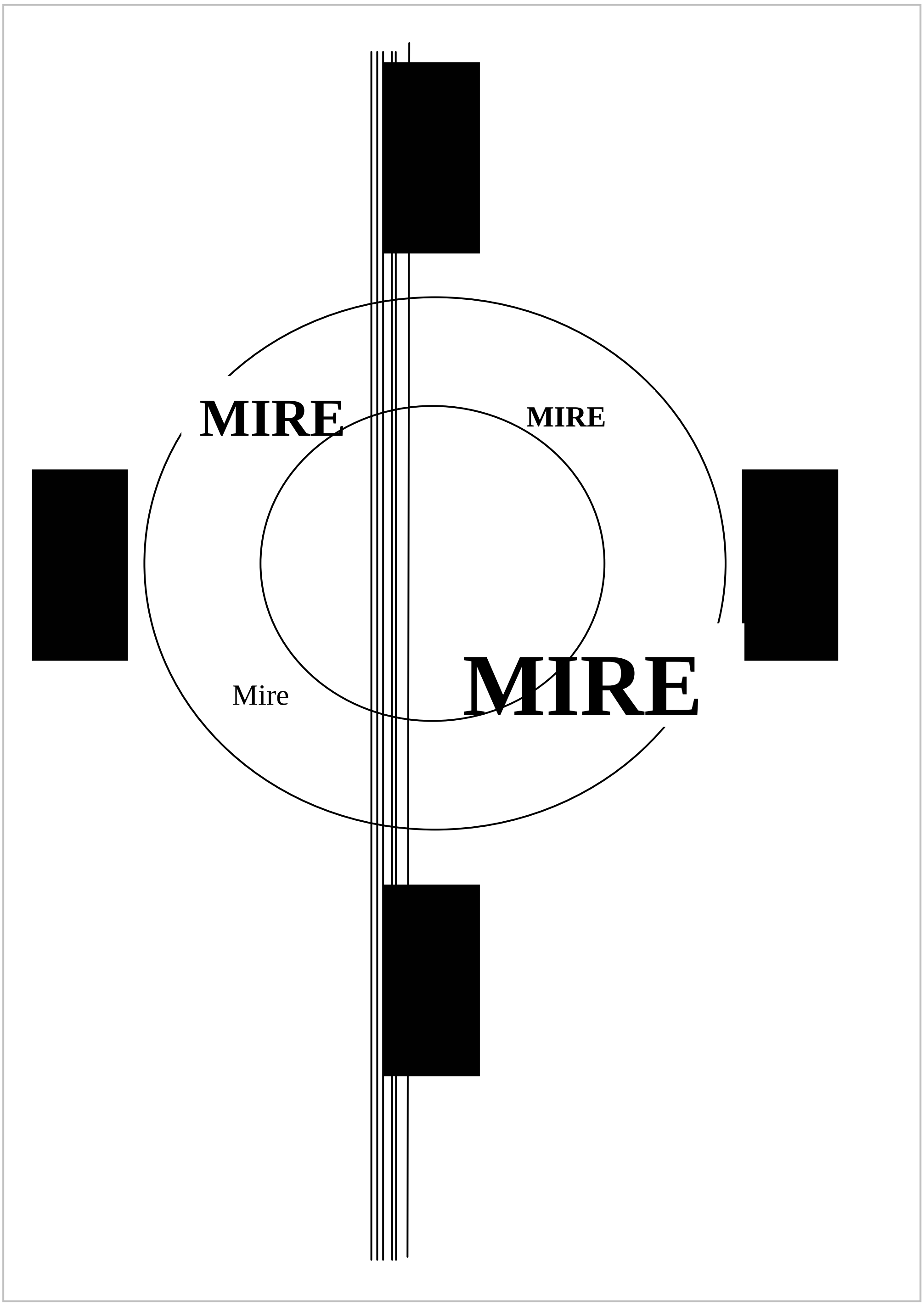
9. Validité des formules :

Comme toutes théories qui sont toujours basées sur des hypothèses, il est nécessaire de vérifier si ce que l'on a calculé est bien la réalité. Il faut absolument revenir sur le plancher des vaches !!

9.1. Grandissement

Il est très simple de vérifier la formule G = L / l. En photographiant une mire placée à une distance L du trou connaissant la distance trou-film, on mesure la dimension de l'objet sur la mire et sur le film. Les rapports doivent être identiques.
On peut aussi vérifier la formule avec des distances beaucoup plus grandes, en exploitant les caractéristiques du sténopé situé dans la cathédrale St Pierre de Bologne et utilisé comme « marque-midi » (voir document de Eric Renner). Le sténopé est situé à environ 36 m du sol et forme une image du soleil d'environ 30 cm. Sachant que le diamètre du soleil est de 1.39 million Km et la distance soleil-terre de 149.5 millions de Km, tous calculs faits, on trouve un diamètre théorique d'environ 33 cm pour 30 cm réellement soit une différence de 10% ce qui est très satisfaisant compte tenu des différentes incertitudes sur les données.

La formule a été vérifiée avec précision avec une distance trou-objet de 75 mm pour une distance trou-film de 60 mm. L'objet était la mire suivante :



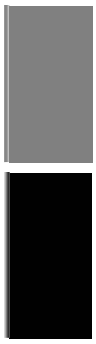
Les rapports ont donné des résultats strictement identiques.

9.2. Netteté

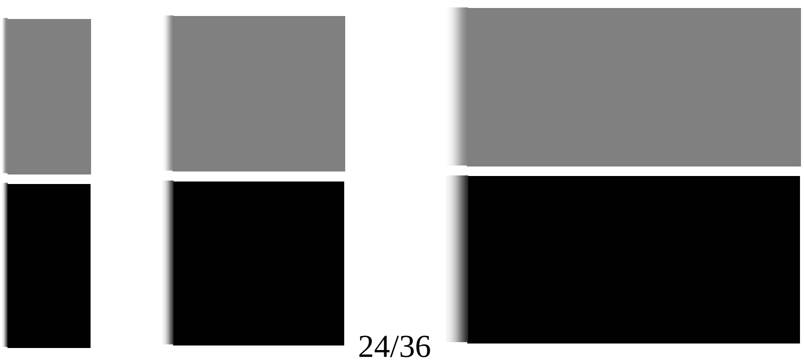
La netteté est une valeur qui est plus difficile à évaluer car elle fait appel à des critères pas toujours objectifs. Et dans ce cas, il faut vérifier la formule $\boxed{b = \frac{d \times l}{L}}$ donc faire varier les

différents paramètres et notamment la distance trou-objet ; les autres paramètres sont plutôt des paramètres de construction.
Comment vérifier sans trop d'erreurs cette formule ?
La meilleur façon est de partir de la photographie d'une mire en noir et blanc, sur laquelle on ne retrouve que 2 couleurs, le noir et le blanc sans couleur intermédiaire.
Mais que peut estimer vraiment l'œil ?
Pour le savoir, il suffit de prendre l'exemple d'un quadrilatère sur le bord duquel on ajoute un flou très simplement en utilisant les possibilités de Word, comme il est montré ci-après :

Deux niveaux d'exposition ont été pris, pour vérifier que le temps de pose n'est pas trop influent.
On constate avec une échelle très dilatée un flou de 1 cm environ sur le bord gauche et nul sur le bord droit avec une longueur du quadrilatère d'environ 145 mm.
Si l'on divise l'échelle par 10, on devrait retrouver un flou de l'ordre de 1mm :

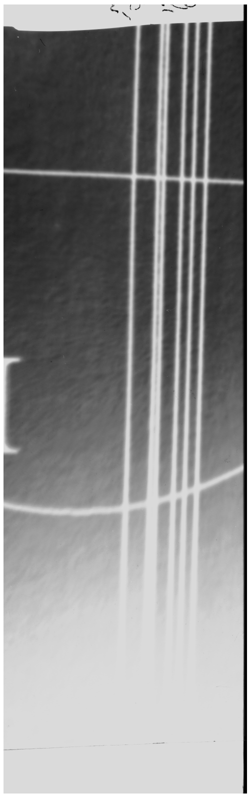


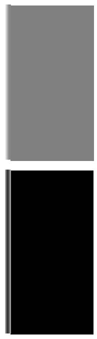
On observe que, dans les 2 cas qu'il est difficile de mesurer un flou de 1 mm, bien que l'on note que la partie droite est plus nette que la partie gauche.
Il faut donc essayer de vérifier la formule avec des flous plus importants que 1 mm. Si l'on reprend la formule, il faut travailler avec des trous relativement grand et une distance un l/L < 1. On peut comparer par exemple des images avec des flous de 1,2 et 4 mm mais les évaluations sont toujours un peu suggestives :



Les essais ont été réalisés avec un trou de à 0.3 et 0.9 mm et des distances trou-objet de 30 et 60 mm et avec une distance trou-film de 60 mm (au-delà de 100 mm, les mesures ne sont plus possibles et sont plus subjectives qu'objectives). Compte tenu des distances très faibles de prise de vue et des moyens utilisés, le cadrage et la mesure des distances trou-objet ne sont pas précis mais suffisants pour valider les formules.
Les différentes photographies données ci-dessous ont été scannées directement sur le négatif (scannage partiel compte tenu de l'équipement disponible).

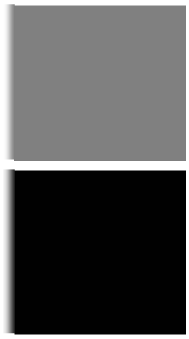
Enregistrement 1 : Trou de 0.3 mm – distance trou-objet de 30 mm.





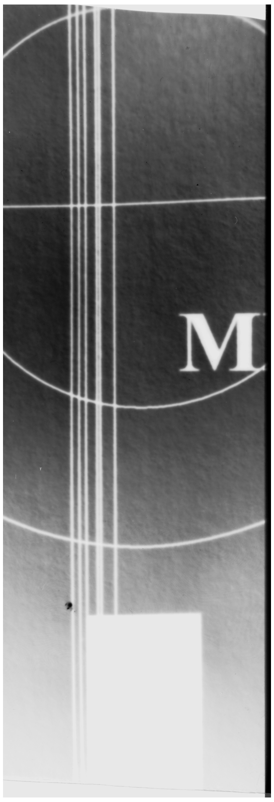
En reprenant la simulation montrée plus haut pour la valeur de 1 mm de flou, il semble qu'en examinant les différents traits, que le flou obtenu sur la photo est un peu inférieur à la simulation, la référence étant la mire figurant en 9.1. Le grossissement de l'objet est de 2 ce qui donne des trait plus épais.
Si l'on effectue les calculs d'après la formule d'Hélios, on trouve f = 0.6 mm, ce qui est du même ordre de grandeur. Vers les bords de la photographie, il semble que les traits deviennent plus épais mais l'arrière plan est beaucoup plus clair.

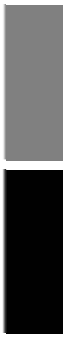
Enregistrement 2 : Trou de 0.9 mm – distance trou-objet de 30 mm.



En reprenant la même analyse que précédemment mais en comparant avec la simulation du flou de 2 mm, on constate que le flou sur la photographie semble du même ordre de grandeur. Si l’on effectue le calcul, on trouve 1.8 mm. Ici également le phénomène de flou fait apparaître les traits nettement plus épais.

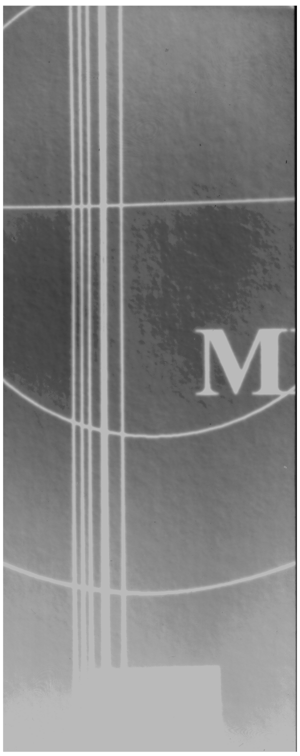
Enregistrement 3 : Trou de 0.3 mm – distance trou-objet de 60 mm.

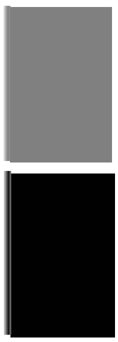




Pour cette distance trou-objet, on constate très peu de flou qu'il est difficile de comparer avec la simulation d'un flou de 0.5 mm. Si l'on calcule le flou par la formule d'Hélios, on trouve une valeur f = 0.3 mm.

Enregistrement 4 : Trou de 0.9 mm – distance trou-objet de 60 mm.





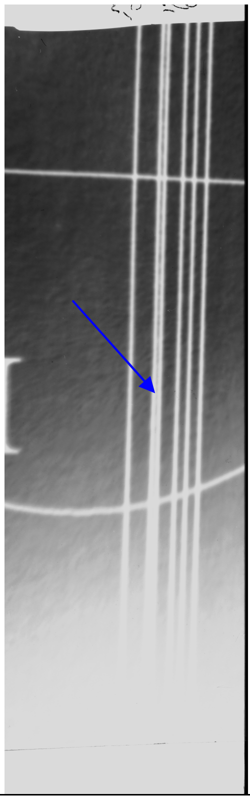
En comparant cet enregistrement avec le précédent, on peut constater une légère augmentation du flou qu'il est difficile de quantifier. Il semble cependant qu'il soit du même ordre de grandeur que celui de la simulation (1mm), le calcul donnant 0.9 mm.

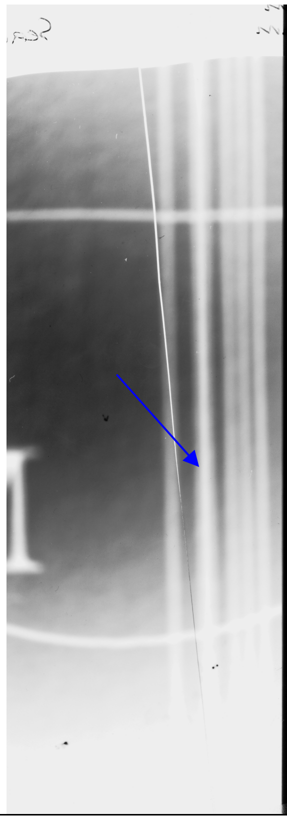
Dans tous les cas analysés, la formule d'Hélios semble convenir. Il faut toutefois noter qu'en dessous d'un flou de 1 mm, il est difficile de faire une mesure et que seul une appréciation visuelle est possible. Le temps d'exposition est un facteur qui entraîne des difficultés dans la comparaison des résultats surtout si les flous ont de faibles valeurs et la photographie sous exposée..

Il semble bien clair qu'au-delà d'une distance trou-objet de 2 à 3 fois la distance trou-film et pour des trous de diamètre inférieur à 0.5 mm, le flou peu être considéré comme négligeable.

9.3. Evaluation du pouvoir séparateur

Pour évaluer le pouvoir séparateur, on va reprendre les photographies précédentes et l'on va exploiter la distance entre les traits.





Trou = 0.3 mm Trou-film = 60 mm Trou-objet = 30 mm		Trou = 0.9 mm Trou-film = 60 mm Trou-objet = 30 mm

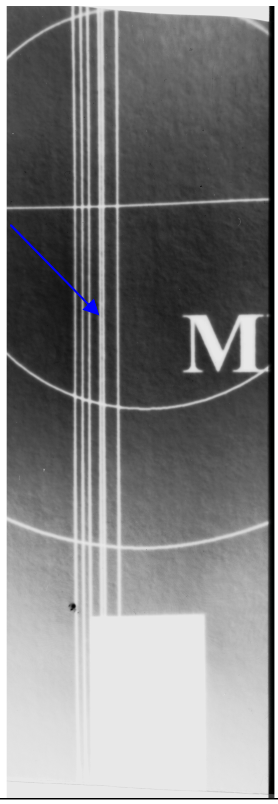
En mesurant sur la mire-objet la distance entre les 2 trait marqués par les flèches ci-dessus, on trouve une distance de l'ordre de 0.3 mm.

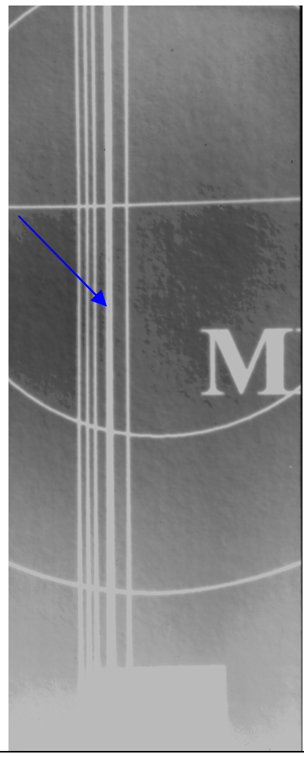
En examinant les photographie on voit que les 2 traits sont dissociables sur la photographie de gauche et indissossiable sur celle de droite. Dans les 2 cas analysés, en calculant le pouvoir séparateur, on trouve :

Trou de 0.3 mm, S = 0.15 mm
Trou de 0.9 mm, S = 0.45 mm.

Comme la distance réelle entre les traits est de 0.3 mm, théoriquement il est possible de les dissocier avec un trou de 0.3 mm et impossible de les dissocier avec un trou de 09 mm. Les photographies démontrent que c'est bien le cas.

En prenant les photographies prises à 60 mm :





Trou = 0.3 mm Trou-film = 60 mm Trou-objet = 60 mm		Trou = 0.9 mm Trou-film = 60 mm Trou-objet = 60 mm

Les valeurs calculées de S sont dans ce cas :

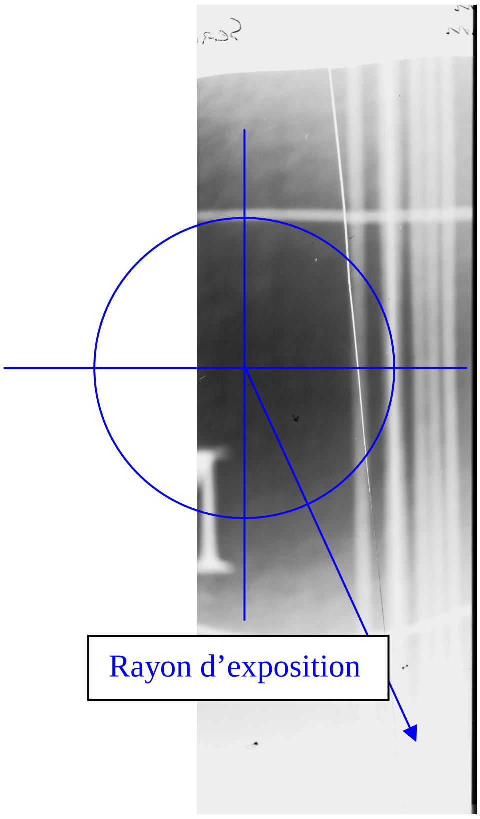
Trou de 0.3 mm, S = 0.3 mm
Trou de 0.9 mm, S = 0.9 mm

Dans les 2 cas, il est impossible de dissocier les 2 traits distants réellement de 0.3 mm ce qui valide la formule du pouvoir séparateur.

Cette validation permet de valider une deuxième fois la formule d'Hélios car le pouvoir séparateur est basé sur la valeur du flou calculé par cette formule.

9.4. Vérification des aspects énergétiques :

On peut commencer à vérifier le réseau de courbes donné en paragraphe 5. Pour cela on reprend les photographies figurant en 9.1.

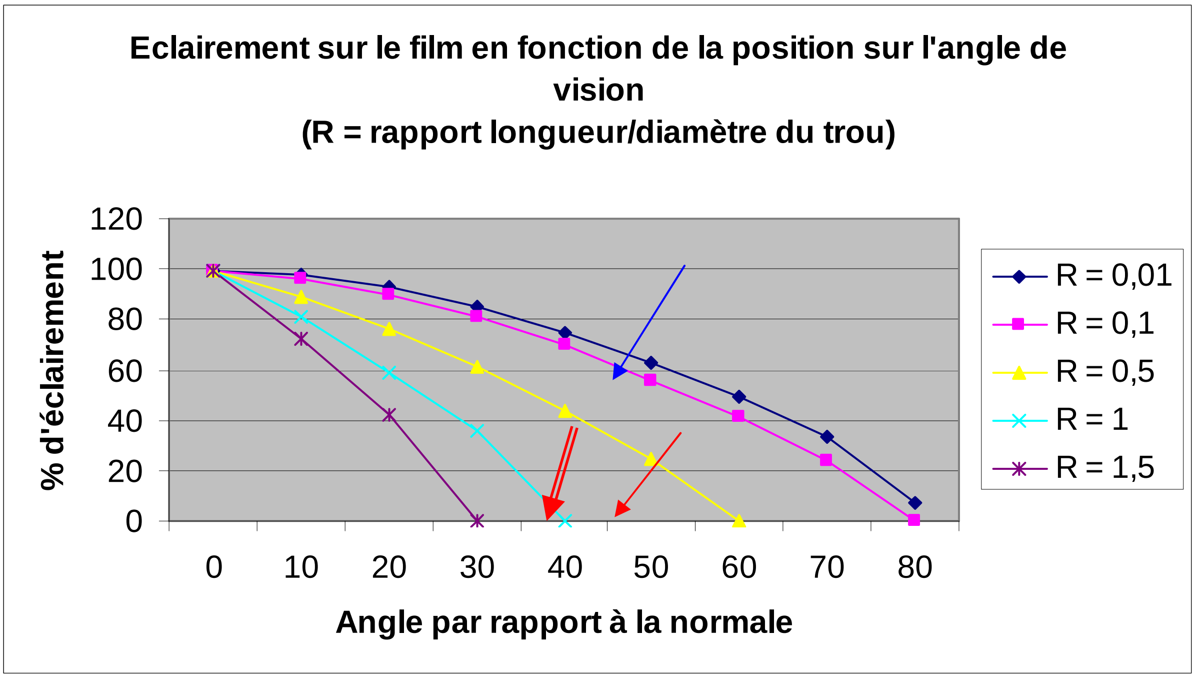


Trou : 0.3 mm
Trou-objet : 30 mm
Trou-film : 60 mm
Longueur trou : 1 mm

On constate une partie centale presque noire qui s'aténue vers l'extérieur pour arriver à une partie transparente (partie du film ne recevant pas d'énergie). Le centre le plus exposé (niveau de gris foncé à peu près constant) peut être visualisé par le cercle et le rayon d'exposition donne la zone d'exposition totale. En dehors le film ne reçoit plus d'énergie.

En mesurant ce rayon, on peut calculer l'angle en-dehors duquel le film ne reçoit plus d'énergie (Arctg (63/60)). On trouve une valeur de 46° environ.

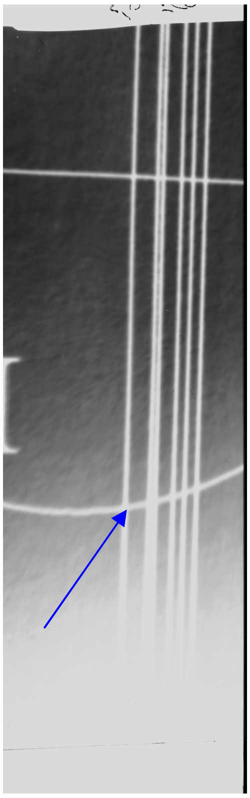
Si l'on reprend le diagramme du paragraphe 5 et que l'on calcule le rapport R qui est dans le cas présent de 1/0.9 = 1.11 on est sur le graphe sur la position suivante :



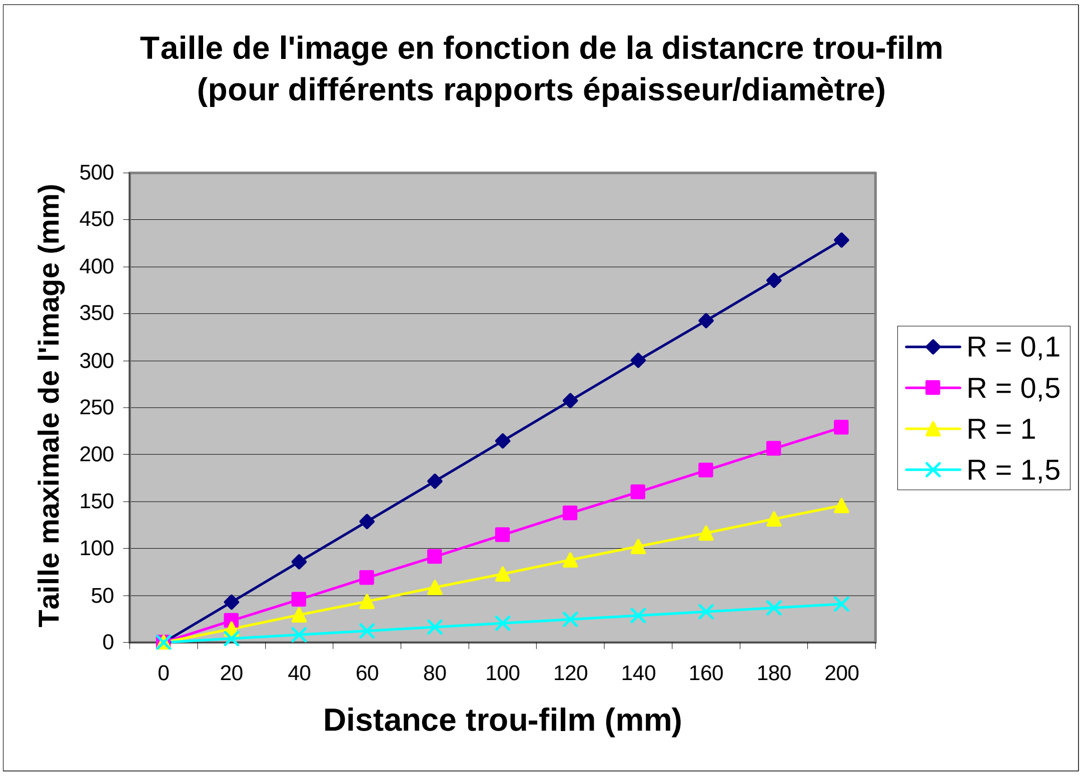
La valeur calculée à partir du film est située sur l'axe X (flèche rouge simple) alors que la valeur théorique est la flèche rouge double. Les deux valeurs sont relativement proches ce qui valide la théorie.

A partir de la photographie et en considérant qu'à l'intérieur du cercle l'exposition est à peu près constante on peut calculer la position extrême de l'angle qui permet une photographie homogène. La valeur calculée est de 20° environ ce qui donne un seuil d'éclairement de 60% environ.

En reprenant la photographie faite avec un trou de 0.3 mm, on voit que la partie à peu près constante en éclairement est limitée au premier cercle de la mire.



Ce cercle ayant un rayon d'environ 60 mm, l'angle est de 45°. Si l'on se reporte aux courbes avec R = 0.16, c'est-à-dire proche de la courbe R = 0.1, la valeur de l'éclairement est d'environ 60% (flèche bleu). Ceci confirme la valeur précédente et signifie que pour ce type de film, on peut se permettre des écarts d'éclairement de 40%.
On peut donc donner des dimensions maximales d'image sur le film en fonction de la dimension trou-film. Les résultats figurent dans le graphe ci-après :



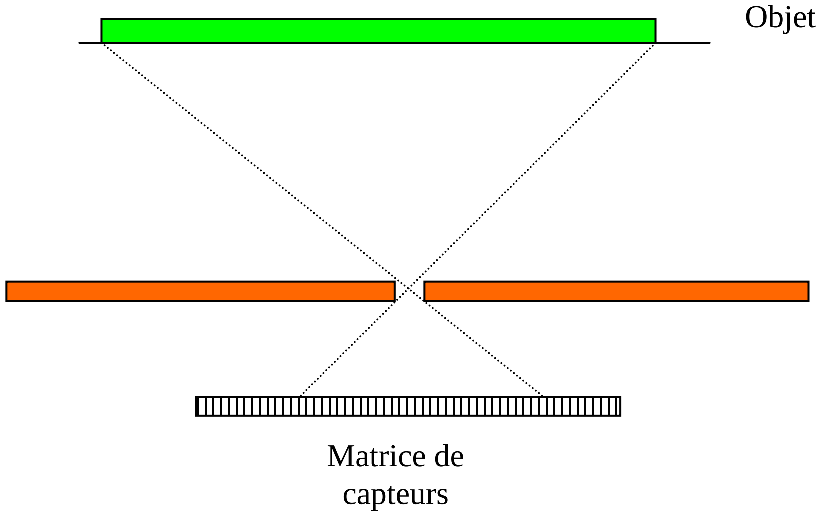
On peut donner les résultats en terme d'angle maximal de vision:

R =	0.1	0.5	1	1.5
Angle de vision	95°	60°	40°	30°

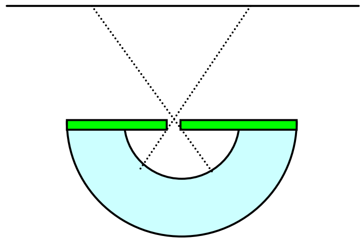
Au-delà de ces angles la photographie ne représentera plus la réalité.

10. Développements futurs

Le principal défaut du sténopé classique est son temps d'exposition relativement long qui peut entraîner des flous et interdit la prise en compte d'objets en mouvement rapide.
Le développement des caméras numériques apporte probablement une solution au problème. En effet, les sensibilités des capteurs d'énergie sont très grandes ce qui permet de filmer ou photographier pratiquement de nuit, ce qui est loin d'être le cas pour un appareil photographique classique.
La grosse différence entre un film et un capteur d'appareil numérique est que le capteur fonctionne à un niveau d'énergie et n'est pas fonction du temps d'exposition, alors que le film est un accumulateur d'énergie qui se sature à un niveau donné.
Il n'y a pas a priori de raison physique pour qu'un système numérique ne puisse pas être utilisé. On aurait donc le schéma suivant :



Il n’y aurait aucune différence de principe entre les 2 procédés et toutes les formules décrites sont applicables.
La seule différence est la définition de la matrice qui pourrait apporter un flou supplémentaire. Mais si les capteurs unitaires ont une taille de l’ordre de 0.01 mm (environ 1000 x 1000 pixels par cm²), le flou reste du deuxième ordre par rapport au flou de principe du sténopé. Mais il ne faut pas oublié que la matrice est très petite donc l’image est très petite. Il faut donc agrandir fortement pour arriver à une image de taille convenable. Pour afficher sur un écran vidéo, il faut au moins agrandir dans un rapport de 20, ce qui multiplie par 20 le flou constaté sur la matrice. Il n’est pas sûr que les matrices d’appareils numériques conviennent. Il serait probablement préférable de disposer de matrices beaucoup plus grandes.
Si l’on a les avantages conservés, les inconvénients le sont aussi. Notamment la diminution de l’énergie en fonction de la position par rapport à la normale sur le plan film. Ceci pourrait en principe être corrigé en amplifiant les niveaux donnés par chaque capteur directement avant restitution de l’image. Cette correction suivrait une loi inverse à celle de l’éclairement en fonction de la position par rapport à la normale (abaque précédent). En effet, les informations que chaque capteur envoie, seraient traitées et il suffirait de multiplier le niveau par un coefficient qui dépendrait bien évidemment des caractéristiques du trou.
On pourrait même en traitant l’information position des capteurs à pouvoir projeter l’image sur un écran semi sphérique par l’intermédiaire d’un projecteur vidéo et créer ainsi une restitution en trois dimensions.
On pourrait avoir la même chose en créant une matrice de capteurs sur une surface semi sphérique et dans ce cas la correction ne devient pratiquement pas nécessaire.



Mais est-il possible de déposer une matrice sur une sphère ?

Ces procédés sont difficiles à mettre en œuvre par un amateur et l'assistance d'un industriel spécialisé est nécessaire.

11. Conclusions

- En analysant le principe du sténopé on arrive à définir des lois qui peuvent être utilisées pratiquement.

- Il faut bien être conscient qu'il n'y a pas *une* solution à *un* problème donné mais que la solution retenue est un compromis entre les principaux paramètres. Tous les paramètres sont liés (épaisseur de la plaque, diamètre du trou, distance trou-film, distance objet-film, nature du film, sensibilité du film, taille du film, taux d'agrandissement de l'image).

Par exemple, la netteté est fonction de la distance de prise de vue, contrairement à ce qui est habituellement écrit. La photographie à courte distance pose des problèmes de netteté et il est alors préférable de travailler avec de très petit trous au détriment du temps de pose.

- On peut aisément éliminer le paramètre épaisseur du trou, en utilisant une plaque d'épaisseur 0.01 à 0.02 mm qui laisse alors une large marge de manœuvre. Au-delà de 1 m, on peut considérer que pour des longueurs trou-film de sténopés portables le flou est pratiquement invisible pour des trous inférieurs à 1 mm.

- Bien que n'apportant pas de distorsion, le procédé sténopé ne peut en aucun cas reproduire parfaitement un objet car il y a décroissance de l'énergie absorbée du centre vers les bords.
C'est comme si le temps de pose était plus faible sur les bords qu'au centre. On peut toutefois considérer qu'une diminution de 40% n'est pas trop visible sur une photographie dans les conditions testées. Ceci reste à démontrer dans d'autres conditions.

- La netteté sur une photographie est en général une notion plus subjective qu'objective et le temps de pose est un paramètre important qui change souvent l'appréciation de la netteté. Les temps longs ne semblent pas le meilleure solution car les perturbations ont des effets plus importants (vibrations, variation d'éclairement, etc.). On a toujours intérêt à travailler avec des trous les plus grands possibles pour le flou souhaité afin de diminuer le temps de pose.

- Pour les artistes aimant les flous, il suffit d'augmenter fortement la taille du trou !

- Malgré des moyens d'investigation rudimentaire, la théorie a été correctement vérifiée.

Les paramètres qui n'on pas été volontairement pris en compte ont des répercussions qui vont, en principe, dans le sens de la dégradation des résultats. Il semble que ce soit des paramètres de second ordre, mais ceci reste à démontrer.

- La solution caméra sténopé numérique semble une solution qui permettrait de développer l'utilisation du sténopé en améliorant les performances (objet en mouvement) et surtout en permettant de l’utiliser dans le cas de vidéo. Il permettrait aussi aux artistes de « travailler » les images à partir de données numériques.

C’est probablement la solution qui «démocratisera » le sténopé.

- Un des problèmes pratiques qui se pose, est la protection du trou afin d’empêcher son obstruction. Peut-être qu’un film transparent pourrait être utilisé (sujet à traiter).

- Il faut être conscient que certaines limites ne pourront pas être dépassées pour des raisons de tenue mécanique des éléments. Une épaisseur de plaque d’un centième de mm et un trou de l’ordre de 5 centièmes à un dixième de mm sont envisageables. En deçà, le sténopé serait pratiquement inutilisable. Pour ne pas trop se poser de question, une épaisseur de plaque de 0.01 mm doit être utilisée.

11. Références

Pinhole photography de Eric Renner