1 GENERALITES

1.1 OBJET DU DOCUMENT

Rassembler un ensemble documentaire sur les sujets :

- Objectifs
- Mise au point
- Profondeur de champ
- etc.

Le document ne vise pas à plagier une documentation en ligne déjà riche sur le sujet mais à proposer :

- Un accès ciblé à cette documentation, éventuellement en la complétant
- Des compléments originaux.

1.2 ABREVIATION

- APN Appareil Photo Numérique
- MAP Mise au point
- PDC Profondeur de champ
- APS-C Un APS-C est le montage d'un capteur de taille réduite dans un boitier dont le tirage optique et la monture d'objectifs sont les mêmes que sur un boitier 24 x 36.
-

2 LOI DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE

2.1 MODELISATION D'UN OBJECTIF

Un objectif photographique est un ensemble optique très complexe rassemblant de nombreuses lentilles et des dispositifs mécaniques. Dans ce formulaire d'optique géométrique, les propriétés optiques essentielles vont être rattachées à une lentille mince convergente. Du moment où on ne fait passer la lumière que dans un sens (cf 3.3.4), il s'agit plus d'une modélisation que d'une simplification et nous montrerons, par des expérimentations pratiques, l'application à l'objectif réel.

La lentille mince présente :

- En son centre : le centre optique O

- Un point particulier où va converger la lumière venant de l'infini : le foyer F

2.2 LOI DE LA CONSTRUCTION DES IMAGES

2.2.1 Les rayons

La règle de construction des images, en optique géométrique, est très simple :

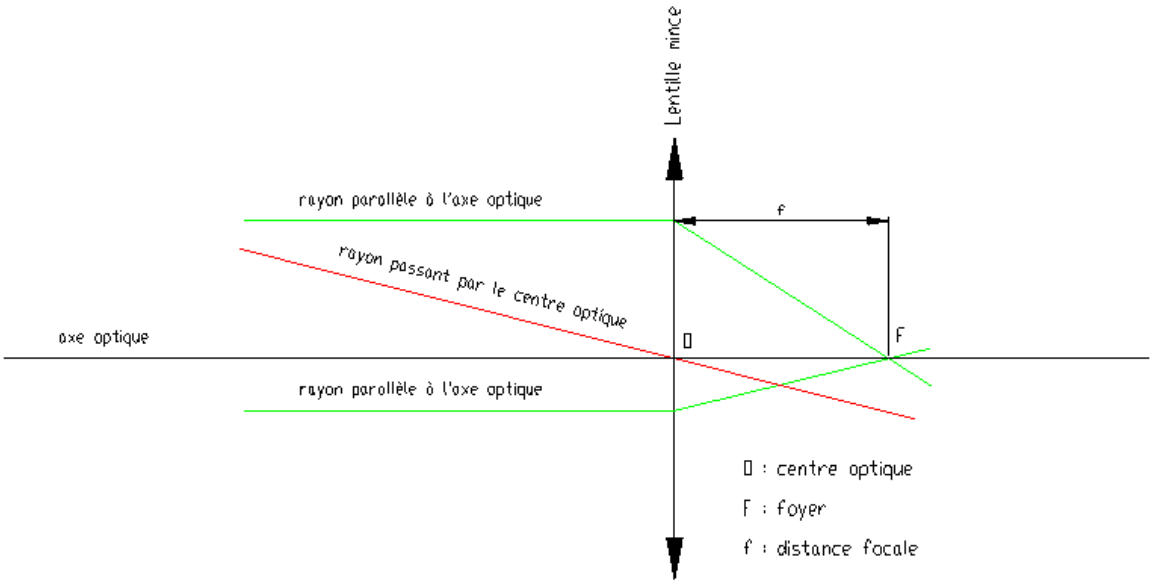


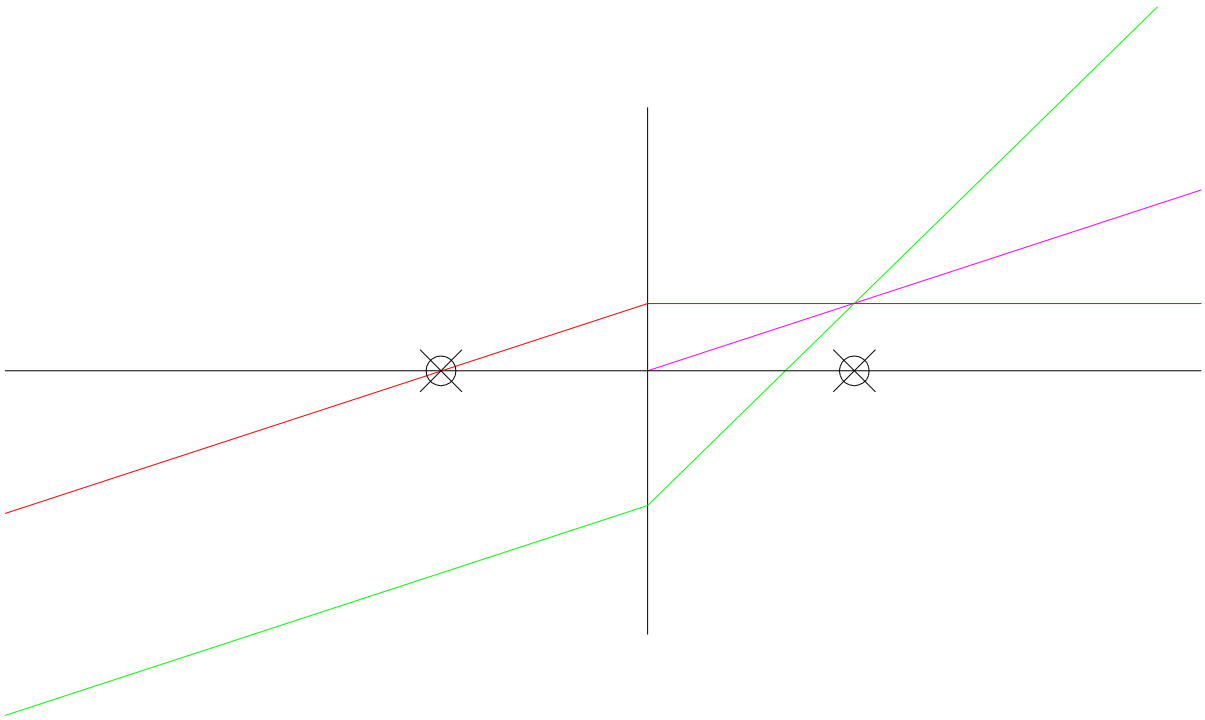
Figure 1 lentille mince, loi de construction des images

- Les rayons lumineux entrant parallèles à l'axe optique en ressortent de façon à passer par le foyer de la lentille
- Les rayons lumineux passant par le centre optique de la lentille en ressortent non déviés.

2.2.2 Les faisceaux

En fait la loi de construction des rayon se généralise : un faisceau de rayons parallèles, frappant une lentille, en ressort convergeant sur le plan focal. Cette loi de construction est fondamental parce qu'elle permet de tracer le parcourt de tout rayon quelque soit sont incidence avec la lentille

Exemple :



Question : le rayon vert venant de gauche comment va-t-il sortir, à droite, de la lentille.

Solution : on trace le rayon violet, parallèle au rayon vert et qui passe par le centre optique. Il forme donc un faisceau incident qui converge sur le plan focal. On notera qu'il en est de même pour le rayon parallèle rouge qui passe par le foyer de gauche et qui ressort donc parallèle à l'axe optique. On peut donc alors tracer le rayon vert à droite de la lentille qui doit passer par ce point de convergeance.

2.3 FORMULE DE CONJUGAISON DITE RELATION DE DESCARTES

2.3.1 Relation de Descartes

On notera :

- p : la distance entre le centre optique et l'objet
- p' : la distance entre le centre optique et l'image

Le tracé de la construction visible est en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, plus loin. On utilise la notion de mise au point (MAP) pour indiquer une combinaison de p et p' faisant apparaitre l'image de l'objet nette. Dans nos applications photographiques on utilisera régulièrement la distance d = p+p' entre l'objet et le plan du capteur. Quand on décide de photographier un objet et qu'on installe, par exemple l'APN sur pied, c'est cette distance d qui va rester constante lors de la MAP et l'opérateur va modifier p' pour faire apparaître l'image nette; cette modification de p' engendre évidemment un modification[1] de p puisque p+p' est

[1] Dans le cas général (hors proxi et macro) p' >> p et la modification relative de p est faible.

constant[a]. Cette distance d est concrètement mesurable car le plan du capteur est repéré sur le côté de l'APN.

Dans l'étude géométrique on essaiera, autant faire que se peut, de ne pas introduire d'approximation afin de conserver le plus longtemps possible des formules générales s'appliquant à tout les cas de figure.

- **F** est le foyer de la lentille mince
- **O** est le centre optique.
- L'objet est **B** de hauteur **b**
- Son image sur le capteur est **M** et sa hauteur **m**.

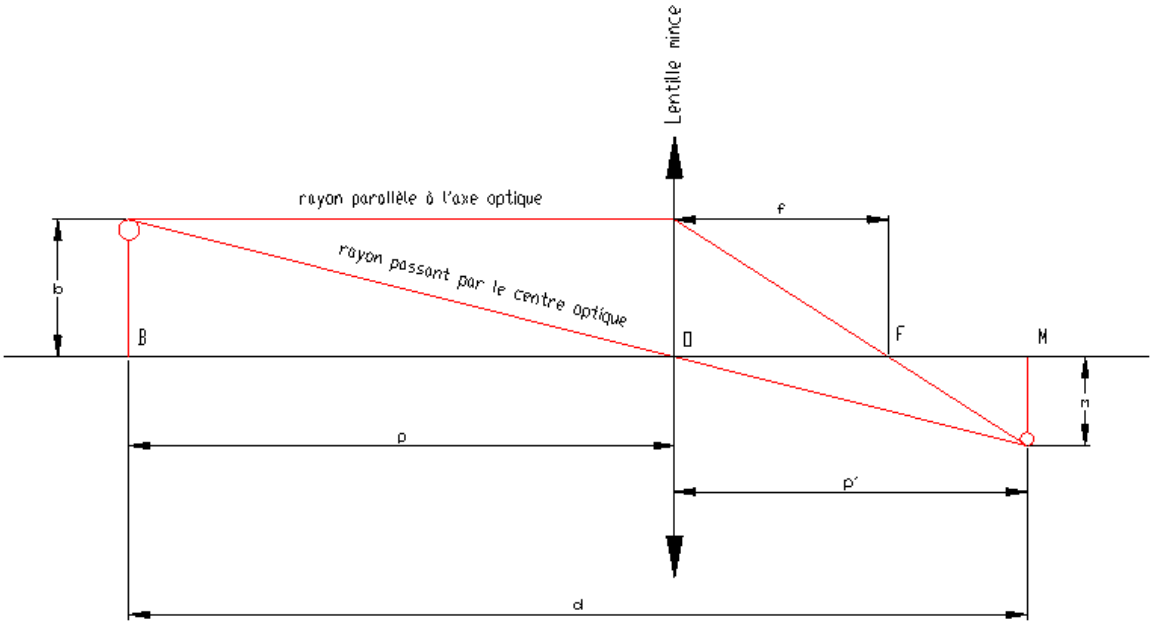


Figure 2 Convention de nommage

On remarque sur la Figure 2 que la construction n'est possible que si p>f; sinon les deux rayons rouges ne convergent pas à droite de la lentille. Le cas de p<f correspond à un fonctionnement en loupe de la lentille mince qui ne produit alors plus une image réelle[2] (visualisable sur le capteur). En photographie on reste toujours avec p>f de façon à produire une image réelle sur le capteur.

Le capteur est déplacé de façon que l'image de l'objet soit net sur lui. Alors, les rayons venant de B, parallèles à l'axe optique passent par F et le rayon BO qui passe par le centre optique n'est pas dévié. Quand la MAP est effectuée, la relation algébrique de Descartes s'écrit :

$$\frac{1}{\overline{p}}-\frac{1}{\overline{p'}}=\frac{1}{\overline{f}}$$

[2] Mais une image virtuelle (faisceau divergeant qui lui est observable en y plaçant l'œil).

Communément on oriente :

- l'axe optique (horizontal sur la figure) de gauche à droite
- objet et image sur l'axe vertical du bas vers le haut.

Sur la Figure 2 l'image est réelle (à droite de F) et c'est le cas général en photographie où la formule algébrique devient, en valeur absolue :

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}}$$

C'est celle là que nous utiliserons par la suite. Dans le cas simple de la géométrie de la Figure 2, la relation de Descartes se démontre facilement. La similitude des grands triangles, opposés en O, permet d'écrire :

$$\frac{m}{b}=\frac{p'}{p}$$

La similitude des petits triangles, opposés en F, permet d'écrire :

$$\frac{m}{b}=\frac{p'-f}{f} \text{ donc } \frac{p'}{p}=\frac{p'-f}{f} \text{ soit } p'.f-p.p'+p.f=0$$

$$f.(p+p')=p.p'$$

$$\frac{1}{f}=\frac{p+p'}{p.p'}=\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}$$

2.3.2 <u>Formules déduites</u>

En réduisant au même dénominateur on peut écrire :

$$\frac{p+p'}{p.p'}=\frac{1}{f} \text{ soit } p'.f+p.f-p.p'=0$$

$$\boxed{p=\frac{p'.f}{(p'-f)}} \text{ et } \boxed{p'=\frac{p.f}{(p-f)}}$$

Ainsi que

$$\boxed{d=p+p'=\frac{p.p'}{f}=} \text{ distance objet ◄-► capteur}$$

Pratiquement, en photographie, la position du centre optique de la lentille mince <u>équivalente</u> à l'objectif ne peut être matériellement[3] identifiée. Il est donc pertinent de savoir calculer p et p' en fonction de d et de f.

[3] Dans certain cas ce centre optique peut se situer à l'extérieur de l'objectif.

$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$ et on pose $d = p + p'$ et donc $p' = d - p$

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{d-p}=\frac{d-p+p}{p.(d-p)}=\frac{d}{p.(d-p)}$$

$f.d = d.p - p^2$ soit $p^2 - d.p + f.d = 0$

Il faut donc résoudre cette équation du second degré en p

$$\Delta = d^2 - 4.f.d$$

$$p=\frac{d\pm\sqrt{d^2-4.f.d}}{2}$$

En fait :

$$\boxed{p=\frac{d+\sqrt{d^2-4.f.d}}{2}}$$

et l'autre racine est

$$\boxed{p'=\frac{d-\sqrt{d^2-4.f.d}}{2}}$$

Néanmoins elle suppose que $d^2 > 4.fd$ soit $d > 4.f$. Ce qui veut dire que, hors de la condition $\boxed{d > 4.f}$ il n'y a pas d'image réelle sur le capteur. Mais à quoi correspond ce cas limite $\boxed{d = 4.f}$ alors

$$\boxed{p = p' = 2.f}$$

Si on reporte dans relation géométrique $\frac{m}{b}=\frac{p'}{p}$ alors $\frac{m}{b}=1$ l'image est égale à l'objet (grandissement de 1). Ce cas particulier est réaliste et si on se reporte à ce qui sera exposé en 3.2 il s'agit simplement d'un passage de d par un minimum dans tous les cas possibles de construction de l'image. En fait on a toujours :

$$\boxed{d \geq 4.f}$$

On vérifie au passage que la somme des racines solutions est bien égale à d. Nous le redisons : cette formule n'est valable que si p > f c'est-à-dire qu'on produit une image réelle.

2.3.3 <u>Relation de Newton</u>

C'est une autre expression de la même relation qui peut être trouvé dans la littérature mais qui à priori, ne nous sera pas utile. Dans notre cas d'une image réelle elle s'écrirait :

$$\boxed{(p-f).(p'-f)=f^2}$$

3 DISTANCE FOCALE

Une des propriétés essentielles d'un objectif est sa distance focale. En général cette longueur est indiquée sur l'objectif mais il peut être utile de la mesurer. Pour cela on va photographier avec l'objectif une règle graduée et mesurer la distance entre cette règle et le plan[4] du capteur.

Par commodité la règle est un mètre à ruban qui pend verticalement et on prendra la photo, sur pied, au format portrait (vertical) pour augmenter la précision. Le capteur (22.2 x 14.7 mm - APS-C Canon 1100D), sur sa plus grande longueur fait 22,2 mm. On lira la grandeur de l'objet directement sur la photo et non dans le viseur qui n'est pas plein champ[5].

Figure 3 Exemple de photos de la règle en montage inversé d'un 50 mm

3.1 CALCUL DE LA DISTANCE FOCALE

Reprenons notre figure

[4] la position du plan du capteur est matérialisé en relief, sur le côté de l'APN (marque : -o-)

[5] On peut aussi utiliser le Live-view pour lire directement la longueur avec le zoom et en profiter pour fignoler la MAP

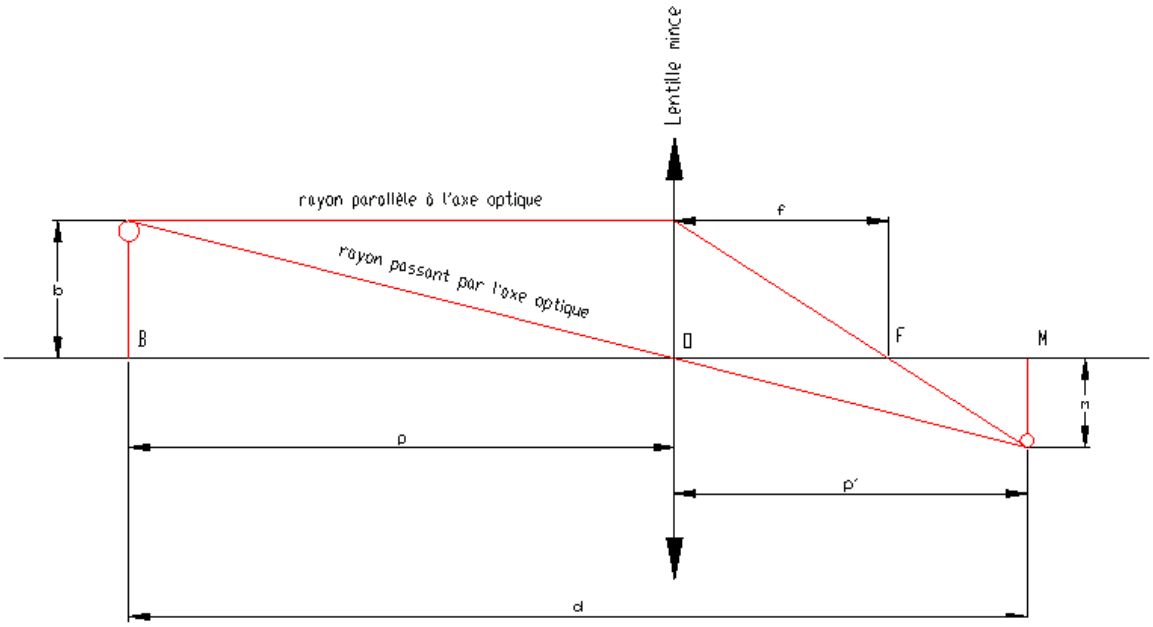


Figure 4 construction géométrique de l'image

Du fait de la similitude des triangles :

$$\frac{p}{p'} = \frac{b}{m} \text{ et donc } \frac{p}{b} = \frac{p'}{m} = \frac{p+p'}{b+m} = \frac{d}{b+m}$$

on en déduit

$$p = \frac{b.d}{b+m}$$

$$p' = \frac{m.d}{b+m}$$

La formule de Descartes permet d'écrire

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{b+m}{b.d} + \frac{b+m}{m.d} = \frac{m(b+m)+b(b+m)}{b.m.d} = \frac{mb+m^2+b^2+mb}{b.m.d} = \frac{(m+b)^2}{b.m.d}$$

Alors $\boxed{f = d.\frac{b.m}{(m+b)^2}}$

Utilisez la feuille Excel « ***Calcul_focale.xls*** »

Cette formule est pratique car on lit b sur la photo et on connait m la taille du capteur. On peut néanmoins faire apparaître le grandissement noté G

On notera que $\frac{p'}{p} = \frac{m.d}{b.d} = \frac{m}{b} = G$

$G = \frac{m}{b}$ exprime le **grandissement** (qui devient plus grand que 1 en macro-photo). Faisons apparaître le grandissement G en remplaçant m dans l'expression ci-dessus

$$f = d.\frac{b.m}{m^2 + b^2 + 2.b.m} = d.\frac{G.b^2}{G^2.b^2 + b^2 + 2.Gb^2} = d.\frac{G}{G^2 + 1 + 2.G}$$

$$\boxed{f = d.\frac{G}{(G+1)^2}}$$

$$\boxed{d = f.\frac{(G+1)^2}{G}}$$

On notera aussi que

$p = \frac{p'}{G}$ alors [2]

et $\boxed{p' = (G+1).f}$ de même $p = \frac{(G+1)}{G}.f$

$$\boxed{p = (\frac{1}{G} + 1).f}$$

donc p' est toujours plus grand que la distance focale. En particulier pour un grandissement de G = 1 alors $p' = 2.f$

Pour fixer les idée, il est intéressant de tracer la variation de d/f[6], , en fonction de G

$$\frac{d}{f} = G + 2 + \frac{1}{G}$$

[6] De façon à normaliser la présentation

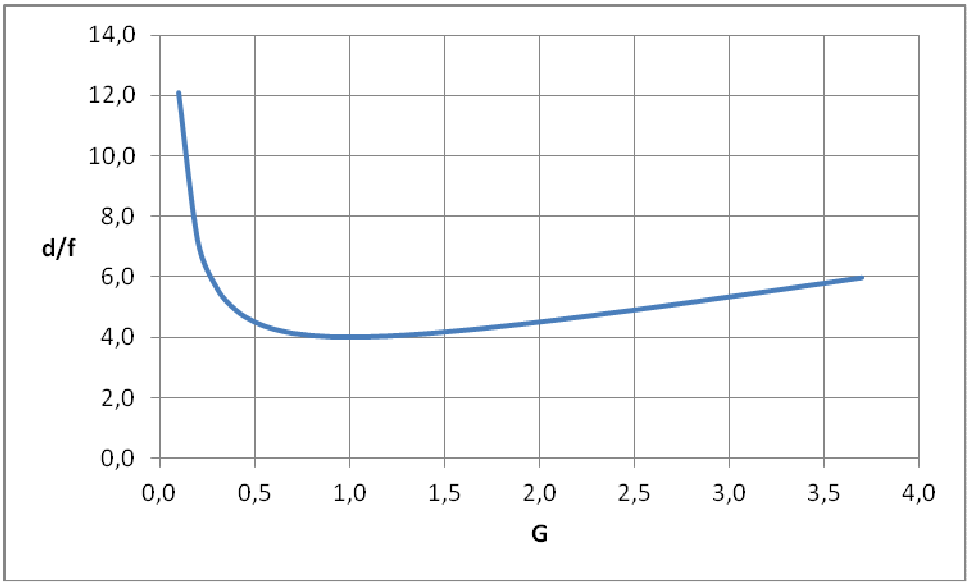


Figure 5 variation de d en fonction du grandissement

On observe qu'en fait, qu'en proxi et macro, d/f varie peu entre 4 et 5

3.2 DIVERSION SUR LE GRANDISSMENT

A partir de la formule ci-avant, on peut aussi exprimer G en fonction des autres paramètres

$f.(G+1)^2 = d.G$ soit $f.G^2 + f + 2.f.G - d.G = 0$

$f.G^2 + (2.f - d).G + f = 0$ équation donc du second degré

$\Delta = (2f - d)^2 - 4.f^2 = 4f^2 + d^2 - 4.f.d - 4.f^2 = d^2 - 4.f.d$

alors $G = \dfrac{d - 2.f \pm \sqrt{d^2 - 4.f.d}}{2.f}$

Pourquoi deux racines ? ceci vient du fait qu'on a choisi d comme variable et non p ou p' (d=p+p'). Il s'en suit que pour une même valeur de d il y a deux grandissements possibles, nous dirons simplement :

- Un grandissement G<1 pour 2f>p'>f (petit tirage)

$$\boxed{G_{g<1} = \frac{d - 2.f - \sqrt{d^2 - 4.f.d}}{2.f}}$$

- Un grandissement G>1 pour p'>2f (grand tirage de la chambre)

$$\boxed{G_{g>1} = \frac{d - 2.f + \sqrt{d^2 - 4.f.d}}{2.f}}$$

- Pour le cas d=2f alors G=1

Ces formules sont intéressantes[7] pour étudier une photographie existante dont les seuls paramètres connus sont la focale et la distance de prise de vue. Il faudra néanmoins être vigilent au voisinage d'un grandissement de 1 car les deux solutions ne sont pas évidentes à discerner.

Utilisez la feuille Excel « ***Grandissement_f(d).xls*** »

3.3 APPLICATION NUMERIQUE

3.3.1 Objectif 50 mm dans le sens normal

Il s'agit d'un ancien objectif pour argentique Pentax 50 mm f/1.7, accouplé à l'APN au travers d'une bague d'adaptation. On s'est mis dans le cas de la distance de MAP minimale et on constate

- d = 455 mm
- b = 147 mm
- m = 22,2 mm

Et on calcule

- f = 52 mm
- p = 395 mm
- p' = 60 mm

On remarque que le grandissement maximum (sans bague allonge) est de 0,151 pour une distance d'approche de 455 mm

3.3.2 Objectif 50 mm dans le sens inversé

Avec le même objectif Pentax 50 mm f/1.7, accouplé au boitier dans le sens inverse au travers d'une bagues dite d'inversion reprenant le taraudage avant de l'objectif, normalement prévu pour un filtre. On constate, là aussi pour la distance minimale de MAP, (Figure 3 Exemple de photos de la règle en montage inversé)

- d = 224 mm
- b = 39 mm
- m = 22,2 mm

On calcule

[7] Le grandissement est un paramètre important dans la prédétermination de la profondeur de champ par exemple. Attention néanmoins aux photographies qui ont fait l'objet, au traitement, d'un *crop*, c'est-à-dire que seule une partie de l'image est présentée; alors les effets du grandissement réel à la prise de vue, peuvent être faussés.

- f = 52 mm
- p = 143 mm
- p' = 81 mm

On remarque que le grandissement maximum (sans bague allonge) est de 0,569 pour une distance d'approche de 224 mm.

3.3.3 Objectif Canon 100 mm 2.8 USM

Il s'agit d'un objectif moderne où la mise MAP s'effectue par déplacement interne à l'objectif d'éléments flottants. La MAP a, là aussi, été faite en butée "au plus proche". On constate

- d = 318 mm
- b = 21.2 mm
- m = 22.2 mm

On calcule

- f = 79, 45 mm
- p = 155 mm
- p' = 163 mm

Cet objectif, à éléments flottants ne présente donc pas une focale fixe en fonction de la distance de MAP; c'est une sorte de zoom inverse. La focale indiquée sur l'objectif est celle pour une MAP à l'infini.

3.3.4 Conclusions

Pour un objectif à optique figé, on constate que les focales, pour un accouplement au boitier dans le sens direct ou inversé, sont identiques. On pouvait s'en douter mais notre modélisation ne l'imposait pas. Par contre, les deux centres optiques, calculés pour la lentille mince équivalente, ne sont pas confondus suivant qu'on monte l'objectif dans le sens normal ou le sens inversé. C'est ce qui fait l'intérêt du montage inversé pour la macro.

Ce centre optique équivalent peut se trouver notablement décalé, par exemple, dans le cas du montage d'un doubleur de focale intercalé entre l'objectif et le boitier. Il faut être prudent quand on utilise la longueur focale d'un objectif à éléments flottants. Je conseille la visite du site web de Pierre TOSCANI proposant une description technique, très pédagogique, des objectifs et de leurs compléments.

http://www.pierretoscani.com/echo_focale.html

On notera au passage que les distances gravées sur le fut de l'objectif sont comptées entre le capteur et l'objet (notre d dans la figure et des calculs)

4 DIAPHRAGME

4.1 INDICE D'OUVERTURE

Considérons une autre vue de notre figure constructive

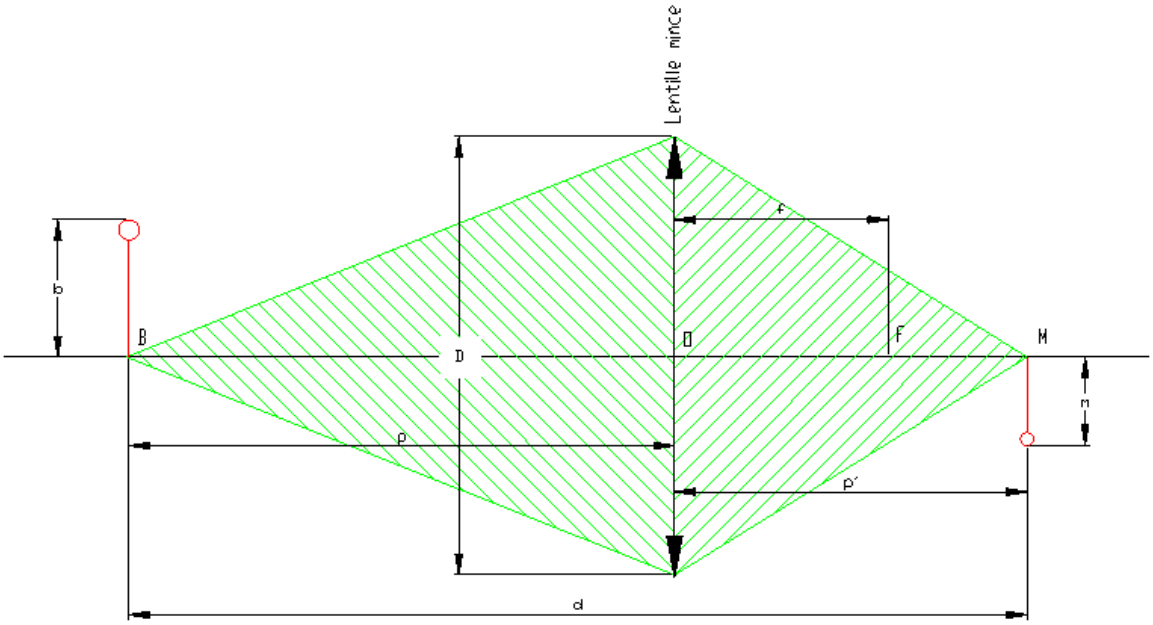


Figure 6 flux lumineux

Un certains nombres de rayons lumineux diffusés par B frappent la lentille de diamètre V. Ce sont ces rayons qui, une fois focalisés par la lentille, forment l'image de M. Les grandeurs d, p et p' sont proportionnels à f. Pour que la figure reste identique à rapport de grandissement m/b constant, il suffit que le diamètre de la lentille soit lui aussi proportionnel à f.

On pose donc par définition

$N = \frac{f}{V}$ et N est appelé **indice d'ouverture**. N est sans dimension et normalisé sur les valeurs :

- 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32

Ce rapport N est ajustable, sur un objectif par la modification du diaphragme. Une position extrême correspond à la pleine ouverture qui peut ne pas être dans une valeur normalisée, 1.7 dans l'exemple de l'objectif Pentax. On note N sous la forme f/1.7 par exemple.

Donc, pour qu'à rapport de grandissement constant, la luminosité soit constante, quelque soit la focale, il suffit que l'indice d'ouverture reste constant. C'est facile à énoncer mais ça veut dire que plus la focale est longue, à indice d'ouverture constant, plus le diamètre de la lentille doit être grand. C'est pour cette raison que les lentilles frontales des téléobjectifs qui ouvrent grand sont énormes.

4.2 CORRESPONDANTE INDICE / RAPPORT

Même pour l'auteur ces notions étaient mathématiquement *un peu* confuses On devra distinguer :

4.2.1 Indice d'ouverture N

L'indice d'ouverture, en général désigné par N. Par définition : N=f/V le rapport de la distance focale par le diamètre du diaphragme. Cet indice d'ouverture est gravé sur les bagues de objectifs argentiques. Dans les objectifs modernes le diamètre du diaphragme et télécommandé depuis l'APN. On a normalisé certains indices particuliers :

- 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32

Cette progression bizarre vient du fait que la lumière est proportionnelle au carré du diamètre V du diaphragme. Comme V est au dénominateur … Astucieusement on a établi une progression des indice de façon qu'en changeant d'indice "*normalisé*" pour aller au voisin la quantité de lumière qui passe par le diaphragme est divisée ou multiplier par DEUX. Comme cette quantité est proportionnelle à la surface du diaphragme (et non au diamètre) la progression des diaphragme normalisés est généré par , $N = (\sqrt{2})^n = 2^{\frac{n}{2}}$ n prenant les valeur 0, 1, 2 ,3 etc.

4.2.2 Crans ou stop de diaphragme

Cette notion est rarement formalisé et pourtant elle est très utilisé. On dit qu'on ouvre (ou ferme) de deux diaphs ou de 2 crans pour indiquer que dans la suite des indice d'ouverture normalisée on va au deuxième qui précède (exemple). Il ne faut surtout pas confondre ce nombre de cran avec la valeur de l'indice

4.2.3 Luminosité linéaire

C'est la quantité de lumière, qu'on pourrait exprimé en Lumens qui passe au travers du diphragme. Il s'en suit que lors qu'on parcourt la liste des indice d'ouverture normalisée, de 1.4 vers 32, à chaque nouveau cran, la lumière a été divisée par deux par rapport au cran précédent

4.2.4 Synthèse

Si on fixe arbitrairement que qu'à N=1 l'éclairement relatif E vaut 1 alors la suite des éclairements relatifs est $E = \frac{1}{2^n} = 2^{-n}$

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Indice d'ouverture N	1,0	1,4	2,0	2,8	4,0	5,7	8,0	11,3	16,0	22,6	32,0	45,3
Rapport d'éclairement E	1/1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	1/128	1/256	1/512	1/1 024	1/2 048

Dans de nombreuses applications numériques on doit passer d'une désignation à une autre. Suivent les bonnes formules magiques, toujours délicates à appliquer.

Tout d'abord, deux formule mathématiques essentielles

- Si $y = a^x$ alors $x = \log_a y$
- $Log_a(x) = \dfrac{Log_z(x)}{Log_z(a)} = \dfrac{\log_{10} x}{\log_{10} a}$

Formule n°1

si $E = 2^{-n}$ alors $-n = \log_2(E) = \dfrac{\log(E)}{\log(2)}$

$$\boxed{n = -\frac{\log(E)}{\log(2)}}$$

Cette formule permet de transformer un rapport de lumière en "*écart d'Il (ou de crans de diaph)*"

Exemple : un rapport de E=1/15 correspond à un écart de n=3.9 Il (indice de lumination) ou de 3.9 crans de diaph

Formule n°2

$$\boxed{E = 2^{-n}}$$

Cette formule permet de transformer un nombre de crans de diaph en un rapport de lumière

Exemple: à un écart de n=3.9 (3.9 crans de diaph) correspond un rapport de E=0.6698 soit E=1/15

Formule n°3

De même comme $N = 2^{\frac{n}{2}}$ alors $\dfrac{n}{2} = Log_2 N$ donc

$$\boxed{n = 2.\frac{\log(N)}{\log(2)}}$$

Exemple : combien de crans de diaph entre les indices d'ouverture 32 et 1.4 (rapport N=32/1.4=22.86 alors n=9.03 soit 9 crans de diaph

4.3 RETOUR SUR LA MODELISATION

Nous l'avons dit, la lentille mince modélise l'objectif

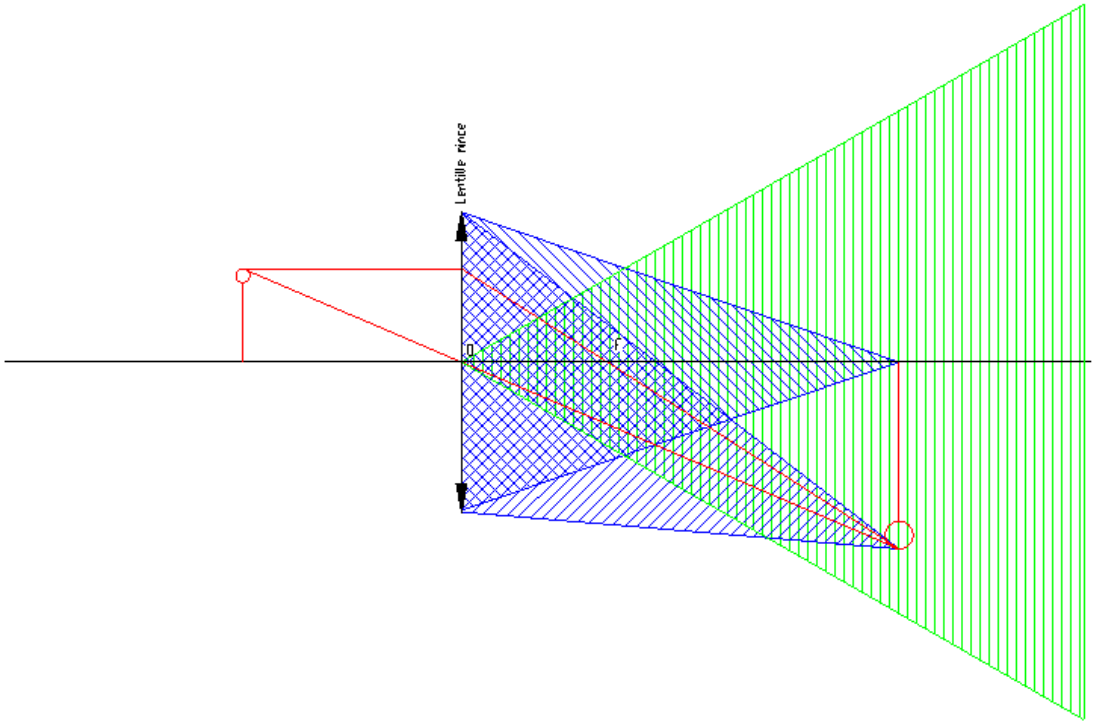


Figure 7 les rayons lumineux

Dans la figure on ne devra pas confondre :

- En rouge les lignes de construction de l'image (optique géométrique)
- En bleu les rayons qui participent à la création de l'image de chaque extrémité de l'objet
- En vert, le cône de lumière qui ressort de l'objectif (on le suppose issu du centre optique), comme s'il était matérialisé par de la fumée. C'est le cône de lumière qu'on voit sortir d'un projecteur cinéma.

La superposition de ces modélisations sur le même croquis parait contradictoire. Éliminons; pour le moment les rayons bleus (nous les réutiliserons plus tard pour la netteté) et imaginons que nous avons affaire à une chambre photographique à soufflet, c'est-à-dire un appareil photo ou la position de la lentille mince est fixe et la longueur p' est rendue variable mécaniquement.

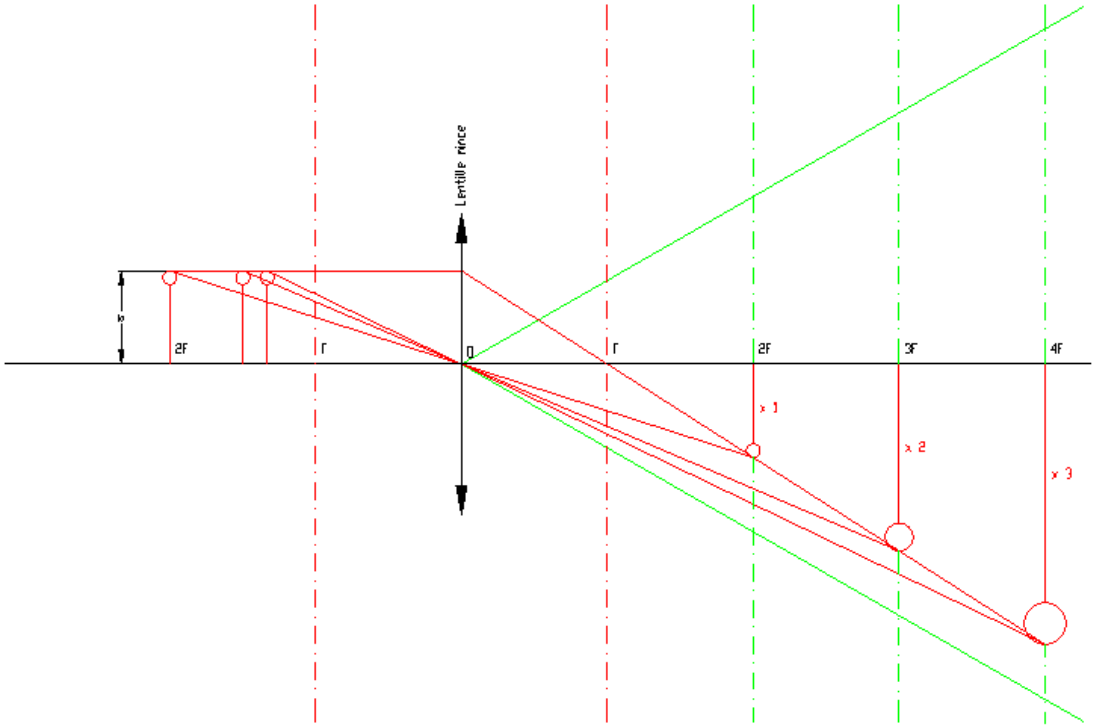


Figure 8 position des images en fonction du grandissement

Dans ce croquis l'objet rouge de gauche est rapproché successivement de façon que son image, à droite de la lentille, soit dans les rapports successifs 1, 2, 3. Ce n'est que l'application de notre formule :

$$\boxed{p' = (G+1).f}$$

Si c'est une chambre, on ne touche pas à l'objectif et on déplace le verre dépoli sur les positions 2f, 3f, 4f. On prend conscience qu'à mesure qu'on déplace le dépoli vers la droite, le cône de lumière (vert sur le croquis) devient de plus en plus large. Évidemment, quand on arrête le dépoli, par exemple sur la position 2f, il faut ajuster la position de l'objet, à gauche de la lentille, pour que son image devienne nette; alors, la taille de l'image sera identique à celle de l'objet. Le flux reste constant mais du fait que la surface croit, la luminosité de l'image va diminuer. On parle souvent de : *conséquences du tirage optique* mais cette expression est maladroite. On normalise la luminosité d'un objectif pour des objets à l'infinis c'est-à-dire lorsque l'écran est au foyer (f). Quand l'écran est à 2f, la section du cône intercepté est 4 fois plus grande (le diamètre est deux fois plus grand et la surface du cercle c'est πr^2 r étant le rayon). C'est-à-dire qu'on a perdu deux crans sur l'indice de luminosité (2 diaph vulgairement) quand on passe au grandissement G=1 par rapport à une prise de vue lointaine.

Il faut bien comprendre que les informations des images de tous les objet sont dans ce cône, mélangées un peu partout. La mise au point, ici le déplacement du verre dépoli, ne fait que sélectionner la cohérence d'une image particulière.

De part notre Figure 8, on peut concevoir la difficulté d'arriver à un grandissement, ne serait-ce que de 1, avec des focales un peu longue. Les focales courtes seront donc la prédilection pour la macro.

Les objectifs sont construits de façon que l'intensité de la lumière issue d'une objet, passant au travers de l'objectif, soit indépendante de la focale et de l'objectif utilisé si l'indice d'ouverture est conservé (et la MAP sur l'infini). Ainsi, face à un mur blanc, à indice d'ouverture constant (f/8 par exemple), quelque soit la focale, l'indice de luminosité (IL), restera constant (le posemètre ne changera pas d'indication). Ce principe facile à admettre n'est pas facile à démontrer même si on idéalise l'objectif en le supposant sans perte.

Ce sujet est développé sur le site Ouvertures et pupilles de Pierre TOSCANI

http://www.pierretoscani.com/echo_ouvertures.html

Lui il appelle nombre d'ouverture ce qu'ici j'ai appelé (comme d'autres) indice d'ouverture (N). Voir en particulier l'animation de la figure 11.

Quoi qu'il en soit, avec nos conventions

Pour un objectif à système figé $\boxed{N_{ph} = N_{\infty}.(G+1)}$[8]

- N_{ph} est l'indice photométrique et on suppose que $N_{ph} = N_{\infty}$ quand la MAP est fait sur un objet à l'infini (G=0)
- N_{∞} est l'indice géométrique, généralement indiqué par la position de la bague mais qui peut être différent si on utilise une bonnette, par exemple.

L'ouverture photométrique agit directement sur le posemètre. L'ouverture géométrique agit sur le profondeur de champ et le diamètre des taches lumineuse.

5 PROFONDEUR DE CHAMP

5.1 DETERMINATION DE LA PDC

On fait donc le net sur l'objet B et il se forme une image réelle sur le capteur en M. Les rayons sont tracés en rouge, toujours sur le principe suivant :

- Le rayon qui passe par le centre optique n'est pas dévié
- Le rayon qui arrive parallèlement à l'axe optique passe par le foyer

[8] Ceci vient de $p' = (G+1).f$ démontré plus haut

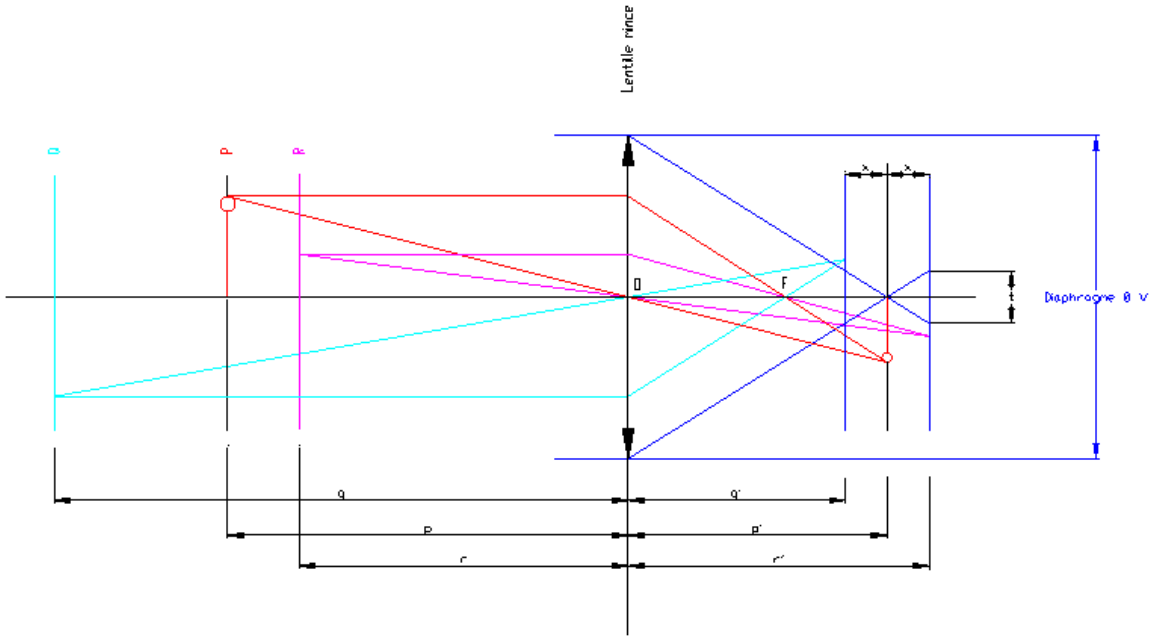


Figure 9 construction générale de la Pdc

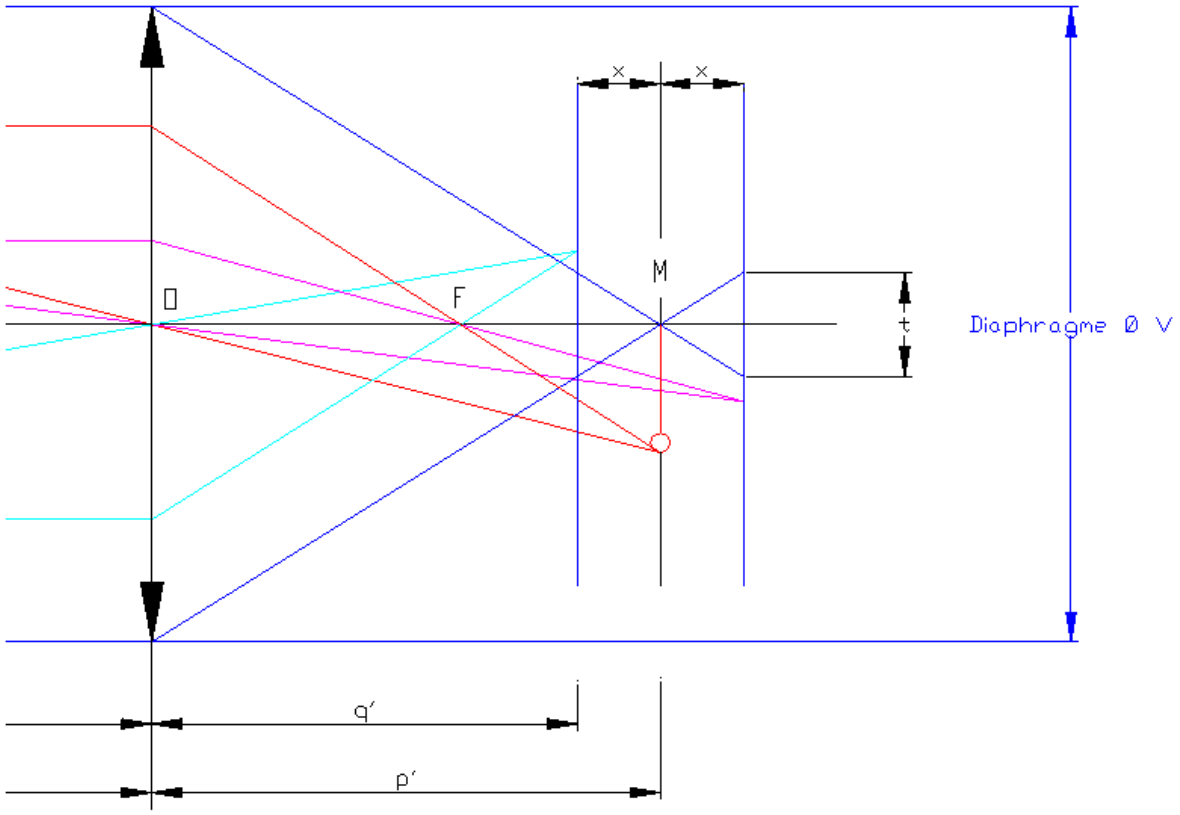


Figure 10 Détail du croquis précédent

Par ailleurs, on trace le cône des rayons entrant par le diaphragme (de diamètre V) et qui vont converger sur le capteur (rayons dessinés en bleu). On peut dire que le point de convergence (dessiné en bleu) est le point particulier où converge les rayons d'une source ponctuelle placée

sur l'axe optique dans le plan de l'objet B. Toute source de ce type, quelque soit sa place dans le plan de l'objet B, viendra converger sur le plan du capteur (et pas forcément au milieu).

Pratiquement si la source ponctuelle est légèrement décalée du plan de l'objet B elle trace une tache (un disque sur le capteur) parce que sont image se forme avant ou après la convergence et qu'alors le capteur coupe le cône, en avant ou en arrière de la convergence.

On trace les deux plans R' et Q' parallèle au plan de capteur et situé à une égal distance x de celui-ci (l'un devant, l'autre derrière). Il se formerait alors deux taches identiques du fait de l'interception du cône bleu. t sera le diamètre de la tache. Nous pouvons construire où seraient les objets qui formeraient leur image (nette) sur chacun des plans Q' et R', respectivement par les rayons mauves et bleus claires. Ces objet sont désignés Q et R.

Considérons les deux grands triangles bleus, opposés par leur pointe, en M; ils sont semblables et si V est le diamètre du diaphragme et t le diamètre de la tache.

$\frac{V}{p'} = \frac{t}{x}$ d'où $x = \frac{t.p'}{V}$

<u>Considérons l'objet proche Q</u>

Appliquons la relation de Descartes

$\frac{1}{p'+x} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$ d'où en remplaçant x par sa valeur

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p'+\frac{t.p'}{V}} = \frac{1}{f} - \frac{V}{p'.V + t.p'} = \frac{1}{f} - \frac{V}{p'}.\frac{1}{V+t} = \frac{p'.(V+t) - f.V}{f.p'.(V+t)}$$

$$\boxed{q = \frac{f.p'.(V+t)}{p'.(V+t) - f.V}}$$

or

<u>Considérons l'objet éloigné R</u>

$\frac{1}{p'-x} + \frac{1}{r} = \frac{1}{f}$ d'où en remplaçant x par sa valeur

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p'-\frac{t.p'}{V}} = \frac{1}{f} - \frac{V}{p'.V - t.p'} = \frac{1}{f} - \frac{V}{p'}.\frac{1}{V-t} = \frac{p'.(V-t) - f.V}{f.p'.(V-t)}$$

$$\boxed{r = \frac{f.p'.(V-t)}{p'.(V-t) - f.V}}$$

Ces deux formules sont un peu compliquées mais calculons $Pdc = r - p$

$$r-p=\frac{f.p'.(V-t)}{p'.(V-t)-f.V}-\frac{f.p'.(V+t)}{p'.(V+t)-f.V}$$

$$r-p=\frac{f.p'.(V-t).(p'.(V+t)-f.V)-f.p'.(V+t).(p'.(V-t)-fV)}{(p'.(V-t)-f.V).(p'.(V+t)-f.V)}$$

$$r-p=\frac{(f.p'.V-fp't).(p'.V+p'.t-f.V)-(f.p'.V+f.p'.t).(p'.V_p'.t-f.V)}{(p'.V-p'.t-f.V).(p'.V+p'.t-fV)}=$$

$$\frac{f.p'^2.V^2+f.p'^2.V.t-f^2.p'.V^2-f.p'^2.V.t-f.p'^2.t^2+f^2.p'.V.t-f.p'^2.V^2+f.p'^2.V.t+...}{p'^2.V^2+p'^2.V.t-f.p'.V^2-p'^2.V.t-p'^2.t^2+f.p'.V.t-f.p'.V^2-f.p'.V.t+f^2.V^2}$$

$$-\frac{f^2.p'.V^2-f.p'^2.V.t+f.p'^2.t^2+f^2.p'.V.t}{}$$

$$r-p=\frac{2.f^2.p'.V.t}{p'^2.V^2-2.f.p'.V^2+f^2.V^2}$$

$$r-p=\frac{2.f^2.p'.V.t}{(p'.V-f.V)^2}=\frac{2.f^2.p'.t}{V.(p'-f)^2}=\frac{2.t}{V}.\frac{f^2.p'}{(p'-f)^2}$$ formule vérifiée numériquement

A la première lecture, on pourrait croire que la Pdc est dépendante de la focal et de la distance p' mais faisons apparaître l'indice d'ouverture $N=\frac{f}{V}$ d'où

$$r-p=2.t.N.\frac{f.p'}{(p'-f)^2}$$

Puis remplaçons p' et f par leur valeur

$$p'=\frac{m.d}{b+m} \text{ et } f=\frac{b.m.d}{(m+b)^2}$$

Alors

$$r-p=2.t.N.\frac{\frac{b.m.d}{(m+b)^2}.\frac{m.d}{(m+b)}}{(\frac{m.d}{(b+m)}-\frac{b.m.d}{(m+b)^2})^2}=2.t.N.\frac{b.m^2.d^2}{(m+b)^3}.(\frac{(m+b)^2}{m.d.(m+b)-b.m.d})^2$$

$$r-p=2.t.N.\frac{b.m^2.d^2.(m+b)}{(m^2.d+b.m.d-b.m.d)^2}=2.t.N.\frac{b.m^2.d^2.(m+b)}{m^4.d^2}=2.t.N.b.\frac{m+b}{m^2}=Pdc$$

On a donc démontré[9] que la profondeur de champ (Pdc) est indépendante de d (la distance objet capteur) et de f (la distance focale) et cela sans approximation, c'est-à-dire sans poser de condition géométrique autre que celle de la lentille mine équivalente.

[9] Miracle de l'algèbre

$$\boxed{Pdc = 2.t.N.b.\frac{m+b}{m^2}}$$

Où :

- $Pdc =$ Profondeur de champs
- $t =$ diamètre du cercle de confusion
- $N = \frac{f}{V}$ indice d'ouverture (2.8, 4, 5.6, 8, 11)
- $b =$ taille réelle de l'objet
- $m =$ taille de l'image de l'objet

Evidemment il faut utiliser la même unité de longueur (millimètre par exemple)

Il est possible d'exprimer la Pdc en fonction du grandissement G=m/b

$G = \frac{m}{b}$ donc $m = G.b$ donc on peut écrire

$$Pdc = 2.t.N.\frac{b.(G.b+b)}{G^2.b^2} = 2.t.N.\frac{b^2(G+1)}{G^2.b^2}$$

$$\boxed{Pdc = 2.t.N.\frac{G+1}{G^2}}$$

5.2 DETERMINATION DE L'HYPERFOCALE

on peut en particulier envisager le cas de r = ∞ qui correspond au cas de l'hyperfocale. A priori, dans ce cas le dénominateur de r est nul

$p'.(V-t) - f.V = 0$ soit en remplaçant p'

$\boxed{p' = \frac{p.f}{(p-f)}}$ (voir 2.3.2)

$$\frac{p.f}{p-f}.(V-t) - f.V = 0$$

$p.f.(V-t) - f.V.(p-f) = 0$ soit car f ≠ 0

$$p.(V-t) - V.(p-f) = 0$$

$$p.V - p.t - p.V + f.V = 0$$

Qui se simplifie en

$p.t - fV = 0$ et $\boxed{p = \frac{f.V}{t}}$ et alors p est l'hyperfocale. En photographie on n'utilise pas V mais N = **indice d'ouverture** avec $\boxed{N = \frac{f}{V}}$

N qui est sans dimension, prend les valeurs *normalisées* parmi 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32

d'où distance hyperfocale $\boxed{H_p = \frac{f^2}{N.t}}$

<u>Attention</u> : si on mesure non pas la distance (p) entre le centre optique et l'objet mais

d = p + p', la distance entre l'objet et le capteur, il faut ajouter p'

Dans http://fr.wikipedia.org/wiki/Hyperfocale

on trouve : $H = \frac{f^2}{N.t} + f$ qu'ils simplifies sous le prétexte que f² >> f mais, en toute rigueur, la distance hyperfocale mesurée depuis le capteur est :

$$H_d = \frac{H_p^{\ 2}}{H_p - f}$$

La distance hyperfocal est la distance de l'objet sur lequel on doit faire le net pour que la zone de netteté s'étende depuis l'infini jusqu'à un distance située en avant de cette distance hyperfocale (environ la moitié comme il sera démontré par la suite). Quelle est cette distance présentant le *même net* qu'à l'infini ? c'est q !

or $\boxed{q = \frac{f.p'.(V+t)}{p'.(V+t) - f.V}}$

et comme $p' = \frac{p.f}{p-f}$ et qu'à l'hyperfocale $p = \frac{f.V}{t}$

$$p' = \frac{\frac{f.V}{t}.f}{\frac{f.V}{t} - f} = \frac{f.V}{V-t}$$

$$q = f.\frac{\frac{f.V.(V+t)}{v-t}}{\frac{f.V.(V+t)}{V-t} - f.V} = f.\frac{f.V^2 + fVt}{f.V^2 + f.V.t - f.V^2 + f.V.t} = f.\frac{V+t}{2.t}$$

$$\boxed{q = \frac{f.V}{2.t} + f = \frac{1}{2}.H_p + f}$$

grossièrement la zone de netteté commence à la moitié de l'hyperfocale (q est mesuré depuis le centre optique; si on mesure depuis le plan de capteur, proche de l'infini, ça fera, en gros la moitié de l'hyperfocale + 2.f

6 EFFET DES SOURCES LULINEUSE HORS PDC

6.1 DIAMETRE DES TACHES

Si une source lumineuse ponctuelle est placée dans le plan de la MAP, son image sur le capteur est, par définition, un point. Si elle est à la limite de la zone de Pdc elle couvre le cercle de confusion. Nous étudierons ici les images produites par des sources ponctuelles placée en dehors de ces cas. Tous les photographes ont remarqué que ces points lumineux produisaient des disque lumineux sur le capteur, plus ou moins grandes, et souvent rappelant la forme du diaphragme. Nous avons démontré que la Pdc est indépendante de la focale à grandissement constant; pourtant le fond trouble de l'image n'a pas la même apparence en fonction de la focale.

La MAP est effectué sur l'objet P et son image M est nette sur le capteur en P'. On suppose une source lumineuse dans le plan Q lui-même à une distance x du plan P. En bleu claire figure la construction de l'image d'un point quelconque de Q; construction qui permet de tracer le plan Q'. La source lumineuse du plan Q converge en une image ponctuelle sur le plan Q' mais le capteur restant en P', cette source va y former une tache de diamètre T. On se propose d'examiner les caractéristiques de T.

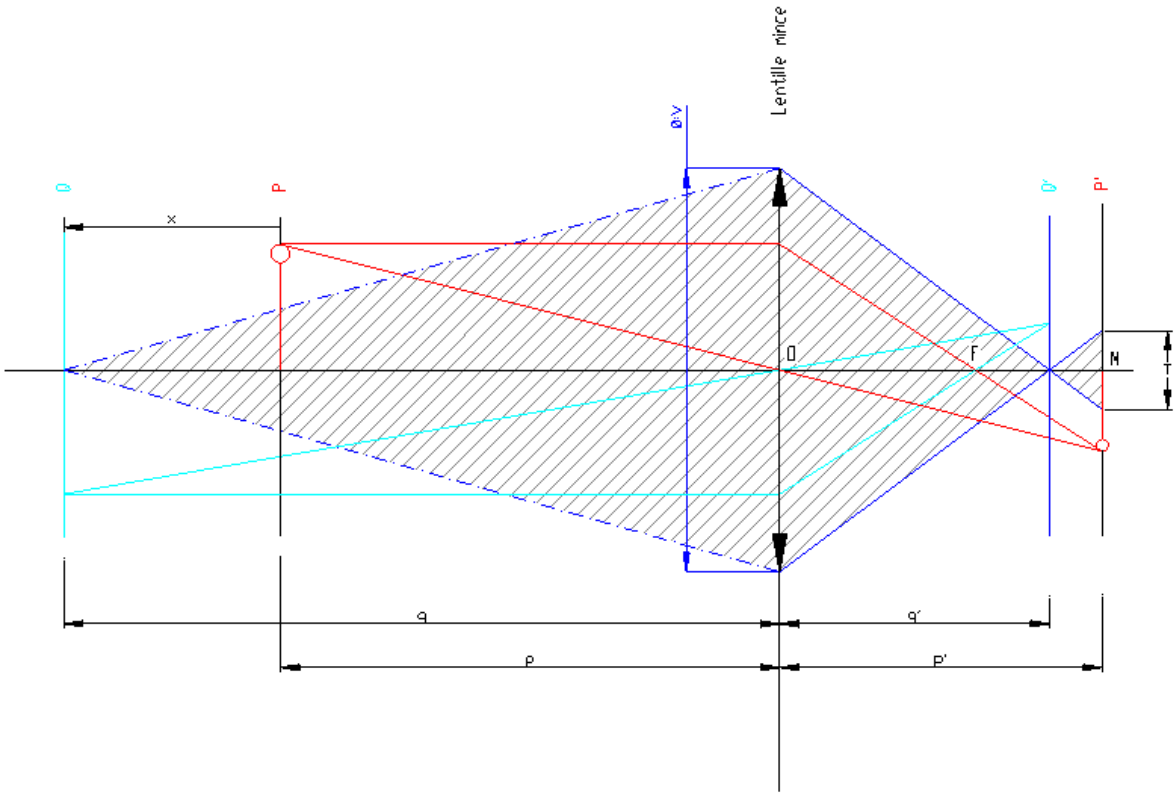


Figure 11 Image d'une source lumineuse en Q

Rappelons, en vrac, les formules déjà démontrée en partant de la relation de Descartes.

$$p = \frac{f.p'}{p'-f}$$

$$q = \frac{f.q'}{q'-f}$$

$$p' = \frac{f.p}{p-f}$$

$$q' = \frac{f.q}{q-f}$$

$$V = \frac{f}{N}$$

Du fait des deux triangles semblables opposé par leur pointe on peut écrire :

$\frac{T}{p'-q'} = \frac{V}{q'}$ d'où $T = V.(\frac{p'}{q'} - 1)$ et nous sommes dans le cas où p'>q'

$$\frac{p'}{q'} = \frac{f.p}{(p-f)}.\frac{(q-f)}{f.q} = \frac{p}{q}.\frac{(q-f)}{(p-f)}$$

On pose $q = p + x$ et on a par ailleurs $p = (\frac{1}{G}+1).f = Z.f$

Soit $Z = \frac{1}{G}+1$ alors

$$T = V.(\frac{Z.f.(Z.f+x-f)}{(Z.f+x).(Z.f-f)}-1) = V.(\frac{Z.(Z.f+x-f)}{(Z.f+x).(Z-1)}-1)$$

Ou sous une autre forme

$$T = V.\frac{Z^2.f + Z.x - Z.f - Z^2.f + Z.f - Z.x + x}{(Z.f+x).(Z-1)} = \frac{V.x}{(Z.f+x).(Z-1)} = \frac{V.x}{Z^2.f - Z.f + Z.x - x}$$

A priori, on ne peut pas éliminer f de cette formule ce qui confirme que les taches auront un aspect différent en fonction de la focale. Le plus simple est de tracer T en fonction de la distance de la source au-delà du point de MAP (x). La focale sera en paramètre et on figera : N (l'ouverture) et G (le grandissement); ainsi on restera à Pdc constante dans un même graphique.

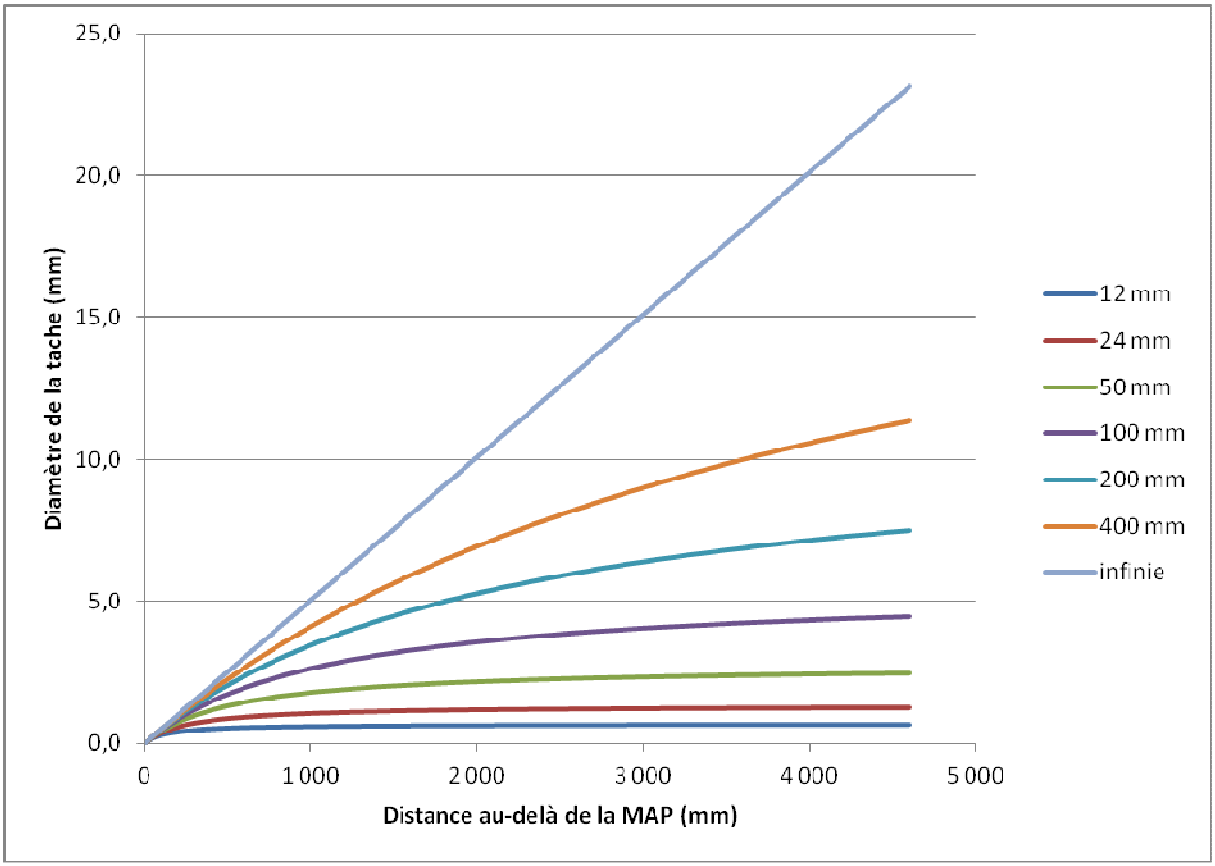


Figure 12 Source au delà de la MAP (G=0,1 N=f/1.8)

On peut donc affirmer que plus la focale est longue plus les taches sont grosses. En fonction de la distance, la taille des taches avec une petite focale sature vite mais pas avec les longues focales. Toutes les courbes présentent la même tangente à l'origine. C'est quoi donc cette tangente ? pour cela il faut dériver la fonction T=f(x) et observer sa valeur pour x=0.

$$T = \frac{V.x}{x.(Z-1) + Z^2.f - Z.f}$$

La dérivée est $T' = \frac{u'.v - u.v'}{v^2}$

$$T' = \frac{V.(x.(Z-1) + Z^2.f - Z.f)) - V.x.(Z-1)}{(x.(Z-1) + Z.^2 f - Z.f)^2} = \frac{V.(Z.x - x + Z^2.f - Z.f) - V.Z.x + V.x}{(x.(Z-1) + Z.^2 f - Z.f)^2}$$

$$T' = \frac{V.Z.x - V.x + V.Z^2.f - V.Z.f - V.Z.x + V.x}{(x.(Z-1) + Z^2.f - Z.f)^2} = \frac{V.Z^2.f - V.Z.f}{(x.(Z-1) + Z^2.f - Z.f)^2}$$

Pour x=0 et comme V=f/N

$$T' = \frac{V.Z^2.f - V.Z.f}{(Z^2.f - Z.f)^2} = V.Z.f.\frac{Z-1}{Z^2.f^2.(Z-1)^2} = \frac{f.Z.f.(Z-1)}{N.Z^2.f^2.(Z-1)^2} = \frac{1}{N.Z.(Z-1)}$$ vérifié ok

La pente est donc bien indépendante de la focale. Elle dépend de l'ouverture et du grandissement. Si on remplace Z par sa valeur

$$Z = (\frac{1}{G} + 1) = \frac{1+G}{G} \text{ alors}$$

$$T' = \frac{1}{N.\frac{1+G}{G}.\frac{1+G-G)}{G}} = \frac{G^2}{N.(1+G)}$$

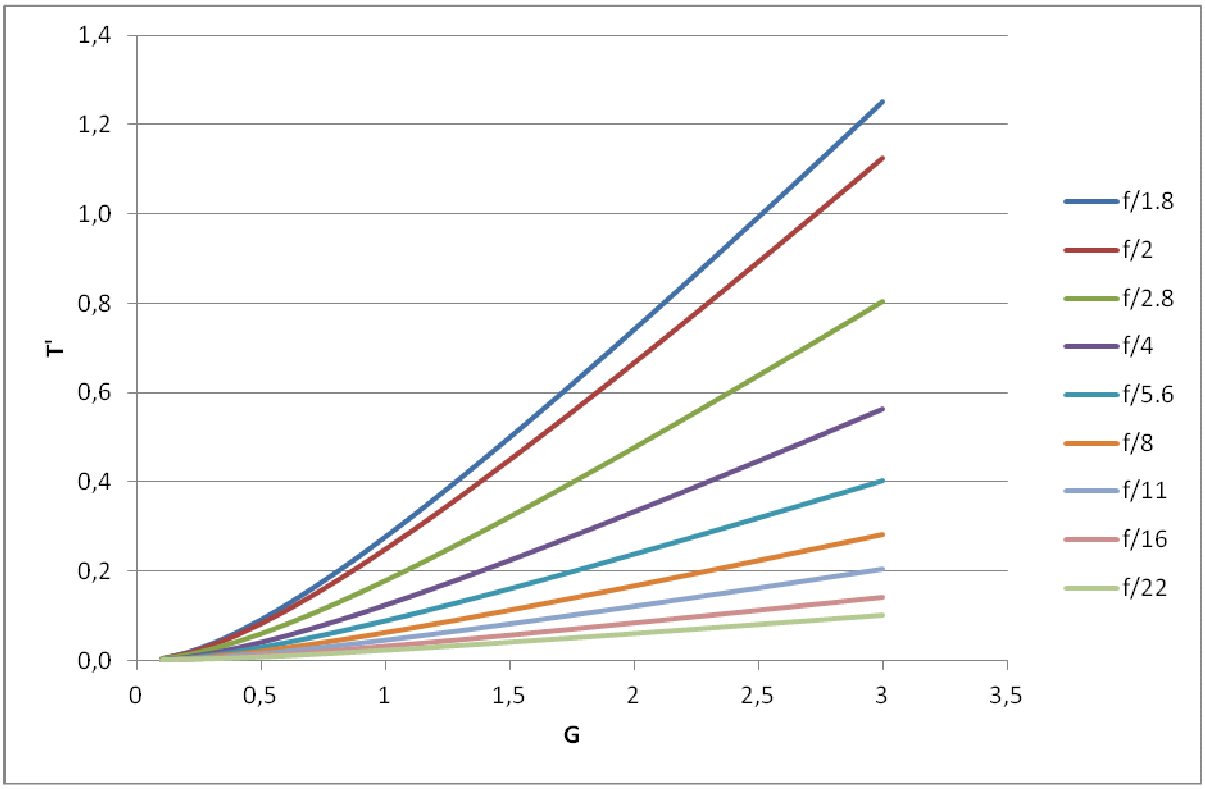


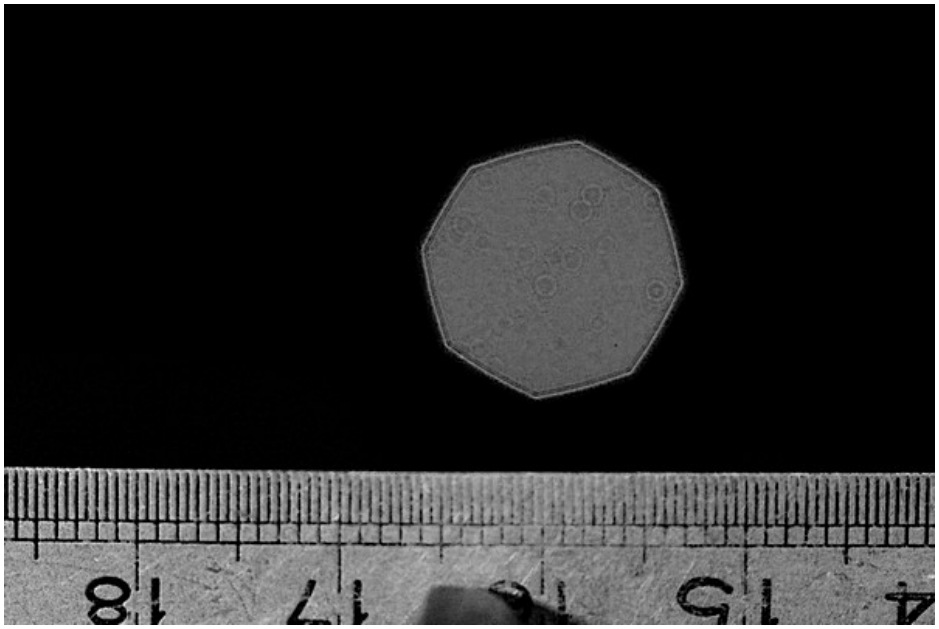
Figure 13 Pente (T') de la courbe T=f(d) à l'origine pour différente ouverture

6.2 APPLICATION A LA MESURE DE L'OUVERTURE

$$V = \frac{T.(Z.f + x).(Z-1)}{x}$$

- V : diamètre de l'ouverture (modélisée)
- T : diamètre de la tache
- f : focale de l'objectif
- Z = 1/G + 1 où G est le grandissement
- x : distance entre la cible de MAP et le point lumineux

On va donc monter un banc permettant de photographier un réglet, sur lequel on fait la MAP, qui permet de déterminer le grandissement sur le plan de MAP. Un peu plus loin, on dispose un point lumineux constitué par une petite torche à LED obturée par un écran percé d'un minuscule trou d'épingle. On règle la distance de cette source lumineuse pour que le cercle produit soit grand dans le viseur sans sortir du champ. Voici une photo de ce que ça donne.



Comme pour la mesure de la focale, on connait les dimensions du capteur et il est facile de calculer le grandissement. Pour évaluer le diamètre de la tache, on met l'image dans un toto-shop et on mesure les coordonnées x,y en pixels d'un diamètre de la tache. On fait Pythagore parce qu'on mesure pas forcément sur un axe horizontal ou vertical et, connaissant la taille en pixels de l'image et la taille du capteur en millimètres on détermine le diamètre de la tache en millimètres.

On a fait neuf mesures :

- 3 montages d'objectif
- Pour chaque montage : 3 ouvertures différentes. Dans cet essais ce sont les crans mécaniques sur le 85 mm qui définissent le diaphragme.

Les distances focales ont été mesurées en 7

	Distance Capteur MAP	Distance MAP point lumineux	Focale	Indice d'ouverture dur la bague	Longueur lue sur le réglet (MAP)	Dimention du capteur	0Diamètre tache en mm	Grandissement	Diamètre du diaph. V	Incice d'ouverture mesuré
	260	673	61	4	34,5	22,2	18,0	0,6	34,5	1,8
85 mm + bonnette	260	673	61	5,6	34,5	22,2	12,8	0,6	24,6	2,5
	260	673	61	8	34,5	22,2	9,2	0,6	17,5	3,5
	875	5110	83,6	4	181	22,2	2,3	0,1	21,3	3,9
85 mm seul	875	5110	83,6	5,6	181	22,2	1,6	0,1	15,3	5,4
	875	5110	83,6	8	181	22,2	1,4	0,1	12,8	6,5
	366	2162	83,6	4	46	22,2	8,8	0,5	20,4	4,1
85 mm + B.A. 36 mm	366	2162	83,6	5,6	46	22,2	6,2	0,5	14,3	5,8
	366	2162	83,6	8	46	22,2	4,3	0,5	9,9	8,4
N du 85 mm	4	5,6	8							
Diamètre du diaph. V=	20,9	14,9	10,5							
1ère estimation de l'ouverture du montage 85 mm + bonnette										
N	2,9	4,1	5,8							

Figure 14 récapitulatif des résultats de mesures

On notera les grandissement pour les trois montage :

- 85 mm + bonnette G = 0,643
- 85 mm seul G = 0,123
- 85 mm + BA de 36 mm G = 0,482

La photo correspond à l'avant dernière ligne des mesures (N=5,6 -> mesure verte 5,8. Comme on le voit les résultats (en vert) sur le 85 mm équipé d'une bague allonge de 36 mm sont très satisfaisants. C'est moins bon sur le 85 mm seul, probablement du faite que les disques étaient petits et donc la mesure de leur diamètre a été quelque peu imprécise.

- Les trois premières lignes (rouges) rapportent des mesures précises, avec des gros disques, le 85 mm étant équipé de la bonnette (voir 7). L'écart de 2 crans se traduit par une écart de 1.97 diaph sur les mesures.
- Les trois suivantes (noires), l'écart mesuré est de 2,2 diaph
- Les trois dernières (vertes), l'écart mesuré est de 2,15 diaph

7 BONNETTE

7.1 EXPERIMENTATION

7.1.1 Expérimentation avec un objectif de 85 mm

7.1.1.1 Evaluation de la puissance résultante

Lors des premiers essais, ne disposant pas de bonnette j'ai utilisé un ménisque élémentaire d'un objectif enchâssé dans un pare soleil, le tout se montant, plus ou moins bien, sur le 85 mm (Ø 52 mm)

Objectif	Focale affichée	Bague de MAP	Bonnette (D)	Taille objet	Taille image	Distance (p+p')	Tirant d'air	Focale	p	p'	Grandisement	Sructure
Pentax 85 mm 1.8	85	Proche	0	175,0	22,2	835		83,4	741,0	94,0	0,13	Figé
Pentax 85 mm 1.8	85	Proche	?	30,4	22,2	30,4		60,9	147,0	104,0	0,73	Figé
Pentax 85 mm 1.9	86	Proche	2	36,2	22,2	36,2		74,5	195,9	120,1	0,61	Figé

Figure 15 longueur en mm, bonnette de focale inconnue

Une loi de composition des focales indique que la focale résultante est déterminée par

$$\frac{1}{f_r} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Pourquoi ? Sans bonnette, par principe, l'image d'un objet à l'infini se forme dans le plan focal (p'=f). Si on suppose que le fait de monter la bonnette ne modifie pas la position du centre optique; alors quand on monte la bonnette

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{f_r} \text{ donc } \frac{1}{p} = \frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_1}$$ Il faut donc soustraire les puissances

on peut dire aussi que la puissance, en dioptries, résultant est la somme des puissances

$$P_r = P_1 + P_2$$

Nous avons

$$P_1 = \frac{1}{0{,}0834} = 11{,}99 \; dioptries$$

$$P_r = \frac{1}{0{,}0609} = 16{,}42 \; dioptries$$

En appliquant cette formule de cumul des puissances la puissance de la bonnette serait $P_2 = P_r - P_1 = 4{,}43 \; dioptrie$ (focale : 226 mm).

Le tableau rend compte des valeur calculée de p' qui est la distance entre le centre optique (de la lentille mince équivalente) et le capteur. Dans notre expérimentation, la bague de MAP n'a pas été touché, l'objectif est donc resté immobile. C'est la distance à l'objet qui a été modifiée pour faire la MAP. Cette distance p' a peu varié avec la mise en place de la bonnette; il s'est

éloigné de 7.6 mm. La lentille (ou la bonnette) sont physiquement montée à environ 112 mm du capteur, soit 18 mm environ devant le centre optique de l'objectif.

Si on applique le même raisonnement sur la troisième ligne du tableau avec une bonnette de 4 dioptrie monté, en gros, comme la précédente de puissance inconnue :

$$P_1 = \frac{1}{0{,}0834} = 11{,}99\ dioptries$$

$$P_r = \frac{1}{0{,}0745} = 13{,}42\ dioptries$$

on arrive à une puissance de bonnette de 1.43 dioptrie alors que le constructeur indique 4 dioptrie. Le tableau montre aussi que le centre optique s'est, cette fois, déplacé de 26.1 mm (vers l'avant).

Ce qui précède démontre que la formule de l'adition des puissance donne un résultat fantaisiste pour des cas réels et nous ne l'utiliserons plus. Rappelons qu'elle supposait les centres optiques confondus et la MAP faite sur l'infini.

7.1.1.2 Ouverture : approximation brutale

Que devient l'ouverture géométrique de l'objectif avec une bonnette. On pourrais penser que le diamètre du diaphragme va rester constant (mécanique dans le 85 mm) et que, comme la focale diminue, l'indice d'ouverture va croitre. On a défini l'indice d'ouverture N = D/f qui permet d'affirmer que l'éclairement de l'image est indépendant de f si N est constant; en fait c'est un artifice puisque qu'il faudra augmenter D si on augmente f. Entre *avec* et *sans* bonnette, D ne change pas (on le suppose dans ce paragraphe) mais N va changer (augmenter puisque la focale avec la bonnette est plus petite que l'objectif seul).

- $N_0 =$ indice ouverture gravé sur la bague (objectif seul de focal f_0)
- $N_i =$ indice d'ouverture de l'assemblage Objectif + bonnette (assemblage de focale f_i)

Alors $N_i = N_0 . \frac{f_i}{f_0}$

Dans l'exemple que nous avons choisi, au cran d'ouverture 4, 5.6, 8 correspondrait des indices d'ouverture géométrique de : 2.9, 4, 5.8

Néanmoins, la mesure des indices d'ouverture géométriques indique : 1.8, 2.5, 3.5²

Attention : la position absolue du dépoli par rapport à l'objectif (et surtout au diaphragme) ne va pas changer mais sa position relative par rapport à la focale, elle, va changer puisque la focale change. Relativement à la focale, l'image va être captée plus loin et sera donc moins lumineuse (on est plus loin dans le cône). Dans ce cas il s'agit de l'indice photométrique qui n'est pas traité ici (pour le moment).

7.1.1.3 Ouverture : mesures effectives

Comme on le montre dans les essais relatés au 6.2 nous avons mesuré l'ouverture géométrique réelle d'un objectif de 85 mm complété par une bonnette. On a trouvé les correspondance suivante :

Indice d'ouverture sur la bague du 85 mm	Indice d'ouverture, mesuré, du montage avec la bonnette
4	1.8
5.6	2.5
8	3.5

Le mesures semblent correctes

- Entre 1.8 et 2.5 il y a 0,95 cran
- Entre 2.5 et 3.5 il y a 0,97 cran
- Entre 1.8 et 3.5 il y a 1,92 cran

Si les mesures étaient fausses on n'aurait pas une telle cohérence dans les mesures d'ouverture. Rappelons-nous que notre référence est une optique géométrique. Elles démontrent que la constance du diamètre physique du diaphragme ne suffit pas à maintenir constante l'ouverture géométrique.

On se reportera utilement aux notions de pupilles évoquées sur le page de P. Toscani

http://www.pierretoscani.com/echo_ouvertures.html

On peut d'emblé faire une comparaison

Si on utilise le 85 mm pour aller au grandissement de G=0,643 on va utiliser une bague allonge. Alors

$$\boxed{N_{ph} = N_{\infty}.(G+1)}$$

si on ouvre à f/4 (sur la bague), on sera à f/6.6 (en lumière) on perdra donc 1.44 cran de diaph sur la lumière.

Avec la bonnette, pour conserver la PCD de f/4, il faudra passer à f8½ sur la bague du 85 mm et on devra perdre plus de lumière qu'avec la bague allonge, soit 0.7 cran de diaph de plus

7.1.2 Expérimentation avec un bonnette 4 dioptries

Il s'agit d'une bonnette hama Close-up +4 C Ø 58.

Objectif	Focale affichée	Bague de MAP	Bonnette (D)	Taille objet	Taille image	Distance (p+p')	Tirant d'air	Focale	p	p'	Grandisement	Sructure
Canon 18-55 3,5-5,6 IS II	55	Proche	0	60,0	22,2	238	106	46,9	173,7	64,8	0,37	Flottant var.
Canon 18-55 3,5-5,6 IS II	55	Proche	4	42,5	22,2	209	77	47,1	137,3	71,7	0,52	Flottant var.
Canon 18-55 3,5-5,6 IS II	18	Proche	0	174,0	22,2	230	102	23,1	204,0	26,0	0,13	Flottant var.
Canon 18-55 3,5-5,6 IS II	18	Proche	4	112,0	22,2	197	65	27,2	164,4	32,6	0,20	Flottant var.
SIGMA WIDE ASPHERICAL	28	30	0	163,0	22,2	300	193	31,7	264,0	36,0	0,14	Figé
SIGMA WIDE ASPHERICAL	28	30	4	95,0	22,2	228	116	35,0	184,8	43,2	0,23	Figé
Canon EF 100 mm 2.8 USM	100	30	0	21,5	22,2	311	148	77,7	153,0	158,0	1,03	Flottant fixe
Canon EF 100 mm 2.8 USM	100	30	4	13,5	22,2	262	93	61,6	99,1	162,9	1,64	Flottant fixe

Figure 16 distance en mm, bonnette de 4 dioptries (info. constructeur)

Pour les 4 premières lignes du tableau, l'essais se fait montant la bonnette sur un 18-55 IS II. Le zoom est en butée soit à 55 mm soit à 18 mm (repère sur l'objectif) et la mise au point reste en butée au plus proche afin de permettre la MAP sans bonnette. Sur la position 55 mm la mise en place de la bonnette ne modifie que très peu la focale. On ne connait pas où est le centre optique de la bonnette mais celui de l'objectif seul est à 64.8 mm du capteur et le devant de la bonnette, une fois vissée est mécaniquement à 132 mm. Comme la bonnette est de longue focale (250 mm), son centre optique pourrait être proche de son centre mécanique soit vers 130 mm. La bonnette est donc très en avant de 65,2 mm. Dans cette configuration de zoom (55 mm) et de MAP (proche) l'objectif est en effet à son déploiement mécanique maximum.

Une application brutale de la somme des dioptries (21.3+4=25.3) devait donner une focal résultante de 39,5 mm; on en est très loin puisqu'on est à 47 mm environ.

7.1.3 Expérimentation de Pierre [egre@wanadoo.fr]

7.1.3.1 Présentation

Cette expérimentation a été menée par Egre [egre@wanadoo.fr]. Elle porte sur ses mesures pratiquées sur

- 100 mm L IS
- 100 mm L IS + bonnette Raynox 250 (8 dioptries)
- 100 mm L IS + le life size converter

Son CR : *pas mal galéré pour faire le montage et aligner le tout. Difficultés aussi pour obtenir un semblant de spot. Bref, je te joins ton tableau Excel complété. Je te laisse vérifier les focales (pour le LSC, j'ai mis l'approx trouvée sur le site de G Therin, pour la bonnette, j'ai laissé inchangé).*

Autre adresse : pibrothier@orange.fr dit Rousillous sur EOS-Numérique (28a)

7.2 BONNETTE EN AVANT DE L'OBJECTIF APPROCHE TEHORIQUE

7.2.1.1 Présentation

On se propose d'étudier le cas le plus fréquent où la bonnette est placée en avant du centre optique de la lentille mince équivalente à l'objectif. Comme on arrive à des polynôme de la mort qui tue, les formules on été vérifié avec Excel et une comparaison avec AutoCad. Néanmoins il reste possible que le tracé de la figure soit erroné. On utilise la propriété exposé au 2.2.2.

Les valeurs des entités suivante son en valeur absolue. Les coordonnées de l'extrémité de l'objet B sont, par exemple, x=-R, y=-B.

- B : hauteur de l'objet
- M : hauteur de l'image
- J : focale de l'objectif
- T : focale de la bonnette
- E : distance entre les deux centre optique (bonnette - objectif)
- R : distance entre l'objet et le centre optique de l'objectif

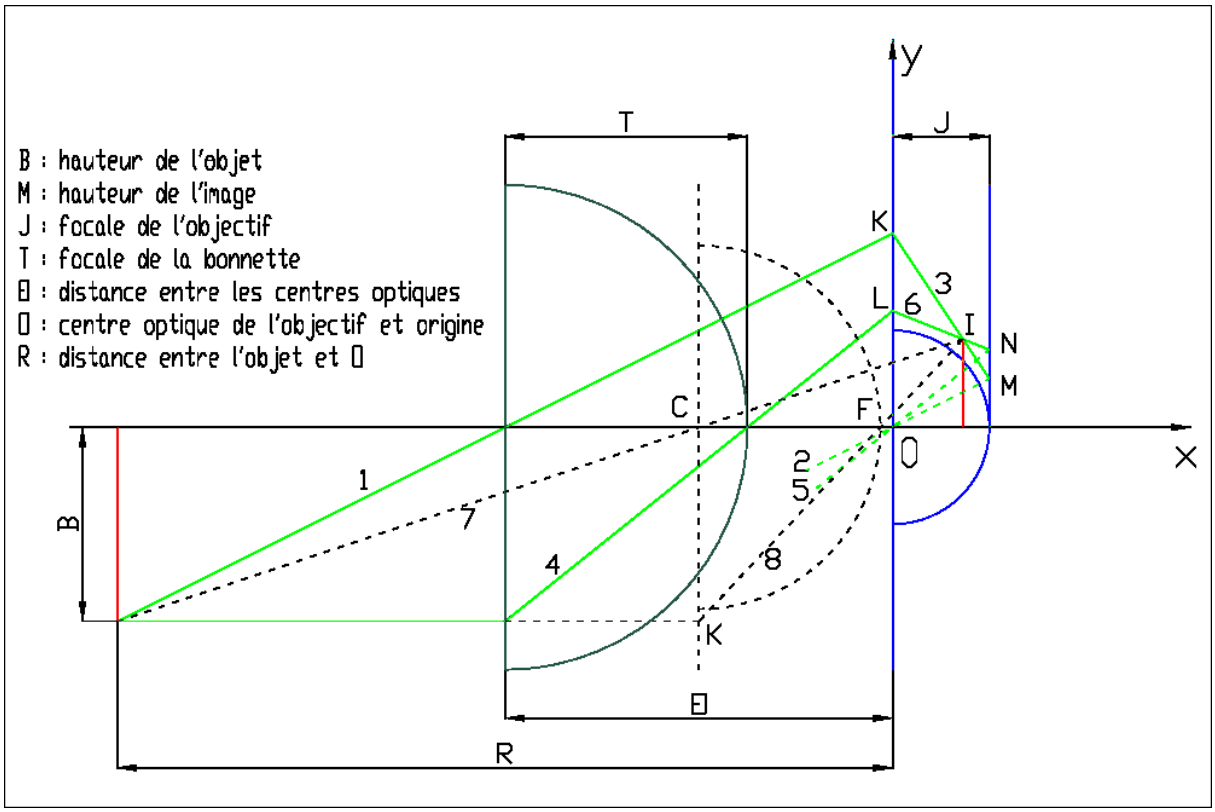


Figure 17 bonnette (en noir) en avant du centre optique de l'objectif (en bleu)

On prend le centre optique de l'objectif comme origine du système de coordonnées. Chaque droite est repérée sur le figure par un numéro qui permet de l'identifier.

7.2.1.2 Equation de la droite n°1

$$pente = \frac{\Delta y}{\Delta x} =$$

$$pente = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{B}{R-E}$$

L'ordonnée à l'origine n'est pas connue mais la droite passe par le point x=-E, Y=0 donc

$$0 = \frac{B}{R-E}.(-E) + c \text{ et } c = \frac{E.B}{R-E} \text{ donc}$$

$$\boxed{y = \frac{B}{R-E}x + \frac{E.B}{R-E}}$$

Point K : $x = 0 \Rightarrow y = \frac{E.B}{R-E}$

7.2.1.3 Equation de la droite n°2

Cette droite est parallèle à la n°1 et elle passe par x=0, y=0 donc

$$\boxed{y = \frac{B}{R-E}x}$$

Point M : $x = J \Rightarrow y = \frac{B.J}{R-E}$

7.2.1.4 Equation de la droite n°3

Cette droite passe par deux points maintenant connus K et M

$$pente = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\frac{B.J}{R-E} - \frac{E.B}{R-E}}{J} = \frac{B}{R-E} - \frac{E.B}{J(R-E)}$$

L'ordonnée à l'origine est $\frac{E.B}{R-E}$ donc

$$\boxed{y = (\frac{B}{R-E} - \frac{E.B}{J(R-E)})x + \frac{E.B}{R-E}}$$

7.2.1.5 Equation de la droite n°4

Cette droite passe par deux points connus :

- x=-E, Y=-B
- x=T-E; y=0

$pente = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{B}{T-E+E} = \frac{B}{T}$ et elle passe par x=T-E, y=0 donc

$0 = \frac{B}{T}.(T-E)+c$ et $c = \frac{B.(E-T)}{T}$ donc équation de la droite 4 :

$$\boxed{y = \frac{B}{T}x - \frac{B(T-E)}{T}}$$

Elle coupe l'axe des y en L

Point L : $x = 0 \Rightarrow y = -\frac{B(T-E)}{T}$

7.2.1.6 Equation de la droite n°5

Cette droite est parallèle à la n°4 donc elle a la même pente et elle passe par 0 donc

$$\boxed{y = \frac{B}{T}x}$$

Cette droite 5 coupe le plan focal de l'objectif en N

Point : N $x = J \Rightarrow y = \frac{B}{T}J$

7.2.1.7 Equation de la droite n°6

Cette droite passe par les point L et N

$pente = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1}{J}(\frac{B}{T}J + \frac{B(T-E)}{T})$ et on connait l'abscisse à l'origine : $-\frac{B(T-E)}{T}$

L'équation de la droite 6 est donc

$$y = \frac{1}{J}(\frac{B}{T}J + \frac{B(T-E)}{T})x - \frac{B(T-E)}{T}$$

7.2.2 Taille de l'image

Le haut de l'image (point I) est à la rencontre des droites N°6 et N°3

$$y = (\frac{B}{R-E} - \frac{E.B}{J(R-E)})x + \frac{E.B}{R-E}$$

$$y = \frac{1}{J}(\frac{B}{T}J + \frac{B(T-E)}{T})x - \frac{B(T-E)}{T}$$

Si on soustrait membre à membre

$$(\frac{B}{R-E}-\frac{E.B}{J(R-E)})x+\frac{E.B}{R-E}-\frac{1}{J}(\frac{B}{T}J+\frac{B(T-E)}{T})x+\frac{B(T-E)}{T}=0$$

$$(\frac{B}{R-E}-\frac{E.B}{J(R-E)}-\frac{B}{T}-\frac{B(T-E)}{JT})x+\frac{E.B}{R-E}+\frac{B(T-E)}{T}=0$$

Si $ax+b=0 \Rightarrow x=-\frac{b}{a}$

$$x=-\frac{\frac{E.B}{R-E}+\frac{B(T-E)}{T}}{\frac{B}{R-E}-\frac{E.B}{J(R-E)}-\frac{B}{T}-\frac{B(T-E)}{JT}}=-(\frac{E.B}{R-E}+\frac{B(T-E)}{T})(\frac{JT(R-E)}{BJT-EBT-BJ(R-E)-B(T-E)(R-E)})$$

$$x=(\frac{EBT+B(T-E)(R-E)}{T(R-E)})(\frac{JT(R-E)}{EBT+BJ(R-E)-BJT+B(T-E)(R-E)})=\frac{ET+(T-E)(R-E)}{1}.\frac{J}{ET+J(R-E)-JT+(T}$$

$$X=J.\frac{ET+(T-E)(R-E)}{ET+J(R-E)-JT+(T-E)(R-E)}$$

On remplace x par sa valeur X dans la première équation

$$Y=\frac{1}{J}(\frac{B}{T}J+\frac{B(T-E)}{T}).J.\frac{ET+(T-E)(R-E)}{ET+J(R-E)-JT+(T-E)(R-E)}-\frac{B(T-E)}{T}$$

$$Y=(\frac{B}{T}J+\frac{B(T-E)}{T}).\frac{ET+(T-E)(R-E)}{ET+J(R-E)-JT+(T-E)(R-E)}-\frac{B(T-E)}{T}$$

$$Y=B.(\frac{J+T-E}{T}.\frac{ET+(T-E)(R-E)}{ET+J(R-E)-JT+(T-E)(R-E)}-\frac{T-E}{T})$$

Les coordonnées de l'image de l'extrémité de l'objet sont alors :

$$X=J.\frac{ET+(T-E)(R-E)}{ET+J(R-E)-JT+(T-E)(R-E)}$$

$$Y=B.(\frac{J+T-E}{T}.\frac{ET+(T-E)(R-E)}{ET+J(R-E)-JT+(T-E)(R-E)}-\frac{T-E}{T})$$

C'est bon signe : X est indépendant de B et Y est proportionnel à B. On utilisera souvent par la suite Y/B

7.2.3 <u>Position de la lentille équvalente</u>

On peut tracer la droite 7 qui passe par le point image X,Y et le point -R,-B

$$pente=\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{Y+B}{X+R}$$

$$y=\frac{Y+B}{X+R}x+c \Rightarrow -B=\frac{Y+B}{X+R}.(-R)+c$$

$$c=-B+R\frac{Y+B}{X+R}$$

$$y=\frac{Y+B}{X+R}x-B+R\frac{Y+B}{X+R}$$

qui coupe l'axe de x en y=0 ☺ et on appellera ce point C (centre optique de l'assemblage) et le x qui suit est la position de ce centre optique sur l'axe.

$$\frac{Y+B}{X+R}x=B-R\frac{Y+B}{X+R}$$

$$x=\frac{X+R}{Y+B}(B-R\frac{Y+B}{X+R})$$

$$x=\frac{X+R}{\frac{Y}{B}+1}(1-R\frac{\frac{Y}{B}+1}{X+R})$$

Donc, abscisse de C (centre optique équivalent)

$$\boxed{x=\frac{X+R}{\frac{Y}{B}+1}-R}$$

On se rappelle que Y/B est indépendant de B

7.2.4 <u>Focale équvalente</u>

On peut finalement, enfin, calculer la focale équivalent en traçant la droite 8 qui relie K à I

$$pente=\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{Y+B}{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}$$

$$y=\frac{Y+B}{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}x+c$$

Comme la droite pas par I

$$Y=\frac{Y+B}{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}X+c$$

$$c = Y - \frac{Y+B}{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}X$$

$$y = \frac{Y+B}{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}x + Y - \frac{Y+B}{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}X$$

et pour y=0

$$x = (\frac{Y+B}{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}X - Y).\frac{X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)}}{Y+B} = \frac{(Y+B)X - Y(X+R-B\frac{(X+R)}{(Y+B)})}{Y+B}$$

$$x = \frac{XY + BX - XY - RY + BY\frac{(X+R)}{(Y+B)}}{Y+B} = \frac{BX - RY + BY\frac{(X+R)}{(Y+B)}}{Y+B}$$

$$x = \frac{X - R\frac{Y}{B} + Y\frac{(X+R)}{(Y+B)}}{\frac{Y}{B}+1} = \frac{X - R\frac{Y}{B} + \frac{Y}{B}\frac{(X+R)}{(\frac{Y}{B}+1)}}{\frac{Y}{B}+1}$$

$$\boxed{x = \frac{X - R\frac{Y}{B} + \frac{Y}{B}\frac{(X+R)}{(\frac{Y}{B}+1)}}{\frac{Y}{B}+1}}$$

x est l'abscisse du foyer équivalent (F) par rapport à l'origine. La distance focale, orientée est

$$f = x - (\frac{X+R}{\frac{Y}{B}+1} - R) = x - \frac{X+R}{\frac{Y}{B}+1} + R$$

$$\boxed{f = x - \frac{X+R}{\frac{Y}{B}+1} + R}$$

X et Y seront les valeurs calculées en 7.2.2

7.2.5 <u>Application numérique</u>

a