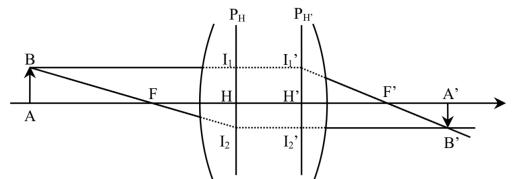


MONTAGE 7 : INSTRUMENT D'OPTIQUE-OBJECTIFS PHOTOGRAPHIQUES

I. Mesure de f' et influence de la mise au point

1) Mesure de f'

Le plan principal image $P_{H'}$ se trouve à l'intersection fictive d'un rayon incident parallèle à l'axe optique (ou son prolongement symbolique) avec le rayon émergent correspondant (ou son prolongement symbolique). Par définition, ce rayon émergent (ou son prolongement dans le cas des systèmes divergents) passe par le foyer image F' puisque le rayon incident est parallèle à l'axe optique. De même, le plan principal objet P_H se trouve à l'intersection fictive d'un rayon émergent parallèle à l'axe optique (ou son prolongement symbolique) avec le rayon incident correspondant (ou son prolongement symbolique). Par définition, ce rayon incident (ou son prolongement dans le cas des systèmes divergents) passe par le foyer objet F puisqu'il correspond à un rayon émergent parallèle à l'axe optique. Ces plans principaux sont perpendiculaires à l'axe optique et leurs intersections H et H' avec cet axe sont appelés points principaux objet et image. Ces points et plans principaux sont conjugués par le système optique, avec un grandissement transversal $\gamma = 1$ pour les plans.



Les distances focales ne sont plus définies par rapport à un point unique O comme dans le cas des lentilles minces, mais par rapport aux points principaux H et H' . On a donc :

$$f = \overline{HF} ; f' = \overline{H'F'} \quad \text{Avec, dans l'air : } \overline{HF} = -\overline{H'F'} \quad \text{soit} \quad f = -f'$$

La position de l'image par rapport à l'objet peut s'obtenir grâce à la relation de conjugaison du système épais avec origine aux points principaux :

$$\frac{1}{\overline{H'A'}} - \frac{1}{\overline{HA}} = \frac{1}{\overline{H'F'}} = \frac{1}{f'}$$

$$\text{Le grandissement principal est, quant à lui, donné par : } \gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{H'A'}}{\overline{HA}}$$

Les distances $H'F' = f'$ ou $HF = f$

correspondent à ce qu'on appelle couramment la focale d'un objectif photographique. Ce type de système optique a cependant une contrainte importante à respecter : il doit former l'image de l'objet sur une surface réceptrice (pellicule, capteur) située toujours au même endroit, et ce quelle que soit la position de l'objet par rapport à l'appareil. Dans les objectifs dits figés, cette opération de mise au point s'effectue par une translation en bloc du système optique pour faire coïncider l'image avec la surface réceptrice → leurs points cardinaux F , H , H' et F' se

déplacent conjointement et la distance focale reste constante. Par contre, la mise au point s'effectue par déplacement d'un ou plusieurs éléments du système optique par rapport aux autres pour les objectifs dits flottants (majoritaires dans les optiques modernes) → dans ce cas, elle entraîne obligatoirement une modification relative de la position des points cardinaux qui peut impacter la valeur de la distance focale. Celle annoncée par le constructeur correspond alors à une mise au point à l'infini. On en tire une conséquence pratique en cas de doute sur la nature de l'objectif : il vaut mieux **régler l'objectif à l'infini pour mesurer expérimentalement sa distance focale**. Une expérience particulièrement simple permet de mesurer la distance f' . Il suffit d'utiliser l'objectif pour projeter l'image d'un petit objet avec un très fort grandissement. On a alors¹ :

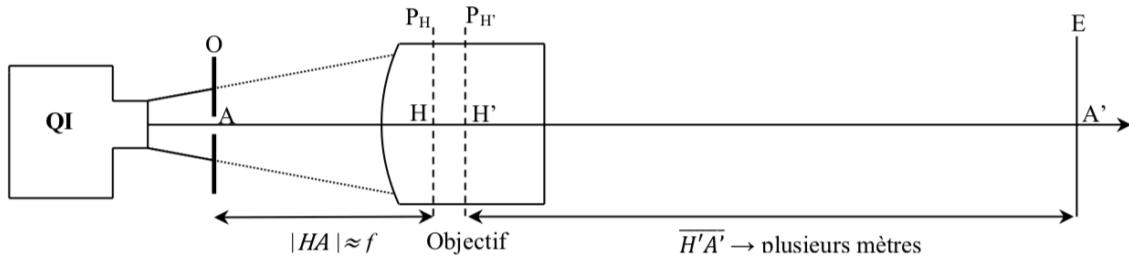
$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{H'A'}}{\overline{HA}} \rightarrow \frac{1}{\overline{HA}} = \frac{\gamma}{\overline{H'A'}}$$

$$\frac{1}{\overline{H'A'}} - \frac{1}{\overline{HA}} = \frac{1}{f'} \rightarrow \frac{1}{\overline{H'A'}} - \frac{\gamma}{\overline{H'A'}} = \frac{1-\gamma}{\overline{H'A'}} = \frac{1}{f'} \rightarrow f' = \frac{\overline{H'A'}}{1-\gamma} = \frac{\overline{H'A'}}{1+|\gamma|}$$

Un grandissement important améliore la précision sur la mesure de f' (image plus grande, donc plus facile à mesurer) et permet de déterminer les positions de P_H et $P_{H'}$ avec une bonne approximation. On suppose la position de $P_{H'}$ connue pour commencer (on verra comment l'obtenir par la suite).

Montage :

[1], p. 23



O : objet de petite dimension connue précisément → exemple : pied à coulisse réglé sur 5 mm.

L'objectif doit être placé avec sa face d'entrée dirigée vers l'objet. On a intérêt à prendre un objectif lumineux et ouvert au maximum afin de réduire la profondeur de champ pour apprécier plus facilement le moment où on conjugue exactement l'objet avec l'écran (variation plus rapide de la netteté → mesure plus précise de γ). La manipulation a été testée avec un Zeiss Sonnar 85 mm f/2 ouvert au maximum **et réglé à l'infini**. Il y a un

avoir une image exempte conditionne la façon dont

compromis à faire pour

$\rightarrow f' = \frac{L}{1 + \frac{D}{d}} = \frac{Ld}{d + D}$: d'aberrations qui on éclaire l'objet.

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \frac{1}{(d+D)^2} \left(\Delta D^2 + \frac{D^2}{d^2} \Delta d^2\right)} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \frac{1}{D^2} \left(\Delta D^2 + \frac{D^2}{d^2} \Delta d^2\right)}$$

Recherche de P_H :

Comme on a formé une image à une distance très éloignée de l'objectif comparée à sa focale, on peut considérer que l'objet est quasiment dans le plan focal objet de l'instrument. La relation de conjugaison permet en effet de monter qu'on a, avec les distances mises en jeu dans l'expérience² :

$$\frac{\overline{HA}}{f'} = \frac{\overline{H'A'}}{f' - \overline{H'A'}} f' = \frac{452}{8,5 - 452} f' = -1,02 \cdot f'$$

L'hypothèse d'un objet situé dans le plan focal objet de l'objectif est donc valable ici à 2 % près → On trouve la position de P_H en comptant ≈ 85 mm à partir de l'objet. On s'aperçoit alors qu'il est situé 1 cm après le début de l'objectif.

2) Influence de la mise au point :

La mesure de f' a été faite en ayant réglé la mise au point à l'infini. On peut recommencer l'expérience en réglant l'objectif à sa distance minimale de MAP. On s'aperçoit alors que le grossissement reste le même. La distance focale ne change donc pas avec la mise au point → cette focale fixe fait partie des systèmes optiques figés3.

II. Influence de l'ouverture sur la luminosité des objectifs

Un intérêt fondamental des lentilles (ou des miroirs) dans la formation d'une image est leur aspect collecteur de lumière. Un appareil à fort grossissement ne sert à rien si, compte tenu de la sensibilité du récepteur, il n'est pas suffisamment lumineux. On peut jouer sur la luminosité d'un objectif en modifiant son nombre d'ouverture NO (cf. [1], p. 34 ou [3], p. 683). Les valeurs des nombres d'ouvertures NO sont standardisées selon une progression géométrique en $\sqrt{2}$ afin de modifier l'éclairement du récepteur par un facteur 2 lorsqu'on passe d'un nombre d'ouverture au suivant.

Manipulation :

Cf. [1], p. 34 pour le montage.

Il faut disposer d'un objectif permettant le contrôle manuel de l'ouverture. On a utilisé ici un objectif Leica 35 mm (l'expérience est aussi possible avec le Pentax 28-200). On peut faire varier manuellement son NO de 2 à 16. On place cet objectif à 50 cm minimum du calque et on éclaire le calque avec une lampe Quartz Iode alimentée en continu (alimentation 30 V – 10 A réglée à 12 V) afin d'avoir un

éclairement le plus stable possible. On place une photodiode dans le plan image du calque en la polarisant en inverse⁴ avec une tension de 12 V. On ajuste la résistance de charge de façon à avoir un signal assez fort à ses bornes à l'ouverture de 2. On mesure ensuite la tension aux bornes de cette résistance pour différentes valeurs du nombre d'ouverture. On mesure aussi le signal avec le cache vissé sur l'objectif pour voir s'il faut corriger les mesures. On calcule alors le rapport des tensions éventuellement corrigées pour deux valeurs successives du NO. Voici à titre indicatif le résultat d'une série de mesure pour une distance entre le calque et l'objectif de 57 cm et une résistance de charge de 20 000 Ω :

NO	2	2,8	4	5,6	8	11	16
Vd (V)	7,41	4,08	2,05	1,01	0,49	0,25	0,09
Vr (V)	7,33	3,63	1,80	0,90	0,45	0,24	0,09
Vd/Vd'	1,81	2,00	2,03	2,05	1,96	2,74	
Vr/Vr'	2,02	2,02	2,00	1,98	1,91	2,59	

Signal au noir : 0,8 mV

Vd : v descendant

Vr : v remontant

Tracé de $V=f(1/NO^2)*$

Bonne concordance entre le nombre d'ouverture et l'éclairement mais tension plus faible que la tension attendue. Pb avec le nombre d'ouverture sans doute puisque les premiers points semblent convenable au niveau de la tension (donc luminosité)

Vérification ; diamètre du diaphragme en fonction du nombre d'ouverture :

Lampe quartz iodé/ Objectif appareil photo (celui avec les NO)/ lentille

Image du diaphragme (plus précisément la pupille d'entrée) avec les bords qui vont apparaître de plus en plus fortement avec le NO qui grandit.

(tracer sur un point et sur un côté plat)

NO	3,5	5,6	8
D(cm)	17,5	11,2	8

Rapport inverse :

$$5,6/3,5 = 1,5$$

$$D(3,5)/D(5,6) = 1,56$$

Attention de bien voir le diaphragme avec l'objectif (il y a du jeu !)

Alors que pour 8 et 5,6 on a un écart de 1,42 et 1,42 donc on a un nombre d'ouverture plus cohérent avec le diaphragme. Donc 5,6 est bon c'est 3,5 qui n'est pas bon et qu'il faudrait corriger.

Cela semble un petit écart mais lorsque l'on met le NO au carré, l'écart devient grand et donc non négligeable.

Correction du NO :

Au lieu de prendre 3,5 ;

$$NO^* = 23 / 32,5 * 5,6 = 3,9$$

III. Aberrations géométriques

Lampe/ lentille/ grosse lentille chelou / écran

Aberration sur les côté halo lumineux

Lampe/ lentille/ grosse lentille chelou / diaphragme/ écran

On ne voit plus le halo lumineux lorsque le diaphragme est proche de la lentille

Par contre dès que l'on éloigne le diaphragme **[?]** effet de distorsion en coussinet
(ligne qui se déforment)

Lampe/ lentille/ diaphragme/ grosse lentille chelou / écran

Ligne qui se courbent vers l'extérieur (arsseau autour d'une barrique) aberration en bariollet.

APN : lentille symétrique les uns aux autres par rapport à un diaphragme.

Aberration en coussinet doivent être compensée par les bariollets.

Dufel : classement des aberrations.

2 - Aberrations géométriques

2.1 - Généralités

L'utilisation courante des instruments d'optique se fait le plus souvent dans des conditions assez éloignées des conditions de Gauss : images de grande dimension et pupilles de grande ouverture.

Les écarts produits par rapport aux conditions de Gauss sont appelés aberrations géométriques.

Considérons un objet AB et son image de Gauss $A'B'$. Un rayon quelconque venant de B ne coupe plus le plan de front ($A'y'z'$) en B' mais en B^* (fig. 6).

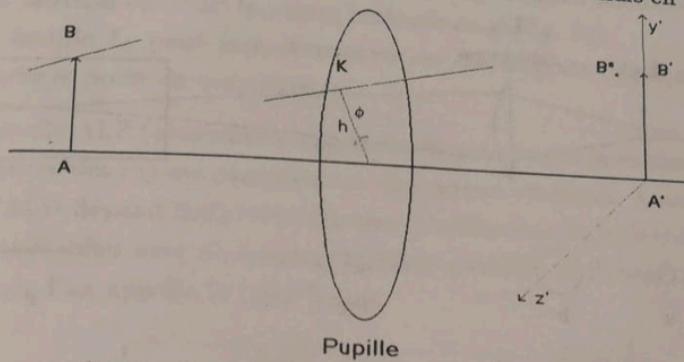


fig. 6 - Paramétrage des aberrations géométriques

Les composantes (dy' , dz') dépendent du rayon considéré que l'on caractérise par y' et par les coordonnées du point K (h, ϕ) situé dans le plan du diaphragme limitant les rayons utiles (pupille).

Il est intéressant de développer $B'B^*$ en fonction des puissances croissantes de h et y' . L'ordre 1 est nul (c'est la définition des rayons paraxiaux donnant l'image de B en B'). L'ordre 2 est nul par raison de symétrie et il reste d'abord le troisième ordre :

$$B'B^* = C_3 h^3 + C_{21} h^2 y' + C_{12} h y'^2 + C_0 y'^3$$

Chacun de ces termes correspond à un effet particulier et la nomenclature est la suivante :

<i>CORRECTIONS</i>	<i>ABERRATIONS</i>
$C_3 h^3$	aberration sphérique
$C_{21} h^2 y'$	coma
$C_{12} h y'^2$	astigmatisme et courbure de champ
$C_0 y'^3$	distorsion

Les expériences qui suivent permettent d'illustrer ces différents termes.

2.5 - Distorsions

Ce défaut en y'^3 s'observe avec une très faible ouverture mais des points source très éloignés de l'axe optique.

Expérience : faire l'image en lumière blanche (éventuellement avec un filtre) d'une grille de dimension 5 cm x 5 cm (**précédée de dépoli** *) au moyen d'une lentille de grand diamètre (10 cm) diaphragmée au voisinage de son centre optique. Le grossissement est indépendant de la distance à l'axe et l'image est homothétique de l'objet (fig. 15a).

Si l'on déplace le diaphragme en avant de la lentille, l'image observée n'est plus homothétique et on observe une distorsion en **bâillet** : le grossissement est plus faible pour les points éloignés (fig. 15b). Inversement, si le diaphragme est après la lentille, la distorsion est en **coussinet** (fig. 15c). Les figures montrent la raison de cette distorsion : l'image du point B n'est pas formée par des rayons passant par le centre de la lentille (rayons qui donneraient l'image en B') mais par des rayons marginaux pour lesquels la lentille est trop convergente et qui arrivent sur le plan de l'écran en B_1 ou B_2 suivant le cas.

* Le rôle du dépoli est de faire que chaque point de l'objet émette de la lumière sur toute la surface de la lentille

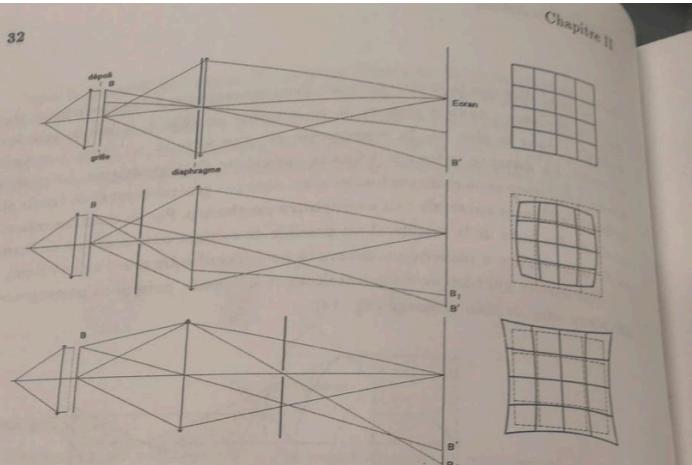


fig. 15 - Distorsions

Généralement, on ne cherche pas intentionnellement à créer de la distorsion en plaçant un diaphragme comme précédemment, mais celle-ci est créée lorsqu'on utilise une source ponctuelle pour faire l'image d'un objet étendu car c'est alors l'image de la source qui joue le rôle de pupille limitante (fig. 16). On minimise la distorsion en faisant l'image de la source sur la lentille de projection.

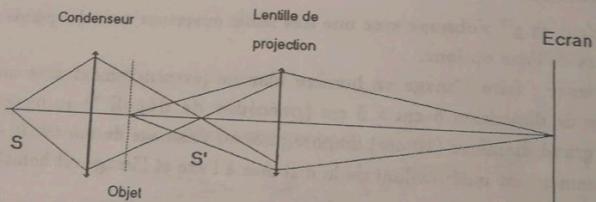


fig. 16 - Distorsion due à la position de l'image de la source

2.6 - Autre façon de mettre en évidence l'ensemble de ces aberrations

Avec un faisceau Laser suivi de 2 réseaux (50 traits/mm) croisés, on constitue un ensemble de faisceaux (fig. 17) dont l'intersection avec un plan perpendiculaire à l'axe forme des taches régulièrement disposées suivant un motif carré (a). Si l'on fait converger ces faisceaux avec une lentille L_1 de grand diamètre, ce quadrillage est déformé en forme bâillet (en b) ou coussinet (en c). La raison en est toujours la trop forte convergence pour les rayons marginaux. On peut agrandir le phénomène avec une lentille L_2 de projection de courte focale.

REMARQUES :

Incertitude : bien dire que si on a l'incertitude qui est environ égal à l'écart type c'est que l'on a pris en compte la répétabilité des mesures.

Mesure de f' : passé trop vite dessus, éventuellement retourner l'objectif.

Influence mise au point sur la distance focale

Bien d'avoir refait le montage pour le diaphragme en fonction du nombre d'ouverture.

Attention de ne pas dire on est l'infini :

La distance entre l'appareil et l'écran qui est très grand devant la focale.

On projette aussi loin afin de pouvoir dire qu'on suppose que pour mesurer $H'A'$, on prend H' au début de la lentille.

Est-ce que c'est gênant de retourner : non car dans le même milieu $f=f'$

QUESTIONS :

- Pourquoi l'incertitude est le même que l'écart type ?

bien dire que si on a l'incertitude qui est environ égal à l'écart type c'est que l'on a pris en compte la répétabilité des mesures.

- Qu'est ce que les caractéristiques d'un instrument d'optique ?

-Focale

-Grossissement

-Grandissement

-luminosité

-Champs

-Résolution (qualité de l'optique)

- Qu'est ce que la résolution ? Limité par quoi ?

Qualité du système optique (si on limite bien les aberrations chromatiques), diffraction.

- Pq la focale est une caract importante ?

Elle caractérise la capacité à faire converger un faisceau Ca joue sur le GRANDISSEMENT.

Plus la focale est grande plus on retrécit l'angle de vue donc on zoom.

- Grandissement pour quel type d'instrument ? (Appareil photo) ; grandissement compare deux tailles. Implicitement il faut des instruments pour lequel l'objet et l'image sont réels.

o Grossissement ? Microscope. On renvoie une image à l'infini
Objet réel mais image virtuelle. grossissement. Comparaison d'angles.

o Lunette astro on peut comparer la taille de la lune avec la photo ?
Non cela nous paraît plus grand en l'observant par rapport à la photo.

o Pourquoi ?

Je ne me souviens plus de l'explication

Si on augmente le grossissement sans rien changer d'autres est ce que l'image est mieux ? Ca ne sert à rien d'augmenter le grossissement si on n'augmente pas la luminosité.

o Est-ce que l'on peut faire une image spécifique sur un capteur sans d'instruments ?

Non on ne peut pas car tous les rayons vont arriver sur le capteur. Il faut une sélectionner les rayons lumineux incident pour faire une image = on peut mettre un petit diaphragme.

o Les lentilles fonctionnent à quelle condition ?

A condition de rester dans les conditions de Gauss

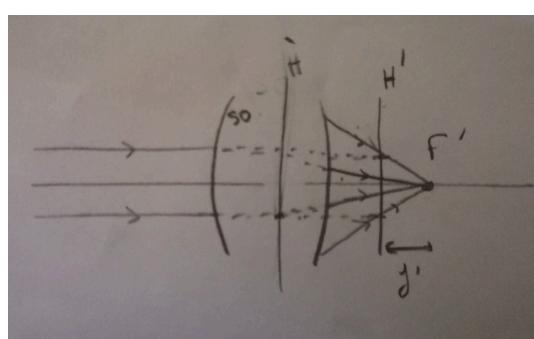
o Qu'est-ce que le stigmatisme ?

o Pourquoi on parle de plans principaux ?

On les introduit ici car la formule de Descartes ne peut pas fonctionner (sy optique simple, lentille mince).

o Quel est l'avantage d'avoir un sy optique complexe alors qu'on pourrait se contenter d'une lentille simple qui converge les rayons comme on le voudrait ?

On est limité par la taille mécanique de l'appareil. Cela permet d'avoir un sy qui converge plus vite. Cf schéma.



o Quelles sont les hypothèses de la lentille mince :

-il faut que le rayon de courbure soit très grand par rapport à l'épaisseur

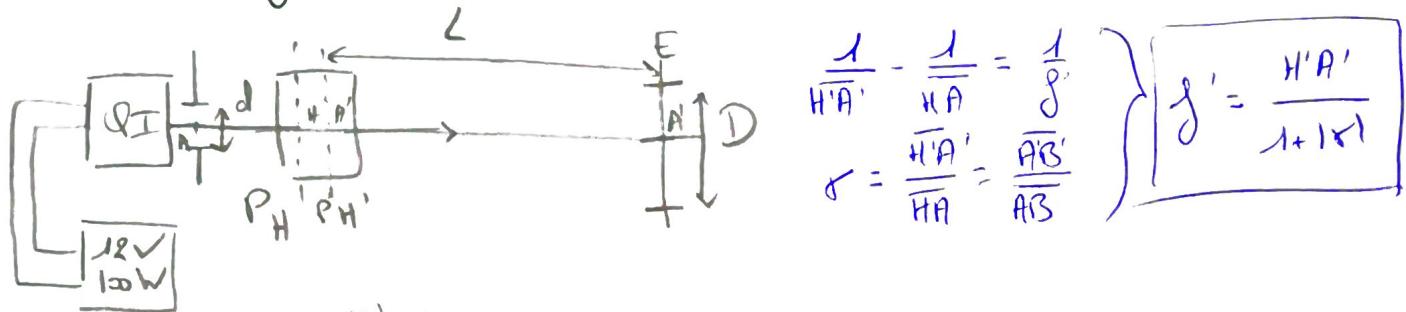
-différence des rayons de courbure soit importante par rapport à l'épaisseur.

Ici on ne réunit pas les conditions **?** système optique épais.

- Pupille d'entrée : image du diaphragme à l'intérieur du système optique.
Effet d'agrandissement entre la pupille d'entrée et le diaphragme d'entrée.
Diaphragme physique proportionnel à la pupille d'entrée.
Cf schéma Marie.

Montage 7: Objectifs photographiques

* Mesure de f'



$$d = (1 \pm 0,02) \text{ cm} \quad \begin{matrix} \text{hyp} \\ HA' \approx f' \end{matrix} \quad L = (228,5 \pm 1,5) \text{ cm} \quad \begin{matrix} \text{"distance apparent/énam" } \gg f' \\ \text{de un point effectuer calcul avec} \\ \text{hyp so.} \end{matrix}$$

$$D \rightarrow \text{mesure statique} \Rightarrow x = \frac{D}{d}$$

$$f' = \frac{L}{1 + \frac{D}{d}}$$

$$\frac{\Delta f'}{f'} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \frac{1}{D^2} \left(D\frac{\Delta D}{d} + \frac{D^2}{d^2} \Delta d\right)^2}$$

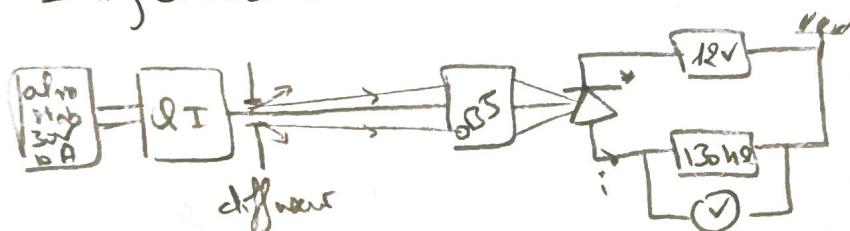
↳ on peut réaliser ainsi l'erreur sur $H'A'$

↳ on peut retrouver H' avec f'

$$f' = (85,0 \pm 0,7) \text{ mm}$$

ici focale objet par défaut car $f = f'$ pour SO avec m en milieu entre entrée et sortie.

* Influence de l'ouverture sur la luminosité



$$\text{Tracé de } V = f\left(\frac{1}{NO}\right) \Rightarrow \frac{NO}{NO'} = \frac{D'}{D}$$

NO	3,5	5,6	8
D_d	17,5	11,2	8
(cm)			

Un diamètre image du diaph.

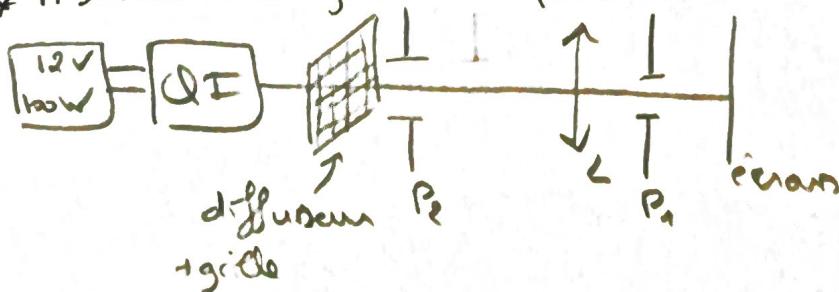
$$\frac{5,6}{3,5} = 1,6 \\ \frac{8}{5,6} = 1,42$$

le carré fait qu'il y a un gros écart.

$$\begin{aligned} &\text{photodiode polarisée en inverse:} \\ &\text{i.e. éclairement} \\ &\text{éclairement} \propto D_{\text{diaphragme}}^2 \quad \left. \right\} \text{éclairement} \\ &NO^2 \propto \frac{1}{D} \quad \begin{matrix} \text{PE} \\ \text{diaphragme} \\ \text{l=diamètre} \\ \text{image.} \end{matrix} \quad \downarrow \\ &\text{PE} \propto \frac{1}{NO^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{D(3,5)}{D(5,6)} &= 1,56 \quad \text{nouvelle mesure} \\ \frac{D(5,6)}{D(8)} &= 1,5 \quad \frac{3,5 \mid 5,6 \mid 8}{365 \mid 23,3 \mid 16,0} \\ \frac{D(5,6)}{D(8)} &= 1,4 \quad \frac{1,42}{1,42} \end{aligned}$$

* Aberrations géométriques



P_1 et P_2 sont $\pm 1^\circ$ du diaph.
 P_1 observe coulisse
 P_2 observe bandes.

Conclusion: $OP = \text{inst opt.} = \text{focale}$; diaph. $\rightarrow NO$ trop grande et aberrant

Comment faire

- Rayonne en épi réel
- Écart type \sim incertitude Ph? réflect^o des expériences est pris en compte
 68%
 $(\times 2)$ pr 35%
 $(\times 3)$ pr 38% on divise par \sqrt{N} pour à norme sans cause il faut faire 6 mesures
- ↓
- explicat^o des plans principaux → introduit point opt C.
 (parler du fait qu'il ne voit pas l'ys de l'obs)
- distance focale = abscisse égale case en hauteur
- * Caractéristique d'un int opt I → pouvoir de résolut^o **

↳ focale ; corriger les rayons.
 capacité à faire

et surtout ça change le grandissement.

* Grossissement pour : objet réel et image virtuel

* Grandissement pour : objet réel et image réel

→ rapport de l'angle d'observat^o avec int et avec l'obj.

→ rapport des tailles de l'obs et l'image

luminosité.

→ not^o de champs

** limité par les aberrat^o et la diffraction

Image sans blemish
ou miroir sur un capteur



réfléchi les rayons

→ resté de l'aberrat^o de Gauss sinon on peut le signification à plusieurs

→ Diversité d'op simple.

→ hyp lentille mince $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{f}$ $\rightarrow S = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$.
 pas rayon de courbure.

Montage 1: Pied à culis devant lampe = object
Gaufré

+ obj' opposé on retrouve alors f'
et les plans principaux image et object de l'objectif

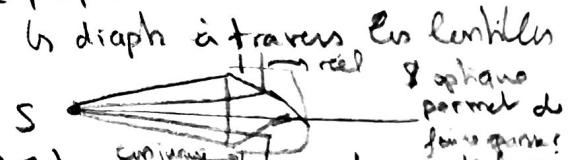
On peut supposer 6 point° du plan image avec la valeur f' contracteur.

On retrouve ensuite f' avec une mesure moyenne.

Montage 2: On enlève le convergent de la lampe QI et on place un écran dépolié + fin + plan (l'objectif) vers écran devant la photodiode celle-ci reliée à un voltmètre R en + d'une alim.

On observe un phénomène courbe \rightarrow pb de diamètre D et pas de la U

↳ montage QI + obj + lentille + écran.
projette l'image du diaphragme sur l'écran.
On mesure l'image du diaphragme. (pupille d'entrée)
le diamètre de +



On observe un écart important pour NO ptt(3,5) ainsi on prend un NO
vecteur $NO^* = \frac{P3}{34,5} \times 5,6 = 3,73$.

↳ remplace sur G courbe \rightarrow point + près de la courbe.
distant.

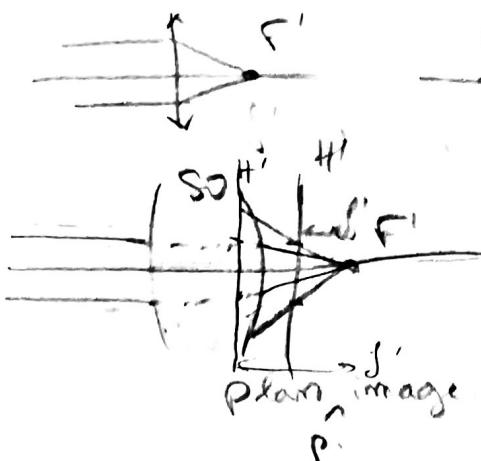
Montage 3: Grosse lentille tq d'aberrat°

* diaphragme après G lentille \rightarrow réduit les aberrat° + d'alo lumineux
+ forte contraste

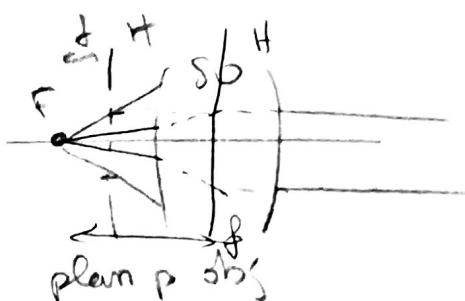
* ap mais fin de L \rightarrow image de la grille se déforme
 \rightarrow s'appelle courbure. 

- diaphragme av L proche obj's aberr^o "aberr" en relief imprimé.
- les aberr^o courb^o compenser aberr^o barbot d'où bonne image.

Suite commentaires



lentille nég.



8 opt +.

→ zoomer pour observer que certain change de focale pb en photographie.

→ diaphragme entre L pour compenser aberr^o

→ A) Distort^o aberr^o type diaphragme formé pour les voir aberr^o sphérique + pb sur l'ave avec daph ouvert.

