

OBJECTIF TELECENTRIQUE

Dans son livre célèbre 'La Technique Photographique' dernière édition (6^{ème} - 1957) -- Paul Montel Editeur -- L.P. Clerc, à la page 37, me crédite de l'invention d'un système nouveau d'objectif télécentrique, plus simple que celui inventé par L. Porro en 1843.

Voici ce que dit Clerc - L'objectif télécentrique ancien est caractérisé par le fait que sa pupille d'entrée est rejetée à l'infini par construction. Dodin réalise un nouveau système plus simple d'objectif télécentrique en disposant un diaphragme au foyer d'un système convergent.

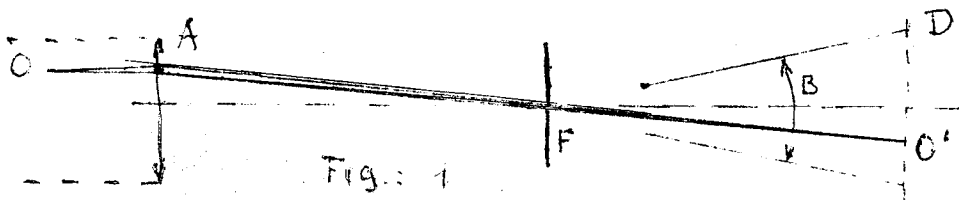
... Disposition dont je signalais en effet l'intérêt dans un article paru à l'époque.

Aussitôt que j'ai eu en main l'édition en question, j'ai écrit à Clerc pour lui signaler qu'il ne s'était pas rendu compte que le seul et unique moyen de rejeter à l'infini une pupille d'entrée était justement de placer un diaphragme au foyer postérieur et qu'en conséquence, je n'avais rien inventé; mon article n'ayant eu d'autre prétention que de vulgariser l'idée de Porro. Je ne sais ce qu'il advint de ma lettre, mais elle resta sans réponse et Clerc mourut peu de temps après.

Je suis heureux d'avoir ici l'occasion de rétablir une 'vérité historique', mais ce livre ci n'aura pas la diffusion du livre de Clerc et je resterai, jusqu'à la fin des temps, crédité d'une invention que je n'ai jamais faite. Après tout on ne prête qu'aux riches.

Quoi qu'il en soit de cette anecdote, voici la théorie extrêmement simple, des objectifs télécentriques. Elle est à peu près inconnue, il est probable que très peu de gens ont compris les mémoires de Porro.

Soit A (fig.1) un système optique convergent fonctionnant comme objectif.



On dispose un diaphragme au droit du foyer postérieur, ce qui a pour effet de rejeter la pupille d'entrée à l'infini.

Si on place un objet éclairé en O près de l'objectif, celui-ci va former une image de cet objet en O'. Les rayons portant cette image sont disposés en forme de pinceaux. Le simple examen de la figure montre que l'axe optique de ce pinceau est parallèle à l'axe optique de l'objectif. Il en sera de même pour tous les objets placés dans le champ utile de l'objectif, quel que soit leur emplacement en hauteur ou en profondeur.

Conclusion. Je reprends ici les termes mêmes du livre de Clerc: 'Le centre de la pupille étant le point de vue, la photographie n'est plus une projection conique, mais une projection orthogonale (perspective cavalière)'.

Remarque: le champ est limité à un cylindre de diamètre égal au diamètre de l'objectif. La profondeur de ce champ est limitée par les dimensions du cliché à couvrir. Plus ce cliché devra être grand moins on pourra éloigner l'objet de l'objectif: il faut en effet qu'une bonne mise au point soit faite pour que les images soient nettes, ce qui impose au plan D un emplacement déterminé dans l'angle B, en conjugaison avec l'objet O.

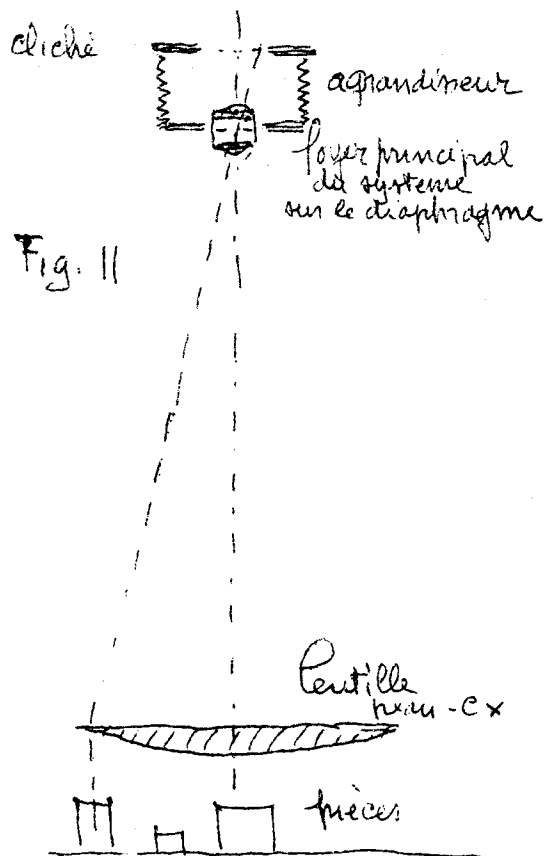
Cette théorie des objectifs télécentriques a été exploitée largement dans la construction de systèmes d'éclairage pour les microscopes: de plus elle permet de comprendre le fonctionnement de ces mêmes microscopes dont les objectifs sont pour la plupart, diaphragmés dans le plan de leur foyer postérieur.

On ne trouvera guère d'ouvrage bien documenté sur les objectifs de microscope, le secret le plus opaque ayant toujours été la règle dans cette industrie particulière. Si vous voulez y connaître quelque chose, il vous faudra tout réinventer. Vous y passerez du temps, mais je suis persuadé que vous y arriverez bien plus facilement qu'on ne pourrait l'imaginer. Après tout les bons objectifs sont dans le commerce. Reconstituer les théories d'après eux est simple affaire de patience et d'instrument de mesure. Un peu d'intelligence ne nuira pas évidemment, sans parler de l'argent nécessaire pour acheter les objectifs destinés à être détruits.

En dehors des microscopes, les applications des objectifs télécentriques sont actuellement totalement inexistantes. Peut-être suis-je le seul au monde à en posséder un grand et à l'utiliser (rarement). Et pourtant les applications industrielles possibles sont très intéressantes.

Si on se propose de photographier de très petits objets, pièces d'horlogerie par exemple, n'importe quel objectif photographique peut être employé pourvu que son ouverture absolue soit plus grande que la plus grande dimension de l'objet à photographier. Il suffit de disposer un petit diaphragme dans le plan du foyer postérieur, la profondeur de foyer sera facteur de l'ouverture de ce diaphragme.

Pour la photographie de grosses pièces, on emploie le montage de la figure 2 en plaçant le foyer principal du système sur le diaphragme de l'objectif de l'agrandisseur. La lentille plan-convexe que je possède a un diamètre de trente cinq centimètres. Les aberrations sphériques de cette lentille sont gênantes, elles apportent des déformations, heureusement faibles si les pièces sont très près de la lentille. Mais alors il devient difficile d'éclairer ces pièces.



On ne peut pas faire cet éclairage à travers la lentille, à cause des reflets, il faut le faire par en dessous.

Le grand intérêt industriel d'images de ce genre est qu'elle permettent d'obtenir d'emblée des reproductions photographiques dont toutes les dimensions sont figurées à la même échelle que celle d'une règle graduée, photographiées en même temps ou sur un autre cliché. Un agrandissement convenable des clichés obtenus de cette façon, permet donc d'obtenir directement et sans l'intervention d'aucun dessinateur, des dessins d'exécution, par exemple à l'échelle vraie grandeur, sur lesquels il est possible de relever les cotes. Ces projections possèdent évidemment tout le modelé photographique ... et aucune erreur. Tout cela en quelques minutes.

Il est stupéfiant qu'une invention aussi ancienne ait été ainsi abandonnée.

D'autres applications sont possibles: on peut, par exemple (l'idée est de moi), déformer un dessin ou un texte de façon à réduire une de ses dimensions sans réduire l'autre et sans lignes de fuite. Il suffit de présenter ce texte ou ce dessin obliquement sous la lentille. C'est le procédé d'anamorphose le plus parfait que nous connaissions.

J'utilise mon montage télécentrique pour la réalisation de typons pour les arts graphiques, ce qui me permet de faire loger un texte déterminé dans une page trop courte ou l'inverse.

Il reste toujours cette question des aberrations sphériques de la grande lentille qui introduisent des déformations? Il serait possible d'y remédier en employant un objectif astronomique, mais, même simplifié, il coûterait une fortune. Tel que ça marche d'une façon satisfaisante pourvu que la lentille soit mince, c'est à dire pourvu que l'agrandisseur soit perché très haut.

Applications décoratives. A notre époque où, pour des effets plus ou moins heureux, on cherche du nouveau n'en fut il plus au monde, on peut pousser le principe de l'instrument au delà du projet de Porro et obtenir des perspectives dont le point de vue n'est pas à l'infini mais au delà. Les lignes de fuite de pareilles perspectives se trouvent inversées, les parties les plus éloignées des objets étant plus grosses que celles qui sont les plus proches. Pour ces applications les aberrations de la planconvexe sont sans importance.

L'article ci-dessus réimprimé, a été écrit il y a dix ans et publié dans mon "Manuel du Tailleur et Polisseur de Verres d'optique", aujourd'hui épuisé. L'idée m'est venue il y a un mois, de rechercher si les objectifs télécentriques n'auraient pas des qualités particulières intéressantes pour la construction des appareils photographiques et, en utilisant des éléments que j'avais déjà, j'ai construit un objectif de ce genre. Pourtant j'ai dû polir trois lentilles spéciales.

Maintenant quelques mots d'histoire. Tous les objectifs photographiques actuels ont comme ancêtre une boule en verre, taillée à Venise au XVI^{ème} siècle. Bien que l'optique telle que nous la connaissons n'ait été découverte qu'au début du XVII^{ème} siècle par Képler, on s'occupait déjà d'optique et l'étude de cette sphère donnait une assez bonne image des objets sur une surface sphérique très proche d'elle et concentrique. Pourtant la boule, même diaphragmée en son centre n'est pas achromatique. Il fallut attendre Newton à la fin du XVII^{ème} pour même s'apercevoir que l'aberration chromatique existait.

Depuis tous les efforts des chercheurs ont porté sur les modifications à faire subir à l'intérieur de la boule pour ...

Eloigner l'image

La rendre plane

La rendre achromatique

mais les deux dioptries terminaux à

l'entrée et à la sortie restent ceux

de la boule et tous les deux concentriques. Cela n'est rigoureusement exact

que pour les objectifs symétriques mais sensiblement exact pour tous les objectifs. Il y a cependant des exceptions et des exceptions qui comptent : les objectifs des microscopes tiennent plutôt de la demi sphère que de la sphère. Pourtant si on considère que le condensateur fait partie de l'objectif on retrouve la sphère avec la préparation cette fois sur le centre. Les objectifs des lunettes terrestres ne sont pas des boules mais des calottes sphériques améliorées.

Notre objectif télécentrique va catégoriquement rompre avec la tradition. Voici comment je l'ai construit.

Premier élément. Une lentille achromatique dite "de Claireau". Ce n'est pas Claireau qui l'a inventée, il en a seulement amélioré le calcul. Ce genre de lentille a été inventé et construit par un artisan parisien inconnu au moment même où Newton déclarait à la Société Royale des Sciences à Londres que cette construction était mathématiquement impossible.

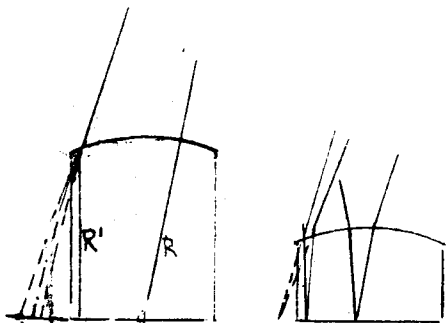
Celle que j'ai employée est relativement mauvaise, elle a été construite empiriquement et sans grand succès.

Deuxième élément. (très loin du premier, presque en contact avec l'image) Une lentille plan-convexe épaisse. Pour la rendre achromatique j'ai fait le raisonnement suivant, beaucoup plus intuitif que scientifique : une lentille planconvexe épaisse peut être construite de telle façon que le centre de courbure de la surface sphérique soit au centre de la surface plane. Dans ces conditions, le stigmatisme absolu est réalisé pour le centre du champ, en vertu du principe digne de La Palisse : "qui ne modifie pas ne saurait modifier mal" En effet les rayons se dirigeant vers le centre ne sont pas déviés. Pour ce point il n'y a aucune aberration même pas chromatique. Mais les rayons obliques arrivant au bord du champ sont largement déviés et un liseré coloré apparaît, très visible.

Et voici mon raisonnement. On sait que, pour réduire l'aberration chromatique, il faut combiner un système optique qui soit à la fois convergent et divergent, tel que la convergence subsiste. Cela paraît contradictoire. On y arrive cependant, pour les lentilles achromatiques en combinant deux verres de compositions chimiques différentes. J'y arrive ici avec une seule qualité de verre en réduisant l'épaisseur de la lentille de telle façon qu'elle soit nettement divergente pour les faisceaux de rayons formant l'image mais en restant fortement convergente en ce qui concerne le champ.

Je ne sais pas si je me ferai bien comprendre, c'est assez difficile.

Premier croquis. Pour faciliter l'explication, je vais supposer que les rayons viennent de l'image pour aller vers l'œil, c'est ce qui se passe effectivement quand on utilise l'instrument comme loupe. Je suppose aussi que le rayon de courbure est égal à l'épaisseur de la



plan-convexe. Dans ces conditions le rayon R, issu du centre, n'est pas dévié; il ne présente aucune aberration, mais un rayon R' issu d'un point loin de l'axe, est fortement dévié. A son point de déviation il est dispersé en un faisceau coloré triangulaire, le sommet du triangle étant sur la lentille. Je figure ce faisceau par deux lignes pointillées, l'une portant la couleur rouge, l'autre la couleur bleue qui seront vues sous l'aspect d'un liseré coloré virtuel en A, d'une certaine étendue et bien visible faisant suite au bord de l'image grossie.

Deuxième croquis. Ici je figure une lentille de hauteur plus faible, elle devient divergente pour les faisceaux, mais reste convergente pour les rayons extrêmes. Si je figure deux rayons blancs issus du même point objet sur le bord du champ, ils sont dispersés

comme dans le premier croquis, mais, à cause de la divergence causée par la réduction d'épaisseur de la lentille, le rayon bleu d'un des rayons blancs va converger sur l'image en même temps et au même point que le rayon rouge issu du second rayon blanc. La lumière se combinera de telle façon que le point de convergence paraîtra blanc. Il n'y a plus de liseré coloré parce que le phénomène n'est pas limité aux deux rayons blancs que j'ai été obligé de supposer pour les besoins de mon explication, il est général pour toutes les couleurs et pour toute la lentille.

Bien entendu il faut que l'épaisseur de la lentille soit bien déterminée

Pour ma construction je n'ai pu faire aucun calcul, ignorant les défauts résiduels de ma lentille imparfaitement achromatique, j'ai opéré par expérience directe en réduisant l'épaisseur de la lentille jusqu'à disparition du liseré coloré. En l'espèce, le résultat a été obtenu dès le premier essai. J'ai eu beaucoup de chance.

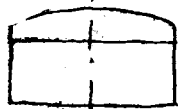
Un seul défaut géométrique est nettement visible, c'est une très légère déformation de l'image (en barillet). Les droites de l'image sont très légèrement courbes avec la concavité tournée vers le centre. Je crains que ce défaut ne puisse être corrigé qu'en taillant une lentille asphérique.

Voici le croquis de l'ensemble de l'objectif.

Résultats.



lentille achromatique
diaphragme (seulement
pour l'emploi comme objectif)
Comme loupe il faut retourner
la lentille. L'oeil dia-
phragme.



lentille plan-convexe
épaisse, collée à un
bloque de verre plan-
parallèle

image

L'ensemble donne une excel-
lente loupe, car l'oeil
diaphragme beaucoup et
compense ainsi les défauts
de ma lentille insuffisam-
ment achromatique.

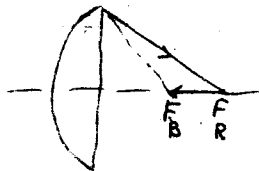
Comme objectif c'est moins
bon, l'image manque de
finesse dans le détail, à
moins qu'on ne diaphragme
beaucoup. Il faudrait faire
calculer cet instrument avec
une calculatrice électronique
Je ne le ferai pas n'ayant
aucun client en vue.

Les axes des faisceaux
formant l'image sont parallè-
les entre eux, la pupille de
sortie est à l'infini. Cela
promet une image très plane.

Le diaphragme est grossi,
virtuellement deux fois par
la lentille plan-convexe ce
qui agrandit virtuellement
l'ouverture optique d'autant.

Il y a beaucoup d'analogie entre cet objectif et celui dessiné
dans l'article de mon manuel, il ne manque guère que le bloc de verre.
il serait possible de l'ajouter. Tel qu'il est il est surcorrigé.

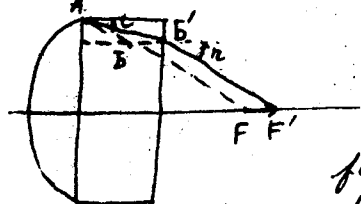
Nous examinons le principe de la solution
l'achromatisme dans un cas simple, en considérant
une lentille plane convexe d'indice de réfraction
 n et de dispersion $\delta n = n(F) - n(C)$. Le
rayon de courbure est R .



La convergence est $\frac{1}{f} = (n-1) \frac{1}{R}$ d'où $f = \frac{R}{n-1}$

La dispersion chromatique du foyer entre les
raies F et C est donc: $\delta f = -R \cdot \frac{\delta n}{(n-1)^2}$ et la distance focale
diminue quand la radiation va du rouge au bleu.

Examinons l'effet d'une lame de verre à faces parallèles d'épaisseur
de réfraction n' et de dispersion $\delta n'$ entre les rayons F et C, accolée à la
face plane de la lentille précédente.



Considérons un rayon lumineux qui émergeait
dans l'air, suivant la direction AF, c'est à dire
passant par le foyer F.

Si on applique la lame à faces parallèles contre la
face plane de la lentille, le rayon se trouve moins
degré dans le verre que dans l'air et prend la direction
AB', puis il sort dans l'air suivant B'F' parallèle à AF et
determine le nouveau foyer F'.

On voit que ce foyer a été déplacé à l'opposé de la lentille d'une
longueur FF' = BB'. Cette longueur est donnée par la formule
classique (voir de $n' - 1 = \frac{n' - 1}{n'}$): $BB' = FF' = \frac{n' - 1}{n'} e = \left(1 - \frac{1}{n'}\right) e$.
L'élonguement est d'autant plus grand que n' est plus grand; il est
donc croissant quand la radiation va du rouge au bleu.

La différence d'élonguement des foyers correspondant à la
raie F (bleue) et à la raie C (rouge) découle de l'équation précédente:

$$\delta(FF') = \frac{\delta n'}{n'^2} e$$

Son action sur la dispersion des foyers vient en deduction de
la dispersion chromatique δf due à la traversée de la lentille simple.
La correction est donc parfaitement réalisée si on a:

$$\delta f + \delta(FF') = 0 \quad \text{ou} \quad R \frac{\delta n}{(n-1)^2} = \frac{\delta n'}{n'^2} e$$

$$\text{d'où} \quad e = R \frac{n'^2}{(n-1)^2} \frac{\delta n}{\delta n'} = f \frac{n'^2}{(n-1)^2} \frac{\delta n}{\delta n'}$$