

FEUILLES VOLANTES

catalogue sur demande

Les Prismes, 234 av Mal Leclerc 34000 Montpellier tel: (67) 92 32 04
Feuille CH auteur: L. Dodin

L'achromatisme, à la portée des imbéciles.

Je fais moi-même partie de la glorieuse phalange des faibles d'esprit. En cette qualité j'aime les explications faciles.

On sait par expérience que le verre n'a pas le même indice de réfraction pour toutes les couleurs du spectre. Il y a "dispersion" des couleurs, cela se mesure par un angle entre les rayons bleus et les rayons rouges. Ce qui est valable pour un dioptré(1) est valable aussi pour les deux dioptrés plans d'un prisme ou les deux dioptrés sphériques d'une lentille. On dit qu'il y a aberration chromatique. Bien entendu il ne s'agit pas d'une aberration de la Nature, mais une aberration des lois de l'optique élémentaire (de la convention de Gauss). La nature ne saurait être aberrante.

Depuis Newton, on cherche sans discontinuer à rectifier les aberrations, qui sont fort gênantes.

Il y a d'abord les systèmes stigmatiques absolu. Le plus connu est la lame à faces parallèles. Soit un rayon incident A sur la première

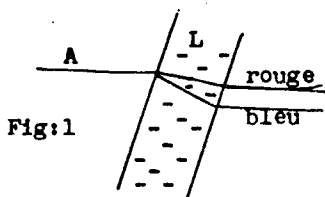


Fig:1

dioptré d'une lame à faces parallèles L. Il est réfracté, donc dispersé. Je figure le rayon bleu et le rayon rouge, ils seront dispersés de nouveau et sortiront du verre, tous les rayons colorés du faisceau parallèles entre eux et au rayon A. Pourvu que la pupille de l'œil soit assez grande pour recevoir les deux rayons extrêmes en même temps, ce qui est en général le cas, l'œil fera

converger sur la rétine les rayons colorés et, comme ils sont parallèles entre eux, ils convergeront tous au même point de la rétine en se recomposant, et l'œil verra un point blanc. J'ai fait l'expérience de construire une grande cuve à faces parallèles que j'ai remplie de sulfure de carbone, produit très réfringent. L'œil était trop peu ouvert pour recevoir tous les rayons à la fois, ce fut un beau feu d'artifice..

Il y a les prismes et les lentilles dits achromatiques. Les prismes ne sont pas utilisés, ils ne constituent qu'un sujet d'étude: il est en effet possible de les corriger de l'aberration chromatique, mais pas des autres aberrations, dites géométriques. Les lentilles sont, au contraire, d'usage courant. Je commencerai tout de même mes explications par les prismes.

Soit un prisme A, taillé dans du crown (c'est le verre à vitre),

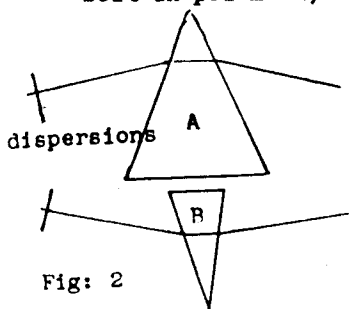


Fig: 2

il est peu réfringent et peu dispersif et un autre prisme B en flint. Il en existe en ce moment quelque chose comme 200 variétés de compositions diverses, mais on a conservé l'ancienne dénomination du temps où il était toujours à base de plomb. Ce verre est plus réfringent que l'autre et disperse beaucoup plus.

(1) Dioptré=surface de verre poli.

On calcule ces prismes de façon à ce qu'ils aient tous les deux une dispersion faisant le même angle. Je figure l'angle par une portion de droite de même longueur pour les deux prismes (le double du sinus). Le second prisme sera beaucoup moins épais que le premier. Si je calcule maintenant les deux prismes l'un à l'autre, tête bêche, les deux dispersions égales s'annuleront, et pourtant il restera une réfringence utile importante, à cause de la plus grande épaisseur du crown. Pour les lentilles c'est la même chose; les lentilles ne sont que des prismes courbes. On devra donc s'arranger pour joindre deux lentilles la première convergente, la seconde divergente et de vergences inverses. Si la dispersion est la même pour les deux lentilles elle sera annulée. Bien entendu c'est plus compliqué que cela. J'ai simplifié pour me faire comprendre. Il restera un spectre résiduel, les deux dispersions ne se recouvrent pas exactement, le crown disperse plus les bleus que ne le fait le flint, et le flint beaucoup plus les rouges. Voici comment on calcule actuellement l'achromatisme des lentilles. Je reproduis ci-dessous un paragraphe d'un livre d'Albada.

" Il résulte de considérations théoriques dans lesquelles nous ne pouvons entrer, qu'un bon achromatisme peut être obtenu si les distances focales (des deux lentilles) sont proportionnelles aux quantités γ (nu) indiquées dans les catalogues (pour chaque qualité de verre). "

Le travail est réduit au calcul de la formule suivante.

$$\text{Inverse des distances focales} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

C'est la "condition d'achromatisme". Elle permet de choisir les verres sur les catalogues.

Il faut tout de même dire quelques mots de la correction des aberrations géométriques. Je me limiterai à l'aberration de sphéricité.

Il existe une infinité de solutions différentes, on les trouvera dans l'Optique Instrumentale de G.A. Boutry, chez Masson (l'ouvrage est épuisé, voyez la bibliothèque nationale). Elles sont groupées en quatre familles. Ces quatre familles sont toutes utilisées pour la construction d'objectifs compliqués, mais seule la première famille l'est quand la lentille est utilisée seule. Boutry donne 11 exemples mais deux sont particulièrement remarquables et les plus employés.

La première de ces deux lentilles satisfait à la condition d'Herchel (stigmatisme conservé quand la distance de l'objet varie), mais le champ est petit. On l'emploie de préférence comme objectif astronomique.

Mesures en unités arbitraires.

Première courbure du crown + 67,20 (centre de courbure à droite vers l'image)

Deuxième courbure du crown - 24,40 (cc à gauche) Les rayons vont de gauche à droite; le crown est en avant.

Première courbure du flint - 27,62 -id-

Deuxième courbure du flint -116,6 -id-

La seconde de ces deux lentilles satisfait à la condition dite des sinus ou d'Abe. Le stigmatisme se conserve sur un champ appréciable, ce qui fait qu'on l'emploie pour la construction des lunettes terrestres.

Première courbure du crown + 61,16 (c de c à droite)

Deuxième courbure du crown - 26,97 (c de c à gauche)

Première courbure du flint - 27,62 - id -

Deuxième courbure du flint - 75,84 - id -

Ces lentilles ne sont pas collables mais l'épaisseur d'air est mince

Pour le choix des verres, il faut appliquer la condition d'achromatisme.

Il est intéressant de remarquer que, bien que ces deux lentilles soient incompatibles, elles n'en sont pas moins voisines et toutes les deux assez proches de la première lentille achromatique construite empiriquement au XVII^{ème} siècle qui, elle était construite de deux lentilles collées, la première équiconvexe en crown, la seconde plan convexe de même courbure en flint. A cette époque il n'existait qu'un seul flint, et la condition d'achromatisme n'était pas connue. Elle constitue un chef-d'oeuvre de travail empirique. L'inventeur n'est pas connu.

Beaucoup de gens ont travaillé pour triompher du spectre résiduel. On y arrive sensiblement en ajoutant au moins un verre, c'est à dire au lieu de se contenter de faire coïncider deux couleurs, on en fait coïncider trois: ce sont les objectifs apochromatiques. L'idéal serait de construire une lentille corrigeant l'aberration chromatique en employant une seule qualité de verre. On démontre que c'est impossible pour l'infini, en tout cas on n'est jamais arrivé à le faire. On a donc cherché autre chose.

Si on prend une boule de verre et si on forme l'image du soleil au milieu, les rayons sortants ne seront pas modifiés et ressortiront comme ils sont entrés.

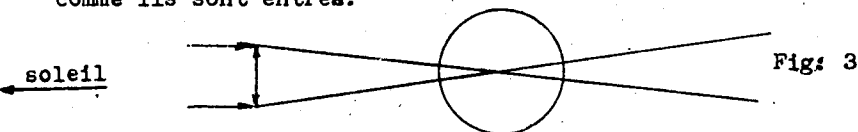


Fig: 3

Cette combinaison permettrait de construire un oculaire de microscope à condition de placer l'oeil assez loin. Mais cet oculaire ne grossirait pas l'image.

Coupons la boule en deux et remplaçons le second hémisphère par un autre de rayon plus petit mais concentrique. Nous ne sommes pas plus avancés.

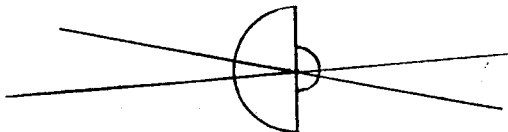


Fig: 4

Réduisons les deux demi-sphères à deux calottes sphériques (des lentilles plan-convexes)

Pour respecter les chemins optiques il faudra éloigner ces deux lentilles l'une de l'autre. Ensuite nous améliorerons le stigmatisme pour l'oeil en retournant la plus petite des deux lentilles.

Nous l'éloignerons encore pour qu'elle puisse grossir l'image et permette de fournir à l'oeil les rayons parallèles qu'il lui faut. Malheureusement, toutes ces opérations nous ont éloigné du stigmatisme absolu de la sphère. Nous arrivons à la formule de l'oculaire de Huygens que voici.

En unités arbitraires:

Foyer de la première lentille = 4

Distance entre les pôles des lentilles = 3

Distance focale de la seconde lentille = 2

Cette formule et la suivante permettent ce qu'on appelle l'achromatisme apparent, les images de couleurs se forment les unes derrière

les autres, et elles ont mêmes dimensions.

Nous avons posé l'équation suivante dont la formule ci-dessus donne une solution, ainsi que la formule de Dolon

Diamètre apparent de l'image rouge = diamètre apparent de l'image bleue.
Les solutions valables sont nombreuses, voici celle dite de Dolon, c'est la formule actuellement employée.

f_1 (distance focale de la première lentille) = 3

e (distance entre les pôles des deux lentilles) = 2

f_2 (distance focale de la seconde lentille) = 1

Cette seconde formule est celle qu'on emploie presque toujours aujourd'hui: elle est assez mauvaise mais bon marché, l'achromatisme est acceptable, le champ est petit, c'est qu'en dehors d'un petit champ, les aberrations géométriques seraient trop grandes ainsi que la courbure de champ. Tel que, on n'emploie guère qu'elle malgré l'existence de formules beaucoup meilleures et à peine plus coûteuses. On peut en conclure aisément que les oculaires comptent peu dans les instruments d'optique quels qu'ils soient. Pour les microscopes, les usagers auront grand avantage à employer un oculaire aussi faible que possible. Pour la photographie microscopique on se passera d'oculaire. Quitte à agrandir l'image ensuite. Un oculaire peut abîmer l'image, il ne saurait jamais l'améliorer.

Suivant d'autres systèmes on a pu construire des oculaires et des loupes avec un champ plus grand et une image plus plane et cela pour un prix à peine plus fort.

J'ai construit moi-même une bonne loupe de ce genre qui ferait tout aussi bien un oculaire. La première lentille de cette loupe est assez originale, la seconde est classique, soit une plan-convexe, soit une lentille achromatique classique à deux verres. Voyez la feuille CB/.

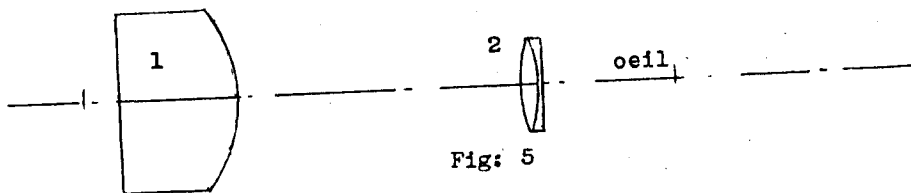
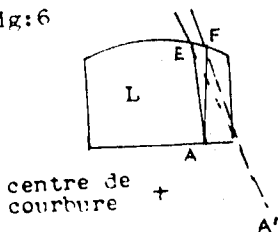


Fig: 5

La première lentille est une lentille planconvexe épaisse, composée pratiquement par une plan-convexe relativement mince collée à une lame à faces parallèles. Le centre de courbure est plus loin que l'image, le dioptré plan est pratiquement sur l'objet ce qui permettrait d'y graver un réticule. Je spécifie qu'elle ne donnerait pas de bons résultats employée seule, si elle recevait des rayons parallèles, ce n'est pas un objectif achromatique, mais elle fonctionne parfaitement pour les pinceaux de rayons convergents qu'elle fournit à la seconde lentille. Dans ce rôle elle est achromatique, bien qu'elle soit entièrement en crown. En voici la théorie. (fig:6)

Fig:6



L'objet étant sur le dioptré plan, il n'y aura aucune aberration pour ce dioptré. Tous les rayons venant de l'objet, ils seront vus blancs. La dispersion des couleurs ne se produit pas puisqu'il n'y a aucune réfraction. Le diaphragme, qui est la pupille de l'oeil dans le cas

d'un oculaire ou d'une loupe, isole un pinceau fin, qui contient évidemment toutes les couleurs puisqu'il est blanc. Je choisis arbitrairement le point A comme objet et je trace AF pour une raie bleue et A' pour une raie rouge. Je les situe de part ou d'autre du pinceau. Je prends comme axe un rayon jaune.

Par $\sin i = n \sin r$, je trouve la direction de l'axe jaune une fois réfracté par le dioptré sphérique. Notons maintenant que le dioptré convexe est divergent, puisque l'objet est entre le dioptré et le centre de courbure. Les rayons rouges et les rayons bleus viendront donc rencontrer l'axe jaune, mais pas nécessairement au même point. Peu importe puisque les points de rencontre sont alignés. L'image sera en A' qu'on situera très en deçà de l'infini. Ce qui peut rester d'aberration chromatique pour la lentille 2 sera corrigé par la même occasion. A' sera vu blanc.

Conclusion. La courbure de la lentille peut être choisie arbitrairement suivant les besoins pourvu que le centre de courbure soit au delà de l'objet.

L'épaisseur de la lentille gouverne le grossissement. Plus elle sera grande plus le grossissement sera fort. Cependant elle devra être inférieure au rayon de courbure. Dans la lentille construite elle est des $2/3$ du rayon qui est de 70 mm.

Le champ est très net et très plan et il est très grand sans déformations apparentes.

On peut généraliser en disant que toutes les lentilles plan-convexes sont achromatiques si on les emploie dans les conditions indiquées ci-dessus, mais, elles n'auront un grossissement appréciable que si elles sont épaisses.

Le système est télécentrique puisque l'axe des pinceaux de rayons est perpendiculaire à la surface plane. Dans ces conditions, pour raison de symétrie la lentille restera achromatique d'aspect si on éloigne un peu l'objet de la surface plane. D'ailleurs

Une propriété très avantageuse des surfaces sphériques est que si le stigmatisme est bon pour un point, il reste à peu près bon pour les points voisins, on peut donc, sans inconvénient apparent, disposer le point A loin du dioptré plan et même au delà du centre de courbure en conservant un bon stigmatisme, au moins pour une loupe.