

Étude expérimentale des aberrations géométriques à l'aide d'un laser

par Roland JOUANISSON
Université Blaise Pascal, 63177 Aubière Cedex

Grâce au laser il est possible d'étudier de manière précise et spectaculaire les principales aberrations géométriques des systèmes optiques. De plus, cette étude s'effectue avec un matériel simple, selon des techniques très faciles à mettre en œuvre.

Dans cet article nous rappelons d'abord les méthodes déjà décrites qui permettent d'étudier ces aberrations, soit dans un plan, soit dans l'espace, et qui utilisent, soit successivement, soit simultanément un ensemble de rayons lumineux. [1], [2], [3].

On obtient un ensemble de rayons à l'aide d'un laser et d'un réseau de diffraction (ou de deux réseaux croisés) mais cette technique exige un réseau répartissant convenablement l'énergie dans les différents ordres : un tel instrument n'est pas courant sur le marché*.

Or il existe une autre méthode, extrêmement simple et qui n'a pas, à notre connaissance, fait encore l'objet de développements : l'utilisation d'une nappe conique de lumière obtenue à partir d'un petit miroir cylindrique.

Nous développons à l'aide de cette méthode, et à titre d'exemple, l'étude de la structure d'un faisceau lumineux issu d'une lentille convergente.

* Les qualités que l'on exige de ce réseau ne correspondent pas à celles que l'on exige habituellement en spectroscopie.

1. DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉTUDE DES ABERRATIONS GÉOMÉTRIQUES

Toutes les méthodes décrites permettent d'obtenir des précisions comparables. Elles ne diffèrent que par le matériel nécessaire à leur mise en œuvre. Cependant il est très intéressant de combiner plusieurs de ces méthodes afin d'obtenir des résultats complémentaires. De plus, certaines sont mieux adaptées à la mise en évidence de tel ou tel type d'aberration.

1.1. Rayon lumineux

A l'heure actuelle le faisceau laser réalise la meilleure approximation que l'on sache faire d'un «rayon lumineux». A la sortie du tube laser le faisceau a une section inférieure à un mm^2 et comme sa divergence est faible (de l'ordre du milliradian) ce faisceau peut être utilisé sans modification sur une distance de l'ordre du mètre.

On remarquera que, la répartition de l'énergie dans le faisceau étant gaussienne, on obtient, sur les différents dispositifs de visualisation utilisés, des traces d'autant plus fines que la puissance du laser est faible. Cette particularité sera mise à profit lorsqu'on voudra privilégier la précision des mesures (par exemple pour la réalisation de photographies). D'autre part, il sera possible d'évaluer (grossièrement au moins) l'intensité des faisceaux. Ainsi, l'intensité d'un faisceau réfléchi sur une surface vitreuse en incidence voisine à la normale est très inférieure à l'intensité du faisceau transmis (la photographie n° 1 montre des faisceaux d'épaisseurs différentes correspondant à des intensités différentes).

Dans la plupart des cas un laser de faible puissance (de l'ordre du milliwatt dont le prix est actuellement de l'ordre de 1000 F.) donnera d'excellents résultats.

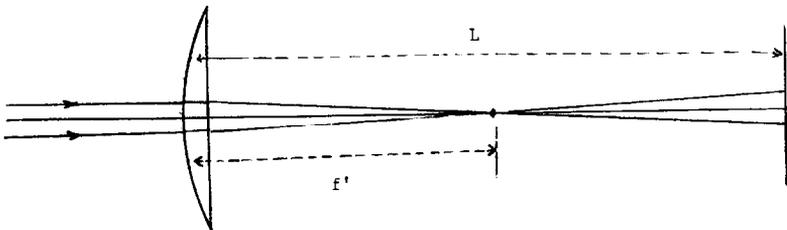


Figure 1

Cependant on peut avoir intérêt à «affiner» le faisceau dans certains cas. Une simple lentille convergente suffit la plupart du temps. La figure 1 montre que la section du faisceau issu de la lentille est inférieure à celle du faisceau incident sur une longueur L inférieure à $2f'$.

Ainsi, lorsqu'on étudie la marche d'un faisceau laser dans une lentille convergente, la section du faisceau est justement minimale au voisinage du foyer image de la lentille, car le faisceau incident est pratiquement parallèle. Dans ce cas l'étude du comportement du faisceau sera plus précise au voisinage du foyer. Dans d'autres cas on pourra être amené à intervenir pour affiner l'étude expérimentale, par exemple si l'on veut réaliser un ensemble de rayons parallèles à l'aide du système réseau + lentille convergente.

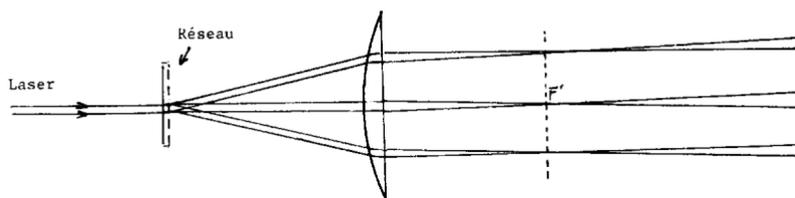


Figure 2

La figure 2 montre que la lentille focalise les faisceaux laser dans son plan focal. Si les rayons parallèles sont destinés à l'étude d'une lentille convergente L_2 placée à la suite de L_1 on peut avoir intérêt à obtenir la focalisation dans le plan focal de L_2 . Pour cela, à l'aide d'une lentille auxiliaire (L_0) on focalisera le faisceau initial sur le réseau R (figure 3).

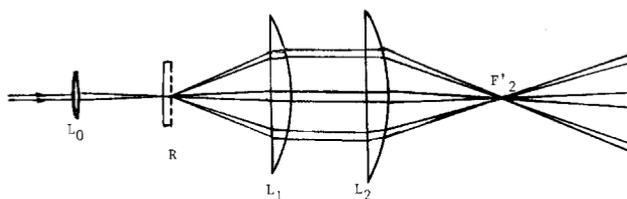


Figure 3

Un miroir plan n'agit pas sur la focalisation du faisceau, de même qu'un miroir cylindrique (ou conique) lorsque le faisceau est dans un plan contenant une génératrice (figure 4).



Figure 4

Ainsi un miroir cylindrique permettra d'obtenir une nappe conique d'épaisseur pratiquement constante (à la divergence du faisceau près). De même si l'on veut transformer une nappe conique en nappe cylindrique pour l'utiliser sur une grande distance on aura avantage, en général, à prendre un miroir conique (figure 5). Une lentille sphérique donne un élargissement du faisceau d'autant plus important que sa convergence est grande (figure 2).

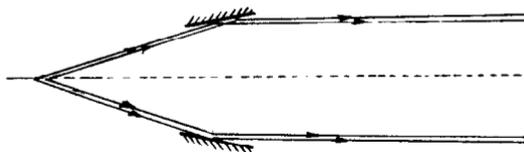


Figure 5

Ces différentes remarques préliminaires permettent de justifier certains montages utilisés par la suite et d'analyser diverses particularités que présentent les documents photographiques.

1.2. Utilisation d'un rayon laser unique.

La méthode la plus naturelle est d'observer (et d'enregistrer) la trace d'un rayon «explorateur» qui rencontre le système optique à étudier. Avec un seul faisceau on a le maximum de lumière (et de visibilité), ce qui permet d'utiliser un laser de faible puissance. Il suffit d'imaginer un dispositif permettant le déplacement souhaité du faisceau incident. Par exemple on obtient un ensemble de faisceaux parallèles successifs en utilisant une lame à faces parallèles (figure 6) tournant autour d'un axe perpendiculaire à son plan.

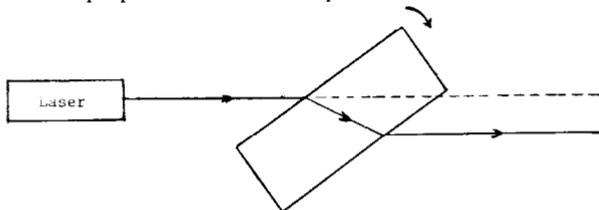


Figure 6

L'observation sera faite dans un caisson à fumée, les traces successives des faisceaux étant reconstituées à partir de repères. Cette méthode utilise le système optique «réel» mais elle est peu commode.

Une amélioration considérable est obtenue en transformant le faisceau rectiligne en faisceau plan et en observant sa trace sur une surface plane diffusante (figure 7). [2], [3], [4].

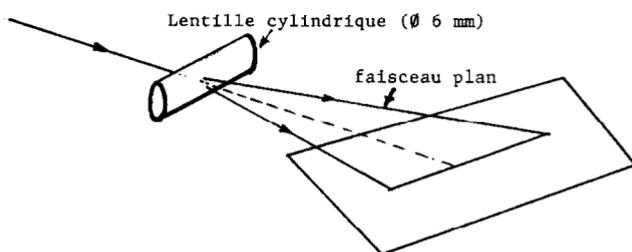


Figure 7

Le faisceau ainsi élargi est moins dangereux en cas d'exposition accidentelle des yeux, tout en donnant une trace très lumineuse sur la surface diffusante (papier blanc ordinaire). L'inconvénient est qu'il faut disposer d'un instrument schématique adapté à cette technique. Ainsi les surfaces sphériques ne pourront être étudiées que selon une courbure à la fois. Cependant les lentilles cylindriques taillées dans des plaques de plexiglas sont d'usage courant dans notre enseignement. (Pour ceux qui voudraient les réaliser eux mêmes, voir [3], [4]).

1.3. Utilisation d'un ensemble de rayons situés dans un plan

On réalise un ensemble de rayons divergents avec un réseau par transmission comprenant de 50 à 100 traits au mm. Si le profil du réseau est convenable (c'est-à-dire si l'épaisseur des traits est très inférieure à la distance a entre ces traits) on obtient un ensemble de rayons ayant des intensités comparables. Par exemple, avec $n = 100$ traits/mm, le réseau étant normal au faisceau, les différents rayons font avec le faisceau d'ordre zéro les angles donnés par :

$$\sin \Delta_k = \pm \frac{k\lambda}{a} = nk\lambda \quad (k \text{ entier}) \quad (\text{figure 8})$$

$$\Delta_1 = \pm 100 \times 0,633 \times 10^{-3} \text{ rd pour } \lambda = 633 \text{ nm}$$

$$\text{soit : } \Delta_1 = \pm 3,62^\circ \quad \Delta_2 = \pm 7,24^\circ \quad \text{etc...} \quad (\text{figure 9})$$

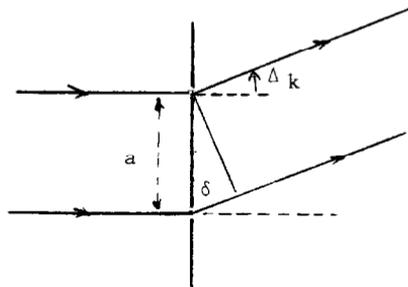


Figure 8

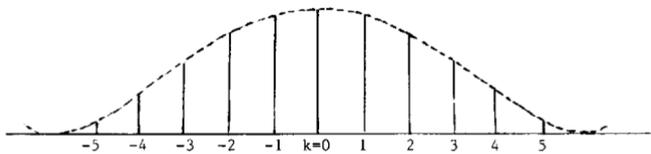


Figure de diffraction d'un réseau utilisable

Figure 9

La méthode permet une observation simultanée de l'ensemble des rayons ; elle est donc plus spectaculaire (photo n° 1). Comme précédemment l'observation a lieu dans le caisson à fumée ou mieux, sur la table d'expérience. Il faut alors combiner l'action d'un réseau et d'une lentille cylindrique ce qui permet d'obtenir un ensemble de nappes planes de lumière.

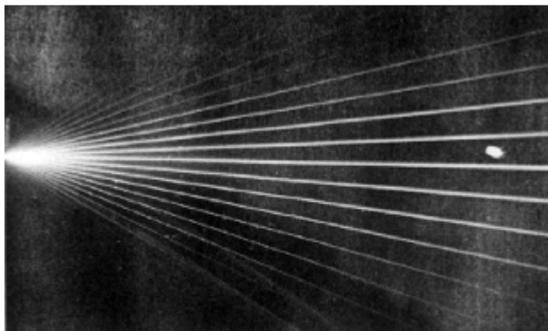


Photo 1

Dans ce dernier cas il faut disposer d'un laser plus puissant (par exemple 5 mW). Les réglages sont un peu plus délicats. (Pour la

fixation des différents instruments sur le laser voir la technique décrite dans l'article cité en référence [4].

1.4. Utilisation d'un ensemble de rayons situés dans l'espace.

Cette technique est signalée dans l'ouvrage [3].

A l'aide de deux réseaux du type décrit précédemment on réalise un réseau croisé qui permet d'obtenir plusieurs dizaines de rayons régulièrement répartis dans un cône. Une observation d'ensemble sera faite dans un caisson à fumée muni de faces vitrées dans des plans perpendiculaires. Pour une étude précise on utilise un écran diffusant qu'on observe par transmission (un papier calque convient) et que l'on déplace perpendiculairement au faisceau (figure 10).

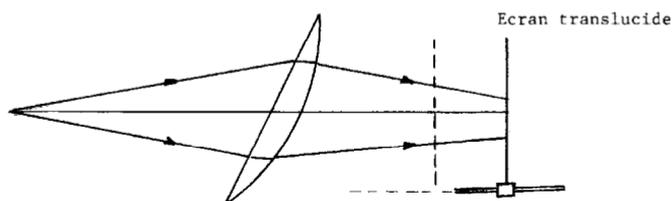


Figure 10

On étudie ainsi la structure du faisceau dans différents cas : par exemple l'aberration de sphéricité (on prend un ensemble de faisceaux incidents parallèles à l'axe de la lentille). (Photos n° 2 et n° 3 prises dans les plans (a) et (b) avant et après le point de focalisation) (figure 11).

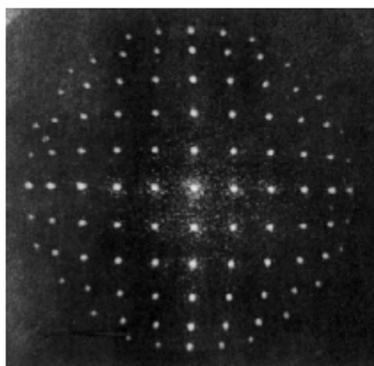


Photo 2

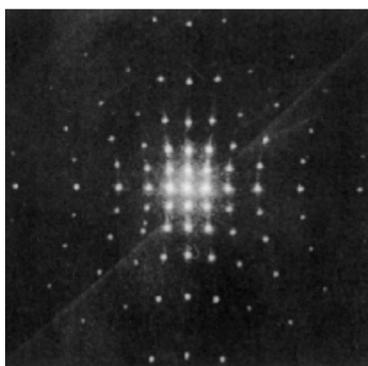


Photo 3

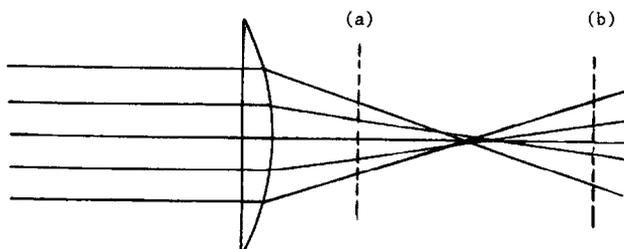


Figure 11

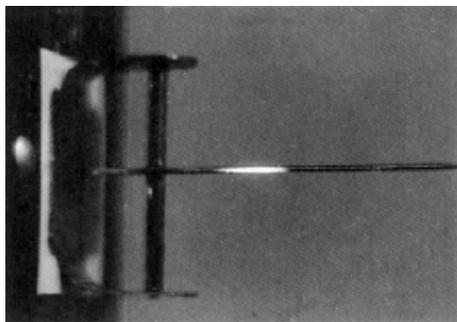
2. UTILISATION D'UNE NAPPE CONIQUE DE LUMIÈRE

Nous avons déjà attiré à plusieurs reprises l'attention sur la possibilité de transformer simplement un faisceau laser en nappe conique de lumière (voir [2], [4], [5]) en utilisant un petit miroir cylindrique comme, par exemple, une aiguille à coudre. Le diamètre optimal de l'aiguille est de l'ordre de 0,6 ou 0,7 mm. Le faisceau laser tombant sur le miroir est transformé en une nappe conique dont l'axe est confondu avec celui de l'aiguille (figure 4). On a intérêt à placer l'aiguille dans un plan diamétral du faisceau.

La partie de la lumière qui ne rencontre pas le miroir donne une tache lumineuse appartenant à la surface conique.

Pour l'étude qui va suivre, comme on utilise des instruments d'optique montés sur des supports verticaux, on a intérêt à ce que l'axe du cône soit horizontal. Pour cela l'aiguille devrait être mobile dans un plan horizontal. Il est utile de réaliser un petit accessoire qui permet de positionner facilement l'aiguille par rapport au faisceau. Cette aiguille sera par exemple collée à l'araldite perpendiculairement à un axe solidaire d'un bâti évidé qu'on fixera sur le boîtier du laser à l'aide d'un aimant (photo n° 4). L'axe sera à frottement dur de manière à immobiliser l'aiguille dans la position convenable. En modifiant l'angle formé par l'aiguille et le faisceau incident on fait varier l'angle du cône.

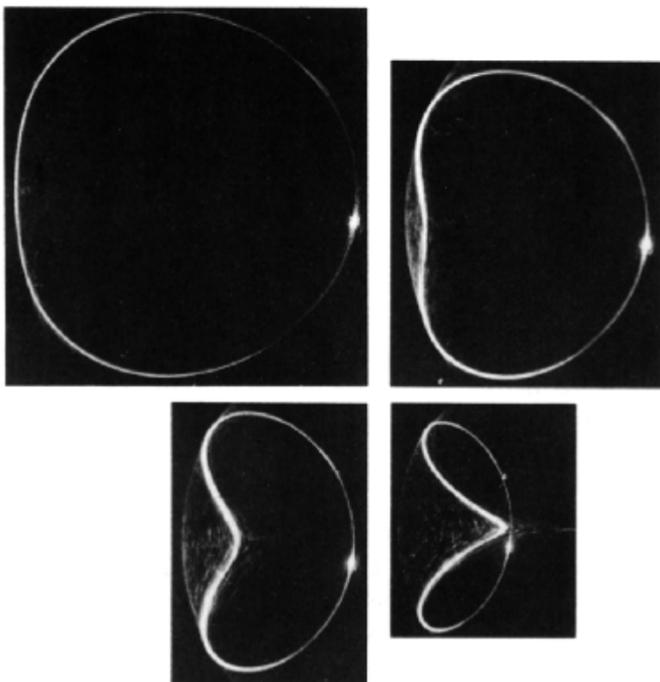
Photo 4



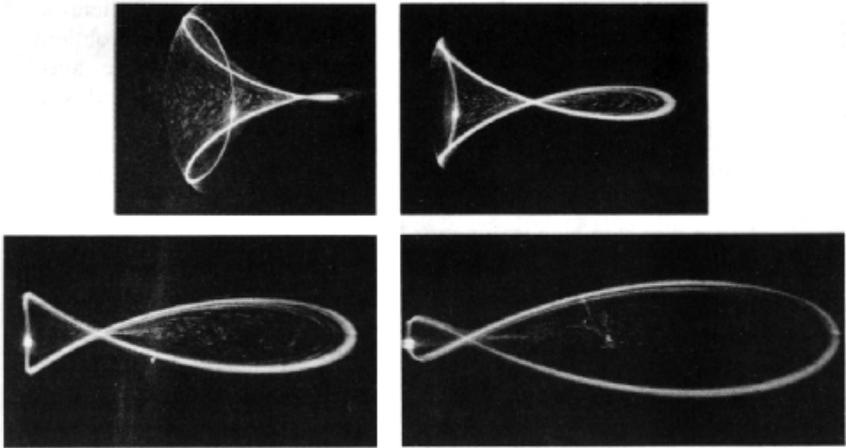
La nappe conique obtenue est très lumineuse (toute la lumière est répartie sur une nappe de faible épaisseur alors qu'avec une lentille sphérique on obtient un cône plein peu lumineux). De plus, on obtient une figure géométrique bien définie dont on pourra suivre avec précision la déformation dans les différents systèmes optiques analysés.

Application à l'étude des aberrations

A titre d'exemple nous donnons le résultat détaillé de l'étude de la déformation d'un faisceau conique tombant sur une lentille plan-convexe dont l'axe optique fait un angle important (de l'ordre de 30°) avec l'axe du cône de lumière. A la suite de la lentille (figure 10) on a placé une tige parallèle à l'axe du faisceau incident. Sur cette tige est fixé un écran diffusant qu'on peut déplacer normalement à la tige. On photographie les figures obtenues par transmission dans des positions (1), (2), (3)... régulièrement espacées, le grandissement étant toujours le même. Il est donc possible, à partir de ces documents, de reconstituer la nappe issue de la lentille (photos n° 5 à n° 12).



Photos 5 à 8



Photos 9 à 12

On remarquera qu'au delà d'une position où elle présente le minimum d'épaisseur, la nappe s'épaissit pour les raisons indiquées au paragraphe 1.1.

Autres possibilités :

1) Une nappe conique permet de visualiser avec précision la déformation d'un pinceau lumineux et en particulier la coma en l'absence d'aberrations de sphéricité. Si on fait varier l'angle du cône on peut suivre l'évolution de la coma.

2) Ensemble de nappes coniques

En associant un réseau et un miroir cylindrique on obtient un ensemble de cônes concentriques (photo n° 13), ce qui permet d'observer simultanément plusieurs faisceaux de lumière.

A titre d'exemple on a reproduit deux aspects de la trace de deux faisceaux obtenus par cette méthode avec la même lentille que précédemment. (A noter cependant que les deux faisceaux coniques incidents n'ont pas le même

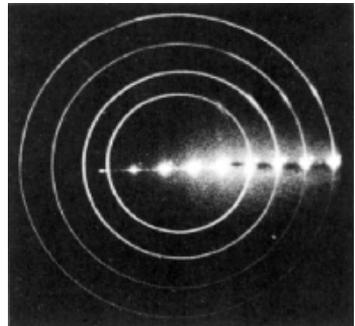
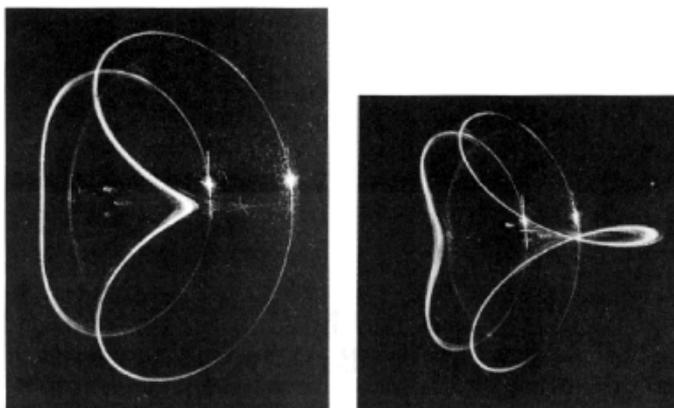


Photo 13

sommet ; les figures observées ne correspondent donc pas exactement au même point objet). (photos n° 14 et n° 15).



Photos 14 et 15

CONCLUSION

L'utilisation d'une nappe conique de lumière paraît très intéressante pour l'étude de l'optique géométrique. A un niveau élémentaire, il est possible de bien matérialiser des faisceaux divergent, convergent, parallèle (un écran transparent et diffusant interceptant le faisceau montre des figures géométriques bien définies et très lumineuses). Il est facile de montrer quelles sont les conditions à respecter pour que l'image d'un point soit un point, etc... A un niveau supérieur on étudie les principales aberrations géométriques dans des conditions exceptionnelles de simplicité et de visibilité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. ROCHE, J. CRETON - B.U.P. n° 610, page 467.
- [2] R. JOUANISSON, G. FABRE - B.U.P. n° 621, page 563.
- [3] M. HENRY, R. JOUANISSON «La lumière du Laser, Guide d'Expériences», Masson, 1987.
- [4] R. JOUANISSON, Fiche technique n° 8, Adasta, 1990.
- [5] R. JOUANISSON «Un enseignement pour le futur», Comptes rendus des Journées de la Villette 1990.