

## Un modèle qualitatif : la formation des images par une lentille convergente

Le physicien cherche à décrire l'univers par des modèles simples qui lui permettent de rendre compte des phénomènes auxquels il est confronté et de les prévoir. Peut-il faire de tels modèles sans calculs, sans données quantitatives ? J'en donne ici un exemple, emprunté au programme de 4<sup>me</sup> : celui des images formées par une lentille convergente.

Le modèle proposé repose sur une idée simple, directement issue de l'expérience (1) : une lentille convergente « referme » les faisceaux lumineux (fig. a et b), contrairement à une lentille divergente qui les « ouvre » (fig. c).

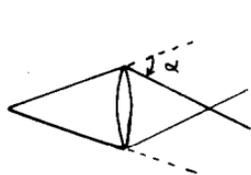


Fig. a

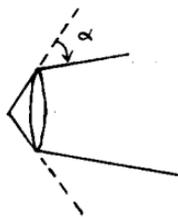


Fig. b

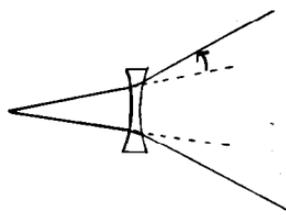


Fig. c

Nous verrons que c'est la notion « clef » qui permet de comprendre :

- comment la lentille donne une image d'un objet,
- pourquoi cette image est localisée à un endroit précis,
- comment sa position dépend de la position de l'objet,
- pourquoi l'image réelle cède la place à une image virtuelle lorsque l'objet est très proche de la lentille,
- ainsi que les notions de grandissement, de latitude de mise au point, de profondeur de champ et leurs variations.

(1) Sciences physiques, classe de 4<sup>me</sup>, livre du professeur, Hachette (1979), page 130 : Visualisation de l'effet d'une lentille convergente sur un faisceau.

On a donc affaire à un véritable *modèle* puisqu'il permet de prévoir toutes les propriétés essentielles des lentilles. Fondé sur une notion qualitative, ses prédictions sont qualitatives ; il suffirait de préciser de « combien » la lentille referme le faisceau (angle  $\alpha$ ) pour obtenir, non plus simplement les sens de variation des diverses grandeurs, mais des valeurs chiffrées. Ce raffinement du modèle par l'apport de données quantitatives a une utilité certaine. L'ingénieur qui conçoit un appareil d'optique ne pourrait s'en passer. Mais si c'est la compréhension des phénomènes qu'on vise, le niveau qualitatif est suffisant et mieux adapté, car plus directement lié à la nature des phénomènes. Il convient bien à la classe de 4<sup>me</sup> et peut être encore fort utile ultérieurement.

Dans l'exposé qui va suivre, je signalerai les points qui sont plus difficiles pour la classe de 4<sup>me</sup>. On peut utiliser le modèle plus ou moins complètement selon les intérêts, les difficultés des élèves et l'importance qu'on a choisi de donner à ce sujet dans l'ensemble du programme de la classe.

### QU'EST-CE QU'UNE IMAGE ?

Le moyen le plus simple pour former une image, c'est de percer un *petit trou d'épingle dans une chambre noire (sténopé)*. C'est aussi la situation la plus directement modélisable ; elle constitue un excellent préalable à l'étude des images données par les lentilles. Je rappellerai brièvement le modèle qu'on peut en faire, car il a déjà été décrit par ailleurs (2) (3), en soulignant certains points importants.

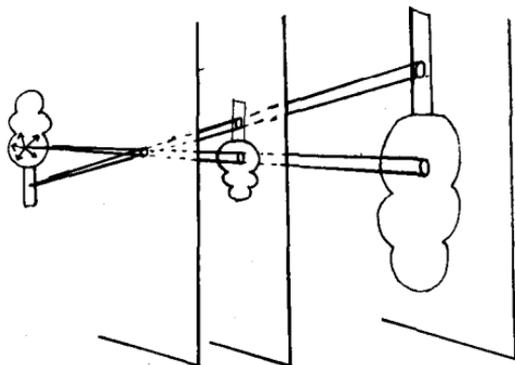


Fig. d

(2) En particulier : Module Photographie, G.T.C.R.E.P. (1974) et L.I.R.E.S.P.T. (1976). Et :

(3) Sciences physiques 4<sup>me</sup> :

— livre de l'élève, Hachette (1979), page 140,

— livre du professeur, Hachette (1979), page 35.

L'image obtenue au fond de la chambre est un ensemble de petites *taches* correspondant chacune à un point de l'objet. Certains auteurs idéalisent cette image en remplaçant l'ensemble du faisceau délimité par le petit trou, par un rayon unique ; cela a l'avantage de donner une image formée de *points* correspondant chacun à un point de l'objet, mais a l'inconvénient de n'avoir aucun sens physique... Il faut donc conserver les taches même s'il y a là une source de difficulté que nous allons discuter maintenant.

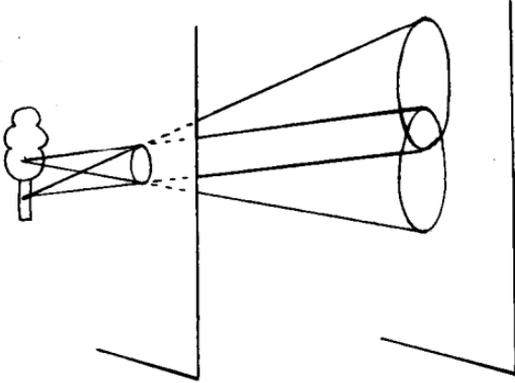


Fig. e

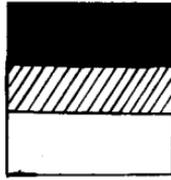
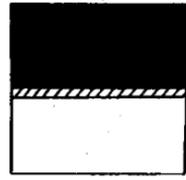
Ce qui est facile à interpréter, c'est le fait que l'image devienne de plus en plus floue lorsqu'on augmente la taille du trou : lorsque le trou est trop grand, des points bien séparés sur l'objet donnent des taches lumineuses qui se chevauchent ; cela correspond bien à la sensation que nous avons en regardant une image floue : les différentes tonalités se mélangent au lieu d'être bien juxtaposées comme sur l'objet.

Le défaut de netteté est ainsi plus directement lié au mélange des taches qu'à la taille des taches. Ainsi, la netteté de l'image ne dépend pas (en première approximation) de la position de l'écran dans la chambre noire. En reculant l'écran (fig. d), on obtient une image homothétique de la précédente, où les taches sont plus grandes mais ne se chevauchent pas davantage ; on a conservé la même information sur l'objet.

Le problème que pose une image formée de taches est le suivant : pourquoi voyons-nous une image nette quand la taille du trou est assez réduite ? Car on peut dire que, quelle que soit la taille du trou, on peut toujours trouver deux points de l'objet assez proches pour qu'il leur corresponde des taches qui se chevauchent. C'est une objection que je n'ai jamais vu soulevée par les élèves de 4<sup>me</sup> avec lesquels nous avons expérimenté l'utilisa-

tion de ce modèle (4) ; il faut néanmoins résoudre le problème ici.

Pour cela, il ne faut pas considérer l'image indépendamment de l'œil qui la regarde. Voici par exemple une image parfaitement nette (*f*), l'image floue (*g*) qu'un gros trou pourrait donner du même paysage (champ de neige et ciel nocturne), et l'image qu'en donne un trou plus petit (*h*).

Fig. *f*Fig. *g*Fig. *h*

Pour des raisons de commodité de reproduction, on a représenté par des zones hachurées les régions de transition qui correspondent, sur les fig. *g* et *h*, au mélange des taches lumineuses claires et sombres ; il s'agit en réalité de dégradés de gris. Ces zones ont également été représentées très agrandies. Si vous éloignez la page à une certaine distance de vos yeux (environ 4 m), la fig. *h* vous apparaîtra semblable à la fig. *f*, mais vous continuerez à percevoir la zone grisée de la fig. *g*. L'image apparaît nette tant que le recouvrement des taches concerne une zone de taille inférieure à la limite de résolution de l'œil.

Revenons maintenant au cas de la lentille convergente. Si l'on insère une lentille convergente dans le gros trou d'un sténopé qui donnait une image floue, on obtient une image parfaitement nette pour une certaine position de l'écran ( $E_1$ ), grâce à l'action de la lentille qui « referme » les faisceaux lumineux et, dans ce cas, les fait converger sur l'écran.

On réserve parfois le nom d'*image* à cette seule figure, qui correspond à une concentration d'énergie lumineuse par un instrument d'optique. Nous avons choisi de garder le mot « image » aussi bien dans le cas du sténopé que de la lentille, l'utilisant ainsi dans un sens plus général comme le fait l'usage courant et même les scientifiques lorsqu'ils parlent « d'images floues » ou de « la latitude de mise au point de l'image ».

Pour une position donnée de l'objet, l'image parfaite est en effet *localisée* dans un plan unique ( $E_1$ ). L'image devient floue en avant et en arrière de ce plan, lorsque des points bien distincts de l'objet donnent des taches qui se chevauchent (position  $E_2$

(4) Expérimentation du Module Photographie, menée dans le cadre de la Commission de Rénovation de l'Enseignement des Sciences physiques (1973-1976).

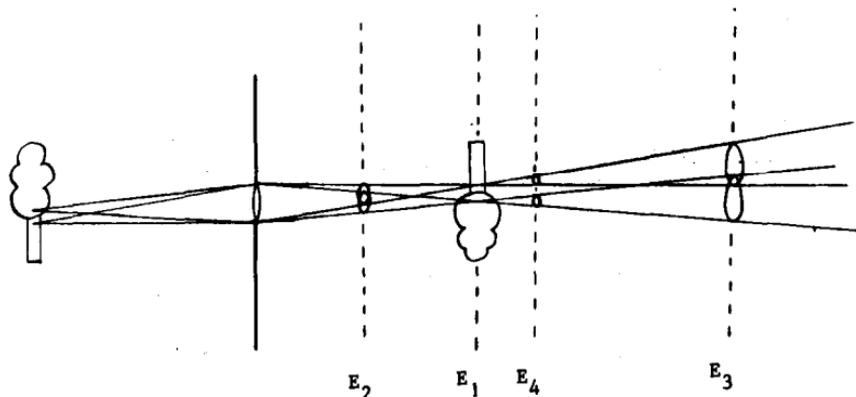


Fig. i

ou  $E_3$ ). Mais il existe une zone où l'image apparaît encore nette ; cette image est de nature semblable à celle que produit le sténopé : elle est formée de petites taches (position  $E_4$ ) ; la zone concernée est ce qu'on appelle la zone de latitude de mise au point de l'image. Si l'on conserve le mot image dans ce cas, il faut le conserver dans le cas du sténopé si on veut être cohérent.

#### COMMENT VARIE LA POSITION DE L'IMAGE AVEC LA POSITION DE L'OBJET.

Il s'agit évidemment ici, comme dans les trois paragraphes suivants, de l'image parfaite (5) située au lieu de convergence des faisceaux.

Lorsque l'objet se rapproche de la lentille, l'image réelle s'en éloigne. On peut expliquer ce phénomène simplement, en considérant l'effet de la lentille sur les faisceaux issus de l'objet :

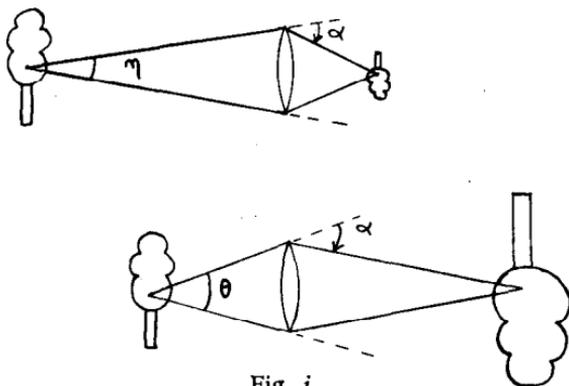


Fig. j

(5) Le modèle ne rend évidemment pas compte des aberrations.

Une lentille donnée possède une certaine capacité de « refermer » les faisceaux (angle  $\alpha$ ); lorsqu'on rapproche l'objet, chacun des faisceaux passant par la lentille est plus divergent (angle  $\vartheta > \eta$ ), la lentille le referme encore [du même angle  $\alpha$  (6)], mais ne peut donner qu'un faisceau moins convergent, le point de convergence recule ainsi donc que l'image.

### IMAGE VIRTUELLE.

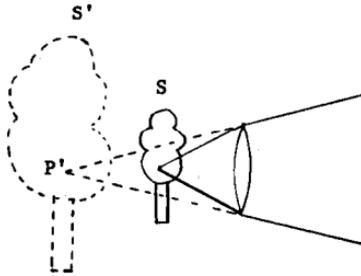
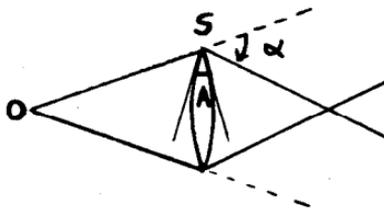


Fig. k

Si l'on continue à rapprocher l'objet, il arrive un moment où les faisceaux incidents sont trop divergents pour que la lentille parvienne à les faire converger à la sortie. Il n'y a plus d'image réelle. Chacun des faisceaux sortants diverge (moins que le faisceau d'entrée) et semble issu d'un point (par exemple P') situé derrière l'objet.

La disparition de l'image réelle est simple à comprendre avec ce modèle. La notion d'image virtuelle est par contre plus délicate, car il faut faire intervenir explicitement l'œil de l'observateur : placé à la sortie de la lentille, il reçoit de la lumière qui lui parvient exactement de la même façon que si elle provenait en ligne droite de chacun des points (P') d'un objet de som-

(6) Pour une lentille donnée, l'angle  $\alpha$  est assez rigoureusement un invariant, si la lentille est mince et est utilisée dans les conditions de Gauss. On peut alors en effet le calculer en assimilant le sommet de la lentille à un prisme de petit angle (A); la déviation du rayon OS est  $\alpha = (n-1)A$  quelle que soit la direction de ce rayon incident.



met  $S'$  ; il a donc la même sensation que s'il regardait directement un objet situé à cet endroit. Ce raisonnement repose sur un fait totalement ignoré *a priori* des élèves de 4<sup>me</sup> (7) (8), à savoir que la perception des objets par l'œil est due à ce qu'il reçoit de la lumière qui est issue de ces objets. C'est donc une notion complexe à ce niveau.

### DISTANCE FOCALE.

La distance focale correspond à la « plus ou moins grande capacité » qu'a une lentille de « refermer » les faisceaux.

Une lentille qui fait converger les faisceaux plus rapidement donne une image plus proche, d'un objet situé à une distance déterminée ; elle est caractérisée par une courte distance focale, la distance focale pouvant être définie comme la distance à laquelle la lentille fait converger un faisceau de lumière parallèle ou comme la distance à laquelle elle forme l'image d'un objet à l'infini.

### GRANDISSEMENT.

Pour interpréter le grandissement des images, il est nécessaire de s'intéresser à la structure du faisceau :

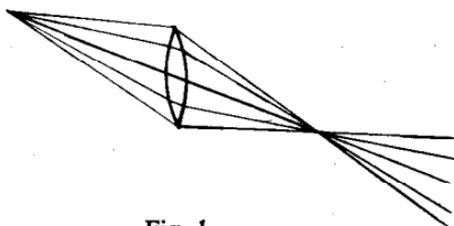


Fig. 1

La lentille referme le faisceau en rabattant les différents rayons lumineux sur la direction moyenne que constitue le rayon passant par le centre de la lentille ; les rayons supérieurs sont déviés vers le bas, les rayons inférieurs sont déviés vers le haut, le rayon médian garde sa direction initiale.

Il en résulte que le point objet et le point image correspondant sont alignés avec le centre de la lentille. Il est alors

(7) E. GUESNE, Lumière et vision des objets : un exemple de représentations des phénomènes physiques préexistant à l'enseignement, in *Physics Teaching in Schools*, Taylor and Francis, London (1978).

(8) Compte rendu de la conférence du 28-XII-1979, B.U.P. n° 620, page 552 (janvier 1980).

facile de prévoir comment la taille de l'image variera avec la distance de l'objet ou avec la distance focale de la lentille.

Avec de longue focale (téléobjectif), l'image se forme loin de la lentille, le grandissement sera important.

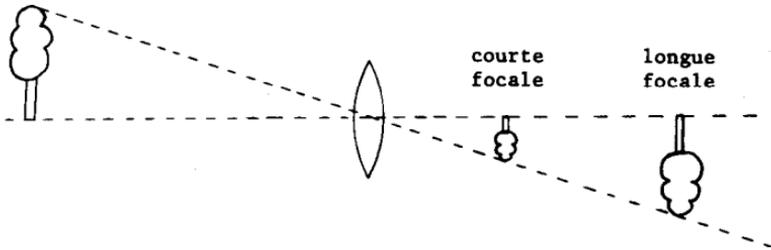


Fig. m

De même, quand on rapproche l'objet de la lentille, l'image grandit; elle grandit encore parce qu'elle se forme plus loin, mais aussi parce que la droite, joignant un point de l'objet au point correspondant de l'image, est plus inclinée.

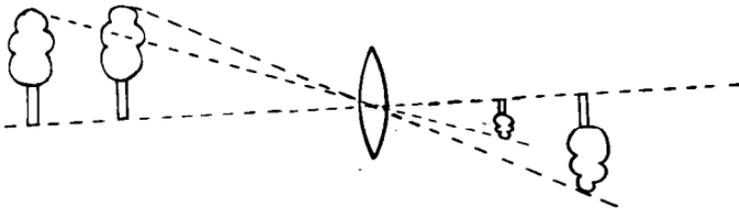


Fig. n

#### LATITUDE DE MISE AU POINT ET PROFONDEUR DE CHAMP : EFFET DU DIAPHRAGME.

Nous avons interprété, dans un paragraphe précédent, la zone de *latitude de mise au point* comme une zone où l'on obtient des images composées de taches distinctes (pour l'œil dont le pouvoir de résolution est limité). Nous allons nous intéresser ici à la longueur de cette zone et à ses variations.

Lorsqu'on diaphragme la lentille, on constate que la zone où l'image est perçue comme nette grandit. Les faisceaux qui passent à travers la lentille (fig. o) sont alors en effet plus minces, leur angle d'ouverture ( $\theta'$ ) est plus petit; par suite, le recouvrement des taches diminue et l'image devient nette à des endroits où elle ne l'était pas avec un plus gros diaphragme (positions  $E_2$  et  $E_3$  des fig. i et o).

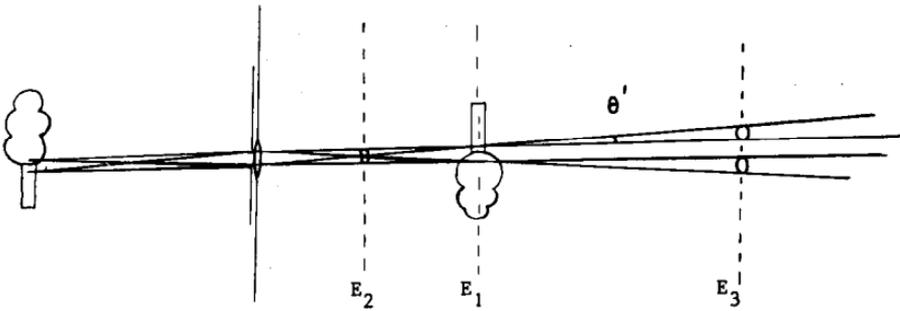


Fig. o

On peut interpréter de la même façon le fait que la zone de latitude de mise au point grandit lorsqu'on rapproche l'objet de la lentille, ou lorsqu'on utilise une lentille de plus grande distance focale. En effet, dans ces deux derniers cas, les faisceaux issus de la lentille convergent plus loin (cf. paragraphes précédents : l'image se forme plus loin), leur angle d'ouverture  $\theta'$  est donc plus petit, ils se chevauchent moins et l'image est perçue comme nette sur une plus grande distance

En photographie, c'est la *profondeur de champ* qui est la grandeur intéressante. On ferme le diaphragme pour accroître la profondeur de champ.

La profondeur de champ est la distance sur laquelle on peut déplacer un objet (ou placer une série d'objets) en conservant une

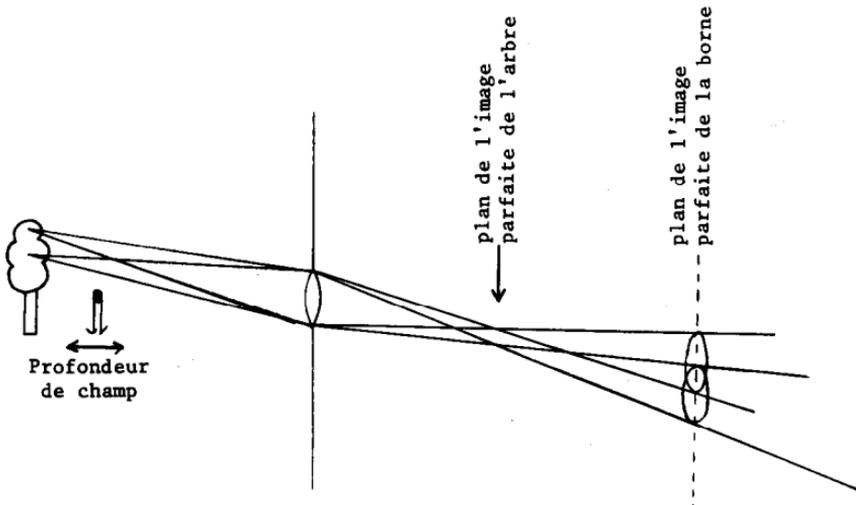


Fig. p

image nette de cet objet (ou de cette série d'objets) dans un plan fixe. Elle est fondamentalement liée à la latitude de mise au point ; elle peut être interprétée de la même façon.

Considérons par exemple l'arbre et la borne des fig. *p* et *q*. En plaçant son film au lieu de convergence des faisceaux issus de la borne, le photographe aura une image nette de l'ensemble des deux objets si les faisceaux lumineux issus de l'arbre donnent à cet endroit des taches distinctes : la fig. *p* représente le cas où l'arbre est en dehors de la zone de profondeur de champ localisée autour de la borne, la fig. *q* représente le cas où l'arbre est à l'intérieur de cette zone. L'arbre ne s'est pas déplacé, c'est la profondeur de champ qui a augmenté lorsqu'on a diaphragmé la lentille (fig. *q*). En effet, les faisceaux lumineux sont alors moins ouverts ; ils se chevauchent moins ; l'image d'objets tels que l'arbre, dont l'image était floue, devient nette.

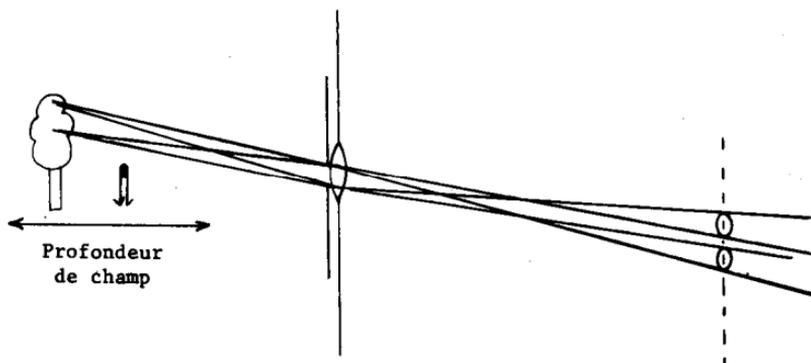


Fig. *q*

### LUMINOSITE DES IMAGES.

Le modèle que j'ai décrit ici permet donc d'interpréter la production d'images (réelles ou virtuelles) par les lentilles et les propriétés de ces images. En considérant l'ensemble du faisceau qui passe à travers la lentille, et non pas simplement quelques rayons privilégiés (rayon parallèle à l'axe de la lentille, rayon passant par le centre de la lentille...), ce modèle a également l'avantage d'interpréter les variations de luminosité de l'image avec la taille du diaphragme.

C'est donc un modèle très complet, qui permet en particulier de comprendre, et donc de maîtriser, la technique si attractive de la photographie.

Edith GUESNE,

(Université Pierre-et-Marie-Curie - Paris VI)  
L.I.R.E.S.P.T. (Université Paris VII).