

# Chapitre 2

## ■ Optique géométrique ■

### Les ordres de grandeur utiles

#### La lumière

vitesse de la lumière dans le vide	$c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
constante de Planck	$h = 6,63.10^{-34} \text{ J.s}$
longueur d'onde (visible)	$400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$
fréquence (visible)	$4.10^{14} \text{ Hz} < \nu = c/\lambda < 8.10^{14} \text{ Hz}$
énergie du photon (visible)	$1,5 \text{ eV} < E = h\nu < 3 \text{ eV}$

#### L'œil

pouvoir séparateur	$\epsilon \approx 1' \approx 3.10^{-4} \text{ rad}$ (soit 1 mm à 1 m de distance)
limites de vision distincte d'un œil normal	PP $\approx 25 \text{ cm}$ et PR = $\infty$

#### Indices lumineux

vide ; air	$n = 1 ; n = 1,00029 (n - 1 \approx 3.10^{-4})$
eau ; verre ordinaire ; flint	$n = 1,33 ; n \approx 1,5 ; n \approx 1,8$

#### En TP

lentille convergente ; divergente	$f' \approx 10, 20 \text{ ou } 50 \text{ cm} ; f' \approx -10 \text{ cm}$
précision du goniomètre	1 minute d'arc = $2,9.10^{-4} \text{ rad}$

### Le cours d'abord

#### ■ Définitions et lois de l'optique géométrique

1. Donner deux caractéristiques physiques importantes d'un faisceau lumineux. Quand et pourquoi parle-t-on de lumière monochromatique ? Comment est définie la longueur d'onde ? Qu'est-ce que la lumière visible ? La lumière blanche ?
2. Quelle inégalité, concernant les dimensions des systèmes, faut-il respecter pour être dans le cadre de l'optique géométrique ? Est-elle vérifiée dans le cas des systèmes optiques usuels ? Citer des cas où l'optique géométrique ne s'applique pas.

3. Comment est défini l'indice de réfraction d'un milieu transparent ? Pourquoi sa valeur est-elle toujours supérieure ou égale à un ?
4. Comment se propage la lumière dans un milieu homogène ? Qu'est-ce qu'un rayon lumineux ?
5. Définir la notion de « dioptré » et en donner des exemples. Comment est défini le plan d'incidence en un point d'un dioptré ?
6. Énoncer les deux lois de Descartes-Snell aussi bien pour le rayon réfléchi que pour le rayon réfracté (en évitant de se limiter aux seules formules...). Comment savoir si, lors d'une réfraction, le rayon s'écarte ou se rapproche de la normale ? Que n'indique pas l'optique géométrique en ce qui concerne les rayons réfléchis et réfractés en un même point d'un dioptré ?
7. Dans quel cas parle-t-on de réfraction limite ? Donner l'expression de  $\sin i_c$ . Définir proprement la notion de réflexion totale et donner des exemples pratiques d'utilisation de ce phénomène.

### ■ Formation d'images

---

8. Donner les définitions précises de « objet » et « image », ainsi que de « réel(le) » et « virtuel(le) ». Faire pour chacune des quatre possibilités (OR, OV, IR et IV) un schéma avec quelques rayons.
9. Comment appelle-t-on un système optique possédant un axe de symétrie de révolution ? Quelle propriété possède un rayon se propageant suivant l'axe optique ?
10. Indiquer la nature des rayons arrivant sur un système centré en provenance : a) d'une source ponctuelle à l'infini sur l'axe ; b) d'une source ponctuelle à l'infini en dehors de l'axe ; c) d'une source étendue à l'infini.
11. Que signifient les notions de « stigmatisme » et d'« aplanétisme » ?
12. Le stigmatisme rigoureux est une propriété rare ; quels arguments font que dans la pratique on peut se contenter d'un stigmatisme approché ? Énoncer pour un système centré les conditions de Gauss permettant un stigmatisme approché. Comment peut-on, en pratique, observer dans les conditions de Gauss ?

### ■ Miroirs plans et dioptrés plans

---

13. Quelle propriété remarquable possède un miroir plan ? Rappeler les caractéristiques : position de l'image, grandissement, ... Montrer sur un schéma et en s'appuyant sur une interprétation en termes de faisceau, que l'image d'un objet réel par un miroir plan est virtuelle et inversement ; en donner une application dans chaque cas.

14. Un dioptre plan séparant deux milieux d'indices  $n$  et  $n'$  est-il stigmatique ? Quelles sont les conditions de stigmatisme approché ? Ces conditions étant respectées, établir une relation de conjugaison qui lie la position du point objet  $A$  et celle de son image  $A'$ .
15. Un observateur, face à une étendue d'eau calme et plane, regarde un poisson se trouvant dans l'eau. Pourquoi voit-il une image de ce poisson sans utiliser de dispositif particulier pour se placer dans les conditions de Gauss ? Estimer par rapport à la profondeur réelle, la profondeur apparente de l'image du poisson dans l'eau ; quel est son grandissement ? Conclure par rapport à l'observation courante dans cette situation.

## ■ Les lentilles minces

16. Quelles inégalités définissent le modèle lentille « mince » ? Quelle conséquence en tire-t-on pour un rayon passant par son centre ? Comment sont définis les foyers et comment sont-ils placés par rapport à la lentille ? Distinguer les deux cas de lentilles en précisant si les foyers sont réels ou virtuels. Comment s'exprime la distance focale et quel est son signe ? Comment est définie la vergence ?
17. Comment construire de façon précise l'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe, dans le cadre du stigmatisme approché ? Quelle est alors la représentation d'une lentille mince dans le cadre de cette construction ?
18. Par quelle(s) construction(s) obtient-on le rayon émergent correspondant à un rayon incident quelconque ?
19. On rappelle les relations de conjugaison des lentilles.

- Origine au centre optique (formule de Descartes) :

en notant  $x = \overline{OA}$  et  $x' = \overline{OA'}$   $\boxed{\frac{1}{x'} - \frac{1}{x} = \frac{1}{f'}}$  qu'indiquent les signes de  $x$  et  $x'$  ?

- Origines aux foyers (formule de Newton) :

en notant  $\sigma = \overline{FA}$  et  $\sigma' = \overline{F'A'}$  :  $\boxed{\sigma\sigma' = -f'^2}$

- Le grandissement transversal est défini par  $\boxed{\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}}$

Quelles caractéristiques de l'image indique-t-il ?

Les expressions du grandissement pour les lentilles minces sont :

$$\boxed{\gamma = \frac{x'}{x} = -\frac{\sigma'}{f'} = -\frac{f}{\sigma}}$$

L'image est homothétique de l'objet par rapport à quel point ?

20. On associe deux lentilles minces de même axe et de distances focales  $f'_1$  et  $f'_2$ .

- ▶ Les lentilles sont accolées (l'interstice  $e = \overline{O_1O_2} \approx 0$ ) ; quelle est la distance focale  $f'$  de la lentille mince équivalente ? Justifier l'utilisation de la vergence exprimée en dioptries.
- ▶ Les deux lentilles sont dissociées ( $e = \overline{O_1O_2} \neq 0$ ) et on définit l'intervalle optique  $\Delta$  par  $\Delta = \overline{F'_1F'_2}$  ; à quelle condition le système est-il afocal (définir ce terme) ?

### Conseils à suivre □ Erreurs à éviter

- Les angles de réflexion et de réfraction (pour l'application de la loi de Descartes) sont toujours définis par rapport à la normale au dioptre (et non pas par rapport au dioptre).
- L'angle de réfraction limite  $i_l$  n'existe que si l'on passe dans un milieu plus réfringent, c'est-à-dire d'indice plus grand. À l'inverse le phénomène de réflexion totale ne peut exister que lors du « passage » dans un milieu moins réfringent.
- La recherche de l'image d'un objet à distance finie doit commencer par un dessin avec une construction soignée en suivant les recommandations ci-dessous :
  - utiliser trois rayons particuliers fléchés (avec 1, 2 ou 3 flèches) dans l'ordre suivant : 1. le rayon qui passe par le centre et qui n'est pas dévié, 2. le rayon qui arrive parallèlement à l'axe et qui ressort par le foyer image et enfin 3. le rayon qui arrive par le foyer objet et qui ressort parallèlement à l'axe. Sans oublier que l'axe optique constitue lui-même le support d'un rayon. Si la figure comporte plusieurs constructions, deux rayons suffisent ;
  - caractériser l'image construite par ses trois propriétés dans l'ordre : réelle ou virtuelle, droite ( $\gamma > 0$ ) ou renversée ( $\gamma < 0$ ), plus grande ( $|\gamma| > 1$ ) ou plus petite ( $|\gamma| < 1$ ) que l'objet ;
  - ne pas oublier de caractériser l'opération réalisée par la lentille en terme de faisceau : le faisceau incident, s'il est divergent (objet réel) est-il rendu plus ou moins divergent (image virtuelle) ou convergent (image réelle) ? le faisceau incident, s'il est convergent (objet virtuel) est-il rendu plus ou moins convergent (image réelle) ou divergent (image virtuelle) ? (voir les questions 26. et 27.).S'exercer à construire l'image d'un objet (d'abord réel puis virtuel) par une lentille (d'abord convergente puis divergente).
- L'image d'un point  $A$  sur l'axe ne peut pas être obtenue avec les rayons particuliers, confondus avec l'axe. Il est très maladroit de surcharger inutilement la figure en utilisant un objet fictif  $AB$ , en construisant son image  $A'B'$  et enfin en déduisant  $A'$  par aplanétisme ! La méthode générale de tracé

d'un seul rayon quelconque passant par  $A$  donne  $A'$  (sur l'axe) immédiatement, avec un minimum de construction (laisser apparente la détermination du foyer secondaire).

- Ne pas parler d'image si le stigmatisme n'est pas avéré.
- Ne pas confondre objet et image : on ne voit pas un objet à travers une lentille, mais son image (pour une observation dans le cadre des conditions de Gauss).
- On utilise souvent l'expression « image nette » il s'agit de préciser une netteté maximale dans le cadre d'un stigmatisme approché et en aucun cas de distinguer une image nette parmi d'autres qui ne le seraient pas !
- Ne pas évoquer « le foyer » ou « le plan focal » d'une lentille puisque dans chaque cas il y en a deux, mais bien préciser « le foyer objet » ou « le foyer image » d'une part et « le plan focal objet » ou « le plan focal image » d'autre part.
- Foyer objet  $F$  et foyer image  $F'$  ne sont pas conjugués !
- Il faut être bien conscient que les constructions théoriques d'image, traduisant le stigmatisme approché des lentilles minces, n'utilisent pas des rayons réels. C'est la raison pour laquelle dans ces constructions les angles sont quelconques, alors que dans la réalité, seuls les rayons peu inclinés permettent d'obtenir une image. En conséquence, indépendamment de leur valeur sur le schéma de construction théorique d'image, il faut, pour tout angle  $\alpha$ , considérer  $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \alpha$ .  
En effet cette approximation est à l'origine même du stigmatisme approché et de l'existence de l'image construite !
- Il peut être utile de connaître les formules de conjugaison, même si l'énoncé doit les rappeler. Cela permet de mieux s'adapter aux changements de notation (par exemple  $\overline{OA}$  noté  $x$  ou  $p$  ou  $d \dots$ ). Respecter évidemment les notations de l'énoncé.
- Choisir entre « formule de Descartes » et « formule de Newton » en fonction des données de l'énoncé ou du résultat cherché (position par rapport au centre ? au sommet ? au foyer ?). Les formules de Newton permettent souvent de conclure plus rapidement. Les expressions de  $\gamma$  découplées par rapport à  $A$  et  $A'$  sont souvent intéressantes.
- Toutes les grandeurs en optique géométrique sont algébriques, c'est-à-dire qu'elles ont un signe ! Ainsi il faut traduire « on photographie un objet à une distance de 5 m » par  $x = \overline{OA} = -5$  m, si l'axe optique est orienté dans la direction de la lumière incidente.  
C'est le cas aussi des distances focales, des grandissements, ...  
Une erreur de signe est de ce fait très mal vue et conduit bien sûr à des applications numériques fantaisistes.

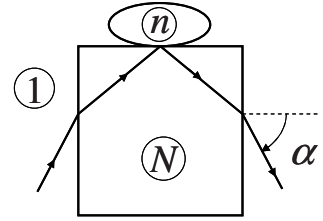
- Le grandissement transversal est défini, de façon générale, par  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$  qui n'est pas une expression du grandissement. Le grandissement n'est pas caractéristique d'un système, il dépend du couple  $(A, A')$ .
- L'approximation des petits angles, du type  $\tan \alpha \approx \alpha$ , suppose que l'angle soit exprimé en radians. Il faut s'exercer à convertir des minutes ou secondes d'arc en radians ou l'inverse comme en TP. Rappelons que  $\pi$  rad correspondent à  $180^\circ$ , que  $1^\circ$  est constitué de  $60'$  (minutes d'arc) et que  $1'$  est constituée de  $60''$  (secondes d'arc).
- Lorsqu'un objet est à l'infini (ou du moins à très grande distance par rapport à la distance focale par exemple), il est interdit de le dessiner sur la figure ; tout point de l'objet envoie alors des rayons parallèles entre eux (plus ou moins inclinés sur l'axe optique du système en fonction du point choisi).
- Lorsque l'étude porte sur un système de deux lentilles disjointes par exemple, l'image donnée par la première devient objet pour la seconde et l'application successive de deux formules de conjugaison (avec origines différentes !) conduit vite à une formule littérale lourde ; il faut dans ce cas préférer les applications numériques intermédiaires et éviter de substituer une formule littérale dans l'autre.
- Un objet virtuel pour un système optique  $S$  peut toujours être considéré comme l'image réelle d'un système optique précédent  $S'$ . Le système  $S$  étant placé trop près de  $S'$  empêche les rayons de se couper réellement.
- L'unité pratique usuelle dans le commerce, pour les distances focales de lentilles utilisées en TP ou celles des objectifs d'appareils photos, de projecteurs,...est souvent le millimètre ; s'en souvenir et convertir en mètre avant l'application numérique.
- L'unité de vergence est la dioptrie, symbole  $\delta$ , qui s'identifie à  $1 \text{ m}^{-1}$ .

## Applications directes du cours

### ■ Réflexion - Réfraction

21. Un rayon lumineux dans l'air tombe sur la surface d'un liquide ; il fait un angle  $\alpha = 56^\circ$  avec le plan horizontal. La déviation entre le rayon incident et le rayon réfracté est  $\theta = 13,5^\circ$ . Quel est l'indice  $n$  du liquide ?

22. Un réfractomètre de Pulrich est constitué d'un bloc de verre de section rectangulaire d'indice  $N$  connu, sur lequel on a déposé une goutte d'un liquide d'indice  $n$  inconnu. On observe un faisceau de rayons parallèles à la limite réfraction – réflexion totale et on mesure l'angle  $\alpha$  correspondant. On prend un indice théorique de 1 pour l'air.

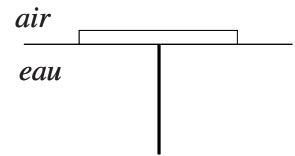


Établir l'expression de  $n$  en fonction de  $N$  et de  $\alpha$ .

AN : Calculer  $n$  sachant que  $N = 1,626$  et  $\alpha = 60^{\circ}00'$ .

Quelles sont les valeurs mesurables de  $n$  avec ce dispositif ?

23. Un disque en liège de rayon  $r$  flotte sur l'eau d'indice  $n$  ; il soutient une tige placée perpendiculairement en son centre.



Quelle est la longueur  $h$  de la partie de la tige non visible pour un observateur dans l'air ? Citer les phénomènes mis en jeu.

24. Une personne de taille 1,80 m se tient debout devant une glace plane verticale. Quelle hauteur minimale doit avoir cette glace pour que la personne s'y voie entièrement ? Ce résultat dépend-il de la distance à laquelle se trouve la personne ? Si la glace possède cette dimension minimale, à quelle hauteur convient-il de la placer ?

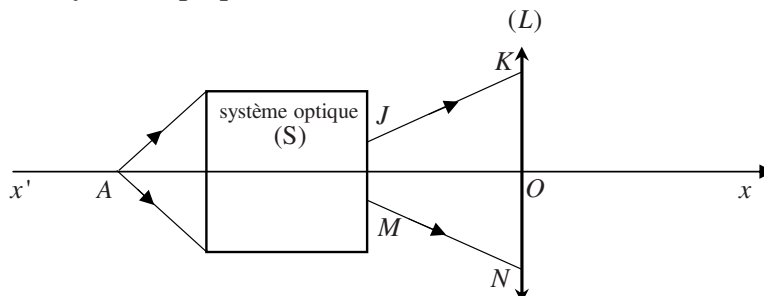
25. Un rayon lumineux tombe sur un miroir plan ; le miroir tourne d'un angle  $\alpha$ , de combien tourne le rayon réfléchi ?

## ■ Lentilles minces

Pour toutes les questions utiliser les relations données question 19.

26. Construire l'image d'un objet réel (d'abord avant  $F$  puis après  $F$ ) par une lentille convergente. Interpréter le résultat en termes de faisceau. Reprendre avec un objet virtuel.
27. Qu'observe-t-on lorsqu'on envoie un faisceau convergent sur une lentille divergente (deux cas sont à distinguer : objet virtuel proche de la lentille, avant  $F$ , et objet éloigné, après  $F$ ) ?

## 28. Image par un système optique suivi d'une lentille



- a) Le système ( $S$ ) est centré et stigmatique. Indiquer sur le schéma, la position de l'image  $A_1$  du point  $A$  par le système optique ( $S$ ).
- b) Le faisceau ( $JK, MN$ ) est-il convergent ou divergent ?
- c) Quelle est la proposition correcte :
- $A_1$  est une image réelle pour ( $S$ ) et un objet virtuel pour la lentille ( $L$ )
  - $A_1$  est une image virtuelle pour ( $S$ ) et un objet virtuel pour la lentille ( $L$ )
  - $A_1$  est une image virtuelle pour ( $S$ ) et un objet réel pour la lentille ( $L$ )
- d) Juste après avoir traversé la lentille ( $L$ ), le nouveau faisceau
- sera nécessairement convergent
  - sera nécessairement divergent
  - peut être convergent, divergent ou parallèle
- e) Soit  $O$  le centre optique de la lentille ( $L$ ), elle donne de l'image intermédiaire  $A_1$  une image définitive sur l'axe optique  $x'x$ . Cette image  $A'$  peut-elle se situer entre les points  $A_1$  et  $O$  ?

**29.** Déterminer graphiquement l'image donnée par une lentille mince sphérique **convergente**, utilisée dans les conditions de Gauss, des objets plans, perpendiculaires à l'axe optique orienté dans le sens de la lumière incidente (dans les cas ci-dessous). Préciser dans chaque cas les caractéristiques de l'image obtenue (c'est-à-dire réelle ou virtuelle, droite ou renversée, plus grande ou plus petite que l'objet) :

objet réel avant le foyer objet et tel que :  $-\infty < \overline{OA} < 2f$  (attention  $f < 0$ )

objet réel avant le foyer objet et tel que :  $2f < \overline{OA} < f$

objet réel entre le foyer objet et le centre optique, tel que :  $f < \overline{OA} < 0$

objet virtuel tel que :  $0 < \overline{OA} < +\infty$

Décrire l'évolution de l'image lorsque le point objet  $A$  décrit l'axe optique ; pour cela s'aider des positions particulières de  $A$  : avant  $F$ , à  $2f'$  de  $O$ , en  $F$ , en  $O$ .

**30.** Dans le cas d'une lentille mince sphérique **divergente**, reprendre les constructions comme à la question **29.**, en déterminant les divers cas intéressants.

**31.** L'objectif d'un appareil photographique est assimilé à une lentille convergente ( $L$ ) de distance focale  $f' = 50$  mm. La distance  $d$  entre ( $L$ ) et le capteur ( $C$ ) où se forme l'image est variable pour permettre la mise au point. On désire photographier des objets dont la distance à ( $L$ ) varie entre  $D = 0,60$  m et  $D \rightarrow \infty$ . Donner les valeurs  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  correspondantes ; commentaire.

**32.** On souhaite projeter un objet lumineux  $AB$  sur un écran  $E$  placé à une distance  $D$  de  $AB$  à l'aide d'une lentille convergente de distance focale  $f'$ .

Montrer qu'il faut  $D \geq 4f'$  ; condition à retenir.