



Tutorat Santé Lyon Sud

UE3

Optique physique et géométrique

Cours du Professeur C.HOUZARD

L'ensemble des cours du Professeur C.HOUZARD fait habituellement l'objet de X QCMs au concours.

Le présent support de cours fourni par le Tutorat Santé Lyon Sud est destiné à faciliter votre prise de notes mais ne constitue en aucun cas une référence pour le concours. Seuls les cours ayant été dispensés par les enseignants et les supports mis à disposition par leurs soins sont légitimes. Veuillez prendre note que seul les photocopiés directement téléchargés depuis Spiral Connect sont certifiés en provenance du tutorat, toute autre source est potentiellement compromise.

SOMMAIRE

I. PREAMBULE.....	3
II. OPTIQUE PHYSIQUE	3
II.A. COMPORTEMENT ONDULATOIRE.....	3
1. <i>Caractéristiques de la lumière</i>	3
2. <i>interférences : le principe d'Huyghens-Fresnel</i>	3
3. <i>Les interférences lumineuses</i>	3
4. <i>La diffraction de la lumière</i>	4
5. <i>Notion de pouvoir séparateur</i>	5
II.B. COMPORTEMENT CORPUSCULAIRE	5
III. OPTIQUE GEOMETRIQUE.....	6
III.A. INTRODUCTION	6
III.B. NOTION D'INDICE OPTIQUE.....	6
III.C. LOI DE SNELL-DESCARTES	6
1. <i>Réflexion</i>	7
2. <i>Réfraction</i>	7
III.D. LE SYSTEME OPTIQUE	8
1. <i>Définitions</i>	8
2. <i>Stigmatisme</i>	8
III.E. OBJETS ET IMAGES	8
1. <i>Images réelles et virtuelles</i>	8
2. <i>Foyer objet et foyer image</i>	9
3. <i>Images et grossissement</i>	9
4. <i>Convergence et divergence</i>	9
5. <i>Les relations de conjugaison</i>	10
III.F. LES LENTILLES	10
1. <i>Généralités</i>	10
2. <i>Lentilles minces</i>	10
3. <i>Lentilles épaisses</i>	11

I. PREAMBULE

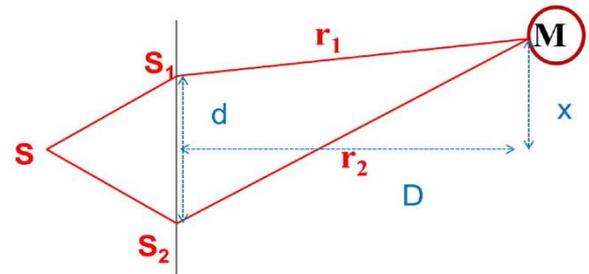
L'optique étudie les propriétés de la lumière et ses interactions avec la matière.

La lumière est une onde électromagnétique qui se distingue des autres rayonnements par le fait qu'elle correspond à la zone de sensibilité de l'œil humain et possède de ce fait la propriété physiologique d'être « visible ».

L'énergie des photons lumineux est faible : la lumière visible n'est donc pas ionisante.

II. OPTIQUE PHYSIQUE

La lumière, comme tout rayonnement électromagnétique, peut se manifester sous un aspect ondulatoire ou corpusculaire, selon les interactions avec la matière mises en jeu.



II.A. COMPORTEMENT ONDULATOIRE

1. Caractéristiques de la lumière

La lumière se caractérise par sa fréquence ν en Hz (s^{-1}), sa période T en s ($=1/\nu$) et sa longueur d'onde λ en m. La longueur d'onde dépend du milieu traversé.

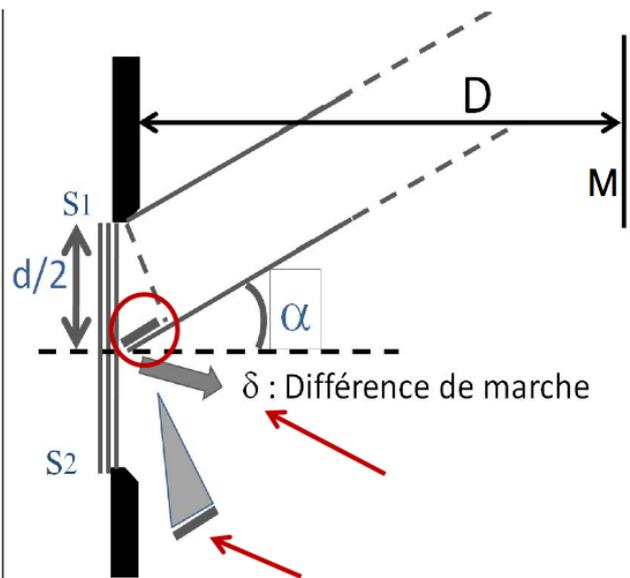
Dans le vide : $\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T$

avec : c célérité (exactement, 299 792 458 m/s ; par simplification, $3 \cdot 10^8$ m/s)

L'aspect ondulatoire se manifeste avec des phénomènes d'interférence et de diffraction, lorsque les dimensions de l'objet éclairé sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière incidente.

2. Interférences : le principe d'Huyghens-Fresnel

A partir d'une source lumineuse ponctuelle, il y a formation d'une onde sphérique : chaque point de ce front d'onde (ou d'un objet éclairé) peut être considéré comme la source d'une nouvelle onde sphérique, synchrone des autres sources et en phase avec l'onde incidente.



3. Les interférences lumineuses

L'expérience des « Fentes d'Young » permet d'obtenir des interférences lumineuses : entre une source lumineuse monochromatique et un écran, on interpose une plaque percée de deux fentes (dont la largeur

est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde) qui se comportent comme des sources secondaires synchrones.

En fonction de la différence de trajet des deux ondes lumineuses émises par les deux sources secondaires S_1 et S_2 on aura : $E_1 = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ et $E_2 = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \Delta\varphi)$

avec : E_0 : amplitude

- ω pulsation
- $\Delta\varphi$: déphasage des ondes $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{D} x$
- t : temps

Le déphasage des ondes caractérise le fait qu'une onde a un certain *retard* par rapport à l'autre. En effet, pour arriver à un point M situé sur l'écran, le chemin à parcourir n'est pas le même pour la lumière qui provient d'une source ou de l'autre (r_1 ou r_2).

$r_2 - r_1 = \partial$ est appelée : différence de marche

$$\partial = \frac{d}{D} x$$

avec : r_1 et r_2 distances entre le point d'observation et S_1 et S_2 .

d distance entre les fentes

D distance entre l'écran et les fentes ($D \gg d$)

x distance de M au centre de l'écran

L'intensité est répartie de manière périodique.

Lorsque $r_2 - r_1 = k \lambda$, $\Delta\varphi$ est un multiple de 2π , les ondes s'ajoutent et on obtient une frange lumineuse sur l'écran : *interférence constructive*.

En revanche si $r_2 - r_1 = (2k+1) \lambda/2$, $\Delta\varphi$ est un multiple impair de π , les ondes s'annulent et on obtient une frange sombre sur l'écran : *interférence destructive*

Sur l'écran on observe ainsi des franges successivement claires et sombres. La distance i séparant 2 franges successives claires ou sombres est telle que : $i = \frac{\lambda}{d} \cdot D$

Ces résultats aboutissent aux observations suivantes :

- plus les fentes sont éloignées l'une de l'autre, plus les franges sont rapprochées ;
- plus l'écran est éloigné, plus les franges sont espacées.

4. La diffraction de la lumière

Pour pousser l'approximation à sa limite, on peut étudier le cas où les rayons interfèrent à l'infini, c'est-à-dire lorsqu'ils sont parallèles entre eux.

Dans la pratique, cela s'obtient en plaçant l'écran à plusieurs mètres des fentes.

Dans ce cas, la différence de marche entre deux rayons interférant entre eux vaut : $\partial = \frac{d}{2} \cdot \sin \alpha$

Les ondes émises en S_1 et S_2 sont des ondes sphériques : leur amplitude décroît au fur et à mesure qu'elles avancent (l'amplitude de E_1 et de E_2 ne sera pas la même au point M).

Les fentes ont une certaine largeur, ce qui implique un phénomène de diffraction par chacune des fentes. En effet, une lumière qui ressort d'un petit trou n'est pas isotrope, mais est majoritairement dirigée vers l'avant.

Diffraction par une ouverture circulaire :

On observe alors sur l'écran des franges d'intensité décroissante autour d'un disque central brillant, nommé « tache d'Airy » : une alternance de cercles concentriques brillants et sombres de diffractions de moins en moins lumineux lorsqu'on s'éloigne du centre.

Un effet important de cette tache de diffraction, en optique, est la dégradation de la résolution (ou pouvoir séparateur) des images dans les appareils optiques, tels que le microscope, ou le télescope (mais non pas celle de l'œil, car la tache a une taille inférieure au pouvoir séparateur).

5. Notion de pouvoir séparateur

Dans ces conditions, l'image d'un point n'est pas un point, mais une tache de diffraction.

Si l'observation se fait à une distance D très supérieure à d , on peut considérer qu'il s'agit d'une diffraction à l'infini, que l'on ramène dans le plan focal de l'appareil (cf optique géométrique)

Le rayon r de la tache peut alors être calculé :

$$r = 1,22 f \cdot \lambda / D$$

f : distance focale de l'appareil

exemple : avec un objectif d'ouverture $D = f/4$, r est de l'ordre de 5λ

On appelle pouvoir séparateur la distance minimale entre deux points objet telle que leurs images (= tache de diffraction) soient distinctes.

Pour cela, selon le critère de Rayleigh, cette distance doit être supérieure ou égale à r (rayon de la tache d'Airy).

Ainsi, pour augmenter le pouvoir séparateur d'un instrument d'optique, en pratique, il faut diminuer la longueur d'onde de la lumière utilisée (comme dans le microscope électronique).

II.B. COMPORTEMENT CORPUSCULAIRE

Par la mise en évidence de l'effet photoélectrique, Albert Einstein a montré que les échanges d'énergie entre les rayonnements et la matière se font de façon discontinue, sous forme de « paquets » d'énergie.

Les rayons lumineux sont donc constitués de « grains », ou quanta d'énergie : les photons. Il s'agit de particules de masse négligeable et charge nulle, susceptibles de se transporter à vitesse finie (inférieure ou égale à la célérité).

En étudiant le rayonnement du corps noir (objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre; alors que l'émission de lumière observée sous l'effet d'augmentation de sa température ne peut être expliquée par la théorie classique, mais seulement par la théorie quantique), Max Planck a postulé une relation de proportionnalité entre le quantum d'énergie transporté par le photon et la fréquence du rayonnement : $E = h \cdot \nu$

h : constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s

E : énergie du photon

Les effets "quantiques" n'apparaissent que lorsqu'on s'intéresse à des phénomènes de niveau atomique (c'est-à-dire d'un ordre de grandeur comparable à h), ainsi, dans les conditions macroscopiques ordinaires, la physique classique reste une approximation valable (h pourra être négligée).

III. OPTIQUE GEOMETRIQUE

III.A. INTRODUCTION

L'optique géométrique s'intéresse aux effets macroscopiques de la lumière (propagation, réflexion, réfraction). Dans ces cas, les longueurs d'onde sont petites devant les dimensions du système observé et les effets de la diffraction peuvent être négligés. Il s'agit donc d'une approximation de l'optique ondulatoire, où l'on n'émet aucune hypothèse sur la nature physique de la lumière, son mode ou sa vitesse de propagation.

En optique géométrique, les rayons lumineux se propagent en ligne droite et les angles sont toujours définis par rapport à la normale au plan.

III.B. NOTION D'INDICE OPTIQUE

Une onde est un phénomène qui se développe dans l'espace et dans le temps.

Dans le vide, le transport d'énergie (pas de matière) se fait en ligne droite, à la vitesse c . Dans la matière, la propagation se fait dans un milieu transparent (**la lumière visible ne pénètre pas les milieux opaques**), avec une vitesse réduite, $v=c/n$: le rapport entre la vitesse de propagation de l'onde dans le vide et celle dans une substance donnée (indice de réfraction) dépend du matériau considéré, mais également de la fréquence de l'onde.

L'indice absolu de réfraction d'un milieu matériel transparent n_{abs} est donné par : $n=c/v$

avec : c célérité

v vitesse

Un milieu réfringent est donc un milieu transparent dont n est différent de 1.

Exemples d'indices optiques absolus :

Air : $n=1$

Eau : $n=1,333$

Diamant : $n=2,417$

Indice optique relatif : $n_{2/1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$

III.C. LOI DE SNELL-DESCARTES

Deux grands groupes de lois régissent la propagation de la lumière :

- Les lois de la propagation rectiligne de la lumière, selon lesquelles le trajet effectivement emprunté entre 2 points A et B est tel que le temps de parcours entre ces 2 points est minimal (la lumière prend le chemin le plus court)
- Les lois de Snell-Descartes, qui concernent la réflexion et la réfraction.

Ces lois, qui s'appliquent à la lumière comme à d'autres ondes (ondes sonores, par exemple), définissent les interactions de la lumière avec l'interface séparant deux milieux d'indice de réfraction différents.

Le rayon incident (I_1), la normale au plan (N), le rayon réfléchi (I_r) et le rayon réfracté (I_2) sont dans le même plan.

1. Réflexion

Une réflexion est spéculaire (une seule direction de réflexion) quand l'interface est lisse (plane). Sinon, elle est diffuse (plusieurs directions de réflexion).

D'après la loi de Descartes (l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion) :
 $i_i = i_r$

D'autre part, l'intensité de l'onde réfléchie est fonction du rapport d'indice des deux milieux (coefficient de réflexion) :

$$\frac{I_r}{I_i} = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_2 + n_1} \right]^2$$

Dans le cas de l'interface entre air ($n=1$) et verre ($n=1,5$), le coefficient de réflexion est donc de 0,04 (96% de la lumière est transmise à travers le verre).

A noter que si $n_2 > n_1$, l'onde réfléchie va subir un déphasage (opposition de phase par rapport à l'onde incidente).

2. Réfraction

Quand un rayon traverse un plan, il change de direction. Le phénomène est évident si les indices n_1 et n_2 sont assez différents.

D'après la loi de Descartes : $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$

Si $n_2 > n_1$, le rayon réfracté se rapproche de la normale

Si $n_2 < n_1$, le rayon réfracté s'écarte de la normale

La modification de la vitesse entre les milieux implique un changement équivalent de la longueur d'onde (la fréquence et l'énergie du rayonnement, restent constantes).

Exemple : réfraction air/eau

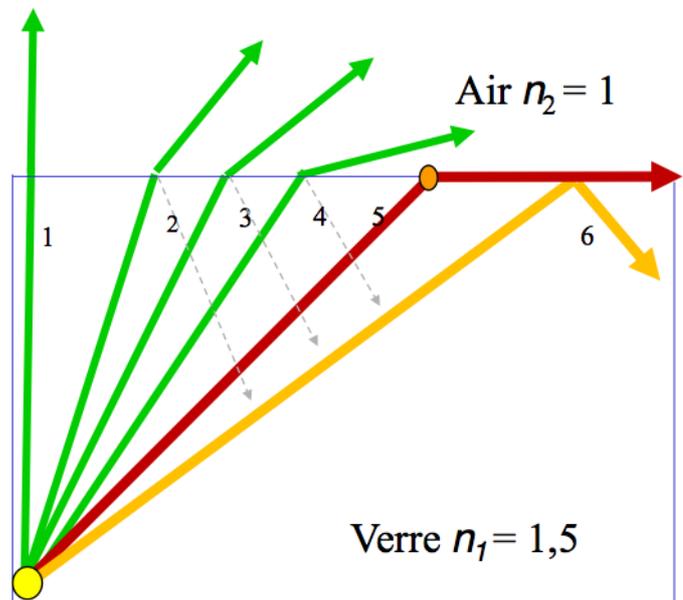
Incidence rasante :

Pour une réfraction sur un milieu d'indice plus grand ($n_2 > n_1$) il existe une valeur maximale d'angle pour le rayon réfracté donné par l'incidence rasante (incidence limite à 90°).

L'angle limite de réfraction est défini par : $\sin i_L = \frac{n_2}{n_1}$

Angle Critique :

A l'inverse, lorsque le rayon incident se propage vers un milieu d'indice plus petit ($n_2 < n_1$), il y a un angle maximal, appelé angle critique, au-delà duquel il ne peut plus y avoir de réfraction, mais une réflexion totale.



Rayons 1,2,3,4 : passent du verre dans l'air

Rayon 6 : réflexion totale (sin impossible)

Rayon 5 : rayon limite

III.D. LE SYSTEME OPTIQUE

1. Définitions

Un dioptre est une interface (surface) entre deux milieux transparents ayant différents indices optiques de réfraction. Une série de dioptres (lentille, ensemble de lentilles, de miroirs, etc.) constitue un système optique.

L'espace objet est l'espace d'où viennent les rayons lumineux (en provenance de l'objet).

L'espace image est l'espace où se formera l'image optique.

Transposé à l'œil, nous avons un milieu extérieur (devant l'œil, ce que l'on regarde) et un milieu intérieur (dans l'œil, où se formera l'image).

Par convention, l'axe optique (sens de propagation des rayons lumineux) est orienté de la gauche vers la droite et passe par le centre et le sommet du dioptre.

Dans un système optique, les points objet et image sont conjugués par rapport au dioptre :

□ origine, sommet du dioptre (S)

□ position de l'objet (p □ SA)

□ position de l'image (p' □ SA')

La position d'un point sur l'axe optique peut être exprimée par l'inverse de la distance algébrique le séparant de l'origine : la proximité ($1/p$), qui s'exprime en dioptrie ($\delta = m^{-1}$).

Un dioptre sphérique est constitué de deux milieux d'indices différents séparés par une interface en forme de calotte sphérique, de sommet S, de centre C et de rayon R.

2. Stigmatisme

Un système optique S est dit stigmat si il donne d'un objet ponctuel O une image ponctuelle I : tous les rayons issus de O à travers S convergent en un seul point I.

Un système complexe est approximativement stigmat si l'on ne considère que les rayons faiblement inclinés par rapport à l'axe optique du système (et proches de celui-ci). Pour la plupart des besoins courants de l'optique géométrique (notamment les applications de l'optique physiologique), il est préférable de travailler dans cette approximation, dite de Gauss (petits angles d'incidence, de réfraction et de réflexion).

A noter qu'un dioptre sphérique n'est stigmat que dans l'approximation de Gauss :

Rayon proche de l'axe optique

Rayon peu incliné par rapport à l'axe optique

III.E. OBJETS ET IMAGES

1. Images réelles et virtuelles

Une image est réelle lorsqu'elle peut être présentée sur un écran : elle se situe alors du côté du dioptre vers lequel se dirigent les rayons et ceux-ci convergent vers l'image.

Une image virtuelle, en revanche, se situe du côté du dioptre dont viennent les rayons et ceux-ci sont divergents.

De même, les rayons lumineux émis par un objet réel sont divergents, alors que les rayons lumineux convergent vers un objet virtuel.

→ dans l'espace objet : objet réel/ image virtuelle

→ dans l'espace image : image réelle/ objet virtuel

2. Foyer objet et foyer image

Après réfraction par un dioptre sphérique de quelconques courbure et indice de réfraction :

- les rayons qui étaient passés par un point F (appelé point focal objet) deviennent parallèles à l'axe (c'est-à-dire qu'ils se focalisent à l'infini)
- les rayons parallèles à l'axe vont passer par un point F' (appelé point focal image) : le foyer image est le conjugué d'un point situé à l'infini.
- les rayons passant par le centre optique ne sont pas déviés

Distances focales :

Les distances qui correspondent à ces points sont nommées les distances focales :

- f = distance focale objet = SF
- f' = distance focale image = SF'

La vergence d'un dioptre :

La vergence d'un dioptre (anciennement appelée puissance optique) est la proximité de la focale image (inverse de sa distance focale image) par son indice de réfraction.

$$D = \frac{n_2}{f'} = \frac{n_2 - n_1}{R} = -\frac{n_1}{f}$$

Dioptre convergent : vergence positive

Dioptre divergent : vergence négative

3. Images et grossissement

Formation d'une image :

Un objet non ponctuel AB se converge simplement dans l'espace image :

- les rayons lumineux issus de l'objet et passant par le centre du dioptre sphérique ne sont pas déviés (ils sont perpendiculaires à la surface sphérique du dioptre) ;
- les rayons parallèles à l'axe optique sont déviés en passant par le foyer image, F'.
- Les points F et F' ne sont pas conjugués à travers un dioptre

Grandissement latéral d'une image :

Le grandissement, $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$, est la taille de l'image rapportée à la taille de l'objet :

4. Convergence et divergence

Dioptre convergent :

Il s'agit d'un dioptre avec rayon de courbure positif, convexe en un point situé sur l'axe optique ; le point focal image.

Dioptre divergent :

Il s'agit d'un dioptre avec rayon de courbure négatif, concave : le point focal image image est virtuel, c'est-à-dire qu'il est situé en avant du dioptre (il se construit graphiquement en prolongeant les rayons réfractés divergents).

5. Les relations de conjugaison

Les formules de conjugaison permettent de déterminer la position sur l'axe optique d'un point image en connaissant la position du point objet (et réciproquement) et d'autres éléments caractéristiques du système.

D en dioptrie, R en m

Formule de conjugaison : $\frac{n_2}{p'} = \frac{n_1}{p} + \frac{n_2 - n_1}{R}$ avec p et p' les distances algébriques de S à A ou A'

III.F. LES LENTILLES

1. Généralités

Une lentille est un système optique formé de deux dioptres sphériques de sommets différents, séparés par un milieu d'indice n.

On représente la lentille par un segment avec des flèches tournées vers l'extérieur pour une lentille convergente, ou vers l'intérieur pour une lentille divergente.

Lentilles convexes : D>0

Lentilles concaves : D<0

2. Lentilles minces

Les lentilles minces représentent un cas particulier, plus simple à traiter dans la mesure où l'on suppose que les sommets des deux dioptres sont confondus en un seul point (l'épaisseur de ces lentilles est donc négligeable devant les rayons de courbure de ses deux faces).

En particulier lorsque les indices de réfraction de part et d'autre de la lentille sont identiques (lentille placée dans l'air, par exemple), les deux distances focales sont égales en valeur absolue (mais de signe opposé).

Les vergences des deux dioptres s'ajoutent, on a alors : $D_L = D_1 + D_2 = (n - 1) \cdot (\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2})$

De même, si on accole plusieurs lentilles minces, ou une lentille mince et un dioptre, la vergence totale est la somme des vergences de chaque élément (vergence sphérométrique).

Formules de conjugaison :

$$D = -\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} = \frac{1}{p'} - \frac{1}{p}$$

Grandissement :

$$\gamma = \frac{p'}{p} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

3. Lentilles épaisses

Une lentille d'épaisseur non négligeable (sommets et centre optique ne sont plus confondus) est assimilable à un doublet de lentilles minces de vergence D_1 et D_2 , séparées par un milieu d'indice n' (c'est le cas de l'œil humain).

Dans ce cas, la vergence totale D_L n'est pas égale à la vergence sphérométrique mais doit tenir compte de l'épaisseur de la lentille e (en mètres) et du milieu de réfraction traversé n (formule de Gullstrand) :

$$D_L = D_1 + D_2 - \frac{e}{n} \cdot D_1 \cdot D_2$$