

Cours d'optique géométrique

présenté par : Pr. A. MANAR

(2006/2007)

Panorama des ondes électromagnétiques

Longueur d'onde λ	Fréquence ν		Dénomination	Usages	Particularités	
10^7 m	50 Hz	E L E C T R O M A G N É T I Q U E	courants électriques	domestiques et industriels	circulent dans les conducteurs	
1000 km	100 Hz			audio-fréquences	~	
100 km	1 kHz					
10 km	10 kHz		grandes ondes (G.O.)	radiodiffusion	longue portée, contournent les obstacles	
1 km	100 kHz					
100 m	1 MHz		ondes courtes (O.C.)		réflexion sur l'ionosphère	
10 m	10 MHz					
1 m	100 MHz		ondes métriques	radio-FM, télévision, radar	directionnelles	
100 mm	1 GHz		micro-ondes	cuisson des aliments	agitation des molécules polaires	
10 mm						
1 mm						
100 μm		O P T I Q U E	infra-rouges (I.R.)	serres, radiateurs, points chauds	transmission de la chaleur par rayonnement	
10 μm						
1 μm						
			lumière	optique	visible	
100 nm			ultra-violets (U.V.)	photosynthèse, bronzage, stérilisation	effet chimique et biochimique, tue les microbes	
10 nm						
1 nm						

Principales constantes

vitesse de la lumière dans le vide	.	$c = 2,997\,93 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
perméabilité du vide	.	$\mu_0 = 1,256\,637 \cdot 10^{-6} \text{ H.m}^{-1}$
permittivité du vide	.	$\epsilon_0 = 8,854\,187 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
charge élémentaire	.	$e = 1,602\,179 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
constante d'Avogadro	.	$N_A = 6,022\,045 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
unités auxiliaires d'énergie	.	$1 \text{ eV} = 1,602\,179 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ J} = 6,241\,461 \cdot 10^{18} \text{ eV}$
Unité de masse atomique	.	$u = 1,660\,53 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
unités auxiliaires de masse	.	$1 \text{ MeV}/c^2 = 1,782\,676 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ $1 \text{ MeV}/c^2 = 1,073\,533 \cdot 10^{-3} \text{ u}$ $1 \text{ u} = 1,660\,565 \cdot 10^{-37} \text{ kg}$ $1 \text{ u} = 9,315\,016 \cdot 10^2 \text{ MeV}/c^2$
constante de Faraday	$F = N_A \cdot e$	$F = 9,648\,45 \cdot 10^4 \text{ mol}^{-1}$
volume molaire des gaz parfaits	pour $0^\circ \text{ C}, 1 \text{ atm}$	$V_0 = 2,241\,383 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
constante des gaz parfaits	$R = P_0 V_0 / T_0$	$R = 8,314\,34 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
constante de Loschmidt	$N_L = N_A / V_0$	$N_L = 2,686 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$
constante de Boltzmann	$K_B = R / N_A$	$k = 1,380\,662 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ $k = 8,617\,35 \cdot 10^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$
constante de gravitation	.	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
constante de pesanteur	.	$g_0 = 9,805\,65 \text{ N.kg}^{-1}$
constante de Planck	.	$h = 6,626\,176 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
constante de Planck réduite	$\hbar = h/2\pi$	$\hbar = 1,054\,588 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
constante de la loi de Stéfán	.	$\sigma = 5,670\,32 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
constante de la loi de Wien	.	$\lambda_m \cdot T = 2,897\,89 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}^{-1}$
constante de Rydberg	$R_y = me^4 / 2\hbar^2$	$R_y = 2,17991 \cdot 10^{-18} \text{ J ou } 13,6058 \text{ eV}$
rayon de Bohr	$a_0 = \hbar^2 / me^2$	$a_0 = 5,291\,770\,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar / 2mc$	$\mu_B = 9,27410 \cdot 10^{-24} \text{ J.T}^{-1}$
masse de l'électron au repos	.	$m_e = 9,109\,534 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
masse du proton au repos	.	$M_p = 1,67261 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
masse du proton /masse de l'électron	.	$M_p / m_e = 1836,11$
Rayon classique de l'électron	$r_e = e^2 / mc^2$	$r_e = 2,817\,938 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
charge de l'électron	.	$e = 1,602\,19 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
électron-volt	.	$1 \text{ eV} = 1,60919 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
angstrom	.	$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

Le Photon

Masse : 0

Charge électrique : 0

Énergie : $E = h\nu$

Quantité de mouvement : $p = h\nu/c = h/\lambda$

Moment cinétique intrinsèque (spin) : $J = 1$ (en unité $h/2\pi$)

Hélicité (projection du spin sur la direction de propagation) : +1 ou -1

Interaction : le photon véhicule la force électromagnétique ;
il n'interagit directement qu'avec les particules élémentaires
chargées (électrons et quarks en particulier)

Comportement collectif : le photon, étant de spin entier,
est un boson, ce qui signifie que le nombre de photons pouvant se
trouver dans un même état quantique n'est pas limité.

h = constante de Plank = $6,626 \dots 10^{-34}$ joule.seconde

λ = longueur d'onde

c = vitesse de la lumière = 299 792 458 m/s

ν = fréquence

Chapitre I

FONDLEMENTS DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

I. Cheminement des idées en optique

I.1 Introduction

Optique géométrique	Optique ondulatoire	Optique quantique
dim. syst $\gg \lambda$	dim. syst $\sim \lambda$	dim. syst $\ll \lambda$
XVIIe siècle	XIXe siècle	XXe siècle
Rayon	Onde	Corpuscule
réflexion réfraction dispersion	interférence diffraction polarisation diffusion	vibrations électromagnétiques

I.1.1 Objet de l'optique

L'optique s'intéresse principalement à l'ensemble des phénomènes perçus par l'œil. La cause de ces phénomènes est la LUMIÈRE. Celle-ci est émise par la matière dans certaines conditions et se manifeste par son action sur divers récepteurs :

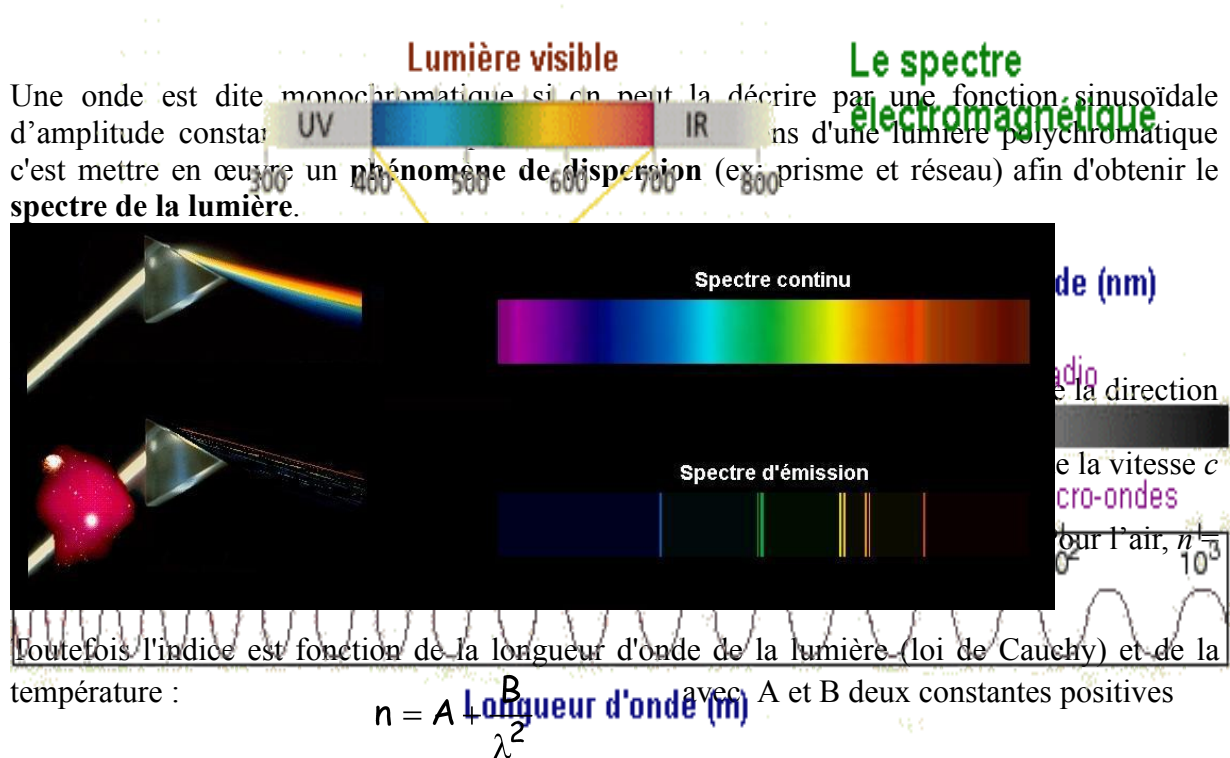
- l'œil,
- la plaque photographique : elle amorce une transformation chimique de sels comme les halogénures d'argent ;
- une lame métallique noircie : celle-ci s'échauffe ce qui montre que la lumière transporte de l'énergie (utilisée, par exemple, dans les chauffe-eau solaires) ;
- certains métaux ou semiconducteurs : ils émettent des électrons par effet photoémissif utilisé, par exemple, dans les tubes photomultiplicateurs, dans les tubes vidicon ou orthicon des caméras de télévision.

I.1.2 Définition de la lumière

Il faut savoir tout d'abord que la lumière est une forme d'énergie. En première approximation, elle est **à la fois une onde** qui se déplace dans le vide ou la matière à l'image d'une vague à la surface d'un liquide; et **à la fois une particule sans masse** appelée "*photon*". Le côté ondulatoire de la lumière conduit à caractériser **l'onde par sa longueur**, (distance entre deux crêtes de vagues) qui traduit en terme classique **la couleur** dans la fenêtre visible. Les longueurs d'onde couvrent toute l'échelle des dimensions, plus elles sont petites, plus la lumière est énergétique. Elles sont arbitrairement rassemblées en domaines. Sans être

exhaustif et selon une gamme décroissante : le premier domaine couvre les ondes kilométriques et métriques qu'on nomme onde **radio**, puis les centimétriques et millimétriques: **ondes courtes** et ondes **radar**; le domaine suivant, micro métriques les **micro-ondes** utilisées par le four du même nom (figure I-1) ; puis l'**infrarouge** lointain et proche, (sous-entendu de la lumière visible) ; le domaine du **visible**, un tout petit domaine, le plus petit : une fenêtre de quelques centaines de nanomètres (un nanomètre = 10^{-9} m), c'est la lumière que nous pouvons appréhender de notre vision; puis l'**U-V** (ultra violet) proche et lointain, comme l'infra rouge, invisible avec nos yeux; les **rayons X**, et enfin les rayonnements les plus énergétiques émis par le noyau des atomes, les **rayons gamma**.

Figure I-1



I.1.4 Propagation rectiligne de la lumière

Dans un milieu homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite.

I.1.5 Principe de retour inverse

Le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation (figure I-2).

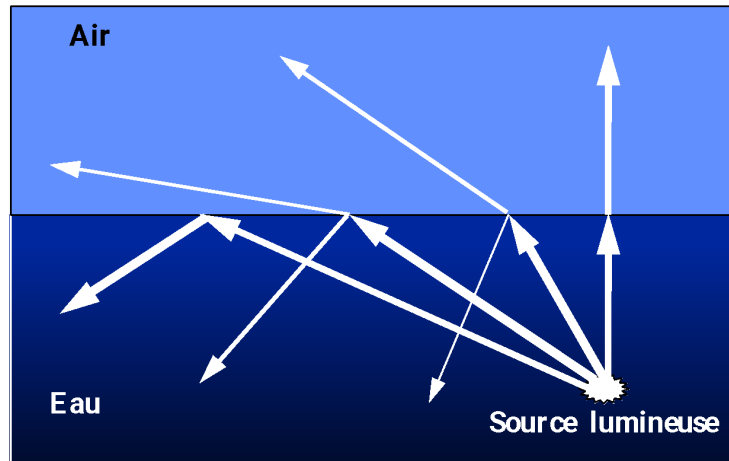


Figure I-2

I.2 Lois de DESCARTES

Etablies en Angleterre par SNELL en 1621 et retrouvées indépendamment en 1637, en France, par DESCARTES d'une manière expérimentale, on sait aujourd'hui qu'elles résultent de la nature ondulatoire de la lumière.

Si on considère la surface S séparant deux milieux homogènes isotropes ce dispositif constitue un dioptré (figure I-3). Quand on envoie à partir d'une source située dans le premier milieu (1) d'indice n_1 un faisceau de lumière incidente, l'expérience permet de distinguer de la lumière réfléchi (celle qui revient dans le milieu (1)) et (ou) de la lumière réfractée (celle qui passe dans le milieu (2) d'indice n_2).

Figure I-3

Le plan d'incidence est défini par le rayon d'incidence (A_1I) et la normale (IN) à la surface de séparation des deux milieux au point d'incidence I . Le rayon incident fait avec la normale au point d'incidence un angle i_1 , le rayon réfracté fait avec cette même normale un angle i_2 et le rayon réfléchi un angle géométrique (inférieur à 90°) noté r . Avec ces conventions on a :

- **1^{ère} loi :** le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence.
- **2^{ème} loi :** les angles d'incidence et de réflexion sont égaux et de sens contraire

(I.1)

- **3^{ème} loi :** pour chaque lumière monochromatique, les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont liés par la relation :

(I.2)

I.2.1 Compléments sur les lois de la réfraction

I.2.1.1 Angle de réfraction limite

Si la lumière passe d'un milieu (1) moins réfringent à un milieu (2) plus réfringent, c'est-à-dire si $n_1 < n_2$, d'après la 3^{ème} loi de DESCARTES on a :

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 \implies \sin i_2 < \sin i_1 \implies i_2 < i_1 \quad (I.3)$$

car les deux angles sont aigus $\left(0 \leq i \leq \frac{\pi}{2}\right)$ et de même signe (figure I-4).

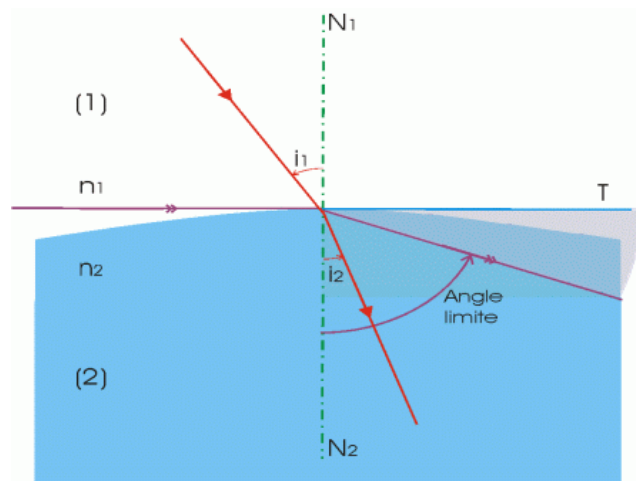


Figure I-4 : Réfraction sur un dioptre

A tout rayon incident A_1I correspond un rayon réfracté IA_2 . Le rayon réfracté se rapproche de la normale en passant dans le milieu plus réfringent.

Pour l'incidence rasante, le rayon incident est pratiquement tangent à la surface du dioptre. Lorsque i_1 varie entre 0 à $+\frac{\pi}{2}$, i_2 varie entre les valeurs 0 et $+\ell$.

$$n_1 \sin \frac{\pi}{2} = n_2 \sin \ell \implies \sin \ell = \frac{n_1}{n_2} \quad (I.4)$$

Remarque : Si le milieu (1) est de l'air et si n est l'indice relatif du milieu (2) par rapport à l'air, on a la formule de définition de l'angle limite qui devient simplement :

$$\text{angle de réfraction limite air/milieu : } \sin \ell = \frac{1}{n} \quad (I.5)$$

I.2.1.2 Réflexion totale

Si la lumière passe d'un milieu plus réfringent (1) à un milieu moins réfringent (2), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. L'angle i_2 devient égal à $\frac{\pi}{2}$ si l'angle i_1 prend la valeur ℓ' telle que :

$$n_1 \sin \ell' = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \ell' = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.6)$$

ℓ' est l'angle de réfraction limite.

Les rayons qui arrivent sous un angle d'incidence supérieur à ℓ' ne peuvent pas être réfractés : ils subissent une réflexion totale (figure I-5) et la surface de séparation des deux milieux se comporte alors comme un miroir parfait (voir sa définition plus loin au § II.11).

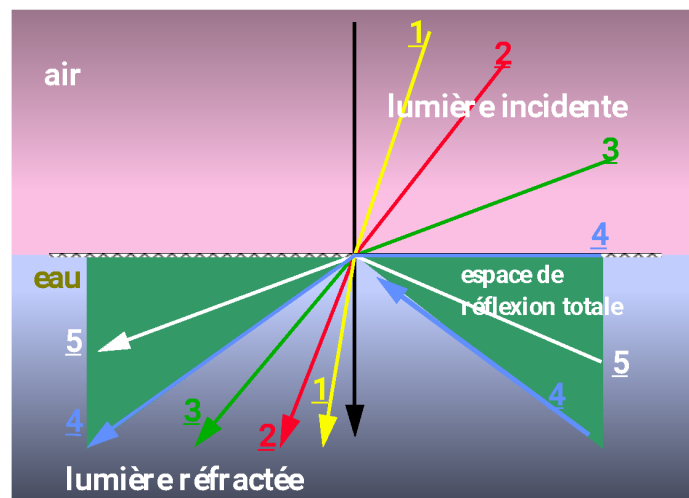


Figure I-5

I.3 Nature des objets et des images

Le rôle des instruments d'optique est de permettre d'observer des reproductions appelées images, des objets, aussi fidèles que possible.

Si un système optique, c'est-à-dire, un instrument ou une partie de celui-ci fait passer les rayons issus d'un point objet A_o en un point A_i , on dit que A_i est l'image de A_o . D'après le principe de retour inverse de la lumière, A_i et A_o peuvent échanger leurs rôles c'est pourquoi on dit également que A_i et A_o sont **conjugués**.

Les objets de la vie courante sont réels. Du point de vue de l'optique, tout point d'un objet réel envoie des rayons lumineux vers la face d'entrée des instruments. Un point objet réel, pour un système optique, est situé avant la face d'entrée de celui-ci, dans le sens de propagation de la lumière (figure I-6).

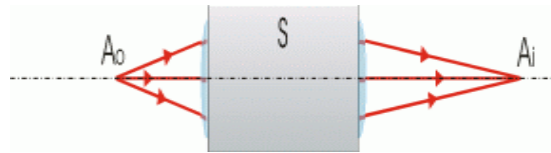


Figure I-6: Objet réel et image réelle pour S

De même, les rayons émergents de la face de sortie du système optique forment une image réelle s'ils passent par "un point" situé après cette face toujours dans le sens de propagation de la lumière. Expérimentalement une image réelle peut être recueillie sur un écran (voir TP sur les lentilles minces). Dans le cas où ce ne sont pas les rayons eux-mêmes mais leurs supports qui passent par "un point" en sortant de l'instrument, on dit que l'image est virtuelle. Elle ne peut pas être recueillie sur un écran (figure I-7).

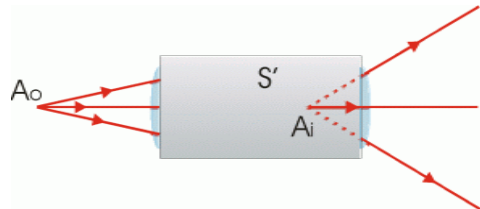
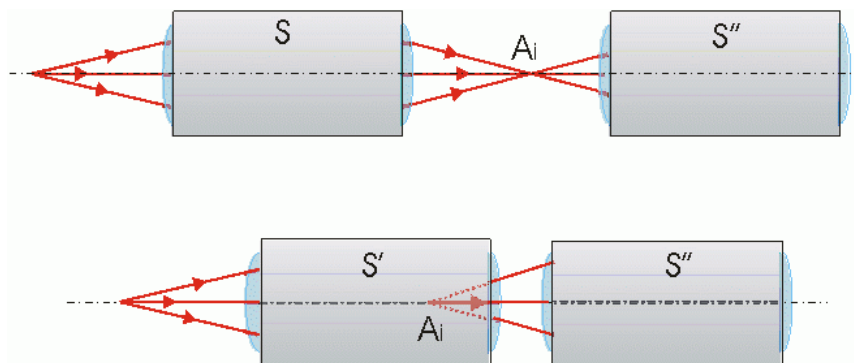


Figure I-7: Objet réel, image virtuelle pour S'

Il est important de bien comprendre que l'image réelle A_i donnée par le système S, comme l'image virtuelle A_i donnée par le système S' peuvent jouer le rôle d'objet réelle pour un système S'' comme le montrent les figures I-8 :

Figure I-8: Dans les deux cas A_i joue le rôle d'objet réel pour S''

Enfin dans le cas où la face d'entrée d'un système comme S'' intercepte les rayons provenant d'un système donnant une image réelle, le point de convergence des supports des rayons émergents constitue un point objet virtuel pour le système S' (figure I-9).

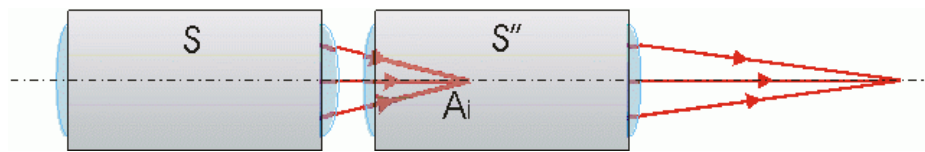


Figure I-9 : A_i joue le rôle d'objet virtuel pour S''

En conclusion :

Espace objet - espace image pour les dioptries

Espace objet - espace image pour les miroirs