

COMPLEMENTS DU COURS OPTIQUE
--

Ce document est un complément du cours dans lequel vous trouverez des « digressions » illustrant certaines propriétés des lois de l'optique géométrique ou permettant d'aller un peu plus loin...

Les esprits curieux seront ravis !

Université Paris-Saclay, Faculté des Sciences d'Orsay

Orsay, septembre 2024. Ne pas reproduire ce poly sans autorisation.

Table des matières

chapitre 1 : les bases de l'optique.....	3
Un peu de métrologie	3
Fizeau et la mesure directe de la vitesse de la lumière.....	3
Les applications des fibres optiques	4
Une application de la réflexion totale	5
Les mirages.....	6
Réfraction, diffraction, et diffusion : des notions à ne pas confondre !.....	7
Intensité lumineuse réfléchie à une interface	8
Chapitre 2 : Images optiques	9
Le télescope spatial Hubble.....	9
Quelques images « non optiques »	10
Chapitre 3 : lentilles, œil.....	12
Les yeux des différents animaux.....	12
L'histoire des lunettes.....	12
La photographie.....	13
Les instruments d'optique	17
Chapitre 4 : spectroscopie et couleurs	19
Les couleurs au fil du temps.....	19
Les arcs de l'arc-en-ciel	21
Spectres de raies et structure de l'atome	21
Hélium, du grec $\eta\lambda\iota\omicron\varsigma$ (soleil)	23
Le daltonisme.....	23
Le disque de Benham (« Benham top »)	24
Les autres origines physiques de la couleur	25
Les lasers et leurs applications	27

CHAPITRE 1 : LES BASES DE L'OPTIQUE

Un peu de métrologie

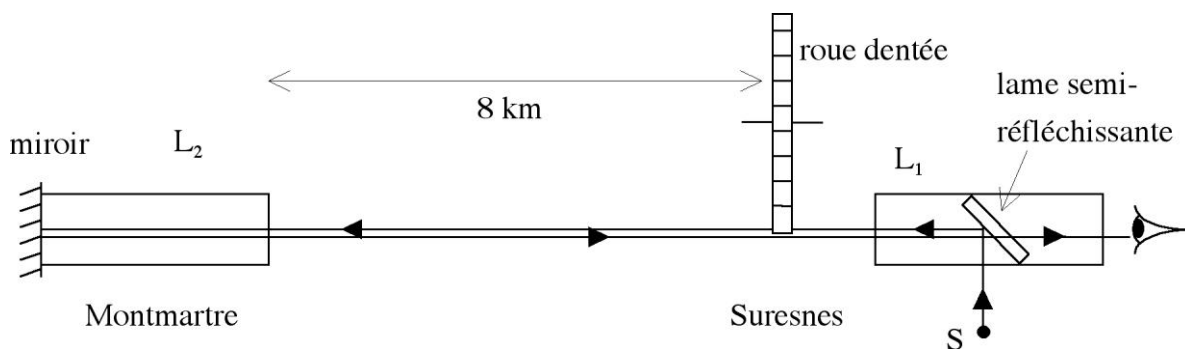
La valeur de la célérité de la lumière, est de $299792,458 \text{ km.s}^{-1}$. Cette valeur a été fixée par décret en 1983 comme "valeur exacte".

Elle sert depuis à définir le mètre dans le système international d'unités : le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299792458$ de seconde.

La seconde est définie par ailleurs à partir de transitions électroniques de l'atome de césium 133.

Fizeau et la mesure directe de la vitesse de la lumière

Hippolyte Fizeau (1819-1896) réalise en 1849 la première mesure directe de la vitesse de la lumière. Le principe de sa mesure repose sur l'utilisation d'une roue dentée en rotation à grande vitesse, et est illustré par le schéma ci-dessous :



Pendant le temps que met la lumière pour faire l'aller-retour entre L_1 et L_2 , la roue dentée a légèrement tourné. Pour certaines valeurs de la vitesse de la roue, elle aura tourné d'un nombre entier d'échancrures, et la lumière réfléchie pourra bien être observée par l'expérimentateur (dans le cas d'un nombre demi-entier, le point lumineux disparaît!)

Le dispositif de renvoi de la lumière est constitué de deux lunettes astronomiques en regard. La lumière d'une source très intense située en S pénètre dans la lunette L_1 perpendiculairement à son axe. Une lame semi-réfléchissante inclinée à 45° renvoie le faisceau dans l'axe de la lunette. Le faisceau émergent, après passage par la roue dentée et parcours d'une distance d'environ 8 km, traverse l'objectif de la lunette L_2 , au foyer de laquelle Fizeau a placé un miroir. La lumière est réfléchie et parcourt un trajet analogue à celui de l'aller, entrant cette fois par l'objectif de L_1 . L'image de la source est observée

à l'oculaire de L_1 .

La lunette L_1 est placée à Suresnes sur la terrasse de la maison de Fizeau et L_2 sur la terrasse d'un ami à Montmartre à 8633 mètres de L_1 . La roue dentée a 720 dents, et la vitesse la plus faible pour laquelle le point lumineux réapparaît est de 25.2 tours/s.

On trouve ainsi (vérifiez-le!) une vitesse de 313274 km.s^{-1} , en accord avec les mesures astronomiques. Une détermination plus précise de 298000 km.s^{-1} sera donnée par Foucault en 1862 avec l'expérience à miroir tournant.

Une version modernisée de l'expérience de Fizeau a été montée en 2005 dans le cadre de l'exposition "c à Paris", à l'Observatoire de Paris. Dans ce cadre, un laser vert a été tiré entre l'Observatoire et Montmartre (photo ci-contre) pour mesurer la vitesse de la lumière.



Les applications des fibres optiques

On utilise des fibres optiques en verre pour le transport d'information depuis les années 1950 environ. C'est surtout quand le laser est apparu dans les années 1960 que l'utilisation de la lumière pour le transport d'information (plutôt que d'autres ondes électromagnétiques de plus basse fréquence, comme les micro-ondes) s'est beaucoup répandue.



Faisceau de fibres optiques

Aujourd'hui, 2/3 des communications mondiales s'effectuent par câble, contre 1/3 seulement par satellite. Les fibres optiques sont utilisées dans les communications terrestres : elles sont présentes le long des autoroutes, des voies ferrées, et sous nos pieds lorsque nous marchons sur les trottoirs des villes. Elles sont également enfouies dans les océans : 200 000 km de câbles sont posés chaque année dans tout ce que la planète compte de mers et d'océans.

Avant d'utiliser des fibres optiques, des câbles en cuivre avaient été posés, par exemple sous l'Atlantique ; le premier avait été posé en 1956, et ne permettait de transporter que

51 conversations simultanées. Le premier câble transatlantique à fibre optique a été installé au fond de l'océan en 1988, et permet de transporter 40000 conversations téléphoniques simultanées. Comme le signal s'atténue au fur et à mesure de sa propagation le long de la fibre, il est nécessaire de l'amplifier régulièrement. Dans ce but, des répéteurs sont disposés tous les 50 km environ. Le câble est posé à deux mètres sous terre et jusqu'à 2000 m de profondeur. C'est la seule méthode pour le protéger des filets de pêche et des ancres des bateaux...

On utilise également les fibres optiques sous forme de faisceau de fibres bien parallèles entre elles. Un tel faisceau permet de transporter point par point une image. C'est ce principe qui est utilisé par exemple dans les *endoscopes* (pour explorer les organes du corps humain, détecter d'éventuelles tumeurs), ou pour aller voir dans le cœur d'un réacteur nucléaire.

Une application de la réflexion totale

L'essor des nouvelles technologies a amené les constructeurs à développer de nouvelles façons d'interagir avec les systèmes informatiques. On connaissait les souris, les claviers, les tablettes graphiques, les « trackpads » (désormais de série sur tous les ordinateurs portables), etc. Depuis quelques années cependant, se développent des technologies permettant de rapprocher d'avantage l'utilisateur du support virtuel qu'il manipule. Nous vivons aujourd'hui l'avènement des technologies tactiles et « Multi-touch ».

Plusieurs techniques existent et l'une d'elles est le FTIR (pour « Frustrated Total Internal Reflection » ou « réflexion totale interne frustrée » - voir par exemple <http://lowres.ch/ftir/> pour construire votre écran multi-touch maison !). Elle utilise le principe de réflexion totale et la diffusion d'onde au contact d'un obstacle. Son principe est simple : On utilise une plaque de plexiglas dans laquelle va se propager de la lumière infrarouge. Cette lumière est créée à partir de diodes spéciales disposées tout autour de la tranche de la plaque. Une partie de ces ondes lumineuses va être guidée dans la plaque par réflexion totale (voir schéma).

Au contact d'un ou plusieurs doigts sur la plaque de plexiglas, la lumière va être diffusée par la peau dans toutes les directions et certains rayons vont traverser la plaque. Une caméra infrarouge (ou une webcam modifiée) est chargée de filmer toute la surface de la plaque. Après numérisation de l'image et une détection des formes est effectuée (les doigts apparaissent comme des boules brillantes en infrarouge).

La liaison avec un programme dédié permet d'associer la position des doigts et leurs mouvements à des actions spécifiques (rotation, agrandissement de photos, musique, dessin, etc.).

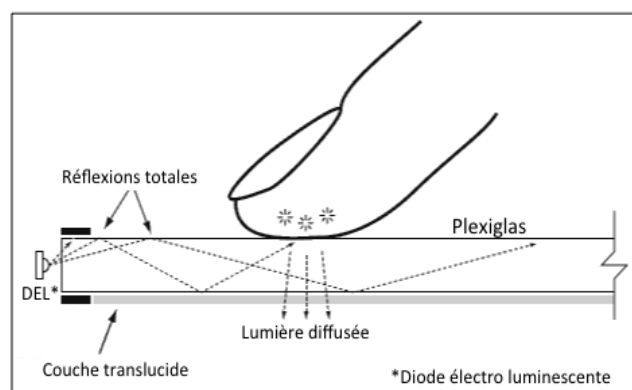
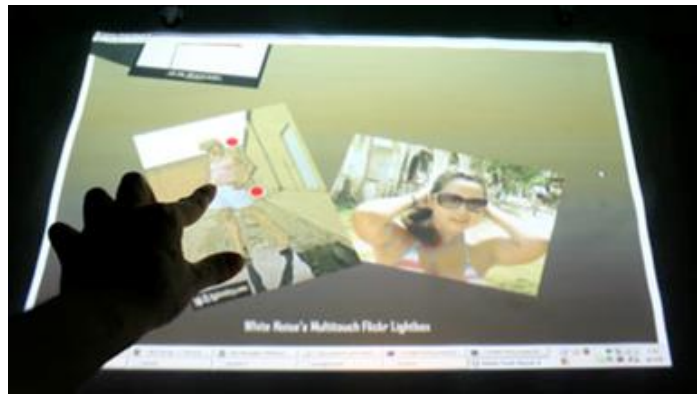




Image vue par la caméra IR

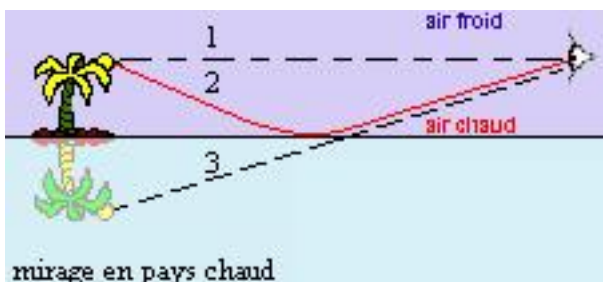


Manipulation de photos sur en « multi-touch »

Les mirages

Le mirage inférieur

Quand la température de l'air diminue lorsqu'on s'éloigne d'une surface chauffée par le soleil (asphalte, sable...), il se produit le phénomène de mirage inférieur (ou « mirage du désert »). La densité de l'air augmente quand on s'éloigne de la surface chauffée, et l'indice aussi. On peut alors montrer que les rayons lumineux provenant du ciel sont courbés vers le haut. L'œil d'un observateur perçoit le reflet du ciel comme si le sol se comportait comme un miroir : c'est le mirage de l'oasis des Dupondt dans l'album de Hergé « Tintin au pays de l'or noir ». La figure suivante montre les trajets réel (2) et apparent (3) des rayons lumineux dans le cas d'un mirage inférieur (le trajet 1 correspondrait au cas d'un milieu homogène).



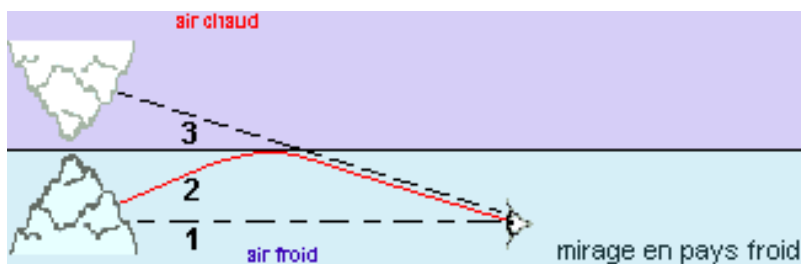
Principe du mirage inférieur



Exemple (W. Tape, 1985)

Le mirage supérieur

Au contraire du « mirage du désert », il se produit lorsque la surface est plus froide que l'air au-dessus d'elle. Les rayons lumineux sont alors déviés vers le sol. Ce second type de mirage est observé plus rarement que le premier. C'est ce phénomène qui explique qu'on puisse parfois voir le Canigou (sommet des Pyrénées) depuis Cassis (près de Marseille).

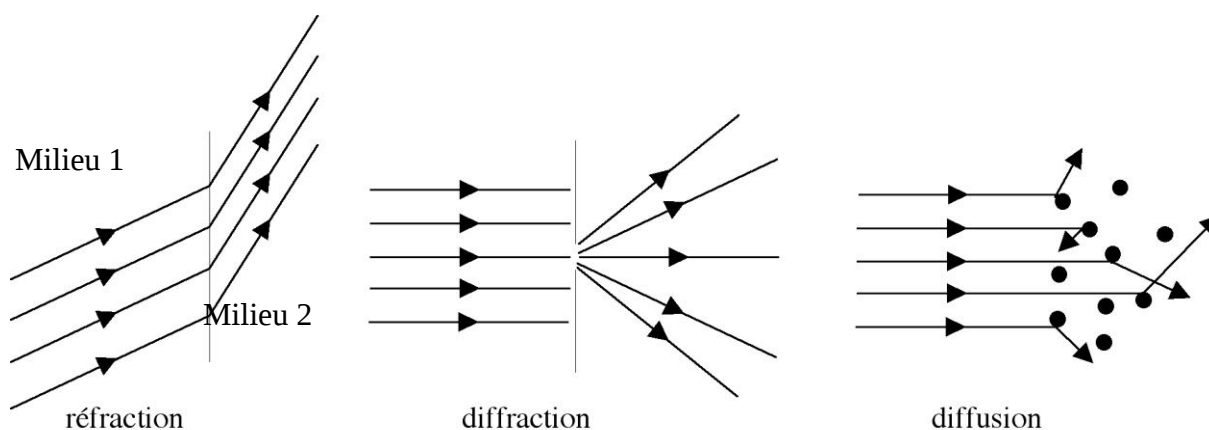


Principe du mirage supérieur



Le Canigou vu de Cassis

Réfraction, diffraction, et diffusion : des notions à ne pas confondre !



Les mots *réfraction* et *diffraction* ont en commun de contenir l'idée de fracture.

Dans le cas de la réfraction, un faisceau de rayons parallèles arrivant sur un dioptre plan est dévié en passant dans le second milieu, de telle sorte que *tous les rayons soient déviés de la même façon*.

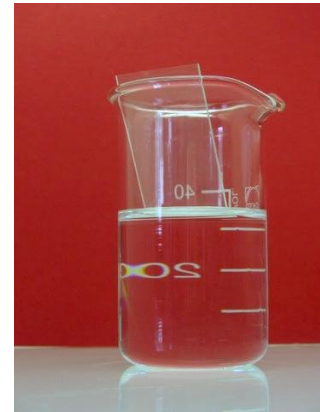
Dans le cas de la diffraction, un faisceau parallèle arrivant par exemple sur un trou assez petit (de taille pas trop grande devant la longueur d'onde du rayonnement lumineux) sera diffracté : à la sortie du trou, les rayons sont dirigés dans toutes les directions.

Le terme de diffusion signifie qu'un rayonnement incident est dévié dans de multiples directions (« éparpillé » en quelque sorte), en général par une particule ou une assemblée de particules. Citons quelques exemples :

- Diffusion de la lumière par de fines particules (poussière par exemple) : c'est ce qui permet de voir un faisceau laser, ou la lumière sous un nuage.
- Diffusion de la lumière par les molécules de l'atmosphère. Il se trouve qu'elle dépend de la fréquence de l'onde lumineuse (le bleu étant nettement plus diffusé que le rouge), c'est donc ce phénomène qui explique que le ciel nous apparaisse lumineux, et bleu (sans atmosphère, le ciel serait noir, comme celui qu'on voit sur la Lune).

Intensité lumineuse réfléchiée à une interface

La photo montre une lame de verre *plongée dans un liquide* (du glycérol). La partie de la lame de verre immergée dans ce liquide est invisible. Comment peut-on interpréter ce résultat ?

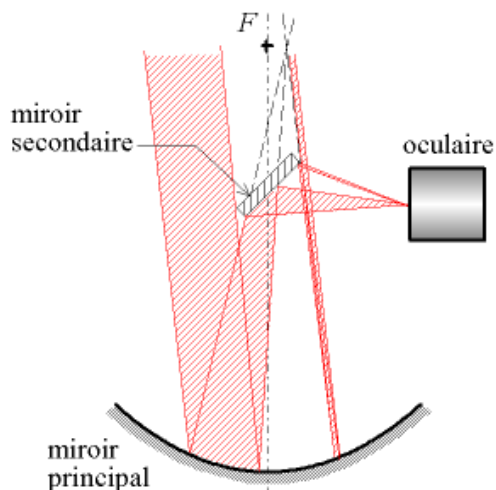


Les lois de Snell-Descartes modélisent les *directions* des rayons réfléchis et réfractés mais ne disent rien de leurs *intensités*. C'est en général la lumière réfléchiée qui permet à un observateur de voir un objet à une position donnée. Dans la situation particulière où l'indice optique du liquide est très proche de celui de la lame de verre, la quantité de lumière réfléchiée tend vers 0. Cette propriété justifie le fait qu'on voit la partie de la lame de verre se trouvant dans l'air mais pas celle plongée dans le glycérol.

CHAPITRE 2 : IMAGES OPTIQUES

Le télescope spatial Hubble

Le télescope aurait été inventé par Newton au XVII^e siècle.



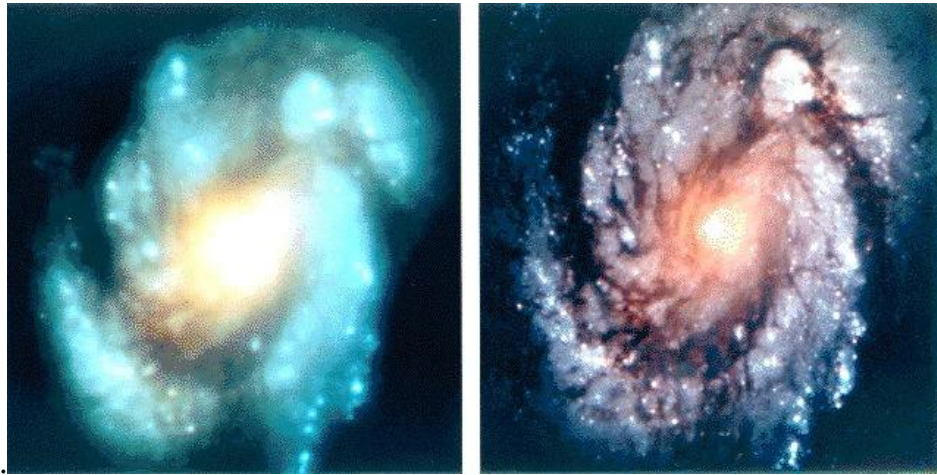
Principe du télescope de Newton



Le télescope spatial Hubble

Le télescope spatial Hubble fonctionne sur le même principe que le premier télescope de Newton. Ce principe est le suivant : un miroir concave de grande taille forme une image de l'astre observé dans son plan focal. Cette image est ensuite généralement renvoyée sur un oculaire à l'aide d'un petit miroir plan. Ce télescope a été mis sur orbite en avril 1990. Il a permis de progresser dans la réponse à des questions telles que : à quelle vitesse l'Univers se dilate-t-il ?

Dès le début, les astronomes se sont rendu compte que les images qu'ils réalisaient comportaient une grossière aberration : certains rayons lumineux sortent des conditions de Gauss ; en conséquence, les rayons provenant d'un même point ne convergent pas tous au même endroit, et « l'image » obtenue est floue (voir figure de gauche ci-dessous). En 1993, des astronautes de la navette spatiale Endeavor ont réussi à corriger ce défaut (voir figure de droite ci-dessous) en installant une nouvelle caméra comprenant sa propre optique correctrice.



Images de la galaxie M-100 prises par le télescope spatial Hubble avant (gauche) et après (droite) réparation de l'aberration « de sphéricité ».

Quelques images « non optiques »

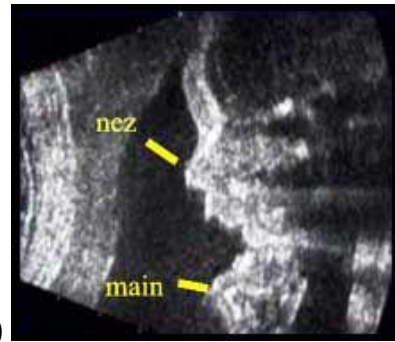
Au cours du XX^e siècle, de nouvelles méthodes pour obtenir des images homothétiques des objets, mais qui ne sont pas basées sur l'optique, ont été inventées. Ces nouvelles méthodes permettent d'explorer le monde à une échelle plus petite (par exemple, de « voir » les atomes), ou d'observer ce qui est caché à notre œil (l'intérieur du corps humain, par exemple).

- On peut réaliser des images à l'aide d'ondes électromagnétiques dans une autre gamme de longueur d'ondes que l'optique, par exemple avec des rayons X dont la longueur d'onde est comprise entre 10 nm et 1 pm (10^{-12} m). Les radiographies du corps humain sont ainsi obtenues grâce à des rayons X (voir figure a).
- On peut obtenir des images grâce à des ondes mécaniques ultrasonores, c'est le principe de l'échographie (voir figure b).
- Des particules constitutives de la matière, comme les électrons ou les neutrons, peuvent servir à réaliser des images. La microscopie électronique (par réflexion, par transmission ou à balayage - MEB), très utilisée notamment en biologie, est sans doute l'exemple le plus connu (figures c, d et e).
- Il existe enfin des techniques particulières pour « voir » les surfaces à l'échelle atomique ; citons la microscopie à effet tunnel (STM) qui permet d'imager des surfaces conductrices (figure g), et la microscopie à force atomique (AFM) qui permet d'obtenir des images de surfaces isolantes (figure f).



a)

a) Une « radio » des poumons ;



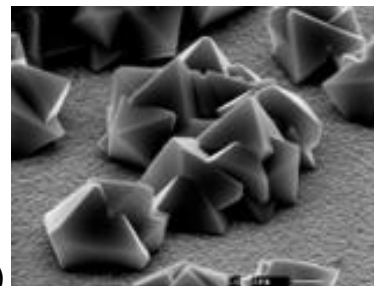
b)

b) Une échographie d'un fœtus



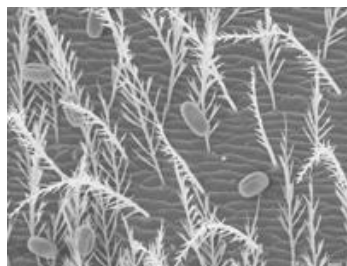
c)

c) Image MEB d'une crevette ;

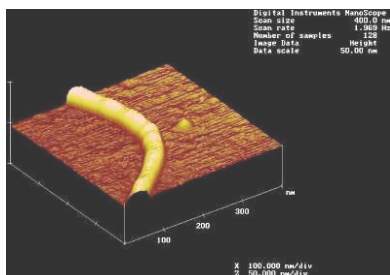


d)

d) Image MEB de microcristaux de cuivre (de taille quelques μm) ;

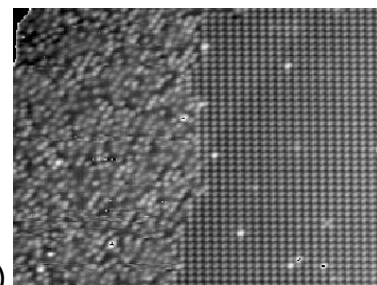


e) Soies d'abeille et grains de pollen (la taille d'un grain est de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$) en ME



f)

f) Image AFM d'un nanotube de carbone (la largeur du tube est de $50\ \text{nm}$ environ) ;



g)

g) Image STM d'atomes de phosphore, ordonnés à droite, désordonnés à gauche.

CHAPITRE 3 : LENTILLES, ŒIL

Les yeux des différents animaux

- Les plus rudimentaires fonctionnent avec un simple petit trou sans lentille, sur le principe de la chambre noire. C'est le cas du serpent à sonnette ou de la seiche.
- D'autres animaux comme la langouste ou certains insectes ont un œil "multifacetté" constitué par un arrangement de multiples petites lentilles (voir l'image ci-contre), chacune effectuant l'image d'une portion de l'espace, le cerveau se chargeant d'en réaliser la synthèse.
- Enfin, la pieuvre, certaines araignées et les vertébrés (dont l'être humain) possèdent des yeux qui fonctionnent comme une seule lentille convergente, formant une seule image réelle sur un écran sensible, la rétine.

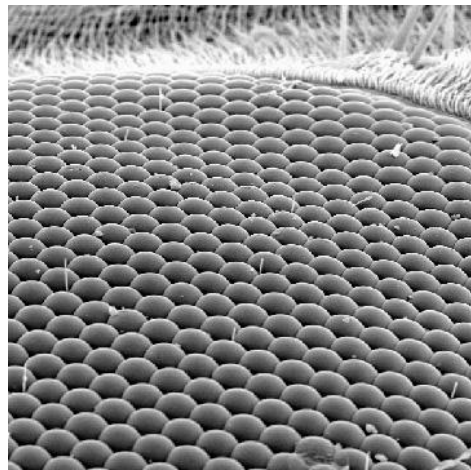


image d'œil de mouche
(microscope électronique)

L'histoire des lunettes

Depuis un peu plus de 700 ans, l'être humain est en mesure d'améliorer sa vision. Dans l'Antiquité (comme le rapporte Pline l'Ancien), des "pierres de lecture" telle que l'émeraude furent utilisées comme loupes. Ce n'est que vers la fin du 13ème siècle, date à laquelle des inventeurs vénitiens mirent sur le marché des "bésicles clouantes", que les aides visuelles eurent un écho croissant (au départ, elles étaient surtout répandues chez les érudits, les philosophes et les médecins). Les lunettes sous leur forme actuelle furent inventées en Angleterre autour de 1850.



La photographie

Photographier signifie de manière étymologique « dessiner avec la lumière ». Avant la naissance de la photographie (1827), la seule manière de produire des images passait par la main de l'homme ou de l'artiste. La photographie a créé une petite révolution dans les techniques d'art et de représentation des images, car elle utilise comme ingrédient principal la lumière, la main de l'homme étant beaucoup moins indispensable. De nos jours, la photographie, grâce à l'évolution technologique de l'appareil photo, est devenue une activité accessible à tous, elle s'est « démocratisée », et pas besoin d'être un artiste ou un professionnel de la photographie pour faire des « photos ». Notre société moderne est devenue un monde d'images où la photographie est très présente (par exemple c'est une fonction intégrée dans notre téléphone portable), et cependant les notions d'optiques qu'elle implique ne sont pas toujours complètement assimilées.

L'appareil photo

Un appareil photographique est constitué d'un *objectif* (association de lentille(s) permettant de former l'image et qui peut se déplacer par rapport au capteur pour placer cette image sur le capteur et avoir alors une image nette) et d'un *boîtier* dans lequel se trouve le capteur qui produira la photographie (Fig. 1). Les premiers *capteurs* étaient constitués d'un support photosensible à base de nitrate d'argent (photographie argentique) et ont été remplacés progressivement par des capteurs silicium dopés permettant de transformer les photons en électrons (Charge-Coupled Device ou CCD). Le détecteur est constitué d'un assemblage de ces capteurs miniaturisés (quelques μm de dimension) pour former une matrice. Chaque capteur représente un pixel de l'image (il y a plutôt 3 capteurs par pixel, pour le rouge, le vert, et le bleu, cf chap. 4). Cette évolution de la microélectronique a permis de rendre la production d'images plus rapide et efficace (plus besoin des bains chimiques pour le développement des photos), de pouvoir stocker les images de manière informatique pour finalement passer à l'ère du numérique.

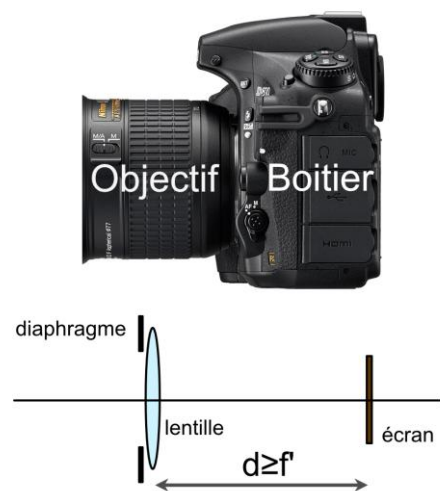


Figure 1 : Schéma simplifié de l'appareil photographique.

En conclusion, on peut schématiser un appareil photo, du point de vue de l'optique géométrique, par l'association d'une lentille mince de focale f' (qui correspond à la focale de l'objectif), d'un diaphragme pour simuler l'ouverture de l'objectif et d'un écran de dimensions finies pour modéliser le capteur (Fig. 1). Pour la mise au point, généralement l'objectif peut se déplacer par rapport au capteur ce qui permet d'avoir des images nettes que le sujet soit proche ou à l'infini.

Champ visuel et photographie

Notre vision est basée sur la mesure d'angle et non pas sur la mesure de dimension ou de distance D d'un objet. Par exemple, lorsqu'on regarde un objet de hauteur H positionné à une certaine distance, nous voyons cet objet sous un angle $\alpha_1 = \arctan(H/D)$ (Fig. 2). Si l'objet est 2 fois plus proche, on verra l'objet plus gros (il occupera plus de place dans notre champ visuel) sous un angle $\alpha_2 = \arctan(2H/D)$ mais la dimension H de l'objet ne change pas. Le *grossissement* peut alors se définir par le rapport des 2 angles α_2 / α_1 .

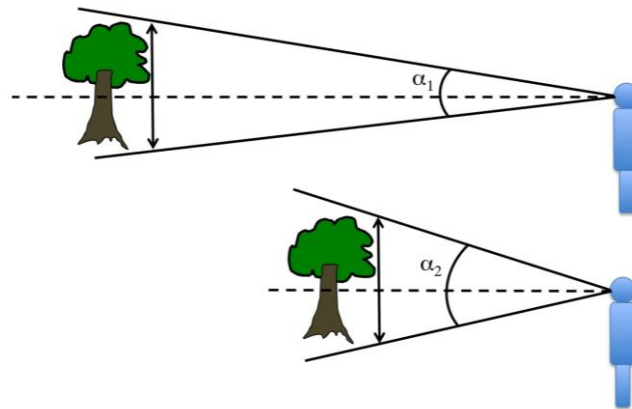


Figure 2 : Angle sous lequel on voit un objet en fonction de sa distance.

Rapidement, l'appareil photographique s'est développé pour retranscrire la réalité (c'est à dire ce que nous voyons avec nos yeux ou proche de notre champ visuel). Les standards de la photographie ont donc défini la *focale normale* qui correspond à peu-près au champ visuel que notre œil peut nous donner si l'appareil était placé au même endroit que l'œil pour faire la photographie.

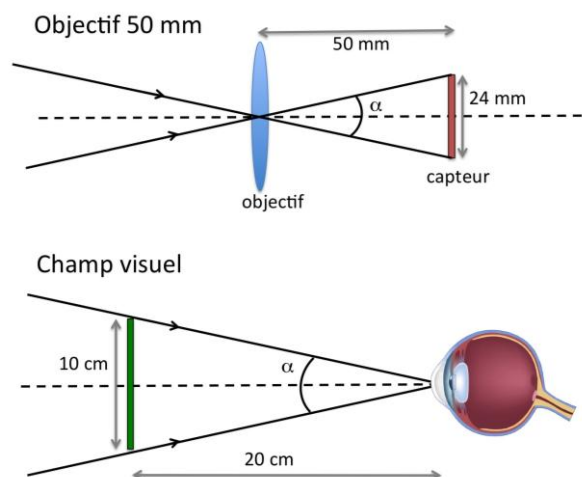


Figure 3 : Objectif 50 mm et champ visuel

Pour un format de capteur standard (24mm x 36mm) utilisé dans les boîtiers d'appareil reflex, la focale normale est de 50 mm, ce qui correspond au champ visuel couvert par une photo de 10 cm x 15 cm observée à 20 cm (Fig. 3). Dans ce cas, l'image

obtenue respectera les perspectives de notre vision ($\alpha \approx 0.45$ rad, proche de $\arctan(24/50)$). Cet objectif est généralement utilisé pour réaliser des portraits, car il ne déforme pas trop les proportions des visages.

Notion de téléobjectif et grand angle

Les objectifs à longues focales (téléobjectifs) sont des objectifs avec une focale supérieure à 50 mm. Dans ce cas, en considérant une taille de capteur fixe et standard (24x36mm), le champ angulaire couvert, $\alpha' = \arctan(24/f')$ (en considérant le petit côté du capteur), est plus petit que pour une focale normale (car $f' > 50\text{mm}$). D'autre part, la taille "d" de l'image de l'objet (vu sous un angle apparent α) est plus grande sur le capteur : $d = (\tan \alpha) \cdot f'$ (Fig. 4 et 5). On constate que c'est bien la distance objectif-capteur (et la taille du capteur) qui définit le champ angulaire. Plus l'objectif est longue focale, plus le « zoom » est fort et plus les effets de perspectives sont diminués (moins d'effets de distorsion). On peut trouver dans le commerce des téléobjectifs avec une focale de 600 mm mais ce sont les objectifs les plus chers qui existent.

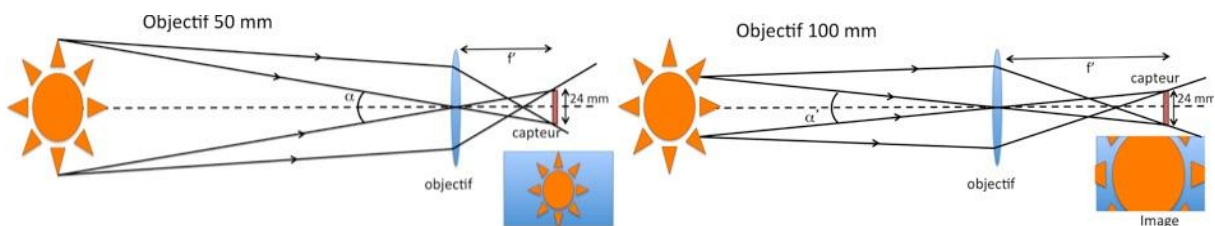


Figure 4 : Comparaison objectif 50 mm et objectif 100 mm

Les objectifs à courtes focales (< 50 mm) correspondent aux objectifs « grand angle » (Fig. 5). En effet, on comprend par exemple qu'un objectif 24 mm possède un angle de vue plus grand qu'un objectif 50 mm ($\alpha' > \alpha$). Avec ce type d'objectif, on pourra facilement faire des prises de vue d'un paysage, d'un bâtiment ou d'un monument en entier. Par contre, les effets de distorsion seront très prononcés sur les bords de l'image provoquant parfois des effets de perspective amusants.



Figure 5 : Comparaison de photos prises avec des objectifs de différentes distances focales

Le grandissement (taille image/taille objet) augmente donc avec la distance focale de l'objectif. Dans tous les cas, quelle que soit la focale (longue, normale, courte), les objectifs permettent d'obtenir une image sur le capteur qui sera toujours plus petite que l'objet photographié, c'est à dire que le grandissement sera toujours plus petit que 1 (à ne

pas confondre avec le grossissement qui correspond à un rapport d'angle). On peut imaginer la taille du capteur pour qu'une personne soit représentée en entier si le grandissement était égal à 1. Il existe un seul type d'objectif capable d'avoir un grandissement égal à 1 (ou supérieur), c'est l'objectif macro.

La macrophotographie

La *macrophotographie*, plutôt connue sous le terme *macro*, est la technique permettant de photographier des objets avec un grandissement de 1 à 10 c'est à dire avec un rapport de 1:1 jusqu'à 10:1 (où le premier chiffre correspond à la taille image et le deuxième chiffre à la taille objet). D'une manière générale, les objectifs macro sont capables de faire des photographies normales (avec un grandissement < 1 comme expliqué précédemment) grâce aux réglages de la mise au point et peuvent aller jusqu'à un rapport de 1:1 maximum. Très peu de marques proposent des objectifs allant à un rapport de 10:1. D'ailleurs plus le grandissement est grand plus la distance objectif-capteur est grande ce qui pose rapidement un problème d'encombrement et de lourdeur de l'appareil. De plus, pour faire une image avec un rapport 1:1, il faut que l'objectif soit à $2f'$ de l'objet, par exemple pour un 50 mm, il faut approcher à 100mm (Fig. 6), ce qui n'est pas toujours facile lorsqu'on veut photographier des insectes ou petites bêtes qui sont vite effrayés quand on approche. Pour un grandissement de 2, on diminue la distance d'approche à $1.5 f'$ et l'encombrement de l'appareil passe à $3f'$. On imagine facilement comment il sera difficile avec un grandissement de 10 d'approcher à quelques millimètres une abeille ou un papillon sans le faire partir.

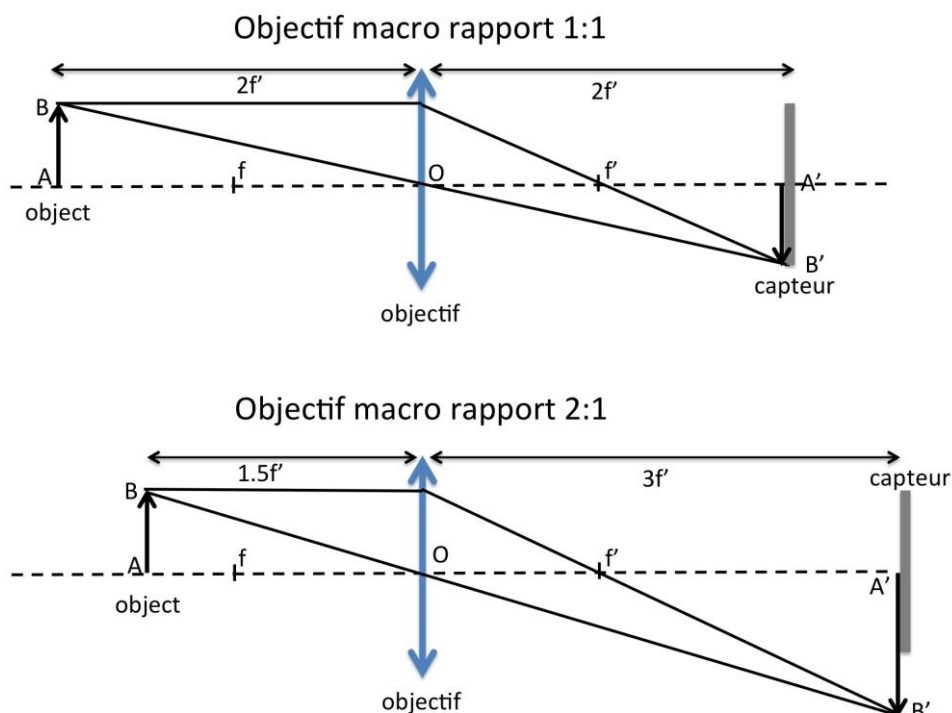


Figure 6 : Schéma optique d'un objectif macro avec un rapport 1:1 et 2:1

Les instruments d'optique

Il s'agit d'objets construits par l'homme permettant de réaliser des images optiques. On les classe en deux catégories :

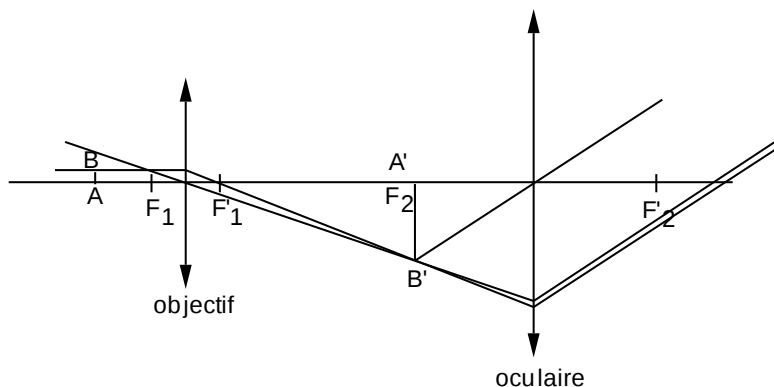
- les instruments visuels : ils fournissent une image virtuelle regardée par l'œil. Ils servent soit à la vision rapprochée (loupe, microscope), soit à la vision d'objets éloignés (jumelles, lunette, télescope)
- les instruments de projection : ils forment une image réelle sur un écran ou sur un détecteur (vidéoprojecteur, objectif d'appareil photo).

Pour comparer ces instruments entre eux, on utilise les notions de :

- grandissement : donne la taille de l'image par rapport à celle de l'objet
- grossissement : compare l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu quand il est placé au punctum proximum avec celui sous lequel on voit son image donnée par l'instrument
- champ : définit la portion de l'espace visible à travers l'instrument

Ils peuvent être composés soit d'une seule lentille (loupe), soit d'associations de lentilles (lunette, microscope), soit de miroirs uniquement (télescope), soit d'association lentille(s)/miroir(s)....

Le microscope aurait été inventé en Hollande à la fin du XVI^e siècle. Au XVII^e, Leeuwenhoek est le premier à observer des cellules et des micro-organismes avec un microscope. Un microscope comprend deux lentilles : un objectif de courte focale (typiquement de l'ordre du cm) qui forme une image fortement agrandie de l'objet. Cette image est par construction dans le plan focal objet de l'oculaire, qui en donne donc une image à l'infini (donc que l'œil peut regarder sans accommoder). Lorsqu'on fait la mise au point, on déplace l'ensemble (objectif + oculaire) de telle sorte à amener l'objet « au bon endroit » pour que son image intermédiaire par l'objectif soit bien dans le plan focal objet de l'oculaire. Le chiffre indiqué sur l'objectif est le grandissement de l'objet lorsqu'il est situé à cette position particulière.

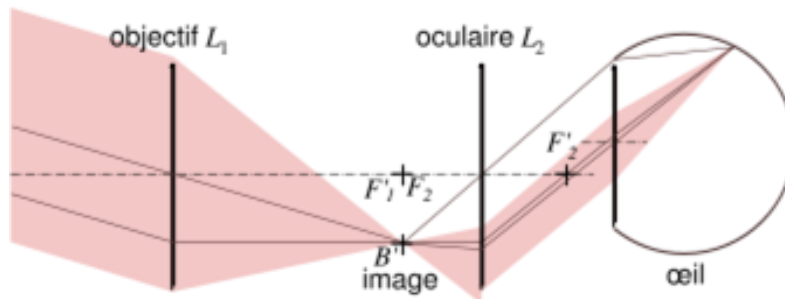


Principe du microscope



photo d'un microscope

La lunette aurait été inventée en Hollande également, au début du XVI^e siècle, et utilisée pour la première fois par Galilée à des fins d'observations astronomiques. Elle est formée également d'une association de deux lentilles. Elle fonctionne un peu à l'inverse du microscope : comme elle sert à regarder des objets très éloignés, la première lentille (objectif) est de grande focale et la deuxième (oculaire) de courte focale. C'est un système afocal : ceci signifie que le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire. Ainsi, l'image d'un objet très éloigné est située dans le plan de ce foyer commun à l'objectif et à l'oculaire, et l'image résultante est à l'infini, ce qui évite là aussi à l'œil d'accommoder.



Principe de la lunette



photo d'une lunette

Essayez de fabriquer une lunette avec les lentilles à votre disposition, afin d'observer un objet éloigné !

Le télescope : voir le chapitre 2 et l'expérience 3 du chapitre 2.

L'appareil photo : à l'époque de la Renaissance les peintres utilisaient la chambre noire (simple petit trou percé dans une paroi, permettant de projeter l'image d'une scène extérieure). Son principal inconvénient était le manque de luminosité. Puis on eut l'idée d'utiliser une lentille, qui améliore considérablement la luminosité. Le problème devint alors de fixer l'image, ce qui fut réussi par Niepce en 1822. Depuis quelques années le support pour enregistrer l'image est non plus argentique mais le plus souvent numérique (voir encadré « La photographie »).

CHAPITRE 4 : SPECTROSCOPIE ET COULEURS

Les couleurs au fil du temps

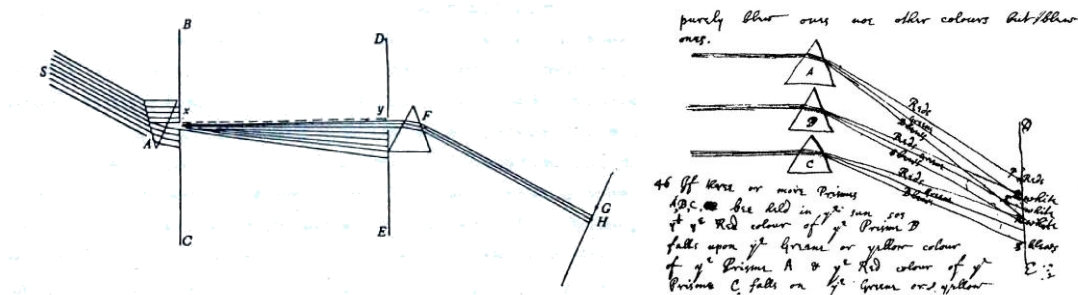
Une question qui a longtemps préoccupé les philosophes et scientifiques est celle de savoir d'où proviennent les couleurs observées dans le ciel lors de l'apparition d'un arc-en-ciel.

Dans l'Antiquité, *Aristote* (384-322 av JC) avance une théorie qui perdura pendant de nombreux siècles, celle de la modification de la lumière blanche. Cette théorie consiste à dire qu'une lumière colorée est un mélange de lumière blanche et d'ombre, la quantité d'ombre incorporée augmentant avec l'épaisseur de matière traversée. Les couleurs étaient ainsi classées en fonction de l'impression subjective de plus ou moins grande luminosité sur un axe allant du blanc au noir (qui sont des couleurs à part entière), en passant par le jaune, le rouge, le vert, le bleu et le violet.

Cette théorie de la modification de la lumière blanche fut aussi utilisée pour expliquer l'apparition des couleurs créées lors du passage de la lumière à travers un prisme (*de Dominis*, 1611). Le prisme est perçu comme un élément qui introduit de l'opacité : ainsi les couleurs obtenues à la sortie du prisme correspondent chacune à une épaisseur traversée différente (et effectivement, le rouge est plus proche du sommet du prisme que le bleu...).

Newton cherchant à construire une théorie "atomique" de la lumière a l'idée que la réfraction d'un rayon peut dépendre de sa couleur. Pour le vérifier, il réalise plusieurs expériences avec des prismes¹.

Il obtient les différentes couleurs à l'aide d'un premier prisme, et il a l'idée de recevoir « les rayons purement rouges » sur un second prisme (figure ci-dessous, gauche). Il n'apparaît pas d'autre couleur que le rouge ! Il opère de même avec le bleu : les « rayons purement bleus (y) subissent vraiment une plus grande réfraction avec le deuxième prisme que les rouges ». La théorie de la modification, qui prévoit un changement de couleur puisque l'épaisseur de verre traversé est plus grande, est mise en défaut. Il prend alors plusieurs prismes et fait tomber sur eux autant de rayons de lumière blanche : il observe que le rouge est toujours moins dévié, le bleu toujours plus. Dans la zone de l'écran où se superposent les couleurs, il observe du blanc (fig. ci-dessous, droite)



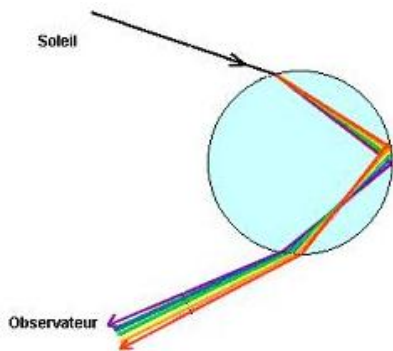
¹ Ces expériences cruciales pour l'optique furent réalisées au cours d'un séjour forcé à la campagne en 1665. Il a en effet été obligé d'interrompre ses études à Cambridge à cause de la peste qui s'était abattue sur la ville.

Expériences de Newton

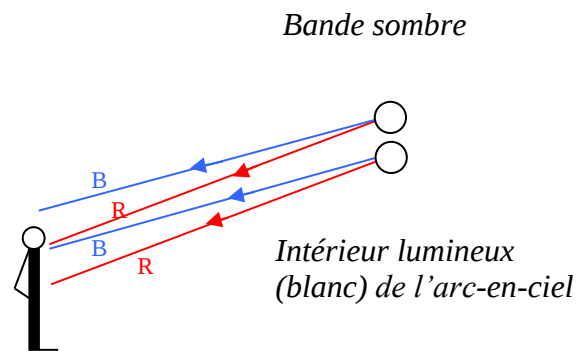
Il est ainsi le premier à comprendre (même si cela nous paraît "évident" aujourd'hui...) que *"La blancheur de la lumière solaire résulte de toutes les couleurs primitives mêlées dans une juste proportion."*

Le tableau ci-dessous donne les noms des couleurs "pures" associées à différents intervalles de longueur d'onde du visible (couleurs de l'arc-en-ciel) :

C'est Newton qui a expliqué la présence des différentes couleurs : c'est lui en effet qui a compris que la lumière blanche était un mélange de couleurs (cf. plus haut l'encadré « les couleurs au fil du temps »), et que les gouttes d'eau agissaient comme des prismes en dispersant les différentes couleurs pour former l'arc-en-ciel.



Dispersion de la lumière par une goutte : un pinceau de lumière blanche peut être décomposé en ses différentes couleurs.



La lumière bleue est plus déviée que la lumière rouge. L'arc bleu provient donc de gouttes qui sont plus basses que celles qui nous donnent à voir l'arc rouge !

Pour expliquer pourquoi on voit bien les couleurs dans la myriade de gouttes qui nous renvoient de la lumière, et pourquoi il en résulte une forme en arc, il faut une analyse détaillée (voir exercice sur ecampus).

Les arcs de l'arc-en-ciel

Au-delà de l'arc primaire de l'arc-en-ciel, il est également possible d'observer parfois un arc secondaire. Celui-ci présente la particularité d'avoir l'ordre des couleurs inversé par rapport à l'arc primaire. Il trouve son origine dans une deuxième réflexion dans la goutte d'eau.

Entre ces deux arcs on peut observer une bande sombre, appelée bande d'Alexandre, du nom d'Alexandre d'Aphrodise, philosophe grec. Elle est due à un déficit de lumière dans cette zone qui se situe au-delà du minimum de déviation du rouge par les gouttes d'eau.

Enfin, on peut noter la présence d'arcs surnuméraires. Sous l'arc-en-ciel primaire on peut parfois observer une alternance de franges violettes et vertes. Ces arcs *surnuméraires* sont des figures créées par interférence sur des gouttes d'eau de taille semblable (~ 1 mm). On les observe principalement au sommet de l'arc primaire.



Pour en savoir plus : <http://www.atoptics.co.uk/rainbows/supers.htm>

Pour une présentation historique de la polémique scientifique sur l'origine des arcs surnuméraires, lire l'article « L'arc-en-ciel de la discorde » (Les Génies de la science N°26 - février - mai 2006).

Spectres de raies et structure de l'atome

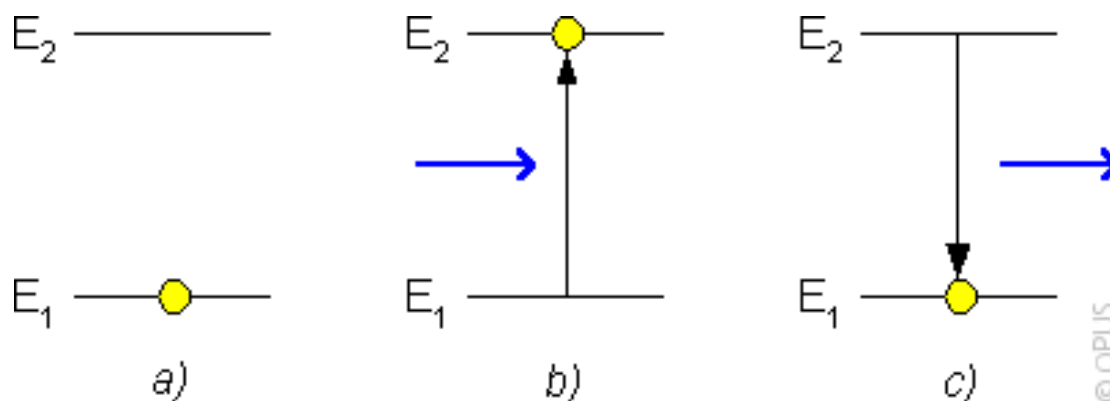
La principale différence que vous avez dû observer entre le spectre de la lumière blanche et celui d'une lampe spectrale quelconque est que celui de la lumière blanche est *continu* (toutes les longueurs d'onde y sont présentes en proportions variables), alors que celui d'une lampe spectrale est *discret* : on parle aussi de spectre de raies.

Spectre d'émission d'un gaz

En effet, dans le cas d'une lampe spectrale contenant un gaz donné, il y a une émission d'un rayonnement à certaines longueurs d'onde spécifiques qui sont caractéristiques de l'élément chimique contenu dans la lampe.

En physique quantique, les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés (*discrets*), ce qui signifie qu'un atome ne peut pas avoir n'importe quelle valeur d'énergie ; l'énergie ne peut prendre que certaines valeurs bien précises, et il en est donc de même pour les énergies libérées ou absorbées par un atome.

On peut illustrer ce fait sur le schéma suivant :



Sur le dessin ci-dessus, E_1 et E_2 représentent deux des niveaux d'énergie possibles d'un atome. Le point jaune est un électron qui peut avoir soit l'énergie E_1 soit l'énergie E_2 . Pour que l'électron passe du niveau E_1 au niveau E_2 ($E_2 > E_1$), il faut lui fournir de l'énergie, par exemple thermiquement (en chauffant) ou électriquement (en appliquant une décharge). Une fois sur le niveau E_2 (état dit *excité*), l'électron se « désexcitera » tout seul, en émettant un photon (un quantum d'énergie lumineuse) d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$, où h est une constante appelée *constante de Planck*. Ainsi l'énergie est restituée sous forme de lumière dont la longueur d'onde, qui dépend de l'énergie, a alors une valeur bien précise $\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1}$, où c désigne la vitesse de la lumière. On voit ici que l'émission de

lumière ne peut se faire qu'à une seule longueur d'onde imposée par la structure électronique de l'atome. Cela correspond à *une raie* dans les spectres de raies en émission. L'émission (ou l'absorption) de lumière est ainsi spécifique de chaque atome qui va présenter une structure électronique distincte.

Dans le cas d'une lampe spectrale, la lumière est émise par les atomes excités d'une vapeur métallique (mercure, cadmium, deutérium par exemple). Il existe plusieurs niveaux excités accessibles par les électrons. Les atomes peuvent alors se désexciter depuis ces différents niveaux d'énergie. La lumière émise est donc en général constituée d'émissions de plusieurs longueurs d'onde distinctes, formant les différentes raies du spectre observées.

Le processus d'émission de lumière décrit ci-dessus est appelé émission spontanée. Il existe un autre processus à la base du fonctionnement des lasers appelé émission stimulée (voir l'encadré "Les lasers et leurs applications" à la fin de ce chapitre).

Spectre d'absorption d'un gaz

La lumière, lorsqu'elle interagit avec la matière, peut être absorbée. S'il s'agit d'un gaz atomique (comme dans une lampe spectrale, ou dans une étoile gazeuse), on constate expérimentalement que l'absorption a lieu selon *les mêmes longueurs d'onde* que celles correspondant à l'émission : si l'on éclaire le gaz considéré par une lumière blanche dont le spectre est continu, la lumière transmise présente des raies sombres montrant que la lumière correspondante a été absorbée (voir l'encadré sur l'hélium).

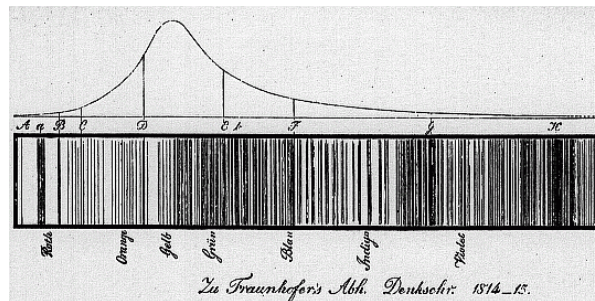
Grâce à la faible densité du gaz, on peut considérer que les atomes le constituant sont indépendants les uns des autres. On peut ainsi raisonner sur un seul atome comme suit : dans le modèle quantique, un atome dans un état de basse énergie E_1 , peut absorber un quantum de rayonnement ayant la valeur nécessaire pour passer de l'état E_1 à l'état E_2 . Il effectue alors une transition et passe dans un état *excité*. La longueur d'onde de la lumière absorbée par un atome est donc la même que celle qu'il peut émettre par désexcitation.

Piste d'interprétation de l'interaction lumière-matière :

Le cas d'un solide ou d'un liquide est plus compliqué que celui d'un gaz. Dans un solide ou un liquide, les atomes sont très proches les uns des autres, et on ne peut plus les considérer comme indépendants les uns des autres. Il en résulte que les énergies accessibles à l'atome ne sont plus discrètes comme pour un atome mais sont des bandes continues, éventuellement séparées par des "bandes interdites"...

Hélium, du grec $\eta\lambda\iota\omicron\varsigma$ (soleil)

Savez-vous que le nom d'hélium donné au gaz rare correspondant vient du grec $\eta\lambda\iota\omicron\varsigma$ (Hélios) qui signifie Soleil ? Et savez-vous pourquoi ? C'est simplement parce que c'est dans le Soleil que l'on a d'abord découvert la présence de cet élément, et ce, en étudiant finement le spectre de la lumière solaire. C'est Fraunhofer qui, dès 1814, a relevé le premier les raies sombres dans le spectre de la lumière solaire, raies qui portent désormais son nom. Kirchhoff, en 1859, a démontré que les longueurs d'onde correspondant à ces raies noires dans le spectre solaire coïncident avec les longueurs d'onde d'émission de lumière observées en laboratoire dans un certain gaz de faible densité et chauffé à haute température (l'hélium!). Il en déduisit que chaque élément produit son propre spectre de raies, caractéristique de sa nature.

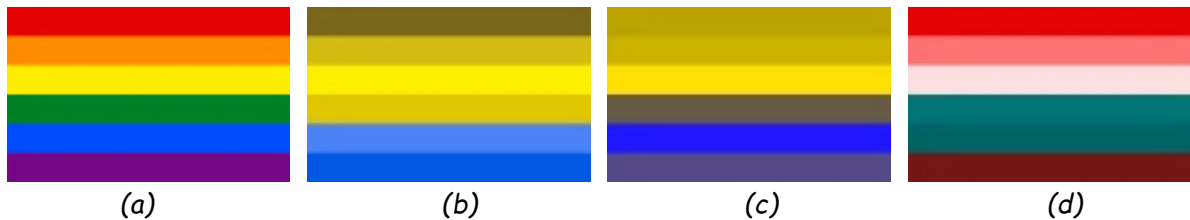


Ainsi, les raies noires du spectre solaire ne sont autres que les raies d'absorption de l'hélium qui constitue l'essentiel de la couronne solaire. La lumière en provenance du cœur du Soleil traverse cette atmosphère et les atomes d'hélium qui s'y trouvent absorbent les composantes correspondant aux transitions d'énergie possibles.

Le daltonisme

Dans le cas d'un œil daltonien, un des trois types de cônes est déficient. Le plus souvent, il s'agit des cônes verts. Dans ce cas, il est impossible de distinguer le rouge du vert. C'est la forme la plus commune de daltonisme, celle-là même dont John Dalton (chimiste et physicien britannique, 1766-1844, auteur de la théorie atomiste de la matière) était atteint.

Les autres formes de daltonisme sont nettement plus rares, comme la confusion du bleu et du jaune, la plus rare de toutes étant la déficience totale de vision des couleurs (achromatopsie), où le sujet ne perçoit que des nuances de gris.



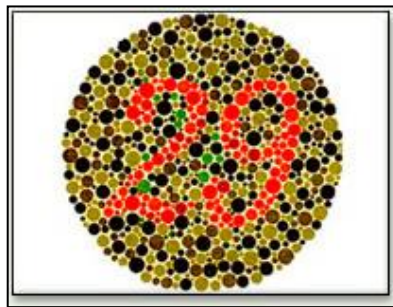
Le drapeau multicolore vu par une personne :

(a) non atteinte de daltonisme.

(b) présentant une déficience des cônes sensibles aux longueurs d'onde dans le rouge.

(c) présentant une déficience des cônes sensibles aux longueurs d'onde dans le vert.

(d) présentant une déficience des cônes sensibles aux longueurs d'onde dans le bleu



Test ophtalmologique pour la détection du daltonisme.

Le disque de Benham (« Benham top »)

Ce disque composé uniquement de noir et de blanc nous apparaît pourtant avec des couleurs pâles bleues et jaunes lorsqu'il est mis en rotation. Les couleurs sont plus ou moins marquées selon la vitesse de rotation du disque. Lorsque le sens de rotation est inversé, la position des couleurs varie.

Dans cette expérience, la perception (l'illusion ?) de couleurs est due à la réponse temporelle des différents photo-récepteurs de la rétine. Le disque de Benham reste un sujet de recherche en physiologie.

Plus d'information + applet Java reproduisant l'effet :

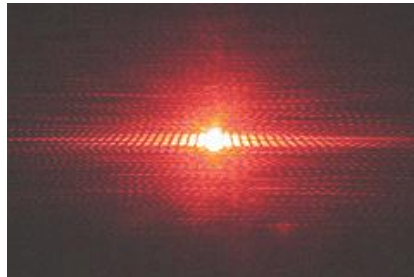
http://www.michaelbach.de/ot/col_benham/index.html



Les autres origines physiques de la couleur

La diffraction

Vous avez vu en Terminale, que le passage de la lumière dans une fente très fine entraînait la formation d'une tache étalée sur un écran. La largeur de la tache centrale de diffraction dépend de la distance D , de la largeur a de la fente et de la longueur d'onde λ .



Tache de diffraction d'un faisceau laser par une fente

C'est cette propriété qui est exploitée dans la fabrication de réseaux de diffraction : on n'obtient pas l'effet d'une seule fente, mais d'un très grand nombre de fentes très serrées.

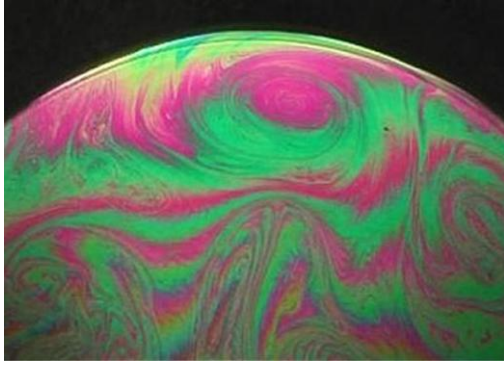
Schématiquement, un réseau (dit "par transmission") est constitué d'un grand nombre de fentes identiques et parallèles de très faible largeur. La distance entre deux fentes est appelée « pas du réseau ». La lumière qui est envoyée sur le réseau est alors diffractée et l'angle à la sortie dépend de la longueur d'onde. On utilise alors les propriétés spectrales de ce type de réseau dans le cadre d'un spectromètre numérique tel que celui utilisé dans ce chapitre pour les expériences de TP.

C'est ce type de phénomène que vous observez chaque jour avec un cédérom : dans ce cas, c'est l'ensemble des cuvettes de l'enregistrement numérique qui fait office de "réseau".

Les interférences



Le phénomène d'interférence peut avoir lieu lorsque la lumière est transmise ou réfléchi par un film mince dont l'épaisseur est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Dans ce cas, le rayonnement de certaines longueurs d'onde disparaît par interférences destructives et celui d'autres longueurs d'onde est préservé par interférences constructives. Ce phénomène est observé par exemple à la surface d'une bulle de savon (film d'eau de très faible épaisseur) ou en présence d'une tache d'huile sur un sol mouillé (film d'huile).



Ce phénomène physique est également à l'origine de la couleur de certains animaux. En particulier les ailes de papillon ou les plumes de certains oiseaux présentent des micro-structurations spatiales à l'échelle de la longueur d'onde. La couleur ainsi observée n'est pas liée à un phénomène d'absorption mais à des interférences constructives et destructives en fonction de la longueur d'onde.



La couleur des ailes de papillon et de certaines plumes d'oiseau est liée à leur structure.

La diffusion de la lumière

La diffusion de la lumière a lieu en présence d'objets dont la taille est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ou bien plus petit. De plus ces objets sont répartis spatialement de manière aléatoire, il n'y a donc pas de phénomène d'interférences. On distingue deux régimes de diffusion

- La diffusion de Rayleigh

Dans ce cas les particules diffusantes sont plus petites que la longueur d'onde (au moins un ordre de grandeur plus petite). La lumière est alors diffusée dans toutes les directions (diffusion isotrope) et dépend fortement de la longueur d'onde. C'est par exemple le cas de la lumière du soleil qui est diffusée par les molécules présentes dans l'atmosphère. Le bleu est davantage diffusé que le rouge, ce qui explique la couleur bleue du ciel. Par contre, au moment du coucher du soleil, la lumière issue du soleil traverse une plus grande épaisseur d'atmosphère. Les plus basses longueurs d'onde bleues étant plus fortement diffusées que les plus hautes, le rayonnement issu du soleil nous apparaît rouge.

- La diffusion de Mie

Ce régime de diffusion a lieu lorsque la taille des particules diffusantes est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. La lumière est alors diffusée principalement vers l'avant et la direction de diffusion dépend peu de la longueur d'onde. La lumière du soleil est ainsi diffusée par les gouttelettes d'eau qui constituent les nuages, ceux-ci nous apparaissent ainsi blanc.



Le blanc des nuages et le bleu du ciel sont liés à deux régimes de diffusion de la lumière distincts

D'autres origines

Sans entrer dans les détails on peut citer d'autres origines physiques de la couleur de certains matériaux. Certains objets présentent en effet des impuretés ou des défauts à l'échelle de leur structure cristalline. C'est le cas en particulier des pierres précieuses. La couleur des métaux conducteurs (cuivre, argent, or, aluminium) est quant à elle liée à leurs structures électroniques particulières

Les lasers et leurs applications



a)



b)



c)

a) Spectacle son et lumière utilisant des lasers ;

b) laser à semi-conducteur (la monture fait 9 mm de diamètre) ;

c) découpage de pièces métalliques par laser

Le mot « laser » vient de l'acronyme LASER qui signifie « light amplification by stimulated emission of radiation », soit « amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement ».

Principe :

Reprenons le modèle d'atome quantique avec ses niveaux d'énergie discrets.

Nous avons vu le principe de l'émission de lumière, dite spontanée. C'est sur ce principe que fonctionnent les lampes spectrales.

Les lasers fonctionnent, eux, sur le principe de l'émission stimulée : dans ce cas, un photon émis par émission spontanée va *désexciter* un électron excité au niveau E_2 , et le forcer à retomber sur le niveau E_1 , en émettant un deuxième photon identique au premier. Pour cela, il faut qu'il y ait en permanence plus d'électrons sur le niveau E_2 que sur le niveau E_1 , ce qui n'est pas naturel (il faut réaliser ce que l'on appelle un « pompage optique »). En effet, un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$ arrivant sur un électron se trouvant sur le niveau E_1 a exactement la bonne énergie pour pouvoir être absorbé par l'atome, et réémis. Dans ce cas, il n'y a pas « production » de photons. Pour que ce soit le cas, il faut qu'il y ait plus d'électrons sur le niveau E_2 que sur le niveau E_1 .

Ensuite, on *amplifie* cette lumière émise par émission stimulée : pour cela, les photons émis font des aller-retours dans une cavité réfléchissante contenant les atomes utiles ; ainsi, un même photon sert un grand nombre de fois à stimuler des émissions de photons par ces atomes.

Historique

Le principe de l'émission stimulée a été trouvé en premier par A. Einstein en 1917. Le premier maser (i.e. un laser, mais à micro-ondes au lieu d'être dans le domaine de l'optique) a été fabriqué aux USA en 1953 par Ch. Townes (prix Nobel de physique 1964). Le premier véritable laser a été fabriqué par Th. Maimann en 1960.

Les différents types de lasers :

Il existe des lasers émettant de la lumière continûment, ou au contraire par impulsions. Les atomes qui sont successivement excités et désexcités sont à l'état gazeux, liquide ou solide.

Lasers à gaz : on peut citer le laser He-Ne utilisé en TP (rouge), le laser à CO_2 (infra-rouge, puissant), le laser à argon qui peut émettre du vert à l'ultra-violet et qui est utilisé dans les spectacles « son et lumière ».

Laser à solide : le YAG est un laser très intense émettant dans l'infra-rouge, permettant de découper des métaux, des diamants..

Les lasers à semi-conducteurs, plus récents, sont de petite taille et peu intenses ; ils sont utilisés dans les lecteurs de CD, les imprimantes laser, comme pointeurs lasers, comme sources de lumière dans les fibres optiques.. Au départ ils émettaient dans le rouge uniquement, mais on sait maintenant en fabriquer qui émettent dans le bleu, le vert, ou l'infra-rouge.

Laser à liquide : les lasers à colorants produisent un rayonnement puissant, par impulsions. Leur intérêt est qu'on peut émettre une longueur d'onde au choix dans une large gamme.

Quelques applications :

En médecine, ils sont utilisés pour détruire des cellules, traiter des cancers, établir des diagnostics, positionner précisément un patient...

Pour faire des mesures : ils servent à mesurer des distances très précisément (hauteur d'un hélicoptère, mesure de la distance Terre-Lune...) ; voir exercice 1.1

Dans le domaine de la communication : le transport d'information se fait de plus en plus via de la lumière laser qui se propage dans une fibre optique.

Remarque finale :

On sait maintenant faire des *lasers à atomes*. Il s'agit bien d'un faisceau d'atomes et non plus de lumière ! Les premiers à l'avoir réalisé sont Andrews, Mewes et Ketterle (USA) en 1997. Ketterle a eu le prix Nobel de physique en 2001 pour cette découverte².

² C'est également l'un des domaines de recherche poursuivi par l'équipe du Pr Alain Aspect à l'Institut d'Optique de l'Université Paris-Sud, Orsay (voir <http://atomoptic.iota.u-psud.fr>)