
Physique pour les chimistes - Optique physique

- Sextant, *Optique expérimentale*, Hermann.
- Duffait, *Expériences d'optique*, Bréal.
- Journeaux, *Travaux pratiques de physique*, de Boeck Université.
- Bottineau, *Expériences d'optique*, DMS-Didalab.
- Bellier, Bouloy, Guéant, *Montages de physique*, Dunod.

I) Rappels théoriques

- La lumière est une onde électromagnétique et donc théoriquement décrite par un couple $(\vec{E}(\vec{r}, t), \vec{B}(\vec{r}, t))$ de champs électrique et magnétique solution des équations de Maxwell.
- Dans un grand nombre de cas, il est possible de s'affranchir de la description ondulatoire et de comprendre les propriétés de la lumière grâce à l'optique géométrique : la lumière se déplace selon des rayons lumineux décrits par leur intensité et leur direction (microscopes, télescopes, appareils photographiques, phénomène de la vision, etc.).
- L'optique physique concerne les phénomènes lumineux qui ne peuvent être expliqués dans ce cadre, comme la diffraction, les interférences, etc.
- Si la lumière est *a priori* un champ vectoriel à six degrés de liberté (3 composantes par champ), les équations de Maxwell qui régissent les propriétés électromagnétiques imposent des relations entre elles, et seules deux composantes sont réellement indépendantes. Conventionnellement, on choisit les composantes E_x et E_y du champ électrique (si z est la direction de propagation).
- Dans une partie de l'optique physique (interférences et diffraction incluses), les deux champs évoluent de façon similaire, et donc l'existence de deux champs ne joue aucun rôle : on n'en étudie qu'un seul. C'est donc un champ scalaire, qu'on note souvent $s(\vec{r}, t)$. Lorsque le champ est monochromatique de pulsation $\omega = 2\pi\nu$ il est plus commode d'introduire son amplitude complexe $\underline{s}(\vec{r})$, telle que $s(\vec{r}, t) = \text{Re}[\underline{s}(\vec{r})e^{-i\omega t}]$. L'intensité lumineuse en un point est alors le module au carré de l'amplitude complexe, $I(\vec{r}) = |\underline{s}(\vec{r})|^2$.
- Prendre en compte le caractère vectoriel de la lumière est nécessaire lors de l'étude des phénomènes de polarisation optique (diffusion de Rayleigh par exemple), de biréfringence cristalline (un système est anisotrope, et a des indices optiques différents selon l'axe du champ) et d'activité optique (un système chiral affichera des propriétés différentes selon la polarisation circulaire gauche ou droite de la lumière).

II) Interférences lumineuses

1) En lumière monochromatique

Le laser rend très facile l'exécution de ces expériences, mais a l'inconvénient de ne pas permettre de varier la longueur d'onde de l'éclairage hors des deux valeurs, dans le rouge et le vert, des deux types de lasers helium-néon disponibles.

Vous disposez de fentes d'Young avec différents écartements entre les fentes. Si la divergence du faisceau n'est pas suffisante pour éclairer les deux fentes simultanément vous pouvez utiliser une lentille convergente de très petite distance focale (quelques mm) pour faire diverger le faisceau. Interprétez qualitativement et quantitativement la figure observée en fonction des échelles de longueur du motif de transmission, ainsi que ses variations en fonction des fentes utilisées.

Expérience : grâce à une mesure d'interfrange (avec une règle, voire une caméra CCD), mesurer l'écartement entre les deux fentes d'un des dispositifs. Évaluer les incertitudes.

2) En lumière blanche

Pour obtenir des interférences en lumière blanche, on peut placer les bifentes de Young au voisinage de la fente source (utiliser un filtre antithermique si les objets diffractants chauffent trop). Dans

ce cas, les franges d'interférence sont irisées, à cause de la dépendance en la longueur d'onde de l'interfrange.

III) Diffraction en lumière monochromatique

1) Théorie

- Pour **une fente** de largeur $2d$ l'intensité lumineuse vaut $I(k) = I_0 \text{sinc}^2(kd)$, avec $\text{sinc}(y) = (\sin y)/y$ la fonction sinus cardinal. La figure de diffraction a une tâche centrale deux fois plus large que les tâches secondaires.
- On voit sur la formule précédente que plus l'ouverture est étroite, plus la figure de diffraction est étalée. C'est une propriété générale qui permet d'interpréter qualitativement la plupart des expériences d'optique physique : s'il y a différentes échelles de longueur dans l'objet diffractant, elles se retrouvent inversées dans la figure de diffraction.
- Un **réseau** est un élément dispersif constituée par un grand nombre de fentes régulièrement espacées. On peut déterminer la direction (c'est-à-dire l'angle θ) des maxima d'intensité : regardons une onde plane arrivant avec un angle θ_0 par rapport à la normale du réseau, l'observation se faisant dans la direction θ . Les ondes issues de deux fentes successives interfèrent constructivement si le retard de deux rayons correspond à un nombre entier de longueurs d'onde, soit

$$(\sin \theta - \sin \theta_0)a = p\lambda,$$

où a est le pas du réseau et l'entier relatif p est appelé *ordre* d'observation.

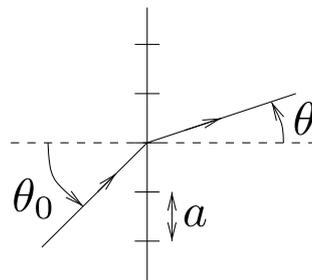


FIG. 1 – Diffraction par un réseau

2) Expériences avec un faisceau laser

Faire passer le faisceau laser dans une fente de largeur ajustable, observer la figure de diffraction sur un écran placé derrière la fente, et ses variations en fonction de la largeur de la fente. Déplacez et faites tourner la fente autour de son axe. Utilisez éventuellement les deux lasers (rouge et vert), comparer la taille de la figure de diffraction pour une même largeur de fente.

Expérience quantitative : utiliser maintenant une fente calibrée dont la taille est bien connue. En mesurant l'interfrange ou la taille de la tâche centrale de la figure de diffraction, déduisez-en une valeur expérimentale de l'ouverture de la fente. On pourra également utiliser une caméra CCD pour observer la répartition spatiale de l'intensité lumineuse.

Vérifiez le théorème de Babinet (deux objets complémentaires donnent la même figure de diffraction) avec un fil et une fente.

3) Utilisation des lampes spectrales et lampes thermiques

On se place dans la configuration schématisée ci-dessous caractéristique de *la diffraction à l'infini* :

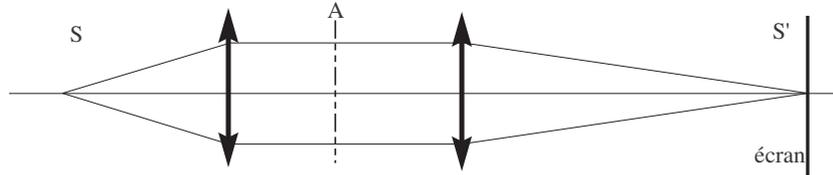


FIG. 2 – Diffraction à l'infini dite de Fraunhofer

Source et écran sont "à l'infini", car la source est dans le plan focal de la lentille L_1 et l'écran dans le plan focal de la lentille L_2 (objet diffractant éclairé par une onde plane et observation à l'infini). Toutefois on peut montrer théoriquement (cf. justification dans le Sextant, paragraphe III.1.8.1) qu'on peut se placer dans une configuration à une unique lentille pour une bonne approximation de la diffraction à l'infini (quand la distance lentille-écran est grande devant celle lentille-objet).

Protocole : Faire l'image d'une fente fine de largeur réglable sur un écran éloigné selon le schéma suivant (mais sans se placer dans une situation de diffraction). S représente la fente que l'on projette sur l'écran à l'aide d'une lentille convergente. On placera la fente près du condenseur d'une lampe quartz-iode, et l'on essaiera de placer la lentille de projection au voisinage du point de convergence du condenseur pour que la lentille travaille dans les conditions de Gauss.

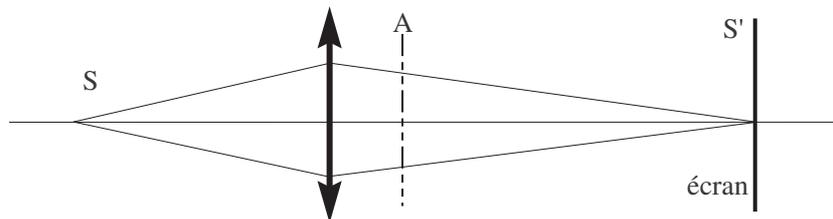


FIG. 3 – Montage à une seule lentille. On placera en ((UNIQ-W2L-47f1af744182cf7b-math-00000016-QINU)) l'objet diffractant.

On l'utilisera dans la suite, en utilisant une fente éclairée comme objet S . Placez comme objet diffractant A une fente fine, en soignant l'alignement avec la fente source. Pour faire varier la longueur d'onde, et donc la taille de la figure de diffraction, vous pouvez utiliser des lampes spectrales ou une lampe QI en combinaison de filtres interférentiels.

IV) Spectroscopie

L'objectif de ce paragraphe va être de mesurer les longueurs présentes dans une source lumineuse. On utilisera donc soit des sources blanches (pour les expériences qualitatives) soit des sources spectrales ou laser pour les expériences quantitatives.

1) Projection de spectres

Reprendre le montage "à une lentille", et interposer en A un élément dispersif, *i.e.*

- un prisme à vision directe (PVD) à réserver pour les expériences qualitatives ;
- un réseau. Remarque : certains réseaux sont dits *blazés*, ils concentrent un maximum de lumière dans un seul ordre.

2) Étude d'un spectre d'une lampe spectrale

Expérience quantitative : Réaliser une expérience de détermination de la longueur d'onde d'une raie atomique à l'aide d'un réseau. Utiliser pour cela la lampe Zn-Cd-Hg et repérer la position de certaines raies (une table des longueurs d'onde se trouve dans le Sextant, page 4) comme valeurs étalons, et en déduire la longueur d'onde d'une autre raie. Quel aurait été l'inconvénient du PVD pour ce type de mesure ? Comparer votre mesure à celle effectuée à l'aide d'un spectromètre à fibre.

Autres expériences

- Observer l'influence du nombre de traits du réseau sur la dispersion du spectre.
- Utiliser une lampe à vapeur de mercure. Montrer que si la fente est suffisamment fine, on peut mettre en évidence les deux raies du doublet jaune. Remarquez qu'il est possible d'observer des raies dans l'ultra-violet avec une feuille de papier blanc : celui-ci contient des molécules organiques appelées azurants, qui absorbent l'ultra-violet et réémettent dans le visible de manière à donner une apparence plus blanche au papier. Ce phénomène est aussi utilisé dans les "tubes néon", dans lesquels une couche de matériau fluorescent est déposée sur le verre à l'intérieur du tube, ce qui permet la réémission de lumière dans le visible.

3) Recomposition de la lumière et filtrage

Avec la lampe QI vous pouvez faire une expérience de recombinaison de la lumière : placer une lentille convergente de courte focale après le PVD de manière à faire converger les différentes couleurs sur le même point de l'écran. De plus on peut faire apparaître le principe des couleurs complémentaires en bloquant, entre le prisme et la seconde lentille, une partie du spectre.

Pour mettre en évidence le spectre d'absorption des solutions colorées (KMnO_4 par exemple) on peut placer un bécher éclairé par une lampe blanche devant un montage dispersif. Une mise en pratique lumineuse et visible est possible en utilisant un rétroprojecteur.

4) Synthèse additive et soustractive des couleurs

Vous disposez d'une source de lumière blanche et de filtres colorés. Réalisez quelques essais avec cet appareil pour observer la synthèse additive et soustractive des couleurs¹.

Pour démontrer la synthèse des couleurs, on peut simplement utiliser le spectroscope fibré. Le logiciel de ce dernier possède un mode colorimétrique que vous pouvez aussi utiliser.

Observez à l'aide d'une loupe (ou une lentille convergente de courte focale) votre écran d'ordinateur. Que remarquez-vous ?

Observez à l'aide d'une loupe une photographie couleur imprimée. Pourquoi utilise-t-on le noir comme quatrième "couleur" en quadrichromie ?

¹ Avec le matériel dont vous disposez la synthèse soustractive est bien plus aisée à démontrer que la synthèse additive. Le centre d'examen dispose de l'appareil adéquate pour la synthèse additive.

5) Transfert quantique d'énergie

La rhodamine est un fluorophore permettant de démontrer la conversion d'énergie lumineuse. Utiliser un laser vert pour exciter une ampoule de rhodamine. Montrer que le vert est absorbé efficacement. Analyser la lumière réémise par la rhodamine. La rhodamine pourrait-elle être utilisée comme milieu amplificateur dans un laser ?

V) Polarisation de la lumière

Le caractère vectoriel de la lumière apparaît lorsqu'elle traverse un milieu non isotrope, comme du quartz, un polariseur, un mélange non racémique d'une espèce chirale, etc.

On doit alors considérer les deux composantes transverses du champ électrique de la lumière $E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz)$ et $E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi)$.

- Si $\varphi = 0$, les deux composantes sont en phase, E_y/E_x est constant, on dit que la polarisation est rectiligne ;
- si $\varphi = 0$ et $E_{y0} = E_{x0}$, alors on dit que la polarisation est circulaire ;
- sinon, la polarisation est dite elliptique.

Pour comprendre cette dénomination, il faut regarder l'évolution en fonction du temps du vecteur \vec{E} dans un plan perpendiculaire à la propagation.

1) Loi de Malus, polariseurs et analyseurs

Une lumière quelconque peut être polarisée rectilignement en utilisant un polariseur qui ne transmet que la composante du champ électrique dans une direction particulière. On l'appelle soit *polariseur* soit *analyseur* selon l'utilisation que l'on en fait. Les polariseurs dont vous disposez sont des feuilles polaroïds, constituées d'une matière plastique dans laquelle sont noyées des cristaux de longues molécules organiques.

Expérience quantitative : vérifier la loi de Malus : l'intensité lumineuse traversant un polariseur suivi d'un analyseur varie comme $\cos^2 \theta$ où θ est l'angle que font les axes de polarisation propre du polariseur et de l'analyseur (on tournera l'analyseur uniquement).

2) Phénomènes de biréfringence

Un élément est dit *biréfringent* lorsque son indice optique dépend de la polarisation de la lumière. Un tel matériau a des axes privilégiés qu'on appelle *axes neutres*.

Lorsque la lumière traverse un milieu biréfringent, sa polarisation peut être affectée. En effet, si la lumière arrive polarisée rectilignement sur le milieu, c'est-à-dire avec des composantes E_x et E_y en phase, comme celles-ci vont voir des indices optiques différents, elles vont se déphaser l'une par rapport à l'autre. La polarisation de sortie sera donc dans le cas général elliptique.

On peut ainsi modifier et contrôler la polarisation de la lumière incidente. Deux exemples d'objets utilisés dans ce sens, dits *lames à retard* :

- une lame $\lambda/2$ permet de faire tourner la direction de polarisation d'une lumière polarisée rectilignement. Si la direction de polarisation est selon un axe neutre de la lame, la polarisation est inchangée ; mais si celle-ci faisait initialement un angle θ avec l'axe neutre, la polarisation tourne d'un angle 2θ .

- une lame $\lambda/4$ permet de transformer une polarisation rectiligne en polarisation elliptique (ou circulaire) et vice versa.

Expérience : Entre polariseur et analyseur croisés, placer une lame $\lambda/2$. La faire tourner jusqu'à extinction de la lumière en sortie : un de ses axes neutres est alors parallèle à la polarisation du polariseur d'entrée. Vérifiez qu'en tournant la lame de $\pi/4$, l'intensité lumineuse en sortie est maximale : la polarisation de la lumière en sortie de la lame est maintenant parallèle à celle de l'analyseur.

Noter qu'une "lame quart d'onde" est spécifique à une longueur d'onde car le déphasage dépend de λ .

3) La lumière est-elle polarisée dans la vie de tous les jours

Oui !

Les sources de lumière naturelle (corps noirs, étoiles, flammes et équivalents) ne sont pas polarisées (significativement), mais la lumière qui nous parvient est souvent polarisée et ce pour plusieurs raisons :

- Lorsqu'un rayon lumineux rencontre un dioptré à l'interface de deux milieux d'indices optiques différents, il subit une réflexion et transmission partielle. La direction des faisceaux transmis et réfléchis est régie par les lois de Descartes, mais l'amplitude de ces faisceaux dépend de la polarisation de la lumière relativement au dioptré (champ transverse électrique ou transverse magnétique) et est régie par les coefficients de Fresnel. En particulier, à l'angle d'incidence dit de Brewster ($\tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \sim 57^\circ$ pour l'interface air/eau), la polarisation transverse magnétique est totalement transmise, et de ce fait, le rayon réfléchi est totalement polarisé transverse électrique. Ce phénomène peut être observé aux abords d'un lac ou sur les pare brises des voitures à l'aide de lunettes polarisées.
- Lors de la diffusion Rayleigh de la lumière par des éléments de taille très petite devant λ , la lumière est polarisée partiellement dans la direction perpendiculaire au plan de diffusion. De ce fait, la lumière du ciel dans une direction donnée est partiellement polarisée perpendiculairement à la direction du soleil. Ce phénomène est mis à profit pour améliorer le contraste des images des aviateurs en utilisant des lunettes à verres polarisés.
- Enfin, les cristaux transparents, de par l'anisotropie de leur réseau cristallin sont donc capable de séparer les rayons de polarisations différentes. Leurs propriétés intéressantes auraient été mises à profit dès l'Antiquité pour la navigation (en utilisation la polarisation du ciel).

4) Activité optique

Les molécules chirales peuvent avoir une **activité optique** (dextrogyre ou lévogyre). Pour celles-ci l'indice optique moyen pour la polarisation circulaire droite diffère de celui de la polarisation circulaire gauche en moyenne. L'effet sur une polarisation incidente linéaire est une rotation du plan de polarisation suivant la loi de Biot :

$$\alpha = \pi \ell \frac{n_G - n_D}{\lambda}$$

où α est le pouvoir rotatoire (ou angle de rotation de la polarisation de la lumière), λ la longueur d'onde du rayonnement incident, ℓ l'épaisseur de l'échantillon traversé, n_G (n_D) l'indice optique pour la lumière polarisée circulaire gauche (droite). Lorsque $\alpha > 0$, l'échantillon est dit dextrogyre, sinon l'échantillon est dit lévogyre.

Expérience : Réaliser un polarimètre de Laurent "maison" en éclairant la cuve à étudier par un faisceau laser, et en la plaçant entre polariseur et analyseur initialement croisés. On mesure alors l'angle de rotation de l'analyseur pour revenir à une extinction.² L'expérience habituelle consiste à étudier le pouvoir rotatoire du sucre dilué dans l'eau. Pour un mélange d'énantiomères, dans la limite où ils n'interagissent pas (formation de dimères, habituellement négligeables), le pouvoir rotatoire total est une simple somme pondérée des pouvoirs rotatoires spécifiques :

$$\alpha = \sum [\alpha]_{\lambda, T} \ell C,$$

où ℓ est l'épaisseur du milieu traversé, C est la concentration de l'énantiomère considéré, et $[\alpha]_{\lambda, T}$ est son pouvoir rotatoire spécifique (à température T et longueur d'onde λ).

²On pourra aussi utiliser un vrai polarimètre de Laurent disponibles en chimie