



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - OPTIQUE II

2022-2023

Bibliographie :

Table des matières

1	Rappels théoriques	3
2	Interférences lumineuses	3
2.1	En lumière monochromatique	3
2.2	En lumière blanche	3
3	Diffraction en lumière monochromatique	4
3.1	Théorie	4
3.2	Expériences avec un faisceau laser	4
3.3	Utilisation des lampes spectrales et lampes thermiques	4
4	Spectrométrie	5
4.1	Spectre d'une lampe à décharge	5
4.2	Spectres d'émission et d'absorption d'une substance chimique	6
5	Polarisation de la lumière	6
5.1	Loi de Malus, polariseurs et analyseurs	7
5.2	Phénomènes de biréfringence	7
5.3	La lumière est-elle polarisée dans la vie de tous les jours	7
5.4	Activité optique	8

1 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).

2 Interférences lumineuses

2.1 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.

2.2 En lumière blanche

Il est plus difficile d'observer les interférences en lumière blanche pour deux raisons : tout d'abord, parce qu'il faut disposer d'une source de lumière quasi ponctuelle suffisamment lumineuse. Ensuite parce qu'il faut s'assurer, avant de placer la bifente que l'on observe bien une image nette de cette source sur l'écran. Le montage est le même que pour l'expérience de diffraction en lumière blanche présentée plus bas.

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



3 Diffraction en lumière monochromatique

3.1 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 tache centrale deux fois plus large que les taches 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 entre deux rayons correspond à un nombre entier de longueurs d'onde, soit

$$(\sin \theta - \sin \theta_0)a = p\lambda, \quad (1)$$

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

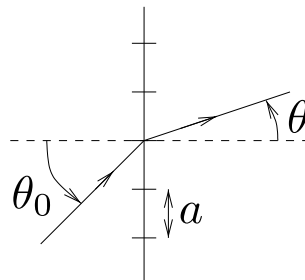


FIGURE 1 – Diffraction par un réseau

3.2 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 : Utilisez maintenant une fente calibrée dont la taille est bien connue. En mesurant l'interfrange ou la taille de la tache 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.

3.3 Utilisation des lampes spectrales et lampes thermiques

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

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



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

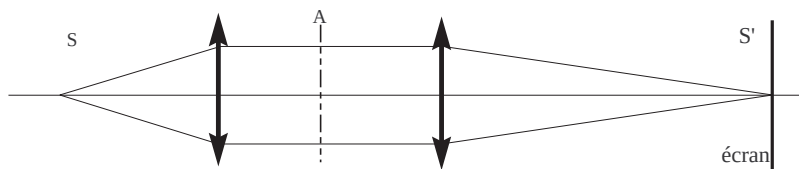


FIGURE 2 – Diffraction à l'infini dite de Fraunhofer

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 : Le montage est semblable à celui présenté plus haut pour les interférences en lumière blanche, mais il est plus difficile d'obtenir une figure nette et brillante. Faire l'image nette 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. Pour vous donner une idée de la netteté requise : pour que l'on puisse voir la figure, il faut que la largeur de la fente visible à l'écran soit environ deux fois plus petite que la taille de la tache principale de diffraction. 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.

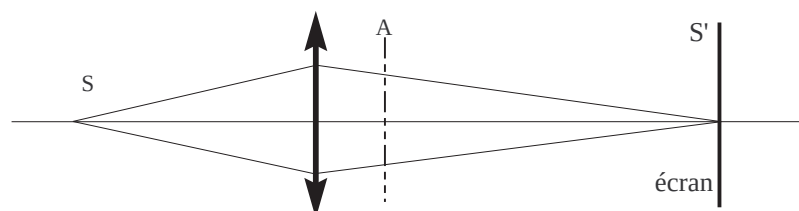


FIGURE 3 – Montage à une seule lentille. On placera en A l'objet diffractant. Si la figure d'interférence n'est pas suffisamment brillante, on pourra approcher l'objet diffractant de l'écran. Il faut toujours s'assurer qu'une bifente unique est éclairée, au besoin utiliser un diaphragme pour couper la lumière parasite entre la lentille et 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.

4 Spectrométrie

La spectroscopie désigne l'étude expérimentale du spectre d'une source. Une version qualitative de cette étude est présentée dans le poly Optique I, par exemple via la projection de spectres à l'aide d'un PVD. La spectrométrie en est quant à elle la version quantitative : il s'agit de mesurer aussi précisément que possible les longueurs d'onde présentes dans le spectre d'une source lumineuse. C'est pourquoi les expériences décrites ci-dessous requièrent d'utiliser des lampes spectrales ou des lasers, dont les spectres sont bien connus.

4.1 Spectre d'une lampe à décharge

Expérience quantitative : lampe Zn-Cd-Hg



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

- En effectuant un montage à une lentille, disperser la lumière émise par une lampe Zn-Cd-Hg à l'aide d'un réseau. Notez qu'il existe des réseaux dits "blazés" qui concentrent la lumière dans le premier ordre de diffraction.
- Observer l'influence du nombre de traits du réseau sur la dispersion du spectre.
- 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. Evaluer l'incertitude de votre mesure.
- Réaliser une seconde mesure de cette longueur d'onde à l'aide d'un spectromètre à fibre et vérifier la compatibilité de vos résultats.

Expérience quantitative : lampe Hg

- Dans le montage précédent, remplacer la lampe Zn-Cd-Hg par une lampe à vapeur de mercure.
- Montrer que si la fente source est suffisamment fine, on peut mettre en évidence les deux raies du doublet jaune.
- Evaluer, en nm, la distance entre ces deux raies.

Question : Pourquoi ne pourrait-on pas réaliser ces expériences à l'aide d'un PVD ?

4.2 Spectres d'émission et d'absorption d'une substance chimique

Expérience quantitative : la rhodamine La rhodamine est une molécule fluorophore qui absorbe la lumière dans le vert et la réémet dans le jaune-orange. La lumière transmise est rose-rouge.

- Dans le montage à une lentille, placer une ampoule de rhodamine en A et éclairer la fente source à l'aide d'une lampe QI. Utiliser un spectromètre à fibre pour déterminer la longueur d'onde maximale d'absorption de la rhodamine. Comparer à la valeur tabulée 541 nm.
- Ôter la fente source et remplacer la lampe QI par un laser vert. Récoltez la lumière diffusée par la rhodamine dans la fibre du spectromètre (utilisez une lentille si besoin) et déterminer la longueur d'onde maximale d'émission. Comparer à la valeur tabulée 572 nm.

Questions :

- Pourquoi la longueur d'onde d'émission d'un fluorophore est-elle toujours supérieure à sa longueur d'onde d'absorption ?
- La rhodamine pourrait-elle être utilisée comme milieu amplificateur dans un laser ?

5 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 $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ 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.



5.1 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).

5.2 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 .

5.3 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).

5.4 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 :

$$\alpha = [\alpha]_{\lambda,T} \ell C \quad (2)$$

où $[\alpha]_{\lambda,T}$ est le pouvoir rotatoire spécifique, λ la longueur d'onde du rayonnement incident, ℓ l'épaisseur de l'échantillon traversé, et C la concentration. Lorsque $\alpha > 0$, l'échantillon est dit dextrogyre, sinon l'échantillon est dit lévogyre. La théorie de Fresnel relie l'angle de rotation de la polarisation à la différence entre les indices optiques pour des ondes polarisées circulairement droite et gauche

$$\alpha = \pi \ell \frac{n_G - n_D}{\lambda} \quad (3)$$

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.¹ 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 :

$$\alpha = \sum [\alpha]_{\lambda,T} \ell C, \quad (4)$$

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).

1. On pourra aussi utiliser un vrai polarimètre de Laurent disponible en chimie

