

Présentation pédagogique d'un beau phénomène de diffusion : l'effet Christiansen

par Luc DETTWILLER

Lycée Blaise Pascal - 36, avenue Carnot
63037 Clermont-Ferrand Cedex

RÉSUMÉ

On présente la diffusion Christiansen de manière spectaculaire, ce qui peut être utilisé - même de façon simplifiée - pour illustrer les notions de réflexion, réfraction et diffusion, exigibles des élèves de Seconde selon le nouveau programme.

INTRODUCTION

Parmi tous les phénomènes de diffusion, la diffusion Christiansen est peu connue, mais pourtant intéressante pour ses applications pratiques : elle permet la réalisation de filtres optiques pour l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet, avec une courbe de transmission réglable. Pour l'enseignant, ce phénomène se prête à une démonstration spectaculaire et esthétique propre à susciter l'intérêt des élèves, tout en leur faisant manipuler les notions théoriques d'indice, de réflexion partielle, de dispersion, de conjugaison, de couleurs complémentaires, de spectre, etc.

PRINCIPE

La diffusion Christiansen s'observe lorsque l'on met en suspension dans un liquide homogène une fine poudre d'un solide transparent, et que les courbes de dispersion du liquide et des cristaux (formant la poudre) ont une intersection pour la longueur d'onde λ_i , par exemple dans le visible (voir figure 1). Alors, pour λ_i , les indices de la solution et des cristaux sont égaux, donc il n'y a plus ni réflexion partielle ni réfraction ni diffraction avec les cristaux dans la solution, donc la suspension est optiquement homogène à cette longueur d'onde ; ainsi cette lumière monochromatique se trouve-t-elle ordinairement transmise par la solution. Par contre, dès que l'on change de longueur

d'onde, les indices des cristaux et de la solution deviennent différents, la suspension se montre optiquement très hétérogène et donc très diffusante, d'autant plus que la différence des indices des cristaux et de la solution est grande. Lorsqu'elle reçoit un faisceau de lumière polychromatique, la suspension se comporte donc comme un filtre, qui transmet essentiellement la lumière de longueur d'onde λ_i , et qui diffuse les autres. En faisant varier la composition de la solution si celle-ci est un mélange, on déplace le point d'intersection des courbes de dispersion, et par conséquent on règle la longueur d'onde λ_i de la lumière transmise par ce filtre ; de plus, en faisant varier la quantité de poudre en suspension dans un volume donné, on agit sur l'acuité du phénomène et donc on règle la bande passante du filtre ainsi réalisé.

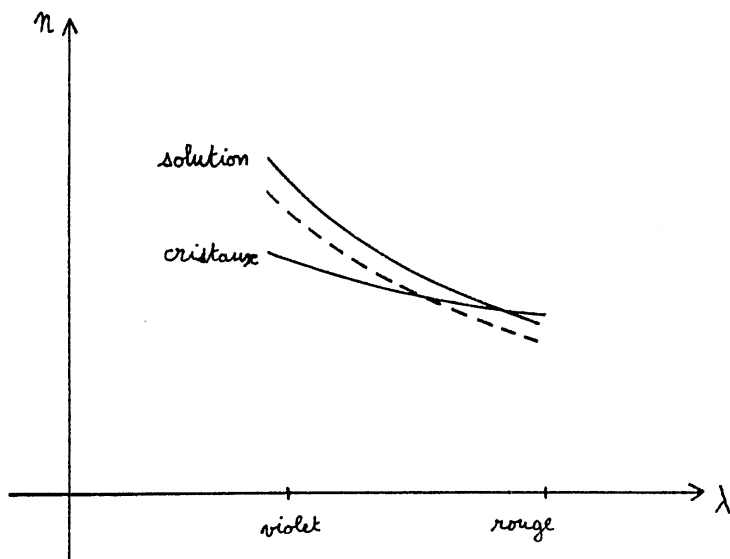


Figure 1 : Principe de l'effet Christiansen ; la courbe en pointillés correspond à une solution de composition différente.

EXEMPLES

Mentionnons plusieurs recettes pour observer l'effet Christiansen.

En versant de l'acide fluorosilicique H_2SiF_6 dans une solution concentrée de chlorure de potassium, il apparaît un précipité de petits

cristaux cubiques transparents de fluorosilicate de potassium K_2SiF_6 , prêt à donner l'effet Christiansen.

On peut aussi réaliser une solution homogène en mélangeant du toluène et de l'éthanol, avec un titre massique en toluène de 0,52 environ, et y mettre en suspension de la fluorine (CaF_2) sous forme de poudre blanche ; on obtient alors par effet Christiansen un filtre orange.

D'autres recettes enfin font appel à du verre, ou mieux du quartz clair fondu, finement pulvérisé, mis en suspension dans de l'huile de cèdre, ou de la glycérine, ou du sulfure de carbone mélangé à du benzène ou de l'acétate d'amyle ou du phtalate de phényle.

PRÉSENTATION EXPÉRIMENTALE

La deuxième recette faisant appel à des produits plus courants dans les laboratoires de chimie des lycées, c'est elle que nous préconisons ; on peut se procurer la fluorine chez Aldrich par exemple - référence n° 23,794-9 (une dizaine de grammes suffit, et le mélange peut servir plusieurs fois). Il ne faut pas mettre trop de fluorine, sinon la suspension devient laiteuse et le flux transmis n'est plus suffisant (la bande passante devient très étroite) ; au bout de quelques tâtonnements on trouve assez facilement un optimum, d'autant que la fluorine en suspension se dépose partiellement au fond de la cuve en une dizaine de minutes, et qu'à cause de cela il peut être nécessaire d'agiter la suspension périodiquement.

Projetons sur un écran, grâce à un objectif convergent de courte focale, l'image agrandie d'un trou circulaire de 1 cm de diamètre environ, éclairé par la lumière blanche d'une lampe à diode. Pour éviter toute limitation de champ, pour minimiser les aberrations et pour obtenir sur l'image un éclairage uniforme (débarassé de toute image résiduelle floue du filament), on prendra soin de former, grâce à un condenseur, l'image de la lampe sur la pupille de l'objectif et sur son axe (voir figure 2). Remarquons que ce réglage est automatiquement réalisé si on utilise un projecteur de diapositives, et que l'on se dote d'un jeu de trous circulaires de différents diamètres (découpés dans du papier rigide et montés dans des cache-diapositives de format 5×5 cm) que l'on y introduit à la place des diapositives [1].

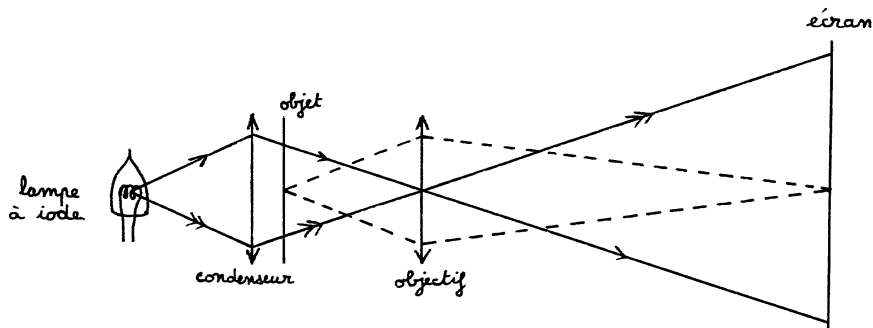


Figure 2 : Principe de la projection.

Plaçons, peu après la sortie du projecteur, une cuve à faces parallèles de quelques centimètres d'épaisseur et d'assez bonne qualité optique, remplie du mélange formant la suspension décrite ci-dessus, et corrigeons la mise au point ; on veillera à ce que le faisceau lumineux issu du projecteur passe entièrement dans la suspension, mais aussi à ce qu'il reste suffisamment de place dans la cuve pour qu'on puisse largement y rajouter du liquide. Si les dimensions de la cuve l'autorisent, on pourra monter celle-ci avec un agitateur magnétique. On place au-dessus de la cuve deux burettes, l'une remplie de toluène, l'autre d'éthanol (voir figure 3).

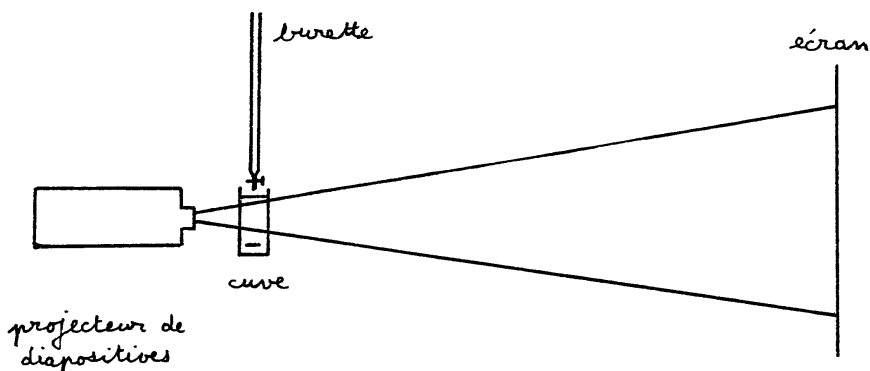


Figure 3 : Montage pour l'observation des couleurs obtenues par effet Christiansen en transmission.

Partant du mélange initial qui se comporte comme un filtre rouge orangé, l'image du trou circulaire a cette couleur. Lorsque l'on ajoute un peu d'éthanol à la solution, après avoir agité pour uniformiser le mélange, la couleur de l'image vire au jaune ; répétons l'opération, et l'on obtient une image verte, puis bleue, indigo, et violette. En continuant, la solution devient un filtre transmettant surtout de l'ultraviolet, ce que l'on met en évidence par la fluorescence d'un papier au platinocyanure de baryum placé sur l'image (contre-expérience : mettre à la sortie du projecteur un filtre *supprimant* l'ultraviolet, et la fluorescence disparaît ; un excellent filtre coupant même le proche ultraviolet est une lame de verre organique polycarbonaté, comme le Lexan ou le Macrolon). L'explication est simple : l'ajout d'éthanol ne change rien à la courbe de dispersion des cristaux de fluorine, mais abaisse (car son indice est inférieur à celui du toluène) l'indice de la solution, qui est plus dispersive que la fluorine, et donc déplace vers le violet l'intersection des deux courbes de dispersion (voir figure 1). On sait donc comment ajuster la couleur obtenue après avoir effectué le mélange initial, si on estime que ce dernier est un peu raté.

Ajoutons maintenant du toluène, et nous verrons la couleur des images varier en sens inverse. Profitons-en pour suivre aussi l'évolution de la lumière diffusée. Recueillons celle-ci grâce à une lentille convergente (de 30 cm de focale et de diamètre assez grand - 10 cm environ) pas trop éloignée du faisceau transmis par la cuve, de façon à projeter sur l'écran, à proximité de l'image du trou circulaire et avec le maximum de luminosité, l'image de la suspension et d'un diaphragme à iris placé en biais juste à la sortie de la cuve (voir figure 4). On a donc côte à côte les images de deux plans différents, formées l'une avec la lumière transmise et l'autre avec la lumière diffusée : il s'ensuit que leurs teintes sont complémentaires.

Grâce à deux miroirs plans, on peut envoyer l'image circulaire formée avec la lumière diffusée sur celle formée avec la lumière transmise, de façon qu'elles se superposent partiellement ; l'éclairement de celle-ci étant le plus fort, on place sur le trajet de la lumière transmise un polariseur suivi d'un analyseur que l'on peut orienter de façon à régler, conformément à la loi de Malus, l'atténuation de l'éclairement de l'image due à la lumière transmise, et à obtenir du blanc sur la superposition de ces deux images (voir figure 4). On peut ainsi vérifier expérimentalement que les teintes des lumières diffusée et transmise sont complémentaires, pour diverses compositions de la solution ; mais à chaque fois que l'on rajoute du toluène ou de l'éthanol

il est nécessaire de revoir l'équilibrage des éclairagements des deux images en tournant l'analyseur, puisque le rapport des flux diffusé et transmis dépend de la pente relative de la courbe de dispersion de la fluorine par rapport à celle de l'éthanol, qui change avec λ_i .

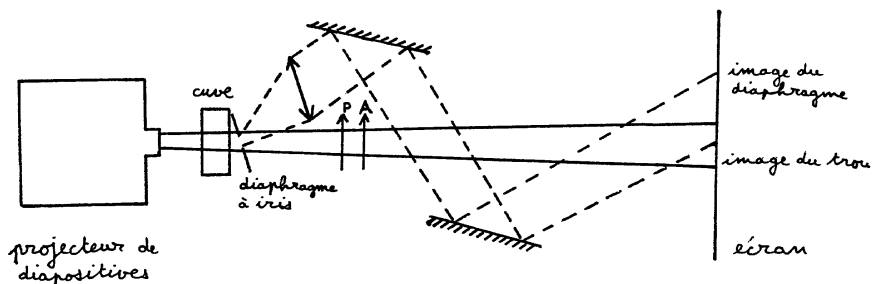


Figure 4 : Montage pour l'observation des couleurs complémentaires en transmission et en diffusion (vue de dessus). P est le polariseur, A l'analyseur ; la lentille est approximativement parallèle au diaphragme placé en biais.

Il est aussi très spectaculaire d'ajouter un peu de toluène, et de *ne pas* agiter. La relative viscosité des liquides fait que leur mélange reste longtemps non uniforme, donc que l'indice de la solution varie d'un point à l'autre, ce qui se manifeste par de belles traînées colorées sur l'image de la suspension (le spectre de la lumière diffusée par un point de celle-ci dépendant de l'indice de la solution en ce point) ; en attendant suffisamment, on peut donc observer par ce biais la diffusion du toluène dans l'alcool... Quant à l'image du trou, elle est brouillée, puisqu'on la forme au travers d'un milieu aberrant (la solution, d'indice non uniforme). Agitons maintenant : la solution redevient homogène (i.e. uniforme), l'image du trou cesse d'être brouillée, et les traînées colorées cèdent la place à une couleur uniforme sur l'image de la suspension.

On peut recommencer pour le plaisir autant de fois que l'on veut, à condition de rajouter au besoin de la fluorine, et d'éviter que la cuve ne déborde ! Profitons-en alors pour nous intéresser au spectre de la lumière transmise. Pour cela, il sera nécessaire de changer de montage (voir la figure 5, qui donne du montage une vue de dessus). Prenons une lampe quartz-iode, un condenseur qui en forme l'image sur un trou (de deux millimètres de diamètre environ), une lentille collimatrice (d'une vingtaine de centimètres de focale environ). Plaçons ce trou, par autocollimation, au foyer objet de cette lentille ; derrière la lentille,

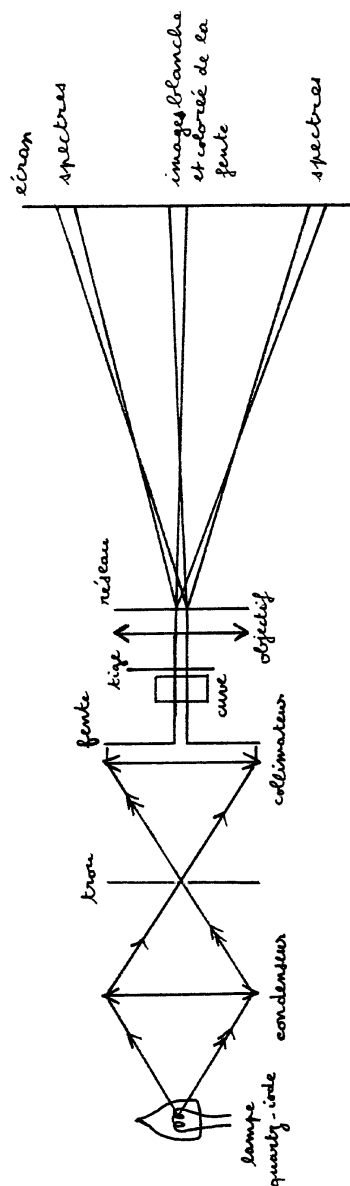


Figure 5 : Montage pour l'observation des couleurs obtenues par effet Christiansen en transmission, et de leurs spectres (vue de dessus).

disposons une fente verticale (de 1 à 2 mm de largeur environ) puis la cuve, de sorte que la moitié du faisceau de rayons quasi-parallèles émergeant de la fente passe dans la suspension et l'autre moitié en dehors, avec ses rayons bien horizontaux de façon à raser la surface libre ; pour éliminer la lumière parasite réfractée par le ménisque de la solution, on peut placer contre la cuve une tige horizontale opaque, réglable à la hauteur de la surface libre. Enfin, projetons sur l'écran l'image de la fente grâce à une lentille convergente placée après la cuve, et mettons contre la lentille un réseau qui intercepte toute la lumière qui la traverse - ses traits étant orientés verticalement (voir figure 5). Sur l'écran, dans l'ordre zéro on observe l'une au-dessus de l'autre les images blanche et colorée de la fente verticale, et de part et d'autre les spectres correspondants dans les ordres diffractés (en jouant sur la quantité de fluorine en suspension on arrive, au bout de quelques tâtonnements, à observer des images de couleurs bien saturées, et la bande spectrale correspondante). Si l'on ajoute du toluène ou de l'éthanol, on voit donc sur l'image de la fente la couleur changer, tandis que sur le spectre la bande transmise par le filtre de Christiansen se déplace.

Avec des polariseurs et analyseurs rectilignes, aucun effet notable de polarisation ou de dépolarisation des lumières transmise ou diffusée ne se manifeste.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. JOUANISSON «*Expériences d'optique à l'aide d'un projecteur de diapositives*», Bulletin de l'ADASTA Supplément pédagogique n° 9, octobre-novembre-décembre 1991
ou encore, mais moins développé B.U.P. n° 743 «*Expériences d'optique à l'aide d'un projecteur de diapositives*».

L'essentiel de ce texte a fait l'objet d'une publication séparée dans le Bulletin de l'ADASTA Supplément pédagogique n° 14, avril - mai - juin 1993.