

Expériences sur la décomposition et la recomposition de la lumière blanche

par R. JOUANISSON
63540 Romagnat

RÉSUMÉ

On procède à une analyse de recomposition de la lumière blanche dispersée par un prisme. On donne une description détaillée du matériel et des expériences qui permettent de mettre en évidence de manière spectaculaire les notions de couleurs complémentaires, de synthèses additive et soustractive.

On propose une méthode originale permettant d'étudier les objets de phase.

INTRODUCTION

La décomposition de la lumière blanche par un prisme n'a été interprétée correctement qu'en 1666 par NEWTON. NEWTON a prouvé, à l'aide d'expériences cruciales, que les couleurs ne sont pas produites par la surface réfractante, (comme le pensait, par exemple, DESCARTES), mais qu'elles font bien partie de la lumière incidente [1]. La recomposition de la lumière blanche par NEWTON à partir des couleurs du spectre en est une confirmation éclatante.

Si la décomposition de la lumière est un phénomène fréquemment observé (dispersion des milieux transparents, diffraction, interférences, etc.), la recomposition est une opération qui a peu de chances de se produire sans le secours de l'expérimentateur.

Les expériences portant sur la décomposition de la lumière, et qui sont à l'origine de la spectroscopie, sont bien connues et ne feront que l'objet de rappels sommaires dans cet article (pour les détails expérimentaux, voir [2] et [3]).

En revanche, les expériences sur la recomposition sont peu étudiées, dans les ouvrages d'enseignement notamment, ce qui est regrettable, car elles permettent de

mettre en évidence de façon spectaculaire un grand nombre de propriétés liées à la couleur : lumière monochromatique, couleurs complémentaires, synthèses additive et soustractive, etc. Nous verrons également que grâce à la recombinaison de la lumière blanche il est possible de réaliser une étude originale de certains milieux transparents présentant des inhomogénéités de structure, comme par exemple des gradients d'indice de réfraction.

LE MATÉRIEL

Pour faciliter la tâche de ceux qui se proposent de reproduire les expériences décrites, je donne une description, parfois détaillée, du matériel et des montages, en justifiant les choix opérés. Ces choix ne sont pas arbitraires : ils tiennent compte à la fois des exigences scientifiques, d'un parti pris pédagogique et, bien sûr, des conditions matérielles. Il ne me paraît pas non plus inutile de rappeler que la réussite d'une expérience n'est que rarement le fruit du hasard ou d'une hypothétique dextérité manuelle, en optique comme dans d'autres disciplines.

SOURCE DE LUMIÈRE BLANCHE

Le plus simple et le plus pratique est d'utiliser un **projecteur de diapositives**. Cet appareil est **conçu** pour projeter des images sur un écran ; ici vous projetterez l'image d'une fente (montée sur un cadre de diapositive comme on le verra plus loin). Les réglages sont ultra simples.

L'image obtenue, grâce à un objectif de bonne qualité (ce peut être un zoom) est irréprochable.

La fente réglable (coûteuse) est remplacée ici par une série de fentes (largeur : 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 mm par exemple).

Les projecteurs de diapositives, qui sont des matériels de grande diffusion (donc bon marché, comparativement aux appareils à usage pédagogique) sont équipés de lampes à halogène basse tension, ce qui permet, grâce à des ampoules en quartz, d'obtenir une lumière blanche dont la température de couleur est de l'ordre de 3 000 K. (Ne pas oublier que cette température est encore très inférieure à celle de la lumière solaire).

Pour réaliser les expériences qui vont suivre, une puissance de 150 W est suffisante.

DISPERSION DE LA LUMIÈRE

Utiliser un prisme en flint équilatéral (les réseaux ordinaires par transmission sont beaucoup moins lumineux). Les dimensions de ce prisme doivent être suffisantes pour ne pas limiter l'ouverture du faisceau issu de l'objectif de projection (de l'ordre de 3 à 4 cm de diamètre).

Ce prisme est placé sur un support, aussi près que possible de l'objectif, au voisinage du point de focalisation du faisceau. On optimise ainsi la projection sans diaphragmer le faisceau, donc sans limiter le champ sur l'image de la fente (figure 1).

Le prisme est utilisé au minimum de déviation pour obtenir la meilleure image possible de la fente.

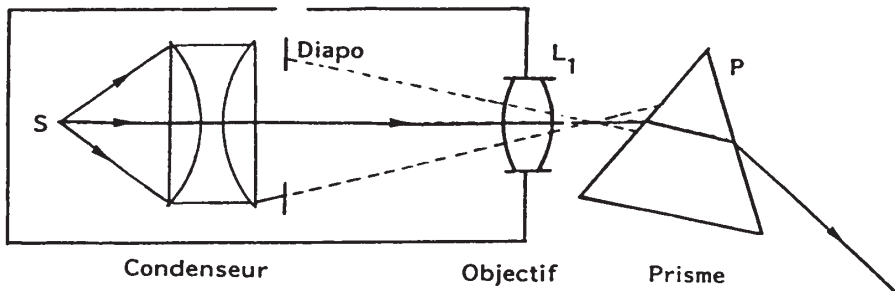


Figure 1

De plus, dans ces conditions, les pertes d'énergie par réflexion sur les faces du prisme sont toujours voisines d'un minimum (environ 10 %) (figure 2).

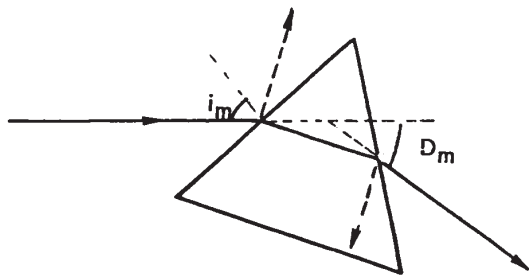


Figure 2

AUTRES ACCESSOIRES

Nous ne décrivons ici que la méthode de recombinaison de la lumière à l'aide d'un objectif. (Pour les autres méthodes, voir par exemple [2] et [3]). L'objectif convergent, noté L_2 sur la figure 3, a pour fonction de faire l'image d'une plage blanche, située au voisinage du prisme, sur un écran situé au-delà du spectre. Sa distance focale est de l'ordre de 20 cm.

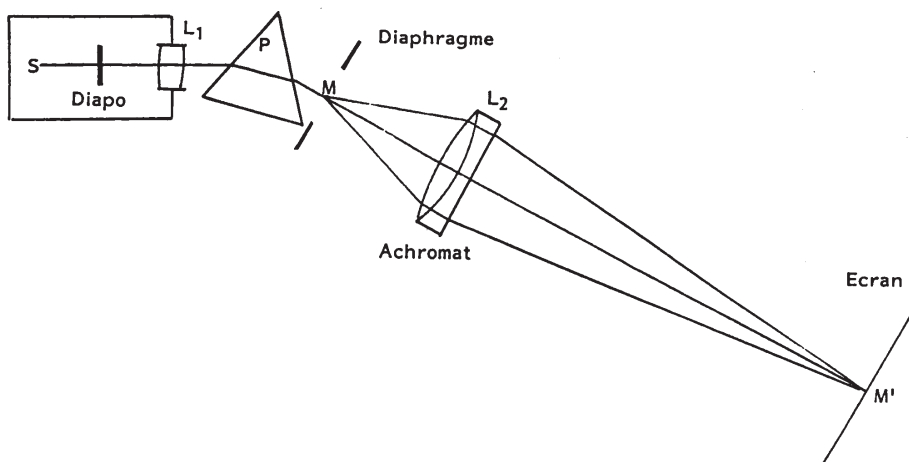


Figure 3

Afin d'obtenir une bonne image (en particulier exempte de colorations) on utilise un **achromat**.

A défaut, un objectif récupéré sur un appareil photo, un rétroprojecteur, etc. peut convenir.

Différents types de filtres sont à réaliser : **fentes, écrans**, etc. (figures 4a, 4b) : ces filtres seront montés sur des cadres de diapositives. Les fentes sont obtenues simplement en incisant, à l'aide d'un cutter, un papier fort ; des écrans sont réalisés en collant des bandes de papier noir sur un support transparent. Il est bon aussi de prévoir un dispositif permettant un déplacement précis de ces filtres.

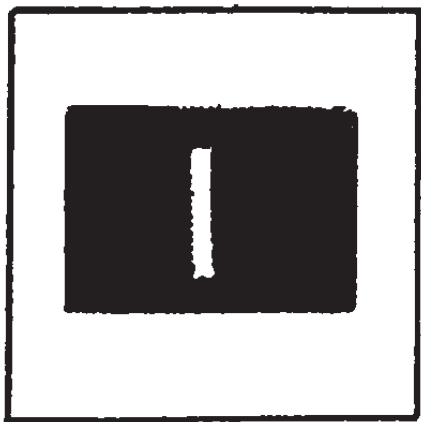


Figure 4a

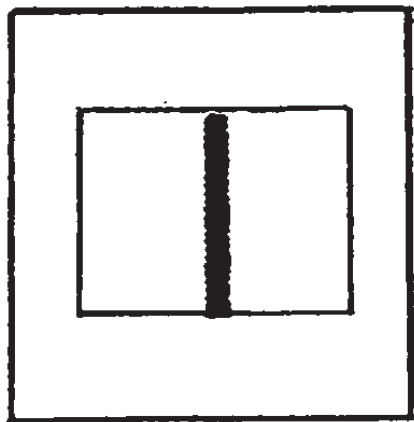


Figure 4b

L'objet dont on fait l'image est un **diaphragme circulaire réglable** (par exemple un diaphragme à iris, ou, ce qui est bien moins coûteux et donne de meilleures images, une série d'ouvertures réalisées à l'aide d'un foret ou d'un emporte-pièce dans une plaque rigide (figure 5).

L'ouverture circulaire (dont le diamètre est de l'ordre du cm) est placée juste à la sortie du prisme et normalement au faisceau. Il est facile de voir pourquoi l'image du diaphragme ainsi placé est de meilleure qualité que celle qu'on obtiendrait, par exemple, de la face d'entrée du prisme (solution suggérée dans nombre d'ouvrages). La seule précaution à prendre est de limiter l'ouverture pour qu'elle n'empiète pas sur les bords colorés du faisceau qui émerge du prisme.

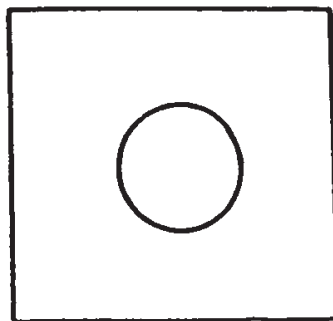


Figure 5

Pour dévier une partie du faisceau et réaliser diverses expériences sur la synthèse des couleurs, on se procurera un **prisme de petit angle** (5 ou 6° par exemple). De tels prismes peuvent être récupérés sur des glaces biseautées anciennes ; peut-être avez-

vous la chance de posséder un biprisme de Fresnel. A défaut, utilisez une règle plate en plastique possédant une partie biseautée sur laquelle les graduations seront effacées à l'aide d'un solvant.

Pour plus de sûreté, l'ensemble des accessoires qu'on vient de décrire seront placés sur un **banc d'optique** (figure d'ensemble 6).

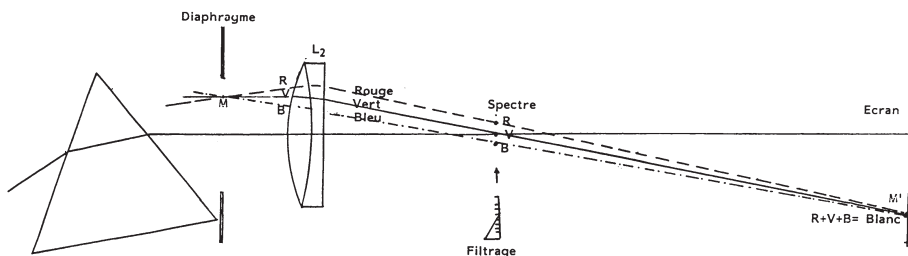


Figure 6

Parmi les autres accessoires, procurez-vous une cuve à faces parallèles, une burette, diverses plaques de verre «cathédrale», des liquides d'indices variés (glycérine) et des composés solides solubles dans l'eau (sucre candi, sels divers, etc.).

Enfin, si vous tenez à garder une trace de vos travaux, un appareil photographique muni d'un film... couleur (pour lumière dite «tungstène») !

EXPÉRIENCES

1. Décomposition

Faire l'image d'une fente verticale sur un écran éloigné à l'aide du projecteur de diapositives. Placer le prisme (arête verticale), au minimum de déviation, tout contre l'objectif de projection et recueillir l'image du spectre sur un autre écran situé environ à la même distance du prisme. En déplaçant le prisme, on s'arrange pour obtenir à la fois l'image de la fente et l'image du spectre qui est nette seulement au minimum de dévia-

tion dans les conditions ci-dessus. (Pour la mise au point du spectre on observera l'image du bord horizontal de la fente rectangulaire utilisée) (figure 7) (Photo I).

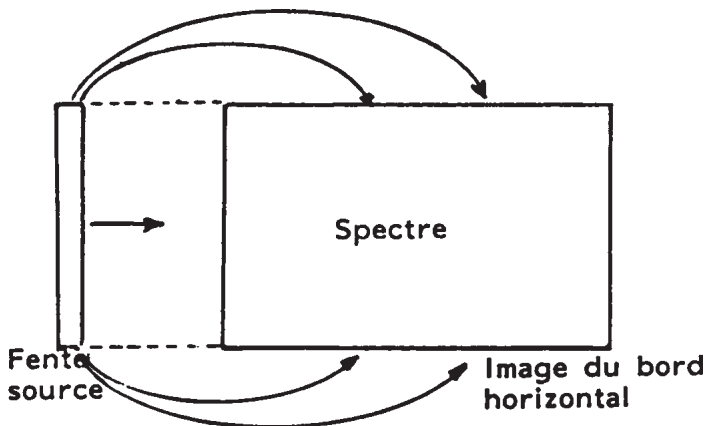


Figure 7

Si l'on veut montrer l'existence des radiations infrarouges et ultraviolettes on aura intérêt à réaliser un spectre plus lumineux, près de l'objectif. Pour éliminer l'ultraviolet, il suffit d'interposer un morceau de verre organique (lexan ou macrolon) ; pour éliminer l'infrarouge on utilise une cuve à eau. N'oubliez pas que les projecteurs de diapositives sont munis d'un filtre infrarouge qu'il faudra retirer si vous voulez mettre en évidence ces radiations !

2. Recomposition

Placer le diaphragme circulaire immédiatement après le prisme et le régler de manière qu'il soit entièrement couvert par un faisceau blanc (on peut être amené dans ce cas à s'écarter du minimum de déviation). Placer ensuite l'objectif L_2 et faire l'image du diaphragme sur l'écran : on constate que cette image est blanche, mais elle a été obtenue par recombinaison de la lumière dispersée par le prisme. Tout près du plan focal image de L_2 on observe le spectre donné par le système L_1 , prisme, L_2 (figure 6).

Constater à l'aide d'un petit écran que pour aller de l'objet (le diaphragme D) à son image sur l'écran E, la lumière passe nécessairement par le spectre. L'ensemble des rayons formant l'image d'un point de la fente converge en R s'ils sont rouges, J s'ils sont jaunes, V s'ils sont verts, B s'ils sont bleus, etc. Il en résulte qu'en plaçant justement en ces points des filtres appropriés on peut, soit isoler une radiation (avec une

fente), soit intercepter complètement une radiation (avec un petit écran opaque). On peut également imaginer des «traitements» d'image plus complexes (placer plusieurs fentes ou plusieurs écrans par exemple).

Voyons quelques cas intéressants de filtrage simples à réaliser.

3. Image quasi-monochromatique

Le filtre est une fente étroite (par exemple de largeur inférieure au $1/5$ de la largeur du spectre) ; elle est placée bien «parallèlement au spectre» (c'est-à-dire parallèlement aux images de la première fente pour chaque longueur d'onde) et on la translate lentement dans le spectre. Lorsqu'elle est située dans la partie rouge l'image circulaire observée sur l'écran est rouge. Au fur et à mesure qu'on déplace la fente on voit apparaître sur l'écran des disques colorés correspondant aux radiations quasi-monochromatiques sélectionnées à l'aide de la fente. On obtient ainsi, successivement, **des images éclairées en lumière quasi-monochromatique** sur l'écran. (Voir les photos II, III, IV).

Les couleurs sont d'autant plus pures que la largeur des fentes (fente source et fente filtre) est plus petite.

Les couleurs ainsi observées séparément sont tout à fait remarquables (rarement observées dans la nature !) et les photographies jointes, qui en altèrent la pureté, n'en donnent qu'une idée imparfaite.

A la limite du violet on met en évidence, grâce à un écran luminescent (feuille de papier à machine par exemple), un éclairage ultraviolet. Si la source de lumière est peu puissante on peut améliorer la sensibilité de la manière suivante : recueillir l'image sur un écran comportant une partie luminescente juxtaposée à un écran ordinaire (figure 8).

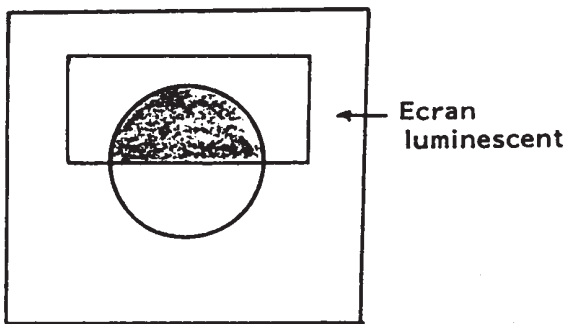


Figure 8

Remarque : la position de la fente par rapport au spectre est critique et c'est pourquoi il est préférable de fixer les accessoires sur un banc d'optique. La figure 9 montre que lorsque le réglage est incorrect une partie de la lumière, provenant des radiations voisines de celle que l'on a sélectionnée, traverse la fente. Par exemple, si on a sélectionné le vert, le haut de l'image est rouge et le bas est bleu si le filtre est en avant du spectre ; on observe le contraire si le filtre est en arrière du spectre.

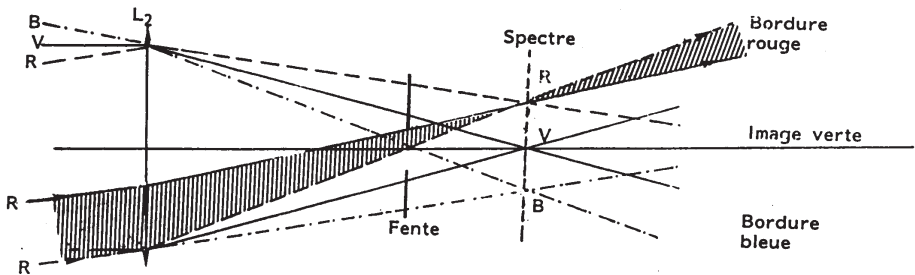


Figure 9

Cette expérience constitue en elle-même un moyen de réglage permettant d'obtenir une plage uniformément colorée.

4. Teintes complémentaires

Si on utilise le filtre complémentaire de la fente, c'est-à-dire un écran rectangulaire (on collera, par exemple, une bande de papier noir sur un support transparent), on intercepte une couleur du spectre et on observe sur l'écran la couleur complémentaire, c'est-à-dire jaune pour le bleu, pourpre (ou magenta) pour le vert, indigo (ou cyan) pour le rouge.

La couleur pourpre présente une particularité. L'œil étant très sensible à l'équilibre entre le rouge et le bleu, un déplacement de l'écran dans le spectre au voisinage du vert provoque des changements rapides de la couleur complémentaire qui vire rapidement du rouge au bleu. La teinte est dite «sensible».

5. Synthèses additive et soustractive des couleurs

Les expériences suivantes sont rendues spectaculaires grâce à l'utilisation d'un prisme de petit angle placé dans le plan du spectre, son arête étant «parallèle au spectre»¹. Par exemple, si le prisme dévie le faisceau bleu sans dévier le reste du faisceau, on observe sur l'écran deux images : une bleue et une jaune (figure 10). Si la dimension de

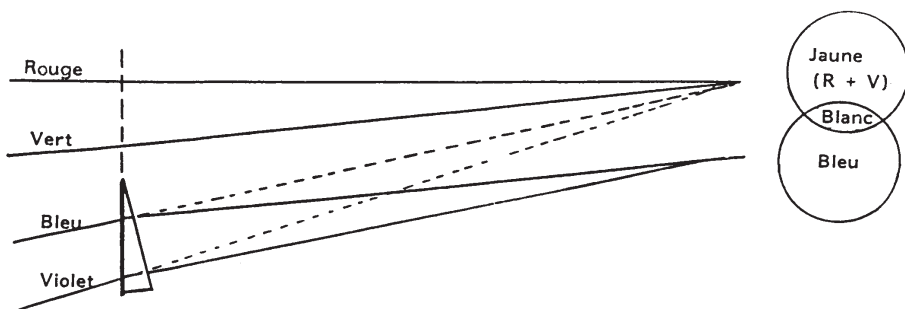


Figure 10

l'ouverture circulaire est convenable, on observe sur l'écran deux images qui ont une partie commune blanche (photo V) : le jaune et le bleu sont donc deux **couleurs complémentaires**. En déplaçant le prisme on obtient les couleurs complémentaires rouge et cyan, vert et pourpre (dans ce cas, il faut disposer d'un prisme étroit qui n'intercepte que le vert).

Ces expériences montrent que la même couleur peut être obtenue expérimentalement :

- par addition (Jaune = Rouge + Vert)
- par soustraction (Jaune = Blanc – Bleu).

Le montage permet de poursuivre les démonstrations en mettant par exemple, dans le spectre, un écran qui intercepte une couleur. L'écran étant placé dans le vert et le

¹ Pour ce prisme, comme son angle est petit, on peut considérer que la déviation qu'il procure est quasiment indépendante de la longueur d'onde, donc la dispersion de son indice n'introduit (contrairement au premier prisme) qu'un chromatisme négligeable, comparable à celui d'une lentille L_2 ordinaire.

prisme déviant le bleu, on observe sur l'écran des images rouge et bleue ayant une partie commune pourpre (photo VII) ; les photographies VI et VIII montrent d'autres possibilités.

Remarquer également que lorsqu'on déplace le prisme dans le spectre dans les expériences précédentes, on modifie les couleurs des images mais pas la couleur résultante, de sorte qu'une couleur donnée peut être obtenue, par addition, de plusieurs façons.

6. Synthèses de la lumière blanche

La lumière blanche peut donc être obtenue :

- par synthèse de l'ensemble des radiations du spectre ;
- par addition de couleurs complémentaires.

On montrera également qu'il est possible d'obtenir le même résultat en sélectionnant trois couleurs dans le spectre : rouge, vert et bleu, convenablement réparties (expérience un peu délicate car il faut jouer sur la largeur des fentes ainsi que sur leur position dans le spectre).

Enfin, une expérience simulant le blanc d'ordre supérieur est réalisée en utilisant un filtre comportant plusieurs fentes (5 ou 6) ou, ce qui revient au même, 5 ou 6 écrans convenablement répartis dans l'ensemble du spectre (figure 11). Ce filtre simule un ensemble de cannelures : la lumière résultante est pratiquement blanche avec des teintes verdâtres (présence de cannelure brillante verte, l'œil étant plus sensible à cette couleur qu'aux autres) ou roses (absence de vert).

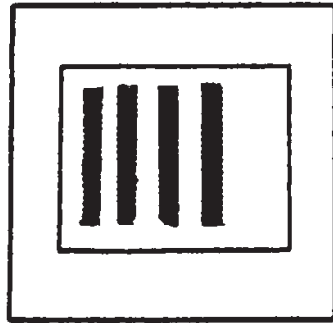


Figure 11

7. Application à l'étude de milieux inhomogènes

La recombinaison de la lumière blanche permet de réaliser d'autres expériences spectaculaires comme l'image d'un **objet de phase** où il est possible de transformer, par exemple, une variation d'indice de réfraction en une variation de couleur.

Le montage général précédent est conservé : il suffit de placer l'objet transparent à examiner dans le plan du diaphragme (circulaire ou non) et d'observer (ou de photographier) son image.

La figure 12 montre un filtrage sur fond vert. On a placé une fente dans le plan du

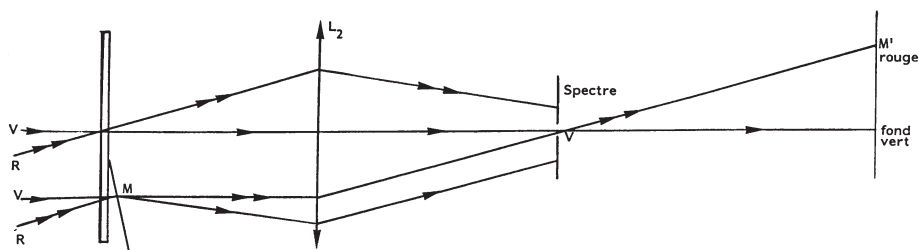


Figure 12

spectre, de sorte que l'image, en l'absence de déviation accidentelle de la lumière, est uniformément verte ; cette image reste verte si on introduit une lame à faces parallèles dans le plan de l'objet. Supposons maintenant que l'on dépose sur cette lame une goutte d'eau : celle-ci va dévier la lumière dans diverses directions et des rayons de diverses couleurs sont susceptibles d'emprunter un chemin qui passe par la fente et vont faire apparaître les colorations correspondantes dans l'image dont le fond est vert.

Soit un point M de la surface de la goutte : compte tenu de son indice et de sa forme, il y a une relation entre la direction de la lumière sortant par ce point et la longueur d'onde ; compte tenu des positions de M, de L_2 et de la fente, seuls quelques rayons sortant en M passeront par la fente ; donc seules quelques longueurs d'onde seront présentes dans l'image de M, et elles dépendent de la forme de la goutte, de son indice et de la position de M. Cette technique apporte des informations qui ne sont pas perceptibles dans le cas d'une observation ordinaire.

Le filtrage peut être effectué dans n'importe quelle région du spectre et même en infrarouge : l'image apparaît alors colorée sur fond noir. On peut aussi utiliser un écran

à la place d'une fente : la couleur du fond est alors complémentaire de celle qui est interceptée.

Autre raffinement de la méthode : on peut faire une observation sur deux fonds de couleurs (complémentaires) simultanément, grâce à l'utilisation du prisme de petit angle vu précédemment, ce qui peut se révéler utile pour un phénomène variant avec le temps (écoulement par exemple).

On notera que ces deux dernières versions de la méthode décrite sont comparables à un foucaultage, ce qui est une façon classique d'observer des objets de phase. Là encore, la dispersion intrinsèque à l'objet de phase ne contribue que partiellement au chromatisme du résultat.

Possibilités et limites de la méthode

Grâce à cette méthode, on examinera des objets plans moulés, l'écoulement d'un liquide dans un milieu d'indice différent (voir photo IX), etc. et, d'une manière générale, tout phénomène qui s'accompagne d'une déviation de la lumière (réfraction, diffraction, ...). (Photo X).

En fait, si la déviation est trop grande, les rayons déviés ne sont plus collectés par l'objectif L_2 (figure 12). D'autre part, pour augmenter la sensibilité de la méthode, on a intérêt à réduire la largeur de la fente, mais cette opération s'accompagne d'une altération de l'image (à cause de la diffraction) qui, de plus, devient de moins en moins lumineuse. En définitive, cette méthode est bien adaptée à des déviations moyennes de quelques degrés. En particulier on ne peut mettre ainsi en évidence les variations d'indice dans un gaz.

Je signale, pour terminer, que les lecteurs captivés par la création d'images disposent, avec la méthode décrite, d'une technique prometteuse qui, à ma connaissance, n'a pas été explorée. A titre d'exemple : les photographies XI et XII obtenues à partir de simples morceaux de verre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. MAITTE : «*la lumière*» - Éditions du Seuil (Paris, 1981).
- [2] R. JOUANISSON : «*Expériences sur la décomposition et la recomposition de la lumière blanche*» - ADASTA (Clermont-Ferrand, 1991) – Fiche n° 26.
- [3] H. MEINERS : «*Physics Demonstration Experiments*» - (Volume II) ; The Ronald Press Company (New York, 1970).



Photo I



Photo II



Photo III



Photo IV

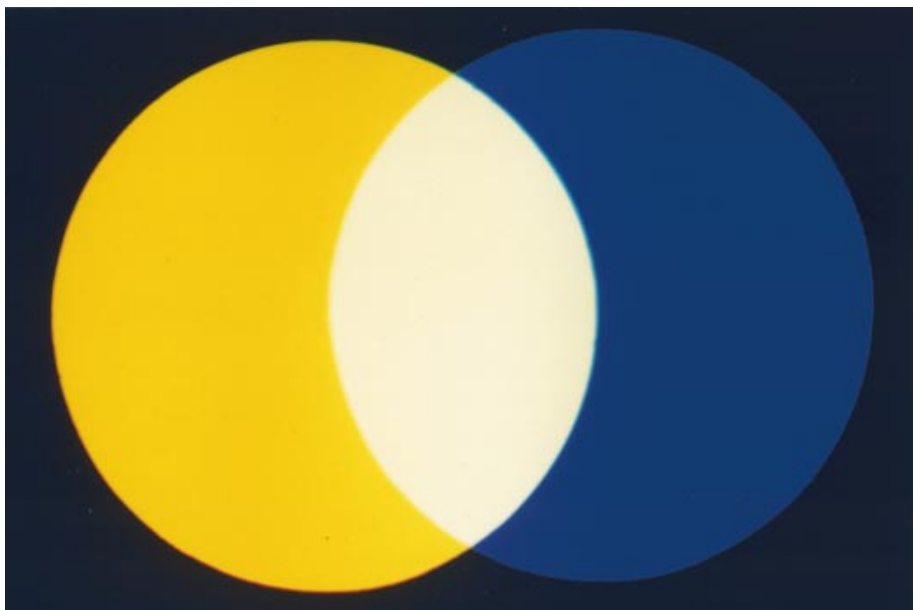


Photo V



Photo VI

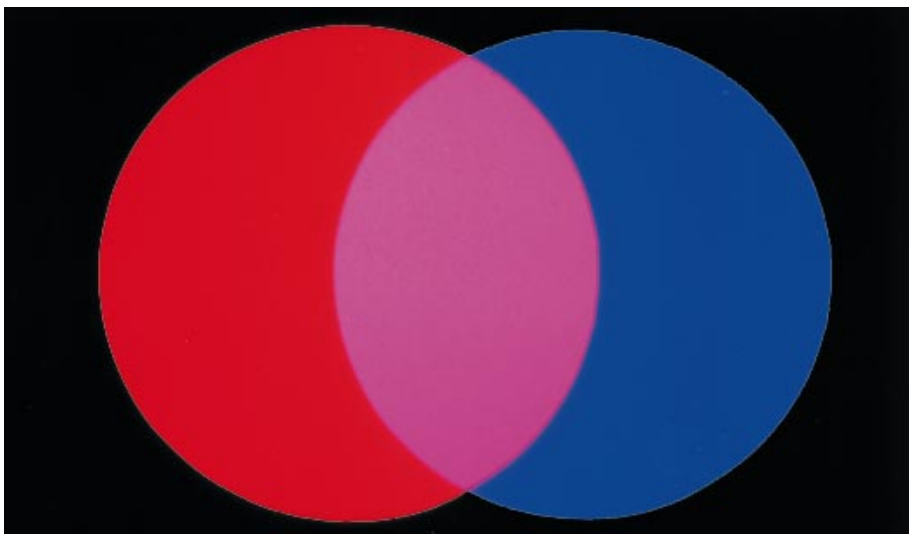


Photo VII

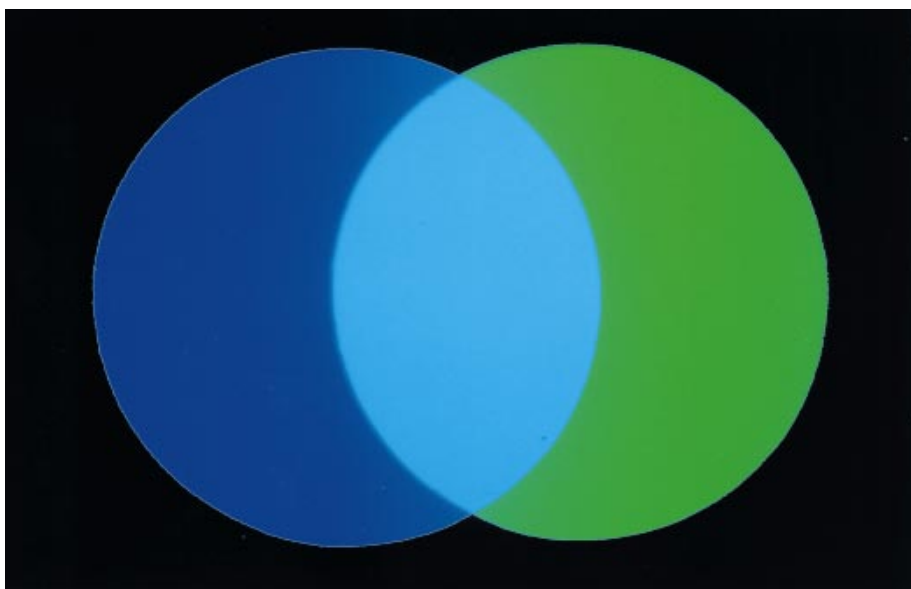


Photo VIII



Photo IX

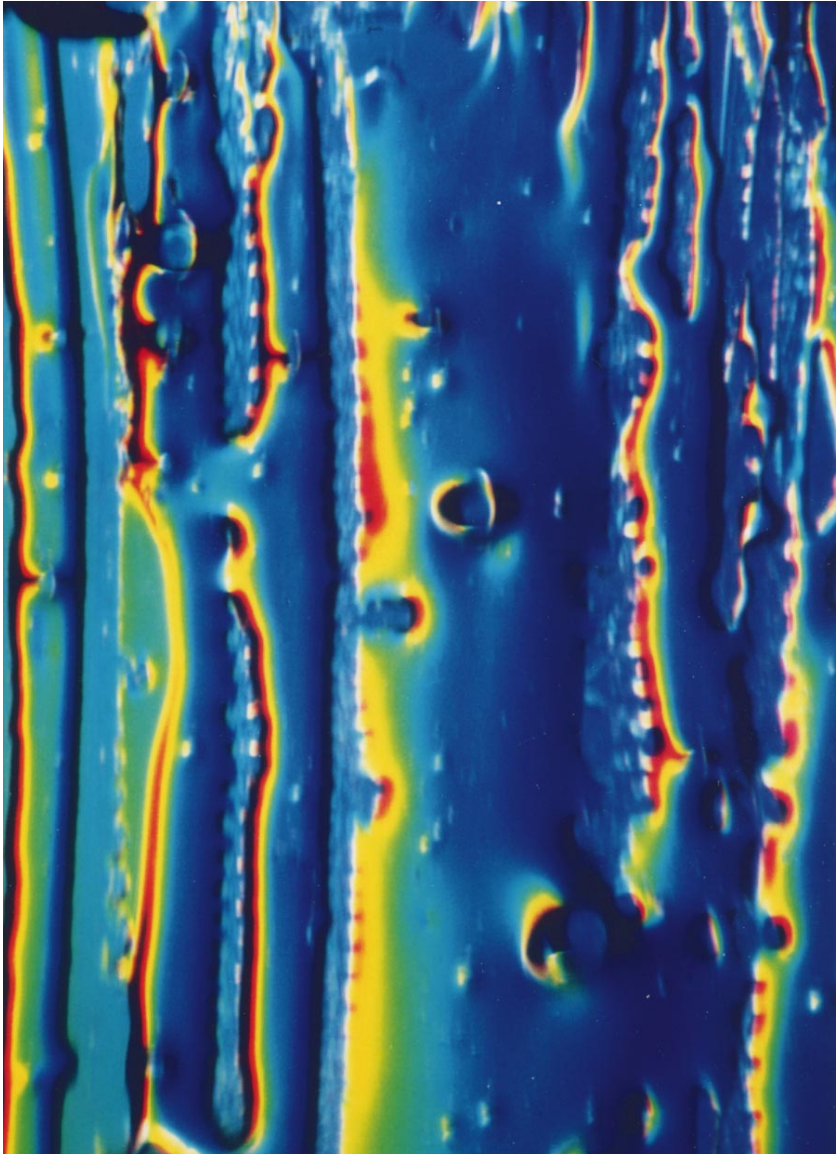


Photo X

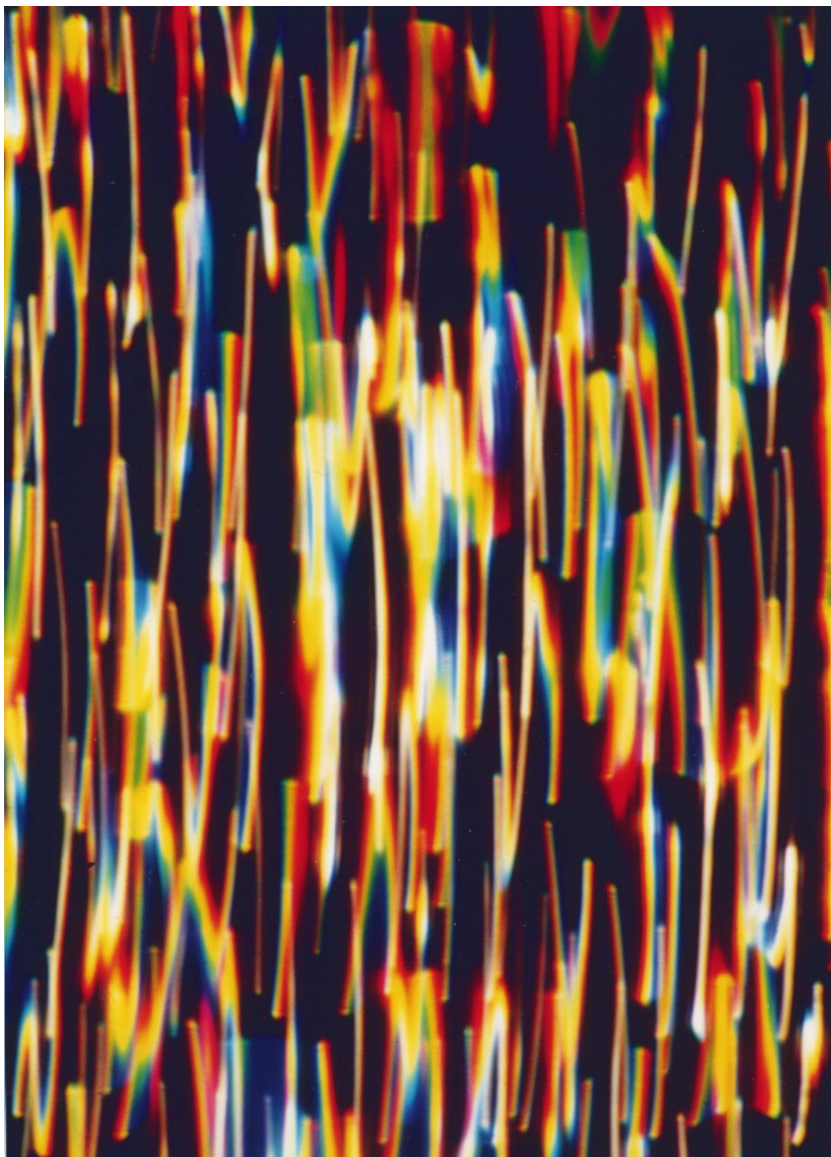


Photo XI

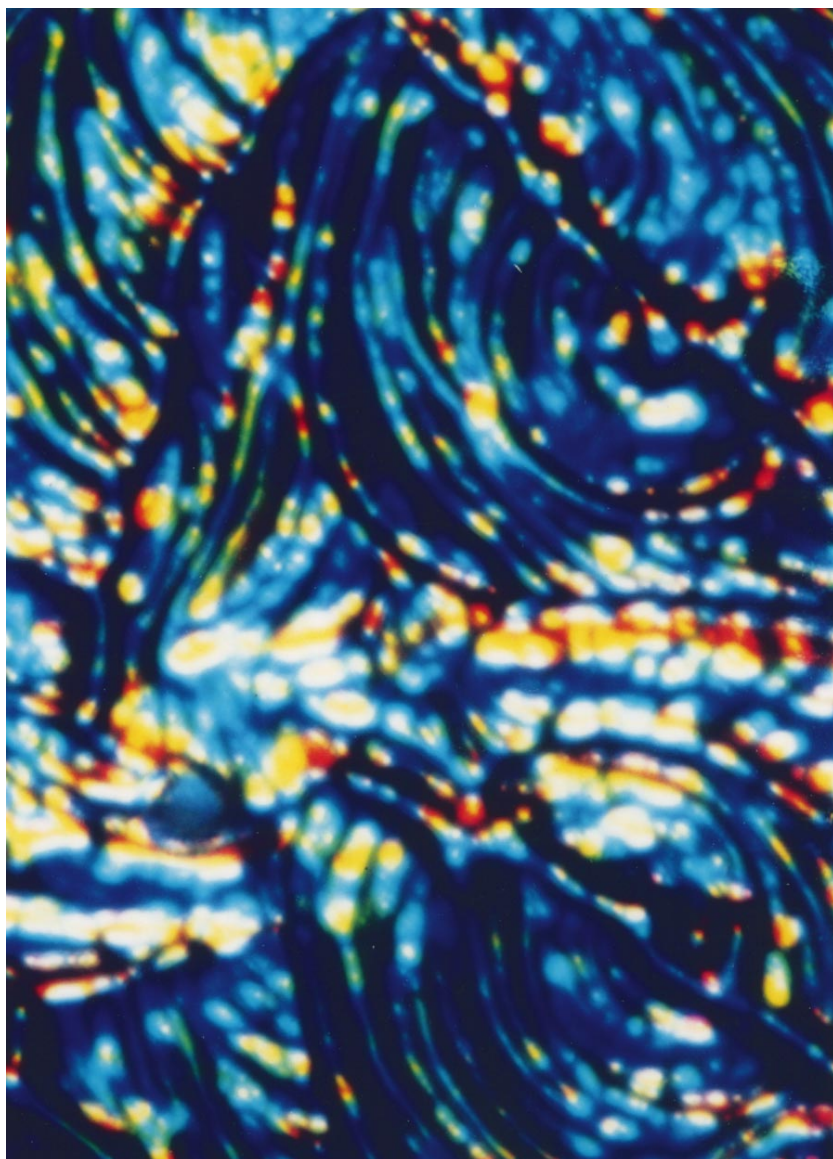


Photo XII