

SPECTRUM

V1.0

PHYSIQUE, SPECTRES ET COULEURS

PRESENTATION DU LOGICIEL

© 1994

par

Luc DETTWILLER

Docteur de 3^{ème} cycle en Optique
Professeur Agrégé de Chaires Supérieures
Classe de Mathématiques Spéciales P'
Lycée Blaise Pascal
36 avenue Carnot
63037 CLERMONT-FERRAND CEDEX
Tel. : 73 98 26 50

et

David ROMEUF

ADASTA
19 rue de Bien Assis
63100 CLERMONT-FERRAND
Tel. : 73 92 12 24
Fax : 73 92 11 04
David point Romeuf à laposte point net

AVERTISSEMENT

Ce logiciel est la propriété intellectuelle des auteurs. L'utilisation multiposte dans les établissements scolaires est tolérée ; la reproduction illicite est strictement interdite.

Table des matières

<i>SPECTRUM V1.0 : Introduction technique</i>	5
<i>Introduction</i>	10
<i>Chapitre I : NOTIONS DE COLORIMETRIE</i>	11
1. Composantes trichromatiques et fonctions colorimétriques	12
2. Coordonnées trichromatiques et diagramme des couleurs	13
3. Position des couleurs sur le diagramme	13
4. Représentation du mélange de deux couleurs sur le diagramme	14
5. Les couleurs pourpres	15
6. Caractérisation d'une couleur non pourpre par sa longueur d'onde dominante et sa pureté colorimétrique	15
7. Caractérisation d'une couleur pourpre par sa longueur d'onde complémentaire et sa pureté colorimétrique	16
<i>Chapitre II : FONCTIONS DU LOGICIEL SPECTRUM</i>	17
A. Le spectre choisi	18
B. Le diagramme colorimétrique	18
C. Le segment de droite joignant le point achromatique <i>W</i> au point <i>M</i> , et la longueur d'onde dominante ou complémentaire	18
D. La pureté colorimétrique de la couleur obtenue	18
E. Une pastille ronde proposant une synthèse de la couleur donnée par le spectre considéré	18
F. L'indication de la luminance lumineuse relative	19
G. La valeur du paramètre variable	19
H. L'affichage de l'ensemble des couleurs calculées	19
<i>Chapitre III : SITUATIONS PHYSIQUES ETUDIEES PAR LE LOGICIEL SPECTRUM</i>	20
1. Couleurs d'un spectre rectangulaire	21
1.1. Paramètres de la simulation	21

1.2. Quelques phénomènes notables	21
2. Couleurs dues à la diffusion Rayleigh, en transmission et en diffusion	23
2.1. Paramètres de la simulation	24
2.2. Quelques phénomènes notables	24
3. Couleurs du corps noir	24
3.1. Paramètres de la simulation	25
3.2. Quelques phénomènes notables	25
4. Couleurs de la polarisation rotatoire	25
4.1. Paramètres de la simulation	25
4.2. Quelques phénomènes notables	26
5. Couleurs de la figure de diffraction de Fraunhofer d'une fente	27
5.1. Paramètres de la simulation	27
5.2. Quelques phénomènes notables	27
6. Couleurs interférentielles (avec une lame dispersive éventuellement)	28
6.1. Cas d'un interféromètre non dispersif : teintes de Newton	28
6.1.1. Paramètres de la simulation	28
6.1.2. Quelques phénomènes notables	29
6.2. Cas d'un interféromètre dispersif : les couleurs autour de la frange achromatique	30
6.2.1. Paramètres de la simulation	30
6.2.2. Quelques phénomènes notables	30
7. Couleurs des métaux en réflexion	32
7.1. Paramètres de la simulation	32
7.2. Quelques phénomènes notables	32
8. Couleurs de la biréfringence	32
8.1. Paramètres de la simulation	32
8.2. Quelques phénomènes notables	33
9. Couleurs dues à la diffusion Christiansen, en transmission et en diffusion	34
9.1. Paramètres de la simulation	36
9.2. Quelques phénomènes notables	36
Bibliographie théorique	38
Textes d'aide	39
Aides pour la page de menu	39
Aides pour chaque situation physique	39

SPECTRUM V1.0

INTRODUCTION TECHNIQUE

REMARQUES PRELIMINAIRES

- Matériels nécessaires :
 - Un compatible PC (640 Ko) équipé d'une carte graphique VGA (idéalement VESA SVGA). L'utilisation d'une carte graphique SVGA compatible VESA est vivement recommandée pour la restitution du maximum de couleurs. Le logiciel peut utiliser en effet les modes 640x480, 800x600 et 1024x768 en 256 couleurs.
 - Une souris si possible.
 - Un disque dur si possible.
 - **Un coprocesseur mathématique est vivement recommandé pour la simulation. Ce programme mène un très grand nombre de calcul.**
- Etant donné que les protections contre la copie sont violées dans la majorité des cas, nous n'avons pas protégé ce logiciel. Une copie de sauvegarde personnelle est conseillée. Une utilisation multiposte est tolérée. Une copie illicite est strictement interdite.
- Ce programme a fait l'objet d'un test sur plusieurs compatibles PC. Aucune anomalie de fonctionnement n'a pu être décelée. Il reste toutefois possible que des anomalies de fonctionnements liées au logiciel surviennent (« bugs »). Nous vous serions reconnaissants de nous en informer afin que l'erreur de programmation puisse être corrigée.
- Afin de rendre le logiciel facilement utilisable par tous les élèves, toutes les fonctions sont sélectionnables à l'écran via la souris (ou les touches du clavier). De même chaque zone active de l'écran se manifeste au survol par la souris (par exemple, un bouton graphique de sélection semble s'enfoncer dans l'écran quand la souris le survole). C'est un moyen de voir que cette zone de l'écran conduit à une fonction du logiciel si le manipulateur clique sur le bouton gauche de la souris).
- Etant donné que le logiciel opère sur les couleurs, il est important de régler la luminosité et le contraste du moniteur afin d'obtenir la meilleure restitution visuelle possible.
- Ce programme a été entièrement écrit en BORLAND C 2.0 ; certificat n° 09I10AAABFFC ; numéro de série : FI0952A1037815.

INSTALLATION SUR UN DISQUE DUR

Vous pouvez utiliser le logiciel sans l'installer sur votre disque dur. Toutefois nous vous conseillons vivement de l'installer quand même si vous en possédez un. L'utilisation d'une disquette n'est pas très compatible avec l'enseignement à cause de leur grande fragilité.

- Après le « boot » de l'ordinateur, introduire la disquette fournie dans le lecteur.
- Aller sur le lecteur A (ou B si la disquette est dans le lecteur B). La commande MS-DOS sera donc A: ou B: puis la touche ENTREE.
- Taper : INSTALL C: (ou D: pour installation sur la partition D)

Le fichier INSTALL.BAT de la disquette s'occupera de créer un répertoire de nom : SPECTRUM, dans la partition du disque dur spécifiée par la ligne de commande. Puis il copiera les fichiers de la disquette sur le disque dur.

LANCEMENT DU LOGICIEL

A partir de la disquette

Si votre ordinateur n'a pas de disque dur alors il faudra « booter », c'est à dire lancer le système d'exploitation, avec une disquette qui contient les fichiers dits « SYSTEM ». La disquette fournie ne contient pas ces fichiers. La première disquette de MS-DOS les contient bien évidemment. Il suffit donc de mettre l'appareil sous tension en glissant cette disquette dans le lecteur A. Après quelques instants l'ordinateur donne la main sur la ligne de commande MS-DOS.

Pour une utilisation cohérente du logiciel il convient que la souris soit installée; c'est à dire que le programme qui gère les déplacements et les actions sur la souris réside en mémoire. Pour cela il faut introduire une disquette contenant le driver de la souris dans le lecteur puis taper la commande généralement appelée MOUSE.

Pour lancer le logiciel il suffit de placer la disquette de SPECTRUM dans le lecteur puis de taper SPECTRUM sur la ligne de commande. Par exemple :

```
A:\>SPECTRUM                (puis la touche ENTREE)
```

Le logiciel se charge en mémoire et s'exécute.

A partir du disque dur

A la mise sous tension de l'ordinateur, le système exécute diverses procédures d'initialisation dont le fichier de configuration CONFIG.SYS et le fichier d'exécution de séquences au démarrage AUTOEXEC.BAT. Après exécution des deux fichiers le système aboutit à la ligne de commande du MS-DOS.

Pour une utilisation cohérente du logiciel il convient que la souris soit installée; c'est à dire que le programme qui gère les déplacements et les actions sur la souris réside en mémoire. Pour cela il suffit de taper la commande généralement appelée MOUSE puis la touche ENTREE. Vous pouvez rendre l'installation de la souris automatique au démarrage en incluant cette commande dans le fichier AUTOEXEC.BAT. Pour cela reportez vous au manuel d'utilisation de MS-DOS (commande EDIT ou EDLIN selon la version de votre système d'exploitation).

Pour pouvoir lancer le logiciel il faut aller dans le répertoire SPECTRUM créé lors de l'installation sur le disque dur en tapant la commande :

```
CD C:\SPECTRUM                (puis la touche ENTREE)
```

le lancement s'effectue en tapant la commande : SPECTRUM (puis la touche ENTREE).

```
ou la séquence après l'installation :
A:\>C:
C:\>CD SPECTRUM
C:\SPECTRUM\>SPECTRUM
```

Pour éviter de frapper cette séquence de commande MS-DOS à chaque utilisation on peut créer un fichier d'extension .BAT dans la racine de la partition où se trouve le programme. Ce fichier BAT contiendra les séquences :

```
CD C:\SPECTRUM
SPECTRUM.EXE
```

L'INTERFACE UTILISATEUR DE SPECTRUM

On entend par interface utilisateur, tous les liens logiciels entre le manipulateur et l'ordinateur. Rentrent donc dans cette catégorie : les saisies de données, les choix de fonctions, les options d'une fonctions. La qualité de cette interface conditionne la facilité d'utilisation d'un logiciel. Pour SPECTRUM nous avons développé une interface utilisateur graphique. Cette conception est un moyen de rendre convivial un programme. Ainsi vous verrez apparaître un certains nombre de choix de fonctions (boutons graphiques en relief), de fenêtres d'aide, de zones de saisies de paramètres, etc... identiques quant à la manière de s'en servir.

Les boutons graphiques en relief

La présence d'un bouton graphique en relief sur une page écran donne accès à une fonction. Pour lancer cette fonction, il suffit de déplacer la souris sur ce bouton graphique. Au moment du survol il doit sembler s'enfoncer dans l'écran, signe qu'il s'agit bien d'une zone active pour le logiciel. On peut valider ce choix par la pression du bouton gauche de la souris. Si vous ne disposez pas de souris, la sélection au clavier d'un bouton s'obtient par la pression simultanée des touches ALT (gauche du clavier) et de la lettre en surbrillance rouge dans le nom du bouton.

Les cases cochables

Ces cases cochables sont représentées par un carré que l'on peut cocher ou non. La forme validée est un carré avec une croix à l'intérieur, la forme non validée est un carré sans croix. Elles sont présentes sur un écran pour paramétrer des options dans exécution de la simulation (par exemple une exécution pas à pas du calcul). Le survol de ces cases cochables par la souris entraînera l'encadrement graphique de leur nom ou désignation. A ce stade il suffit de cliquer gauche sur la souris pour sélectionner ou non ce choix. La non-sélection s'effectue de la même manière, les cases cochables sont des bascules.

Les zones de saisies

SPECTRUM dispose de zones de saisies formatées. C'est à dire, par exemple, qu'il est impossible d'entrer un nombre négatif quand cette zone doit contenir un nombre positif. Cette méthode évite les premières erreurs de saisie. Si plusieurs zones de saisies se trouvent sur une page écran, alors il sera possible de passer de l'une à l'autre par la pression des flèches Haut et Bas du clavier. De même on pourra sélectionner la zone de saisie courante par son survol par la souris accompagné d'un click gauche. La zone de saisie courante peu être reconnue par le clignotement du curseur ou par le fait, au contraire des autres zones, qu'elle semble sortir de l'écran.

Il est possible de saisir des caractères en mode insertion ou en mode « par dessus ». La sélection du mode s'effectue par la pression de la touche « Inser » du clavier. En mode insertion de caractères, le curseur est un trait _ qui clignote. En mode remplacement de caractères le curseur est un carré plein ¶ qui clignote.

La suppression de caractères s'effectue de deux manières. La pression de la touche ← (« delete » sur le haut du clavier) supprime le caractère immédiatement avant le curseur. La pression de la touche « Suppr » supprime immédiatement le caractère sous le curseur de saisie.

Les zones de saisies peuvent contenir plus de caractères que la place qu'elles occupent (en caractères) sur l'écran. Il est possible de se déplacer dans le champ de saisie par la pression des flèches droite ou gauche du clavier (← ou →).

La fenêtre d'aide mémorisée

SPECTRUM dispose de textes d'aides. Ces aides peuvent être pratiques pour guider le manipulateur parmi les différents paramètres. Elles peuvent aussi servir d'aide mémoire de physique. De plus, cette fenêtre mémorise les différentes aides demandées. Il est donc possible de relire l'aide d'une fonction précédente. Pour cela, des ascenseurs graphiques sont présents à droite et en bas de la fenêtre. L'ascenseur à droite agit sur les lignes (monter ou descendre les lignes de textes), l'ascenseur du bas agit sur les colonnes (décalage du texte à droite ou à gauche). Par exemple, pour descendre le texte d'une ligne dans la fenêtre, il faut déplacer la souris sur

le bouton graphique en haut et à droite de la fenêtre (flèche vers le haut). Si vous voulez avancer ou reculer le texte d'une page il faut cliquer gauche dans le corps des ascenseurs. Vous pouvez aussi prendre le curseur de l'ascenseur grâce à la souris et vous déplacer dans le texte. Pour cela il faut placer la souris au dessus du curseur de l'ascenseur ; appuyer sur le bouton gauche de la souris et maintenir enfoncé tout en déplaçant la souris dans la cage de l'ascenseur. Le relâchement du bouton de la souris sera suivi du rafraîchissement du texte dans la fenêtre.

Si vous ne disposez pas de souris, vous pouvez rendre la fenêtre sensible au déplacement en l'activant par la pression simultanée des touches CTRL + SHIFT (gauche) + la touche de la lettre figurant dans le coin inférieur gauche de la fenêtre (qui sera toujours A dans SPECTRUM). Cette dernière s'affichera en surbrillance rouge, signe que le logiciel a compris que la pression, simultanée, de SHIFT (gauche) et d'une flèche de déplacement du clavier, agira sur le texte à l'intérieur de la fenêtre. Pour se déplacer d'une page de texte, on pourra utiliser les touches SHIFT (gauche) + Page Up ou Page Down.

Un texte d'aide peut être obtenu par la pression de la touche F1. Ce texte d'aide portera sur la zone de saisie courante.

FONCTIONS Logicielles COMMUNES A TOUTES LES SITUATIONS PHYSIQUES

Boutons en relief

Simuler : Le click gauche avec la souris conduit le logiciel à commencer la simulation de la situation physique. Cette simulation s'effectue selon les options des cases cochables présentes sur la page écran. Durant la simulation un certain nombre de fonctions sont possibles : la touche d'espacement (SPACE) permet de faire une pause, les touches + ou - permettent de ralentir le logiciel (par pas de 20 ms) à chaque itération, la touche ESC permet l'arrêt de la simulation.

Couleurs calculées : Il s'agit ici de faire un tableau récapitulatif des couleurs obtenues lors de la dernière simulation. Cette fonction conduit à une boîte de sélection vous demandant de choisir le mode graphique sous lequel vous voulez afficher ces couleurs. Selon votre carte graphique le logiciel vous demandera de faire un choix parmi les résolutions suivantes : 320x200, 640x480, 800x600, 1024x768 en 256 couleurs. Afin d'afficher le mieux possible les couleurs obtenues, le logiciel procède à un tramage de 63 niveaux de rouge, 63 niveaux de vert et 63 niveaux de bleu (il peut synthétiser environ 250 000 couleurs simultanément sur l'écran). Si un trop grand nombre de couleurs sont en mémoire pour la place disponible sur l'écran, alors des boutons graphiques seront présents sur le bas de l'écran afin de passer d'une page à l'autre. Etant donné qu'il s'agit d'un tramage, plus la résolution graphique sera faible et plus on devra s'éloigner de l'écran pour observer.

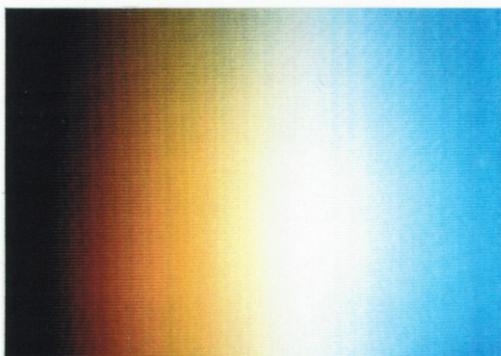
Quitter : Quitter la situation physique pour aller au menu de sélection ; ou quitter le logiciel...

Case cochable

Pas à Pas : Cette option permet une exécution pas à pas de la simulation

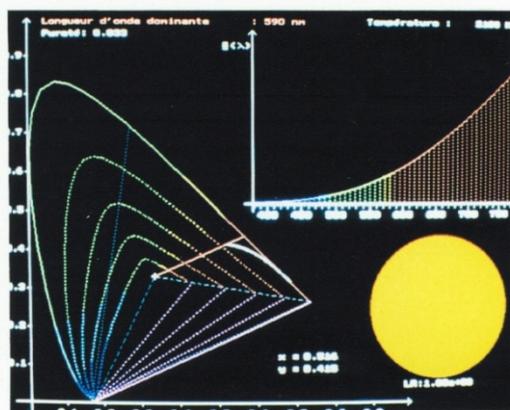
Point unique : Cette option précise que l'on ne souhaite qu'un seul point de calcul lors de la simulation. Dans le cas où cette fonction est validée, le calcul s'effectuera avec la valeur de la zone de saisie contenant le paramètre variable de la simulation.

Luminosité absolue : Cette option précise que la luminosité de la pastille (résultat de la simulation) évolue proportionnellement à la luminosité de la couleur simulée. L'écran ne pouvant être linéaire que dans une gamme réduite de luminance, il procédera donc à des changements d'échelle de luminosité. Si cette option n'est pas cochée, le logiciel reconstitue la luminosité grâce à une échelle logarithmique dont les paramètres ont été déterminés par nos soins.



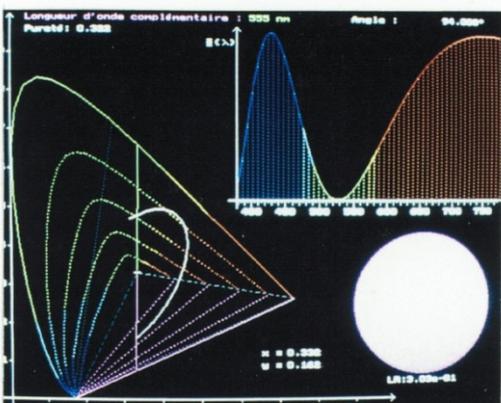
Couleurs calculées pour le corps noir (la température croît de gauche à droite)

1



2

Etude du corps noir à 3 100 K



3

Etude du voisinage de la teinte sensible d'un biquartz de Soleil



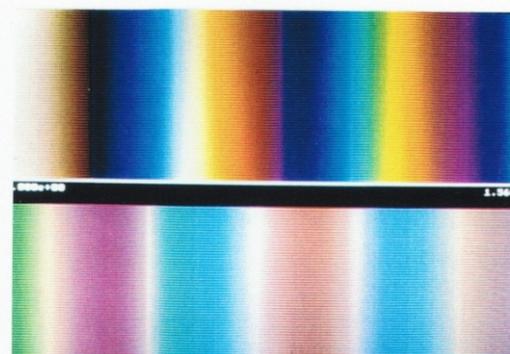
4

Couleurs calculées pour un biquartz de Soleil (remarquer la finesse de la bande mauve)



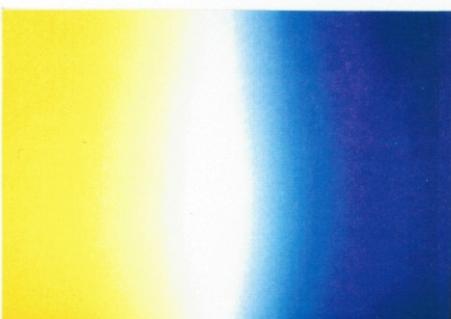
5

Couleurs calculées pour la diffraction de Fraunhofer par une fente



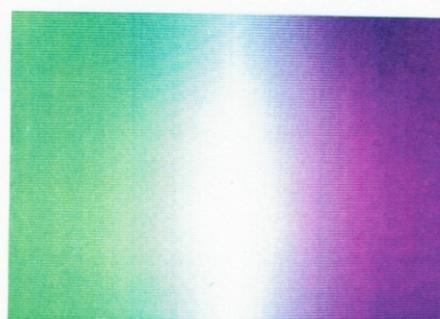
6

Couleurs de Newton calculées



7

Couleurs complémentaires de la biréfringence



8

Couleurs complémentaires de la biréfringence

Introduction

Le logiciel SPECTRUM est consacré à l'étude des principales couleurs rencontrées dans les phénomènes physiques, et plus particulièrement en optique, à partir de leurs spectres. Il contient, prédéfinies, neuf fonctions $\Phi(\lambda)$ donnant la densité spectrale de flux énergétique en fonction de la longueur d'onde λ , pour les situations suivantes :

1. couleurs d'un spectre rectangulaire ;
2. couleurs dues à la diffusion Rayleigh, en transmission et en diffusion.
3. couleurs du corps noir ;
4. couleurs de la polarisation rotatoire ;
5. couleurs de la figure de diffraction de Fraunhofer d'une fente ;
6. couleurs interférentielles (avec une lame dispersive éventuellement) ;
7. couleurs des métaux en réflexion ;
8. couleurs de la biréfringence ;
9. couleurs de la diffusion Christiansen.

La sélection de ces différentes situations, et le choix des paramètres nécessaires pour l'étude de chacune d'elles, se font dans des boîtes de dialogue ; par défaut, des valeurs intéressantes de ces paramètres se trouvent prédéfinies, mais des messages d'erreur ou des avertissements s'affichent au cas où des valeurs incorrectes seraient choisies. Une aide, précisant la signification de certains paramètres ou apportant quelques explications complémentaires, est disponible en appuyant sur la touche F1 ; pour arrêter les calculs, il suffit de presser la touche Echap.

Dans cette présentation, nous rappellerons d'abord les quelques notions de colorimétrie utiles pour l'exploitation de ce logiciel (qui utilise le système de la CIE 1931) ; ensuite, nous donnerons la liste des éléments fournis par ce logiciel pour chaque situation ; enfin, nous commenterons ces situations une à une. Une notice technique indique aussi les détails du fonctionnement du logiciel avec le clavier ou avec la souris.

Les fonctions étudiées peuvent servir dans l'enseignement de la physique aux différents niveaux des lycées et collèges indiqués ci-dessous, mais aussi de l'enseignement supérieur :

1. pour compléter les expériences classiques de décomposition et recombinaison de la lumière blanche (en classe de quatrième par exemple) ;
2. pour approfondir l'étude de la diffusion (en classe de seconde), en particulier dans l'expérience de diffusion par un précipité de soufre obtenu en ajoutant de l'acide chlorhydrique à une solution de thiosulfate, et pour analyser certains phénomènes optiques dans l'atmosphère (en option de physique en première S) ;
3. pour aider à expliquer les propriétés du corps noir, et ses applications à l'étude des couleurs des lumières émises par les étoiles et par les lampes à incandescence ordinaire ou à halogène en fonction de la température du filament (pour l'option de physique de la classe de première S), ainsi qu'à la détermination de la température de la surface du soleil ou d'une tache solaire (pour l'option de physique de la classe de première S) ;
4. pour illustrer un cours de l'enseignement supérieur sur l'activité optique ;
- 5 et 6. pour compléter l'étude de la diffraction et des interférences, en insistant sur leur caractère chromatique et sur les couleurs qui en résultent (en classe de terminale) ;
7. pour donner un exemple de prévision de la couleur d'un corps éclairé, à partir de ses caractéristiques physiques (pour l'option de physique de la classe de première S) ;
8. pour illustrer un cours de l'enseignement supérieur sur la biréfringence ;
9. pour approfondir l'étude de la diffusion Christiansen, que l'on peut montrer en classe de seconde pour stimuler l'intérêt des élèves, en ce qui concerne le phénomène de diffusion, par une expérience spectaculaire.

Des références bibliographiques concernant les expériences étudiées sont données dans le corps du texte ; des références bibliographiques générales concernant les notions théoriques sont regroupées à la fin de ce fascicule.

Chapitre I

NOTIONS DE COLORIMÉTRIE

En toute généralité, une sensation lumineuse est une couleur, qui dépend de son « intensité » au sens large (plus précisément sa luminance lumineuse). Cela vient des différences d'excitabilité entre les diverses formes de cellules rétiniennes : les cônes et les bâtonnets. En abaissant la quantité de lumière reçue par la rétine, donc en s'approchant ainsi du seuil d'excitabilité des cônes, et en donnant donc relativement plus d'importance à la réponse des bâtonnets car leur seuil est plus bas que celui des cônes, on modifie la composition du signal nerveux que l'œil envoie au cerveau, donc on change la sensation colorée ; mais la composition spectrale du marron est la même que celle du rouge orangé – *idem* entre le noisette et l'orange, le chocolat et le jaune orangé, le brun et le jaune, le vert olive et le jaune vert, le gris et le blanc... On obtient ainsi les « couleurs rabattues ».

En éliminant l'intensité de l'étude colorimétrique, quand on ne considère plus que les coordonnées trichromatiques définies au paragraphe suivant, on supprime donc la possibilité de rendre compte des couleurs rabattues. Cette limitation sera implicite, pour simplifier notre étude, à chaque fois que nous nommerons les couleurs considérées.

1. Composantes trichromatiques et fonctions colorimétriques

Il est possible de caractériser la sensation lumineuse correspondant à la densité spectrale de flux énergétique $\Phi(\lambda)$ par la donnée de trois nombres positifs, appelés composantes trichromatiques :

$$\begin{cases} X = \int \bar{X}(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda \\ Y = \int \bar{Y}(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda \\ Z = \int \bar{Z}(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda \end{cases}$$

où $\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$ et $\bar{Z}(\lambda)$ sont les trois fonctions colorimétriques, dont les intégrales sur le spectre sont égales par définition. Leurs valeurs sont tabulées par la Commission Internationale de l'Eclairage ; nous prenons les valeurs définies en 1931, et celles qui sont utilisées pour les calculs effectués par le logiciel SPECTRUM correspondent à toutes les longueurs d'onde multiples de 5 nm entre 380 et 780 nm ; le pas de cet échantillonnage impose une limite ultime à la précision des calculs colorimétriques possibles.

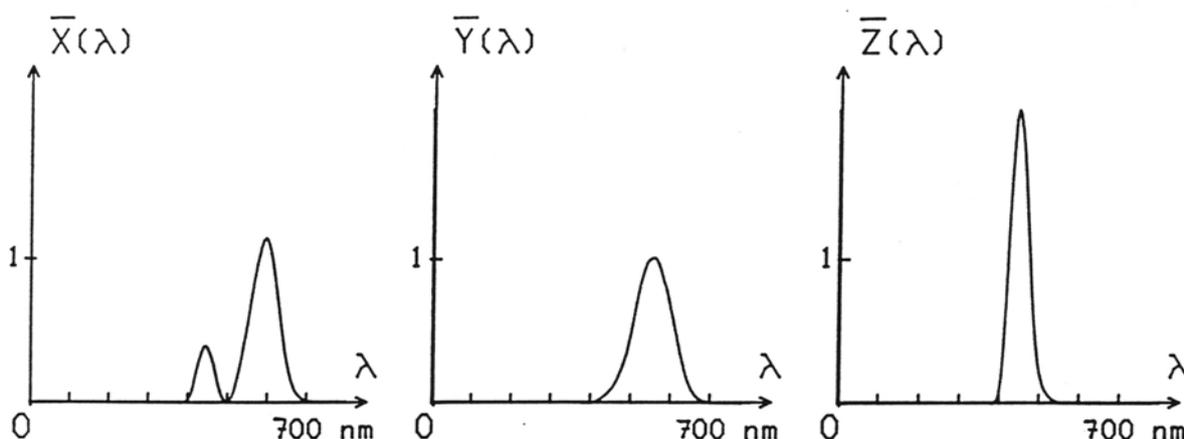


Figure 1. Graphes des trois fonctions colorimétriques $\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$ et $\bar{Z}(\lambda)$

Cette possibilité de représenter une sensation lumineuse par seulement trois paramètres indépendants, en vision diurne, vient de l'existence de trois types de cônes rétiniens S, M et L – dont les pourcentages dans l'œil humain normal sont respectivement 7 %, 31 % et 62 %, et les maxima d'absorption de leurs photopigments sont vers 0,43 μm, 0,53 et 0,57 μm.

La fonction $\bar{Y}(\lambda)$ est par définition la sensibilité de l'oeil humain (en vision photopique), dont le maximum est normalisé à 1 (à $\lambda = 556 \text{ nm}$) ; donc la deuxième composante trichromatique, Y , est donc proportionnelle à la luminance lumineuse.

2. Coordonnées trichromatiques et diagramme des couleurs

Si l'on veut représenter la couleur d'une lumière sans son intensité, on considérera les coordonnées trichromatiques

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases}$$

qui sont liées par la relation $x + y + z = 1$. Il suffira donc de deux coordonnées pour caractériser une couleur quel que soit le flux énergétique (car la multiplication de $\Phi(\lambda)$ par une constante laisse inchangées les coordonnées trichromatiques). Un point du plan, de coordonnées (x, y) , caractérise donc une couleur ; comme x , y et z sont positifs, ce point sera donc compris dans le triangle que délimitent les droites $x = 0$, $y = 0$, $x + y = 1$. Cette représentation graphique porte le nom de diagramme des couleurs.

3. Position des couleurs sur le diagramme

Une lumière monochromatique, de longueur d'onde λ , et de flux énergétique Φ , est décrite par les composantes trichromatiques $\Phi \bar{X}(\lambda)$, $\Phi \bar{Y}(\lambda)$ et $\Phi \bar{Z}(\lambda)$. Les coordonnées trichromatiques associées sont donc

$$\begin{cases} x(\lambda) = \frac{\bar{X}(\lambda)}{\bar{X}(\lambda) + \bar{Y}(\lambda) + \bar{Z}(\lambda)} \\ y(\lambda) = \frac{\bar{Y}(\lambda)}{\bar{X}(\lambda) + \bar{Y}(\lambda) + \bar{Z}(\lambda)} \\ z(\lambda) = \frac{\bar{Z}(\lambda)}{\bar{X}(\lambda) + \bar{Y}(\lambda) + \bar{Z}(\lambda)} \end{cases}$$

Le lieu des points de coordonnées $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ quand λ varie sur tout le spectre visible est une courbe non fermée appelée *spectrum locus*. En la décrivant dans le sens trigonométrique direct, on y rencontre toutes les couleurs de l'arc en ciel du rouge au violet.

Une couleur achromatique est par définition celle que représente le point W de coordonnées $1/3$, $1/3$. Ce serait par exemple la couleur de la lumière fournie par une source idéale (W), dont la densité spectrale de flux énergétique est Φ_W uniforme sur le domaine visible ; on trouve alors

$$\begin{cases} X_W = \Phi_W \int \bar{X}(\lambda) d\lambda \\ Y_W = \Phi_W \int \bar{Y}(\lambda) d\lambda \\ Z_W = \Phi_W \int \bar{Z}(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

et, comme ces trois intégrales sont égales par définition, $x_W = y_W = z_W = 1/3$.

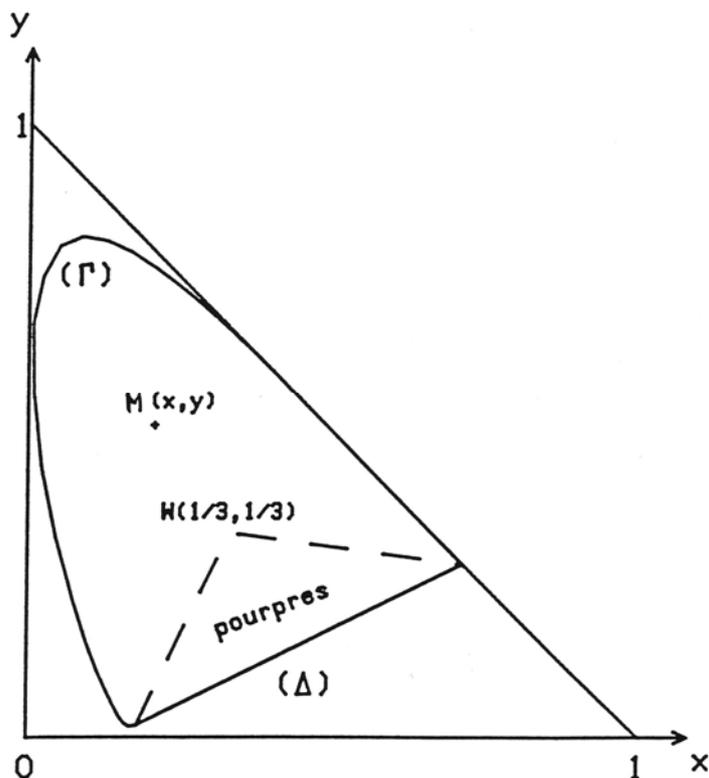


Figure 2. Diagramme des couleurs ; (Γ) est le spectrum locus, (Δ) la droite des pourpres

4. Représentation du mélange de deux couleurs sur le diagramme

Considérons deux lumières, de coordonnées trichromatiques (X_1, Y_1, Z_1) et (X_2, Y_2, Z_2) , de couleurs représentées par les points M_1 et M_2 sur le diagramme. On peut montrer que le point représentant la couleur produite par la superposition de ces deux lumières est le barycentre des points M_1 et M_2 pondérés par $X_1 + Y_1 + Z_1$ et $X_2 + Y_2 + Z_2$. Comme tout spectre visible peut être considéré comme une superposition de lumières monochromatiques, l'ensemble des couleurs existantes occupera l'enveloppe convexe du *spectrum locus*. Deux couleurs complémentaires, i.e. dont la superposition des lumières donne la lumière blanche W , sont représentées sur le diagramme par deux points alignés avec le point W entre eux.

5. Les couleurs pourpres

Certaines couleurs ne peuvent être obtenues par mélange d'une lumière blanche W et d'une lumière monochromatique : ce sont les pourpres, qui sont obtenus grossièrement par mélange de rouge et de bleu. Ils correspondent, sur le diagramme des couleurs, au domaine triangulaire dont les sommets sont le point achromatique W , le rouge extrême monochromatique et le violet extrême monochromatique. Le segment qui joint ces deux derniers points a pour nom la droite des pourpres, les couleurs correspondantes sont les pourpres purs.

6. Caractérisation d'une couleur non pourpre par sa longueur d'onde dominante et sa pureté colorimétrique

Une infinité de spectres différents peuvent produire une couleur donnée (non monochromatique). Entre autres, toute couleur non pourpre (représentée par le point $M(x, y)$ sur le diagramme) peut être obtenue par superposition d'une lumière achromatique et d'une lumière monochromatique en proportions convenables ; cela se comprend en considérant sur le diagramme le segment de droite WMD qui joint le point achromatique W au point $D(x_D, y_D)$ du *spectrum locus* en passant par M . La longueur d'onde de la lumière monochromatique représentée par D est appelée longueur d'onde dominante de cette couleur non pourpre. La pureté colorimétrique p de cette couleur non pourpre est définie à partir de cette décomposition, comme le rapport du flux lumineux de la lumière monochromatique à la somme des flux lumineux des lumières achromatique et monochromatique ; elle est donnée par la formule $p = \frac{y_D}{y} \frac{y - y_W}{y_D - y_W}$.

L'utilisation du logiciel SPECTRUM semble montrer cependant que la pureté colorimétrique n'est pas une notion satisfaisante pour mesurer la sensation de saturation d'une couleur, surtout dans les bleus : on y trouve des couleurs à faible pureté colorimétrique qui semblent pourtant assez saturées.

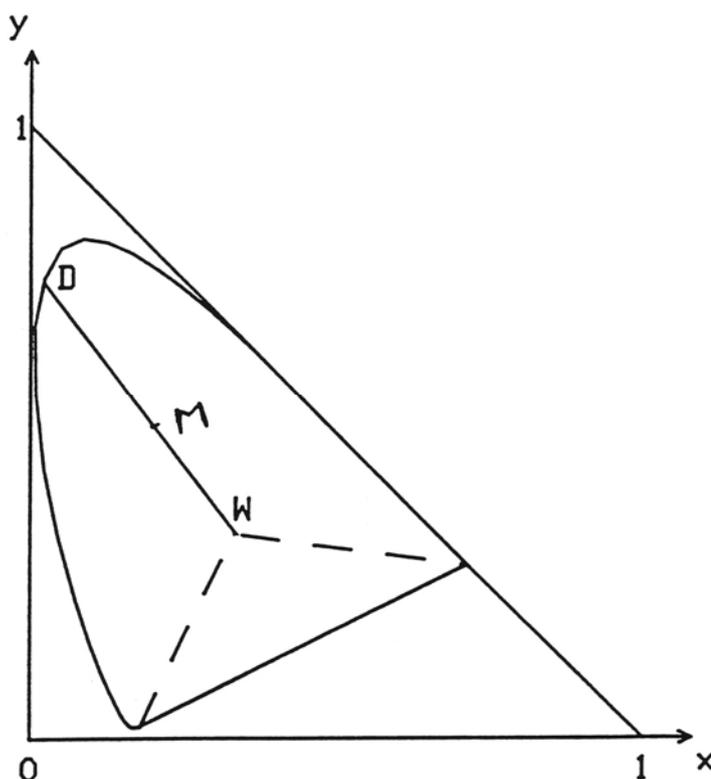


Figure 3. Détermination de la longueur d'onde dominante sur le diagramme des couleurs

7. Caractérisation d'une couleur pourpre par sa longueur d'onde complémentaire et sa pureté colorimétrique

De même, toute couleur pourpre peut être obtenue d'une première façon : par soustraction d'une lumière monochromatique à une lumière achromatique en proportions convenables ; mais encore d'une deuxième façon : par superposition d'une lumière pourpre pure (représenté par le point P de la droite des pourpres) et d'une lumière achromatique. Cela se comprend en considérant sur le diagramme le segment de droite $PMWD$. La longueur d'onde de la lumière monochromatique est appelée longueur d'onde complémentaire de cette couleur pourpre pure. La pureté colorimétrique de cette couleur pourpre est définie à partir de la deuxième décomposition, comme le rapport du flux *lumineux* de la lumière pourpre pure à la somme des flux *lumineux* des lumières achromatique et pourpre pure ; elle est donnée par la même formule.

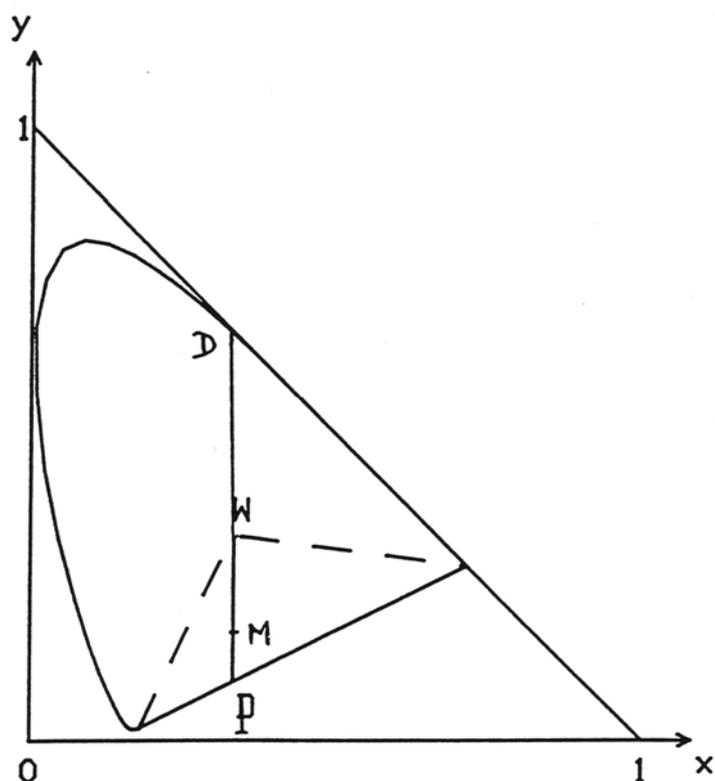


Figure 4. Détermination de la longueur d'onde complémentaire sur le diagramme des couleurs

Chapitre II

FONCTIONS DU LOGICIEL SPECTRUM

Une fois les paramètres choisis grâce aux boîtes de dialogue, et le calcul lancé, les éléments présentés par le logiciel sont les suivants.

A. Le spectre choisi

sous la forme du graphe de la fonction $\Phi(\lambda)$ dans le domaine visible (λ compris entre 380 et 760 nm), dessiné avec la couleur correspondant sommairement à chaque bande spectrale, et une échelle qui s'adapte automatiquement (un message annonçant chaque changement d'échelle).

B. Le diagramme colorimétrique

dessiné en couleur, sur lequel vient se positionner le point M représentant la couleur donnée par le spectre considéré ; on a rajouté sur ce diagramme, en pointillés colorés, les courbes d'égale pureté colorimétrique de 0,2 en 0,2 . Les coordonnées trichromatiques x et y sont affichées en bas à droite du diagramme.

C. Le segment de droite joignant le point achromatique W au point M , et la longueur d'onde dominante ou complémentaire

Ce segment, coloré conformément à la position de M , se trouve prolongé jusqu'au point D du *spectrum locus*. Dans le cas d'une couleur non pourpre, on affiche sa longueur d'onde dominante (en utilisant la couleur correspondante) ; dans le cas d'une couleur pourpre, on représente aussi le prolongement de ce segment dans le triangle des pourpres jusqu'au point P de la droite des pourpres, et on affiche sa longueur d'onde complémentaire (en utilisant la couleur correspondante).

D. La pureté colorimétrique de la couleur obtenue

La pureté minimale pour avoir une sensation colorée dépend de la longueur d'onde dominante et de la luminosité ; en dessous de 3 % de pureté d'excitation (rapport WM/WD , ou WM/WP pour un pourpre) la sensation de blancheur dépend surtout de la luminance, et au delà surtout de la pureté. Une très légère teinte bleutée accroît la sensation de blanc (d'où les produits azurants dans les lessives !). Non seulement la notion de couleur blanche, mais même celle de lumière blanche est difficile à définir : comme l'écrit Charles FABRY, « tout rayonnement à spectre continu dont la courbe d'énergie n'est pas trop accidentée nous donne la sensation de blanc lorsque nous la recevons depuis un certain temps et que rien ne nous rappelle un rayonnement que nous considérons comme blanc quelques minutes avant ». Dans SPECTRUM, un message apparaît lorsque la pureté colorimétrique est inférieure à 2 % , et le tracé du segment WM disparaît ainsi que les indications de la longueur d'onde dominante ou complémentaire.

E. Une pastille ronde proposant une synthèse de la couleur donnée par le spectre considéré

Sur le diagramme colorimétrique, le triangle représenté en trait pointillé gris sombre indique l'ensemble des couleurs reproductibles théoriquement dans le système R V B. Mais il faut garder présent à l'esprit le fait que les pastilles lumineuses du moniteur ne donnent pas une couleur pure ; donc l'ensemble des couleurs reproduites à l'écran occupe en pratique un domaine du diagramme plus restreint que l'intérieur de ce triangle. La synthèse de la couleur que propose la pastille ne peut donc être que très approximative.

De plus, la luminosité de cette pastille essaie de rendre compte de l'évolution des luminances lumineuses, qui sont proportionnelles à la deuxième composante trichromatique Y (car la deuxième fonction colorimétrique $\bar{Y}(\lambda)$ est par définition la sensibilité spectrale de l'oeil humain en vision photopique). Pour cela, deux options sont proposées :

1°) une restitution subjectivement satisfaisante de cette évolution de la luminance lumineuse, agréable à l'oeil pour les paramètres prédéfinis par défaut, mais qui ne conviendrait peut-être pas pour des valeurs trop différentes de ces paramètres ; cette option peut être utilisée pour une présentation qualitative des phénomènes étudiés ;

2°) une restitution linéaire (dite en « luminosité absolue ») de cette évolution de la luminance, avec une augmentation automatique de la sensibilité de cette restitution si la luminosité de la pastille devient trop faible pour être bien observée, et une diminution si la luminosité vient à dépasser les possibilités de restitution de l'écran, de façon à s'adapter à n'importe quel choix de paramètres ; la sensibilité change à chaque fois d'une puissance de 2 par défaut (mais il est possible de choisir un autre facteur), et à chaque changement un message s'affiche sur la pastille, ce qui permet une étude plus précise de la luminance lumineuse si le moniteur est de bonne qualité. ATTENTION : si on constate une augmentation de la sensibilité, il ne faut pas en conclure que c'est forcément lié à une diminution de la luminance lumineuse, et vice-versa, pour des raisons liées à l'optimisation du programme et des possibilités du moniteur.

F. L'indication de la luminance lumineuse relative

Cette indication apparaît seulement dans les fonctions où le logiciel ne simule pas qu'une seule couleur (comme dans le cas de la couleur des métaux en réflexion), mais une série de couleurs séquentiellement ; elle est calculée à partir de la deuxième composante trichromatique, Y . Le rapport de la luminance lumineuse, du spectre présent, à celle du premier spectre étudié dans la séquence en cours, est affiché en dessous de la pastille ronde (sauf si le premier spectre étudié est nul, auquel cas la luminosité relative n'est plus définie), après l'abréviation LR : ...

G. La valeur du paramètre variable

désigné par son nom (en abrégé éventuellement), ou son symbole, et avec l'unité correspondante.

H. L'affichage de l'ensemble des couleurs calculées

A la fin de l'étude d'un ensemble de couleurs, obtenu en faisant varier un paramètre, il est possible d'observer d'un seul coup d'œil l'évolution de ces couleurs successives en les faisant s'afficher : elles apparaissent sous la forme d'un spectre, chaque raie verticale ayant la couleur synthétisée pour une valeur donnée du paramètre. Une échelle apparaît, pour permettre de retrouver la valeur du paramètre variable, correspondante à chaque couleur affichée.

Chapitre III

**SITUATIONS PHYSIQUES ÉTUDIÉES PAR LE LOGICIEL
SPECTRUM**

Pour chacune des situations étudiées dans cette partie, nous indiquerons d'abord les paramètres demandés par le logiciel pour sa simulation, et la finalité de cette simulation. Puis nous signalerons quelques phénomènes notables, qui sont chacun autant d'exemples d'utilisations intéressantes de SPECTRUM, cette liste n'étant pas limitative ; de plus, lorsque nous préciserons des valeurs de paramètres pour ces exemples, les valeurs des paramètres non précisés seront celles définies par défaut dans le logiciel.

1. Couleurs d'un spectre rectangulaire

Dans certaines expériences pédagogiques, pour illustrer la décomposition puis la recombinaison de la lumière blanche, on isole à l'aide d'une fente une bande spectrale de largeur et de position variable dans le spectre visible, et on montre la couleur correspondante - voir par exemple la fiche pédagogique de l'ADASTA n° 26 : Expériences sur la décomposition et la recombinaison de la lumière blanche (p. 17).

Le logiciel SPECTRUM permet de simuler l'évolution de la couleur obtenue lorsque l'on fait varier la largeur de la bande spectrale sélectionnée, en laissant son centre fixe, ou au contraire lorsque l'on déplace son centre en gardant sa largeur constante.

1.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande de choisir :

- le centre de la bande spectrale de profil rectangulaire (570 nm par défaut), qui ne se trouve pas forcément dans le domaine visible - dans le cas d'une variation de la longueur d'onde moyenne il s'agit de la valeur initiale ;
- sa largeur (5 nm par défaut) - dans le cas d'une variation de la largeur spectrale il s'agit de la valeur initiale ; on prendra pour ces deux valeurs un multiple de 5 nm afin d'utiliser au mieux les valeurs des fonctions colorimétriques utilisées, qui sont tabulées pour des longueurs d'onde multiples de 5 nm ;
- le pas de la variation de la longueur d'onde moyenne ou de la largeur spectrale, qui peut être négatif (5 nm par défaut, mais la valeur optimale dépend de la vitesse de votre ordinateur ; le pas des tables utilisées pour les fonctions colorimétriques étant de 5 nm aussi, une valeur plus petite du pas de variation de la largeur ne permettrait donc pas une étude plus fine du phénomène) ;
- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (5 par défaut) ;
- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

1.2. Quelques phénomènes notables

◆ Dans l'étude des couleurs en fonction de la largeur spectrale, on observe que la pureté colorimétrique reste bonne même avec une largeur spectrale assez élevée (ce qui explique la réussite spectaculaire des expériences de décomposition/recombinaison de la lumière blanche, ou de diffusion Christiansen) ; puis forcément elle diminue et on obtient finalement la couleur achromatique W .

La forme du *spectrum locus*, quasiment rectiligne du vert à 520 nm au rouge extrême, rend bien compte de cette propriété intéressante et particulièrement spectaculaire lorsque le centre de la bande spectrale se trouve à la position préréglée, 570 nm par défaut. En effet, la propriété de la représentation du mélange additif de deux lumières sur le diagramme (voir chap. I, § 4.) a pour corollaire le fait que la couleur, due à un spectre à support borné dans le domaine visible, se trouve à l'intérieur de l'enveloppe convexe de la partie du *spectrum locus* associée au support de ce spectre (voir figure 5).

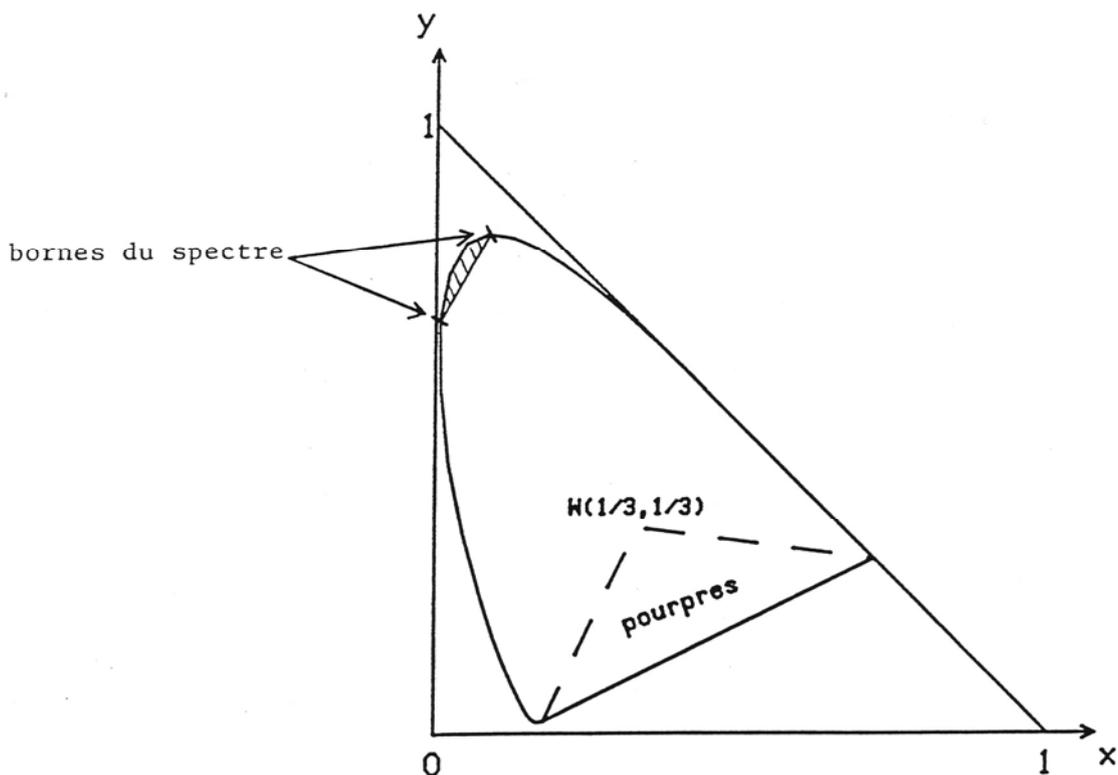


Figure 5. Domaine contenant le point qui représente la couleur d'un spectre à support borné

Par exemple, on retrouve ainsi un fait bien connu : le mélange additif de rouge pur à 780 nm et de vert pur à 520 nm peut donner une sensation de jaune quasi pur, bien qu'il n'y ait pas de partie correspondant au jaune dans ce spectre, et que les longueurs d'onde du vert et du rouge extrême mélangés diffèrent de 260 nm ! (voir figure 6).

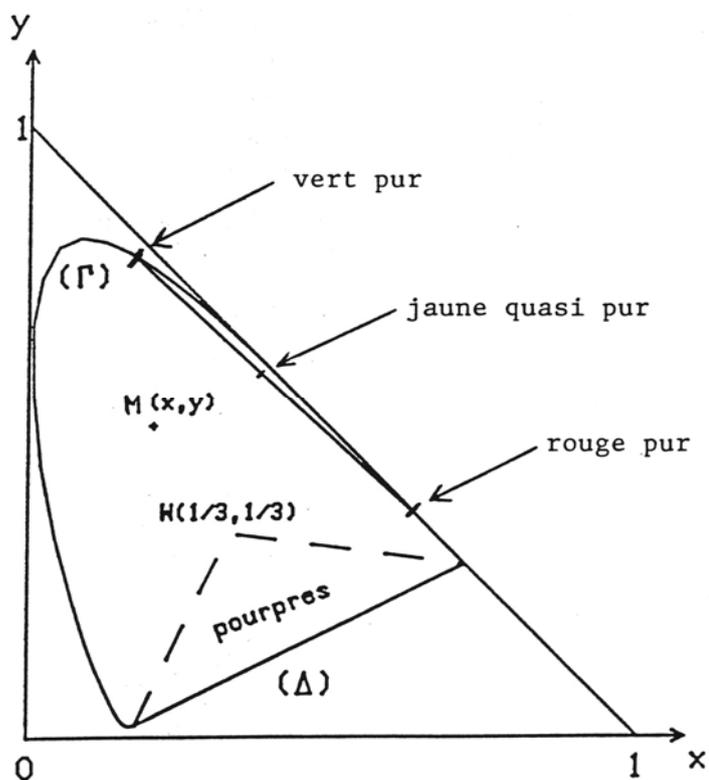


Figure 6. Mélange additif de rouge pur et vert pur donnant du jaune quasi pur

Enfin, les coordonnées trichromatiques $x(\lambda)$ et $y(\lambda)$ du *spectrum locus* ont une variation inférieure à 10^{-4} quand λ varie de 700 à 780 nm ; ceci fait aussi que la couleur correspondante à un spectre compris entre ces valeurs est très pure, comme on pourra le constater encore par la suite en de multiples occasions où le logiciel affiche une pureté de 1,00 (couleurs du corps noir à des températures inférieures à 935 K, couleurs dues à la diffusion Rayleigh pour des épaisseurs supérieures à 59,2 unités arbitraires pour la lumière diffusée et 50,2 unités arbitraires pour la lumière transmise, couleurs de la diffusion Christiansen avec les paramètres pré-réglés mais un titre massique de A supérieur à 59,2 % pour la lumière diffusée et 58,2 % pour la lumière transmise).

Ainsi, avec un spectre rectangulaire ayant une longueur d'onde moyenne de 630 nm, on obtient quand même une pureté colorimétrique de 0,91 pour une largeur spectrale de 280 nm !

Pour une longueur d'onde moyenne inférieure à 460 nm, la courbe obtenue est convexe. Pour une longueur d'onde moyenne comprise entre 465 et 550 nm, la courbe obtenue présente une ou des inflexions. Puis pour une longueur d'onde moyenne supérieure à 555 nm, la courbe devient concave ; pour la longueur d'onde moyenne 570 nm, elle est quasiment rectiligne et sa concavité change de sens.

◆ Notons l'évolution, pour des valeurs croissantes de la largeur spectrale, de la courbe décrite dans le diagramme des couleurs lorsque la bande spectrale rectangulaire se déplace d'une extrémité à l'autre du spectre. Mais pour cette étude particulière, et surtout avec une faible largeur spectrale de cette bande, l'imprécision des valeurs tabulées des fonctions colorimétriques aux limites ultimes du spectre visible empêche de simuler ce qui se passe quand la bande spectrale est proche de ces limites ultimes ; c'est pourquoi le logiciel arrête les calculs pour toute cette partie lorsqu'une borne du spectre rectangulaire devient supérieure à 680 nm ou inférieure à 410 nm.

Pour une largeur spectrale très faible, la courbe décrite se confond avec le *spectrum locus* par définition ; c'est bien ce que l'on observe en choisissant une largeur spectrale de 5 nm (dans ce cas, le pas d'échantillonnage des fonctions colorimétriques étant de 5 nm, le résultat de la simulation est le même que pour une largeur spectrale nulle comme dans le cas d'une raie monochromatique). Mais l'imprécision relative des fonctions colorimétriques aux extrémités

Pour une largeur spectrale plus importante, la courbe décrite a une forme voisine de celle du *spectrum locus*, et reste convexe comme lui.

Au dessus d'une largeur spectrale comprise entre 135 et 140 nm, la courbe devient non convexe.

Pour une largeur spectrale de 240 nm, la courbe présente quasiment un point anguleux proche du point W .

Pour une largeur spectrale supérieure à celle du spectre visible (400 nm), la courbe ne peut plus changer. Elle présente un point anguleux en W , qui se comprend bien si on demande l'affichage des couleurs calculées : au fur et à mesure du déplacement du spectre vers les grandes longueurs d'onde, elles partent du violet pur, donnent un bleu de plus en plus délavé, puis un blanc W , puis un rouge qui finit par devenir pur (pour observer cela, il faut choisir une longueur d'onde moyenne initiale égale à 410 nm moins la demi-largeur spectrale).

2. Couleurs dues à la diffusion Rayleigh, en transmission et en diffusion

Ces couleurs sont bien sûr celle du Soleil couchant (ou levant) sur l'horizon, et du bleu du ciel. On peut les reproduire et les simuler dans une célèbre expérience pédagogique, consistant à observer la propagation d'un pinceau de lumière incidente blanche dans une solution où apparaît progressivement un précipité de soufre colloïdal - voir par exemple J. BERTY, A. ESCAUT, P. MARCHAND, L. MARTIN, A. OUSTRY, *Physique pratique - tome 3 : optique*, Vuibert (Paris, 1991) : p. 272.

Le logiciel simule l'évolution des couleurs diffusées et transmises pour ce pinceau lumineux, non pas au fur et à mesure de l'apparition du précipité, mais au fur et à mesure du déplacement dans le sens du pinceau pour une composition donnée du milieu provoquant la diffusion Rayleigh (voir figure 7). Pour la lumière transmise par le pinceau, à une distance d de son entrée dans le milieu diffusant (supposé homogène), la densité spectrale de

flux énergétique est $\Phi_T(\lambda) = \Phi_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{\lambda^4} d\right)$, où α est proportionnel à la concentration du corps

provoquant la diffusion Rayleigh ; pour la lumière diffusée à cette distance, la densité spectrale de flux énergétique est $\Phi_D(\lambda) = \Phi_0 \frac{\beta}{\lambda^4} \exp\left(-\frac{\alpha}{\lambda^4} d\right)$, où β est aussi proportionnel à la concentration du corps

provoquant la diffusion Rayleigh (c'est pourquoi on simule l'évolution de la couleur pour une composition donnée et non pas une composition variable, pour ne pas avoir besoin de tenir compte de la variation de β , qui affecte la luminance de la lumière diffusée).

2.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande :

- la valeur initiale de d , en unités arbitraires (0 u.a. par défaut) - sinon il faudrait préciser aussi l'efficacité de diffusion Rayleigh du corps considéré, sa concentration, etc. ;
- le pas de sa variation, qui peut être négatif (0,1 u.a. par défaut, mais la valeur optimale dépend de la vitesse de votre ordinateur) ;
- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (5 par défaut) ;
- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

2.2. Quelques phénomènes notables

On observe que, au fur et à mesure de l'augmentation de d (voir figure 7), la couleur de la lumière transmise rougit : d'abord on obtient un jaune orangé, mais plus loin la couleur vire forcément au rouge sombre (comme le soleil couchant). Pour la lumière diffusée, au début du trajet du pinceau la couleur est complémentaire de la couleur transmise, c'est à dire bleu ciel. Mais au fur et à mesure que l'on avance en suivant le pinceau, la diffusion en $1/\lambda^4$ que l'on observe s'effectue avec une lumière incidente qui n'est plus blanche mais déjà rougie ; le logiciel montre que, pour la couleur du faisceau diffusé, le rougissement de la lumière du pinceau finit par l'emporter sur la diffusion préférentielle du violet. La lumière diffusée, d'abord bleu ciel juste après l'entrée du faisceau dans la cuve (on peut observer une pause dans l'exécution pour insister sur ce cas), vire au jaune, puis au rouge sombre, au fur et à mesure que l'on avance le long du pinceau.

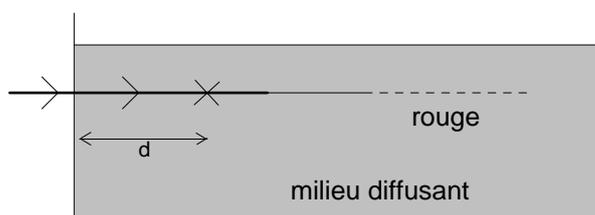


Figure 7. Expérience de diffusion Rayleigh

3. Couleurs du corps noir

On appelle ainsi les couleurs de la lumière émise par un corps noir dont on élève progressivement la température T ; sa densité spectrale de luminance est donnée par $L_\lambda = \frac{c}{4\pi} \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k T} - 1}$, où h et k sont les constantes de Planck et de Boltzmann. Le spectre de la lumière émise par un corps noir présente un maximum pour une longueur d'onde inversement proportionnelle à la température (première loi du déplacement de Wien). A basse température, celui-ci se situe donc dans l'infrarouge ; au fur et à mesure de l'élévation de température, celui-ci apparaît dans le visible par son extrémité rouge, se déplace vers le violet, et disparaît dans l'ultraviolet. La couleur évolue donc du rouge profond à l'orange, puis au jaune, au blanc, et au bleu du ciel (de pureté colorimétrique 0,16, qui serait dû à la diffusion Rayleigh : en effet, lorsque la température dépasse 10^5 K environ, selon la formule de Rayleigh-Jeans $L_\lambda \cong 2ckT/\lambda^4$ dans le visible). Cette évolution explique, en particulier, les couleurs des étoiles (que l'on voit beaucoup mieux sur les photographies qu'à l'œil nu, à cause de

la perte de sensibilité aux couleurs de l'œil dans les conditions de vision scotopique, c'est à dire de vision nocturne) ; alors on comprend bien que les étoiles les plus chaudes ne sont pas blanches (c'est plutôt le Soleil qui est blanc), mais bleues.

3.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande :

- la température initiale (800 K par défaut - il est inutile de la prendre trop basse) ;
- le pas de sa variation, qui peut être négatif (10 K par défaut, mais la valeur optimale dépend de la vitesse de votre ordinateur) ;
- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (5 par défaut) ;
- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

3.2. Quelques phénomènes notables

◆ On peut vérifier qualitativement les lois théoriques et leurs conséquences : les lois du déplacement de Wien, la formule de Rayleigh-Jeans, et les couleurs qui en découlent (voir planche en couleurs, figure 1).

◆ La courbe décrite sur le diagramme colorimétrique ressemble à une parabole.

◆ Il est possible de réaliser une étude point par point, en ne choisissant que la température désirée : par exemple, la température du filament de tungstène d'une lampe à incandescence ordinaire (2900 K environ), celle d'une lampe à halogène (3100 K environ - voir planche en couleurs, figure 2), celle de la photosphère du Soleil (5500 K environ). Dans le premier cas, on voit que la lumière émise est jaune orangée ; dans le deuxième, elle se rapproche plus du blanc ; et dans le dernier, elle est quasiment blanche, avec un maximum de densité spectrale au voisinage du maximum de sensibilité de l'œil humain (grâce à l'évolution des espèces...).

4. Couleurs de la polarisation rotatoire

On nomme ainsi les couleurs de la lumière émergente obtenue lorsqu'on envoie un faisceau incident collimaté de lumière blanche W sur une lame optiquement active, placée entre polariseur et analyseur parfaits croisés, et que l'on fait tourner l'analyseur (ou le polariseur) ; ce sont par exemple les couleurs observées *au centre* de la célèbre figure d'interférences en lumière polarisée convergente appelée « croix de Malte ». Ces couleurs viennent de la dispersion du pouvoir rotatoire (il varie approximativement, selon la loi de Biot, comme l'inverse du carré de la longueur d'onde). Si la lame est assez épaisse on observe des cannelures parfaitement sombres dans le spectre de la lumière transmise : ce sont les radiations monochromatiques sortant de la lame polarisées rectilignement et perpendiculairement à l'axe de l'analyseur. Si l'épaisseur de la lame est trop grande, on observe trop de cannelures dans le spectre, et on obtient du blanc d'ordre supérieur.

4.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande de choisir :

- le pouvoir rotatoire de la lame pour la raie moyenne D orange du sodium (par défaut, 21,72 °/mm, valeur pour le quartz à 20 °C ; cette valeur croît avec la température, valant 21,18 °/mm à -188 °C et 24,30 °/mm à 560 °C, et présente une discontinuité de +3,8 % à 570 °C, qui est la température de transformation du quartz α en quartz β) ;
- l'épaisseur de la lame (par défaut, 7,5 mm, valeur donnant entre polariseur et analyseur croisés une teinte sensible utilisée dans un modèle de biquartz de Soleil) ;
- la longueur d'onde moyenne de résonance, c'est à dire le paramètre λ_0 au dénominateur de la formule empirique de Drude à un seul terme (par défaut, 218 nm) ;
- l'angle initial α_0 entre les axes du polariseur et de l'analyseur (par défaut, 0 °) ;
- le pas de variation de cet angle α , qui peut être négatif (1° par défaut, mais la valeur optimale dépend de la vitesse de votre ordinateur) ;

- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (5 par défaut) ;
- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

A partir de ces données, le logiciel SPECTRUM calcule la dispersion de rotation produite par la lame. Pour rendre compte de l'existence de la teinte sensible mauve, la précision de la loi de Biot n'est pas suffisante. On prend alors la formule de Drude à un terme, dont la précision dans le domaine visible est bien meilleure, et selon laquelle le pouvoir rotatoire est proportionnel à $\frac{1}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$; λ_0 est appelé longueur d'onde de résonance (218 nm pour le quartz, valeur prédéfinie par défaut). Dans une formule de Drude à *plusieurs termes*, les longueurs d'onde de résonance sont celles des bandes d'absorption du corps considéré ; celles qui ont un effet prépondérant, sur la dispersion de pouvoir rotatoire dans le spectre visible, se situent dans l'ultraviolet.

4.2. Quelques phénomènes notables

◆ SPECTRUM simule la variation de couleur de la lumière émergente lorsque l'on fait tourner l'axe de l'analyseur, le spectre étant donné par $\Phi(\lambda) = \Phi_0 \cos^2\left(\alpha - \frac{K}{\lambda^2 - \lambda_0^2}\right)$. L'effet de cette rotation sur le

spectre n'est qu'un déplacement monotone des cannelures sans variation de contraste. Les teintes de la lumière émergente varient donc, mais périodiquement, la période correspondant à une rotation de 180° de l'axe de l'analyseur ; et quand celui-ci tourne de 90°, la couleur de la lumière émergente s'est changée en sa complémentaire. Sur le diagramme colorimétrique, cela se traduit par le fait que le point représentant la couleur décrit de façon périodique une courbe fermée tournant autour de W , et que pour une rotation de 90° de l'axe de l'analyseur, le segment WM a tourné de 180°.

◆ Avec les valeurs prédéfinies, on obtient effectivement la teinte sensible mauve pour un angle de 90° entre les axes du polariseur et de l'analyseur (voir planche en couleurs, figure 3) ; et on observe bien que la variation de cette teinte se fait très rapidement (voir planche en couleurs, figure 4), de façon sensible sur un dixième de degré. Il est intéressant de visualiser les couleurs calculées en mode graphique 1024 x 768 en 256 couleurs, avec un pas de 0,1° et un angle initial de 83°, pour voir combien cette couleur mauve est sensible.

◆ On obtient une autre teinte sensible mauve en gardant les constantes physiques du quartz, et en choisissant pour épaisseur celle de l'autre modèle de biquartz (3,75 mm) pour un angle entre les axes du polariseur et de l'analyseur voisin de 0°.

◆ On peut vérifier que, pour une longueur d'onde de résonance donnée, les phénomènes observés restent identiques si on change l'épaisseur de la lame ou son pouvoir rotatoire (pour la raie moyenne D orange du sodium), à condition qu'on laisse leur produit constant.

◆ Dans le cas particulier où on choisit un pouvoir rotatoire nul, on n'observe plus de couleurs évidemment ; mais on obtient des lumières grises de luminance lumineuse variable proportionnellement au carré de l'angle entre le polariseur et l'analyseur, conformément à la loi de Malus.

◆ Il est amusant d'étudier ce qui se passe lorsque l'on place, entre le polariseur et l'analyseur, une lame dont le produit de l'épaisseur par le pouvoir rotatoire (pour la raie moyenne D orange du sodium) tend vers zéro. Lorsque l'angle entre les axes du polariseur et de l'analyseur est assez différent de 90°, le spectre est quasiment constant et la lumière émergente quasiment blanche. Mais lorsque cet angle est très proche de 90°, la lumière émergente se colore : elle passe par du mauve. Pour un produit de l'épaisseur par le pouvoir rotatoire très petit, on vérifie que les phénomènes observés sont indépendants de sa valeur, mais sont angulairement d'autant plus sensibles que ce produit est petit ; en gardant les paramètres physiques du quartz, on peut choisir par exemple d'abord une épaisseur de 10^{-3} mm, un angle initial de 89,9° et un pas de 10^{-3} °, puis 10^{-4} mm, 89,99° et 10^{-4} ° : le même phénomène se reproduira, la sensibilité ayant été multiplié par 10. On peut ainsi concevoir des mauves aussi sensibles que l'on veut, mais ceci est purement académique : car plus ils sont sensibles, moins ils sont lumineux !

5. Couleurs de la figure de diffraction de Fraunhofer d'une fente

Quand on observe la figure de diffraction de Fraunhofer d'une fente rectangulaire infiniment longue (voir figure 8), en lumière monochromatique on observe des franges sombres, symétriques par rapport au point de convergence de la lumière prévu par l'optique géométrique, et dont l'espacement à celui-ci est proportionnel à la longueur d'onde. En lumière blanche, l'observation de la figure de diffraction en partant du point de convergence prévu par l'optique géométrique, montre d'abord du blanc, puis des couleurs, puis du blanc d'ordre supérieur (car le spectre devient très cannelé).

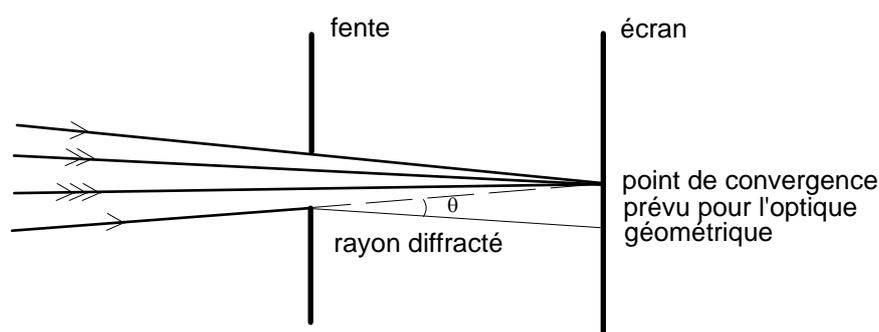


Figure 8. Diffraction de Fraunhofer par une fente de largeur a

SPECTRUM simule cette évolution, en supposant que la lumière incidente n'est pas W , mais a un spectre proportionnel au carré de la longueur d'onde (pour compenser la variation d'échelle de la figure de diffraction, à deux dimensions, proportionnelle à la longueur d'onde). Quand on s'est écarté de beaucoup de franges de diffraction à partir du point de convergence prévu par l'optique géométrique, la couleur ne tend plus alors vers du blanc (comme ce serait le cas avec la source blanche W), mais vers la couleur orangée (de pureté colorimétrique 0,34 environ) du spectre proportionnel au carré de la longueur d'onde.

5.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande :

- le produit de la valeur initiale de l'angle de diffraction θ par la largeur a de la fente, en $^{\circ} \cdot mm$ (0 $^{\circ} \cdot mm$ par défaut) ;
- le pas de sa variation (0,001 $^{\circ} \cdot mm$ par défaut).
- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (5 par défaut) ;
- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

A partir de cela, SPECTRUM calcule le spectre de la lumière étudiée :

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0 \left[\frac{\sin\left(\pi \frac{\theta a}{\lambda}\right)}{\pi \frac{\theta a}{\lambda}} \right]^2$$

et simule son évolution lorsque le produit θa (voir figure 8) varie.

5.2. Quelques phénomènes notables

◆ On peut vérifier la parité des phénomènes par rapport à $\theta a = 0$, par exemple en choisissant une valeur initiale de θa négative, et en vérifiant que pour θa positif on repasse bien par les mêmes points du diagramme des couleurs.

◆ On peut aussi obtenir une figure qui ressemble très fortement à la figure de diffraction de Fraunhofer qu'on obtiendrait dans la classique expérience réelle avec une fente source éclairée par une lumière blanche, et une fente diffractante (voir planche en couleurs, figure 5) ; il suffit pour cela de visualiser les couleurs calculées (en mode graphique 1024 x 768 en 256 couleurs de préférence) avec les valeurs suivantes des paramètres :

valeur initiale de θa : - 0,091 °. mm ;
 pas : 0,00035 °. mm
 arrêter lorsque θa vaut environ 0,091 °. mm.

6. Couleurs interférentielles (avec une lame dispersive éventuellement)

Ce sont les couleurs observées dans les expériences d'interférence à deux ondes en lumière naturelle blanche W , comme celles que l'on obtient avec les fentes d'Young, les miroirs de Fresnel ou de Lloyd, les bilentilles de Billet, le biprisme de Fresnel, les lames minces (lames de savon, anneaux de Newton, couche anti-reflet unique, etc.), l'interféromètre de Michelson, etc. Leur densité spectrale de flux énergétique est

$$\Phi(\lambda) = \frac{\Phi_0}{2} \left[1 + C \cos \left(2\pi \frac{\delta}{\lambda} - \varphi \right) \right], \text{ où } \delta \text{ désigne la différence de marche.}$$

6.1. Cas d'un interféromètre non dispersif : teintes de Newton

Dans ce cas, δ est un paramètre indépendant de λ . C'est quasiment ce qui se passe avec les fentes d'Young, les miroirs de Fresnel ou de Lloyd, les bilentilles de Billet, le biprisme de Fresnel, les anneaux de Newton, l'interféromètre de Michelson.

6.1.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande :

- quel contraste C (1 par défaut, et c'est à peu près ce qui se produit avec les interféromètres usuels lorsque les éclairagements dus aux faisceaux délivrés par chaque voie sont sensiblement égales, comme par exemple pour les lames de savon *en réflexion* - mais pour les lames de savon *en transmission* le contraste n'est que de 2 % environ, ce qui est à la limite du perceptible) ;
- quel déphasage φ (0 ° par défaut, ce qui donne les teintes de Newton à centre blanc, comme avec les fentes d'Young, les miroirs de Fresnel, les bilentilles de Billet, le biprisme de Fresnel ; avec $\varphi = 180^\circ$ on aurait celles à centre noir, complémentaires de celles à centre blanc, comme avec un miroir de Lloyd en verre sans traitement métallique utilisé en incidence rasante, les lames minces - lames de savon présentant une zone noire avant d'éclater, anneaux de Newton à centre noir - si on les observe *en réflexion*).
- à partir de quelle valeur on veut faire croître δ (0 μm par défaut : si on veut obtenir des teintes de Newton convenables, il vaut mieux ne pas dépasser 3 μm de différence de marche) ;
- avec quel pas (0,01 μm par défaut, mais la valeur optimale dépend de la vitesse de votre ordinateur) ;
- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (1,5 par défaut) ;
- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

6.1.2. Quelques phénomènes notables

On voit évoluer les caractéristiques des teintes de Newton en fonction de la différence de marche δ qui s'affiche.

◆ En partant de la différence de marche nulle, on voit le spectre initialement blanc se creuser de cannelures qui lui arrivent par son extrémité rouge. Quand il n'y en a qu'une seule dans le spectre, les couleurs de Newton ne sont pas encore très saturées (puisque l'on est parti du blanc d'ordre zéro), et elles évoluent vite avec la différence de marche ; dans le cas des teintes de Newton à centre noir, on passe par une première « teinte sensible » à cet égard, pour $\delta \cong 0,556 \mu m$. Puis, avec deux ou trois cannelures dans le spectre, cette évolution se ralentit, et les couleurs deviennent plus saturées ; on remarque, sur la courbe décrite dans le diagramme colorimétrique, le passage par une sorte de point de rebroussement, pour $\delta \cong 1,86 \mu m$ si $\varphi = 0^\circ$ et un contraste quelconque (mais on ne retrouve pas ce point de rebroussement si $\varphi = 180^\circ$). Enfin, lorsque le nombre de cannelures continue de croître, les couleurs deviennent de plus en plus délavées, mauve et vert pâle alternés selon qu'une cannelure passe ou non sur la partie verte du spectre à $0,556 \mu m$, correspondant au maximum de sensibilité de l'oeil humain ; entre ces franges mauves et vertes se trouvent de très fines franges blanchâtres, que l'on voit bien en faisant afficher les couleurs calculées (on peut les étudier avec un pas de variation de δ valant $0,001 \mu m$). Après, la courbe se resserre autour du point W : on tend vers du blanc d'ordre supérieur ; on voit bien que les cannelures sont plus espacées dans le rouge que dans le violet, et que la luminance lumineuse relative par rapport à la frange centrale $\delta = 0$ (pour $C = 1$ et $\varphi = 0^\circ$) tend vers $1/2$. Lorsque les cannelures dans le spectre sont trop serrées et que l'échantillonnage du spectre par pas de 5 nm ne permet plus des calculs assez précis, le logiciel interrompt l'étude en cours et envoie un message d'explication.

◆ On peut vérifier la parité des phénomènes par rapport à $\delta = 0$, par exemple en choisissant une valeur initiale de δ négative, et en vérifiant que pour δ positif on repasse bien par les mêmes points du diagramme des couleurs.

◆ On peut aussi obtenir une figure qui ressemble très fortement à la figure d'interférences qu'on obtiendrait dans la classique expérience réelle avec une fente source éclairée par une lumière blanche, et des miroirs de Fresnel (ou un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air) ; il suffit pour cela de visualiser les couleurs calculées (en mode graphique 1024×768 en 256 couleurs de préférence) avec les valeurs des paramètres préréglés, en s'arrêtant à $\delta \approx 6 \mu m$ (voir planche en couleurs, figure 6).

◆ Avec les paramètres préréglés, si on veut étudier les teintes de Newton à centre noir en mettant $\varphi = 180^\circ$ et en gardant un contraste de 1, on constate que la première couleur obtenue après le noir de $\delta = 0 \mu m$ n'est pas du gris, mais tout de suite du bleu pâle (longueur d'onde dominante et pureté colorimétrique

voisines de 480 nm et $0,09$), car pour $\delta \ll 0,5 \mu m$ on a $\Phi(\lambda) = \frac{\Phi_0}{2} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{\delta}{\lambda}\right) \right] \cong \Phi_0 \frac{\pi^2 \delta^2}{\lambda^2}$

dans le domaine visible. Pourtant, les teintes de Newton à centre blanc et à centre noir sont bien complémentaires ; mais sur le diagramme des couleurs, les points correspondants à deux couleurs complémentaires ne sont pas symétriques par rapport au point W , ils sont seulement alignés avec lui ! Mais, si on veut voir la courbe décrite pour les teintes de Newton à centre noir partir du point W , il suffit de prendre un contraste très légèrement inférieur à 1, ou un déphasage légèrement supérieur à 180° : pour étudier ce phénomène en détail, on peut par exemple choisir ($\varphi = 180^\circ, C = 0,99$) ou ($\varphi = 181^\circ, C = 1$), avec un pas de variation de δ égal à $0,001 \mu m$; par contre, avec ($\varphi = 179^\circ, C = 1$) et un pas de $0,0001 \mu m$, on voit que la courbe décrite dans le diagramme des couleurs effectue un tour supplémentaire avant de suivre quasiment la même courbe qu'avec ($\varphi = 180^\circ, C = 1$) à partir du bleu pâle ci-dessus mentionné.

◆ Si on diminue le contraste C , les couleurs obtenues se délavent ; la limite en dessous de laquelle on ne perçoit plus de couleur semble être $C \approx 0,03$, comme on peut le constater en visualisant les couleurs calculées (en mode graphique 1024×768 en 256 couleurs). Cependant la transformation de la courbe décrite dans le diagramme des couleurs, quand on passe de $C = 1$ à $C < 1$, ne se réduit pas à une homothétie de centre W ...

◆ On peut comparer, pour chaque valeur de la différence de marche, les couleurs simulées avec les couleurs décrites dans les échelles des teintes de Newton, à centre blanc ou à centre noir (données en annexe) ; la coïncidence est excellente, le seul léger désaccord s'observant dans les valeurs de la différence de marche donnant les teintes pourpres sensibles, à une dizaine de nanomètres près...

6.2. Cas d'un interféromètre dispersif : les couleurs autour de la frange achromatique

On rencontre ce cas lorsque la dispersion n'est pas compensée entre les deux voies de l'interféromètre, ce qui entraîne une variation de δ avec λ . Cela correspond à l'exercice classique où l'on considère des fentes d'Young avec une lame de verre placée contre l'une des fentes, mais ce n'est pas facile à réaliser expérimentalement ; pour observer un tel phénomène effectivement, il est beaucoup plus commode d'utiliser un interféromètre de Michelson initialement réglé à la teinte plate en lumière blanche, et dans lequel on dérègle progressivement la lame compensatrice tout en traduisant l'un des miroirs de façon à conserver les interférences (qui vont alors se manifester sous la forme de franges hyperboliques ou elliptiques).

Dans les cas usuels, la différence de marche peut se mettre sous la forme approchée $\delta \approx \delta_0 - (n-1)e$, car il y a une lame (de verre) en plus sur une voie par rapport à l'autre ; la longueur δ_0 et l'épaisseur e sont quasiment indépendantes de λ , mais l'indice varie selon la formule approchée de Cauchy

$$n \cong A + \frac{B}{\lambda^2}.$$

SPECTRUM simule l'évolution du phénomène en fonction de δ_0 (la valeur optimale du pas dépend de la vitesse de votre ordinateur), pour des valeurs données de A , B et e qu'il demande de choisir (indirectement pour A et B). Cela correspond à la configuration usuelle de l'expérience, où le matériau constituant la lame est fixé ainsi que son épaisseur ; ce qui varie en fonction du point d'observation est la différence de marche due aux trajets dans l'air...

6.2.1. Paramètres de la simulation

Ainsi, par rapport au cas non dispersif, SPECTRUM demande :

- à partir de quelle valeur on veut faire varier δ_0 (ici la valeur intéressante n'est plus la valeur nulle : par défaut on propose une valeur bien adaptée, 128,5 μm) ; δ_0 peut être appelé « différence de marche en l'absence de lame » ;
- quelle est l'épaisseur e de cette lame (0,25 mm par défaut) ;
- quelle est la valeur de l'indice moyen n_d de la lame dispersive, c'est à dire son indice pour la raie jaune d de l'hélium (par défaut, l'indice moyen du verre ordinaire : 1,5119) ;
- quelle est sa constringence $\nu = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$, n_F et n_C désignant les indices respectifs pour les raies

F bleue et C rouge de l'hydrogène (elle est de l'ordre de 65,35 pour le verre ordinaire, ce qui est le cas considéré par défaut, mais de 30 pour le cristal, qui est plus dispersif) - à partir de n_d et ν , SPECTRUM calcule les paramètres A et B de la formule de Cauchy.

6.2.2. Quelques phénomènes notables

◆ La parité des phénomènes par rapport à $\delta_0 = 0$ n'est plus vérifiée ! Il n'existe alors plus de valeur du paramètre variable δ_0 telle que l'ordre d'interférences $p = \delta/\lambda$ soit indépendant de λ , et donc qu'on obtienne rigoureusement la couleur W . A tel point que, pour une lame de verre ordinaire dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques millimètres seulement, on a déjà perdu la possibilité d'observer des couleurs interférentielles : car quelle que soit la valeur de δ_0 choisie, p varie trop sur le spectre visible, on y trouve toujours trop de cannelures, et on ne quitte pas le blanc d'ordre supérieur.

◆ Les valeurs prédéfinies évitent bien sûr cette situation, tout en conservant les paramètres A et B du verre ordinaire. La courbe donnant p en fonction de λ présente, pour des valeurs de δ_0 supérieures à $(A-1)e$, un minimum stationnaire qui se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque δ_0 augmente. Avec les valeurs prédéfinies, l'étude commence lorsque ce minimum n'existe pas dans le visible, les cannelures sont serrées comme dans le cas précédent pour le blanc d'ordre supérieur. Pendant que δ_0 continue à augmenter, ce minimum arrive dans le spectre par son extrémité rouge ; cela se traduit par le fait que l'espacement des cannelures devient irrégulier, que le spectre se met à présenter un extremum local plus large que toutes les cannelures, particulièrement lorsqu'il se produit pour la densité de flux spectral nulle ou absolument maximale.

On voit alors des cannelures naître de cet extremum, et s'écarter de lui vers les deux extrémités du spectre, alors que l'extremum dérive lentement vers l'extrémité violette du spectre, avant d'aller se perdre dans l'ultraviolet.

Lorsqu'il n'y a qu'environ cinq cannelures dans le spectre, les couleurs interférentielles obtenues ressemblent assez à celles de Newton : c'est ce qui se passe si l'épaisseur e est très petite. Avec une épaisseur plus grande, comme celle qui est présélectionnée, on peut avoir une dizaine de cannelures dans le spectre et observer encore des couleurs interférentielles, lorsque le minimum de p est dans le visible : ceci est dû à la largeur importante de la bande sans cannelure dans le spectre au niveau de l'extremum local, mais pour un interféromètre non dispersif on n'aurait plus que du blanc d'ordre supérieur ! La couleur interférentielle observée alors est essentiellement imposée par le domaine dans lequel se trouve l'extremum, et pour un domaine donné il n'y a presque que deux teintes - selon que la bande large non cannelée centrée sur cet extremum est claire ou sombre. Voici essentiellement les couleurs interférentielles observées dans une expérience réelle, en fonction de la position de cet extremum dans le spectre :

extremum dans le	rouge	couleurs interférentielles :	turquoise vif et rose pâle
	jaune		claires et sombres achromatiques
	vert		mauve vif et turquoise pâle
	bleu		jaune pâle et blanc

La frange la plus achromatique, reconnaissable avec certitude par un observateur entraîné, est la frange sombre telle que l'extremum du spectre tombe exactement dans le jaune et l'éteigne : il n'y en a qu'une seule bien que la dérive de l'extremum quand δ_0 augmente soit assez lente, car le jaune n'occupe qu'une bande spectrale très étroite.

Les calculs de SPECTRUM redonnent des résultats semblables.

◆ Il est intéressant d'étudier les phénomènes qui se produisent avec une lame ayant une épaisseur optique presque négligeable, donnant des couleurs presque identiques à celles de Newton : par exemple, $e = 0,001 \text{ mm}$ avec l'indice moyen et la constringence prédéfinies ; on voit alors que la courbe décrite dans le diagramme des couleurs passe par du blanc pour $\delta_0 \cong 0,53 \mu\text{m}$, et qu'au delà de cette valeur la courbe revient presque sur elle-même, mais pas exactement : il n'y a pas non plus parité des phénomènes par rapport à $\delta_0 \cong 0,53 \mu\text{m}$... Avec $e = 0,005 \text{ mm}$, le passage par le blanc est obtenu pour $\delta_0 \cong 2,58 \mu\text{m}$, et l'absence de parité s'accroît. On peut aussi étudier le cas $e = 0,01 \text{ mm}$ pour $\delta_0 \geq 3 \mu\text{m}$.

◆ L'autre situation extrême est le cas d'une lame dispersive trop épaisse : à partir de quelques millimètres pour un verre ordinaire, il y a toujours trop de cannelures pour que des couleurs apparaissent. On peut utiliser SPECTRUM pour comprendre ce cas, en choisissant $e = 1,15 \text{ mm}$ pour $\delta_0 \geq 655 \mu\text{m}$.

7. Couleurs des métaux en réflexion

La couleur de la lumière réfléchiée par un métal vient de la variation du facteur de réflexion $R = \left| \frac{1-n}{1+n} \right|^2$ avec la longueur d'onde ; $n^2 \cong 1 + i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$ donne l'indice complexe n du métal, avec $i^2 = -1$, ϵ_0 la permittivité électrique du vide, σ la conductivité du métal (qui s'exprime en fonction de sa conductivité statique σ_0 , de la pulsation ω et de la durée moyenne τ entre deux collisions des électrons, par $\sigma = \frac{\sigma_0}{1-i\omega\tau}$). Le logiciel simule la couleur de la lumière réfléchiée, quand la lumière incidente est W et sous incidence normale ; son spectre est donc proportionnel à $R(\lambda)$.

7.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande :

- la conductivité statique σ_0 ($57.10^6 \Omega^{-1}.m^{-1}$ ou $S.m^{-1}$ par défaut) ;
- la durée moyenne τ entre deux collisions des électrons, appelée « temps de relaxation » ($0,525.10^{-12}$ s par défaut : les valeurs prédéfinies sont celles du cuivre).

7.2. Quelques phénomènes notables

On voit que $R(\lambda) \cong 1$ pour $\lambda > \lambda_p = 2\pi c \sqrt{\epsilon_0 \tau / \sigma_0}$ qui est dans le vert pour le cuivre, ce qui explique sa couleur orange (C désignant la célérité de la lumière dans le vide).

8. Couleurs de la biréfringence

On nomme ainsi les couleurs de la lumière émergente obtenue lorsqu'on envoie un faisceau incident collimaté de lumière blanche W sur une lame biréfringente, placée entre un polariseur et un analyseur parfaits, et que l'on fait tourner l'analyseur (ou le polariseur) ; c'est le cas classique des « interférences en lumière polarisée ». Si la différence des indices multipliée par son épaisseur est trop grande devant la longueur d'onde, on observe trop de cannelures dans le spectre, et on obtient du blanc d'ordre supérieur.

8.1. Paramètres de la simulation

SPECTRUM demande de choisir :

- la biréfringence $n_e - n_o$ (qu'il suppose non dispersive et égale à la différence des indices - celle du quartz par défaut, à savoir 0,01) ;
- l'épaisseur e de la lame (0,113 mm par défaut) ;
- l'angle β entre l'axe du polariseur et une ligne neutre de la lame (45° par défaut - voir figure 9) ;
- la valeur initiale de l'angle α entre l'axe de l'analyseur et cette ligne neutre (45° par défaut - voir figure 9) ;
- le pas de sa variation (1° par défaut, mais la valeur optimale dépend de la vitesse de votre ordinateur).
- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (5 par défaut) ;

- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

8.2. Quelques phénomènes notables

◆ SPECTRUM simule alors leur variation lorsque l'on fait tourner l'analyseur dans son plan. L'effet de cette rotation sur le spectre n'est qu'une variation périodique du contraste des cannelures sans déplacement, avec inversion de contraste chaque fois que l'analyseur est parallèle à la direction de l'un des axes de la lame ; alors le spectre est achromatique, et la lumière émergente est blanche W . La couleur de la lumière émergente n'aura donc que deux teintes, complémentaires l'une de l'autre, en fonction de l'orientation de l'analyseur, et seule sa pureté varie (voir planche en couleurs, figures 7 et 8). Sur le diagramme colorimétrique, cela se manifeste par le fait que le point représentant la couleur décrit de façon périodique un segment de droite passant par W . Les cannelures sont parfaitement sombres lorsque les directions des axes du polariseur et de l'analyseur font avec les lignes neutres de la lame un angle de 45° (modulo 90°).

Tout cela s'explique par l'expression du spectre de la lumière étudiée :

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0 \left\{ \cos^2(\alpha - \beta) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \left[\pi \frac{(n_e - n_o)e}{\lambda} \right] \right\}$$

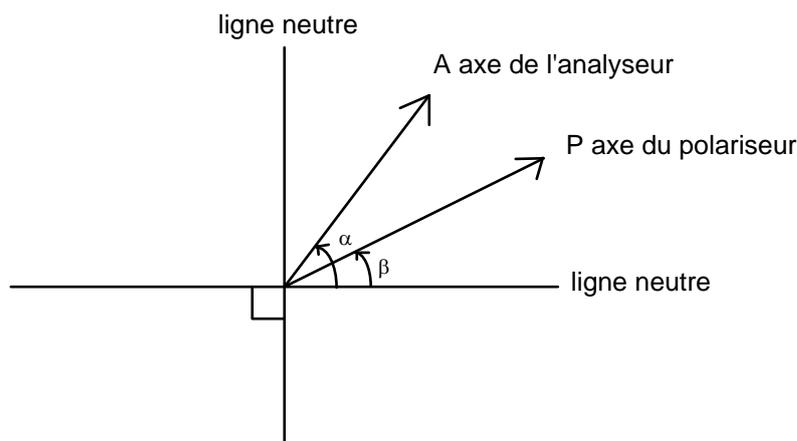


Figure 9. Disposition d'une lame biréfringente entre un polariseur et un analyseur

◆ Pour $|(n_e - n_o)e| = 0,0002mm$, il n'y a qu'une cannelure, dans le violet ; la pureté colorimétrique atteint 0,80 dans la couleur orange mais seulement 0,05 dans le bleu. Pour $|(n_e - n_o)e| = 0,00095mm$, il y a deux cannelures dans le domaine visible, et les couleurs sont plus saturées dans le bleu. Pour $|(n_e - n_o)e| = 0,002mm$, il y a trois cannelures, et les couleurs sont déjà très délavées.

9. Couleurs dues à la diffusion Christiansen, en transmission et en diffusion

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.

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 10). 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 suspension. 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 de deux liquides A et B, on déplace le point d'intersection des courbes de dispersion (voir figure 10), 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.

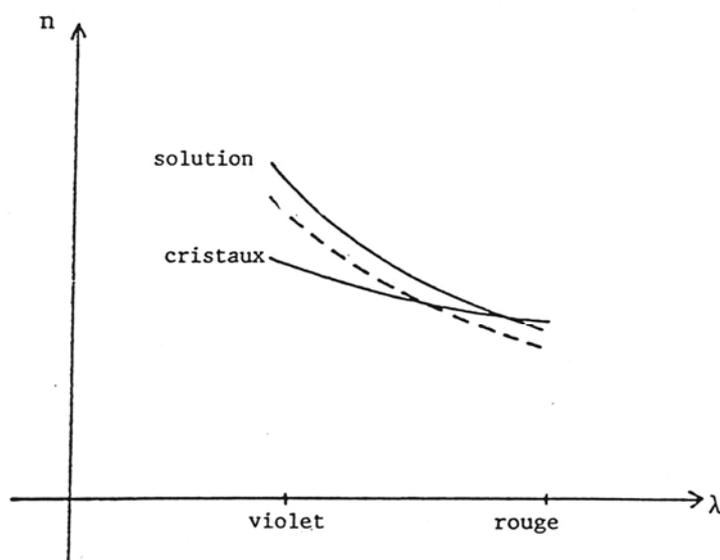


Figure 10. Principe de l'effet Christiansen : la courbe en pointillés correspond à une solution de composition différente.

Plusieurs recettes existent 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 K_2SiF_6 de potassium, 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.

Un mode opératoire détaillé, permettant une présentation pédagogique et spectaculaire de l'effet Christiansen avec du toluène, de l'éthanol et de la fluorine, est donné dans les références ci-dessous :

L. DETTWILLER, Présentation pédagogique d'un beau phénomène de diffusion : l'effet Christiansen, B.U.P. n° 757, octobre 1993 ;

L. DETTWILLER "Présentation pédagogique d'un beau phénomène de diffusion : l'effet Christiansen" Bulletin de l'ADASTA Supplément pédagogique n° 14 , avril - mai - juin 1993.

Le logiciel SPECTRUM peut simuler l'évolution des lumières diffusée et transmise en fonction de la distance d parcourue à partir de l'entrée du faisceau de lumière blanche dans la suspension (voir figure 11) de cristaux d'indice n' , pour une composition donnée de la solution d'indice n , comme pour les lumières dues à la diffusion Rayleigh. Les spectres des lumières transmise et diffusée sont respectivement

$$\Phi_T(\lambda) \cong \Phi_0 \exp \left[-\alpha \left(\frac{n-n'}{n+n'} \right)^2 d \right]$$

$$\Phi_D(\lambda) \cong \Phi_0 \beta \left(\frac{n-n'}{n+n'} \right)^2 \exp \left[-\alpha \left(\frac{n-n'}{n+n'} \right)^2 d \right]$$

en considérant que, à cause de la faible valeur de la différence des indices lorsqu'il y a une transmission notable, la diffusion est due essentiellement à la réflexion partielle de la lumière entre la solution et les cristaux, avec un facteur de réflexion variant peu en fonction de l'incidence et donc restant presque toujours proche de sa valeur

$\left(\frac{n-n'}{n+n'} \right)^2$ pour l'incidence normale ; les coefficients de diffusion α et β augmentent avec la concentration des cristaux dans la suspension. SPECTRUM calcule la variation du facteur de réflexion avec la longueur d'onde, en admettant que les indices des cristaux suivent approximativement la loi de Cauchy : $n \cong A + \frac{B}{\lambda^2}$ et

$n' \cong A' + \frac{B'}{\lambda^2}$; le facteur de réflexion s'annule pour la longueur d'onde λ_i . Lorsque d augmente à partir de zéro, on observe que le spectre de la lumière transmise passe d'un spectre blanc à un spectre quasiment gaussien, de plus en plus étroit, mais que le maximum de ce spectre reste fixe ; la couleur correspondante passe du blanc à une couleur de plus en plus pure. Quant au spectre de la lumière diffusée, il est d'abord pour $d = 0$ proportionnel au facteur de réflexion, qui croît lorsque λ s'écarte de λ_i ; puis, à cause du resserrement du spectre de la lumière transmise dont on simule la diffusion à la distance d , ce spectre ne présente plus que deux bosses de part et d'autre de λ_i , de plus en plus étroites au fur et à mesure que d augmente (voir figure 11).

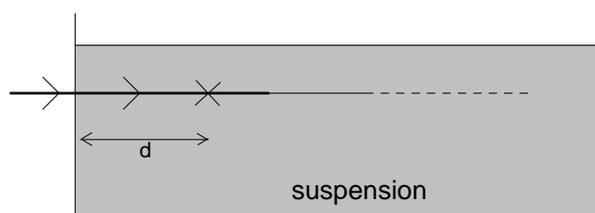


Figure 11. Expérience de diffusion Christiansen

Le logiciel SPECTRUM peut simuler aussi l'évolution des lumières diffusée et transmise en fonction de la composition de la solution, pour une distance d donnée. On considère ici le cas où la solution est le mélange de deux liquides miscibles transparents A et B, d'indices respectifs n_A et n_B ; on note x_m le titre massique du liquide A dans la solution, qui détermine sa composition. L'indice du mélange en fonction du titre massique est donné approximativement en considérant les réfractions massiques (introduites par Lorentz et Lorenz) et la loi approchée

$$\frac{1}{\mu} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cong x_m \frac{1}{\mu_A} \frac{n_A^2 - 1}{n_A^2 + 2} + (1 - x_m) \frac{1}{\mu_B} \frac{n_B^2 - 1}{n_B^2 + 2} ;$$

μ_A , μ_B et μ sont respectivement les masses volumiques des liquides A, B et du mélange, avec

$$\frac{1}{\mu} \cong \frac{x_m}{\mu_A} + \frac{1 - x_m}{\mu_B}$$

si on néglige les contractions ou dilatations de volume de l'opération de mélange.

En faisant varier le titre massique x_m dans un intervalle assez étroit et judicieusement choisi, on constate que la longueur d'onde λ_i parcourt l'intégralité du spectre visible, entraînant avec elle les spectres des lumières transmise et diffusée ; on voit donc leurs teintes changer, comme dans l'expérience décrite dans les références bibliographiques.

9.1. Paramètres de la simulation

Pour simuler cette évolution des lumières diffusée et transmise en fonction de la distance d , SPECTRUM demande :

- l'indice moyen du liquide A (1,495 par défaut) ;
- la constringence du liquide A (31 par défaut) ;
- la masse volumique du liquide A (0,866 kg/l par défaut) ;
- l'indice moyen du liquide B (1,361 par défaut) ;
- la constringence du liquide B (59 par défaut) ;
- la masse volumique du liquide B (0,794 kg/l par défaut) ;
- l'indice moyen des cristaux (1,4339 par défaut) ;
- la constringence des cristaux (92 par défaut) ;
- le titre massique de A dans le mélange (56 % par défaut) ; dans le cas où la case cochable « Titre massique de A variable » est active, il s'agit de la valeur initiale (48 % par défaut) ;
- la distance traversée d , en unités arbitraires (u.a.) car cela dépend de la concentration des cristaux dans la suspension : dans le cas où la case cochable « Titre massique de A variable » n'est pas active, il s'agit de la valeur initiale (0 u.a. par défaut), mais dans le cas contraire il s'agit d'une valeur constante (2 u.a. par défaut) ;
- le pas du calcul (0,01 u.a. par défaut pour d , 0,1 % par défaut pour x_m) ;
- le facteur de changement d'échelle servant à adapter le graphe du spectre (2 par défaut) ;
- le facteur de changement de sensibilité de la pastille ronde en bas à droite de l'écran, en ce qui concerne l'adaptation de sa luminosité dans le cas d'une restitution linéaire - dite en « luminosité absolue » (2 par défaut).

Les valeurs par défaut sont celles qui correspondent à l'étude de la suspension de fluorine dans un mélange de toluène (liquide A) et d'éthanol (liquide B).

9.2. Quelques phénomènes notables

Toutes les observations ci-dessous sont faites avec les valeurs pré-réglées.

◆ On peut noter que l'évolution de la couleur de la lumière diffusée en fonction du titre massique conduit à une belle courbe.

◆ Dans l'étude de la lumière transmise en fonction de la distance d , on constate que la longueur d'onde dominante reste quasiment constante pour $x_m = 55,00\%$ et pour $x_m = 57,45\%$.

◆ Dans l'étude de la lumière transmise en fonction de la distance d , bien que la largeur spectrale augmente avec le titre massique, la pureté colorimétrique augmente.

Bibliographie théorique

- P. FLEURY et J.P. MATHIEU, *Cours de physique générale - Lumière*, 3^{ème} édition, Eyrolles (Paris, 1970)
- G. BRUHAT, *Cours de physique générale - Optique*, 6^{ème} édition, Masson (Paris, 1992)
- L. DETWILLER, *Qu'est-ce que l'optique géométrique ? Fondements et applications*, Dunod Université (Paris, 1990)
- Y. LE GRAND, *Optique physiologique - Tome II : lumière et couleurs*, 2^{ème} édition, Masson (Paris, 1972)
- P. KOWALISKI, *Vision et mesure de la couleur*, 2^{ème} édition, Masson (Paris, 1990)

Textes d'aide

Aides pour la page de menu

COULEURS D'UN SPECTRE RECTANGULAIRE

Il s'agit des couleurs obtenues lorsque l'on isole, dans un spectre blanc, une bande spectrale. On étudie l'évolution de ces couleurs en fonction de la largeur et de la position de cette bande spectrale.

COULEURS DE LA DIFFUSION RAYLEIGH

Il s'agit des couleurs dues à la diffusion Rayleigh d'un faisceau de lumière blanche, c'est à dire la diffusion par des particules de dimensions très petites vis à vis de la longueur d'onde. Son efficacité est inversement proportionnelle à la longueur d'onde à la puissance quatre. Le bleu du ciel et le rouge du Soleil couchant sont dus à ce phénomène.

COULEURS DU CORPS NOIR

Il s'agit des couleurs dues à l'excitation thermique d'un corps idéalement absorbant (d'où son nom de corps noir). Les filaments des lampes à incandescence, les étoiles, se comportent approximativement comme un corps noir.

COULEURS DE LA POLARISATION ROTATOIRE

Il s'agit des couleurs données par un faisceau de lumière blanche, après traversée d'une lame optiquement active placée entre un polariseur et un analyseur.

COULEURS DE LA FIGURE DE DIFFRACTION DE FRAUNHOFER D'UNE FENTE

Il s'agit des couleurs observées dans les franges de diffraction de Fraunhofer d'une fente rectangulaire, éclairée en lumière blanche.

COULEURS INTERFERENTIELLES

Il s'agit des couleurs observées dans les franges d'interférences à deux ondes, avec une source de lumière blanche.

COULEURS DES METAUX EN REFLEXION

Il s'agit de la couleur de la lumière réfléchiée par un métal, éclairé par un faisceau de lumière blanche sous incidence normale.

COULEURS DE LA BIREFRINGENCE

Il s'agit des couleurs données par un faisceau de lumière blanche, après traversée d'une lame biréfringente placée entre un polariseur et un analyseur.

COULEURS DE LA DIFFUSION CHRISTIANSEN

Il s'agit des couleurs dues à la diffusion Christiansen d'un faisceau de lumière blanche, c'est à dire la diffusion par une suspension de cristaux transparents dans une solution transparente, mais dont les courbes de dispersion se croisent. Ce phénomène est utilisé pour réaliser des filtres optiques ayant une courbe de transmission réglable.

Aides pour chaque situation physique

Couleurs d'un spectre rectangulaire

Longueur d'onde moyenne

Elle caractérise le centre de la bande spectrale de profil rectangulaire. Il est repéré par sa longueur d'onde, en nanomètres (10^{-9} mètres). Si on choisit «Variation de la longueur d'onde moyenne », alors il s'agit de la longueur d'onde moyenne initiale.

Largeur spectrale

Il s'agit de la différence entre les longueurs d'onde maximale et minimale du spectre considéré. Elle est demandée en nanomètres (10^{-9} mètres). Si on choisit «Variation de la largeur spectrale », alors il s'agit de la largeur spectrale initiale.

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (longueur d'onde moyenne ou largeur spectrale) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

Couleurs de la diffusion de Rayleigh

Distance initiale

Le logiciel simule l'évolution des couleurs diffusées ou transmises lorsqu'un rayon de lumière blanche W pénètre dans un milieu provoquant une diffusion Rayleigh (exemple de couleurs : le bleu du ciel et le rouge des rayons du Soleil couchant). Ces couleurs dépendent de la distance parcourue par le rayon depuis son entrée dans le milieu. Le paramètre demandé est la distance initiale pour le calcul ; comme le résultat dépend de l'efficacité de diffusion du milieu, la distance est exprimée en unités arbitraires (u.a.).

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (distance traversée par un rayon lumineux) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

Couleurs du corps noir

Température initiale

Le logiciel simule l'évolution, en fonction de la température, de la lumière émise par un corps idéalement absorbant, dit « corps noir ». On demande ici la valeur initiale de cette température pour le calcul. Cette température s'exprime en Kelvins (degrés Celsius + 273,15).

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (température) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

Couleurs de la polarisation rotatoire

Pouvoir rotatoire

Les milieux dits optiquement actifs, quand ils sont traversés par un faisceau de lumière polarisée rectilignement, font tourner la direction de polarisation de celui-ci d'un angle proportionnel à l'épaisseur traversée. Le pouvoir rotatoire est cet angle de rotation (algébrique) par unité de longueur ; il est compté positivement si la rotation est vue vers la gauche par un observateur recevant la lumière (milieu lévogyre), négativement si la rotation est vue vers la droite (milieu dextrogyre). Il dépend beaucoup de la longueur d'onde.

Epaisseur de la lame

On considère que le milieu optiquement actif est une lame à faces parallèles, dont il faut préciser l'épaisseur.

Longueur d'onde moyenne de résonance

Il s'agit d'un paramètre de l'expression du pouvoir rotatoire en fonction de la longueur d'onde (consulter la notice chap. III, § 4.1.).

Angle initial

Pour observer des couleurs il faut placer la lame optiquement active entre un polariseur et un analyseur ; la couleur dépend de l'angle entre leurs axes. On demande ici la valeur initiale de cet angle pour le calcul.

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (angle entre les axes de l'analyseur et du polariseur) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

Couleurs de la figure de diffraction de Fraunhofer d'une fente

Valeur initiale de l'angle par la largeur

« La diffraction est tout écart des rayons lumineux à leur trajectoire rectiligne qui ne s'explique ni par réflexion, ni par une réfraction » (SOMMERFELD). Pour la diffraction de Fraunhofer, on étudie la distribution de lumière

lorsque l'on s'écarte transversalement du point de convergence du faisceau prévu par l'optique géométrique. La figure de diffraction de Fraunhofer par un diaphragme circulaire est importante pour l'étude du pouvoir de résolution des instruments d'optique ; on l'appelle tache d'Airy. Dans le cas de la figure de diffraction de Fraunhofer par une fente très longue, l'éclairement pour une longueur d'onde s'exprime facilement en fonction du produit de l'angle de diffraction par la largeur de la fente (voir notice chap. III, § 5.1.). On demande ici la valeur initiale de ce paramètre, en $^{\circ}.mm$.

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (angle de diffraction par largeur de la fente) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

Couleurs interférentielles

Contraste

Il s'agit, ici, du contraste des franges d'interférences obtenues avec une lumière monochromatique : il est défini par le rapport de la différence des intensités lumineuses (monochromatiques) des franges claires et sombres sur la somme de ces intensités.

Déphasage en degrés

Les vibrations lumineuses qui interfèrent peuvent être déphasées pour d'autres raisons que la différence des chemins optiques parcourus entre un point source et un point d'observation : par exemple un déphasage φ de 180° dû à une réflexion vitreuse, faisant que l'on observe les teintes de Newton à centre noir (au lieu des teintes à centre blanc lorsque φ est nul). Le logiciel demande la valeur de ce déphasage φ .

Valeur initiale de la différence de marche sans lame dispersive

C'est la variation, avec le point d'observation, de la différence de marche (des deux rayons qui interfèrent au point d'observation), qui est responsable de l'apparition des franges d'interférences ; le logiciel étudie la variation de la couleur d'une frange à l'autre, c'est à dire la variation de la couleur interférentielle en fonction de la différence de marche. Le logiciel demande la valeur initiale, en μm , de cette différence de marche en l'absence de lame dispersive (voir notice chap. III, § 6.1.1., ou 6.2. et 6.2.1. selon le cas).

Epaisseur de la lame en millimètres

Il s'agit de l'épaisseur, en mm, d'une lame dispersive (c'est à dire une lame dont l'indice de réfraction varie avec la longueur d'onde).

Indice moyen pour la raie d de l'hélium

La raie d de l'hélium est une raie jaune à 587,6 nm de longueur d'onde. Comme l'indice de la lame dispersive dépend de la longueur d'onde, sa valeur pour cette raie (située approximativement au milieu du spectre visible) est appelée indice moyen de la lame.

Constringence

La constringence d'un milieu est un nombre (sans unité) qui donne une idée de la dispersion de ce milieu ; plus le milieu est dispersif et plus sa constringence est faible, car elle est définie comme le rapport de son indice moyen (pour la raie d de l'hélium) moins 1, sur son indice dans le bleu (pour la raie F de l'hydrogène) moins son indice dans le rouge (pour la raie C de l'hydrogène). Elle est de l'ordre de 60 pour le verre ordinaire, mais de 30 pour le cristal.

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (différence de marche sans lame dispersive) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

Couleur des métaux en réflexion

Conductivité statique

La conductivité (électrique) est l'inverse de la résistivité. Rappelons que pour un conducteur homogène de section constante, sa résistivité est égale à sa résistance multipliée par sa section et divisée par sa longueur; son unité dans le système international est donc l'Ohm mètre. La conductivité statique est la conductivité mesurée en courant continu.

Temps de relaxation

C'est la durée moyenne séparant deux collisions consécutives d'un électron de conduction.

Couleurs de la biréfringence

Biréfringence

Pour un milieu de structure anisotrope l'indice de réfraction dépend de la polarisation de la lumière : on dit alors que le milieu est biréfringent. Sa biréfringence est la variation maximale de l'indice en fonction de la polarisation (pour un milieu uniaxe) ; on suppose ici que cette valeur est indépendante de la longueur d'onde.

Epaisseur de la lame

On considère que le milieu biréfringent est une lame à faces parallèles, dont il faut préciser l'épaisseur.

Angle entre le polariseur et une ligne neutre

Pour observer des couleurs il faut placer la lame biréfringente entre un polariseur et un analyseur ; la couleur dépend de l'angle entre l'axe du polariseur et une des lignes neutres de la lame (les lignes neutres sont les directions des polarisations rectilignes inchangées par la propagation au travers de la lame). On demande ici la valeur de cet angle pour le calcul.

Angle initial entre l'analyseur et cette ligne neutre en degrés

Pour observer des couleurs il faut placer la lame biréfringente entre un polariseur et un analyseur ; la couleur dépend de l'angle entre l'axe de l'analyseur et une des lignes neutres de la lame (les lignes neutres sont les directions des polarisations rectilignes inchangées par la propagation au travers de la lame). On demande ici la valeur initiale de cet angle pour le calcul.

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (angle entre l'analyseur et une ligne neutre) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

Couleurs de la diffusion Christiansen

Indice du liquide A

La raie d de l'hélium est une raie jaune à 587,6 nm de longueur d'onde. Comme l'indice de réfraction du liquide A dépend de la longueur d'onde, sa valeur pour cette raie (située approximativement au milieu du spectre visible) est appelée indice de réfraction moyen du liquide A.

Constringence du liquide A

La constringence d'un milieu est un nombre (sans unité) qui donne une idée de la dispersion de ce milieu ; plus le milieu est dispersif et plus sa constringence est faible, car elle est définie comme le rapport de son indice moyen (pour la raie d de l'hélium) moins 1, sur son indice dans le bleu (pour la raie F de l'hydrogène) moins son indice dans le rouge (pour la raie C de l'hydrogène). Elle est de l'ordre de 60 pour le verre ordinaire, mais de 30 pour le cristal.

Masse volumique du liquide A

Pour un corps homogène, c'est le rapport de la masse du corps à son volume. Ce paramètre intervient dans le calcul de l'indice de la solution, qui est un mélange des liquides A et B.

Indice du liquide B

La raie d de l'hélium est une raie jaune à 587,6 nm de longueur d'onde. Comme l'indice de réfraction du liquide B dépend de la longueur d'onde, sa valeur pour cette raie (située approximativement au milieu du spectre visible) est appelée indice de réfraction moyen du liquide B.

Constringence du liquide B

La constringence d'un milieu est un nombre (sans unité) qui donne une idée de la dispersion de ce milieu ; plus le milieu est dispersif et plus sa constringence est faible, car elle est définie comme le rapport de son indice moyen (pour la raie d de l'hélium) moins 1, sur son indice dans le bleu (pour la raie F de l'hydrogène) moins son indice dans le rouge (pour la raie C de l'hydrogène). Elle est de l'ordre de 60 pour le verre ordinaire, mais de 30 pour le cristal.

Masse volumique du liquide B

Pour un corps homogène, c'est le rapport de la masse du corps à son volume. Ce paramètre intervient dans le calcul de l'indice de la solution, qui est un mélange des liquides A et B.

Indice des cristaux

La raie d de l'hélium est une raie jaune à 587,6 nm de longueur d'onde. Comme l'indice de réfraction des cristaux dépend de la longueur d'onde, sa valeur pour cette raie (située approximativement au milieu du spectre visible) est appelée indice de réfraction moyen des cristaux.

Constringence des cristaux

La constringence d'un milieu est un nombre (sans unité) qui donne une idée de la dispersion de ce milieu ; plus le milieu est dispersif et plus sa constringence est faible, car elle est définie comme le rapport de son indice moyen (pour la raie d de l'hélium) moins 1, sur son indice dans le bleu (pour la raie F de l'hydrogène) moins son indice dans le rouge (pour la raie C de l'hydrogène). Elle est de l'ordre de 60 pour le verre ordinaire, mais de 30 pour le cristal.

Titre massique de A dans le mélange

La solution est un mélange des liquides A et B. Le titre massique de A dans le mélange est le rapport de la masse du liquide A dans la solution sur la masse totale de la solution. Dans le cas où la case cochable « Titre massique de A variable » est active, le titre massique est la variable de calcul ; on doit alors donner le titre massique initial.

Distance traversée

Le logiciel simule l'évolution des couleurs diffusées ou transmises lorsqu'un rayon de lumière blanche W pénètre dans une suspension provoquant une diffusion Christiansen. Ces couleurs dépendent de la distance parcourue par le rayon depuis son entrée dans le milieu. Le paramètre demandé est la distance initiale pour le calcul ; comme le résultat dépend de l'efficacité de diffusion du milieu, la distance est exprimée en unités arbitraires (ua). Dans le cas où la case cochable « Titre massique de A variable » n'est pas active, la distance est la variable de calcul ; on doit alors donner la distance initiale.

Pas du calcul

Il s'agit de la différence du paramètre variable (soit le titre massique du liquide A dans le mélange, soit la distance traversée) entre deux calculs consécutifs.

Facteur de changement d'échelle

Il s'agit du facteur de dilatation ou de contraction de l'échelle du graphe du spectre (densité spectrale de flux énergétique) en haut à droite de l'écran, lorsque son échelle devient inadaptée.

Facteur de changement de sensibilité

Ce facteur concerne la sensibilité avec laquelle est restituée, sur la pastille ronde en bas à droite de l'écran, l'intensité (luminance lumineuse) de la lumière étudiée. Lorsque la luminosité de la pastille devient trop faible, la sensibilité de cette restitution est multipliée par une puissance de ce facteur. Lorsque la luminosité dépasse les possibilités de restitution de l'écran, la sensibilité est divisée par une puissance de ce facteur.

ANNEXE

	σ_m	NOIR	BLANC
PREMIÈRE ORDRE	40	Gris de fer.	Blanc.
	97	Gris lavande.	Blanc jaunâtre.
	158	Bleu gris.	Blanc brunâtre.
	218	Gris plus clair.	Brun jaune.
	234	Blanc verdâtre.	Brun.
	259	Blanc.	Rouge clair.
	267	Blanc jaunâtre.	Rouge carmin.
	275	Jaune paille pâle.	Brun rouge sombre.
	281	Jaune paille.	Violet sombre.
	306	Jaune clair.	Indigo.
	332	Jaune vif.	Bleu.
430	Jaune brun.	Bleu gris.	
505	Orangé rougeâtre.	Vert bleuâtre.	
536	Rouge chaud.	Vert pâle.	
551	Rouge plus foncé.	Vert jaunâtre.	
DEUXIÈME ORDRE	565	Pourpre.	Vert plus clair.
	575	Violet.	Jaune verdâtre.
	589	Indigo.	Jaune d'or.
	664	Bleu de ciel.	Orangé.
	728	Bleu verdâtre.	Orangé brunâtre.
	747	Vert.	Rouge carmin clair.
	826	Vert plus clair.	Pourpre.
	843	Vert jaunâtre.	Pourpre violacé.
	866	Jaune verdâtre.	Violet.
	910	Jaune pur.	Indigo.
	948	Orangé.	Bleu sombre.
998	Orangé rougeâtre vif.	Bleu verdâtre.	
1101	Rouge violacé foncé.	Vert.	
TROISIÈME ORDRE	1128	Violet bleuâtre clair.	Vert jaunâtre.
	1151	Indigo.	Jaune sale.
	1258	Bleu (teinte verdâtre.)	Couleur chair.
	1334	Vert de mer.	Rouge brun.
	1376	Vert brillant.	Violet.
	1426	Jaune verdâtre.	Bleu violacé grisâtre.
		

Échelle des teintes de Newton, à centre noir ou blanc, en fonction de la différence de marche δ en nanomètres (dans Georges BRUHAT (1954) – Cours de Physique Générale – Optique – Masson).