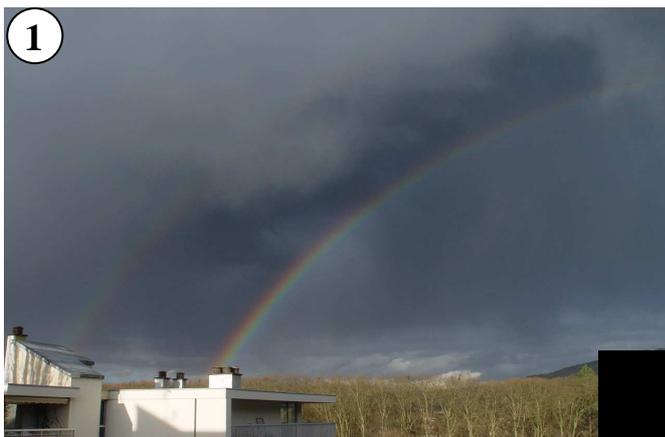


# THÈME : SPECTROSCOPIE

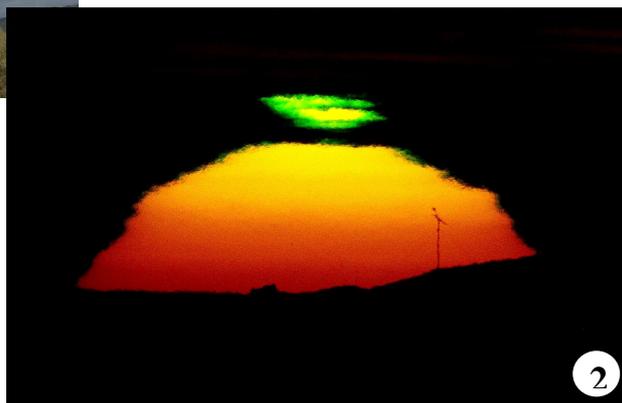


1

- 1** Arc-en-ciel.  
On voit les deux arcs sur lesquels l'ordre des couleurs est inversé.

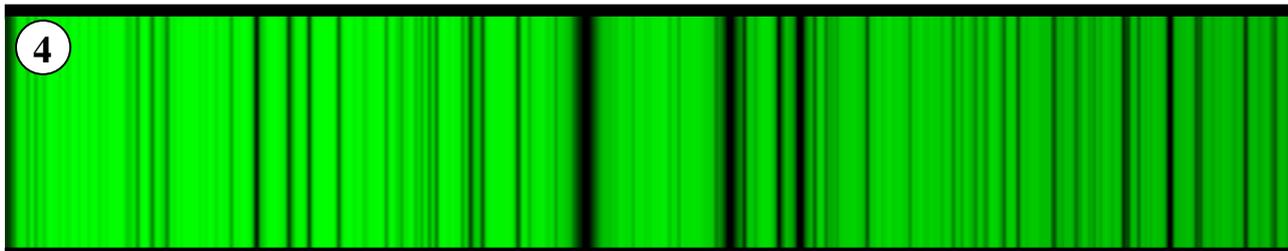
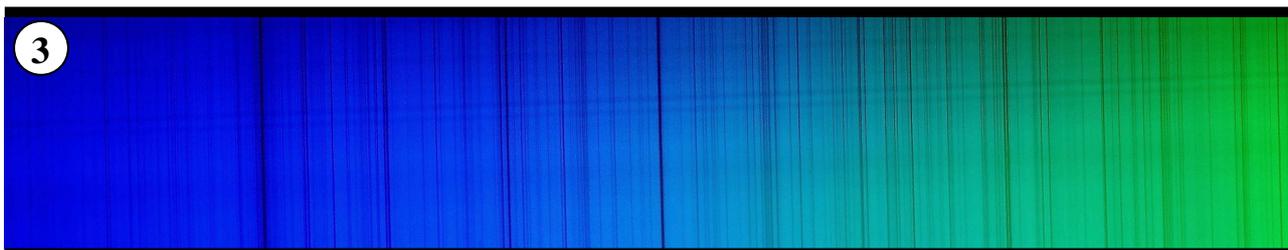
*Photo Françoise Suagher*

- 2** Coucher de Soleil :  
Par réfraction l'image verte apparaît au dessus de l'image rouge  
*Photo Jean-Paul Rémy-Martin*



2

- 3** Spectre du Soleil : autour de la raie H $\beta$ . *Photo Roger Meunier*  
**4** Spectre du Soleil : triplet du magnésium. *Photo Roger Meunier*



## Les Cahiers Clairaut et la spectroscopie

Pour compléter ce court dossier, de nombreux articles sont déjà parus dans les Cahiers Clairaut. Ils sont tous accessibles (sauf le premier) sur le site du CLEA (<http://www.inrp.fr/Access/clea>). En voici quelques-uns :

**CC 128** Un atelier astro de lycée en observatoire professionnel (réalisation et analyse de spectres stellaires par des lycéens).

**CC 127** Spectroscopie astronomique à l'aide d'un spectromètre à fibre optique (des spectres stellaires de qualité réalisés avec du matériel d'observation d'amateur).

**CC 123** La spectrographie (le tour des utilisations de la spectrographie en astronomie).

**CC 122** Dossier spectro avec un article sur les spectrographes, sur la réalisation de spectres avec le "Lhires 3", sur les spectres radio et des idées de travaux sur le spectre du Soleil.

**CC 111** Les spectres enfin compris (petit cours de spectroscopie).

**CC 100** Jeux de réseaux et mystère de nébuleuse (le spectre des nébuleuses).

**CC 98** Un spectrographe solaire et Activité en seconde : Étude d'un texte de Janssen (à propos de spectres réalisés pendant une éclipse de Soleil en 1868) et Les étoiles Be.

**CC 99** Les étoiles Be (suite) et Huit expériences simples pour débiter en spectro.

# Spectroscopie : notions de base

Jean Ripert

*Comme le dit le titre d'un fascicule du CLEA "La lumière messagère des astres", la plupart des informations que nous avons de l'Univers viennent de ce que l'Homme a pu déceler dans la lumière reçue. Qu'est-ce donc que cette lumière ?*

## Historique

**Isaac Newton** (25 décembre 1642 / 20 mars 1727 ou dans le calendrier grégorien non encore adopté en son pays 4 janvier 1643 / 31 mars 1727).

En 1666, Newton décrit l'expérience faite en décomposant la lumière blanche du Soleil (voir page XX) à l'aide d'un prisme. Ce n'est sûrement pas la première fois que cette décomposition est observée. Ibn al Haytham (965 - 1038) l'a certainement observée, lui qui a étudié en détail la réfraction. Dans l'Antiquité dès la fabrication d'un verre transparent, le phénomène a dû se dévoiler. L'arc-en-ciel était également à la disposition de tous, mais le lien avec la lumière n'était pas fait ou mal interprété.

Newton décrit son expérience dans "Optiks" en 1704. Dès 1662, il taille des lentilles pour réaliser une lunette astronomique en essayant de supprimer le phénomène coloré qui apparaît sur le bord des images (c'est en abandonnant cette idée de lunette qu'il construisit un télescope).

La lumière traversant un prisme donne un ensemble de couleurs appelé spectre (figure 1). Pour Newton ces couleurs étaient contenues dans la lumière blanche. Chaque couleur est déviée différemment, ce qui permet de les séparer. L'ensemble de ces couleurs donne la lumière blanche.

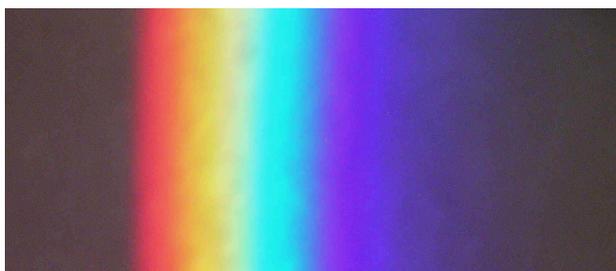


Fig.1. Dispersion de la lumière par un prisme.

Chacun connaît ce disque (appelé disque de Newton) et comportant des secteurs colorés (les couleurs de l'arc-en-ciel) et qui apparaît blanc (un blanc "sale") lorsqu'on le fait tourner rapidement autour de son axe<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> <http://acces.inrp.fr/clea/lunap/Couleurs/CoulActiv.html>

Grâce à la persistance rétinienne, l'ensemble des couleurs au niveau des cellules réceptrices de la rétine (cônes) est traduit par le cerveau en une sensation de blanc. Pour avoir cette sensation de blanc, il suffit même de trois couleurs : rouge - vert - bleu (pour vérifier on peut observer les luminophores sur une zone blanche d'un téléviseur allumé).

Ce spectre permet d'analyser la lumière que l'on reçoit d'un objet. C'est un spectre continu : les différentes couleurs se juxtaposent sans interruption.

Afin de mieux distinguer les différentes nuances de couleur, il faut étaler au maximum le spectre.

**Joseph von Fraunhofer** (1787 en Bavière – 1826 Munich).

En 1816, ce physicien allemand réalise un spectre du Soleil. Surprise, sur le spectre continu, apparaissent des raies plus ou moins sombres appelées depuis raies de Fraunhofer (raies déjà observées en 1802 par William Hyde Wollaston). Il en distingue 570, les plus intenses sont nommées par les lettres de A à K (figure 2).

Il invente le réseau de diffraction qui produit également la décomposition de la lumière.

*Pourquoi certaines couleurs sont absentes ? Ces raies sombres sont-elles dues à l'atmosphère terrestre ou proviennent-elles du Soleil ?*

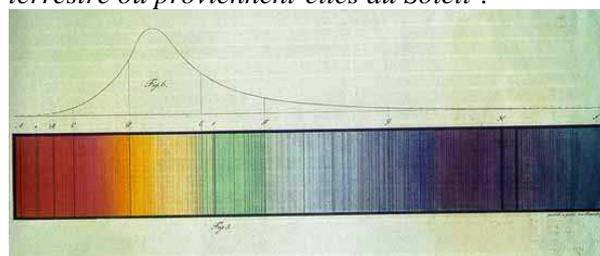


Fig.2. Raies de Fraunhofer.

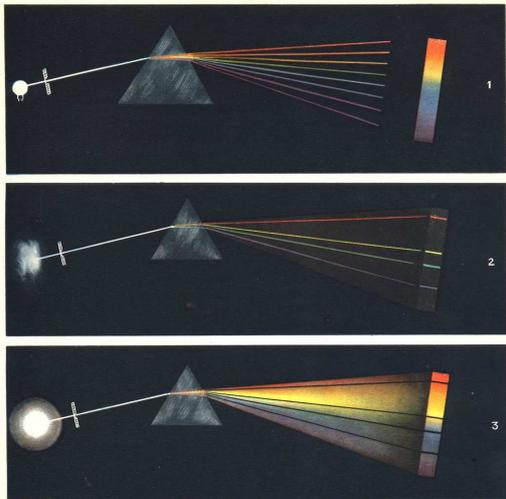
**Gustav Robert Kirchhoff** (1824-1887)

Il travaille beaucoup sur le rayonnement avec entre autre Robert Bunsen (1811 - 1899) à partir de 1860. Cette recherche lui permet d'énoncer des lois qui portent son nom :

Un objet chaud incandescent produit un spectre continu,

Un gaz peu dense et chaud produit un spectre de raies de différentes couleurs (donc non continu),

Un objet chaud entouré d'un gaz froid produit un spectre continu présentant des raies sombres, il y a donc absence de certaines couleurs (figure 3).



**Fig.3.** Les différents types de spectres  
L'astronomie de Lucien Rudaux et Gérard de Vaucouleur.

C'est la naissance de la spectroscopie. La seconde loi nous dit que le spectre de raies d'un élément chimique correspond à sa carte d'identité. Si dans la lumière émise par un mélange gazeux chaud, on reconnaît toutes les raies d'émission d'un élément chimique, c'est que celui-ci est présent dans le mélange.

Ainsi cette analyse spectrale a permis de découvrir entre autre, l'indium, le gallium, le germanium.

La troisième loi permet d'expliquer les observations de Fraunhofer, les raies sombres présentes dans le spectre du Soleil. Celles-ci sont dues à des éléments chimiques présents dans les couches externes et qui absorbent certaines couleurs (les mêmes que celles qu'ils auraient émis).

En août 1868, Jules Janssen découvre dans le spectre de la couronne solaire des raies inconnues dues à un nouvel élément chimique qui sera appelé hélium (découvert sur Terre 27 ans plus tard par Ramsay).

Lors de l'éclipse totale de Soleil de 1869, on découvrit une raie d'émission verte qui fut attribuée à un nouvel élément le coronium. En fait, on comprit en 1933 qu'il s'agissait de fer ayant perdu 13 électrons.

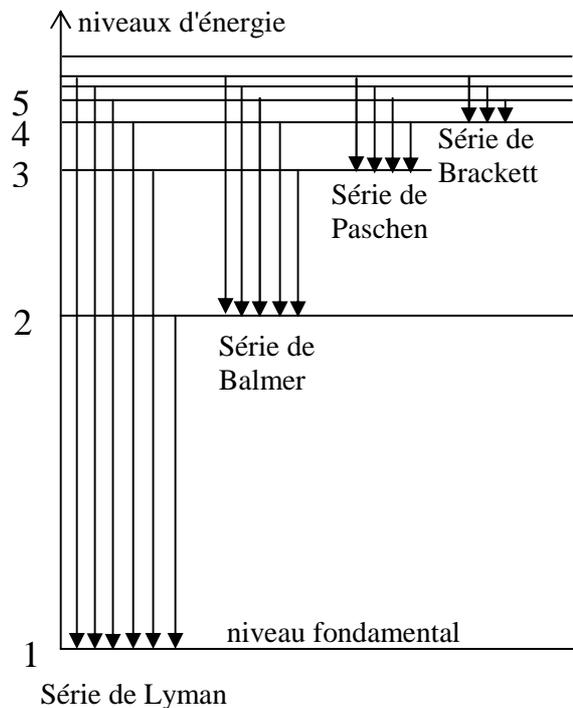
*Dans le cas d'un spectre de raies, pourquoi l'élément chimique n'émet que certaines couleurs et pas toutes ?*

## Structure de l'atome

Pour comprendre ces phénomènes, il a fallu cerner la structure de la matière, constituée d'atomes. Ernest Rutherford donna une première approche de

la structure de l'atome en 1911. Celle-ci évolua grâce aux apports de Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Max Planck.

Considérons l'atome le plus simple : l'atome d'hydrogène. Il est constitué d'un proton (noyau) et d'un électron. Cet atome ne peut pas avoir n'importe quel niveau d'énergie. On dit que l'énergie de l'atome est quantifiée, c'est-à-dire que les échanges d'énergie ne peuvent se faire que par paquets discontinus.



**Fig.4.** Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.

Quand l'atome est dans son état stable, son niveau d'énergie correspond au niveau 1 de la figure 4. Lors de chocs entre atomes ou avec un photon, il peut prendre la quantité d'énergie nécessaire à son passage à un état excité (niveaux 2, 3, ...). C'est ce qui se passe dans un gaz chaud sous faible pression. Mais l'atome ne reste pas dans cet état et revient à son niveau 1 en rendant l'énergie  $\Delta E$  correspondant à l'écart entre le niveau excité et le niveau fondamental. Cette énergie rendue apparaîtra sous forme d'une lumière colorée caractérisée par un photon de fréquence  $\nu$  tel que  $\Delta E = h \nu$ . Ceci donnera une raie brillante dans le spectre.

Ainsi le retour depuis les niveaux excités vers le niveau fondamental génère un ensemble de raies correspondant à la série de Lyman. Les échanges d'énergie correspondant à ces transitions donnent des photons de fréquence élevée (raies dans l'ultraviolet).

Le retour vers le niveau 2 (série de Balmer) donnera des raies dans le visible, ce sont les

fameuses raies  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$ ,  $H_\epsilon$ . Les raies de la série de Paschen apparaissent dans l'infrarouge. Ceci explique les spectres de raies d'émission.

Comment expliquer un spectre d'absorption ?

Supposons que la lumière du Soleil (ensemble de nombreuses couleurs, ou radiations de différentes longueurs d'onde ou de photons de différentes fréquences) traverse un nuage d'hydrogène. Lors de l'interaction lumière-atomes, ceux-ci vont être excités en prélevant les photons correspondants aux transitions  $n_1-n_2$ ,  $n_1-n_3$ , ...  $n_2-n_3$ ,  $n_2-n_4$ , ...  $n_3-n_4$ , .... Si nous analysons cette lumière venant du Soleil, les couleurs (radiations, photons) correspondant à ces transitions seront manquantes et donc dans le spectre des raies sombres apparaîtront.

Évidemment, ces atomes excités vont revenir à leur niveau fondamental en émettant des photons, mais la plupart du temps dans d'autres directions que celle de l'observateur.

## Décomposition de la lumière par un prisme

Dans un milieu homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite. Par contre quand elle rencontre un dioptre (surface de séparation entre deux milieux transparents différents), elle subit une fracture (figure 5), c'est le phénomène de réfraction. La relation de Snell-Descartes permet de calculer l'angle de réfraction ( $r$ ) connaissant l'angle d'incidence ( $i$ ) :  $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

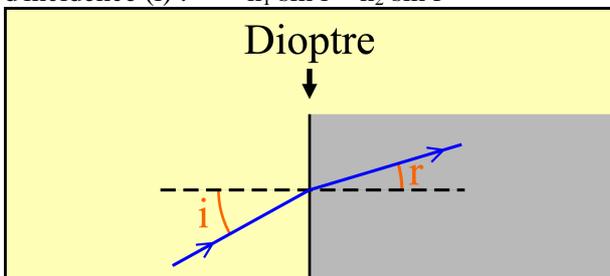


Fig.5. Réfraction d'un rayon lumineux.

Dans le cas d'un prisme en verre,  $n_1$  est l'indice de réfraction de l'air (très voisin de 1) et  $n_2$  celui du verre.

La dispersion de la lumière vient du fait que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la radiation qui traverse le prisme.

La loi de Cauchy donne une bonne approximation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde :  $n_\lambda = a + b/\lambda^2$

Si  $\lambda$  croît,  $n_\lambda$  diminue, donc  $\sin r$  augmente et pour un prisme donné les angles de réfraction  $r$  vont croître quand la longueur d'onde augmente. Ainsi le rouge sera moins dévié que le bleu, contrairement au réseau.

Chaque radiation sera déviée sur le second dioptre du prisme

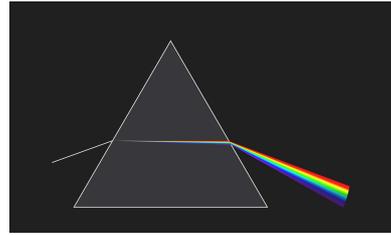


Fig.6. Dispersion de la lumière blanche par un prisme.

## Par un réseau

Dans le cas d'un réseau le phénomène n'est pas le même.

Un réseau est constitué d'un ensemble de traits parallèles réalisés par gravure ou par holographie sur un support transparent (réseau par transmission) ou sur un miroir (réseau par réflexion).

Chaque fente va diffracter la lumière et les radiations diffractées par l'ensemble des fentes vont donner des interférences constructives et destructives faisant apparaître de la lumière dans des directions définies par l'angle  $\alpha$  tel que :

$$\sin \alpha = k \lambda / a$$

$k$  est l'ordre de diffraction ; 0, 1, 2, ...

$\lambda$  la longueur d'onde de la radiation

$a$  le pas du réseau ou la distance entre deux traits.

L'encadré page suivante donne plus de détails sur le fonctionnement du réseau.

Nous avons simplifié en prenant un faisceau se déplaçant dans l'air et arrivant perpendiculairement au réseau (cas utilisé le plus souvent par les amateurs).

Si on utilise un laser rouge, la lumière est monochromatique ( $\lambda_R$ ). Pour l'ordre 0,  $\alpha = 0$ , la lumière n'est pas déviée. Pour les autres ordres nous aurons des taches rouges dans les directions correspondantes aux angles  $\alpha_{1R}$ ,  $\alpha_{2R}$ ,  $\alpha_{3R}$ , tel que :

$$\sin \alpha_{1R} = \lambda_R / a ; \sin \alpha_{2R} = 2 \lambda_R / a ; \sin \alpha_{3R} = 3 \lambda_R / a$$

On comprend aisément que pour une lumière blanche, chaque radiation va subir le même phénomène, mais les angles  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  seront différents suivant la longueur d'onde. Ainsi les couleurs seront séparées, le bleu sera moins dévié que le rouge puisque  $\lambda_B < \lambda_R$

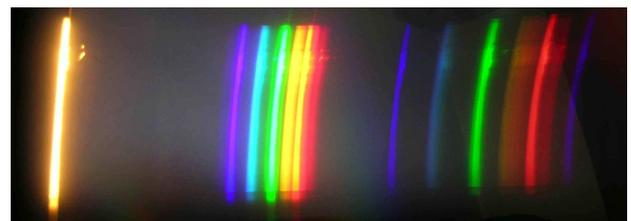


Fig.7. Spectre du lampe basse consommation. On distingue les ordres 0, 1 et 2 ainsi que le bleu de l'ordre 3.

## Comment obtenir un spectre ?

### Observation directe

1 À l'aide d'un CD qui se comporte comme un réseau

2 À l'aide d'un morceau de réseau monté dans un cache diapo et placé devant l'œil. On peut alors :

- observer une petite ampoule de lampe de poche (spectre continu),
- mettre en évidence l'évolution du spectre en faisant varier l'intensité du courant traversant la lampe,
- observer la flamme d'un bec Bunsen dans laquelle on introduit des sels de sodium [cristaux ou tige de verre] (jaune), un fil de cuivre (vert), ...
- observer une lampe spectrale (spectre de raies d'émission),
- observer une lampe à économie d'énergie (spectre continu - fluorescence du dépôt blanc et spectre de raies d'émission),

Si la source lumineuse est trop étendue, on place une fente (deux cartons suffisent) devant celle-ci.

3 à l'aide d'un spectroscope (tube de carton muni

d'une fente et d'un réseau) il est possible d'observer les raies d'absorption dans le spectre du Soleil (viser le ciel ou un nuage). Voir l'article page 23.

### Spectres sur un écran

1. À l'aide d'un prisme

2. À l'aide d'un rétroprojecteur : on réalise une fente sur la vitre du rétroprojecteur à l'aide de deux feuilles cartonnées et on place le réseau sur la lentille (attention à l'élévation de température du réseau)

3. À l'aide d'un projecteur diapos : on place dans le projecteur une diapo fente réalisée avec deux morceaux de lame de rasoir, on fait le point sur l'écran puis on place le réseau devant l'objectif du projecteur,

4. À l'aide d'un vidéo projecteur : on projette l'image d'une fente et on place un réseau devant l'objectif.

5. Il est possible d'obtenir des spectres d'absorption en plaçant dans un des dispositifs précédents (entre le réseau et l'écran) des solutions colorées. ■

### Spectre donné par un réseau

Si on éclaire en lumière monochromatique deux fentes, chacune va se comporter comme une source secondaire (diffraction) et des interférences constructives vont se produire dans des directions privilégiées (figure 1). Les pastilles jaunes, vertes et bleues de la figure 1 indiquent les points où les interférences sont constructives. Ces points sont quasiment alignés surtout quand la distance est grande par rapport à la longueur d'onde.

Dans le cas d'un réseau le nombre de fentes est beaucoup plus important (par exemple 750 par mm). De la même façon, il y aura des interférences dans des directions privilégiées (figure 2).

Attention les figures 1 et 2 ne sont pas à la même échelle.

Dans le cas d'un faisceau provenant d'un laser rouge de longueur d'onde  $\lambda_R$  pour qu'il y ait interférences constructives dans la direction  $\theta$ , il faut que les faisceaux passant par les fentes 1 et 2 soient déphasés de  $2\pi$  ou que leur différence de marche  $\Delta$  soit un nombre entier de longueur d'onde  $k\lambda_R$ . Toutes les fentes donneront des interférences constructives dans la direction  $\theta$ .

Or  $\Delta = a \sin \theta_R$  relation dans laquelle  $a$  est le pas du réseau (distance entre deux fentes). Donc  $a \sin \theta = k\lambda$

Pour  $k = 0$   $\sin \theta = 0$  spectre d'ordre zéro (le faisceau n'est pas dévié).

Pour  $k = 1$   $\sin \theta_R = \lambda_R / a$  spectre d'ordre 1.

Pour  $k = 2$   $\sin \theta_R = 2\lambda_R / a$  spectre d'ordre 2 (figure 3)..

D'après ces relations on voit que l'angle dépend de la longueur d'onde. Ainsi pour le bleu nous aurons pour l'ordre 1  $\sin \theta_B = \lambda_B / a$  (figure 4).

Comme  $\lambda_B < \lambda_R$  on aura  $\theta_B < \theta_R$ , le bleu sera moins dévié que le rouge.

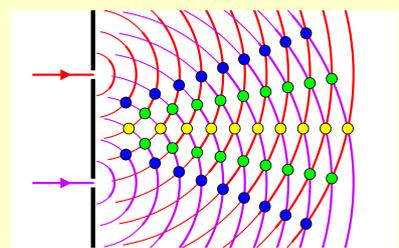


Fig.1. Interférences données par deux fentes de Young.

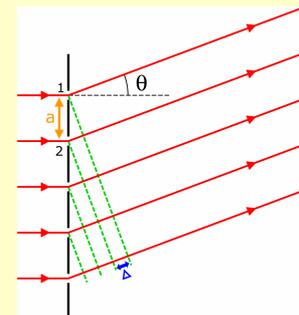


Fig.2. Interférences données par un réseau.

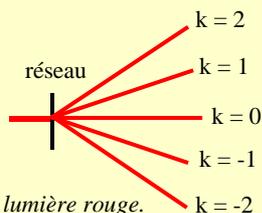


Fig.3. En lumière rouge.

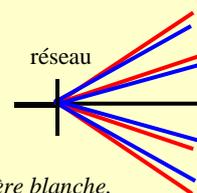


Fig.4. En lumière blanche.