

TP de Physique n°7 : Réseaux de diffraction

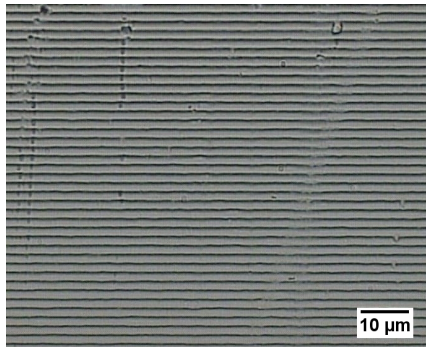
Objectifs :

- Apprendre ce qu'est un « réseau de diffraction » (souvent appelé « réseau » tout court en optique), quelles sont ses propriétés et ses applications pratiques.
- Mettre en œuvre un protocole permettant de mesurer le « pas » d'un CD, et la taille des pixels du capteur CMOS d'une webcam.
- Apprendre à régler un « goniomètre » (appareil permettant de mesurer précisément des angles) et l'utiliser pour étudier le spectre de la lumière émise par une lampe spectrale (lampe au mercure).

I Le réseau de diffraction : principe de fonctionnement :

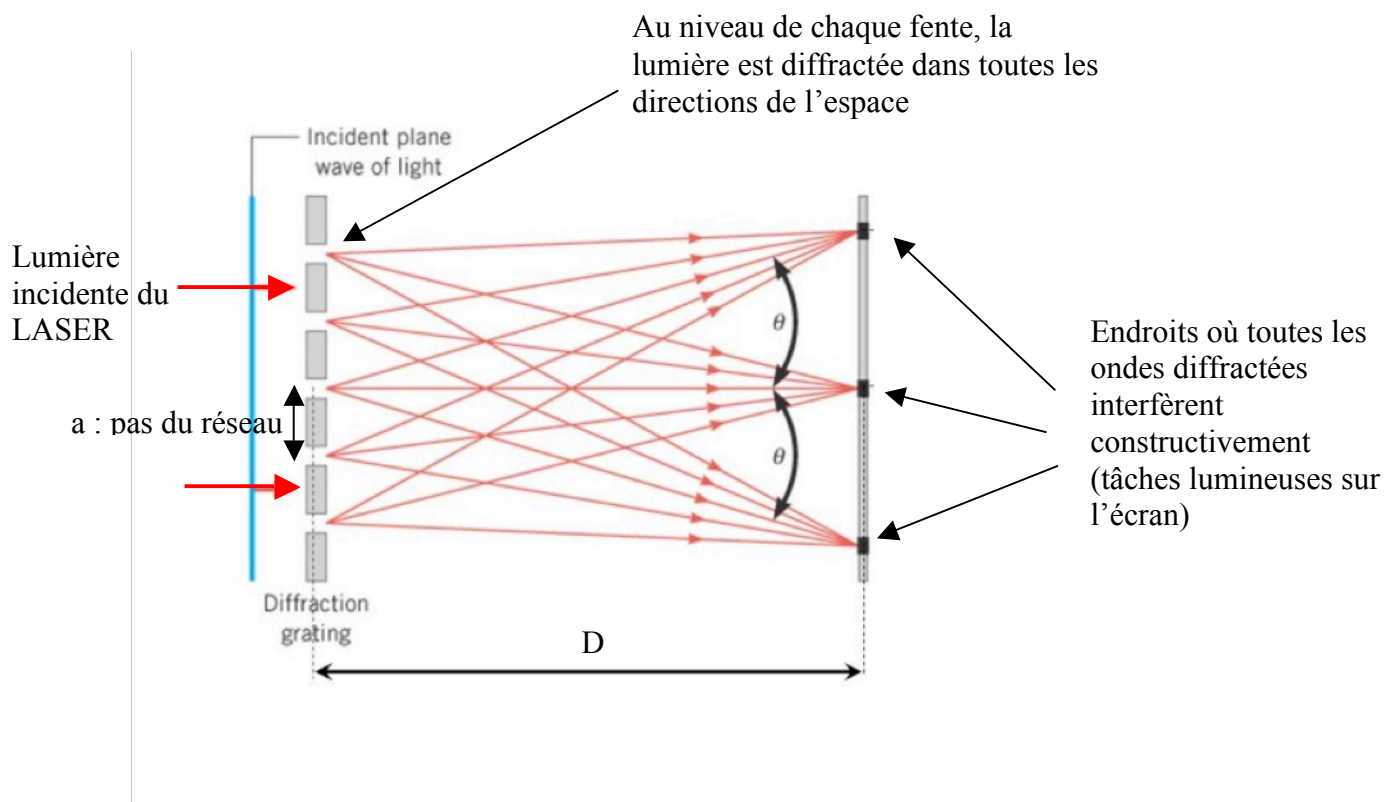
Un « réseau de diffraction » (« diffraction grating » en anglais) est un dispositif optique composé d'une série de fentes parallèles (réseau en transmission) ou de rayures réfléchissantes (réseau en réflexion), toutes espacées d'une même distance, appelée « pas » du réseau. De manière générale, tout objet dont la surface présente un motif périodique peut agir comme un réseau.

En général, un réseau utilisé pour de la lumière visible a un pas de l'ordre de quelques microns.



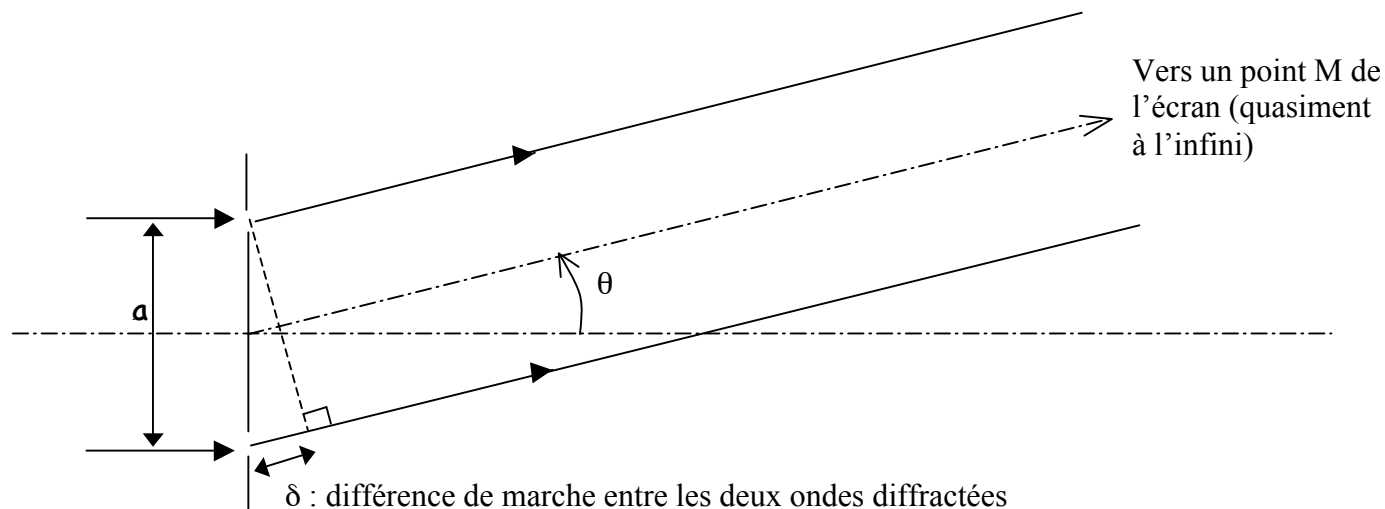
Vue au microscope électronique de la surface d'un réseau de diffraction : notez les stries périodiques

Lorsque la lumière traverse un réseau, chaque fente diffracte la lumière dans toutes les directions, puis les ondes diffractées interfèrent entre elles pour donner une « figure de diffraction ». Le principe de l'étude théorique du réseau est le même que celui des « fentes de Young », sauf qu'au lieu d'avoir seulement deux fentes côte à côte, on en a un très grand nombre (plusieurs milliers).



On cherche à savoir précisément dans quelles directions les ondes diffractées vont interférer constructivement (et on verra donc des tâches lumineuses sur l'écran).

Pour cela, étudions plus précisément ce qui se passe pour deux fentes voisines, et supposons que la distance entre le réseau et l'écran d'observation est très grande devant la distance entre deux fentes (ce qui est bien le cas en pratique) : on peut alors considérer que l'écran est « à l'infini ».



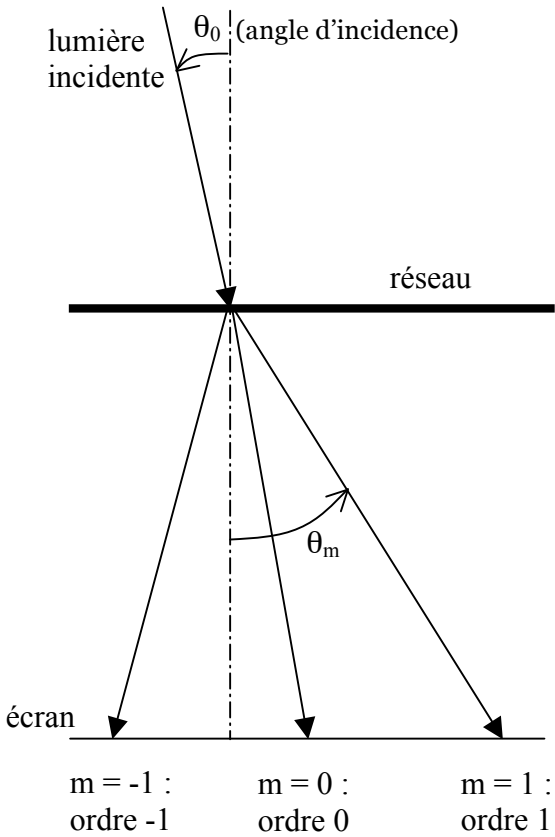
Question 1: À l'aide du schéma ci-dessus, montrer rapidement que les deux ondes qui arrivent en M interfèrent constructivement si l'angle θ vérifie :

$$\sin(\theta) = m \frac{\lambda}{a}, \text{ avec } m \in \mathbb{Z} \text{ (m est un entier relatif)}$$

Cette formule fondamentale, permettant de trouver la position des points lumineux sur l'écran, s'appelle la « formule du réseau ». La valeur de m s'appelle « l'ordre » de la tache lumineuse. On verra ainsi sur l'écran des taches d'ordre 0, 1, -1, 2, -2 ...

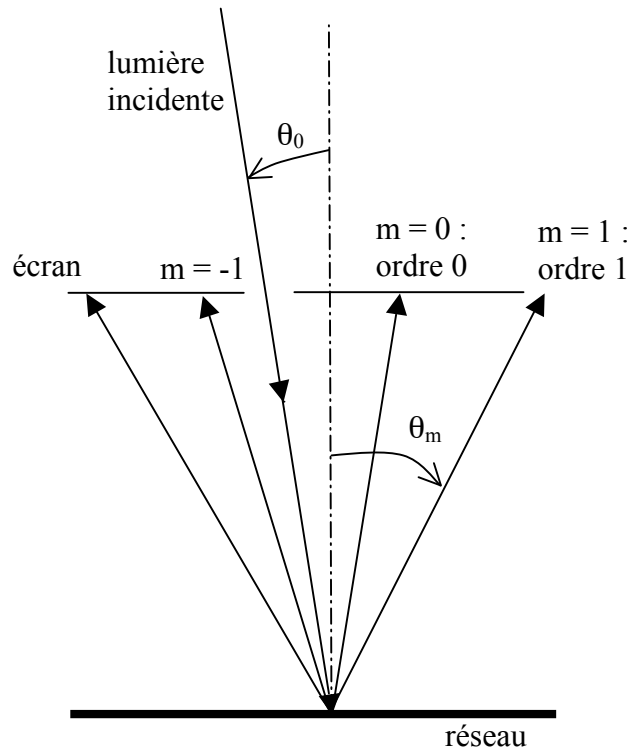
Généralisation :

Dans notre étude, on s'est limité au cas où le réseau était éclairé en incidence normale (la lumière arrive perpendiculairement au plan du réseau), et le réseau est utilisé en transmission (i.e. on s'intéresse à la lumière qui le traverse, et pas à la lumière réfléchie). On peut montrer facilement (on ne demande pas de le faire) que, dans le cas général, la formule qui donne les positions angulaires θ_m des tâches lumineuses sur l'écran devient :



Réseau en transmission

$$\sin(\theta_m) - \sin(\theta_0) = m \frac{\lambda}{a}$$



Réseau en réflexion

$$\sin(\theta_m) + \sin(\theta_0) = m \frac{\lambda}{a}$$

II Première application : mesure du pas d'un CD et d'un capteur CMOS :

Document 1 : Constitution d'un CD (d'après Wikipedia) :

Les disques compacts sont constitués d'une galette de polycarbonate (plastique) de 1,2 millimètre d'épaisseur recouvert d'une fine couche d'aluminium protégée par un film de laque. Ce film peut éventuellement être imprimé pour illustrer le disque.

Les informations sur un CD standard sont codées sur une piste d'alvéoles en spirale moulée dans le polycarbonate. Chaque alvéole mesure environ entre 125 nm (0,125 µm) et 500 nm de large et varie entre 833 nm et 3,5 µm en longueur. L'espace entre les pistes est de ??? (c'est cette valeur que vous devez déterminer expérimentalement). Pour se donner une idée des dimensions, si le disque était mis à l'échelle d'un stade de foot, un alvéole aurait la taille d'un grain de sable. La piste en spirale commence au centre du disque pour se terminer en périphérie.

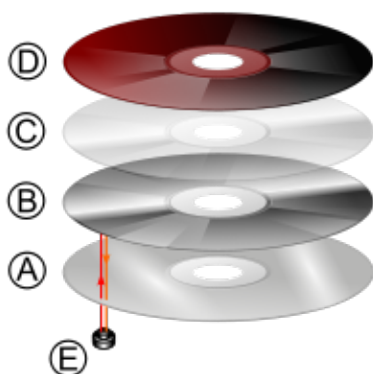
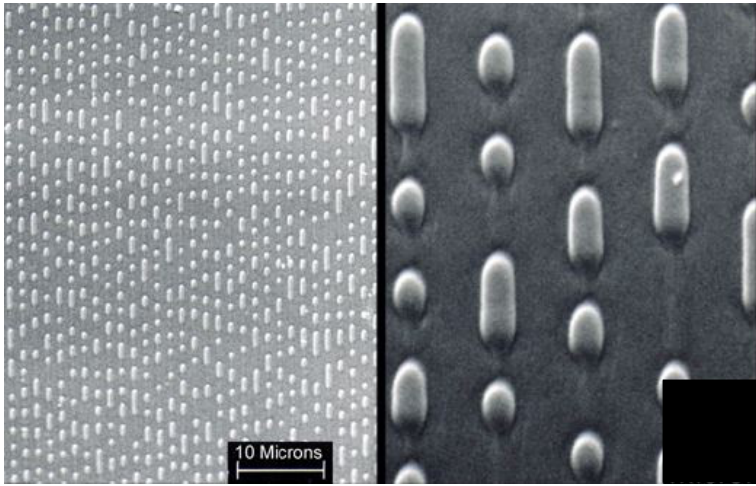


Diagram of CD layers :

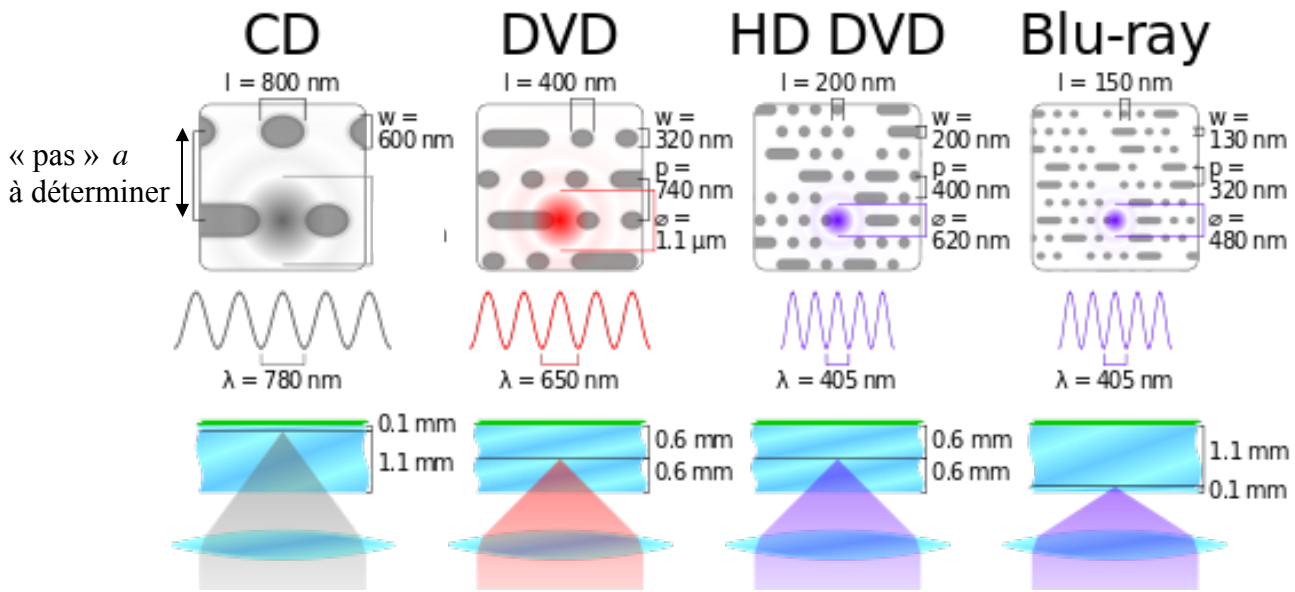
- A. A polycarbonate disc layer has the data encoded by using bumps.
- B. A shiny layer reflects the laser.
- C. A layer of lacquer protects the shiny layer.
- D. Artwork is **screen printed** on the top of the disc.
- E. A laser beam reads the CD and is reflected back to a sensor, which converts it into electronic data.



Surface d'un CD vue au microscope électronique :

Les lignes représentent la « piste » et agissent sur la lumière comme un réseau de diffraction (ce qui explique les couleurs que l'on voit quand on éclaire la surface d'un CD avec de la lumière blanche).

Les creux et les bosses le long de la piste sont les « alvéoles », qui codent l'information de manière binaire (« bits » : 0 ou 1)

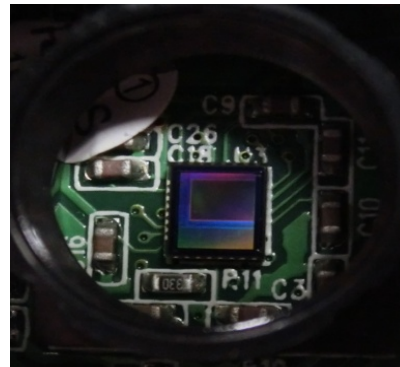
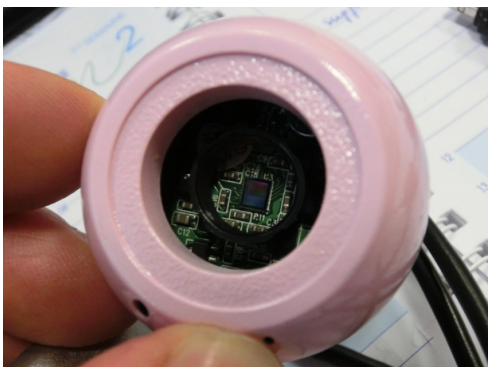


Comparaison des technologies CD, DVD et Blu-ray : ce schéma illustre les différences dans la largeur de la piste, la taille des alvéoles ainsi que la longueur d'onde du LASER utilisé pour la lecture du disque.

Question 2 : A l'aide du matériel dont vous disposez (laser vert, CD, règle graduée, potence et pinces, écran de papier calque troué en son centre, supports), et de ce que vous venez d'apprendre sur les réseaux de diffraction, proposez et mettez en œuvre un protocole permettant de mesurer le « pas » a du CD, c'est à dire la largeur de la piste sur laquelle les informations sont codées.

Vous ferez l'expérience et donnerez la valeur de a avec une incertitude associée (évaluation de type A ou B), puis vous comparerez la valeur que vous obtenez avec la valeur donnée par Wikipedia.

Document 2 : Fiche technique du capteur CMOS d'une webcam :



General Description

The OV7670/OV7171 CAMERACHIP™ is a low voltage CMOS image sensor that provides the full functionality of a single-chip VGA camera and image processor in a small footprint package. The OV7670/OV7171 provides full-frame, sub-sampled or windowed 8-bit images in a wide range of formats, controlled through the Serial Camera Control Bus (SCCB) interface.

This product has an image array capable of operating at up to 30 frames per second (fps) in VGA with complete user control over image quality, formatting and output data transfer. All required image processing functions, including exposure control, gamma, white balance, color saturation, hue control and more, are also programmable through the SCCB interface. In addition, OmniVision CAMERACHIPS use proprietary sensor technology to improve image quality by reducing or eliminating common lighting/electrical sources of image contamination, such as fixed pattern noise (FPN), smearing, blooming, etc., to produce a clean, fully stable color image.



Note: The OV7670/OV7171 uses a lead-free package.

Features

- High sensitivity for low-light operation
- Low operating voltage for embedded portable apps
- Standard SCCB interface compatible with I2C interface
- Output support for Raw RGB, RGB (GRB 4:2:2, RGB565/555/444), YUV (4:2:2) and YCbCr (4:2:2) formats
- Supports image sizes: VGA, CIF, and any size scaling down from CIF to 40x30
- VarioPixel® method for sub-sampling
- Automatic image control functions including: Automatic Exposure Control (AEC), Automatic Gain Control (AGC), Automatic White Balance (AWB), Automatic Band Filter (ABF), and Automatic Black-Level Calibration (ABLC)
- Image quality controls including color saturation, hue, gamma, sharpness (edge enhancement), and anti-blooming
- ISP includes noise reduction and defect correction
- Supports LED and flash strobe mode
- Supports scaling
- Lens shading correction
- Flicker (50/60 Hz) auto detection
- Saturation level auto adjust (UV adjust)
- Edge enhancement level auto adjust
- De-noise level auto adjust

Ordering Information

Product	Package
OV07670-VL2A (Color, lead-free)	24 pin CSP2
OV07171-VL2A (B&W, lead-free)	24 pin CSP2

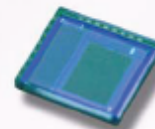
Applications

- Cellular and Picture Phones
- Toys
- PC Multimedia
- Digital Still Cameras

Key Specifications

Active Array Size		640 x 480
Power Supply	Digital Core	1.8VDC ±10%
	Analog	2.45V to 3.0V
	I/O	1.7V to 3.0V ^a
Power Requirements	Active	60 mW typical (15fps VGA YUV format)
	Standby	< 20 µA
Temperature Range	Operation	-30°C to 70°C
	Stable Image	0°C to 50°C
Output Formats (8-bit)		<ul style="list-style-type: none"> • YUV/YCbCr 4:2:2 • RGB565/555/444 • GRB 4:2:2 • Raw RGB Data
Lens Size		1/8"
Chief Ray Angle		25°
Maximum Image Transfer Rate		30 fps for VGA
Sensitivity		1.3 V/(Lux • sec)
S/N Ratio		46 dB
Dynamic Range		52 dB
Scan Mode		Progressive
Electronics Exposure		Up to 510:1 (for selected fps)
Pixel Size		3.6 µm x 3.6 µm
Dark Current		12 mV/s at 60°C
Well Capacity		17 K e
Image Area		2.36 mm x 1.76 mm
Package Dimensions		3785 µm x 4235 µm

a. I/O power should be 2.45V or higher when using the internal regulator for Core (1.8V); otherwise, it is necessary to provide an external 1.8V for the Core power supply.



www.DataSh

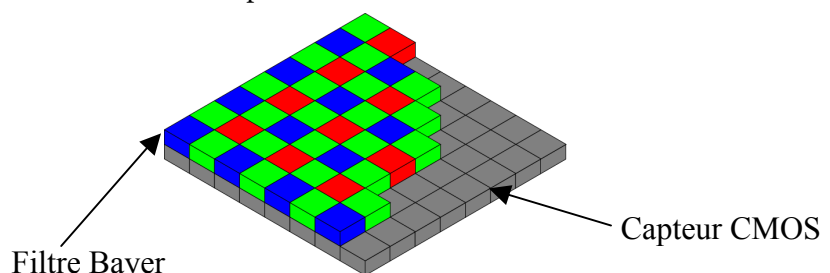
Question 3 : Toujours par la même méthode, retrouver la taille d'un pixel du capteur CMOS (qui a été collé à la surface du CD), et comparer à la taille donnée dans la fiche technique. Comparer la figure de diffraction du capteur CMOS à celle du DVD et expliquer la différence.

La figure de diffraction obtenue en utilisant le LASER vert est elle la même que celle obtenue en utilisant le LASER rouge ? Expliquez en utilisant la remarque ci-dessous.

Rem : Filtre Bayer :

Pour pouvoir détecter les couleurs, le capteur CMOS est placé sous un filtre Bayer RVB (rouge, vert, bleu). Ainsi, chaque pixel adjacent détecte une couleur différente. Les filtres sont disposés comme ceci :

V	B	V	B
R	V	R	V
V	B	V	B
R	V	R	V



II Application du réseau à la spectroscopie, à l'aide d'un goniomètre :

La spectroscopie est l'étude des « spectres » lumineux, c'est à dire la détermination des longueurs d'ondes qui composent une lumière donnée (par exemple, la lumière émise par une lampe spectrale).

Le réseau peut-être utilisé en spectroscopie. En effet, on a vu que la lumière incidente était diffractées dans des directions θ_m telles que $\sin(\theta_m) - \sin(\theta_0) = m \frac{\lambda}{a}$. Ainsi, la direction dans laquelle est renvoyée la lumière dépend de sa longueur d'onde (sauf quand $m = 0$, c'est à dire pour la tâche centrale), et le réseau va donc permettre de séparer les différentes longueurs d'ondes qui composent une lumière.

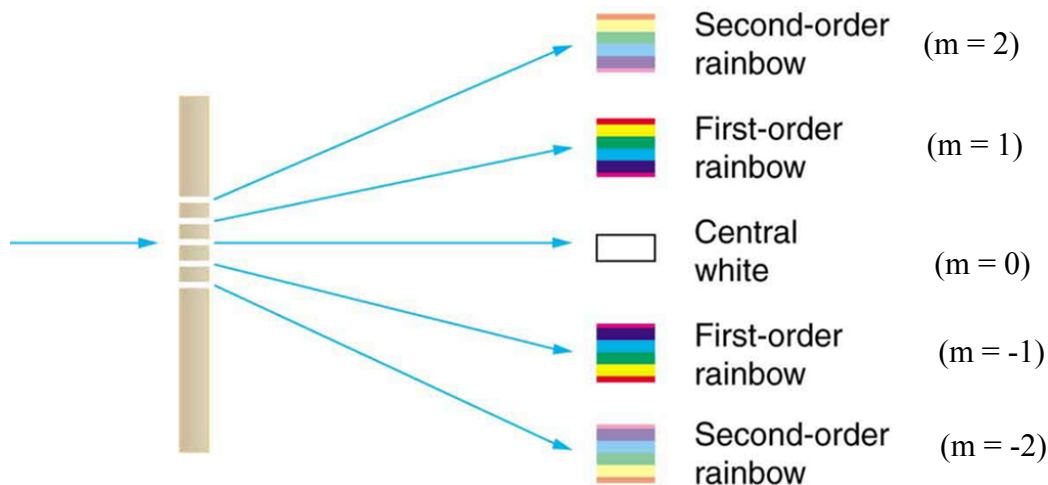
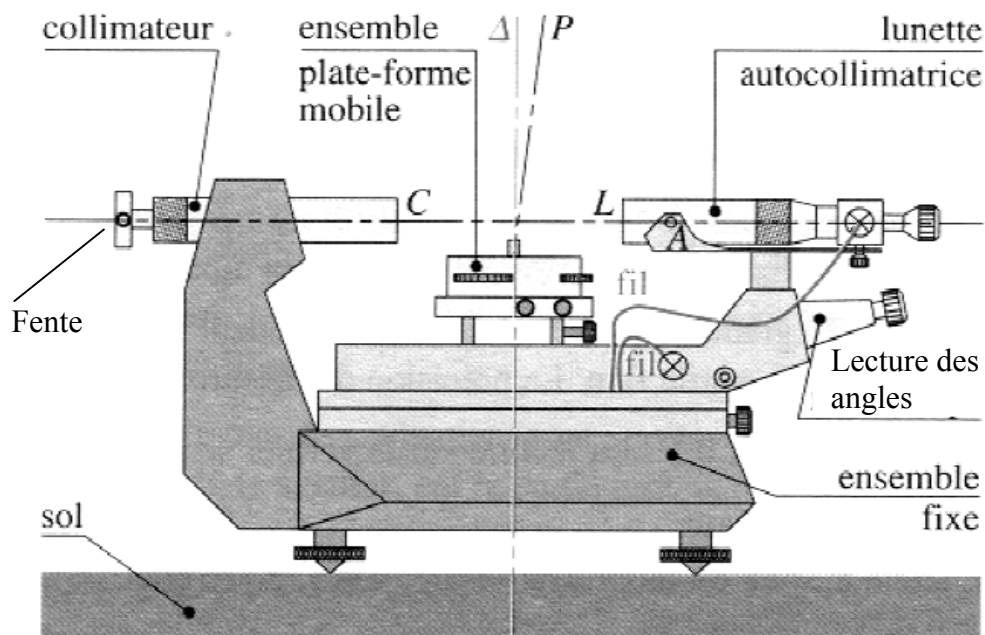


Illustration de la décomposition de la lumière blanche (du soleil par exemple) par un réseau : l'ordre 0 est blanc mais tous les autres ordres (1, -1, 2, -2) présentent des arcs en ciels car les différentes longueurs d'ondes ne sont pas déviées aux mêmes angles.

Question 4 : Citer un autre dispositif qui permet de « décomposer » la lumière (qui fonctionne sur un principe complètement différent du réseau), et expliquez brièvement son principe de fonctionnement.

Pour faire de la spectroscopie de manière précise, on a besoin d'un dispositif capable de mesurer précisément les angles de déviation des différentes couleurs : il s'agit du goniomètre, que l'on va apprendre à régler.

1) Réglage du goniomètre :



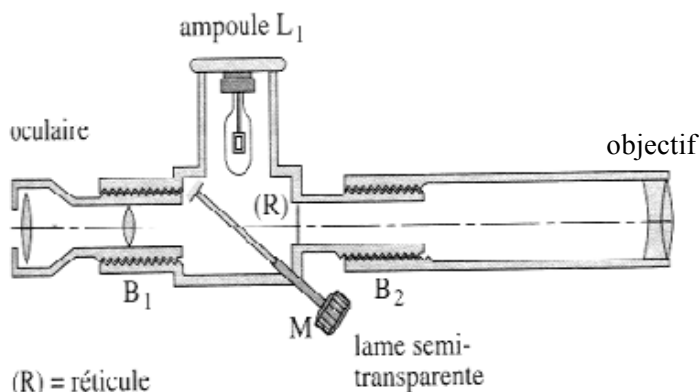
Le goniomètre est un appareil qui a pour objectif de mesurer avec précision des angles (en pratique les angles que font des rayons lumineux). Il est composé d'un bâti (ensemble fixe) sur lequel sont montés trois accessoires :

1 – Le collimateur donne de la fente-source une image à l'infini. Il est composé d'un objectif et d'une fente de largeur réglable.

2 – Le plateau (plate forme mobile) est destiné à recevoir le système optique dispersif (ici le réseau). Il est mobile autour d'un axe vertical.

3 – La lunette est mobile autour du même axe vertical que le plateau. Une manette permet le blocage de la rotation. La rotation de la lunette peut être repérée à la minute d'arc près grâce à un vernier.

a) Réglage de la lunette autocollimatrice :



La lunette comporte un objectif, un réticule éclairé par une ampoule et un oculaire. Elle doit donner une image nette d'un objet à l'infini. Pour la régler :

- pousser la lame semi-réfléchissante de façon qu'un faisceau lumineux éclaire le réticule et sorte de la lunette. Régler l'oculaire à votre vue de façon à voir le réticule net. Tourner le réticule de façon à ce qu'il soit droit (et pas penché).

- plaquer alors un miroir plan contre l'objectif et régler la position de l'objectif pour que l'image du réticule soit dans le même plan que le réticule (en pratique, on doit voir deux réticules en même temps, légèrement décalés). La lunette est alors réglée pour viser à l'infini (et on a fait le réglage par « autocollimation », en utilisant le miroir plan).

b) Réglage du collimateur :

Un collimateur sert à créer un objet à l'infini. Il est constitué d'une fente et d'un objectif. Si la fente est dans le plan focal objet de l'objectif, son image sera à l'infini. Elle sera alors observée nettement à travers la lunette de visée à l'infini.

On utilisera la lampe à vapeur de mercure pour éclairer la fente. Evitez de regarder directement la lampe car elle émet des ultraviolets.

Attention : si vous éteignez une lampe spectrale, il faut attendre au moins une quinzaine de minutes avant de la rallumer, sinon elle risque de griller.

Pour régler le collimateur, éclairez la fente la lampe spectrale et observez-la à travers la lunette (que vous venez de régler). Réglez la distance entre la fente et l'objectif du collimateur jusqu'à ce que vous voyiez la fente nette à travers la lunette.

La fente doit être verticale et fine (vous pouvez la tourner et régler son épaisseur à l'aide d'une vis).

2) Spectroscopie à réseau : étude qualitative :

Placez le réseau sur le plateau du goniomètre (utilisez un réseau de 80 traits par millimètre si possible, sinon prenez un 600 traits par millimètre), et éclairez-le en incidence quasi normale à l'aide du collimateur. Observez la lumière diffractée à travers la lunette et répondez aux questions suivantes.

Question 5 :

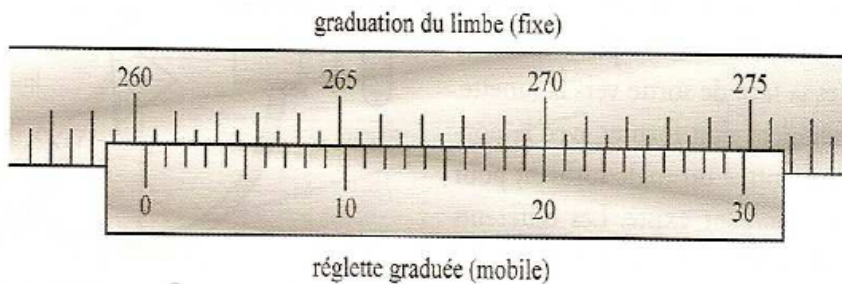
- Repérez l'ordre zéro. Quelle est sa direction et quelle est sa couleur ? Expliquer.
- Repérez un spectre d'ordre non nul. Le violet est-il plus ou moins dévié que le rouge ? Est-ce en accord avec la formule du réseau ?
- Le spectre est-il continu ou discontinu (spectre de raies) ? Expliquez cela en rappelant comment fonctionne la lampe spectrale. Indiquez les différentes couleurs que vous voyez.
- Repérez les différents ordres que vous pouvez observer avec la lunette. Quels sont les numéros des ordres visibles ?
- L'écart angulaire entre les différentes longueurs d'ondes (c'est à dire la « dispersion ») est-il le même pour tous les ordres ? Expliquez.
- A partir de quel ordre les spectres se recouvrent-ils ?
- Eclairez la fente-source avec la lampe de bureau (au lieu de la lampe au mercure). Qu'observez-vous ? Expliquez.

3) S'il reste du temps : lecture précise des angles à l'aide du vernier :

Document : Le vernier (lecture d'un angle sur le goniomètre) :

Un vernier permet une mesure angulaire avec une précision d'une minute d'angle. L'angle à mesurer est la somme :

- de l'angle, défini à trente minutes près, indiqué par le limbe en face du zéro de la règlette mobile,
- et de l'angle, compris entre 0 et 30 min, donné par la règlette mobile au point où sa graduation est superposée à celle du limbe.



Sur l'exemple précédent, le zéro de la règlette correspond à un angle de $260^{\circ}00'$. Les graduations du limbe et de la règlette sont alignées pour $19'$, ce qui conduit à un angle de $260^{\circ}19'$.

Question 6 (facultative) :

La longueur d'onde de la raie verte intense émise par la lampe à vapeur de mercure est de 546 nm. En déduire, à partir d'une mesure d'angle, une valeur approchée du nombre de raies par mm que comporte le réseau.