

DOSSIER PEDAGOGIQUE:
"LES SIGNATURES DE LA MATIERE"

2012

Dossier préparé par Réjouissiences
et le Groupe d'Astrophysique des Hautes Energies
(Département A.G.O., Université de Liège)

TABLE DES MATIERES

I.	Introduction	3
II.	Les couleurs dans la lumière	4
III.	Les couleurs expliquées	10
IV.	Les couleurs invisibles	14
V.	Révéler les secrets de la lumière (1)	22
VI.	Révéler les secrets de la lumière (2)	31
VII.	Le ballet des étoiles	44
VIII.	Annexe : le télescope HRT	53
IX.	Glossaire	55
X.	Fiches pour les élèves	58

I. INTRODUCTION

Ce dossier, par les activités qu'il propose, invite à l'exploration des « signatures lumineuses de la matière ». Il s'agit de découvrir une branche particulière des sciences appelée *spectroscopie*.

Indispensable en astronomie, chimie et physique, la spectroscopie a véritablement révolutionné la manière d'étudier la matière en permettant de déterminer les propriétés physiques des objets sans les toucher (donc sans les détruire).

Elle a également modifié notre vision du monde, par exemple en mettant en évidence des éléments inconnus (hélium, rubidium, césium) ou en révélant que l'Univers est en expansion.

Ce dossier aborde plusieurs aspects de la spectroscopie grâce à des activités adaptées à deux niveaux (1 = fin de primaire, 2 = fin de secondaire). On y découvrira notamment les secrets de l'arc-en-ciel, la face cachée de la lumière, et l'instrument qui dévoile les signatures lumineuses.

Il est proposé dans le cadre de l'inauguration du Télescope Robotique d'Hambourg, installé sur le site de La Luz au Mexique. Ce télescope a été construit grâce à un partenariat international entre les universités d'Hambourg (Allemagne), Guanajuato (Mexique) et Liège (Belgique).

II. LES COULEURS DANS LA LUMIÈRE

Niveau 1

Fiche de l'enseignant

Buts : Découvrir que la lumière n'est autre qu'un ensemble de couleurs.

Programme concerné : l'éveil scientifique

D'où viennent les lumières que nous recevons et qui nous entourent ?

Du Soleil, des lampes d'éclairage

Ces lumières sont de quelle(s) couleur(s) ?

Blanche pour le Soleil et lampes de maison ou jaune-orange pour l'éclairage public.

As-tu déjà vu un arc-en-ciel ?

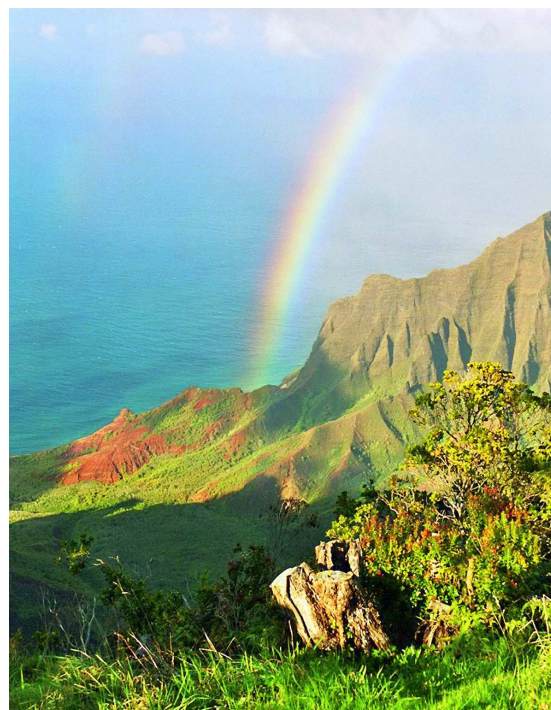
Quelles sont les couleurs présentes dans l'arc-en-ciel ?

Combien sont-elles ?

Dans quel ordre apparaissent-elles ?

On y voit sept couleurs : rouge-orange-jaune-vert-bleu-indigo-violet

Peux-tu le dessiner ?



Arc-en-ciel ©Y. Nazé

Y a-t-il d'autres exemples où des couleurs surgissent de la lumière ?

Dans les bulles de savon, dans une flaque d'eau avec de l'huile ou de l'essence en surface, sur un CD ou un DVD éclairé...

Infos supplémentaires : Attention, notez qu'il ne s'agit pas toujours d'un arc-en-ciel unique et régulier, car des paramètres supplémentaires interviennent (ex. épaisseur du film de savon pour les bulles et espacement des traits pour les CDs et DVDs).



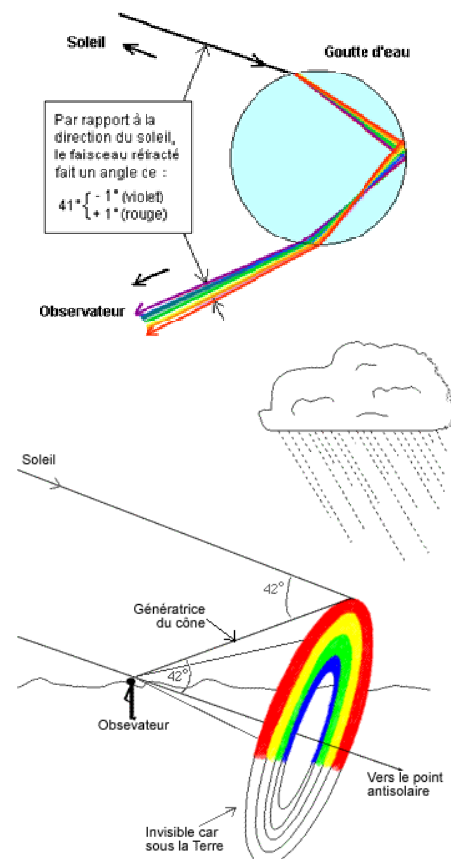
Autres exemples de décomposition de la lumière. ©Anon./dreamstime

A ton avis, d'où viennent les couleurs de l'arc-en-ciel ?

Autrement dit, pour qu'il y ait un arc-en-ciel, que faut-il ?

Laisser débattre les élèves. Après un moment, s'ils ne trouvent pas, proposer des indices : As-tu déjà remarqué l'arc-en-ciel quand il n'y a pas de Soleil ou pas de pluie ? Il faut en effet absolument qu'il y ait les deux, c'est-à-dire qu'il faut (1) une source de lumière et (2) un élément dispersif (c'est-à-dire capable de décomposer la lumière). Pour l'arc-en-ciel qu'on observe dans le ciel, ce sont en effet les gouttelettes d'eau qui décomposent la lumière du Soleil.

Infos Supplémentaires : On peut ajouter que la position observateur-goutte-Soleil n'est pas quelconque, voir figures ci-contre.



Positions relatives du Soleil, des gouttes et de l'observateur pour pouvoir observer un arc-en-ciel. ©UDPPC

Activité supplémentaire : production d'un arc-en-ciel artificiel

1. Tuyau d'arrosage

Matériel :

- un tuyau d'arrosage relié à un robinet
- une météo favorable (il faut du Soleil, pas trop haut dans le ciel, comme en matinée ou en fin d'après-midi)

Procédure :

Se placer dehors dans un endroit d'où l'on voit bien le Soleil, se placer dos au Soleil.

Ouvrir le robinet, placer le doigt sur la sortie d'eau pour disperser le jet et obtenir des très fines gouttelettes.

Observations :

Un arc-en-ciel apparaît. Par contre, si l'on se place ensuite à l'ombre ou si l'on coupe l'eau, l'arc-en-ciel disparaît.

Conclusion :

La lumière est un mélange de couleurs. Pour les faire apparaître, il faut deux éléments : (1) une source de lumière et (2) un élément dispersif.



L'arrosage permet de créer des arc-en-ciel si le Soleil est de la partie ce jour-là. ©Anon./Flickr-PierreF.

2. Prisme

Matériel :

- un local sombre (faiblement éclairé, sans fenêtres ou aux fenêtres occultées)
- une puissante lampe de bureau ou de poche
- un prisme
- un carton (habituel ou tetra pak) dans lequel on coupe une ligne d'1 mm de large et de 2 cm de long (utiliser un cutter acéré et couper en une seule fois)
- un écran (une feuille blanche, un papier calque ou un mur blanc) sur lequel projeter

Procédure :

Dans le local sombre, allumer la lampe et placer le carton devant, de manière à obtenir un rayon lumineux fin.

Disposer un prisme dans le trajet du rayon lumineux et regarder le résultat sur l'écran.

(On peut faire faire l'expérience aux élèves si l'on dispose de suffisamment de lampes et de prismes. Il faut alors les laisser tâtonner pour trouver « le bon angle » donnant naissance à l'arc-en-ciel)

Observations :

Un arc-en-ciel apparaît.

Si on éteint la lampe ou retire le prisme du trajet, il disparaît.

Conclusion :

La lumière est un mélange de couleurs. Pour les faire apparaître, il faut deux éléments : (1) une source de lumière et (2) un élément dispersif.

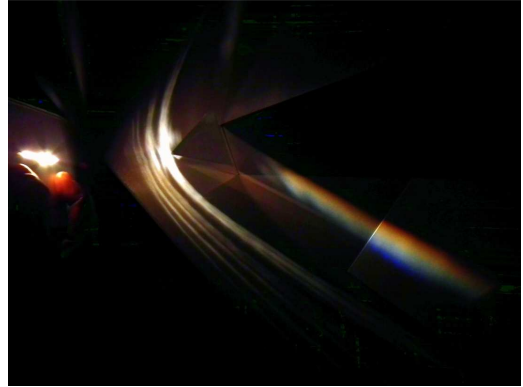
Infos supplémentaires :

a) Il vaut mieux placer le matériel sur une table, de préférence blanche ou claire.

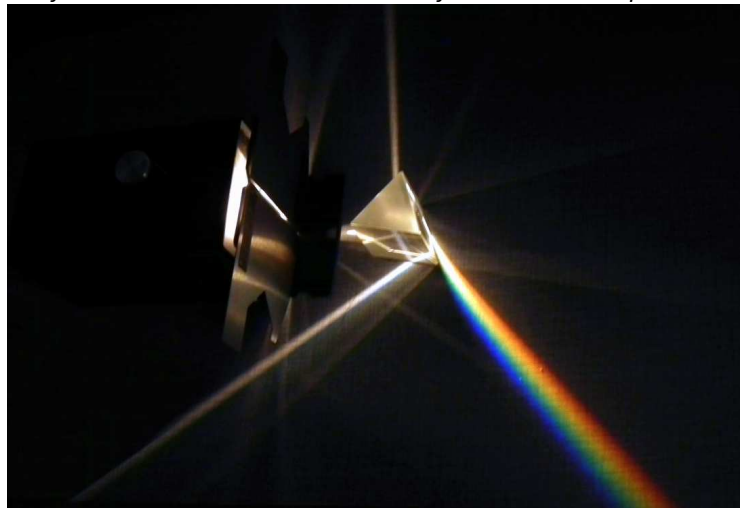
b) On peut également remarquer que la position du rayon par rapport au prisme a de l'importance, tout comme la position de l'observateur n'est pas quelconque pour l'arc-en-ciel.

c) Pour voir un arc-en-ciel intense en classe, facilement observable par toute la classe en même temps, on peut remplacer la lampe par un rétroprojecteur

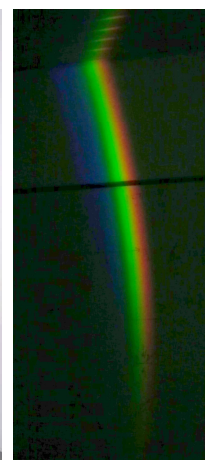
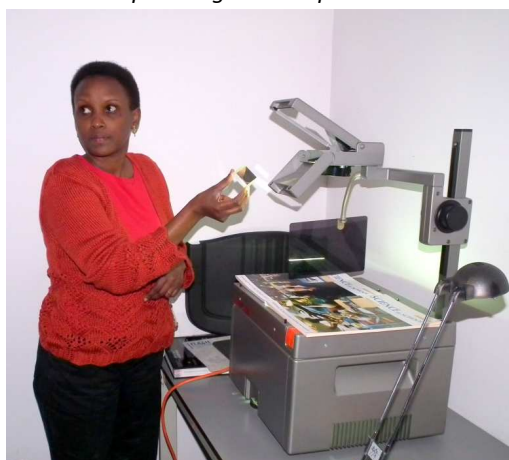
ou un projecteur de diapositive comme source lumineuse. Comme pour la lampe, il faut utiliser une fente, par exemple en disposant deux livres séparés d'un millimètre environ.



Dispositif expérimental : lampe, carton avec fente, prisme, écran. Comme on le remarque sur la photo de droite, des lumières parasites peuvent apparaître ; elles proviennent de « fuites » lumineuses des côtés de la lampe ; pour les éviter, il faut bien masquer la lampe à l'aide du carton de manière à n'avoir aucune lumière qui sorte ailleurs que par la fente. À noter aussi : bien mettre la fente devant l'ampoule allumée ! ©GAPHE



Même chose avec une lampe halogène très puissante. ©GAPHE



Même chose pour un rétroprojecteur : livres sur le rétroprojecteur pour faire une fente, disposition du prisme dans le trajet lumineux, arc-en-ciel obtenu sur le mur d'en face. © GAPHE

Ton professeur va produire un arc-en-ciel artificiel.

Les couleurs sont-elles les mêmes que pour l'arc-en-ciel naturel ?

Oui

Sont-elles dans le même ordre ?

Oui

Si l'on observe attentivement cet arc-en-ciel, le bord entre les couleurs est-il net ? Autrement dit, entre le jaune et le vert ou entre le bleu et le vert, y a-t-il une limite bien nette ?

Non, la succession des couleurs se fait de façon continue.

Infos supplémentaires : Les élèves peuvent observer à la loupe si nécessaire mais, quel que soit le cas, attention à ne pas bloquer le faisceau lumineux en regardant l'arc-en-ciel.

Possibilité d'extension : si l'on possède un pointeur laser, envoyer son faisceau vers le prisme, selon le même angle que pour la lampe ordinaire.

Si l'on envoie la lumière d'un pointeur laser vers le prisme, que va-t-il se passer selon toi ?

Ne pas guider les réflexions.

Fais l'expérience, que se passe-t-il en réalité ?

Le rayon lumineux est dévié, mais pas décomposé : sa couleur ne change pas, aucune autre couleur n'apparaît.

Comment l'expliquer ?

La lumière laser est différente de la lumière naturelle des lampes ordinaires et du Soleil car elle se compose d'une seule couleur - on parle de lumière « monochromatique ».

III. LES COULEURS EXPLIQUÉES

Niveau 2

Fiche de l'enseignant

Buts : Découvrir pourquoi la lumière se décompose.

Programme concerné : Loi de la réfraction et le spectre électromagnétique.

Matériel :

- un local sombre (faiblement éclairé, sans fenêtres ou aux fenêtres occultées)
- une puissante lampe de bureau ou de poche
- un prisme
- un carton (habituel ou tetra pak) percé d'une petite fente d'1 mm de large et de 2 cm de long (utiliser un cutter acéré et couper en une seule fois)
- un écran (une feuille blanche, un papier calque ou un mur blanc) sur lequel projeter

Procédure :

Dans le local sombre, allumer la lampe et placer le carton devant, de manière à obtenir un rayon lumineux fin. Il vaut mieux placer l'ensemble du matériel sur une table, de préférence blanche ou claire.

Disposer un prisme dans le trajet du rayon lumineux et regarder le résultat sur l'écran.

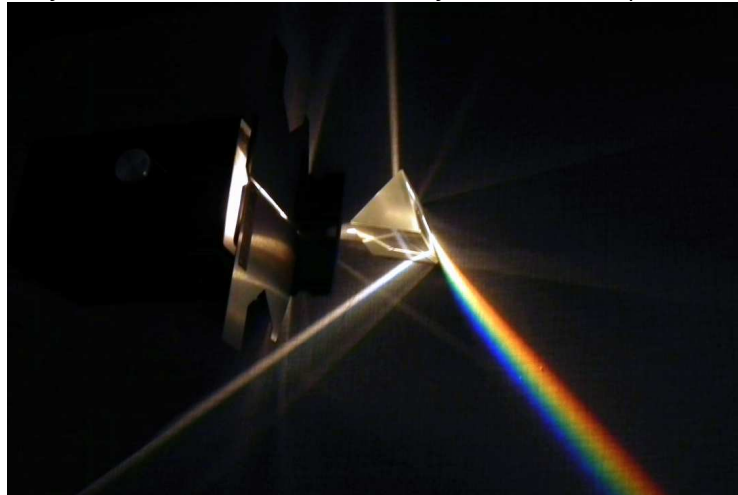
On peut faire faire l'expérience aux élèves si l'on dispose de suffisamment de lampes et de prismes. Il faut alors les laisser tâtonner pour trouver « le bon angle » donnant naissance à l'arc-en-ciel.

Pour voir un arc-en-ciel intense en classe, facilement observable par toute la classe en même temps, on peut remplacer la lampe par un rétroprojecteur ou un projecteur de diapositive comme source lumineuse. Comme pour la lampe, il faut utiliser une fente, par exemple en disposant deux livres séparés d'un millimètre environ.

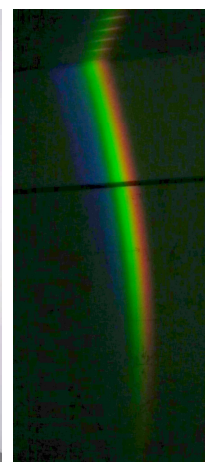
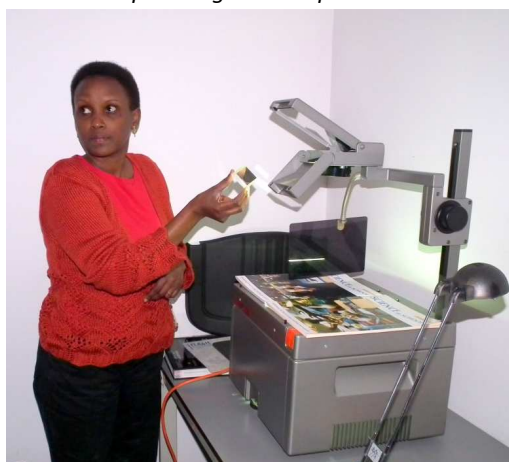
Dessine le dispositif expérimental.



Dispositif expérimental : lampe, carton avec fente, prisme, écran. Comme on le remarque sur la photo de droite, des lumières parasites peuvent apparaître ; elles proviennent de « fuites » lumineuses des côtés de la lampe ; pour les éviter, il faut bien masquer la lampe à l'aide du carton de manière à n'avoir aucune lumière qui sorte ailleurs que par la fente. À noter aussi : bien mettre la fente devant l'ampoule allumée ! ©GAPHE



Même chose avec une lampe halogène très puissante. ©GAPHE



Même chose pour un rétroprojecteur : livres sur le rétroprojecteur pour faire une fente, disposition du prisme dans le trajet lumineux, arc-en-ciel obtenu sur le mur d'en face. © GAPHE

Que peux-tu observer ?

Le prisme décompose la lumière.

Pourquoi ce phénomène se produit-il ? Essayons de le comprendre.

Nous avons ici affaire à un rayon qui change de direction en passant dans un matériau autre que l'air. Quelle loi décrit ce phénomène ?

La loi de la réfraction de Snell-Descartes.

Énonce-la :

$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r)$, parfois aussi écrite sous la forme $\sin(i) = n \sin(r)$

où n_i sont les indices de réfraction des milieux traversés, n l'indice de réfraction du second milieu par rapport à celui du premier milieu, i l'angle d'incidence et r l'angle de sortie (tous deux mesurés par rapport à la normale à la surface séparant les deux milieux).

Le rayon lumineux est au départ unique : l'angle d'entrée est donc bien déterminé. Par contre, on observe que l'angle de sortie varie selon la couleur ; de quelle manière ?

Le rouge est moins dévié que le bleu ; l'angle de réfraction r est donc plus grand pour le rouge que pour le bleu.

En te basant sur la loi énoncée plus haut, comment peux-tu expliquer cette différence ?

Les indices de réfraction varient en fonction de la couleur : l'indice est plus grand pour le bleu et plus petit pour le rouge.

Infos supplémentaires :

a) La couleur bleue correspond à une longueur d'onde d'environ 400 nm, tandis que le rouge correspond à une longueur d'onde de 700 nm (pour rappel, 1 nm = un milliardième de mètre).

b) L'indice de réfraction (n) est fonction de la vitesse de l'onde dans le vide (c) et dans le milieu de propagation (v) suivant la loi $n = c/v$.

c) Pour la lumière visible, une approximation satisfaisante des variations de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde est donnée par la Loi de Cauchy

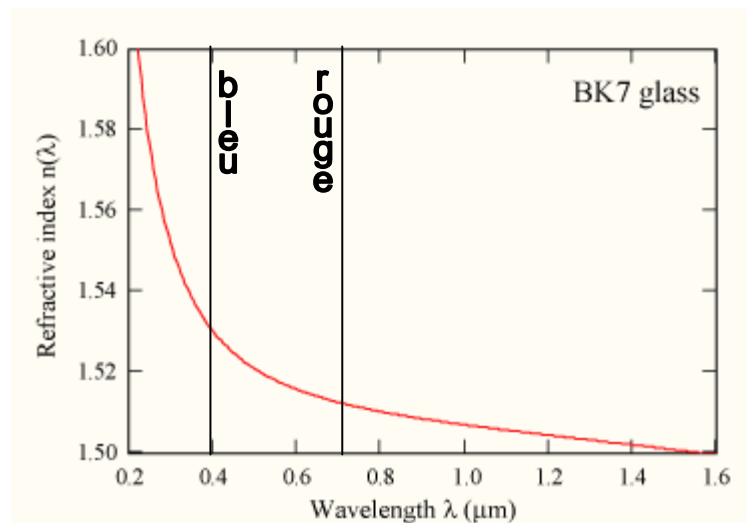
$$n(\lambda) = a_0 + \frac{a_1}{\lambda^2}$$

où a_0 et a_1 sont des coefficients positifs, a_0 sans dimension, a_1 en m^2 , à préciser pour chaque milieu.

Une généralisation de cette équation est l'équation de Sellmeier :

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$$

où B_i et C_i sont les coefficients de Sellmeier (déterminés expérimentalement).



Variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde. ©Wikipedia

IV. LES COULEURS INVISIBLES

Niveau 2

Fiche de l'enseignant

Buts : Découvrir l'existence de lumières non détectables par l'œil.

Programme concerné : Le spectre électromagnétique.

1. Mise en évidence de l'infrarouge (1)

Matériel :

- trois thermomètres à alcool
- un prisme
- une boîte en carton
- une feuille de papier blanc
- une météo favorable (Soleil)
- peinture ou encre noire

Procédure :

Noircir, à l'aide de peinture ou d'encre noire, les réservoirs des thermomètres pour assurer une absorption maximale. Essayer d'appliquer la même couche sur les trois thermomètres et attendre que ça sèche.

Coller la feuille de papier au fond du carton et placer le carton dans une zone éclairée.

Dans le bord supérieur de la face du carton exposée au Soleil, faire une encoche où placer le prisme, les dimensions de l'encoche devant être égales à celles du prisme. Bien fixer le prisme comme le montre la figure ci-contre.

Tourner le carton de manière à obtenir l'arc-en-ciel le plus grand possible.

Placer le triplet de thermomètres dans le spectre de manière à ce que le premier (Th1) se retrouve dans la région bleue, le deuxième (Th2) dans la région jaune et le troisième (Th3) juste au-delà du rouge.



Le carton avec le prisme inséré dans l'encoche. © IPAC

Au préalable, on peut poser quelques questions de réflexion. Il est utile d'avoir effectué auparavant l'activité « les couleurs expliquées ».

Un prisme décompose la lumière en ses composantes colorées. Supposons que l'on parvienne à enregistrer de manière objective la présence de lumière par un dispositif quelconque. Si seules les couleurs observables à l'œil existent, qu'indiquerait ce dispositif si on le place à côté de l'arc-en-ciel artificiel généré par le prisme ?

Il n'enregistrerait rien, et indiquerait donc zéro, c'est-à-dire absence de lumière.

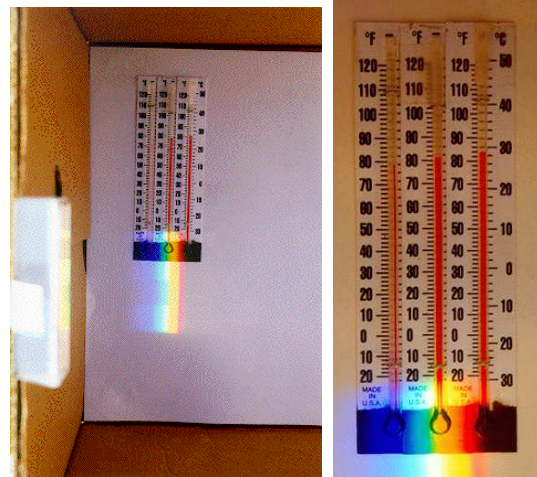
Si ce dispositif donne une réponse contraire à cela, quelle conclusion en tires-tu ?

Soit le dispositif a un problème (calibration inadéquate, par exemple), soit notre hypothèse est à revoir : il existe autre chose que les couleurs visibles à l'œil nu.

Ensuite, procéder à l'expérience :

Lorsqu'on est exposé au Soleil, on sent la chaleur nous envahir. Essayons de mesurer cet effet pour chaque « couleur » de la lumière.

Dessine le dispositif expérimental



Dispositif expérimental : vue générale du carton (gauche), zoom sur le prisme et les thermomètres, cette fois bien placés (milieu) et sur les températures relevées après 5 minutes (droite). © IPAC

Relève la température initiale des thermomètres, quand ils sont dans l'ombre. Une fois le dispositif éclairé, relève la température finale des thermomètres après 5 minutes.

	Th1	Th2	Th3
T° à l'ombre			
T° après 5 min d'éclairage			
Différence			

Les thermomètres indiquent-ils tous la même température au départ ?

Oui.

Si jamais les thermomètres n'indiquent pas la même température au départ (problème de calibration), insister surtout sur l'augmentation de température.

Les thermomètres indiquent-ils tous la même température après cinq minutes ?

Non.

Si non, as-tu remarqué une quelconque tendance ? Par exemple, où observes-tu les plus hautes températures ?

La température monte régulièrement du bleu vers le rouge.

Les plus hautes températures sont observées au-delà du rouge

Que peux-tu en conclure ?

Il existe de la lumière invisible au-delà du rouge

Infos supplémentaires :

a) Le rayonnement mis en évidence par cette expérience s'appelle infrarouge (souvent abrégé en IR).

b) Cette expérience a été effectuée pour la première fois en 1800 par l'astronome anglais William Herschel. C'était la première fois que l'on découvrait une lumière invisible. Précisons « invisible pour l'œil humain » car

certaines animaux (serpents, insectes) sont capables de « voir » ce rayonnement infrarouge.

c) Ce dispositif ne permet pas de mettre en évidence l'existence de l'ultraviolet car le verre (du prisme et des thermomètres) arrête ce rayonnement.

d) Observer une température élevée pour le rouge... Le résultat de cette expérience peut paraître surprenant si l'on se souvient de la fameuse théorie du « corps noir ». En effet, celle-ci indique que les objets les plus chauds émettent plus de lumière bleue que de rouge. Ainsi, le Soleil, avec une température de surface d'environ 5800 K, émet la majorité de son rayonnement vers 500 nm, dans le vert¹. Observer une température élevée pour le rouge et plus encore pour l'IR peut donc sembler étrange. Le paradoxe se résout facilement si l'on tient compte du fait que la dispersion du prisme n'est pas linéaire (voir page 13). Les grandes longueurs d'onde sont ainsi « compactées », et l'IR se trouve concentré sur une plus petite surface que la lumière bleue : c'est ce « confinement » qui provoque le plus grand échauffement observé. Si l'on corrigeait de cet effet, le maximum de température serait bien observé vers 500nm, dans le vert, là où le Soleil émet la majorité de son rayonnement.

e) Les applications du rayonnement infrarouge sont nombreuses. L'IR est souvent utilisé dans le domaine militaire/policié car il permet de détecter toute source chaude (un humain par exemple) à distance et même parfois si l'objet est caché à l'œil (caché derrière un voile opaque ou simplement invisible parce qu'il n'y a pas assez de lumière). Ainsi, les équipements de vision de nuit ou les détecteurs de mouvement utilisent l'IR, de même que les missiles se guidant automatiquement vers une cible, par exemple le (ou les) réacteur(s) chaud(s) d'un avion en vol. De manière plus pacifique, les détecteurs infrarouges permettent aussi de mesurer la température des océans ou des sols depuis l'espace, ou de repérer un malade atteint de la grippe parmi un groupe de passagers dans les aéroports. Les télécommandes (TV, voiture) utilisent aussi le rayonnement IR.

¹ Dans l'Univers, une étoile bleue présente une température de surface de plus de 10 000 K, alors qu'un astre rouge possède une surface à « seulement » 3000K.

2. Mise en évidence de l'infrarouge (2)

Matériel :

- un appareil photo numérique ou un gsm pouvant prendre des photos
- une télécommande en état de marche

Procédure :

Comparer l'apparence d'une télécommande, et plus particulièrement du bout de celle-ci (là où il y a une partie transparente) dans deux situations : (1) quand on ne fait rien et (2) quand on utilise la télécommande (en changeant de chaîne sur une télévision, par exemple).

Observe la télécommande quand on ne fait rien et quand on l'utilise. Vois-tu quelque chose de particulier ?

Non, on ne voit rien de spécial.

Que peux-tu en déduire ?

Si la télécommande envoie un signal, il ne s'agit pas de lumière visible.

Remplace ton œil par un détecteur électronique, par exemple en utilisant la fonction « photo » de ton gsm ou un appareil photo numérique. Recommence l'expérience. Qu'observes-tu ?

Sur l'écran de l'appareil, une lumière brillante apparaît au bout de la télécommande quand on l'utilise.

Que peux-tu en déduire ?

Le signal envoyé par la télécommande est de la lumière invisible.

Infos supplémentaires :

Les détecteurs électroniques sont, contrairement à l'œil, capables de détecter le proche IR et le proche UV, comme certains animaux. Précisons que « proche » veut ici dire « proche du spectre visible », c'est-à-dire avec



Photo de la télécommande si on ne touche à rien (à gauche) et si l'on appuie sur un des boutons (à droite) © GAPHE

des longueurs d'onde juste en deçà de 400 nm (pour le proche UV) et au-delà de 700 nm (pour le proche IR, ce qui est le cas ici).

3. Mise en évidence de l'ultraviolet

Matériel :

- une météo favorable (Soleil) ou, mieux, une lampe à UV (« lumière noire »)
- un billet de banque ou un t-shirt qui change de couleur « à la lumière »

Procédure :

Dans la classe toutes fenêtres fermées ou dehors à l'ombre, observer attentivement l'apparence du billet ou du t-shirt.

Ensuite, il y a deux possibilités :

1. Allumer la lampe à UV et passer dessous le billet ou une partie du t-shirt.
2. Disposer le t-shirt en plein Soleil quelques minutes.



T-shirt réactif à l'UV : état initial (à gauche) et état final après éclaircissement par une lampe UV ou le Soleil (à droite). Certaines perles pour enfants présentent aussi les mêmes propriétés : blanches à la lumière normale, elles se colorent en plein Soleil ou sous une lampe à UV. ©GAPHE



Billets de banque vus sous une lumière noire : certaines couleurs changent et de courts fils colorés apparaissent.

©GAPHE

Observations :

Le t-shirt se colore, de courts fils invisibles apparaissent sur le billet et certaines de ses couleurs se modifient. Si l'on éteint la lampe ou si l'on place le t-shirt à l'ombre, billet et t-shirt reprennent leur aspect normal.

Conclusions :

Il existe un rayonnement invisible à l'œil.

Infos supplémentaires :

a) Ce rayonnement invisible est l'ultraviolet (souvent abrégé en UV). Il est arrêté par le verre (ce qui fait qu'on ne bronze pas en voiture) ainsi qu'en partie par l'atmosphère.

b) C'est en utilisant la même procédure que les supermarchés ou les banques peuvent distinguer un vrai d'un faux billet. La lampe à UV est utilisée pour distinguer les faux billets des vrais.



Billets de 50 euros passés sous une lampe à UV. Plusieurs indications permettent de distinguer le vrai billet (deux photos à gauche) du faux (photo de droite) : le papier du vrai billet émet de la lumière vive, il présente diverses fibres fluorescentes (rouges, bleues, vertes) incorporée dans la masse, le drapeau européen et la signature du président de la banque centrale européenne virent au vert fluo, les étoiles prennent une couleur orange, la carte, le pont et le chiffre de valeur ressortent en jaune. ©BCE <http://www.ecb.europa.eu>

c) Si l'on voit apparaître des symboles fluos sur les billets, c'est par un phénomène de fluorescence : en fait, ces symboles absorbent l'UV et le réémettent dans le domaine visible, ce qui permet de les voir. Bien sûr, s'ils ne faisaient que renvoyer l'UV, on ne verrait strictement rien !

d) On entend très souvent parler des dangers de l'UV. En effet, en grandes quantités (lors d'expositions prolongées au Soleil), il peut provoquer des cancers cutanés, un vieillissement prématuré de la peau ainsi que des cataractes. Cependant, en faible quantité, le rayonnement UV est bénéfique. Il est ainsi indispensable à la synthèse de vitamine D et sert également à traiter plusieurs maladies, dont le rachitisme, le psoriasis, l'eczéma et l'ictère.

e) Attention à l'utilisation prolongée des lampes à UV, qui peuvent provoquer des lésions oculaires car la puissance émise en UV est bien plus forte que ce que laisse croire la partie visible, violette, émise par ces lampes.

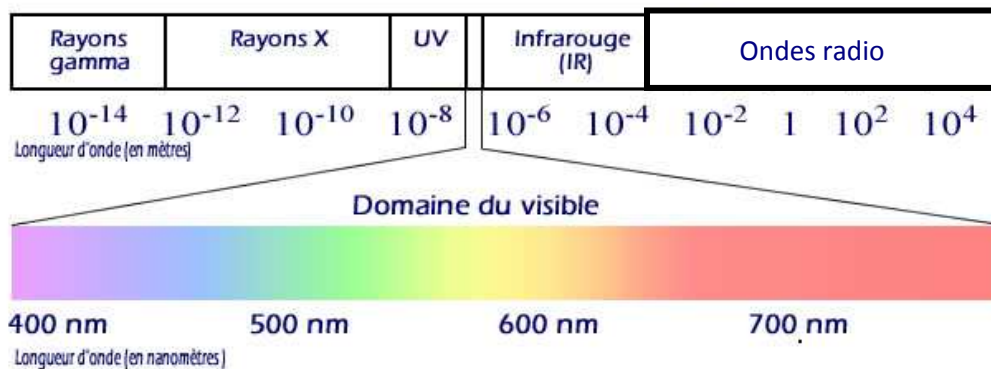
Infos supplémentaires : les couleurs invisibles de la lumière

Le spectre électromagnétique de la lumière comprend en fait six parties :

- les rayons gamma
- les rayons X
- l'ultraviolet
- le visible
- l'infrarouge
- les ondes radio (dont les micro-ondes)

(ici citées par énergie décroissante ou longueurs d'onde croissantes)

Les rayons gamma et les rayons X, ainsi qu'une bonne partie de l'UV et de l'IR sont arrêtés par l'atmosphère. Les astronomes doivent donc mettre des télescopes dans l'espace pour pouvoir observer les astres qui en émettent. Sur Terre, on peut aujourd'hui produire artificiellement ces rayonnements. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines de la vie courante, par exemple en médecine (rayons X, rayons gamma), en cuisine (ondes radio dans les fours à micro-ondes), en télécommunications (ondes radio),...



Ensemble du spectre électromagnétique. © Wikipédia

V. REVELER LES SECRETS DE LA LUMIÈRE

Niveau 1

Fiche de l'enseignant

Buts : Construire un spectroscope et découvrir les signatures lumineuses de la matière.

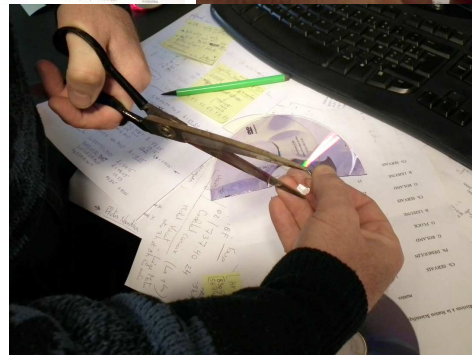
Programme concerné : L'éveil scientifique.

Matériel (pour chaque élève si chacun construit son spectroscope) :

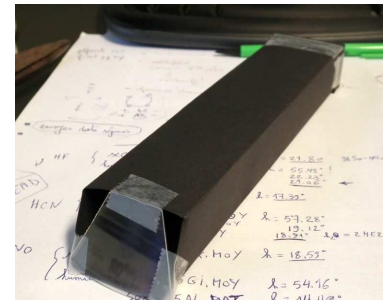
- une paire de ciseaux
- du papier collant
- un huitième de DVD
- une feuille de papier cartonné et non transparente sur laquelle est imprimé l'un des plans fournis ci-dessous. Le papier le plus sombre et le plus cartonné donne les meilleurs résultats.

Procédure :

(à faire par le professeur !) Séparer les deux couches du DVD : couper le DVD en deux, écartier les deux couches en partant du milieu, couper chaque moitié en quatre.



Découpe du DVD © GAPHE



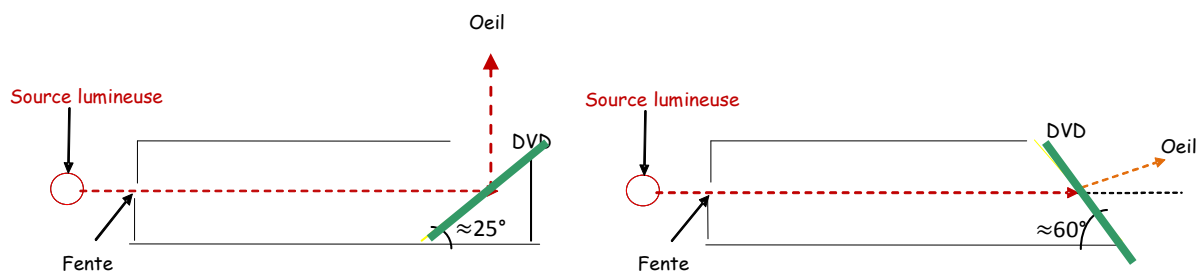


Spectroscopie en réflexion : boîte ouverte (montrant la position du morceau de DVD) à gauche, zoom sur le positionnement de la partie accueillant le DVD au milieu et zoom à droite sur la boîte fermée, pour montrer comment se placent les rabats. © GAPHE

Découper le plan fourni suivant les lignes extérieures, de manière à éliminer toutes les zones grisées. Couper la fente au cutter d'un trait unique et droit. Plier ce qui reste suivant les lignes intérieures. Coller à l'aide du papier collant les rabats en suivant les indications lettrées (rabat indiqué par les flèches A sur le côté A, rabat B sur côté B, etc.) de manière à construire une petite boîte allongée : les rabats doivent impérativement être collés à l'extérieur de la boîte et non à l'intérieur, pour éviter que la lumière n'entre par les côtés. Veiller à ne pas mettre de papier collant sur la fente ou sur le morceau de DVD !

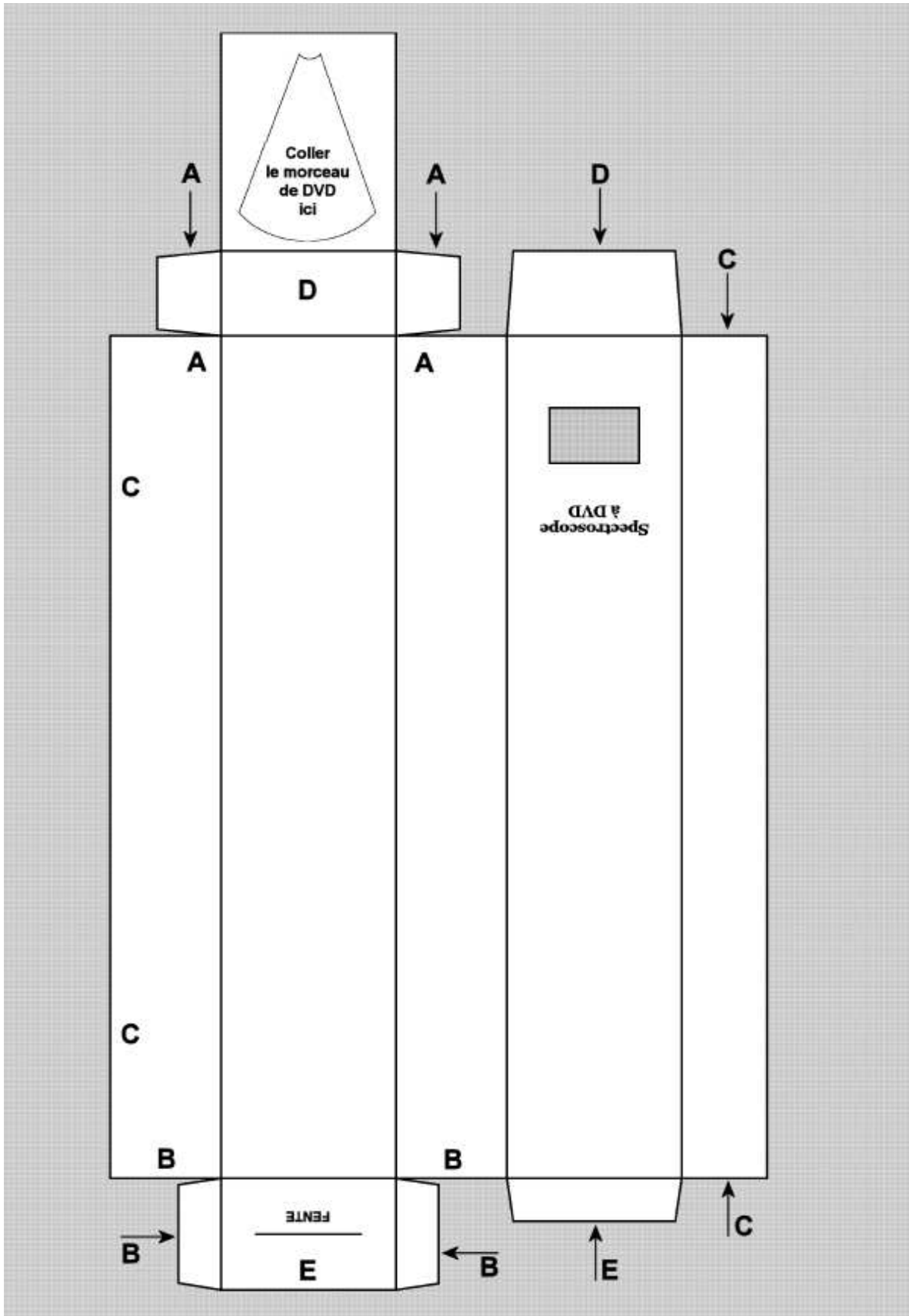
Il existe deux types de spectroscopes : les spectroscopes en transmission et ceux en réflexion (voir infos supplémentaires). Pour construire le premier, coller le huitième de DVD transparent au bout de la boîte ; pour construire le second, coller le huitième de DVD semblable à un miroir sur l'endroit indiqué (s'il dépasse, le découper encore un peu).

Pour utiliser ces spectroscopes, il faut tourner la boîte, fente vers une source de lumière (il vaut mieux que la pièce soit sombre et que la lampe soit la seule allumée). Pour le spectroscope en réflexion, la lumière révélera ses secrets en positionnant l'œil juste devant le trou à la base de l'instrument. Pour le spectroscope en transmission, il faut plutôt regarder de biais, à travers le morceau transparent. Au cas où trop peu de lumière passe par la fente, élargir un peu celle-ci en introduisant le cutter et en le faisant osciller un peu - ne pas élargir en coupant une 2^e fois au cutter et veiller à ce que la fente reste assez fine quelles que soient les circonstances !

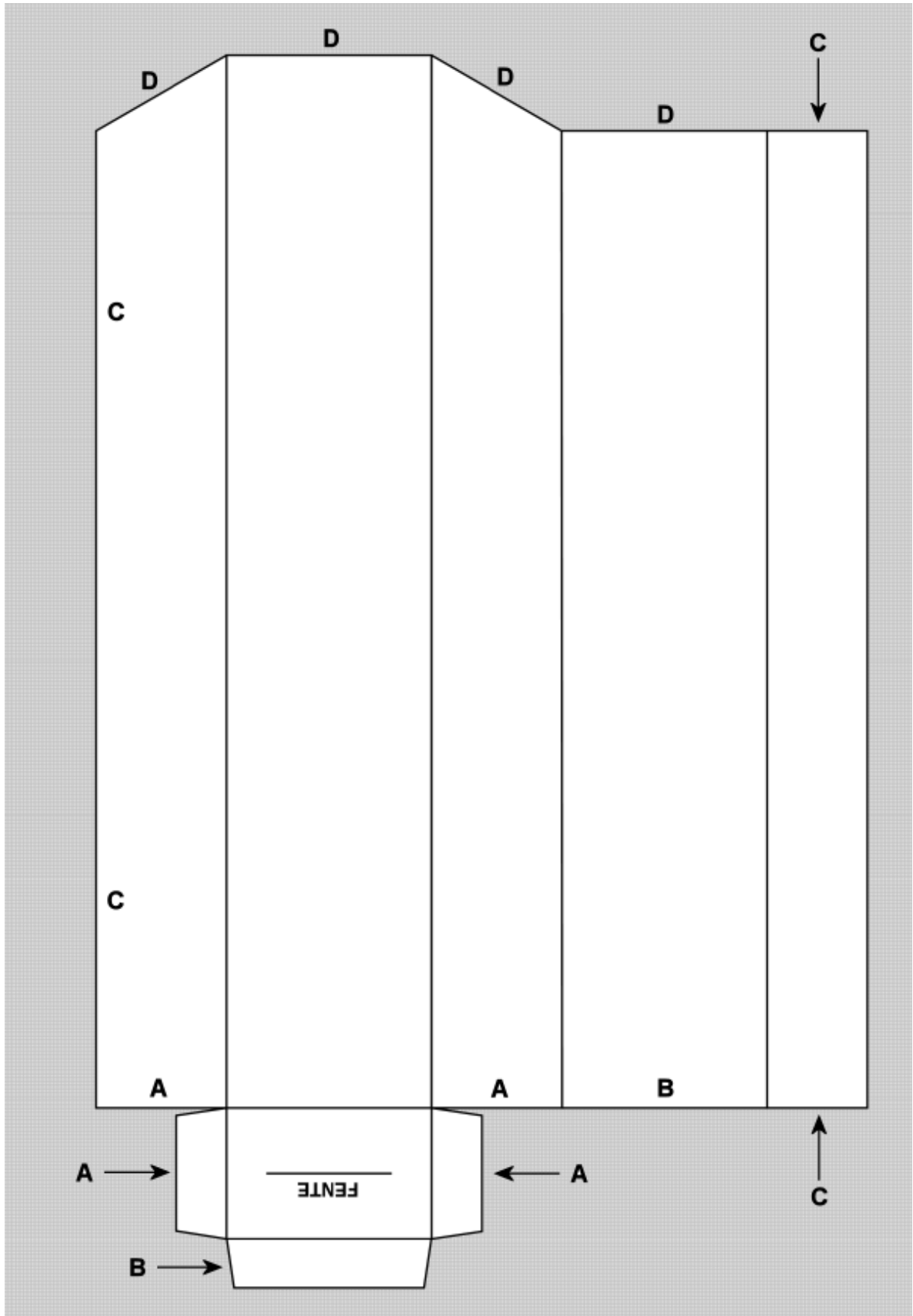


Utilisation du spectroscope à réflexion (à gauche) et en transmission (à droite). © GAPHE

PLAN DU SPECTROSCOPE EN REFLEXION © AGO-Ph. Demoulin



PLAN DU SPECTROSCOPE EN TRANSMISSION © AGO-Ph. Demoulin



La lumière cache bien des secrets. Tentons de les découvrir avec un analyseur de lumière. Construis le tien en suivant les indications de ton professeur. Cet « analyseur » porte un nom assez compliqué : **spectroscope** !

Tourne-le vers une source lumineuse : l'arc-en-ciel parfois un peu bizarre que tu observes s'appelle un **spectre**. Il va te permettre de trouver les signatures secrètes de la lumière.

Essaie de décrire ce que tu observes dans les cas suivants :

- le Soleil

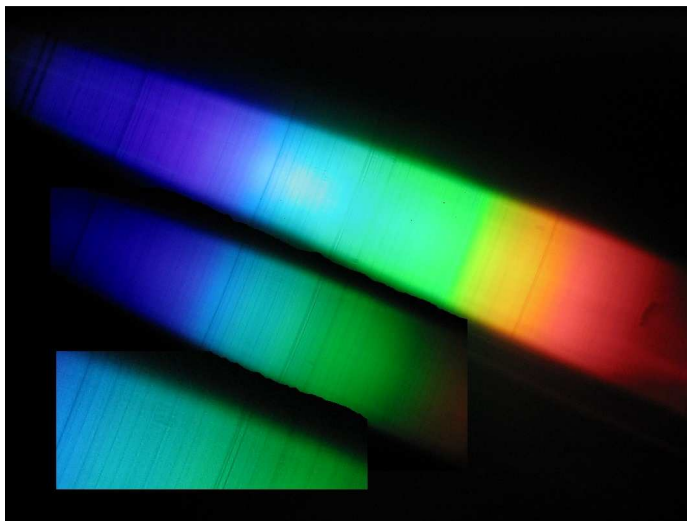
Y a-t-il des lignes ? *Oui*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

Noires sur fond coloré (attention, elles sont très faibles)

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

Info supplémentaire : attention à ne pas regarder trop longtemps, ou utiliser un reflet sur un mur blanc plutôt que le Soleil lui-même.



Spectre solaire observé avec le bricolage. Le spectre d'une lampe à incandescence est similaire, mais sans les lignes noires.

© Christophe Cattelain

- une lampe à incandescence

Y a-t-il des lignes ? *Non*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

- un tube fluorescent (« tube néon ») ou une lampe « économique »

Y a-t-il des lignes ? *Oui*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?
Colorées sur fond noir

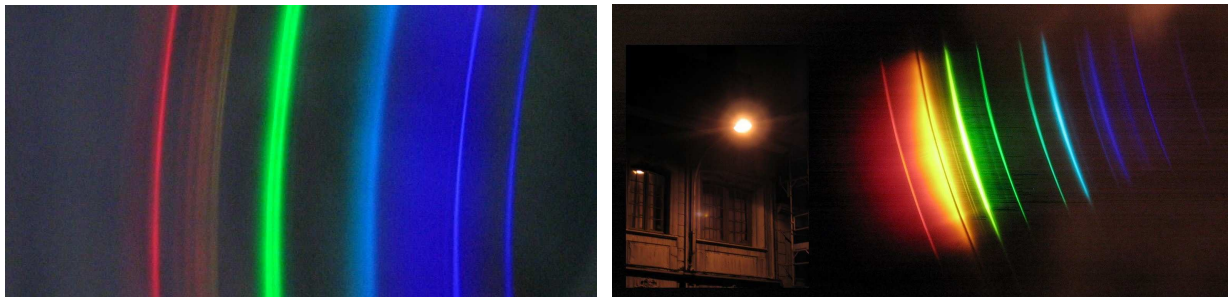
S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ? *Violet-bleu, vert, rouge*

- une lampe orange d'éclairage public

Y a-t-il des lignes ? *Oui*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?
Colorées sur fond noir

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ? *Une ligne orange large et très brillante, une ligne verte et une ligne bleue un peu plus faibles.*



Spectre d'un tube fluorescent dit tube « néon » (à gauche) et d'une lampe d'éclairage public (à droite).

© Christophe Cattelain

Info supplémentaire : On peut également regarder la lumière d'une bougie chauffe-plat, et voir comment le spectre se modifie quand on jette du sel (de cuisine ou autre) dans la flamme, ou si l'on y dépose le bout soufré d'une allumette. À noter : le sel de cuisine contenant du sodium, le spectre ressemblera un peu à celui d'une lampe d'éclairage public.

Les lignes observées dans certains cas s'appellent des **raies**.

Sont-elles toutes colorées sur fond noir ou toutes noires sur fond coloré ?
Et si elles sont colorées, ont-elles toutes la même couleur ?

Non, il y en a qui sont noires et d'autres qui sont de couleur (rouge, jaune, bleue, ...).

S'il y en a qui ont la même couleur (par exemple orange) pour des sources lumineuses différentes, sont-elles disposées de la même façon ?

Non

En fait, chaque source lumineuse possède un ensemble de raies qui lui est propre, un peu comme un code-barres. Cette signature dépend de ce qui est à l'intérieur des ampoules (pour les lampes) et de ce qui est dans le Soleil car chaque gaz, liquide ou solide possède son propre « code-barres ».

Cette propriété est très utile en astronomie puisqu'elle permet d'identifier, à distance, la composition des étoiles. En effet, il n'est pas possible de toucher et manipuler les étoiles : les astronomes ne peuvent donc qu'étudier la

lumière reçue par leurs télescopes. Ils déterminent, suivant les « codes-barres » lumineux enregistrés, les éléments présents dans l'Univers.

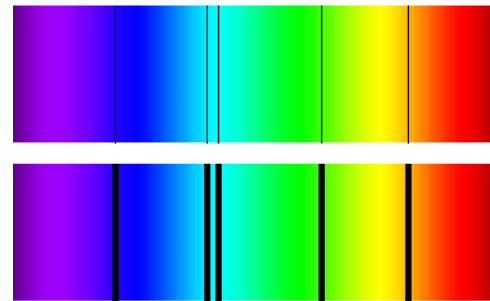
Compare ces deux spectres :

Quelles sont les similitudes ?

Les traits occupent les mêmes positions.

Quelles sont les différences ?

Les seconds sont plus larges que les premiers.



© GAPHE

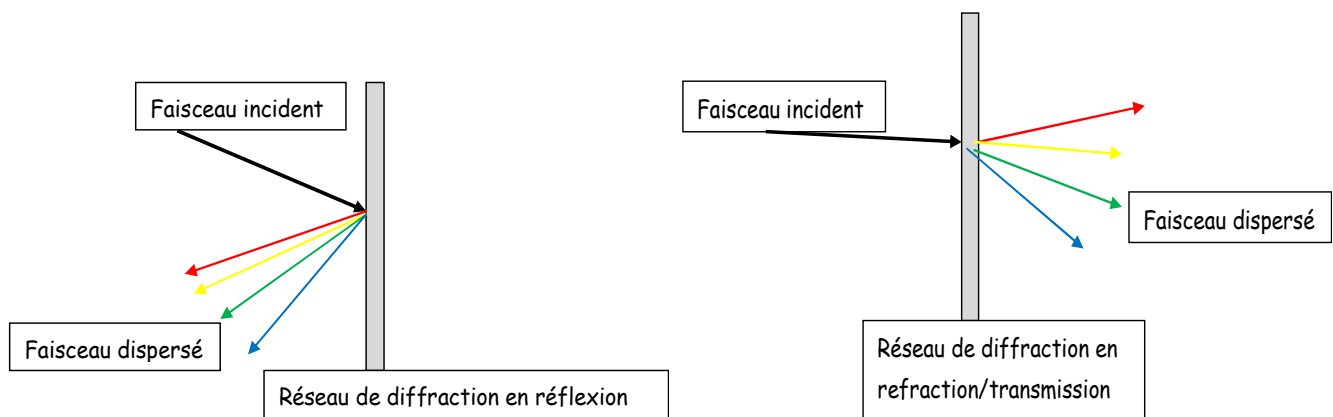
En astronomie, on peut trouver des spectres semblables à ceux-ci. Puisque les positions sont les mêmes, la composition des deux sources est identique, mais la largeur des traits donne des informations supplémentaires. Quand c'est un « code-barres » avec des traits fins, cela indique une étoile qui tourne lentement sur elle-même tandis que le « code-barres » aux traits larges indique une petite étoile ou une étoile qui tourne rapidement sur elle-même.

Les spectres renferment donc beaucoup d'informations utiles aux astronomes.

Infos supplémentaires :

a) L'élément de base d'un spectroscope est un composant optique capable de disperser la lumière, comme les prismes dans l'activité « produire un arc-en-ciel artificiel » et les gouttes d'eau pour l'arc-en-ciel naturel (voir activité « les couleurs dans la lumière »). Les prismes sont aujourd'hui rarement utilisés par les scientifiques car leur pouvoir de dispersion est assez faible (c'est-à-dire qu'on distingue difficilement les détails des spectres avec les prismes).

On leur préfère donc des « réseaux » qui sont des pièces sur lesquelles sont gravés un grand nombre de sillons parallèles et capables eux aussi de décomposer la lumière, mais avec une meilleure séparation des couleurs. Il existe des réseaux avec des traits gravés sur une surface transparente - on parle alors de « transmission » - et d'autres avec des traits gravés sur une surface réfléchissante - on parle alors de « réflexion ». Notez que les principes physiques derrière les prismes et les réseaux diffèrent, même si les effets (décomposition de la lumière) sont similaires.

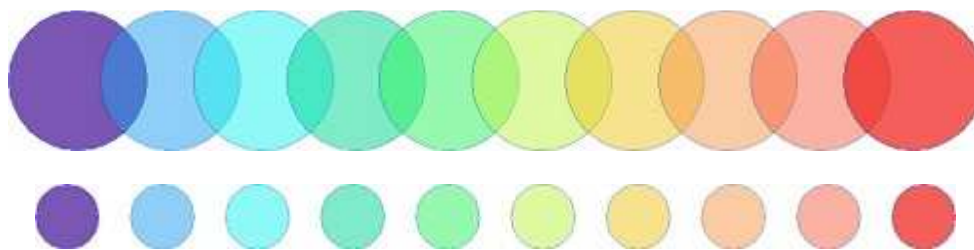


Les deux types de réseaux. ©GAPHE

Un CD ou un DVD est un réseau car les différentes pistes d'un CD ou d'un DVD sont des sillons gravés sur une surface. La séparation entre deux pistes d'un CD est de 1,6 microns, tandis qu'elle est de 0,74 microns pour un DVD. Cette séparation est environ 100 fois plus petite que l'épaisseur d'un cheveu. Sa plus petite séparation entre pistes confère aux DVDs une meilleure résolution spectrale que les CDs, c'est pourquoi nous n'utiliserons que ceux-ci pour ce bricolage. Notez que les plans fournis ne peuvent être utilisés tels quels avec un CD car l'inclinaison du morceau de CD doit être différente. Remarquez également que les sillons des CDs ou DVDs ne sont ici pas droits, mais courbés : les raies obtenues seront donc également courbées.

b) Un autre élément essentiel du spectroscope est la fente qui recueille la lumière émise par la source. En fait, le spectre observé est l'image de cette fente et non de la source lumineuse. C'est après être passé par la fente que le rayon lumineux est dispersé par le réseau. Le spectre est ensuite imagé sur un écran ou enregistré par un système détecteur (l'œil, une pellicule photographique, un détecteur de caméra digitale, etc.).

Le rôle crucial de la fente réside dans sa taille : plus la fente est fine, moins les raies se superposent. Pour le comprendre, regardons les deux spectres ci-dessous, issus d'une même lampe de bureau : pour le premier spectre, on n'a rien interposé entre la source et le réseau, tandis que pour le deuxième, on s'est arrangé pour que la lumière passe à travers un petit trou circulaire percé dans un masque.



En haut, la lumière provient d'une source de large étendue, comme une lampe de bureau : les couleurs se superposent et le spectre est « flou ». En bas, pour empêcher la superposition, on a fait passer la lumière au travers d'un petit trou : on voit alors une série de taches de couleurs bien séparées. © astrosurf

Il semble évident qu'il faille utiliser le plus petit trou possible pour pouvoir séparer au mieux les couleurs. Toutefois, il ne faut pas en réduire la taille indéfiniment, car plus il est petit, moins de lumière passe et plus le spectre paraît peu brillant. Il faut donc trouver un bon compromis entre brouillage des couleurs et luminosité faible.

En pratique, les scientifiques utilisent une fente allongée au lieu d'un petit trou circulaire, comme dans le bricolage proposé ici. Attention cependant : si la fente n'est pas coupée nette, les raies ne seront pas des lignes parfaites.

c) Les tubes fluorescents sont parfois appelés « néons ». Pourtant, ils contiennent principalement du mercure, qui émet beaucoup de rayonnement ultraviolet. La paroi intérieure du tube est recouverte d'une couche de matière fluorescente, qui transforme l'ultraviolet en lumière visible. Cette matière contient notamment des métaux rares : l'euprium qui fournit la raie rouge observée et le terbium qui contribue majoritairement à la raie verte ainsi qu'à la raie large violette.

VI. REVELER LES SECRETS DE LA LUMIERE

Niveau 2

Fiche de l'enseignant

Buts : Découvrir Construire un spectroscope et découvrir les signatures lumineuses de la matière.

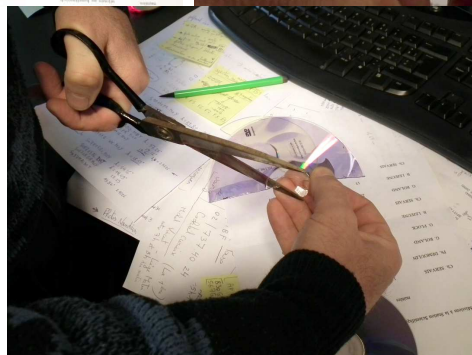
Prog. concerné : L'atome de Bohr, l'effet Doppler, le tableau de Mendeleïev.

Matériel (pour chaque élève si chacun construit son spectroscope) :

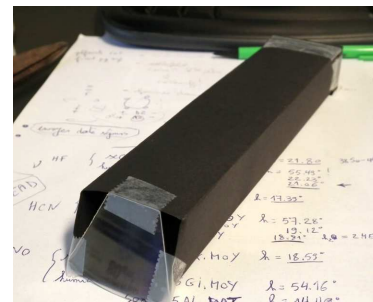
- une paire de ciseaux
- du papier collant
- un huitième de DVD
- une feuille de papier cartonné et non transparente sur laquelle est imprimé l'un des plans fournis ci-dessous. Le papier le plus sombre et le plus cartonné donne les meilleurs résultats.

Procédure :

(à faire par le professeur !) Séparer les deux couches du DVD : couper le DVD en deux, écarter les deux couches en partant du milieu, couper chaque moitié en quatre.



Découpe du DVD © GAPHE



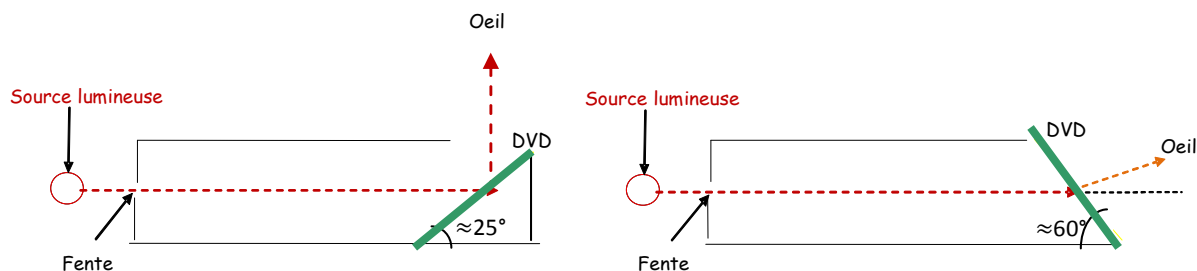


Spectroscopie en réflexion : boîte ouverte (montrant la position du morceau de DVD) à gauche, zoom sur le positionnement de la partie accueillant le DVD au milieu et zoom à droite sur la boîte fermée, pour montrer comment se placent les rabats. © GAPHE

Découper le plan fourni suivant les lignes extérieures, de manière à éliminer toutes les zones grisées. Couper la fente au cutter d'un trait unique et droit. Plier ce qui reste suivant les lignes intérieures. Coller à l'aide du papier collant les rabats en suivant les indications lettrées (rabat indiqué par les flèches A sur le côté A, rabat B sur côté B, etc.) de manière à construire une petite boîte allongée : les rabats doivent impérativement être collés à l'extérieur de la boîte et non à l'intérieur, pour éviter que la lumière n'entre par les côtés. Veiller à ne pas mettre de papier collant sur la fente ou sur le morceau de DVD !

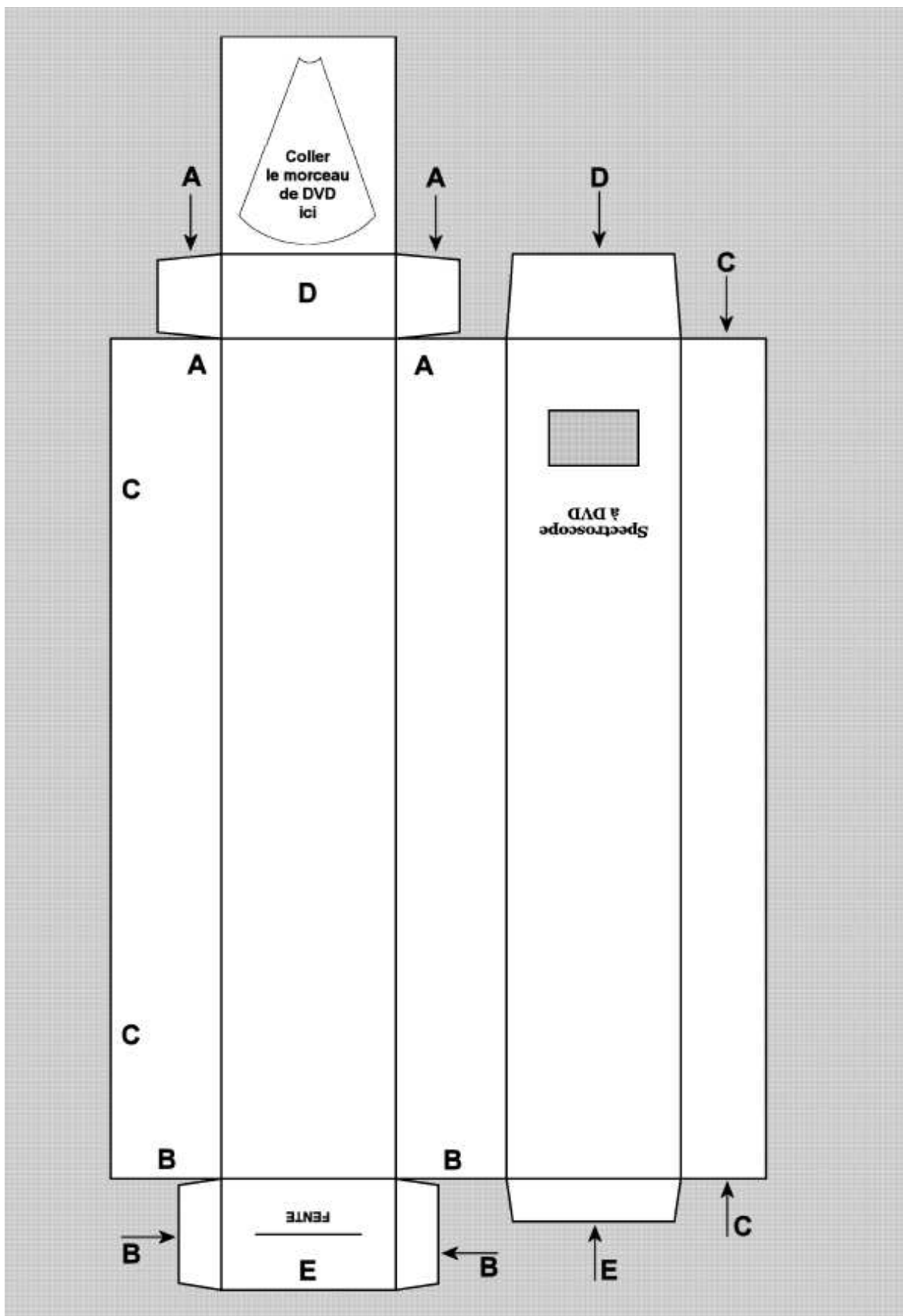
Il existe deux types de spectroscopes : les spectroscopes en transmission et ceux en réflexion (voir infos supplémentaires). Pour construire le premier, coller le huitième de DVD transparent au bout de la boîte ; pour construire le second, coller le huitième de DVD semblable à un miroir sur l'endroit indiqué (s'il dépasse, le découper encore un peu).

Pour utiliser ces spectroscopes, il faut tourner la boîte, fente vers une source de lumière (il vaut mieux que la pièce soit sombre et que la lampe soit la seule allumée). Pour le spectroscope en réflexion, la lumière révélera ses secrets en positionnant l'œil juste devant le trou à la base de l'instrument. Pour le spectroscope en transmission, il faut plutôt regarder de biais, à travers le morceau transparent. Au cas où trop peu de lumière passe par la fente, élargir un peu celle-ci en introduisant le cutter et en le faisant osciller un peu - ne pas élargir en coupant une 2^e fois au cutter et veiller à ce que la fente reste assez fine quelles que soient les circonstances !

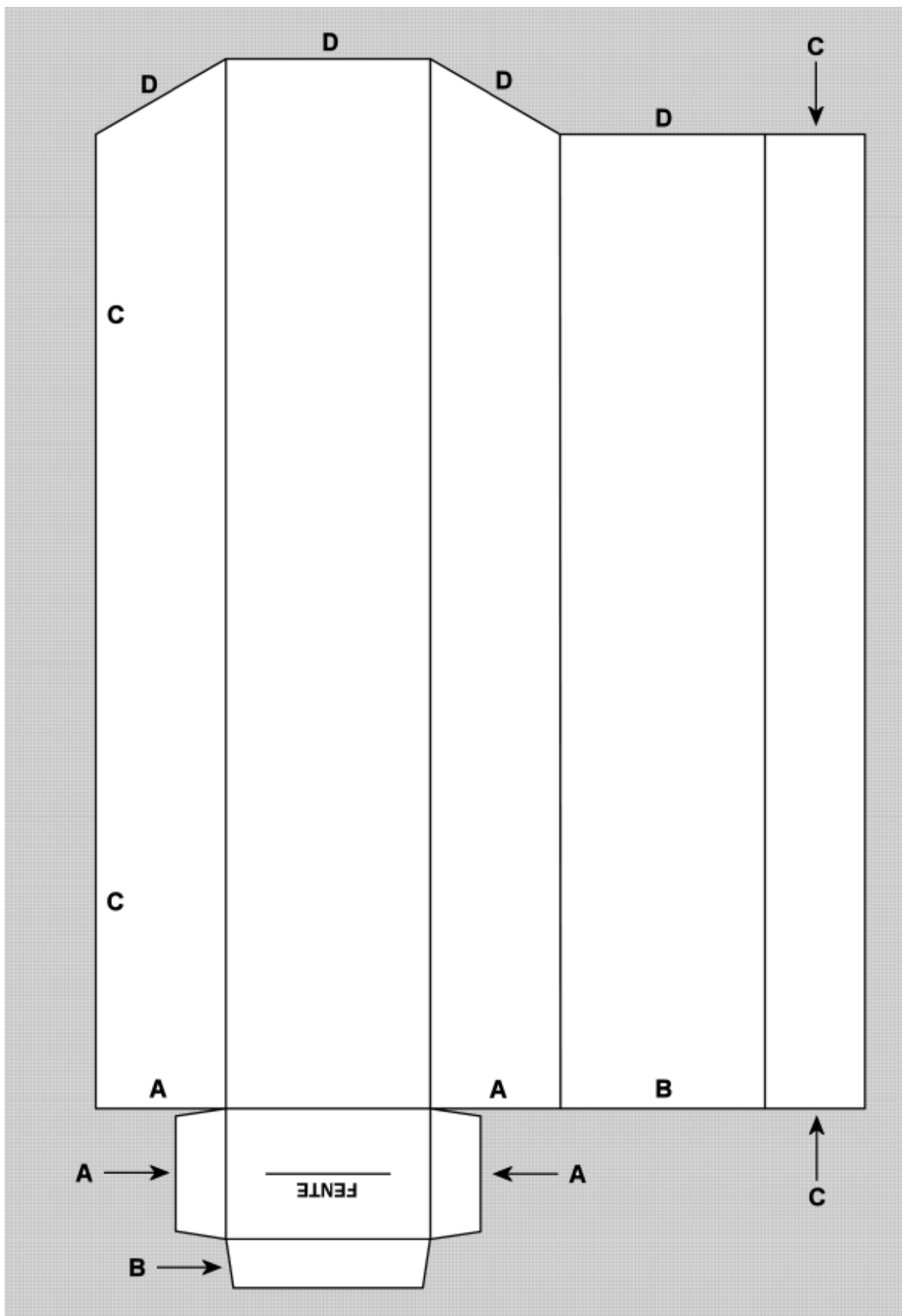


Utilisation du spectroscope à réflexion (à gauche) et en transmission (à droite). © GAPHE

PLAN DU SPECTROSCOPE EN REFLEXION © AGO-Ph. Demoulin



PLAN DU SPECTROSCOPE EN TRANSMISSION © AGO-Ph. Demoulin



Construis un « analyseur de lumière », dont le véritable nom est **spectroscope**, en suivant les indications de ton professeur. Tourne-le ensuite vers une source lumineuse : l'arc-en-ciel que tu observes s'appelle un **spectre**.

Essaie de le décrire dans les cas suivants :

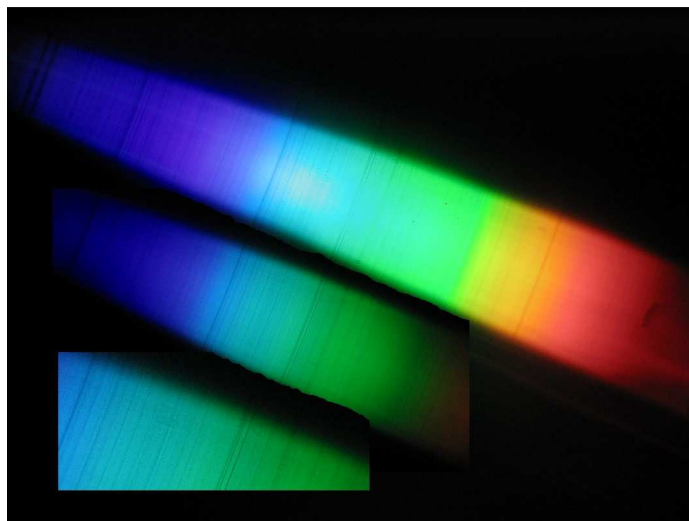
- le Soleil

Y a-t-il des lignes ? *Oui*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

Noires sur fond coloré (attention, elles sont très faibles)

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?



Spectre solaire observé avec le bricolage. Le spectre d'une lampe à incandescence est similaire, mais sans les lignes noires.

© Christophe Cattelain

- une lampe à incandescence

Y a-t-il des lignes ? *Non*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

- un tube fluorescent (« tube néon ») ou une lampe « économique »

Y a-t-il des lignes ? *Oui*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

Colorées sur fond noir

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ? *Violet-bleu, vert, rouge*

- une lampe orange d'éclairage public

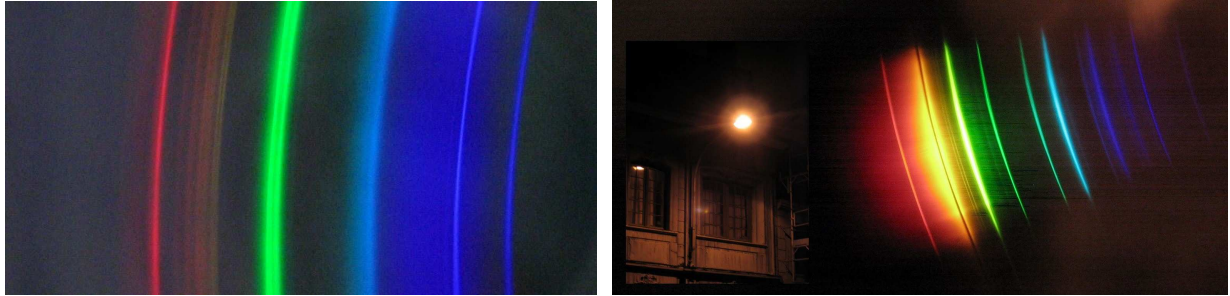
Y a-t-il des lignes ? *Oui*

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

Colorées sur fond noir

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ? *Une ligne orange large et très brillante, une ligne verte et une ligne bleue un peu plus faibles*

Info supplémentaire : On peut également regarder la lumière d'une bougie chauffe-plat, et voir comment le spectre se modifie quand on jette du sel (de cuisine ou autre) dans la flamme, ou si l'on y dépose le bout soufré d'une allumette. À noter : le sel de cuisine contenant du sodium, le spectre ressemblera un peu à celui d'une lampe d'éclairage public.



Spectre d'un tube fluorescent dit tube « néon » (à gauche) et d'une lampe d'éclairage public (à droite).

© Christophe Cattelain

Les lignes observées dans certains cas s'appellent des **raies**.

Sont-elles toutes colorées sur fond noir ou toutes noires sur fond coloré ?
Et si elles sont colorées, ont-elles toutes la même couleur ?

Non, il y en a qui sont noires et d'autres qui sont de couleur (rouge, jaune, bleue, ...).

D'après toi, qu'est-ce qui peut être à l'origine de cette différence ?

La composition de la source lumineuse. À chaque source correspond un ensemble de raies qui lui est unique, comme un code-barres. Ainsi, la nature de la source peut être identifiée à distance !

À quoi correspond le noir ?

Le noir correspond à l'absence de couleur, c'est-à-dire à l'absence de lumière, plus particulièrement à une longueur d'onde donnée dans ce cas-ci.

Qu'indique alors la présence d'une raie sombre ?

La présence d'une raie sombre ou noire indique un déficit de photons à une longueur d'onde précise.

Qu'indique alors la présence d'une raie brillante ?

Au contraire, la présence d'une raie colorée brillante indique l'apparition ou le renforcement de lumière à une longueur d'onde précise.

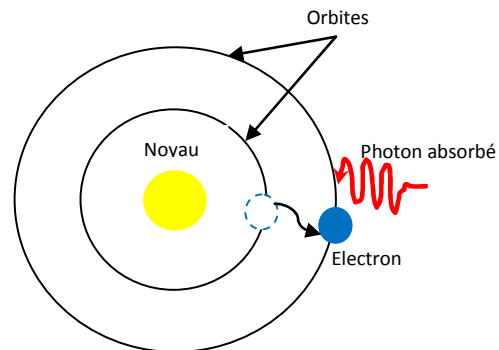
On peut expliquer la présence de ces raies à partir du modèle dit « de l'atome de Bohr ».

La matière est constituée d'atomes qui peuvent être décrits par le modèle de Bohr : un noyau central autour duquel gravitent les électrons.

Prenons alors l'atome d'hydrogène, le plus simple : il est constitué d'un noyau, fait d'un seul proton, et d'un seul électron sur une orbite circulaire à une certaine distance du noyau.

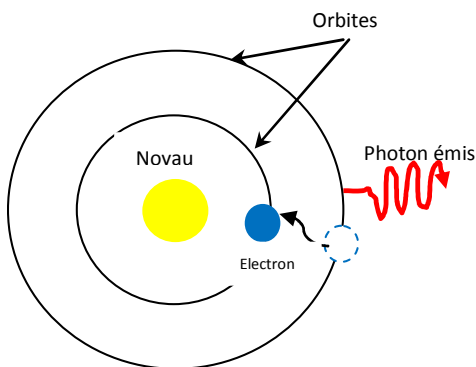
Si on fournit de l'énergie à l'électron, par exemple sous forme de lumière, il peut s'éloigner un peu plus du noyau, sur une orbite plus grande. Notons toutefois que toutes les orbites ne sont pas permises : seules certaines orbites existent. Autrement dit l'électron ne peut pas passer sur une orbite située à une distance quelconque du noyau.

L'énergie est donc utilisée pour faire « grimper » l'électron et elle disparaît alors. Par conséquent, la lumière présentera un déficit à une



Un noyau (en jaune) est entouré d'un électron (en bleu) et reçoit un faisceau de lumière (indiqué en rouge). Les lignes concentriques représentent les orbites. En absorbant la lumière, l'électron peut passer sur une orbite plus éloignée. © GAPHE

énergie ou longueur d'onde bien définie (fixée par les positions des orbites) : c'est ce qui explique les lignes noires sur fond coloré, appelées raies en absorption.



Un noyau (en jaune) est entouré d'un électron (en bleu). Les lignes concentriques représentent les orbites. L'électron qui redescend sur une orbite basse émet un peu de lumière (indiquée en rouge). © GAPHE

L'électron revient ensuite sur son orbite de départ : il doit se « débarrasser » de l'énergie qu'il a reçue. L'énergie perdue est émise sous forme de lumière avec une longueur d'onde (énergie) précise : un peu plus de lumière apparaît, c'est ce qui explique les lignes brillantes colorées, appelées raies en émission.

Les atomes de tous les éléments chimiques sont différents : ils ont un nombre de protons et d'électrons différents. Les rayons des orbites permises ne seront donc pas les mêmes et, partant, le type de photons absorbés ou émis sera différent. Ainsi, le spectre dépend de l'élément

chimique considéré : le code-barres obtenu pour chaque élément constitue donc une véritable signature.

Cette propriété est très utile en astronomie, peux-tu deviner pourquoi ?

Pour pouvoir identifier la composition de la matière à distance. En effet, il n'est pas possible de toucher et manipuler les étoiles : les astronomes ne peuvent donc qu'étudier la lumière reçue par leurs télescopes. En comparant les codes-barres des spectres enregistrés à ceux prédéterminés au laboratoire, ils déterminent, suivant les codes-barres enregistrés, les éléments présents dans l'Univers.

Voici les signatures de quelques éléments chimiques. Compare-les aux spectres observés. Peux-tu trouver à quels éléments ils correspondent ?

Lampe d'éclairage public : *elle contient du sodium.*

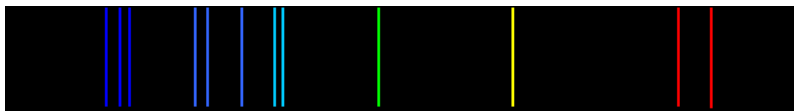
Le spectre d'un tube fluorescent (« tube néon ») ressemble-t-il à la signature du néon montrée ci-dessous ? Si non, à quoi ressemble-t-elle plus ?

Elle ne ressemble pas du tout au néon mais bien au mercure.

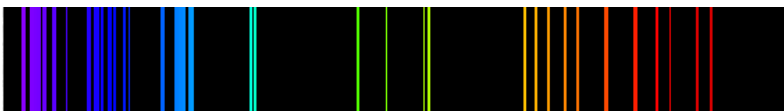
Info supplémentaire : Les « tubes néon » sont des lampes à décharge utilisant pour gaz du néon, ce qui leur confère leur couleur rouge caractéristique. Ils sont surtout utilisés pour les enseignes lumineuses. En utilisant d'autres gaz, on obtient d'autres couleurs que le rouge. C'est par abus de langage qu'on appelle à tort « néon » les lampes ayant d'autres couleurs - le terme approprié est tube fluorescent. Les tubes utilisés pour l'éclairage domestique ne contiennent donc pas de néon, mais bien du mercure, qui émet beaucoup de rayonnement ultraviolet. La paroi intérieure du tube est recouverte d'une couche de matière fluorescente, qui transforme l'ultraviolet en lumière visible. Cette matière contient notamment des métaux rares : l'euporium qui fournit la raie rouge observée, et le terbium qui contribue majoritairement à la raie verte ainsi qu'à la raie large violette.



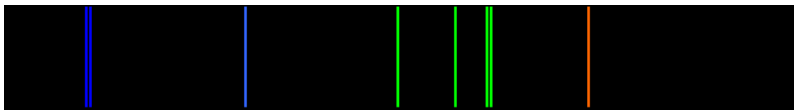
Spectre d'émission de l'Hydrogène http://www.physique.unicaen.fr/~tice/new_site_tice/pdf/cours_Int_ray_mat/apprendre/B/III/3/atome_III_32.html



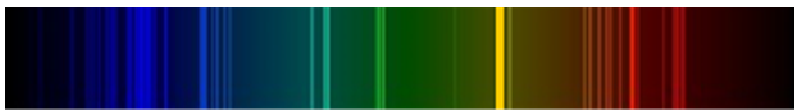
Spectre d'émission de l'Hélium <http://physique-henner.net/Seconde/Lumiere/spectreabsorp.htm>:



Spectre d'émission de l'Oxygène http://www.physique.unicaen.fr/~tice/new_site_tice/pdf/cours_Int_ray_mat/apprendre/B/III/3/atome_III_31.html



Spectre d'émission du Mercure <http://physique-henner.net/Seconde/Lumiere/spectreabsorp.htm>



Spectre d'émission du Sodium <http://www.amateurspectroscopy.com/color-spectra-of-chemical-elements.htm>



Spectre d'émission du Néon <http://www.amateurspectroscopy.com/color-spectra-of-chemical-elements.htm>



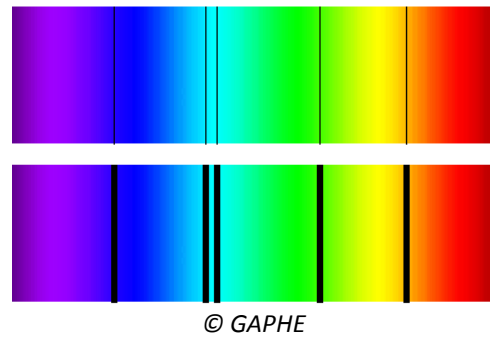
Spectre de l'Argon <http://www.amateurspectroscopy.com/color-spectra-of-chemical-elements.htm>

Compare ces deux spectres :

Quelles sont les similitudes ?

Les raies se trouvent aux mêmes positions.

Que t'apprennent ces similitudes ? Ces deux spectres appartiennent-ils à des objets de composition identique ou différente ?



Puisque les raies se trouvent aux mêmes positions, la composition doit être identique.

Quelles sont les différences ?

Les raies d'un des codes-barres sont plus larges que celles de l'autre.

En astronomie, on peut trouver des spectres d'étoiles semblables aux spectres/codes-barres ci-dessus. À ton avis d'où vient cette différence ?

Débattre avec les élèves. Une chose est sûre, la différence dépend d'une autre caractéristique que la composition de l'objet observé.

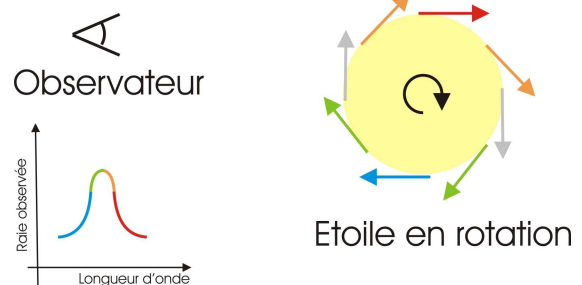
Connais-tu un phénomène susceptible de changer la position des raies ?

L'effet Doppler

À l'aide de ce phénomène, peux-tu imaginer pourquoi les raies seraient larges ?

Si les élèves ne trouvent pas de réponse, reformuler la question : « en considérant le mouvement de rotation des étoiles sur elles-mêmes et l'effet Doppler, peux-tu expliquer comment produire des raies larges ? »

Info supplémentaire : on observe aussi des raies fines pour les étoiles géantes. Comme elles sont très peu denses, il y a moins de collisions entre les atomes et ions. En plus, ces étoiles tournent assez lentement, vu leur taille. Tout cela assure des raies très fines.

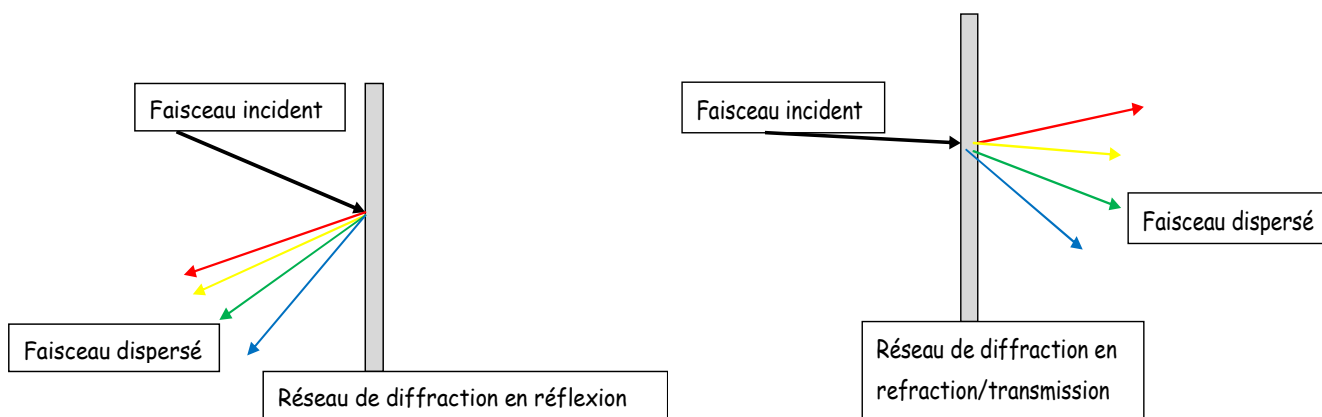


Une étoile qui tourne sur elle-même possède un côté qui vient vers l'observateur et un autre qui s'en éloigne. La lumière émise par le côté qui s'approche sera décalée vers le bleu, celle envoyée par le côté qui s'éloigne sera décalée vers le rouge. L'observateur reçoit toutes ces lumières ensemble : il observe donc une raie large, avec des zones décalées vers le bleu et d'autres vers le rouge. Plus l'étoile tourne vite, plus ces décalages seront importants et la raie large. © GAPHE

Infos supplémentaires :

a) L'élément de base d'un spectroscope est un composant optique capable de disperser la lumière, comme les prismes dans l'activité « produire un arc-en-ciel artificiel » et les gouttes d'eau pour l'arc-en-ciel naturel (voir activité « les couleurs dans la lumière »). Les prismes sont aujourd'hui rarement utilisés par les scientifiques car leur pouvoir de dispersion est assez faible (c'est-à-dire qu'on distingue difficilement les détails des spectres avec les prismes).

On leur préfère donc des « réseaux » qui sont des pièces sur lesquelles sont gravés un grand nombre de sillons parallèles et capables eux aussi de décomposer la lumière, mais avec une meilleure séparation des couleurs. Il existe des réseaux avec des traits gravés sur une surface transparente - on parle alors de « transmission » - et d'autres avec des traits gravés sur une surface réfléchissante - on parle alors de « réflexion ». Notez que les principes physiques derrière les prismes et les réseaux diffèrent : les prismes reposent sur les variations de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde (voir « les couleurs expliquées »), alors que les réseaux utilisent les interférences entre ondes lumineuses.



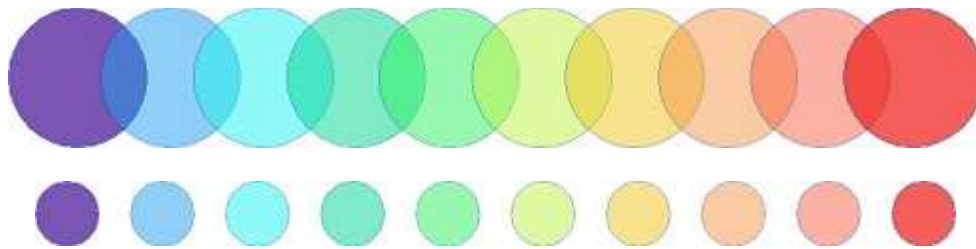
Les deux types de réseaux. ©GAPHE

Un CD ou un DVD est un réseau car les différentes pistes d'un CD ou d'un DVD sont des sillons gravés sur une surface. La séparation entre deux pistes d'un CD est de 1,6 microns, tandis qu'elle est de 0,74 microns pour un DVD. Cette séparation est environ 100 fois plus petite que l'épaisseur d'un cheveu. Sa plus petite séparation entre pistes confère aux DVDs une meilleure résolution spectrale que les CDs, c'est pourquoi nous n'utiliserons que ceux-ci pour ce bricolage. Notez que les plans fournis ne peuvent être utilisés tels quels avec un CD car l'inclinaison du morceau de CD doit être différente.

Remarquez également que les sillons des CDs ou DVDs ne sont ici pas droits, mais courbés : les raies obtenues seront donc également courbées.

b) Un autre élément essentiel du spectroscope est la fente qui recueille la lumière émise par la source. En fait, le spectre observé est l'image de cette fente et non de la source lumineuse. C'est après être passé par la fente que le rayon lumineux est dispersé par le réseau. Le spectre est ensuite imagé sur un écran ou enregistré par un système détecteur (l'œil, une pellicule photographique, un détecteur de caméra digitale, etc.).

Le rôle crucial de la fente réside dans sa taille : plus la fente est fine, moins les raies se superposent. Pour le comprendre, regardons les deux spectres ci-dessous, issus d'une même lampe de bureau : pour le premier spectre, on n'a rien interposé entre la source et le réseau, tandis que pour le deuxième, on s'est arrangé pour que la lumière passe à travers un petit trou circulaire percé dans un masque.



En haut, la lumière provient d'une source de large étendue, comme une lampe de bureau : les couleurs se superposent et le spectre est « flou ». En bas, pour empêcher la superposition, on a fait passer la lumière au travers d'un petit trou : on voit alors une série de taches de couleurs bien séparées. © astrosurf

Il semble évident qu'il faille utiliser le plus petit trou possible pour pouvoir séparer au mieux les couleurs. Toutefois, il ne faut pas en réduire la taille indéfiniment, car plus il est petit, moins de lumière passe et plus le spectre paraît peu brillant. Il faut donc trouver un bon compromis entre brouillage des couleurs et luminosité faible.

En pratique, les scientifiques utilisent une fente allongée au lieu d'un petit trou circulaire, comme dans le bricolage proposé ici. Attention cependant : si la fente n'est pas coupée nette, les raies ne seront pas des lignes parfaites.

c) Les spectres renferment beaucoup d'information, et ne renseignent pas seulement sur la composition des objets. Ainsi, la présence de raies d'absorption sur un fond coloré qu'on retrouve dans le spectre des étoiles (à l'instar de celles observées dans le Soleil) montrent que ces astres sont composés d'une partie interne extrêmement chaude, responsable de l'arc-en-

ciel coloré, et d'une couche externe, son atmosphère, composée de gaz plus froids qui absorbent le rayonnement émis par les couches sous-jacentes.

En outre, la position des raies renseigne sur le mouvement des étoiles par rapport à la Terre (éloignement ou approche) via l'effet Doppler tandis que leur forme renseigne sur la rotation des étoiles mais également sur leur densité (voir plus haut). Enfin, des raies doubles indiquent la présence de couples d'étoiles, ce qui permet de déterminer les masses stellaires (voir activité « ballet des étoiles »).

d) Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les raies n'ont jamais une fréquence parfaitement déterminée, elles s'étalent sur une bande de fréquences, on parle d'élargissement de la raie. Outre l'élargissement Doppler évoqué plus haut, dû à la rotation des astres sur eux-mêmes, il y a l'élargissement instrumental (dû à la taille finie de la fente) et l'élargissement physique (collisionnel et naturel). L'élargissement collisionnel est dû aux collisions entre ions, atomes et molécules composant l'astre tandis que l'élargissement dit naturel est inhérent à la matière même : il est dû au fait que, même pour un élément donné, les rayons des orbites de Bohr sont légèrement différentes d'un atome à l'autre. Ainsi l'absorption et/ou l'émission des photons ne se produit pas exactement au même endroit pour les différents atomes, ce qui a pour conséquence d'élargir la raie. De façon quantique, cet élargissement s'explique par l'incertitude de Heisenberg sur les niveaux d'énergie.

VII. LE BALLET DES ÉTOILES

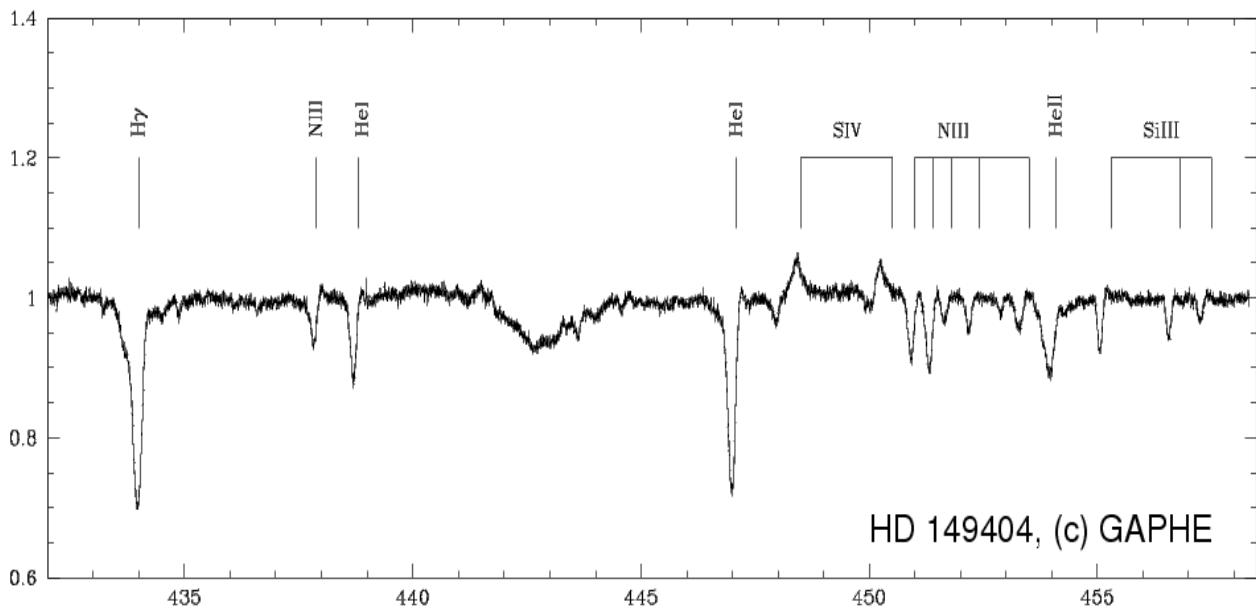
Niveau 2

Fiche de l'enseignant

Buts : Utiliser l'effet Doppler pour déterminer les paramètres physiques d'étoiles.

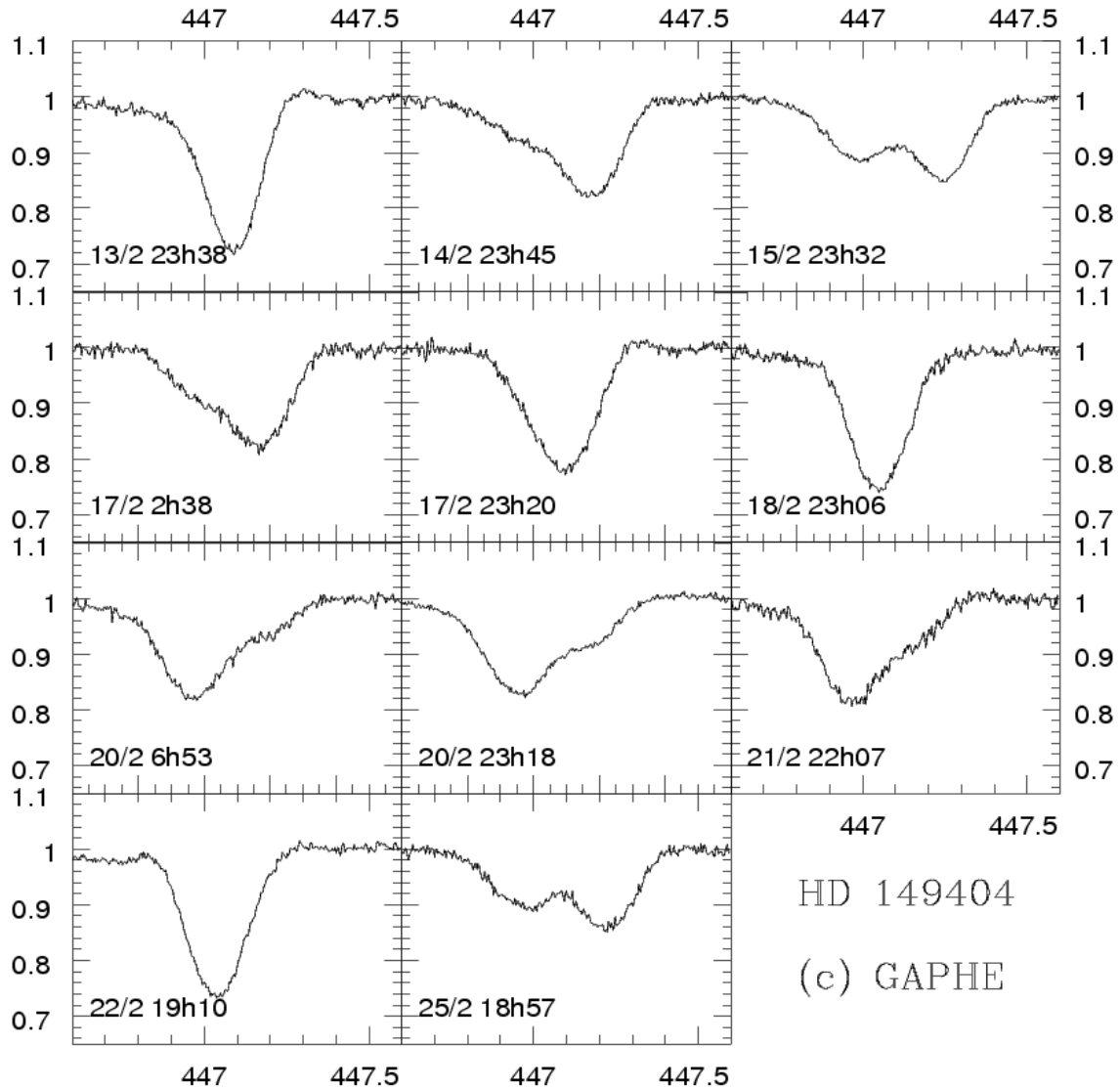
Programme concerné : L'effet Doppler, l'Univers actuel, les lois de Kepler.

Les spectres observés grâce au spectroscopie peuvent être enregistrés pour être traités et analysés plus tard. Voici un exemple de spectre d'étoile : on y voit des raies en absorption (qui apparaissent comme des creux) et des raies en émission (les bosses). Les raies ont été identifiées, et plusieurs éléments sont ainsi détectés, comme par exemple l'hélium, le soufre, le silicium, l'azote et l'hydrogène. Ils sont indiqués par le symbole chimique de l'élément suivi d'un chiffre romain (I indiquant l'atome neutre, II l'atome une fois ionisé, III l'atome deux fois ionisé,...).



Petite partie du spectre de l'étoile HD149404. La raie très large à 443nm n'appartient pas à l'étoile mais est inscrite dans son spectre par les nuages de matière se trouvant sur le trajet de la lumière vers la Terre. ©GAPHE

Faisons un zoom, pour n'observer que la raie en absorption de l'hélium située en laboratoire à une longueur d'onde de 447,1512 nm. Il s'agit ici d'une série de spectres de la même étoile enregistré au fil des jours (la date est indiquée dans le coin inférieur gauche).



Raie d'hélium enregistrée à différents moments ©GAPHE

Manifestement, la raie ne reste pas identique au fil des jours, peux-tu décrire les variations que tu observes ?

La raie est parfois unique, parfois double, et quand elle est unique, elle est plus profonde.

C'est un phénomène qui semble périodique, peux-tu repérer des configurations qui se répètent ?

La raie observée le 13/2 à 23h38 ressemble à celle du 22/2 à 19h10 et la raie observée le 15/2 à 23h32 ressemble à celle du 25/2 à 18h 57.

S'il y en a, que vaut l'intervalle de temps entre les répétitions (qui s'appelle la période) ?

La période est d'environ 10 jours (en réalité, $[9,81475 \pm 0,00084]j$).

Compare la raie observée le 13/2 (ou le 22/2) à celle observée le 15/2 (ou le 25/2), que remarques-tu ?

La raie observée le 13/2 (ou le 22/2) est plus intense, plus profonde, que chacune des composantes observées le 15/2 (ou le 25/2). On remarque également que plus les deux composantes se séparent, moins elles sont intenses.

Que peux-tu en conclure ?

La raie observée le 13/2 (ou le 22/2) est en fait la somme des deux raies ; il s'agit simplement de deux raies enregistrées à une même longueur d'onde.

Les raies semblent changer de position, quel phénomène est susceptible de décaler les raies ?

L'effet Doppler

Peux-tu écrire la loi décrivant ce phénomène ?

$\lambda/\lambda_0=1+(v/c)$, où v est la vitesse radiale de la source lumineuse, c la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s soit environ 300 000 km/s), λ_0 est la longueur d'onde émise par la source supposée au repos, ici 447,1512 nm, et λ est la longueur d'onde mesurée.

Supposons qu'on soit en présence d'une seule source, ce phénomène peut-t-il expliquer l'apparence de la raie en absorption de l'hélium située à 447,1512 nm sur le spectre ci-dessus ?

Non car dans ce cas, il n'y aurait qu'une seule composante pouvant se décaler.

Que peux-tu en déduire ?

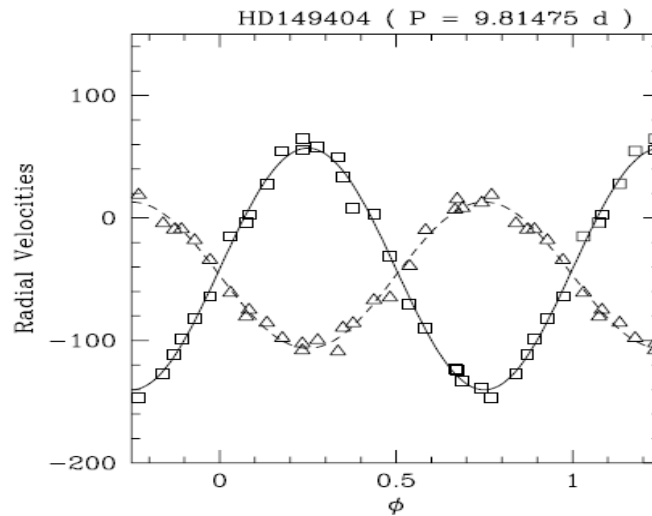
La seule possibilité d'observer un dédoublement de raie est qu'il existe deux sources de lumière. Pour la raie d'hélium observée, il ne s'agit donc pas d'une raie issue d'une seule étoile mais de raies provenant de deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre.

A l'aide d'une latte, mesure la position des différentes composantes de la raie (deux quand elle paraît double, une quand la raie semble unique). Attention, la position se mesure en bas de la raie, dans le fond du creux, puisqu'il s'agit d'une raie en absorption.

Reporte ces valeurs dans le tableau suivant et, en utilisant la loi vue précédemment, détermine les valeurs des vitesses correspondantes :

N° Spectre	Jour	Longueurs d'ondes mesurées (en nm)		Vitesses correspondantes (en km/s)	
1	13/2	447,0602	447,1288	-61,0	-15,0
2	14/2	447,0237	447,1928	-85,5	27,9
3	15/2	446,9983	447,2479	-102,5	64,8
4	17/2 AM	447,0176	447,2015	-89,6	33,7
5	17/2 PM	447,0511	447,1557	-67,1	3,0
6	18/2	447,0927	447,0468	-39,2	-70,5
7	20/2 AM	447,1697	446,9446	12,4	-138,5
8	20/2 PM	447,1742	446,9662	15,4	-124,0
9	21/2	447,1446	446,9615	-4,4	-127,2
10	22/2	447,1242	447,0286	-18,1	-82,2
11	25/2	446,9901	447,2340	-108,0	55,5

Reporte ces valeurs sur le graphique suivant



Courbe des vitesses mesurées pour cette étoile sur ces données (et d'autres) par les astronomes. L'axe des abscisses donne la phase, qui est une fonction simple des jours : $\phi = (T - T_0) / P$ où T est la date, T_0 une date de référence (choisie pour que les courbes se croisent en $\phi = 0$) et P la période du système. © GAPHE.

Détermine les amplitudes K_1 et K_2 des courbes de vitesse pour chaque composante, c'est-à-dire calcule la moitié de la différence entre vitesse maximale et vitesse minimale :

$$K_1 = 60 \pm 2 \text{ km/s}$$

$$K_2 = 99 \pm 3 \text{ km/s}$$

L'astronome Kepler, et plus tard le physicien Newton, ont étudié les lois de la physique qui régissent le problème de deux corps gravitant l'un autour de l'autre ; on peut en tirer les équations suivantes :

$$\frac{(M_1)^3}{(M_1 + M_2)^2} = 10^{-7} \times (K_2)^3 \times P \quad \text{et} \quad \frac{(M_2)^3}{(M_1 + M_2)^2} = 10^{-7} \times (K_1)^3 \times P$$

Où P est la période en jours que tu as déterminée plus haut. Les masses sont exprimées en multiples de la masse solaire.

Ces équations permettent de trouver facilement le rapport entre les masses des deux objets $M_2/M_1 = K_1/K_2$

Que vaut-il ? $M_2/M_1 = K_1/K_2 = 0,605 \pm 0,027$

Si ce rapport M_2/M_1 est baptisé α , utilise les équations ci-dessus de manière à trouver ce que vaut M_1 :

$$M_1 = (1+\alpha)^2 \times 10^{-7} \times (K_2)^3 \times P \text{ et } M_2 = \alpha \times M_1 = (1+(1/\alpha))^2 \times 10^{-7} \times (K_1)^3 \times P$$

Détermine ainsi les masses des deux étoiles :

$$M_1 = 2,52 \pm 0,21 \text{ Masses solaires}$$

$$M_2 = 1,52 \pm 0,13 \text{ Masses solaires}$$

Ces masses sont-elles vraiment les masses réelles des étoiles ? Pour le savoir, il faut se souvenir des limitations de la loi utilisée plus haut pour calculer les vitesses : quelles sont-elles ?

L'effet Doppler ne considère que la vitesse radiale (de rapprochement ou d'éloignement) de la source, c'est-à-dire la composante de la vitesse réelle dirigée vers l'observateur. On ne mesure donc qu'une partie de la vitesse réelle et les masses calculées sont en réalité des limites inférieures des masses réelles.

Info supplémentaire : on peut essayer de faire raisonner les élèves sur un système composé de deux étoiles qui tourneraient dans un plan perpendiculaire à l'observateur. Dans ce cas, bien que les vitesses réelles soient non nulles, les vitesses mesurées vaudront zéro car elles n'ont pas de composante dirigée vers l'observateur.

Tu as en fait calculé les masses multipliées par le sinus de l'inclinaison au cube. Sachant que, dans le cas présent, l'angle d'inclinaison i vaut environ 20 degrés, que valent les masses réelles ?

$$M_1 = [(2,52 \pm 0,21) / (\sin 20)^\3] = 63 \pm 5 \text{ Masses solaires}$$

$$M_2 = [(1,52 \pm 0,13) / (\sin 20)^\3] = 38 \pm 3 \text{ Masses solaires}$$

Info supplémentaire : L'angle i , appelé inclinaison, est l'angle entre le plan dans lequel les étoiles se déplacent et le plan perpendiculaire à la direction d'observation.

Infos supplémentaires :

a) On appelle binaires ou systèmes binaires les couples d'étoiles liés par la gravitation. Ce type d'objet est assez répandu puisque environ la moitié des étoiles sont en fait des binaires. Dans un tel système, les deux étoiles tournent toutes les deux autour de leur centre de masse commun. Si les étoiles ont des masses égales, leurs trajectoires seront identiques et leurs vitesses seront également identiques mais de sens opposés. Par contre, si les masses sont différentes, la plus massive, plus proche du centre de masse, se déplacera sur une trajectoire plus petite et présentera donc des vitesses plus faibles. On peut montrer cet effet en utilisant une ronde enfantine. Soit deux enfants assez semblables qui se tiennent les mains et tournent l'un autour de l'autre : leurs mouvements seront semblables. Si par contre on remplace l'un des enfants par un adulte, ce dernier ne bougera pas beaucoup alors que l'enfant devra tourner très rapidement pour rattraper l'adulte.

Soient deux étoiles A et B, B étant plus massive que A. L'image ci-dessous montre leur mouvement autour de leur centre de masse et les positions des raies enregistrées.

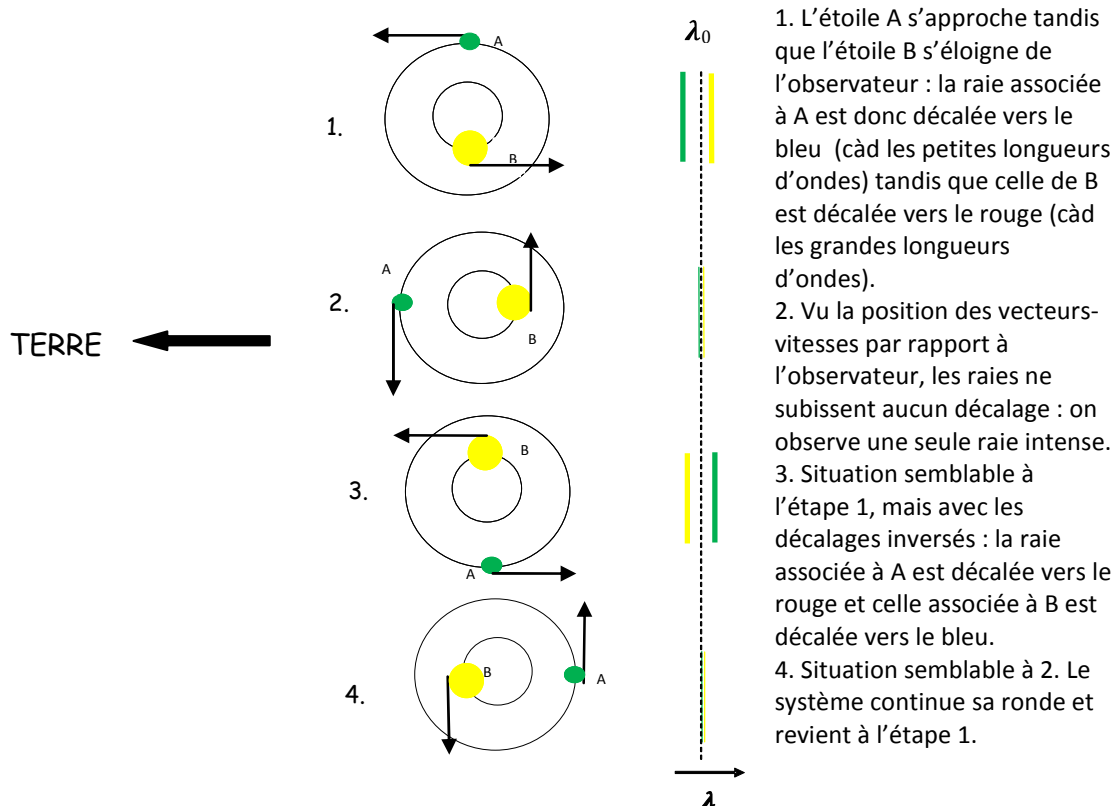


Schéma d'un système binaire (à gauche) et spectre observé (à droite) – une seule raie est représentée pour chaque étoile. ©GAPHE

b) Les valeurs indiquées dans ce formulaire corrigé correspondent aux vraies valeurs déterminées par les astronomes à l'aide de logiciels sophistiqués. Les élèves n'arriveront pas à des valeurs aussi précises, évidemment. L'article complet publié sur ce système est disponible sur <http://hdl.handle.net/2268/15962/>

Notez que la masse du Soleil est d'environ 2×10^{30} kilogrammes et que les dates affichées sur les graphiques ne sont pas les véritables dates des enregistrements : pour que les dates soient plus proches des années en cours et proches les unes des autres, les dates ont été translatées d'environ 400 périodes de révolution du système binaire.

c) C'est en faisant ce genre d'observations, d'interprétations et de calculs que les astronomes ont

- détecté qu'environ la moitié des étoiles vivent en couple
- mesuré la masse des étoiles vivant en couple
- détecté la plupart des 700 exoplanètes² connues aujourd'hui
- mesuré, en observant le décalage vers le rouge des raies, que les galaxies lointaines s'éloignent et en ont conclu que l'Univers est en pleine expansion.

À propos de ce dernier point : bien que la découverte de ce décalage vers le rouge soit attribuée à l'astronome américain Edwin Hubble, il avait été mis en évidence bien avant lui par d'autres astronomes. En effet, en 1912, un autre astronome américain appelé Vesto Slipher fut le premier à observer le décalage vers le rouge des raies spectrales des galaxies lointaines. En 1927, l'astronome belge Georges Lemaître, étudiant les équations de la Relativité Générale d'Einstein, trouva que l'Univers devrait être en expansion. Il utilisa alors les observations de Slipher pour vérifier ses prédictions théoriques sur l'expansion de l'Univers, et tira de l'ensemble une loi reliant la vitesse d'éloignement des galaxies à la distance. Lemaître déduisit de l'expansion actuelle que par le passé, les objets devraient être très proches les uns des

² Une exoplanète est une planète qui tourne autour d'une étoile qui n'est pas notre Soleil. Comme les planètes sont bien moins massives que les étoiles, les étoiles se déplacent peu alors que la vitesse des planètes est importante. Toutefois, les planètes sont aussi bien moins lumineuses que les étoiles : les astronomes ne pouvant pas mesurer la vitesse de la planète, puisqu'ils ne les voient pas, ils doivent mesurer le déplacement minuscule des raies de l'étoile - de l'ordre du mètre par seconde alors que les mesures ici étaient des kilomètres par seconde !

autres. Il proposa alors une théorie d'évolution de l'Univers à partir d'un « atome primitif » ; cette théorie recevra par la suite le surnom de « Big Bang ». C'est seulement en 1929 qu'Edwin Hubble et Milton Humason recommencèrent les mesures de Slipher. Ils publièrent alors de nouveau la loi reliant le décalage vers le rouge et la distance des galaxies, et c'est ainsi qu'elle est actuellement connue sous le nom de « la loi de Hubble », alors que le Belge Lemaître l'avait trouvée deux ans plus tôt.

VIII. LE TÉLESCOPE HRT

La majeure partie de nos connaissances de l'Univers, les astronomes les ont obtenues à partir de l'analyse spectroscopique de la lumière des astres. Pour ce faire, ils ont besoin de collecter autant de lumière que possible et ils le font au moyen de télescopes. Depuis l'utilisation du premier télescope, l'astronomie n'a cessé de progresser. Les progrès dépendent en grande partie du raffinement des techniques d'observation.

La plupart des télescopes sont pilotés par un astronome et/ou un technicien installés dans la salle de contrôle situé à côté du télescope. Pour certaines applications cependant, les astronomes ont besoin de télescopes capables de réagir rapidement sans nécessairement devoir être sur place. Ils utilisent alors des télescopes entièrement robotisés, qui fonctionnent sans la présence constante d'un opérateur. Ils sont contrôlés par des ordinateurs et obtiennent leurs instructions à distance par Internet.

C'est le cas du HRT, un instrument privé et flexible, construit grâce à un partenariat international entre les universités de Hambourg (Allemagne), Guanajuato (Mexique) et Liège (Belgique). Il a été construit à Hambourg, d'où le nom de Télescope Robotique d'Hambourg (HRT) et est installé sur le site de La Luz au Mexique. L'Université de Liège a financé le dôme, l'installation électrique et le transport vers le Mexique. En échange, les astrophysiciens liégeois auront accès à 10% du temps d'observation du HRT pendant 15 ans.

Ce télescope possède un miroir principal de 1,2m de diamètre est équipé d'un spectrographe de type échelle, c'est-à-dire pouvant distinguer très finement les détails des messages lumineux envoyés par les étoiles. Il travaille du proche infrarouge au proche ultraviolet.

Diverses études seront menées par les astronomes liégeois. Par exemple, ils analyseront les phénomènes de variabilité associés aux étoiles massives (c'est-à-dire ayant au minimum une dizaine de fois la masse du Soleil), utiliseront les étoiles massives vivant en couples afin d'en déterminer les propriétés fondamentales (les masses, et les rayons,...) et tenteront de comprendre l'éjection de masse de ces étoiles - ce que l'on appelle un « vent stellaire ». Ces étoiles massives jouent en effet un rôle essentiel dans la fabrication et la dissémination des éléments chimiques dans l'espace. Elles sont aussi à l'origine de la formation d'autres étoiles, et sont capables de « sculpter » le milieu environnant, y créant de jolies nébuleuses.

En outre, les astrophysiciens liégeois essaieront de détecter les particularités spectrales d'étoiles jeunes entourées de disques de débris

protoplanétaires. En effet, il existe aux abords des étoiles jeunes des rochers et boules de glaces qui, en s'agglomérant, donnent naissance aux planètes. Cependant, toute la matière présente n'est pas nécessairement utilisée, et le reste forme un disque de débris. Cette épaisse couche de gaz rend ces étoiles difficile à étudier et donc mal connues - la haute résolution spectrale du spectroscopie attaché au HRT donnera ici des informations inédites, en sondant l'environnement direct de ces étoiles jeunes. Cela permettra de mieux comprendre comment se forment les planètes et les étoiles - et notamment comment s'est passée la formation de notre Système solaire.

Enfin, la grande résolution du HRT permettra d'étudier les pulsations d'étoiles. En effet, la surface des étoiles vibre continuellement, comme une peau de tambour. À l'image des instruments de musique, les fréquences et l'amplitude de ces oscillations dépendent des propriétés de l'étoile : une petite cloche et une grande cloche, une cloche en bois et une cloche en bronze ne donneront pas le même son - il en va de même pour les étoiles, mais pour la lumière. Les astrophysiciens obtiendront ainsi des informations sur les propriétés physique de l'étoile considérée, mais aussi sur sa structure interne, inaccessible autrement (car la lumière émise par les étoiles ne provient que d'une fine couche externe).

IX. GLOSSAIRE

-**Spectroscope** : c'est un appareil qui permet de faire les spectres : il disperse la lumière et en révèle les propriétés (distribution de l'intensité lumineuse en fonction de l'énergie ou de la longueur d'onde, présence de raies en émission/absorption voir p37). Cela nous renseigne sur les caractéristiques de la matière.

-**Spectroscopie** : c'est une branche de la science ayant pour objet l'étude des spectres, c'est-à-dire de la répartition de la lumière en fonction de son énergie (ou de sa longueur d'onde).

La spectroscopie est une technique fondamentale en astronomie (science qui cherche à expliquer l'origine, l'évolution ainsi que les propriétés chimiques et physiques des astres). En effet, il n'est pas possible de toucher et manipuler les objets de notre Univers³ : les astronomes ne peuvent donc qu'étudier la lumière reçue par leurs télescopes. La spectroscopie leur permet de décoder ce rayon lumineux afin d'en dégager les caractéristiques de l'objet céleste qui l'a émis.

En Chimie, la spectroscopie occupe également une place privilégiée vu son utilité pour identifier les composants chimiques. On trouve de nombreuses applications de la spectroscopie dans les industries. Ainsi, les industries agro-alimentaires utilisent de la spectroscopie pour l'analyse des constituants majeurs et de la valeur nutritionnelle des aliments, les industries du papier pour le contrôle de la qualité du produit, les industries métallurgiques pour doser la fonte très chaude sans la « toucher », etc.

-**Effet Doppler** : c'est un phénomène dû au fait que les ondes émises par une source en mouvement sont « comprimées » en avant de la source et « étirées » en arrière. Au niveau sonore, on en fait l'expérience régulièrement quand une voiture passe à côté de nous rapidement : elle émet un niiiiaoon où les

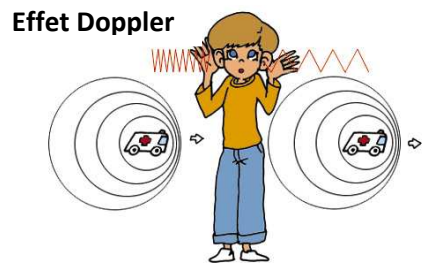


Illustration de l'effet Doppler sonore ©
http://www.redorbit.com/modules/reflib/article_images

³ A l'exception de quelques objets dans le système solaire explorés par des robots comme sur Mars ou des hommes sur la Lune.

fréquences aigües correspondent au moment où la voiture s'approche et les graves au moment où la voiture s'éloigne.

Son équivalent lumineux correspond à un décalage vers le bleu de la longueur d'onde de la lumière émise par un objet qui s'approche de la Terre et un décalage vers le rouge de la longueur d'onde de la lumière émise par un objet qui s'éloigne de la Terre.

L'effet Doppler permet de déterminer la composante de la vitesse dirigée vers l'observateur en mesurant ce décalage. Il permet donc de mesurer la vitesse des objets célestes par rapport à la Terre et par exemple de déterminer les mouvements des étoiles dans les galaxies.

-Etoile : C'est une boule de gaz assez massive pour briller par elle-même. Elle tire son énergie de la fusion nucléaire qui se produit en son sein : la réaction principale consiste en une fusion de quatre noyaux d'hydrogène pour donner un seul noyau d'hélium, ce qui libère de l'énergie.

Cette énergie diffuse du centre jusqu'à la surface de l'étoile où elle est émise sous forme de lumière, que nous recevons ensuite. Notez que les étoiles subissent également d'autres réactions de fusion vers la fin de leur vie. Ce sont en fait les étoiles qui ont bâti tous les éléments chimiques qui nous entourent. En effet, dans les premiers instants de l'Univers, il n'existait que de l'hydrogène (~90% des atomes), de l'hélium (~10% des atomes), et quelques traces de lithium et de béryllium. Les autres éléments chimiques (carbone, oxygène, calcium, uranium,...) ont été fabriqués par les générations stellaires précédentes.

Dans notre Système solaire il n'existe qu'une seule étoile : le Soleil. Les étoiles que l'on voit la nuit paraissent bien moins lumineuses, mais c'est simplement parce qu'elles se trouvent beaucoup plus loin. Par exemple, l'étoile la plus proche, Proxima Centauri, se trouve 250 000 fois plus loin de la Terre que le Soleil.

Toutes les étoiles ne sont pas identiques : il existe des étoiles chaudes et étoiles froides (de 3000 à 120 000°C en surface, avec 5500°C pour notre Soleil), des petites et des grandes (de 8% de la masse du Soleil à 100 fois la masse du Soleil, la masse du Soleil valant 300 000 fois la masse de la Terre) ; des jeunes âgées de quelques années et des vieilles âgées de plusieurs milliards d'années.

-**Galaxie** : Une galaxie est un gigantesque ensemble d'étoiles. Notre Galaxie, s'appelle la Voie Lactée et elle contient environ 100 milliards d'étoiles. Notre Soleil ne se trouve pas au centre de notre Galaxie mais en périphérie. Il effectue une rotation autour de ce centre en 220 millions d'années.

-**Big Bang** : Lorsqu'on observe les galaxies lointaines, on se rend compte qu'elles s'éloignent toutes de nous à grande vitesse : c'est l'expansion de l'Univers. L'espace s'étire donc avec le temps. Si l'on remonte le film de l'Univers à l'envers, on trouvera un instant où l'Univers était très dense et très chaud. Cette situation s'est produite il y a 13,7 milliards d'années et a été baptisé le Big Bang.

X. FICHES ELÈVES

Les couleurs dans la lumière

D'où viennent les lumières que nous recevons et qui nous entourent ?

.....

Ces lumières sont de quelle(s) couleur(s) ?

.....

As-tu déjà vu un arc-en-ciel ?

.....

Quelles sont les couleurs présentes dans l'arc-en-ciel ?

Combien sont-elles ?

Dans quel ordre apparaissent-elles ?

.....

.....

.....

Peux-tu le dessiner ?

Y a-t-il d'autres exemples où des couleurs surgissent de la lumière ?

.....

A ton avis, d'où viennent les couleurs de l'arc-en-ciel ?

Autrement dit, pour qu'il y ait un arc-en-ciel, que faut-il ?

.....

.....

.....

Ton professeur va produire un arc-en-ciel artificiel.

Les couleurs sont-elles les mêmes que pour l'arc-en-ciel naturel ?

.....

Sont-elles dans le même ordre ?

.....

Si l'on observe attentivement cet arc-en-ciel, le bord entre les couleurs est-il net ? Autrement dit, entre le jaune et le vert ou entre le bleu et le vert, y a-t-il une limite bien nette ?

.....

.....

Si l'on envoie la lumière d'un pointeur laser vers le prisme, que va-t-il se passer selon toi ?

.....

.....

.....

Fais l'expérience, que se passe-t-il en réalité ?

.....

.....

.....

Comment l'expliquer ?

.....

.....

.....

Les couleurs expliquées

Dessine le dispositif expérimental.

Que peux-tu observer ?

.....
.....

Pourquoi ce phénomène se produit-il ? Essayons de le comprendre.

Nous avons ici affaire à un rayon qui change de direction en passant dans un matériau autre que l'air. Quelle loi décrit ce phénomène ?

.....

Énonce-la :

.....
.....
.....
.....

Le rayon lumineux est au départ unique : l'angle d'entrée est donc bien déterminé. Par contre, on observe que l'angle de sortie varie selon la couleur ; de quelle manière ?

.....
.....
.....

En te basant sur la loi énoncée plus haut, comment peux-tu expliquer cette différence ?

.....
.....

Les couleurs invisibles

Un prisme décompose la lumière en ses composantes colorées. Supposons que l'on parvienne à enregistrer de manière objective la présence de lumière par un dispositif quelconque. Si seules les couleurs observables à l'œil existent, qu'indiquerait ce dispositif si on le place à côté de l'arc-en-ciel artificiel généré par le prisme ?

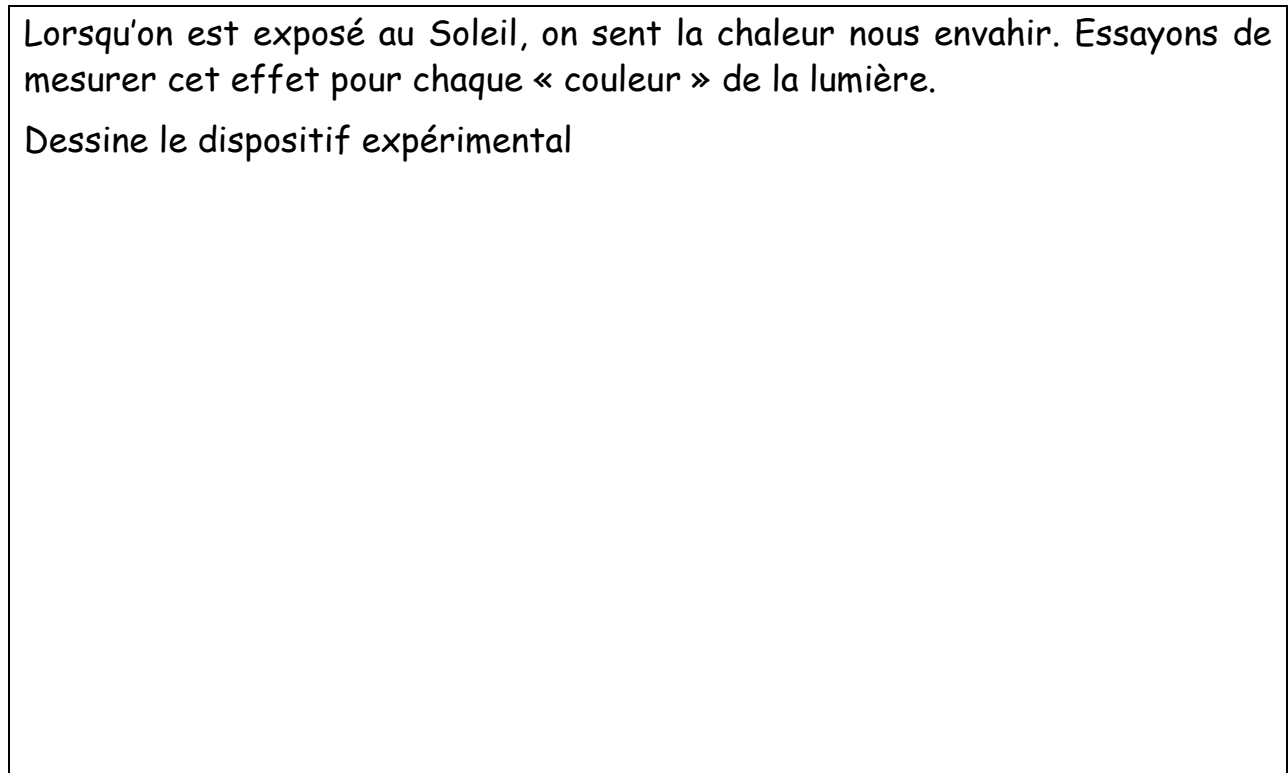
.....
.....
.....
.....

Si ce dispositif donne une réponse contraire à cela, quelle conclusion en tires-tu ?

.....
.....
.....
.....

Lorsqu'on est exposé au Soleil, on sent la chaleur nous envahir. Essayons de mesurer cet effet pour chaque « couleur » de la lumière.

Dessine le dispositif expérimental



Relève la température initiale des thermomètres, quand ils sont dans l'ombre. Une fois le dispositif éclairé, relève la température finale des thermomètres après 5 minutes.

	Th1	Th2	Th3
T° à l'ombre			
T° après 5 min d'éclairage			
Différence			

Les thermomètres indiquent-ils tous la même température au départ ?

.....

Les thermomètres indiquent-ils tous la même température après cinq minutes ?

.....

Si non, as-tu remarqué une quelconque tendance ? Par exemple, où observes-tu les plus hautes températures ?

.....

.....

.....

Que peux-tu en conclure ?

.....

.....

.....

Observe la télécommande quand on ne fait rien et quand on l'utilise. Vois-tu quelque chose de particulier ?

.....

Que peux-tu en déduire ?

.....

.....

Remplace ton œil par un détecteur électronique, par exemple en utilisant la fonction « photo » de ton gsm ou un appareil photo numérique. Recommence l'expérience. Qu'observes-tu ?

.....

.....

Que peux-tu en déduire ?

.....

.....

Révéler les secrets de la lumière - 1

La lumière cache bien des secrets. Tentons de les découvrir avec un analyseur de lumière. Construis le tien en suivant les indications de ton professeur. Cet « analyseur » porte un nom assez compliqué : **spectroscope** !

Tourne-le vers une source lumineuse : l'arc-en-ciel parfois un peu bizarre que tu observes s'appelle un **spectre**. Il va te permettre de trouver les signatures secrètes de la lumière.

Essaie de décrire ce que tu observes dans les cas suivants :

- le Soleil

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

- une lampe à incandescence

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

- un tube fluorescent (« tube néon ») ou une lampe « économique »

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

- une lampe orange d'éclairage public

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

Les lignes observées dans certains cas s'appellent des **raies**.

Sont-elles toutes colorées sur fond noir ou toutes noires sur fond coloré ?

Et si elles sont colorées, ont-elles toutes la même couleur ?

.....

.....

S'il y en a qui ont la même couleur (par exemple orange) pour des sources lumineuses différentes, sont-elles disposées de la même façon ?

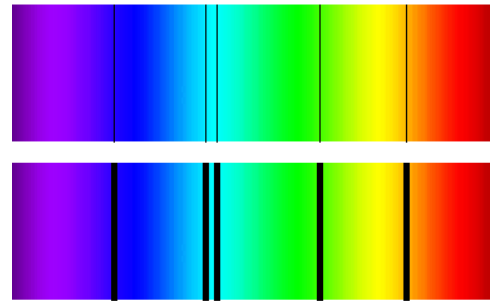
.....

.....

En fait, chaque source lumineuse possède un ensemble de raies qui lui est propre, un peu comme un code-barres. Cette signature dépend de ce qui est à l'intérieur des ampoules (pour les lampes) et de ce qui est dans le Soleil car chaque gaz, liquide ou solide possède son propre « code-barres ».

Cette propriété est très utile en astronomie puisqu'elle permet d'identifier, à distance, la composition des étoiles. En effet, il n'est pas possible de toucher et manipuler les étoiles : les astronomes ne peuvent donc qu'étudier la lumière reçue par leurs télescopes. Ils déterminent, suivant les « codes-barres » lumineux enregistrés, les éléments présents dans l'Univers.

Compare ces deux spectres :



© GAPHE

Quelles sont les similitudes ?

.....
.....

Quelles sont les différences ?

.....
.....

En astronomie, on peut trouver des spectres semblables à ceux-ci. Puisque les positions sont les mêmes, la composition des deux sources est identique, mais la largeur des traits donne des informations supplémentaires. Quand c'est un « code-barres » avec des traits fins, cela indique une étoile qui tourne lentement sur elle-même tandis que le « code-barres » aux traits larges indique une petite étoile ou une étoile qui tourne rapidement sur elle-même.

Les spectres renferment donc beaucoup d'informations utiles aux astronomes.

Révéler les secrets de la lumière - 2

Construis un « analyseur de lumière », dont le véritable nom est **spectroscope**, en suivant les indications de ton professeur. Tourne-le ensuite vers une source lumineuse : l'arc-en-ciel que tu observes s'appelle un **spectre**.

Essaie de le décrire dans les cas suivants :

- le Soleil

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

- une lampe à incandescence

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

- un tube fluorescent (« tube néon ») ou une lampe « économique »

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

- une lampe orange d'éclairage public

Y a-t-il des lignes ?

.....

S'il y en a, sont-elles colorées sur fond noir ou noires sur fond coloré ?

.....

S'il y en a des colorées, quelle est leur couleur ?

.....

Les lignes observées dans certains cas s'appellent des **raies**.

Sont-elles toutes colorées sur fond noir ou toutes noires sur fond coloré ?

Et si elles sont colorées, ont-elles toutes la même couleur ?

.....

.....

D'après toi, qu'est-ce qui peut être à l'origine de cette différence ?

.....

.....

.....

.....

À quoi correspond le noir ?

.....

.....

Qu'indique alors la présence d'une raie sombre ?

.....

.....

Qu'indique alors la présence d'une raie brillante ?

.....

.....

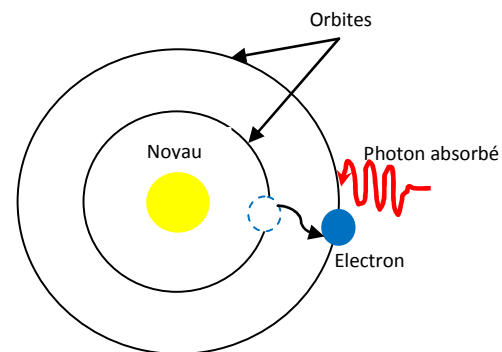
On peut expliquer la présence de ces raies à partir du modèle dit « de l'atome de Bohr ».

La matière est constituée d'atomes qui peuvent être décrits par le modèle de Bohr : un noyau central autour duquel gravitent les électrons.

Prenons alors l'atome d'hydrogène, le plus simple : il est constitué d'un noyau, fait d'un seul proton, et d'un seul électron sur une orbite circulaire à une certaine distance du noyau.

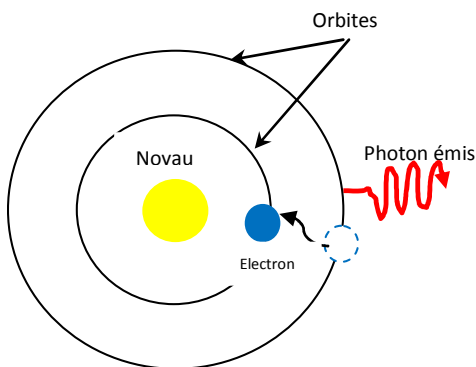
Si on fournit de l'énergie à l'électron, par exemple sous forme de lumière, il peut s'éloigner un peu plus du noyau, sur une orbite plus grande. Notons toutefois que toutes les orbites ne sont pas permises : seules certaines orbites existent. Autrement dit l'électron ne peut pas passer sur une orbite située à une distance quelconque du noyau.

L'énergie est donc utilisée pour faire « grimper » l'électron et elle disparaît alors. Par conséquent, la lumière présentera un déficit à une



Un noyau (en jaune) est entouré d'un électron (en bleu) et reçoit un faisceau de lumière (indiqué en rouge). Les lignes concentriques représentent les orbites. En absorbant la lumière, l'électron peut passer sur une orbite plus éloignée. © GAPHE

énergie ou longueur d'onde bien définie (fixée par les positions des orbites) : c'est ce qui explique les lignes noires sur fond coloré, appelées raies en absorption.



Un noyau (en jaune) est entouré d'un électron (en bleu). Les lignes concentriques représentent les orbites. L'électron qui redescend sur une orbite basse émet un peu de lumière (indiquée en rouge). © GAPHE

L'électron revient ensuite sur son orbite de départ : il doit se « débarrasser » de l'énergie qu'il a reçue. L'énergie perdue est émise sous forme de lumière avec une longueur d'onde (énergie) précise : un peu plus de lumière apparaît, c'est ce qui explique les lignes brillantes colorées, appelées raies en émission.

Les atomes de tous les éléments chimiques sont différents : ils ont un nombre de protons et d'électrons différents. Les rayons des orbites permises ne seront donc pas les mêmes et, partant, le type de photons absorbés ou émis sera différent. Ainsi, le spectre dépend de l'élément

chimique considéré : le code-barres obtenu pour chaque élément constitue donc une véritable signature.

Cette propriété est très utile en astronomie, peux-tu deviner pourquoi ?

.....
.....
.....
.....

Voici les signatures de quelques éléments chimiques. Compare-les aux spectres observés. Peux-tu trouver à quels éléments ils correspondent ?

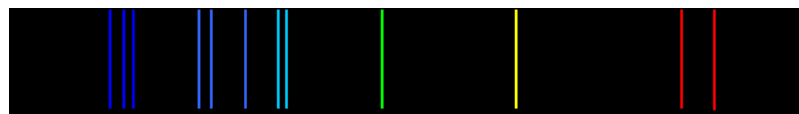
Lampe d'éclairage public :

Le spectre d'un tube fluorescent (« tube néon ») ressemble-t-il à la signature du néon montrée ci-dessous ? Si non, à quoi ressemble-t-elle plus ?

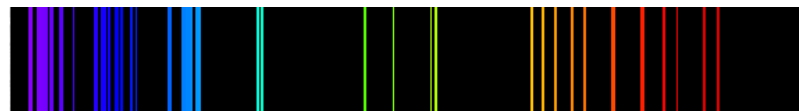
.....
.....



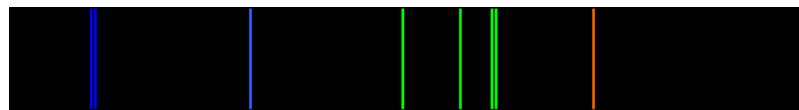
Spectre d'émission de l'Hydrogène http://www.physique.unicaen.fr/~tice/new_site_tice/pdf/cours_Int_ray_mat/apprendre/B/III/3/atome_III_32.html



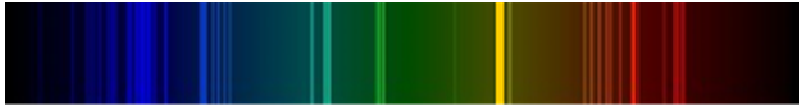
Spectre d'émission de l'Hélium <http://physique-henner.net/Seconde/Lumiere/spectreabsorp.htm>:



Spectre d'émission de l'Oxygène http://www.physique.unicaen.fr/~tice/new_site_tice/pdf/cours_Int_ray_mat/apprendre/B/III/3/atome_III_31.html



Spectre d'émission du Mercure <http://physique-henner.net/Seconde/Lumiere/spectreabsorp.htm>



Spectre d'émission du Sodium <http://www.amateurspectroscopy.com/color-spectra-of-chemical-elements.htm>

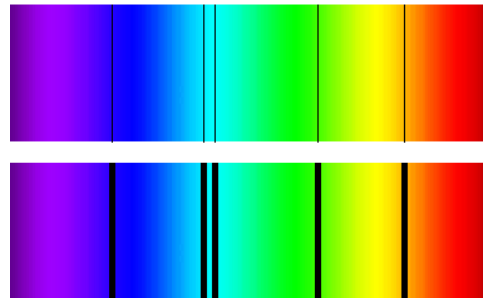


Spectre d'émission du Néon <http://www.amateurspectroscopy.com/color-spectra-of-chemical-elements.htm>



Spectre de l'Argon <http://www.amateurspectroscopy.com/color-spectra-of-chemical-elements.htm>

Compare ces deux spectres :



© GAPHE

Quelles sont les similitudes ?

.....
.....

Que t'apprennent ces similitudes ? Ces deux spectres appartiennent-ils à des objets de composition identique ou différente ?

.....
.....

Quelles sont les différences ?

.....
.....

En astronomie, on peut trouver des spectres d'étoiles semblables aux spectres/codes-barres ci-dessus. À ton avis d'où vient cette différence ?

.....
.....

Connais-tu un phénomène susceptible de changer la position des raies ?

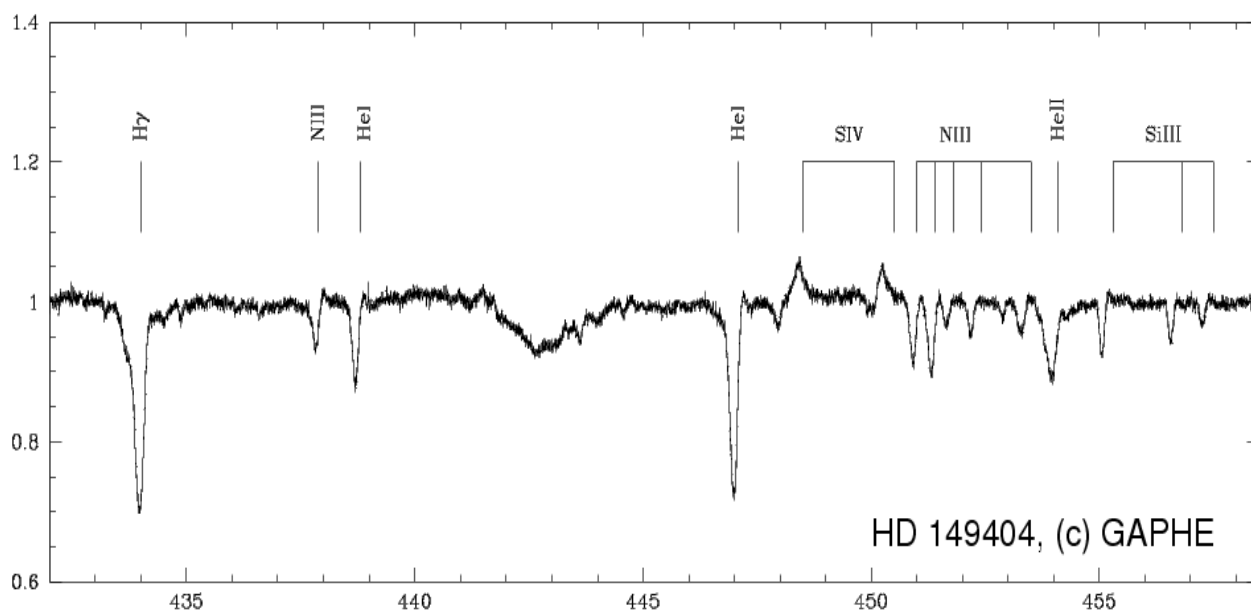
.....
.....

À l'aide de ce phénomène, peux-tu imaginer pourquoi les raies seraient larges ?

.....
.....
.....

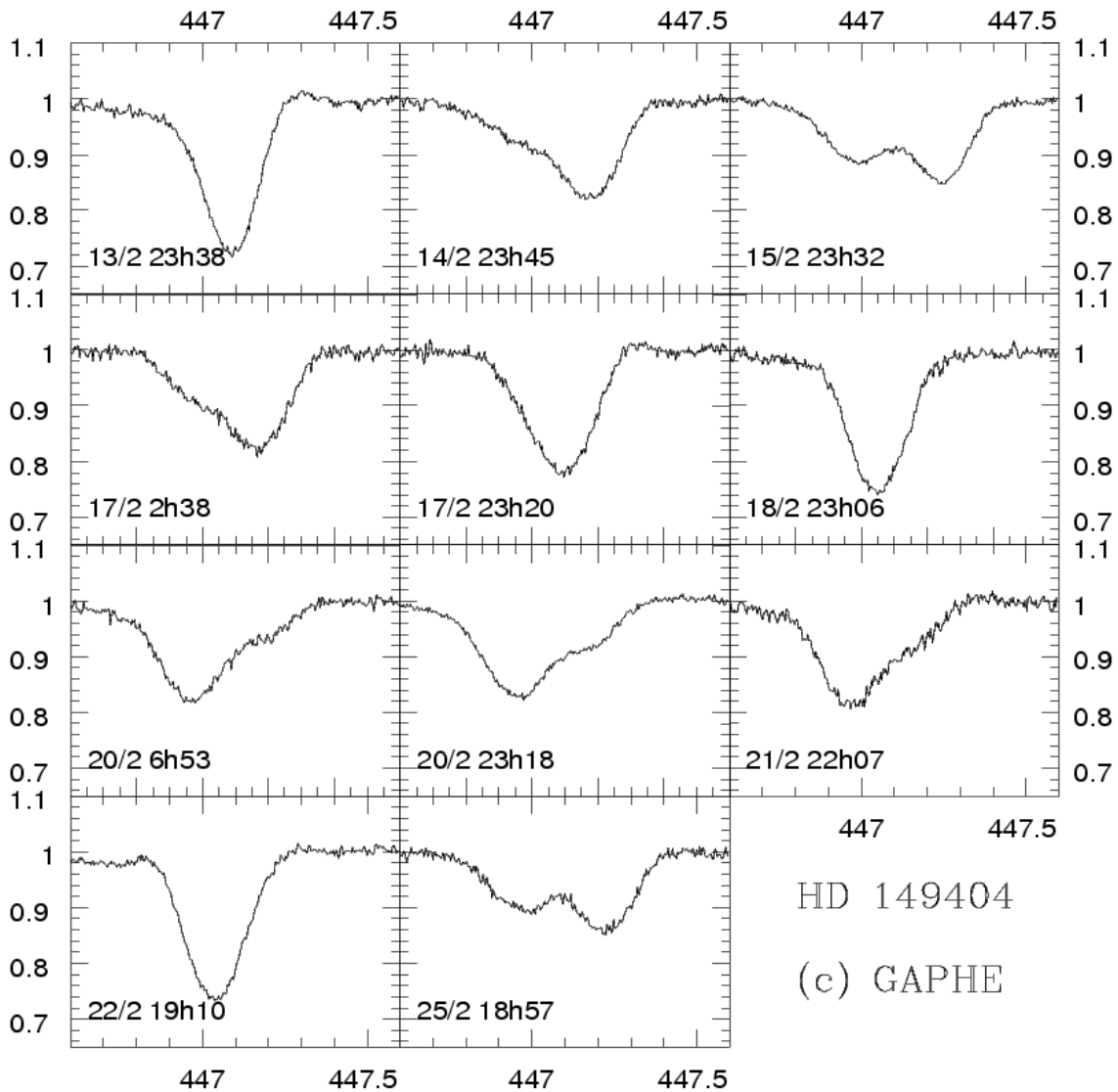
Le ballet des étoiles

Les spectres observés grâce au spectroscopie peuvent être enregistrés pour être traités et analysés plus tard. Voici un exemple de spectre d'étoile : on y voit des raies en absorption (qui apparaissent comme des creux) et des raies en émission (les bosses). Les raies ont été identifiées, et plusieurs éléments sont ainsi détectés, comme par exemple l'hélium, le soufre, le silicium, l'azote et l'hydrogène. Ils sont indiqués par le symbole chimique de l'élément suivi d'un chiffre romain (I indiquant l'atome neutre, II l'atome une fois ionisé, III l'atome deux fois ionisé,...).



Petite partie du spectre de l'étoile HD149404. La raie très large à 443nm n'appartient pas à l'étoile mais est inscrite dans son spectre par les nuages de matière se trouvant sur le trajet de la lumière vers la Terre. ©GAPHE

Faisons un zoom, pour n'observer que la raie en absorption de l'hélium située en laboratoire à une longueur d'onde de 447,1512 nm. Il s'agit ici d'une série de spectres de la même étoile enregistré au fil des jours (la date est indiquée dans le coin inférieur gauche).



Raie d'hélium enregistrée à différents moments ©GAPHE

Manifestement, la raie ne reste pas identique au fil des jours, peux-tu décrire les variations que tu observes ?

.....

.....

.....

C'est un phénomène qui semble périodique, peux-tu repérer des configurations qui se répètent ?

.....

.....

S'il y en a, que vaut l'intervalle de temps entre les répétitions (qui s'appelle la période) ?

Compare la raie observée le 13/2 (ou le 22/2) à celle observée le 15/2 (ou le 25/2), que remarques-tu ?

Que peux-tu en conclure ?

Les raies semblent changer de position, quel phénomène est susceptible de décaler les raies ?

Peux-tu écrire la loi décrivant ce phénomène ?

Supposons qu'on soit en présence d'une seule source, ce phénomène peut-t-il expliquer l'apparence de la raie en absorption de l'hélium située à 447,1512 nm sur le spectre ci-dessus ?

Que peux-tu en déduire ?

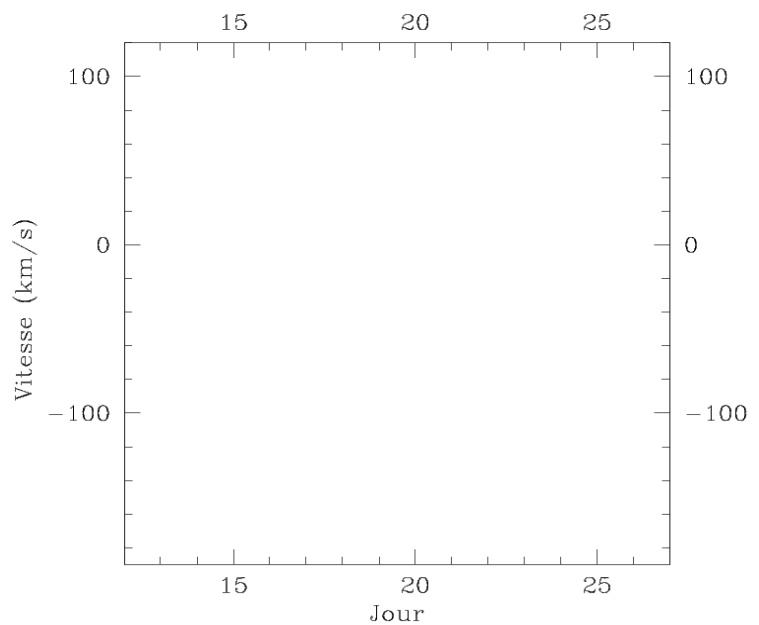
A l'aide d'une latte, mesure la position des différentes composantes de la raie (deux quand elle paraît double, une quand la raie semble unique).

Attention, la position se mesure en bas de la raie, dans le fond du creux, puisqu'il s'agit d'une raie en absorption.

Reporte ces valeurs dans le tableau suivant et, en utilisant la loi vue précédemment, détermine les valeurs des vitesses correspondantes :

N° Spectre	Jour	Longueurs d'ondes mesurées (en nm)		Vitesses correspondantes (en km/s)	
1	13/2				
2	14/2				
3	15/2				
4	17/2 AM				
5	17/2 PM				
6	18/2				
7	20/2 AM				
8	20/2 PM				
9	21/2				
10	22/2				
11	25/2				

Reporte ces valeurs sur le graphique ci-contre



Détermine les amplitudes K_1 et K_2 des courbes de vitesse pour chaque composante, c'est-à-dire calcule la moitié de la différence entre vitesse maximale et vitesse minimale :

$K_1 =$

$K_2 =$

L'astronome Kepler, et plus tard le physicien Newton, ont étudié les lois de la physique qui régissent le problème de deux corps gravitant l'un autour de l'autre ; on peut en tirer les équations suivantes :

$$\frac{(M_1)^3}{(M_1 + M_2)^2} = 10^{-7} \times (K_2)^3 \times P \text{ et } \frac{(M_2)^3}{(M_1 + M_2)^2} = 10^{-7} \times (K_1)^3 \times P$$

Où P est la période en jours que tu as déterminée plus haut. Les masses sont exprimées en multiples de la masse solaire.

Ces équations permettent de trouver facilement le rapport entre les masses des deux objets $M_2/M_1 =$

Que vaut-il ?

Si ce rapport M_2/M_1 est baptisé α , utilise les équations ci-dessous de manière à trouver ce que vaut M_1 :

.....
.....

Détermine ainsi les masses des deux étoiles :

$M_1 =$

$M_2 =$

Ces masses sont-elles vraiment les masses réelles des étoiles ? Pour le savoir, il faut se souvenir des limitations de la loi utilisée plus haut pour calculer les vitesses : quelles sont-elles ?

.....
.....
.....

Tu as en fait calculé les masses multipliées par le sinus de l'inclinaison au cube. Sachant que, dans le cas présent, l'angle d'inclinaison i vaut environ 20 degrés, que valent les masses réelles ?

$M_1 =$

$M_2 =$