

# Travaux Personnels Encadrés

(TPE)

## *La spectrographie astronomique*

### Problématique :

**Comment acquérir et analyser des données issues de la spectrographie astronomique?**

### Equipe de travail :

- Cyril De Saint Aubert T9
- Nicolas Charpenel T9

# SOMMAIRE

## Introduction

## Approche historique à la spectrographie

### I Présentation du spectrographe

- Description de chaque éléments composants le spectrographe
- La difficulté des réglages

### II Le spectrographe en pratique

- Acquisition des spectres
- Problèmes de fixation
- Importance du miroir principal

### III Traitement des spectres obtenus

- Qu'est-ce qu'un spectre ?
- Les spectres obtenus du spectroscopie

### IV Composition chimique de l'étoile

- Du spectre à la composition de l'étoile
- Intérêt de la spectrographie

### V Lexique

### VI Bibliographie

### VII Remerciements

### Annexes

- 1 Pointage d'une étoile au télescope GOTO : coordonnées équatoriales, azimutales
- 2 Protocoles de traitement de spectre
- 3 Protocole d'étalonnage du spectrographe



# INTRODUCTION

**G**âce à notre semaine d'observation à l'observatoire St Michel, dans le cadre du projet Callisto, nous avons pu apprendre les rudiments sur la spectrographie. L'équipe d'encadrement nous a tout d'abord fait un rappel sur la théorie du montage, puis nous avons pu appliquer ces connaissances de manière concrète en acquérant des spectres sur place et en les traitants.

Nous nous proposons de vous communiquer à notre tour les principes de la spectrographie astronomique et de l'analyse des données spectrographique au travers de cette démarche expérimentale. Nous avons donc obtenus nous-même les spectres que nous montrerons ici.



Callisto

# Approche historique à la spectrographie astronomique

La dispersion de la lumière par un prisme a sans doute été observée pour la première fois par Kepler, puis étudié par Descartes. Mais c'est Newton, vers 1665, qui en donne l'interprétation : la lumière « blanche » du Soleil est formé d' un mélange de lumière de toutes les couleurs, que le prisme dévie différemment, permettant ainsi de l' étaler en « spectre ».

Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, on commence à étudier d'autres lumière. Tandis que certaines sources, comme le soleil, donnent un spectre continu passant graduellement du rouge au violet, d'autres donnent seulement quelques « raies » lumineuses isolées. En 1814, l'opticien bavarois J. von Fraunhofer, en perfectionnant le spectrographe, découvre que le spectre solaire est interrompu par un grand nombre de raies très fines : Certaines longueurs d'ondes bien définies y sont absentes ! Avec Fraunhofer, qui invente en particulier le réseau à diffraction, l'outillage spectroscopique est au complet. Reste interpréter l'existence des spectres.

Kirchhoff montre, vers 1860, que chaque élément chimique a ses raies caractéristiques, que l'on retrouve en clair dans la lumière qu'il émet et en noir dans celle qu'il absorbe. On parvient ainsi à analyser la composition des étoiles, et l'on découvre même un nouvel élément dans le Soleil : L'hélium (du grec hélios, Soleil).

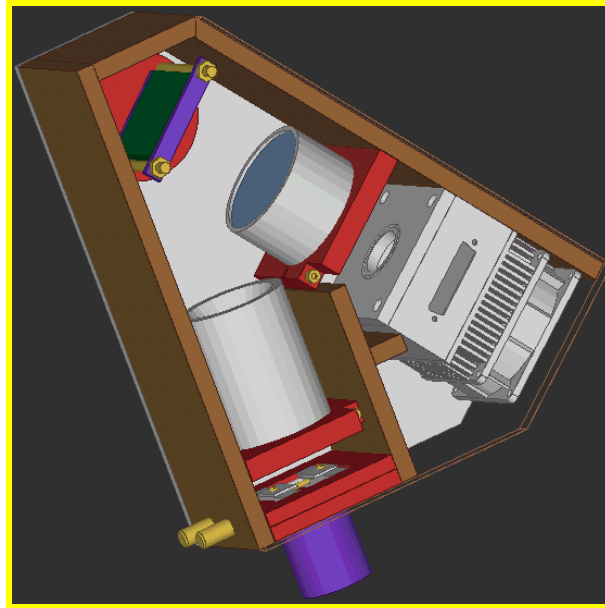
Quand au deuxième niveau de cette interprétation (pourquoi tel élément émet-il tel longueur d' onde ?), il faudra attendre le début du XX<sup>ème</sup> siècle et la physique quantique. On pourra alors relier les niveaux d'énergie d'un atome aux longueurs d'ondes qu'il peut émettre ou absorber. Enfin, le message spectroscopique transporté par la lumière ne se borne pas à la « signature » des atomes de la source. Il contient aussi une foule d'informations sur les conditions qui y règnent (température, vitesse, etc.)



Kepler Johannes

# I Présentation d'un spectrographe

**A**vant toutes choses, voici une vue d'ensemble d'un spectrographe à peu près similaire à celui que nous avons pu utiliser lors de notre semaine au Centre d'Astronomie de Saint Michel l'Observatoire:



**Vu d'ensemble d'un Spectrographe**

Nous allons maintenant énumérer les différents éléments qui composent le spectrographe. Pour cela, nous suivrons l'ordre du sens de la lumière.

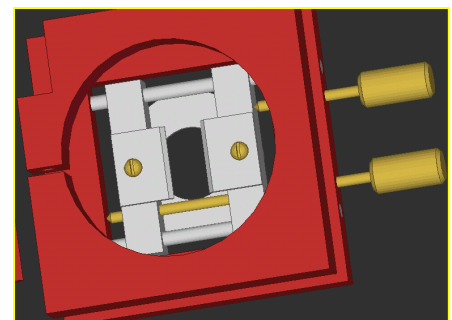
## ● Le miroir plan (Non représenté sur le schéma)

On utilise un miroir, orienté à 45°, lorsque l'on place le spectrographe dans un plan perpendiculaire au plan d'arrivée des rayons. Il dévie les rayons, qui arrivent convergents du télescope (cf. TPE Télescopes), et ce, avant qu'il ne converge au point focal image.

## ● La fente

La fente joue un rôle très important dans le fonctionnement du spectrographe.

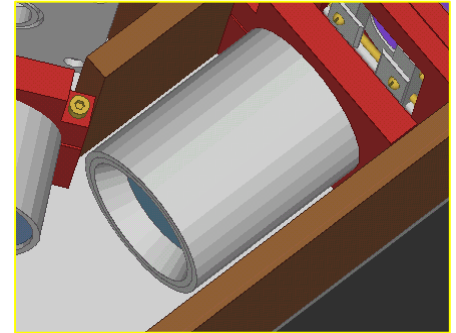
Son rôle est de sélectionner la lumière arrivant du télescope, afin de ne recueillir que la lumière arrivant de l'objet céleste observé. De plus, il convient de la placer le plus précisément possible au point focal image du télescope. En effet, c'est à ce point très précis que l'on récolte le plus de lumière venant de l'étoile –On peut alors se permettre de réduire la fente au maximum, ce qui augmente la résolution spectrale et donc la netteté du spectre-. Afin de positionner la fente précisément,



cette dernière est dotée de vis de positionnement afin à la fois de régler la largeur de la fente et de la décaler pour la mettre au point focal.

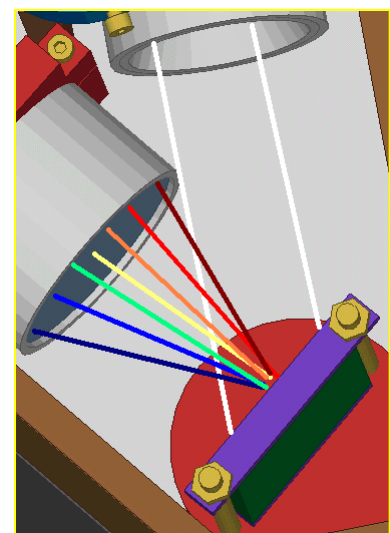
### ● Le collimateur

Nous avons dit que les rayons convergeaient sur la fente. Là, ils se recoupent et progressent divergents. Or, le réseau nécessitant que les rayons arrivent parallèles, on place ici un collimateur (lentille convergente) qui redressent les rayons qui ressortent effectivement parallèles. Là, encore, le positionnement de cet objet est problématique : pour que des rayons divergents arrivant sur une lentille convergente en ressortent parallèles, il est nécessaire que leur point de départ soit situé à la distance focale de la lentille.



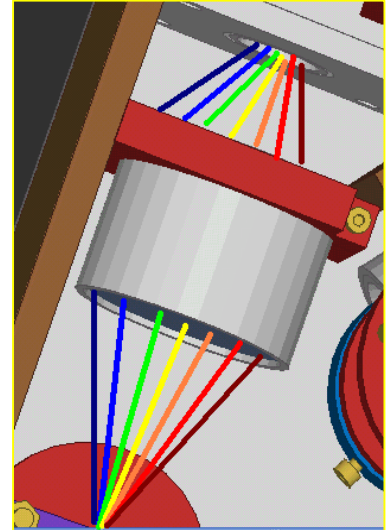
### ● Le réseau de diffraction

C'est l'élément le plus important du spectrographe. Le réseau est un composant optique capable de disperser la lumière, mais les rayons doivent lui parvenir parallèles. Les prismes de verre ont également cette propriété. Les prismes sont cependant mal commodes à l'usage dans un spectrographe car il n'est pas facile de maîtriser le pouvoir de dispersion. L'instrument peut devenir vite encombrant et le traitement numérique des spectres est assez complexe. On leur substitue souvent avec bonheur des réseaux à diffraction. Le réseau à diffraction est une pièce optique, généralement plane, sur laquelle est gravé un grand nombre de sillons. C'est la diffraction de la lumière sur ces sillons qui provoque l'apparition d'un spectre. Ci-contre la photographie d'un réseau de 100 traits par millimètre. Le réseau utilisé au Centre d'Astronomie possédait quant à lui 600 t/mm. Certains réseaux peuvent atteindre jusqu'à 2000 t/mm ! Plus le nombre de traits au millimètre est élevé, plus la diffraction de la lumière est large est plus le spectre final sera précis ! Cependant, la résolution du capteur de la caméra CCD étant de 765x510 pixels, nous serions obligés de faire de très nombreuses captures pour avoir le spectre entier, car ce dernier serait trop étendu en largeur et ne rentrerait pas totalement dans le capteur ! Sur le plan optique, les rayons (qui, on se le rappelle, arrivent parallèles grâce au collimateur) ressortent diffracté et divergent, comme le montre ce schéma.



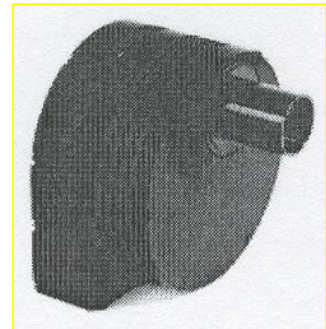
### ● L'Objectif

Le but étant de ramener les rayons divergent diffractés dans le capteur CCD, il est nécessaire de placer une deuxième lentille convergente, appelé l'Objectif. Cet objectif doit faire converger les rayons dans le petit capteur de la camera CCD. Afin de pouvoir faire converger la largeur de longueur d'onde voulue, il est de bon ton de pouvoir régler la position de la lentille, de même que le collimateur.



### ● La camera CCD

La caméra CCD constitue le dernier composant du spectrographe. Son rôle est d'accumuler chaque photon reçu sur son capteur, et de transmettre le tout. Elle est pour cela reliée à un ordinateur possédant un logiciel d'acquisition spécifique. Sur le spectrographe, la camera se doit d'être fixé de manière convenable et durable (elle doit pouvoir s'enlever et se remettre exactement à la même place, au moyen d'un système ingénieux). Ci- contre, la caméra utilisé lors de notre stage.



#### Caractéristique :

Caméra SBIG ST7 / CCD Kodak KAF-400 + TI TC-211

Pixel : 765x510, 6.9x4.6 mm (Taille des pixels : 9x9 microns)

# Le spectrographe en pratique

## I) Fixations du spectrographe :

Pour acquérir des spectres, il faut tout d'abord fixer le spectrographe sur le télescope, et là déjà on s'aperçoit que les télescopes de Newton sont plus appropriés pour les spectrographes amateurs. Cela tiens du fait que les éléments du spectrographe sont souvent fixés sur une planche et que les télescopes de Newton présentent une large surface plane au niveau de l'oculaire. L'utilisation d'éléments de fixation en bois à permis d'alléger le montage, ce qui présente deux intérêts majeurs :

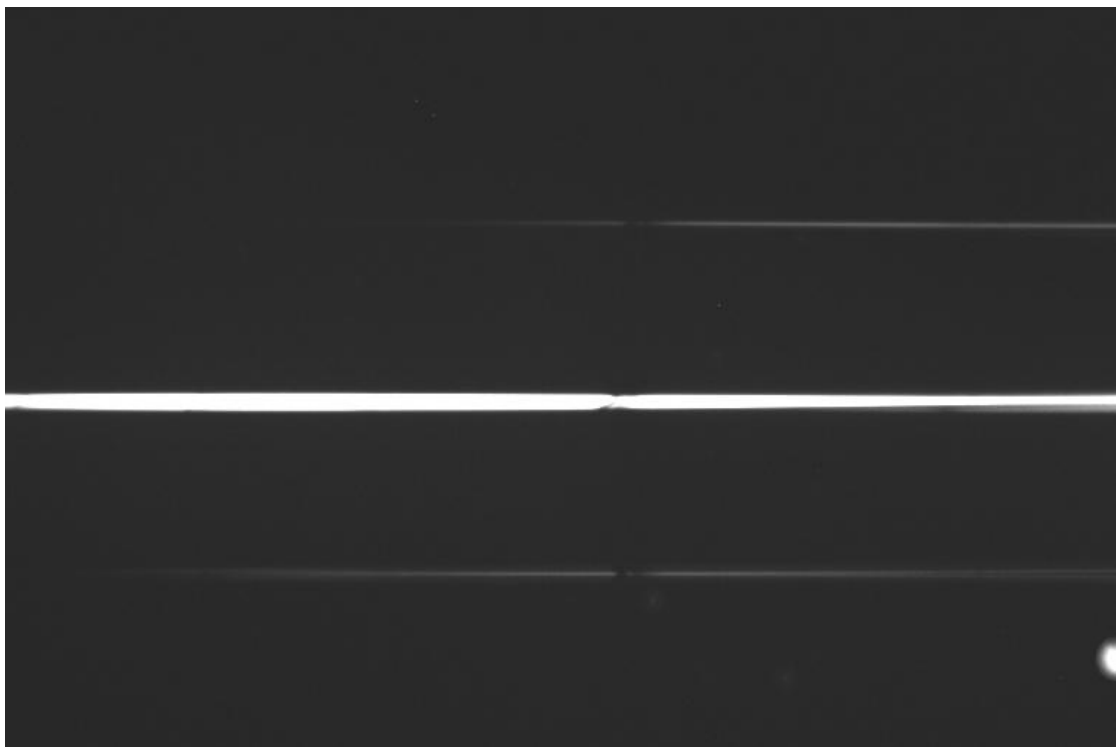
Moins de contraintes sur le télescope (en effet, sur un télescope de Newton, le spectroscopie est situé à l'extrémité du télescope et peut le faire dévier).

On a pu alors fixer le montage au télescope avec du scotch, ce qui s'est avéré fort efficace et commode à l'usage.

Une fois le spectrographe fixé, on installe la camera CCD, on effectue tous les branchements nécessaires et on allume l'ordinateur. Là, on lance la procédure de refroidissement de la CCD.

## II) Acquisition des spectres :

Une fois que la CCD à atteint sa température minimale, on lance le logiciel d'acquisition et on configure le temps de pose. En effet, on a besoin d'un temps de pose minimal pour collecter assez de lumière. L'avantage de la CCD ici est qu'on dispose immédiatement d'un rendu.



(spectre obtenu de Sirius)



Cela nous permet de corriger les détails de réglages sur le spectrographe (distance entre l'objectif, le réseau et la caméra) pour affiner le spectre, le redresser et le rendre utilisable pour le traitement qui suivra.



(Spectre de Sirius mieux focalisé)

Nous verrons plus tard l'importance de la qualité du spectre de départ lors du traitement des données.

# Traitement des spectres obtenus

## Qu'est-ce qu'un spectre ?

Pour commencer, rappelons-nous qu'un spectrographe est un instrument qui a pour fonction de réaliser l'analyse spectrale de la lumière. La lumière apparemment blanche qui nous arrive d'une étoile est le mélange d'un ensemble continu de radiations que l'œil perçoit sous la forme des couleurs de l'arc-en-ciel dans certaines conditions. C'est ce dégradé du bleu au rouge que l'on appelle un spectre.



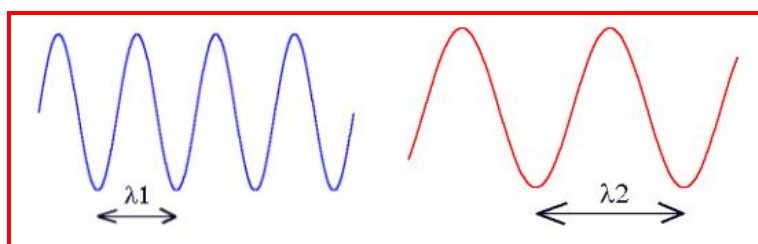
Spectre de lumière blanche

Mais le spectre ne s'arrête pas là : du côté du bleu il est prolongé par l'ultraviolet et du côté du rouge par l'infrarouge. Les radiations qui correspondent à ces couleurs existent toujours, mais elles ne sont pas vues par l'œil. Par définition, le domaine spectral de sensibilité de l'œil se limite au spectre dit "visible". Au-delà et en deçà l'œil n'est pas sensible et ne voit donc que du noir. En revanche, un capteur CCD sera apte à détecter le rayonnement lumineux sur un domaine spectral bien plus large, notamment en direction de l'infrarouge. La fonction d'un spectrographe est donc de décomposer la lumière en un spectre observable.

Mais attardons-nous sur l'origine des couleurs :

La couleur trahit une caractéristique fondamentale de la lumière. La perception visuelle des couleurs est liée à la manière dont l'œil traduit cette caractéristique physique. Au lieu de parler de couleurs, qui est une notion assez subjective, les physiciens préfèrent parler de longueur d'onde. Ils représentent souvent la lumière comme une onde sinusoïdale qui se propage dans l'espace à la vitesse de 299792,458 km/s. C'est la distance parcourue sur une période de cette sinusoïde que l'on appelle longueur d'onde. Cette quantité est généralement désignée par la lettre grecque  $\lambda$  (lambda).

Voici par exemple deux ondes lumineuses avec des longueurs distinctes  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  :



Les courtes longueurs d'ondes sont associées à la couleur bleue dans le spectre visible, alors que les grandes longueurs d'ondes produisent la sensation de rouge. Donc, à chaque couleur perçue par l'œil est associée une longueur d'onde. Voici les valeurs usuelles de cette longueur pour le spectre visible en nanomètre (1 nanomètre =  $1.10^{-6}$  mm).



Par exemple, un rayon lumineux de longueur d'onde de 450 nm sera vue par l'œil d'un bleu extrêmement profond. Cette longueur est petite : 0,45 microns, ou si on préfère un 450 milliardièmes de mètre ! Un capteur CCD courant peu détecter quant à lui la lumière jusqu'à une longueur d'onde de 1000 nm, ce qui double pratiquement le domaine spectral observable par rapport à ce que voit l'œil !

La longueur d'onde peut aussi s'exprimer en Angstrom. C'est une unité de longueur fort usitée en spectrométrie. On la note par la lettre Å. La relation entre l'Angstrom et le nanomètre est fort simple :

$$1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm.}$$

Le milieu du spectre visible correspond ainsi à une longueur d'onde de 5700 Angstrom environ.

Oui, mais l'allure de ce spectre peut être très différente d'un objet à l'autre. Avec la plupart des étoiles, un examen rapide du spectre montre que celui-ci passe régulièrement du bleu au rouge, sans interruption des couleurs. On dit que le spectre est continu. En y regardant de plus près, on constate que généralement le spectre comprend des zones étroites où la lumière est pratiquement absente. On appelle ces zones des raies d'absorption. Elles sont la signature spectrale des éléments chimiques présents dans l'atmosphère de l'étoile. Dans certaines conditions physiques, les raies apparaissent en émission, c'est à dire plus lumineuses que le continuum qui les entoure. Le spectre simulé ci-après montre à la fois des raies en absorption et une raie en émission dans le rouge, cette dernière, à la longueur d'onde de 6563 Angstrom, étant probablement provoquée par les atomes d'hydrogène.

Tous les objets lumineux ont un spectre, mais l'allure de ce spectre peut être très différente de l'un à l'autre. Avec la plupart des étoiles, un examen rapide du spectre montre que celui-ci passe régulièrement du bleu au rouge, sans interruption des couleurs. On dit que le spectre est continu. En y regardant de plus près, on constate que généralement le spectre comprend des zones étroites où la lumière est pratiquement absente. On appelle ces zones des raies d'absorption. Elles sont la signature spectrale des éléments chimiques présents dans l'atmosphère de l'étoile. Le spectre simulé ci-après montre des raies d'absorption et une raie en émission dans le rouge, cette dernière, à la longueur d'onde de 6563 Angstrom, étant probablement provoquée par les atomes d'hydrogène.



L'enregistrement des spectres permet d'identifier à distance les éléments constituant l'objet observé et les conditions physiques qui règne dans le milieu où est produite cette lumière. Cela montre l'intérêt considérable de la spectrographie, notamment en astronomie...

Mais pour cela, il faut tout d'abord commencer par identifier chaque raies, ce que nous aborderons un peu plus tard dans ce dossier

Mais commençons par essayer de comprendre ce qui se passe au niveau atomique.

## *Les spectres obtenus du spectroscopie*

Maintenant que l'on connaît l'origine des spectres, revenons sur notre spectre de départ :



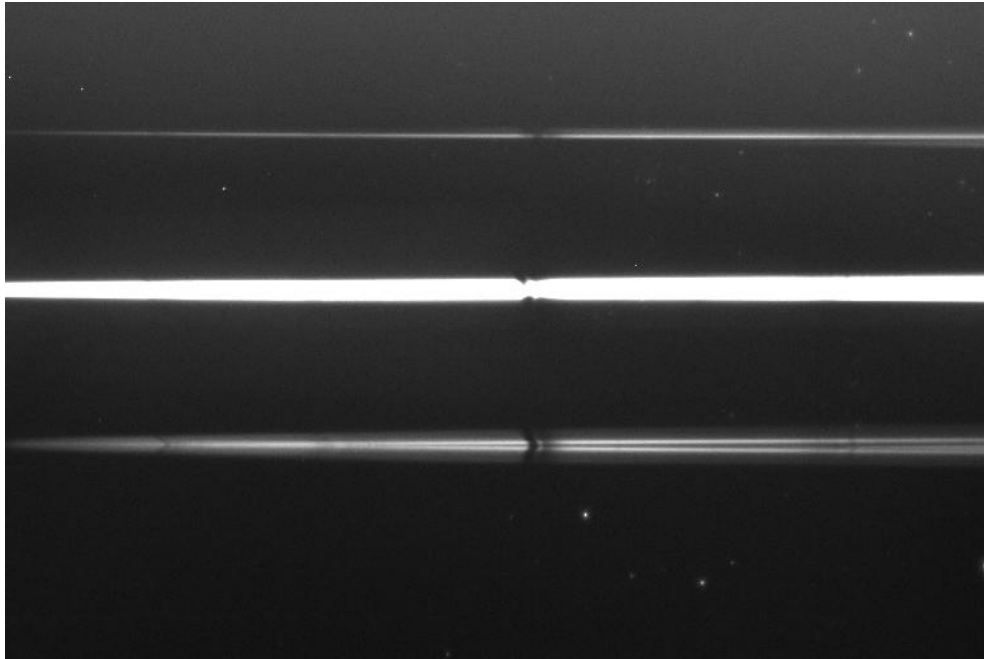
( Spectre brut de Sirius)

On a vu qu'un spectre est normalement composé de raies d'absorption, or elles sont quasiment indiscernables à ce stade. Il va donc falloir traiter ce spectre avec le logiciel Iris<sup>®</sup> pour isoler ce spectre, le redresser, redresser les raies et enfin les mettre en évidences.

(Le protocole et les manipulations se trouvent dans l'Annexe II : Protocole de traitement des spectres).

Tout d'abord, il faut enlever le signal thermique provoquer par la camera, le télescope et tout ce par quoi la lumière est passée et qui n'était pas au zéro absolu, car en fait, tous les corps qui ne sont pas à  $-273.15^{\circ}\text{C}$  émet des rayonnements infrarouges perçus par la CCD.

Ensuite, il faut isoler notre spectre, en effet, il n'est pas rare d'avoir plusieurs spectre sur notre image, comme dans celle-ci, dont le signal thermique n' a pas encore été enlevé (bruit de fond):



On doit alors créer une image totalement noire puis on y insère la bande d'image qui correspond à notre spectre.

(Cette manipulation se fait entièrement en ligne de commande avec la console d'Iris, les manipulations qui suivent seront aussi effectuées avec cette console. Pour plus de détails, se référer à l'annexe II).

Maintenant, il faut redresser l'image en la faisant tourner autour d'un point situé à une extrémité du spectre.

Enfin, il arrive parfois que les raies ne soient pas droites, il faut les rendre parfaitement droites grâce à la fonction *slant* qui modifie l'inclinaison des raies sans modifier celle du spectre.

Enfin, la fonction qui nous permettra d'obtenir notre spectre final est *l\_bin* qui additionne verticalement tous les pixels et les redresse ensuite, sachant qu'un pixel noir vaut 0 et que les autres sont calculés en fonction de leur intensité.

On obtient alors un spectre beaucoup plus parlant et analysable :



(Ce spectre ressemble quand même plus à ceux que l'on voit en cours de physique !).

On peut même le mettre en couleur pour mieux visualiser la quantité de raies par endroits.

**Attention, ces couleurs ne correspondent pas à la couleur de la lumière du spectre !**



Pour la suite, on utilisera toujours de même la version en noir et blanc afin que les logiciels supportent mieux les images et soient les plus précis possible.

# Composition chimique de l'étoile

## Du spectre final à la composition chimique de l'étoile

**A**u chapitre précédent, nous avons vu comment traiter un spectre brut fraîchement sorti du spectrographe. Le produit à la sortie de tous ces traitements est un profil spectral dans lequel l'axe des abscisses représente des numéros de pixels et l'axe des ordonnées un signal.

Nous avons vu plus haut que, connaissant la longueur d'onde de chaque raie d'absorption ou d'émission, l'élément chimique correspondant pouvait être facilement identifié au moyen de tables ou de certains logiciels.

Les deux opérations qu'il nous reste à faire afin de pouvoir exploiter le spectre sont, d'une part l'étalonnage en longueur d'onde de l'axe des abscisses, d'autre part l'étalonnage de l'axe des ordonnées pour obtenir l'intensité lumineuse de l'objet. Pour ce faire, nous allons utiliser le logiciel VisualSpec dont le travail est de réaliser ces opérations. Nous prendrons l'exemple de l'étoile Rigel.

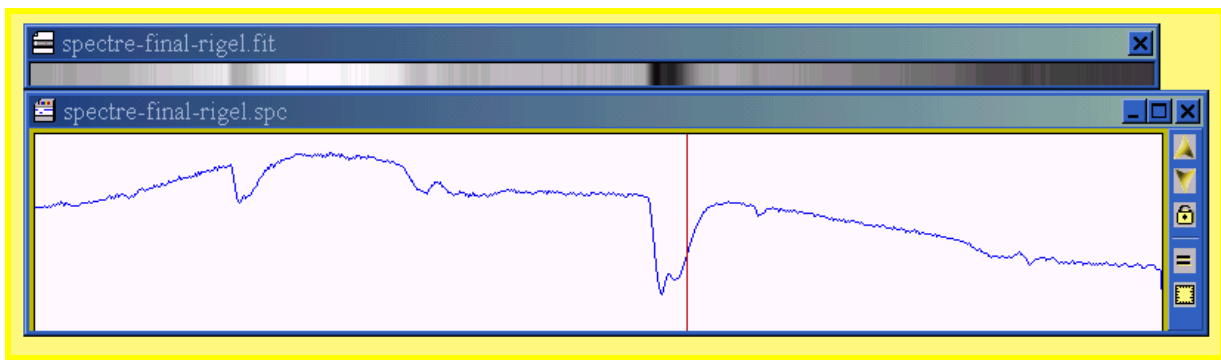
### DISCLAMER

Ce logiciel est en téléchargement libre sur internet à cette adresse : <http://valerie.desnoux.free.fr/vspec>. Il est gratuit. Le but ici n'est pas d'énumérer toutes les subtilités de VisualSpec. Nous allons simplement donner quelques repères. Il est recommandé de lire le manuel de référence et d'utilisation fournis avec VisualSpec avant toute utilisation.



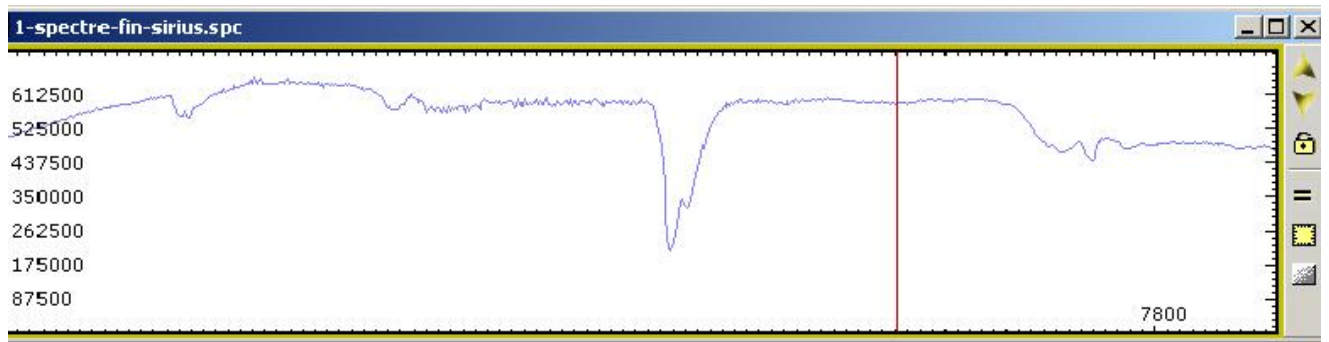
Les images que nous allons montrer ici sont extraites de ce logiciel, et son soumises au copyright suivant : Copyright Valérie Desnoux VisualSpec©

Procédure d'utilisation du logiciel VisualSpec : Cf. Annexe 3.



Voici ce que le logiciel nous propose : En haut, nous avons le spectre final de l'étoile Rigel. Juste en dessous, nous retrouvons le graphique qui nous propose l'intensité lumineuse en fonction du numéro de pixel.

Après avoir chargé le fichier d'étalonnage du spectrographe (cf. Annexe 4), le logiciel Vspec© nous indique, sur le graphique, la longueur d'onde en fonction de l'intensité de la lumière : C'est gagné !



Le logiciel, après analyse des différentes raies vu sur le graphique, recherche dans sa base de données les éléments correspondants et nous les indique dans un tableau de ce type :

Lambda	Ion	Intensité	Eléments
7336.77	3	120	F
7338.92	1	40	V
7343.94	2	150	NE
7344.72	1	120	TI
7346.37	2	40	HG
7350.814	1	5	AR
7352.16	1	11	TI
7353.293	1	70	AR
7354.94	3	130	F
7355.9	1	85	CR
7356.54	1	35	V
7357.74	1	90	TI
7358.66	1	11	V
7361.39	1	24	V
7361.57	1	110	AL
7362.3	1	140	AL
7362.49	1	12	V
7363.16	1	24	V
7364.11	1	60	TI
7372.118	1	200	AR
7373	1	35	SI
7376.46	2	20	FE
7379.96	3	12	TI
7380.426	2	20	AR
7383.98	1	10000	AR
7385.95	1	9	V
7387	1	5	MG
7387.69	1	12	MG
7392.98	1	20	AR
7393.49	0	6	V
7398.64	1	210	N
7398.69	1	10000	F
7400	0	100	VO

Nous connaissons donc maintenant les éléments chimiques qui composent l'étoile et leurs proportions, nous pouvons déterminer leur âge et leur durée de vie restante. En effet, plus il y a

d'atomes lourds dans une étoile, plus elle est vieille. La spectrographie permet donc de déterminer cet âge, grâce aux éléments reconnus.

Tout ceci a donc amené les spectrographes à concevoir un système de classement des étoiles en fonction de leurs compositions atomiques. C'est l'objectif des classes spectrales.

### ■ Les classes spectrales

Les classes spectrales sont un moyen de classement des étoiles en fonction de leurs compositions chimiques. Ainsi, les scientifiques ont pu établir des tableaux qui répertoriaient toutes les ressemblances et les différences dans la composition chimique des étoiles. Voici un tableau permettant de classer les étoiles en fonction des atomes qui les constituent :

Classe	Raies principales	Autres raies
W	Hélium ionisé, hydrogène	Carbone, et Oxygène (classe WC) Azote (classe WN)
O	Hélium ionisé	Hélium neutre, faibles raies de l'hydrogène
B	Hélium neutre	Raies de l'hydrogène se renforçant dans les classes B6 à B9
A	Hydrogène très visibles en A0, allant en décroissant vers A9	Raies du calcium ionisé de plus en plus fortes de A0 vers A9
F	Raies du calcium ionisé de plus en plus fortes	
G	Raies du calcium ionisé très marquées	Métaux, particulièrement le Fer
K	Fortes raies métalliques	Molécules CH et CN
M	Raies d'absorption de l'oxyde de titane	Nombreuses raies métalliques
C	Raies métalliques	Carbone
S	Raies métalliques	Oxyde de Zirconium, Yttrium, Baryum

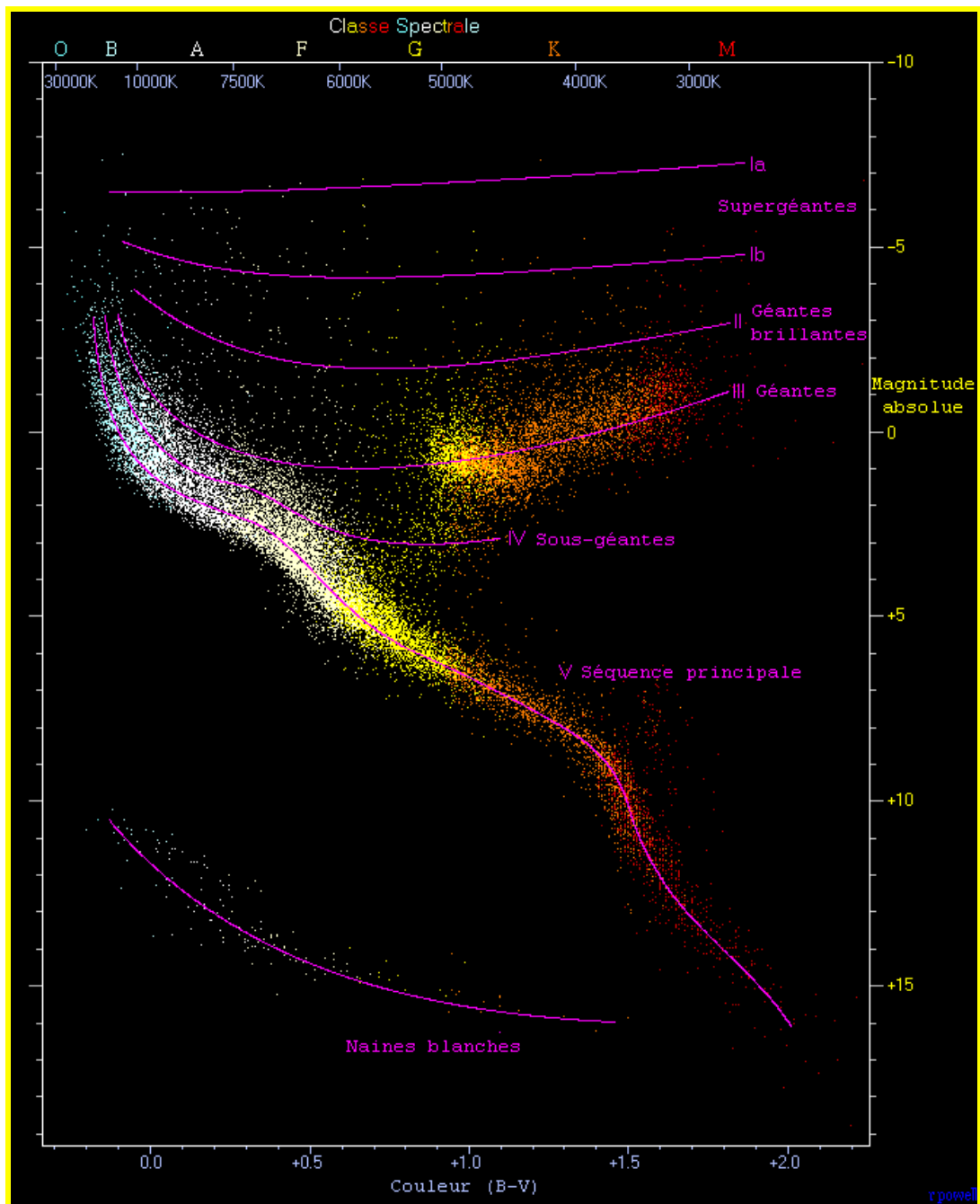


On a alors découvert que les étoiles d'une même classe spectrales possédaient des ressemblances entres elles, notamment au niveau de la masse, de leur rayon, luminosité et températures :

Classe spectrale	Masse	Rayon	Luminosité	Température de surface (en degrés K)	Durée de vie (en millions d'années)	Abondance relative (en %)
W	>40	20	1.000.000	50.000	<1	négligeable
O5	32	18	600.000	40.000	1	0.00002
B0	16	7.4	16.000	28.000	10	
B5	6.5	3.8	600	15.500	100	0.1
A0	3.2	2.5	60	9.900	500	
A5	2.1	1.7	20	8.500	1.000	1
F0	1.75	1.4	6	7.400	2.000	
F5	1.25	1.2	3	6.600	4.000	3
G0	1.06	1.1	1.3	6.000	10.000	
<i>G2 Soleil</i>	1	1	1	5.800	12.000	
G5	0.92	0.9	0.8	5.500	15.000	9
K0	0.80	0.8	0.4	4.900	20.000 (1)	
K5	0.69	0.7	0.1	4.100	30.000	14
M0	0.48	0.6	0.02	3.500	75.000	
M5	0.20	0.3	0.001	2.800	200.000	73

Par la suite, les scientifiques ont cherchés à classer toutes ces étoiles dans des diagrammes. Le diagramme le plus connu en astronomie est le diagramme d' Hertzsprung-Russel. Ce diagramme est un tracé de la luminosité (= magnitude absolue) par rapport à la couleur des étoiles en partant des étoiles bleues-blanches très chaudes sur la gauche, et allant vers les étoiles rouges et froides vers la droite.

Le diagramme ci- dessous est un tracé correspondant à 22000 étoiles du Catalogue d' Hipparcos et 1000 étoiles de faibles luminosités (naines rouges et blanches) tirées du Catalogue Gliese des Etoiles Proches. Les étoiles naines ordinaires, qui brûlent de l' hydrogène, se situent dans une bande qui part de haut à gauche et se dirige en bas à droite du diagramme. Au-dessus d'elles se trouvent les rares étoiles brillantes géantes et supergéantes. Enfin, en bas à gauche, on trouve les naines blanches : ce sont les résidus des vieilles étoiles mortes qui n' ont plus de sources d' énergie interne et se refroidissent lentement pendant des milliards d' années en se décalent vers le bas à gauche du diagramme.



**Le diagramme d'Hertzsprung Russel**

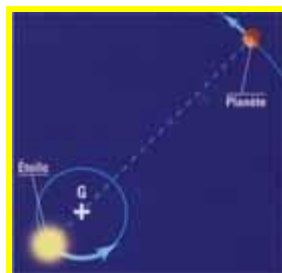
## ■ Les classes de luminosité des étoiles

Les étoiles sont réparties en cinq classes principales de luminosité. Voici ces classes :

<b>I Supergéantes</b>	Etoiles extrêmement massives et lumineuses en fin de vie. La classe est découpée en deux sous-classes Ia et Ib, où Ia représente les plus brillantes. Ces étoiles sont très rares - on en compte 1 pour un million d'étoiles. L'étoile supergéante la plus proche est Canopus (F0Ib) à 310 années lumière de la Terre. Quelques autres exemples sont fournis par Betelgeuse (M2Ib), Antares (M1Ib) et Rigel (B8Ia)
<b>II Géantes Brillantes</b>	Des étoiles qui ont une luminosité intermédiaire entre les géantes et les supergéantes. On y trouve par exemple Sargas (F1II) et Alphard (K3II).
<b>III Géantes</b>	Ce sont principalement des étoiles de faible masse à la fin de leur vie qui ont enflé pour devenir des géantes. Cette catégorie comprend également quelques étoiles massives évoluant vers le stade de supergéantes. On y trouve par exemple Arcturus (K2III), et Hadar (B1III)
<b>IV Sous-géantes</b>	Des étoiles qui commencent à évoluer vers le stade géante ou supergéante Par exemple, Alnair (B7IV) et Muphrid (G0IV). Notons aussi Procyon qui entre dans cette catégorie et se retrouve classifiée comme F5IV-V.
<b>V Naines</b>	Toutes les étoiles normales qui brûlent de l'hydrogène. Les étoiles passent la majeure partie de leur vie dans cette catégorie avant d'évoluer dans la classification. Les étoiles de classe O et B de cette catégorie sont en fait très lumineuses, souvent plus que beaucoup d'étoiles géantes. Comme exemples, citons Sirius (A1V), et Vega (A0V).

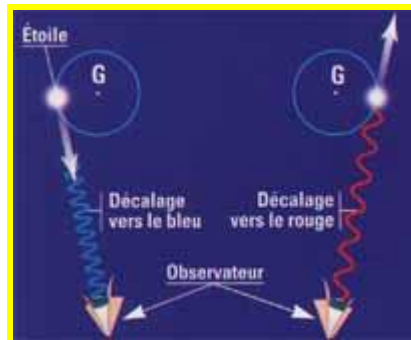
## ■ Les exoplanètes

Ces dernières années, l'intérêt pour la spectrographie est compréhensible par la traque aux exoplanètes. La technique la plus évidente serait de prendre une image d'une étoile pour voir si aucune planète n'orbite autour, mais la luminosité d'une planète est bien mince comparée à celle d'une étoile : on observe donc les effets de sa rotation autour de l'étoile : en effet cette dernière étant attirée par la planète avec la même intensité qu'elle l'attire, l'astre n'est donc pas immobile, le centre de gravité du système planète-étoile n'est pas au centre de l'étoile.



Système planète-étoile

Certes, la masse d'une étoile est des milliers de fois plus importante que celle d'une planète, mais cette différence permet tout de même d'observer des oscillations.



Oscillations du spectre perceptibles.

Ainsi, la spectrographie permet aussi de trouver des exoplanètes, assez massives pour permettre une oscillation perceptible du spectre de l'étoile. Ainsi, si des hypothétiques extra-terrestres voulaient repérer des planètes autour du soleil, en utilisant les méthodes actuelles, il leur serait impossible de détecter d'autres planètes que Jupiter ou Saturne, et non Mars ou la Terre, les deux planètes les plus propices à la vie mais beaucoup trop petites.

C'est donc pour deviner des planètes plus petites que Norman Murray, un astronome de l'université de Toronto, a analysé le taux de fer de notre Soleil (lors de ses premiers milliards d'années d'existence, notre étoile a, en effet, attiré des météorites dont la masse totale est de 2 à 5 fois la masse de la Terre, et dont la composition s'approchait de celle de notre planète). On pourrait donc facilement faire le rapprochement entre ce taux et la présence de planètes plus petites autour d'étoiles. Ce scientifique a donc, grâce à la spectroscopie, étudié ce taux chez 640 étoiles, et il a trouvé une valeur comparable à celle du Soleil chez 466 d'entre-elles. Mais d'autres scientifiques ont rappelé que ce taux ne constituait qu'une indication, préférant miser sur l'amélioration des méthodes classiques.

Lorsque les étoiles sont lointaines, il devient impossible de discerner si elles sont par couples, en trio, voire en quatuor ; seulement 2 % d'entre-elles s'observent directement, à l'aide d'un télescope. Pour les autres, il faut identifier ces arrangements par leurs conséquences. Dans des conditions d'alignement des orbites par rapport à la Terre, il devient possible de deviner des « éclipses » d'étoiles, par la variation de leur luminosité. Dans les autres cas, il faut encore user de la spectrographie : de même que pour les planètes, chaque étoile attire l'autre, et est attirée elle-même. Le centre de gravité du système n'est donc pas au centre d'une étoile. On observe donc des oscillations.



Les spectres permettant de discerner un couple.

# LEXIQUE

Voici un petit lexique qui, loin d'être exhaustif, a pour objet de rappeler quelques définitions essentielles pour la pratique de la spectrographie astronomique.

## ● Catalogue de Messier

Catalogue dressé par l'astronome français Charles Messier vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle pour conserver une trace des nébuleuses, galaxies et amas d'étoiles.

Ainsi, par exemple, M31, la galaxie d'Andromède, est la trente et unième entrée du catalogue.

Voici quelques exemples d'objets intéressants :

M8	M13	M16	M17	M20	M27	M31	M42
M45	M51	M57					

## ● Longueur d'onde

Distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs dans une onde électromagnétique. Elle est liée à la fréquence. Plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est petite.

## ● Lumière

Partie visible du spectre électromagnétique.

Dans le vide, la lumière se propage à une vitesse de 299792,458 km/s.

## ● Luminosité

Puissance rayonnée par les corps célestes.

Energie émise par la surface d'une étoile (d'un groupe d'étoile) en une unité de temps. On la compare souvent avec la luminosité du Soleil (Exemple : une étoile a une luminosité de 50 soleils, c'est-à-dire 50 fois supérieure à celle du soleil). On exprime plutôt la magnitude d'une étoile, que sa luminosité.

## ● Raie d'absorption

Bandes sombres de fréquence particulière sur un spectre qui se forme lorsque des substances situées entre une source lumineuse et un observateur absorbent la lumière de la fréquence en question. Chaque substance produit une configuration particulière des raies d'absorption.

Les raies nous permettent de connaître entre autre la composition chimique des couches externes des étoiles.

## ● Raies spectrales

Lignes brillantes ou obscures dans le spectre. Les raies brillantes sont des raies d'émission, les raies sombres sont des raies d'absorption.

A chaque raie correspond un rayonnement d'une longueur d'onde bien déterminée

## ● Spectral (Type)

La plupart des étoiles sont entièrement caractérisées par deux données d'observation : par exemple par la magnitude absolue et le type spectral.

Ceci traduit le fait physique qu'une étoile est caractérisée par deux paramètres : sa température et sa pression.

Lorsqu'on classe les étoiles en fonction de la magnitude absolue et du type spectral, on obtient le diagramme de Hertzsprung/Russel.

95% des étoiles cataloguées se répartissent en sept types fondamentaux que l'on désigne, dans l'ordre des températures décroissantes, du blanc bleuté au rouge, par les lettres **O - B - A - F - G - K - M**.

Suivant cet ordre, la température des étoiles s'abaisse de 30.000 K à 2800 K

## ● Spectre

Bande colorée résultant de la décomposition de la lumière au moyen d'un prisme. Un spectre d'étoile présente un spectre continu parsemé de raies spectrales qui apparaissent le plus souvent en absorption.

## ● Spectroscope

Instrument pour étudier le spectre d'une source lumineuse. Il en existe deux types principaux : les spectroscopes à prisme et les spectroscopes à réseau de diffraction.

# BIBLIOGRAPHIE

## Ouvrages et Encyclopédies

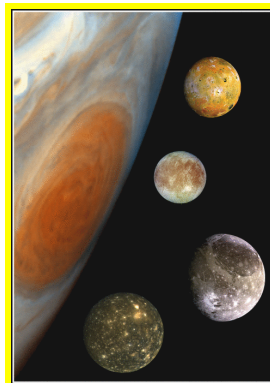
- ✓ *Memo*, encyclopédie en un volume de Larousse (2001 2002)
- ✓ Le dictionnaire *Le petit Larousse* (1962)
- ✓ Le *dictionnaire encyclopédique visuel* (1999)
- ✓ L' *encyclopédie alphabétique*, Larousse
- ✓ L'encyclopédie *interactive Hachette* 2001
- ✓ L'encyclopédie interactive *Encarta de luxe*

## Sites Internet

- ✓ <http://www.obs-hp.fr/www/archive/tgmet-lib/library.html>
- ✓ <http://www.obs-hp.fr/www/technique/sophie/sophie.htm>
- ✓ <http://www.astrosurf.com/skylink/pagepers/bazin/bazin.html>
- ✓ <http://perso.wanadoo.fr/marc.chapelet/>
- ✓ <http://www.cjasm.espci.fr/>
- ✓ <http://perso.wanadoo.fr/sdmorata/appareil/appareil.html>
- ✓ <http://perso.wanadoo.fr/sdmorata/solaire/solaire.html>
- ✓ <http://www.astrosurf.com/buil/histoire.htm>

## Autres sources

- ✓ M.Pierre Henriquet, pour ses nombreuses explications sur les éléments composant le spectrographe et sur la spectrographie en générale.
- ✓ M. Cyril Bazin, webmaster du site internet [www.astrosurf.com/skylink/pagepers/bazin/bazin.html](http://www.astrosurf.com/skylink/pagepers/bazin/bazin.html) pour son soutien dans notre démarche.



# Remerciements

Nous tenons à remercier vivement :

- Le personnel du **Centre d'Astronomie de Saint Michel l'Observatoire**, qui nous a accueilli très chaleureusement lors de notre semaine d'observation, et notamment Pierre et Horatio.
- L'ensemble des personnes ayant participé à l'organisation du projet Callisto, notamment les professeurs suivants : M. Strajnic, Mme Mialet, M. Chanu et M. Dugast.
- L'Observatoire de Haute Provence, pour sa visite guidée très instructive et sa mise à disposition d'un télescope 80 cm trois nuits d'affilée.
- Toutes les personnes et organisations ayant participé au financement de notre séjour...



# Annexes

## I Pointage d'une étoile au télescope GOTO et coordonnées équatoriales, azimutales

Les coordonnées des astres sont pratiquement toujours indiquées en coordonnées équatoriales. Les coordonnées équatoriales sont :

- La **déclinaison** (qui correspond à la latitude terrestre, en degrés). La déclinaison mesure l'écart d'un astre par rapport à l'équateur céleste. Elle s'étend donc de 0° (équateur céleste) à 90° (pôle Nord ou sud.). Dans l'hémisphère céleste sud la déclinaison est négative.
- **L'ascension droite** correspondant à la longitude de la Terre. Sur Terre la longitude 0 est arbitrairement fixée par le méridien de Greenwich, c'est à dire la ligne qui passe par l'observatoire de Greenwich et les deux pôles terrestres. Dans le ciel c'est le point vernal.

L'ascension droite doit être calculée au moment où on pointe l'étoile ou l'objet céleste en question. Elle est en heure et doit être soustraite à l'heure sidérale à laquelle on pointe.

La déclinaison ne change pas, en effet, la variation de la position de l'étoile dans le ciel est due uniquement à la rotation de la terre et n'affecte que L'ascension droite.

L'autre système de coordonnées et est dit Azimutale, il comprend deux coordonnées :

- **L'azimut**, qui correspond à l'angle formé entre l'axe Nord-Sud terrestre, l'observateur, et la direction dans laquelle on doit se tourner pour observer l'objet céleste en question.
- **L'altitude**, de l'objet ou de l'étoile par rapport à l'horizon (en degrés).

Les télescopes que nous avons utilisé étaient en monture équatoriale et avaient le système GOTO qui n'est applicable qu'à ces montures.

Le GOTO et une gestion informatique des coordonnées qui assure aussi le suivi des étoiles au cours du temps d'observation pour palier à la rotation de la terre.

Pour pointer une étoile avec un télescope GOTO, il faut d'abord indiquer la date et l'heure à laquelle on est, puis on pointe une étoile connue et on entre son nom de catalogue. Ensuite, on a plus qu'à entrer le nom de catalogue de l'étoile ou de l'objet que l'on veut étudier.

## II Protocoles de traitement de spectre

Nous pouvons utiliser pour cela le logiciel Iris©, créé par Christian Build, (<http://www.astrosurf.com/buil/indexfr.htm>) ainsi que le logiciel Visual Spec© créé par Valérie Desnoux. (<http://valerie.desnoux.free.fr/vspec>.)

Ouvrir IRIS

1) Définir le répertoire de travail

Fichier / Réglages

2) Charger l'image du spectre brut

Fichier / Charger / fichier "Spectre-brut-Nom\_De\_L\_Etoile"

3) Régler les seuils de visualisation dans la fenêtre "Seuils"

Bouton "Auto"

4) Enlever le signal thermique (le Dark)

Traitement / Soustraction

sélectionner "fichier" et choisir le Dark dans le répertoire

5) Enregistrer le fichier créé

Fichier / Sauver

Remarque : En général, on l'appelle "Spectre-dark-Nom\_De\_L\_Etoile"

6) Ouvrir la console de commande

bouton console

Remarque : à partir de maintenant, toutes les commandes seront tapées dans cette console

7) Tracer un rectangle serrant au plus près le spectre

8) Repérer et noter sur un papier les coordonnées du coin en haut à gauche (X1 Y1) et en bas à droite (X2 Y2) du rectangle de sélection en plaçant la souris sur ces deux points (les coordonnées apparaissent en bas à droite de l'écran)

8) Créer un fichier noir (tous les pixels mis à 0)

Taper: clipmax 0 0

9) Copier dans ce fichier vide le spectre qu'on a encadré

Taper: copy Spectre-dark-Nom\_De\_L\_Etoile X1 Y1 X2 Y2

10) Ce spectre est peut être penché. Il faut le redresser pour qu'il apparaisse à l'horizontal (fondamental lorsque nous l'étirerons pour faire apparaître les raies)

Cherchons son angle d'inclinaison

Encadrer une portion du spectre avec la souris

Taper: l\_ori

Le logiciel retourne l'inclinaison du spectre

11) Tournons le spectre autour du point (X3, Y3) et de l'angle indiqué par la commande l\_ori  
Remarque : Le point de rotation est à choisir sur le spectre. En général, on prend l'extrémité droite du spectre

Tapez: rot X3 Y3 angle

12) Maintenant, le spectre est horizontal, mais parfois, les raies ne sont pas parfaitement verticales, dans ce cas, il existe une commande qui redresse les raies sans toucher à l'inclinaison du spectre.

Taper slant Y Alpha

Remarque: Y est la coordonnée du milieu du spectre et alpha l'angle d'inclinaison des raies

Important: Alpha est à trouver par tâtonnement

13) Une fois que votre spectre est correct, on peut alors l'étirer verticalement pour voir apparaître les raies.

Tapez l\_bin...

...et ajustez les seuils pour voir les raies (en général, il faut monter le seuil haut à 32 767 et le seuil bas à 0)

14) Sauvez ce spectre sous le nom que vous voulez, et fermez IRIS.

15) Ouvrez VisualSpec<sup>®</sup>

16) Ouvrez le fichier du spectre final que vous venez d'enregistrer

Fichier / Charger Image

Remarque: Attention, le logiciel cherchera par défaut des fichier .pic, il faut choisir en bas de la fenêtre les fichiers .fit et les noms des fichiers apparaîtront.

17) Appuyer sur le bouton de transformation du spectre en courbe (c'est un petit bouton sur lequel est dessiné un spectre noir, une flèche rouge et une courbe jaune)

### III Protocole d'étalonnage du spectrographe

L'étalonnage s'effectue en fait sur le logiciel Vspec<sup>®</sup> et résulte du fait que la caméra CCD ne nous permet pas d'obtenir un spectre entier. Donc, depuis le début, nous travaillons sur un fragment de spectre dont nous ne connaissons même pas la location sur le spectre original.

Il faut donc établir une échelle adéquate pour analyser les raies et savoir à quels éléments elles correspondent. Pour étalonner les spectres, on a besoin de valeurs de référence, on peut utiliser des lampes spéciales ou trouver le spectre d'une des étoiles que l'on a déjà avec ses valeurs, ou bien, on peut aussi avoir des raies d'absorption de l'atmosphère terrestre (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N, etc....) dont on connaît les longueurs d'ondes (Attention, l'unité est l'angströms, pas le nanomètre).

Ouvrir Vspec<sup>®</sup>

1) Ouvrir le fichier contenant notre spectre (menu *Fichier/Ouvrir Image*).

2) On crée le profil de notre spectre en cliquant sur l'icône



3) Cliquer sur :



Et cocher la case *Référence 1* puis *OK*.

4) Cliquer droit sur la courbe puis sur *étalonner*.

5) Sélectionner une raie dont on connaît la longueur d'onde en gardant le bouton gauche de la souris enfoncé puis cliquer droit sur cette raie puis sur *raie1*.

Recommencer l'opération sur une seconde raie en la désignant comme étant la *raie2*.

6) Saisir les valeurs des deux raies dans les deux rectangles blancs en haut de l'écran.

7) Cliquer sur



Pour valider l'étalonnage.

8) Enfin, on peut maintenant utiliser l'*outil/éléments* pour retrouver les éléments chimiques qui composent l'atmosphère de l'étoile que l'on a étudiée.