

# Histoire de la spectroscopie

Alain Brémond

## Table des matières

- 1- La préhistoire de la spectroscopie : le récepteur est l'œil
- 2- La découverte de l'effet Doppler-Fizeau et de ses applications
- 3- Les matériels de spectroscopie astronomique : spectroscopes, prismes et réseaux
- 4- La spectrométrie (mesure de l'énergie du rayonnement)
- 5- Les premiers travaux en astronomie avec la spectroscopie:
  - Soleil
  - Etoiles
- 6- Les débuts de la photographie et de son application à l'astronomie

## 1- La préhistoire de la spectroscopie

Tout commence par l'observation de la lumière « naturelle » c'est à dire celle du Soleil.

C'est Isaac Newton (1643-1727) qui décide d'étudier systématiquement cette lumière à l'aide d'un prisme. Avant lui d'autres avaient observé les bandes colorées qui apparaissaient dans différentes circonstances, comme l'arc en ciel, mais aucune étude scientifique n'avait été conduite. Ses travaux commencés en 1666 sont couronnés par la publication de l'ensemble de ses résultats dans « Optiks » en 1704<sup>1</sup>. Il démontre que la lumière blanche est constituée de plusieurs couleurs, que chacune de ces couleurs ne peut être décomposée par le prisme et enfin, qu'en additionnant toutes ces couleurs on peut recomposer la lumière blanche(1). A aucun moment il n'observe de spectre de raie. Cela est probablement lié à la forme ronde et surtout au grand diamètre de l'orifice d'entrée de la lumière solaire que décrit Newton : « *Ayant introduit un faisceau de rayons solaires dans une chambre fort obscure, par un trou rond de quatre lignes fait au volet de croisée...* ». En 1732, un adepte de la philosophie de Newton, Thomas Merrill(2) observe diverses flammes produites par des corps divers, souvent de l'alcool auquel il mêle différentes substances. En plaçant un prisme en arrière d'un trou percé dans un cache il constate que lorsque du sel de mer est mêlé à l'alcool, le spectre est presque totalement remplacé par une couleur jaune. Nous savons aujourd'hui que ce sont les raies d'émission du sodium.

Un peu plus tard William Herschel (1738-1822) s'intéresse au spectre solaire. En 1800, il mesure avec un thermomètre la température au niveau de chaque bande colorée(3). Il observe qu'elle augmente du violet au rouge mais il constate aussi qu'elle est maximum à 38 mm du rouge alors qu'au-delà du violet, elle ne varie plus. Ainsi il

---

<sup>1</sup> Traduction de Jean-Paul Marat de 1787.

découvre le premier les infrarouges (figure ci contre). Il étudie ensuite ce rayonnement invisible, source de chaleur au-delà du rouge, et observe qu'il obéit aux mêmes lois de réflexion et de réfraction que la lumière visible(4), (5). Cette partie du spectre est appelée « rayonnement calorifique ».

L'année suivante Johan Ritter (1776-1810) (6)s'intéresse à l'effet de la lumière sur les sels d'argent et montre qu'un rayonnement, situé au-delà du violet, noircit les sels d'argent. Il appelle cette partie du spectre : « rayonnement chimique ». Wollaston réalise une expérience semblable la même année qui le conduit aux mêmes observations.(7)

Thomas Young (1773-1829), en 1802(8), démontre la nature ondulatoire de la lumière à partir des phénomènes d'interférence et de diffraction obtenues à l'aide d'un réseau de 500 traits par pouce. Il est le premier à mesurer des longueurs d'onde et des fréquences des couleurs visibles par l'œil humain.

Sa méthode est très simple. Il utilise deux écrans percés de trous de petit diamètre. Le premier écran est percé d'un seul orifice et le second de deux. Il projette sur le premier trou une lumière d'une couleur donnée produite par un prisme ou par un réseau. Sur un écran placé au-delà de l'écran percé de deux trous à la distance  $d$  il observe des franges d'interférence. Au centre de symétrie, en  $O$ , la frange est la plus intense car il n'y a pas de différence de marche  $S1O = S2O$ . La distance à la frange suivante est notée  $a$  et l'écartement entre les trous  $S1S2$  est  $e$ . Il existe pour la frange située en dehors de la frange centrale une différence de marche des rayons  $S2B - S1B$  notée  $\delta$ .

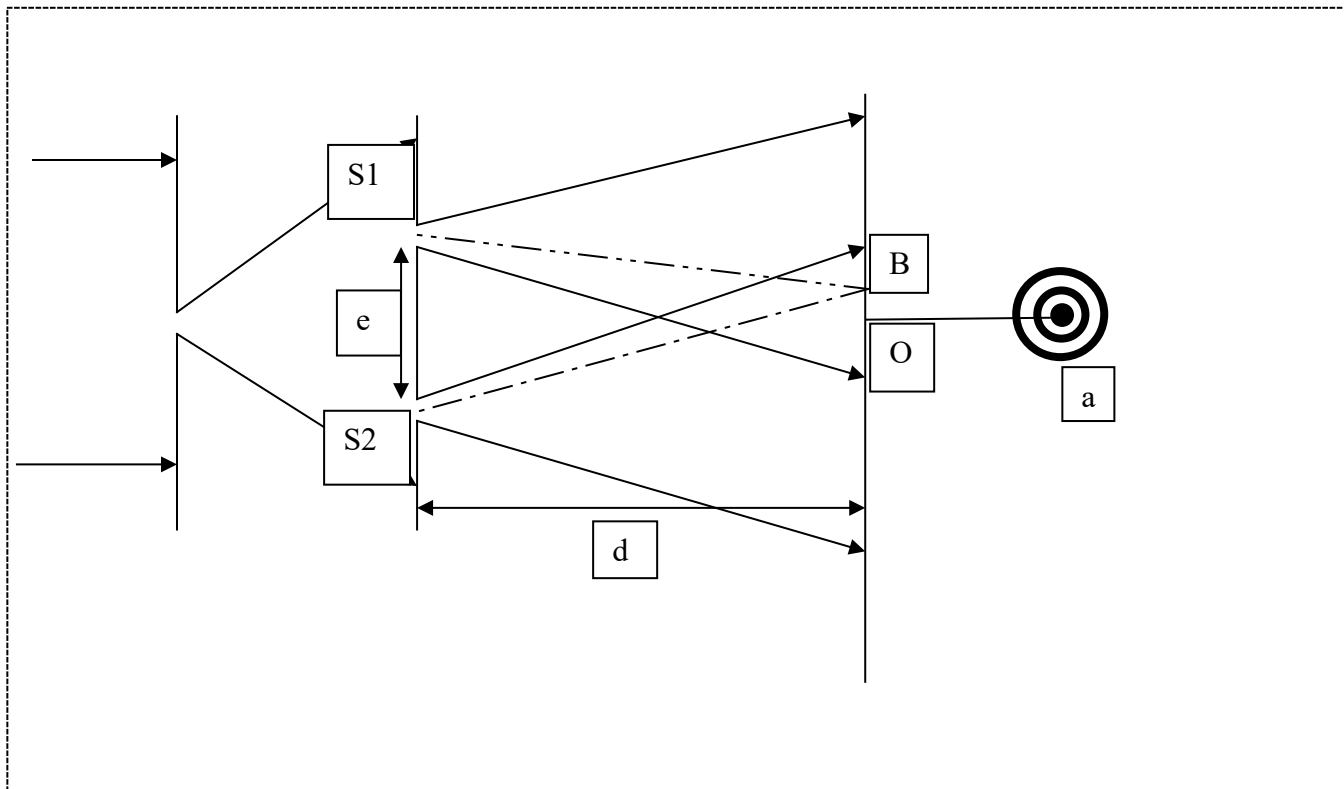


Figure : schéma des expériences de Young.

On a :

$$a/d = \delta / e. \quad \text{Si } a \text{ est petit par rapport à } d$$

La différence de marche est liée à la longueur d'onde comme l'imagine Young dans son hypothèse ondulatoire.

$$\delta = k.\lambda \text{ pour les franges brillantes ; donc } a = \lambda.d / e \text{ d'où } \lambda = a.e / d$$

Avec cette méthode et avec le prisme, il mesure les longueurs d'onde du rouge du violet et du jaune. Il trouve pour ces couleurs des longueurs d'onde mesurant respectivement : 0,7, 0,42, 0,56 microns.

### **La découverte de raies dans le spectre solaire.**

C'est William Hyde Wollaston (1766-1828) qui en 1802 (7) a l'idée de reprendre les expériences de Newton en remplaçant le trou percé par ce dernier dans son volet, par une fente étroite de 1/20 pouce. Il observe alors, devant le prisme, des raies sombres qui semblent délimiter les couleurs du spectre. C'est l'interprétation qu'il fait de ces raies. Cinq fortes raies et deux plus faibles retiennent son attention. Il nomme les raies fortes des lettres majuscules A, B, C, D et E et les plus faibles f et g. C'est lui qui leur donne le nom anglais de «line» (raie en français) qui leur restera. Comme il s'intéresse à de nombreux autres sujets scientifiques, Wollaston n'approfondit pas plus sa découverte.

### **Les premières études du spectre solaire par Fraunhofer.**

Joseph Fraunhofer (1787-1826) travaille dans une entreprise, près de Munich qui fabrique du verre destiné à l'optique. Pour tester les lentilles, il s'intéresse à l'optique dans le but de construire des lunettes achromatiques. En plaçant un prisme de flint derrière une fente étroite il découvre des centaines de raies sombres dans le spectre solaire. Il utilise alors, un théodolite de 25 millimètres. La fente est étroite (15 secondes d'arc) et haute de 36 minutes. Le prisme possède un angle au sommet de 60°. Contrairement à Wollaston il conclut que ces raies ne constituent pas des séparations entre les différentes couleurs(9), (10). En effet il remarque que certaines d'entre elles sont entourées de la même couleur. Il confirme que ces raies ont toujours le même ordre et la même position relative les unes par rapport aux autres. Dans un premier temps il dénombre 476 raies et donne aux dix raies la plus marquées, les lettres suivantes, du rouge au violet : A, a, B, C, D, E, b, F, G et H (figure 1)

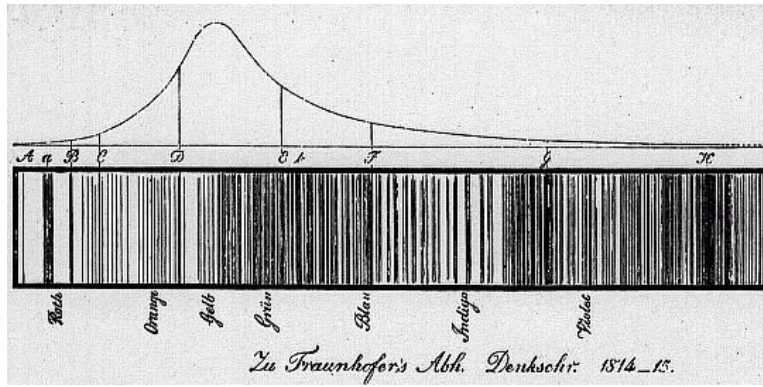


Figure 1 : les raies observées et nommées par Fraunhofer ainsi qu'en haut du spectre la variation de l'intensité visuelle en fonction de la couleur.

La raie A est très proche de la limite du spectre visible, dans le rouge

La raie D est formée de deux raies très proches. Elles correspondent aux raies brillantes qu'a observé Fraunhofer dans la lumière de sa lampe au sodium.

La raie b se dédouble en trois raies plus fines

La raie G est constituée de plusieurs raies très serrées

La raie H est formée de deux raies de dimensions identiques encadrant une raie très sombre.

Entre les raies B et H il en dénombre 674 mais n'en porte que 350 sur son schéma.

Fraunhofer signale également que l'intensité du spectre solaire est maximum dans la région du jaune.

Ces raies lui servent pour tester les verres qu'il fabrique et en particulier mesurer leurs indices pour différentes couleurs. Rappelons que son objectif est de diminuer le chromatisme des verres et des lentilles optiques.

Il perfectionne son instrumentation avec l'utilisation d'une lunette de 4,5 pouces pour remplacer le théodolite. Il couple cet instrument avec un prisme objectif de  $37^{\circ}40'$  d'angle au sommet. Une lentille cylindrique lui permet d'élargir le spectre et ainsi de mieux observer les étoiles. Il poursuit en effet ses travaux d'observation en portant son dispositif sur d'autres corps célestes, planètes et étoile. C'est ainsi qu'il conclut que le spectre de Vénus est très proche de celui du Soleil alors que celui des étoiles les plus brillantes peut en différer notablement. Le spectre de Sirius possède par exemple des raies différentes de celle de la lumière solaire.

La diffraction est aussi une source de défaut des dispositifs d'optique ? Il commence à l'étudier avec une fente étroite placée au foyer d'une lentille. Très vite il fabrique un réseau fait de fils très fins, parallèles les uns aux autres et à la fente. Il découvre alors que la lumière forme un spectre principal entouré de spectres identiques mais moins lumineux situés de part et d'autre du spectre principal. Il leur donne les noms de spectres d'ordre 1 et 2.

Enfin il construit un réseau par transmission constitué d'une plaque de verre recouverte d'un film d'or sur laquelle il trace des traits parallèles et régulièrement espacés. Cette relation lui permet de mesurer des longueurs d'onde

Ainsi se trouve-t-il en mesure de calculer les longueurs d'onde des dix raies principales en utilisant un réseau de 2000 traits gravés sur un film d'or déposé sur une plaque de verre. Il observe que « en connaissant l'angle de déviation de la lumière, résultant de l'influence réciproque des rayons et la distance entre les traits du réseau on peut calculer

*l'étendue d'une onde lumineuse<sup>2</sup> des différentes couleurs, au moyen d'une équation extrêmement simple... »*. En appliquant sa formule dans le cadre de la théorie ondulatoire de Young il peut calculer les longueurs d'onde. Il décrit aussi les raies d'émission observées dans le spectre des arcs électriques produits par une machine électrostatique.

Les travaux suivants vont se faire au laboratoire où des expérimentateurs anglais vont étudier tous les corps chimiques dont ils disposent. Ainsi peu à peu les raies brillantes du spectre sont associées à des substances chimiques. Parmi ces travaux, ceux de Brewster ont des applications astronomiques. En effet, en réalisant des observations systématiques du Soleil il remarque que certaines raies dépendent de la hauteur du Soleil sur l'horizon. Il en déduit que certaines de ces raies sont dues à l'atmosphère terrestre(11). Certains physiciens évoquent la possibilité que les raies sombres du spectre solaire pourraient être dues à une atmosphère solaire. Des expériences faites lors d'éclipses ne permettent pas de vérifier cette hypothèse (Forbes, Brewster et Gladstone cités par Saillard(12) ).

Bien que ces études soient très importantes pour l'avenir de la spectroscopie, ces observations restent purement descriptives et il faudra attendre les travaux de Bunsen et Kirchhoff pour véritablement parler de spectroscopie.

### **Les travaux de Kirchhoff et Bunsen**

Le problème majeur qui se pose aux physiciens est celui de la nature des raies sombres du spectre solaire. Deux hypothèses s'affrontent. Pour certains, les raies sont dues à l'absorption de la lumière par un milieu physique alors que pour d'autres il s'agit de franges d'interférences (Brewster par exemple).

En 1849 Léon Foucault (1819-1868) présente les résultats d'une expérience qu'il vient de réaliser. Il observe le spectre d'un arc électrique formé entre deux charbons chargés de sel sur lequel il projette, avec une lentille, des rayons solaires. Il observe que les raies D sombres de Fraunhofer correspondent aux raies brillantes produites par l'arc électrique(13). Il en conclut que leur nature est identique. Il retrouve par ailleurs cette raie D dans tous les matériaux qu'il teste<sup>3</sup>. Foucault très intéressé par tout ce qui touche l'astronomie déclare : *« ... ce phénomène nous semble dès aujourd'hui une invitation pressante à l'étude du spectre des étoiles, car, si par bonheur on y retrouvait cette même raie, l'astronomie stellaire en tirerait certainement parti. »*

La même année W.A. Miller (1817-1870) du King's College de Londres (14) conduit des expériences identiques et arrive aux mêmes conclusions que Foucault.

Gustav Kirchhoff (1824-1887), en association avec Robert Bunsen (1811-1899), et effectuant une expérience semblable à celle de Foucault montre en 1859 que ces raies sont associées au sodium. En effet, une source qui donne un spectre continu, lorsqu'elle traverse une flamme « salée » permet d'observer des raies d'absorption de type D. Il

---

<sup>2</sup> La longueur d'onde ?

<sup>3</sup> On montrera plus tard que cette raie D est présente à cause d'une contamination par du chlorure de sodium (présent sur les mains des expérimentateurs) car une quantité infime suffit à faire apparaître cette raie.

montre aussi que la température joue un rôle important. Il faut que la température soit plus basse dans le milieu absorbant que dans la source qui produit le spectre continu sinon ce sont des raies d'émission qui sont produites. Kirchhoff poursuit en supposant que dans le Soleil, les raies sombres sont dues à son atmosphère qui est plus froide que le cœur de cet astre. Il pense également qu'il y a du sodium dans cette atmosphère.

Ses travaux l'amènent à constater qu'il existe une relation entre le pouvoir émissif d'un corps et son pouvoir absorbant à longueur d'onde et à température donnée. Cette relation s'observe aussi bien dans le cadre du spectre continu que dans celui du spectre de raies. En outre il précise que les raies sombres sont dues à un phénomène d'absorption et non à des interférences. Voici une citation tirée de la conclusion de son article de 1859 : « ... *le spectre d'un gaz incandescent est renversé (c'est à dire que les raies brillantes deviennent sombres) quand une source de lumière d'intensité suffisante, qui donne un spectre continu, est placée derrière un gaz lumineux. De ceci nous pouvons conclure que le spectre solaire, avec ses raies sombres, n'est rien d'autre que l'inverse du spectre que produirait l'atmosphère solaire elle-même. Ainsi, pour faire l'analyse chimique de l'atmosphère solaire, tout ce que nous devons faire c'est découvrir les substances qui, lorsqu'elles sont portées à la flamme, donnent des raies qui coïncident avec les raies sombres du spectre solaire.* »

A partir de ses expériences et de celles de ses prédécesseurs il détermine ce qui est connu comme les **lois de Kirchhoff et Bunsen**(15), (16) :

*- Un gaz à pression élevée, un liquide ou un solide, chauffés, émettent un rayonnement continu qui contient toutes les couleurs.*

*- Un gaz chaud, à basse pression, émet un rayonnement uniquement pour certaines couleurs bien spécifiques : le spectre de ce gaz présente des raies d'émission.*

*- Un gaz froid, à basse pression, éclairé par une source de rayonnement continu, absorbe certaines couleurs, produisant ainsi dans le spectre des raies d'absorption. Ce gaz absorbe les mêmes couleurs qu'il émettrait s'il était chaud.*

Ces lois permettront de mieux comprendre la physique des étoiles et des différentes nébuleuses.

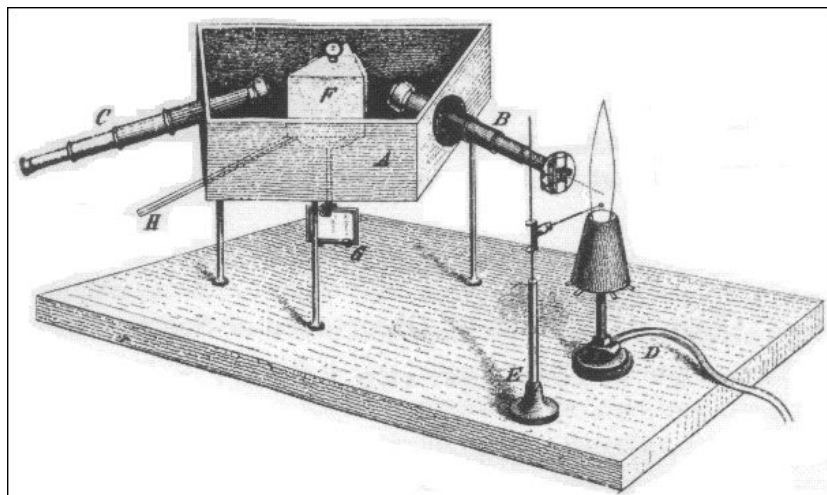
Kirchhoff poursuit ses études en étudiant au laboratoire une grande variété de corps dont il recherche la présence sous forme de raies d'absorption dans le spectre du Soleil(17), (18), (19).

### **L'instrumentation de Kirchhoff et Bunsen**

Le brûleur passé à la postérité sous le nom de « bec Bunsen » a été en réalité construit par un technicien de l'Université de Heidelberg où travaillait Bunsen. Peter Desaga, c'était son nom, avait bénéficié des remarques et des

conseils de Bunsen de façon à ce que cet instrument réponde parfaitement aux besoins de Kirchhoff et Bunsen pour leurs expérimentations spectroscopiques.

Ils mirent aussi au point un spectroscopie qui porte leur nom.



En voici la description faite par Kirchhoff et Bunsen : « C'est une boîte dont le fond est trapézoïdal, l'intérieur est noirci. Il repose sur trois pieds. Les deux parois obliques qui forment un angle d'environ  $58^\circ$  l'une avec l'autre, portent deux petites lunettes B et C. L'oculaire de la première a été enlevé et remplacé par une plaque dans laquelle une fente formée de deux lames de

laiton est ajustée au foyer de la lentille objectif. La lampe D est placée devant la fente de façon à ce que le bord de la flamme soit dans l'axe du tube B. Un peu en-dessous le point où l'axe rencontre le bord, se trouve l'extrémité d'une boucle formée d'un fin fil de platine, qui est tenu par le bras E. La petite perle de chlorure sec à étudier est fondue sur la boucle.

Entre la lentille objectif des télescopes B et C se trouve le prisme creux F de  $60^\circ$  d'angle de réfraction ; il est rempli de carbone disulfure. Le prisme repose sur une plaque de laiton qui peut être tournée sur un axe vertical. Cet axe porte le miroir G sur son extrémité inférieure et, au-dessus de lui, la poignée H au moyen de laquelle le prisme et le miroir peuvent être tournés. Une petite lunette est dirigée en direction du miroir de façon à ce que l'observateur puisse voir l'échelle horizontale montée à petite distance. En tournant le prisme, la totalité du spectre de la flamme peut être amené devant le fil du télescope C. Toute région du spectre correspond à une lecture sur l'échelle graduée. Si le spectre est très faible, le fil en C est illuminé avec l'aide d'une lentille qui projette une partie des rayons de la lampe à travers une petite ouverture ouverte sur le côté de l'oculaire C »(20)

Le problème est bien entendu celui de la production de la flamme, qui interfère avec la substance à analyser. Ils sont donc obligés de comparer les spectres des substances à étudier avec des flammes différentes et à étudier pour les métaux, des sels différents de ces métaux. Ceci fait que leurs études s'avèrent longues et fastidieuses. Ces méthodes leur permettent de conclure que « il apparût que la variété de composés dans lesquels les métaux étaient utilisés (les sels de ces métaux), les différences dans la composition chimique des flammes, et les grandes différences de leurs températures, n'avaient aucune influence sur la position des raies spectrales correspondant aux différents métaux »<sup>7</sup>. L'étude de 1860 leur permet de décrire précisément les spectres du sodium, du lithium, du potassium, du strontium, du calcium et du baryum. Ils ne doutent pas que la recherche de ces éléments dans les objets du système solaire sera possible.

Leurs travaux ont un grand retentissement. Malgré quelques physiciens un temps réticents, la plupart des physiciens et des astronomes se lancent dans les études spectroscopiques. Cette discipline va s'orienter principalement dans deux voies. Dans le domaine de la chimie, Kirchhoff a montré que la spectroscopie pouvait détecter des corps en quantité infime et que par conséquent tout un nouveau champ d'analyse s'offrait aux physiciens et aux chimistes. Les astronomes pour leur part vont pouvoir « analyser » les objets célestes mais aussi, grâce aux découvertes de Doppler et Fizeau mesurer les vitesses des objets lointains mais aussi des mouvements de rotation des planètes.

C'est ensuite Angström à Uppsala qui donne un spectre étalonné où les longueurs d'onde des raies sont mesurées en mètres. Jusqu'alors les échelles étaient parfois spécifiques à un observateur ou étaient mesurées en pouce anglais ou français. Dans un article de 1880 l'astronome anglais Piazz Smyth(21), s'attaque de façon virulente à l'utilisation du mètre, mais remarque-t-il, tous les spectroscopistes sont en train de l'adopter ! L'angström sera bientôt adoptée par les spectroscopistes comme unité de longueur d'onde.

## 2- Le décalage spectral. Christian Doppler (1803-1853) et Hyppolite Fizeau (1819-1896)

C'est Doppler qui, chronologiquement est le premier à rapporter l'idée d'un décalage spectral lié au déplacement de l'émetteur du signal ou de celui du récepteur. Il présente son étude le 25 mai 1842 à la Société Royale Bohémienne(22). Sa théorie est que la lumière est une onde longitudinale et que sa longueur d'onde est influencée par le déplacement de la source qui l'émet. Il prétend appliquer cette théorie aux étoiles doubles. Pour lui le son qui est aussi une onde longitudinale doit subir les mêmes modifications. Il ne dispose pas des moyens d'observation qui lui permettraient de vérifier son hypothèse pour la lumière mais il parvient dès 1845 à vérifier son hypothèse avec les ondes sonores. C'est Christophore Buys-Ballot (1817-1890) alors professeur de physique à Utrecht que réalise l'expérience<sup>4</sup>. Pour cela il fait appel à des musiciens. Un groupe est situé sur une plateforme d'un train qui se déplace et croise d'autres musiciens qui colligent les notes qu'ils entendent selon que le train s'approche ou s'éloigne d'eux. L'expérience est concluante. Plus tard (1846) Doppler précise son hypothèse en prenant en compte les déplacements de la source aussi bien que celle de l'auditeur.

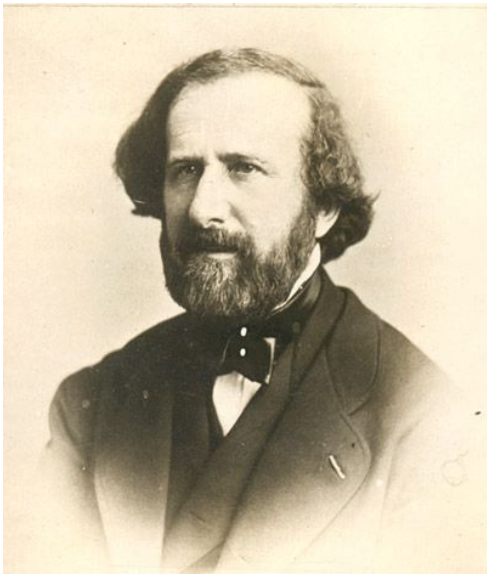
C'est tout à fait indépendamment que Fizeau fait la même découverte. Le 23 décembre 1848 il lit un mémoire à la Société Philomathique qui décrit le même phénomène appliqué à la lumière. En voici le compte rendu publié dans « Notice sur les travaux de M. H. Fizeau »<sup>5</sup>. Le titre de sa communication, « *Sur les phénomènes que présentent les sons lorsque le corps sonore ou l'observateur sont en mouvement, et sur des phénomènes correspondant que doit présenter la lumière.* » indique que ses expériences portent sur les ondes sonores et qu'il fait l'hypothèse que des phénomènes semblables doivent se produire avec la lumière. Ce n'est cependant qu'une théorie qu'il n'a pas vérifiée. Le compte-rendu précise que : « *En appliquant ces considérations (relatives au son) à la lumière, on trouve que si*

<sup>4</sup> Filkin, D. and Hawking, S. [\*Stephen Hawking's Universe: The Cosmos Explained\*](#). New York: BasicBooks, 1997.

<sup>5</sup> Archives de l'Académie des Sciences de Paris.



*l'on attribue au corps lumineux ou à l'observateur un mouvement assez rapide pour qu'il soit comparable à la vitesse de la lumière, les longueurs d'ondulation de tous les rayons simples seront changés, et, par conséquent, leurs indices de réfraction. Considéré dans le spectre, cet effet se traduira par un déplacement des raies, dont l'auteur a calculé la valeur, et qu'il espère parvenir à démontrer par l'expérience. On voit que ce phénomène permettrait d'établir une relation entre les vitesses des corps lumineux et les résultats de l'analyse prismatique de la lumière. »* Ainsi toutes les applications du phénomène sont envisagées dès 1848. Ce travail ne sera publié qu'en 1870(23). Il propose une expérience et estime la valeur du déplacement des raies dans le cas de la vitesse orbitale de Vénus et de celle de la Terre. Les valeurs trouvées de l'ordre de 3 à 4'' sont, dit Fizeau, à la portée des astronomes.



Hippolyte Fizeau

Plus tard, en 1860, Ernst Mach (1838-1916) fait une conférence dans laquelle il développe les mêmes idées

Alors que les preuves s'accumulent sur l'effet Doppler dans les ondes sonores, pour ce qui concerne la lumière, il y aura des controverses tant que le phénomène ne sera pas démontré par des expériences et des observations précises.

### **3- Les différents spectroscopes**

L'appareillage utilisé par Newton en 1666, comporte un prisme d'angle au sommet de  $60^\circ$ , un trou rond par où passe un rayon de soleil et un écran constitué par le mur du fond de sa chambre. Il observe un spectre continu. La réduction du diamètre de l'orifice d'entrée de la lumière, permet à Merrill, en 1752, d'observer des zones sombres qui semblent délimiter les contours des couleurs. En utilisant une fente étroite, Wollaston observe en 1802 un spectre de raies.

Les perfectionnements de l'appareillage porteront dès lors sur le moyen de créer le spectre (prismes et réseaux) et l'utilisation de lentilles complémentaires.

Fraunhofer, vers 1824, est le premier à apporter de nombreuses modifications au dispositif jusqu'alors simple.

- La fente est très étroite et le spectre n'est plus seulement observé à l'œil nu mais à travers une lunette qui le grossit. C'est ainsi qu'il peut distinguer plus de 500 raies dans le spectre solaire.

- Pour observer les étoiles il dispose un grand prisme dont l'angle au sommet mesure  $37^{\circ}40'$ , qu'il place en avant de l'objectif de la lunette (prisme-objectif). Il dispose ensuite, à la sortie du faisceau lumineux, une lentille cylindrique qui étale le spectre. Ce dispositif lui permet d'étudier les raies spectrales d'objets peu lumineux.

- Création d'un réseau de diffraction à l'aide de fils fins parallèles

- Après T. Young, il met au point d'un réseau par transmission constitué d'une plaque de verre recouverte d'une mince feuille d'or sur laquelle des traits sont finement gravés abrasant la fine pellicule métallique.

Kirchhoff, nous l'avons vu, utilise des lunettes situées l'une entre la fente et le prisme, l'autre entre le prisme et l'écran. Déjà, en 1848, William Simms (1793-1860) avait disposé une lentille formant un collimateur entre la fente et le prisme. Ce dispositif est aussi décrit par William Swan (1818-1894) en 1856.

Le problème de la qualité du verre est important, c'était la raison d'être des expériences de Fraunhofer. On dispose de deux qualités de verre : le Crown et le Flint. En juxtaposant trois prismes accolés respectivement de Crown, de Flint et de Crown, Amici (1786-1868) peut réaliser un spectroscopie à vision directe (figure ). Plus facile à utiliser il a cependant l'inconvénient d'entraîner une importante perte de luminosité.

William Huggins (1824-1910) construit un spectroscopie stellaire formé de deux prismes comportant une lentille placée en avant de la fente. Il utilise, comme Fraunhofer une lentille cylindrique pour obtenir une plus grande dispersion du spectre. Son objectif étant de réaliser l'identification des raies du spectre des étoiles, il crée un dispositif pour disposer d'un spectre témoin. Un arc électrique, formé entre des électrodes constituées de différents métaux, produit une lumière qui est projetée sur un prisme redresseur qui envoie ce faisceau lumineux sur la partie haute de la fente. La partie basse recevant la lumière de la source à étudier. Il utilise une lunette de huit pouces fabriquée par Alvan Clark (1804-1887) pour l'optique et Cooke pour la monture équatoriale. Plus tard il se fait construire un grand spectroscopie constitué de treize prismes.

Mais les prismes ont des limites, principalement ils atténuent beaucoup la lumière incidente. Les astronomes s'orientent alors vers les réseaux. En 1881, Hermann Vogel (1841-1907) utilise un réseau pour la spectroscopie stellaire ; c'est un échec. Plus tard, en 1890, James Keeler (1857-1900) à l'observatoire Lick réussit. Il utilise un réseau de 570 traits/mm (fait par Rowland) couplé avec une lunette de 36 pouces qu'il dirige vers les nébuleuses. Ce dispositif très lumineux lui permet d'étudier ces objets faibles (24).

#### **4- Les débuts de la spectrométrie**

##### **La naissance des magnitudes.**

La spectrométrie se propose de mesurer l'énergie issue des objets célestes. Elle est classiquement mesurée sur terre par le système des magnitudes mis au point par les Grecs. L'Almageste de Ptolémée (100-170) est le premier écrit qui nous soit parvenu faisant état de classement des étoiles en magnitudes (ou grandeurs). Ce serait Hipparque (vers 129 av. J.-C.), cité par Ptolémée qui aurait créé le premier système de magnitudes en trois classes. Ptolémée en utilise six, la magnitude 1 correspondant aux étoiles les plus brillantes et la magnitude six les plus faibles. Ce système, dans son principe, reste encore utilisé de nos jours. Avec cette classification de nombreux catalogues d'étoiles sont rédigés. Citons, outre Ptolémée, le persan al-Sûfi (903-986), Tycho Brahé (1546-1601) avec son catalogue de 777 étoiles, le Progymnasmata et Johann Bayer (1572-1625). L'apparition de la lunette et du télescope repousse les limites au-delà de la sixième magnitude et avec eux apparaissent aussi des subdivisions de l'échelle en demi magnitudes. De très nombreux astronomes contribuent à l'établissement de catalogues plus précis, étendus souvent maintenant à l'hémisphère austral. Rappelons la mémoire de James Bradley (1693-1762), Nicolas Louis de Lacaille (1713-1762), Jérôme de Lalande (1732-1807) et surtout la compilation de Francis Baily (1744-1844) avec son *Astronomical Society Catalog* de 1826.

### **Les méthodes sans comparaison avec un objet étalon.**

Mais les mesures sont très subjectives. Pour limiter cette imprécision plusieurs méthodes sont mises au point. La méthode des séquences<sup>(25;26)</sup> de William Herschel (1738-1822) consiste à observer une première étoile puis à rechercher à proximité deux autres étoiles, l'une un peu plus lumineuse et l'autre un peu moins. Il répète cette classification pour toutes les étoiles de la constellation étudiée. Ainsi il arrive à subdiviser chaque intervalle de magnitude en tiers de magnitude. Chaque étoile de la constellation est classée en ordre décroissant et Herschel un chiffre en partant de 1 pour l'étoile la plus lumineuse, classification utilisée par Flamsteed (1646-1719) dans son catalogue. Mais Herschel utilise aussi une autre méthode, plus précise : il pointe deux télescopes identiques sur deux étoiles différentes et place des diaphragmes de diamètres décroissants devant le télescope qui est dirigé vers la plus brillante jusqu'à ce que les deux magnitudes lui paraissent égales. Le diamètre du diaphragme lui permet de comparer ainsi de façon assez rigoureuse les magnitudes relatives de plusieurs étoiles. Son fils John Herschel (1792-1871) travaille d'une façon similaire<sup>(27)</sup> en classant par magnitude croissante les étoiles observées au cours d'une nuit. La nuit suivante il repart d'une étoile déjà notée et continue de la même façon. Il obtient ainsi une classification ordonnée par magnitude de toutes les étoiles qu'il observe. Il reste cependant à leur assigner une valeur absolue. Il utilise comme référence les étoiles du catalogue de Francis Baily.

Anders Celsius (1701-1744) utilise une autre méthode. Pointant une étoile il place devant sa lunette des plaques de verre qui absorbent la lumière avec une valeur de une demi magnitude. Il lui suffit de compter le nombre de plaques nécessaires pour faire disparaître l'étoile pour avoir une mesure relative de sa magnitude.

### **Seconde étape : comparaison de la lumière des étoiles avec celle d'une lumière étalon.**

La méthode de Christian Huyghens (1629-1695) est assez sommaire : il compare la lumière d'une étoile observée à la lunette (Sirius) à celle du soleil observée à l'aide d'un tube fermé à une extrémité mais percée d'un petit trou. En plaçant une sorte de lentille devant le pinceau de lumière ainsi obtenu et en l'éloignant de l'orifice il diminue la luminosité apparente jusqu'à ce qu'elle soit égale à celle de Sirius. Il effectue ensuite des calculs géométriques qui lui permettent d'en déduire que Sirius est 27 664 fois plus distant de la terre que le Soleil (cité par Bouguer et Histoire de l'Académie Royale des Sciences de 1735 (28)) Cette méthode est aussi préconisée à Paris par le père François Marie en 1700 dans son ouvrage «*Nouvelles découvertes sur la lumière*» (cité par Bouguer).

Mais c'est Pierre Bouguer (1698-1758) qui peut être considéré comme le premier à apporter un dispositif et une base théorique précise à la mesure de la lumière. Dans son ouvrage posthume édité par l'abbé De La Caille en 1760 (29), Bouguer précise d'abord que l'intensité lumineuse décroît avec le carré de la distance. Il démontre ensuite que pour que les mesures comparatives soient précises il faut que la lumière provenant de l'objet et celle de l'étalon soient observées par l'œil au même moment. En effet la sensibilité de l'œil à la lumière, dit Bouguer, varie en fonction des circonstances et si l'on doit passer d'un instrument à un autre il n'est pas certain que la comparaison sera fiable. De là il en déduit un appareillage qui répond à ces préconisations. C'est ainsi qu'il peut comparer les éclats de la Lune et du Soleil (p 106 à 109 de son traité). On lui doit aussi la mesure précise de l'assombrissement des bords du Soleil et surtout la loi de l'absorption de la lumière par l'atmosphère en fonction de la hauteur de l'objet sur l'horizon (droite de Bouguer).

Parmi les auteurs qui ont travaillé sur cette question il faut citer Johann Lambert (1728-1777) et John Michell (1724-1793) mais le travail de Bouguer reste le plus précis.

### **Troisième étape : un appareillage de mesures précises au XIX<sup>ème</sup> siècle.**

Deux grands types d'appareils voient progressivement le jour. Les spectromètres par extinction, selon le principe de Celsius sont abandonnés en raison principalement parce que l'absorption dépend de la couleur de l'objet à mesurer. Les spectromètres comparatifs se développeront progressivement sous l'impulsion de Carl von Steinheil (1801-1870), de Karl Friedrich Zöllner (1834-1882) et d'Edward Pickering (1846-1919). Ces dispositifs leurs permettent de dresser des catalogues d'étoiles avec des mesures de magnitude plus précises.

Un peu plus tard, après les travaux du physiologiste G.T. Fechner (1801-1887), Norman Pogson (1829-1891) établit en 1856 la relation entre la magnitude et la quantité de lumière appelée éclat en astronomie. Il montre que l'éclat est multiplié par 2,512 pour chaque augmentation de une magnitude. La forme moderne de la relation(30) est :

$$m_1 - m_2 = -2,512 \log(F_1/F_2)$$

où  $m_1$  et  $m_2$  sont les magnitudes apparentes et  $F_1$  et  $F_2$  sont les densités de flux lumineux en  $W.m^{-2}$ .

Il fallut ensuite déterminer une référence pour le point zéro de référence. C'est d'abord l'étoile polaire qui est choisie par Pickering directeur de l'observatoire de Harvard, puis, un peu plus tard, c'est un ensemble d'étoiles situées autour de Polaris, la séquence polaire, qui est choisi.

## **5- Les premiers travaux astronomiques avec la spectroscopie.**

L'étude historique des travaux sur le Soleil et les étoiles ne rentre pas précisément dans l'objectif de ce travail. Néanmoins, ce sont ces travaux qui ont permis aux astronomes de parfaire leur méthode et de pouvoir ensuite les appliquer à l'étude des nébuleuses. C'est pourquoi nous esquisserons une présentation de ces premières réalisations en spectroscopie.

### **5.1. L'étude spectroscopique du soleil**

Source naturelle de lumière, il était tout naturel que ce soit le spectre du Soleil, qui, au début soit le plus étudié. Après les premières études de Fraunhofer et de Kirchhoff, les travaux deviennent systématiques. L'analyse spectrale permet de découvrir, pas à pas les éléments chimiques qui constituent le Soleil. Les éclipses totales de Soleil permettent de mieux comprendre la structure de l'atmosphère solaire. Très tôt la spectroscopie est utilisée par Jules Janssen (1824-1907) de Paris qui commence ses travaux en 1862. Ils porteront principalement sur l'effet de l'atmosphère terrestre sur le spectre solaire mais il participe également aux observations des différentes zones du Soleil qui, alors, ne peuvent être étudiées que pendant une éclipse totale. On lui doit aussi la construction d'un observatoire astronomique sur le Mont Blanc en 1892. Il lui permit l'étude des raies de l'oxygène. Le problème était alors de savoir si de l'oxygène pouvait être présent en dehors de l'atmosphère terrestre. Norman Lockyer (1836-1920) découvre la raie C de Fraunhofer dans la chromosphère lors de l'éclipse de 1868. En 1867, il essaye aussi, sans grand succès de mettre en évidence des variations du spectre des taches solaires(31). L'américain C.A. Young (1834-1908), au cours d'une éclipse en 1870, montre la substitution des raies sombre sur le fond continu du spectre par des raies brillantes situées à la même position dans le spectre lorsque le Soleil est occulté par la Lune. Cette découverte fondamentale atteste l'identité de nature des raies spectrales. Jules Janssen et au même moment Lockyer mettent au point un spectroscopie solaire à grand pouvoir dispersif. Dans le spectre solaire on identifie une raie de longueur d'onde plus courte que celle du sodium et ne correspondant à l'époque à aucun corps terrestre. On l'appelle la raie de l'hélium (soleil = helios en grec). C'est William Ramsay (1852-1916) qui en 1895 montre que l'hélium découvert de façon indépendante par Rayet, Janssen et Lockyer, existe aussi dans des minéraux radioactifs terrestres. Pour la raie dite du « coronium » car observée dans la couronne solaire, sa nature n'est identifiée qu'en 1941 par Walter Grotrian (1890-1954) qui travaille sur l'ionisation produite à très haute température. Elle correspond au fer fortement ionisé. La raie du « nebulium » est elle identifiée par Ira Bowen (1878-1973) en 1927, sous la forme de l'oxygène ionisé (OIII).

### **5.2. L'étude des étoiles**

On doit à Hearnshaw(32) une étude historique très précise du développement de l'étude spectroscopique des étoiles. Deux grands types de recherches se sont développés.

**5.2.1. L'étude spectrale est d'abord purement qualitative.** La première observation d'une étoile est due, nous l'avons vu à Fraunhofer qui observe une étoile très brillante, Sirius. L'Italien G.B. Donati (1826-1873) à Florence suivi par Angelo Secchi (1818-1878) sont les premiers à conduire des études systématiques. En France les noms de Charles Wolf (1827-1918) et de Georges Rayet (1839-1906) sont associés à un type d'étoiles qui porte leur nom. Mais ce sont Henry Draper (1837-1882), William Huggins (1824-1910), Hermann Carl Vogel (1841-1907) à Potsdam et Norman Lockyer (1836-1920) qui constituent les personnalités phares de ces débuts de l'astrophysique stellaire. Puis l'étude systématique des étoiles permettra des classifications dont celle de Harvard, la plus prestigieuse sous l'impulsion de Edward Pickering (1846-1919) reste celle qui est encore utilisée de nos jours.

### **5.2.2. Les déplacements des étoiles : la vitesse radiale, les étoiles doubles.**

Les premières mesures seront réalisées, pour les étoiles par le père Angelo Secchi (1818-1878) qui n'observe en 1868 aucun déplacement notable. C'est le contraire pour William Huggins (1824-1910). Dans son article, lu 14 mai 1868, Huggins précise que « ...si les étoiles se déplacent vers la Terre ou s'en éloignent, leurs mouvements, composés avec celui de la terre, devrait altérer pour un observateur terrestre la réfrangibilité de la lumière émise par elles, et par conséquent, les positions des raies des substances terrestres ne devraient pas coïncider avec les raies sombres produites par l'absorption dues aux vapeurs de ces mêmes substances existantes dans les étoiles. »(33). Huggins utilise un spectroscope constitué de deux prismes en flint d'angle égal à 60°.

Secchi continue ses observations et, en 1869, met en évidence un déplacement probable de Sirius et rend hommage aux travaux de Huggins. Mais très vite il déclare que ses nouvelles observations sont négatives et que celles de Huggins sont en désaccord avec celles de William Christie (1881-1910) qui travaille à l'observatoire de Greenwich.

Ce dernier répond à Secchi dans un article de 1876(34). Il expose en détail les difficultés et les sources d'erreurs instrumentales auxquelles il a du faire face: astigmatisme, défaut de parallélisme, mauvaise orientation du pinceau de lumière sur la fente, tous défauts qui ont été progressivement corrigés. Il ne reconnaît alors que deux mesures discordantes avec celles de Huggins.

D'autres programmes de recherche de vitesses radiales se développent et occupent de nombreuses pages des revues d'astronomie. Citons ceux anglais de E.W. Maunder (1851-1928) et Christie (1881-1910) à Greenwich sous la direction de l'astronome royal Airy, ceux de G.M. Seabroke (1838-1918) à Rugby. Toutes ces études montrent que la précision des mesures est loin d'être parfaite et pour une étoile donnée les mesures répétées donnent des écarts allant jusqu'à un changement de signe de la vitesse de l'étoile par rapport à la terre.

Aux Etats Unis James Keeler (1857-1900) à l'observatoire Lick poursuit des travaux identiques. Il utilise une lunette de 36 pouces. Ses travaux porteront principalement sur les nébuleuses.

## **6- Les débuts de la photographie et de son application à l'astronomie**

L'action de la lumière sur les sels d'argent est connue depuis 1727 grâce à une expérimentation de J.H. Schultze puis par W. Lewis en 1763. Ils montrent que le nitrate d'argent noirci à la lumière. Ces travaux et ceux de K.W. Scheele (1742-1786) en 1777 conduisent à l'essai de Thomas Wedgwood (1771-1805) avec l'apposition de nitrate d'argent sur un papier en 1802. Deux problèmes apparaissent: la durée de pose très longue et l'impossibilité d'arrêter l'action de la lumière sur ce « film » lorsque l'effet désiré est obtenu. La première difficulté est aplanie par l'utilisation de chlorure d'argent plus réactif. C'est Nicéphore Niepce (1765-1833) aidé par son frère Claude qui trouve le moyen de fixer l'image ainsi produite. Le support est fait de plaques de métal recouvertes de bitume de Judée. Le premier succès date de 1822. Ce procédé appelé héliographie est perfectionné pour aboutir en 1826 à des plaques reproductibles en série. Daguerre (1797-1851), qui travaille aussi sur ce sujet, prend connaissance des travaux de Niepce. Il le contacte en 1829 et ensemble ils perfectionnent le procédé par l'utilisation de iodure d'argent et le traitement des plaques par les vapeurs de mercure. C'est un grand succès et François Arago (1786-1853) présente leur méthode à l'Académie des Sciences le 19 août 1839. Ce dernier en comprend très vite l'intérêt pour l'astronomie. En 1840 il faut (à f/11) 80 secondes pour obtenir une image exposée au Soleil.

Le procédé de Niepce et Daguerre est utilisé pour la première fois en 1845 par L. Foucault (1819-1868) et AHL Fizeau (1819-1896) à l'observatoire de Paris pour photographier le Soleil. Les photos sont réalisées sur des plaques de Daguerre avec une exposition de 1/60 secondes.

La première photographie stellaire a lieu le 18 juillet 1850 (l'étoile Véga) par William Bond (1789-1859) et John Whipple (1822-1870) à Cambridge avec une lunette de 38 cm. Le collodion humide remplace en 1851 les plaques de Daguerre avec une sensibilité multipliée par 10 (8 secondes pour les mêmes conditions que ci-dessus). Ceci permet à Warren De la Rue (1815-1889) de photographier en 1858 les premières taches solaires. Les plaques sèches apparaissent en 1880 réduisant à une demie seconde le temps de pose. Puis la gélatine remplace le collodion avec une plus grande facilité d'utilisation et une sensibilité encore plus grande. Il est alors possible de réaliser des photos astronomiques nocturnes. En 1891, la première photographie en couleur est réalisée par G. Lippmann.

Les astronomes utilisent ces performances pour faire de longues poses sur des objets astronomiques difficiles à voir, même avec les télescopes les plus puissants, et améliorer les détails des objets mieux visibles.

Dans le domaine des nébuleuses, il faut signaler la photographie de la nébuleuse d'Orion prise le 30 septembre 1880 par Henry Draper (1837-1882) avec une lunette de 28 cm

Par ailleurs la photographie permet la réalisation de cartes systématiques du ciel nocturne, l'étude des mouvements des étoiles en comparant les plaques d'une même zone du ciel, prises à quelques années d'intervalle.

C'est ainsi que W. N. Campbell (1862-1938) à l'observatoire Lick entreprend l'étude du mouvement propre de toutes les étoiles de magnitude  $\leq 5,5$  dans les deux hémisphères.

### **Adaptation de la photographie pour la spectroscopie qui devient spectrographie**

Huggins et Miller, en 1863 tentent de fixer par la photographie un spectre des étoiles Sirius et Aldébaran. Ils utilisent les plaques au collodion humide. Ils n'observent qu'un spectre continu sans raie. Huggins attribue cet échec à l'utilisation d'une lunette qui selon lui perturbe l'obtention d'un spectre de raies. Auparavant, en 1862, W.A. Miller avait travaillé sur la sensibilité des plaques photographiques aux ultraviolets produits par un arc électrique(14). Il avait montré que les plaques étaient sensibles à des longueurs d'onde qui s'étendent au-delà du violet sur une longueur égale à cinq à six fois la longueur de la partie visible du spectre. C'est Henry Draper (1837-1882) qui en mai 1872 obtient un spectre de alpha Lyrae (Vega) avec un prisme en quartz placé au foyer du miroir secondaire de son télescope de 28 pouces. En août de la même année il refait une photo du spectre de Vega où il montre quatre raies. Il n'utilise ni fente ni lentille sur l'appareil photographique(32).

Un peu plus tard, en mars 1882, Henry Draper obtient un spectre photographique de la grande nébuleuse d'Orion(35). Il obtient quatre photos. Deux sont réalisées avec un spectroscopie à fente. Il décrit deux raies dans l'ultra(14)violet en plus de deux raies de l'hydrogène aux longueurs d'onde de 4340 (H $\gamma$ ) et 4101 (H $\delta$ ) angström. Les deux autres spectres sont obtenus sans fente avec un spectroscopie à prisme, direct, placé un peu en avant du foyer primaire du télescope. Il observe dans deux condensations situées en avant du Trapèze d'Orion, un spectre continu que Draper attribue à du gaz sous haute pression, du liquide ou un solide. En effet il n'observa aucune étoile dans cette zone qui pourrait donner un tel spectre. Au même moment Huggins réalise aussi des spectrographies de la nébuleuse d'Orion(36). Il observe deux autres raies l'une à la longueur d'onde de 5005 Å, l'autre à 4957 Å. De plus il note une forte raie dans l'ultraviolet (environ 3730 Å), zone de sensibilité des plaques qu'il utilise. Le matériel utilisé par Huggins est précisément décrit(14). Après des essais avec Miller c'est un télescope de 18 pouces en métal poli qui est motorisé par une horloge très précise. La fente est placée au foyer primaire. Une lentille de collimation est placée devant un prisme en spath d'Islande, très transparent aux UV et très dispersif, comme le verre de flint. Les prises de vues sont fixées sur des plaques sèches. Celles-ci permettent à Huggins d'obtenir sur les mêmes plaques un spectre témoin (soleil ou arc électrique). La durée d'exposition pour Orion est de 45 minutes.

### **La spectrophotométrie photographique**

Dans le domaine de la mesure des magnitudes la photographie s'avère un procédé plus simple que les méthodes comparatives avec une source étalon. C'est encore dans le domaine stellaire que les études ont débuté. Heranshaw en a tracé très précisément le déroulement historique(37). C'est à Harvard que les travaux de photométrie photographique se ont développés sous l'impulsion de Edward et de William Pickering (1858-1938). En 1890 un



article de synthèse signé de Edward Pickering fait le point sur les techniques utilisées(38). Il y rapporte principalement les travaux de Williamina Fleming (1857-1911). Il confie ensuite à Henrietta Leavitt (1868-1921) la tâche d'établir une référence : la séquence polaire nord. Elle consacra presque vingt ans de sa vie à ce travail et d'autres poursuivront dans ce domaine. La référence sera acceptée par la communauté internationale des astronomes. La première publication qui date de 1909 (39) porte sur les 47 premières étoiles mesurées. Ce standard servira de référence notamment pour le projet « Carte du Ciel » mais aussi à l'étude des étoiles variables Céphéides qui joueront un rôle fondamental dans l'étude des nébuleuses spirales.

Ultérieurement la photographie sera complétée par la photométrie photoélectrique puis par les photomultiplicateurs.

J.B. Hershaw fait remarquer dans son ouvrage « *The measurement of starlight* » que ces données, fastidieusement compilées, n'ont pas conduit à des analyses permettant de mieux comprendre la nature des étoiles, les observateurs se contentant d'établir des catalogues. Pour lui une nouvelle astrophysique ne démarre réellement qu'en 1908 lorsque Johannes Wilsing (1856-1943) et Julius Scheiner (1858-1913) exploitent leurs données pour en déduire les températures stellaires selon la loi de Planck.

#### Reference List

1. Newton I: Optiks. Paris Christian Bourgeois, 1989
2. Merrill T: Observations on light and colors. Physical and literary essays. Edinburgh, 1752, pp. 231-271
3. Herschel F.W.: Investigation of the Powers of the Prismatic Colours to Heat and Illuminate Objects; With Remarks, That Prove the Different Refrangibility of Radiant Heat. To Which is Added, an Inquiry into the Method of Viewing the Sun Advantageously, with Telescopes of Large Apertures and High Magnifying Powers. Phil Trans R Soc 1800, 90: 255-283
4. Herschel F.W.: Experiments on the refrangibility of the invisible rays. Phil Trans R Soc 1800, 90: 284-292
5. Herschel F.W.: Experiments on the Solar and on the Terrestrial Rays that occasion heat, with a comparative view of the laws to which light and heat, or rather the Rays which occasion them, are subject, in order to determine whether they are the same or different. Phil Trans R Soc 1800, 90: 293-326
6. Ritter JW: Versuche über das Sonnenlicht. Gilberts Ann 1803, 12: 409-415

7. Wollaston WH: A method of examining refractive and dispersive powers by prismatic reflexion. Phil Trans R Soc 1802, 92: 365-380
8. Young T.: Bakerian Lecture on the theory of Light and Colour. Phil Trans R Soc 1802, 92: 12-48
9. Fraunhofer J.: Bistimmung des Breschung und Farbenzerstreuungs Vermügens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Ver...konnung achromatischer Fernökie. Gilberts Ann 1817, 56: 264-313
10. Fraunhofer J.: Kurzer Bericht von dem Resultaten neuren Versuche uber die Gesetze des Lichtes, und die Theorie deselhen. Gilberts Ann 1823, 74: 337-378
11. Brewster D: Observations on the lines of the solar spectrum, and on those produced by earth's atmosphere, and by the action of nitrous acid gas. Trans Roy Soc Edinb 1834, 12: 519-530
12. Saillard, M. Histoire de la spectroscopie. Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences [26], 1-172. 1988.  
Ref Type: Journal (Full)
13. Foucault Léon. Note sur la lumière de l'arc voltaïque. Ann.Chim.Phys. 58, 477. 1860.  
Ref Type: Journal (Full)
14. Huggins, W. The photographic spectra of stars. The Observatory 1, 4-7. 1877.  
Ref Type: Journal (Full)
15. Kirchhoff G. Analyse chimique fondée sur l'observation du spectre. Ann.Chim.Phys. 62, 452-486. 1861.  
Ref Type: Journal (Full)
16. Kirchhoff G. Analyse chimique fondée sur l'observation du spectre. Ann.Chim.Phys. 64, 257-311. 1862.  
Ref Type: Journal (Full)
17. Kirchhoff G. Recherches sur le spectre solaire et sur les spectres des corps simples. Ann.Chim.Phys. 68, 5-45. 1863.  
Ref Type: Journal (Full)

18. Kirchhoff G. Recherches sur le spectre solaire et sur les spectres des corps simples. *Ann.Chim.Phys.* 1, 396-411. 1864.  
Ref Type: Journal (Full)
19. Kirchhoff G. Contribution toward the history of the solar spectrum. *Phil.Mag.* 25, 255. 1863.  
Ref Type: Journal (Full)
20. Kirchhoff G. and Bunsen, R. Analyse chimique par l'observation des spectres. *Ann der Phys.Chim.* 110, 161-189. 1860.  
Ref Type: Journal (Full)
21. Piazzzi Smyth, C. Practical spectroscopy in 1880. The language. *The Observatory* 3, 491-500. 1880.  
Ref Type: Journal (Full)
22. Bolzano B. Ein Paar Bemerkungen über neue Theorie in Herrn Professor Chr. Doppler's Schrift: "Über das farbige Licht des Dopples-sterne und einiger anderer Gestirne des Himmels". *Ann.der Phys.* 49, 83-89. 1843.  
Ref Type: Journal (Full)
23. Fizeau, H. Des effect du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d'onde des rayons de lumière. *Ann.Chim.Phys.* 19[4ème série]. 1870.  
Ref Type: Journal (Full)
24. Keeler JE: Spectroscopic observations of nebulae made at Mount Hamilton, California with the thirty-six inch refractor of the Lick Observatory. *Publications of Lick Observatory* 1894, 3: 163
25. Herschel W: On the Method of Observing the Changes That Happen to the Fixed Stars; With Some Remarks on the Stability of the Light of Our Sun. To Which is Added, a Catalogue of Comparative Brightness, for Ascertaining the Permanency of the Lustre of Stars. By William Herschel, LL. D. F. R. S.  
*Philosophical Transactions Series I* 1796, 86: 166-226

26. Herschel W: A Fourth Catalogue of the Comparative Brightness of the Stars. By William Herschel, LL. D. F. R. S. Philosophical Transactions Series I 1799, 89: 121-144
27. Herschel JFWB: Results of astronomical observations made during the years 1834, 5, 6, 7, 8, at the Cape of Good Hope; being the completion of a telescopic survey of the whole surface of the visible heavens, commenced in 1825. 1847
28. Celsius Anders: Rapport de M. de Mairan. Histoire de l'Académie Royale des Sciences. Paris, Imprimerie Royale, 1735,
29. Bouguer Pierre: Traité d'optique sur la gradation de la lumière. Paris H.L. Guérin et L.F. Delatour, 1760
30. Karttunen H KPOHPMDK: Fundamental Astronomy. Berlin, Heidelberg, New York Springer, 2003
31. Lockyer, J. N. Spectroscopic observations of the sun. Areg 5, 38-39. 1867.  
Ref Type: Journal (Full)
32. Hearnshaw J-B: The analysis of starlight. Cambridge (USA) Cambridge University Press, 1986
33. Huggins, W. Further Observations on the Spectra of Some of the Stars and Nebulae, with an Attempt to Determine Therefrom Whether These Bodies are Moving towards or from the Earth, Also Observations on the Spectra of the Sun and of Comet II. Phil.Trans.R.Soc. 158, 529-564. 1868.  
Ref Type: Journal (Full)
34. Christie, W. H. M. Note on the displacement of lines in the spectra of stars. Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 36, 313-317. 1876.  
Ref Type: Journal (Full)
35. Draper, H. On photographs of the nebula in Orion, and of its spectrum. Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 42, 367-368. 1882.  
Ref Type: Journal (Full)

36. Huggins, W. The photographic spectrum of the great nebula of orion. *The Observatory* 5, 106-107. 1882.  
Ref Type: Journal (Full)
37. Hearnshaw J-B: The measurement of starlight. Two centuries of astronomical photometry.  
1385. Cambridge (USA) 1996, pp. 1-511
38. Pickering EC: A photographic determination of the brightness of the stars. *Annals of Harvard College Observatory* 1890, 18: 119-214
39. Pickering EC: A Standard Scale of Photographic Magnitudes. *Harvard College Observatory Circular* 1909,  
150: 1-7