

Quel est le langage des étoiles ?

Sergio ILOVAISKY

mise à jour 19/09/16

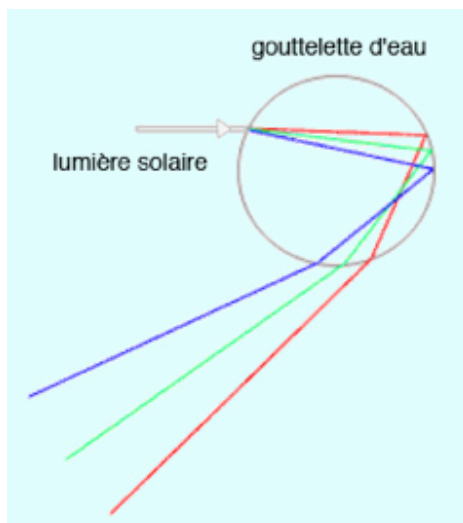
La lumière des étoiles

- La lumière qui nous vient des étoiles porte en elle un *message codé*.
 - Pour le décoder nous devons séparer la lumière en ses couleurs élémentaires : on appelle cela former un **spectre**.
 - Le spectre le plus simple est l'**arc-en-ciel** : ce sont les gouttelettes de pluie qui séparent la lumière du soleil.
-

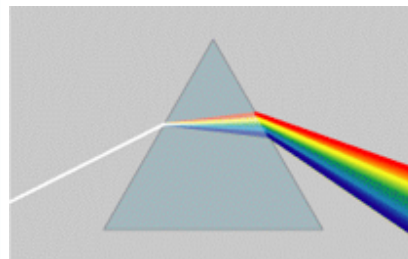
C'est quoi un spectre ?



Le spectre est la séparation de la lumière en couleurs élémentaires. L'arc-en-ciel est le plus simple des spectres. On appelle "dispersion" cette séparation (image J-C Baietto).



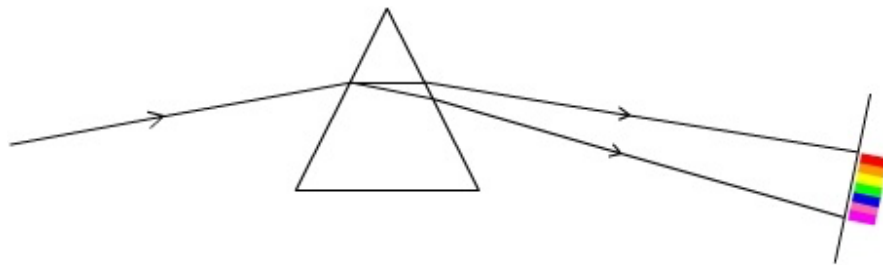
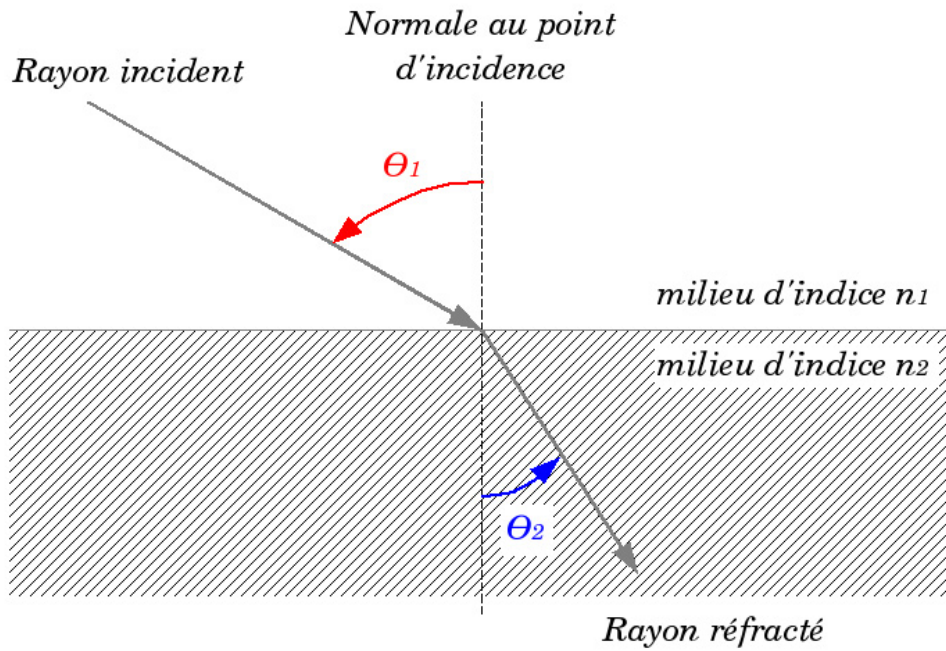
Ce sont les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air qui dispersent la lumière solaire. C'est le phénomène de la *réfraction* (qui est accompagné par une réflexion interne). La *réfraction* a été découverte par Thomas Harriot en 1602.



La dispersion de la lumière par un prisme a été utilisée par Isaac Newton en 1666 pour montrer que la lumière blanche était composée de toutes les couleurs. C'est Newton qui a expliqué l'origine de l'arc-en-ciel (image [Wikipedia](#)).

Comprendre la réfraction

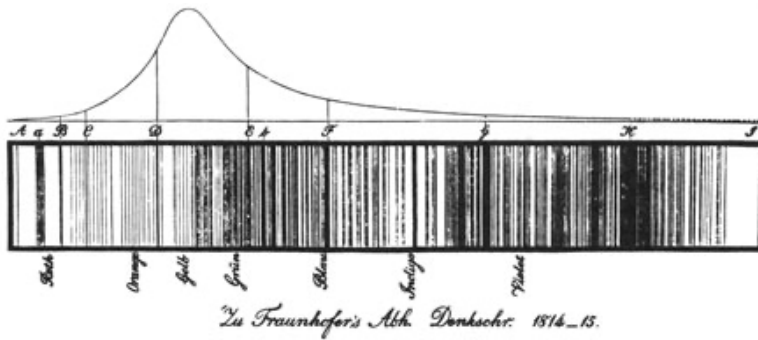
La vitesse de propagation de la lumière, environ 300 000 km/s dans le vide, est réduite dans un milieu transparent (air, eau, verre, etc.). Le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide (c) et celle dans un milieu (v) est appelé **indice de réfraction** ($n = c/v$) et caractérise ce milieu. La vitesse v dépend de la couleur de la lumière : la lumière bleue se propage plus lentement que la lumière rouge, et est donc plus réfractée. Ceci explique pourquoi la lumière blanche entrant dans un prisme est décomposée à la sortie en couleurs élémentaires.



Le secret des spectres

- C'est au début du 19^{ème} siècle que l'on a découvert le secret des spectres : *il manquaient certaines couleurs* dans le spectre du soleil et des étoiles !
 - Mais il a fallu attendre le 20^{ème} siècle pour comprendre **pourquoi**. C'est alors le plein développement de l'astrophysique : l'application des lois de la physique à l'astronomie.
-

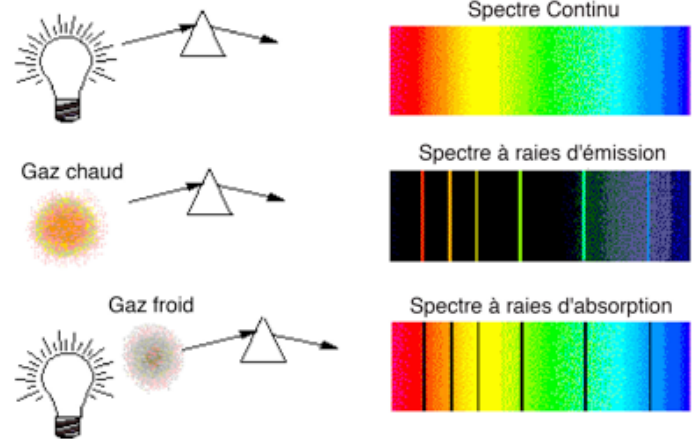
Que contient un spectre ?



Très longtemps après Newton, William Wollaston découvre en 1802 des *couleurs manquantes* dans le spectre du soleil, appelées depuis raies d'absorption. En 1814 Joseph Fraunhofer observe, décrit et dessine le spectre du Soleil. Il constate qu'une raie double jaune correspond exactement à celle observée dans le spectre d'une flamme (c'est le Sodium). Plus tard il décrit 350 autres raies, dont bon nombre sont dues au Fer.

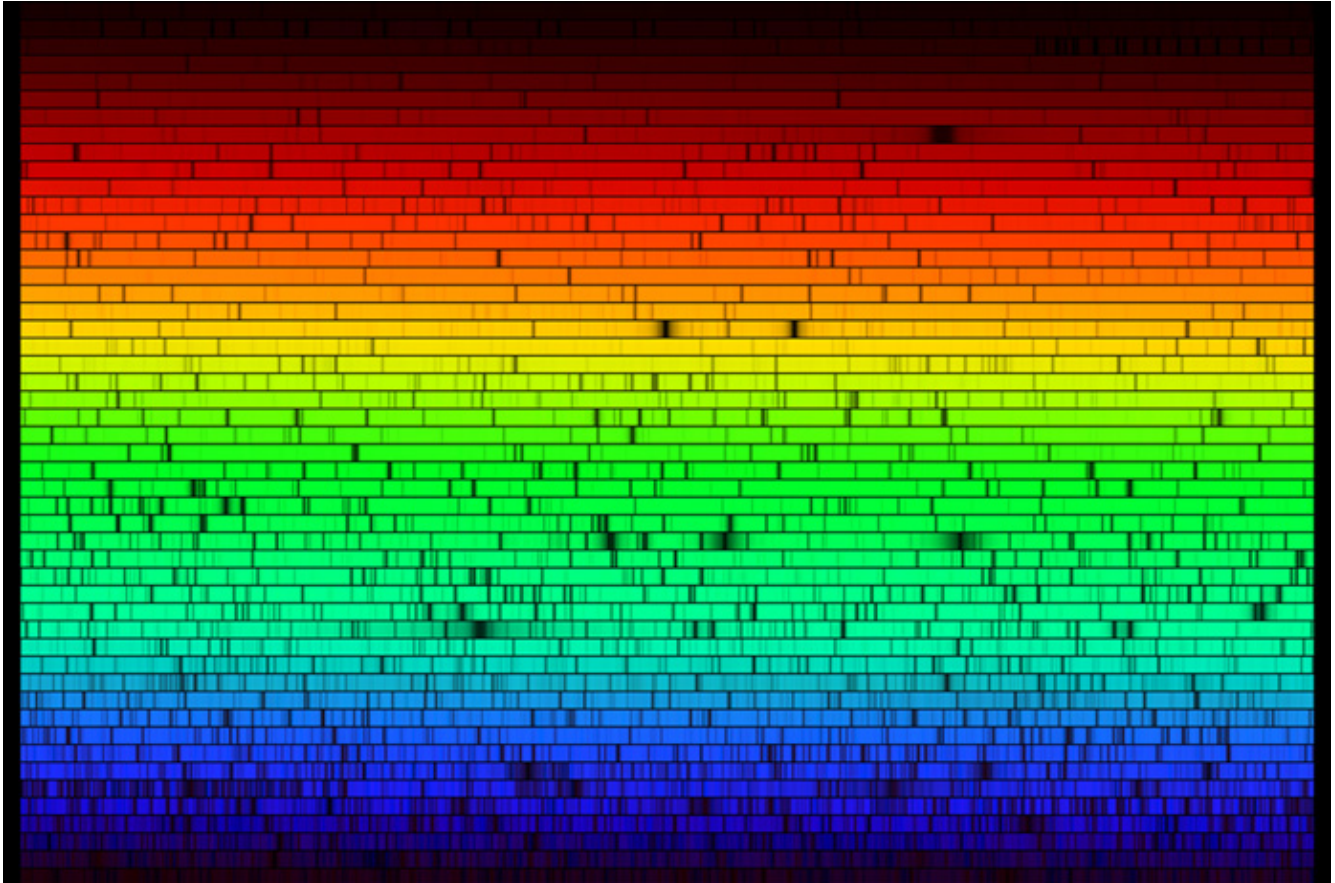
En 1859, Gustav Kirchhoff, avec l'aide de Robert Bunsen, découvre les lois du rayonnement qui portent son nom :

1. Un corps solide, liquide ou gazeux, soumis à haute pression, émet un spectre continu
2. Un gaz chaud à basse pression produit un spectre en émission, caractéristique du gaz
3. Vu devant une source à spectre continu, le même gaz sous pression, mais froid, produit les mêmes raies, mais en absorption

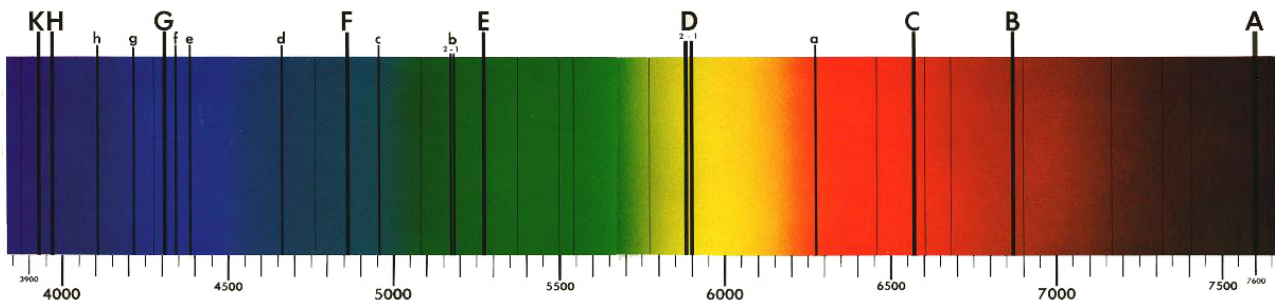


Les raies de Fraunhofer

Spectre du Soleil illustrant les nombreuses **raies d'absorption** produites dans l'atmosphère de notre étoile. C'est la [structure des atomes](#) qui explique pourquoi chaque élément chimique produit des raies qui lui sont propres. ([Image NOAO](#))



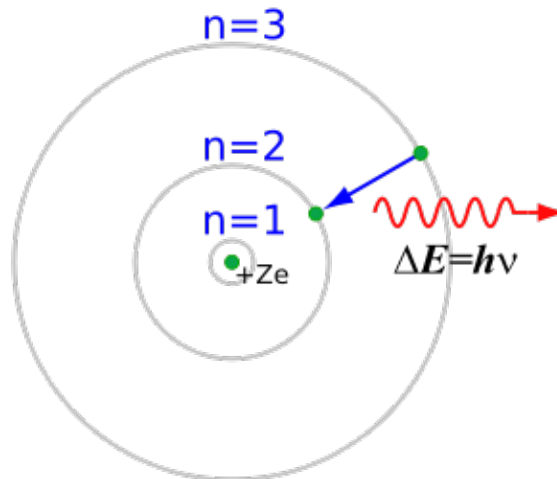
Les principales raies, découvertes par Joseph Fraunhofer en 1814, sont indiquées ci-dessous (entre autres, les raies D sont dues au Sodium, les raies H et K au Calcium, les raies C, F, f et h à l'Hydrogène).



La structure de l'atome

La lumière c'est de l'énergie électromagnétique émise ou absorbée par un atome sous forme de "paquets" qu'on appelle photons.

Dans un atome des électrons sont en orbite autour du noyau. A chaque orbite correspond une énergie différente. Seules certaines orbites sont permises: c'est la **quantification**. Les électrons ayant le plus d'énergie sont sur des orbites hautes (les plus lointaines du noyau).



(Image [Wikipedia](#))

- Quand un électron passe d'une orbite haute à une orbite basse, la différence d'énergie entre les deux orbites est émise sous forme d'un photon.
- Quand un électron fait la transition inverse (orbite basse à orbite haute), il y a absorption d'un photon de la même énergie.

C'est Niels Bohr (1885-1962) qui a développé en 1913 la théorie de la structure atomique en suivant les premiers travaux de Ernest Rutherford (1871-1937).

La nature discrète de la lumière émise par un gaz, sous forme de photons à certaines longueurs d'onde, est la conséquence directe sa structure atomique quantifiée.

C'est pourquoi chaque élément chimique émet (ou absorbe) seulement des photons dont les énergies lui sont caractéristiques (son empreinte digitale).

Elles correspondent aux transitions entre les différentes orbites possibles des électrons qui lui sont associés. On connaît 117 [éléments chimiques](#), dont 94 existent à l'état naturel sur Terre.

Les éléments chimiques dans l'Univers

Les éléments chimiques dans l'univers Il y a 118 éléments chimiques différents connus, dont 94 existent à l'état naturel sur Terre. Mis à part l'hydrogène et une petite partie de l'hélium, qui ont existé dès le début de l'Univers, tous les autres éléments naturels ont été fabriqués à l'intérieur de plusieurs générations d'étoiles par des réactions thermonucléaires.

Dans ce sens nous sommes donc tous "poussière d'étoile".

Les astronomes ont constaté que les abondances relatives des éléments chimiques naturels sont à peu près les mêmes partout dans l'Univers. Cette composition "universelle" est :

Hydrogène	73,9 %
Hélium	24 %
Oxygène	10,7 %
Carbone	4,6 %
Néon	1,34 %
Fer	1,09 %
Azote	0,95 %
Silicium	0,65 %
Magnesium	0,58 %
Soufre	0,44 %
Tous autres	0,65 %

Les abondances sur Terre et sur les autres planètes sont différentes, car ces corps sont formés avec les éléments les plus lourds, les autres s'ayant évaporé depuis. Le tableau de [Mendeleïev](#) regroupe tous les éléments connus selon leur poids atomique, du plus léger, l'hydrogène, jusqu'au plus lourd existant naturellement, l'uranium.

Le tableau des éléments chimiques

Tableau périodique des éléments

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	** Actinides	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Métaux alcalins

Métaux alcalino-terreux

Lanthanides

Actinides

Métaux de transition

Métaux pauvres

Métalloïdes

Non-métaux

Halogènes

Gaz rares

Dans des conditions normales de pression et de température :

- Les éléments dont le numéro atomique est **rouge** sont gazeux ;
- Les éléments dont le numéro atomique est **bleu** sont liquides (il n'y en a que deux : le brome et le mercure);
- Les éléments dont le numéro atomique est **noir** sont solides.

Dans la nature :

- Les éléments avec une bordure continue grise peuvent être trouvés naturellement sur Terre, sous la forme d'un ou plusieurs isotopes stables.
- Les éléments avec une bordure en tirets fins noirs apparaissent naturellement lors de la désintégration d'autres éléments chimiques, mais n'ont pas d'isotopes plus anciens que la Terre.
- Les éléments avec une bordure en pointillés fins bleus sont artificiels (éléments synthétiques).
- Les éléments sans bordure n'ont pas encore été découverts.

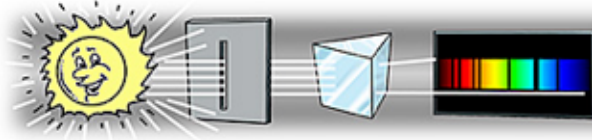
(Illustration : [Wikipedia](#))

L'astrophysique et les spectrographes

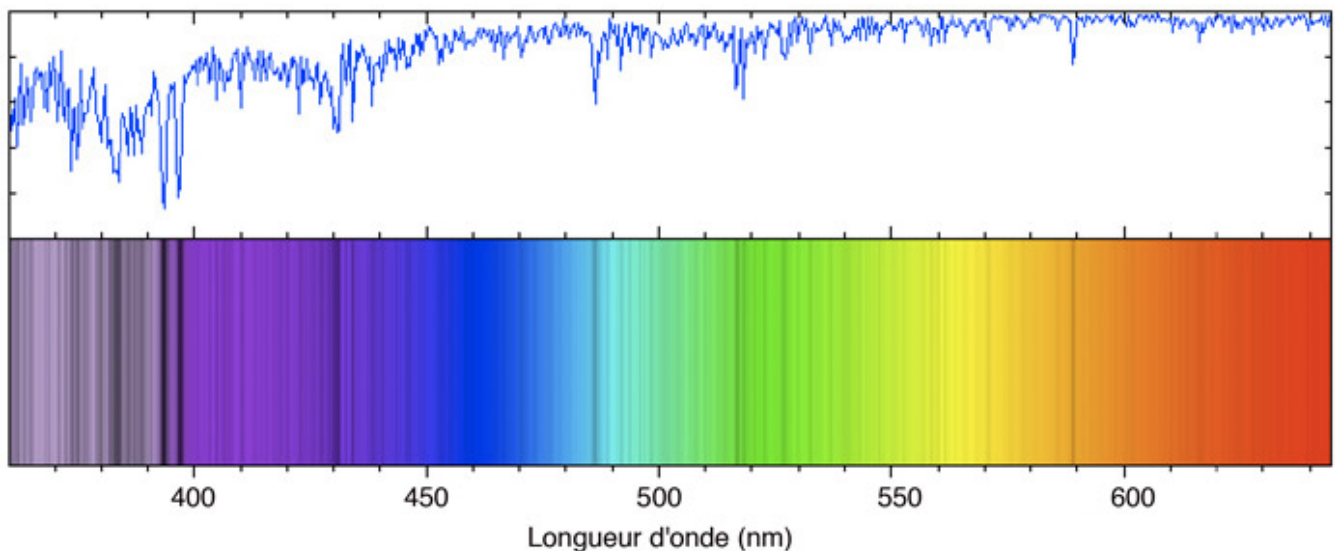
- L'Observatoire de Haute Provence a été créé en 1937 pour développer l'astrophysique en France.
 - On a installé des télescopes et construit des **spectrographes** (appareils qui permettent la dispersion de la lumière), dont quelques uns sont présentés [ailleurs](#).
 - Le spectre d'une étoile montre un grand nombre de couleurs manquantes : ces sont les raies d'absorption.
-

C'est quoi un spectrographe ?

C'est un instrument d'optique qui disperse les différentes couleurs de la lumière d'un astre, puis les enregistre. Chaque couleur est identifiée alors par sa longueur d'onde.



Dans un spectrographe, on dispose en entrée une fente très étroite pour que la pureté du spectre soit la meilleure. Les raies d'absorption sont alors les plus nettes possibles. [Comment disperse-t-on un spectre ?](#)



Voici le spectre de la lumière du Soleil montré à la fois comme une image colorée et aussi comme une courbe qui trace l'intensité du spectre en fonction de la longueur d'onde. (On mesure les longueurs d'onde en nanomètres : un nanomètre (*nm*) est un milliardième de mètre). Ces courbes, sous forme de fichiers informatiques, sont utilisées par les astronomes pour analyser en détail la lumière des étoiles.

Comment créer un spectre ?

Par réfraction, avec un prisme

Les premiers spectrographes utilisaient des prismes de verre pour disperser (séparer) les différentes couleurs présentes dans la lumière blanche.

On utilise ici le principe de la réfraction (comme dans les gouttes de pluie), qui dit que la vitesse de propagation de la lumière est plus lente dans un milieu que dans le vide. Et cette vitesse varie directement avec la longueur d'onde de la lumière. La lumière bleue voyage plus lentement dans le verre que la lumière rouge et elle est donc plus fortement déviée.

Le principal inconvénient d'un prisme est que la dispersion varie directement avec la longueur d'onde et les spectres sont comprimés dans le rouge par rapport au bleu. Et cette compression varie comme le cube de la longueur d'onde.

Par diffraction, avec un réseau

C'est seulement après la 2^{ème} guerre mondiale que les premiers bons réseaux à diffraction ont été commercialement disponibles en France.

Ces réseaux sont des blocs de verre d'une dizaine de centimètres de long dans lesquels on a gravé à la machine un très grand nombre de fines rayures toutes parallèles. On a couramment entre 300 et 1200 traits par millimètre.

Quand un réseau est illuminé, le principe de diffraction dit que ces rayures agiront toutes comme des sources indépendantes, et il y aura interférence entre la lumière émise par ces sources. Dans certaines directions l'interférence sera constructive et la lumière sera renvoyée par le réseau dans ces directions et dans d'autres l'interférence sera destructive et il n'y aura pas de lumière renvoyée. La lumière est donc renvoyée dans des directions préférentielles : on les appelle les ordres. Ce phénomène d'interférence variant avec la longueur d'onde, la lumière sera donc dispersée à l'intérieur d'un ordre.

Le principal avantage des réseaux est que la dispersion est constante dans un ordre, mais augmente d'un ordre au suivant. On sait aussi diriger la lumière diffractée préférentiellement dans un ordre donné en donnant une forme spéciale aux rayures. On dit alors que le réseau est blazé pour cet ordre.

Que dit cette lumière ?

L'analyse des *raies d'absorption* dans le spectre d'une étoile nous renseigne sur l'étoile elle-même et son environnement :

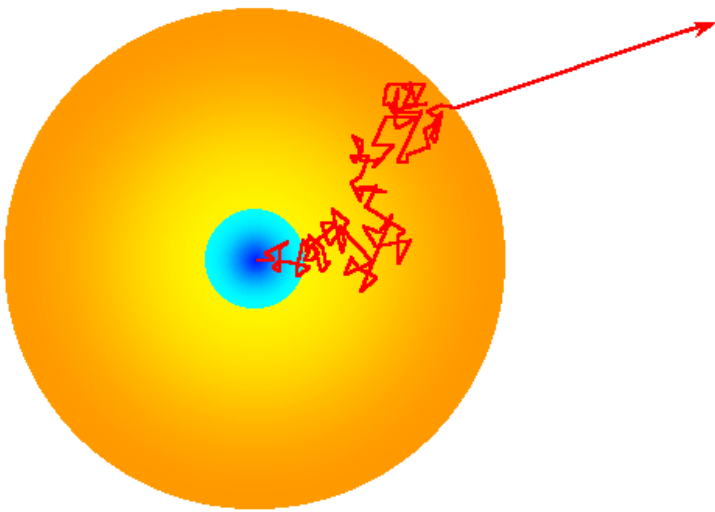
- la température de sa surface
- la taille et la distance de l'étoile
- sa vitesse relative à nous
- la composition chimique de son atmosphère
- sa rotation sur elle-même
- son champ magnétique
- de la matière interstellaire sur la ligne de visée

Si l'on arrive à bien comprendre le *message codé* d'un spectre, son étude permet donc de presque tout savoir sur une étoile !

Le rayonnement d'une étoile

Une étoile, comme notre Soleil, est une gigantesque boule de gaz (100 fois la taille de la Terre), dont le coeur, porté à des températures d'une dizaine de millions de degrés par le poids de l'étoile elle-même, est le site de réactions de **fusion thermonucléaire**.

La pression au centre du Soleil est environ de deux cents milliards de fois la pression sur Terre au niveau de la mer, ce qui l'empêche ainsi de s'effondrer sous son propre poids (on appelle cela l'équilibre hydrostatique). Ces réactions, en convertissant l'hydrogène en hélium, produisent de l'énergie sous forme de rayons gamma (photons très énergétiques) qui diffusent très lentement vers l'extérieur.



Cette énergie finit par sortir de l'étoile (en un million d'années environ) sous forme de rayonnement visible que l'on perçoit avec nos yeux.

La surface de l'étoile, la **photosphère**, a une température qui peut varier entre 1700° pour les plus froides et 40000° pour les plus chaudes.

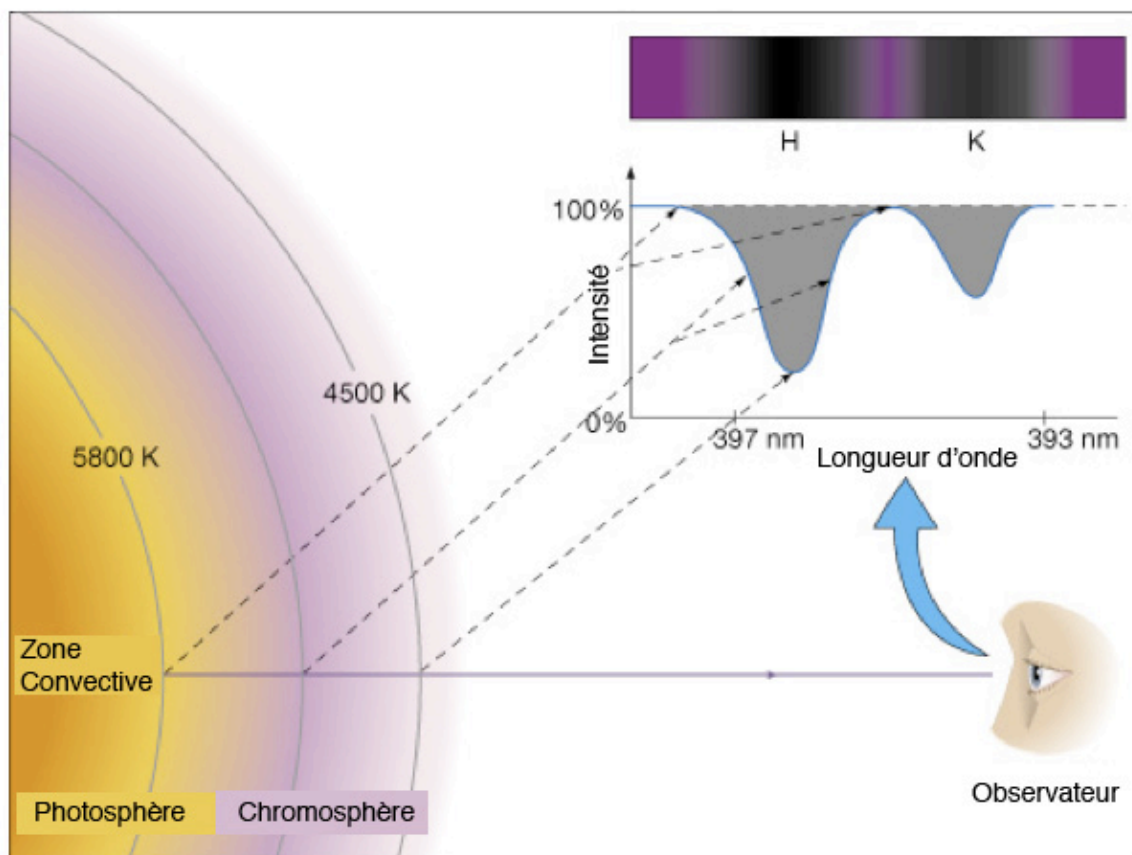
Le spectre émis à la base de la photosphère est celui d'un corps noir.

Un corps noir ?

Un corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit. Dans ces conditions, le flux réfléchi est nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis. Tous les corps noirs de même température possèdent la même luminance. Le corps noir est le corps qui, pour une température quelconque, émet le plus d'énergie.

La théorie de la physique quantique, développée en 1900 par Max Planck (1858-1947) pour décrire correctement le rayonnement d'un corps noir, dit que la matière ne peut absorber ou émettre des ondes électromagnétiques que par petits "paquets," appelés quanta, caractérisés par leur énergie ou longueur d'onde.

Les raies d'absorption sont produites dans les couches externes

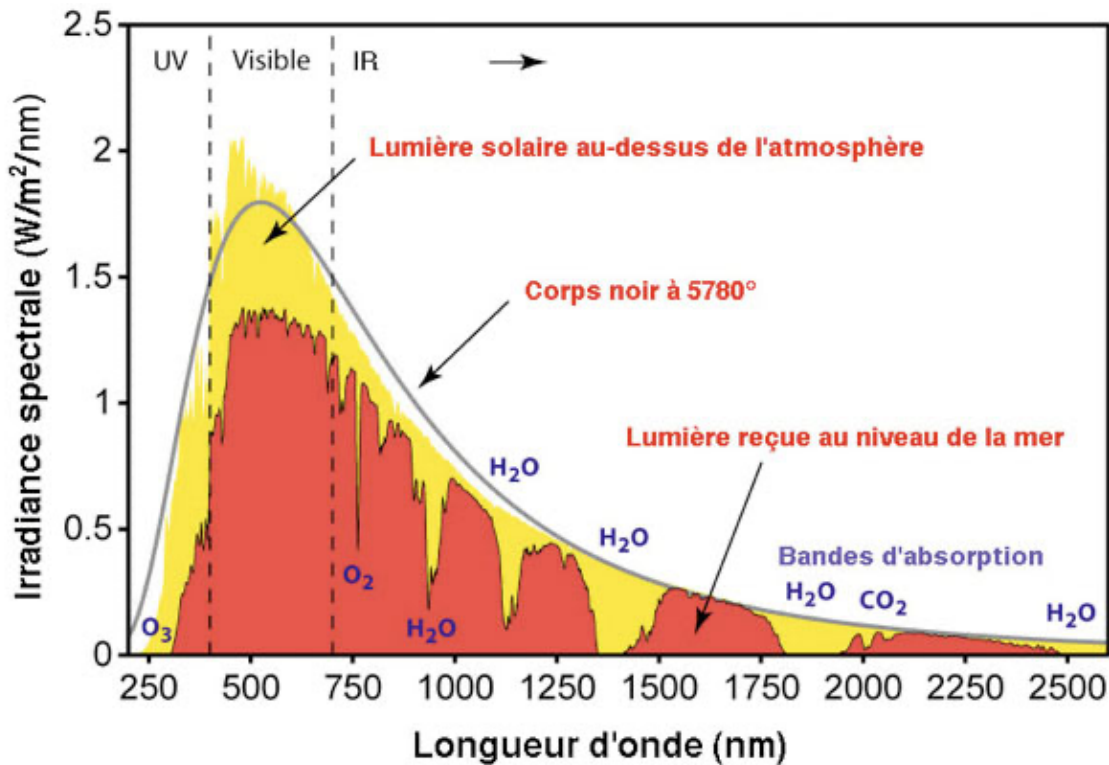


La température décroît rapidement dès que l'on s'éloigne de la base de la **photosphère**.

Les couches les plus externes de l'étoile, son atmosphère, sont plus froides, et absorbent donc une certaine partie de cette énergie sous la forme de raies d'absorption (Loi de Kirchhoff).

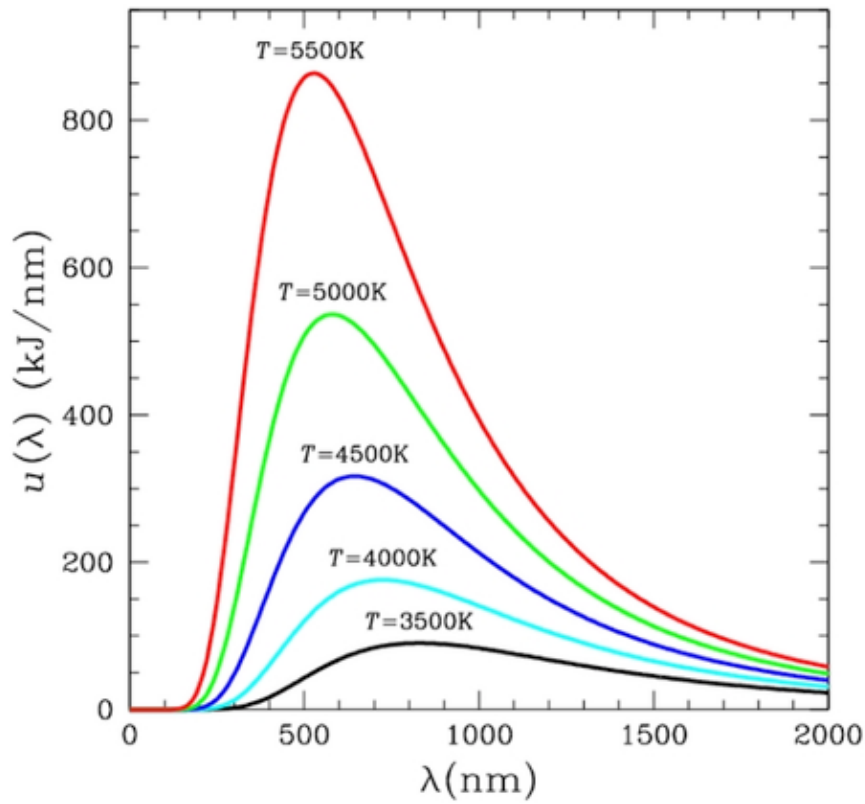
Un *nm* (nanomètre) est un milliardième de mètre.

La lumière du Soleil filtrée par l'atmosphère terrestre



On voit ici la courbe d'un corps noir ayant la température effective de la photosphère solaire, 5780° (courbe continue noire), comparée au **spectre solaire au-dessus de l'atmosphère** (en jaune) et à la partie qui arrive au niveau de la mer (en rouge), après absorption par l'atmosphère terrestre, essentiellement par de la vapeur d'eau. (Image tirée de [Wikipedia](#))

Plus une étoile est chaude plus elle est bleue



Ces graphiques illustrent la loi de Wien qui dit que la longueur d'onde du maximum du rayonnement d'un corps noir diminue quand la température augmente. Les étoiles froides apparaîtront donc plutôt rouges et les étoiles chaudes plutôt bleues.

[En savoir plus sur l'histoire](#)

L'histoire de la spectroscopie

L'anglais Isaac Newton (1642-1726), en faisant passer la lumière solaire à travers un prisme de verre, montre en 1666 que la lumière blanche est composée de couleurs élémentaires, chaque couleur étant déviée d'une quantité différente. C'est le phénomène de la réfraction.

L'anglais William Herschel (1738-1822), d'origine allemande, montre en 1800 l'existence d'un rayonnement au delà du rouge, découvrant ainsi l'existence des infra-rouges.

L'allemand R.W.Ritter (1776-1810) découvre l'existence du rayonnement ultra-violet par une méthode qui a précédé de 38 ans la découverte de la photographie avec des sels d'argent par le français Louis Jacques Daguerre.

L'anglais Thomas Young (1773-1829) met en évidence l'aspect ondulatoire de la lumière et mesure le premier avec précision les longueurs d'onde avec un réseau de diffraction. Chaque couleur pure est caractérisée par sa longueur d'onde propre.

Newton avait toujours été réticent à une interprétation ondulatoire de la lumière, préférant penser en termes de "corpuscules." En vérité, la lumière est un rayonnement électromagnétique qui présente à la fois des caractéristiques d'onde et de particules (sans masse, appelés les photons).

L'anglais William Wollaston (1766-1828) découvre en 1802 la présence de raies d'absorption dans le spectre solaire.

L'allemand Joseph Fraunhofer (1787-1826) observe, décrit et dessine en 1814 le spectre du Soleil. Il fut le premier à étudier en 1823 le spectre des planètes et des étoiles les plus brillantes. Il constate qu'une raie double dans le spectre du Soleil correspond exactement à celle observée dans le spectre d'une flamme (c'est le Sodium). Plus tard il décrit 350 autres raies, dont bon nombre sont dues au Fer.

L'allemand Gustav Kirchhoff (1824-1887) avec l'aide de Robert Bunsen (1811-1899) découvre les lois du rayonnement qui portent son nom.

Les anglais John Herschel (1792-1871) et W.Fox Talbot (1800-1877) suggèrent pour la première fois d'utiliser la spectroscopie pour l'analyse chimique des substances.

J. Herschel et les français Hippolyte Fizeau (1819-1896) et Léon Foucault (1819-1868) étudient le spectre infrarouge du Soleil.

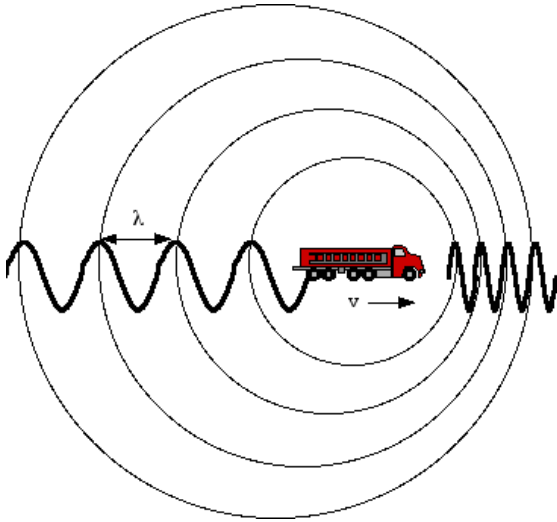
En 1842, le français Edmond Becquerel (1820-1891) fut le premier à photographier le spectre solaire en utilisant la découverte de Daguerre de 1839.

Un élément chimique inconnu jusqu'alors fut identifié dans le spectre du Soleil en 1868 par nombreux astronomes lors d'une éclipse de Soleil. Mais l'anglais Sir Normal Lockyer (1836-1920) pu déterminer en 1868 la longueur d'onde exacte de cette raie à 5876Å. Cet élément fut alors nommé "hélium." Ce gaz ne fut identifié sur Terre qu'en 1895.

Comment mesurer la vitesse d'une étoile ?

- Quand un objet se déplace par rapport à nous, on peut mesurer sa vitesse dans la ligne de visée avec l'aide d'un appareil.
 - Dans le cas d'une voiture sur la route, le radar envoie une onde radio et mesure la longueur d'onde de l'écho en provenance de la voiture. Ceci donne la vitesse.
 - Dans le cas d'une étoile, on utilise un spectrographe et on mesure les longueurs d'onde des raies d'absorption. Ceci donne aussi la vitesse.
 - Dans le deux cas on utilise le même principe, **l'effet Doppler-Fizeau**.
-

L'effet Doppler-Fizeau



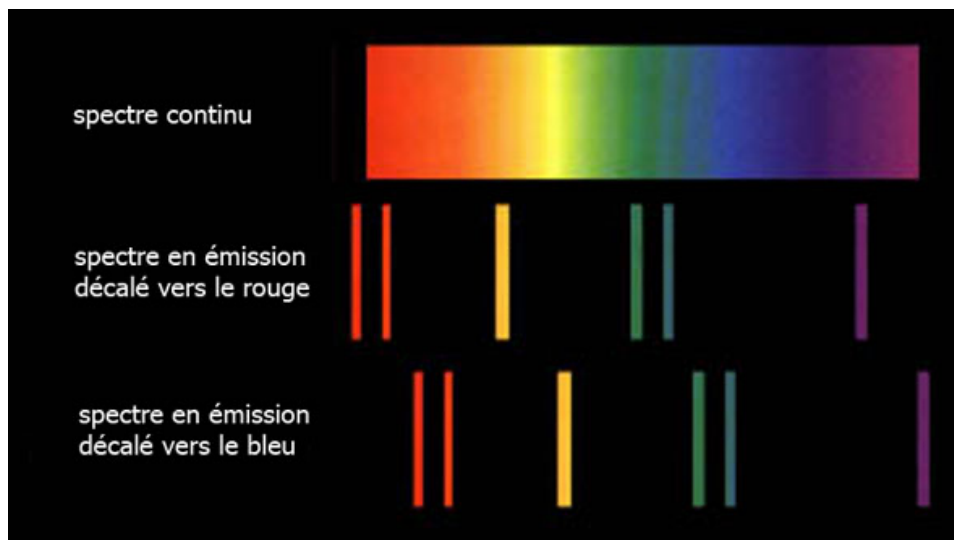
Les ondes lumineuses (ou sonores) émises par un corps en déplacement sont affectées par le mouvement de celui-ci par rapport à un observateur au repos.

L'intervalle séparant des ondes successives est plus petit dans la direction du mouvement et plus grand dans la direction opposée.

Vous entendez l'effet Doppler-Fizeau chaque fois qu'un véhicule pourvu d'une sirène (pompiers, ambulance) passe rapidement près de vous: en s'approchant, le son émis par le véhicule est plus aigu et en s'éloignant le son est plus grave.

Cet effet fut décrit par Christian Doppler (en 1842) et Hyppolite Fizeau (en 1848).

[En savoir plus sur l'histoire...](#)



Pour une étoile qui se déplace par rapport à un observateur sur la Terre, le phénomène est analogue, mais il s'agit d'ondes lumineuses. La lumière est plus **bleue** si l'étoile *approche* et plus **rouge** si l'étoile *s'éloigne*.

Histoire de l'effet Doppler-Fizeau

En 1842, l'autrichien Christian Doppler (1803-1853) montre que la fréquence d'une oscillation (son, lumière) change quand la source ou l'observateur sont en mouvement. Il essaye ensuite, sans succès, d'appliquer son principe pour expliquer les différentes couleurs des étoiles et, en particulier, la différence de couleur de certaines étoiles doubles. Ceci en effet aurait supposé que les étoiles auraient eu des vitesses proches de celle de la lumière !

En 1845 l'hollandais C.H.Buys-Ballot (1817-1890) démontre la validité du principe de Doppler pour les ondes sonores en constatant le changement de ton entendu quand des musiciens jouant des instruments à vent, embarqués sur un train sur la ligne Utrecht-Amsterdam, s'approchent et puis s'éloignent de la gare.

En 1848, le français Hippolyte Fizeau (1819-1896) développe le même principe de manière indépendante, mais montre que dans le cas de la lumière la couleur ne change pas. Ce sont les positions de raies spectrales qui changent. Un autre autrichien, Ernst Mach (1836-1916), ignorant le travail de Fizeau, arriva en 1860 aux mêmes conclusions.

L'italien Angelo Secchi (1818-1878) et l'anglais William Huggins (1829-1910) tentent les premiers de mesurer visuellement le décalage en longueur d'onde dans le spectre d'une étoile prédit par le principe de Doppler. Huggins annonce en 1871 avoir pu enfin mesurer la vitesse de Sirius, l'étoile très brillante dans la constellation du Grand Chien.

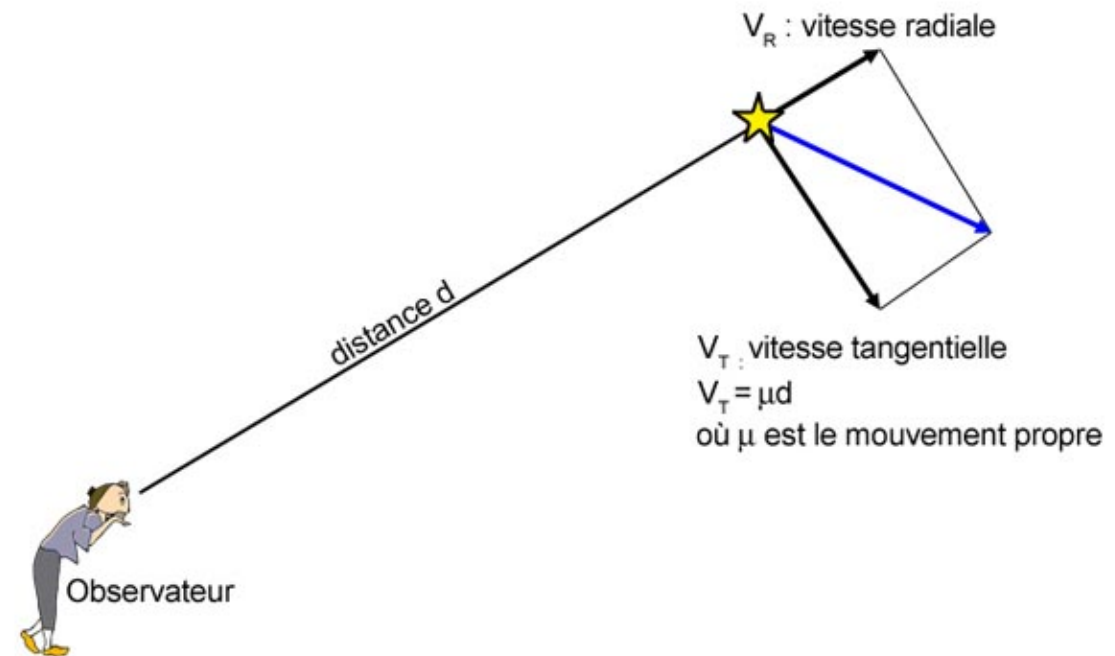
En 1887 l'allemand H.C.Vogel (1841-1907) est le premier à faire cette détermination en photographiant le spectre de Sirius. C'est un énorme progrès dans la précision des mesures, qui passent de ± 22 km/s, pour la moyenne des mesures visuelles d'une nuit entière, à ± 2.6 km/s pour une observation photographique.

Vitesse Radiale

Lorsqu'on mesure la vitesse d'une étoile on ne mesure que la composante de sa vitesse spatiale *projetée sur la ligne de visée*. On appelle cette vitesse la vitesse radiale.

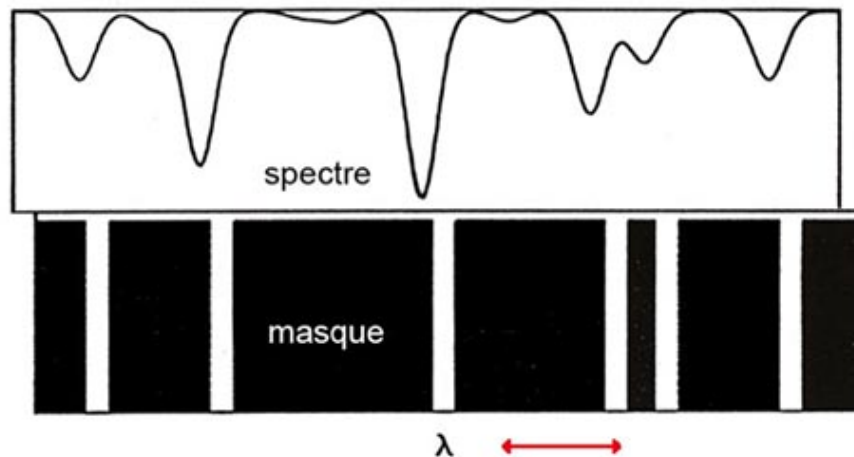
La détermination de la vitesse radiale d'une étoile se fait en deux temps :

- D'abord on prend le spectre d'une source de référence (une lampe au Thorium interne au spectrographe) qui donne la correction instrumentale à apporter pour que la vitesse mesurée de la lampe soit zéro !!
- Ensuite on prend le spectre de l'étoile et on lui applique la correction déduite de la lampe à Thorium puis une correction calculée pour tenir compte du mouvement annuel de la Terre autour du Soleil et aussi de la rotation diurne de la Terre autour d'elle-même.



Vitesse par corrélation

La mesure précise de la vitesse radiale est obtenue par **corrélation**. Cela consiste à comparer le **spectre** de l'étoile avec un spectre synthétique dont seules les raies d'absorption les plus fines ont été sélectionnées. On appelle **masque** ce spectre synthétique qui comporte plus de 3000 trous très fins.

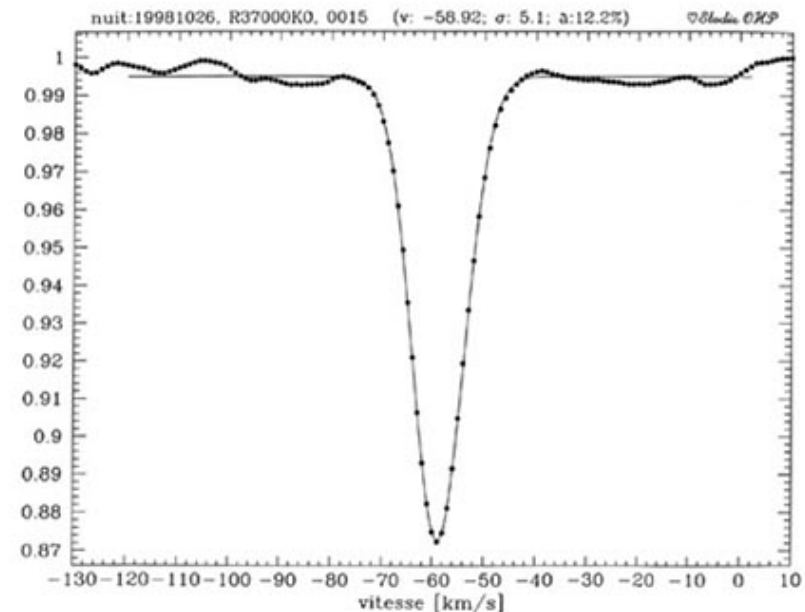


Ci-dessus, seule une toute petite partie du **spectre** d'une étoile est illustrée avec la partie correspondante du **masque** utilisé.

La corrélation consiste à déplacer numériquement en longueur d'onde le **masque** jusqu'à ce que les trous coïncident exactement avec les raies du **spectre**.

A chaque nouvelle position en vitesse du masque, l'ordinateur calcule la lumière de l'étoile passant par tous les trous. Quand ils seront exactement en face des raies de l'étoile, la lumière traversant le masque sera minimale.

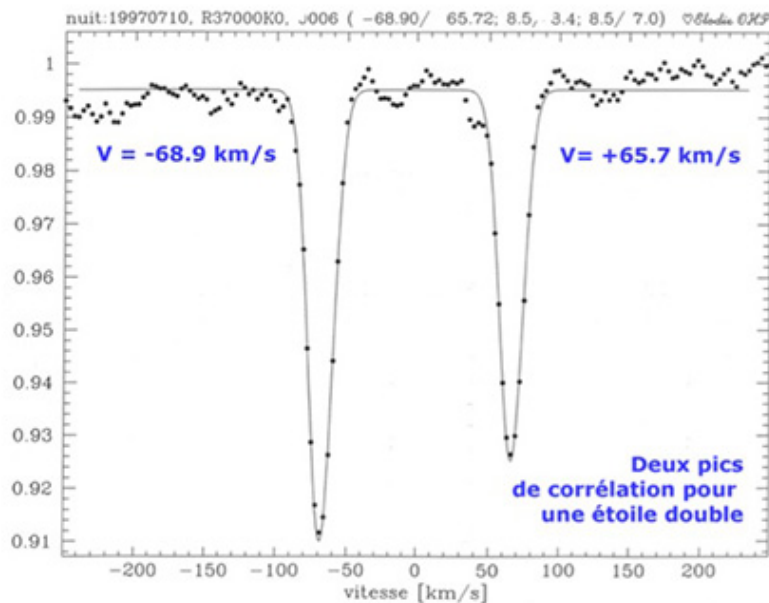
On construit ainsi ce qu'on appelle la **fonction de corrélation**.



Comme le déplacement systématique du masque par rapport au spectre revient à balayer les raies de l'étoile avec un peigne fin, la fonction de corrélation représente donc le **profil typique d'une raie d'absorption** dans le spectre de l'étoile.

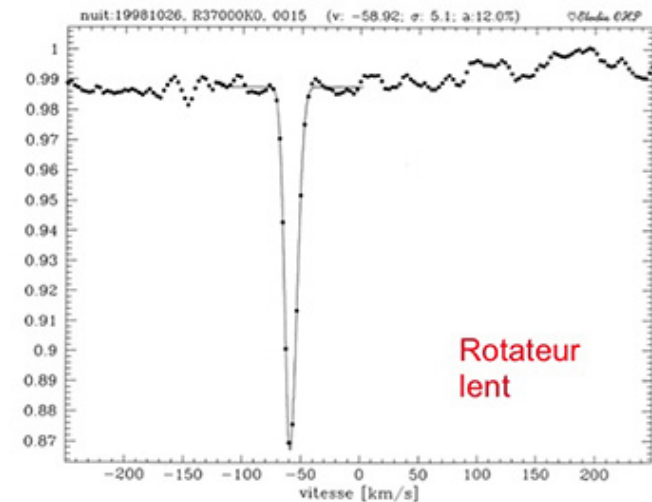
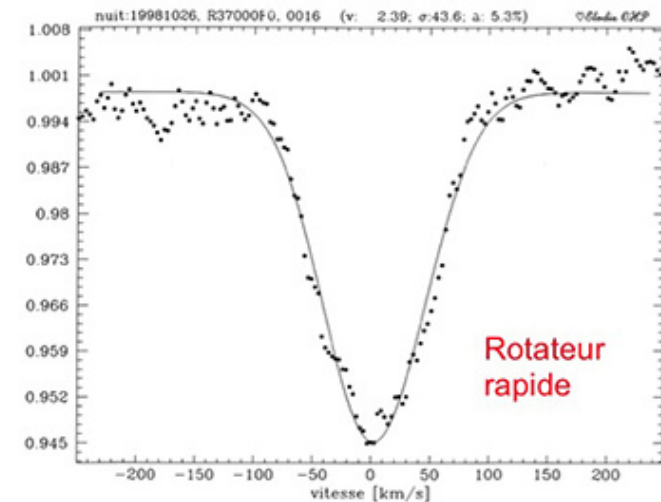
A quoi sert la fonction de corrélation ?

- Elle donne d'abord la vitesse radiale de l'étoile (le **centre** du pic). Si l'étoile est double, un deuxième pic apparaît (comme ci-dessous). Si les deux étoiles sont réellement associées, elles tournent l'une autour de l'autre et les vitesses vont varier périodiquement.



- Elle peut donner aussi des indications sur l'abondance de certains éléments chimiques (la **surface** du pic).

- Elle donne aussi une mesure de la vitesse de rotation de l'étoile autour d'elle-même (la **largeur** du pic). Voici deux extrêmes : une étoile qui tourne sur elle-même rapidement (en haut) et une qui tourne lentement (en bas).



Les vitesses en Astronomie

On exprime les vitesses des astres couramment en kilomètres par seconde (km/s).

La vitesse de la lumière (limite absolue de vitesse imposée par la Théorie de la Relativité) est $c = 299793 \text{ km/s}$

1 km/s équivaut à 3600 km/h

Voici quelques vitesses astronomiques typiques :

- La Lune sur son orbite = 1 km/s
- La Terre sur son orbite = 29.8 km/s
- Le Soleil par rapport aux étoiles proches = 20 km/s
- Rotation de la Galaxie au voisinage du soleil = 215 km/s

Les vitesses que l'on mesure avec ELODIE sont de l'ordre de quelques dizaines de **mètres par seconde**. (1 m/s équivaut à 3.6 km/h soit la vitesse d'un marcheur)

L'étoile la plus "véloce" connue

L'étoile SDSS J090745.0+24507, dont la vitesse radiale est de **+853 km/s**, est l'étoile la plus "véloce" connue dans notre Galaxie, et dépasse de loin celle de G233-27 (-583 km/s)

Cette étoile a été découverte en 2005 lors d'une étude systématique du ciel (Sloan Sky Survey) et sa vitesse par rapport au centre de notre Galaxie ($+709 \text{ km/s}$) implique qu'elle va la quitter tôt ou tard

