

# DOSSIER : LA SPECTROGRAPHIE

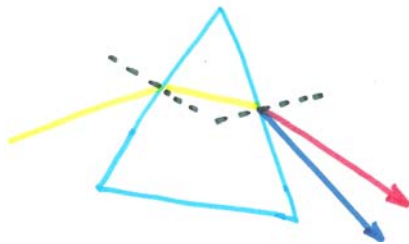
Georges Paturel, Observatoire de Lyon

**Résumé :** La décomposition de la lumière peut être réalisée selon deux processus physiques : utilisation du changement d'indice de réfraction avec la longueur d'onde (c'est le cas du prisme), diffraction par un système optique (c'est le cas du réseau).

## Spectrographes à prisme

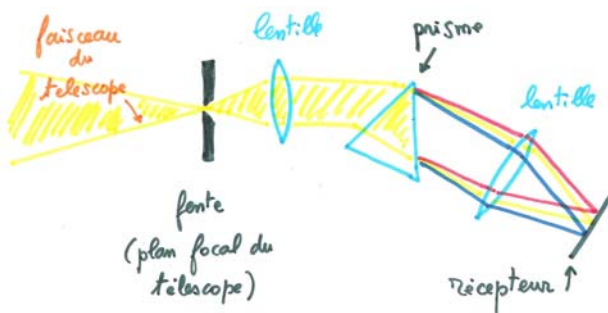
C'est le spectrographe le plus ancien. Il n'est plus guère utilisé en astronomie professionnelle. Deux méthodes sont possibles : avec ou sans fente d'entrée.

Un rayon lumineux entrant dans un prisme en ressort dans une direction différente, à cause des réfractions, en entrée et en sortie. L'indice de réfraction diminue quand la longueur d'onde augmente. Or la déviation augmente avec l'indice. Donc la déviation décroît avec la longueur d'onde. Un rayon rouge est moins dévié qu'un rayon bleu.



Les grandes longueurs d'onde sont moins déviées

En spectrographie, un prisme doit être utilisé en faisceau parallèle. Il faut donc effectuer le montage optique suivant :



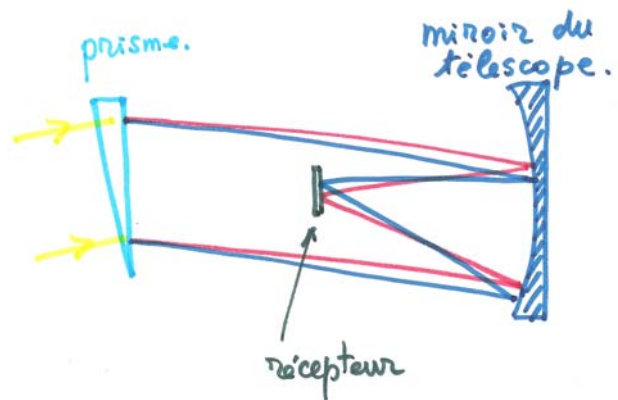
Un spectro travaille en faisceau parallèle.

La fente d'entrée doit être très fine. Elle est placée au foyer du télescope. L'image de l'astre dont on veut le spectre se forme donc sur la fente. De ce fait, le spectre ne sera obtenu que pour la partie de l'astre en regard de la fente. Nous reviendrons sur ce point qui est important à comprendre. La première lentille donne du faisceau incident un faisceau

parallèle. La fente d'entrée est donc placée à son foyer. La seconde lentille reforme, sur le récepteur, les images de la fente aux différentes longueurs d'onde. Le récepteur est donc placé au foyer de cette deuxième lentille.

Les spectrographes à prismes ont plusieurs défauts : Le plus gênant est que la dispersion ne varie pas linéairement avec la longueur d'onde. Si on trace la longueur d'onde en fonction de la position mesurée sur le récepteur, la courbe n'est pas linéaire. De plus, la lumière doit traverser une grande épaisseur de verre, ce qui rend les prismes coûteux quand ils doivent être réalisés en quartz pour laisser passer l'ultraviolet.

On a longtemps utilisé les prismes, sans fente, directement à l'entrée du tube du télescope. C'était la technique des prismes objectifs développée par Charles Fehrenbach. Il était possible ainsi de réaliser, en une seule pose, un grand nombre de petits spectres de faible dispersion. Chaque étoile du champ donnait un spectre. C'était très utile pour mesurer par exemple les vitesses radiales de toutes les étoiles d'un champ, ou pour détecter les objets particuliers (à raie d'émission par exemple).

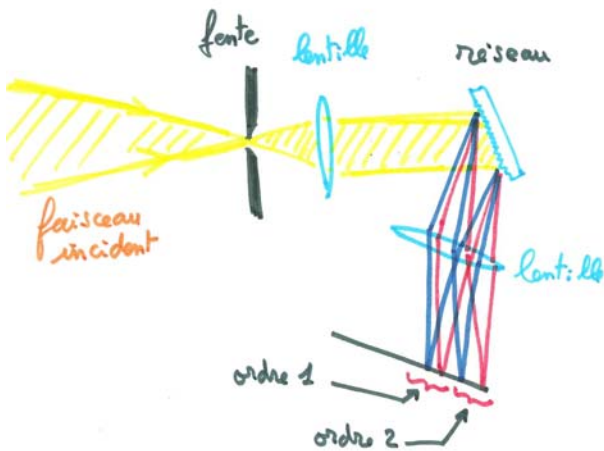


Le prisme objectif : une technique efficace.

En revanche, pour les objets étendus, comme les galaxies, le prisme objectif n'était pas utilisable car il y avait en chaque point du récepteur un mélange des spectres donnés par les différents points de l'image. Le prisme objectif a été complètement supplanté par les spectrographes à fibres, dont nous parlerons plus loin.

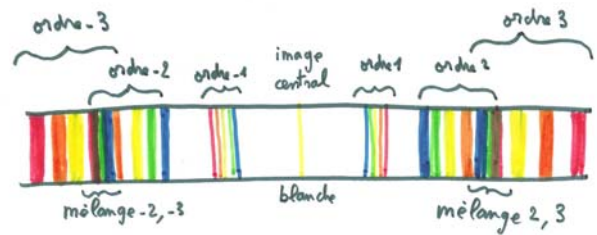
## Spectrographes à réseau

C'est le spectrographe moderne. Il est universellement utilisé en astronomie. C'est une plaque de verre sur laquelle on a effectué un très grand nombre de stries parallèles (par exemple, 1500 traits par millimètre). La diffraction par chacune des stries donne de part et d'autre de l'image centrale blanche, des images pour les différentes longueurs d'onde. En fait il y a plusieurs systèmes (on dit des ordres), de plus en plus dispersifs, qui se superposent. Les spectres aux premiers ordres sont peu dispersés mais bien séparés, aux ordres élevés, la dispersion est plus grande mais dans une direction donnée, plusieurs longueurs d'onde de différents ordres se superposent. En dehors de l'ordre utilisé, la lumière est perdue, ce qui peut conduire à un faible rendement. Cependant les nouveaux réseaux, par une forme adaptée des traits de diffraction, permettent de concentrer la lumière pour une longueur d'onde particulière dans un ordre particulier. Les pertes sont ainsi réduites. On dit que le réseau est "blazé" autour d'une longueur d'onde donnée.



*Un spectro à réseau donne plusieurs spectres "d'ordre" différents*

Les réseaux s'utilisent, comme les prismes, en faisceau parallèle, mais on peut les utiliser en transmission ou en réflexion. La réflexion a l'avantage de ne pas modifier la distribution spectrale de la source (pas plus qu'une réflexion sur un miroir de télescope). La dispersion est bien plus linéaire que pour le prisme. Mais aux ordres élevés, il y a un mélange des longueurs d'onde de différents ordres.



*Les ordres élevés sont plus dispersés, mais ils se mélangent avec les ordres voisins.*

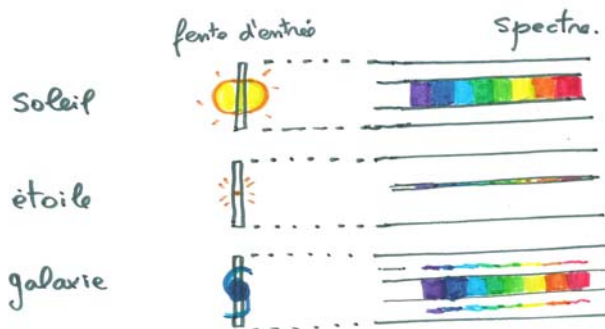


### Aspect d'un spectre pour un spectro à fente.

Nous l'avons dit plus haut, il est important de savoir quelle partie de l'astre a été "spectrographiée" avec un spectro à fente. Nous avons vu que l'image de l'objet se forme sur la fente d'entrée du spectrographe.

Si l'objet est étendu, comme le Soleil, toute la surface de la fente est éclairée. Evidemment, se sont des parties différentes du Soleil qui donnent les différentes lignes du spectre. Mais chaque longueur d'onde est bien représentée sur toute la largeur du spectre. En revanche, si l'objet est quasiment ponctuel, comme une étoile, seule une toute petite partie de la fente est éclairée. Le spectre ne montre qu'une étroite bande éclairée. Autrefois, quand les récepteurs étaient des plaques photographiques, il était important de bien voir toute la largeur du spectre pour bien y discerner les raies spectrales. Aussi, l'astronome devait-il déplacer lentement et régulièrement l'étoile le long de la fente d'entrée, pendant toute la durée de la pose. L'inconvénient était que la lumière était diluée. Aujourd'hui ceci n'est plus nécessaire. Les récepteurs peuvent enregistrer un spectre sur quelques rangées de pixels seulement.

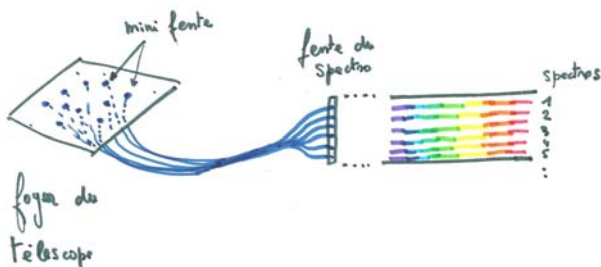
La représentation graphique ci-dessous illustre différents cas de figures.



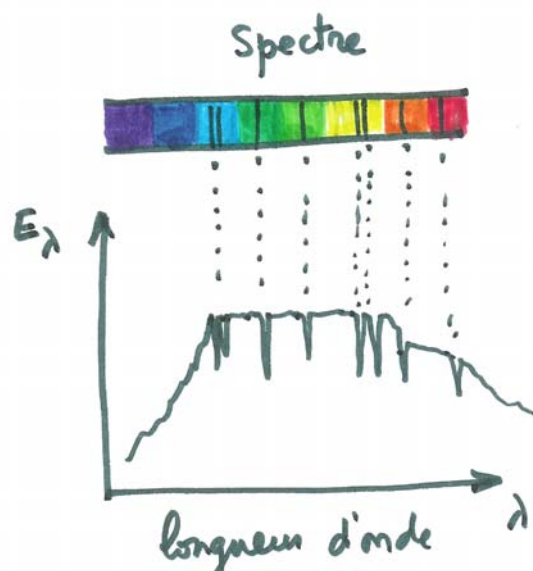
Un spectro ne fournit un spectre que pour les régions de l'objet qui sont projetées sur la fente d'entrée : par exemple un diamètre du Soleil, une étoile ponctuelle, des régions différentes d'une galaxie (centre et morceaux de bras).

### Les spectrographes à fibres.

Les spectrographes classiques ne sont pas très efficaces. Par exemple, pour les galaxies lointaines, il fallait compter deux heures de pose pour faire un spectre. Pour mesurer les vitesses de centaines de milliers de galaxies, il aurait fallu un temps énorme. Depuis les années 1990 une nouvelle technique a vu le jour qui permet de multiplier l'efficacité par 100 ou 200. Le principe consiste à placer non pas une fente au foyer du télescope mais une multitude de petites fentes (entre 100 et 200) sur les images de chaque objet, préalablement repéré. Un faisceau de fibres optiques conduit la lumière de chaque mini fente à l'entrée de la fente principale du spectro. Les 100 ou 200 galaxies sont enregistrées en une seule pose. Le schéma ci-dessous illustre le fonctionnement d'un tel spectro. Le télescope de Schmidt de Siding Spring en Australie a été l'un des premiers à fonctionner sur ce principe. Chaque mini fente devait être collée à la main à l'emplacement exact défini par une photo. Aujourd'hui, un robot fait automatiquement ce travail à partir des coordonnées des objets à mesurer. A la fin de la pose, les spectres sortent automatiquement sous forme graphique pour être exploités directement à l'ordinateur.



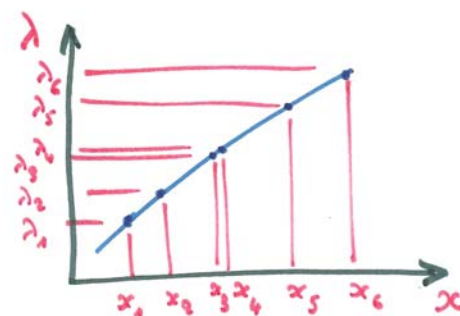
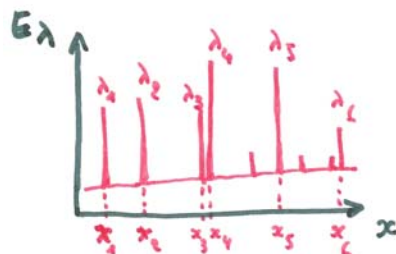
Spectrographe à fibres : en une pose des centaines de spectres obtenus pour des objets différents.



Un spectre graphique : plus facile à exploiter par informatique.

### Calibration des longueurs d'onde.

Quand on a obtenu un spectre informatique, comme celui figuré ci-dessus, il est assez facile d'obtenir les longueurs d'onde précises des raies spectrales et de déduire par exemple la vitesse radiale de l'objet de la relation Doppler-Fizeau. Il y a une étape cependant qui est fondamentale, c'est la calibration en longueur d'onde.



Le spectre de raies d'émission d'une lampe spectrale (en haut) permet de produire la correspondance entre positions  $x$  et longueurs d'onde.

En effet, le récepteur nous donne le flux monochromatique  $E_\lambda$  pour chaque position de



l'abscisse  $x$ . Mais nous voulons graduer ces abscisses en longueur d'onde. Le principe est simple : sans rien changer au spectrographe, on enregistre un spectre donnant des raies spectrales bien connues, à l'aide d'une lampe (par exemple avec une lampe à vapeur de mercure ou autre). Sur le récepteur, on a ainsi une série de raies spectrales dont on connaît parfaitement les longueurs d'onde.

Il suffit de tracer la relation : longueur d'onde - position sur le récepteur. Ensuite, par une méthode numérique simple d'interpolation, on saura faire correspondre à n'importe quelle position  $x$ , une longueur d'onde bien déterminée.

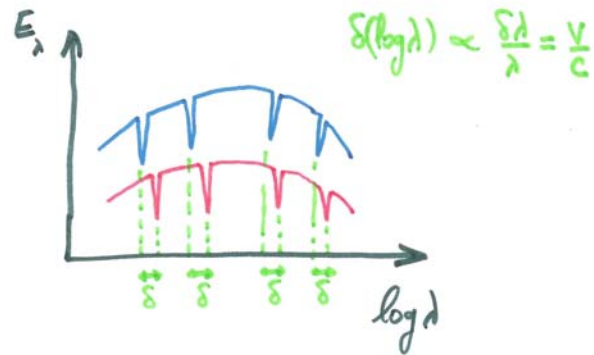
## La méthode par corrélation

Nous supposons que nous avons un spectre, bien calibré, donnant  $E_\lambda$  en fonction de la longueur d'onde. Comment mesurer une vitesse radiale ? La méthode la plus naïve consiste à mesurer la longueur d'onde d'une raie bien reconnue (pas toujours facile !) et de comparer à la longueur d'onde tabulée en laboratoire. On obtient le décalage  $\Delta\lambda$ , qui, rapporté à la longueur d'onde tabulée donne le rapport de la vitesse cherchée à la vitesse de la lumière. C'est le fameux effet Doppler Fizeau dont nous parlions plus haut (voir la section correspondante). Pour augmenter la précision, nous pouvons recommencer avec une seconde raie, puis une troisième, etc. A ce petit jeu on a vite fait de se décourager.



Bien sûr, il existe une méthode pour traiter globalement le spectre, mais ce n'est pas simple. Nous allons expliquer brièvement. Quand la source lumineuse est animée d'une certaine vitesse, toutes les raies spectrales se décalent. En général, elles se décalent assez peu pour ne pas gêner leur identification (ça n'a pas toujours été le cas, par exemple pour les quasars : le décalage spectral était si grand que les astronomes ont eu du mal à identifier les raies connues). Mais le problème est que le décalage est fonction aussi de la longueur d'onde de la raie considérée. Il y a une façon élégante de faire que *le décalage devienne le même à toute les longueurs d'onde* : c'est de considérer le

spectre gradué, non pas en longueur d'onde mais en logarithme de longueur d'onde (voir l'encadré "propriétés de dérivation" dans le CC121, p15).



Vous voyez sur la figure ci-dessus, qu'il suffit de faire glisser un modèle de spectre (en bleu) semblable à celui étudié (en rouge) pour mesurer le décalage quand on a la meilleure coïncidence des deux. C'est la méthode par corrélation. De cette manière, toutes les raies spectrales sont prises en compte, d'un seul coup, même les plus petites. Sur ce principe, les astronomes ont pu réaliser les spectrographes les plus performants jamais construits : les spectrographes par corrélation.

## Spectrographes par corrélation

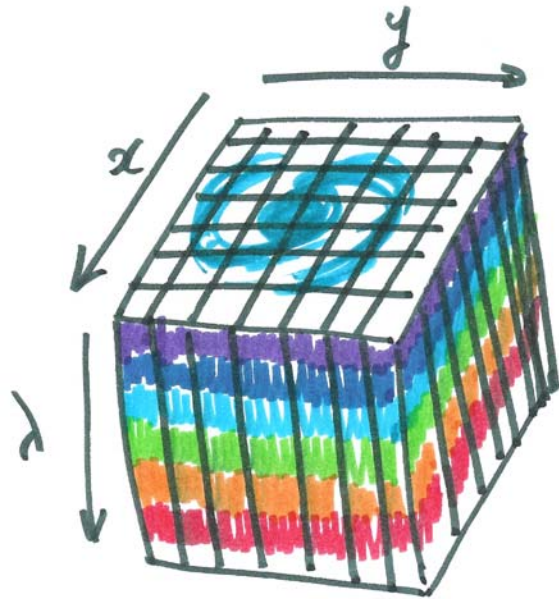
Dans les premiers spectrographes par corrélation, le spectre de référence était constitué d'un masque, obtenu par dépôt métallique sur verre, reproduisant au mieux toutes les raies spectrales des objets à étudier. On projetait le spectre sur ce masque et on enregistrait la lumière globale. En décalant le masque par rapport au spectre réel la quantité de lumière reçue variait. Quand la coïncidence du masque et du spectre était optimale (maximum ou minimum, selon que l'on avait avec un masque négatif ou positif), on enregistrait le décalage, pour en déduire automatiquement la vitesse radiale.

Cette méthode est utilisée maintenant avec des spectres décomposés en plusieurs morceaux, empilés les uns au-dessus des autres. On peut ainsi traiter un nombre considérable de raies et atteindre une précision extraordinaire (des vitesses mesurées à quelques mètres par seconde près). Les nouveaux spectrographes par corrélation effectuent une corrélation avec des masques numériques. Ils permettent d'exploiter d'un seul coup un très grand domaine spectral et un grand nombre d'ordres (jusqu'au 67<sup>e</sup> ordre entre 385 nm et 685 nm, pour le spectrographe ELODIE, celui la même qui a permis à M. Mayor et D. Queloz de mettre en évidence la première planète extrasolaire par la détection des mouvements de quelques dizaines de mètres par

seconde seulement, induits par la planète sur l'étoile centrale).

## Spectrographe intégral de champ

Il existe des spectrographes qui donnent un spectre pour chaque point du champ du télescope. On n'a plus un spectre unique mais un cube de données spectrales. Un tel résultat était déjà possible avec les interféromètres de Pérot-Fabry à balayage. L'emploi, par exemple, de trame de micro-lentilles a permis de réaliser de tels spectrographes plus facilement. Cette belle invention est due à l'astronome Georges Courtès. Le domaine d'emploi est plutôt réservé à la cinématique interne d'un objet étendu, comme une galaxie, car le champ est généralement peu étendu. Un tel instrument, du nom de MUSE, est en cours de développement pour les grands télescopes VLT de l'ESO.



# DOSSIER : La spectro... pourquoi pas ?

Jean-Noël Terry

**Résumé :** Avec le temps les techniques évoluent et ouvrent à l'amateur des portes interdites il y a 20 ans. Inutile de revenir sur l'arrivée des caméras CCD avec des capteurs performants et de taille satisfaisante. Il en est de même pour l'acquisition, le traitement et l'exploitation des spectres. Des passionnés ont débroussaillé le terrain et permettent à l'amateur de faire réellement de l'astrophysique. C'est toujours un sujet d'émerveillement que de voir évoluer au fil des jours des étoiles situées à quelques centaines d'années-lumière, ou de faire quelques mesures sur ces objets. C'est maintenant possible pour un investissement raisonnable en argent et en patience.

## Introduction

Le but de cet article est de présenter quelques possibilités d'un point de vue concret : acquisition des spectres, traitement, exploitation.

Et de montrer le champ qui s'ouvre devant nous et qu'il ne faut pas hésiter à explorer. Il y a bien sûr d'autres voies pour explorer la spectro, mais on ne parle bien que de ce qu'on connaît !

Je vais reprendre une idée proposée par Christian Buil dans une de ses présentations : regarder ou photographier l'amas des Pléiades. Comme sur la photo du télescope Hubble, nous voyons des étoiles jeunes et actives (Fig. 1).

Changeons de lunettes et observons-les à travers le spectroscopie (Fig. 2). Le spectre est centré sur la raie  $H_{\alpha}$  (656,3 nm) et les étoiles nous apparaissent très différentes.



Figure 1 : Le jeune amas des Pléiades

Chez certaines la raie est en absorption (Maia, Atlas, Taygeta), chez d'autres cette raie est en émission (pic), mais avec des allures différentes (Alcyone, Pleione, Merope, Electra).