

ARTICLE DE FOND - RÉALISATION

Spectroscopie astronomique à l'aide d'un spectromètre à fibre optique.

Vincent Boudon (Institut Carnot de Bourgogne – UMR 5209 CNRS - Université de Bourgogne et Société Astronomique de Bourgogne), Éric Chariot (Société Astronomique de Bourgogne).

L'utilisation d'un petit spectromètre à fibre optique commercial rend très aisée l'obtention de spectres d'étoiles, de planètes ou de nébuleuses à l'aide d'un télescope. Après quelques traitements analogues à ceux utilisés en astrophotographie, on obtient des courbes directement exploitables pour étudier la composition des astres.

Introduction

La spectroscopie, c'est-à-dire l'étude de la décomposition de la lumière par un élément dispersif (prisme, réseau de diffraction) et son exploitation pour l'étude de la température ou de la composition des astres (entre autres) est maintenant à la portée des astronomes amateurs et peut également s'avérer un outil très pédagogique auprès des élèves. L'un des auteurs de cet article (VB) a ainsi eu l'occasion de présenter le dispositif décrit ci-après à des collégiens et lycéens, ainsi que lors de la dernière assemblée générale du CLEA à Dijon.

Pour avoir un aperçu exhaustif des possibilités offertes par la spectroscopie astronomique, le lecteur pourra se référer en particulier à l'excellent site de Christian Buil [1]. Il faut noter que la plupart des travaux d'amateurs dans ce domaine reposent sur l'utilisation d'instruments de la société Shelyak, en particulier le célèbre spectromètre Lirhes III [2]. Si cet excellent instrument fournit des résultats impressionnants, il possède également certains inconvénients. En effet, le spectromètre, relativement encombrant, doit être installé au porte-oculaire du télescope. Il faut lui adjoindre une caméra ou un appareil photo, afin d'enregistrer des images de spectres, qui, après traitement et étalonnage en longueur d'onde, donnent enfin une courbe montrant les raies d'absorption ou d'émission de l'objet observé.

Au sein de notre club, la Société Astronomique de Bourgogne, nous avons choisi une approche différente. Nous nous sommes basés sur l'utilisation d'un spectromètre commercial "de chimiste" à fibre optique. Ce type de dispositif offre en effet une grande souplesse d'utilisation, ainsi que nous allons le voir.

Le spectromètre

Nous utilisons un spectromètre StellarNet EPP 2000 [3], prêté par l'Institut Carnot de Bourgogne, laboratoire de recherche de l'Université de Bourgogne. La figure 1 présente le dispositif en question. La fibre optique permet d'amener la lumière depuis le télescope, jusqu'à l'entrée du spectromètre. Elle se fixe sur un adaptateur au coulant 31,75 mm se glissant dans le porte-oculaire du télescope.

Cette pièce a été fabriquée de telle façon que, lorsque la mise au point a été faite sur l'astre visé via un oculaire réticulé, le remplacement de celui-ci par l'adaptateur fait que l'entrée de la fibre se trouve précisément au foyer de l'instrument.

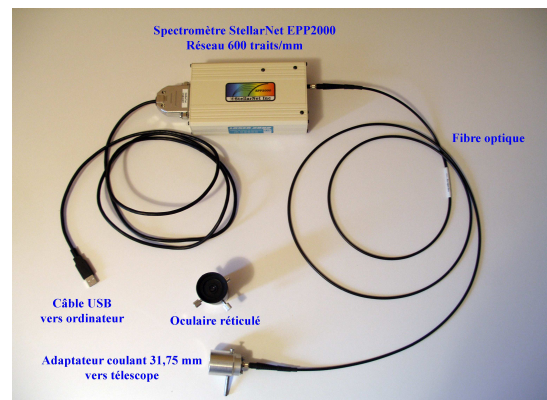


Fig. 1 : Le dispositif utilisé.

Il y a essentiellement deux points critiques pour l'enregistrement de spectres à l'aide de cette méthode :

- Le pointé de l'astre qui doit être très précis, est réalisé à l'aide d'un bon oculaire réticulé éclairé. En effet, la lumière doit pénétrer correctement dans la fibre, dont l'entrée est très petite.

- Le suivi du télescope doit être très bon sur une durée d'au moins 30 s, afin de garder l'alignement de l'astre avec l'entrée de la fibre pendant l'enregistrement du spectre.

Les avantages sont, quant à eux, évidents :

- Le spectromètre n'étant pas fixé au télescope, mais relié à celui-ci par la fibre optique, le poids reposant sur le porte-oculaire est minimal et il n'y a donc pas de contrainte d'équilibre du télescope.
- Ce type de spectromètre, une fois étalonné en longueur d'onde (par voie logicielle) sur un spectre connu (par exemple les raies de l'hydrogène dans le spectre solaire), fournit directement une courbe exploitable.

Bien entendu, en particulier dans le cas des astres de faible luminosité, certains traitements sont nécessaires. Ceux-ci, ainsi que nous allons le voir, sont assez semblables à ceux utilisés en astrophotographie, mais restent néanmoins très simples. Les traitements présentés ici sont réalisés à l'aide du logiciel Igor Pro de Wavemetrics [4], mais d'autres logiciels peuvent être utilisés.

Première étape : le spectre brut.

L'enregistrement d'un spectre brut, en particulier dans le cas des étoiles de magnitude supérieure à 2, pour lesquelles un temps de pose d'au moins 20 secondes est nécessaire, produit une courbe où les raies spectrales sont méconnaissables (courbe du haut sur la figure 2). Ce problème est dû aux défauts du capteur, mais il peut être facilement corrigé. La lumière pénétrant dans le spectromètre via la fibre optique (dont l'entrée est placée au foyer du télescope) est en effet dispersée en longueur d'onde par un réseau et envoyée sur une barrette CCD. Même lorsqu'il n'y a pas de lumière reçue, chaque pixel de la barrette émet un petit courant électrique. Celui-ci est différent pour chaque pixel. Pour une source de lumière faible, avec un long temps de pose, le signal résultant peut être du même ordre de grandeur que celui recherché.

Seconde étape : la soustraction du "dark" ou "noir".

La solution est simple : il suffit d'enregistrer un *dark*, comme en astrophotographie (de préférence juste avant ou après avoir enregistré le spectre brut, afin d'être dans les mêmes conditions de température). Pour cela, on acquiert tout simplement un nouveau spectre en bouchant l'entrée du spectromètre (ou du télescope). Comme on le

voit en haut de la figure 2, l'essentiel des pics "vers le haut" du spectre brut proviennent en fait du *dark*. Sa soustraction produit un spectre parfaitement exploitable où les raies spectrales apparaissent clairement (courbe du bas de la figure 2). Afin d'améliorer le résultat, il est de plus conseillé d'enregistrer plusieurs spectres bruts et plusieurs *darks*, afin de faire des moyennes et de réduire le bruit.

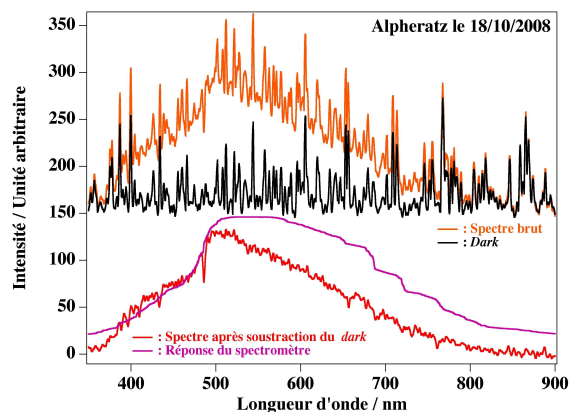


Fig. 2 : spectre d'Alpheratz (α Andromedae) illustrant l'importance de la soustraction du dark du spectre brut. La courbe en magenta du bas est la réponse du spectromètre déterminée à l'aide du spectre d'Altaïr (α Aquilae), (explications ci-dessous).

Troisième étape : la correction de la réponse du spectromètre.

Le spectre ainsi obtenu est déjà exploitable, mais un traitement supplémentaire peut encore être effectué. En effet, le spectromètre ne répond pas de manière uniforme dans toutes les longueurs d'onde. En particulier, il "coupe" les parties ultraviolette et infrarouge du spectre. Il faut donc déterminer la courbe de réponse du spectromètre. Ceci peut être fait à l'aide d'un spectre professionnel, correctement calibré en intensité. On peut pour cela utiliser par exemple la base de données UVES de l'ESO (*European Southern Observatory*) [5]. Nous avons ainsi divisé le spectre de l'étoile Altaïr, que nous avons enregistré précédemment, par celui de la base UVES afin d'obtenir, après lissage, la courbe de réponse en magenta en bas de la figure 2.

Tous les spectres obtenus ensuite peuvent alors être divisés par cette courbe de réponse. On obtient alors le spectre "vrai" de l'étoile ou de la planète observée, comme on peut le voir sur la figure 3. Sur celle-ci, la comparaison avec la courbe du corps noir correspondant à la température de l'étoile en question montre que le spectre obtenu est bien correct (la coupure en dessous de 400 nm étant due à l'ozone atmosphérique).

En quelque sorte, la fonction de réponse peut-être comparée à la PLU (Plage de Lumière Uniforme) de l'astrophotographie. La PLU sert à corriger les défauts d'uniformité (principalement dus à l'optique) de la prise de vue sur la surface du capteur. Dans le cas de la spectroscopie, nous avons le même phénomène, mais en longueur d'onde, la lumière étant dispersée sur le capteur. La PLU est une fonction de réponse géométrique ; ici, nous utilisons une fonction de réponse spectrale. Dans les deux cas, il faut diviser le spectre (l'image) par cette fonction (PLU).

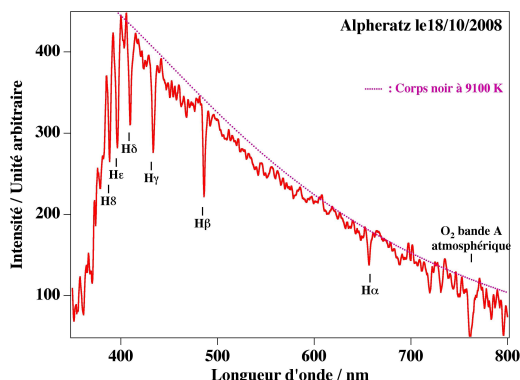


Fig. 3 : spectre final d'Alpheratz (α Andromedae) après correction de la réponse du spectromètre. Quelques raies sont identifiées, dont la série de Balmer de l'hydrogène.

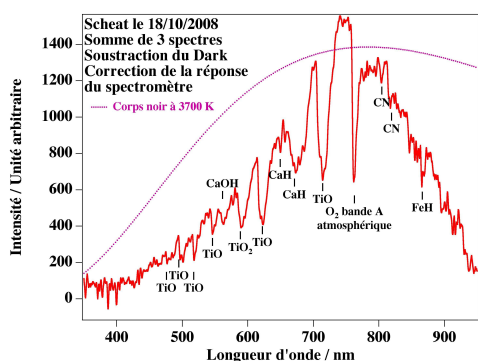


Fig. 4 : spectre de Scheat (β Pegasi) présentant des bandes moléculaires diverses.

Quatrième étape : l'analyse.

Une fois le spectre final ainsi obtenu, il ne reste plus qu'à l'analyser, c'est-à-dire à identifier les différentes raies et bandes spectrales présentes. Si les étoiles chaudes (types spectraux O, B, A) ont un spectre dominé par la série de Balmer de l'atome d'hydrogène (figure 3), les étoiles plus froides (types spectraux F, G, K, M) contiennent de nombreux atomes et même des molécules. La figure 4 montre ainsi le très beau spectre de

Scheat, dominé par les bandes de l'oxyde de Titane, TiO.

Quelques exemples.

Dans les spectres obtenus, on observe toutes les caractéristiques habituelles des spectres astronomiques : raies et bandes d'absorption dues aux molécules de l'atmosphère terrestre (eau, oxygène) et à l'atmosphère de l'astre lui-même, raies d'émission éventuelles et profil général du spectre suivant une courbe de corps noir (même si, du fait que le spectromètre et la fibre ont une fenêtre de transmission centrée sur la région visible, cette courbe et son maximum ne sont pas toujours entièrement visibles). Les spectres d'étoiles chaudes sont en général dominés par la série de Balmer de l'hydrogène.

Outre les exemples présentés ci-dessus, déjà très parlants, et de grands classiques comme Sirius (figure 5), il est possible d'obtenir très facilement

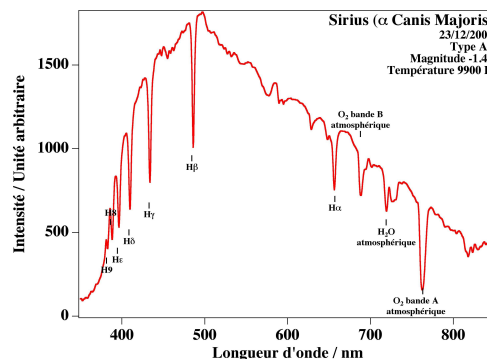


Fig. 5 : spectre de Sirius.

des spectres d'autres objets très intéressants. Ainsi, la figure 6 montre le spectre du cœur de la grande nébuleuse d'Orion (M42). Celui-ci présente de superbes raies d'émission de l'hydrogène et de l'oxygène ionisé deux fois (noté O III). Ces raies étant situées dans le rouge (longueur d'onde de 656 nm) et dans le vert (500 nm), on comprend immédiatement pourquoi ces couleurs dominent largement sur les photographies de M42 et sont observées ... à l'œil par les observateurs

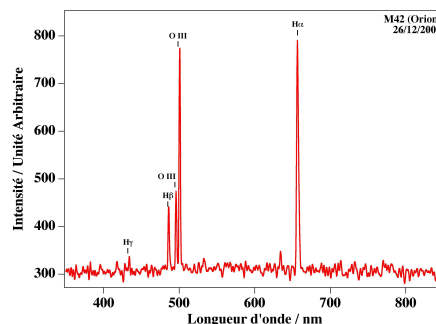


Fig. 6 : spectre de la grande nébuleuse d'Orion (M42) montrant des raies d'émission dans le rouge (hydrogène) et dans le vert (oxygène deux fois ionisé et hydrogène).

aguerris !

La figure 7 montre un exemple intéressant d'étoile dite de type Be présentant à la fois des raies d'absorption et des raies d'émission. Ces dernières sont dues à un nuage d'hydrogène formant

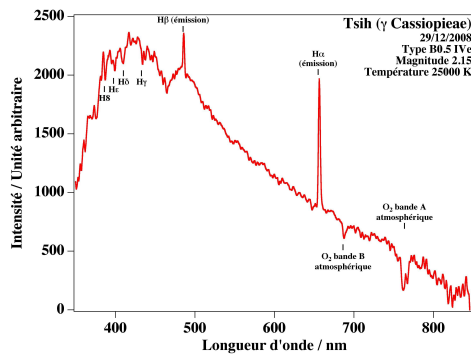


Fig. 7 : spectre de Tsih (nom chinois de γ Cas), étoile Be typique présentant deux raies d'émission intenses de l'hydrogène.

un disque autour de l'étoile et qui est excité par le rayonnement de celle-ci. Les étoiles Be constituent un sujet de recherche actuel, auquel les amateurs peuvent contribuer [1].

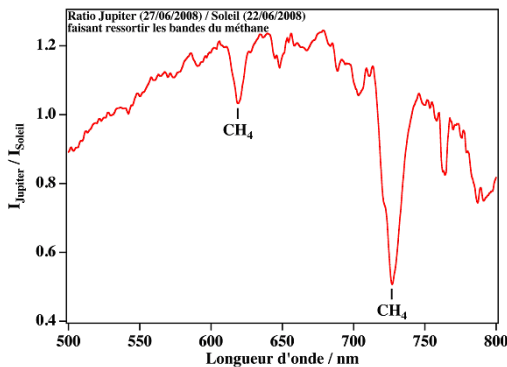


Fig. 8 : Bandes du méthane (CH $_4$) dans le spectre de Jupiter (le spectre a été divisé par un spectre solaire pour faire ressortir les bandes d'absorption spécifiques à la planète géante).

Enfin, il est bien entendu possible d'enregistrer des spectres de planètes. Dans ce cas, la lumière du Soleil, réfléchiée par la surface (ou les nuages) de la planète est en partie absorbée par les gaz contenus dans son atmosphère. Afin de faire ressortir la composition de celle-ci, il suffit alors de diviser le spectre obtenu par celui du Soleil (un simple spectre du fond de ciel), afin d'éliminer à la fois la contribution de l'atmosphère de notre étoile et de celle de notre Terre. La figure 8 montre ainsi des bandes du méthane dans l'atmosphère de Jupiter.

Conclusion

Nous avons ainsi démontré que l'utilisation d'un petit spectromètre commercial à fibre optique pouvait s'avérer un outil très pratique et très pédagogique pour la spectroscopie astronomique. Elle ouvre la porte à de nombreuses utilisations pour les amateurs. Il est à noter que Christian Buil [1] a très récemment utilisé un dispositif de ce genre (avec un spectromètre plus sophistiqué) pour observer une exoplanète par la méthode de la mesure des vitesses radiales !

Les différents spectres enregistrés au sein de notre club peuvent être trouvés sur un site Web dédié [6].

Références

- [1] <http://www.astrosurf.org/buil/>
- [2] <http://www.shelyak.com/>
- [3] <http://www.stellarnet-inc.com/>
- [4] <http://www.wavemetrics.com/>
- [5] <http://www.sc.eso.org/santiago/uvespop/>
- [6] <http://vboudon.club.fr/Spectro/>

Pourquoi soustraire ou diviser des spectres ?

- Quand un bruit s'ajoute au signal des photons, il faut le soustraire : c'est le cas du dark.
- Quand un capteur ne répond pas de la même manière aux différentes longueurs d'onde, on considère que, pour une longueur d'onde donnée, sa réponse est proportionnelle au nombre de photons qui arrivent sur le capteur. Si, par exemple, il ne détecte que 30% des photons incidents, on divise le nombre de photons enregistrés par 0,3 et on retrouve le bon nombre de photons incidents. C'est pour cette raison que l'on divise le spectre obtenu par la courbe de réponse du capteur.
- Par ailleurs, lorsque la lumière traverse un milieu donné, le nombre de photons à chaque longueur d'onde est multiplié par le coefficient d'absorption de ce milieu.

Dans le cas d'un spectre d'une planète, la lumière du Soleil traverse l'atmosphère du Soleil, celle de la planète et celle de la Terre. Elle est donc multipliée par trois coefficients d'absorption successifs. En divisant par un spectre solaire (lumière n'ayant traversé que l'atmosphère du Soleil et celle de la Terre) le spectre d'une planète, on obtient donc le spectre (le coefficient d'absorption) de l'atmosphère de celle-ci.