

RÉALISATION

Quelques variations autour de la spectroscopie stellaire

Jean-Michel Vienney

Nul n'ignore la richesse des messages portés par la lumière, et combien les données issues de la spectroscopie sont essentielles en astrophysique. Encore faut-il pouvoir les décoder, et ce n'est pas toujours simple. Cet article n'a pour ambition que de montrer qu'il est possible, avec un budget raisonnable et en se limitant à des moyens de traitement relativement simples, d'illustrer quelques unes des techniques utilisées en spectroscopie, et montrer quelques unes des nombreuses et délicates étapes du traitement des données préalables à l'obtention des spectres qu'on peut voir dans les publications scientifiques.

L'acquisition des spectres

Selon le matériel et le budget dont on dispose, de nombreux montages sont possibles. Nous nous limiterons ici aux plus simples qui ont une particularité en commun : ils n'utilisent pas de fente pour isoler la lumière de l'étoile étudiée.

Montage minimal

Matériel

- Un APN¹³ (même compact) pouvant prendre des photos en "pose longue" (15 secondes peuvent suffire),

- Un pied photo.

- Un réseau : on peut bien sûr utiliser des réseaux sur feuille plastique, tels que ceux qu'on trouve au CLEA mais pour obtenir des spectres assez lumineux et bien résolus, il est tout de même préférable d'utiliser un réseau blazé (voir le lexique en fin d'article) en verre tel que le Star Analyser (100 traits/mm) proposé par la société Shelyak (<http://www.shelyak.com/>) ou d'autres qu'on peut commander à l'étranger par Internet (se méfier dans ce cas des droits de douane qui peuvent faire beaucoup gonfler la facture).

On dispose simplement le réseau devant l'objectif, le plan du réseau perpendiculaire à l'axe. On peut pour cela imaginer divers bricolages : bagues carton, en PVC, bouchon d'objectif bricolé, ruban adhésif...

La dispersion dépend du pas du réseau et de la distance focale de l'objectif : elle est d'autant plus grande que le nombre de traits au mm est important et que la focale est grande (penser à utiliser le zoom).



Fig.1. À gauche, réseau CLEA sous cache diapo et à droite, réseau blazé fixé sur un zoom.

Protocole de prise de vue

L'appareil photo fixé sur le pied est directement dirigé vers l'étoile (on est limité aux plus brillantes) dont on veut obtenir le spectre. On essaie de cadrer de manière à avoir à la fois l'image de l'étoile (ordre 0) et celle de son spectre (ordre 1).

On oriente le réseau de telle sorte que ses traits soient approximativement parallèles au plan de l'équateur céleste ou que l'axe du spectre soit dirigé vers l'étoile Polaire : avec cette disposition le mouvement diurne aura pour effet d'étaler l'image perpendiculairement à la direction du spectre.

On fait une image en pose longue (15 secondes à 1 minute). Il est rare de réussir du premier coup, avec certains appareils la mise au point peut s'avérer délicate, mais avec de la patience et après quelques essais on finit généralement par arriver à un résultat satisfaisant.



Fig.2. Deux spectres de Véga, obtenus avec le réseau CLEA et un objectif de 35 mm en haut, avec un réseau lumix et un objectif de 49 mm en bas (poses de 60 s).

¹³ La signification des abréviations est donnée à la fin de l'article.

Avec cette méthode, on peut aussi photographier la nébuleuse d'Orion et obtenir la raie d'émission H α à 656 nm.

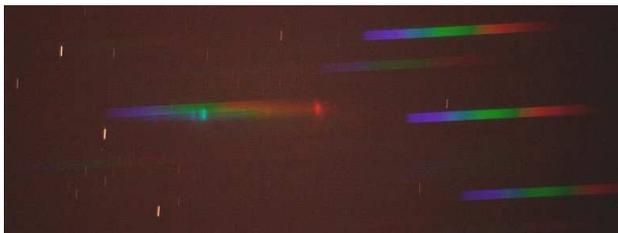


Fig.3. De gauche à droite, les étoiles du baudrier d'Orion, le spectre de la nébuleuse M42 avec des raies d'émission bien visibles et les spectres des étoiles du baudrier.

Montage avec une Webcam

Matériel

Il faut disposer d'une lunette ou d'un télescope. Sa distance focale n'est pas critique (elle a tout de même une influence sur la résolution finale).

Une monture motorisée en ascension droite n'est pas indispensable, mais elle rend les réglages beaucoup plus aisés, surtout si la focale de l'instrument est longue car on n'a pas à recadrer.

Il faut ensuite une webcam (type ToUcam), une bague d'adaptation au coulant du porte oculaire (le plus souvent 31,75 mm), un réseau (par exemple Star Analyser) pouvant s'adapter sur la bague.

Un ordinateur et un logiciel d'acquisition comme le logiciel libre QcFocus sont indispensables. (à télécharger par exemple sur :

<http://www.astrosurf.com/astroqc/qcam/programme.html>)

Le montage photographié utilise un réseau monté dans une bague qui se visse directement sur le filetage de l'adaptateur. On peut bien sûr tenter de bricoler son propre système. La dispersion dépend du pas du réseau et de la distance réseau-capturateur. Selon le pas et la distance, on peut cadrer à la fois l'image de l'étoile et celle de son spectre, ou seulement l'image du spectre (mais cela rend l'étalonnage plus difficile).

Compte tenu de la petite taille des capteurs, il vaut mieux orienter l'axe du spectre selon la diagonale de l'image.

Une des particularités de ce montage est qu'en retirant l'objectif de la webcam, on a aussi retiré le filtre qui arrêtaient le rayonnement infrarouge. Le spectre obtenu s'étend donc de ce côté (au point parfois de recouvrir le violet du spectre du second ordre...). La webcam et le réseau sont directement montés à la place de l'oculaire de la lunette.



Fig.4. Montage avec une webcam. À gauche, la webcam (sans son objectif), l'adaptateur et le réseau. À droite, l'ensemble fixé sur le porte oculaire d'une lunette.

Protocole de prise de vue

On vise l'étoile dont on veut le spectre, on oriente éventuellement la webcam et le réseau. La mise au point peut s'avérer délicate, et on n'arrive pas toujours à la faire simultanément sur l'étoile et sur le spectre (dans ce cas mieux vaut privilégier ce dernier et faire la mise au point sur lui).

On règle la luminosité (temps de pose et sensibilité de la caméra) et le contraste de l'image en faisant attention à ce que les photosites ne soient pas saturés. On acquiert alors une séquence vidéo de quelques dizaines de secondes à partir de laquelle on pourra obtenir une image brute après tri, registration et addition des meilleures images, comme dans le traitement des images planétaires (voir CC 130).



Fig.5. Spectre de Sirius (addition des 30 "meilleures" images d'une séquence vidéo de 150 images avec un ciel très turbulent).

Plus sophistiqué mais plus cher : APN et lunette

Matériel

Le montage est presque le même qu'avec la webcam mais cette dernière est remplacée par le boîtier de l'APN. Il faut alors disposer d'une bague d'adaptation (bague T) dédiée au boîtier utilisé et d'une bague de raccord adaptée au coulant de l'oculaire de l'instrument, sur laquelle on va monter le réseau (avec éventuellement une ou plusieurs bagues allonge). On monte le tout à la place de l'oculaire de la lunette. Là aussi, une monture équatoriale motorisée n'est pas absolument indispensable, mais elle est très conseillée si on ne veut pas passer son temps à recadrer l'image lors des phases de réglage (la mise au point peut s'avérer longue et délicate !).

Un ordinateur portable et un câble permettant de télécharger les images au fur et à mesure faciliteront la mise au point (écran plus large et zoom) et l'analyse des images (dynamique et saturation) au cours de la prise de vues. On pourra de plus les nommer, évitant ensuite les confusions.

Attention : beaucoup de capteurs sont munis de filtres qui limitent la bande passante, aussi bien du côté du violet que du côté du rouge, or beaucoup de raies intéressantes sont précisément dans ces domaines (notamment les raies de Balmer de l'hydrogène : $H\alpha$ dans le rouge, $H\beta$, $H\gamma$ et $H\delta$ dans le bleu). Le défiltrage est bien sûr possible mais très délicat, coûte relativement cher et modifie la balance des blancs de l'appareil.

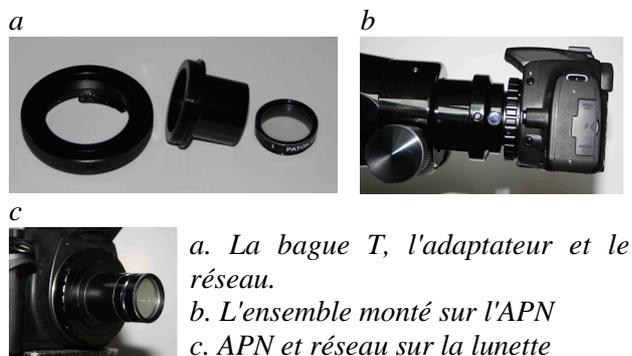


Fig.6. Montage avec un APN.

Protocole de prise de vue

On oriente la lunette de manière à avoir sur la photo l'image de l'étoile et le spectre d'ordre 1.

On s'assure que ce dernier s'étale sur une région sans étoiles brillantes et que la direction des traits du réseau est proche de la parallèle au plan équatorial. On fait une mise au point aussi soignée que possible en faisant des poses courtes (il faut trouver un compromis, c'est plus facile si le spectre présente des raies bien marquées).

On arrête le suivi et on déclenche la pose : le spectre de l'étoile va alors s'étaler et former une image d'autant plus large que la pose sera longue (cela dépend aussi bien sûr de la focale de l'instrument utilisé).

Il faut ensuite s'assurer que la pose est correcte : la photo doit être assez lumineuse mais les photosites ne doivent pas être saturés. Dans le doute, on peut faire plusieurs poses en modifiant à chaque fois la sensibilité de l'appareil.

On peut aussi, au lieu d'arrêter la monture, utiliser les mouvements lents (rattrapage) en ascension droite ou en déclinaison (dans ce cas les traits du réseau doivent bien sûr être perpendiculaires au plan équatorial). Pour conserver toute la dynamique et la résolution de l'image, il faut enregistrer celle-ci dans un format non compressé (format RAW).

Si on veut faire un traitement rigoureux, il faut faire en plus une série d'images d'obscurité (noir ou dark) avec le même temps de pose en occultant l'objectif de l'instrument, une image d'éclaircissement uniforme (PLU ou flat-field) en plaçant un écran uniformé-

ment éclairé devant l'objectif, et une image d'offset. Ce traitement sophistiqué dépasse les ambitions de cet article et le lecteur intéressé pourra trouver sur Internet de nombreux tutoriels, par exemple à partir du site de Christian Buil (l'auteur du logiciel IRIS que nous allons utiliser pour traiter les spectres).

Les images suivantes, découpées et recadrées pour les besoins de la mise en pages, ont été obtenues par cette technique avec un APN défiltré, un réseau blazé à 200 traits par mm et une lunette de 80 mm d'ouverture et 500 mm de focale. (Les images originales au format RAW sont téléchargeables sur le site du CLEA : www.clea-astro.eu, rubrique Cahiers Clairaut, sommaire n°132).

Sur ces images brutes, on peut déjà voir des différences et des similitudes : dans les spectres de Véga et d'Alioth (deux étoiles très chaudes, de type A), on distingue nettement deux raies d'absorption ($H\beta$ et $H\gamma$ dans le bleu) et on voit que la partie bleue est beaucoup plus brillante que la rouge, alors que dans le cas d'Arcturus (de type K, beaucoup moins chaude) c'est le rouge qui domine et on distingue de nombreuses raies fines.



Fig.7. Spectres de Véga, Arcturus et Alioth (de haut en bas), obtenus avec une lunette de 500 mm de focale, un réseau blazé à 200 traits/mm et un APN.

De l'image brute au spectre 1D

Nous allons maintenant voir comment on peut à partir de l'image brute, obtenir un spectre dont la dynamique sera améliorée, faisant apparaître de nouveaux détails et permettant une analyse un peu plus poussée.

Pour cela nous allons utiliser le logiciel IRIS.

Il faut pour commencer préciser qu'IRIS est un logiciel de traitement d'images extrêmement puissant, dont les fonctions vont de l'acquisition des images (avec un APN ou une Webcam) aux traitements les plus sophistiqués en passant par la photométrie et l'astrométrie. On trouve sur le site de son concepteur, Christian Buil (<http://www.astrosurf.com/buil/iris/iris.htm>) la liste complète des commandes des tutoriels et exemples d'utilisation, et les instructions nécessaires pour le télécharger et l'installer (IRIS a été fourni sur le CD accompagnant le n° 130 des Cahiers Clairaut).

Les lignes qui suivent décrivent très sommairement les opérations à effectuer. Ceux qui voudront effectivement réaliser le traitement ont intérêt à lire l'article complet avec les lignes de commandes et des captures d'écran sur le site du CLEA (www.clea-astro.eu, rubrique Cahiers Clairaut, sommaire n°132)

Précisons aussi à nouveau que nous avons pris le parti de laisser de côté le prétraitement des images RAW.

Première étape : la visualisation

On charge et on visualise l'image brute. On peut ensuite faire une première analyse du spectre en y faisant une coupe longitudinale. On peut lire ainsi les niveaux de luminosité de chaque pixel et vérifier qu'aucun n'a été saturé (le niveau maximum étant fixé à 255). On peut repérer les "creux" correspondant aux raies sombres. On voit aussi que ce qui paraissait noir ne l'est pas tout à fait : le niveau du ciel n'est pas strictement nul.

En allant faire une coupe du côté de l'étoile, on pourra voir que cette dernière est saturée.

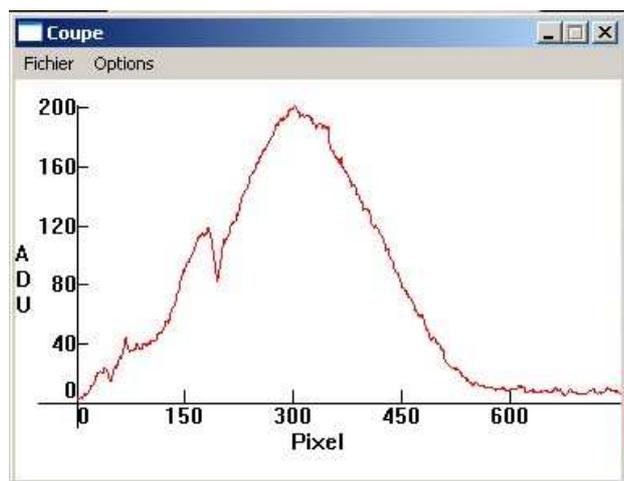


Fig.8. Coupe du spectre brut dans le logiciel IRIS.

Deuxième étape : découpage et corrections géométriques

Afin de limiter la place occupée par les images et le temps de traitement, on découpe l'image afin de n'en conserver que la partie utile (figure 9).

On lui fait ensuite subir quelques corrections géométriques. Il faut d'abord déterminer approximativement l'angle d'inclinaison pour redresser l'ensemble du spectre (figure 10).

La dernière correction géométrique consiste à redresser les raies du spectre (figure 11).



Fig.9. Découpage de l'image.



Fig.10. Le spectre est horizontal à l'écran.



Fig.11. Le spectre est redressé.

Troisième étape : du spectre couleur 2D au spectre 1D

Le spectre est maintenant redressé géométriquement, mais l'image est toujours constituée des 3 plans couleur correspondant à ce qu'on verrait si on le regardait à travers trois filtres respectivement rouge, vert et bleu. Si on veut étudier la luminosité en fonction de la longueur d'onde, il va falloir additionner ces trois plans, ce qui nous donnera une image en niveau de gris, moins jolie certes, mais plus pertinente.

L'addition des plans fait gagner un peu de dynamique (les niveaux vont de 0 à 350) mais une partie de l'image est saturée !

Il est donc nécessaire de régler les "seuils de visualisation". En jouant sur ces seuils, on peut mettre en évidence des détails ou faire apparaître des raies peu profondes.



Fig.12. Le spectre est maintenant en niveau de gris. On remarque la présence d'une raie bien visible dans le rouge (à droite), c'est la raie H α de l'hydrogène. On remarque aussi un segment brillant près de la raie H γ (la plus à gauche). Il pourrait s'agir d'une raie en émission ou de la trace laissée par une étoile peu brillante. Pour trancher, il faudrait faire d'autres spectres en orientant le réseau différemment pour voir si cette trace persiste ou non.

Les deux dernières opérations consistent à évaluer et soustraire le niveau moyen du ciel, puis à additionner par colonne les niveaux de luminosité de chaque pixel du spectre.

On espère ainsi, sous réserve qu'elles soient réparties de manière aléatoire, minimiser les fluctuations de luminosité et améliorer le rapport signal/bruit et la dynamique de l'image.

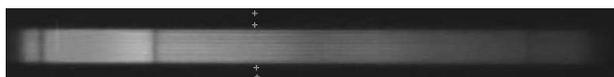


Fig.13. Le spectre après soustraction du fond de ciel.

On peut maintenant vérifier que les raies observées sont bien les raies de Balmer de l'hydrogène.

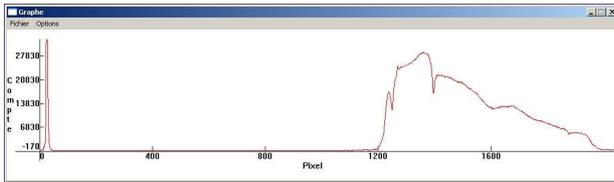


Fig.14. Le spectre transformé en graphique par Iris.

Dans notre montage, le pas p du réseau vaut $5 \mu\text{m}$ (200 traits par mm), la distance d réseau-capteur vaut 90 mm (mesuré au pied à coulisse) et le capteur est une matrice de $3\,456 \times 2\,304$ pixels de côté a valant $6,42 \mu\text{m}$.

Au prix de quelques approximations, on peut montrer que la différence entre l'abscisse x de la raie de longueur d'onde λ et l'abscisse x_0 du centre de l'image de l'étoile (en pixels) est donnée par la relation $x - x_0 = d \times \lambda / (a \times p)$

On en déduit la dispersion :

$$\Delta\lambda / \Delta x = a \cdot p / d \approx 0,356 \text{ nm/pixel.}$$

À partir du graphique, ou en déplaçant le pointeur sur l'image, on détermine l'abscisse (en pixel) du milieu de l'étoile, soit $x_0 = 27$ pixels puis celle du milieu de chaque raie. On peut alors dresser le tableau suivant :

	Raie 1	Raie 2	Raie 3
	(H_γ)	(H_β)	(H_α)
Abscisse du centre (x en pixel)	1251	1397	1877
Différence ($x - x_0$ en pixel)	1224	1370	1850
λ calculé (nm)	436	488	659
λ table (nm)	434,0	486,1	656,3

On retrouve avec une très bonne précision (mieux que 1 %) les longueurs d'onde données par les tables. On ne peut pas espérer mieux, la principale cause d'incertitude venant ici de la mesure de la distance réseau-capteur.

Il ne nous reste pour aujourd'hui qu'à enregistrer nos fichiers. Dans un prochain article, nous verrons comment on peut, à l'aide du logiciel VSpec, analyser plus finement le spectre 1D, déterminer la courbe de réponse instrumentale, et finalement estimer la température d'une étoile à l'aide de son "profil de Planck".

Lexique

APN : appareil photo numérique.

RAW : le format d'enregistrement non compressé de certains APN.

Avantage : c'est celui avec lequel on aura la meilleure dynamique et perdra le moins d'informations.

Inconvénient : l'acquisition (il faut acquérir des images de plages noires (Dark), de lumière uniforme (PLU), et de d'offset (bias...)) et le traitement (soustraction de l'offset et du dark, division par la PLU, ... sont plus compliqués)

BMP : un des formats (peu ou pas compressé) d'enregistrement des images sous Windows.

Chacun des 3 plans couleurs (rouge, vert, bleu) est codé sur 8 bits (soit 256 niveaux).

Avantage : peu ou pas compressé.

Inconvénient : donne des fichiers assez lourds et la dynamique est limitée

JPG (ou JPEG) : un autre format (souvent le seul disponible sur les APN compacts) d'enregistrement des images.

Avantage : les images sont compressées, donc le volume des fichiers est raisonnable.

Inconvénients : la dynamique est limitée (256 niveaux par plan couleur).

FTS, FITS : deux formats d'enregistrement des images scientifiques très utilisés dans les bases de données. Les images sont en niveau de gris (il faut donc 3 fichiers FITS pour une image en couleurs).

Le fichier comporte un en-tête avec des données sur les caractéristiques de l'image.

PIC : le format d'enregistrement des images couleur sous IRIS. Chacun des 3 plans image y est codé sur 16 bits (32768 niveaux). Pas de compression.

Avantage : pas de perte d'information lors de l'enregistrement, et une bonne dynamique.

Inconvénient : des fichiers plutôt volumineux.

Réseau blazé : c'est un réseau taillé de telle manière que la majeure partie de l'énergie lumineuse (pour d'une longueur d'onde donnée) est concentrée dans un des ordres du spectre (le plus souvent le spectre l'ordre 1).



Fig.15. Le spectre final.

Quelques sites

Une série de spectres obtenus avec un LHIRES III

<http://bmauclair.free.fr/astromie/spectro/atlas/seriebr/>

Un article de C Buil sur l'utilisation du Star Analyser <http://astrosurf.com/buil/staranalyser/obs.htm>

Un autre du même Christian Buil mais en anglais <http://astrosurf.com/buil/us/spe1/spectro4.htm>