

RÉALISATION

Exploitation de spectres à basse résolution avec VSpec

Jean-Michel Vienney

Dans le précédent numéro nous avons vu comment on pouvait obtenir un spectre stellaire.

Nous allons maintenant voir comment on peut, en utilisant le logiciel libre VSpec, obtenir un "profil spectral", puis le corriger de la "réponse instrumentale", et enfin accéder à la température ou à la classe spectrale de l'étoile étudiée.

I Du spectre 1D au "profil spectral brut" étalonné

Dans l'article précédent, nous avons expliqué comment obtenir une image en niveaux de gris du spectre de Véga, et vu qu'on pouvait déjà y identifier les principales raies d'absorption.

On suppose maintenant qu'on dispose de plusieurs spectres, obtenus au cours d'une même séance d'acquisition et avec le même montage, et qui ont été traités de la même manière.

Ici, ce sont des spectres de Véga, Alioth, Dubhe et Arcturus, obtenus le 29 juin 2010.



Fig.1. Spectres redressés avant découpage. De haut en bas ceux de Véga, Alioth, Dubhe, Arcturus.

Les fichiers vega1d.fit et dubhe1d.fit sont disponibles sur le site du CLEA à partir du sommaire de ce numéro dans la rubrique cahiers Clairaut, ou à l'adresse <http://www.ac-nice.fr/clea/SommCC133.html>.

Les autres fichiers cités dans l'article (alioth1d.fit, arcturus1d.fit), leurs versions "découpées" ainsi que les profils spectraux obtenus avec VSpec ne sont accessibles qu'aux abonnés "numérique" à l'adresse <http://acces.inrp.fr/clea/vieclea/nouvelles-productions/spectro/> (ils y trouveront également un forum pour échanger avec l'auteur)

Pour commencer extrayons de ces spectres la partie "utile" (qui correspond en gros au "domaine visible", et plus précisément à la "bande passante" du capteur utilisé). Elle s'étend approximativement de 1 200 à 1 900 pixels à partir de l'image d'ordre 0 (bande brillante à gauche de chaque spectre).

On charge dans IRIS le fichier correspondant à Véga, qui va nous servir de référence : (attention

pour conserver la dynamique, il faut sauvegarder et charger les fichiers au format FITS ou au format PIC : les formats JPEG ou BMP ramènent les images à 256 niveaux de gris) ...

Comment se procurer VSpec ?

La meilleure solution est de télécharger ce logiciel sur le site de son auteur, Valérie Desnoux à l'adresse : <http://astrosurf.com/vdesnoux/index.html>

En plus de la dernière version du logiciel on trouvera une documentation complète (140 pages en français), mais aussi de nombreux exemples et "tutoriels" mais la plupart sont écrits en anglais.

Il y a aussi une version française, mais moins à jour, à l'adresse :

<http://astrosurf.com/vdesnoux/sitefr/>

On y trouvera en plus de nombreuses données sur la spectroscopie, et des plans pour la réalisation de spectroscopes.

On repère alors aussi précisément que possible le barycentre de l'image de l'étoile (on peut ici utiliser la fonction "PSF" d'Iris, accessible par clic droit après avoir encadré l'image de l'étoile). Pour Véga, on obtient $x = 27$ pixels (figure 2).

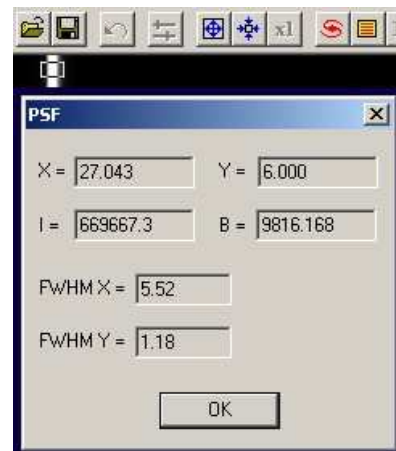


Fig.2. Fenêtre PSF d'Iris.

On découpe la partie intéressante en saisissant la commande "window 1227 1 1927 20" puis on enregistre l'image au format FITS.

On procède de la même manière avec les trois autres spectres. Les fichiers correspondants sont nommés respectivement : vega1d_1200_1900.fit , alioth1d_1200_1900.fit, dubhe1d_1200_1900.fit et arcturus1d_1200_1900.fit.

Le travail sous IRIS est maintenant terminé, on peut le fermer et ouvrir le logiciel VSpec.

Sous VSpec on commence par charger le fichier image contenant le spectre à étudier (ici vega1d_1200_1900.fits) à l'aide de la fonction "Fichier/Ouvrir Image". Une fenêtre s'ouvre alors qui contient l'image du spectre1d (figure 3).



Fig.3. Fenêtre VSpec.

On va alors pouvoir obtenir un premier profil spectral en utilisant la fonction "binning objet" accessible par un des boutons de la barre d'outils (figure 4).

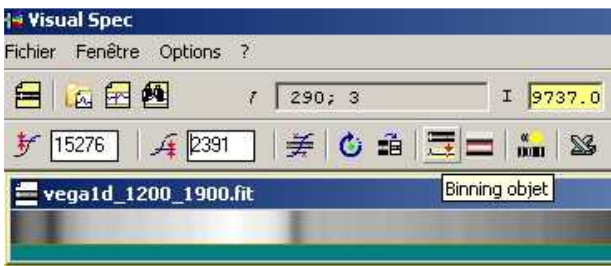


Fig.4. Fonction "binning objet".

Le profil spectral apparaît alors dans une nouvelle fenêtre. Il est possible de la redimensionner, de faire ou non apparaître les échelles. On observera surtout que de nouvelles fonctions sont apparues dans la barre de menus (figure 5).

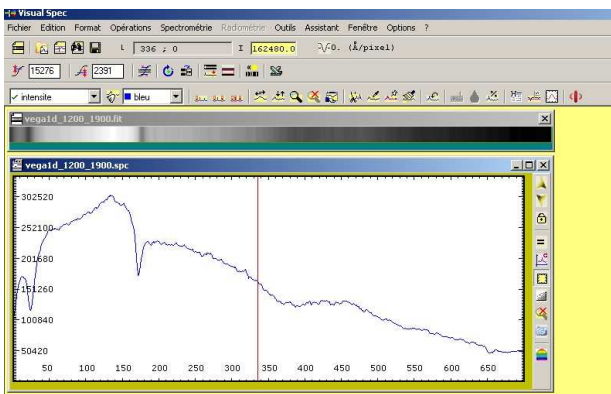


Fig.5. L'écran de Vspec après l'extraction du premier profil spectral. Remarquer le curseur (barre verticale) et la graduation en pixels de l'axe des abscisses.

En promenant le curseur sur le graphique, on peut lire son abscisse en pixel (L) et son ordonnée (I) dans une unité arbitraire (en fait la somme sur la colonne correspondante de l'image des intensités codées en niveaux de gris).

Une nouvelle barre d'outils est aussi apparue, qui va nous permettre d'étalonner le profil en longueur d'onde.

Plusieurs méthodes sont envisageables :

- avec une seule raie (il faut alors connaître la "dispersion" en Å/pixel) ;
- avec deux raies ;
- avec plus de deux raies si on ne veut pas se contenter de l'approximation "affine".

Nous avons déjà identifié les deux raies de l'hydrogène très marquées dans le spectre de Véga (à 4 340,5 Å et 4 861,3 Å). Nous allons donc les utiliser.

Le détail des opérations est un peu fastidieux à décrire ici mais très bien documenté et assez intuitif. Le principe consiste, après avoir cliqué sur le bouton "calibrage avec 2 raies" et précisé que le spectre étudié sert aussi de référence, à encadrer successivement avec le pointeur de la souris les deux raies choisies, et à préciser pour chacune la longueur d'onde correspondante (en Å).

Cette opération faite, on peut lire dans la barre de menus la valeur de la dispersion : 3,53 Å/pixel, ce qui est relativement proche de la première détermination (3,56 Å/pixel) faite avec IRIS. Quand on déplace le curseur sur le spectre, l'abscisse est maintenant affichée à la fois en pixel et en Å (figure 6).

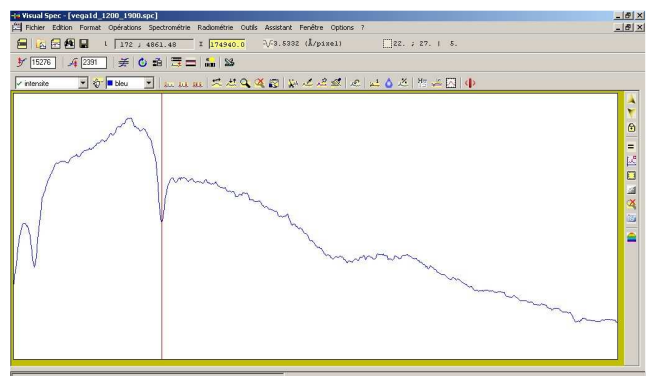


Fig.6. Capture d'écran, le spectre brut étalonné en longueur d'onde. Le curseur est placé sur la raie Hβ qui a servi à l'étalonnage.

II Identification des raies spectrales et comparaison avec un spectre de référence

Parmi les nombreux outils disponibles, Vspec dispose d'une banque de données spectroscopiques qui permet d'afficher les raies d'un élément et leurs longueurs d'onde.

Cette fonction est accessible par le menu "Outils/Elements". Nous allons l'utiliser pour faire apparaître les raies de l'hydrogène et de l'hélium : il suffit d'ouvrir le menu, sélectionner chaque élément, trier puis exporter pour voir les raies s'afficher sur le profil. Il n'est pas surprenant de constater la coïncidence des raies qui ont servi à l'étalonnage, mais on est aussi content de voir que la raie H α de l'hydrogène correspond assez bien avec un "creux" sur le profil spectral (figure 8).

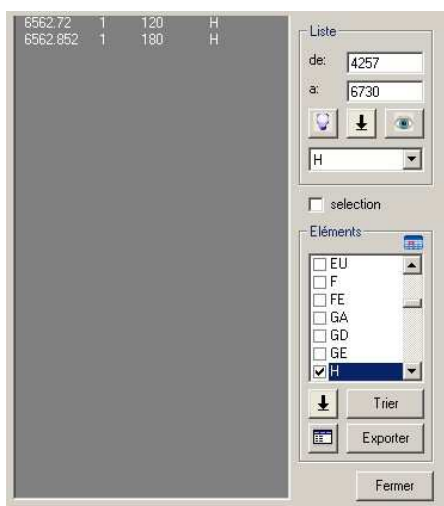


Fig 7a : Pour afficher les raies de l'hydrogène.

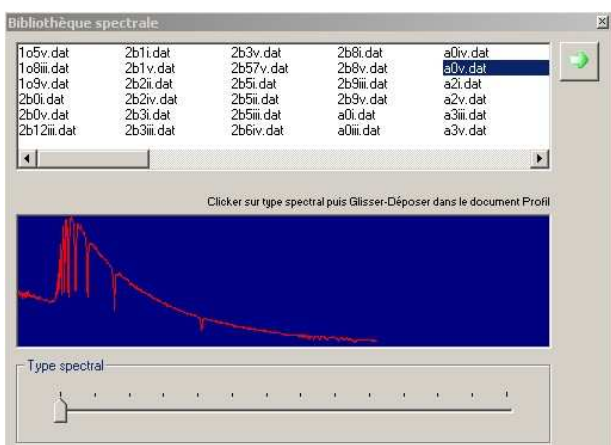


Fig.7b. Le spectre d'une étoile A0V donné par la banque de spectres.

VSpec dispose aussi d'une banque de spectres de référence qui est accessible par le menu

"Outils/Bibliothèque". Si le type spectral de l'étoile est connu (c'est le cas pour Véga qui est de type A0 V) il suffit de le sélectionner dans la banque pour afficher un spectre de référence qu'on peut comparer à celui qui est en cours d'analyse.

On remarque alors tout de suite que si les principales raies d'absorption coïncident relativement bien, il en va tout autrement pour l'intensité.

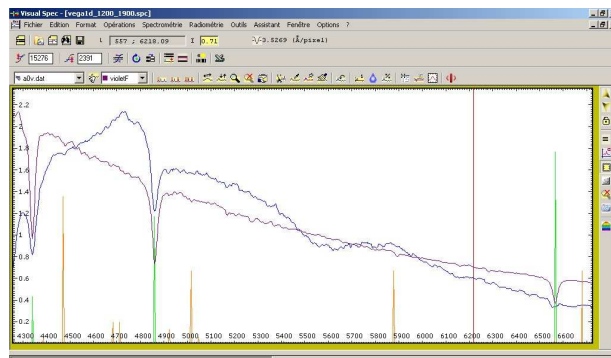


Fig.8. On a demandé l'affichage des raies de l'hydrogène (vert) et de l'hélium (orangé), ainsi que le spectre d'une étoile de type A0 V issu de la banque de spectres.

Ceci n'est pas surprenant : l'intensité mesurée dans notre spectre n'a pas été corrigée de la "réponse instrumentale". Ce sera la prochaine étape de notre traitement.

III Qu'est-ce que la "réponse instrumentale", et comment l'obtenir ?

Pour une longueur d'onde donnée, le nombre figurant en ordonnées du profil spectral est bien proportionnel à la quantité de lumière reçue pendant la pose. Malheureusement la constante de proportionnalité dépend de la longueur d'onde de la radiation étudiée : la sensibilité du capteur n'est pas la même pour le rouge, le jaune ou le bleu. D'autre part la lumière que nous recevons d'une étoile doit, entre autres, traverser l'atmosphère terrestre, dont les effets en terme d'absorption dépendent de la longueur d'onde, mais aussi de l'épaisseur d'air traversée (donc de la hauteur de l'astre observé) et de sa "transparence", qui peut être très variable d'une nuit à l'autre.

On va ici, pour simplifier, considérer que pour une longueur d'onde donnée, l'intensité $I_M(\lambda)$ mesurée par le capteur est égale au produit de l'intensité réelle $I_R(\lambda)$ par un facteur $R(\lambda)$ dépendant de la longueur d'onde et qui prend en compte aussi bien la réponse du capteur que les effets de l'atmosphère.

$$I_M(\lambda) = R(\lambda) \cdot I_R(\lambda).$$

C'est cette fonction $R(\lambda)$ que nous appellerons dorénavant (et par abus de langage) "réponse instrumentale" (il faudrait en fait découpler les effets du capteur des effets de l'atmosphère, ce qui n'est possible que si l'on sait modéliser les effets de l'atmosphère).

Moyennant ce parti pris, il nous est maintenant possible de déterminer la "réponse instrumentale" : il suffit de diviser pour chaque longueur d'onde la valeur mesurée par la valeur correspondante du spectre de référence : $R(\lambda) = I_M(\lambda) / I_R(\lambda)$.

On suppose de plus que la réponse instrumentale ne varie pas brutalement en fonction de la longueur d'onde : on va donc, avant de faire la division, lisser les deux courbes.

Ce lissage peut par exemple se faire en utilisant la fonction "**Radiométrie/Extraire le continuum**" : on découpe d'abord les parties correspondant aux raies d'absorption profondes, puis on règle le coefficient du filtre de manière à obtenir une courbe lissée (mais pas trop).

On peut alors effectuer la division. On sélectionne d'abord la quantité à diviser : $I_M(\lambda)_{\text{lissée}}$ (dans notre exemple elle est nommée "Fit.intensité") puis on ouvre le menu "**Opérations/Diviser un spectre par un autre**" et on sélectionne le diviseur $I_R(\lambda)_{\text{lissée}}$ (nommé ici "Fit.Ref1"). On obtient la courbe nommée pour l'instant "division" (figure 9).

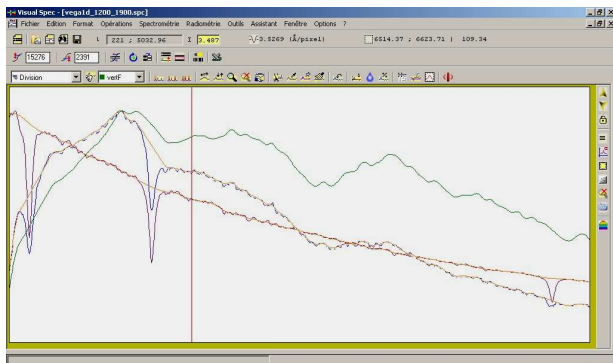


Fig.9. Capture d'écran après extraction du continuum de chaque spectre, et division.
bleu : spectre brut (Intensité)
violet : spectre de référence (Ref1)
orangé : spectres lissés (Fit.intensité et Fit.Ref1)
vert : la réponse instrumentale (Division).

Avant d'aller plus loin, il faut enregistrer notre travail.

Attention : la fonction "enregistrer" de VSpec n'enregistre que quatre des spectres présents à

L'écran : ceux qui sont respectivement nommés **Intensité, Ref1, Ref2, et Normalisé.**

Si l'on veut en conserver un autre, il faut d'abord le recopier à la place d'un des quatre précédents.

On va donc, avant d'enregistrer, en utilisant la fonction "**Edition/Remplacer**" remplacer le spectre "Ref2" par "Intensité" puis le spectre "Intensité" par "Division" avant d'enregistrer sous "rep_inst.spc".

Après cette opération, le fichier enregistré contient 3 profils : la réponse instrumentale dans "Intensité", le profil de référence dans "Ref1" et le profil brut dans "Ref2". Les autres profils ont purement été éliminés (figure 10).



Fig.10. Fenêtre "Remplace".

Pour finir, nous allons sélectionner le profil brut (contenu dans "Ref2") et le diviser par la réponse instrumentale (contenue dans "Intensité"). En cochant la case "normalise et remplace", le résultat de l'opération viendra remplacer dans "Ref2" le profil brut. Le résultat est donné sur la copie d'écran qui suit : à part du côté des courtes longueurs d'onde, l'accord est plutôt satisfaisant. La différence de profondeur des raies doit pouvoir être attribuée à la trop faible résolution du spectrographe ou à une mise au point pas tout à fait assez soignée : les détails sont "moyennés".

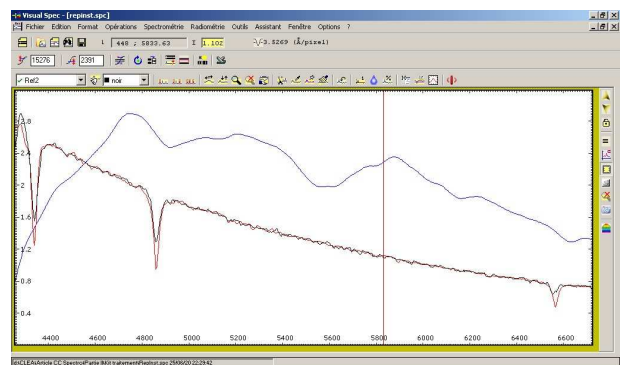


Fig.11. La réponse instrumentale (bleu), le spectre de référence (rouge) et le spectre corrigé (noir).

IV Étalonnage et correction d'autres spectres obtenus au cours de la même nuit

Nous allons maintenant pouvoir exploiter d'autres spectres. Émettons tout de même quelques réserves. Ce qui suit suppose que la "dispersion" et la "réponse instrumentale" n'ont pas varié d'un spectre à l'autre. La première condition est relativement facile à réaliser si l'on prend soin, lors de l'acquisition, de placer à chaque fois l'étoile au même endroit du capteur (pas très aisé tout de même, surtout avec un montage rudimentaire).

Pour s'approcher au mieux de la seconde, il faudrait que l'étoile étudiée et l'étoile qui a servi à obtenir la réponse instrumentale soient assez proches de telle sorte que l'épaisseur d'atmosphère traversée soit la même et que la transparence du ciel n'ait pas trop varié d'une acquisition à l'autre.

Tentons notre chance avec deux étoiles brillantes de la constellation de la Grande Ourse : Alioth et Dubhe.

On charge dans Vspec les spectres découpés d'Alioth (alioth1d_1200_1900.fit) et de Véga (vega1d_1200_1900.fit).

On sélectionne la fenêtre contenant le spectre d'Alioth et l'on extrait son profil avec la fonction "binning objet", ce qui le met dans "Intensité". On sélectionne ensuite la fenêtre contenant le spectre de Véga et l'on extrait son profil en utilisant la fonction "binning reference", ce qui a pour effet de le mettre dans "Ref1" (figure 12).

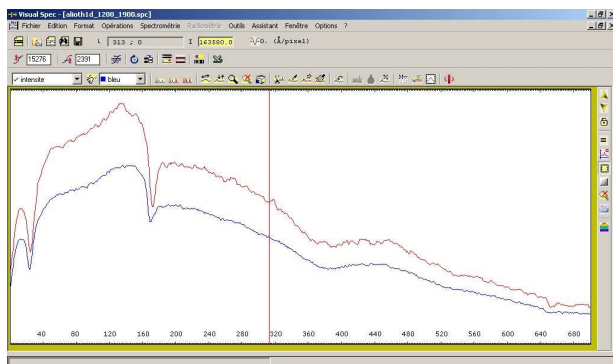


Fig.12. Profils d'Alioth et de Véga.

Première bonne surprise : les profils bruts concordent plutôt bien ! On va donc pouvoir étalonner. La calibration avec 2 raies se fait sur le spectre de Véga, et donne la même dispersion soit 3,53 Å/pixel (figure 13).

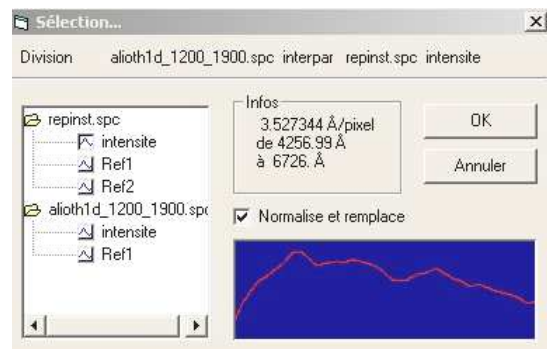


Fig.13. Division des profils.

On va maintenant tenter d'appliquer la réponse instrumentale obtenue avec Véga :

Il faut d'abord, si ce n'est déjà fait, ouvrir le profil correspondant (RepInst.spc) puis afficher la fenêtre contenant le spectre brut d'Alioth (menu "Fenêtre/alioth1d_1200_1900.spc"), sélectionner son spectre brut nommé "Intensité" et le diviser par la "réponse instrumentale". Si l'on a sélectionné "normalise et remplace", on obtient le profil corrigé dans "Intensité" (figure 14).

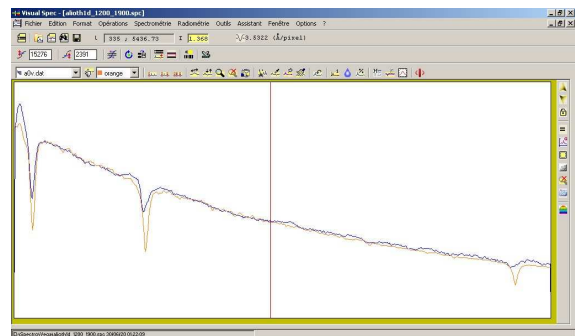


Fig.14. Le spectre d'Alioth corrigé (bleu) et le spectre de la bibliothèque pour une étoile de type A0 V (orangé).

Il ressemble bien au spectre d'une étoile de type A0... pour nous en convaincre allons voir dans la bibliothèque : le type A0 semble bien convenir (on peut tout de même hésiter entre A0 IV et A0 V) ! Vérification : selon Wikipédia Alioth (alias ϵ Uma) appartiendrait à la classe A0pCr, soit une étoile de type A0 avec une forte raie du Chrome (figure 16)...

Du coup la tentation est trop forte ! On ouvre le menu "Outils/Elements" pour afficher les raies du chrome et là ... déception ! Pas de creux évident à l'endroit indiqué. Peut-être la résolution est-elle trop faible et la mise au point pas assez soignée sur cette région du spectre.

Tentons une autre expérience sur ce spectre : dans le menu "Radiométrie" il y a une fonction intitulée "auto-Planck". Essayons-la ! Une fenêtre s'ouvre qui nous propose un intervalle de température et un pas de calcul (figure 15).



Fig.15. La fenêtre de la fonction "Radiométrie/AutoPlanck".

Le logiciel va tenter de trouver automatiquement la courbe de Planck qui s'ajuste le mieux au profil sélectionné. Résultat : une température effective de 14 000 K. Un peu chaud peut-être ... à vérifier (figure 16).

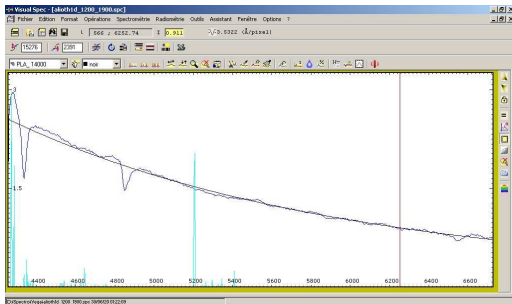


Fig.16. Le profil spectral corrigé, la position des raies du chrome, et le profil de Planck du corps noir à 14 000 K.

Tentons maintenant notre chance avec une étoile un peu moins chaude de la même constellation : Dubhe alias α Uma. Selon Wikipédia, c'est un système multiple. Quelles surprises va-t-il nous réserver ?

Voici pour commencer le profil brut après étalonnage en longueur d'onde : rien à voir avec les précédents ! On voit déjà qu'il y a beaucoup moins de bleu dans ce spectre ! (figure 17).

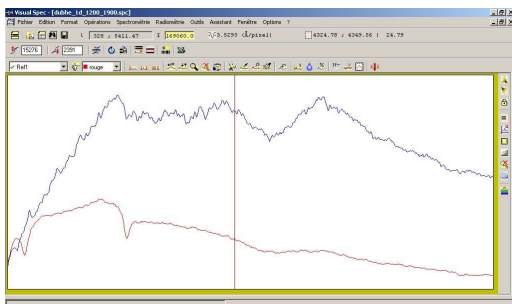


Fig.17. Spectre brut de Dubhe (bleu) et de Véga (rouge). Les échelles sont différentes.

Tentons la correction de la "réponse instrumentale" : manifestement le maximum de luminosité se situe dans l'infrarouge (figure 18) !

Tentons un profil de Planck avec un pas de 250K entre 3 000K et 5 000K. Réponse de Vspec : 4 250K, alors qu'une encyclopédie donne pour la composante principale une température de 4 500 K.

Pas si mal !

Essayons de comparer avec la bibliothèque : la composante principale devrait être de type K0 III. Les profils ne sont manifestement pas superposables, mais il y a des ressemblances plutôt encourageantes (figure 18).

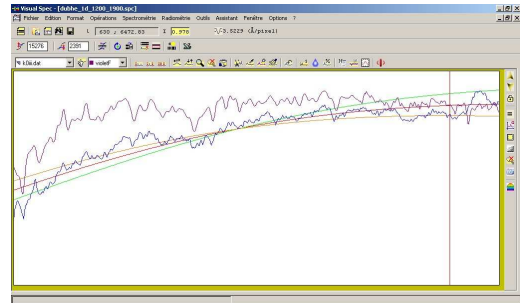


Fig.18. Spectre corrigé (bleu), spectre de la bibliothèque pour la classe K0 III (violet) et profils de Planck à 4000K (vert), 4250K (rouge) et 4500K (orange).

Pour finir, voici le résultat obtenu sur le spectre du gardien de l'ourse, Arcturus alias α Boo. Une encyclopédie la donne pour une étoile de type K 1,5 III pe, avec une température effective de 4 300K.

La bibliothèque de Vspec permet d'afficher le profil d'une étoile de type K1 III. L'accord est loin d'être parfait, mais il y a tout de même quelques ressemblances.

Si on utilise la fonction "auto-Planck" pour afficher le profil du corps noir qui s'approche le plus, on obtient 4 000K.

Là encore l'accord n'est pas parfait, mais l'ordre de grandeur reste acceptable.

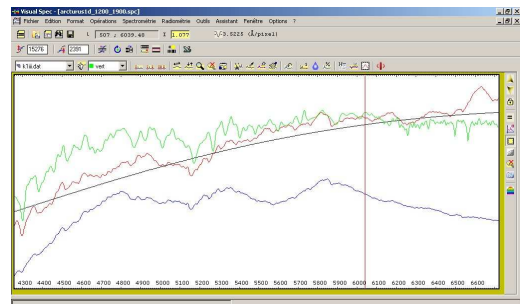


Fig.19. Arcturus : spectre brut (bleu), spectre corrigé (rouge), profil de Planck du corps noir à 4000K (noir) et spectre de la bibliothèque pour une étoile K1 III (vert).

Pour conclure nous dirons que ces premiers résultats ont été obtenus avec un traitement "minimal".

Il doit être assez facile, en soignant un peu plus l'acquisition (mise au point, temps de pose ...) et en soignant bien le montage optique, d'obtenir des profils beaucoup mieux résolus. Juste ce qu'il faut pour avoir envie d'aller un peu plus loin... ■

Jean-Michel Vienney se propose pour répondre à toutes vos questions sur le forum situé à l'adresse : <http://accs.inrp.fr/clea/vieclea/nouvelles-productions/spectrographie/forums>