

Principes de la réduction et de l'analyse des spectres

Introduction

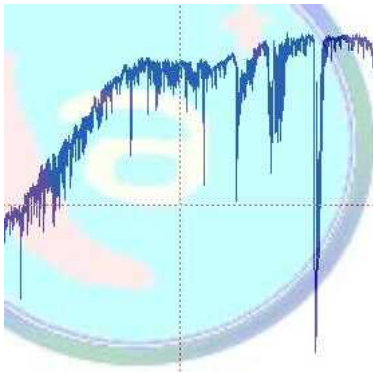
ABC de la
réduction des
spectres

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

B. MAUCLAIRE



28 septembre 2013

Introduction

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments

- Les amateurs sont aujourd'hui équipés et de CCD et de spectroscopes : Shelyak, L200, Dado, ...
- Les spectroscopes et CCD : présentent des défauts optiques et numériques intrinsèques.
- Les travaux des professionnels utilisent les spectres des amateurs : vingtaines de publications (δ Sco, ϵ Aur, HD57682, ...).
- Nécessité de formation et de standardisation des procédés.
- Nous allons voir :
 1. Les défauts à corriger dans les spectres.
 2. Les méthodes de réduction des spectres.
 3. L'exploitation astrophysique sur des séries de spectres.

ABC de la réduction des spectres

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments

Qu'obtient-on durant une nuit spectrale ?



Les déformations géométriques

CCD non parallèle au réseau $\Rightarrow$ tilt :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Quelques constats sur
les spectres bruts**

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Les déformations géométriques

Fonctionnement hors axe des lentilles $\Rightarrow$ smile d'axe y :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Quelques constats sur
les spectres bruts**

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

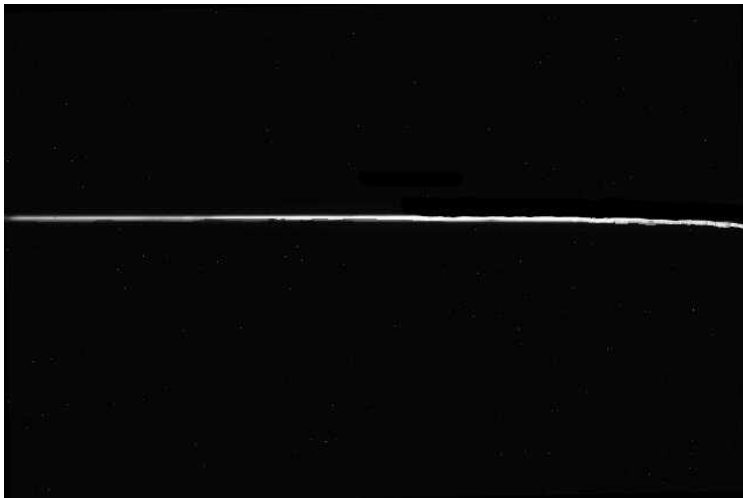
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Les déformations géométriques

Fonctionnement hors axe des lentilles $\Rightarrow$ smile d'axe x :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Quelques constats sur
les spectres bruts**

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

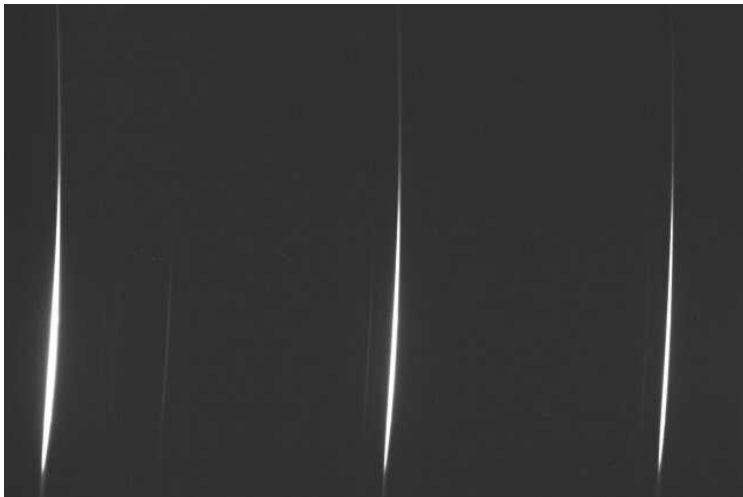
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Les déformations géométriques

Déplacement de l'étoile le long de la fente $\Rightarrow$ décalage vertical :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Quelques constats sur
les spectres bruts**

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

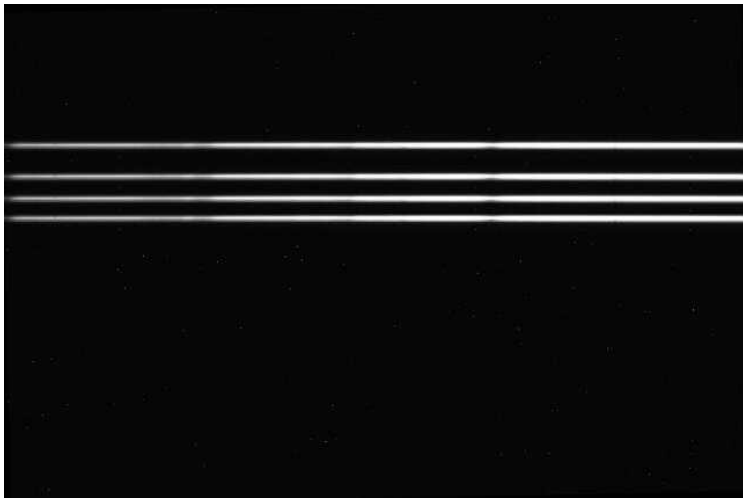
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Les déformations géométriques

Flexions mécaniques prépondérantes $\Rightarrow$ déplacement horizontal :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

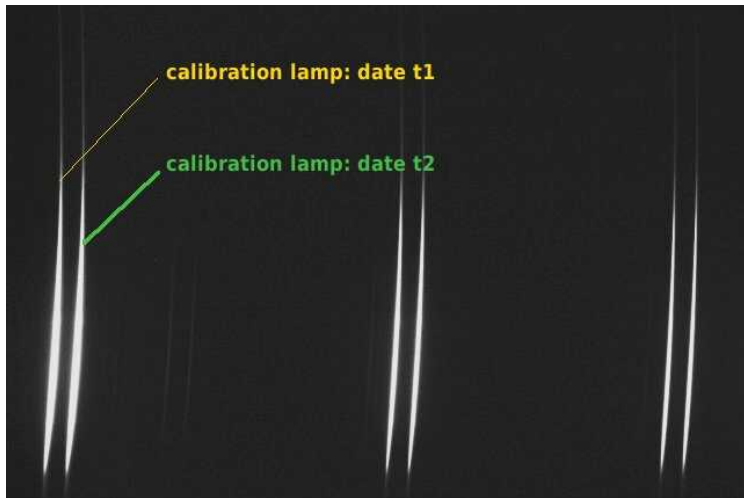
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

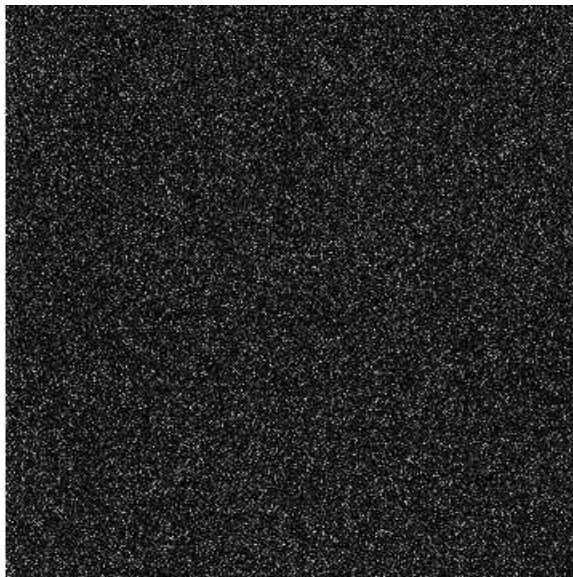
Conclusion

Compléments



Les effets liés au CCD

Bruit thermique → darks :



Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Quelques constats sur
les spectres bruts**

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommaton des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

Les effets liés au CCD

Courant électronique d'obscurité → offsets :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Quelques constats sur
les spectres bruts**

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

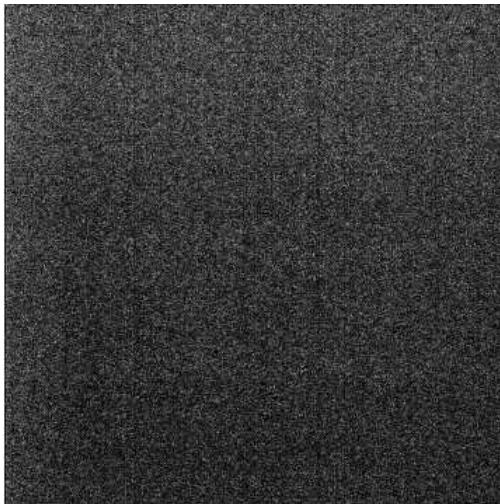
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Les effets relatifs à l'éclairement

Vignetage, poussières et non linéarité CCD → PLU :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Quelques constats sur
les spectres bruts**

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

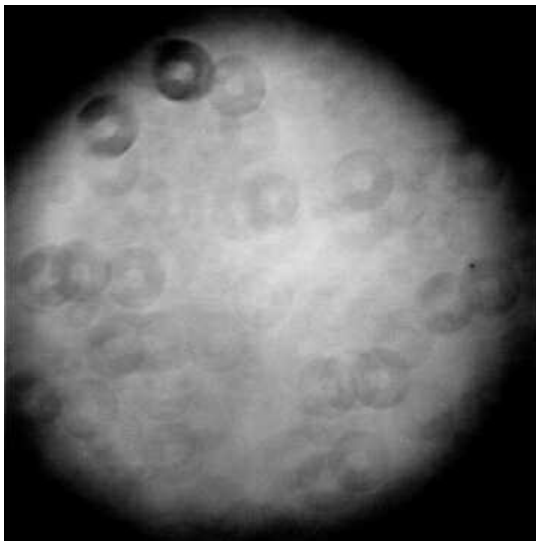
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

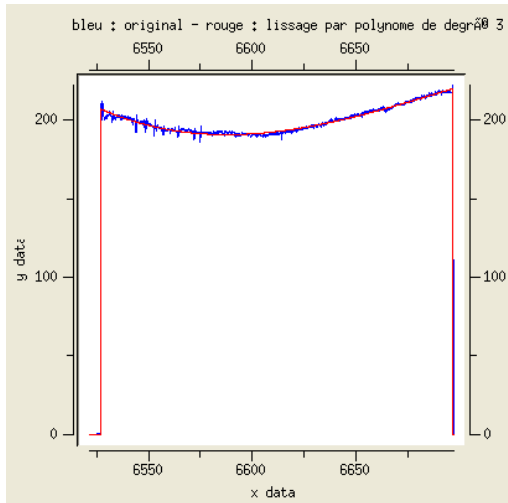
Conclusion

Compléments



Réponse en longueur d'onde du spectroscop+CCD

Réponse instrumentale :



Prétraitement des spectres

Étapes traditionnelles liées aux capteurs numériques fixés à une optique :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

**Prétraitement des
spectres**

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Image stellaire



Noir de l'image



Image de la PLU



Noir de la PLU



Image prétraitée

Correction des déformations géométriques

Le tilt :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

**Correction des
déformations
géométriques**

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Correction des déformations géométriques

Le tilt : `spc_autotilt fichier_spectre_2d.fit`

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

**Correction des
déformations
géométriques**

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments



Correction des déformations géométriques

sinon le smile d'axe y :

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

**Correction des
déformations
géométriques**

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

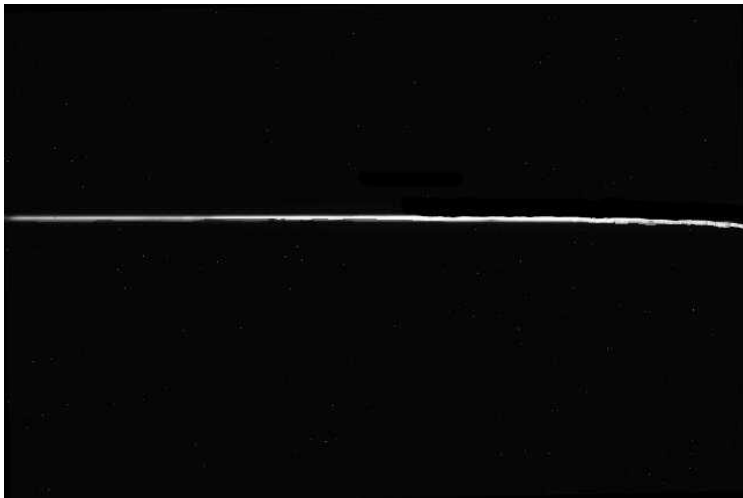
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments



Correction des déformations géométriques

sinon le smile d'axe y : `spc_smiley fichier_spectre_2d.fit`

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

**Correction des
déformations
géométriques**

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

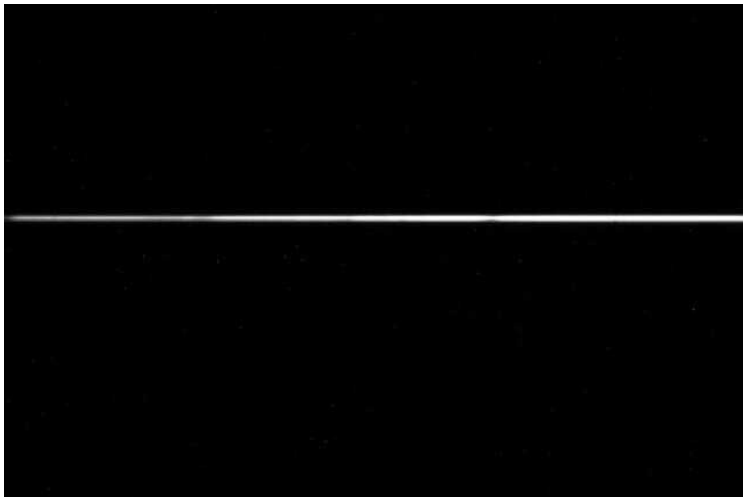
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments



Correction des déformations géométriques

Le smile d'axe x :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

**Correction des
déformations
géométriques**

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

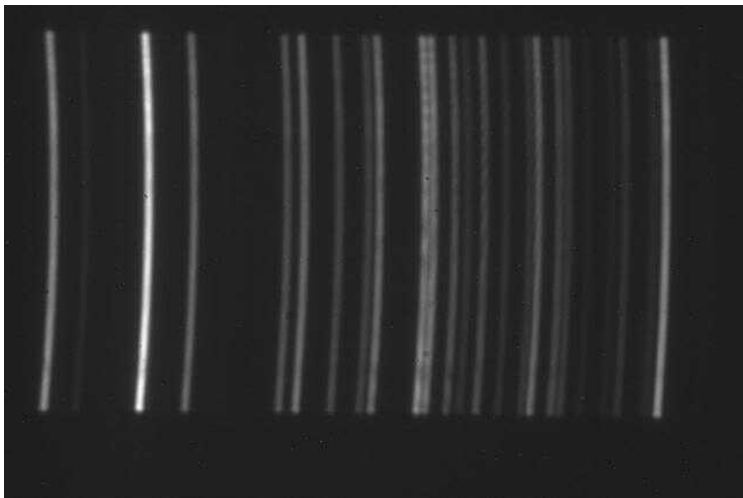
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Correction des déformations géométriques

Le smile d'axe x : `spc_smilex spectre_lampe_calibration.fit`

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

**Correction des
déformations
géométriques**

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

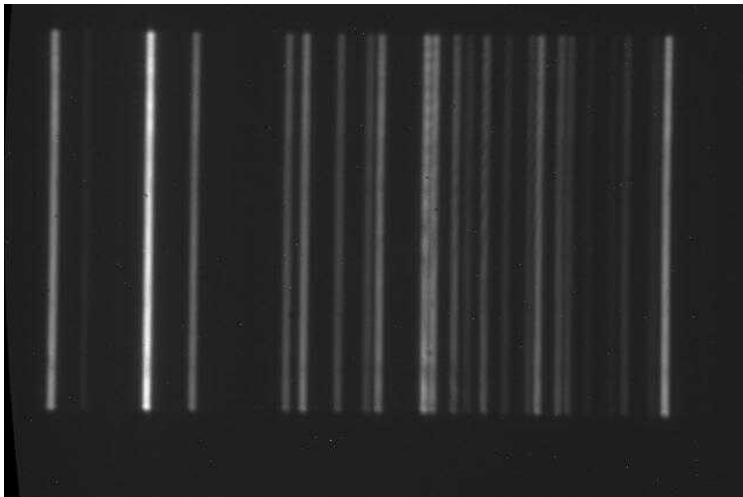
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Correction des déformations géométriques

Recalage verticale :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

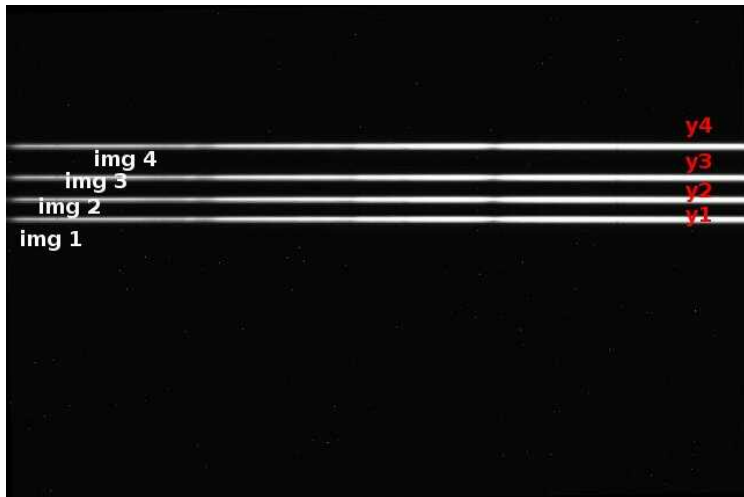
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments



Correction des déformations géométriques

Recalage verticale : `spc_register nom_générique_spectres_2d`

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

**Correction des
déformations
géométriques**

Sommaton des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

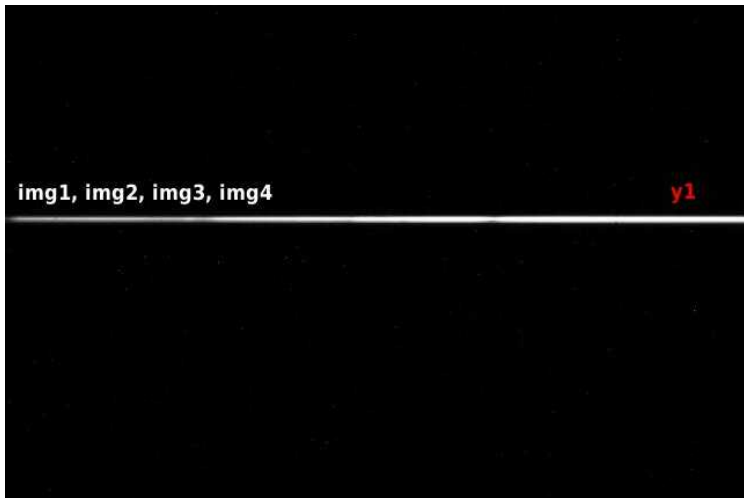
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments



Sommation des spectres 2D

- En 32 bits non signés.
- Plusieurs types de sommes selon les cas :
 - ▶ somme simple : maximise le flux.
 - ▶ médiane : élimine les cosmics et pixels divergents, diminution du flux.
 - ▶ kappa-sigma : le meilleur des deux mondes avec réjection des pixels abérants, flux non maximal malgré tout.
 - ▶ moyenne : sans intérêt.

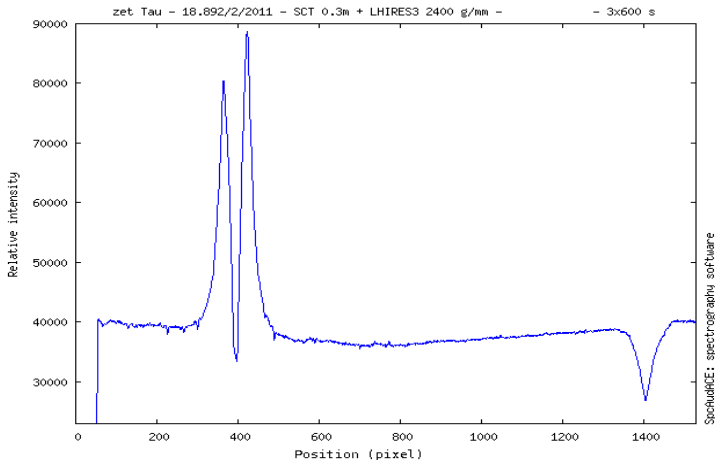
Fonction SpcAudace :

```
spc_somme <nom_générique> ?méthode somme (addi/moy/sigmakappa/med)?
```

- Cas des time series : pas de sommation.

Extraction du profil de raies

Passage 2D-1D :



Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

**Extraction du profil de
raies**

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

Extraction du profil de raies

Détermination de la zone optimale de binning :

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

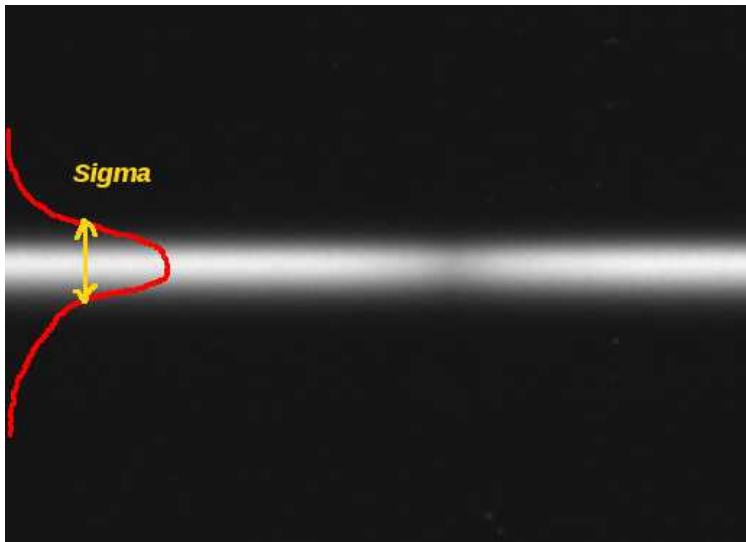
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

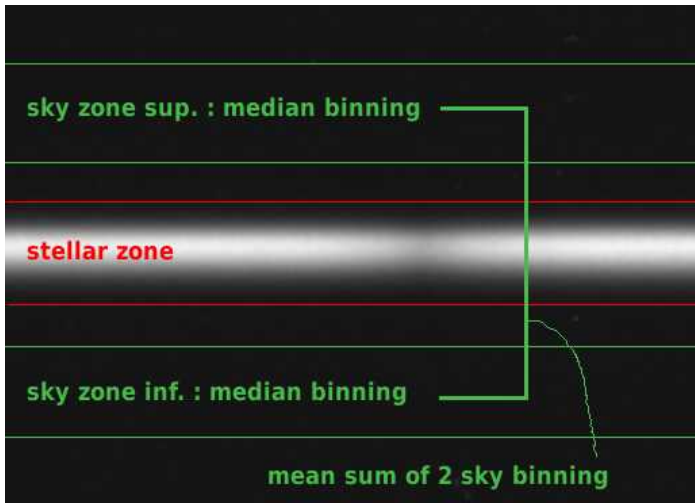
Compléments



Extraction du profil de raies

Soustraction du fond de ciel :

- Principe :



Extraction du profil de raies

Soustraction du fond de ciel :

- Réalisée au moment du binning du spectre.
- Variantes :
 - ▶ Somme moyenne dans sky zone.
 - ▶ Modélisation par un gradient.
 - ▶ Une seule des deux zones est utilisée (sup ou inf).
 - ▶ Modélisation du fond par un filtre d'extraction.
 - ▶ Aucune zone utilisée.

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

Extraction du profil de raies

Binning du spectre stellaire :

- Il faut éliminer les pixels abérants dans chaque colonne.
- Plusieurs méthodes :
 - ▶ Réjection simple.
 - ▶ Algorithme de Robertson.
 - ▶ Algorithme de Horne : gère mieux les faibles SNR
→ comportement par défaut.

Fonction SpcAudace :

```
spc_profil spectre_2D.fits  
?methode_soustraction_fond_de_ciel (moy, moy2, med, sup, inf, none, back)?  
?methode_de_detection_du_spectre (large, serre, moy)?  
?methode_de_bining (add, rober, horne)?
```

```
Ex. : spc_profil del_sco_2d.fit med serre horne
```

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

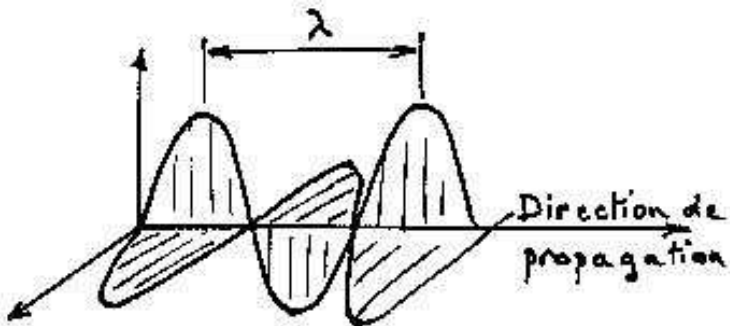
Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

Calibration en longueur d'onde

Rappels sur la longueur d'onde λ :



- C'est la période spatiale des ondes lumineuses (ici).
- L'unité courante : angström ($\text{\AA}$), $1 \text{\AA} = 1.10^{-10} \text{ m}$

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

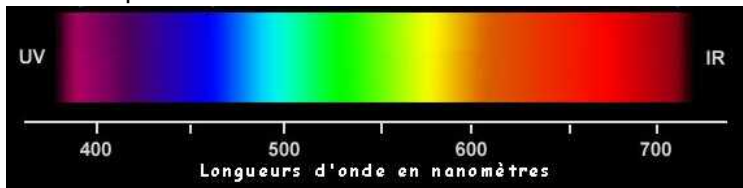
Conclusion

Compléments

Calibration en longueur d'onde

Rappels sur la longueur d'onde λ :

- Le spectre visible :



- Exemples de raies stellaires “célèbres” :

Raie	H α	H β	H γ	NaI	NaI	Ca
λ (Å)	6562,8	4861,3	4340,5	5889,9	58895,9	3968

Calibration en longueur d'onde

Calcul d'une loi de calibration :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils de
raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

- But : associer à chaque pixel x une longueur d'onde λ telle qu'au pixel $n^{\circ}1$, $\lambda = a$.
- Trouver les coefficients du polynôme de la forme :

$$\lambda = a + b(x - 1) + c(x - 1)^2 + \dots + c_n(x - 1)^n$$

- Utilisation d'une référence : lampe de calibration (Ne, Ar, Th...).
On connaît la longueur d'onde et la distribution de chaque raie d'émission.

Calibration en longueur d'onde

Spectre de lampe de calibration :

Introduction

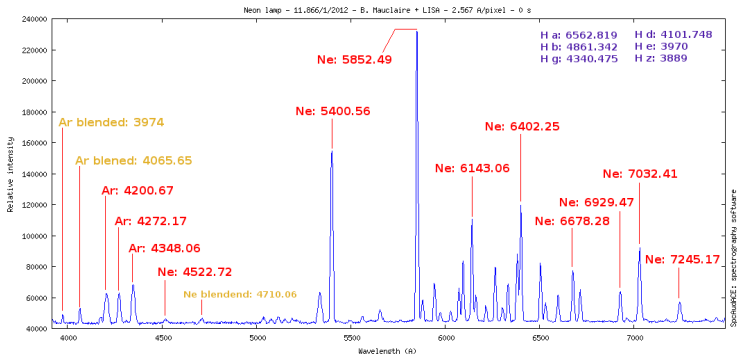
ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts
Prétraitement des
spectres
Correction des
déformations
géométriques
Sommaton des
spectres 2D
Extraction du profil de
raies
Calibration en
longueur d'onde
Détermination de la
réponse instrumentale
Rectification du
continuum
Exportation des profils de
raies
Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments



Calibration en longueur d'onde

Spectre de lampe de calibration :

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

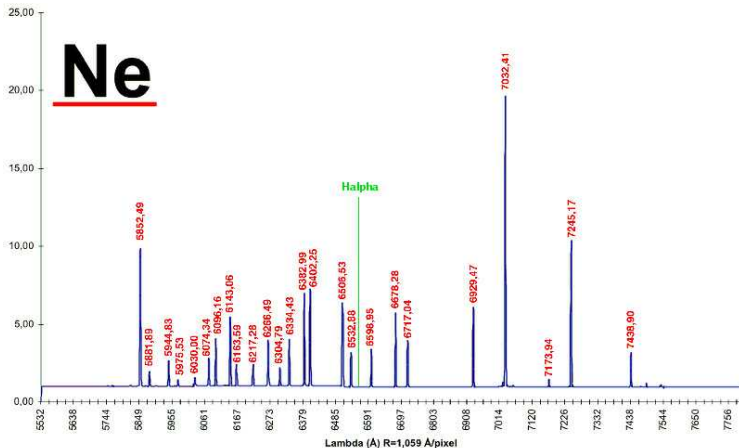
Exportation des profils de
raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments



Calibration en longueur d'onde

Calcul d'une loi de calibration :

- On applique la loi de calibration calculée à l'ensemble des profils de raies.
- La loi sera linéarisée ensuite en rééchantillonnant les intensités du profil :

$$\lambda = a + b(x - 1)$$

- ▶ Cela permet d'obtenir des fichiers FITS interoperables : les mots clés de l'entête du fichier mémorisent les coefficients a et b .
- ▶ Longueur d'onde du premier pixel :

$$\text{CRVAL1} = a / [\text{angstrom}]$$

- ▶ Dispersion linéaire :

$$\text{CDEL1} = b / [\text{angstrom/pixel}]$$

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

**Calibration en
longueur d'onde**

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

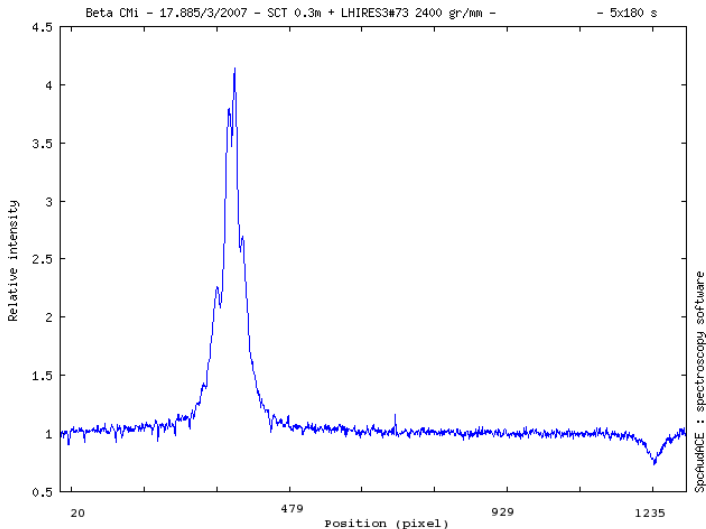
Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments

Calibration en longueur d'onde

Profil de raies non calibré de l'étoile :



Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

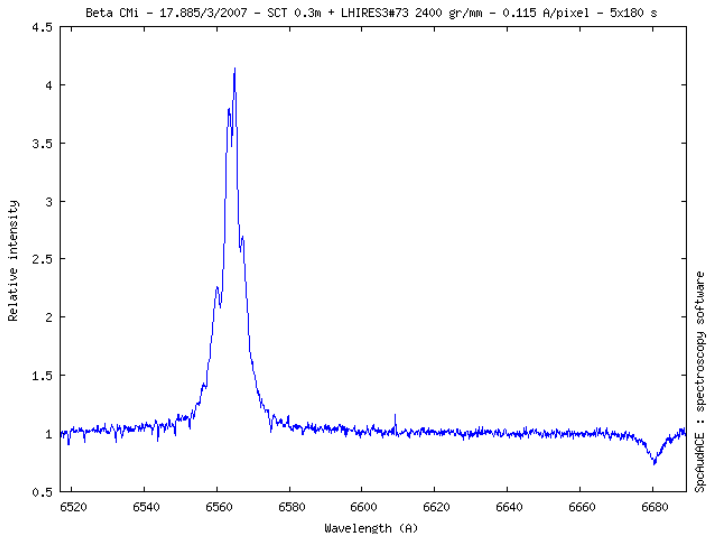
Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments

Calibration en longueur d'onde

Résultat après application de la loi de calibration :



Calibration en longueur d'onde

Quelques précautions :

- La répartition des raies choisies pour l'étalonnage doit être homogène sur l'ensemble du spectre.
- Prendre un spectre de lampe toute les heures.
- Gestion de certaines flexions mécaniques du spectroscopie qui créent majoritairement un décalage horizontal des spectres : encadrer la série de spectres stellaires avec un spectre de lampe azvant et après la série.
- Le recalage horizontal sera alors géré par le pipeline.

Fonction SpcAudace :

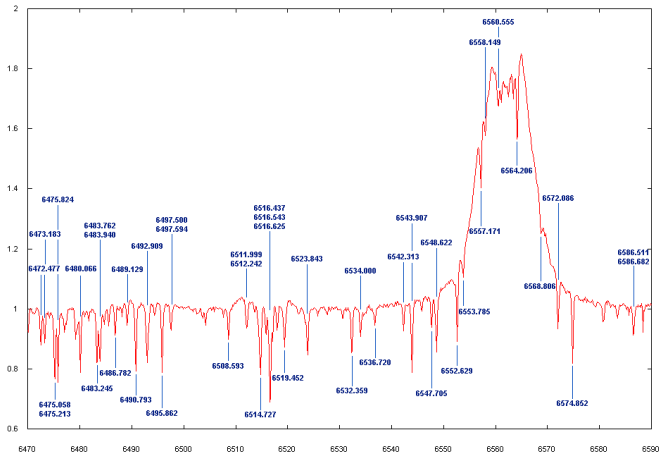
```
spc_calibren profil_de_raie_fits x1 lambda1 x2 lambda2 ...
```

```
Ex. : spc_calibren lampe_del_sco.fit 125.7 6532.46 612.3 6598.17
```

Calibration en longueur d'onde

Amélioration de calibration :

- Utilisation des raies telluriques (H_2O) dues à l'atmosphère terrestre.



Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

**Calibration en
longueur d'onde**

Détermination de la
réponse instrumentale

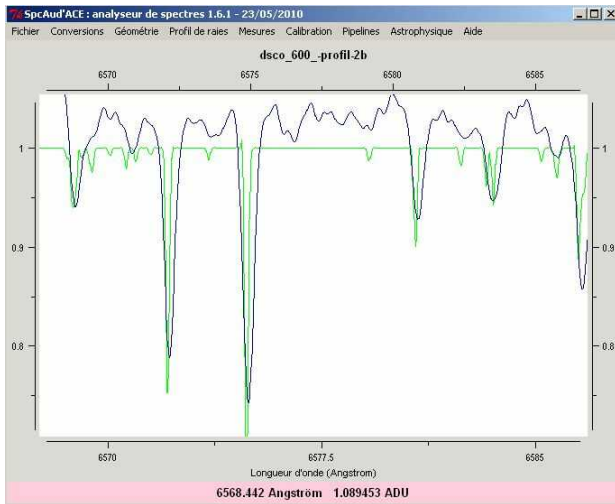
Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Calibration en longueur d'onde

Permet une rectification de la loi de calibration (coéff. a) :



Calibration en longueur d'onde

Rectification automatique de la loi de calibration :

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

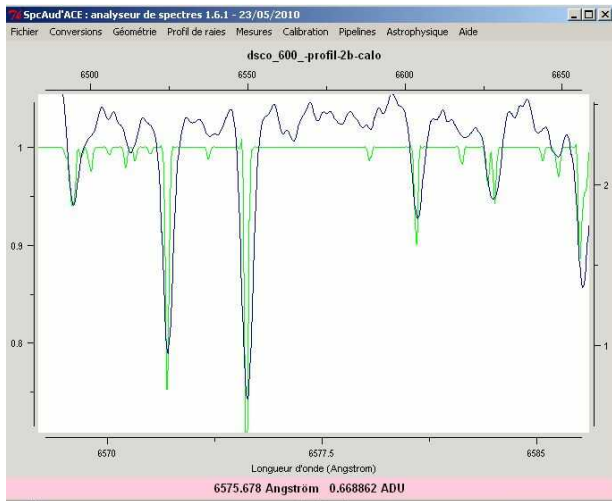
Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments



Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts
Prétraitement des
spectres
Correction des
déformations
géométriques
Somme des
spectres 2D
Extraction du profil de
raies
**Calibration en
longueur d'onde**
Détermination de la
réponse instrumentale
Rectification du
continuum
Exportation des profils de
raies
Heureusement, il y a
les pipelines

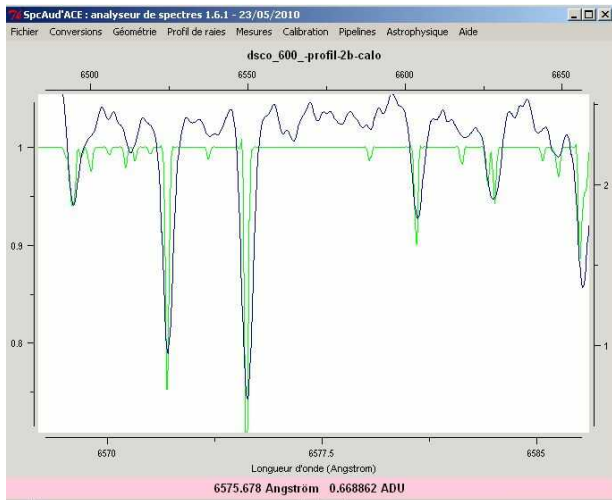
Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments

Calibration en longueur d'onde

Rectification automatique de la loi de calibration :



Fonction SpcAudace automatique :

```
spc_calibretelluric del_sco_calibre.fit
```

Calibration en longueur d'onde

Regard sur la qualité de la calibration :

- Permet une estimation de la qualité de la calibration avec les raies telluriques : **RMS**

```
# ===== Détermine la meilleure calibration =====  
  
Spectre de calibration avec (2) de meilleure qualité (dec de Meanshift).  
Loi de calibration finale linéarisée : 6524.33283782+0.114841194984*(x-1)  
Qualité de la calibration :  
RMS=0.0467691125425 A  
Ecart moyen=-0.00108927777789 A  
  
# Ouverture d'un profil de raies calibré linéairement..  
zet_tau--profil-final-ocal
```

- Correction de la vitesse héliocentrique : si demandée (pas fait par défaut pour les pros.).

Détermination de la réponse instrumentale

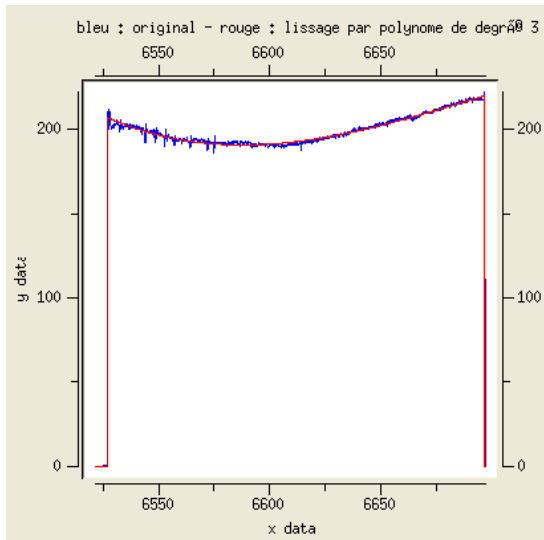
- Le spectrographe ne possède pas une réponse linéaire en intensité selon la longueur d'onde.
- On utilise le spectre d'étoiles de référence (Altair, Régulus, ...) dont on possède le spectre correctement calibré en flux.
→ Atlas spectral : UVES, Elodie, ...
- On réalise le spectre de cette étoile avec notre spectrographe.
- La réponse instrumentale s'obtient par :

$$RI = \text{lissage} \left(\frac{\text{Profil_Altair_ciel}}{\text{Profil_Altair_UVES}} \right)$$

`spc_rinstrum profil_etoile profil_etoile_atlas`

Détermination de la réponse instrumentale

Exemple :



Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

**Détermination de la
réponse instrumentale**

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

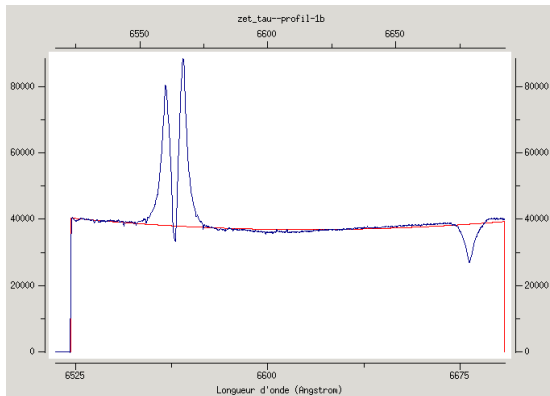
Rectification du continuum

- Soit par mise à l'échelle du continuum à 1 pour une longueur d'onde donnée :

`spc_rescalecont profil.fit`

- Soit par normalisation : toutes les valeurs du continuum sont mises à 1 :

`spc_autonorma profil.fit`



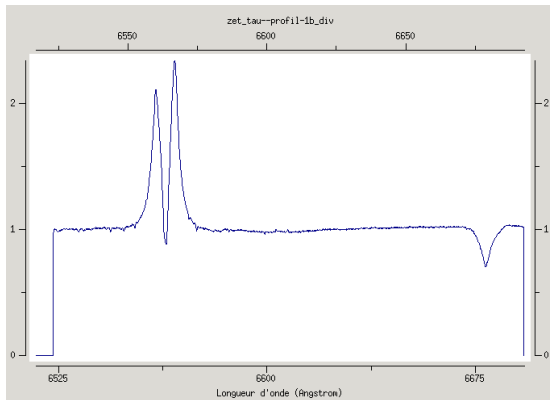
Rectification du continuum

- Soit par mise à l'échelle du continuum à 1 pour une longueur d'onde donnée :

`spc_rescalecont profil.fit`

- Soit par normalisation : toutes les valeurs du continuum sont mises à 1 :

`spc_autonorma profil.fit`



Exportation des profils de raies

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments

- Mise à la norme BeSS (base de données des étoiles Be et Herbig).
 - ▶ Entête FITS correctement renseignée.
 - ▶ Format reconnu par la communauté professionnelle.
- Export d'un profil au format d'image PNG :
 - ▶ Pour communiquer avec ses collaborateurs un résultat immédiatement évocateur sans nécessité d'un logiciel particulier.
 - ▶ Pour alimenter un site web collaboratif de campagne d'observation.

Introduction

ABC de la réduction des spectres

- Quelques constats sur les spectres bruts
- Prétraitement des spectres
 - Correction des déformations géométriques
 - Sommation des spectres 2D
- Extraction du profil de raies
- Calibration en longueur d'onde
- Détermination de la réponse instrumentale
- Rectification du continuum
- Exportation des profils de raies
- Heureusement, il y a les pipelines

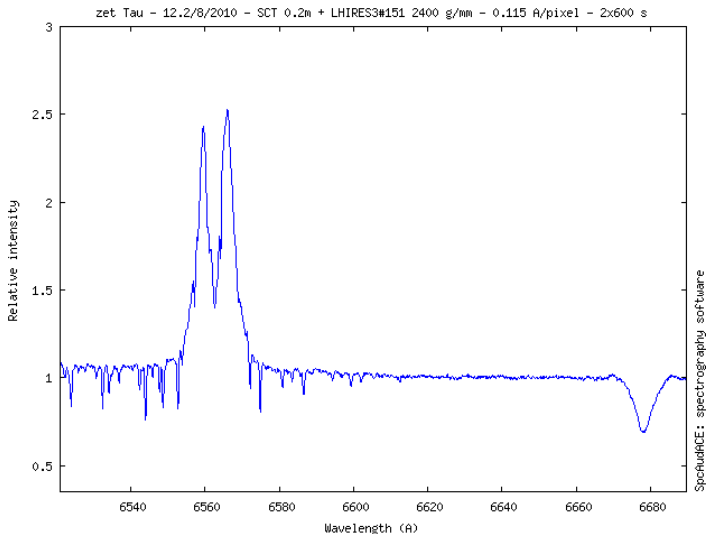
Exploitation astrophysique de vos spectres

Conclusion

Compléments

Exportation des profils de raies

Exemple d'image PNG :



Heureusement, il y a les pipelines

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

**Heureusement, il y a
les pipelines**

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

- Toutes ces opérations sont réalisées de façon enchaînée et en 3 clics.
- Exemples de logiciels amateur utilisant des pipelines :
 - ▶ ISIS : C. Buil.
 - ▶ [SpcAudace](#) : B. Mauclaire.
 - ▶ eShell Audela : M. Pujol.
 - ▶ Prism : S. Charbonnel.

Heureusement, il y a les pipelines

Exemple du pipeline d'SpcAudace :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Quelques constats sur
les spectres bruts

Prétraitement des
spectres

Correction des
déformations
géométriques

Sommation des
spectres 2D

Extraction du profil de
raies

Calibration en
longueur d'onde

Détermination de la
réponse instrumentale

Rectification du
continuum

Exportation des profils
de raies

Heureusement, il y a
les pipelines

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Conclusion

Compléments

Réduction de spectres stellaires

Réduction de spectres stellaires

Lampe de calibration : nom du spectre 2D ou nom du 1ier spectre 2D ou nom du spectre 1D calibré **ne_rr_lyr-1.fit**

Nom générique des spectres bruts rr_lyr- ▾

Nom générique des noirs d_15_600-smd3.fit ▾

Nom générique des plu(s) f2400t- ▾

Nom générique des noirs de plu df2400t-smd3.fit ▾

Nom générique des offset(s) none ▾

Spectre 1D de la réponse intrumentale **reponse_instrumentale-3.fit**

Sélection manuelle d'une raie pour la géométrie (o/n) 0 ▾

Calibration avec plusieurs spectres de lampe (o/n) 0 ▾

Calibration supplémentaire avec raies telluriques (o/n) 0 ▾

Normalisation (oui/émission/absorption/rescale/non) r ▾

Inversion gauche-droite des profils de raies (o/n) n ▾

Retrait des cosmics (o/n) n ▾

Export au format de la base Bess (o/n) n ▾

Export vers un graphique au format PNG (o/n) n ▾

Traite chaque spectre individuellement (o/n) 0 ▾

Annuler OK

Heureusement, il y a les pipelines

- Les fichiers en sortie du pipeline donne les résultats intermédiaires : utile pour vérification.

Exemple de fichiers obtenus :

<code>zet_tau--spectre2D_traite.fit</code>	: Spectre 2D prétraité et corrigé des déformations géométriques
<code>zet_tau--profil-1a.fit</code>	: Profil de raies non calibré
<code>zet_tau--profil-1b.fit</code>	: Calibré en longueur d'onde
<code>zet_tau--profil-1c_nonlin.fit</code>	: Corrigé de la réponse instrumentale
<code>zet_tau--profil-1c.fit</code>	: Corrigé de la réponse instrumentale et loi de calibration linéarisée
<code>zet_tau--profil-2b.fit</code>	: Avec continuum rescalé ou normalisé
<code>zet_tau--profil-2b-calo.fit</code>	: Calibration rectifiée avec les raies telluriques

Heureusement, il y a les pipelines

- Particularité SpcAudace : entête FITS enrichie avec tous les paramètres calculés durant les opérations.

Exemple de mots clef ajoutés :

```
SPC_HBIN= 14.9601 / [pixel] Binning thickness
SPC_TILT= 0.555853 / [degres] Tilt angle
SPC_TILX= 765 / [pixel] Tilt x center
SPC_TILY= 510 / [pixel] Tilt y center
SPC_YBIN= 731 / [pixel] Y heigh for binning
SPC_SLX1= 1471.23 / [pixel] ycenter smilex
SPC_SLX2= 2.849649E-05 / coef deg2 smilex
CRVAL1  = 6524.17445199 / [angstrom]
CDELTA1 = 0.114914760647 / [Angstrom/pixel]
CRPIX1  = 1 / [pixel] Reference pixel
CUNIT1  = 'angstrom' / Wavelength unit
CTYPE1  = 'Wavelength'
SPC_RESP= 15443. / Power of resolution at wavelength SPC_RESL
SPC_RESL= 6598.95300019 / [angstrom] Wavelength
                                where power of resolution is computed
SPC_RMS0 = 2.096967E-03 / [angstrom] RMS regarding telluric lines
SPC_NORM= 'Dividing by continuum polynome extracted'
                                / Technic used for normalisation
```

- Une petite démo pour mieux se faire une idée !

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

**Exploitation
astrophysique de
vos spectres**

Ce qui est mesurables

Voir l'évolution d'une
raie au cours du
temps

Mesure de la vitesse
radiale

Mesure du rapport
 V/R d'une raie

Mesure de la FWHM
d'une raie

Mesure de la largeur
équivalente

Création et
exploitation de séries
de mesures

Spectre dynamique
d'une série

Post-traitement des
pulsantes

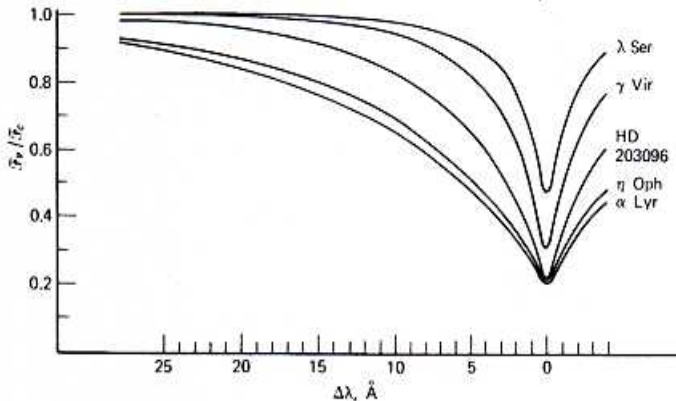
Scripts personnalisés

Conclusion

Compléments

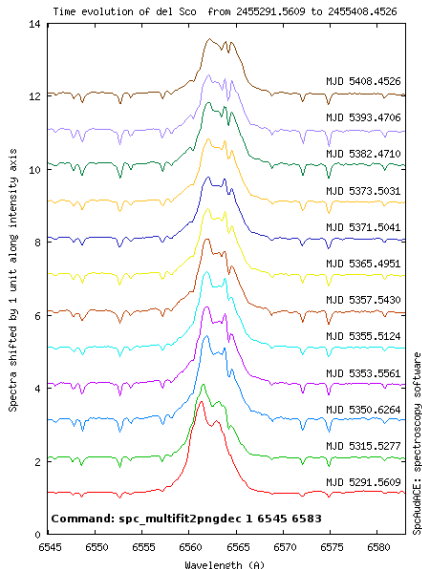
Exploitation astrophysique de vos spectres

Ce que l'on peut mesurer dans les spectres



- Profondeur : température effective.
- Largeur : densité, rotation, expansion.
- Translation : effet Doppler, vous savez l'ambulance.
- Modification de la forme : échanges de matière, disque, activité de l'étoile. . .

Voir l'évolution d'une raie au cours du temps



Voir l'évolution d'une raie au cours du temps

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Exploitation astrophysique de vos spectres

Ce qui est mesurables

Voir l'évolution d'une
raie au cours du
temps

Mesure de la vitesse
radiale

Mesure du rapport
V/R d'une raie

Mesure de la FWHM
d'une raie

Mesure de la largeur
équivalente

Création et
exploitation de séries
de mesures

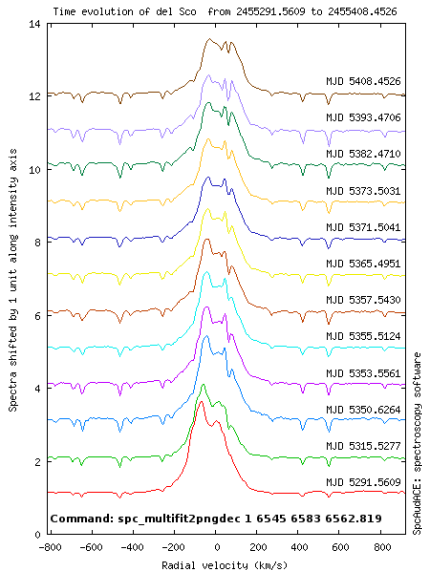
Spectre dynamique
d'une série

Post-traitement des
pulsantes

Scripts personnalisés

Conclusion

Compléments



Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Ce qui est mesurable
Voir l'évolution d'une
raie au cours du
temps

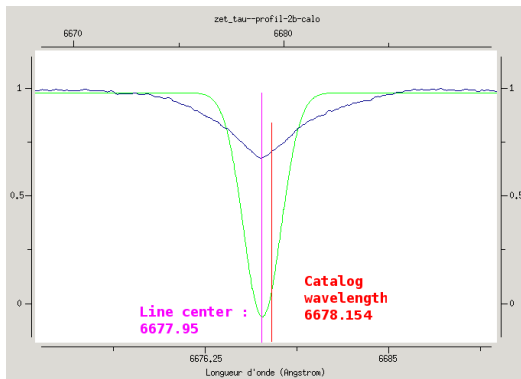
Mesure de la vitesse
radiale

Mesure du rapport
V/R d'une raie
Mesure de la FWHM
d'une raie
Mesure de la largeur
équivalente
Création et
exploitation de séries
de mesures
Spectre dynamique
d'une série
Post-traitement des
pulsants
Scripts personnalisés

Conclusion

Compléments

Mesure de la vitesse radiale

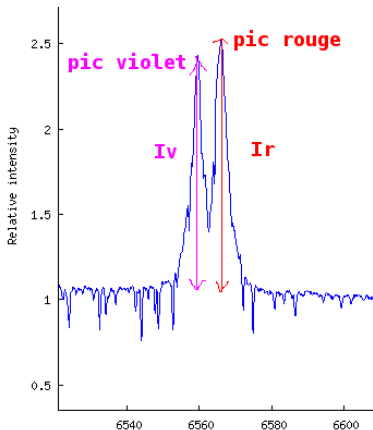


Commande :

```
spc_vradiale profil_raies_étalonné  
type_raie (e/a) lambda_raie_approchée  
lambda_réf
```

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Mesure du rapport V/R d'une raie

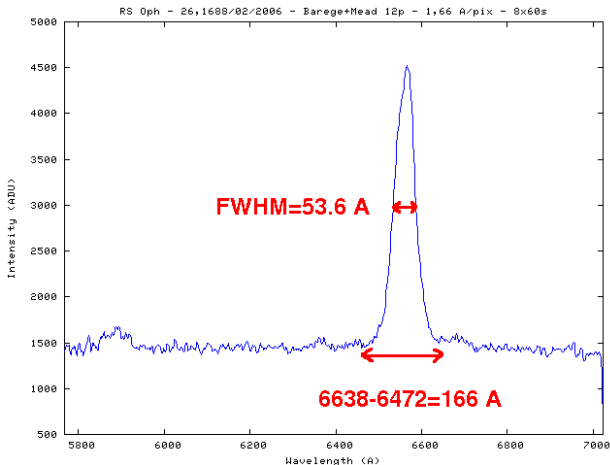


Commande :

$$V/R = \frac{I_{\text{pic-violet}}}{I_{\text{pic-rouge}}}$$

```
spc_vrmes nom_profil_raies lambda_raie_Violet  
lambda_raie_Rouge largeur_raie  
?pourcent_RMS_rejet (150)?
```

Mesure de la FWHM d'une raie

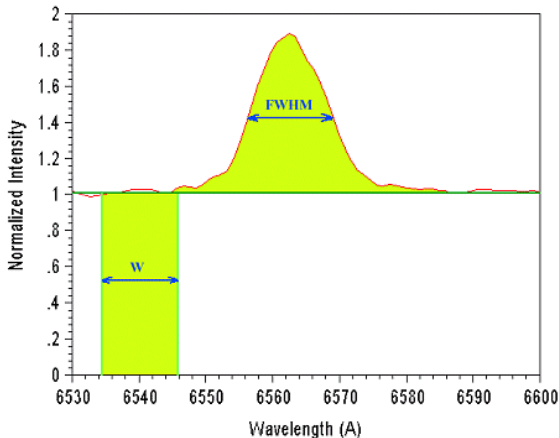


Modélisation par
une gaussienne.

```
spc_fwhm profil_de_raies_lineaire  
lambda_debut lambda_fin a/e
```

Mesure de la largeur équivalente

Définition de la largeur équivalente (EW) :

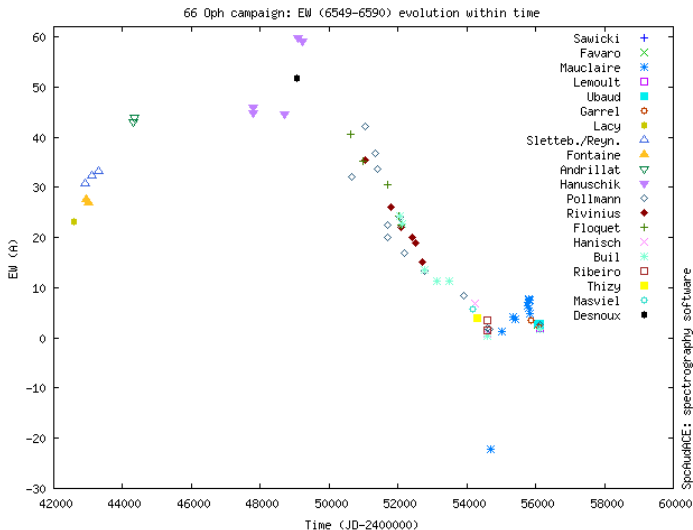


$$EW = \sum_{\lambda_{\text{deb}}}^{\lambda_{\text{fin}}} \frac{I_c - I_{\lambda}}{I_c}$$

Aire calculée par intégration numérique.
Suivi de l'activité stellaire et du disque.

Mesure de la largeur équivalente

Utilité de la largeur équivalente :



Mesure de la largeur équivalente

Précautions à prendre :

- Nécessité de modéliser le continuum pour connaître I_C dans la raie :
 - ▶ Étape critique (cf. OHP 2010 Workshop).
 - ▶ Choisir pour toutes les mesures une méthode unique d'extraction du continuum.
- Choisir les mêmes longueurs d'onde limites : choix selon l'étoile et les spécifier dans les diagrammes.
- Toujours faire un calcul d'estimation de l'erreur.
- Éviter l'influence de l'opérateur : une fonction logicielle sans usage de la souris !

- Exemple :

```
spc_ew nom_profil_raies lambda_debut lambda_fin  
?taux_doucissage_continuum (0-[6]-15)?  
?efface_continuum(o)?  
?degré_polynomes_continuum_methode_pbas(2)?
```

Mesure de la largeur équivalente

Détermination du continuum :

Introduction

ABC de la
réduction des
spectres

Exploitation
astrophysique de
vos spectres

Ce qui est mesurable

Voir l'évolution d'une
raie au cours du
temps

Mesure de la vitesse
radiale

Mesure du rapport
V/R d'une raie

Mesure de la FWHM
d'une raie

**Mesure de la largeur
équivalente**

Création et
exploitation de séries
de mesures

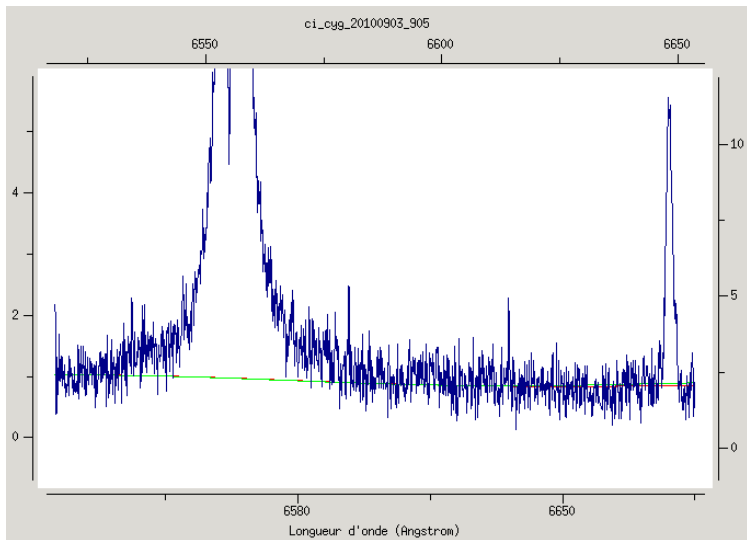
Spectre dynamique
d'une série

Post-traitement des
pulsantes

Scripts personnalisés

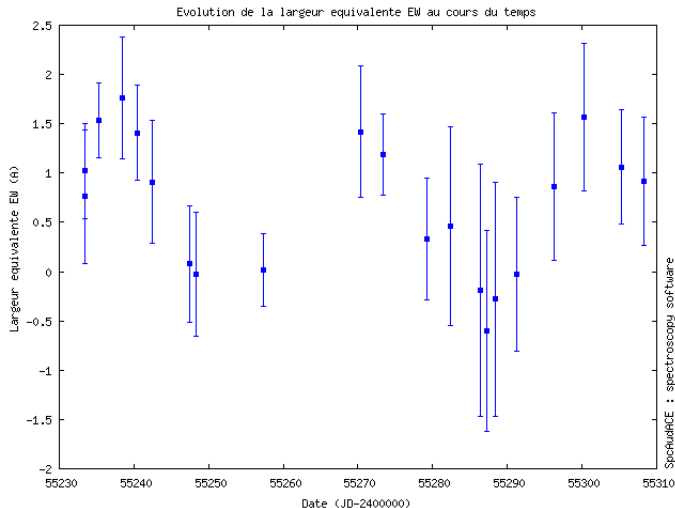
Conclusion

Compléments



Création et exploitation de séries de mesures

Mesure de EW sur une série de spectres :

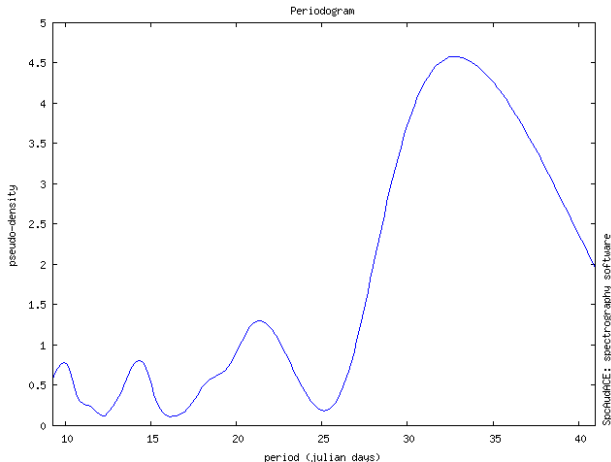


`spc_ewcourbe lambda_deb lambda_fin`

→ traite les fichiers du répertoire.

Création et exploitation de séries de mesures

Périodogramme de Scargle-Lomb :



```
spc_periodogram data_filename.dat time_unit measured_quantity  
?nb_periodes_plausibles (10)? ?period_min (0.)?  
?period_max (=duree enregistrement des mesures)?  
?valeur minimum autorisee pour le pas d'echantillonnage du periodogram
```

Introduction

ABC de la réduction des spectres

Exploitation astrophysique de vos spectres

Ce qui est mesurables
Voir l'évolution d'une
raie au cours du
temps

Mesure de la vitesse
radiale

Mesure du rapport
V/R d'une raie
Mesure de la FWHM
d'une raie

Mesure de la largeur
équivalente

Création et exploitation de séries de mesures

Spectre dynamique
d'une série

Post-traitement des
pulsantes

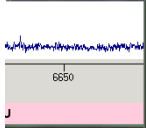
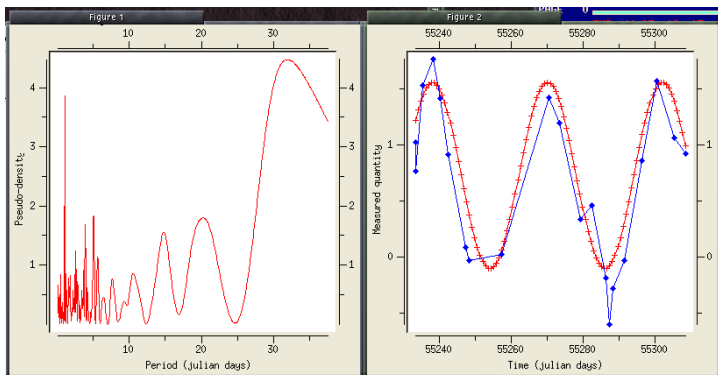
Scripts personnalisés

Conclusion

Compléments

Création et exploitation de séries de mesures

Détermination d'une période de variation :



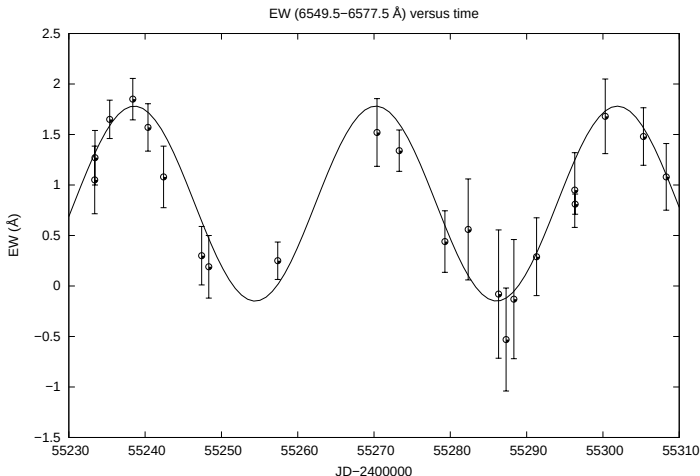
spc_periodogram ewcoube_20100421.dat "julian days"

```
# Nombre d'échantillons de données : 23  
# Maximum N°0 trouve (4.47647115583) pour une période de 31.9115954317  
# Maximum N°1 trouve (1.79482217775) pour une période de 20.1689981349  
# Maximum N°2 trouve (1.55264272849) pour une période de 14.7326104974  
# Estimated amplitude : -0.830212467181 and time shift : 7.1797123323  
# periodogram.dat
```

→ Ajustement d'une sinusoïde et calcul de la phase.

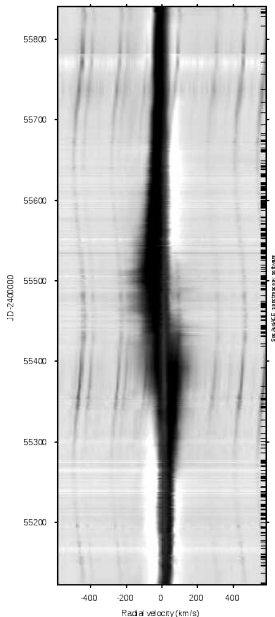
Création et exploitation de séries de mesures

Détermination d'une période de variation :



Ajustement d'une sinusoïde avec la période principale issue du périodogramme.

Spectre dynamique d'une série



- Idéal pour les phénomènes de pulsation et de binarité.
- Exemple de commande :

```
spc_dynagraph lambda_deb lambda_fin  
lambda_reference interpolation(o/n)  
RA DEC
```

Post-traitement des pulsantes

- Retrait des cosmics dans le profil de raies :

Fonction SpcAudace :

```
spc_rmcosmics _rr_lyrae-b--20130919_936 2
```

- → vérifier la liste des raies trouvées avec celles observées.
- Lissage doux des spectres de la série :

Fonction SpcAudace :

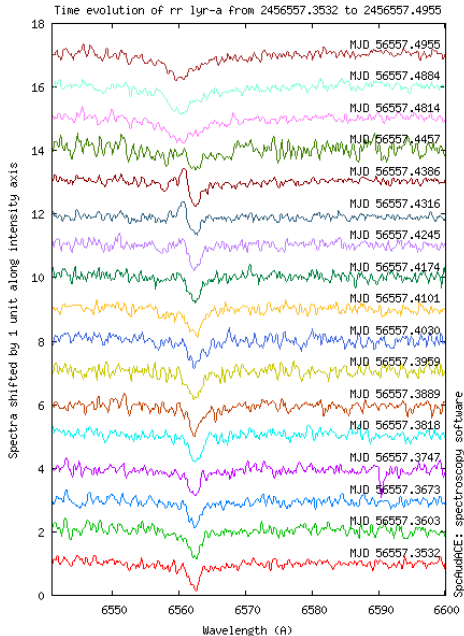
```
bm_cmd "spc_smooth %s"
```

- Vue d'ensemble es spectres de la nuit :

Fonction SpcAudace :

```
spc_multifit2pngdec 1
```

Post-traitement des pulsantes



Spcscripts personnalisés

- Appliquer une commande à tous les fichiers d'un répertoire :
- ```
bm_cmd "spc_ew %s 6530 6600 6 o"
```
- Script de post-production : enchaîner mise en forme et mesures.

## *Exemple de succession de tâches :*

```
Complétion du header FITS
Correction de la vitesse héliocentrique
Normalisation
Formatage du nom de fichier
Export PNG et Postscript
```

- Exploitation des spectres d'une campagne d'observation :  $\epsilon$  Aur, HD57682, RR Lyr bien sûr !

# Spcripts personnalisés : possibilités quasi-infinies

## Exemple :

```
proc bm_hd50138 { args } {
 global audace conf tcl_platform
 set nbargs [llength $args]
 if { $nbargs==0 } {
 set resolution $res_dflt
 set conti_wave $wconti_dflt
 } elseif { $nbargs==1 } {
 ...
 #--- Rescaling des profils par rapport au continuum et calcul du SNR :
 set listefiles [lsort -dictionary [glob -dir $audace(rep_images) -tail *$conf(extension)
 set nbfiles [llength $listefiles]
 foreach fichier $listefiles {
 set fichier [file rootname $fichier]
 set filenorma [spc_autonorma $fichier]
 set snr [spc_snr $filenorma]
 set msnr [expr $msnr+$snr]
 ...
 set msnr [expr round($msnr/$nbfiles)]
 #--- Renomme chaque fichier pour etre de la forme hd50138_yyyymmdd_fff :
 ...
 #--- Converti en dat et construit la liste des fichiers .dat pour Gnuplot :
 foreach fichier $listefiles_named {
 spc_fits2dat "$fichier"
 ...
 #--- Construit le script gnuplot :
 ::console::affiche_prompt "\nConstruit le script gnuplot et tracé du graphique de synthèse
 set titre "HD50138: ${annee}/${mois}/${jour} ${exptime}s serie, R=$resolution, mean SNR=$msnr
 set fileout "hd50138_serie_${dateobs}.pdf"
 return $fileout
 }
 }
```



# Spcripts personnalisés : résultat

Introduction

ABC de la  
réduction des  
spectres

Exploitation  
astrophysique de  
vos spectres

Ce qui est mesurable

Voir l'évolution d'une  
raie au cours du  
temps

Mesure de la vitesse  
radiale

Mesure du rapport  
 $V/R$  d'une raie

Mesure de la FWHM  
d'une raie

Mesure de la largeur  
équivalente

Création et  
exploitation de séries  
de mesures

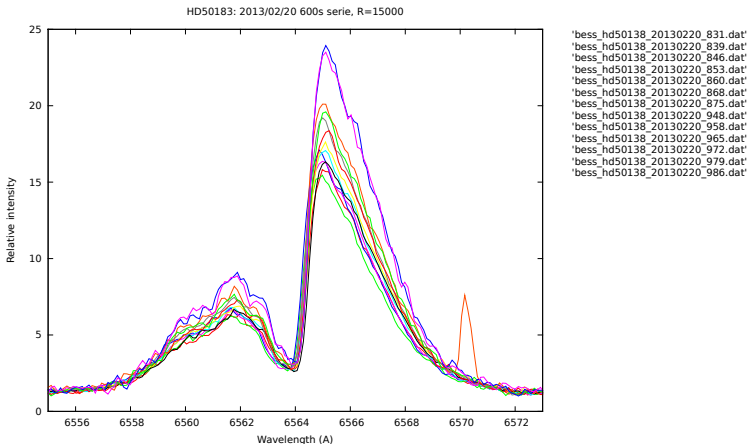
Spectre dynamique  
d'une série

Post-traitement des  
pulsantes

Spcripts personnalisés

Conclusion

Compléments



# Conclusion

Introduction

ABC de la  
réduction des  
spectres

Exploitation  
astrophysique de  
vos spectres

Conclusion

Compléments

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline : évite l'influence de l'opérateur et gain de temps.
- Le contrôle de la qualité : résultats intermédiaires et mots clé ou log.
- Chaque mesure doit être accompagnée de l'estimation de son erreur.
- **À vous de jouer !**

# Quand se montrera notre étoile. . .

Introduction

ABC de la  
réduction des  
spectres

Exploitation  
astrophysique de  
vos spectres

Conclusion

Compléments



# Détermination de la température électronique

Introduction

ABC de la  
réduction des  
spectres

Exploitation  
astrophysique de  
vos spectres

Conclusion

Compléments  
Température et  
densité électronique

- Commande : `spc_te profil_de_raies_etalonne  
largeur_raie`
- `# spc_te m42_061209 16`  
# Le température électronique de la  
nébuleuse est :  
12158.3809392 Kelvin ;  $R(0III)=124.239096676$
- Les valeurs usuelles de  $T_e$  pour les régions HII vont  
de 7000 à 11000 K. Notre mesure légèrement  
supérieure.

# Détermination de la densité électronique

Introduction

ABC de la  
réduction des  
spectres

Exploitation  
astrophysique de  
vos spectres

Conclusion

Compléments

Température et  
densité électronique

- Commande : `spc_ne profil_de_raies_etalonne`  
`Te largeur_raie`
- ```
# spc_ne m42_061209 12158 12
```

La densité électronique de la nébuleuse
est : $4622.2806091 \text{ e}^-/\text{cm}^3$; $R(\text{SII})=0.60396$

```
# spc_ne m42_061209 12158 13
```

La densité électronique de la nébuleuse
est : $3785.84178667 \text{ e}^-/\text{cm}^3$; $R(\text{SII})=0.63368$
- Les valeurs usuelles de N_e pour les régions HII vont
de 80 à $5000 \text{ e}^-/\text{cm}^3$. Notre mesure semble donc
cohérente.