

Aide-mémoire specINTI / specINTI Editor V2

Projet Sol'Ex/Star'Ex : <http://www.astrosurf.com/solex>

Christian Buil, Valérie Desnoux, octobre 2024

1. Objet

Ce document présente **specINTI** et **specINTI Editor** (version V2 et ultérieures). Il ne s'agit pas d'un manuel complet d'usage, mais plutôt d'un aide-mémoire des fonctions principales dans des situations courantes, couvrant les modes de traitement en haute et basse résolution spectrale, ainsi qu'une section dédiée aux spectres d'objets étendus (tels que les nébuleuses). Référez-vous à ce document en cas de doute sur le déroulement des opérations.

Pour commencer, rappelons que **specINTI** est le moteur de calcul principal pour le traitement des spectres, tandis que **specINTI Editor** est une interface graphique qui interagit avec specINTI en fournissant deux fichiers essentiels :

- Un **fichier de configuration**, définissant les paramètres de traitement des spectres ;
- Un **fichier d'observation**, contenant les données spectrales à analyser.

Ces deux fichiers peuvent être édités directement dans specINTI Editor, qui intègre plusieurs outils pour simplifier ce travail, mais aussi pour visualiser le résultat des traitements et la qualité.

Vous pouvez télécharger l'ensemble specINTI/specINTI Editor via ce lien :
http://valerie.desnoux.free.fr/inti/specinti_editor.zip

2. Le traitement de spectres à haute résolution spectrale

2.1. Introduction

Nous décrivons dans cette partie le traitement des spectres à haute résolution centrés sur la raie H-alpha en partant de zéro : nous ne disposons ni de la fonction d'étalonnage spectral, ni de la réponse instrumentale.

Nous travaillons à partir d'une séquence de spectres acquise avec un spectrographe Star'Ex HR monté au foyer d'une lunette Askar 107PHQ. Le spectrographe est équipé d'une fente Star'Ex GEN2 de 26 microns de large, et la caméra utilisée est une ZWO

ASI533MM lue en mode binning 1x1. L'observation date de la nuit du 2 au 3 octobre 2024.



Le centre de la pupille d'entrée de la lunette est éclairé en continu par une fibre optique en plastique de 1 mm de diamètre, reliée à une lampe néon à l'autre extrémité. Nous travaillons donc en **mode latéral** : le spectre des raies de la lampe néon est enregistré simultanément avec celui de l'étoile. Nous nous concentrons sur une région du spectre couvrant la raie H-alpha (6563 \AA) et la raie rouge He I (6678 \AA).



Les images du spectre sont recadrées dès l'acquisition sur une zone entourant la trace des spectres afin d'économiser de l'espace de stockage et d'accélérer les calculs.

Les données de l'exemple traité (images, fichiers .YAML) sont regroupées dans un fichier compressé que vous pouvez [télécharger ici](#).

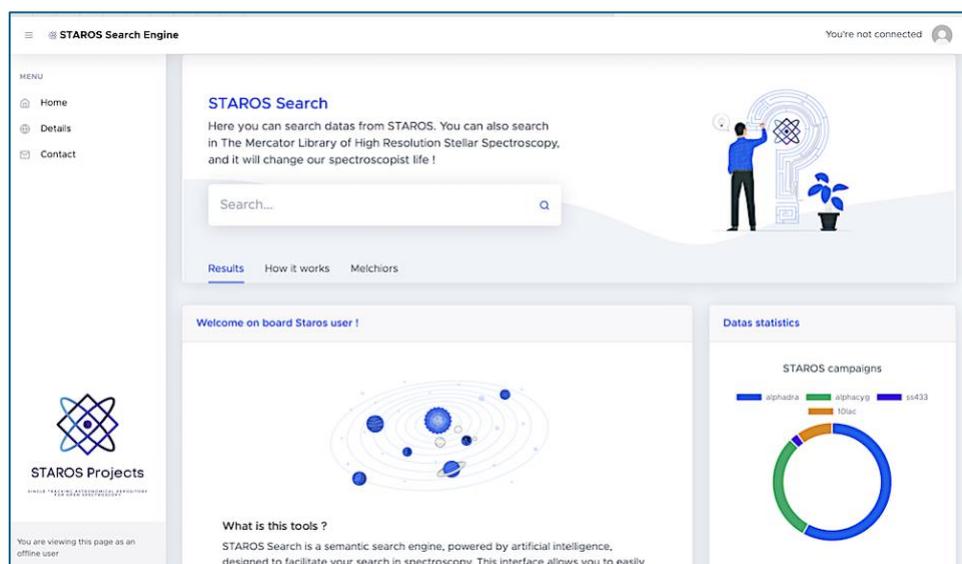
2.2. Le spectre de référence

Notre principal objectif est de déterminer la réponse instrumentale au flux lumineux incident. Ce processus commence par l'acquisition et le traitement du spectre d'une étoile de référence, dont le profil énergétique est fidèlement connu. Ce profil correspond à la vraie distribution d'énergie de l'étoile, telle qu'elle serait observée en dehors de l'atmosphère terrestre et avec un instrument parfait.

Notre spectre de référence provient de la base de données Melchiors, une vaste bibliothèque de 3 256 spectres couvrant une plage de longueurs d'onde allant de 380 à 900 nm, avec une résolution de $R = 85\,000$. Ces spectres ont été obtenus grâce au spectrographe HERMES, installé sur le télescope Mercator de l'observatoire de Roque de los Muchachos à La Palma. La base Melchiors se trouve à l'adresse suivante : <https://www.royer.se/melchiors.html>

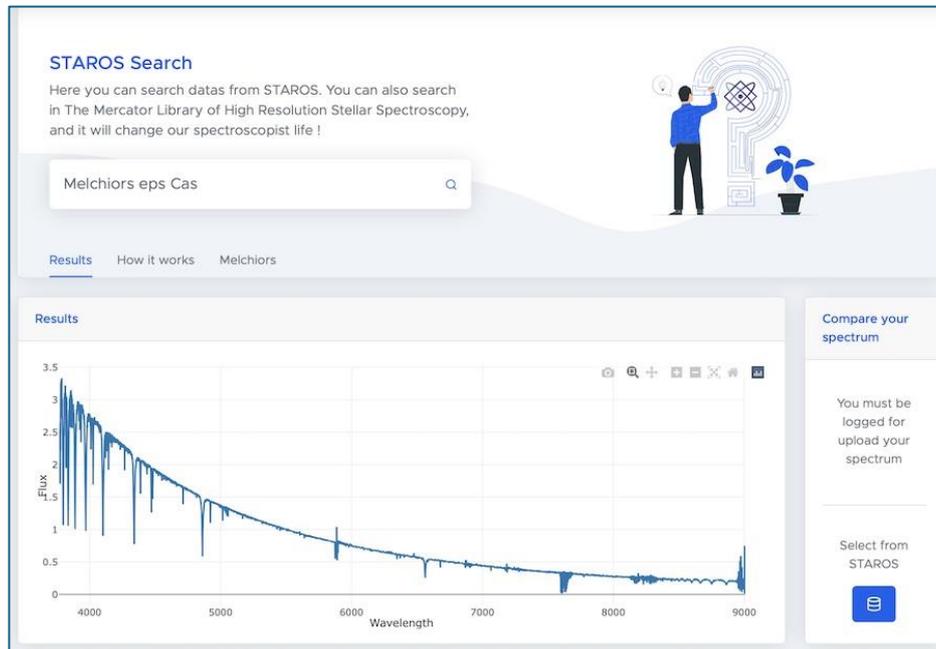
Nous avons choisi d'observer l'étoile **epsilon Cas** (HD11415, une étoile Be peu active) dont on dispose du spectre de référence dans la base Melchiors. Cette étoile est bien positionnée dans le ciel, brillante ($V = 3,4$) et possède un continuum lisse, idéal pour évaluer la réponse instrumentale.

L'usage de l'outil « Search », un sous-ensemble de la base de données STAROS, accessible gratuitement, sans inscription, est la façon la plus simple d'extraire un spectre de la base Melchiors. Voir à cette adresse : <https://search.staros-projects.org>



Dans le champ de recherche, tapez simplement : **Melchiors esp Cas**

Après quelques secondes, le spectre de l'étoile epsilon Cas s'affiche :



Depuis cette même interface, vous pouvez télécharger le spectre au format FITS, directement compatible avec specINTI. Nous vous recommandons de sauvegarder ce spectre dans le **dossier de travail**, celui-là même qui contient les images à traiter. Donnez un nom facile à identifier et retenir à ce fichier. Dans l'exemple, nous adoptons : **_ref_epscas.fits**.

Nos images brutes se trouvent dans le dossier « D:\starex412 » (bien sûr, vous aurez probablement un nom différent – ici, « 412 » fait référence à la nuit d'observation numéro 412 réalisée avec Star'Ex).

Remarque : l'ajout du caractère « _ » en début de nom permet de distinguer les fichiers de référence ou les données traitées des données brutes. Nous vous encourageons à adopter cette convention.

Noter que le choix de l'étoile eps Cas pour cette démonstration n'est pas très judicieux car elle est de type 'Be', donc susceptible de varier dans le temps. Il faut sélectionner de préférence une étoile réputée stable pour évaluer la réponse instrumentale, comme 10 Lac, Altair...

2.3. Affichage des spectres et des images

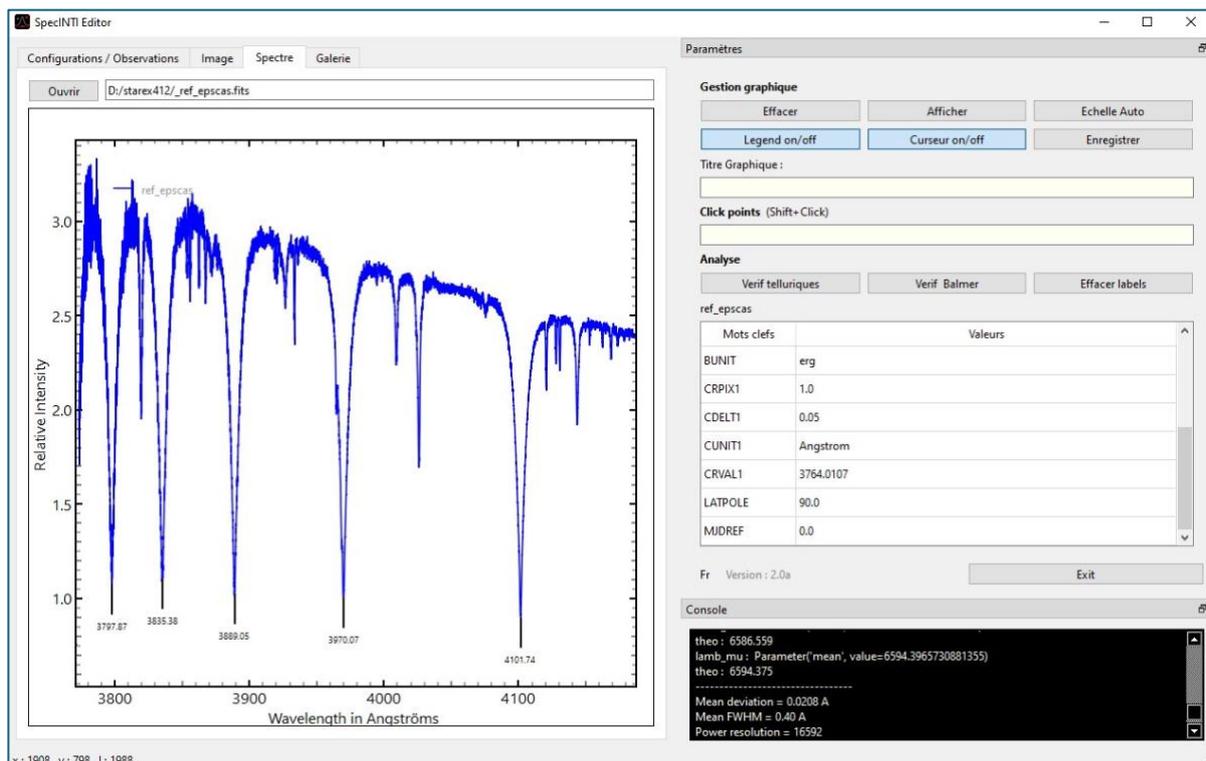
Nous partons du principe que vous avez téléchargé et installé **specINTI Editor V2**. Voyons comment afficher le spectre de l'étoile de référence via l'interface.

Depuis l'onglet « Configurations / Observations », la première tâche à réaliser est de désigner le répertoire de travail, ici « D:\starex412 ». Cliquez pour cela sur le bouton « Répertoire » :

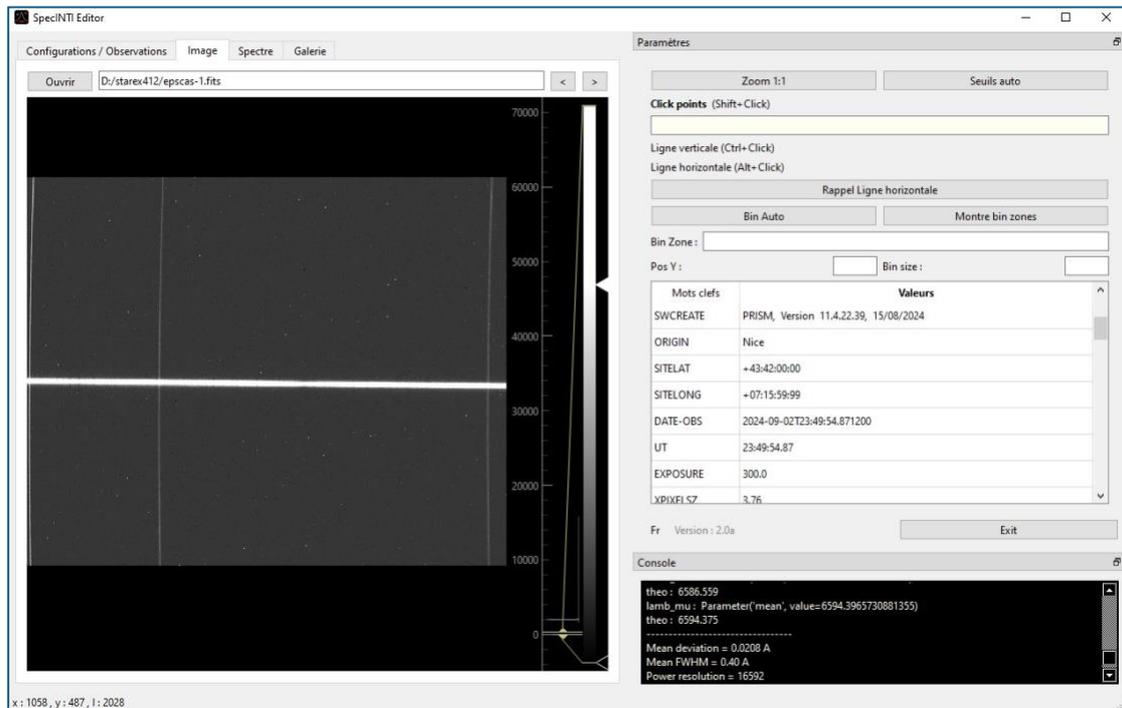


Ensuite, ouvrez l'onglet « Spectre » et chargez le fichier « _ref_epscas » en mémoire en cliquant sur le bouton « Ouvrir ».

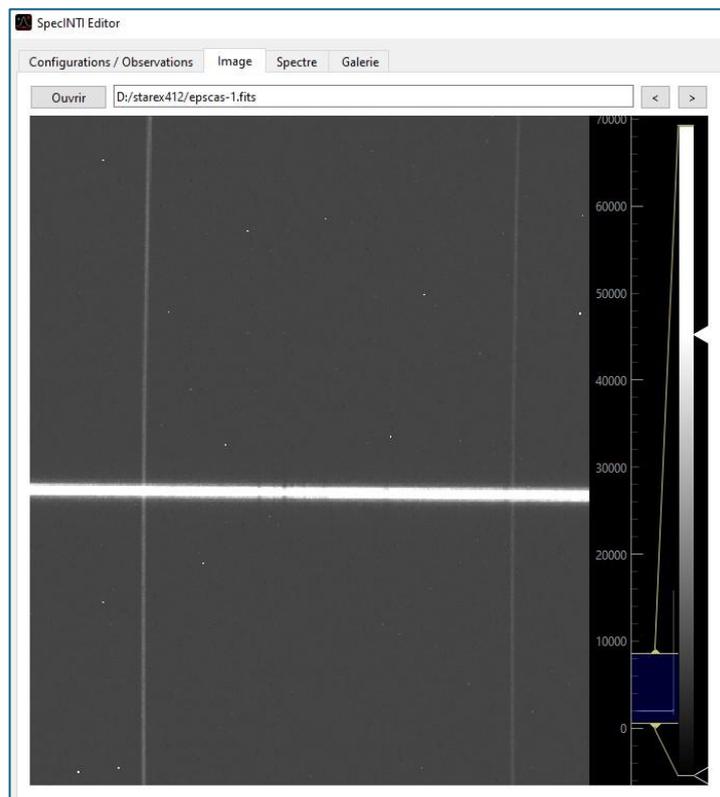
A ce stade, vous pouvez interagir avec le spectre de plusieurs façons : zoomer verticalement ou horizontalement en maintenant le bouton droit de la souris enfoncé, vous déplacer dans le graphique en glissant la souris avec le bouton gauche enfoncé, ou déplacer un curseur (barre verticale) qui affiche en temps réel la longueur d'onde et l'intensité. Vous pouvez également identifier les raies telluriques en cliquant sur le bouton « Vérif telluriques », faire apparaître un menu contextuel (clic gauche) pour modifier l'apparence du graphique, l'exporter, et plus encore.



Nous avons pris quatre images du spectre de l'étoile epsilon Cas, avec des expositions de 300 secondes chacune (acquises à l'aide du logiciel Prism). Vous pourrez afficher leur contenu en accédant à l'onglet « Image » :



Tout comme avec les profils de spectres, il est possible d'agrandir/réduire, vous déplacer, agir sur la molette de la souris... Sur la partie droite vous pouvez examiner l'entête FITS du fichier. Familiarisez-vous avec la modification du contraste et de la luminosité de l'image en utilisant la règle latérale :



Les boutons flèches « < > » en haut à droite, permettent de charger simplement les images de la séquence à la suite (epscas-1, ... epscas-4), ce qui est fort commode pour déceler des anomalies d'acquisition en cas de doute.

2.4. Traitement du spectre brut sans la réponse instrumentale

Revenons à notre sujet principal : la détermination de la **réponse instrumentale**.

Notez que nous travaillons bien en mode latéral, puisqu'on dispose simultanément dans la même image du spectre de l'étoile et les raies du néon, ces dernières occupant toute la hauteur de la fente. La présence permanente de ces raies du néon simplifie le traitement du spectre, notamment en automatisant l'étalonnage en longueur d'onde.

Nous allons effectuer un traitement complet des quatre spectres de l'étoile epsilon Cas, à l'exception de la correction de la réponse instrumentale, puisque celle-ci n'est pas encore connue à ce stade.

Bien entendu, nous devons disposer des DOF (Dark, Offset, Flat). Pour des raisons d'espace, nous ne fournissons pas ces images maîtresses individuellement, mais seulement leur combinaison, les fichiers image maîtres : `_dark`, `_offset` et `_flat` (notez l'utilisation du caractère « `_` »).

Apprenez à bien gérer les DOF

Pour information, le jeu de DOF pour cette observation comprend :

- 20 images du signal d'offset (prises avec un temps de pose très court et dans l'obscurité). Ces images sont sauvegardées dans le répertoire de travail sous les noms `o-1`, `o-2`, ..., `o-20`.
- 11 images du signal d'obscurité (acquises avec un temps de pose de 900 secondes et dans l'obscurité). Elles ont été réalisées de jour en plaçant l'ensemble de Star'Ex dans un réfrigérateur, en bouchant l'entrée du spectrographe, en fermant au mieux la porte, tout en laissant passer le câble d'alimentation et le câble USB de la caméra scientifique. La caméra est maintenue à la même température que celle adoptée lors de l'observation des étoiles (ici, -15 °C, la caméra est une ZWO ASI533MM Pro). Les images sont nommées `n900_15-1`, ..., `n900_15-11`.
- 28 images flat-field, obtenues en plaçant un panneau LED d'éclairage domestique devant l'objectif, tout en positionnant le tube verticalement. Le temps de pose est de 6 secondes par image. Bien que le panneau soit éblouissant, les LED produisent très peu de lumière dans le rouge, ce qui explique ce temps de pose relativement long. Ces images sont appelées `f-1`, `f-2`, ..., `f-28`.



Un conseil (vraiment utile !) : prenez l'habitude de nommer vos DOF toujours de la même manière !

La toute première fois que vous traitez un spectre, il est **impératif** d'indiquer implicitement le nom des DOF et leur nombre pour que ces informations apparaissent dans le fichier d'observation :

Offset :	<input type="text" value="o-"/>	Nb	<input type="text" value="20"/>
Dark :	<input type="text" value="n900_15-"/>	Nb	<input type="text" value="11"/>
Flat :	<input type="text" value="f-"/>	Nb	<input type="text" value="28"/>
Image postfix :			
	<input type="text" value="-"/>		
Calibration prefix :			
	<input type="text" value=""/>		
Calibration postfix :			
	<input type="text" value="_neon-"/>		

Si vous cliquez sur le bouton « Autofill », le logiciel sera capable de détecter automatiquement le nombre d'images, vous n'aurez donc pas à remplir ces champs manuellement. Profitez-en également pour renseigner le champ « Image postfix » avec un tiret (-) et le champ « Calibration postfix » avec « _neon- ». Ainsi, vous n'aurez plus à vous soucier de ces paramètres lors de votre prochaine utilisation de *specINTI Editor*.

Une fois que votre première étoile est traitée avec ces paramètres, specINTI génère les fichiers DOF maitres suivants dans le dossier de travail : *_dark*, *_offset*, et *_flat* (ces noms sont imposés).

Pour le traitement de l'étoile suivante, vous pouvez désormais écrire plus simplement :

Offset :	<input type="text" value="_offset"/>	Nb	<input type="text" value="0"/>
Dark :	<input type="text" value="_dark"/>	Nb	<input type="text" value="0"/>
Flat :	<input type="text" value="_flat"/>	Nb	<input type="text" value="0"/>

Cela sera vrai pour toutes les étoiles de la nuit, et même pour le traitement de nombreuses nuits d'observation avec ces mêmes DOF (il s'est ici écoulé plus de 10 nuits avant de décider de les rafraîchir).

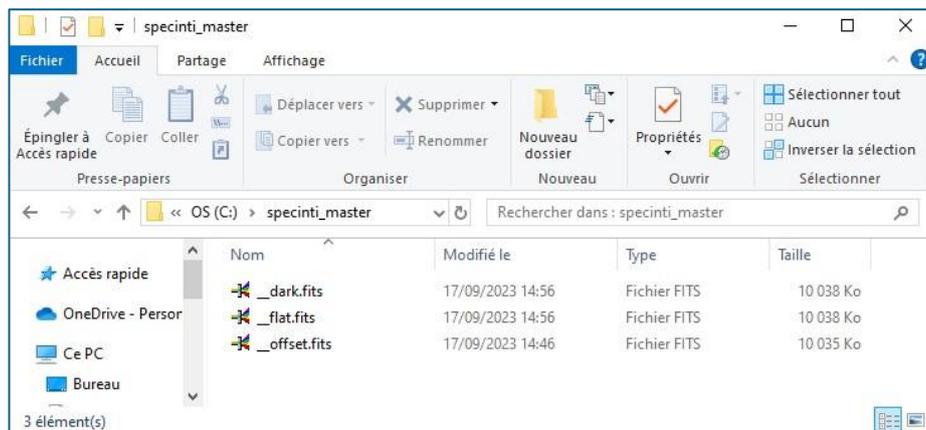
Toutefois, il y a un léger inconvénient. Une bonne pratique consiste à créer un dossier distinct pour chaque nuit d'observation, que vous indexez avec la date ou un numéro d'observation, comme dans notre exemple. Cela signifie que vous devrez copier les trois fichiers maîtres `_dark`, `_offset` et `_flat` d'un répertoire à l'autre.

Sous Windows uniquement

Il est possible de simplifier encore le processus si vous le souhaitez. Depuis la racine de votre disque principal « C: », créez le dossier suivant (notez que le nom est imposé) :

C:\specinti_master

Copiez vos trois DOF dans ce dossier, en ajoutant un « double underscore » devant chaque nom (`__`) :



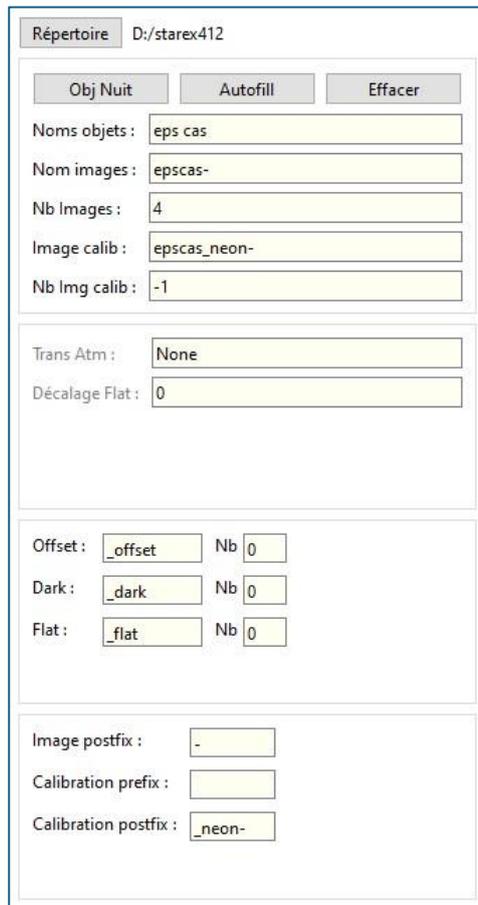
Dorénavant, vous n'avez plus qu'à indiquer dans l'interface de SpecINTI Editor :

Offset :	<input type="text" value="__offset"/>	Nb	<input type="text" value="0"/>
Dark :	<input type="text" value="__dark"/>	Nb	<input type="text" value="0"/>
Flat :	<input type="text" value="__flat"/>	Nb	<input type="text" value="0"/>

Vous n'avez plus à vous soucier de copier les DOF du dossier d'une nuit à la suivante.

Les fichiers des images brutes de l'étoile sont appelés `epscas-1.fits`... `epscas-4.fits`. Toujours des noms simples et dont la racine est compréhensible par SIMBAD, à ceci près que nous avons omis l'espace entre « eps » et « cas » (évitons les blancs dans vos noms de fichier, on fait ici de la science !).

Voici comment se présente la paramétrisation du fichier d'observation pour notre étoile. Rappel : il vous suffit de remplir la première case « Noms Objets » avec « eps Cas » (ou « eps cas »), puis de cliquer sur « Autofill » pour que les champs se remplissent automatiquement – ceci grâce au nommage judicieux des images lors de l'acquisition :



Répertoire D:/starex412

Obj Nuit Autofill Effacer

Noms objets : eps cas

Nom images : epscas-

Nb Images : 4

Image calib : epscas_neon-

Nb Img calib : -1

Trans Atm : None

Décalage Flat : 0

Offset : _offset Nb 0

Dark : _dark Nb 0

Flat : _flat Nb 0

Image postfix : -

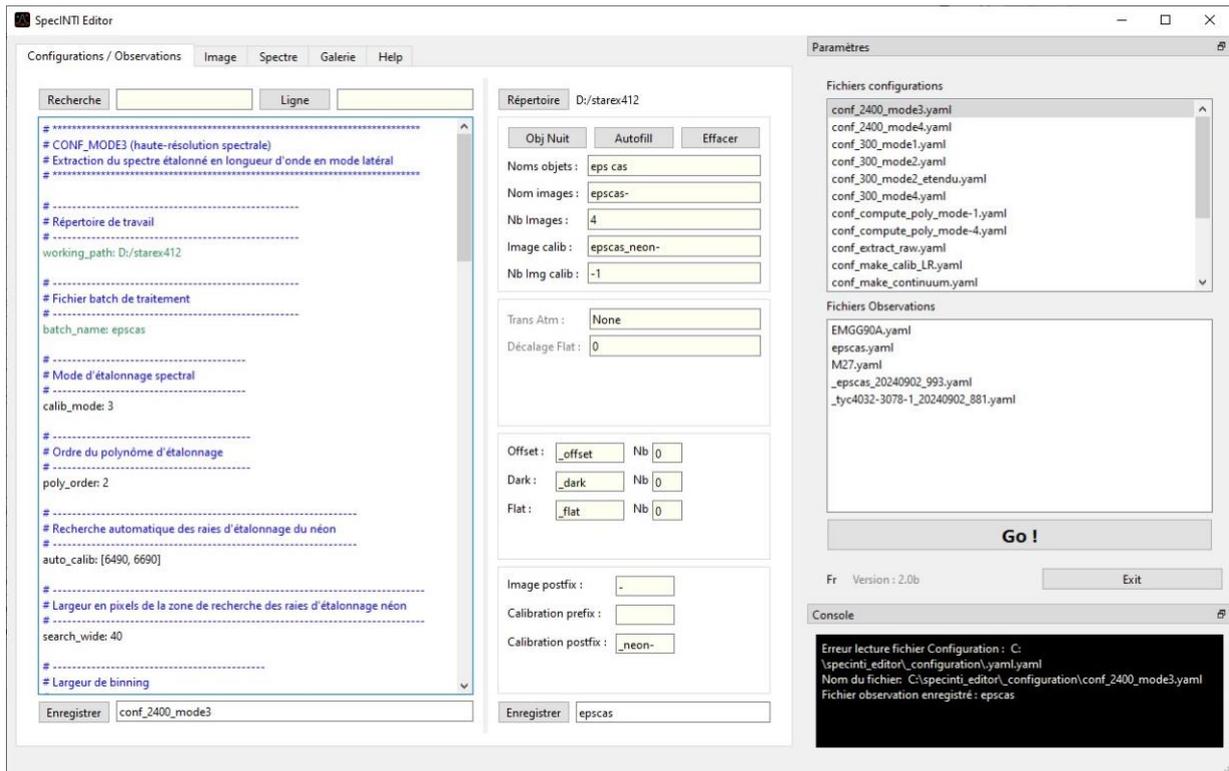
Calibration prefix :

Calibration postfix : _neon-

Vous êtes cependant libre de nommer vos fichiers à votre convenance, mais dans ce cas les fonctions automatiques basées sur des règles simples de nommage seront inopérantes. Vous devez alors entrer l'ensemble des informations à la main pour tous les champs.

Nous devons ensuite utiliser le fichier de configuration le mieux adapté à notre situation. Nous vous recommandons d'utiliser le fichier **conf_2400_mode3.yaml**, spécifiquement écrit pour exploiter les données acquises en mode latéral pour un étalonnage spectral entièrement automatisé. Vérifiez sa présence ou copiez-le dans le répertoire « **_configuration** » du répertoire d'installation de specINTI. Pour qu'il apparaisse dans la liste des fichiers de configuration après copie, vous devez relancer l'application.

Double-cliquez alors sur son intitulé, et le contenu apparaîtra alors dans la fenêtre de gauche :



Attention, vous devez bien préciser que la réponse instrumentale n'est actuellement pas connue, en mettant en commentaire, provisoirement, la commande **instrumental_response** (un caractère dièse devant la ligne) :

```

# -----
# Observateur
# -----
Observer: cbuil

# -----
# Format des sorties (0: compact, 1: élargi)
# -----
check_mode: 1

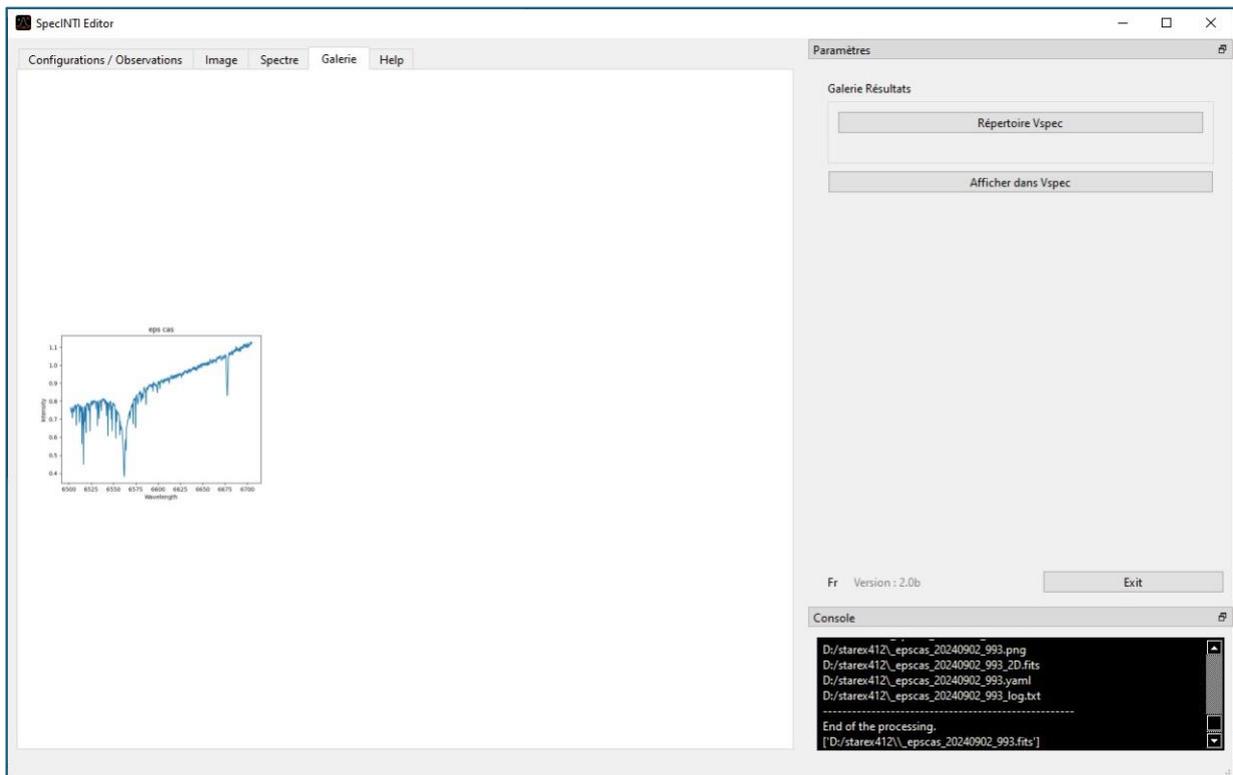
# -----
# Réponse instrumentale
# -----
#instrumental_response: _rep412

# -----
# Demande le calcul du S/B
# -----
snr: [6650, 6665]

# -----
# Décalage spectral demandé
# -----
spectral_shift_wave: 0.0
    
```

Tout est quasiment prêt pour le traitement. Cliquez sur le bouton « Enregistrer » du **fichier d'observation** (cela met automatiquement à jour l'argument « working_path » du fichier de configuration). Cliquez également sur le bouton « Enregistrer » du **fichier de configuration**. Enfin, cliquez sur le bouton « Go ! ».

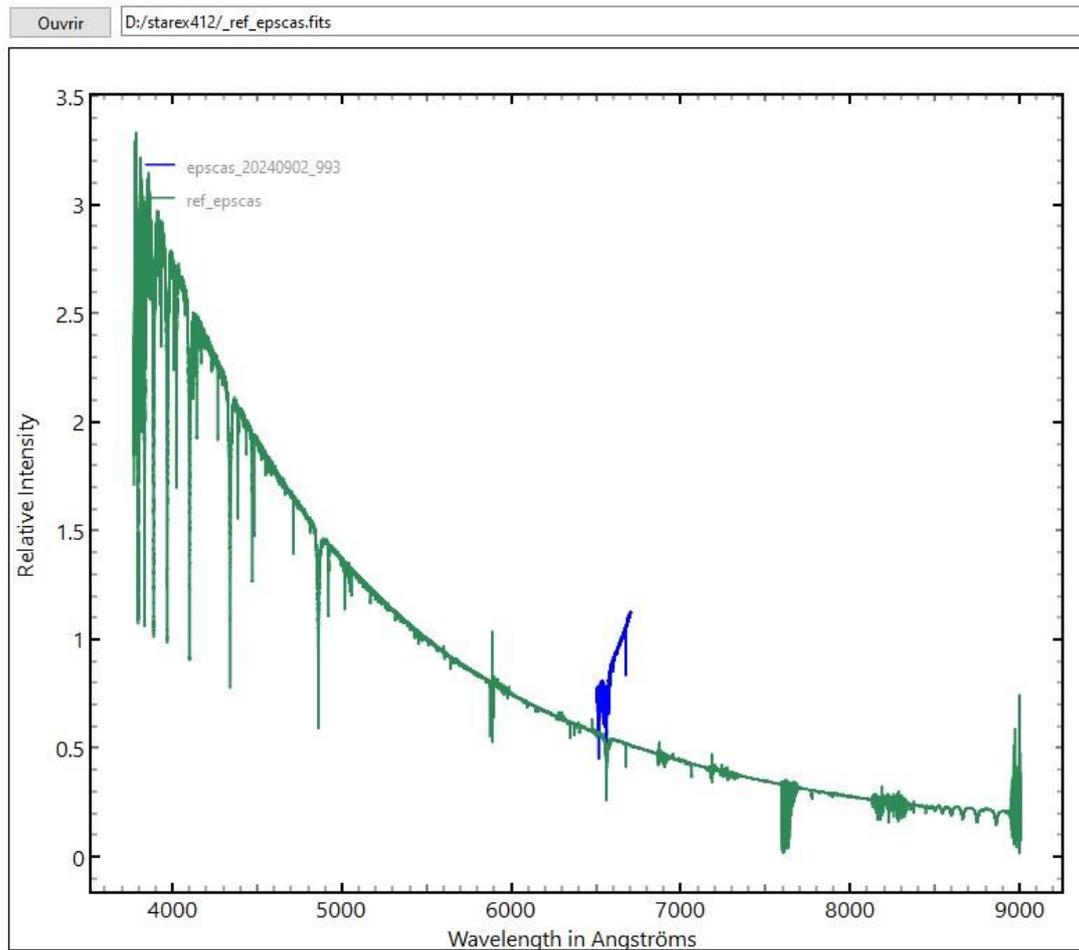
À l'arrière de la fenêtre principale du programme, une console affiche des informations sur le déroulement du traitement (attention, elle peut être masquée par d'autres fenêtres). À la fin du traitement, le résultat s'affiche sous la forme d'une vignette. Vous disposez également d'une console locale, qui est une autre façon d'examiner l'historique du traitement directement dans l'interface.



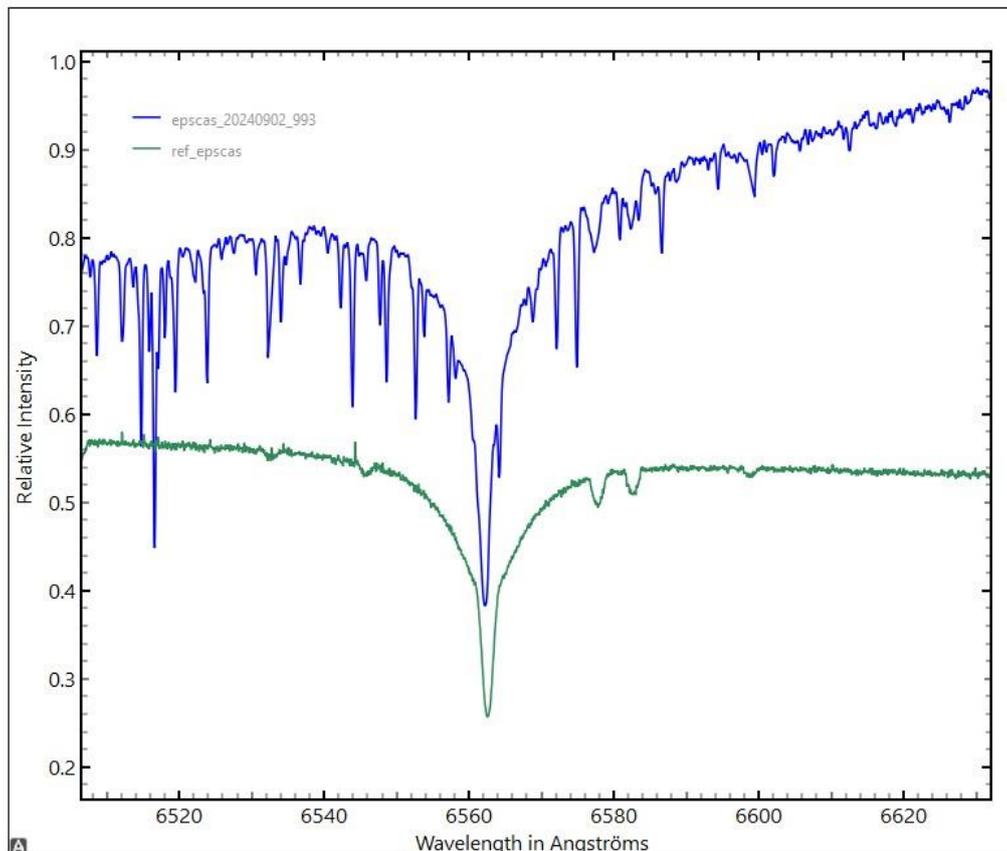
2.5. Le calcul de la réponse

Vous pouvez bien sûr examiner le profil issu du traitement précédent en utilisant toutes les fonctionnalités offertes par l'onglet « Spectre ». Le nom de ce profil est composé du nom de l'étoile associé à la date, par exemple ici : **_epscas_20240902_993.fits**.

Il est très instructif de comparer l'aspect du spectre ainsi calculé à celui qu'il devrait être si la réponse spécifique de l'instrument était corrigée. C'est très simple. Affichez d'abord le profil calculé, puis cliquez à nouveau sur le bouton « Ouvrir » pour charger le profil de référence de la base Melchior. Plusieurs courbes peuvent ainsi apparaître sur le même graphique :



Le spectre Star'Ex est affiché en bleu. Il ne couvre qu'une petite portion du spectre visible. Agrandissez la région autour de la raie H-alpha :

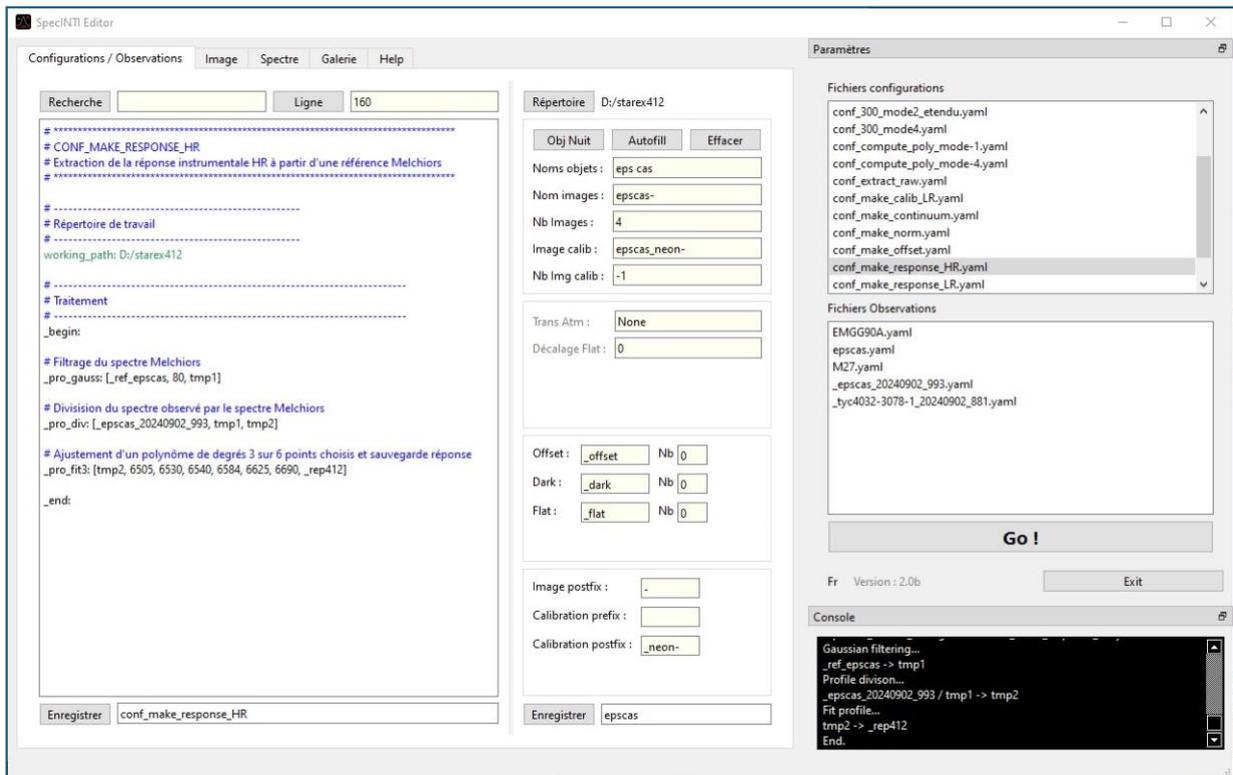


Il existe une certaine ressemblance entre ces deux spectres, mais aussi des différences significatives. Les raies telluriques de la vapeur d'eau sont présentes dans notre spectre, mais pas dans celui de la base Melchior. Surtout, la forme moyenne du continuum est inversée. Cette différence est due à la réponse instrumentale propre à notre équipement, ici non prise en compte, ainsi que la couleur de la lampe LED utilisée pour produire l'image flat-field, bien plus bleue que rouge.

La réponse instrumentale est obtenue en **divisant** le spectre observé par le spectre de référence. Cette opération fournit directement la réponse instrumentale, car le spectre de l'étoile epsilon Cas que nous avons calculé est similaire à celui que nous observons en dehors de l'atmosphère terrestre. En examinant attentivement le fichier de configuration, vous trouverez en effet la commande **corr_atmo**, qui calcule la transmission de l'atmosphère au moment de l'observation de l'étoile, permettant ainsi de simuler une observation en absence de l'atmosphère.

Nous allons utiliser un petit utilitaire pour effectuer cette division, sous la forme d'un fichier de commande contenant des fonctions de calcul. Ce fichier s'appelle **conf_make_response_HR.yaml** (vous pouvez le renommer selon votre convenance). Copiez dans le répertoire « **_configuration** » du programme s'il ne s'y trouve pas.

Ouvrez l'onglet « **Configurations / Observations** » et sélectionnez le fichier de configuration **conf_make_response_HR.yaml** pour voir le contenu :



Les fonctions sont incluses entre les mots clefs « **_begin** » et « **_end** » :

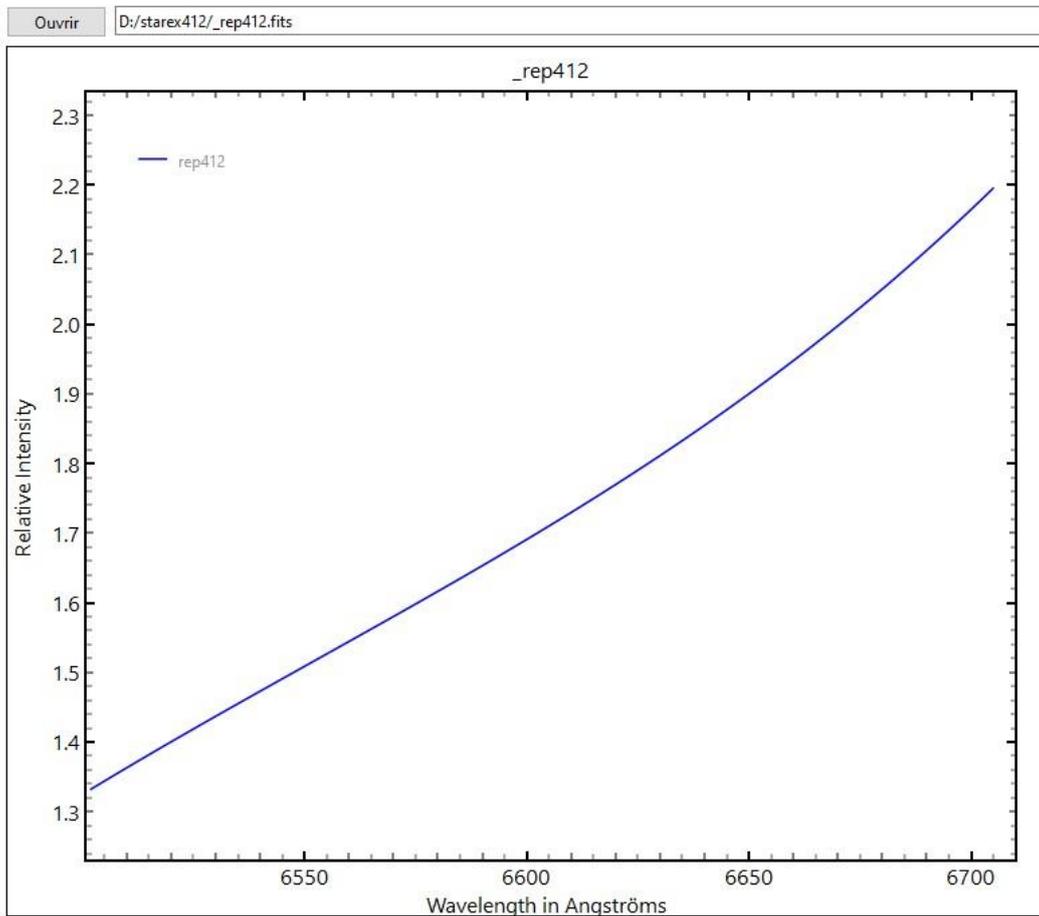
```
# *****  
# CONF_MAKE_RESPONSE_HR  
# Extraction de la réponse instrumentale HR à partir d'une référence Melchiors  
# *****  
  
# -----  
# Répertoire de travail  
# -----  
working_path: D:/starex412  
  
# -----  
# Traitement  
# -----  
_begin:  
  
# Filtrage du spectre Melchiors  
_pro_gauss: [_ref_epscas, 80, tmp1]  
  
# Division du spectre observé par le spectre Melchiors  
_pro_div: [_epscas_20240902_993, tmp1, tmp2]  
  
# Ajustement d'un polynôme de degrés 3 sur 6 points choisis et sauvegarde réponse  
_pro_fit3: [tmp2, 6505, 6530, 6540, 6584, 6625, 6690, _rep412]  
  
_end:
```

La première fonction (**_pro_gauss**) réalise un lissage du spectre Melchiors afin de l'adapter à la résolution spectrale plus faible de l'instrument Star'Ex. Ensuite, la division proprement dite est calculée (**_pro_div**). La dernière fonction détermine une fonction polynomiale de degré 3 à partir de six points du spectre, définis par leurs longueurs d'onde, tout en évitant les raies telluriques (par exemple, si vous examinez le spectre, la longueur d'onde de 6505 Å est libre de raies telluriques et représente bien le continuum local).

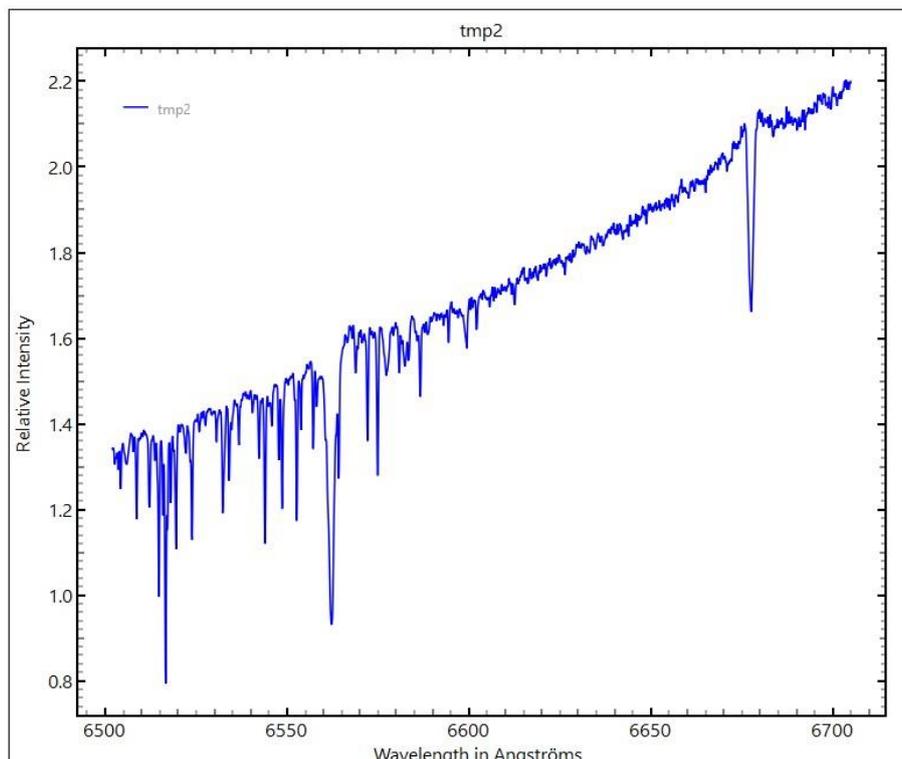
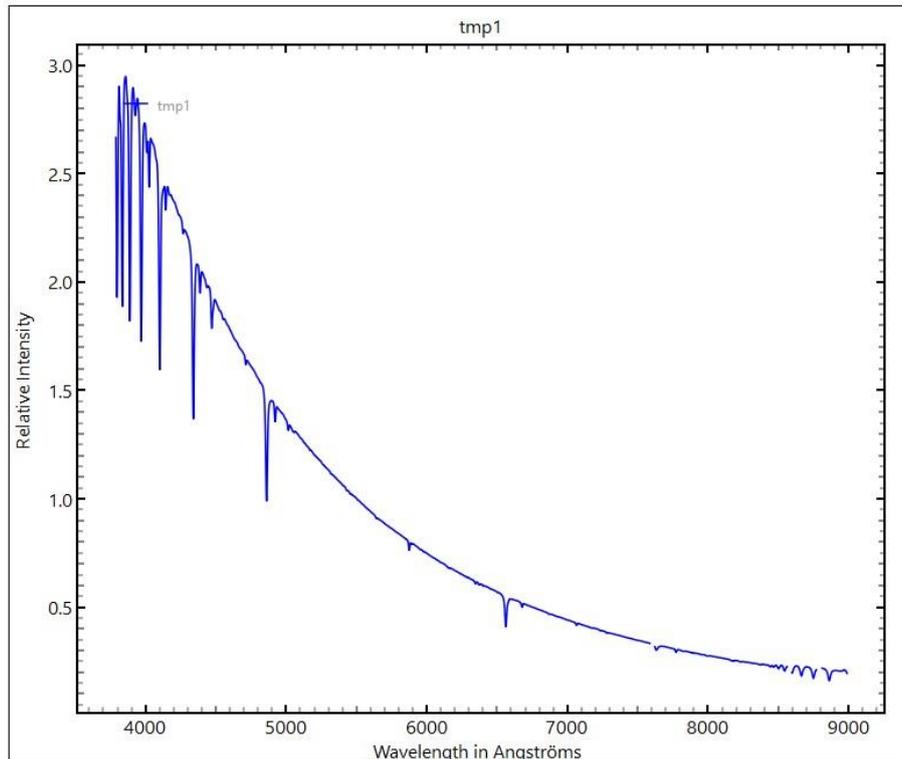
Les paramètres doivent être bien modifiés manuellement pour traiter les fichiers appropriés. Lors du filtrage, assurez-vous d'indiquer que le traitement s'applique au fichier de référence Melchiors (**_ref_epscas**). Pour la division, on entre d'abord le nom du profil spectral observé de l'étoile comme premier paramètre de la fonction **_pro_div**. Enfin, modifiez le dernier paramètre de la fonction **_pro_fit3** pour y inscrire le nom du fichier de réponse instrumentale souhaité, ici « **_rep412** » (ce qui signifie qu'il s'agit d'un fichier de réponse calculé à partir des spectres de l'observation numéro 412). Ces opérations sont un peu fastidieuses, mais rappelez-vous qu'on les réalise que rarement – **on ne calcule pas une réponse instrumentale toutes les nuits**, loin de là.

Avant de lancer specINTI avec ce fichier de configuration, vérifiez que le paramètre « working_path » pointe vers le bon dossier de travail. Astuce : cliquez sur le bouton « Enregistrer » du fichier d'observation pour actualiser ce paramètre facilement.

Cliquez sur « Go ! ». Le calcul est rapide. Voici le résultat :



Pour bien comprendre comment le calcul se déroule, examinez le fichier temporaire « tmp1 », qui est le spectre lissé de l'étoile Melchior, et le fichier « tmp2 » qui est la réponse instrumentale avant le lissage. Ces fichiers sont dans le répertoire de travail



Prise en compte de la vitesse barycentrique

Le spectre Melchioris est identique à celui que l'on obtiendrait en observant au centre du Soleil. Cependant, notre propre observatoire est mobile par rapport à l'étoile en raison de la révolution annuelle de la Terre autour du Soleil. Lors de la comparaison entre le spectre Melchioris et le spectre observé, un examen attentif révèle que la raie H-alpha est légèrement décalée entre les deux. Ce décalage est causé par la vitesse radiale apparente de l'étoile induite par rotation de la Terre autour du Soleil.

Pour corriger ce décalage, il suffit d'ajouter la ligne suivante dans le fichier de configuration « conf_2400_mode3.yaml » :

corr_bary: 0

Comparez ensuite le spectre avant et après cette correction barycentrique. Notez que la différence est minimale et que, dans les deux cas, la réponse spectrale sera quasi identique.

Attention : retirez cette correction barycentrique si vos spectres sont destinés à certaines bases professionnelles, comme BeSS, par exemple.

2.6. Utilisation de la réponse instrumentale

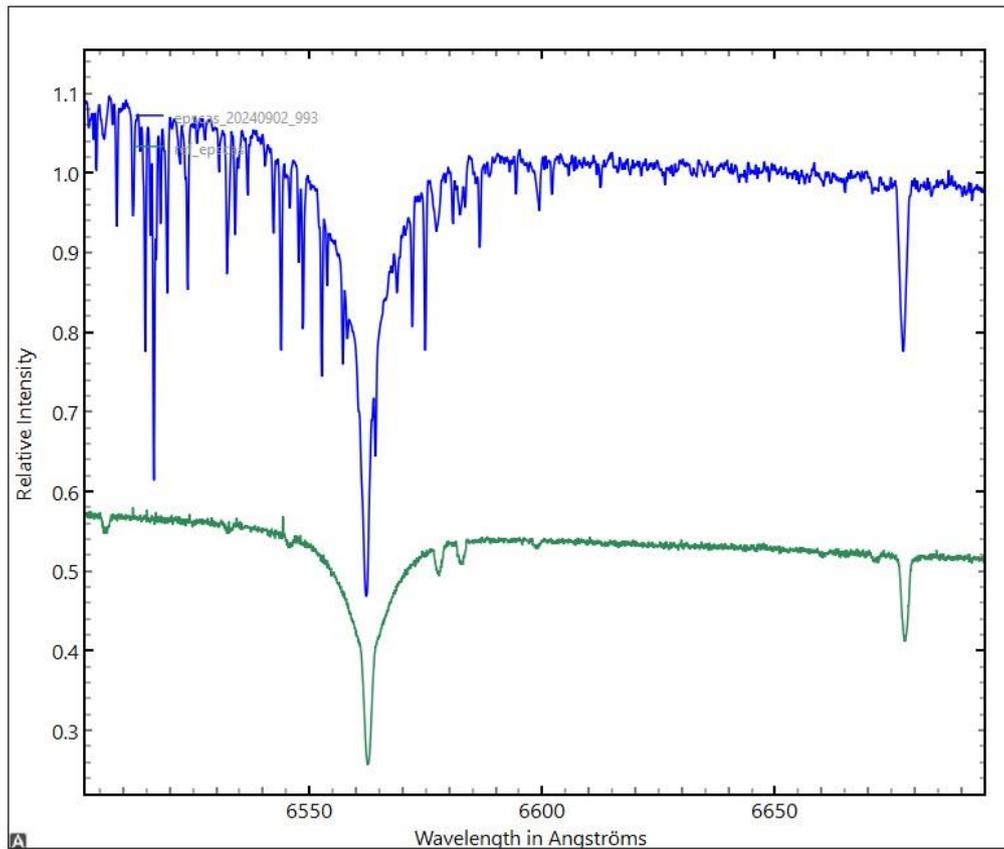
Vous pouvez désormais traiter tous les spectres de votre nuit d'observation, ainsi que ceux des nuits suivantes, en utilisant le fichier de réponse que nous venons de calculer. En effet, Star'Ex est suffisamment stable, et la courbe calculée suffisamment lisse pour disposer ici d'une quasi-constante instrumentale, ce qui signifie que vous n'aurez pas souvent à la recalculer.

N'oubliez pas de retirer le commentaire sur la ligne **instrumental_response** :

```
# -----  
# Réponse instrumentale  
# -----  
instrumental_response: _rep412
```

Désormais, le seul fichier de configuration que vous utiliserez régulièrement est **conf_2400_mode3.yaml**, qui permet un traitement rapide, automatique et fiable de vos nuits d'observation.

À titre d'exemple, relancez le traitement de l'étoile epsilon Cas en utilisant la réponse instrumentale trouvée. Pour cela, retirez le commentaire devant la ligne du paramètre **instrumental_response** comme dit plus haut. Voici le résultat final (en bleu) comparé au spectre Melchioris (en vert) :



La normalisation des spectres

La comparaison des deux spectres n'est pas simple, car ils n'ont pas le même point de normalisation à l'unité. Il est facile de remédier à ce problème en lançant specINTI avec le fichier de configuration **conf_make_norm.yaml**, où la fonction **pro_norm** se charge de la normalisation entre deux bornes en longueur d'onde :

```

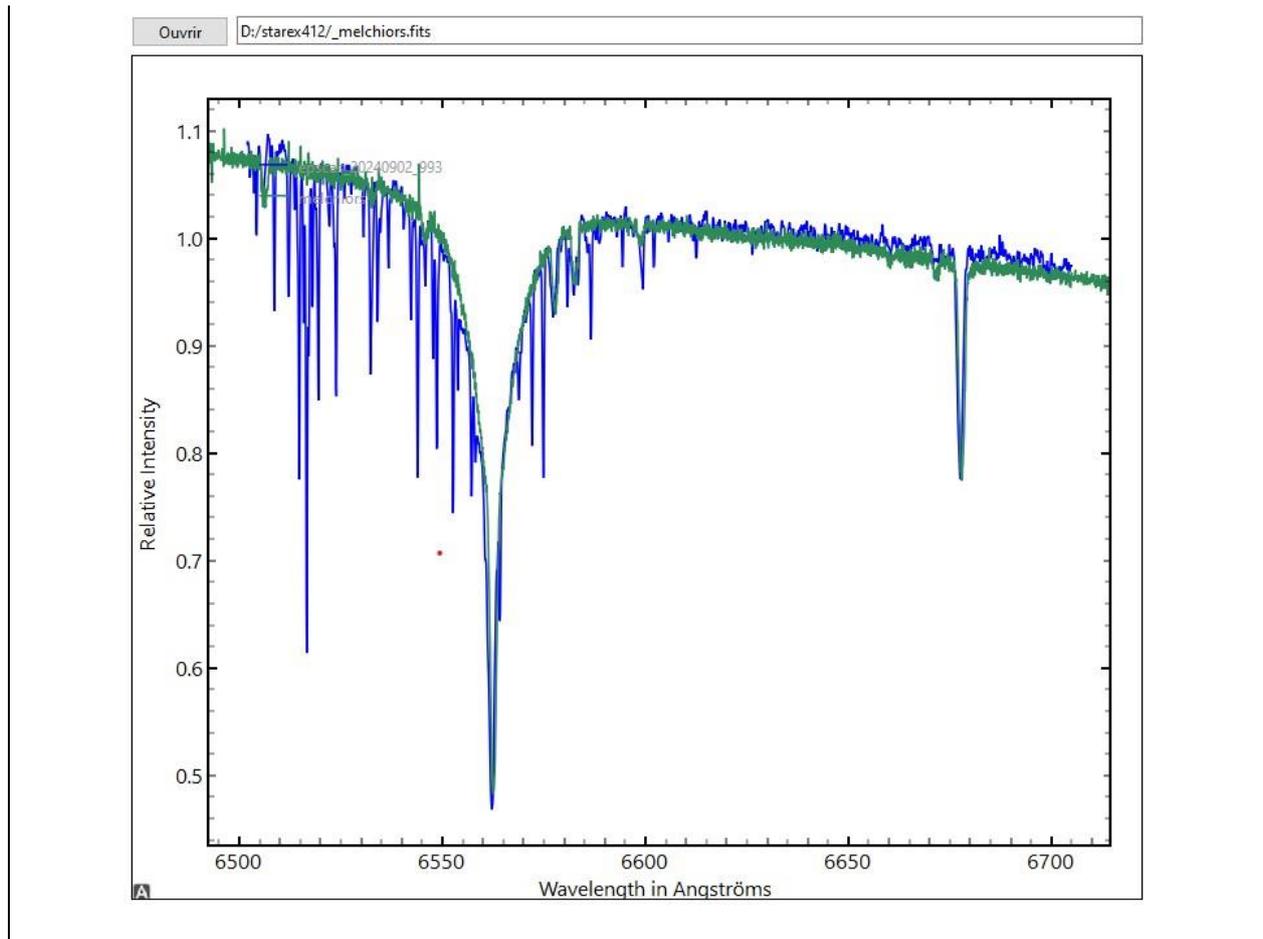
# *****
# CONF_MAKE_NORM
# Normalise un spectre à l'unité
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex412

# -----
# Normalisation à l'unité dans un intervalle spectral
# -----
_pro_norm: [_ref_epscas, 6620, 6640, _melchiors]

```

Ce qui donne (on affiche à présent le contenu du fichier `_melchiors.fits` :



3. Le Traitement des spectres à basse résolution

3.1. Introduction

La deuxième partie de cet aide-mémoire est dédiée au traitement des spectres à basse résolution spectrale.

Pour illustrer la procédure, nous utilisons également les données provenant d'un spectrographe Star'Ex, mais cette fois équipé d'un réseau de 300 traits/mm (par opposition aux 2400 t/mm utilisés pour la haute résolution). La fente est un modèle GEN2 de 26 microns, et, comme précédemment, l'instrument de prise de vue est une lunette Askar 107PHQ.

Comme toujours, il est nécessaire d'observer au moins une fois une étoile de référence pour déterminer la réponse instrumentale. C'est l'étoile epsilon Cassiopeiae qui va nous servir à nouveau. Son spectre, corrigé des effets de l'atmosphère terrestre, a déjà été extrait de la base Melchiors (voir section 2.2). L'observation a eu lieu durant la nuit du 3 au 4 octobre 2024, et nous avons acquis 10 spectres avec une exposition de 5 secondes pour chacun.

Le flat-field est obtenu sur place, au cours de la nuit, en éclairant l'entrée de l'objectif avec un ensemble de 5 lampes tungstène (type MagLite, et ce n'est qu'un exemple), et ce, à travers un diffuseur en papier calque pour uniformiser l'éclairage de la pupille.



Les images et les fichiers. YAML nécessaires pour traiter peuvent être [téléchargés ici](#).

Le traitement des spectres à basse résolution est à peine plus complexe que celui des spectres à haute résolution. En effet, une étape clé est moins automatisable : l'étalonnage en longueur d'onde. C'est par cette procédure que nous allons débiter.

3.2. L'étalonnage en longueur d'onde

Voici comment est écrit notre fichier d'observation :

Répertoire D:/starex413

Obj Nuit Autofill Effacer

Noms objets: epscas

Nom images: epscas-

Nb Images: 10

Image calib: epscas_neon-

Nb Img calib: -1

Trans Atm: None

Décalage Flat: 0

Offset: _offset Nb 0

Dark: _dark Nb 0

Flat: _flat Nb 0

Image postfix: -

Calibration prefix:

Calibration postfix: _neon-

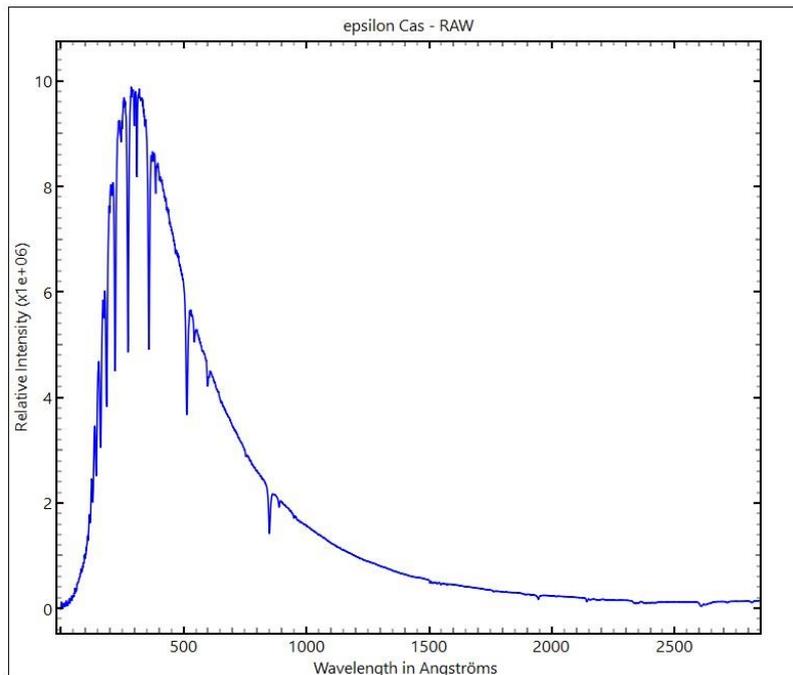
Nous retrouvons les 10 images du spectre de l'étoile, ainsi que les DOF (à noter qu'ils diffèrent de ceux utilisés en haute résolution, car même si la caméra est également une ASI533MM, il s'agit d'un autre exemplaire).

Il est important de souligner que nous n'avons pas utilisé de lampe d'étalonnage pour cette observation. À la place, nous allons nous appuyer sur les raies naturelles présentes dans le spectre de l'étoile epsilon Cas, essentiellement la série de Balmer de l'hydrogène, bien visible dans ce type d'étoile.

La première étape consiste à extraire le profil spectral brut, c'est-à-dire un spectre encore non étalonné, exprimé en rang de pixels plutôt qu'en longueurs d'onde. Pour réaliser cette opération, nous utilisons le fichier de configuration **conf_extract_raw.yalm** :

```
Recherche  Ligne   
# *****  
# CONF_EXTRACT RAW  
# Extraction d'un profil d'intensité brut  
# *****  
# -----  
# Répertoire de travail  
# -----  
working_path: D:/starex413  
# -----  
# Fichier batch de traitement  
# -----  
batch_name: epscas  
# -----  
# Mode d'extraction du spectre (non étalonné)  
# -----  
calib_mode: -5  
# -----  
# Largeur de binning  
# -----  
bin_size: 40  
# -----  
# Zones de calcul du fond de ciel autour de la trace  
# -----  
sky: [160, 30, 30, 160]  
# -----  
# Zone de calcul des paramètres géométriques  
# -----  
xlimit: [600, 1800]  
# -----  
# On force l'angle de tilt à 0  
# -----  
# -----  
Enregistrer 
```

Le logiciel écrit la distribution de l'intensité lumineuse dans le fichier **_epscas_raw.fits**.
Voici l'aspect affiché depuis l'onglet « Spectre » de specINTI Editor :



La position des raies de Balmer en pixels dans ce profil est relevée, tout en associant à chacune d'elles la longueur d'onde correspondante. Nous incluons également la raie O₂ située à 6869,1 Å, qui est bien identifiable. Pour établir la liste des positions, il suffit de faire un *Ctrl + Click* sur les creux des raies :

Mots clefs	Valeurs
SIMPLE	True
BITPIX	-32
NAXIS	1
NAXIS1	3008
CRVAL1	0
CDEL1	1

Voici les valeurs trouvées dans notre exemple, avec les longueurs d'onde associées :

```
# -----
# Coordonnées relevée des points
```

```
# -----
fit_posx: [2141,1944, 850, 513, 359,274, 222,186,162]
# -----
```

```
# -----
# Longueurs d'onde des points mesurés
# -----
fit_wavelength: [6869.1, 6562.8, 4861.3, 4340.5, 4101.7, 3970.1, 3889.0, 3835.4, 3797.9]
```

Lancer specINTI avec le fichier de configuration **conf_compute_poly_mode-1**. Ce nom un peu compliqué (que vous pouvez changer) signifie que l'on exploite les couples de positions « numéro de pixels versus longueurs d'onde » pour définir la loi de dispersion spectrale via une fonction polynômiale (ici choisie de degré 3) :



```
# *****
# CONF_COMPUTE_POLY
# Calcul du polynôme de dispersin à partir d'une série de raies d'absorption
# (on fournit la position approximative de ces raies en pixels).
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex413

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: epscas

# -----
# Etalonnage à partir du seul polynôme (pas de spectre étalon)
# -----
calib_mode: -1

# -----
# Degré du polynôme à évaluer
# -----
fit_order: 3

# -----
# Longueurs d'onde des points mesurés
# -----
fit_wavelength: [6869.1, 6562.8, 4861.3, 4340.5, 4101.7, 3970.1, 3889.0, 3835.4,
3797.9]

# -----
# Coordonnées relevée des points
# -----
fit_posx: [2141,1944,850,513,359,274,222,186,162]
# -----

Enregistrer conf_compute_poly_mode-1
```

Le logiciel retourne les coefficients du polynôme dans la console (remarquez que l'erreur RMS d'ajustement est petite, environ 0,2 angströms) :

```

Console
1.536288234700825, 3547.589176010768]
Computed wavelength:
[6869.23721737 6562.5978853 4861.55447269 4340.45701118 4101.52160537
3969.76782302 3889.03147792 3835.3530213 3798.27948586]
O-C: [-0.137 0.202 -0.254 0.043 0.178 0.332 -0.031 0.047 -0.379]
Root Mean Square Error = 0.2149 A
End.

```

3.3. L'évaluation de la réponse instrumentale

Les coefficients d'étalonnage obtenus sont ensuite copiés et collés dans le fichier de configuration **conf_300_mode1.yaml**. Ce sera dorénavant votre compagnon si vous suivez la procédure décrite. Ce fichier commande indique à specINTI de calculer le spectre en utilisant un étalonnage spectral basé uniquement sur un polynôme. Pour l'instant, nous commentons le paramètre **instrumental_response** dans ce fichier puisque l'objectif est précisément d'évaluer cette réponse. La démarche suivie ici est très similaire à celle utilisée pour estimer la réponse instrumentale en haute résolution :

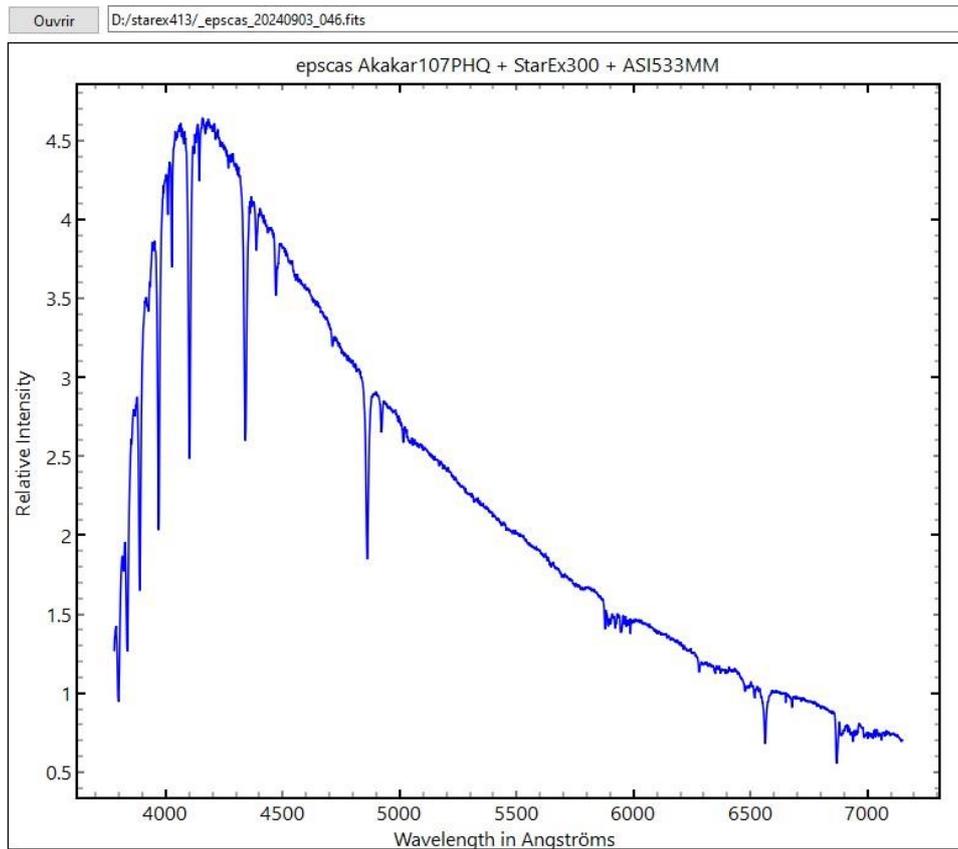
```

# *****
# CONF_300_MODE1
# Extraction du spectre étalonné en longueur d'onde via un polynôme (mode 1)
# *****
# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex413
# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: epscas
# -----
# Etalonnage à partir du seul polynôme (pas de spectre étalon)
# -----
calib_mode: 1
# -----
# Coefficients du polynôme d'étalonnage spectral
# -----
calib_coef: [-3.3499818443954024e-09, 1.3880360441486678e-05,
1.536288234700825, 3547.589176010768]
# -----
# Largeur de binning
# -----
bin_size: 30
# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 30, 30, 160]
# -----
# Zones de calcul des intensités cosmétiques
# -----

```

Enregistrer conf_300_mode1

Le résultat est le spectre apparent, étalonné en longueur d'onde, que l'on observerait hors de l'atmosphère terrestre :



Il ne reste plus qu'à diviser ce spectre par le spectre Melchior de l'étoile epsilon Cas (le fichier `_ref_epscas.fits`).

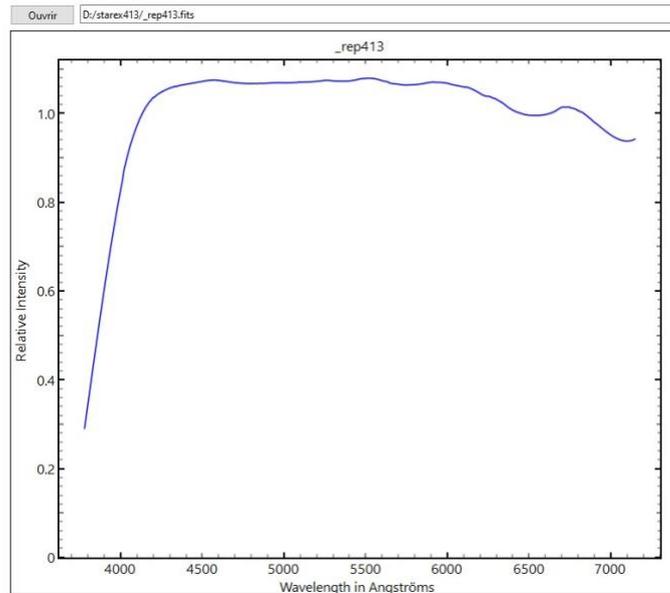
Nous utilisons pour cela le court utilitaire `conf_make_response_LR.yaml`, dont le contenu est :

```
# *****  
# CONF_MAKE_RESPONSE_LR  
# Extraction de la réponse instrumentale en basse resolution  
# à partir d'une référence Melchiors  
# *****  
  
# -----  
# Répertoire de travail  
# -----  
working_path: D:/starex413  
  
# -----  
# Traitement  
# -----  
_begin:  
  
# Filtrage du spectre Melchiors (HR -> LR)  
_pro_gauss: [_ref_epscas, 70, tmp1]  
  
# Retrait des bandes telluriques dans le spectre observé  
_pro_clean: [_epscas_20240903_046, 6830, 7030, tmp2]  
_pro_clean2: [tmp2, 6260, 6315, tmp2]  
_pro_clean3: [tmp2, 5857, 6030, tmp2]  
  
# Division du spectre observé par la spectre Melchiors  
_pro_div: [tmp2, tmp1, tmp3]  
  
# Lissage du résultat de la division  
_pro_blur2: [tmp3, 600, tmp4]  
  
# Normalisation et et sauvegarde de la réponse instrumentale  
_pro_norm: [tmp4, 6620, 6640, _rep413]  
  
# Normalisation du spectre Melchiors pour comparaison (facultatif)  
_pro_norm2: [tmp1, 6620, 6640, tmp0]  
  
_end:
```

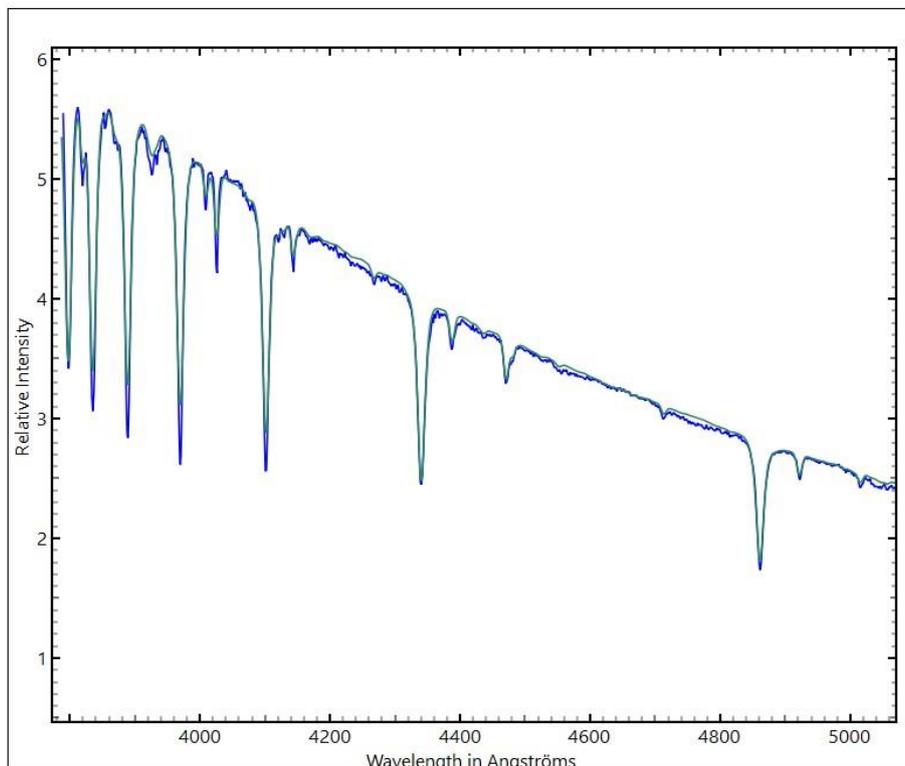
Enregistrer conf_make_response_LR

Nous réduisons d'abord la résolution du spectre Melchiors (**_pro_gauss**). Les fonctions **_pro_clean**, interpoles des régions du spectre trop marquées par les raies telluriques (elle sont donc effacées, pour cela ont fourni leurs bornes en longueurs d'onde). Le reste est similaire à ce que nous avons vu pour la haute résolution spectrale.

Voici le profil résultat, le profil spectrale « **_rep413** » :



Nous pouvons maintenant relancer le traitement complet de l'étoile en intégrant cette réponse dans le fichier de configuration **conf_300_mode1.yaml**, qui sera sûrement votre base de travail pour traiter dorénavant le spectre d'étoiles brillantes. Le spectre obtenu (en bleu dans le graphique ci-dessous) correspond bien au spectre de référence (en vert), ce qui valide la justesse de notre réponse instrumentale.



Le travail est achevé : le spectre est étalonné spectralement et en flux relatif.

3.4. Observations des étoiles de faible éclat en basse résolution

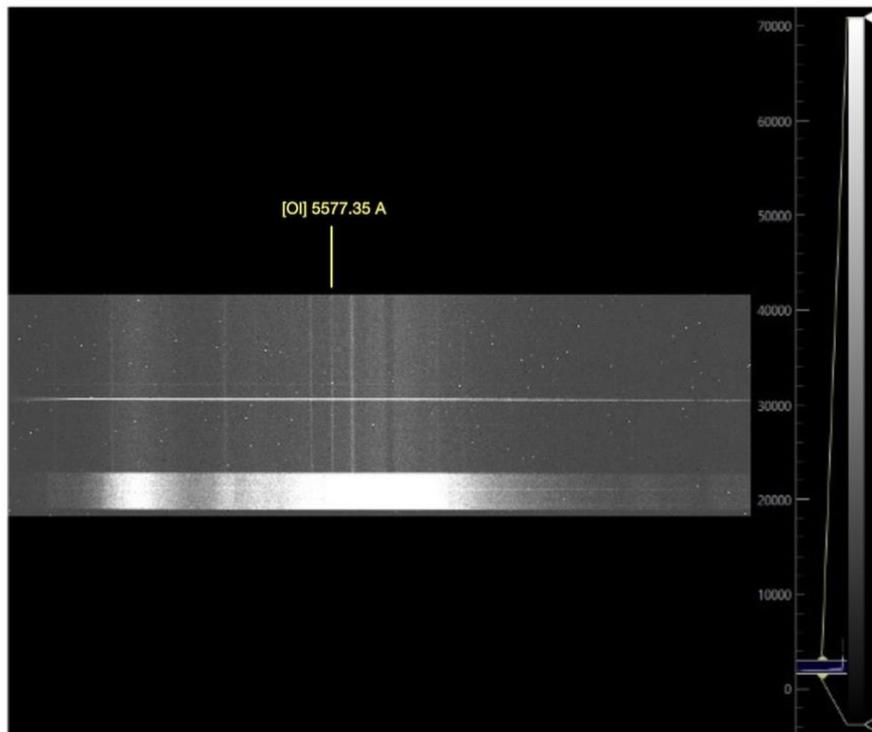
Il est plutôt rare d'utiliser les raies de Balmer pour étalonner les spectres lors d'observations de routine (en mode « productif » ou « routine »). En effet, ces raies ne sont pas toujours visibles, notamment si l'étoile est relativement froide (de type spectral G à M), peu lumineuse, ou encore si le spectre est exotique ou inconnu (comme dans le cas des galaxies, par exemple). Dans ces situations, il est tout de même possible d'utiliser des raies naturelles pour étalonner les spectres en longueur d'onde. Nous nous appuyons alors sur les raies présentes dans la lumière du fond de ciel, gratuitement. Ces raies nocturnes, provenant de la pollution lumineuse des villes (mercure) ou de la stratosphère terrestre, s'impriment dans l'image en même temps que le spectre de l'étoile, dès que le temps de pose est suffisamment long (quelques minutes). Nous pouvons donc utiliser le mode d'étalonnage latéral, fort pratique car il automatise fortement le traitement des spectres et il est précis.

Rappelons la procédure, qui se déroule en deux étapes :

1. **Évaluation du polynôme de dispersion**, comme expliqué dans la section 3.2, en observant une étoile brillante. À l'exception du premier terme de ce polynôme, qui correspond à un déplacement global du spectre dans le plan du détecteur (lié aux divers pointages sur le ciel occasionnant des flexions mécaniques différentielles), les autres termes peuvent être considérés comme des constantes instrumentales. C'est pourquoi les étoiles de référence sont rarement observées : une seule fois par nuit et pour une étoile si vous êtes pointilleux ou si vous suspectez un changement dans l'appareil. Sinon, une vérification hebdomadaire ou mensuelle suffit, comme c'est le cas par exemple avec l'instrument Star'Ex si vous l'utilisez correctement.

2. **Exploitation des raies du fond de ciel nocturne** pour actualiser uniquement le premier terme du polynôme (appelé « constante »). Le spectre est alors recalé en longueur d'onde par translation. Cette procédure sera rappelée ici en utilisant la raie stratosphérique de l'oxygène [OI], située à 5577,35 Å, qui est toujours présente, bien que son intensité varie.

Comme exemple type, nous nous intéressons à l'observation de l'étoile Be nommée EM*GGA90, de magnitude $V=11,2$. L'instrument utilisé est encore le Star'Ex LR, placé au foyer d'une lunette Askar 107PHQ (107 mm de diamètre). Ci-dessous, l'aspect de l'un des spectres 2D d'une séquence de 6, chacun exposé pendant 900 secondes :



Vous avez déjà téléchargé ces images spectrales avec celles de epsilon Cas.

Nous utilisons à présent le fichier de configuration **conf_300_mode4.yaml** pour le traitement. Comme le nom l'indique, il est adapté pour travailler sur des spectres provenant d'un spectrographe Star'Ex équipé d'un réseau de 300 traits/mm. Le mode 4 signifie que nous allons trouver le premier terme du polynôme de dispersion en exploitant une ou plusieurs raies étalons en mode latéral (cette ou ces raie(s), est ou sont présente(s) en même temps que le spectre de l'étoile dans l'image du spectre).

Par rapport au fichier de configuration **conf_300_mode1.yaml** utilisé à la section précédente, nous avons ajouté des paramètres qui visent à accroître le rapport signal à bruit (**sky_mode**, **kernel_size**, **sigma_gauss**, **extract_mode**). Il faut être prudent avec le paramètre **kernel_size**, car l'algorithme utilisé, consistant à éliminer le bruit télégraphe, n'est opérant que si le spectre est correctement échantillonné (près de 3,5 pixels/FWHM au moins), or nous sommes ici à la limite. La sanction est l'apparition d'artefact. Il faut surveiller cela de près lorsqu'on exploite une lunette relativement compacte, comme c'est le cas ici).

```
# *****  
# CONF_300_MODE4  
# Etalonnage avec recalage sur raies du fond de ciel en mode latéral  
# *****  
  
# -----  
# Répertoire de travail  
# -----  
working_path: D:/starex413  
  
# -----  
# Fichier batch de traitement  
# -----  
batch_name: EMGGA90  
  
# -----  
# Etalonnage à partir du seul polynôme (pas de spectre étalon)  
# -----  
calib_mode: 4  
  
# -----  
# Coefficients du polynôme d'étalonnage spectral  
# -----  
calib_coef: [-3.3499818443954024e-09, 1.3880360441486678e-05,  
1.536288234700825, 3547.589176010768]  
  
# -----  
# Longueur d'onde des raies d'émission étalon  
# -----  
wavelength: [5577.35]  
  
# -----  
# Position en pixels des raies d'émission  
# -----  
line_pos: [1312]  
  
# -----  
# Longueur de la zone de recherche des raies d'émission  
# -----
```

Enregistrer conf_300_mode4

Les paramètres du fichier d'observation sont les suivants :

Répertoire D:/starex413

Obj Nuit Autofill Effacer

Noms objets : EM*GGA90

Nom images : EMGGA90-

Nb Images : 6

Image calib : EM*GGA90_neon-

Nb Img calib : -1

Trans Atm : None

Décalage Flat : 0

Offset : _offset Nb 0

Dark : _dark Nb 0

Flat : _flat Nb 0

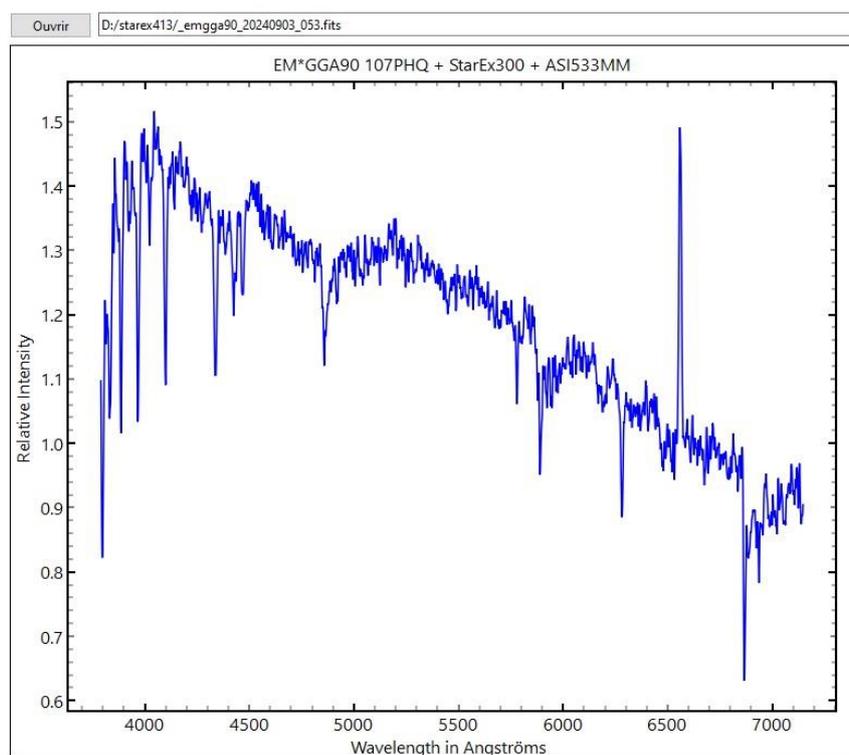
Image postfix : -

Calibration prefix :

Calibration postfix : _neon-

Enregistrer EMGGA90

Voici le résultat, où l'on constate la présence d'une raie H-alpha en assez forte émission :



Quelques rappels pour clore cette section :

Dans notre exemple, l'éclat de la zone photométrique en bas de l'image peut être supérieur à celui de l'étoile observée. Dans ce cas, specINTI ne parviendra pas à déterminer automatiquement la position verticale de la trace du spectre de l'étoile, et le résultat du traitement sera erroné.

La solution consiste à exclure la partie de l'image correspondant à la zone photométrique (ou à tout autre objet gênant). Pour cela, il suffit d'ajouter le paramètre suivant dans le fichier de configuration :

pos_exclude: [180, 270]

où (180, 270) sont les coordonnées verticales d'une zone considérée comme valide pour le traitement.

Si la trace de l'étoile est à peine visible car l'objet est très peu lumineux, vous pouvez définir manuellement la position verticale de la trace en ajoutant dans le fichier de configuration :

ypos : 426

Il est également possible d'affiner la recherche de la trace du spectre en la rendant flottante, mais limitée à la hauteur de la zone de binning, en utilisant une valeur négative :

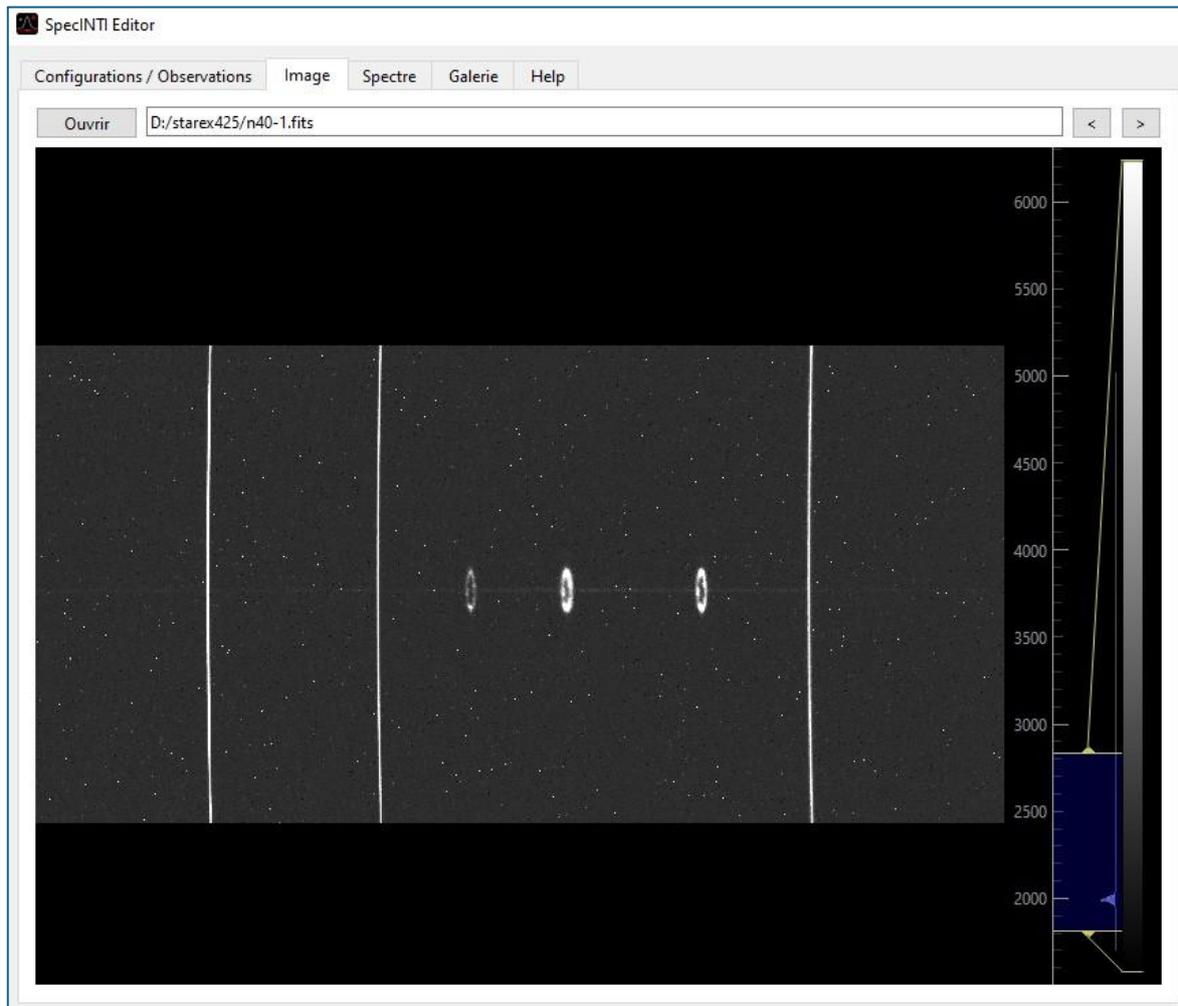
ypos : -426

Attention à l'utilisation du paramètre **ypos**. Son emploi doit rester exceptionnel. Dès que vous n'en avez plus besoin, laissez specINTI retrouver lui-même la trace du spectre. Pensez donc à retirer ce paramètre du fichier de configuration une fois qu'il n'est plus nécessaire (ou le mettre en commentaire).

4. Rappels sur le traitement des objets à surface large

Si vous êtes amené à traiter le spectre d'un objet présentant une surface étendue, quelques précautions doivent être prises.

Voici l'image brute type d'un tel objet, la nébuleuse planétaire NGC 40 observée en haute résolution (Star'Ex HR, sur une lunette Askar 107PHQ, temps de pose de 900 secondes, éclairage latéral par une fibre en entrée) :



La forme ovalisée des raies (hydrogène + azote) vient de la vitesse radiale d'expansion du gaz dans la nébuleuse (effet Doppler-Fizeau).

La précision de l'évaluation automatique de la coordonnée verticale (Y) de la trace du spectre est ici très incertaine. Forcez cette position en ajoutant le paramètre **ypos** dans le fichier de configuration. Par exemple :

ypos : 367

Dans le même ordre d'idée, specINTI est incapable dans une telle situation de trouver tout seul la valeur de l'inclinaison de la trace du spectre. Vous avez sûrement traité le spectre d'une étoile précédemment, aussi, la valeur courante de ce « tilt » est-elle retournée dans ce cas dans la console de sortie et donc connue. Il faut alors fournir cette valeur en degrés au travers du paramètre TILT. Par exemple, ajouter dans le fichier de configuration (où bon vous semble), la ligne suivante :

tilt : -0,06

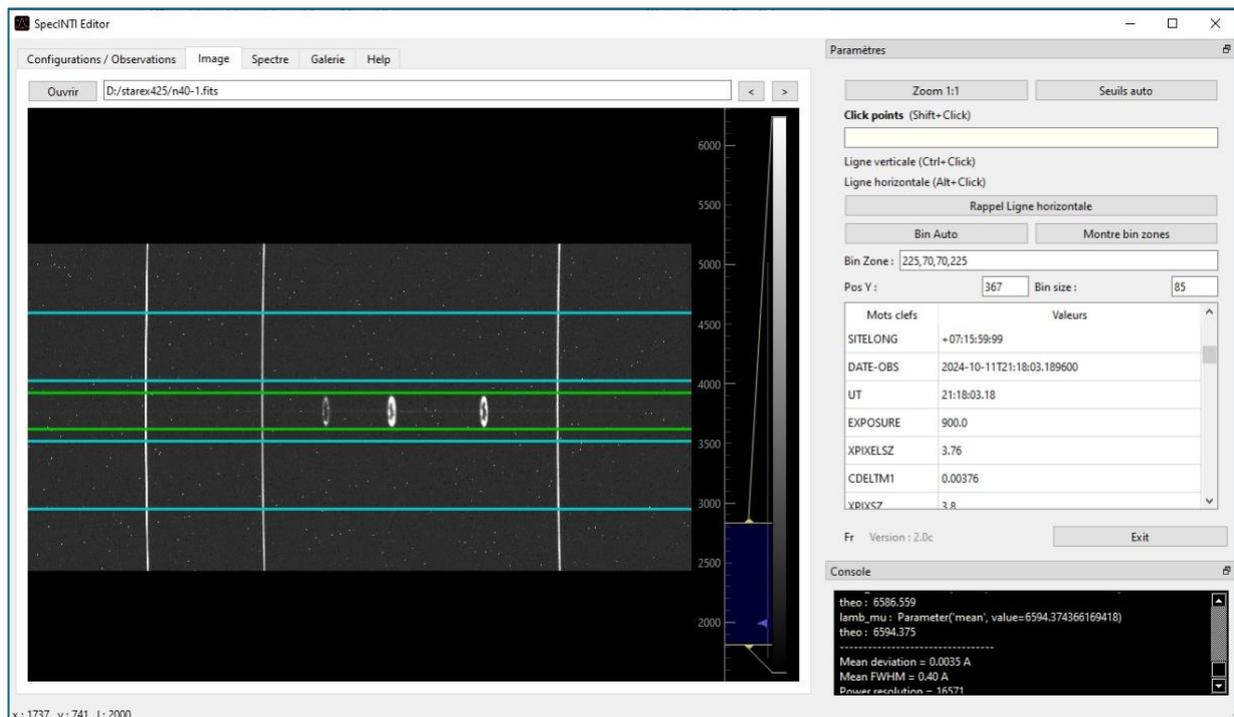
Il faut aussi s'occuper de la hauteur de la zone de binning. Typiquement, sa largeur doit être aussi grande que celle du spectre de l'objet. Par exemple, si l'objet fait 85 pixels de haut,

bin_size: 85

Les zones de calculs du fond de ciel doivent être écartées en conséquence, par exemple :

sky : [225, 70, 70, 225]

Ce qui donne (noter que specINTI Editor V2 autorise le tracé des zones de binning et de calcul du fond de ciel, ce qui a facilité la recherche des bonnes valeurs) :



Par rapport au traitement du spectre d'une étoile, retirer le mode d'extraction optimal du spectre, en faisant :

extract_mode : 0

Le reste du processus est similaire au traitement d'une étoile, mais étant donné les modifications apportées au fichier de configuration, il est recommandé d'en créer un nouveau, que vous nommerez de façon reconnaissable, afin de pouvoir le réutiliser sans le confondre avec le fichier de traitement standard pour les étoiles.

Un dernier point : il peut arriver que l'objet dont on analyse le spectre n'ait pas de nom valide dans SIMBAD, ce qui peut poser un problème, notamment si vous souhaitez récupérer ses coordonnées équatoriales pour calculer la transmission atmosphérique. Cela peut se produire, par exemple, pour une comète.

Dans ce cas, il faut indiquer à specINTI le nom d'un objet proche de celui observé, et dont le nom est reconnu par SIMBAD (généralement une étoile). Il suffit d'ajouter dans le fichier de configuration :

near_star : arcturus

ou

near_star : HD132336

Ces exemples sont bien sûr à adapter selon vos besoins. Comme toujours, pensez à retirer cette ligne ou à la commenter si elle n'est plus nécessaire (lors du traitement de l'objet suivant).