

# specINTI

## Boîte à outils

---

### 1. Introduction

Ce document traite de l'utilisation du logiciel specINTI dans des situations courantes et moins courantes (à vous de juger !). Il couvre les domaines de la haute et de la basse résolution spectrale. Il concerne la version 2.5 et au-dessus de specINTI.

Il ne s'agit pas d'une notice d'utilisation proprement dite. Pour cela, référez-vous au site du programme : [http://www.astrosurf.com/solex/specint1\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specint1_fr.html)

Il est question d'une "boîte à outils" s'appuyant sur des exemples concrets et de nombreux conseils d'emploi et astuces. Elle est organisée comme un "pipeline" de pré-traitement de vos spectres. Cela signifie que si vous suivez pas à pas les différentes sections, vous devriez aboutir à un résultat satisfaisant avec vos propres données. Faire l'effort de bien lire le contenu de cette "boîte à outils" (en n'hésitant pas à vous référer à la documentation générale, le manuel de référence en particulier) devrait donc vous aider à devenir un expert de specINTI.

Le logiciel specINTI a ceci de particulier qu'il détone des autres applications de traitement que l'on trouve en astronomie actuellement par le fait que le dialogue avec l'application se fait au travers d'un quasi unique fichier texte. Nous sommes donc fort loin des interfaces graphiques rutilantes habituelles (mais une interface peut tout de même vous aider à rédiger ce texte, il s'agit de specINTI Editor).

Piloter specINTI c'est donc un peu comme taper à la machine, avec l'avantage d'une grande liberté, de pouvoir partager le texte rédigé, de le faire valider et certainement, ne pas revenir sur cette œuvre si vous en êtes satisfait, y compris plusieurs années après. Ce mode de fonctionnement fait de specINTI un formidable outil de production, bien plus simple à employer qu'il n'y paraît dès lors qu'on en partage l'esprit.

Le texte principal à rédiger se trouve dans un fichier dit de « configuration ». Il décrit votre instrument et la façon de l'utiliser. Il y a un second fichier à rédiger, qui lui décrit l'observation que vous voulez traiter, on dit aussi « réduire » dans le jargon. C'est le fichier « d'observation ». On peut imaginer qu'à terme certains logiciels d'acquisitions écriront pour vous automatiquement ce dernier document (c'est même déjà un peu le cas).

Sans que cela remplace la documentation principale de specINTI, voici quelques détails supplémentaires sur la fonction et l'usage de ces deux fichiers :

- Le fichier de configuration est un simple fichier texte ASCII (dont l'extension doit se terminer par ".yaml"), situé dans un sous-répertoire spécial du répertoire d'installation du logiciel (le sous-répertoire "\_configuration"). Outre des

commentaires, chaque ligne dans le fichier de configuration contient un nom de paramètre suivi de la valeur de ce paramètre. Ces paramètres, à eux seuls, contrôlent le comportement global de specINTI. Au lancement du logiciel, ce dernier se contente de lire votre fichier de configuration, puis exécute en séquence des opérations suivant des modes définis par les valeurs des paramètres. Il est important de noter que le sous-répertoire "\_configuration" est une sorte de réceptacle où vous pouvez placer des configurations de votre choix, correspondant à des usages spécifiques de specINTI ou des instruments divers. On trouve aussi des petits utilitaires, prenant également la forme de fichiers de configuration (nous en utiliserons dans cette boîte à outils).

- Le fichier d'observation est un simple fichier texte ASCII (dont l'extension doit se terminer par ".yaml"), situé obligatoirement dans le répertoire contenant vos données brutes d'observations (appelé par la suite "dossier de travail"). Par blocs, les lignes dans ce fichier précisent les paramètres observationnels d'un objet donné (nombre d'images brutes, nombre d'images de "dark", etc.). Il peut y avoir plusieurs blocs de paramètres, correspondant à autant d'objets distincts à traiter, specINTI étant capable sur les gérer en séquence de manière automatique (cela correspond au traitement "en un coup", ou « par lot » de toute une nuit d'observation).

Nous ne décrivons pas dans cette boîte à outils le fonctionnement détaillé de l'interface "specINTI Editor", qui sera normalement le point d'entrée du logiciel, facilitant l'écriture des fichiers de configuration et d'observation grâce à des automatismes, et vous aidant aussi grâce à des outils graphiques (affichage des images, des spectres ...). Il faut se rapporter à la documentation générale de specINTI pour plus d'informations.

Les conseils de lecture...

Le manuel de référence : [http://www.astrosurf.com/solex/spevinti6\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/spevinti6_fr.html)

La section questions/réponses, avec de très nombreux exemples, plutôt orientés vers le matériel, qui complète parfaitement cette boîte à outils :

[http://www.astrosurf.com/solex/specinti\\_annexe4\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specinti_annexe4_fr.html)

Comme cela va vous arriver, pour commencer, nous partons d'une feuille blanche !

Pour vous aider, des liens sont fournis pour télécharger les données brutes des exemples. Il est vivement recommandé de les rejouer par vous-même afin de bien sentir le fonctionnement du logiciel et reproduire ensuite les bons gestes avec vos propres données. Ne brulez jamais les étapes !

Cette boîte à outils repose sur un certain nombre de fichiers de configuration et d'utilitaires. Vous pouvez télécharger ces fichiers spécifiques depuis le lien :

[http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist\\_sp24/\\_configuration.zip](http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist_sp24/_configuration.zip)

et les copier si vous le souhaitez dans le sous-répertoire "\_configuration" de l'installation specINTI.

## 2. A propos du nom des fichier

Avant de commencer réellement, abordons un sujet pouvant être source de frustration.

Au même titre qu'il est délicat de ne pas tenir un marteau par le manche pour enfoncer un clou, au risque de se faire mal et d'échouer, l'usage de specINTI demande de respecter un protocole d'usage et de la rigueur. De fait, si employer un outil en suivant les règles de l'art peut sembler contraignant au début, cela s'avère toujours bénéfique à long terme.

Notre sujet porte sur la manière de nommer les fichiers bruts au format FITS lors de leur importation dans specINTI. Il est vrai que ce logiciel est exigeant par rapport aux normes habituelles, mais c'est justifié. Ainsi, prendre trop de liberté en écorchant le nom d'un objet revient un peu à déformer un nom de famille, ce qui n'est ni agréable ni pratique pour s'y retrouver.

Le plus souvent, les données à traiter sont des séquences d'images indexées généralement de manière chronologique. Le format accepté par specINTI pour les noms de fichiers se compose d'une racine, d'un séparateur, suivi d'un numéro d'indexation. Cette structure est ensuite complétée par une extension, soit ".fits", soit ".fit", les deux étant acceptées (nous ignorerons généralement l'extension par la suite).

Prenons un exemple :

M51-1

M51-2

M51-3

...

Ici "M51" est la racine, "-" est le séparateur, et les numéros d'indexation sont 1, 2, 3. L'ensemble constitué de la racine et du séparateur, soit "M51-", est parfois appelé *nom générique* dans ce document.

Tout d'abord, la racine du nom des fichiers d'objet doit être simple et reconnue par la base de données SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>).

Pour illustrer cela, prenons l'exemple de l'observation de la galaxie Messier 51, également connue sous le nom de galaxie des "Chiens de Chasse".

Si vous utilisez un nom tel que "la galaxie du tourbillon" (en français) - et il peut exister des dénominations plus farfelues - vos données ne seront pas reconnues par SIMBAD, ce qui pourrait entraîner des problèmes potentiels avec specINTI, et votre archivage n'aura ni valeur technique ni scientifique.

En revanche, des désignations telles que M51, Messier51, NGC5194, UGC8493, ... garantissent une compatibilité avec specINTI.

Il est impératif d'éviter les espaces (ou blancs) dans les noms de fichiers (de l'avis de l'auteur, l'acceptation des espaces dans les noms de fichiers est l'une des pires calamités de l'histoire de l'informatique - ceci explique cela !). Même si specINTI peut, dans certains cas, accepter les espaces, préférez utiliser le caractère « \_ » comme séparateur. Ainsi, pour revenir à l'exemple de Messier 51, au lieu d'utiliser un nom racine tel que "M 51", privilégiez

"M\_51", voire plus simplement "M51". Il est à noter que le caractère de soulignement « \_ » comme séparateur est reconnu par SIMBAD, ce qui n'est pas un hasard.

L'utilisation de majuscules ou de minuscules est totalement indifférente dans specINTI. Des noms tels que M51, m51, Messier51, messier51... sont tous acceptés.

En ce qui concerne le séparateur entre le nom racine et l'index, le tiret "-" est recommandé, bien que d'autres formes soient possibles, specINTI étant souple à ce sujet (le logiciel specINTI Editor offre la possibilité de choisir son séparateur, ce que l'on appelle le "postfix"). Cependant, la suggestion d'utiliser "-" est basée sur des considérations de logique et de lisibilité. Ainsi, le nom de fichier "m\_51-1" apparaît mieux structuré et moins ambigu que "m\_51\_1", grâce à une meilleure utilisation des séparateurs.

La partie la plus délicate concerne l'indexation des fichiers bruts. Supposons que vous souhaitez traiter une séquence de 3 images du spectre de Messier 51, et que vos fichiers bruts soient enregistrés sur votre disque dur sous les noms suivants :

M51-0001.FITS  
M51-0002.FITS  
M51-0003.FITS

ou encore,

M51\_gain200\_20230912\_881.FITS  
M51\_gain200\_20230912\_993.FITS  
M51\_gain200\_20230912\_998.FITS

specINTI refusera ces données, et c'est certainement le sujet qui suscitera le plus d'agacement. La bonne manière de nommer les fichiers indexés pour specINTI est d'utiliser un nom simple avec un indice commençant à 1 :

M51-1.FITS  
M51-2.FITS  
M51-3.FITS

ou encore à la rigueur, on l'a compris,

M51\_1.FITS  
M51\_2.FITS  
M51\_3.FITS

Vous pouvez même utiliser la notation suivante, bien que cela soit fortement déconseillé en raison du risque de confusion :

M511.FITS  
M512.FITS  
M513.FITS

Respecter ces quelques règles permet de mettre en œuvre certains automatismes de specINTI pour une efficacité maximale et d'éviter les erreurs.

Si votre logiciel d'acquisition enregistre des noms de fichiers incompatibles avec specINTI, vous avez trois options : (1) les renommer manuellement ou automatiquement à l'aide d'un

utilitaire existant ou à créer (par exemple, ISIS en propose un), (2) changer votre logiciel d'acquisition pour un autre qui génère des données compatibles, (3) ne pas utiliser specINTI.

### 3. Les images maîtres

Pour bien suivre la procédure qui va suivre (un "pipeline" de traitement), vous pouvez télécharger les données d'illustrations (un jeu d'images brutes) depuis ce lien :

[http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist\\_sp24/starex340.zip](http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist_sp24/starex340.zip)

Il s'agit d'un répertoire d'observation à décompresser dans votre dispositif de stockage. L'observation en question concerne l'étoile 10 Lacertae, un standard spectrophotométrique.

En plus des images spectrales de notre première cible, nous disposons également :

- D'une image du signal d'offset, ou bias, dont le fichier est appelé "o-1.fits". C'est une image exposée pendant 0,01 seconde dans l'obscurité.
- D'une séquence de 13 images du signal thermique, ou signal d'obscurité, exposées chacune pendant 900 secondes à une température de -12°C (la même température que lors de l'observation de l'objet). Cette séquence a été réalisée de jour avec le spectrographe installé dans un réfrigérateur. Les fichiers correspondants sont appelés : n900-1, n900-2, ... n900-13.
- D'une séquence de 50 spectres d'une lampe à filament de tungstène (lampe de type MagLite, de 2700 K de température de couleur) éclairant la fente d'entrée du spectrographe à travers un diffuseur. Cette séquence correspond à une suite d'images nommées : tung-1, tung-2, .... tung-50. Elle est obtenue en dehors du télescope, on posant le spectrographe sur une table durant la journée (on y revient).

La caméra à l'origine de ces images est le modèle ZWO ASI533MM. Notez qu'un fenêtrage à l'acquisition (ou "cropping") a été réalisé au moment de l'acquisition afin de limiter le format des images à la zone utile, avec une marge (le fenêtrage est une pratique toujours recommandée pour éviter d'acquérir des données inutiles et d'alourdir le traitement).

Une opération classique, que l'on retrouve également pour le traitement des images du Ciel Profond, consiste à calculer des "moyennes" de toutes ces images pour produire des images maîtres du signal d'offset, du dark et du flat-field, dans lesquelles le bruit est minimisé. Ce jeu d'images est parfois appelé DOF, pour "Dark, Offset, Flat".

Avec specINTI, le calcul des DOF maîtres se fait de manière transparente, dès votre premier traitement sur un objet cible. Le logiciel utilise les images brutes d'offset, de dark et de flat field pour produire dans le répertoire de travail les images "\_offset", "\_dark", et "\_flat", nos fameux DOF et toujours ces noms, qui sont en quelque sorte réservés.

**Note :** pour bien distinguer les images brutes des images traitées, specINTI ajoute systématiquement le caractère "\_" à l'avant du nom de tous les fichiers de ce type qu'il génère. Cela est vrai pour tous vos traitements, y compris celui des fichiers DOF.

Si normalement le calcul du fichier maître d'offset ne déroge pas à la règle (moyenne d'une séquence brute o-1, o-2, o-3, ... par exemple), nous pouvons cependant faire ici une exception...

Remarquez que dans la séquence DOF brute fournie, il n'y a qu'une seule image d'offset brute, "o-1.fits". Ce n'est a priori pas du tout recommandé car le bruit de cette image se retrouvera tel quel dans vos pré-traitements ultérieurs, entraînant ainsi une dégradation du rapport signal sur bruit, que vous devrez pourtant toujours chercher à maximiser.

L'explication tient à une particularité des capteurs CMOS (une caméra CMOS est utilisée pour produire les images de l'exemple). L'image d'offset y est si uniforme avec les versions modernes de ces détecteurs (tout du moins chez Sony) que le signal d'offset peut se limiter à une seule valeur numérique que l'on applique à tous les pixels de l'image maître "\_offset".

C'est l'idée d'un offset "synthétique", qui a l'avantage d'éliminer toute source de bruit dans celui-ci. Le niveau retenu dans l'image synthétique est le niveau moyen d'intensité constaté dans une image d'offset réelle, ici l'image "o-1.fits". C'est la raison pour laquelle il faut malgré tout acquérir au moins une image brute d'offset, mais une seule suffit.

Depuis l'onglet "Configuration" de specINTI Editor, chargez le fichier de configuration "conf\_make\_offset.yaml". Il est très court, puisqu'il se limite au lancement de la fonction "\_img\_make\_offset" :

```
# ****
# CONF_MAKE_OFFSET
# Synthétise un offset uniforme à partir d'une
# image d'offset effectivement acquise
# ****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Appel de la fonction img_make_offset
# -----
_img_make_offset: [o-1, _offset]
```

Dans specINTI, on appelle "fonction" un paramètre spécial qui lance une procédure de calcul (en général une tâche simple) en toute autonomie, en utilisant principalement les valeurs fournies en paramètres (des nombres, des chaînes de caractères). Le programme s'arrête dès la fin de l'exécution de ladite fonction.

En l'espèce, les paramètres de la fonction "\_img\_make\_offset" utilisent des noms de fichiers images. La fonction sait que les fichiers en question se situent dans un répertoire de travail donné (ici "d:/starex340", mais ce n'est qu'un exemple). Pour ce faire, le fichier de configuration doit contenir le paramètre « working\_path », suivi de l'intitulé du chemin menant au dossier de travail.

Comme arguments de la fonction « \_img\_make\_offset » , on trouve le nom d'une image d'offset brute (ici "o-1") et le nom du fichier d'offset synthétique (ici "\_offset").

Lancez l'exécution de ce fichier de configuration. Vous retrouverez alors l'image synthétique "\_offset" dans le répertoire de travail.

**Astuce :** Si vous ne changez pas d'instrumentation, il y a peu de chance que le contenu du fichier d'offset change, donc le calcul que nous venons de réaliser n'est à faire qu'une fois.

## 4. Comment sont utilisées les images maîtres

Nous évoquons ici la manière d'utiliser les fichiers DOF d'une nuit à l'autre. Tout d'abord, il est recommandé de dédier un répertoire distinct à chaque nuit d'observation. Nommez ces répertoires de manière logique, en incluant par exemple la date d'observation ou une indexation appropriée.

Supposons que vous venez de traiter les spectres présents dans le dossier "starex340", qui est notre dossier de travail actuel. Chaque fois que vous utilisez une séquence de DOF bruts dans un traitement, specINTI génère dans le dossier de travail courant les fichiers maîtres (résultant de l'addition des images brutes), dont on a vu qu'ils portent les noms "`_dark`", "`_offset`" et "`_flat`". Notez le préfixe "`_`" un signe distinctif qu'ajoute specINTI aux éléments qu'il a traité.

Lorsque vous travaillez une cible, au lieu de fournir par exemple une séquence du signal d'obscurité, que le logiciel se sentirait obligé de traiter pour générer un nouveau fichier "`_dark`" (qui écraserait l'ancien), utilisez directement l'unique fichier "`_dark`" pour vos traitements. Il offre une qualité équivalente, tout en simplifiant et accélérant les opérations.

Dans l'exemple ci-dessous, on montre comment remplir le fichier d'observation depuis specINTI Editor :

Fichier(s) Offset :	<code>_offset</code>	nb : 0
Fichier(s) Dark :	<code>n900-</code>	nb : 13
Fichier(s) Flat :	<code>tung-</code>	nb : 50

Il est ici demandé d'exploiter l'image maître « `_offset` », que nous venons de créer. Notez que le nombre d'images précisé est 0 (nous n'avons pas à faire à une séquence d'images). En revanche, pour le « `dark` » et le « `flat-field` », nous utilisons le jeu d'images d'étalonnage sous une forme brute. Sans que vous ne vous en aperceviez, specINTI va générer dans le répertoire de travail les images maîtres « `_dark` » et « `_flat` », qui sont la somme des 13 images d'obscurité et des 50 images de la lampe tungstène, respectivement.

Supposons maintenant que nous venons juste de terminer une observation et que les traitements ne sont pas encore effectués. Les données brutes de cette nouvelle observation se trouvent dans le dossier « starex341 » du disque dur. Nous souhaitons utiliser les fichiers DOF maîtres de la nuit précédente (on refait rarement les DOF, sauf si les circonstances l'exigent, comme un changement de température ou une nouvelle région d'intérêt dans les images).

En fonctionnement « normal » de specINTI, vous devez copier les images DOF de « starex340 » vers « starex341 ». Cependant, au lieu de transférer les 50 flat-field, par exemple, vous pouvez vous limiter à copier l'images « `_flat` ».

Ces copies de fichiers peuvent devenir à la longue un peu fastidieuses, mais ont l'avantages de garder une trace cohérente du travail effectué.

Le logiciel peut fonctionner d'une autre manière pour les images DOF, en particulier si votre spectrographe est considéré comme stable (les mêmes DOF peuvent alors être exploités de très nombreuses fois). Pour cela, créez un dossier dans un coin de votre espace de stockage.

Appelez-le, par exemple :

```
c:/specinti_master
```

Dans le fichier de configuration, indiquez le chemin complet de ce répertoire en tant qu'argument du paramètre « master\_path ». Par exemple ici :

```
master_path : c:/specinti_master
```

Copiez vos fichiers DOF maîtres dans le répertoire "c:/specinti\_master" depuis le dossier "starex240", par exemple. Cette opération n'est à faire qu'une fois. Ensuite, modifiez légèrement le nom de ces fichiers en ajoutant un "\_" supplémentaire. Dans le répertoire "specinti\_master", voici ce que vous devez y trouver (notez les doubles soulignements, n'hésitez pas aussi à changer les noms selon vos préférences, c'est autorisé) :

```
__offset
__dark
__flat
```

Désormais, ces images maîtresses peuvent être exploitées pour le traitement des spectres des nuits suivantes sans avoir à les copier d'un répertoire à l'autre.

Cependant, les images de ce répertoire maître ne sont vues que si vous écrivez implicitement les doubles "\_" devant leurs noms dans le fichier d'observation. Par exemple :

Fichier(s) Offset :	<u>_</u> offset	nb : 0
Fichier(s) Dark :	<u>_</u> dark	nb : 0
Fichier(s) Flat :	<u>_</u> flat	nb : 0

Ici, pour le traitement des spectres, les images maîtresses d'offset et de dark sont chargées depuis le répertoire « c:/specinti\_master ». En revanche l'image maître flat-field est recherchée dans le dossier de travail courant, car son nom ne comporte qu'un seul « \_ ».

## 5. Considérations sur l'étalonnage en longueur d'onde des spectres

L'étalonnage en longueur d'onde, on parle aussi *d'étalonnage spectral*, est une opération consistant à associer une longueur d'onde aux différents pixels de l'image du spectre d'un objet suivant l'axe des couleurs (l'axe de dispersion spectrale).

A la base, il nous faut un spectre de référence réalisé avec notre instrument dans lequel il est possible de repérer des détails dont la longueur d'onde est connue.

Des opérations sont à réaliser en séquence sur ce spectre de référence (isoler le profil brut, identifier la position de raies dans ce spectre, puis calculer le polynôme de dispersion). Nous allons les décrire successivement.

Donc, première opération, extraire de l'image 2D du spectre un graphique traduisant l'intensité observée dans cette image le long de l'axe des longueurs d'onde. Cette courbe est le profil d'intensité spectral du spectre, on dit aussi plus simplement « profil spectral ».

Le profil spectral présente l'avantage d'être plus léger à manipuler qu'une image. Il révèle mieux la distribution spectrale et en donne une meilleure quantification. Certaines opérations sont aussi facilitées, par exemple, il est habituel de linéariser en longueur d'onde le profil spectral, ce qui signifie qu'entre deux points de cette courbe, le pas en longueur d'onde est constant.

Dans l'exemple traité, notre source lumineuse de référence est une étoile. Pas n'importe quelle étoile, une qui présente plusieurs caractéristiques essentielles : un grand nombre de raies spectrales (mais pas trop), une distribution uniforme dans le spectre, un bon contraste des raies, et bien sûr, une connaissance précise de leurs longueurs d'onde. De plus, il est préférable que cette étoile soit relativement brillante pour une observation aisée, offrant ainsi un rapport signal sur bruit satisfaisant sans trop d'effort.

Notre choix s'est porté sur l'étoile 10 Lacertae, également connue sous le nom de 10 Lac, un standard spectrophotométrique bien établi, affichant une magnitude de 4,8 et un type spectral O9V.

L'étoile 10 Lac est particulièrement intéressante car en plus elle va nous permettre plus tard de trouver la réponse en intensité spectrale de notre instrument. En utilisant 10 Lac, nous réalisons donc deux tâches en une, ce qui est idéal (bien entendu, d'autres choix sont possibles).

Il est important de noter que pour évaluer la loi d'étalonnage, il est possible d'utiliser une source naturelle, comme dans notre cas, le spectre d'une étoile, mais aussi une source spectrale artificielle produisant un spectre de raies d'émission fines. Le problème des sources artificielles est qu'elles ne sont pas toujours évidentes à trouver, en particulier lorsqu'on demande une distribution spectrale des raies en longueur d'onde assez homogène.

Nous avons des avantages à exploiter une étoile telle que 10 Lac, gratuite et aux bonnes propriétés. Cependant, dans la plupart des cas, une lampe à raies d'émission, à faible exigence spectrale, est nécessaire pour compléter l'étalonnage spectral de chaque cible observée, ce point sera abordé plus en détail ultérieurement.

Nous faisons ici l'hypothèse que l'équation d'étalonnage spectral (un polynôme d'un certain degré), qui relie les points dans le spectre à leurs longueurs d'onde, est une *constante instrumentale*, demeurant stable d'une cible à l'autre visée. C'est généralement une hypothèse valable, à quelques détails près qui seront discutés ultérieurement (notamment le problème de la « constante », le premier terme du polynôme).

Le spectrographe utilisé pour cet exemple est un Star'Ex LR (Low Resolution), configuré en basse résolution (fente de 23 microns, réseau de 300 traits/mm et caméra ASI533MM). Il est monté au foyer d'un télescope Newton de 150 mm F/5 :



Voici l'aspect d'une des images 2D du spectre de 10 Lac, exposée 30 secondes :



À la base, le capteur utilisé comporte 3008x3008 pixels. Dès l'acquisition, nous ne conservons qu'une sous-image (« crop ») de seulement 2620 x 431 pixels, ce qui est amplement suffisant pour capturer l'ensemble du spectre utile avec une marge confortable.

**Astuce :** Il est important d'éviter de travailler sur l'image complète afin de réduire la taille des fichiers et d'accélérer les traitements. La fenêtre utilisée, également appelée ROI (Region Of Interest), se contente d'encadrer la trace filiforme du spectre tout en laissant un espace en-dessous et au-dessus pour permettre une mesure précise de l'intensité du fond de ciel.

Nous disposons de 12 images du spectre de 10 Lacertae, dont les fichiers sont nommés dès l'acquisition (l'extension .fits est ignorée) : 10lac-1, 10lac-2, 10lac-3, ..., 10lac-12. Nous allons explorer deux méthodes pour calculer le polynôme de dispersion. D'abord, une méthode très manuelle, que vous utiliserez rarement, sauf dans des situations bien particulières. Ensuite, nous présenterons une méthode bien plus rapide à la section 8, qui sera privilégiée.

Cependant, nous tenons à présenter la méthode manuelle car elle met en œuvre un ensemble d'outils et de méthodes importants, qui peuvent vous être utiles un jour, en

particulier la notion de « fonction » dans specINTI. Si vous êtes pressé, vous pouvez passer directement à la section 8.

## 6. L'extraction du profil spectral brut, le spectre de niveau #0

Examinons tout d'abord la séquence d'opérations nécessaire pour déterminer la loi de dispersion spectrale en mode manuel à partir d'un spectre d'étoile.

Commençons par calculer le profil spectral brut de 10 Lacertae. L'utilisation du terme "brut" indique que le graphique obtenu à ce stade ne sera pas calibré en termes de longueur d'onde. Cependant, il reflète de manière précise la distribution des intensités apparentes relevées dans les pixels de l'image en 2D.

Dans l'éditeur specINTI, remplissez l'onglet "Observation" (et donc le fichier d'observation) de la manière suivante :

Observations directory : D:/starex340

Objects list : 10 Lac

Images list : 10Lac-

Nb of img by object : 12

Calibration list : 10Lac\_neon-

Nb of calibration img : 1

▲ Advanced mode

File(s) Offset : offset nb : 0

File(s) Dark : n900- nb : 13

File(s) Flat : tung- nb : 50

File Img postfix : -

File Cal prefix :

File Cal postfix : neon-

Observations file to save : 10Lac

Il est judicieux de spécifier immédiatement à specINTI le chemin du dossier de travail en cliquant sur le bouton "Parcourir". C'est dans ce dossier que se trouvent les observations à traiter ainsi que, plus tard, les résultats.

**Astuce :** SpecINTI Editor conserve les données entrées. Lorsque vous rouvrez l'application, vous trouverez les champs déjà préremplis, tels qu'ils étaient au moment de la fermeture. Vous pouvez identifier le nom de notre objet, "10 Lac", dans le champ "Liste objets". En cliquant sur le bouton "Auto", le logiciel remplit automatiquement certains champs.

Le nom générique (ou racine) « 10lac- » de nos spectres bruts est reconstitué dans le champ "Liste images". Notez que le champ "Fichier Img postfix" contient le caractère "-", que vous

devrez probablement remplir une fois pour toutes si vous nommez correctement vos données.

**Remarque :** Le nom de l'objet fourni est « 10 Lac », avec un espace entre le « 10 » et « Lac ». Il s'agit d'un nom dit "Catalogue". C'est ce nom d'objet, tel quel, qui va être enregistré dans l'entête du fichier FITS du spectre traité. Cette écriture est à la fois compatible avec SIMBAD et lisible pour des analyses ultérieures. De même, vous écrirez de préférence "NGC 891" comme nom de catalogue (ou "ngc 891"). Cependant, notez que specINTI supprime tous les espaces lorsqu'il s'agit de définir le nom des fichiers d'entrée sur votre disque au moment de cliquez sur "Auto". C'est en quelque sorte la norme choisie pour la définition des noms génériques des fichiers à l'entrée de specINTI (une sobriété maximale dans l'écriture, donc par exemple : ngc891-1, ngc891-2, ...).

En même temps, le logiciel détermine automatiquement le nombre d'images de la séquence (dans ce cas, 12 images). C'est ici que l'on commence à comprendre l'importance de bien nommer les images brutes.

Indiquez également le nom des images DOF dans les champs correspondants. Remarquez que pour l'image maître d'offset, nous nous sommes bien gardés d'indiquer "o-", car sinon, en cliquant sur "Auto", le logiciel trouverait une seule image. Cela donnerait le bon nombre d'images, mais ce ne serait pas satisfaisant, car cette seule image introduirait un bruit significatif lors du traitement. La meilleure option est d'indiquer le nom du fichier « \_offset » que nous avons calculé précédemment. Puisqu'il n'appartient pas à une série indexée, il faut utiliser 0 comme nombre d'images. De cette manière, specINTI reconnaîtra correctement l'image « \_offset.fits » comme l'image d'offset maître.

**Astuce :** Que faire si la liste des DOF est incomplète ? SpecINTI peut parfaitement traiter vos spectres en l'absence d'un élément DOF, voire même de tous les DOF. Par exemple, supposons que vous n'ayez pas à disposition des images du signal d'obscurité. Dans le champ "Fichier Dark", inscrivez alors « none ». Profitez-en pour mettre à 0 le nombre d'images correspondant (ne laissez pas ce champ sans valeur). Si vous ne disposez ni de l'offset, ni du dark, ni du flat, inscrivez « none » dans tous les champs. C'est une grande flexibilité offerte par SpecINTI.

Cliquez sur le bouton « Sauver ». SpecINTI Editor construit et sauvegarde alors le fichier d'observation dans le dossier de travail. Avant cela, pensez à donner un nom à ce fichier. Dans l'exemple, il sera nommé « 10lac.yaml » (vous êtes totalement libre de choisir ce nom).

Pour le traitement proprement dit, nous utilisons le fichier de configuration nommé « conf\_extract\_raw.yaml » (c'est-à-dire : extraction d'un profil spectral brut à partir de notre séquence d'images 2D). Voici son contenu que vous pouvez afficher depuis l'onglet "Configuration" en cliquant sur le nom correspondant dans la liste à droite.

**Remarque :** Cette liste à droite montre le contenu du sous-répertoire « \_configuration ». C'est une sorte de bibliothèque de configurations instrumentales ou d'utilitaires qui s'affichent à cet endroit.

Le contenu de ce fichier :

```
# ****
# CONF_EXTRACT_RAW
# Extraction d'un profil d'intensité brut à partir d'une image 2D
# Niveau 0
# ****
```

```
# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: 10Lac

# -----
# Mode d'extraction du spectre (non étalonné)
# -----
calib_mode: -5

# -----
# Hauteur de binning
# -----
bin_size: 30

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel autour de la trace
# -----
sky: [160, 20, 20, 160]

# -----
# Zone de calcul des paramètres géométriques
# -----
xlimit: [600, 1800]

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

Voici une brève explication des paramètres :

- working\_path : le chemin du répertoire de travail actuel.
- batch\_name : le nom du fichier .yaml d'observation.
- calib\_mode : le mode d'utilisation de SpecINTI. La valeur -5 indique un mode spécial, à savoir, l'extraction d'un profil brut à partir de la moyenne des images spectrales en entrée.
- bin\_size : la hauteur de binning en pixels.
- sky : une liste de valeurs indiquant, en pixels, les parties de l'image où le niveau du fond de ciel est calculé (de part et d'autre de la trace du spectre).
- xlimit : la plage en coordonnées horizontales en pixels dans laquelle les paramètres géométriques du spectre sont calculés, notamment l'inclinaison de la trace (l'angle de « tilt »).
- check\_mode : précise si vous êtes en mode de vérification du fichier de configuration. Lorsque vous débutez, la valeur 1 est recommandée, car SpecINTI fournit alors de nombreuses informations sur le déroulement du programme et écrit des fichiers de contrôle dans le disque, ce qui peut s'avérer utile pour identifier les erreurs (la valeur par défaut est 0 si le paramètre n'est pas défini, avec un affichage plus sobre).

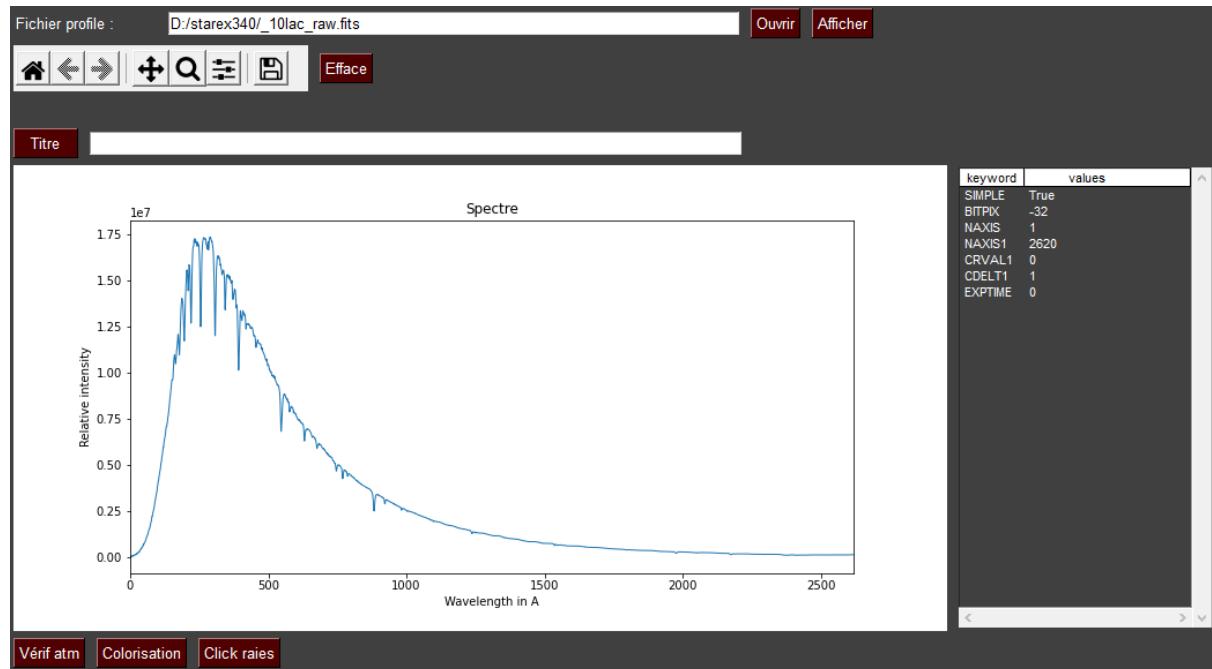
La hauteur de la zone de binning (paramètre « bin\_size ») est définie généralement large afin de s'assurer de collecter tout le signal de notre spectre le long de sa trace. Nous soustrayons également l'intensité du fond de ciel (paramètre « sky »), mesurée de part et d'autre de la trace dans des zones cohérentes avec la hauteur de binning adoptée.

Cliquez sur le bouton « Exécuter » pour lancer le traitement. Après quelques secondes, le profil brut « \_10lac\_raw.fits » est sauvegardé dans le dossier de travail (consultez les

indications dans le terminal de sortie). Il s'agit de la somme du signal mesuré dans nos 12 images 2D du spectre de 10 Lacertae.

Le spectre ainsi calculé est dit de « niveau 0 ». Un tel niveau de produit spectral signifie qu'aucune opération d'étalonnage n'a été appliquée. Ce niveau se contente de représenter sous forme d'une courbe l'image spectrale fournie par Star'Ex et pixelisée par le détecteur.

Vous pouvez afficher le contenu de ce profil depuis l'onglet « Visu profil » de SpecINTI Editor ou depuis tout autre logiciel capable d'afficher un profil de spectre, tel que ISIS, par exemple. Voici le profil de niveau #0 trouvé.



## 7. Identification et mesure des raies spectrales

Le spectre de 10 Lacertae comporte de nombreuses raies, faciles à identifier, et donc la longueur d'onde est connue. Cependant, si l'affichage révèle bien ces raies dans la partie bleue (à gauche), il n'en est pas de même dans la partie rouge. Des raies sont bien présentes, mais un problème de visualisation empêche de bien les voir en raison de la très grande variation d'intensité le long de la trace. Nous proposons ici une technique pour régler cette difficulté, qui améliore par ailleurs la précision de mesure. C'est aussi l'occasion de mieux se familiariser au principe des fonctions dans specINTI.

Le but est de modéliser grossièrement le continuum du spectre par un lissage très énergique du profil, puis de diviser le profil brut de départ par ce profil lissé. Nous utilisons pour cela un petit utilitaire, le fichier de configuration « conf\_remove\_continuum.yaml » :

```
# ****
# CONF_REMOVE_CONTINUUM
# Rectification du continuum d'un spectre.
# ****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
```

```

working_path: D:/starex340

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: 10Lac

_begin:
_pro.blur: [_10lac_raw, 200, p1]
_pro.div: [_10lac_raw, p1, p2]
_end

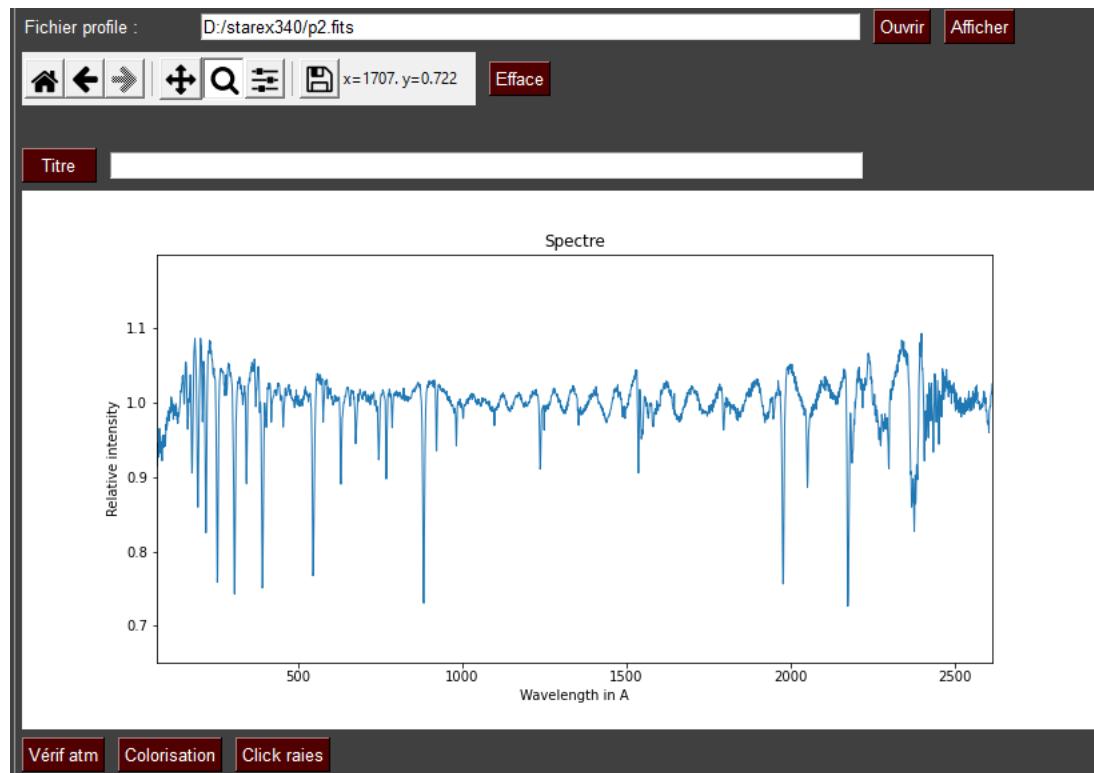
```

Dans ce listing nous utilisons deux fonctions. D'abord « \_pro.blur », qui réalise le lissage du profil « \_10lac\_raw », avec comme résultat profil « p1.fits », automatiquement sauvegardé dans le dossier de travail. La valeur 200 fixe la force du lissage (valeur typique pour un premier essai, plus elle est forte, plus le lissage est puissant). Au besoin, vous pouvez réaliser des tests en visualisant le profil « p1.fits ».

La fonction suivante, « \_pro.div », calcule la division du profil de départ par le profil lissé, et génère le profil rectifié (sans le continuum) sous le nom « p2.fits ». Vous êtes bien sûr libre du choix des noms.

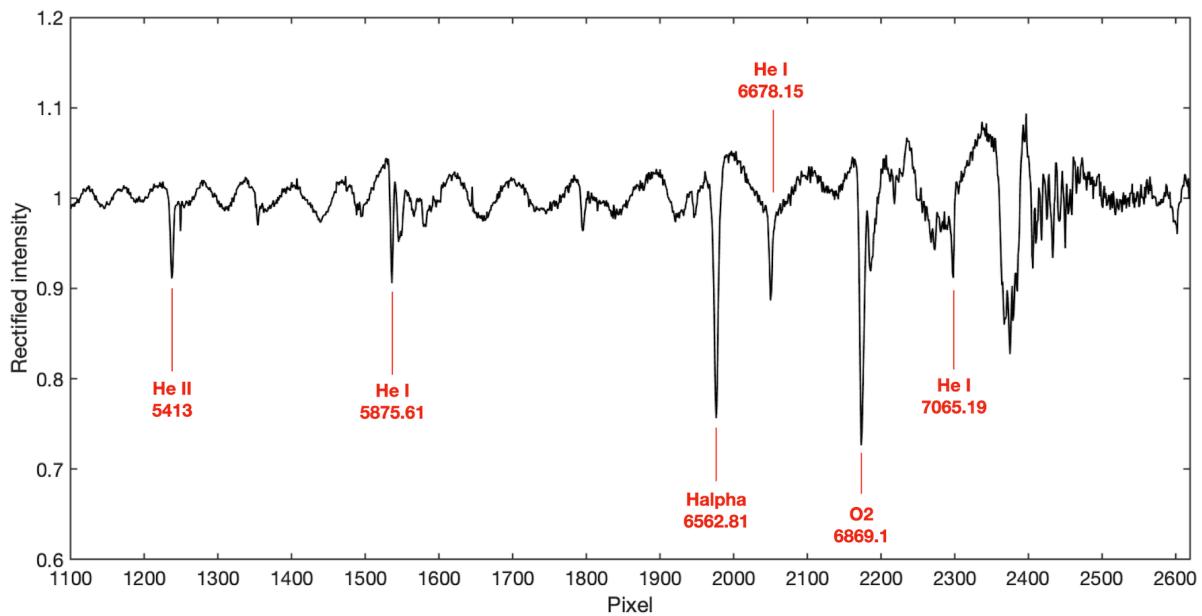
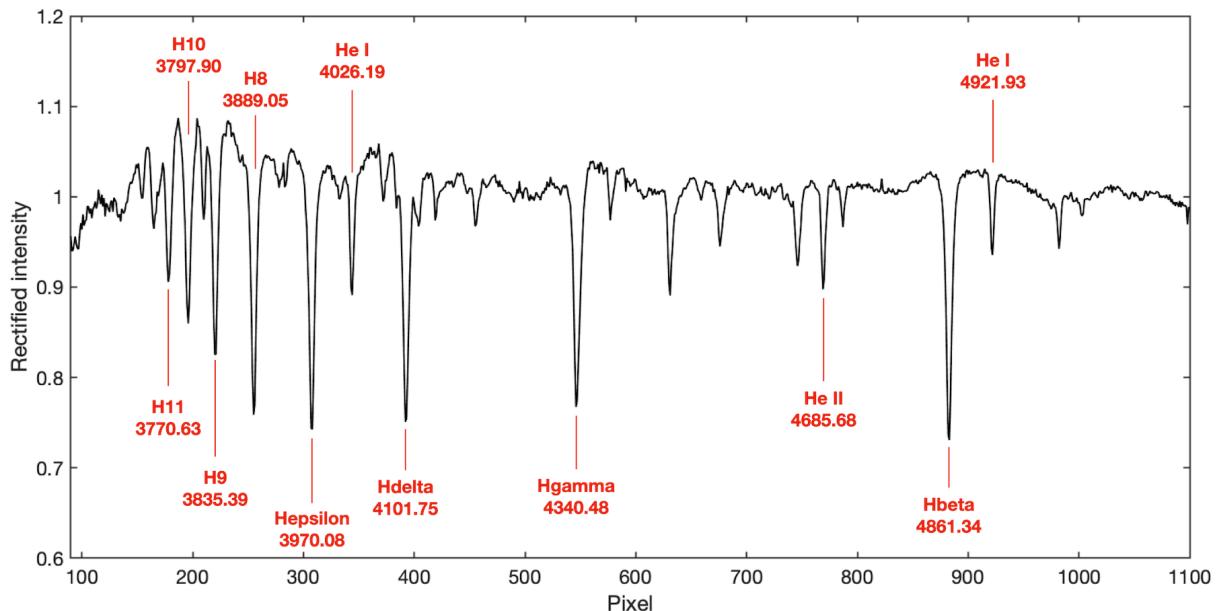
**Astuces :** il est possible d'enchaîner plusieurs fonctions, comme ici, en les encadrant par « \_begin » et « \_end ».

Voici le résultat (il peut y avoir des artefacts dans les extrémités, jouez alors sur la loupe pour mieux percevoir les parties d'intérêt) :



Un certain nombre de défauts affectent ce spectre, notamment des oscillations qui ne sont pas d'origine naturelle, mais qui sont le résultat d'effets instrumentaux (causés par la réponse spectrale du détecteur). La résolution de ces problèmes sera abordée ultérieurement. Pour le moment, notre priorité est l'identification et la localisation des raies.

La figure suivante représente une sorte d'atlas des raies spectrales dans le spectre de l'étoile 10 Lacertae, avec leurs longueurs d'onde précises :



Parmi cet ensemble, voici la liste des longueurs d'onde que nous choisissons pour traiter le spectre :

[3770.63, 3797.90, 3835.39, 3889.05, 3970.08, 4026.19, 4101.75, 4340.48, 4685.68, 4861.34, 4921.93, 5875.61, 6562.81, 6678.15, 7065.19]

La liste est un peu longue, elle comporte 15 raies, qui sont autant de points de mesure. On pourrait en choisir moins, mais toujours bien distribuées dans le domaine spectral. Soyez vigilant lors de la transcription manuelle des valeurs dans le fichier de configuration, ne faites pas d'erreur. Un copier-coller est la meilleure méthode.

En regard de ces longueurs d'onde de raies, nous devons mettre une liste de même taille contenant les coordonnées en pixels de ces mêmes raies dans le profil spectral. Celui que nous venons de calculer, sans le continuum (on dit qu'il est rectifié), est parfait pour cette tâche. A ce stade nous nous contentons d'évaluer la position du centre des raies au pixel près. Malgré cette approximation, la précision d'étalonnage sera déjà satisfaisante du fait du mécanisme de lissage des erreurs de pointage. Nous verrons un peu plus loin comment mieux faire.

Pour estimer la coordonnée horizontale (axe X) en pixels de chaque raie, vous pouvez vous appuyer sur l'onglet « Visu profil » de specINTI Editor, puis l'outil « Click raies », ou utiliser un autre logiciel de votre choix. Voici le résultat pour notre exemple (15 positions donc) :

[178, 195, 220, 255, 307, 343, 392, 547, 769, 883, 922, 1536, 1976, 2050, 2297]

**Astuces :** si vous devez vous déplacer dans le spectre avec un zoom, il est recommandé de désélectionner « Click raies » puis de resélectionner cette option quand vous vous trouvez dans la partie voulue du spectre.

## 8. Calcul du polynôme d'étalonnage spectral

Pour calculer le polynôme d'étalonnage spectral, ouvrez un nouvel utilitaire, le fichier de configuration « conf\_compute\_poly », qui doit ressembler à ceci :

```
# ****
# CONF_COMPUTE_POLY
# Calcul manuel de la loi de dispersion
# *****

# -----
# Calcul du polynôme à partir d'une liste de points
# -----
calib_mode: -4

# -----
# Odre du polynôme de dispersion à évaluer
# -----
fit_order: 3

# -----
# Longueurs d'onde des points mesurés
# -----
fit_wavelength: [3770.63, 3797.90, 3835.39, 3889.05, 3970.08, 4026.19, 4101.75, 4340.48,
4685.68, 4861.34, 4921.93, 5875.61, 6562.81, 6678.15, 7065.19]

# -----
# Coordonnées relevées des points
# -----
fit_posx: [178, 196, 220, 255, 307, 343, 392, 547, 769, 883, 922, 1536, 1976, 2050, 2297]
```

Le paramètre « calib\_mode » prend ici la valeur -4, encore un mode spécial, justement dédié au calcul d'un polynôme ajustant aux moindres carrés des couples de points (voir le manuel de référence de specINTI).

On reconnaît la liste de longueurs d'onde et la liste des positions de raies trouvées, comme arguments respectifs des paramètres « fit\_wavelength » et « fit\_posx ».

Le paramètre « fit\_order » détermine le degré du polynôme ajusté. Le degré 3 est bien adapté pour un spectrographe Star'Ex LR (ne cherchez pas plus). Après avoir cliqué sur le

bouton « Exécuter » vous obtenez les valeurs recherchées des termes du polynôme dans le terminal de sortie :

```
-----
Polynomial fit
calib_coef: [1.3697786967858392e-09, 4.7375755940865985e-07, 1.5459285880960587,
3495.239344027813]
-----
O-C: [ 0.193 -0.37  0.009 -0.455  0.156  0.586  0.351 -0.748  0.718 -0.267
-0.132 -0.257  0.397 -0.035 -0.148]
Root Mean Square Error = 0.3902 A
End.
```

Il est toujours intéressant d'examiner l'erreur finale d'ajustement. Dans ce cas, elle est d'environ 0,4 Å, alors que l'échantillonnage spectral moyen est de 1,55 Å par pixel et que la finesse spectrale est de 8 Å. Par conséquent, le résultat semble très satisfaisant, mais il convient toutefois de ne pas se fier uniquement aux apparences. Bien que le polynôme s'ajuste parfaitement à tous les points que nous lui avons fournis, la véritable question concerne la qualité des mesures (la précision du pointage au pixel près sur le centre apparent des raies, par exemple). Il est donc nécessaire d'être prudent, car l'erreur réelle pourrait être supérieure à celle indiquée dans la valeur RMS affichée. Néanmoins, nous sommes assez proches d'une mesure de bonne qualité en l'espèce.

**Astuce :** La façon dont le résultat est présenté dans le terminal (« calib\_coef : ... ») facilite le copier-coller dans le fichier de configuration, éliminant ainsi les risques d'erreur d'une transcription manuelle.

Vous pourriez envisager d'améliorer la précision de l'étalonnage spectral en utilisant davantage de termes dans le polynôme, par exemple en optant pour un degré 4, mais l'erreur RMS diminue seulement légèrement, et même pas du tout. Ceci indique qu'un polynôme de degré 3 convient parfaitement à l'ajustement de la loi de dispersion. Un polynôme de degré 2 (une loi parabolique) donne déjà un résultat très satisfaisant dans ce cas. Il est important de noter que cela ne s'applique pas à tous les spectrographes, notamment le Alpy600, qui est un peu plus difficile à étalonner en raison de la présence d'un "grism" (la combinaison d'un réseau de diffraction et d'un prisme produit une non linéarité de dispersion spectrale spécifique).

**Astuce :** La qualité d'étalonnage spectral repose sur un suréchantillonnage raisonnablement élevé du spectre observé. Ainsi, les caméras à petits pixels sont avantagées. Cela peut sembler contre-intuitif, mais l'utilisation excessive d'un binning 2x2 des pixels au moment de l'acquisition est une erreur dans la plupart des situations. Privilégiez toujours le binning 1x1 avec les capteurs CMOS. Le filtrage des bruits non gaussien sera aussi plus efficace par la même occasion.

## 9. L'amélioration de l'étalonnage spectral et l'accélération de la procédure

La précision de l'étalonnage spectral peut être améliorée. Plutôt que faire confiance à des pointages manuels du centre des raies, laissez à specINTI le soin de faire une mesure plus précise, à une fraction de pixels près, qui plus est à partir d'un ajustement du profil de chaque raie pour trouver un centre plus probable (prise en compte de la forme des raies d'absorption).

Nous utilisons pour cela le mode spécial -1. Outre un accroissement potentiel de la précision, ce mode automatise les opérations d'extraction du profil spectral et de son lissage. Plus besoin donc d'utiliser des outils comme « conf\_extract\_raw » ou « conf\_remove\_continuum » dans ce contexte. Le calcul du polynôme de dispersion est dès lors bien plus simple et rapide. Ce sera s'en doute votre mode préféré si vous cherchez à étalonner un spectrographe à partir d'un spectre d'étoile acquis avec celui-ci.

Voici le fichier de configuration correspondant (« conf\_compute\_poly2.yaml ») :

```
# ****
# CONF_COMPUTE_POLY2
# Calcul du polynôme de dispersion à partir d'un ensemble de raies d'absorption
# donc la position est évaluée par le logiciel à une fraction de pixel près.
# Exploitation du mode -1
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: 10Lac

# -----
# Recherche et étalonnage d'un ensemble de raies d'absorption
# -----
calib_mode: -1

# -----
# Ordre du polynôme de dispersion à évaluer
# -----
fit_order: 3

# -----
# Longueurs d'onde des points mesurés
# -----
fit_wavelength: [3770.63, 3797.90, 3835.39, 3889.05, 3970.08, 4026.19, 4101.75, 4340.48,
4685.68, 4861.34, 4921.93, 5875.61, 6562.81, 6678.15, 7065.19]

# -----
# Coordonnées relevée des points
# -----
fit_posx: [178, 196, 220, 255, 307, 343, 392, 547, 769, 883, 922, 1536, 1976, 2050, 2297]

# -----
# Intervalle de recherche des raies d'absorption
# -----
search_wide: 8

# -----
# Hauteur de binning
# -----
bin_size : 30

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 20, 20, 160]

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

# -----
# Largeur de binning
# -----
bin_size: 30

# -----
```

```
# Zone de calcul des paramètres géométriques
# -----
xlimit: [600, 1800]

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

Les paramètres sont déjà ceux utilisés en mode manuel, mais regroupés dans un seul fichier de configuration. Autre nuance importante : les valeurs fournies au travers du paramètre « fit\_posx » ne sont à présent que des approximations (position des raies à +/- 4 pixels car la valeur du paramètre « search\_wide » est fixée à 8, en quelque un domaine de tolérance en pixels pour la recherche des raies d'absorption). C'est specINTI qui affinera ces positions pour vous.

Voici le polynôme calculé, avec l'erreur associé :

```
Line coordinates find:
[ 179.67774178 196.86153141 221.45224697 256.21705029 308.41947413
 344.89519673 393.58831445 547.77860381 770.30299539 883.7254091
 922.72643671 1536.72803631 1977.08720072 2051.27596072 2298.3270732 ]
Calibration coefficients:
calib_coef: [1.085594959858908e-09, 5.813166788913862e-07, 1.5472939986711927,
3494.266662841573]
Computed wavelength:
[3770.75841205 3797.352492 3835.41098395 3889.21838427 3970.0214486
4026.48653726 4101.87148859 4340.6451703 4685.442875 4861.30205269
4921.79242928 5875.79242459 6562.50147892 6678.44630736 7065.13751516]
O-C: [-0.128 0.548 -0.021 -0.168 0.059 -0.297 -0.121 -0.165 0.237 0.038
0.138 -0.182 0.309 -0.296 0.052]
Root Mean Square Error = 0.2272 A
End.
```

**Astuce :** Au fil du temps, entre le jour J et le jour J+n, en raison du caractère évolutif d'un spectrographe, il n'est pas rare que l'image optique du spectre se déplace à la surface du détecteur. Le déplacement le long de l'axe spatial n'est pas très critique, mais celui le long de l'axe spectral (l'axe des longueurs d'onde) est un peu plus délicat. Un déplacement spectral implique des modifications des valeurs indiquées dans le paramètre "fit\_posx". Cela se traduit par un décalage global, par exemple, les valeurs [178, 196, 220, ...] deviennent [168, 186, 210, ...]. Il est évident que le spectre s'est déplacé de 10 pixels vers la gauche de l'image. Plutôt que de retaper manuellement toutes les valeurs dans l'argument de « fit\_posx » pour les mettre à jour, ce qui serait fastidieux, conservez les valeurs initiales de ce paramètre et ajoutez un nouveau paramètre où bon vous semble dans le fichier de configuration (au début, au milieu ou à la fin) : le paramètre « shift\_posx ». Dans notre exemple, puisque le déplacement est de -10 pixels depuis la mesure de référence, vous pouvez simplement écrire :

```
# -----
# Prise en compte d'un glissement spectral
# -----
shift_posx: -10
```

Pas de panique, cette valeur n'a pas à être connu très précisément (la tolérance en pixel est donnée par la valeur du paramètre « search\_wide » on le rappelle, 8 pixels dans l'exemple (une valeur typique recommandée, qui peut influencer plus ou moins le résultat du calcul).

## 10. Le spectre de niveau #1

Maintenant que la loi de dispersion polynomiale est connue, nous pouvons passer aux choses sérieuses et plus intéressantes. Notre tâche consiste à calculer un profil spectral gradué en longueur d'onde plutôt qu'en numéros de pixels. Le résultat est un produit spectral dit de niveau #1, qui va ressembler bien plus à un vrai spectre.

Nous utilisons le fichier de configuration « conf\_level1\_mode1 » :

```
# ****
# CONF_LEVEL1_MODE1
# Extraction du spectre étalonné en longueur d'onde via un polynôme (mode 1)
# Niveau 1 de traitement
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: 10Lac

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

# -----
# Coefficients du polynôme d'étalement spectral
# -----
calib_coef: [1.3697786967858392e-09, 4.7375755940865985e-07, 1.5459285880960587,
3495.239344027813]

# -----
# Largeur de binning
# -----
bin_size: 30

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 20, 20, 160]

# -----
# Zone de calcul des paramètres géométriques
# -----
xlimit: [600, 1800]

# -----
# Zone de normalisation à l'unité
# -----
norm_wave: [6620, 6640]

# -----
# Zone de cropping du profil
# -----
crop_wave: [3650, 7150]

# -----
# Pouvoir de résolution estimée
# -----
power_res: 800

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

On retrouve les coefficients du polynôme calculés précédemment comme argument du paramètre « calib\_coef » (vous pouvez les copier-coller depuis la console de sortie).

Le paramètre « norm\_wave » précise que l'on souhaite normaliser l'intensité à l'unité à partir de l'intensité moyenne trouvée entre les longueurs d'onde 6620 Å et 6640 Å. Qu'est-ce que cela signifie exactement ? Dans le profil traité, vous constaterez qu'aux alentours des longueurs d'onde 6620 Å - 6640 Å, l'intensité du spectre est proche de la valeur 1. Bien sûr, les intensités varient de part et d'autre, mais elles sont exprimées *relativement* à cette valeur unitaire. C'est beaucoup plus compréhensible que de graduer le spectre en utilisant les unités des images brutes (ADU, « Analog Digital Unit »). Par exemple, il est beaucoup plus facile de repérer l'endroit du spectre où le signal est deux fois plus intense qu'au point de référence choisi.

**Astuce :** Le point de référence défini avec le paramètre « norm\_wave » est idéalement sélectionné dans une région du spectre pauvre en raies spectrales et où le continuum semble relativement uniforme. Il est recommandé de choisir une fois pour toutes ce point de référence et de s'y tenir. De cette manière, vous pourrez facilement comparer l'intensité spectrale relative des différents objets pour lesquels vous avez obtenu le spectre.

Le spectre est recadré entre les longueurs d'onde de 3700 Å et 7150 Å, supposées valides à ce stade (paramètre « crop\_wave »).

Notez qu'il est impératif de fournir une valeur estimée du pouvoir de résolution spectral (« power\_res »). En effet, dans le mode d'étalonnage de type 1, SpecINTI n'a pas la possibilité de déterminer cette valeur automatiquement, car aucun spectre à raies d'émission n'est utilisé lors du traitement, alors que c'est la seule méthode permettant d'obtenir une valeur fiable du pouvoir de résolution, par la mesure de la largeur des raies étroites à la base. Une valeur estimée du pouvoir de résolution est nécessaire pour compléter correctement l'en-tête du fichier FITS du spectre traité.

Le résultat est le spectre nommé "\_10lac\_20230727\_107.fits", qui a l'apparence du précédent, de niveau #0, mais qui est désormais étalonné en longueur d'onde.

**Remarque :** Les noms des fichiers résultants traités par SpecINTI commencent toujours par le caractère " \_ ", ce qui facilite leur distinction par rapport aux fichiers bruts et simplifie leur tri. De plus, la date de la première image de la séquence est indiquée dans le nom du fichier.

## 11. Préparation des données pour l'évaluation de la réponse spectrale

La dernière opération critique d'étalonnage consiste à corriger la *réponse instrumentale*. En effet, l'aspect du spectre obtenu à l'étape précédente est fortement altéré par la manière dont l'instrument, y compris l'atmosphère, transmet ou collecte le signal optique.

Supposons que l'instrument présente une sensibilité plus élevée dans le bleu que dans le rouge, ce qui signifie qu'il capte davantage de flux lumineux dans le bleu par rapport au rouge. Dans cette situation, l'instrument génère une intensité artificielle plus élevée dans le bleu et une intensité réduite dans le rouge. Aucun de ces effets ne reflète la véritable distribution spectrale de l'intensité de l'étoile. Pour obtenir une représentation fidèle, il

faudrait que l'instrument (y compris l'atmosphère) réagisse de manière uniforme à toutes les longueurs d'onde, ce que l'on appelle une "réponse plate". C'est loin d'être le cas.

La suite des opérations consiste à déterminer la réponse instrumentale en fonction de la longueur d'onde pour le flux entrant, puis à diviser le spectre de niveau #1 par cette courbe de réponse. Cela nous ramène à la situation idéale d'une réponse instrumentale plate, mais grâce à un calcul. Ceci conduit à un spectre étalonné en flux relatif, appelé de niveau #2.

Il est important de noter que si l'instrument lui-même contribue à la distorsion du signal réel de l'étoile, notre atmosphère, que la lumière de l'astre traverse avant d'atteindre le télescope, joue également un rôle. Nous savons qu'elle provoque le rougissement de la couleur des étoiles, comme le Soleil lorsqu'il approche de l'horizon.

Cependant, nous devons veiller à séparer les contributions de l'instrument et de l'atmosphère, car elles seront traitées de manière distincte par la suite. La raison en est simple : la réponse intrinsèque de l'instrument au rayonnement spectral reste constante (c'est une constante instrumentale), tandis que la transmission atmosphérique est très variable en fonction du moment et de l'élévation de l'astre.

Nous avons déjà utilisé le spectre de référence de 10 Lac (dans la base de données SpecINTI, il porte le nom "c\_10lac.fit" provenant de Calspec). Son fichier doit donc déjà se trouver dans le répertoire de travail.

**Remarque :** en ce qui concerne Calpsec, voir :

<https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/reference-data-for-calibration-and-tools/astronomical-catalogs/calspec>. A la section 20 de cette boîte à outils nous expliquons comment exploiter la bibliothèque de spectre Melchiors, encore plus riche, qui peut ici rendre le même service.

Les intensités dans ce spectre de référence sont en unités énergétiques ( $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{\AA}$ ), ce qui complique la comparaison avec notre spectre, qui est en intensités relatives. Il est donc recommandé de normaliser à l'unité le spectre de référence sur le même point que le spectre observé (ici, entre 6620 et 6640  $\text{\AA}$ ). Pour cela, exploitez l'utilitaire « conf\_make\_norm » :

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

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Normalisation à l'unité dans un intervalle spectral
# -----
_pro_norm: [c_10lac, 6620, 6640, _ref]
```

Lancez le programme. Après le calcul, élémentaire et rapide, le résultat se trouve dans le fichier nommé « \_ref.fits » (un choix arbitraire, mais commode car court et voulant dire ce qu'il veut dire).

La réponse instrumentale proprement dite s'obtient en divisant le profil observé apparent par le profil réel de notre astre (hors atmosphère), c'est-à-dire le spectre « \_ref ». Nous

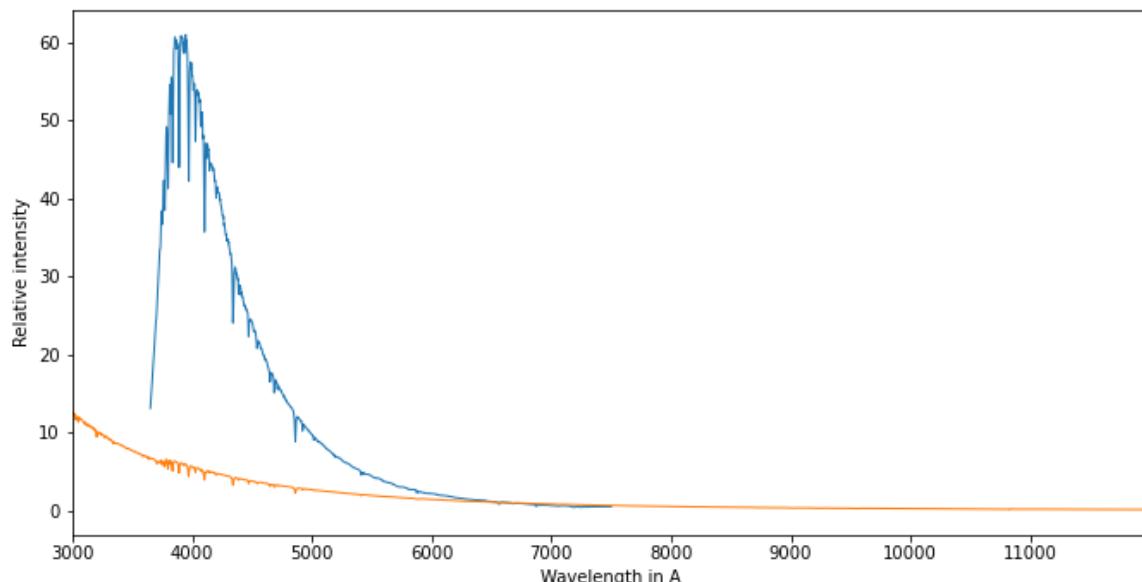
obtiendrons ainsi la carte de rendement de notre instrument, donc, comment il altère le signal initial.

Nous allons faire évoluer le fichier de configuration de niveau #1 (étalonnage spectral) vers le fichier de configuration de niveau #2 (étalonnage spectral + correction de la réponse instrumentale). La transformation est simple. Dans la distribution de cette boîte à outils, le résultat est un fichier de configuration appelé « conf\_level2\_mode1.yaml ». Vous pouvez l'utiliser tel quel, à l'exception d'une modification temporaire obligatoire qu'il faut faire à présent : vous devez mettre en commentaire la ligne contenant le paramètre "instrumental response" en ajoutant un « # » devant son nom :

```
# -----
# Réponse instrumentale
# -----
#instrumental_response: _rep340
```

Nous allons décrire pas à pas les transformations dans le fichier de configuration de niveau #1 pour le passer en niveau #2.

D'abord, comparons notre spectre de niveau #1 au spectre attendu de l'étoile 10 Lac (le profil « \_ref.fits » précisément) :



En orange, le spectre observé (niveau #1), en bleu le spectre de référence de l'étoile. L'écart est très grand, en particulier dans le bleu, ce qui peut être source d'incertitude par la suite.

Nous allons donc réduire cet écart en tenant compte au préalable : (1) de la transmission atmosphérique, (2) de la température de couleur de la lampe flat-field utilisée.

Du côté de la transmission atmosphérique, les choses sont simples. specINTI est capable de la calculer automatiquement à partir des coordonnées de l'aste et de la date. Une fois fait, le logiciel corrige le spectre apparent pour qu'il ressemble à celui que nous verrions si l'atmosphère n'existe pas. C'est le spectre « hors atmosphère ».

Pour cela, il faut dire à specINTI où nous nous trouvons sur Terre, en ajoutant les lignes suivantes dans le fichier de configuration :

```
# -----
```

```
# Longitude du lieu d'observation
# -----
longitude: 7.040

# -----
# Latitude du lieu d'observation
# -----
latitude: 43.5801

# -----
# Altitude du lieu d'observation en mètres
# -----
altitude: 40
```

On en profite pour fournir d'autres informations qui vont se retrouver dans l'en-tête des fichiers FITS produits, rendant alors ceux-ci compatibles avec les bases de données (comme BeSS) :

```
# -----
# Site d'observation
# -----
site: Antibes Saint-Jean

# -----
# Description de l'instrument
# -----
inst: T150 + StarEx _LR + ASI533MM

# -----
# Observateur
# -----
observer: cbuil
```

Pour corriger nos spectres de la transmission atmosphérique, il suffit d'ajouter encore deux lignes dans le fichier de configuration :

```
# -----
# Accès à SIMBAD
# -----
simbad : 1

# -----
# Correction de la transmission atmosphérique
# -----
corr_atmo : 0.13
```

La valeur 1 du paramètre « simbad » précise que l'on va récupérer les coordonnées équatoriales de l'objet à partir de son nom sur la base SIMBAD (et non pas dans l'en-tête des fichiers images FITS). La valeur par défaut de ce paramètre est 0, ce qui signifie que l'on ne fait rien. Le second paramètre indique que nous voulons réaliser une correction avec un paramètre de transparence des aérosols (AOD) de 0,13. C'est une valeur un peu passe-partout.

**Astuce :** si vous faites le spectre d'un objet dont le nom n'est pas reconnu par SIMBAD (une comète, une nova...), vous pouvez indiquer le nom d'un objet proche de la cible, qui lui est identifié par SIMBAD. Cela se fait au travers du paramètre « near\_star ». Par exemple, ajouter la ligne (mais penser à la retirer ou mettre un « # » devant quand vous traitez un autre objet !) :

```
near_star : epsilon Peg
```

La couleur de la lumière émise par la lampe tungstène utilisé pour réaliser l'image maître flat-field est loin d'être blanche : bien plus de rouge que de bleu. Pour obtenir une réponse représentative de

l'instrument est facile à modéliser, nous devons tenir compte de ce fait (une température de couleur de 2700 K en l'espèce), qui est un biais d'étalonnage. Nous ajoutons un paramètre dans le fichier de configuration qui ramène par calcul la distribution spectrale de cette lampe à celle d'une source « parfaitement » blanche :

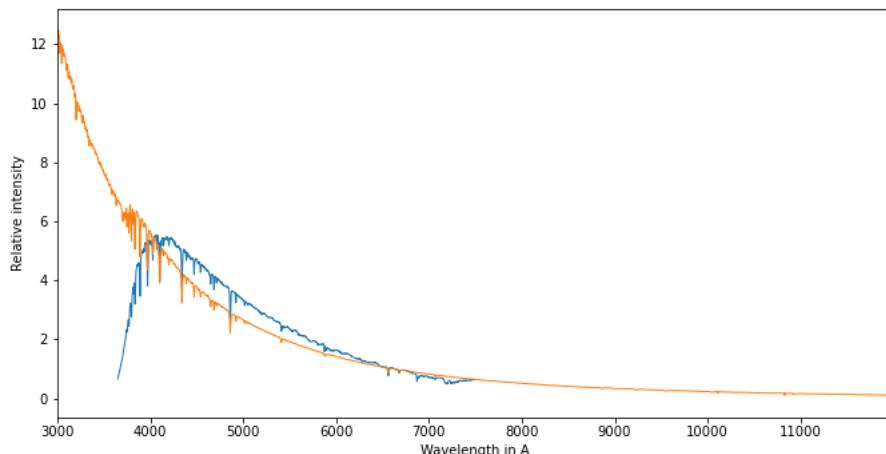
```
# -----
# Température de couleur de la lampe tungstène
# -----
planck : 2700
```

Il importe de bien comprendre comment le flat-field a été obtenu : sur table (donc hors télescope), en éclairant de manière adéquate la fente d'entrée de spectrographe avec une lampe torche type halogène. Voir :

A la section 5.4 de cette page : [http://www.astrosurf.com/solex/specinti2\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specinti2_fr.html)

A la section A1 de cette page : [http://www.astrosurf.com/solex/specinti\\_annexe\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specinti_annexe_fr.html)

Lancez le logiciel (pensez à bien mettre en mode commentaire la ligne « instrumental\_response » si vous utilisez le fichier d'origine « conf\_level2\_mode1.yaml »). Voici le résultat :



Ces deux profils sont bien plus proches l'un de l'autre, sauf pour les longueurs d'onde inférieure à 4000 Å, où la réponse de l'instrument décroche vers le bas. Mais il y a un gros progrès, ce qui montre que la température de couleur de la lampe flat-field a un fort impact, dont il faut tenir compte (singulièrement en spectrographie basse résolution).

## 12. Le décalage flat-field

Une retouche est à faire sur l'image flat-field. L'examen du profil observé révèle en effet un phénomène d'oscillations dans le continuum, notamment dans la partie rouge du spectre. Cette structure est clairement générée par l'instrument (le véritable continuum de l'étoile 10 Lac est très uniforme).

L'origine de ces oscillations, qui peuvent présenter une modulation atteignant jusqu'à 5%, réside dans le rendement quantique du détecteur, qui montre des fluctuations de nature similaire, comme le met en évidence l'image maître « \_flat » :



Le problème réside dans le fait qu'entre le moment où nous avons acquis les spectres de l'étoile 10 Lacertae sur le télescope et le moment où nous avons effectué la prise de vue pour le flat-field sur la table, le spectrographe a subi des déformations dues à des effets tels que la gravité et les variations de température. Nous avons anticipé cette difficulté : lors de l'acquisition des spectres de l'étoile 10 Lacertae, nous avons ajouté une exposition en utilisant une lampe à raie d'émission au néon (veilleuse électrique) placée devant le télescope (elle était ici simplement agitée à la main). De même, lors de la prise de vue pour le flat-field, nous avons disposé une lampe du même type devant l'entrée du spectrographe pour obtenir une image équivalente.

Le résultat de ces actions se traduit par deux images portant respectivement les noms « 10lac\_neon-1.fits » et « tung\_neon-1 ». En mesurant la position des raies du néon à l'aide du curseur de la souris entre ces deux documents, on observe un décalage en X (axe spectral) d'environ +10 pixels dans l'image tungstène par rapport à l'image capturée depuis le ciel. C'est cette translation de +10 pixels qui est responsable du phénomène des "franges". Le flat-field est donc mal exploité en raison de la déformation instrumentale survenue entre les deux prises de vue.

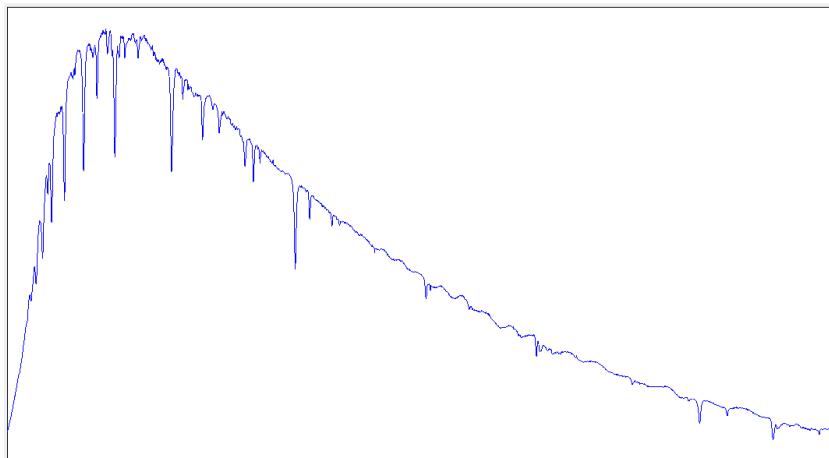
Pour corriger ce défaut, avant de traiter le spectre, indiquez à SpecINTI de prendre en compte le décalage via le menu des "Modes avancés" dans SpecINTI Editor (champ « Liste décalage flat ») :

Liste objets :	10 Lac	
Liste images :	10Lac-	
Nb image par objet :	12	
Liste calibration :	10Lac_neon-	
Nb image calibration :	1	
<b>▼ Mode avancé</b>		
Liste fichiers trans atm :	None	
Liste décalage flat :	-10	
Fichier(s) Offset :	_offset	nb : 0
Fichier(s) Dark :	n900-	nb : 13
Fichier(s) Flat :	tung-	nb : 50
Fichier Img postfix :	-	
Fichier Cal prefix :		
Fichier Cal postfix :	_neon-	
Fichier observations à sauver :	10Lac	<b>Sauver</b>

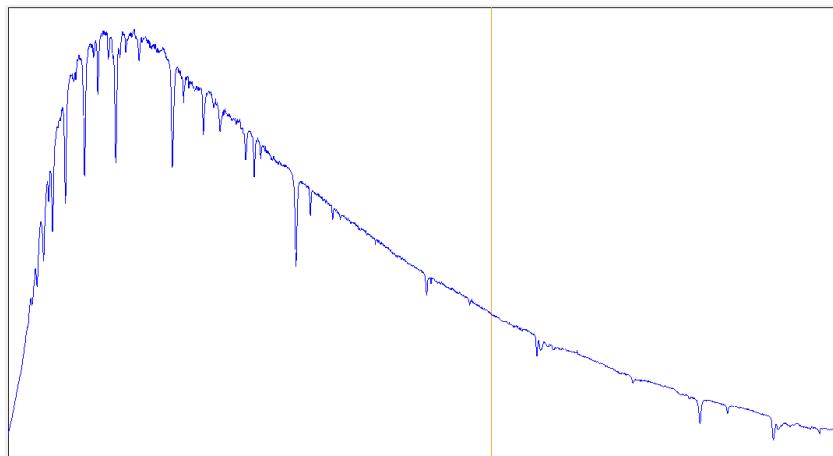
Noter trois choses : (1) bien tenir compte du signe du décalage ; de toute manière si vous vous trompez vous allez vite vous en apercevoir car la correction ne marche pas du tout et il faudra donc changer le signe, (2) la valeur de ce décalage est assez constante en valeur et en signe d'une observation à l'autre, (3) specINTI Editor garde en mémoire la valeur de ce décalage tant que vous ne le modifiez pas, ce qui simplifie le traitement des objets suivants.

Relancez le traitement en tenant compte du bougé instrumental.

Dans le graphe suivant, le spectre avant la correction du décalage flat-field :



Dans le graphe suivant, après l'application du décalage :



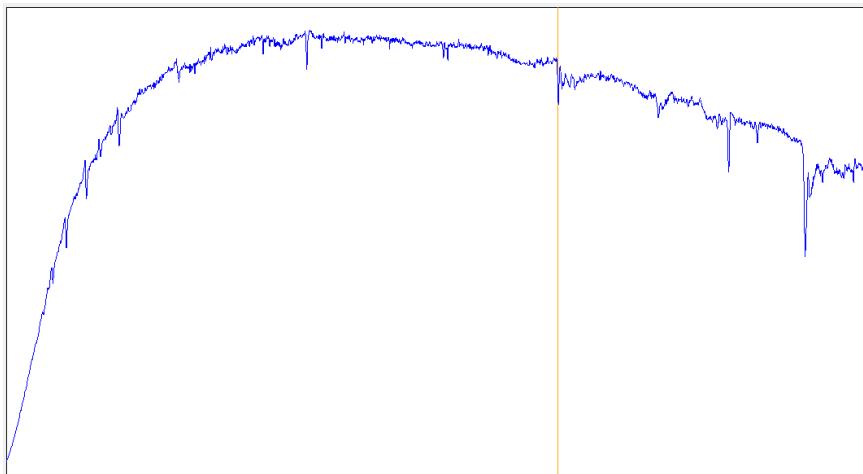
L'opération est un réflexe à prendre. Elle est très liée à la manière d'acquérir le flat-field (hors télescope et en temps différé pour gagner de précieuses minutes lors de l'observations). En pratique, il s'avère que la retouche que nous venons de décrire est peu de chose par rapport à la contrainte que pose souvent l'acquisition flat-field de nuit, avec une vraie lampe tungstène (surtout pas ici un panneau de LED, avec une distribution spectrale très déformée et donc impropre).

Le spectre que nous venons d'obtenir est un résultat intermédiaire. Il nous faut à présent trouver la réponse instrumentale proprement dite.

### 13. Le calcul de la réponse instrumentale

Nous avons à ce stade en main un profil spectral de l'étoile 10 Lac avec une correction flat-field bien appliquée et corrigée de la transmission atmosphérique. Simultanément nous disposons du spectre de référence de ce même objet (origine NASA CalSpec), dont l'aspect est celui que l'on cherche à approcher.

La réponse spectrale s'obtient en divisant le premier par le second. Si nous réalisons l'opération (on verra comment dans quelques lignes). Voici le résultat :



L'allure générale pour une réponse instrumentale est correcte (par expérience !). Mais il y a du bruit et un résidu des raies spectrales de l'étoile. Dans le rouge profond, on observe même la signature spectrale de la molécule O<sub>2</sub> vers 6900 Å – l'oxygène diatomique - venant de notre atmosphère, intacte, car étant absente du spectre de référence (la division ne l'a donc pas retirée).

On peut faire nettement mieux en exploitant un petit utilitaire qui se présente sous la forme d'un enchaînement de fonctions. Bien entendu, tout tourne autour de la division de deux profils. C'est le fichier « conf\_make\_response.yaml », que vous pouvez adapter à votre convenance :

```
# ****
# CONF_MAKE_RESPONSE
# Calcul de la réponse instrumentale
# ****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# On enlève les raies telluriques, on divise par la référence, on lisse
# -----
_begin:
_pro_clean: [_10lac_20230727_107, 6850, 6990, tmp1]
_pro_div: [tmp1, _ref, tmp2]
_pro.blur2: [tmp2, 1000, _rep340]
_end:
```

Traduisons le contenu de ce fichier.

Avant de diviser le spectre observé par le spectre de référence de cette étoile, nous effaçons les détails du spectre entre 6850 Å et 6990 Å, une zone correspondant aux bandes d'absorption O<sub>2</sub>, une interpolation linéaire étant réalisée entre ces points. C'est l'objet de la fonction « \_pro\_clean ». Nous générerons un fichier intermédiaire « tmp1 » dans le dossier de travail à la suite de cette fonction.

**Astuce :** vous pouvez mettre plusieurs fonctions « \_pro\_clean » à la suite pour effacer autant de détails qui vous dérangent. Il faut cependant indexer le nom des fonctions en question : \_pro\_clean2, \_pro\_clean3, ... Par exemple (regardez bien l'usage du fichier intermédiaire « tmp1 ») :

```
_pro_clean: [_10lac_20230727_107, 6850, 6990, tmp1]
_pro_clean2: [tmp1, 6540, 6580, tmp1]
```

Vient ensuite la division via la fonction « \_pro\_div ». Les trois termes dans cette fonction sont :

Le nom du profil observé avant la correction de la réponse instrumentale.

Le nom du profil de référence.

Le nom du profil de la réponse instrumentale.

Après la division, le résultat subit un lissage pour éliminer les aspérités qui n'ont rien à voir avec la réponse effective, ainsi que le bruit. C'est l'objet de la fonction « \_pro.blur2 ». Le lissage est d'autant plus fort que la valeur du paramètre est grande.

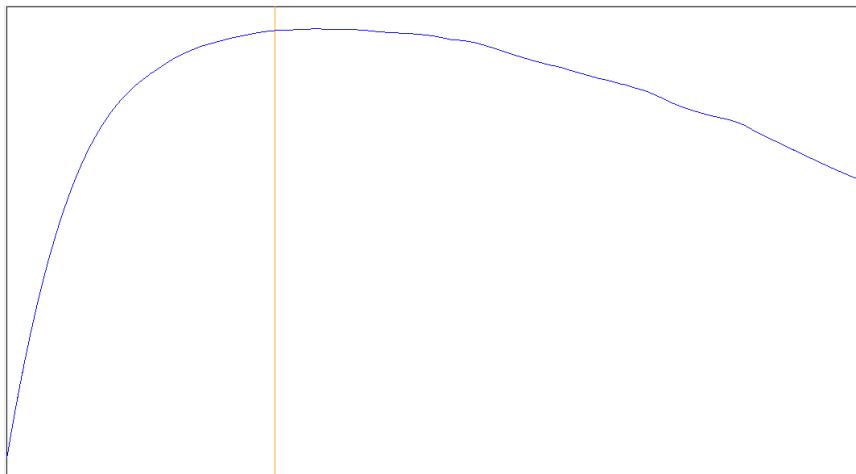
La réponse spectrale recherchée est contenue dans le fichier « \_rep340 ».

**Astuce :** une bonne idée consiste à composer le nom de la réponse avec la racine « \_rep » suivie du numéro de la nuit (ici 340e nuit avec la configuration décrite). Ceci permet de

distinguer les fichiers de réponse d'une nuit à l'autre, d'un mois à l'autre ..., utile si on constate une évolution.

Remarquez la création de fichiers intermédiaires, tmp1, tmp2, associées aux différentes étapes. Ils ne sont pas effacés et vous pouvez les examiner pour un contrôle des opérations.

Ci-après la réponse spectrale calculée par la méthode décrite, « \_rep340.fits » :



Vu de loin, le petit utilitaire « conf\_make\_response.yaml » peut paraître complexe, mais en réalité son emploi est immédiat et très rapide. Noter que specINTI Editor, via l'onglet « Réponse », permet de réaliser les mêmes opérations, mais de manière interactive.

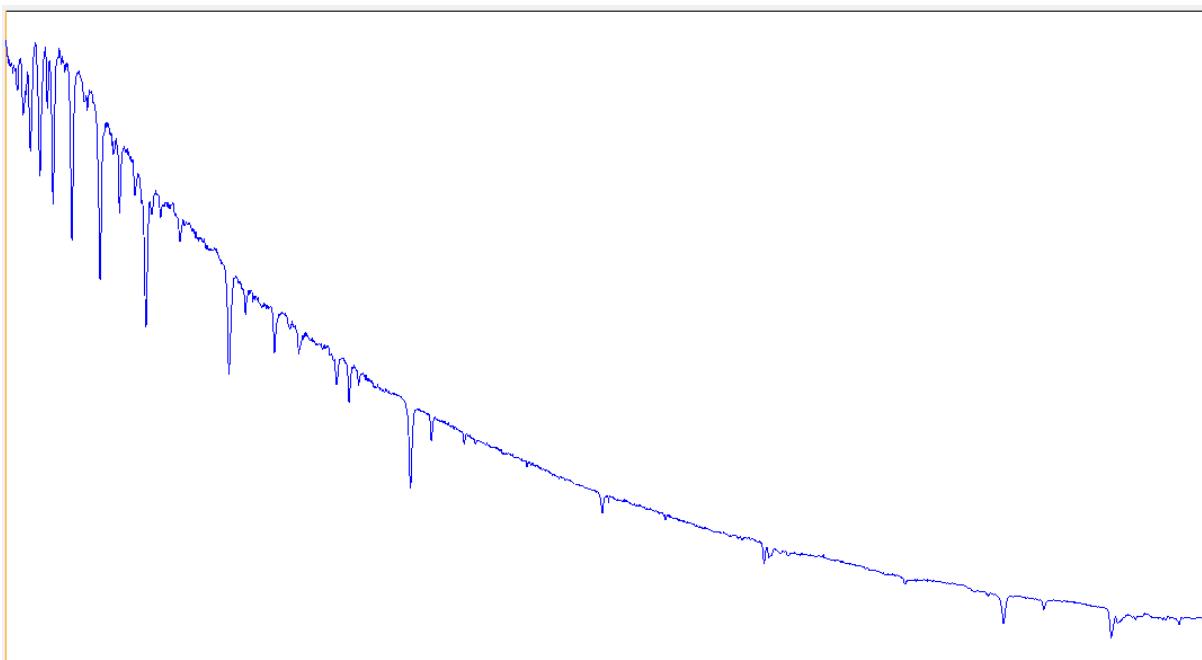
La courbe de réponse ainsi calculée est celle que nous obtiendrions si notre instrument était situé dans l'espace. Donc elle n'est pas affectée par la transmission atmosphérique, par la différence de hauteur angulaire des astres, etc. Elle s'avère très stable si vous ne démontez pas l'instrument. Les opérations précédemment décrites autour de la réponse ne sont donc à réaliser que très épisodiquement.

## 14. Le spectre de niveau #2

Il ne reste plus qu'à tenir compte de la réponse spectrale instrumentale dans le traitement. Rendez opérationnelle la ligne suivante dans le fichier « conf\_level2\_mode1.yaml » :

```
instrumental_response: _rep340
```

Dès lors que vous définissez le paramètre « instrumental\_response » avec le nom du fichier de réponse instrumentale, la correction de la réponse instrumentale s'applique automatiquement. Voici le résultat final du traitement des données de l'étoile 10 Lac :



Ci-après, le fichier de configuration complet de traitement de niveau #2 :

```
# ****
# CONF_LEVEL2_MODE1
# Extraction du spectre étalonné en longueur d'onde via un polynôme (mode 1)
# Niveau 2 de traitement
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: 10Lac

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

# -----
# Coefficients du polynôme d'étalonnage spectral
# -----
calib_coef: [1.3697786967858392e-09, 4.7375755940865985e-07, 1.5459285880960587,
3495.239344027813]#

#-----
# Largeur de binning
# -----
bin_size: 30

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 20, 20, 160]

# -----
# Zone de calcul des paramètres géométriques
# -----
xlimit: [600, 1800]
```

# -----

```
# Température de couleur de lampe flat tungtène
# -----
planck: 2700

# -----
# Demande l'accès à SIMBAD
# -----
simbad: 1

# -----
# Correction de la transmission atmosphérique
# -----
corr_atmo: 0.13

# -----
# Zone de normalisation à l'unité
# -----
norm_wave: [6620, 6640]

# -----
# Zone de cropping du profil
# -----
crop_wave: [3700, 7150]

# -----
# Longitude du lieu d'observation
# -----
longitude: 7.0940

# -----
# Latitude du lieu d'observation
# -----
latitude: 43.5801

# -----
# Altitude du lieu d'observation en mètres
# -----
altitude: 40

# -----
# Site d'observation
# -----
site: Antibes Saint-Jean

# -----
# Description de l'instrument
# -----
inst: T150 + StarEx300 + ASI533MM

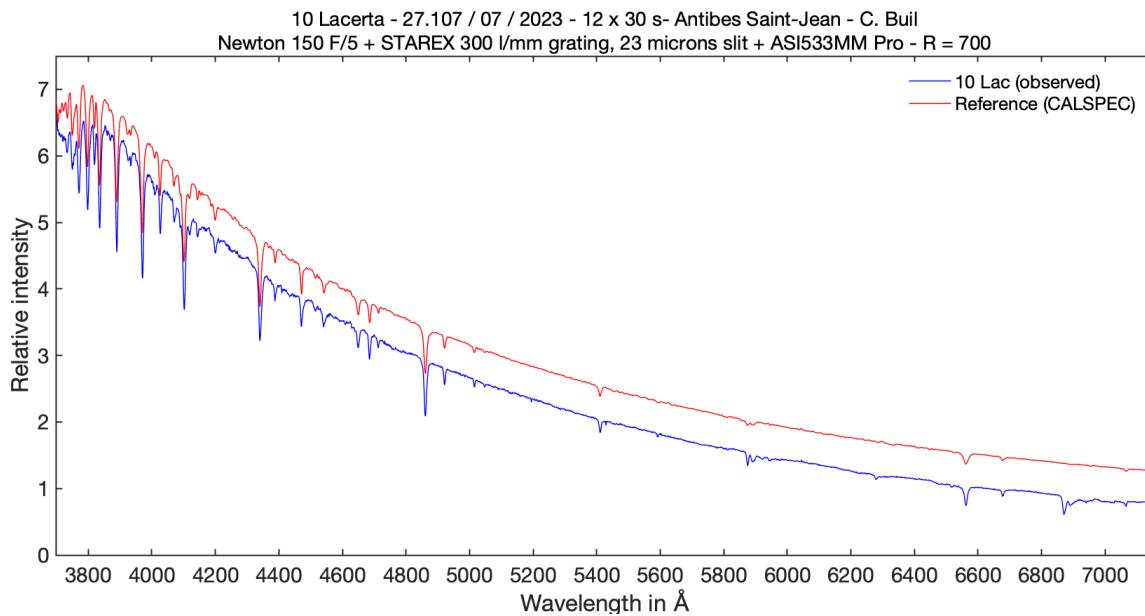
# -----
# Observateur
# -----
Observer: cbuil

# -----
# Pouvoir de résolution (obligatoire en mode 1)
# -----
power_res: 800

# -----
# Réponse instrumentale
# -----
instrumental_response: _rep340

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

Dans le graphe suivant, le spectre de 10 Lac observé avec Star'Ex LR sur un télescope de 150 mm et le spectre de référence de cette étoile que l'on retrouve dans la base de données Calpsec (standard spectrophotométrique). Les spectres sont volontairement décalés de 0,5 en intensité afin de rendre la comparaison plus lisible :



L'accord est très bon.

## 15. L'étalonnage à partir d'une lampe spectrale

Procédons maintenant au traitement d'un objet de faible luminosité, la galaxie Markarian 917, d'une magnitude de 14,1. Pour ce faire, nous continuerons à utiliser les coefficients d'étalonnage spectral calculés précédemment, mais à une nuance près.

Si les coefficients de degrés élevés peuvent être considérés comme stables en termes de valeurs (ils sont liés au concept même du spectrographe), en revanche, le premier terme du polynôme, "A0", dépend beaucoup plus des conditions d'utilisation du spectrographe. Par exemple, si l'image du spectre se déplace sur le détecteur en raison d'un effet de flexion mécanique, c'est ce terme du polynôme de dispersion qui est altéré en premier lieu.

En d'autres termes, pour réaliser des observations de précision de haute qualité, il est nécessaire de surveiller et de mettre à jour ce terme dit « constant » du polynôme. Dans le polynôme utilisé, il vaut 3495,24 Å.

Pour prendre en compte le déplacement accidentel de l'image du spectre en fonction de la longueur d'onde, nous avons besoin d'un spectre de référence acquis au même moment que les prises de vue sur l'objet étudié, ou du moins à un intervalle de temps très court. Dans le cas de Mark 917, nous disposons de 2 images exposées chacune pendant 900 secondes. De plus, nous avons à notre disposition l'image du spectre d'une veilleuse néon, capturée juste après ces deux longues prises de vue sur la cible, sans déplacer le télescope. Pour cette occasion particulière, le spectre de la lampe néon a été réalisé de manière simple et basique, en agitant la lampe devant l'ouverture du télescope pendant une pose de 30 secondes. Voici l'image de la lampe néon ainsi obtenue :



Il est caractéristique, avec de fines raies d'émission, surtout ici localisées dans la partie rouge du spectre.

On relève au pixel près (pas grave si vous vous trompez de 2 ou 3 pixels) les coordonnées X (horizontales) de quelques raies dont on connaît par ailleurs les longueurs d'onde. Pour tout savoir sur la position des raies dans les spectres de ce type :  
[http://www.astrosurf.com/solex/specinti\\_annexe3\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specinti_annexe3_fr.html)

Les voici mis en regard ces données sous forme de deux listes pour les raies sélectionnées, l'une concernant avec les longueurs d'onde (paramètre « wavelength ») et l'autre avec les positions en pixels mesurées dans l'image (paramètre « line\_pos ») :

```
wavelength: [5944.83, 6266.49, 6678.28]
line_pos: [1583, 1789, 2053]
```

L'onglet « Observation » est rempli de la manière suivante :

Répertoire observations : D:/starex340 Parcourir

Liste objets :	<input type="text" value="mrk917"/>
Liste images :	<input type="text" value="mrk917-"/>
Nb image par objet :	<input type="text" value="2"/>
Liste calibration :	<input type="text" value="mrk917_neon-"/>
Nb image calibration :	<input type="text" value="1"/>

▲ Mode avancé

Fichier(s) Offset :	<input type="text" value="_offset"/>	nb : <input type="text" value="0"/>
Fichier(s) Dark :	<input type="text" value="n900-"/>	nb : <input type="text" value="13"/>
Fichier(s) Flat :	<input type="text" value="tung-"/>	nb : <input type="text" value="50"/>

Fichier Img postfix :	<input type="text" value="-"/>
Fichier Cal préfix :	<input type="text" value=""/>
Fichier Cal postfix :	<input type="text" value="_neon-"/>

Fichier observations à sauver :  Sauver

Dans l'onglet « Observation » de specINTI Editor nous inscrivons le nom générique de l'image du spectre du néon, ainsi que le nombre d'images disponibles (ici une seule). En cliquant sur le bouton « Auto » le logiciel réalise ces écritures pour vous.

Remarquez comment le nom de l'image néon est constitué : le nom de l'objet associé, puis le qualificatif « \_neon- ». specINTI Editor vous aidera si vous respectez un tel protocole et si vous définissez le postfix correspondant dans le champ prévu à cet effet dans l'interface specINTI Editor (champ « Ficher Cal postfix »).

Le travail de specINTI va consister à traiter les spectres astronomiques comme nous l'avons vu précédemment, mais aussi traiter les ou les spectre(s) d'étalonnage spectral. Il va se servir de cette dernière information pour ajuster le polynôme de dispersion en le rendant au conforme aux conditions d'observation du moment. Ce faisant, nous venons de décrire le mode d'étalonnage 2 de specINTI.

Puisque nous traitons une cible de faible éclat, il faut aussi nous occuper de la possible réduction du bruit dans le profil final, mais sans altérer son contenu (cela signifie qu'il faut être raisonnable). Indiquons que les données en question ont été obtenues en milieu urbain et dans les conditions d'une transparence atmosphérique médiocre (avec le télescope Newton de 150 mm et le spectrographe Star'Ex LR). Voici des outils que vous pouvez utiliser pour réduire le bruit. Ce sont de simples lignes que vous ajoutez dans votre fichier de configuration actuel :

```
# -----
# Motif de filtrage médian
# -----
kernel_size: -3

# -----
# Filtrage gaussien
# -----
sigma_gauss: 0.75

# -----
# Extraction optimale
# -----
extract_mode: 1
gain: 0.083
noise: 1.3
```

Le paramètre « kernel\_size » est associé à un filtrage médian des images. Le fait que la valeur du paramètre soit un nombre négatif précise que le filtrage appliqué est optimal pour retirer le bruit RTS (bruit dit télégraphique ou « poivre et sel »), tout en préservant les détails dans le spectre. Le noyau du filtre fait 3x3 pixels.

La paramètre « sigma\_gauss » est associé à un filtrage du type passe-bas des images, ici à une fréquence plus haute que la fréquence de coupure optique. Là encore, la plupart des détails sont conservés, on altère donc très peu la résolution spectrale. La valeur du paramètre définit la force du filtre – entre 0,5 et 1,0, l'impact sur la finesse des détails spectraux est marginal en général.

La présence du paramètre « extract\_mode » avec la valeur 1 implique qu'un binning dit optimal est réalisé pour passer de l'image au profil spectral, une étape critique. Ne pas toucher aux paramètres « noise » et « gain », associées à « extract\_mode ». L'effet positif de ce type de binning n'est perceptible que l'on traite des spectres de faible intensité.

Tout ce travail dans le fichier de configuration fait que le niveau de traitement passe du niveau #2 au niveau #3. Un spectre de niveau #3 peut être diffusé pour des études scientifiques.

**Remarque :** un niveau #4 existe, qui se distingue par le fait que les données sont fournies en unité physique absolue (comme le erg, mais ceci sort du cadre de la présente boîte à outils).

Pour traiter au niveau #3 en exploitant une lampe spectrale d'ajustement, inspirez-vous du fichier de configuration « conf\_level3\_mode2.yaml » :

```
# ****
# CONF_LEVEL3_MODE2
# Extraction du spectre étalonné en longueur d'onde via un polynôme mise à jour
# avec une lampe spectrale (constante)
# Niveau 3 de traitement
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: mrk917

# -----
# Etalonnage à partir du seul polynôme (pas de spectre étalon)
# -----
calib_mode: 2

# -----
# Coefficients du polynôme d'étalonnage spectral
# -----
calib_coef: [1.080925343279991e-09, 5.919400721871533e-07, 1.5472908312138407,
3494.26602194136]

# -----
# Longueur d'onde des raies d'émission étalon
# -----
wavelength: [5944.83, 6266.49, 6678.28]

# -----
# Position en pixels des raies d'émission étalon
# -----
line_pos: [1583, 1789, 2053]

# -----
# Largeur de la zone de recherche des raies d'étalonnage
# -----
search_wide: 15

# -----
# Hauteur de binning
# -----
bin_size: 16

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 15, 15, 120]

# -----
# Mode extraction du ciel (0: basique; 1: optimal)
# -----
sky_mode: 1

# -----
# Zone de calcul des paramètres géométriques
# -----
xlimit: [600, 1800]

# -----
# Température de couleur de lampe flat tungstène
# -----
planck: 2700

# -----
# Demande l'accès à SIMBAD
# -----
simbad: 1
```

```
# -----
# Correction de la transmission atmosphérique
# -----
corr_atmo: 0.13

# -----
# Motif de filtrage médian
# -----
kernel_size: -3

# -----
# Filtrage gaussien
# -----
sigma_gauss: 0.75

# -----
# Extraction optimale
# -----
extract_mode: 1
gain: 0.083
noise: 1.3

# -----
# Zone de normalisation à l'unité
# -----
norm_wave: [6620, 6640]

# -----
# Zone de cropping du profil
# -----
crop_wave: [3700, 7150]

# -----
# Longitude du lieu d'observation
# -----
Longitude: 7.0940

# -----
# Latitude du lieu d'observation
# -----
Latitude: 43.5801

# -----
# Altitude du lieu d'observation en mètres
# -----
Altitude: 40

# -----
# Site d'observation
# -----
Site: Antibes Saint-Jean

# -----
# Description de l'instrument
# -----
Inst: T150 + StarEx300 + ASI533MM

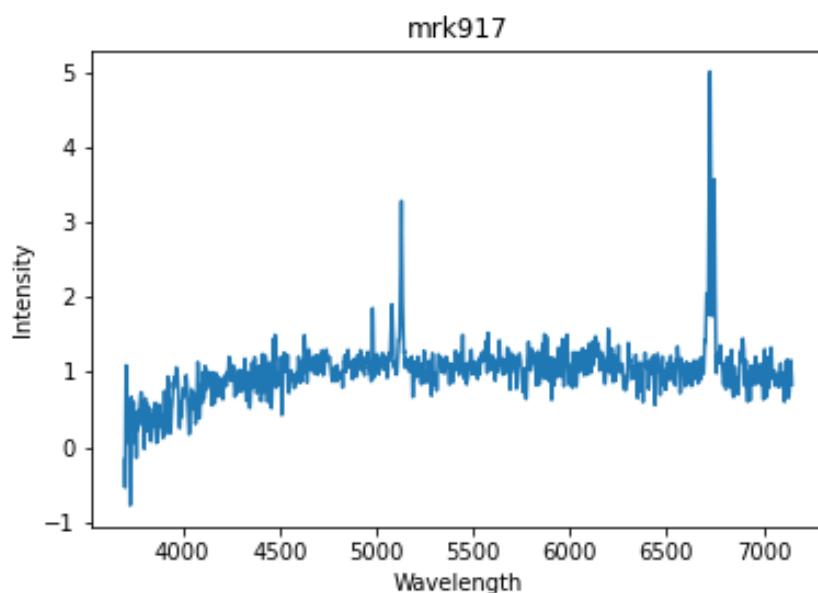
# -----
# Observateur
# -----
Observer: cbuil

# -----
# Réponse instrumentale
# -----
instrumental_response: _rep340

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

Remarque : Vous avez une totale liberté quant à la disposition de ce fichier et des commentaires. Adaptez-le comme vous le souhaitez, n'hésitez pas à être créatif. Veillez simplement à respecter la syntaxe des paramètres.

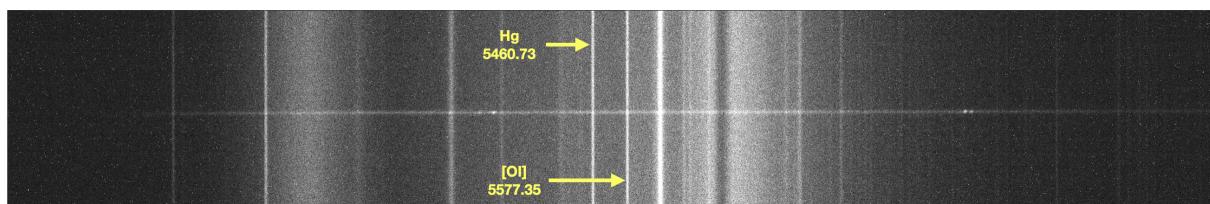
Tout devrait vous sembler familier. Notez les trois raies du néon que nous avons sélectionnées. Comme prévu, SpecINTI établit la relation entre les longueurs d'onde théoriques de ces raies et les longueurs d'onde observées, puis corrige en conséquence le terme A0 du polynôme de dispersion. Voici le résultat :



## 16. L'étalonnage en mode latéral

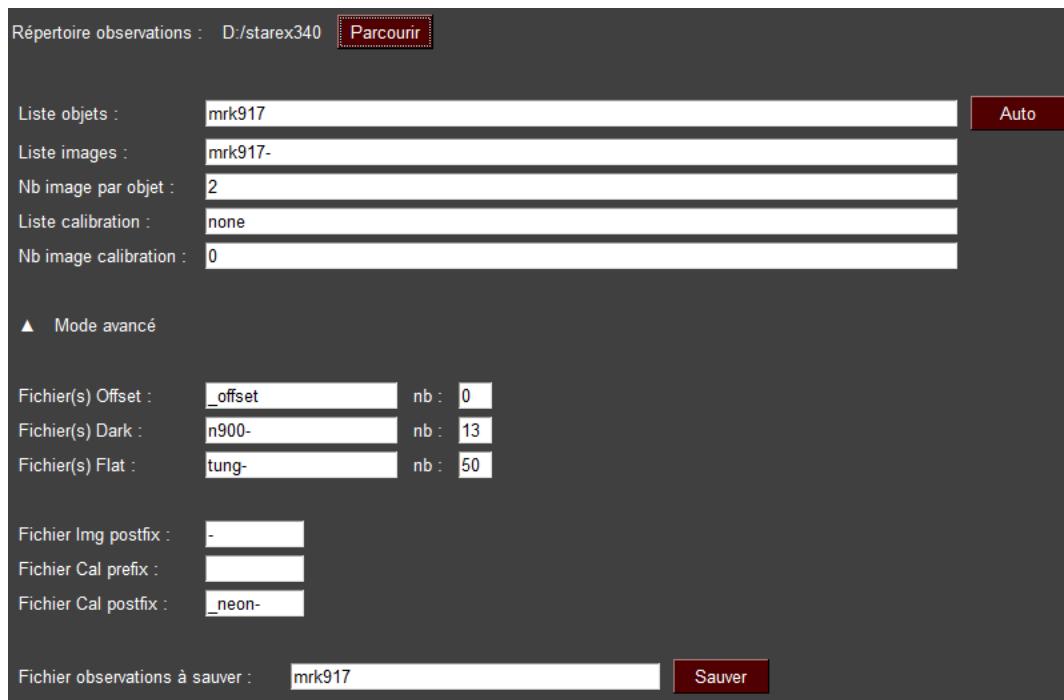
Donnons quelques exemples et astuces dans cette boîte à outils pour exploiter un puissant principe d'étalonnage des spectres en longueur d'onde, dit « latéral ».

Toujours dans l'idée d'ajuster le terme A0 (« constante ») du polynôme de dispersion, vous pouvez aussi exploiter les raies naturelles du fond de ciel ou celles de la pollution lumineuse. En voici deux identifiées dans l'une des images brutes du spectre de Mark 917 :



C'est donc bien un spectre acquis en basse résolution spectrale dont il s'agit, tel que vous l'obtiendriez avec un spectrographe Alpy600 par exemple. Nous indiquons une raie provenant de la pollution urbaine (raie du mercure, Hg) et une raie émise depuis la haute atmosphère terrestre (OI).

Du coup, nous n'avons même plus besoin d'une lampe spectrale pour étalonner notre spectre en longueur d'onde. Voici comment est organisé le fichier d'observation à présent (remarquer le « none » dans le champ « Liste calibration ») :



Nos deux raies latérales, qui s'impriment accidentellement dans le spectre de la galaxie , mais bien utiles, sont mesurées aux coordonnées  $x = 1273$  et  $x = 1348$ . Toutes deux vont nous servir pour l'ajustement du polynôme de dispersion établi précédemment en observant le spectre de l'étoile 10 Lac (une seule raie pourrait être exploitée, mais la précision sera en principe supérieure).

Ce mode d'étalonnage latéral est identifié par le numéro 4 dans la nomenclature de specINTI. Voici le fichier de configuration type correspondant :

```
# ****
# CONF_LEVEL3_MODE4
# Extraction du spectre étalonné en longueur d'onde via un polynôme mise à jour
# en mode latéral avec des raies du fond de ciel (mode 4)
# Niveau 3 de traitement
# ****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex340

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: mrk917

# -----
# Etalonnage à partir du seul polynôme (pas de spectre étalon)
# -----
calib_mode: 4

# -----
# Coefficients du polynôme d'étalonnage spectral
# -----
calib_coef: [1.080925343279991e-09, 5.919400721871533e-07, 1.5472908312138407,
3494.26602194136]

# -----
```

```
# Longueur d'onde des raies d'émission étalon
# -----
wavelength: [5460.73, 5577.35]

# -----
# Position en pixels des raies d'émission étalon
# -----
line_pos: [1273, 1348]

# -----
# Largeur de la zone de recherche des raies d'étalonnage
# -----
search_wide: 30

# -----
# Hauteur de binning
# -----
bin_size: 16

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 15, 15, 120]

# -----
# Mode extraction du ciel (0: basique; 1: optimal)
# -----
sky_mode: 1

# -----
# Zone de calcul des paramètres géométriques
# -----
xlimit: [600, 1800]

# -----
# Température de couleur de lampe flat tungstène
# -----
planck: 2700

# -----
# Demande l'accès à SIMBAD
# -----
simbad: 1

# -----
# Correction de la transmission atmosphérique
# -----
corr_atmo: 0.13

# -----
# Motif de filtrage médian
# -----
kernel_size: -3

# -----
# Filtrage gaussien
# -----
sigma_gauss: 0.75

# -----
# Extraction optimale
# -----
extract_mode: 1
gain: 0.083
noise: 1.3

# -----
# Zone de normalisation à l'unité
# -----
norm_wave: [6620, 6640]

# -----
# Zone de cropping du profil
# -----
crop_wave: [3700, 7150]
```

---

```
# -----
```

```
# Longitude du lieu d'observation
# -----
Longitude: 7.0940

# -----
# Latitude du lieu d'observation
# -----
Latitude: 43.5801

# -----
# Altitude du lieu d'observation en mètres
# -----
Altitude: 40

# -----
# Site d'observation
# -----
Site: Antibes Saint-Jean

# -----
# Description de l'instrument
# -----
Inst: T150 + StarEx300 + ASI533MM

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

# -----
# Réponse instrumentale
# -----
instrumental_response: _rep340

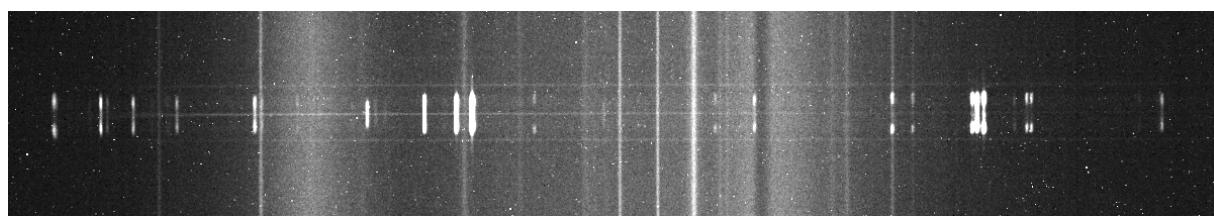
# -----
# Format des sorties (0: compact, 1: élargi)
# -----
check_mode: 1
```

On note que les paramètres « wavelength » et « line\_pos » acceptent une liste de valeurs, ici les données de nos deux raies d'étalonnage.

**Astuce :** le paramètre « sky\_mode » donne deux choix pour retirer le fond parasite des images. Si sa valeur est 0, le niveau du fond de ciel est une intensité médiane calculée dans les zones « sky » qui encadre le spectre de l'objet, colonne après colonne. Si la valeur est 1 (comme ici), ce sont des polynômes de Legendre distincts pour chaque colonne qui sont retirés. En principe, c'est cette dernière option qui donne le meilleur résultat, mais le temps de calcul est plus long. Faire des essais.

## 17. Traitement du spectre d'un objet étendu

On traite une séquence de 7 spectres de la nébuleuse Messier 57, exposés chacun 600 secondes, pris avec Star'Ex basse résolution sur le télescope Newton 150 mm f/5. Voici une des images brutes :



Vous pouvez télécharger les données brutes de cet exemple en cliquant sur ce lien :

[http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist\\_sp24/starex341.zip](http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist_sp24/starex341.zip)

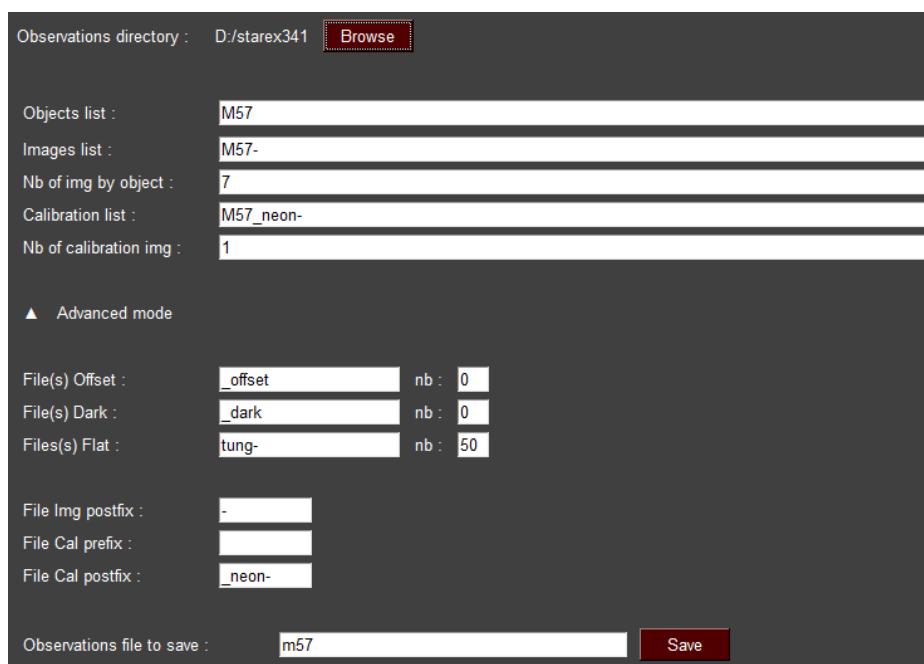
Outre les raies en émissions produites par la nébuleuse, on remarque la signature spectrale de la pollution lumineuses provenant de la ville d'Antibes, d'où est pris ce spectre.

Si specINTI sait trouver la position des traces d'étoiles dans une image, dans le cas présent, l'objet, à cause de sa surface apparente, complique la tâche. Nous sommes obligés de désigner manuellement où se trouve la nébuleuse dans l'image, et passer cette information (approximativement) par un paramètre, « posy », pour position Y, ou position verticale :

posy : 210

Ici, le centre de la trace se trouve 210 pixels au-dessus du bord inférieur de l'image. On doit définir une hauteur de binning important pour intégrer un maximum de signal de l'objet. Les zones de calcul du fond de ciel sont aussi adaptées.

L'onglet d'observation pour cet objet :



Le fichier de configuration modifié pour traiter un objet angulairement large (nous adoptons par ailleurs ici le mode d'étalonnage numéro 2) :

```
# ****
# CONF_LEVEL3_ETENDU_MODE2
# Extraction du spectre étalonné en longueur d'onde via un polynôme mise à jour
# avec une lampe spectrale (constante)
# Niveau 3 de traitement - Adaptation au traitement d'un objet à surface étendue
# ****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex341

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: m57
```

```
# -----
# Etalonnage à partir du seul polynôme (pas de spectre étalon)
# -----
calib_mode: 2

# -----
# Coefficients du polynôme d'étalonnage spectral
# -----
calib_coef: [1.080925343279991e-09, 5.919400721871533e-07, 1.5472908312138407,
3494.26602194136]

# -----
# Longueur d'onde des raies d'émission étalon
# -----
wavelength: [5944.83, 6266.49, 6678.28]

# -----
# Position en pixels des raies d'émission étalon
# -----
line_pos: [1583, 1789, 2053]

# -----
# Largeur de la zone de recherche des raies d'étalonnage
# -----
search_wide: 15

# -----
# Position verticale de l'objet
# -----
posy: 210

# -----
# Hauteur de binning
# -----
bin_size: 140

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [190, 90, 90, 200]

# -----
# Mode extraction du ciel (0: basique; 1: optimal)
# -----
sky_mode: 1

# -----
# Zone de calcul des paramètres géométriques
# -----
xlimit: [600, 1800]

# -----
# Température de couleur de lampe flat tungstène
# -----
planck: 2700

# -----
# Demande l'accès à SIMBAD
# -----
simbad: 1

# -----
# Correction de la transmission atmosphérique
# -----
corr_atmo: 0.13

# -----
# Motif de filtrage médian
# -----
kernel_size: -3

# -----
# Filtrage gaussien
# -----
sigma_gauss: 0.5

# -----
```

```
# Zone de normalisation à l'unité
# -----
norm_wave: [6620, 6640]

# -----
# Zone de cropping du profil
# -----
crop_wave: [3700, 7150]

# -----
# Longitude du lieu d'observation
# -----
Longitude: 7.0940

# -----
# Latitude du lieu d'observation
# -----
Latitude: 43.5801

# -----
# Altitude du lieu d'observation en mètres
# -----
Altitude: 40

# -----
# Site d'observation
# -----
Site: Antibes Saint-Jean

# -----
# Description de l'instrument
# -----
Inst: T150 + StarEx300 + ASI533MM

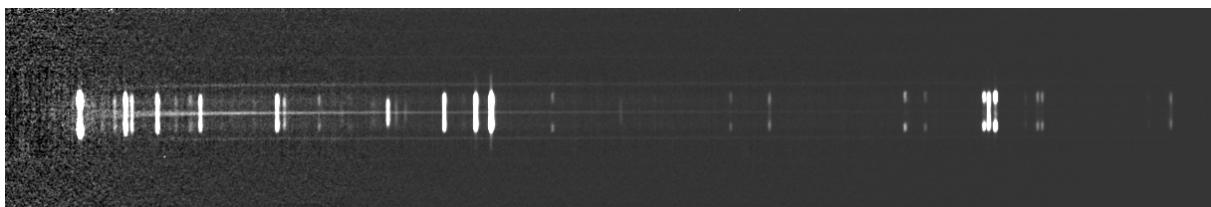
# -----
# Observateur
# -----
Observer: cbuil

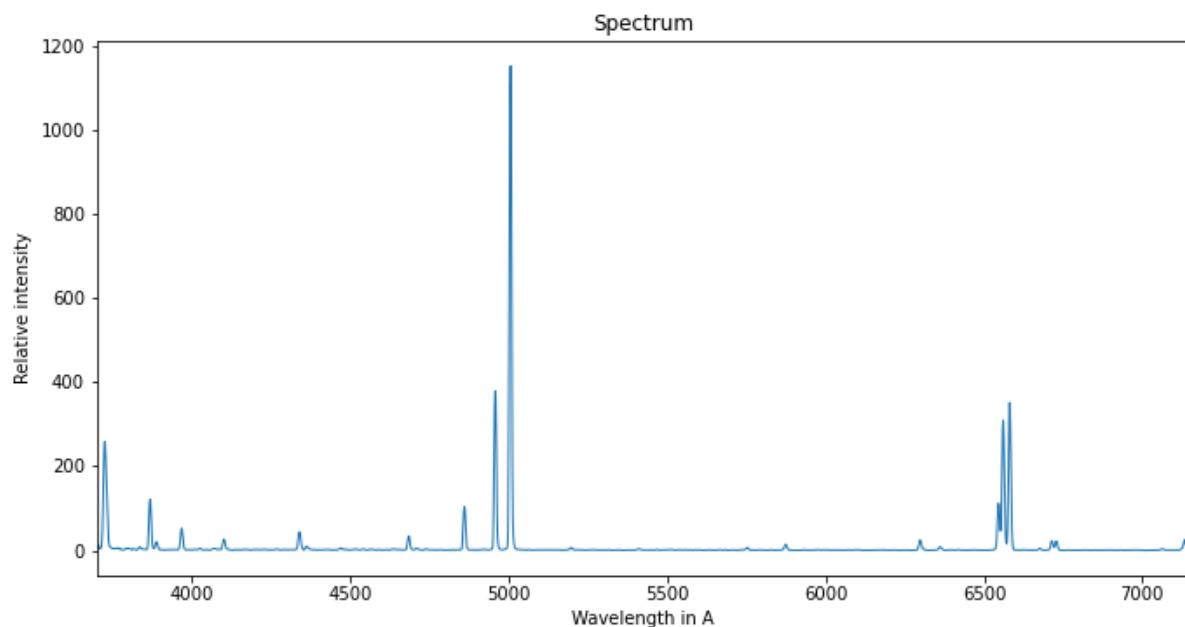
# -----
# Réponse instrumentale
# -----
instrumental_response: _rep340

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

# -----
# Angle de tilt imposé
# -----
tilt: 0
```

Le résultat en 2D et profil :





Remarquez la largeur adoptée pour le binning, via le paramètre « bin\_size » : 140 pixels. Nous avons obtenu cette valeur en mesurant la taille de la nébuleuse sur la hauteur de la fente (aidez-vous aussi du fichier image « \_step101 », très précieux, qui contient les traces de zones du fond de ciel et de binning que vous avez programmé après un premier traitement).

**Astuce :** vous pouvez demander à specINTI de ne pas retirer le signal du fond de ciel. Pour cela il faut utiliser le paramètre « sky\_remove » avec la valeur 0, comme ceci :

```
sky_remove: 0
```

Cette possibilité est intéressante si vous voulez observer les extensions faibles d'une nébuleuse ou d'une galaxie, la chevelure lointaine d'une comète, la pollution du ciel, etc. Par défaut, la valeur de ce paramètre est 1, ce qui implique le retrait du fond de ciel, le comportement normal de specINTI.

Remarquez que la valeur de l'angle de tilt est forcée par la présence du paramètre « tilt » dans le fichier de configuration. Il est en effet très difficile de demander au logiciel de trouver cet angle sur un objet étendu. Retenez cette remarque, il faut parfois se méfier des automatismes et aider le logiciel en passant en « manuel ».

## 18. Traitement d'un spectre à haute résolution spectrale

Nous traitons à présent un spectre réalisé en haute résolution spectrale avec un Star'Ex HR, équipé d'un réseau de 2400 traits/mm et d'une fente de 19 microns (configuration 80 / 125 mm). Le spectrographe est ajusté pour observer la raie Halpha. L'instrument de prise de vu est une lunette Askar 80PHQ (f/7,5) :



Nous observons le spectre de l'étoile alpha Dragonis, une système double spectroscopique.

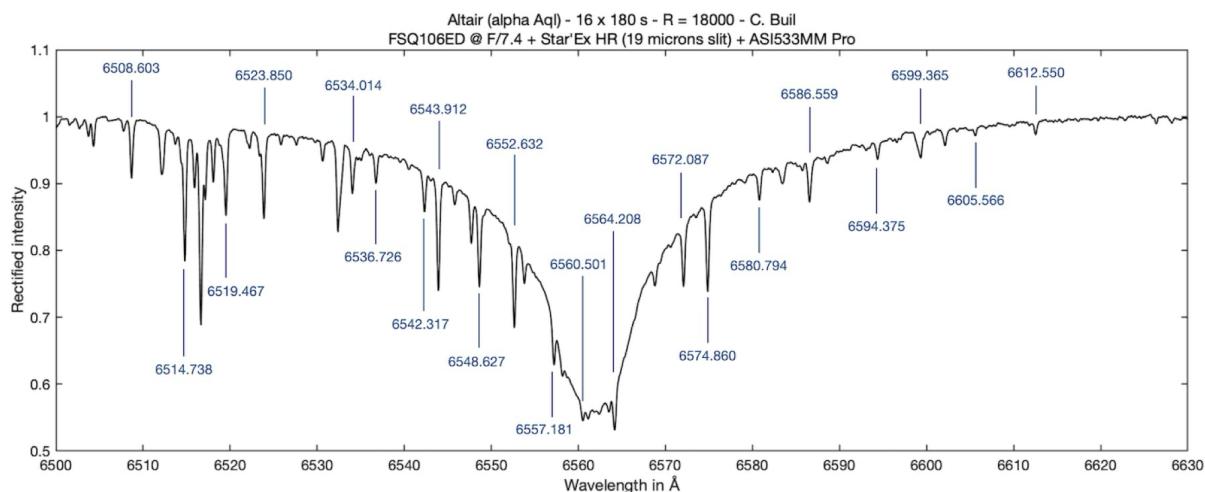
Vous pouvez télécharger les données brutes de cet exemple en cliquant sur ce lien : [lien](#)

[http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist\\_sp24/starex332.zip](http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/dist_sp24/starex332.zip)

Pour ce qui concerne la réalisation de l'image flat-field, nous utilisons un panneau de lampe LED posé à l'avant de la lunette. Nous considérons que cette solution est satisfaisante, car dans le très petit intervalle spectral observé, l'éclairement est jugé suffisamment uniforme spectralement (malgré un fort déficit de lumière rouge) :



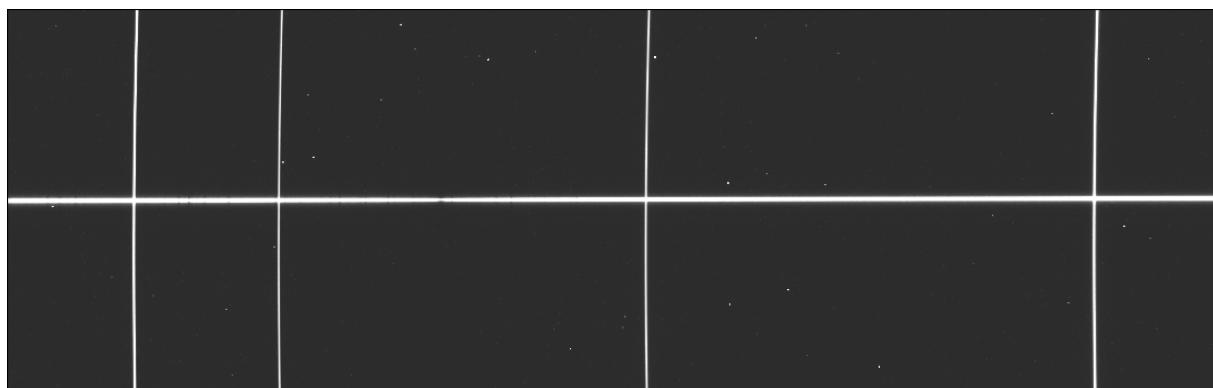
Pour ce qui concerne l'étalonnage spectral, il repose sur une séquence de raies (ici d'origine tellurique) que l'on ajuste par un polynôme (le degré 2 est ici suffisant) :



La manière de trouver le polynôme de dispersion à partir des raies telluriques ( $\text{H}_2\text{O}$ ) est expliquée en détail dans la partie A4.3 de cette page :

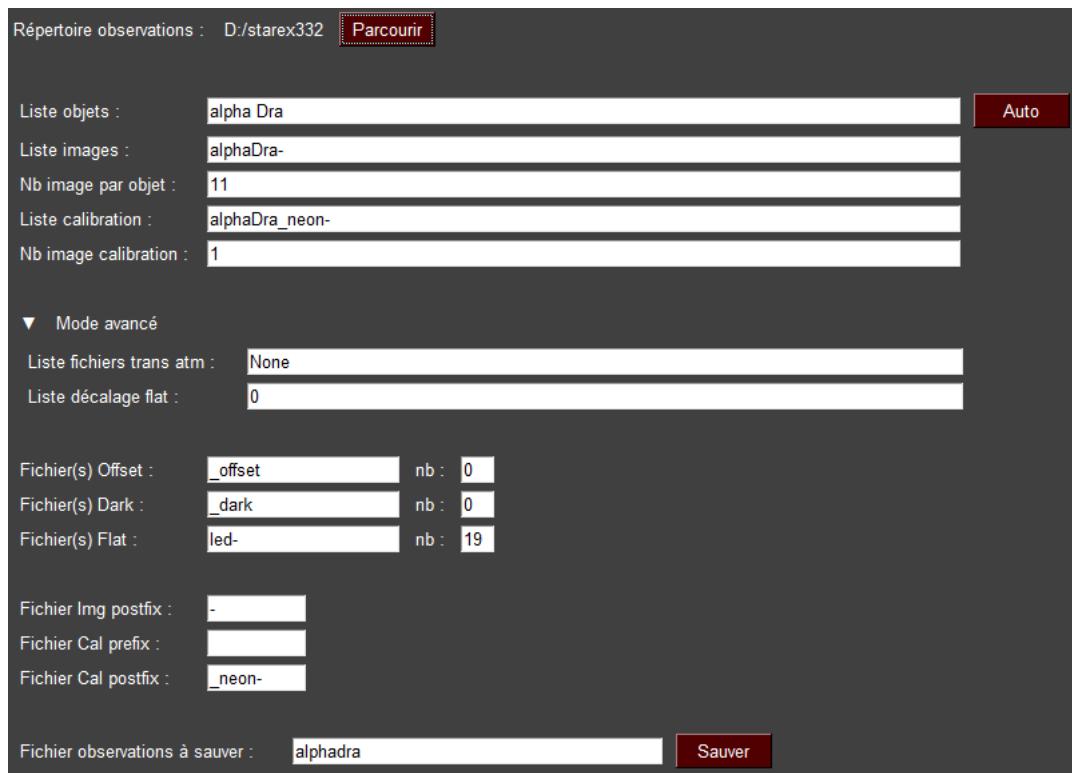
[http://www.astrosurf.com/solex/specinti\\_annexe4\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specinti_annexe4_fr.html).

Pour prendre en compte les flexions temporelles, nous travaillons en mode latéral, mais cette fois avec une source artificielle locale : une fibre optique qui véhicule la lumière d'une veilleuse néon jusqu'à l'entrée de la lunette. Cette lampe d'étalonnage est allumée en permanence, si bien que l'on observe simultanément le spectre de l'étoile et celui de la lampe étalon :



Nous nous exploitons le mode 4 d'étalonnage de specINTI. On rappelle qu'il s'agit un mode mixte. La loi de dispersion est d'abord calculée (ici à partir des raies telluriques, ce qui donne une haute précision sur une bonne largeur spectrale), puis la touche finale est réalisée à partir des raies de la lampe néon exploitée en mode latéral, celles-ci étant utilisées pour ajuster le terme A0 du polynôme aux conditions locales.

L'onglet (et fichier) d'observation se présente de la manière suivante :



Voici le fichier de configuration caractéristique pour le traitement des spectres haute résolution capturés avec notre lunette de 80 mm et en mode 4 :

```
# ****
# CONF_LEVEL3_MODE4 (haute-résolution spectrale)
# Extraction du spectre étalonné en longueur d'onde via un polynôme mise à jour
# en mode latéral avec des raies du fond de ciel (mode 4)
# Niveau 3 de traitement
# ****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex332

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

# -----
# Mode d'étalonnage spectral
# -----
calib_mode: 4

# -----
# Polynôme d'étalonnage
# -----
calib_coef: [-1.147614869142545e-06, 0.10002814151183108, 6484.353249168842]

# -----
# Recherche automatique des raies d'étalonnage du néon
# -----
auto_calib: [6490, 6690]

# -----
# Largeur en pixels de la zone de recherche des raies d'étalonnage néon
# -----
search_wide: 40

# -----
# Largeur de binning
# -----
```

```
# -----
bin_size: 18

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 16, 16, 160]

# -----
# Effacement des raies latérales d''étalonnage
# -----
clean_wave: [6506.5, 6532.8, 6598.9, 6678.3]
clean_wide: [1.1, 0.8, 0.9, 1.0]

# -----
# Rayon de courbure du smile
# -----
smile_radius: -16000

# -----
# Mode extraction du ciel (1 = optimal)
# -----
sky_mode: 1

# -----
# Bornes x pour mesures géométriques
# -----
xlimit: [400, 1800]

# -----
# Réponse instrumentale
# -----
instrumental_response: _rep332

# -----
# Correction de la transmission atmosphérique
# -----
simbad: 1
corr_atmo: 0.20

# -----
# Motif de filtrage médian
# -----
kernel_size: 0

# -----
# Filtrage gaussien
# 0.0 : R = 19500
# 0.5 : R = 18100
# 0.75 R =: 16900
#1.0 : R =15600
# -----
sigma_gauss: 0.75

# -----
# Extraction optimale
# -----
extract_mode: 1
gain: 0.083
noise: 1.3

# -----
# Zone de normalisation à l'unité
# -----
norm_wave: [6640, 6660]

# -----
# Zone de cropping du profil
# -----
crop_wave: [6489, 6691]

# -----
# Longitude du lieu d'observation
# -----
Longitude: 7.0940

# -----
```

```

# Latitude du lieu d'observation
# -----
Latitude: 43.5801

# -----
# Altitude du lieu d'observation en mètres
# -----
Altitude: 40

# -----
# Site d'observation
# -----
Site: Antibes Saint-Jean

# -----
# Description de l'instrument
# -----
Inst: Askar80PHQ + StarEx2400 + ASI533MM

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

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

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

# -----
# Décalage spectral demandé
# -----
spectral_shift_wave: -0.008

```

On rappelle que les valeurs du coefficient du polynôme de dispersion spectrale :

```
calib_coef: [-1.147614869142545e-06, 0.10002814151183108, 6484.353249168842]
```

ont été trouvé précédemment à partir de la trace des raies telluriques présentes autour de la raie Halpha.

Remarquons l'apparition du paramètre « auto\_calib ». Grace à lui, specINTI recherche automatiquement les raies du néon dans l'intervalle spectral fourni en paramètre, soit ici entre 6490 et 6690 A. Il n'y a plus à donner la position des raies, ni leurs longueurs d'onde, le logiciel fait tout automatiquement (identification des raies présentes et mesures) !

**Astuce :** On trouve aussi deux paramètres assez habituels lorsqu'on travaille en mode latéral, « clean\_wave » et « clean\_wide »:

```
clean_wave: [6506.5, 6532.8, 6598.9, 6678.3]
clean_wide: [1.1, 0.8, 0.9, 1.0]
```

Ils indiquent au logiciel d'effacer des artefacts à l'intersection de la trace du spectre et des raies étalons, laissées par un retrait non parfait du fond de ciel à ces endroits. Le problème est particulièrement sensible lorsqu'on utilise une petite lunette et une fente fine, comme ici. L'opération consiste simplement à une interpolation linéaire du continuum aux longueurs d'onde et pour les largeurs spectrales indiquées en angströms.

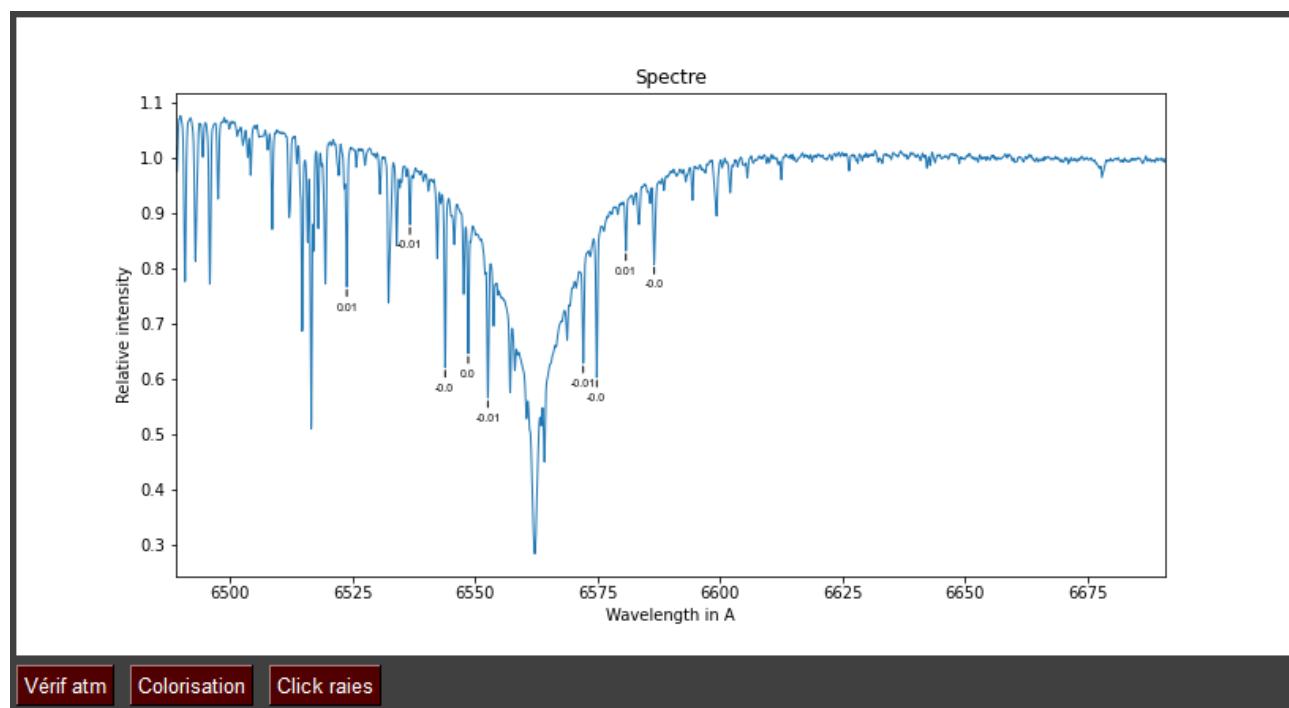
Un des points à relever concerne la valeur du paramètre « kernel\_size » du filtrage médian. La taille du « kernel » (motif) de filtrage est mise à 0, ce qui signifie que le filtrage médian

n'est pas appliqué. La raison vient du fait que la trace spectrale délivrée par la lunette est si étroite qu'un tel filtrage médian provoque des défauts radiométriques jugés non acceptable. Attention si vous travaillez avec des petits instruments, les détails sont alors très fins, alors les pixels des capteurs (pourtant petits). Nous sommes souvent en régime de sous-échantillonnage, ce qui n'est jamais très bon et demande de l'attention.

Noter encore un ajustement manuel de l'étalonnage spectral : une translation du spectre de -0,008 Å (paramètre « spectral\_shift\_wave »). Cette valeur de décalage est trouvée en exploitant l'outil « Vérif atmo » de l'onglet « Visu profil » sous specINTI Editor.

Le fichier de réponse instrumentale « \_rep332 » a été évalué en faisant le rapport du spectre observé de l'étoile Altair et du spectre HR de référence de cet objet (fichier « UVEX\_altair.fits » dans la base de données specINTI).

Ci-après le résultat du traitement :



L'erreur d'étalonnage spectral est inférieure à 0,01 Å, ce qui constitue un excellent résultat.

Il peut être utile d'indiquer qu'il est facile de transformer le fichier de configuration actuel, adapté au mode d'étalonnage 4, afin de travailler dans le mode d'étalonnage 3. L'auteur de ces lignes jongle souvent entre ces deux modes suivant la brillance de l'objet observé en haute résolution spectrale. Cela prend moins d'une minute alors qu'il n'est pas toujours utile de multiplier les fichiers de configuration.

Le mode 3 est sans doute le plus pratique de tous et le plus simple. En effet, il suffit de positionner une ou plusieurs lampes néon (ou fibres) devant l'ouverture de la lunette ou du télescope pour acquérir les spectres étalons en mode latéral (spectre de l'objet et de la source étalon dans la même image spectrale), puis d'activer l'étalonnage automatique lors du traitement (paramètre « auto\_calib »).

La seule véritable transformation à effectuer consiste à préciser que l'on est en mode 3 et à ajuster le degré du polynôme comme suit :

```
calib_mode: 3  
poly_order: 2
```

Seul petit bémol, en mode 3, la précision de l'étalonnage, bien que très bonne et satisfaisante pour la majorité des situations, est parfois légèrement inférieure à celle obtenue en utilisant les raies telluriques pour déterminer le polynôme de dispersion.

**Astuce :** dans la plupart des cas, il est recommandé de ne pas acquérir qu'une seule image spectrale d'un objet, afin de pouvoir éventuellement filtrer certains artefacts. Supposons que vous ayez réalisé 10 spectres d'une cible. Le travail habituel de specINTI consiste à calculer une somme de ces 10 spectres individuels pour produire le profil spectral final. Cependant, vous pouvez également demander au logiciel d'enregistrer les résultats du traitement de chaque spectre individuel dans le dossier de travail. Ce traitement est strictement identique pour les spectres individuels et pour le spectre cumulé. Cette capacité de disposer des spectres individuels traités est utile si vous souhaitez, par exemple, étudier une évolution temporelle entre ces 10 spectres. Pour ce faire, il vous suffit d'ajouter la ligne suivante dans le fichier de configuration :

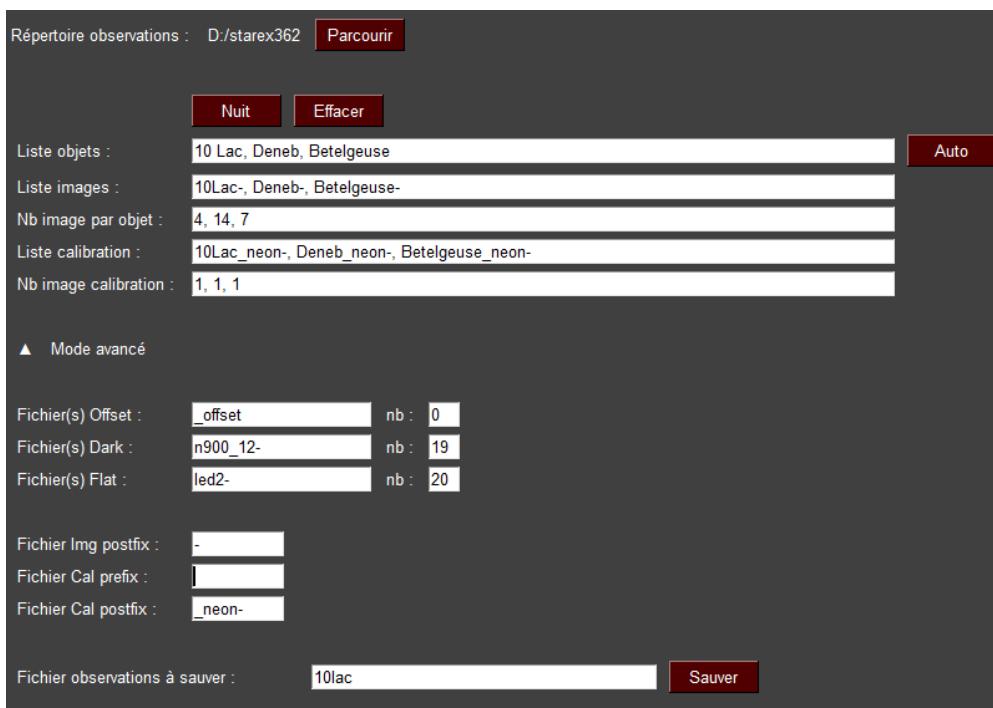
```
seq_mode: 1
```

Les fichiers individuels reprennent le nom catalogue de l'image traitée, mais specINTI ajoute un numéro d'indice et le caractère "@" devant le nom, par exemple :

```
@10dra-1  
@10dra-2  
...  
...  
@10dra-10
```

**Astuce :** Il ne faut pas non plus oublier l'une des forces de specINTI : sa capacité à traiter des listes d'objets (pouvant représenter toute une nuit d'observation, par exemple) sans nécessiter votre intervention. Cela signifie que vous pouvez vaquer à d'autres occupations pendant que le logiciel travaille. Un des usages les plus spectaculaires est de pouvoir utiliser le logiciel en temps réel sur le télescope, au fil de l'eau, et par exemple traiter l'objet en cours d'observation, en vous arrêtant lorsque le nombre d'images est jugé suffisant pour un résultat donné. Tout cela se fait en un seul clic ou presque.

Voici par exemple à quoi ressemble l'onglet "Observation" pour traiter trois cibles en séquence :



Il vous suffit d'entrer les noms catalogues des objets dans le champ liste objet avec une virgule comme séparateur (le bouton "Nuit" peut également vous aider ici), puis de cliquer sur "Auto", et enfin sur "Exécuter". C'est tout.

**Astuce :** remarquez le nom générique adopté pour les images du signal d'obscurité. C'est une habitude prise par l'auteur : un "n" pour indiquer qu'il s'agit d'une image prise dans l'obscurité, un "900" pour indiquer le temps de pose en secondes, et un "\_12" pour indiquer que la température du détecteur est de -12°C. Cette convention rend plus facile la constitution de bibliothèques d'images de référence et permet de vérifier en un coup d'œil si les images de dark sont bien adaptées aux objets à traiter. De plus, il est important de noter que 19 images n900\_12-xxx ont été réalisées avec une exposition de 900 secondes, qui est aussi le temps de pose maximal ici utilisé pour les cibles de la nuit. Bien entendu, ces images d'étalonnage ont été acquises pendant la journée, en plaçant le spectrographe avec sa caméra dans un réfrigérateur et un bouchon devant la fente, en veillant à ne pas ouvrir la porte trop souvent !

## 19. La spectrographie d'objets de très faible intensité

specINTI est un logiciel suffisamment souple pour s'adapter à la plupart des situations. En réalité, une solution de traitement est toujours disponible, mais elle peut demander plus ou moins d'efforts et parfois des connaissances logicielles avancées.

Une situation difficile se présente par exemple lorsque la trace du spectre de l'objet est à peine perceptible dans l'image 2D, même après une exposition très longue.

L'un des automatismes importants de specINTI peut échouer dans une telle situation : la recherche de la position verticale du spectre (sa coordonnée Y par rapport au bas de l'image). L'échec peut être dû au bruit, à des points chauds ou à une partie de l'image mal traitée, ce qui peut tromper specINTI car l'intensité de la trace est nettement plus faible que ces défauts.

Il existe plusieurs techniques pour essayer de résoudre ce problème.

Supposons qu'après un affichage à fort contraste, nous repérons la trace à la coordonnée  $Y = 423$ .

**Remarque :** Si le spectre apparaît incliné dans l'image en raison d'une mauvaise orientation de la caméra, mesurez toujours la valeur  $Y$  au centre de l'image le long de l'axe horizontal.

La première mesure à prendre est de limiter la zone de recherche de la trace de l'étoile le long de l'axe vertical. Pour ce faire, nous utilisons le paramètre « posy\_exclude ». Par exemple, ici :

```
posy_exclude: [380, 460]
```

Cela signifie que la recherche de la trace ne se fera pas sur toute la hauteur de l'image, mais entre les coordonnées  $Y = 380$  et  $Y = 460$ . Vous pouvez bien sûr élargir ou rétrécir cette zone de recherche.

« posy\_exclude » est un outil puissant que vous pouvez utiliser dans de nombreuses situations. Par exemple, si la trace que vous souhaitez extraire se trouve à côté de la trace d'une étoile beaucoup plus brillante. En laissant specINTI en mode automatique intégral, vous obtiendrez toujours le spectre de l'étoile la plus brillante. Grâce à « posy\_exclude », en travaillant avec finesse, vous pouvez éliminer ce risque et permettre à specINTI de trouver automatiquement la cible appropriée.

Si cette solution échoue, vous devrez utiliser le paramètre « posy » en écrivant dans le fichier de configuration :

```
posy: 423
```

Cela bloque complètement l'automatisme de recherche de la trace et oblige specINTI à effectuer les traitements autour de la coordonnée  $Y = 423$  (y compris le binning).

Bien que cette solution soit très efficace, elle n'est malheureusement pas toujours satisfaisante. Supposons que nous ayons obtenu 3 spectres du même objet, mais que pour une raison ou une autre, la coordonnée  $Y$  change légèrement à chaque fois :  $Y_1 = 423$ ,  $Y_2 = 421$ ,  $Y_3 = 419$ .

En écrivant

```
posy: 423
```

specINTI additionne toutes les traces en supposant que la moyenne est autour de  $Y = 423$ . Cependant, ce n'est pas le cas. En figeant la recherche verticale avec « posy », specINTI empêche également le centrage vertical automatique de tous les spectres de la séquence, ce qui est une fonction normale du logiciel pour maximiser le rapport signal sur bruit, même donc en présence de mouvements verticaux accidentels.

Cependant, il existe une solution. Écrivez plutôt :

```
posy: -423
```

La valeur négative du paramètre est délibérée. Bien sûr, c'est la valeur positive qui sera retenue, mais l'indication d'un nombre négatif change fondamentalement le fonctionnement du logiciel.

En effet, vous avez très probablement quelque chose comme ceci dans votre fichier de configuration (car c'est un paramètre obligatoire) :

```
bin_size: 14
```

Il s'agit de la hauteur verticale de binning (agglomération) que le logiciel utilise pour rassembler l'intensité des pixels, colonne par colonne, afin de construire le profil spectral. Cette zone est normalement centrée sur la coordonnée Y = 423 dans notre exemple. Dans ce cas, le binning se fait entre les coordonnées Y'=423-7=416 et Y''=423+7=430.

Cela semble parfait a priori, car nos trois traces de spectre entrent dans la zone de binning considérée. Mais il y a bien mieux. En donnant une valeur négative à la coordonnée Y, specINTI recentre les trois spectres en utilisant uniquement une bande d'image comprise entre Y = 416 et Y = 430. Souvent, cette approche fonctionne bien car le risque de se retrouver devant un pixel aberrant sur une bande aussi étroite est plutôt rare (et vous avez également la liberté de choisir la hauteur de binning). Cette astuce est similaire à la solution « posy\_exclude », mais elle est plus simple et plus précise dans des situations complexes.

Que faire si cela ne fonctionne toujours pas, si specINTI refuse toujours d'extraire le spectre au bon endroit ?

**Astuce :** Une excellente idée, si vous avez défini la valeur 1 pour le paramètre « check\_mode », est d'examiner l'image de contrôle intermédiaire produite par le logiciel dans le dossier de travail sous le nom « \_step101.fits ». Cette image est souvent une mine d'informations précieuses. Elle contient la somme de toutes les images de la séquence, traitées, recentrées sur la meilleure trace, sans le fond de ciel, éventuellement filtrée. De plus, et c'est crucial, vous verrez des traits horizontaux sur cette image. Ces traits délimitent les zones de calcul du fond de ciel que vous avez demandées, la zone de binning, et enfin, une ligne centrale supposée correspondre à votre cible. Si ce n'est pas le cas, il est temps d'agir !

Notre dernier recours est de limiter la recherche de la trace sur la largeur de l'image. Normalement, cette recherche se fait sur une projection verticale de toute la largeur de l'image. Cependant, ce n'est plus le cas si vous utilisez, par exemple :

```
xlimit: [750, 980]
```

La recherche de la trace se fait alors entre les coordonnées X = 750 et X = 980 en pixels. L'astuce consiste à ajuster ces bornes pour encadrer la partie la plus intense du spectre. Cette méthode peut être combinée avec les restrictions de recherche verticale précédemment décrites.

**Remarque :** Dans des cas très difficiles, il peut arriver que specINTI ne puisse pas trouver automatiquement l'angle de basculement de la trace du spectre (l'inclinaison de la trace) ou l'angle d'inclinaison des raies. Dans ce cas, si nécessaire, vous devrez forcer ces angles, par exemple :

```
tilt: 0,32  
slant: -0,12
```

**Astuce :** Parcourez le manuel de référence, vous y trouverez de nombreuses sources d'inspiration. Il est relativement court car specINTI exploite un nombre limité de paramètres pour travailler, effectuant de nombreuses opérations de manière automatique. Voici un rappel du lien vers le manuel de référence :

[http://www.astrosurf.com/solex/spevinti6\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/spevinti6_fr.html)

## 20. L'exploitation de la librairie de spectres Melchiors

### 20.1 Introduction

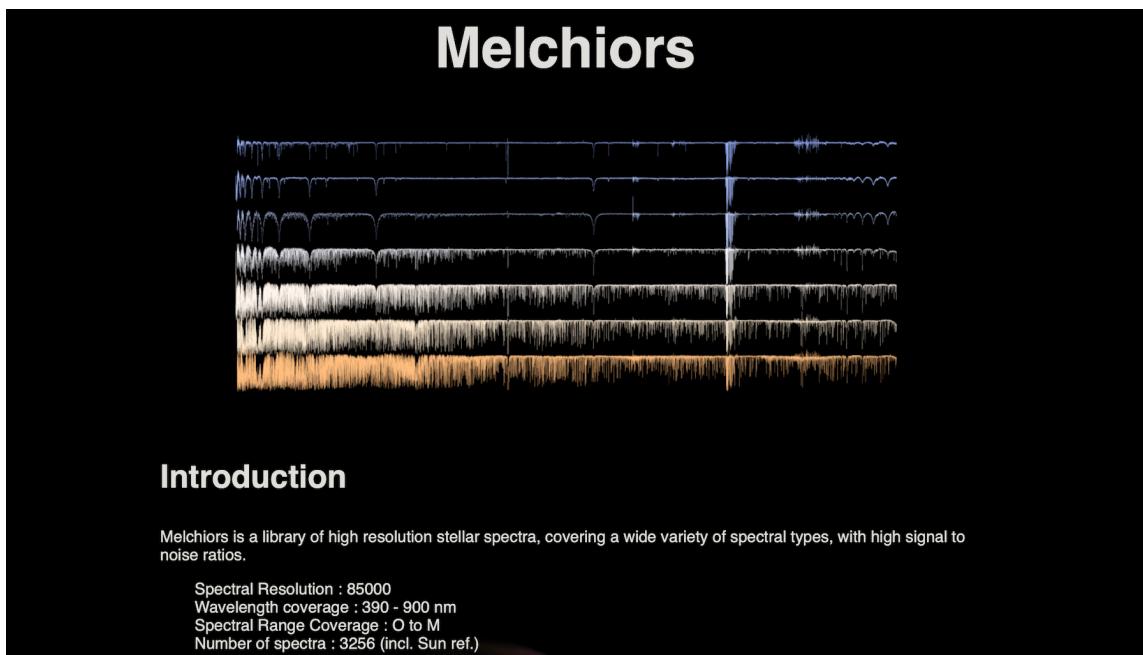
Melchiors est une vaste bibliothèque de 3256 spectres couvrant la plage spectrale allant de 380 à 900 nm, avec une résolution de  $R = 85\,000$ . Ces spectres ont été acquis grâce au spectrographe HERMES installé sur le télescope Mercator de l'observatoire de Roque de Los Muchachos à La Palma.

Cette base est accessible au public à l'adresse suivante :

<https://www.royer.se/melchiors.html>.

Pour des informations détaillées, veuillez consulter Royer et al 2013 :

[https://www.royer.se/melchiors/royer\\_etal\\_melchiors.pdf](https://www.royer.se/melchiors/royer_etal_melchiors.pdf).



Les spectres sont de haute qualité, ramenés à un référentiel barycentrique pour les vitesses radiales et disponibles dans divers formats. Le plus pertinent pour nous est celui où l'absorption atmosphérique est corrigée (les spectres sont ainsi présentés tels qu'ils seraient observés depuis l'espace). Les intensités sont relatives (non en valeurs absolues, comme en unités erg par exemple). Parfois, plusieurs spectres sont disponibles pour une même étoile. On trouve également un spectre du Soleil, très utile (Ganymede Sun).

Les magnitudes des étoiles couvrent une plage allant des plus brillantes du ciel jusqu'à la magnitude 8.

Cette bibliothèque est révolutionnaire pour nous, amateurs (et probablement tout aussi importante pour les professionnels), car elle offre un ensemble très étendu de spectres de référence dans le ciel sur lesquels nous pouvons nous appuyer pour étalonner les données brutes.

La disponibilité de cette base confirme la stratégie proposée dans cette boîte à outils, visant à déterminer la réponse instrumentale en séparant celle-ci de la transmission atmosphérique. La base Melchiors rend cette technique de réduction de données encore plus simple (voir section 11). De plus, la résolution spectrale (R) des spectres étant élevée, cela facilite également l'étalonnage de nos propres spectres en longueurs d'onde, y compris en "haute-résolution", à partir de ces sources naturelles (calcul des termes de degrés supérieurs à 1 du polynôme d'étalonnage – référence à la section 6 pour la basse résolution et à la section 18 pour la haute résolution et le mode latéral 4).

Le format FITS des spectres de cette base est assez complexe, avec de nombreuses extensions. Un petit utilitaire a été créé dans specINTI (à partir de la version 2.5) sous la forme d'une fonction simple pour convertir les spectres Melchiors dans un format FITS plus simplifié, directement compatible avec specINTI et bien d'autres logiciels de traitement. Il s'agit de la fonction « `_pro_conv_melchiors` », dont l'utilisation sera décrite à la suite.

Noter que c'est ajout dans specINTI permet de bénéficier immédiatement des spectres de la librairie Melchiors, mais ce n'est pas la seule manière d'accéder aux spectres de la librairie. Notamment, une application Web est actuellement en construction (association STAROS) qui va rendre l'exploitation de cette ressource plus opérationnelle encore dans l'avenir.

## 20.2 L'extraction d'un spectre Melchiors

À titre d'exemple d'exploitation de la bibliothèque Melchiors, nous allons montrer comment en extraire un spectre et l'utiliser en nous focalisant sur une observation bien concrète de l'étoile 10 Lacertae (elle-même un standard photométrique et spectrophotométrique).

La méthode choisie ici pour exploiter la bibliothèque Melchiors est de rapatrier l'intégralité de cette base vers un stockage local. À partir de la page principale, téléchargez les deux dossiers compressés, "Spectra Part I" et "Spectra Part II" (ils font chacun 9 Go, mais cela reste raisonnable de nos jours).

La bibliothèque Melchiors contient un spectre de l'étoile 10 Lac. Notre objectif est de confronter ce spectre avec celui observé, afin d'évaluer la réponse spectrale de l'instrument utilisé au flux stellaire incident et de vérifier la qualité de l'étalonnage spectral.

Les fichiers dans la bibliothèque Melchiors sont organisés par numéros, par exemple :

00307233\_melchiors\_spectrum.fits

Pour identifier le bon fichier, nous avons besoin de faire correspondre le nom de l'étoile avec ce numéro de fichier. Le fichier Excel (Microsoft) « `Melchiors_lib.xlsx` » est une table de correspondance (vous pouvez trier par magnitude, coordonnées célestes, etc.). Vous

pouvez télécharger ce fichier à l'adresse suivante :

[http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/melchiors/excel/melchiors\\_lib.xlsx](http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/melchiors/excel/melchiors_lib.xlsx).

Localisez dans le tableau la ou les lignes concernant 10 Lac :

3057	374023	HD 214203	HIP 111601	6,42	A1III	22:36:36.30	11:41:47.90
3058	376041	HD 214454	* 9 Lac	4,63	A9V <sub>k</sub> A7mA6	22:37:22.40	51:32:42.40
3059	585269	HD 214454	HD 214454	4,63	A9V <sub>k</sub> A7mA6	22:37:22.40	51:32:42.40
3060	389330	HD 214665	V* V416 Lac	5,17	M4+III	22:38:37.90	56:47:44.30
3061	478113	HD 214734	* 30 Cep	5,19	A0IV	22:38:39.10	63:35:04.09
3062	374024	HD 214567	HD 214567	5,82	G8II	22:38:52.60	19:31:20.10
3063	416436	HD 214680	* 10 Lac	4,88	O9V	22:39:15.70	39:03:01.01
3064	478110	HD 214680	* 10 Lac	4,88	O9V	22:39:15.70	39:03:01.01
3065	584854	HD 214680	HD 214680	4,88	O9V	22:39:15.70	39:03:01.01
3066	835841	HD 214749	LT 9143	7,84	K4.5V <sub>k</sub>	22:40:43.38	-29:40:28.13
3067	374025	HD 214850A	BD+13 4971A	6,05	G4V	22:40:54.00	14:33:00.00
3068	366666	HD 214923	* zet Peg	3,41	B8V	22:41:27.70	10:49:52.90
3069	366667	HD 214923	* zet Peg	3,41	B8V	22:41:27.70	10:49:52.90

On s'aperçoit que la librairie contient en fait deux spectres de 10 Lac. Nous nous intéressons au premier (par exemple), dont le numéro de rang est 416436.

Le mieux à ce stade est de copier le fichier FITS correspondant de la librairie vers votre dossier de travail courant :

00416209_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:14	6,7 Mo	Flexible...cument
00416210_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:14	6,7 Mo	Flexible...cument
00416281_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416282_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416283_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416285_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416284_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416436_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416437_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416438_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416439_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument
00416440_melchiors_spectrum.fits	13 mars 2023, 15:15	6,7 Mo	Flexible...cument

La conversion du fichier Melchiors en un fichier FITS plus conventionnel se fait à travers la fonction « \_pro\_conv\_melchiors », dont la syntaxe est la suivante :

\_pro\_conv\_melchiors : [entrée, sortie, tellurique]

- entrée : le nom du fichier Melchiors (sans l'extension FITS) ;
- sortie : le nom du fichier après conversion ;
- tellurique : un paramètre permettant de choisir d'extraire un fichier avec les raies telluriques absentes (valeur : 0), ou avec les raies telluriques présentes (valeur : 1).

Cette fonction est exécutée à l'intérieur d'un fichier de paramètres « \_conf\_melchiors.yaml » (vous êtes de donner un nom de votre choix), dans lequel est également précisé le chemin du dossier de travail où se trouve le fichier à convertir. Voici le contenu complet du fichier « yaml » que nous utilisons pour cet exemple (vous devez changer le nom du chemin). Vous pouvez copier/coller ce contenu dans votre propre dossier de configuration, nommé « \_configuration » :

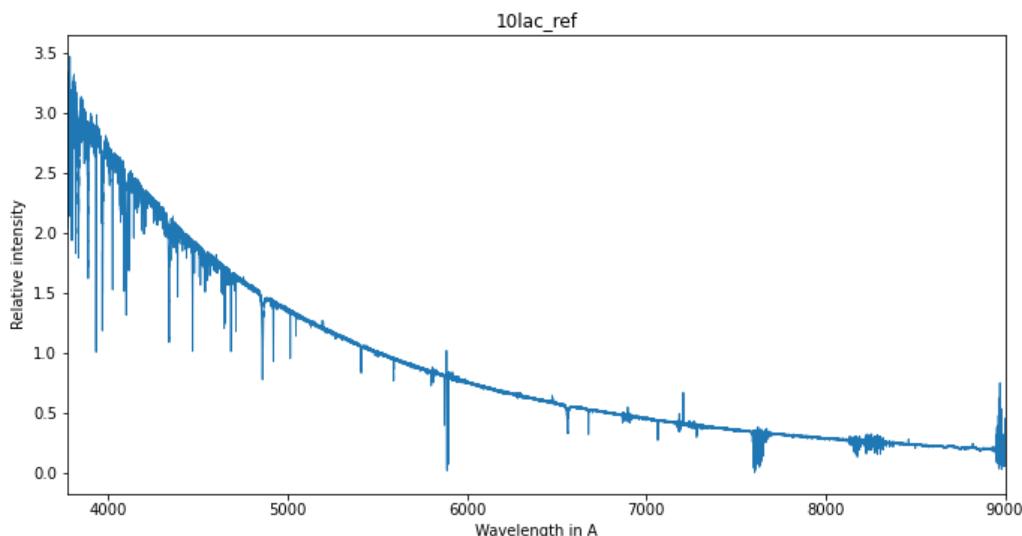
```
#*****
# CONF_MELCHIORS
# Conversion d'un fichier FITS Melchiors en un spectre FITS lisible par specINTI
```

```
# ****
# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex374

# -----
# Conversion
# -----
_pro_conv_melchiors: [00416436_melchiors_spectrum, 10lac_ref, 0]
```

Nous identifions la référence du fichier Melchiors pour l'étoile 10 Lac. Nous optons pour le nom « 10lac\_ref » pour le fichier résultant. Enfin, nous souhaitons que les raies telluriques soient absentes (les auteurs de la base Melchiors ont pris soin de produire une version des spectres dans laquelle ces raies parasites provenant de notre propre atmosphère sont retirées, c'est celle que nous utilisons).

Voici l'aspect du spectre Melchiors dans toute son étendue spectrale, échantillonné avec un pas de 0,05 angströms par specINTI :



Nous le gardons de côté.

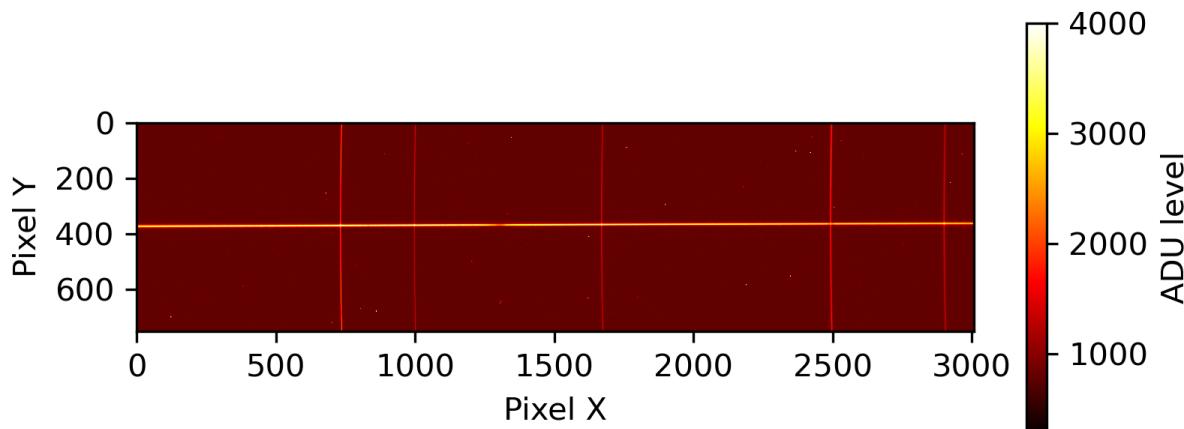
## 20.3 Calcul du spectre de 10 Lacertae sans correction instrumentale

Les données ont été acquises le 8 novembre 2023 avec une lunette Askar 107PHQ (diamètre de 107 mm, focale de 750 mm), un spectrographe Star'Ex HR (réseau de 2400 t/mm) et une caméra ASI533MM pro. En tout, 7 spectres de cet objet ont été pris autour de la raie Halpha, avec un temps de pose de 300 secondes pour chacun d'eux. L'étalonnage spectral est réalisé via une fibre plastique de 1,5 mm de diamètre envoyant en permanence le signal d'une lampe néon au centre de l'objectif de 107 mm (c'est le mode latéral). Le flat-field est réalisé en posant à l'avant de l'objectif un panneau LED d'éclairage domestique (38 poses, avec un temps d'exposition de 6 secondes pour le modèle utilisé). Le site d'observation est situé à Antibes Juan-les-Pins, dans le sud de la France.

Les données brutes de cette observation correspondant peuvent être téléchargés à cette adresse : <http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/melchiors/data/10lac.zip>

Les données de configuration utiles à cet exemple peuvent être téléchargées ici :  
<http://www.astrosurf.com/buil/specinti2/melchiors/configuration/configuration.zip>

Ce contenu permettra de rejouer le traitement et de mieux comprendre la démarche utilisée dans ce cas. N'hésitez pas à le faire. Notez que pour réduire le volume des données, les images d'offset, de dark et de flat-field (DOF) sont fournies sous une forme prétraitée. L'image suivante montre l'une des 7 poses, dans laquelle on peut voir en plus du spectre, les raies d'étalonnage en superposition :



Les 7 images du spectre de 10 Lac sont traitées de façon habituelle avec specINTI, ici en mode 4 (mode latéral avec une loi de dispersion spectrale pré-établie). Cependant, nous n'appliquons pas la correction de la réponse instrumentale, celle-ci étant supposée être inconnue pour l'instant. Voici l'intégralité du listing du fichier de configuration utilisé :

```
# ****
# CONF_HR1_10lac (mode 4)
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex374

# -----
# Fichier batch de traitement
# -----
batch_name: 10lac

# -----
# Mode d'étalonnage spectral
# -----
calib_mode: 4

# -----
# Polynôme d'étalonnage
# -----
# observation #374
calib_coef: [-1.092363802124218e-06, 0.10117821188182664, 6433.414563476807]

# -----
# Recherche automatique des raies d'étalonnage du néon
# -----
auto_calib: [6490, 6690]

# -----
# Largeur en pixels de la zone de recherche des raies d'étalonnage néon
# -----
search_wide: 40

# -----
```

```
# Largeur de binning
# -----
bin_size: 20

# -----
# Zones de calcul du fond de ciel
# -----
sky: [160, 22, 22, 160]

# -----
# Effacement des raies latérales d'étalonnage
# -----
clean_wave: [6506.5, 6532.8, 6598.9, 6678.27]
clean_wide: [1.1, 0.8, 0.9, 0.5]

# -----
# Rayon de courbure du smile
# -----
smile_radius: -18000

# -----
# Mode extraction du ciel (1 = optimal)
# -----
sky_mode: 1

# -----
# Bornes horizontales pour les mesures géométriques
# -----
xlimit: [400, 1800]

# -----
# Réponse instrumentale
# -----
# instrumental_response: _rep374

# -----
# Correction de la transmission atmosphérique
# -----
simbad: 1
corr_atmo: 0.20

# -----
# Motif de filtrage médian (0 = pas de filtrage médian)
# -----
kernel_size: 0

# -----
# Filtrage gaussien
# -----
sigma_gauss: 0.75

# -----
# Extraction optimale
# -----
extract_mode: 1
gain: 0.083
noise: 1.3

# -----
# Zone de normalisation à l'unité
# -----
norm_wave: [6640, 6660]

# -----
# Zone de cropping du profil final
# -----
crop_wave: [6500, 6700]

# -----
# Longitude du lieu d'observation
# -----
Longitude: 7.093

# -----
# Latitude du lieu d'observation
# -----
Latitude: 43.581
```

```

# -----
# Altitude du lieu d'observation en mètres
# -----
Altitude: 40

# -----
# Site d'observation
# -----
Site: Antibes Saint-Jean

# -----
# Description de l'instrument
# -----
Inst: Askar107PHQ + StarEx2400 + ASI533MM

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

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

# -----
# Le calcul du S/B est demandé
# -----
snr: [6650, 6665]

# -----
# Décalage spectral demandé
# -----
spectral_shift_wave: 0.025

# -----
# Correction de la vitesse barycentrique de la Terre
# -----
corr_bary: 0

```

Comme toujours, vous pouvez vous inspirer de ce fichier de configuration pour vos propres observations, mais attention, il est présenté ici dans une version intermédiaire qu'il ne faut pas nécessairement adopter en l'état. Quatre points sont à relever :

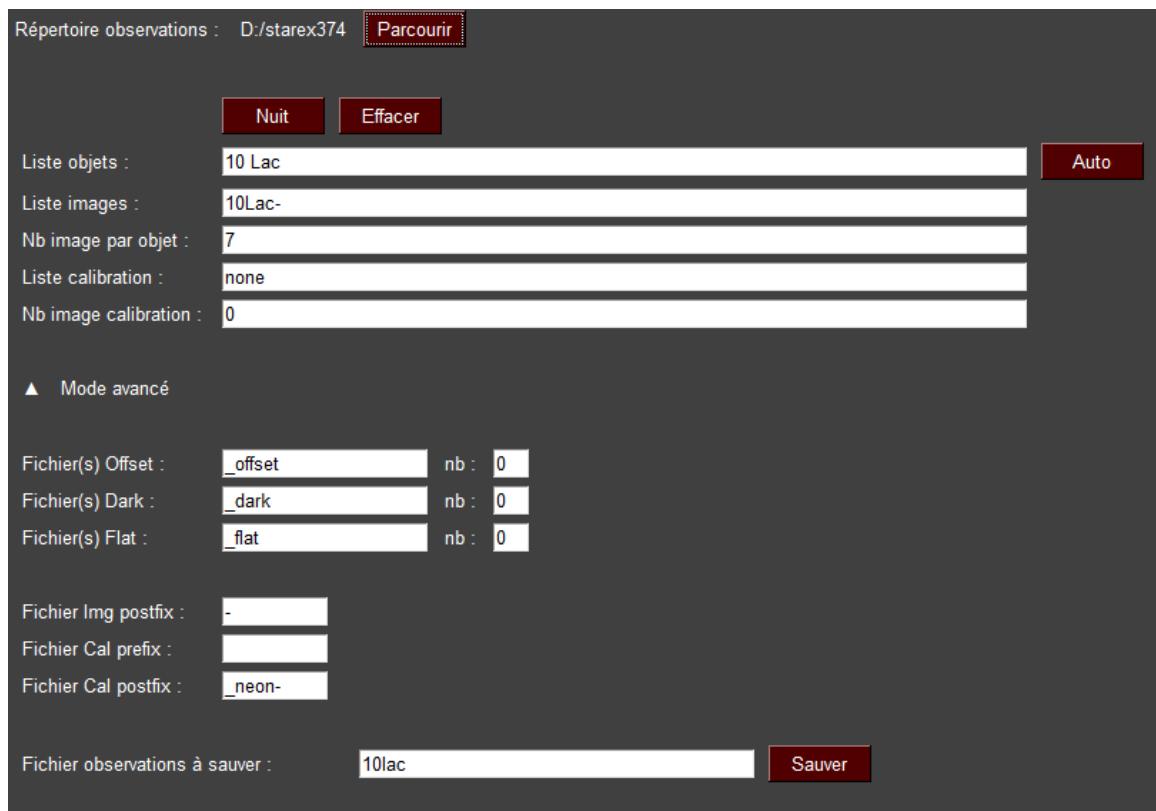
Premièrement, la ligne « instrumental\_response » est pour le moment mise en commentaire, car le paramètre n'est pas évalué pour l'instant.

Deuxièmement, remarquez la présence du paramètre « corr\_bary » auquel on attribue la valeur 0. Cela oblige specINTI à corriger la vitesse barycentrique de la Terre au moment de l'observation (autrement dit, la vitesse radiale de l'objet est celle que nous verrions depuis le centre du Soleil). Le fait d'indiquer 0 signifie qu'en revanche, la vitesse radiale propre de l'objet n'est pas corrigée, ce qui est également le cas dans les données Melchiors.

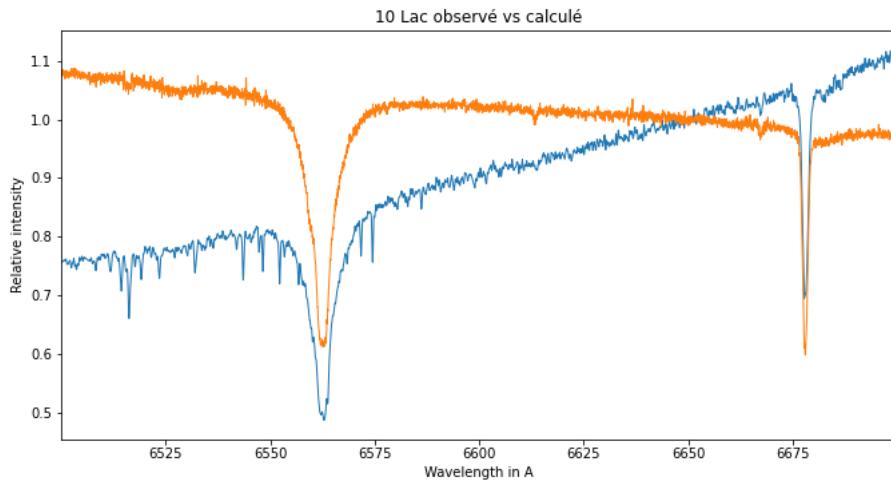
Troisièmement, la correction de la transmission atmosphérique (hors raies moléculaire) est réalisée au travers de la commande « corr\_atmo ». Le AOD adopté ici est de 0,2 le ciel n'étant pas considéré très transparent (en moyenne, utilisez 0,13). Cette correction est un élément fondamental car il va nous permettre de trouver la vraie « réponse » instrumentale.

Enfin, notez que le paramètre « spectral\_shift\_wave » prend la valeur de +0,025 angströms. Cette légère correction provient du fait que l'éclairage de la pupille par la fibre est trop ponctuel, ce qui peut générer ce biais en étalonnage spectral. Faites un contrôle en effectuant un premier traitement, puis vérifiez l'étalonnage sur les raies telluriques à l'aide de l'outil « Verif atmo » de l'onglet « Visu profil » sous specINTI Editor.

Voici le contenu de l'onglet « Observation » pour notre exemple, permettant de générer le fichier d'observation « 10lac.yaml » :



Cliquez sur le bouton « Exécuter » pour dérouler le traitement. A son terme vous obtenez le résultat suivant, tracé en bleu, alors qu'en orange est tracé l'extrait de spectre de la librairie Melchior pour l'étoile 10 Lac :



L'aspect du continuum est très différent entre ces deux spectres, et pour cause, nous n'avons pas effectué de correction de la réponse instrumentale. Le fait que notre spectre, en trait bleu, soit apparemment plus intense dans le rouge que dans le bleu vient de l'usage d'un panneau LED pour réaliser le flat-field. La lumière LED présente un déficit de rouge par rapport au bleu, provoquant une sur-correction lorsque les images brutes sont divisées par l'image maître flat-field.

C'est à ce type de problème que nous allons remédier à présent en exploitant le spectre de référence de la librairie Melchiors.

**Astuce :** vous pouvez utiliser la fonction « `_pro_norm` » pour normaliser à l'unité le spectre de référence Melchiors sur une plage de longueur d'onde donnée pour faciliter l'affichage comparatif. Ici, les spectres sont normalisés vers la longueur d'onde de 6650 Å (voir aussi le paramètre `norm_wave` dans le fichier de configuration).

## 20.4 Le calcul de la réponse instrumentale

La réponse instrumentale est le résultat de la division du spectre observé par le spectre de l'étoile de référence associé à une observation hors atmosphère. Nous allons réaliser cette opération en nous aidant d'un petit fichier de configuration, dont voici le listing :

```
# ****
# CONF_MAKE_CONTINUUM
# Ajuste un continuum stellaire par une fonction parabolique
# *****

# -----
# Répertoire de travail
# -----
working_path: D:/starex374

# -----
# Normalisation à l'unité dans un intervalle spectral
# -----
_begin:

_pro_gauss: [_ref_10lac, 6, tmp1]
_pro_div: [_10lac_20231108_856, tmp1, tmp2]
_pro_fit: [tmp2, 6505, 6585, 6625, 6690, _rep374]

_end:
```

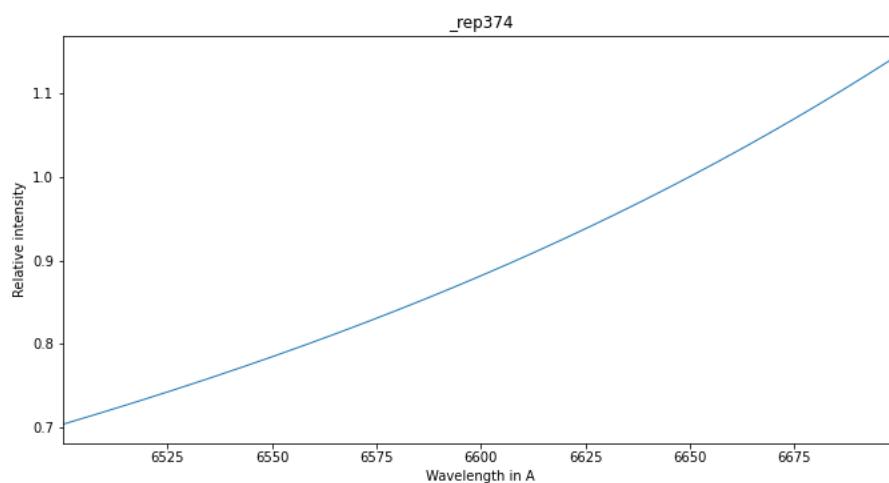
Après avoir défini le chemin du répertoire de travail, nous trouvons trois fonctions qui se lancent en séquence.

Tout d'abord, nous réalisons un lissage gaussien du profil de référence `_ref_10Lac` pour dégrader sa résolution spectrale de  $R = 85,000$  à  $R = 20,000$ , cette dernière valeur correspondant au pouvoir de résolution du spectrographe Star'Ex que nous utilisons. La largeur du filtre est de 6 pixels (vous pouvez choisir cette valeur), et le résultat est enregistré dans un fichier sous le nom `tmp1.fits`.

Ensuite, le paramètre « `_pro_div` » commande la division du spectre `tmp1.fits` par le spectre de 10 Lac calculé à la section précédente. Le résultat de cette division est un fichier nommé `tmp2.fits` (vous pouvez choisir le nom, ici « `temp` » pour « temporaire »).

Enfin, nous ajustons un profil parabolique au résultat de la division, qui va devenir la vraie réponse instrumentale. En paramètre de la fonction « `_pro_fit` », nous fournissons le nom du profil à ajuster (ici « `tmp2` ») et une liste de 4 longueurs d'onde associées à des intensités à partir desquelles INTI va ajuster sa parabole. Il est conseillé de choisir des zones sans raies et uniformément réparties pour calculer la réponse instrumentale. Le nom choisi pour le fichier décrivant la réponse instrumentale est `_rep374.fits` (il est courant d'associer le fichier de réponse aux données qui ont permis de le calculer, ici la nuit numéro 374 réalisée avec Star'Ex, sachant que ce même fichier est exploitable pour les nuits suivantes).

Voici le résultat après avoir lancé le script écrit dans le fichier de configuration «conf\_make\_continuum» :



Faisons ici une remarque importante : l'allure de la réponse calculée est assez uniforme ; on remarque seulement une pente et une légère courbure. Lorsqu'on travaille en haute résolution spectrale et sur un intervalle spectral particulièrement étroit, il n'y a pas de raison pour qu'il en soit autrement. Si tel n'est pas le cas, cela peut indiquer un problème dans le protocole de traitement, comme un usage incorrect du flat-field (ou l'absence d'usage !), une mauvaise extraction du profil, entre autres. Il est impératif de corriger ces éléments, car il n'y a pas de raison valable d'obtenir autre chose que ce qui est présenté ici, du moins en haute résolution (cela peut être un peu plus complexe en basse résolution).

La courbe de réponse est supposée si monotone que nous nous sommes permis de définir seulement 4 points dans le spectre pour ajuster une simple parabole (un polynôme de degré 2). Cette procédure est sûre, précise et simple car automatisée.

Il est cependant honnête de reconnaître que l'évaluation de la réponse instrumentale peut toujours réserver des surprises. Pour des cas plus complexes et encore améliorer le résultat, specINTI propose les fonctions « \_pro\_fit2 » et « \_pro\_fit3 », où cette fois, il est nécessaire de fournir respectivement 5 et 6 points dans l'intervalle spectral pour l'ajustement selon un polynôme de degré 3. Par exemple ici :

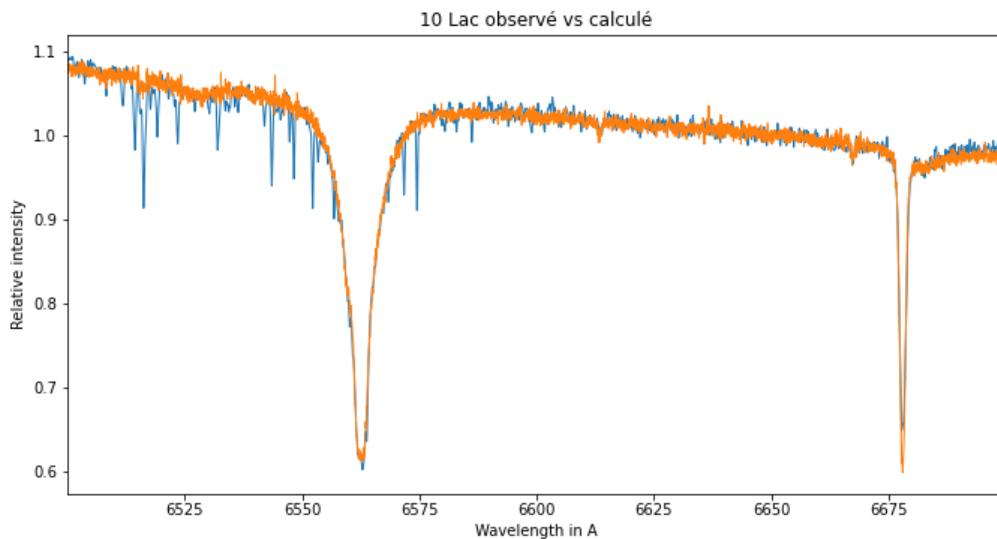
```
_pro_fit3: [tmp2, 6505, 6530, 6540, 6584, 6625, 6690, _ref374]
```

## 20.5 Calcul du spectre de 10 Lacertae avec correction instrumentale

Pour appliquer la correction de la réponse instrumentale il suffit de retirer le commentaire au début de la ligne « instrumental\_response »

```
instrumental_response: _rep374
```

Il n'y a plus qu'à relancer le traitement complet, donc voici le résultat :



En bleu, notre spectre ; en rouge, celui de la librairie Melchiors. Profitons-en pour vérifier que l'étalonnage en longueur d'onde est correct, ce qui semble être le cas ici (notez la superposition des profils).

En réalité, ce n'est pas tout à fait terminé. Lorsque vous diffusez un spectre pour une étude, par exemple pour alimenter la base BeSS ou participer à une campagne STAROS, il n'est pas toujours demandé de réaliser la correction de vitesse barycentrique. À ce stade, assurez-vous absolument de mettre en commentaire la ligne « `corr_bary` » (supprimez le caractère # devant) si vous travaillez dans ces contextes. Relancez ensuite le processus, et votre spectre sera prêt pour être exploité !

La réponse ainsi calculée peut être utilisée pour traiter d'autres spectres. Une fois évaluée, c'est une « constante » de l'instrument, utilisable sur de nombreuses nuits sans nécessiter de réévaluation. Voici, par exemple, le résultat du traitement du spectre de l'étoile Deneb (en bleu), pris dans des conditions similaires (lunette de 107 mm, Star'Ex, ici 30 x 120 secondes) et avec la même réponse instrumentale – et en orange le spectre de Deneb (alpha Cyg) lui aussi présent dans la base Melchiors :

