

Calibration de HARPS



High Accuracy Radial Velocity for Planetary Search

Sami JANNIN

Ecole Nationale Supérieure de Physique de Grenoble



Tuteurs : Francesco PEPE & Didier QUELOZ
Observatoire de Genève



Juin–Septembre 2004

Un grand merci à Francesco Pépé, Didier Queloz, Denis Mégevand, Stéphane Udry, Luc Weber, Christophe Lovis et Xavier Bonfils.

Abstract

HARPS is a high resolution spectrograph dedicated to the search of extra-planets by means of precise radial velocity (RV) measurements. It is installed on the ESO 3.6-m telescope at the La Silla observatory (Chile). The discovery of 51 Peg B by Mayor and Queloz has energized the scientific community and, since 1995, 124 extra-planets have been discovered. The last one (Mayor & Queloz) is an earth-type planet and asks the question of an extra-solar life.

Wavelength calibration is provided by a ThAr lamp simultaneously imaged on the CCD. It allows to reach $0.8m.s^{-1}$ accuracy on RV measurement. This paper summarizes three months of work on the wavelength calibration. It deals with a method to correct the wavelength for a better calibration that bring HARPS to an accuracy of $0.5m.s^{-1}$. It also describes the improvement of the wavelength calibration.

Résumé

HARPS est un spectrographe haute résolution dédié à la recherche de planètes extra-solaires. La méthode de détection des planètes est la méthode de la vitesse radiale (RV). Il est installé sur le télescope 3.6-m à l'Observatoire de l'ESO sur le site de La Silla (Chili). La découverte de 51 Peg B par Mayor et Queloz a initié beaucoup de travaux sur ce thème dans la communauté scientifique. Depuis cette découverte en 1995, 124 planètes extra-solaires ont été découvertes. La dernière en date est une planète tellurique qui pose pour la première fois la question de la vie extra-terrestre.

La calibration de HARPS est de type Thorium simultané. Cette méthode permet à HARPS d'atteindre une précision de $0.8m.s^{-1}$ sur les mesures de vitesse radiale. Ce rapport résume un travail de trois mois sur l'optimisation de la calibration par correction de la solution en longueur d'onde du Thorium. Ce travail a permis de passer d'une précision de $0.8m.s^{-1}$ à $0.5m.s^{-1}$.

Table des matières

A	En guise d'introduction	4
1	Contexte scientifique	5
1.1	A la recherche de planètes extra-solaires	5
1.2	Quand HARPS détecte	6
1.3	Pourquoi "réaccorder" HARPS?	9
B	Analyse des écarts de position des raies	11
1	Observation des écarts (fibre A)	12
1.1	Écarts	12
1.2	Écarts en fonction du flux photonique mesuré	14
1.3	Écarts moyens	15
1.4	Distribution des écarts moyens	17
1.5	Ecarts moyens en fonction du flux mesuré	18
1.6	Précisions des écarts moyens	18
2	Origine des écarts	21
2.1	Système optique	22
2.2	Pixellisation	23
2.3	Conclusions sur l'origine des écarts	27
C	Correction de la solution en longueur d'onde	28
1	Première modification par pondération	29
1.1	Marche à suivre	29
1.2	Observations	29
1.3	Conclusion intermédiaire	32
2	Réintégration de nouvelles raies	33
2.1	Observation	33
2.2	Élimination des écarts trop importants	35
2.3	Correction des écarts moyens	36
2.4	Résultats	36
D	Conclusion et perspectives	37

Première partie

En guise d'introduction

1 Contexte scientifique

1.1 A la recherche de planètes extra-solaires

A première vue, notre ciel est composé d'étoiles me direz-vous. Nous connaissons bien sûr les quelques planètes qui gravitent imperturbablement autour de notre soleil. Mais d'autres astres intéressent davantage les Astrophysiciens, ce sont les planètes extra-solaires, plus simplement appelées exoplanètes. . .

Si la présence d'exoplanètes est aujourd'hui acceptée par notre bon sens, gardons à l'esprit que la preuve de leur existence reste très récente. Ce n'est qu'en 1995 que Michel Mayor, Didier Queloz et leurs collègues découvrirent la toute première, en orbite autour de 51 Pegasi. Cette découverte a suscité beaucoup d'intérêt pour ce type de recherche.

Depuis, 136 exoplanètes ont été détectées. La dernière en date, découverte le 26 août 2004 par l'équipe de Michel Mayor, est une planète tellurique semblable à notre terre. Les planètes découvertes avant celle-ci (principalement des géantes gazeuses) ne constituaient pas encore d'environnements favorables à l'émergence de la vie. Cette toute récente découverte a particulièrement attiré l'attention de la communauté scientifique comme celle des médias car elle est la seule à ce jour à pouvoir prétendre abriter la vie¹. La Terre ne peut donc plus à présent être considérée comme une exception, on sait aujourd'hui que d'autres Terres peuplent l'espace .

Beaucoup d'informations émanent de ces découvertes, concernant notamment la compréhension de la formation de notre système solaire, la statistique des éléments orbitaux (les masses, périodes), ou encore la probabilité d'une vie extraterrestre. Durant ces dix dernières années, l'équipe de Michel Mayor a amélioré la précision de leurs mesures en mettant successivement au point des instruments de plus en plus performants : Elodie, Coralie, puis HARPS.

1. Pour beaucoup d'astrophysiciens, la présence de méthane (CH₄) et d'ozone (O₃) est une preuve indubitable de la présence de vie. Lorsque les photons émis par l'étoile traversent l'exoplanète, le spectre qui en résulte révèle alors la composition de l'atmosphère.

1.2 Quand HARPS détecte

Les exoplanètes sont difficiles à observer car elles gravitent autour d'étoiles dont la luminosité leur est très largement supérieure, cela rend alors impossible leur détection par des observations standards. Les méthodes de détection d'exoplanètes ayant fait leurs preuves à ce jour sont indirectes²: ce n'est pas la planète qui est observée mais son influence sur l'étoile.

1.2-a Méthode de la vitesse radiale

Cette méthode consiste à mesurer les variations de vitesse de l'étoile tournant autour du barycentre du système planète-étoile. En mesurant le décalage doppler de la lumière émise par l'étoile, on peut détecter son mouvement périodique.

Les variations de longueurs d'ondes des raies émises par l'étoile sont très faibles. Elles correspondent environ à des variations de vitesses de l'ordre de la marche d'un homme. Il est donc nécessaire de mettre au point des instruments de grande précision et stabilité pour percevoir ces infimes variations de vitesse à plusieurs années lumière de nous.

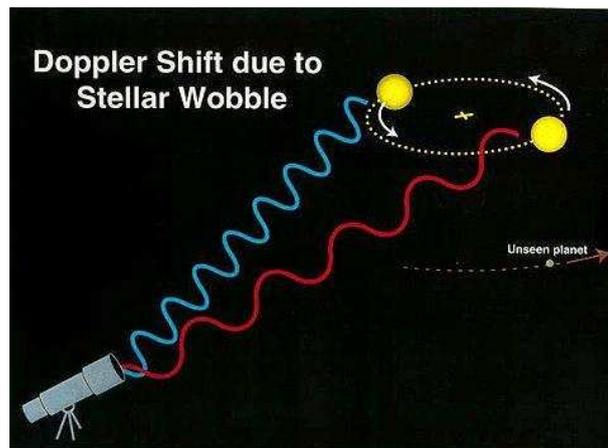


FIG. 1 – Lorsque l'étoile s'éloigne de nous, son spectre vire au rouge. Lorsqu'elle se rapproche, il vire au bleu. Les variations à détecter n'atteignent cependant pas le dixième d'angstroem, ce qui impose l'utilisation d'instruments de grande précision.

2. Méthodes des transits planétaires, Observations de pulsars, Effets de lentilles gravitationnelles

1.2–b HARPS, un instrument de haute technologie

C'est pour permettre d'atteindre des précisions de l'ordre du m/s que le projet HARPS a été réalisé sous la responsabilité de Genève pour l'ESO. Un consortium franco-suisse, regroupant l'Observatoire de Haute-Provence, le Service d'Aéronomie du CNRS, l'Observatoire de Genève et l'Institut de Physique de Berne a mis sur pied ce projet en 2003. HARPS est à présent installé sur un télescope de 3.60 m de La Silla au Chili et compte déjà plusieurs découvertes d'exoplanètes à son actif (HARPS a révélé l'existence de 5 exo-planètes, et, plusieurs dizaines en cours d'observations feront l'objet de publications dans les mois à venir).

Le but de cette introduction n'est pas de décrire de manière exhaustive le fonctionnement de HARPS³, mais de présenter son fonctionnement global, et plus particulièrement la place qu'y tient la calibration.

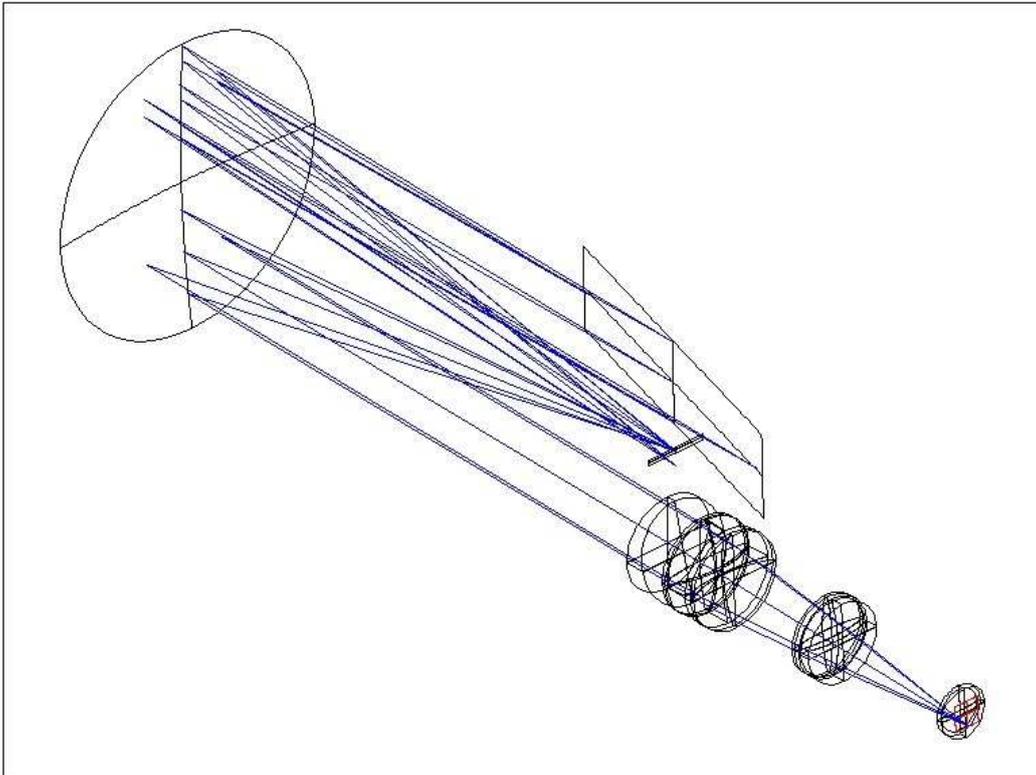


FIG. 2 – *Fonctionnement global de HARPS: une fibre guide le rayon incident du télescope jusqu'à HARPS, ensuite, le système optique étale le spectre sur un écran à capteurs CCD.*

3. Se reporter à la bibliographie pour de plus amples informations

L'étoile observé nous envoie une image composés de photons de longueurs d'ondes différentes, c'est à dire de couleurs différentes. HARPS va en quelque sorte séparer ces couleurs du rouge au bleu avec une très grande précision. Le spectre de l'étoile observée est conduit sur un écran CCD, l'image obtenue est composée de 71 ordres qui recouvrent une gamme de longueurs d'ondes comprises entre 3800 et 6900 angstroems.

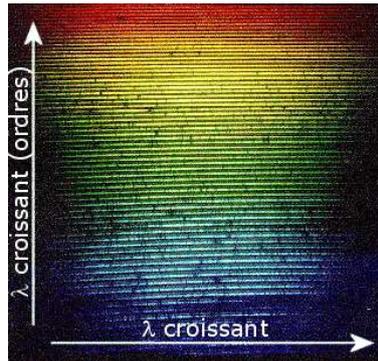


FIG. 3 – *Image CCD*

A chaque longueur d'onde (couleur) correspond une position sur le CCD. Une calibration est alors nécessaire pour connaître la correspondance pixel - longueur d'onde. La méthode de calibration de HARPS est un processus long et très complexe mis en place par Didier Queloz. La fibre A provenant du télescope est déviée vers une lampe thorium-argon. La fibre B est aussi connectée, mais de façon permanente, à une lampe thorium-argon. Ainsi, sur le CCD, se forment deux spectres identiques mais légèrement décalés en hauteur.

Le spectre du thorium est connu, ses valeurs sont fournies par l'Atlas à une résolution $R=100000$, on peut donc ensuite convertir les longueurs d'ondes en pixels et vice versa. La partie logicielle rentre en jeu à ce moment et procède à la calibration. Ensuite, lors des mesures, l'image obtenue contient à la fois la mesure (fibre A) et la référence (fibre B).

Pour assurer une stabilité et une précision maximales de l'instrument, plusieurs points sont cruciaux:

- Le faisceau d'entrée est stabilisé.
- Le banc optique est stabilisé mécaniquement et thermiquement.
- Les effets du mouvement de la Terre dans le système solaire sont pris en compte.
- L'auto-calibration avant chaque nuit d'observation assure une référence d'étalonnage spectroscopique stable.

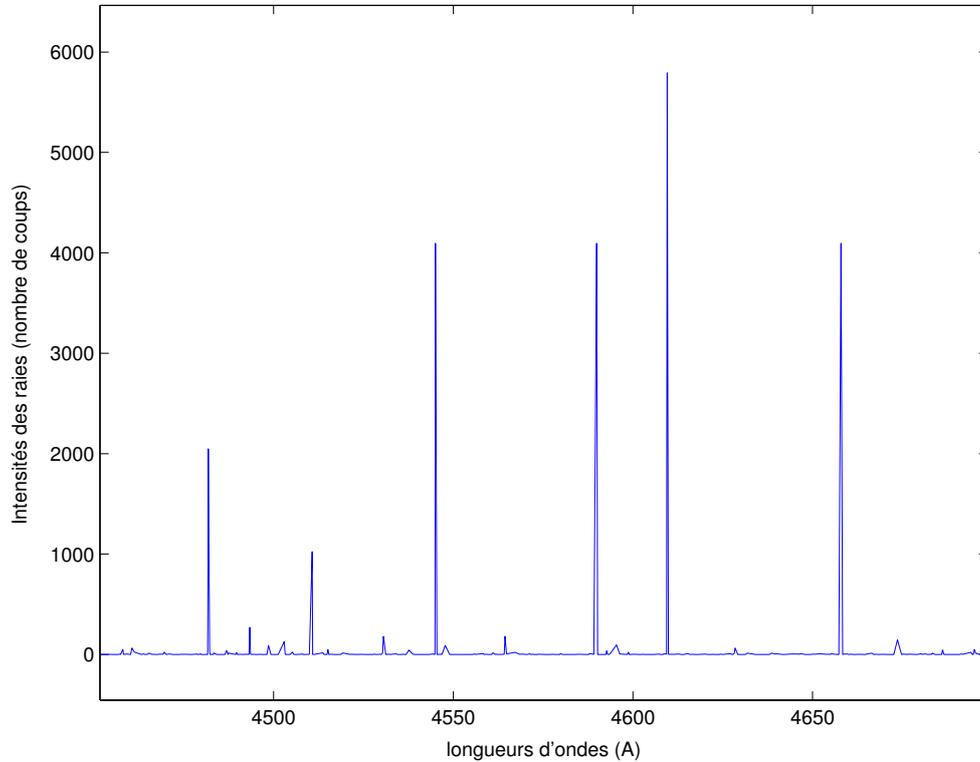


FIG. 4 – *Spectre du Thorium*

1.3 Pourquoi "réaccorder" HARPS ?

1.3–a Etat des lieux, $0.8m.s^{-1}$

HARPS nécessite une calibration avant chaque nuit de mesure, cela permet de corriger des dérives mécaniques et thermiques pendant la journée. A partir de l'image CCD, le logiciel de réduction des données va "fitter" chaque raie à une gaussienne, puis ajuster l'ensemble des raies de chaque ordre à un polynome. Ainsi, chaque raie présente sur le CCD sera convertie en longueur d'onde (*1pixel* correspond environ à $10^{-2}Amstroem$ ou encore à $1km.s^{-1}$). En théorie, après calibration, la solution en longueur d'onde du Thorium résultant du traitement de l'image obtenue par la fibre A devrait être identique à celle donnée par l'Atlas. Cependant, à chaque calibration, on remarque que les raies sont décalées de leur position théorique. On soupçonne que ces écarts limitent les performances de HARPS. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts, ils seront détaillés et analysés plus tard.

1.3–b Travaux à entreprendre, objectifs

On soupçonne que la présence d'écarts systématiques limite les performances de HARPS. L'origine de ces écarts est inconnue mais il est possible qu'ils viennent d'une mauvaise définition des longueurs d'ondes dans le catalogue de l'Atlas.

La première partie du stage est consacrée à l'étude de ces écarts, de leur comportement au cours du temps et ce pour toutes les raies. S'il s'avère exact que des écarts ont des comportements systématiques, le stage pourra ensuite s'orienter vers la mise en place d'un algorithme de correction de la solution en longueur d'onde du thorium.

On espère au final améliorer les performances de HARPS. Le bruit actuellement engendré par la solution en longueur d'onde permet d'atteindre une précision de $0.8m.s^{-1}$ sur les mesures. C'est précisément le bruit de la solution en longueur d'onde qu'on tentera de réduire, en espérant que cela ait un impact sur la précision de mesure de HARPS.

Deuxième partie

Analyse des écarts de position des raies

1 Observation des écarts (fibre A)

1.1 Écarts

Une calibration de qualité tend à réduire l'écart entre la position attendue de la raie sur le CCD et sa position mesurée. En imaginant que le flux de photons soit très puissant, que la solution en longueur d'onde donnée par l'Atlas décrive parfaitement les longueurs d'onde émises par le thorium et que, ni l'instrument, ni la calibration, n'induisent d'erreur de positionnement des raies, une calibration idéale supprimerait totalement ces écarts. Or il n'en est rien. Tout d'abord, le flux photonique est très faible, ce qui m'a poussé à reprendre toutes les mesures de HARPS depuis sa mise en marche (1127 expériences) pour diminuer ce bruit photonique d'un facteur $\sqrt{1127} \approx 33.57$. Ensuite, la résolution de la solution en longueur d'onde du thorium donnée par l'Atlas est de 100000, cela correspond à des erreurs de l'ordre de $5 \cdot 10^{-2}$ Angstroms. Enfin, bien que HARPS soit stabilisé mécaniquement et thermiquement et que ses composants soient d'une très grande fiabilité, son système optique engendre inévitablement des distorsions du spectre. Les imperfections du CCD entraînent des erreurs de reconnaissance des positions des raies, etc. En résumé, à chaque étape, de l'entrée de la fibre aux données réduites en sortie, il peut se glisser d'innombrables erreurs. Malheureusement, si le logiciel de réduction des données nous informe sur l'erreur en sortie, il est difficile de connaître la part que jouent les différents éléments.

L'observation de l'évolution de l'écart entre la position attendue de la raie (x_{in}) et la position observée (x_{out}) pour quelques raies permet de mettre en évidence immédiatement la présence de "systématiques".

Sur la figure 5, La raie du haut a un écart moyen de -0.035 pixel et une dispersion de 0.031 pixel et celle du bas a un écart moyen de -0.089 pixel et une dispersion de 0.04 pixel. Ainsi, on observe que le bruit photonique n'est pas seul responsable des erreurs de mesures. Les systématiques peuvent provenir de différentes sources d'erreurs citées précédemment. A ce stade, il semble intéressant de procéder à une correction des écarts systématiques. Pour ce faire, il est nécessaire de traiter l'ensemble des raies au cas par cas.

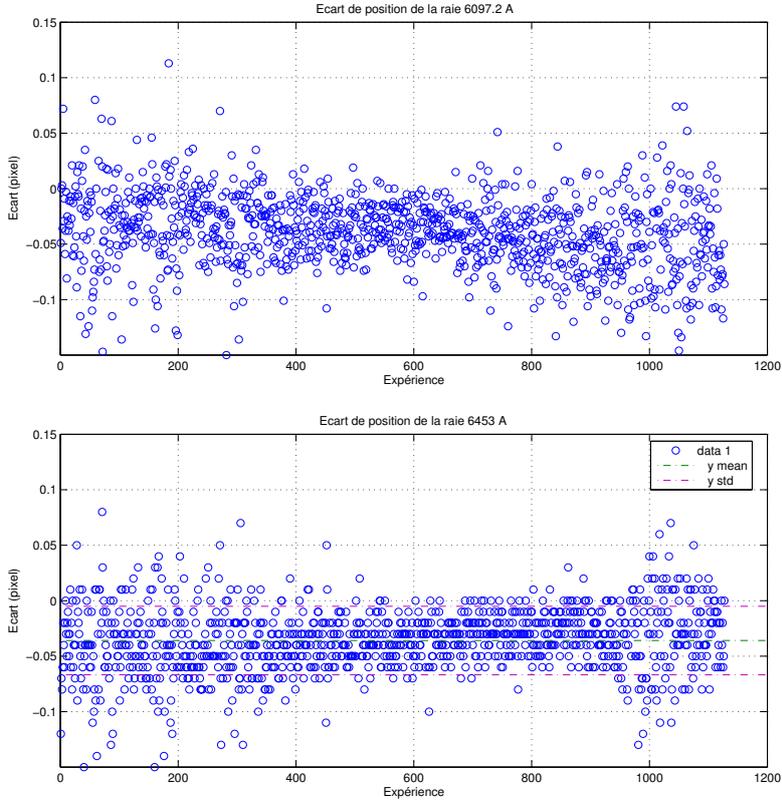


FIG. 5 – *Écarts pour les 1127 mesures effectuées entre février 2003 et mars 2004 pour la raie de longueur d’onde 5116.5 Angstroems (en haut) et 5747.4 (en bas) provenant de la fibre A. Illustration du décalage systématique de l’écart de position au cours des expériences.*

Pour corriger les erreurs systématiques, la méthode la plus adaptée au logiciel de réduction des données consiste tout simplement à constituer une nouvelle solution en longueur d’onde du Thorium. Il faut cependant garder à l’esprit qu’il n’est pour l’instant pas question d’affirmer la validité de cette nouvelle solution en dehors du domaine d’application de HARPS (les systématiques peuvent provenir d’une mauvaise définition des raies du Thorium, mais aussi d’imperfections physiques de HARPS).

Plusieurs méthodes de calcul des systématiques peuvent être utilisées, et leur choix se révèle très important. On remarque en effet, que certaines erreurs improbables viennent perturber considérablement les calculs. Ces erreurs peuvent être les fruits de mauvaises calibrations, de Ghosts (raies cosmiques ou reflets d'autres raies, etc). Il faut alors, soit couper les raies pathogènes selon des critères précis, soit pondérer les raies par un facteur valable.

Le choix de la méthode la plus appropriée passe tout d'abord par une étude plus précise des écarts de position des raies.

1.2 Écarts en fonction du flux photonique mesuré

La figure 6 représente les écarts de position d'une même raie pour plus de 1000 expériences. Les écarts sont ordonnés selon le flux photonique mesuré. A faible flux, la dispersion des écarts est plus importante qu'à fort flux. De plus, les valeurs semblent converger vers une valeur asymptotique lorsque le flux augmente.

On remarque aussi, qu'à faible flux, la dispersion des écarts n'est pas toujours symétrique. Cela est provoqué par la présence d'une raie de fort flux à proximité qui déforme le profil de la raie en question. Le profil de la raie n'étant plus gaussien, le calcul du barycentre par le logiciel de réduction des données est faussé.

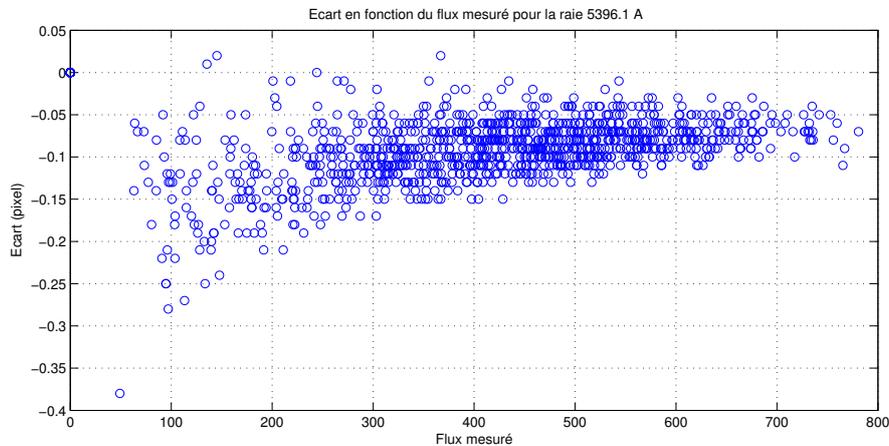


FIG. 6 – Distribution des écart de la raie 5396.1 Angstroem (fibre A) en fonction du flux mesuré. Illustration de la diminution de la dispersion avec l'augmentation du flux mesuré.

Le flux est donc un facteur très important du point de vue de la distribution des écarts. Il serait donc judicieux de le prendre en compte dans le calcul des écarts moyens. Dans le cas de la raie 5396.1 Å, une moyenne calculée sans prendre en compte le flux serait très fortement faussée par la distortion de la distribution des écarts. L'écart moyen serait alors tiré vers les pixels négatifs.

1.3 Écarts moyens

Soient 1127 expériences utilisées (depuis février 2003), ces expériences sont notées $i=1 \dots 1127$. Et soient les 4913 raies détectées notées $j=1 \dots 4913$. Ainsi, à chaque mesure d'écart, et pour chaque raie, est associée une valeur Δx_j^i . Cette valeur représente l'écart de position de la raie, c'est à dire la valeur attendue moins la valeur mesurée $x_{in} - x_{out}$. D'autres valeurs essentielles sont détaillées ci-dessous.

Ecarts	$\Delta x_j^i = x_{in} - x_{out}$	<i>pixels</i>
Poids	w_j^i	<i>cohérent au flux de photons</i>
Raies	λ_j^i	<i>Angströms</i>
Conversion	$\Delta v_j^i / \Delta x_j^i$	$m^{-1} \cdot pixels^{-1}$

La méthode de calcul des systématiques la plus adaptée est la méthode des moyennes pondérées par les poids. Ainsi, plus le flux est important, et plus la mesure aura de l'importance dans le calcul de la moyenne. On calcule donc un écart moyen pour chaque raie, en moyennant sur toutes les expériences.

$$\langle \Delta x \rangle_j = \frac{\sum_{i=1}^{1127} \Delta x_j^i * w_j^i}{\sum_{i=1}^{1127} w_j^i} \quad (1)$$

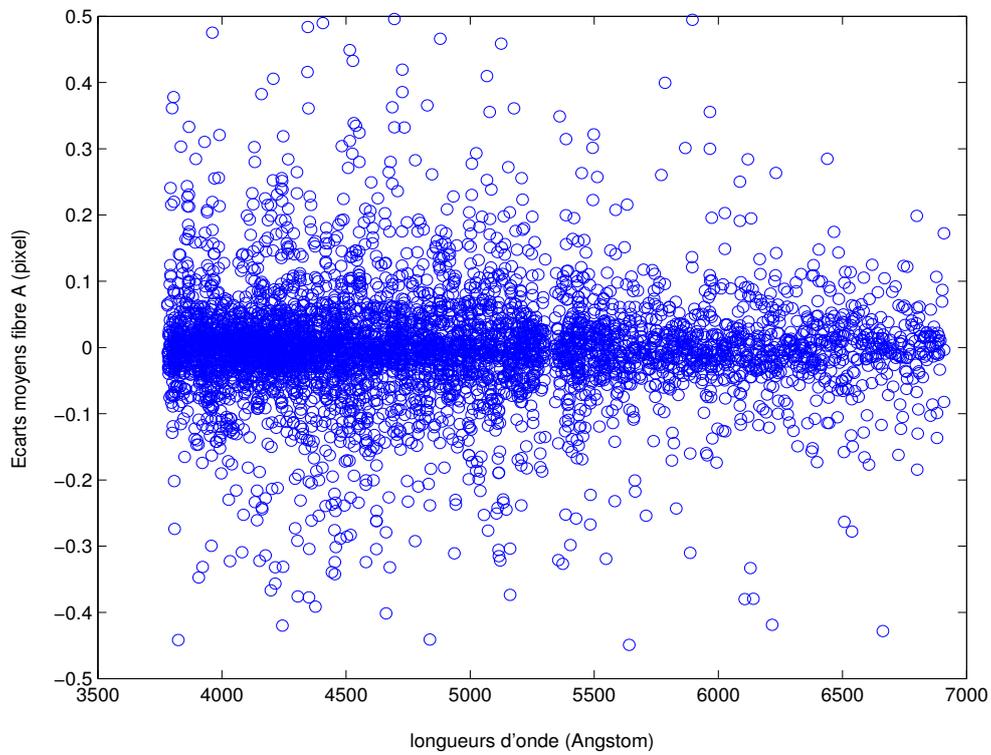


FIG. 7 – *Ecart moyen des 4913 raies détectées.*

On observe alors clairement que le phénomène d'erreur systématique n'est pas spécifique à quelques raies mais à toutes les raies. La dispersion des écarts moyens est de 0.113 pixels. La moyenne des écarts moyens en valeurs absolues est de 0.0577 pixel.

1.4 Distribution des écarts moyens

Les écarts moyens présentent une distribution de type gaussienne.

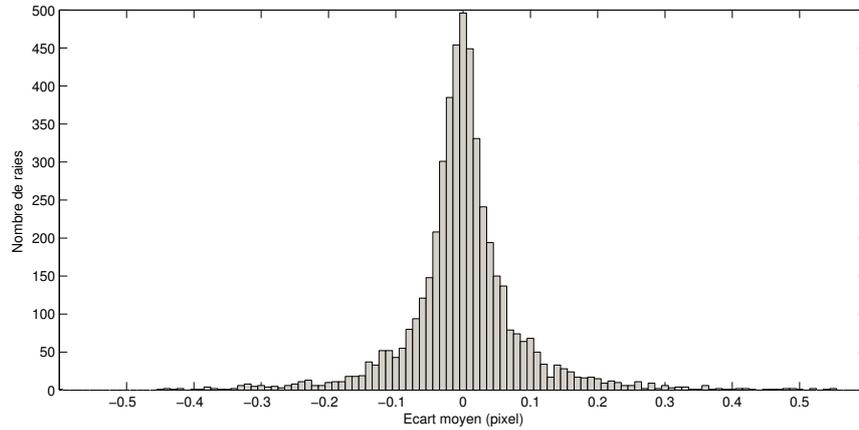


FIG. 8 – *Distribution des écarts moyens*

On observe cependant un comportement non gaussien au delà de 0.3 pixels. Ces raies problématiques seront traitées par la suite.

1.5 Écarts moyens en fonction du flux mesuré

La figure 9 montre le comportement des écarts moyens en fonction du flux moyen. On remarque alors que les forts écarts correspondent tous à un faible flux. Au delà d'un seuil critique du flux (≈ 100), les écarts moyens sont confinés entre -0.2 et 0.2 pixels.

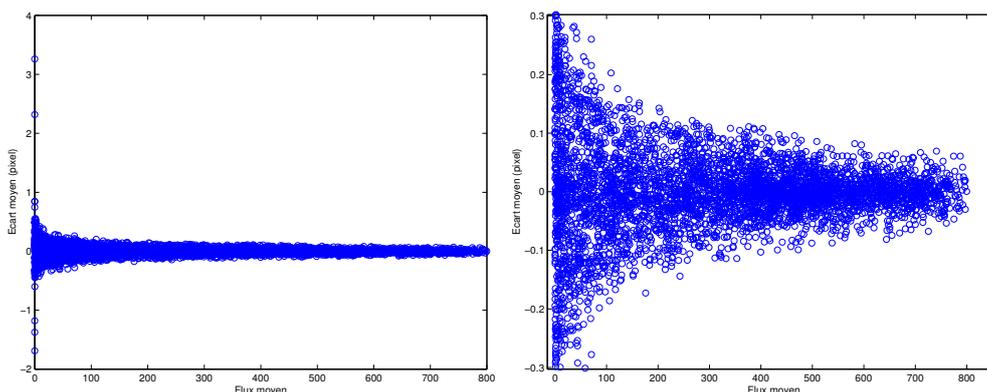


FIG. 9 – *Écarts moyens des 4913 raies détectées en fonction du flux moyen mesuré.*

1.6 Précisions des écarts moyens

A chaque écart moyen $\langle \Delta x \rangle_j$ correspond une précision P_j calculée sur toutes les expériences. Cette précision est en fait la dispersion des écarts divisée par la racine du nombre d'expériences effectuées.

$$P_j = \frac{\sigma_j}{\sqrt{1127}} = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{1127} (\Delta x_j^i - \langle \Delta x \rangle_j)^2 * w_j^i}{\sum_{i=1}^{1127} w_j^i} \right)^{(1/2)}}{\sqrt{1127}} \quad (2)$$

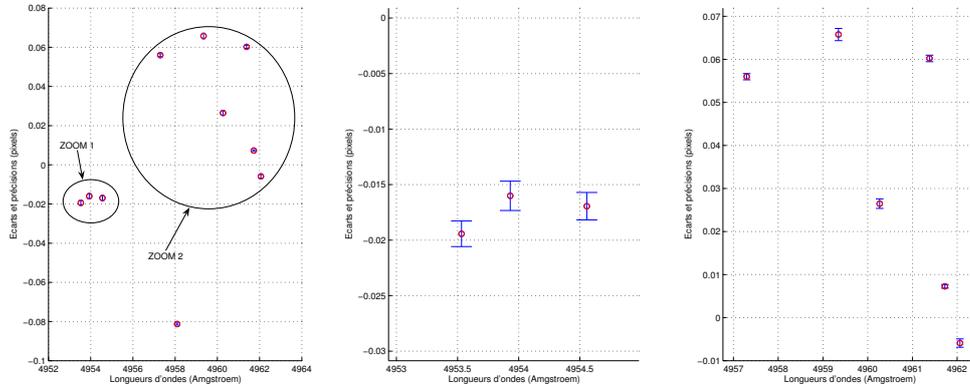


FIG. 10 – *Précisions (barres d'erreurs) et écarts moyens pour quelques raies.*

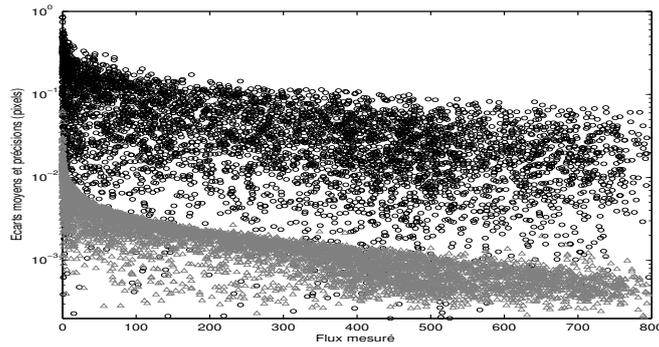


FIG. 11 – *Précisions (triangle gris) et écarts moyens (cercle noir) pour toutes les raies. Selon le flux mesuré.*

La figure 10 montre à quel point la précision sur les valeurs d'écarts moyens est bonne. En comparant les précisions aux écarts moyens, on s'assure que la correction de la solution en longueur d'onde a un sens. Dans notre cas, les précisions sont bien inférieures aux écarts comme le montre la figure 11. Dans le cas contraire, corriger des raies d'écarts moyens inférieurs aux erreurs ne servirait à rien.

La figure 12 représente les rapports écart moyen sur précisions et montre que moins de 3% des raies (130 sur 4913) ont un écart moyen inférieur à leur précision, et, plus de 76% (3735 sur 4913) ont un écart moyen dix fois supérieur. Dans ces conditions, une correction de la solution en longueur d'onde est pertinente.

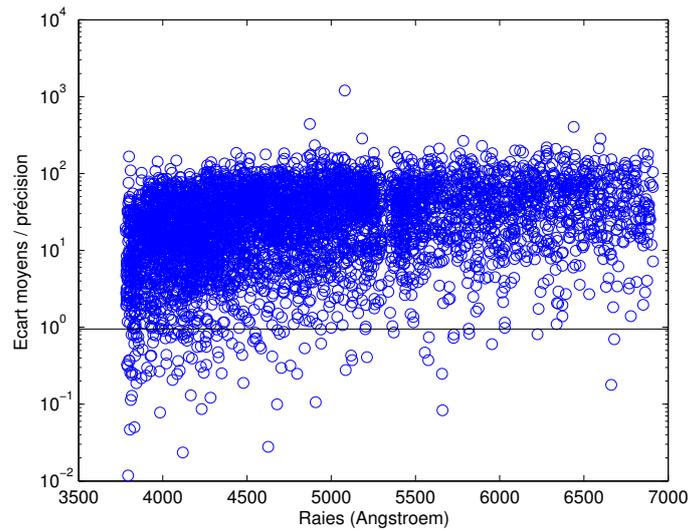


FIG. 12 – *Rapports "écart moyen sur précision"*

2 Origine des écarts

Voici plusieurs pistes de provenance des écarts moyens de position des raies.

- Le système optique: en sortie du télescope ou de la lampe à thorium, la fibre conduit les photons jusqu'au système optique de séparation des raies en longueur d'onde (grism, miroirs, réseau). Des erreurs de positionnement des raies peuvent être induites par des déviations du chemin optique des photons ou par des variations de la longueur d'onde des raies émises par les lampes.
- La pixellisation: lorsqu'une raie est détectée sur le CCD, une gaussienne y est ajustée. Cette gaussienne peut alors s'étendre sur 3 à 4 pixels. Il est alors possible que les écarts moyens proviennent d'une erreur logicielle d'ajustement du centre de gravité de la gaussienne.
- Les imperfections des capteurs CCD: le capteur CCD peut présenter des secteurs défectueux et les jointures entre capteurs peuvent induire des offsets.
- Les imprécisions de la solution en longueur d'onde du thorium: La précision de la solution en longueur d'onde n'est pas donnée par l'Atlas, cependant, les valeurs sont données à trois chiffres après la virgule, c'est-à-dire à 10⁻³ Angstrom. Il est donc possible que la précision de HARPS dépasse celle de l'Atlas.

L'intérêt de cette section n'est pas de donner une réponse précise à la question de la provenance des erreurs, mais de présenter des éléments qui peuvent être tirés de cette étude, et éventuellement de donner des pistes de recherche.

2.1 Système optique

Le système optique est décrit dans la section 1.2-b. Les erreurs provenant du système optique sont conditionnées par la précision de fabrication des lentilles, des miroirs ou du grism ainsi que par tous les phénomènes d'ab'érations.

Cependant, les écarts observés présentent des variations très fortes entre des longueurs d'ondes très proches. Or les erreurs provoquées par le système optique sont des erreurs qui sont régies par des polynômes du second ou troisième degré. En aucun cas de telles variations peuvent être liées à l'optique du système.

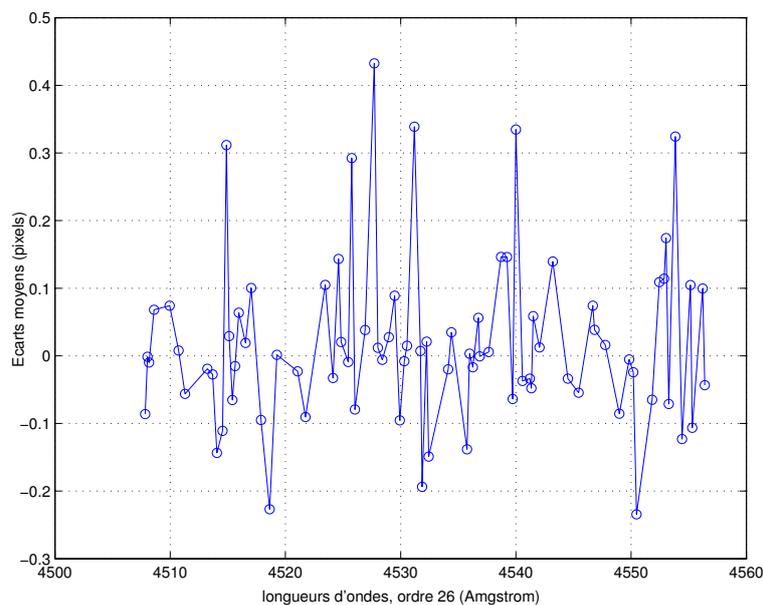


FIG. 13 – *Illustration des discontinuités d'écart moyen*

2.2 Pixellisation

L' hypothèse de la pixellisation peut être étudiée en observant les raies apparaissant sur deux ordres successifs. HARPS est un spectrographe à échelle, c'est à dire qu'il y a un recouvrement des ordres en longueur d'onde. Les raies de fin d'ordre se retrouvent donc en début d'ordre suivant, ce sont les raies multiples. Ainsi, une même raie passe par deux chemins optiques différents qui tombent sur des pixels différents.

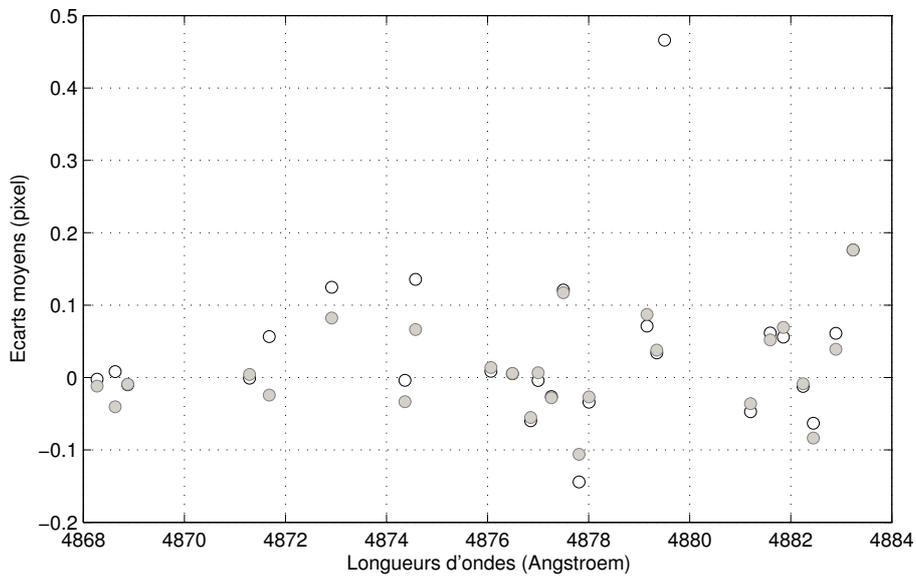


FIG. 14 – *Ecart moyen et précisions dans la zone de recouvrement des ordres 35 et 36. Les raies de l'ordre 35 sont en rouge et celles de l'ordre 36 en noir.*

Dans ce cas précis, on observe les raies multiples des ordres 35 et 36. A chaque longueur d'onde correspondent deux raies provenant de deux ordres différents. Ainsi le chemin optique emprunté par chaque raie est différent et les pixels sur lesquels tombent ces raies sont différents.

Immédiatement, on remarque une très forte corrélation entre les écarts moyens provenant des deux ordres différents. Cela est très intéressant car ce sont des raies qui empruntent des chemins optiques différents et qui tombent sur des pixels différents. En toute logique, leurs écarts ne devraient en rien être semblables. A ce stade, il est possible d'affirmer qu'une part significative de l'erreur n'est pas due à HARPS. La précision de HARPS semble limitée par un facteur étranger à sa structure physique. Il est probable que la solution en longueur d'onde du thorium donnée par l'Atlas ne soit pas assez précise, et qu'elle limite la précision de HARPS.

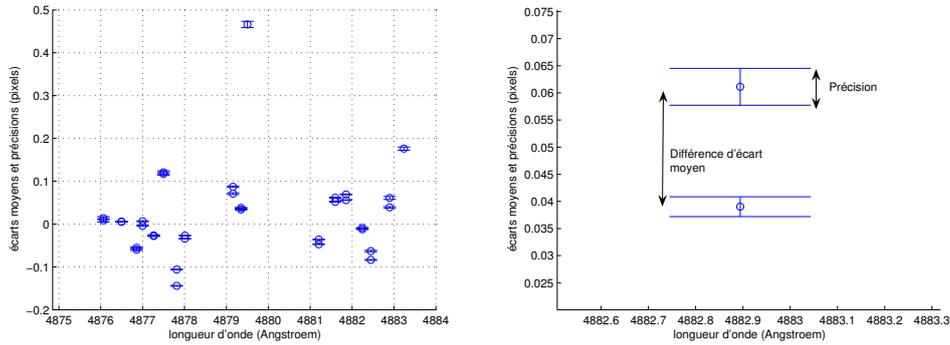


FIG. 15 – Raie multiple (ordres 35 et 36). Illustration des rapports entre écarts moyens, incertitudes sur les écarts moyens et différences d'écarts moyens.

La part d'erreur P_{HARPS} due à HARPS peut alors se dégager simplement de l'imprécision entre ordres voisins. Il faut pour cela faire la moyenne, pour chaque doublet de raies multiples, des différences d'écarts moyens divisées par la moyenne des écarts moyens.

$$P_{HARPS} = \frac{\sum_{\text{Raies multiples}} \frac{(\langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n} - \langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n+1})}{\frac{(\langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n} + \langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n+1})}{2}}}{N_{\text{raies multiples}}} = 0.4 = 40\% \quad (3)$$

Les écarts de positions des raies proviennent donc en partie non négligeable de HARPS. La part d'erreur qui lui est due est évaluée à environ 40 %, et représente en moyenne une erreur de $2.45 \cdot 10^{-4}$ Angstrom.

$$\frac{\sum_{\text{Raies multiples}} |\Delta x_{\text{ordre } n+1} - \Delta x_{\text{ordre } n}| * w_{\text{moyen}}}{\sum_{\text{Raies multiples}} w_{\text{moyen}}} = 2.45 \cdot 10^{-4} \text{ Angstrom} \quad (4)$$

L'erreur totale moyenne sur les écarts moyens est égale à la moyenne des écarts moyens en valeurs absolues, pondérés par le flux mesuré.

$$\frac{\sum_{\text{Raies multiples}} |\langle \Delta x \rangle| * w_{\text{moyen}}}{\sum_{\text{Raies multiples}} w_{\text{moyen}}} = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{Angstroem} \quad (5)$$

La même étude est ensuite faite pour non plus les raies multiples mais les raies de la fibre A et celles de la fibre B. Dans ce cas, deux raies identiques parcourent des chemins optiques très proches et tombent sur des pixels différents. La figure suivante montre les écarts moyens des raies provenant de la fibre A et de la fibre B simultanément.

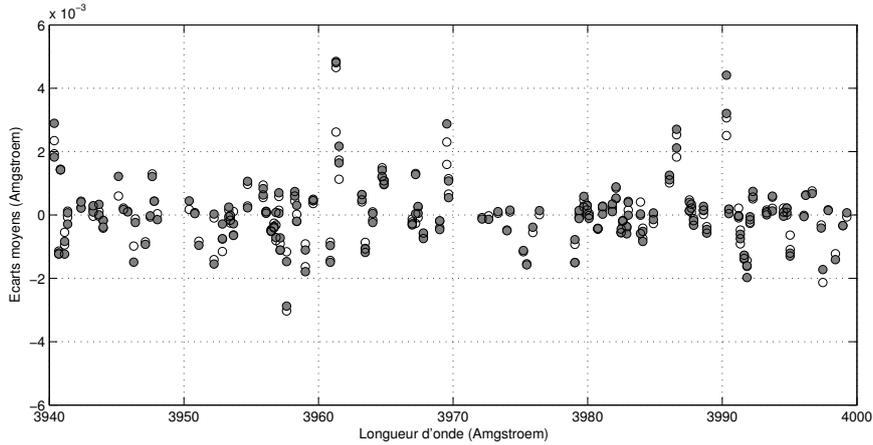


FIG. 16 – *Ecart moyen des raies de la fibre A (blanc) et B (gris).*

Cette figure montre une proximité encore plus marquée entre les écarts moyens. C'est confirmé par le calcul des valeurs suivantes.

Part de l'erreur due à la pixellisation :

$$P_{\text{pixel}} = \frac{\sum_{\text{Raies AB}} \frac{(\langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n} - \langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n+1})}{(\langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n} + \langle \Delta x \rangle^i_{\text{ordre } n+1})}}{N_{\text{raies ABs}}} = 0.23 = 23\% \quad (6)$$

Erreur de pixellisation :

$$\frac{\sum_{\text{Raies } AB} |\Delta x_{\text{ordre } n+1} - \Delta x_{\text{ordre } n}| * w_{\text{moyen}}}{\sum_{\text{Raies } AB} w_{\text{moyen}}} = 9.8 \cdot 10^{-5} \text{Angstroem} \quad (7)$$

Erreur totale :

$$\frac{\sum_{\text{Raies } AB} |\langle \Delta x \rangle| * w_{\text{moyen}}}{\sum_{\text{Raies } AB} w_{\text{moyen}}} = 4.7 \cdot 10^{-4} \text{Angstroem} \quad (8)$$

La part de l'erreur totale due ici à la pixellisation est de 23 %. Cette valeur est très intéressante car beaucoup de d'astrophysiciens étaient persuadé que HARPS serait limité par la pixellisation. Or on se rend compte que la pixellisation ne représente qu'une faible part de l'erreur.

	Fibre A et B	Raies multiples
Erreur totale	$4.7 \cdot 10^{-4} \text{Angstroem}$	$4.8 \cdot 10^{-4} \text{Angstroem}$
Part d'erreur	23 %	40 %
Source d'erreur	Pixels	Pixels+Optique
Erreur partielle	$9.8 \cdot 10^{-5} \text{Angstroem}$	$2.45 \cdot 10^{-4} \text{Angstroem}$

2.3 Conclusions sur l'origine des écarts

Les trois principales conclusions qui se dégagent de cette étude sont :

- La précision est supérieure aux écarts moyens
- Les écarts moyens sont très proches entre raies multiples
- Idem pour les raies provenant des fibres A et B

L'étude de l'origine des écarts a permis de mettre en évidence le fait que le système optique tout comme la pixellisation ne sont pas les principaux responsables. Il est fort probable que le facteur principal d'erreur soit l'imprécision de la solution en longueur d'onde. Pour améliorer les performances de HARPS, mon travail va consister à mettre en place une nouvelle solution en longueur d'onde adaptée à HARPS.

Il sera alors possible de vérifier si effectivement les performances de HARPS en seront améliorées. Si c'est le cas, il sera alors très intéressant de voir si cette nouvelle solution en longueur d'onde du thorium trouvera un domaine d'application plus large que HARPS, et améliorera donc les performances d'autres spectrographes⁴.

La troisième partie est donc consacrée à la correction de la solution en longueur d'onde du thorium.

4. Coralie et Elodie sont deux instruments prédécesseurs, basés sur le même principe mais moins performants que HARPS

Troisième partie

Correction de la solution en longueur d'onde

1 Première modification par pondération

1.1 Marche à suivre

La correction de la solution en longueur d'onde du thorium consiste à remplacer les valeurs des raies par celles corrigées de sorte que la raie corrigée ne donne plus d'écart par rapport au fit. Les écarts moyens sont donc convertis en Amgstroem et retranchés aux longueurs d'ondes de la manière suivante :

$$\lambda_j^{new} = \lambda_j^{old} * (1 + \langle \Delta x \rangle_j * \frac{\Delta v_j / \Delta x_j}{299792}) \quad (9)$$

La solution en longueur d'onde ainsi obtenue a ensuite été intégrée au logiciel de réduction des données de HARPS à la place de celle de l'Atlas. Francesco Pépé a par la suite "rejoué" les nuits de mesures. Ainsi, on espère à partir de mêmes images sources, qu'une calibration différente stabilise mieux le fit et permette une meilleure précision de mesure.

Après récupération des données, et traitement similaire à la première itération décrite dans la partie précédente, voici quelques résultats.

1.2 Observations

La figure 17 montre, à même échelle, les écarts moyens avant et après correction de la solution en longueur d'onde. En gris, les écarts moyens avant correction et en noir après correction. On remarque immédiatement une amélioration générale. Quelques remarques peuvent être faites.

- L'amélioration est générale, bien que moins marquée dans les basses longueurs d'ondes.
- L'amélioration est observable quel que soit le flux de la raie.
- De nombreuses raies non détectées auparavant le sont à présent.
- On observe des variations des écarts moyens de type polynomiales d'ordre 2 ou 3, et ce ordre par ordre. Leur réduction semble faire apparaître les imperfections dues au "fit".

La correction de la solution en longueur d'onde a donc eu pour effet, non seulement de réduire les écarts moyens, mais aussi de faire apparaître de nouvelles raies. Une amélioration globale tend donc à rapprocher le "fit" des raies qui étaient exclues (par la procédure de calibration de HARPS) du fait de leur trop fort écart.

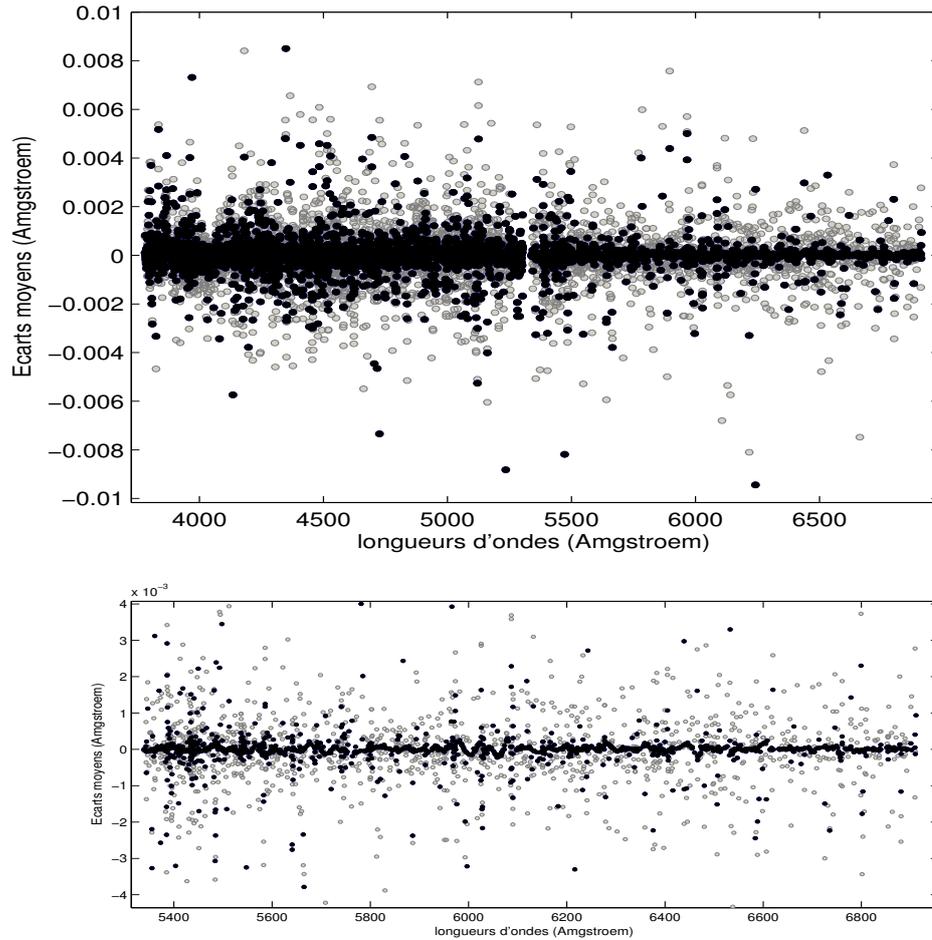


FIG. 17 – *Ecartis moyens avant (gris) et après (noir) correction de la solution en longueur d'onde.*

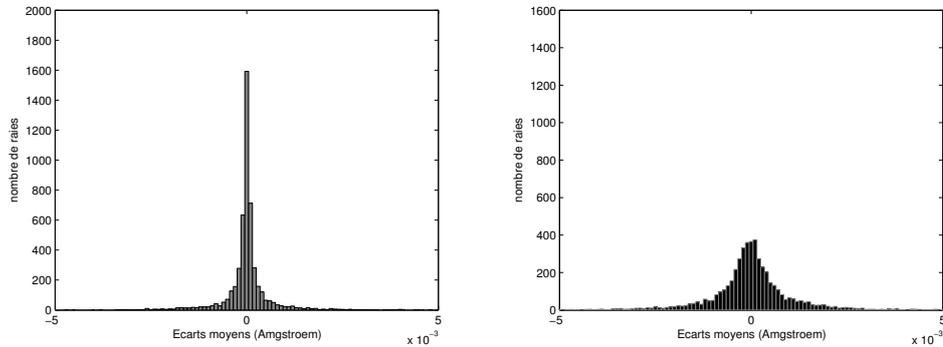


FIG. 18 – *Distribution des écarts moyens avant (droite) et après (gauche) correction de la solution en longueur d'onde, à même échelle*

Les distributions des écarts moyens avant et après correction sur la figure 18 montrent tout d'abord une augmentation de la densité d'écarts moyens proches de 0. Ensuite, un resserrement global de la gaussienne de répartition des écarts. Enfin, des résidus non statistiques persistent encore de part et d'autre de la gaussienne.

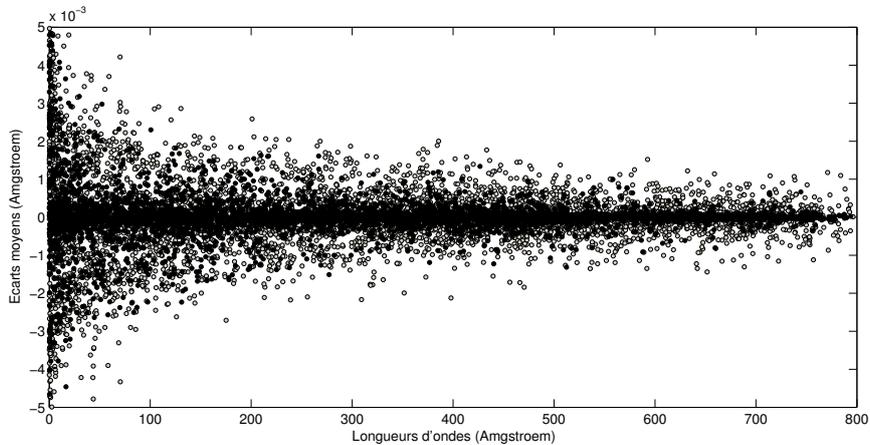


FIG. 19 – *Ecarts moyens en fonction du flux avant (gris) et après (noir) correction*

La figure 19 montre que la dépendance des écarts moyens au flux mesuré est moins marquée après correction de la solution en longueur d'onde.

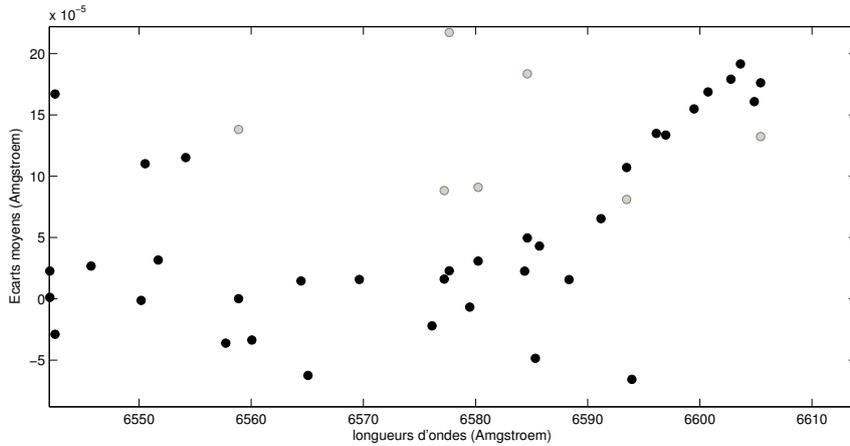


FIG. 20 – *Zoom sur l'ordre 67*

La figure 20 montre un phénomène nouveau qui apparaît avec la correction de la solution en longueur d'onde. Il semble que le comportement des écarts moyens soit conditionné par le fit. Cet effet ne peut être corrigé en modifiant la solution en longueur d'onde. Il faut ici se pencher sur les pondérations des raies dans le fit. En effet, une pondération plus "souple" permettrait de réduire ces effets de divergence du fit en bord d'ordre.

1.3 Conclusion intermédiaire

La méthode de correction de la solution en longueur d'onde du thorium s'avère donc efficace. Cependant, avant de procéder à un travail d'évaluation de l'efficacité de cette correction, il faut porter un intérêt tout particulier sur la répartition de raies exclues jusqu'à présent. Puisque l'amélioration globale tend à réintégrer de nouvelles raies, pourquoi ne pas réintégrer les raies ignorées, puis les corriger comme précédemment pour améliorer encore la stabilité de la solution en longueur d'onde?

2 Réintégration de nouvelles raies

2.1 Observation

Parmi les 3997 longueurs d'onde fournies par l'Atlas, toutes ne sont pas utilisées. Didier Queloz avait, lors de la programmation du logiciel de réduction des données de HARPS, mis en place une procédure d'élimination des raies jugées problématiques. Le critère d'élimination des raies était basé sur le calcul du rapport "écart de la raie sur flux de la raie". En deçà d'une valeur critique la raie était rejetée.

A la suite de la première correction de la solution en longueur d'onde du Thorium, un grand nombre de raies auparavant rejetées sont réapparues. Didier Queloz a alors souhaité que ces raies ignorées soient réintégrées dans le logiciel de réduction sous certaines conditions. Après modification du logiciel de réduction des données de sa part, j'ai donc récupéré toutes les raies sans restriction et procédé à la constitution d'une solution en longueur d'onde corrigée pour une plage de longueurs d'ondes la plus étendue possible.

Le traitement de la totalité des raies pose plusieurs problèmes. Tout d'abord, certaines d'entre elles présentent un poids nul, ce qui interdit la pondération des moyennes. Dès lors, sans pondération, les erreurs trop importantes (mauvaise mesure, bas flux) faussent les calculs d'écarts moyens. On observe des écarts trop importants pour être dûs à de réels écarts de position des raies. Ces écarts trop importants, de l'ordre de 10^{-1} à 10^1 angstrom, sont alors éliminés à partir d'un seuil critique déterminé de la façon suivante.

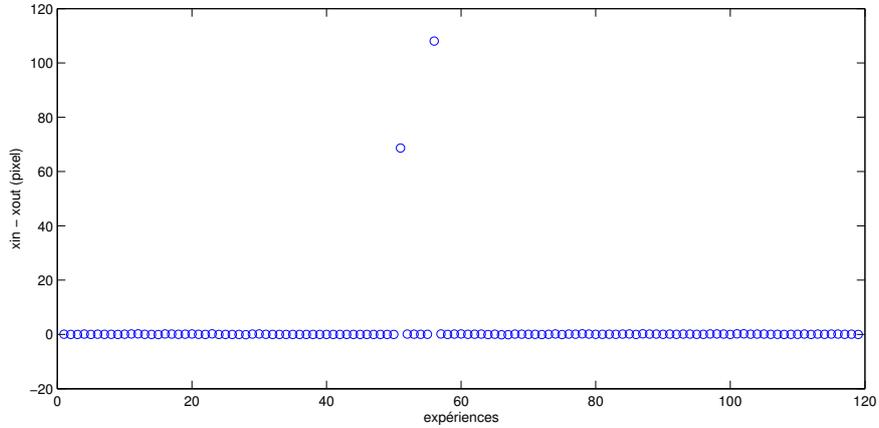


FIG. 21 – *Écarts de la raie 4732 Angstroem. On observe clairement deux points s'écartant sensiblement des autres. Ce sont ces points qui induisent des erreurs dans les moyennes d'écarts.*

La figure 21 illustre les problèmes liés à certaines mesures "pathologiques". Ces aberrations sont principalement dues à des erreurs de mesures pouvant provenir d'une expérience à flux trop faible, mais aussi parfois à des "ghost", ou encore à des cosmiques. Lorsque l'erreur devient trop importante, elle peut tout simplement être due à une erreur de reconnaissance des raies par le logiciel de réduction des données, la plupart du temps provenant de la confusion en deux ordres.

Quoi qu'il en soit, ces raies pathologiques ne représentent qu'une partie infime de l'ensemble des mesures. On en observe environ 2 à 3 par longueur d'onde. Leur suppression ne modifie donc pas sensiblement la précision finale.

Il est à présent important de mettre en place un algorithme de suppression des raies pathologiques cohérent, c'est à dire, qui n'élimine que les raies qui ont une erreur exceptionnelle.

2.2 Élimination des écarts trop importants

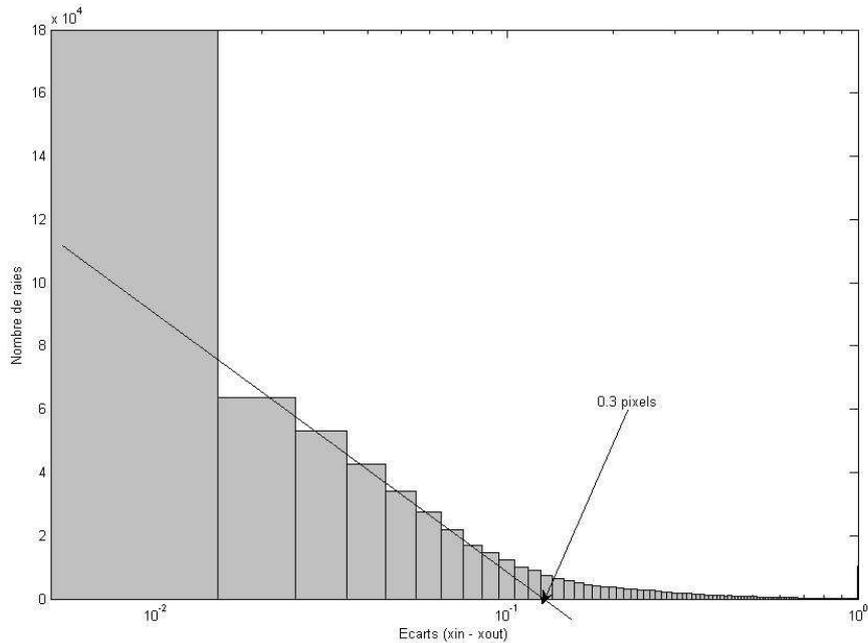


FIG. 22 – *Histogramme des écarts. Au delà de 0.3 pixels, on quitte le régime statistique.*

L’histogramme de la figure 22 illustre la distribution des écarts de position pour la totalité des raies et les 119 dernières mesures. En tout, 600117 écarts y sont représentés. On observe une distribution statistique puis une valeur critique à partir de laquelle on entre dans un autre régime. La valeur retenue est 0.3 pixels. Au delà de cette valeur, les écarts sont artificiellement réduits à 0 pour ne pas être pris en compte. En tout, 333 points sont au delà de cette valeur critique, ce qui représente environ 0.05 % des écarts mesurés. Bien que cette proportion soit très faible, les effets engendrés peuvent être considérables.

Un second critère important est le taux d’apparition d’une raie. ainsi, si une raie a un taux d’apparition de moins 10 %, elle est rejetée. Cela permet de rejeter les raies fantômes (ghost) et les raies apparaissant un nombre de fois trop limité pour que la correction soit pertinente.

2.3 Correction des écarts moyens

Une fois la sélection des raies effectuée, la correction est faite par la méthode des écarts moyens non pondérés. En effet, les nouvelles raies ont un flux artificiellement mis à 0 par le logiciel de réduction des données. Ce paramètre n'étant pas modifiable, cette méthode s'est imposée de par l'impossibilité de pondérer les raies de flux nul. δ est égal à 1 lorsque la raie est détectée, et nul dans le cas contraire.

$$\langle \Delta x \rangle_j = \frac{\sum_{i=1}^{1127} \Delta x_j^i * \delta_j^i}{\sum_{i=1}^{1127} \delta_j^i} \quad (10)$$

La correction de la solution de la solution en longueur d'onde est similaire à celle décrite en C.1.1.

2.4 Résultats

Une fois la solution corrigée, Didier Queloz a rejoué les 119 nuits précédentes. Plusieurs valeurs témoignent des performances de HARPS.

Le RMS est donné en $m.s^{-1}$, il décrit la dispersion des écarts de position des raies pour une mesure. Il passe en moyenne sur l'ensemble des mesures de :

$$RMS : 50 \rightarrow 30 \text{ m.s}^{-1} \quad (11)$$

Le bruit est donné en $m.s^{-1}$, il est calculé par comparaison des écarts entre plusieurs mesures. Pour un flux donné, il passe de :

$$Bruit : 7.5 \rightarrow 5.5 \text{ m.s}^{-1} \quad (12)$$

Ces valeurs confirment l'amélioration des performances de HARPS. Cette amélioration passe par l'amélioration de l'ajustement du "fit", et, par un meilleur "calage" général de la solution en longueur d'onde.

L'amélioration des performances de HARPS se répercute sur la précision de mesures des variations de vitesses des étoiles observées. Cette précision de mesure était de 80 cm.s^{-1} , elle est à présent de 50 cm.s^{-1} .

$$Précision : 80 \rightarrow 50 \text{ cm.s}^{-1} \quad (13)$$

Quatrième partie

Conclusion et perspectives

Le travail effectué durant ce stage a conduit à une amélioration sensible de la précision de HARPS. En réduisant l'incertitude sur les mesures de vitesses radiales d'étoiles de 80cm.s^{-1} à 50 cm.s^{-1} , on espère découvrir de nouveaux types d'exoplanètes, plus proches encore de la Terre.

Outre l'amélioration des performance de HARPS, beaucoup d'informations ressortent de cette étude des écarts moyens.

- L'observation des écarts moyens a par exemple permis de mettre en évidence des effets d'offset au niveau des jonctions entre cellules CCD. Ce problème peut être corrigé et avoir une incidence sur les performances de HARPS.
- L'étude des différences d'écarts moyens entre la fibre A et la fibre B, et, entre les raies multiples a permis d'évaluer avec précision la part d'erreur due à la pixellisation ou au système optique.
- Les distorsions du spectre dues au fit sont à présent observables. Cela aidera sans doute à améliorer le logiciel de réduction des données.
- La validité de la solution en longueur d'onde du thorium corrigée peut être évaluée en l'intégrant à d'autres spectrographes.

Quand à la procédure de correction de la solution en longueur d'onde, plusieurs itérations seront effectuées par la suite pour tenter d'améliorer encore la précision de HARPS. Le code a été transmis à Christophe Lovis qui prévoit de l'intégrer au logiciel de réduction des données pour affiner automatiquement la solution en longueur d'onde au cours des prochaines mesures.

HARPS est aujourd'hui l'instrument de détection d'exoplanètes par excellence. Sa précision reste inégalée mais les capacités de HARPS peuvent encore être optimisées pour repousser ses limites.

Références

- [1] Pépé francesco, Mayor Michel, Delabre Bernard, Kohler Dominique, Lacroix Daniel, Queloz Didier, Udry Stephane, Benz Willy, Bertaux Jean-Loup, Sivan Jean-Pierre. HARPS, a new high-resolution spectrograph for the search of extra-solar planets *Observatoire de Genève*
- [2] Pépé francesco "Performance Verification of HARPS - First Laboratory Results", in *Astronomical Telescopes and Instrumentation 2002: Ground-based Telescopes and Instrumentation*, Proc. SPIE Vol. 4841, (2002, in print).
- [3] HARPS cookbook *Version 1.0*
- [4] Queloz Didier, Mayor Michel. 2001, From CORALIE to HARPS, *The Messenger*, 105, 1-7.
- [5] F. P  p  , M. Mayor , G. Rupprecht, HARPS: ESO's Coming Planet Searcher *Chasing Exoplanets with the LA Silla 3.6-m Telescope*
- [6] Stéphane Udry, Planètes extra-solaires *Observatoire de Genève*
- [7] F. Bouchy, D. Queloz, D. M  gevand, M. Mayor, HARPS: USER MANUAL *Doc. No. 3M6-MAN-HAR-33110-0016, Issue 1.0, 30 Sept 2003*
- [8] K. Shimasaki, Lab8 *Measuring Doppler Shift*